

# Progetti di meteorologia alpina: MAP e MAP D-PHASE

**Silvio Davolio** - Ricercatore presso l'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima, ISAC CNR  
S.Davolio@isac.cnr.it, Società Meteorologica Italiana

1. La catena Alpina vista dal satellite Terra (MODIS), il 13.03.2007 ore 10.10 UTC.



## 1. Introduzione

Lo scopo di questo articolo è di fornire una panoramica su due progetti di ricerca internazionali nel campo della meteorologia alpina, «MAP» e «MAP D-PHASE», evidenziandone rispettivamente gli importanti risultati conseguiti e le rilevanti potenzialità future. Il MAP si è concluso nel 1999 per quanto riguarda la campagna di misure, nel 2005 si è considerata conclusa ufficialmente la fase di ricerca; il MAP D-PHASE è in corso d'opera (tra giugno e novembre 2007 si è svolta l'attività modellistica, che sarà seguita dalle valutazioni dei risultati).

Entrambi i progetti hanno focalizzato l'attenzione sulla catena alpina (Fig. 1) per diverse ragioni. Innanzi tutto essa dispone di una densa rete osservativa, senza eguali in altre regioni mon-

tuose della terra, che facilita la conduzione di campagne di misure. Inoltre, dal punto di vista meteorologico, le Alpi esercitano un'importante influenza non solo locale, ma in generale sull'intero bacino del Mediterraneo. Basti pensare, ad esempio, a fenomeni quali la ciclogenosi orografica che si origina principalmente sul Mar Ligure. Infine le Alpi sono spesso all'origine di fenomeni meteorologici intensi che possono indurre rischi naturali, quali alluvioni e frane conseguenti a forti precipitazioni. Così la regione alpina è stata scelta come prototipo di regione ad orografia complessa e soggetta a fenomeni meteorologici particolarmente pronunciati e di forte impatto sull'assetto del territorio e delle attività umane, ovvero come area campione per lo studio di una fenomenologia che è comunque comune a molte regioni ad orografia pronunciata. Al MAP (*Mesoscale Alpine Programme*) è già stato dedicato nel 2000 un esauriente articolo di Claudio Cassardo sul numero 17/18 di Nimbus, che consigliamo vivamente di leggere e a cui rimandiamo per i dettagli del progetto. In questa sede si vuole rivolgere l'attenzione principalmente ai risultati che, a seguito della campagna di misure del 1999, sono stati pubblicati sulle riviste internazionali dedicate alla fisica dell'atmosfera e alla meteorologia.

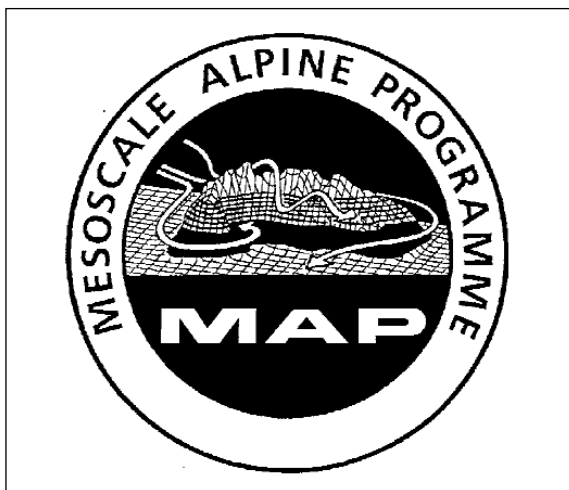
Il MAP D-PHASE (*Demonstration of Probabilistic Hydrological and Atmospheric Simulation of flood Events in the Alpine region*) ha invece preso forma nel 2004,

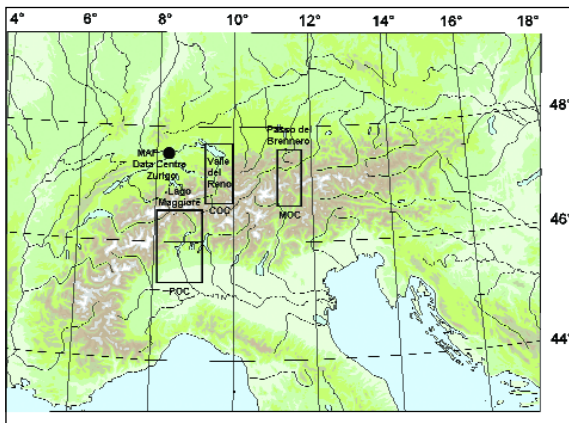
quando il comitato scientifico del MAP ha iniziato ad esplorare la possibilità di organizzarne una logica continuazione, sviluppando un progetto dimostrativo riguardo alle potenzialità previsionali della moderna modellistica meteorologica e idrologica. Tale progetto non è rimasto solo sulla carta visto che, dopo un lungo periodo preparatorio, siamo nel pieno della fase operativa che si è conclusa a fine novembre 2007.

## 2. Il progetto MAP: scopo ed organizzazione

Il progetto MAP (Fig. 2) ha avuto ufficialmente inizio nel lontano 1994 allo scopo di comprendere e modellare i processi fisici che stanno alla base dei fenomeni meteorologici intensi indotti dall'orografia e per affinare gli strumenti che concorrono a formulare le previsioni a breve termine. Particolare attenzione è stata rivolta ai fenomeni meteorologici a mesoscala (cioè su scale spaziali comprese tra le centinaia di chilometri e il chilometro) associati a precipitazioni intense che sono all'origine delle alluvioni. Il MAP è stato caratterizzato da tre fasi successive. Prima una fase di sviluppo (1995÷1999) consistente nella preparazione dei piani del progetto e in studi preliminari sia di climatologia che di eventi meteorologici intensi in area alpina. Successivamente è venuta la fase sperimentale, con la campagna di misure meteorologiche ed idrologiche svoltasi nell'autunno del 1999, detta SOP (*Special Observing Period*). Durante il SOP, che ha rappresentato una campagna osservativa senza precedenti nella regione, è stata impiegata la più avanzata strumentazione disponibile nei settori della meteorologia e dell'idrologia affiancata alle tradizionali reti di misura. Infine, negli anni successivi, si è avuta la fase di analisi, terminata ufficialmente nel 2005, anche se in realtà vengono tuttora pubblicati risultati inerenti al progetto. Il MAP, patrocinato dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO), ha visto la partecipazione di ben 13 paesi. Oltre all'Italia (che ha partecipato grazie al Progetto Strategico «MAP-SOP» del CNR) ne hanno fatto parte Francia, Svizzera, Germania, Austria, Slovenia, Croazia, Stati Uniti, Canada, Nuova Zelanda, Regno Unito, Grecia e Slovac-

2. Logo del progetto MAP





3. Area di interesse del progetto e dislocazione delle target area e dei centri di controllo

chia. Ha costituito quindi uno sforzo internazionale ed interdisciplinare volto a migliorare le conoscenze di base e le capacità predittive dei processi fisici e dinamici che governano la precipitazione su topografia complessa e che determinano le circolazioni atmosferiche tridimensionali in prossimità di catene montuose estese.

Nel dettaglio, ecco gli obiettivi scientifici del MAP:

1. Migliorare la comprensione degli eventi di precipitazione influenzati dall'orografia e degli episodi alluvionali ad essi associati che coinvolgono la conve-

zione profonda, la precipitazione frontale, i deflussi al suolo.

2. Migliorare la previsione numerica dei processi umidi sopra e in prossimità di orografia complessa, includendo l'interazione con i processi alla superficie terrestre.

3. Migliorare la conoscenza e la previsione del ciclo di vita del föhn e dei fenomeni associati all'interazione dei flussi atmosferici con l'orografia, includendo la loro struttura tridimensionale e i processi nello strato limite planetario.

4. Migliorare la conoscenza del fenomeno di rottura delle onde di gravità tridimensionali e del «wave drag» ad esso associato, al fine di perfezionarne la descrizione (parametrizzazione) all'interno dei modelli numerici meteorologici e climatici.

5. Fornire un database per la validazione ed il miglioramento dei modelli numerici meteorologici ad alta risoluzione, dei modelli idrologici e dei modelli accoppiati (meteo-idro) applicati ad aree montuose.

Per raggiungere questi obiettivi, durante la campagna di misure SOP sono stati organizzati otto sottoprogetti scientifici, in gran parte dettati dagli interessi dei gruppi di ricerca partecipanti,

ognuno focalizzato su un tema differente:

P1: meccanismi di precipitazione orografica

P2: anomalie di vorticità potenziale (PV) nell'alta troposfera

P3: misure idrologiche per la previsione delle alluvioni

P4: dinamica del flusso in un intervallo (gap) di una catena montuosa («gap flow»)

P5: aspetti non stazionari del föhn in una valle larga

P6: rottura delle onde di gravità tridimensionali

P7: bande di vorticità potenziale (PV banner)

P8: struttura dello strato limite planetario in orografia complessa

Come si può vedere, il MAP si è interessato a una vasta gamma di fenomeni, che in estrema sintesi potrebbero essere divisi in «umidi» (*Wet-MAP*: P1, P2, P3) e «secchi» (*Dry-MAP*: P4, P5, P6, P7, P8), ma che sono comunque strettamente collegati tra loro (si pensi agli eventi di intense precipitazione sul versante sud delle Alpi, a cui si associa spesso intenso föhn sul versante opposto).

La fase saliente del progetto MAP è stata quella del SOP nell'autunno del 1999, precisamente nei tre mesi di settembre, ottobre e novembre. Presso i tre centri operativi (Fig. 3), uno a Innsbruck (MOC, *Mission Operation Centre*), uno a Milano Linate (POC, *Precipitation Operation Centre*) e uno a Bad Ragaz (COC, *Co-operation Centre*), si sono alternati previsori e ricercatori da ogni parte del mondo, i quali pianificavano la campagna di misure e coordinavano i voli di ben nove aerei attrezzati per missioni scientifiche: il Falcon 20-E5 tedesco per voli ad alta quota, due aerei americani (NCAR Electra e NOAA P3) ed uno inglese (UK C-130) per voli a quote medie, quattro aerei per voli a bassa quota tra cui due velivoli francesi (Fokker 27 e Merlin IV). Strumentazione avanzata era dislocata nella regione alpina: 3 radar doppler statunitensi (S-Pol e due DOW Doppler-On-Weel) ed uno francese (Ronsard) che coprivano l'area del Lago Maggiore (una delle target area del progetto), affiancando il radar svizzero di Monte Lema e gli altri radar installati nel nord Italia: sodar, RASS, lidar doppler operanti sia nel visibile che nell'infrarosso, profilatori di vento e un numero aggiuntivo di stazioni di misura convenzionali e di radiosondaggio. Infine, i dati satellitari del Meteosat-6 ad alta frequenza (ogni 5 minuti) e le previsioni effettuate con diversi modelli meteorologici di ultima generazione, completavano il quadro sperimentale. Nei tre mesi della campagna di misure, ogni volta che la situazione si prospettava interessante dal

## ALCUNE DEFINIZIONI

### Temperatura potenziale

Viene definita come la temperatura che una massa d'aria avrebbe se venisse portata adiabaticamente ad un livello di pressione di riferimento pari a 1000 hPa. La temperatura potenziale ( $\theta$ ) permette quindi di confrontare la temperatura (e la densità) di masse d'aria poste a quote diverse in quanto, portandole tutte ad un uguale livello di riferimento, elimina la differenza di temperatura legata alla quota a cui si trovano. Attraverso il gradiente verticale di  $\theta$  si determina la stabilità dell'atmosfera. Risulta stabile se  $\theta$  aumenta con la quota, poiché l'aria potenzialmente più calda e leggera si trova sopra. Inoltre è una grandezza che si conserva per moti adiabatici ed è perciò costante lungo la linea discesa del föhn.

