Le valanghe 2.6

2.6.1 Introduzione

L'analisi storica degli eventi valanghivi e dei loro effetti negli ultimi 150 anni, condotta attraverso la consultazione di dati d'archivio, monografie e articoli di giornale d'epoca, ha permesso di stimare il ripetersi di eventi di particolare gravità, diffusi sull'arco alpino piemontese, all'incirca ogni 20-30 anni.

2.6.2 Le valanghe nel contesto territoriale dell'arco alpino piemontese

Eventi storici con caratteristiche decisamente catastrofiche furono quelli verificatisi in Piemonte nell'Ottocento, in particolare nel gennaio 1845, nel gennaio 1885 e nel febbraio 1888.
Durante quest'ultimo evento le quantità di precipitazione nevosa cumulata in diversi giorni consecutivi determinarono il raggiungimento di altezze di neve al suolo pari a 325 cm a Oropa (BI), 350 cm a Prali (TO), 432 cm a Entracque (CN), 144 cm a Cuneo (Denza, 1889).

Nel 1888 valanghe di enormi dimensioni si verificarono con gravi danni e vittime su tutto l'arco alpino italiano causando complessivamente 248 vittime. I maggiori danni si verificarono in zone montane a quota intermedia, in quanto fenomeni valanghivi con eccezionale sviluppo giunsero ad interessare molte borgate, allora densamente abitate, collocate sui versanti o sul fondovalle anche a quote inferiori a 1'000 m slm.
All'inizio del Novecento un evento di grande rilevanza storica colpì tragicamente la comunità del paese di Pragelato (TO): una valanga di grandi



Figura 2.6.1
La valanga di Deveis (Exilles – TO), il 18 gennaio 1885 causò la distruzione di 14 abitazioni e 39 vittime. Disegno dal vero di Oreste Silvestri (Serra, 1997)



Figura 2.6.2
Le valanghe cadute nel mese di aprile 1986 causarono ingenti danni alla viabilità in Val Sesia nelle Valli dell'Ossola



Figura 2.6.3
Le stazioni nivometriche della rete meteorologica automatica di Arpa Piemonte costituiscono una fonte insostituibile di informazioni sulle condizioni nivometeorologiche per la previsione del pericolo di valanghe

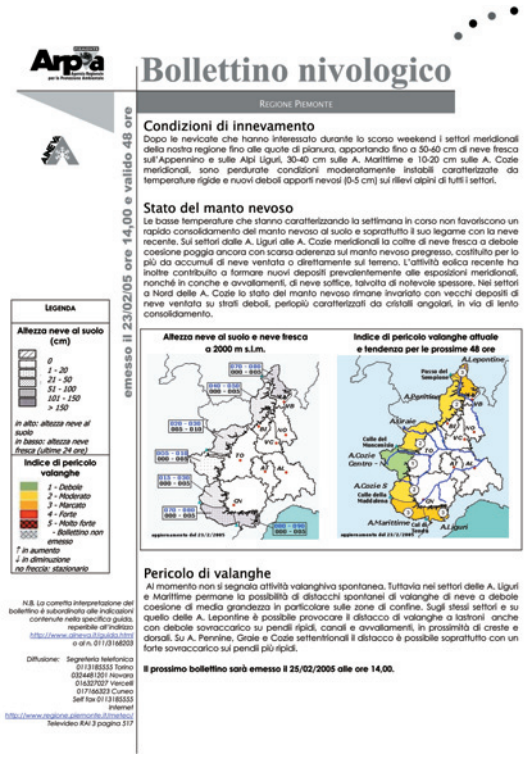
dimensioni determinò la morte di 81 operai della miniera del Beth, in Val Troncea, il 19 aprile del 1904 (Avondo *et al.,* 2003). Questo evento viene annoverato tra i più gravi incidenti da valanga della storia moderna per il numero di vittime coinvolte.
Il verificarsi di eventi di precipitazione di eccezionale intensità diffusa sul territorio regionale in tempi attuali determinerebbe sicuramente un minor numero di vittime rispetto al passato, sia per l'elevato sviluppo tecnologico e scientifico verificatosi negli ultimi decenni nel campo della previsione nivometeorologica a breve e medio termine, sia per le potenzialità di comunicazione e di allertamento della popolazione per scopi di protezione civile. Inoltre, anche il contesto ambientale e socioeconomico è profondamente mutato: una più estesa copertura boschiva dei versanti rispetto al passato determina una minore estensione di terreni predisposti al distacco di valanghe, così come la concentrazione della popolazione nelle località capoluogo del territorio montano, generalmente collocate in luoghi a bassa pericolosità, riduce notevolmente il numero di persone esposte al pericolo rispetto al passato.
Tuttavia, la consapevolezza degli effetti di eventi catastrofici del passato e di una probabilità statistica, seppur bassa, che situazioni di emergenza di rilevanza secolare possano comunque ripetersi in futuro, determina la necessità di tenere in conto il rischio valanghe nella pianificazione dell'uso del territorio montano.
Anche in tempi relativamente recenti eventi di precipitazione nevosa di forte intensità hanno determinato situazioni di elevata criticità per il territorio piemontese. A titolo di esempio, un evento di rilievo che interessò, nell'aprile 1986, in particolare il settore settentrionale dell'arco alpino piemontese, determinò numerose interruzioni della viabilità principale e secondaria dalla Val Sesia alla Val Formazza, senza fortunatamente provocare vittime.
In tale occasione si verificò il danneggiamento di numerose infrastrutture viarie, alcune di esse a causa della sottovalutazione in fase progettuale di situazioni di pericolosità da valanghe: ne è un esempio la distruzione del viadotto sul Fiume Sesia della Strada Statale di Alagna in località Isolello di Riva Valdobbia (VC) da parte di una imponente valanga di fondo di neve umida.
Lo sviluppo sostenibile delle attività umane nel territorio montano non può quindi prescindere dalla valutazione del rischio valanghivo a cui lo sviluppo economico e turistico della montagna espone necessariamente strutture e infrastrutture.
La prevenzione di questo tipo di rischio è possibile innanzitutto attraverso una corretta pianificazione dell'uso del territorio montano che si fonda su due requisiti essenziali:

- la disponibilità di conoscenze dei fenomeni valanghivi del passato e dei loro effetti, facilitata dall'impiego di un Sistema Informativo Geografico che ne permetta la fruizione in modo rapido ed efficace;
- l'applicazione di criteri scientifici nella perimetrazione delle zone pericolose, attraverso l'impiego di modelli di calcolo della dinamica valanghiva o di strumenti di analisi storico-statistica.