### Gap e gap flow

Si definisce gap un intervallo della catena montuosa che spesso è associato con variazioni del livello del suolo. Esempio tipico è un passo. Un gap limita il flusso ed il termine gap flow denota il passaggio dell'aria attraverso la struzzatura. Il gap flow si origina quando la massa d'aria a monte non raggiunge un'altezza sufficiente per scavalcare l'intera barriera orografica (come nel caso del föhn) ma riesce solo a raggiungere le aperture (gap) poste a quote inferiori, da cui si riversa nel versante opposto.

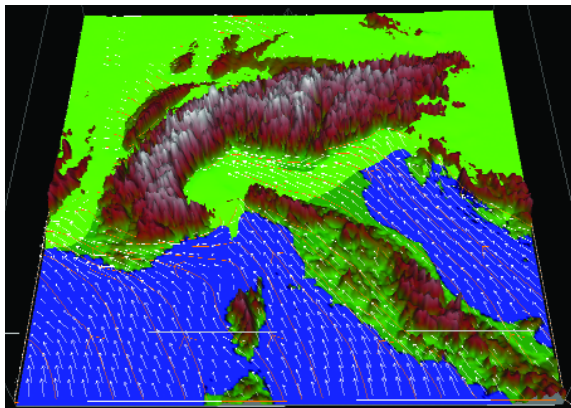
### Riming e coalescenza

Il riming è un processo microfisico assai importante nella formazione della precipitazione. È il meccanismo attraverso il quale gocce d'acqua soprassatura (ovvero allo stato liquido benché a temperatura inferiore allo zero) che si formano durante il moto ascendente si attaccano a particelle precipitanti allo stato solido. Quando ci si trova a temperature superiori allo zero, l'urto avviene tra gocce d'acqua in quanto non sono presenti cristalli di ghiaccio. In tal caso si parla di coalescenza. Questi due meccanismi sono di fondamentale importanza nella modulazione della precipitazione orografica: attraverso riming e coalescenza si formano rapidamente idrometeore sufficientemente pesanti per precipitare sul versante sopravvento anziché venir trasportate verso la cresta della barriera orografica.

### Vorticità potenziale (PV) e PV banner

La vorticità potenziale viene definita come il rapporto tra vorticità assoluta e stabilità della massa d'aria. La PV assume valori elevati in stratosfera, quindi può essere utilizzata per definire la tropopausa e per individuare intrusioni di aria stratosferica in troposfera.

Con il termine PV banner si indicano le strutture a forma di bandiera presenti nelle sezioni trasversali dei campi di PV che si estendono sottovento alle Alpi a partire dalla loro sommità per centinaia di chilometri (Nimbus 17-18, 2000).



4. Durante gli eventi di precipitazione intensa che interessano il nord Italia e l'area alpina, si osserva nei bassi strati un vento di barriera generato dalla deviazione del flusso meridionale proveniente dall'Adriatico per effetto dell'orografia alpina. Tale flusso si sovrappone ed interagisce con quello proveniente dal Mar Tirreno. In figura, oltre al vento ai bassi strati è evidenziata in verde anche la massa d'aria fredda che stazionava in Pianura Padana nell'evento di precipitazione nevosa del gennaio 2006.

punto di vista meteorologico per aspetti inerenti uno o più sottoprogetti (e a tale scopo i previsori, con l'ausilio dalla modellistica previsionale, erano fondamentali), venivano lanciate delle IOP (*Intense Observing Period*), vere e proprie fasi sperimentali durante le quali si effettuavano le misurazioni con gli aerei (utilizzando l'appropriato velivolo a seconda del fenomeno e della quota di volo) e si intensificavano le misure da terra.

La campagna di misure che ha visto un totale di 17 IOPs si è concentrata principalmente su tre regioni di interesse dette target area, ritenute rappresentative di una classe di fenomeni meteorologici studiati dal progetto. In tali aree era concentrata la strumentazione. Si tratta della zona del Lago Maggiore e del Bacino del Toce per quanto riguarda la precipitazione orografica e l'idrologia, del Passo del Brennero e della Wipptal per il *gap flow*, della Valle del Reno per lo studio del föhn e dello strato limite planetario.

### 3. I risultati del MAP

Claudio Cassardo, nel concludere il precedente articolo sul MAP scriveva: «Al momento della stesura di questo articolo, il periodo di osservazioni della campagna si sta concludendo ed è quindi ancora prematuro parlare dei risultati. La sensazione personale di chi scrive è di un generale successo. Probabilmente le misure effettuate in questa occasione costituiranno la base per le ricerche nel campo della meteorologia durante i prossimi anni». Ora, a diversi anni di distanza, non possiamo che confermare quelle parole. Infatti, nell'autunno del 1999 si è avuta una sequenza di situazioni meteorologiche interessanti e variegata, con frequenza anche maggiore della media climatologica, che ha contribuito alla buona riuscita della campagna sperimentale (alcune risorse strumentali sono state impiegate fino all'esaurimento) e ha permesso, soprattutto per quanto riguarda lo studio della precipitazione orografica e del föhn, di osservarne nuovi e interessanti aspetti e ottenere

quindi importanti risultati scientifici, pubblicati negli anni successivi. Per quantificare il successo del progetto MAP basta contare il numero di pubblicazioni su riviste scientifiche internazionali: 23 nel 2000, 25 nel 2001, 20 nel 2002, 57 nel 2003, 43 nel 2004, 19 nel 2005, 25 nel 2006, fino ad arrivare alla recente uscita nel 2007 di un numero speciale della prestigiosa rivista inglese *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, interamente dedicato ad una rassegna dei principali risultati del progetto. Diversi convegni internazionali sono stati dedicati o hanno ospitato presentazioni dei risultati inerenti il MAP. Gli studi legati al MAP sono stati tra gli argomenti prominenti nei programmi delle conferenze di «*Mountain Meteorology*» della *American Meteorological Society*. Non è inoltre trascurabile il fatto che il progetto MAP abbia permesso di creare forti legami tra osservazioni e simulazioni, quindi tra il laboratorio naturale e quello numerico, nonché rafforzare la cooperazione tra meteorologi ed idrologi. Senza la pretesa di entrare nei dettagli, proviamo di seguito a descrivere i risultati più rilevanti nei diversi campi di interesse del MAP.

### 3a. Meccanismi di precipitazione orografica

Lo studio della precipitazione orografica era uno dei principali scopi del progetto MAP. La simultanea e coordinata azione dei radar da terra in modalità doppler e polarizzata e dei radar a bordo degli aerei ha permesso di ottenere informazioni molto dettagliate dei sistemi precipitanti, oltre alle proprietà delle idrometeore e alla direzione ed intensità del vento. Senza dubbio, questo è il campo che ha visto i risultati più rilevanti, sia dal punto di vista della comprensione dei fenomeni che della modellistica, grazie anche al fatto che l'autunno 1999 è stato caratterizzato, nella regione alpina, da numerosi eventi precipitativi con caratteristiche diverse.

Già prima dell'inizio della campagna di misure, erano noti alcuni precursori degli eventi di precipitazione intensa caratterizzati il versante meridionale della catena alpina (es: alluvione Piemonte 1994): la presenza a scala sinottica di una profonda saccatura sul Mediterraneo occidentale, allungata in direzione nord-sud, associata ad un'anomalia o streamer della vorticità potenziale in alta troposfera sviluppata dal vortice circumpolare. A tale saccatura è normalmente associato un fronte freddo in lento spostamento verso est, preceduto da una corrente a getto nei bassi strati che convoglia aria umida (complice anche

il mare relativamente caldo) e condizionatamente stabile da sud verso le Alpi.

L'intensità e la localizzazione della precipitazione viene modulata dalle caratteristiche, o regimi, del flusso nei bassi strati che raggiunge la barriera alpina, il quale può essere bloccato dall'orografia, e quindi verrà ritardato e tenderà a deviare attorno all'ostacolo («*flow around*») oppure, nel caso opposto, sarà in grado di scavalcare l'ostacolo («*flow over*»). Da un punto di vista dinamico, l'instaurarsi dell'uno o dell'altro di questi due regimi di flusso dipende da un parametro, detto numero di Froude, definito come il rapporto tra la velocità del vento incidente (U) e il prodotto dell'altezza della montagna (h) per la stabilità della massa d'aria (N = frequenza di Brunt-Vaisala):

$$Fr = U / (N * h)$$

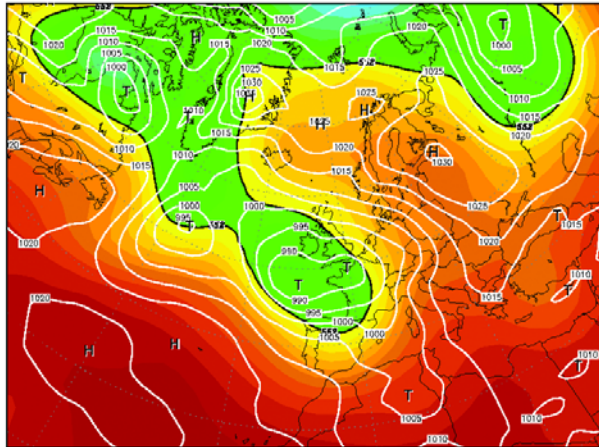
Per valori del numero di Froude molto piccoli (quindi venti deboli, montagne elevate e aria stabile) il flusso incidente non sarà in grado di superare la barriera, mentre nel caso contrario passerà al di sopra. È importante notare che la stabilità della massa d'aria che giunge sull'orografia è fortemente influenzata dall'eventuale condensazione e conseguente rilascio di calore latente, che può modificarne la stratificazione effettiva. Il calore rilasciato dalla condensazione (così come l'evaporazione delle goccioline) diminuisce infatti la stabilità di uno strato saturo e favorisce quindi il *flow over* a scapito del *flow around*.

In generale, se la massa d'aria viene bloccata dall'orografia, le precipitazioni non risultano particolarmente intense. Infatti, mentre la porzione di aria ai livelli superiori è in grado di superare le Alpi, viene a mancare l'apporto alla precipitazione derivante dall'ascesa dell'aria umida presente inizialmente ai bassi livelli. Sui rilievi si registrano così solo precipitazioni di debole o moderata intensità, mentre altre precipitazioni, anche consistenti, possono essere localizzate sopravvento alla montagna, dove si manifesta la convergenza associata al rallentamento del flusso diretto verso l'orografia stessa. Questo può avvenire sulla pianura adiacente, ad una certa distanza dai piedi delle montagne, nonché, in particolari condizioni, sul Mar Ligure e sull'Alto Adriatico. Se la massa d'aria scavalca l'orografia, le forti velocità verticali concentrano la pioggia sui primi rilievi (nel caso specifico sulle Prealpi) e il rilascio dell'instabilità potenziale assieme all'elevato contenuto di vapore acqueo, favoriscono l'accumulo di quantità di precipitazione talvolta notevoli, qualora si verificano una serie di condizioni favorevoli. Tra queste vi sono an-

**17+20 Settembre 1999 e 19+21 Ottobre 1999: IOP2b e IOP8**

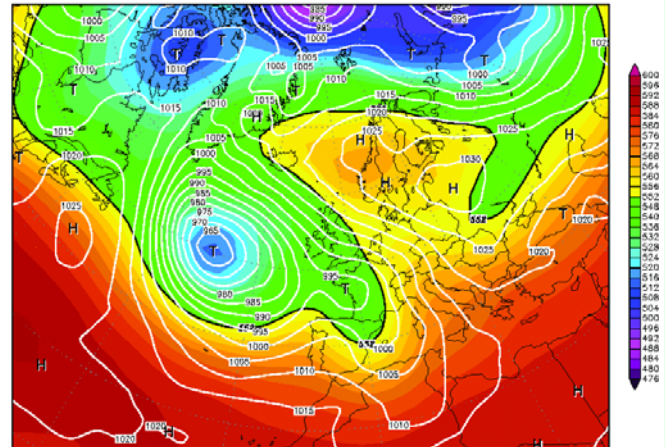
Le due IOPs (*Intense Observation Period*) 2b e 8 sono sicuramente state le più studiate dell'intero periodo della campagna MAP-SOP. Pur presentando entrambe i tipici precursori degli eventi di precipitazione intensa e seppur caratterizzate da intensi flussi umidi da sud hanno avuto evoluzioni assai differenti (FIG. A e B). Durante la campagna, basandosi sulle uscite dei modelli, i previsori emisero l'allerta per precipitazioni intense sulla target area del Lago Maggiore per entrambi gli eventi. Pioggia forte si registrò nella IOP2b, ma durante l'IOP 8 ci fu solo debole precipitazione (FIG. C e D). Vediamo nel dettaglio i due episodi per capire cosa non andò nelle previsioni.

20SEP1999 00Z  
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP  
(C) Wetterzentrale  
www.wetterzentrale.de

21OCT1999 00Z  
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



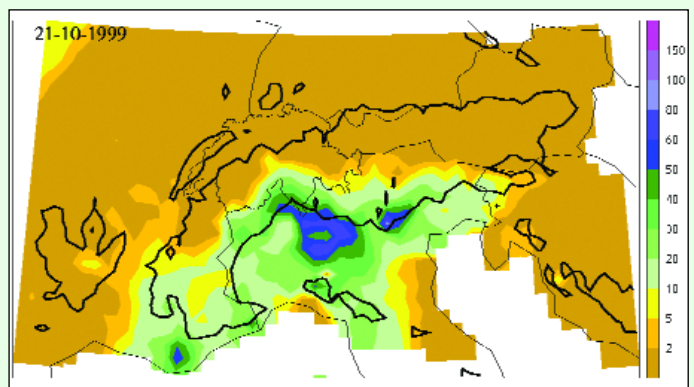
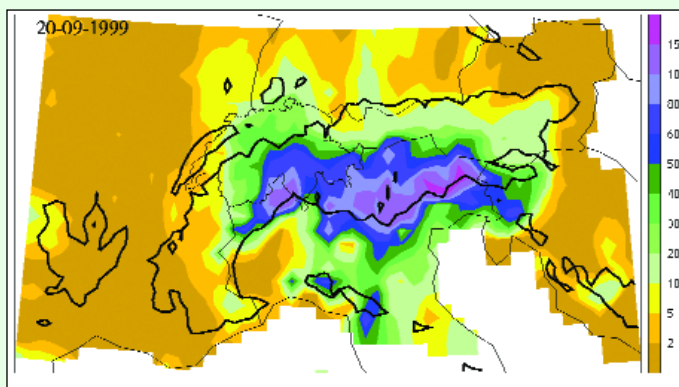
Daten: Reanalysis des NCEP  
(C) Wetterzentrale  
www.wetterzentrale.de

A e B. Il geopotenziale a 500 hPa e la pressione alla superficie mostrano che entrambi gli episodi delle IOP2b e IOP8 presentano le caratteristiche tipiche degli eventi di intense precipitazioni sulle Alpi. Solo nel primo caso la previsione è stata rispettata.

La IOP2 è in realtà composta da due episodi distinti come caratteristiche ma strettamente legati temporalmente. Nella giornata del 17 settembre 1999 (IOP2a), si assiste al passaggio di una *squall line* pre-frontale sulla zona del Lago Maggiore, formatasi a causa del flusso instabile localizzato dinanzi alla saccatura in moto dall'Europa occidentale verso il Mediterraneo. Precipitazioni localizzate ma piuttosto intense, fino a 70 mm, si registrano sui rilievi a nord ovest del Lago Maggiore.

Dalla giornata successiva (IOP2b) la saccatura, pilotata da un'area depressionaria situata sull'Europa occidentale, si avvicina rapidamente alle Alpi, richiamando aria dal nord Africa. Si genera una corrente a getto da sud ai bassi livelli che trasporta aria umida e condizionatamente stabile dal Mar Tirreno, la quale in prossimità della catena alpina si sovrappone al flusso proveniente dal Mar Adriatico che percorre la Pianura Padana da est a ovest (situazione analoga mostrata anche in FIG. 4). Le due correnti convergono nella zona del Lago Maggiore. Il nord Italia è interessato dal rapido passaggio di un sistema frontale associato a moderata attività convettiva e la regione del Lago Maggiore è soggetta a precipitazioni intense. In generale la situazione appare molto simile a quella caratterizzante il precedente evento alluvionale del Piemonte di novembre 1994. La precipitazione stratiforme inizia il 19 settembre, associata a flussi da sud al suolo, tendenti a ruotare da sud ovest in quota. Le condizioni sono tali da permettere alle masse d'aria debolmente instabile di scavalcare l'orografia (regime di *flow over*) producendo quindi precipitazione orografica sempre più intensa a cui si aggiunge il contributo di diverse celle convettive. Alla fine si avranno picchi superiori ai 200 mm in 24 ore. In totale, 240 mm a Intragna, 170 mm a Locarno-Monti

La IOP8 copre il periodo dal 19 al 21 ottobre 1999. Le previsioni del modello del ECMWF e quelle dei modelli ad area limitata confermano avvicinandosi all'evento, una situazione favorevole allo sviluppo di intense precipitazioni nell'area del Lago Maggiore, con un flusso in quota generalmente da sud o sud ovest, pilotato da un'area depressionaria sull'Europa occidentale. In realtà le previsioni non vengono confermate dai fatti. Al suolo si registra un flusso freddo e stabile che entra da nord est e segue la barriera alpina muovendosi sulla Pianura Padana fino ad uscire verso il golfo di Genova attraverso i passi tra le Alpi Marittime e l'Appennino ligure. Sul Mar Ligure si registrano temporali. Lungo le valli alpine della zona del Lago Maggiore i radar doppler individuano flussi discendenti nei bassi strati, sopra ai quali scorrono correnti da sud. Sul lago Maggiore si registrano solo deboli precipitazioni stratiformi, mentre moderata attività convettiva si osserva lungo il Po. La pioggia comunque raggiunge i 100 mm solo in alcune stazioni.



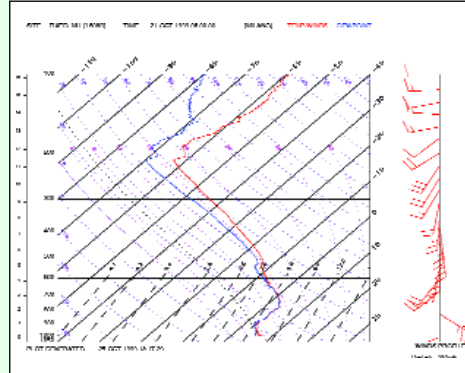
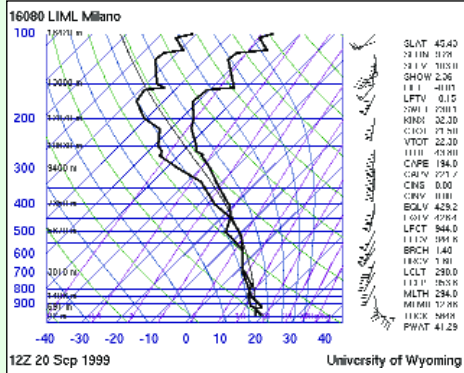
C e D. Le analisi di precipitazione accumulata in 24 ore nelle giornate del 20 Settembre (IOP2b) e 21 Ottobre 1999 (IOP8) evidenziano la profonda differenza tra i due casi in esame.

(continua)

A cosa è dovuta la profonda differenza fra i due eventi che sembravano, stando alle previsioni, molto simili tra loro? Questa è la domanda che diversi ricercatori si sono posti e a cui hanno dato risposta attraverso numerosi studi, sia basati su simulazioni modellistiche che su analisi dei dati osservativi, i quali hanno mostrato che a fronte di una situazione sinottica molto simile, la IOP2 e la IOP8 presentano profonde differenze nei profili termodinamici (FIG. E e F). Nel primo caso la massa d'aria che giunge contro la barriera orografica risulta essere debolmente instabile e si sovrappone al flusso da est più stabile proveniente dall'Adriatico. Entrambi i flussi sono in grado di scavalcare le Alpi (come successe per l'alluvione del Piemonte del 1994) generando persistenti ed intense precipitazioni sui monti attorno al Lago Maggiore. Nel secondo caso, sulla Pianura Padana è presente una massa d'aria fredda generata in seguito ai flussi freddi da nord est dei giorni precedenti ed evidenziata dallo strato di inversione termica nel radiosondaggio. Tale massa non è in grado di superare le Alpi e scorre lungo la Pianura appoggiandosi alla barriera alpina, fino a trovare un varco verso il Mar Ligure. La convezione che si produce sul mare, generata dall'arrivo dell'aria fredda, sottrae umidità ai flussi da sud che scavalcano le Alpi, riducendone la potenzialità in termini di precipitazione.

Questi due eventi dimostrano come con condizioni sinottiche molto simili, la differenza alla mesoscala nella modifica dei flussi dovuta all'orografia risulta essere il fattore determinante nella modulazione dell'intensità e localizzazione delle piogge.

E e F: Il radiosondaggio a Linate alle 12 UTC del 20 settembre (IOP2b) evidenzia un'atmosfera praticamente satura e neutrale sino a 400 hPa. Al contrario, il profilo alle 06 UTC del 21 ottobre (IOP8) indica una forte stabilità della massa d'aria presente sulla pianura.

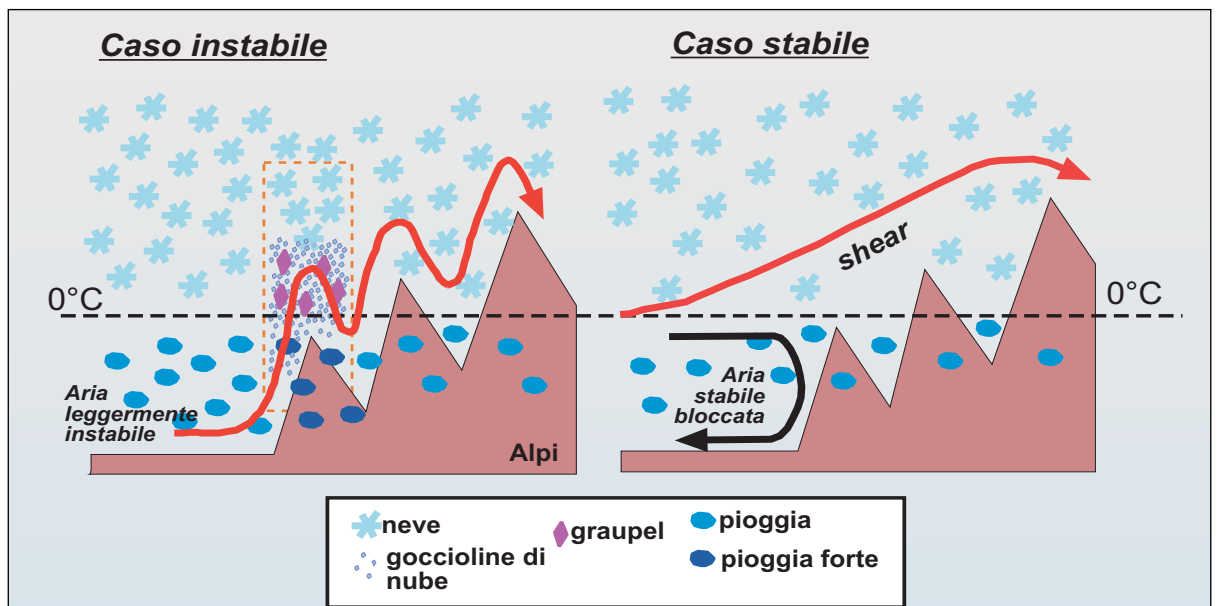


che fattori a scala più piccola (mesoscala) che accompagnano gli eventi di precipitazione intensa, quali la presenza di un jet pre-frontale ai bassi livelli che intensifica la convergenza di aria umida e l'effetto di barriera delle Alpi che, deviando verso ovest il vento proveniente dall'Adriatico, generano una zona di convergenza sulle Alpi Occidentali (Fig. 4). L'esperienza del MAP ha mostrato come eventi che si annunciano essere apparentemente simili ai casi alluvionali del Piemonte, si siano talvolta rivelati profondamente diversi, proprio a causa del differente regime di flusso rispetto all'orografia. Tra questi spiccano la IOP 2b e la IOP 8 (si veda riquadro), dettagliatamente studiate sotto molti punti di vista e che rappresentano i