Il Piemonte dispone di una normativa avanzata nel campo della pianificazione dell'uso del territorio montano, rappresentata dalla L.R. 56/1977 e s.m.i. *Tutela ed uso del suolo* e, per quanto riguarda gli aspetti di prevenzione del rischio idrogeologico, idraulico e valanghivo, dalla Circolare del P.G.R. n. 7/LAP del 08/05/1996, *Specifiche tecniche per l'elaborazione degli studi geologici a supporto degli strumenti urbanistici.* Il principio ispiratore di queste norme è quello di uno sviluppo equilibrato e sostenibile del territorio attraverso la sua edificazione e infrastrutturazione a seguito di un'adeguata valutazione dei rischi naturali e dell'applicazione di misure di prevenzione e di salvaguardia per la loro minimizzazione.
Sul fronte della prevenzione del rischio valanghivo, nel corso degli ultimi vent'anni, le Regioni e le Province Autonome dell'arco alpino italiano si sono coordinate per migliorare i servizi di previsione delle valanghe ed i prodotti d'informazione al pubblico per la prevenzione degli incidenti da valanga, a seguito dell'istituzione nel 1983 dell'AINEVA (Associazione Interregionale *Neve e Valanghe),* in cui Arpa Piemonte rappresenta la Regione Piemonte all'interno del Comitato Tecnico Direttivo.
Gli effetti di questa collaborazione tra le strutture tecniche delle singole Amministrazioni Regionali e Provinciali, addette alle attività legate alla prevenzione del rischio valanghivo, si rilevano innanzitutto nell'adozione di metodologie condivise per

l'effettuazione di misure e prove per l'analisi del manto nevoso, di standard nella elaborazione e nella diffusione al pubblico delle informazioni nivo-meteorologiche. Inoltre l'associazione svolge un ruolo primario nella divulgazione delle conoscenze in campo nivologico attraverso la pubblicazione della rivista quadrimestrale *Neve e Valanghe* e nel campo della formazione professionale in materia nivologica, riconosciuto a livello nazionale.
La previsione del pericolo valanghe costituisce un determinante elemento nella prevenzione dei rischi valanghivi e si attua su due livelli territoriali: quello regionale e quello locale.
A livello regionale, Arpa Piemonte contribuisce con la redazione trisettimanale di un bollettino nivologico, identificato come strumento previsionale all'interno del sistema d'allertamento piemontese per la Protezione Civile, gestito dal Centro Funzionale dell'Area Previsione e Monitoraggio Ambientale, secondo gli indirizzi operativi forniti dalla Direttiva del P.C.M. del 27/02/2004.
Il bollettino nivologico a scala regionale viene redatto sulla base delle previsioni meteorologiche a breve e a medio termine e dei dati nivo-meteorologici acquisiti dalla rete automatica regionale, della rete di osservatori manuali, dei risultati di rilievi, analisi stratigrafiche del manto nevoso e prove di stabilità del manto nevoso.
Il bollettino contiene informazioni sulla copertura nevosa (altezza media del manto a 2'000 m, distribuzione dell'innevamento, quantità di neve fresca), sulle condizioni del manto nevoso (stratigrafia, consolidamento, individuazione di elementi predisponenti il distacco di valanghe), sul grado di pericolo valanghe (tipo e dimensioni delle valanghe cadute e attese, localizzazione delle zone pericolose) e sulla sua evoluzione nelle successive 24-48 ore. Il grado di pericolo viene stabilito secondo le definizioni della Scala di Pericolo Europea unificata e differenziato per 7 aree geografiche dell'arco alpino piemontese.

A livello locale, il supporto tecnico al Sindaco nello svolgimento dei suoi compiti istituzionali per garantire la pubblica incolumità in situazioni di pericolo da valanghe compete alle Commissioni Locali Valanghe, istituite dalle Comunità Montane, in base all'articolo 40 (*Difesa dalle valanghe*) della L.R. 02/07/1999, n. 16, *Testo unico delle leggi sulla montagna,* "per l'esercizio dell'attività di controllo dei fenomeni nivologici ed al fine di segnalare il pericolo di valanghe su centri o nuclei abitati, opere pubbliche ed impianti o infrastrutture di interesse pubblico".
Il relativo regolamento attuativo, promulgato con Decreto del P.G.R. 07/06/2002, n. 4/R, *Modalità costitutive e di funzionamento delle Commissioni Locali Valanghe,* attribuisce ad Arpa Piemonte, in virtù del trasferimento di funzioni attuato dalla L.R. 28/2002, il ruolo di supporto tecnico-scientifico alle Commissioni Locali Valanghe per l'adozione di metodologie operative comuni sul territorio regionale e per la messa a disposizione di dati nivo-meteorologici.


Arpa

Bollettino nivologico

Regione Piemonte

emesso il 23/02/05 ore 14,00 e valido 48 ore

Condizioni di innevamento

Dopo le nevicate che hanno interessato durante lo scorso weekend i settori meridionali della nostra regione fino alle quote di pianura, apportando fino a 50-60 cm di neve fresca sull'Appennino e sulle Alpi Liguri, 30-40 cm sulle A. Marittime e 10-20 cm sulle A. Cozie meridionali, sono perdurate condizioni moderatamente instabili caratterizzate da temperature rigide e nuovi deboli apporti nevosi (0-5 cm) sui rilievi alpini di tutti i settori.

Stato del manto nevoso

Le basse temperature che stanno caratterizzando la settimana in corso non favoriscono un rapido consolidamento del manto nevoso al suolo e soprattutto il suo legame con la neve recente. Sui settori dalle A. Liguri alle A. Cozie meridionali la coltre di neve fresca a debole coesione poggia ancora con scarsa aderenza sul manto nevoso pregresso, costituito per lo più da accumuli di neve ventata o direttamente sul terreno. L'attività eolica recente ha inoltre contribuito a formare nuovi depositi prevalentemente alle esposizioni meridionali, nonché in conche e avvallamenti, di neve soffice, talvolta di notevole spessore. Nei settori a Nord delle A. Cozie lo stato del manto nevoso rimane invariato con vecchi depositi di neve ventata su strati deboli, perlopiù caratterizzati da cristalli angolari, in via di lento consolidamento.

LEGENDA

Altezza neve al suolo (cm)

0
1 - 20
21 - 50
51 - 100
101 - 150
> 150

in alto: altezza neve al suolo
in basso: altezza neve fresca (ultime 24 ore)

Indice di pericolo valanghe

1 - Debole
2 - Moderato
3 - Marcato
4 - Forte
5 - Molto forte
- Bollettino non emesso

↑ in aumento
↓ in diminuzione
no freccia: stazionario

Altezza neve al suolo e neve fresca a 2000 m s.l.m.

Indice di pericolo valanghe attuale e tendenza per le prossime 48 ore

Pericolo di valanghe

Al momento non si segnala attività valanghiva spontanea. Tuttavia nei settori delle A. Liguri e Marittime permane la possibilità di distacchi spontanei di valanghe di neve a debole coesione di media grandezza in particolare sulle zone di confine. Sugli stessi settori e su quello delle A. Lepontine è possibile provocare il distacco di valanghe a lastroni anche con debole sovraccarico su pendii ripidi, canali e avvallamenti, in prossimità di creste e dorsali. Su A. Pennine, Graie e Cozie settentrionali il distacco è possibile soprattutto con un forte sovraccarico sui pendii più ripidi.

Il prossimo bollettino sarà emesso il 25/02/2005 alle ore 14,00.

Figura 2.6.4
Il bollettino nivologico per la Regione Piemonte di previsione del pericolo valanghe

2.6.3 La cartografia tematica delle valanghe per la pianificazione territoriale

2.6.3.1 Carte di Localizzazione Probabile delle Valanghe

La conoscenza delle problematiche legate al verificarsi delle valanghe nei territori montani è di fondamentale importanza per gli organi tecnici delle Amministrazioni Pubbliche impegnati ai vari livelli della pianificazione e della gestione del territorio alpino.
Le *Carte di Localizzazione Probabile delle Valanghe* (CLPV) costituiscono un prodotto cartografico di sintesi delle conoscenze sui fenomeni valanghivi, realizzato dalle Regioni e dalle Province Autonome aderenti all'AINEVA, secondo una metodologia condivisa ed elaborata all'inizio degli anni Settanta dall'Istituto Geografico Nazionale di Francia. Tale prodotto è adottato come documento di riferimento per la realizzazione di approfondimenti successivi, finalizzati alla pianificazione dell'uso del territorio montano.

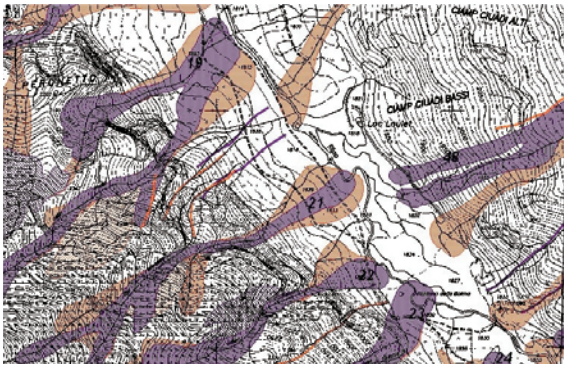


Figura 2.6.5
Stralcio di *Carta di Localizzazione Probabile delle Valanghe*

Le CLPV sono il prodotto integrato di uno studio eseguito sia a tavolino, mediante fotointerpretazione, sia sul territorio, attraverso sopralluoghi sull'area di indagine, con interviste a testimoni locali e ricerche di dati d'archivio (archivi parrocchiali, forestali, comunali, editoriali).
Il lavoro viene condotto in tre fasi consequenziali:

- individuazione dei siti valanghivi mediante la fotointerpretazione di aerofotogrammi estivi;
- effettuazione di sopralluoghi sul territorio oggetto d'indagine e raccolta di testimonianze orali;
- verifica dei dati di terreno con informazioni storiche d'archivio e bibliografiche.