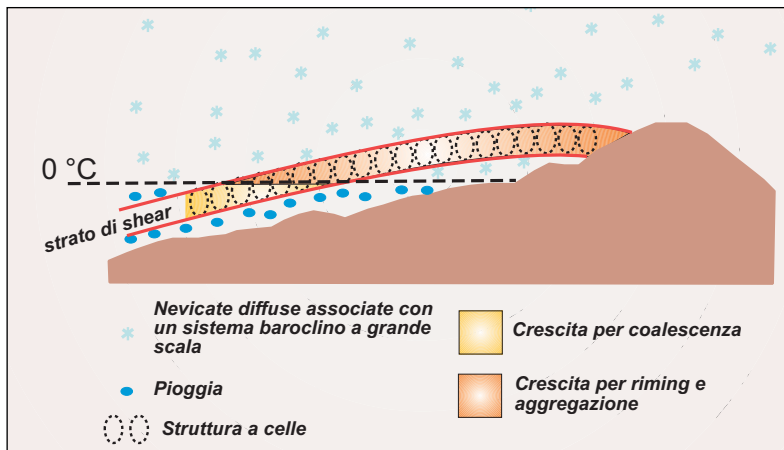
prototipi delle due condizioni di flusso descritte sopra. L'evento precipitativo della IOP 2b (19-21 settembre 1999) per molti aspetti ricorda gli eventi alluvionali delle Alpi Occidentali, ma a differenza di questi ultimi, il sistema si è spostato più rapidamente verso est interessando tutto il versante meridionale delle Alpi ma limitando gli accumuli al suolo a valori, comunque notevoli, superiori ai 200 mm in 24 ore. La tipica confluenza dei flussi meridionali di aria calda e umida verso le Alpi ha prodotto la risalita e lo scavalcamento del massiccio da parte della massa d'aria, con conseguenti precipitazioni intense. Nel caso della IOP8 (19-21 ottobre 1999), pur essendo osservati i precursori a larga scala descritti in precedenza, la presenza di una massa d'a-

ria fredda e stabile in Pianura Padana, affluita da est nei giorni precedenti, ha impedito al flusso di passare sopra alla catena alpina. Si è sostanzialmente formato un vento di barriera che dalla costa adriatica ha seguito verso ovest il margine delle Alpi per poi fluire verso sud tra le Alpi Marittime e gli Appennini. Lungo le valli alpine si è osservato un flusso discendente nei bassi strati, opposto al flusso meridionale alle quote superiori, che ha prodotto convergenza lungo la valle del Po dove si è sviluppata precipitazione da nuvolosità stratiforme. Studi successivi alla campagna di misura del MAP, in particolare quelli basati sull'elaborazione dei dati radar raccolti, oltre a mettere in luce e confermare questi aspetti dinamici, hanno

5. Modelli concettuali del flusso e della microfisica durante la precipitazione orografica. Nel caso instabile (a sinistra) l'intera massa d'aria scavalca la montagna, nel caso stabile (destra) il flusso nei bassi strati è bloccato (da Rotunno & Houze, 2007, Quart. J. Roy. Met. Soc)



6. Modello concettuale dei meccanismi dinamici e microfisici responsabili dell'accrescimento della precipitazione in presenza di uno strato stabile bloccato dall'orografia (da Rotunno & Houze, 2007, Quart. J. Roy. Met. Soc.).



identificato degli importanti meccanismi microfisici in grado di accrescere l'efficienza di precipitazione favorendo maggiori accumuli al suolo. Pure in questo caso si distingue fra le due condizioni dinamiche di *flow over* e *around* (Fig. 5). Quando aria umida caratterizzata da debole instabilità o instabilità condizionale, spinta da forti correnti contro la barriera alpina, si solleva per superarla, la precipitazione è concentrata sui primi picchi orografici del versante meridionale. La condensazione dovuta al sollevamento e la formazione di celle convettive sviluppatasi a seguito del rilascio dell'instabilità producono zone ristrette ad alta concentrazione di gocce d'acqua in corrispondenza dei picchi più ripidi del terreno. Queste gocce di nube si vanno ad aggregare alla precipitazione già presente attraverso il processo di *riming*, con formazione di graupel, negli strati al di sopra dell'isoterma di 0°C, o di coalescenza al di sotto di tale quota. Il maggiore peso delle particelle precipitanti ne accelera la caduta e quindi la pioggia si concentra sui primi pendii del versante sopravvento. In assenza di questi fenomeni microfisici di accrescimento delle gocce di precipitazione, le gocce stesse sarebbero trasportate dalle correnti più a nord e la precipitazione non si concentrerebbe in corrispondenza delle prime alture. Nel caso di flusso bloccato si generano due strati separati da un forte gradiente di vento (*shear*): ai bassi livelli il flusso è rallentato o addirittura si inverte in prossimità delle Alpi, favorito dalla discesa di aria stabile dalle valli verso la pianura; al di sopra, il flusso a larga scala è in grado di scavalcare la catena alpina, generare condensazione e quindi precipitazioni, seppur non di particolare intensità. A causa del forte shear che separa i due strati, si vengono a formare delle strutture a celle, analoghe a celle convettive di modeste dimensioni, dovute a turbolenza di tipo meccanico (Fig. 6). Esse sono responsabili di un incremen-

to dell'efficienza di precipitazione. Infatti, nel momento in cui la precipitazione orografica a larga scala presente passa attraverso questo strato caratterizzato da moti convettivi, vengono fortemente favoriti processi di aggregazione (*riming* e coalescenza) tra le gocce o i cristalli precipitanti e le idrometeorie presenti, concentrate in aree ristrette dalle correnti ascendenti dette di *up-draught*. Le particelle precipitanti così accresciute cadono più rapidamente producendo una maggiore intensità di pioggia di quanto non sarebbe possibile in assenza del moto cellulare.

Riassumendo, zone caratterizzate da moti verticali strutturati in celle nel versante sopravvento si possono avere sia nel caso in cui il flusso risulti bloccato che nel caso in cui superi la catena alpina. Nel primo caso esse sono conseguenza dello shear di vento e quindi hanno un'origine meccanica. Nel secondo caso si generano per convezione, quindi hanno un'origine termodinamica. In entrambi i casi la cellularità è in grado di favorire la rapida crescita della precipitazione, aumentandone l'intensità.

### 3b. Modellistica meteorologica per la previsione delle precipitazioni

Strettamente legato al tema della precipitazione in area ad orografia complessa, come la regione alpina, vi è quello della sua previsione, quindi dei modelli numerici meteorologici. In generale, la previsione della precipitazione in area montuosa è un compito assai difficile in quanto entrano in gioco molti processi che vanno dalla scala sinottica alla mesoscala, includendo processi nello strato limite planetario e processi microfisici, i quali interagiscono tra di loro. Inoltre la presenza stessa dell'orografia introduce ulteriore complessità, conseguenza del *forcing* sulla dinamica e sulla microfisica non solo in prossimità dell'orografia, ma anche a distanza talvolta considerevole. Un'adeguata rappresentazione nei modelli dell'o-

rografia e dei processi a piccola scala ad essa associati rappresenta un problema tuttora aperto.

Il MAP SOP è stata la prima campagna sperimentale a vasta scala in Europa nella quale siano state prodotte previsioni ad alta risoluzione (3 km) con un modello non idrostatico, il modello canadese MC2, in grado di descrivere esplicitamente la convezione profonda, senza ricorrere a parametrizzazioni. Contemporaneamente ha rappresentato un importante campo di prova per diversi modelli meteorologici ad area limitata, che a loro volta fornivano ogni giorno previsioni operative: ALADIN, Swiss Model (SM), BOLAM, Lokal Modell (LM), MM5. In seguito sono stati effettuati studi anche con modelli non idrostatici ad alta risoluzione, sviluppati nel frattempo, quali MOLOCH, MESO-NH e WRF.

Il vasto data base di MAP ha permesso di valutare le prestazioni, in termini di previsione della precipitazione, dei modelli operanti durante il SOP. La verifica della QPF (*quantitative precipitation forecast*) per tali modelli a mesoscala si è dimostrata assai utile per determinarne sia le potenzialità che i punti deboli, indicando possibili indirizzi per migliorarne la qualità previsionale. In particolare, si è visto come un aumento della risoluzione del modello permetta di ottenere un incremento della precipitazione e quindi migliori prestazioni nei casi di eventi intensi. D'altro canto, durante la campagna SOP, i modelli idrostatici ad alta risoluzione si sono dimostrati migliori dei pochi modelli non idrostatici operativi, probabilmente a causa del fatto che questi ultimi non erano al tempo sufficientemente maturi. Il MAP ha comunque rappresentato per la modellistica meteorologica un trampolino di lancio grazie ai progressi teorici, alle verifiche estensive, all'esperienza accumulata e dal 1999 a oggi si è giunti a sviluppare ed utilizzare operativamente modelli ad alta risoluzione non idrostatici con prestazioni decisamente superiori ai modelli idrostatici, come dimostrato dai numerosi confronti effettuati recentemente utilizzando casi studio e dati MAP.

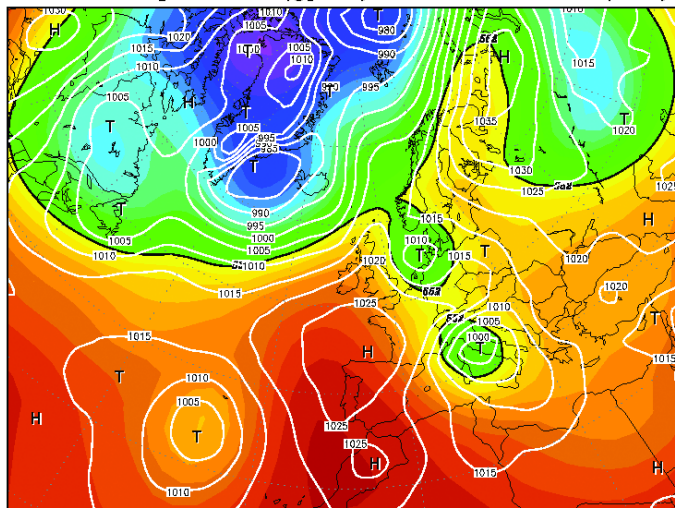
Successivamente, studi di verifica dei modelli (sia a bassa che ad alta risoluzione), basati su casi MAP ed effettuati utilizzando i dati dell'archivio del progetto, hanno messo in luce che quando la risoluzione del modello è bassa, l'aria inizia a sollevarsi troppo lontano dalla montagna alla quale si avvicina, a causa della rappresentazione troppo grossolana dell'orografia nel modello. Inoltre, nei modelli a bassa risoluzione, si è evidenziato un si-

**6+7 Novembre 1999: IOP15**

L'evento noto come IOP15 rappresenta un caso esemplare di ciclogenesi alpina sul golfo di Genova. Il periodo del 6-7 Novembre 1999 è caratterizzato dal rapido sviluppo di una depressione orografica a sud delle Alpi e dal passaggio di un intenso fronte freddo proveniente da nord ovest (FIG. L).

A scala sinottica, il giorno 6 novembre la situazione è dominata da una vasta area depressionaria centrata sul Mare del Nord in lento spostamento verso est. Un intenso fronte freddo si estende dalla Danimarca sino alla Francia meridionale e si appresta a raggiungere le Alpi. In media troposfera, la saccatura si approfondisce sul bacino del Mediterraneo e il jet stream scorre sul suo fianco occidentale tra l'Irlanda e il Golfo di Biscaglia. In alta troposfera è presente un lungo filamento di vorticità potenziale (PV) caratterizzato da due massimi, di cui quello più a sud in prossimità delle Alpi, risulta direttamente associato al processo di cut-off che sta verificandosi (FIG. M). Nella giornata del 7 novembre, il ciclone orografico si sviluppa e si intensifica sul Mar Tirreno, con un minimo di 997 hPa, separandosi dalla circolazione principale sul nord Europa attraverso la formazione di un intenso promontorio di alta pressione a nord delle Alpi. Il fronte freddo scavalca le Alpi, un forte Maestrale fa irruzione sul Mediterraneo mentre sull'Adriatico inizia a soffiare un'intensa Bora.

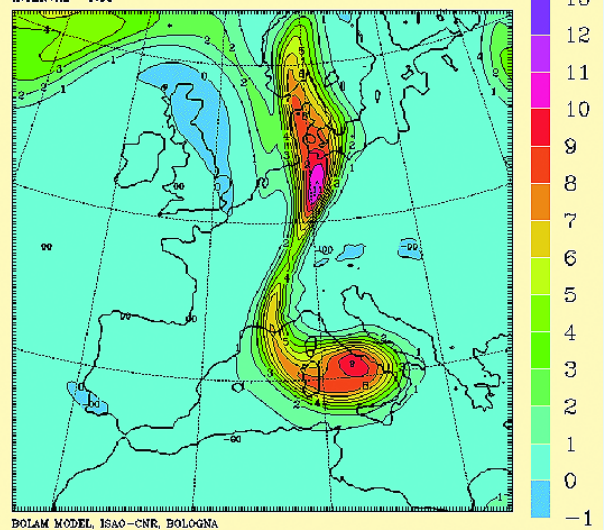
07NOV1999 00Z  
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP  
(C) Wetterzentrale  
www.wetterzentrale.de

PV AT 300 HPA (PV UNITS)

INITIAL DATE 07/11/1999 0600 UTC  
FORECAST HOUR +00 VALID AT 07/11/1999 06 UTC  
INTERVAL 1.00



BOLAM MODEL, ISAO-CNR, BOLOGNA

L: Il 7 novembre il ciclone orografico si è già sviluppato a sud delle Alpi ed inizia il lento spostamento sul Mar Tirreno.  
M: In alta troposfera (300 hPa) si evidenzia un lungo filamento di vorticità potenziale (PV) che unisce il ciclone "padre" sul nord Europa, al ciclone "secondario" di natura orografica sviluppatosi sul Mediterraneo.

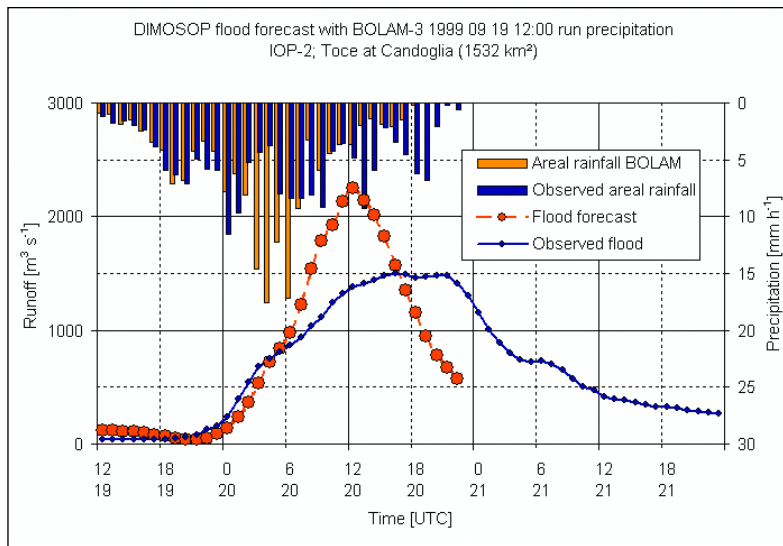
Diversi fenomeni intensi a mesoscala si osservano in concomitanza dell'evento: forti venti modulati o generati dalla presenza dell'orografia su Liguria, Lombardia e Toscana, precipitazioni intense, in parte di natura orografica su diverse zone alpine (Lago Maggiore e Veneto-Friuli) e sull'Appennino settentrionale a causa del flusso post-frontale da nord est, piogge brevi ma forti lungo il corso del Po.

Nel dettaglio, il passaggio del fronte freddo sulla zona del Lago Maggiore, ben documentato dalle immagini radar, ha la forma di una corrente di densità di aria fredda e secca che si riversa a sud delle Alpi passando dal Passo del Gottardo. Un vortice a mesoscala si genera sulla Pianura Padana occidentale e i flussi da sud est sono costretti a salire sopra all'aria fredda, innescando intense precipitazioni nelle vicinanze di Milano. In seguito il flusso persistente da nord est generato dalla forte Bora produce intense precipitazioni orografiche sull'Appennino settentrionale con conseguenti piene dei torrenti (FIG. N e O) e acqua alta a Venezia (116 cm).



N e O: le intense precipitazioni cadute sull'Appennino settentrionale ingrossano il fiume Secchia. Alle casse di espansione di Campo Galliano (MO) si registrano allagamenti (F. Luca Lombroso)

7. Esempio di previsione di piena per il 19 settembre 1999, ottenuta accoppiando il modello meteorologico BOLAM (ISAC-CNR) ed il modello idrologico DIMOSOP (Univ. di Brescia) sul bacino del fiume Toce. È il primo esempio in Italia di previsione in tempo reale ottenuta mediante l'accoppiamento di modelli.



stematico errore nella localizzazione della precipitazione che viene spesso soppressa o sotto-stimata sottovento. Ciò risulta essere una conseguenza del fatto che i processi di convezione profonda, responsabili della maggior parte della precipitazione prodotta dal modello, sono descritti da schemi di parametrizzazione i quali rilasciano la pioggia nella posizione stessa in cui è presente l'instabilità, senza quindi tenere conto del possibile trasporto delle celle convettive dovuto alle correnti. Sempre attraverso esperimenti di confronto fra modelli anche di recente sviluppo si è notata una sistematica superiorità dei modelli non idrostatici di recente implementazione, al contrario di quanto era avvenuto durante la campagna di misure.

Aspetti più tecnici di modellistica hanno riguardato il miglioramento della rappresentazione dell'orografia, la definizione di coordinate verticali che producessero errori minori in prossimità di forti pendenze del suolo e lo sviluppo di migliori schemi numerici sia per la diffusione che per la descrizione dei processi microfisici.

Anche altri settori, quali l'assimilazione dati e la previsione di ensemble, hanno ricevuto una grossa spinta grazie al MAP. Il Centro Europeo ECMWF ha effettuato delle rianalisi utilizzando i dati aggiuntivi resi disponibili dal progetto, tra cui le misure dei profili di vento, radiosondaggi e innumerevoli osservazioni alla superficie. L'impatto di tali dati è risultato decisivo nel migliorare la qualità della previsione numerica in diverse IOPs. Per quanto riguarda la previsione probabilistica si è giunti alla implementazione del sistema COSMO-LEPS (*Local Ensemble Prediction System*) e si sono effettuati esperimenti di predicibilità utilizzando ensemble di modelli ad alta risoluzione. Questi ultimi hanno mostrato che la

bassa predicibilità degli eventi di precipitazione è solitamente legata alla presenza di instabilità convettiva. D'altro canto, la presenza di convezione non preclude necessariamente la predicibilità su scale spazio-temporali più grandi di quelle della singola cella convettiva nel caso in cui le condizioni a larga scala forzano una certa organizzazione.

Non va infine dimenticato che gli esperimenti basati su modelli numerici hanno permesso di identificare fenomeni specifici rilevanti nella meteorologia alpina, tra cui i meccanismi di precipitazione orografica e l'esistenza di regimi di flusso (*flow over e around*) discussi in precedenza, l'importanza della stratificazione, nonché della distribuzione dell'umidità nella massa d'aria incidente, l'interazione dei cicloni e dei fronti con l'orografia alpina, la formazione di bande di vorticità potenziale (PV streamer), la formazione di onde sottovento, e altro ancora.

### 3c. Aspetti idrologici

Nell'ambito del sottoprogetto P3 dedicato all'idrologia, attraverso la stretta collaborazione tra meteorologi ed idrologi, si è investigata con successo la possibilità di accoppiare modelli meteorologici e idrologici, in modo da fornire previsioni di piena con un sufficiente anticipo temporale, e si è analizzato l'impatto che possono avere i bacini di raccolta nel modulare la piena dei fiumi.

Durante la campagna SOP, utilizzando due differenti catene modellistiche meteo-idrologiche (l'italiana BOLAM-DIMOSOP e la canadese MC2-WATFLOOD), è stato possibile emettere avvisi di allerta relativamente alle piene nei bacini del Ticino e del Toce in occasione dei maggiori eventi di precipitazione (Fig. 7). L'utilizzo operativo di tali catene ha rappresentato il primo esempio in Italia di previsioni in tempo reale mediante l'accoppiamento di un modello meteorologico ad al-

ta risoluzione con un modello idrologico distribuito. Si è dimostrato in tal modo l'utilità di tale tecnica di previsione idrologica per bacini di piccole e medie dimensioni per i quali, a causa dei rapidi tempi di risposta, non è sufficiente disporre della sola precipitazione osservata per fornire previsioni tempestive. Avendo inoltre a disposizione campi di precipitazione previsti da differenti modelli meteorologici, è stato possibile, in una fase successiva, effettuare delle previsioni probabilistiche d'ensemble, utilizzando la tecnica del multi-model. Da questi esperimenti si è potuto concludere che è attualmente possibile effettuare previsioni di piena con uno o due giorni di anticipo per bacini di medie dimensioni (1000÷10000 km<sup>2</sup>), stimando in modo abbastanza realistico sia il picco, sia il volume totale, che la tempistica della piena.

I bacini analizzati durante il progetto (Toce, Ticino, Verzasca e Maggia) possono essere considerati rappresentativi di bacini alpini fortemente sfruttati da impianti idroelettrici. Gli studi hanno dimostrato che i bacini di raccolta possono influire sulle piene, riducendo i volumi di deflusso del 10% (come ordine di grandezza). La trasmissione in tempo reale dei dati riguardanti i rilasci da tali bacini (che non avviene normalmente durante gli eventi di piena) si è rivelata di grande importanza nel corso della campagna MAP sia per una più accurata previsione idrologica, sia per una migliore gestione dei bacini stessi.

### 3d. Anomalie di vorticità potenziale (PV) in alta troposfera

L'interesse nello studio delle anomalie di PV è dovuto al fatto che esse rappresentano sia un precursore che un attivo elemento degli eventi di intense precipitazioni in area alpina. La profonda saccatura che si sviluppa sul Mediterraneo in occasione di tali fenomeni è infatti associata a filamenti, detti *streamer*, di aria stratosferica, caratterizzata quindi da alti valori di PV, che tendono ad allinearsi con la saccatura stessa e scendono verso la troposfera. La presenza del jet troposferico, associato a tali *streamer*, favorisce moti ascendenti e quindi alimenta sia la ciclogenese che lo sviluppo di convezione profonda, responsabile di intense precipitazioni. I filamenti di PV possono interagire con i flussi meridionali di aria umida ai bassi livelli diretti verso la catena alpina, intensificandoli e riducendo la stabilità della massa d'aria, favorendo quindi lo sviluppo di celle convettive.