Le CLPV riportano le delimitazioni dei siti valanghivi, ovvero delle aree soggette al movimento simultaneo e repentino della coltre nevosa, nell'estensione massima nota al momento di redazione della carta, anche se tale perimetrazione fa riferimento a eventi occorsi in epoca storica e con tempi di ritorno elevati, anche superiori ai 100 anni.
Per ogni sito valanghivo vengono compilate schede analitiche che riportano i dati topografici e morfologici delle tre aree che lo caratterizzano: la zona di distacco, quella di scorrimento e quella d'arresto. La descrizione dei danni accertati con la relativa data di accadimento, nonché delle opere di difesa realizzate (rappresentate anche nella carta tematica con simbologia specifica), completano la caratterizzazione del sito, insieme ad eventuali documentazioni fotografiche, giornalistiche o tecniche.
Fino ad un ventennio addietro, in Piemonte, la disponibilità di una raccolta organica di dati d'archivio sulle valanghe era rappresentata esclusivamente dall'*Archivio Storico-Topografico delle Valanghe in Italia,* (Capello, 1977, 1980) per il territorio delle Province di Cuneo e di Torino.
Contestualmente alla nascita del Servizio Nivometrico Regionale, nel 1983, in occasione dei principali eventi di precipitazione, fu avviata un'indagine permanente sui fenomeni valanghivi in Piemonte. Tale indagine fu condotta tramite l'adozione di apposite schede, uniformate a livello di arco alpino nell'ambito delle attività di coordinamento interregionale operate dall'AINEVA (Modello 7) e rilevate da collaboratori della rete nivometrica regionale.
Nel 1993, il Settore Meteoidrografico della Regione Piemonte ha iniziato la realizzazione di CLPV, in scala 1:25.000, in collaborazione con il Servizio Difesa del Suolo della Provincia di Torino e il Servizio Cartografico della Provincia di Cuneo.
Per approfondire ulteriormente la base di conoscenze relativa agli eventi valanghivi del passato meno prossimo, è stata condotta un'indagine negli archivi delle principali testate giornalistiche locali della provincia di Torino per il periodo storico 1885-1951 (Tomasuolo, 2001); lo studio ha permesso di censire 203 eventi valanghivi storici, associati a 162 siti diversi. Le informazioni tratte dagli articoli giornalistici dell'epoca hanno permesso di validare la perimetrazione di siti valanghivi già noti e, in molti casi, hanno incrementato il *database* relativo agli eventi e ai danni prodotti dalle valanghe, sebbene in molti casi dalla lettura degli articoli non sia stato possibile dedurre con precisione l'estensione areale della valanga. Le informazioni cartografiche tematiche e documentali raccolte sono disponibili nel Sistema Informativo Valanghe, prodotto con la collaborazione del Servizio Difesa del Suolo della Provincia di Torino, consultabile sul sito *internet* di Arpa Piemonte.

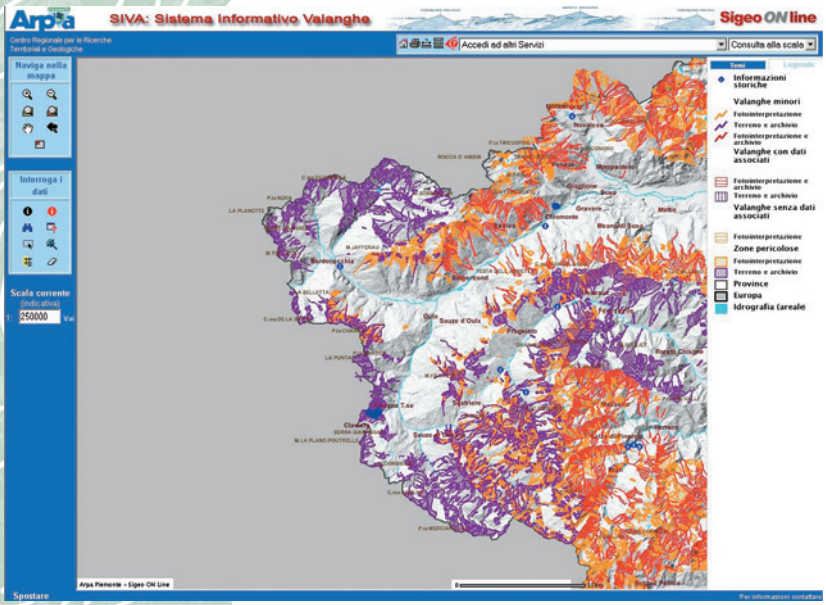


Figura 2.6.6
Il Sistema Informativo Valanghe condiviso tra Arpa Piemonte e Provincia di Torino

2.6.3.2 Carte di pericolosità

L'adozione di misure di mitigazione del rischio in aree urbanizzate presuppone lo svolgimento di indagini a progressivi livelli di approfondimento, a partire dalla rappresentazione del dato storico di massima estensione nota dei fenomeni valanghivi.
La disponibilità di un catasto dei fenomeni valanghivi del passato e la sua sintesi in una CLPV è da considerarsi il primo livello di un processo di progressivo affinamento degli strumenti di prevenzione dei fenomeni nel contesto della pianificazione territoriale. Questo livello di approfondimento è appropriato alla scala di pianificazione dei Piani Territoriali e ha costituito la base metodologica, ad esempio, per la redazione dell'Atlante dei Rischi Idraulici e Idrogeologici allegato al Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) adottato dall'Autorità di Bacino del Fiume Po con Deliberazione del Comitato Istituzionale n. 18 in data 26/04/2001.
Una corretta e approfondita valutazione dell'interazione tra fenomeni valanghivi e previsioni d'utilizzo urbanistico locali deve essere opportunamente basata sull'elaborazione, nelle fasi preliminari alla stesura dei Piani Regolatori Generali Comunali, di specifici studi finalizzati alla delimitazione di aree con differente grado di esposizione al pericolo di valanghe. Le perimetrazioni vengono generalmente effettuate con riferimento alla frequenza ed intensità dei fenomeni considerati.
A supporto dell'attività legislativa in materia di nor-

me per la pianificazione territoriale di competenza delle regioni, negli ultimi quattro anni l'AINEVA, attraverso una convenzione stipulata con il Dipartimento di Ingegneria Idraulica dell'Università di Pavia, ha promosso un'attività di ricerca, a cui Arpa Piemonte ha fattivamente collaborato, orientata alla definizione di criteri scientifici per la perimetrazione delle zone esposte al pericolo di valanghe.
La ricerca si è concretizzata con la pubblicazione di due documenti di indirizzo: *Linee di indirizzo per la gestione del pericolo di valanghe nella pianificazione territoriale* e *Criteri per la perimetrazione e l'utilizzo delle aree soggette al pericolo di valanghe,* approvati dall'Assemblea AINEVA rispettivamente il 23/02/2001 e il 19/06/2002.
A questi due documenti di indirizzo, che hanno definito il quadro programmatico delle diverse fasi della pianificazione urbanistica e territoriale, si sono aggiunte le *Linee guida metodologiche per la perimetrazione delle aree esposte al pericolo di valanghe* che, sviluppando aspetti di natura tecnico-ingegneristica, forniscono criteri per l'elaborazione degli studi di dettaglio finalizzati alla redazione dei Piani delle zone esposte a valanga (Barbolini *et al.*, 2004a).
Il documento *Criteri per la perimetrazione e l'utilizzo delle aree soggette al pericolo di valanghe* definisce i criteri da adottare per la perimetrazione delle aree esposte e suggerisce i relativi regimi di utilizzo a cui subordinarne la fruibilità urbanistica. La definizione dei differenti gradi di esposizione al pericolo, espressi sostanzialmente attraverso i parametri del tempo di ritorno della valanga e della sua pressione di impatto, comporta una perimetrazione (seppure temporanea e soggetta a potenziali continui aggiornamenti) delle aree soggette a valanghe, attraverso l'impiego di modelli matematici, supportata da dati storici e di terreno. La perimetrazione di aree a diversa pericolosità diventa pertanto uno strumento indispensabile al fine di definire il corretto regime di utilizzo dei suoli nell'ambito della redazione degli strumenti urbanistici dei comuni montani e, conseguentemente, dei Piani di Protezione Civile Comunale.
La classificazione proposta prevede la definizione di tre zone, a pericolosità decrescente.

Zona rossa (zona ad elevata pericolosità)
Sono classificate come zone rosse (zone ad elevata pericolosità) le porzioni di territorio che possono essere interessate con una certa frequenza da valanghe, anche con modesto potenziale distruttivo, o più raramente da valanghe altamente distruttive. In particolare, una porzione di territorio è attribuita alla zona rossa quando esiste la possibilità che in essa si producano:
- valanghe *frequenti* (per le quali si assume convenzionalmente un tempo di ritorno di riferimento pari a 30 anni) che esercitano una pressione uguale o superiore a 3 kPa;
- valanghe *rare* (per le quali si assume convenzionalmente un tempo di ritorno di riferimento pari a 100 anni) che esercitano una pressione uguale o superiore a 15 kPa.

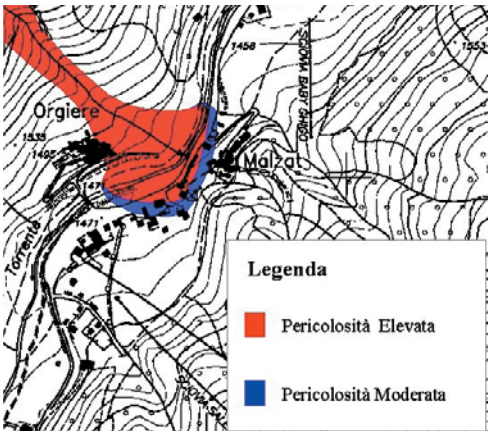


Figura 2.6.7
Esempio di perimetrazione di zone a diversa pericolosità da valanghe ottenuta attraverso l'analisi di dati storici e di terreno e con l'applicazione di un modello di simulazione della dinamica valanghiva

Una sola di queste due condizioni è di per sé sufficiente per attribuire alla zona rossa la porzione di territorio in esame; per tali aree è raccomandabile l'applicazione di vincoli urbanistici di inedificabilità.

Zona blu (zona a moderata pericolosità)
Sono classificate come zone blu (zone a moderata pericolosità) le porzioni di territorio che possono essere interessate con una certa frequenza dagli effetti residuali di valanghe, o più raramente da valanghe moderatamente distruttive. In particolare, una porzione di territorio è attribuita alla zona blu quando esiste la possibilità che in essa si verifichino:
- valanghe *frequenti* (per le quali si assume convenzionalmente un tempo di ritorno di riferimento pari a 30 anni) che esercitano una pressione inferiore a 3 kPa;
- valanghe *rare* (per le quali si assume convenzionalmente un tempo di ritorno di riferimento pari a 100 anni) che esercitano una pressione compresa tra 3 e 15 kPa.

Una sola di queste due condizioni è di per sé sufficiente per attribuire alla zona blu la porzione di territorio in esame; per tali aree sono previsti vincoli urbanistici di edificabilità con restrizioni.