Attraverso l'utilizzo delle rianalisi per il periodo 1966÷1999 (ERA-40 dataset) prodotte dal

8. foto lenticolari



centro europeo ECMWF è stata prodotta un'analisi climatologica delle anomalie di vorticità, la quale ha confermato il forte legame dei filamenti di PV in alta troposfera con gli eventi di precipitazione intensa in area alpina. Infatti, più del 70% dei fenomeni di piogge intense che interessano il versante meridionale delle Alpi sono accompagnati dalla presenza di PV *streamer* posizionati in corrispondenza del margine occidentale della catena montuosa. Inoltre si è notato come l'evoluzione tipica di tali filamenti sia caratterizzata da un cut-off a sud delle Alpi, che accompagna lo sviluppo di una depressione di origine orografica sottovento (si veda anche riquadro dedicato alla IOP 15).

La struttura in termini di umidità dei PV *streamer* non era nota prima del MAP. Il passaggio delle anomalie di PV è stato monitorato tramite la rete francese di profilatori di vento VHF e mediante i frequenti radiosondaggi, oltre che attraverso l'utilizzo dell'aereo Falcon opportunamente equipaggiato. Infatti, grazie allo sviluppo da parte del Centro Aerospaziale Tedesco (DLR) di un particolare strumento lidar per la misura del vapore acqueo, detto DIAL (*Differential Absorption Lidar*), operante nell'infrarosso, si è potuto raccogliere una notevole quantità di informazioni in regioni a basso contenuto di umidità quali quelle prossime alla tropopausa (alta troposfera-bassa stratosfera), pianificando voli attraverso le anomalie di PV. Le misure DIAL hanno rivelato la presenza di strutture a piccola scala all'interno dei PV *streamer*.

Tali osservazioni, supportate dalle simulazioni dei modelli numerici, sono inoltre risultate utili nel confermare diversi aspetti già noti del fenomeno di ciclogenese orografica, caratterizzato dallo sviluppo di una depressione sottovento che interessa non solo la bassa e media troposfera, ma che si estende anche in alta troposfera, come evidenziato

dalle strutture dei PV *streamer*. L'effetto della catena alpina è fondamentale sia nella fase iniziale del cut-off, sia nella successiva evoluzione del ciclone orografico.

### 3e. Onde di gravità

La presenza di nubi lenticolari, l'interferenza talvolta pericolosa con il traffico aereo e la comparsa di intense tempeste di vento lungo i pendii sono le possibili conseguenze dello sviluppo di onde orografiche, da diversi decenni oggetto di ricerca nel campo della meteorologia. Le Alpi sono in grado di eccitare onde di gravità anche se, essendo principalmente allineate come il flusso medio (ovest-est), raramente si è osservata la presenza di onde di grande ampiezza. Fenomeni più intensi si hanno in occasione del passaggio di sistemi perturbati o saccature che si protendono sul Mediterraneo, ai quali sono associati forti flussi meridionali e quindi perpendicolari alla barriera orografica.

Durante il SOP, gli aerei impiegati nelle misure di onde di gravità percorrevano ripetutamente lo stesso percorso allineato con il vento, avanti e indietro, mantenendosi ad una quota fissa. Questo ha permesso di verificare l'assunzione di stazionarietà delle onde in esame, che sta alla base della teoria sviluppata, condizione necessaria per poter investigare il fenomeno. L'utilizzo simultaneo di due o tre velivoli a quote differenti ha permesso di investigare anche la struttura verticale delle onde. Durante il MAP, a differenza di quanto avvenuto in precedenti esperimenti, si è inoltre osservata la regione di generazione delle onde nello strato limite (in prossimità del suolo) contemporaneamente alle osservazioni effettuate nella regione di propagazione delle onde in troposfera. Sonde GPS (*DWS, dropwindsonde*), lasciate cadere dagli aerei durante i voli sperimentali, hanno fornito informazioni su temperatura, umidità e vento. Nel frattempo,

due speciali strumenti lidar (SABL, *Scanning Aerosol Backscatter Lidar*; DIAL) installati a bordo dell'Electra e del Falcon fornivano altre informazioni. L'Electra, volando a bassa quota poteva analizzare la distribuzione delle nubi cumuliformi che denotano la sommità dello strato limite planetario. Il Falcon osservava dall'alto l'intera popolazione di nubi in troposfera, compresi cirri e nubi lenticolari. Infine, altri tre strumenti osservativi sono stati utilizzati: immagini dal satellite Meteosat ad alta frequenza, palloni sonda a quota costante e profilatori di vento (VHF e UHF).

I numerosi dati raccolti hanno permesso di valutare la capacità dei modelli non idrostatici ad alta risoluzione di recente sviluppo di riprodurre in maniera accurata lo sviluppo delle onde orografiche. Questi test hanno fornito risultati generalmente buoni e promettenti, specie in occasione di eventi caratterizzati da onde stazionarie che non si rompevano. Si è rilevata una particolare sensibilità ad alcuni aspetti dei modelli, quali la risoluzione orizzontale, le coordinate verticali utilizzate e la parametrizzazione dello strato limite. Le onde di gravità hanno infatti una lunghezza d'onda generalmente compresa tra i 3 e i 15 km. Considerando che per descrivere in modo appropriato un'onda è necessario avere tra i 6 e gli 8 punti di griglia entro la sua lunghezza, risulta chiaro che per le onde di gravità sono richieste risoluzioni che scendono sotto la scala del chilometro. Inoltre l'alta risoluzione orizzontale risulta necessaria per descrivere adeguatamente le caratteristiche locali della complessa orografia alpina.

La possibilità di utilizzare i modelli per ottenere simulazioni realistiche dello sviluppo delle onde ha permesso anche di effettuarne un'analisi climatologica, la quale ha individuato nelle Alpi occidentali, tra il Monte Rosa e le Alpi Marittime, la zona più favorevole allo sviluppo di onde di gravità.

Nel periodo della campagna SOP sono stati osservati sette casi di formazione di onde di gravità sulla catena alpina. Alcuni interessanti meccanismi sono stati identificati. Innanzi tutto l'effetto di uno strato d'aria stabile, bloccato nel versante sopravvento della montagna. Tale area di stagnazione impone che solo il flusso al di sopra si muova per scavalcare l'orografia generando onde di gravità. In pratica viene ridotta l'altezza effettiva della montagna e di conseguenza si sviluppano solo onde di modesta ampiezza. Inoltre, tale strato è in grado di assorbire (anziché riflettere come avverrebbe in sua assenza) le onde che si propaga-

9. foto foehn



no verso il basso, riflesse dal *jet stream*. Il blocco della massa d'aria sopravvento può anche avere altri effetti in casi in cui, sotto particolari condizioni di *shear* di vento, si ha un disaccoppiamento tra il flusso ai bassi livelli e quello al di sopra, come previsto dalla teoria non lineare. In tali casi, lo strato inferiore può riversarsi al di là della barriera orografica, analogamente a quanto avverrebbe per un sottile strato di acqua che tracima da una diga, eventualmente producendo un salto idraulico (*hydraulic jump*). Infine è stato individuato l'importante effetto del rilascio di calore latente nella bassa e media troposfera, in grado di ridurre la stabilità dell'atmosfera e di aumentare in modo significativo l'intensità del flusso discendente nel versante sottovento, con conseguente intensificazione delle onde di gravità nonché del foehn.

### 3f. Struttura dello strato limite in area montuosa

All'interno del programma MAP, le problematiche legate allo strato limite (PBL: *Planet Boundary Layer*) sono state investigate in quattro differenti progetti. Il MAP Riviera era dedicato esclusivamente allo studio osservativo e modellistico del PBL nella valle del Riviera (Ticino), nella quale era installata una densa rete di strumentazione, tra cui «torri meteorologiche» per misure della turbolenza, della radiazione e delle variabili meteorologiche, stazioni per radiosondaggi, sodar ed un profilatore a microonde di temperature. Il PBL era poi studiato nei progetti riguardanti il föhn nella Valle del Reno, il *gap flow* nella Wipptal e l'idrologia. In quest'ultimo caso le misure micro-meteorologiche erano utilizzate per la validazione dei modelli idrologici.

Il principale oggetto di ricerca riguardava la possibilità di estendere o modificare in modo appropriato le nozioni di turbolenza nel PBL, note per terreno piatto, in presenza di orografia complessa. La campagna di misure nel PBL ha portato il risultato

più importante proprio in questo ambito: infatti sebbene sia stata osservata una notevole variabilità spaziale della turbolenza, essa risulta essere strettamente legata alla topografia e quindi è possibile individuarne caratteristiche riproducibili anche attraverso schemi numerici di parametrizzazione.

Nei bacini alpini, a differenza di quanto osservato nelle larghe valli americane, si è notato che lo strato di inversione vicino al suolo, formatosi nel corso della notte, non sempre viene rimosso durante il giorno dalla turbolenza. Così sul versante meridionale delle Alpi, anche in tarda estate, si possono trovare valli nelle quali l'atmosfera risulta stabilmente stratificata nei bassi strati, mentre al di sopra può essere presente uno strato rimescolato con debole convezione. Questo fenomeno è stato attribuito sia alla subsidenza, che tende a compensare la circolazione attraverso la valle alimentata dal riscaldamento dei versanti, sia a possibili circolazioni secondarie dovute alla curvatura della valle stessa.

Durante la campagna di misure tutti gli aspetti, per altro già noti, caratterizzanti la circolazione lungo la valle e i venti lungo i suoi pendii sono stati osservati e, grazie alla densità spaziale della rete osservativa, si è ottenuto un dettaglio decisamente superiore della struttura tridimensionale di queste correnti «*thermally driven*».

Per quanto riguarda gli aspetti legati alla modellistica, le simulazioni sono servite per riprodurre le caratteristiche del PBL osservate e per indagare i processi fisici. Il progetto ha chiaramente dimostrato che per poter simulare in modo appropriato i processi del PBL in aree ad orografia complessa è necessario scendere a risoluzioni orizzontali dell'ordine del centinaio di metri. Operare a risoluzioni sempre più spinte non garantisce però la corretta modellazione del PBL (è condizione necessaria, ma non sufficiente). Infatti occorre anche avere informazioni dettagliate

te delle condizioni della superficie, in particolare sull'umidità del suolo. Attualmente non è ancora possibile operare modelli meteorologici, né tanto meno climatici, con griglie così fitte e quindi si ricorre alla parametrizzazione dei processi turbolenti, tenendo in considerazione che la differenza tra l'orografia reale e quella descritta dal modello può essere rilevante. Sebbene i casi studio del MAP rappresentino un campione limitato, hanno mostrato una via per descrivere e parametrizzare gli scambi turbolenti in area montuosa e hanno permesso di raccogliere una data base osservativa indispensabile per la validazione dei modelli.

Simulazioni dei modelli numerici hanno anche permesso di individuare i meccanismi di scambio tra il PBL e la libera atmosfera, generati dai cambiamenti della sezione della valle, dalla circolazione locale e dagli scambi turbolenti. Tutti e tre questi processi possono contribuire agli scambi con la libera atmosfera e il loro impatto dipende dalle caratteristiche della circolazione a mesoscala, quindi può variare di giorno in giorno.

### 3g. Föhn

Lo studio del föhn è stato focalizzato nella valle del Reno. La valle, che si estende dalla cresta alpina sino alle pianure a nord, è caratterizzata da una forma complessa, essendo orientata da ovest a est nella parte meridionale e da sud a nord nella porzione terminale, nonché da numerosi passi e valli laterali. Durante la campagna di misure SOP, corrispondente al periodo di massimo climatologico di occorrenza del föhn, sono stati osservati una dozzina di eventi. A differenza degli altri esperimenti precedenti mirati all'osservazione del föhn, durante il MAP è stata messa in campo una strumentazione di densità e qualità tali da rendere possibile un'adeguata risoluzione spaziale e temporale del fenomeno e che ha permesso di documentare nel dettaglio la struttura tridimensionale, dalla scala sinottica alla singola valle. Sono state coordinate misure da piattaforme differenti: voli di ben 6 aerei con strumentazione, lidar per la misura della velocità radiale del vento, cinque sodar doppler, due radar per il profilo di vento, due scintillometri per rilevare le componenti verticale e orizzontale del vento e documentare la penetrazione delle onde di gravità, microbarometri e numerose stazioni di superficie e per radiosondaggi. Inoltre sono state installate tre telecamere a circa 1800 metri di quota per il monitoraggio della penetrazione del vento nella valle (i migliori filmati sono tuttora disponibili su web



10. Cascate nel Ticino, in prossimità di Locarno, ingrossate dalle piogge del 25 settembre 1999.

- vedi note bibliografiche).

Come è noto sulle Alpi il föhn si origina in presenza di forti correnti a scala sinottica generalmente perpendicolari alla barriera orografica. Si distingue fra föhn profondo o superficiale (*deep o shallow föhn*) a seconda che il flusso che attraversa le Alpi si estenda o meno significativamente al di sopra dell'orografia. Mentre gli aspetti termodinamici del fenomeno e del riscaldamento nel versante sottovento sono ormai assodati (si veda ad esempio Nimbus 31/32 del 2004), restano aperte ancora diverse questioni inerenti la dinamica, la penetrazione del föhn nelle valli alpine e la rimozione dell'aria fredda e stabile in prossimità del suolo. Sono questi gli aspetti che il MAP ha cercato di indagare con maggiore attenzione.

Si è notato che l'estensione orizzontale e verticale e la durata del föhn sono in buona parte dettate dalle caratteristiche della massa d'aria diretta verso la montagna, rilevabili prima che la stessa raggiunga la barriera orografica. Oltre ai consueti indicatori quali la differenza di pressione e temperatura potenziale attraverso le Alpi, si è notato che esiste un parametro, il numero di Froude (lo stesso definito per la precipitazione orografica), che permette di descrivere il comportamento del flusso in presenza di un ostacolo e quindi delineare le caratteristiche del föhn. Durante eventi tipici di föhn, si è notata una transizione tra i due regimi di flusso, dal *flow around* al *flow over* che corrisponde ad un progressivo passaggio da *shallow a deep föhn* e ad una maggiore penetrazione del vento all'interno della valle del Reno. Durante la prima fase

aria potenzialmente fredda scavalca solo le zone di cresta poste a quote inferiori e si riversa nella valle. Man mano che il fenomeno si intensifica, la massa d'aria accelera sopra alle Alpi ed è soggetta ad onde di gravità con associati moti discendenti piuttosto intensi che penetrano nella valle del Reno. Massimi di vento si registrano proprio in corrispondenza di onde di gravità che propagano verso il basso.

Nelle valli alpine, specie quelle del versante nord, è comune osservare la presenza di uno strato d'aria freddo e stabile in prossimità del suolo, generatosi o attraverso raffreddamento radiativo notturno, o per avvezione di aria fredda legata alla situazione meteorologica. Questo ultima eventualità è abbastanza tipica per la valle del Reno che risulta esposta alle correnti fredde da nord, come confermato dalle misure effettuate. La presenza di questo cuscinetto freddo è di fondamentale importanza nell'evoluzione del föhn, il quale può essere in grado di rimuoverlo e raggiungere quindi il suolo solo quando soffia con sufficiente intensità. Sono stati individuati tre meccanismi che regolano la penetrazione del föhn nella valle: il riscaldamento diurno dovuto alla radiazione solare, il rimescolamento turbolento che può erodere progressivamente la parte superiore dello strato freddo e l'eventuale intensificazione di onde di gravità in grado di forzare il flusso sottovento specie in caso di rottura delle onde stesse. Questi tre processi possono operare simultaneamente.

Anche per quanto riguarda la modellistica si sono ottenuti importanti risultati, evidenziando tre aspetti particolarmente deficitari che limitavano l'accuratezza della previsione del föhn. Il primo è legato all'inizializzazione dei modelli ad area limitata per mezzo delle analisi prodotte da modelli globali, le quali non riproducono correttamente i dettagli della struttura termodinamica all'interno della valle a causa della limitata risoluzione orizzontale. Solo attraverso l'assimilazione a mesoscala di dati al suolo è stato possibile recuperare queste caratteristiche locali che si sono rivelate fondamentali per la corretta simulazione del fenomeno. Un altro aspetto critico riguarda i modelli stessi, il cui passo di griglia di alcuni chilometri non è ancora sufficiente per riprodurre i dettagli topografici della valle. Infine, gli schemi numerici di diffusione hanno mostrato evidenti errori in presenza di orografia complessa e sono per tanto state sviluppate opportune modifiche rivelatesi assai efficaci.

L'ultimo aspetto legato allo studio del föhn nel progetto MAP è stato quello dell'impatto sulla

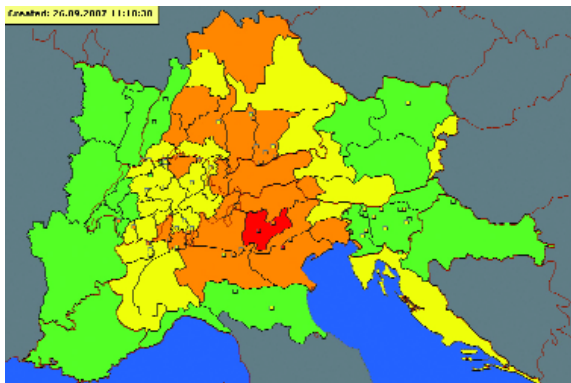
qualità dell'aria attraverso misure di inquinanti, quali ozono, ossidi di azoto e aerosol, e l'ausilio dei modelli numerici. In particolare si è osservato che la penetrazione del föhn nella valle porta ad un generale calo degli inquinanti, ma ad un aumento della concentrazione di ozono che pur non raggiungendo i picchi degli eventi di smog fotochimico, arriva a valori ben superiori alla media. Nel caso di föhn da sud, l'aria che giunge nella valle del Reno proviene dalla pianura Padana ad una quota attorno ai 2000 metri, mentre non si è registrata alcuna intrusione di aria stratosferica (ricca di ozono). Questo significa che con ogni probabilità è il trasporto di ozono da zone inquinate ad aumentarne la concentrazione, assieme al fatto che il calo degli altri inquinanti sfavorisce la trasformazione dell'ozono stesso.

### 3h. Gap flow

Il concetto di *gap flow*, ovvero di un flusso attraverso un'apertura (gap appunto) ma che non scavalca l'intera cresta orografica, è molto simile a quello che viene definito *shallow föhn*. Quando si parla di föhn, in generale si considera il *deep föhn* in cui il flusso supera l'orografia non solo attraverso i passi ma al di sopra della linea di cresta.

Per lo studio del *gap flow* durante il MAP è stata selezionata la zona del Passo del Brennero che rappresenta il passo più basso delle Alpi centrali. Lungo la valle che lo attraversa, da Vipiteno a Innsbruck, detta Wipptal, è stata installata la strumentazione necessaria. La campagna di misure è stata mirata agli eventi di vento da sud, quindi la rete osservativa era per lo più posta nel versante austriaco. Essa era composta da numerose stazioni meteorologiche automatiche che fornivano dati ad alta frequenza (tra i trenta secondi e i quindici minuti), disposte sia lungo la valle che lungo i pendii in modo da avere una visione anche verticale, sodar doppler, profilatori di vento e lidar doppler per misurare le velocità radiali, supportati dai voli del NOAA P-3 e dell'Electra che fornivano dettagliate sezioni di vento e monitoravano la sommità dello strato interessato dal föhn.

Attraverso le misure e studi modellistici anche idealizzati, sono stati identificati tre prototipi di *gap flow* nella Wipptal nonché l'appropriato contesto teorico atto a descrivere l'evoluzione di questi flussi fortemente non-lineari, sostanzialmente basato sulla «*hydraulic theory*». Il modello concettuale del *gap flow* è quello di due serbatoi di masse d'aria di diverso spessore posti uno a monte e l'altro a valle del passo. A monte vi è aria caratterizzata da temperatura poten-



12. La piattaforma di visualizzazione delle allerte del MAP D-PHASE permette una rapida identificazione delle aree soggette a fenomeni di intense precipitazioni e piene

ziale più fredda che viene spinta verso il gap, a causa di un gradiente di pressione legato alla situazione sinottica o a mesoscala, fino a quando non inizia a traboccare nel versante opposto attraverso il passo. Passato il gap, il flusso accelera sostanzialmente comportandosi come föhn e può eventualmente subire brusche transizioni, tipo salto idraulico («hydraulic jump») a causa della presenza dell'altra massa d'aria o talvolta originate da piccole variazioni della topografia.

È stata anche compilata una climatologia per quanto riguarda l'occorrenza del *gap flow* che si presenta per il 20% dei giorni dell'anno. Risulta essere più frequente nei mesi di transizione, cioè da marzo ad aprile e da settembre a novembre. Durante l'estate, il fronte polare si posiziona troppo a nord per garantire un apporto regolare di aria fredda che possa scavalcare le Alpi, mentre tra dicembre e febbraio l'atmosfera risulta spesso così fredda e stabile nei bassi strati da impedire al flusso di oltrepassare il gap.

#### 4. Il progetto MAP D-PHASE

Negli ultimi anni si sono verificati diversi episodi di precipitazione intensa sull'area alpina che hanno dimostrato il devastante impatto che possono avere le alluvioni in questa regione, sia in termini umani che economici. Il MAP D-PHASE (Fig. 11) si presenta con un ruolo assai im-

11. Logo del progetto MAP D-PHASE



portante nella prevenzione e previsione di queste situazioni, in quanto è teso a dimostrare (il D-PHASE è un progetto dimostrativo, leggasi anche Demonstration-PHASE) le capacità, in termini di previsione di eventi alluvionali in aree ad orografia complessa, di una moderna catena modellistica meteo-idrologica ad alta risoluzione. Tale catena viene detta «end-to-end forecasting system» per specificare che non include soltanto la parte modellistica, ma anche l'utenza, ovvero i previsori, considerati utenti intermedi, e gli utenti finali, quali ad esempio la protezione civile, le autorità di bacino, i decisori a differenti livelli. Si tratta quindi di una logica prosecuzione del MAP che ne riprende alcuni aspetti ed alcuni importanti risultati, quali il miglioramento dei modelli meteorologici e idrologici, l'accresciuta conoscenza dei fenomeni fisici e il progresso delle tecnologie di osservazione, per dimostrare quali benefici abbiano portato in termini di previsione degli eventi di precipitazione intensa e conseguenti alluvioni, ovviamente sulla regione alpina.

Il progetto si occupa dell'intero spettro previsionale, dalla raccolta delle osservazioni, al nowcasting, alla previsione (anche d'ensemble) sia a scala sinottica che a mesoscala e ad alta risoluzione, alla previsione idrologica e, infine, agli utenti finali che devono prendere decisioni sulla base delle previsioni stesse.

Come nel passato, l'Organizzazione Mondiale della Meteorologia (WMO) ha riconosciuto l'importanza del progetto che rientra nell'ambito del Programma di Ricerca Meteorologica Mondiale (WWRP).

Entrando nel dettaglio del progetto, il MAP D-PHASE ha raccolto l'eredità del MAP per quanto riguarda i progressi ottenuti nei seguenti campi:

1. Meccanismi di precipitazione orografica, inclusa la capacità dei moderni modelli di previsione di descrivere in modo appropriato le caratteristiche dinamiche e microfisiche dei sistemi precipitanti in area montuosa.

2. Campi di precipitazione da rete radar in aree con orografia complessa; i dati radar trovano applicazione non solo nel nowcasting e nella verifica delle previsioni, ma anche nell'assimilazione nei modelli numerici meteorologici ed idrologici.

3. Modelli ad alta risoluzione, con passo di griglia inferiore ai 4 km, utilizzati sia a scopo operativo, sia a scopo di ricerca.