Zona gialla (zona a bassa pericolosità)
Sono classificate come zone gialle (zone a bassa pericolosità) le porzioni di territorio che possono esse-

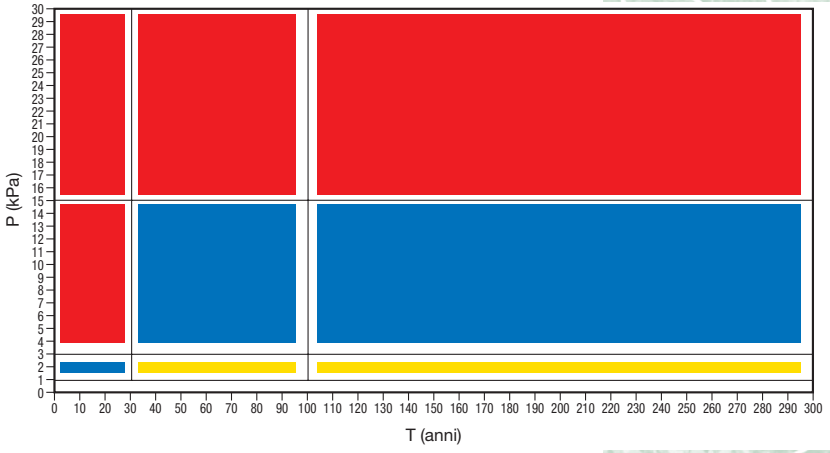


Figura 2.6.8
Schema di rappresentazione delle zone a diversa pericolosità in funzione della frequenza e delle pressioni d'impatto delle valanghe di progetto (Barbolini, comunicazione personale)

re interessate dagli effetti residuali di valanghe di accadimento raro. In particolare una porzione di territorio è attribuita alla zona gialla quando esiste la possibilità che in essa si verifichino valanghe *rare* (per le quali si assume convenzionalmente un tempo di ritorno di riferimento pari a 100 anni) che esercitino una pressione inferiore a 3 kPa.
Andranno altresì delimitate in giallo le porzioni di territorio interessate dall'arresto di eventi valanghivi di accadimento *eccezionale* (per i quali si può assumere indicativamente un tempo di ritorno di riferimento pari a 300 anni).
Per tali aree si può ammettere l'edificabilità con riserva.

2.6.4 Misure per la mitigazione del rischio valanghivo nel contesto della pianificazione e dell'uso del territorio montano

Nell'affrontare le problematiche connesse con il rischio valanghivo, al fine di delineare le misure per la sua mitigazione, si intende introdurre, come nel caso di qualsiasi altro rischio naturale, alcune definizioni terminologiche e concettuali che identificano le misure preventive, strutturali e non, il ruolo della previsione a breve e medio termine, i soggetti implicati nei sistemi di allertamento alle diverse scale (da quella sinottica regionale a quella del singolo comune o di una porzione di esso – ad esempio di comprensorio sciistico), la necessaria educazione del comportamento di fronte al rischio ed infine alcuni aspetti relativi alla normativa connessa alla problematica specifica.
La prevenzione contempla tutte le misure adottate in anticipo, prima dell'insorgere del rischio, al fine di diminuire, evitare o mitigare i danni attesi come conseguenza dell'insorgenza del fenomeno in questione. Si tratta di misure realizzate a lungo termine e che in generale comportano l'adeguata pianificazione e gestione del territorio in funzione dei risultati ottenuti al termine di un organico lavoro propedeutico (di cui si è gia ampiamente parlato nelle precedenti sezioni) e che sostanzialmente si traducono nell'elaborazione di una zonazione della pericolosità per le aree esposte a valanghe. A questi provvedimenti si affiancano e seguono azioni di carattere strutturale (opere di ingegneria classica, ingegneria naturalistica, miglioramenti selviculturali, ecc.) o non strutturale (legislazione e normative sugli usi del suolo in zone di rischio, piani di protezione civile, piani di gestione del rischio nei comprensori sciistici, ecc.).
La soluzione mediante misure strutturali, nel caso dei centri abitati e delle arterie di collegamento viario principali, è stata quella prevalentemente adottata fino a un passato recente, sostenuta da una cultura di scarsa propensione a convivere e quindi a gestire il rischio (ad esempio attraverso temporanee sospensioni di esercizio di impianti di risalita o chiusure temporanee della viabilità, ecc.) e che mira piuttosto a soluzioni radicali, anche se molto più onerose, dei problemi.
Negli ultimi anni si è diffusa, soprattutto all'estero, una linea d'intervento basata sulla gestione del rischio attraverso un equilibrio tra l'adozione di misure strutturali e non strutturali, più rispettosa dell'ambiente, per quello che concerne i comprensori sciistici e le infrastrutture stradali, con la possibilità di intervenire attivamente mediante il distacco programmato delle masse nevose contestualmente alla chiusura preventiva delle aree a rischio a seguito dell'insorgere di situazioni critiche.
Alla prevenzione si attribuiscono quindi le azioni connesse alla individuazione e caratterizzazione approfondita del fenomeno ed alla perimetrazione delle zone potenzialmente da esso interessate (CLPV, Piani delle Zone Esposte a Valanghe, Piani Urbanistici a scala territoriale e locale, ecc.), alle misure legislative nazionali e regionali e alle normative specifiche di settore (limitazioni all'uso del suolo in aree a rischio, Piani di Protezione Civile, normativa relativa alla sicurezza degli impianti a fune, ecc.), alle parallele misure strutturali (opere di difesa attive o passive) realizzabili per la mitigazione del rischio.
Alla previsione si riferisce invece, per quello che concerne il ruolo della struttura di Arpa Piemonte a questo dedicata, tutta quella serie di operazioni che, in funzione della registrazione dei fenomeni che interessano il territorio regionale e delle previsioni meteorologiche a breve e medio termine, porta all'emissione di bollettini di previsione del pericolo valanghe a scala regionale.

2.6.4.1 Piste da sci e impianti di risalita

Nel caso dei comprensori sciistici, che rappresentano una realtà fondamentale dal punto di vista socio-economico e turistico per diverse vallate alpine piemontesi, è opportuno accennare alle normative di maggior rilievo, nazionali e regionali, che definiscono i requisiti di sicurezza da valanghe per gli impianti a fune:

- *D.M. 04/08/1998, n. 400 Regolamento generale per le funicolari aeree e terrestri in servizio pubblico destinate al trasporto di persone;*
- *D.M. 05/12/2003, n. 392 Regolamento concernente modifica dell'art.7 del D.M. 4 agosto 1998, n. 400;*
- *L.R. 14/12/1989 Disciplina degli impianti funiviari in servizio pubblico per il trasporto di persone;*
- *Decreto del P.G.R. 29/11/2004, n. 13/R Regolamento regionale relativo alle procedure per l'approvazione dei progetti per la realizzazione di nuovi impianti a fune e per l'ammodernamento di impianti esistenti da parte delle comunità montane.*

Per quanto concerne le componenti relative all'equilibrio idrogeologico dei versanti e alla compa-



Figura 2.6.9
Opere fermaneve (ponti da neve in acciaio) a difesa dalle valanghe di un impianto di risalita nel Vallone del Rio Nero, in Comune di Cesana T.se (comprensorio sciistico della Via Lattea)

tibilità ambientale degli interventi, si applicano le normative regionali relative agli interventi da eseguire in terreni sottoposti a vincolo idrogeologico (L.R. 09/08/1989, n. 45), alle disposizioni concernenti la compatibilità ambientale e le procedure di valutazione (L.R. 14/12/1998, n. 40) ed, infine, alle specifiche tecniche per l'elaborazione degli studi geologici a supporto dell'elaborazione dei Piani Regolatori Generali Comunali (L.R. 05/12/1977, n. 56 e s.m.i. e Circolare del P.G.R. n. 7/LAP 08/05/1996), le cui norme di attuazione definiscono i requisiti rispetto ai quali gli impianti di risalita e le piste da sci devono essere conformemente realizzati.

Le varie normative definiscono un quadro legislativo piuttosto articolato e complesso, in cui vengono perseguiti diversi fini, primariamente quello di garantire la sicurezza di persone, beni ed infrastrutture, contemperando allo stesso tempo l'esigenza di conservazione degli equilibri idrogeologici e quella di ottimizzazione della compatibilità delle opere col contesto ambientale alpino.

Per la realizzazione e l'esercizio di nuovi impianti a fune, nell'iter istruttorio relativo alle procedure per l'ottenimento dell'autorizzazione, il recente D.M. n. 392 del 05/12/2003, stabilisce che devono essere verificate da parte dell'autorità competente le condizioni di *immunità dal pericolo di valanga, ovvero l'efficacia degli interventi proposti.*

Devono pertanto essere predisposti dal soggetto proponente, in sede di progettazione, gli interventi di difesa atti ad evitare che le valanghe investano gli elementi strutturali fissi dell'impianto; ci si riferisce pertanto a tutte le tipologie di interventi strutturali di tipo attivo (opere di stabilizzazione del manto nevoso, reti fermaneve, ponti da neve, ecc.) o di tipo passivo (argini o cunei deviatori, ecc.) che impediscano alla massa nevosa di raggiungere i manufatti.

L'aspetto innovativo introdotto dal D.M. 392/03 è rappresentato dall'aver configurato la possibilità alternativa di mettere in atto misure attive di gestione del rischio, consistenti nel distacco controllato di contenute masse nevose, che comunque non devono raggiungere gli elementi strutturali fissi dell'impianto. Qualora il rischio di valanga interessi il solo tracciato dell'impianto e non i suoi elementi strutturali è ammessa la chiusura temporanea (misura preventiva) dell'impianto fino al superamento della situazione di rischio.

Nel caso in cui vi siano le condizioni per attuare misure di gestione del rischio attraverso la chiusura preventiva dell'impianto e il distacco programmato, deve essere redatto e approvato un Piano di Gestione della Sicurezza che individua le modalità operative e gli accorgimenti da adottarsi in relazione alla sicurezza e un eventuale relativo Piano di Intervento per il Distacco Artificiale di Valanghe (PIDAV).

Il Piano di Gestione della Sicurezza deve essere attuato da personale in possesso di attestato di



Figura 2.6.10
Opere di difesa attiva da valanghe e esploditori a gas per il distacco programmato delle valanghe (individuati dai cerchi rossi) sul versante NE del Monte Fraiteve (comprensorio sciistico della Via Lattea)



Figura 2.6.11
Effettuazione di rilevamenti nivo-meteorologici per la previsione locale del pericolo di valanghe

frequenza a corsi professionali comprovanti la competenza in materia in relazione al ruolo ricoperto nell'ambito del piano: tale attestazione deve essere rilasciata dall'AINEVA o da istituzioni pubbliche specializzate italiane o straniere.
La Regione Piemonte non dispone ancora di una legge che regolamenti la sicurezza delle piste da sci, compresa quella relativa al rischio valanghivo, sebbene sia in discussione nella competente Commissione Consiliare un disegno di legge che, fra l'altro, dovrà recepire e dare attuazione alla recente legge *Norme in materia di sicurezza nella pratica degli sport invernali da discesa e da fondo* (L. 24/12/2003, n. 363).
In sede istruttoria di procedimenti relativi alla fase di verifica, ai sensi dell'art. 10 della L.R. 40/1998, Disposizioni concernenti la compatibilità ambientale e le procedure di valutazione, a cui sono sottoposti i progetti di piste da sci con sviluppo complessivo superiore a 1'500 m, vengono analizzati anche gli aspetti relativi alla sicurezza delle opere, in particolare in relazione al pericolo da valanghe.
In situazioni particolari e con motivate argomentazioni tecniche, ad esempio dove l'adozione di opere strutturali fisse risulti eccessivamente onerosa o di eccessivo impatto paesaggistico, la sicurezza da valanghe su piste da sci può essere garantita anche attraverso l'adozione di misure gestionali, sull'esempio di quanto da diversi anni avviene nei paesi d'oltralpe e in Italia nella Provincia Autonoma di Trento, come prevista dal regolamento attuativo della Legge Provinciale 21/04/1987 *Disciplina delle linee funiviarie in servizio pubblico e delle piste da sci.*
Il Piano di Gestione della Sicurezza è basato sul monitoraggio continuo delle condizioni meteorologiche e del manto nevoso nell'area del comprensorio per la previsione locale del pericolo valanghe e sull'applicazione di idonee procedure per la chiusura preventiva delle piste in condizioni critiche.
Un mansionario operativo definisce le procedure per l'acquisizione di dati nivo-meteorologici giornalieri da parte del personale responsabile o acquisiti da stazioni nivometriche automatiche; in taluni casi possono essere predisposte inoltre eventuali aste nivometriche nei settori soggetti al distacco di valanghe, per una lettura a distanza dell'altezza del manto nevoso.
La necessità di chiusura preventiva delle piste da sci a rischio e la loro successiva riapertura viene stabilita dal responsabile della sicurezza attraverso l'adozione di criteri scientifici di riferimento (altezze critiche di precipitazione, attività eolica, temperatura, ecc.) ed altre informazioni (test di stabilità, effetti di eventuali distacchi artificiali con esplosivo).