4. Modellistica idrologica e accoppiamento con i modelli meteorologici.

5. Previsione d'ensemble, applicata non solo ai modelli glo-

bali, ma anche ai modelli ad area limitata e ad alta risoluzione. Tutti questi aspetti contribuiscono ad una tempestiva previsione degli eventi di precipitazione intensa in aree ad orografia complessa e dei conseguenti effetti di piena nei bacini montani necessaria per diramare l'allerta alla popolazione.

I principali obiettivi scientifici del MAP D-PHASE sono:

1. Valutare il grado di predicibilità degli episodi di precipitazione intensa e delle alluvioni in funzione dell'entità dell'evento, della quantità di pioggia, del tipo di evento (stratiforme o convettivo) e del range di previsione.

2. Dimostrare la potenzialità dei modelli meteorologici operativi ad alta risoluzione nel descrivere i processi rilevanti responsabili degli eventi di intense precipitazioni sulle Alpi e più in generale in aree montuose.

3. Dimostrare l'abilità dei modelli idrologici di fornire accurate e tempestive previsioni dei deflussi nei bacini montani.

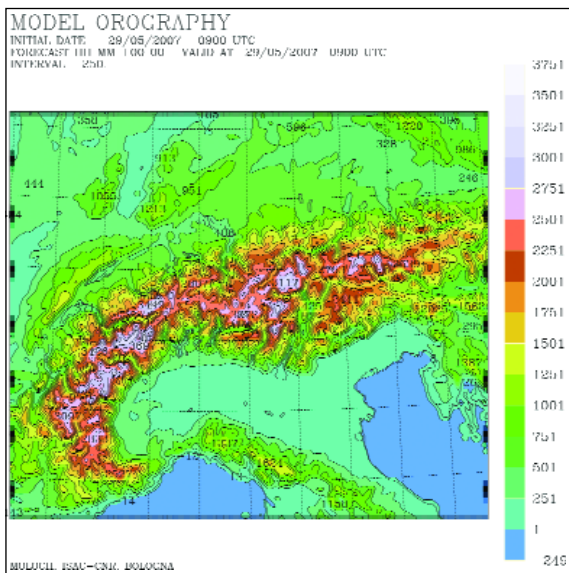
4. Valutare la possibilità di effettuare previsioni a brevissimo termine (*nowcasting*) di forti precipitazioni convettive in aree montuose utilizzando tecniche euristiche, osservazioni da radar, stazioni di misura automatiche al suolo, radiosondaggi e immagini da satellite.

5. Stabilire una migliore collaborazione sia tra ricercatori nell'ambito della meteorologia e dell'idrologia che tra il mondo della ricerca e gli utenti finali.

Dopo un lungo periodo organizzativo, il MAP D-PHASE è entrato ora nella fase operativa, denominata DOP (D-PHASE Operations Period), iniziata il 1 giugno e che terminerà il 30 novembre 2007.

#### 4a. La fase operativa del MAP D-PHASE

Dal punto di vista pratico il sistema di previsione in tempo reale, distribuito tra le varie nazioni e istituzioni partecipanti, procede attraverso diversi livelli di allerta. Si parte dalle previsioni d'ensemble, sia globali che ad area limitata, per identificare con anticipo, dai 3 ai 5 giorni, possibili eventi meteorologici di interesse ed emettere eventuali pre-allerte. Avvicinandosi all'evento, vengono poi prodotte le previsioni deterministiche ad alta (7÷10 km) e altissima (2÷4 km) risoluzione che possono correggere, confermare o precisare le allerte con un anticipo di 48 ore. Le uscite deterministiche dei modelli ad alta risoluzione vengono utilizzate sia per produrre previsioni probabilistiche attraverso la tecnica del multi-model ensemble, sia per guidare le previsioni dei modelli idrologici. L'utilizzo come input dei campi di previsione generati da model-



13. Dominio di integrazione del modello MOLOCH per il MAP D-PHASE. Grazie all'alta risoluzione orizzontale (2.2 km) i dettagli dell'orografia risultano ben descritti.

li meteorologici differenti permette di produrre previsioni d'ensemble anche per quanto riguarda l'idrologia. Infine, a brevissimo termine, inferiore alle 6 ore, entrano in gioco anche gli strumenti di nowcasting, che affiancano la modellistica ad altissima risoluzione, in particolare le immagini dei radar svizzeri, francesi ed italiani ed il rilevamento automatico delle celle convettive prodotto dal DLR.

Tutti i dati prodotti dai modelli in un formato comune vengono raccolti in un database gestito dal Max-Planck Institute for Meteorology situato ad Amburgo. Una piattaforma di visualizzazione (Fig. 12), gestita attraverso il servizio meteorologico elvetico (Meteoswiss) permette, agli utenti registrati, una rapida identificazione delle aree a rischio e la possibilità di analizzare nel dettaglio le allerte emesse (dove, quando e da quali modelli) e le uscite grafiche dei singoli modelli. Gli utenti finali sono poi chiamati a fornire un feedback riguardo agli strumenti ritenuti utili ed affidabili ed una valutazione della qualità delle previsioni utilizzate.

Sono davvero tanti i modelli deterministici che quotidianamente vengono fatti girare anche più volte presso diversi centri partecipanti. Eccone un elenco, con indicata tra parentesi anche la risoluzione orizzontale a cui operano (Fig. 13):

- BOLAM (12 km) e MOLOCH (2.2 km) che girano, su aree diverse, sia presso l'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima (ISAC) del CNR a Bologna, che presso l'ARPA Liguria (BOLAM a 6.5 km);
- QBOLAM (33 e 11 km), versione non recente di BOLAM implementata per supercalcolatori paralleli Quadrics presso l'APAT;
- LM, Lokal Modell, che gira sotto diverse denominazioni e configurazioni presso enti differenti:

- all'ARPA-SIM Emilia Romagna come LAMI (7 e 2.8 km), al CNMCA dell'Aeronautica Militare come LMEURO (7 km) e LMITA (2.8 km), a Meteoswiss come COSMOCH (7 e 2.2 km), al DWD come LME (7 km) e LMK (2.8 km);
- ALADIN (11 km) e AROME (4.5 km) presso Météo France (Tolosa) e ZAMG (Vienna);
- MM5 presso l'Università di Hohenheim (Stoccarda) e il Karlsruhe Institute of Technology, con risoluzioni dai 60 km a 1 km;
- WRF (60, 20 e 5 km) presso il Karlsruhe Institute of Technology;
- GEM (15 e 2.5 km) presso il Servizio Meteorologico del Canada. Ai modelli deterministici si affiancano diversi sistemi di previsione d'ensemble:
- COSMO-LEPS (10 km) presso l'ARPA Emilia Romagna;
- MOGREPS (25 km) presso l'UK Met Office;
- INMSREPS (27 km) presso l'Istituto Nazionale di Meteorologia (INM) Spagnolo;
- COSMO-SREPS (10 km) presso l'ARPA Emilia Romagna;
- PEPS (7 km) presso il DWD per conto di EUMETNET;
- MPEPS (2.2 km) presso il DWD.

Come detto in precedenza, l'area di interesse del MAP D-PHASE su cui vengono emesse le allerte copre l'intero arco alpino. Inoltre è stata estesa verso nord per includere l'area montuosa compresa tra la Germania meridionale e la Francia orientale sulla quale si è svolta nei tre mesi estivi di giugno, luglio e agosto la fase operativa di un altro importante progetto detto COPS (Convective and Orographically-induced Precipitation Study [www.cops2007.de](http://www.cops2007.de)). COPS è un progetto tedesco, con partecipazione internazionale, che ha lo scopo di studiare la convezione in presenza di orografia. Esso prevedeva, oltre alla parte modellistica, una copertura osservativa davvero impressionante. Data l'affinità degli intenti e la sovrapposizione della fase operativa con il MAP D-PHASE è nata una proficua collaborazione tra i due progetti. Di fatto l'archivio dati e la piattaforma di visualizzazione sono comuni e i modelli vengono fatti girare ed utilizzati in entrambi i progetti.

Per quanto riguarda la parte idrologica, numerosi bacini alpini sono monitorati attraverso previsioni modellistiche che impegnano diversi istituti. Tra i vari modelli che attualmente stanno iniziando a produrre costantemente previsioni ci sono il modello DIMOSOP presso l'Università di Brescia e il modello PREVAH presso l'ETHZ di Zurigo. Altri modelli hanno iniziato ad operare nella fase autunnale del progetto.

Al momento della stesura dell'articolo, siamo giunti a metà

del progetto e i fenomeni temporaleschi estivi dovrebbero lasciare spazio progressivamente ai sistemi perturbati tipici della stagione autunnale. Solo alcune analisi preliminari sono state fatte sino ad ora per valutare le performance dei modelli, ma solamente dopo la fine della fase operativa si potrà iniziare a produrre risultati più concreti. Il primo appuntamento per mostrare i risultati sarà un meeting dedicato al progetto che si terrà a Bologna tra il 19 e il 22 maggio 2008.

Per chi fosse interessato ad approfondire gli argomenti, segue una lista di siti e pubblicazioni.

### Ringraziamenti

L'autore ringrazia il Dott. Andrea Buzzi (ISAC-CNR) per i commenti e i suggerimenti durante la stesura dell'articolo

### Bibliografia e siti

- [www.map.meteoswiss.ch/](http://www.map.meteoswiss.ch/)
- Sito ufficiale del progetto MAP con links ai database, alle Newsletter, alle pubblicazioni uscite recentemente.
- [www.map.meteoswiss.ch/map-doc/dphase/dphase\\_info.htm](http://www.map.meteoswiss.ch/map-doc/dphase/dphase_info.htm) Sito del progetto MAP D-PHASE
- <http://catalog.eol.ucar.edu/map/catalog/> Field Catalog: tutto il materiale delle IOPs
- [www.isac.cnr.it/~map/](http://www.isac.cnr.it/~map/) Sito italiano del progetto
- [www.atmos.washington.edu/%7Ehoze/WorkingGroup/MAPprecip\\_working\\_groupV08.html](http://www.atmos.washington.edu/%7Ehoze/WorkingGroup/MAPprecip_working_groupV08.html)
- Gruppo di lavoro sulla precipitazione orografica, presente ampia bibliografia.
- <http://gap.uibk.ac.at/>
- Informazioni su Fohn e al gap flow [ftp://ftp.meteoswiss.ch/outgoing/map/sop/data/video/Form/readme.htm](http://ftp.meteoswiss.ch/outgoing/map/sop/data/video/Form/readme.htm)
- filmati sul foehn <http://bsing.ing.unibs.it/~dic-segr/maphyd.htm>
- Gruppo di lavoro sull'idrologia [www.map.meteoswiss.ch/map-doc/icam2005/presentations.html](http://www.map.meteoswiss.ch/map-doc/icam2005/presentations.html)
- Presentazioni all'ultimo MAP Meeting, tenutosi in Croazia nel 2005. In particolare le presentazioni S1.1, S1.2, S4.1, S4.2, O14.1, S14.2 riassumono i più importanti risultati ottenuti nei vari settori.
- [www.smr.arpa.emr.it/dphase-cost/](http://www.smr.arpa.emr.it/dphase-cost/) Presentazione del meeting di Bologna, dal 19 al 22 Maggio 2008

CASSARDO C., 2000 - MAP (Mesoscale Alpine Programme): terminate le operazioni di osservazione. Nimbus 17/18.

SCHROTT D. e VERANT W., 2004 - Il föhn sulle Alpi. NIMBUS 31/32

QUART.J.R., 2007 - Met.Soc. 133, 809-1072.

BUZZI A., 2000 - Il Mesoscale Alpine Programme per comprendere i processi meteo-idrologici. Ricerca&Futuro n.15, [www.fi.cnr.it/r&f/n15/buzzi1.htm](http://www.fi.cnr.it/r&f/n15/buzzi1.htm)