In molti casi la gestione di un piano della sicurezza in relazione al rischio valanghivo viene affiancata anche dal supporto operativo del distacco programmato delle valanghe.
Il distacco programmato delle valanghe è attuabile con diversi sistemi, da quelli più tradizionali con esplosivi classici a quelli più innovativi che impiegano sostanze gassose (idrogeno o propano, miscelati con ossigeno), di più semplice utilizzo in quanto non soggette alle norme di sicurezza nel trasporto e nell'utilizzo applicate agli esplosivi.
Questi ultimi sistemi consistono nell'installazione in alta quota di dispositivi di distacco attivabili in remoto; il piano per l'impiego di questi dispositivi presuppone l'adozione di rigorose procedure di sicurezza per evitare il rischio di incidenti e uno studio modellistico della dinamica valanghiva, al fine di valutare le modalità e le tempistiche operative che permettono di innescare il distacco in condizioni ottimali in funzione delle altezze di neve al suolo, consentendo l'analisi delle distanze di arresto delle valanghe e degli eventuali effetti derivanti.
Una approfondita rassegna della teoria del distacco programmato delle valanghe e dei vari sistemi in uso è rappresentata in Cresta (2002).
Un esempio di applicazione di procedure gestionali per la sicurezza da valanghe è rappresentato dal caso del comprensorio sciistico del Belvede-

re a Macugnaga (VB). Le caratteristiche morfologiche tipicamente alpine del versante orientale del Massiccio del Monte Rosa condizionano fortemente la fruibilità turistica invernale dell'ambiente, in quanto valanghe anche di grandi dimensioni possono interessare il comprensorio.
Nel 1991, fu commissionato dalla Regione Piemonte alla Divisione Nivologia del CEMAGREF (*Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forets*) di Grenoble (F) uno specifico studio denominato *Studio dei rischi valanghivi sul comprensorio sciistico ovest di Macugnaga* (Buisson & Charlier, 1993), che permise di definire gli scenari di rischio da valanga per gli impianti di risalita e le piste da sci ubicati nell'area Pecetto – Burki – Belvedere.
In tale studio vennero analizzate le possibili soluzioni attuabili per garantire la sicurezza d'esercizio degli impianti presenti nel comprensorio, valutando specificamente le possibili alternative fra interventi strutturali e procedure di gestione del rischio tramite distacco programmato delle valanghe, in analogia con quanto veniva attuato in Francia in contesti simili.
La realizzazione di opere strutturali di difesa attiva (reti o ponti da neve) risultò non attuabile dal punto di vista tecnico, oltre che da quello economico, per l'ampiezza delle aree di distacco da bonificare e per la presenza di aree con copertura glaciale sulle quali non è possibile fondare opere.
Sulla base di questi vincoli e di analoghe esperienze condotte già da tempo in Francia, i tecnici del CEMAGREF prospettarono l'attuazione di procedure di gestione del rischio attraverso la chiusura preventiva del comprensorio sciistico, condotta con criteri scientifici basati sull'acquisizione e l'analisi di dati nivo-meteorologici, osservazioni e test di stabilità del manto nevoso da parte di un'équipe di personale qualificato professionalmente, nominato dalla Società esercente.
Dal 1993 ad oggi nel comprensorio sciistico occidentale di Macugnaga viene quindi attuato, su specifiche disposizioni conformi agli esiti dello studio sopra citato e definite dall'allora Settore Prevenzio-



Figura 2.6.12
Test diretto di stabilità del manto nevoso *(Rutschblock)*

Figura 2.6.13
Effetti su un bosco di larici di una valanga nubiforme scesa dalla Cima Jazzi in località Burki, Macugnaga (VB). Foto di R. Cresta



ne Rischio Geologico, Meteorologico e Sismico della Regione Piemonte, un Piano di Sicurezza Valanghe che costituisce parte integrante del regolamento d'esercizio degli impianti di risalita dell'area.
A supporto della gestione del Piano è prevista la prossima attuazione di un PIDAV grazie all'installazione in quota di quattro esploditori a gas e all'impiego di esplosivi trasportati con elicottero per la bonifica dei versanti in condizioni d'innevamento critiche.

2.6.5 Un caso di studio: la pericolosità da valanga sulla viabilità dell'alta Val Susa e Val Chisone

2.6.5.1 Finalità

A supporto delle attività del Gruppo di Pianificazione per la Sicurezza dei XX Giochi Olimpici Invernali Torino 2006, istituito dalla Prefettura di Torino, all'interno del quale il Servizio di Protezione Civile della Provincia di Torino ha il compito di definire lo scenario di rischio conseguente a precipitazioni nevose intense e prolungate, l'Area Previsione e Monitoraggio Ambientale di Arpa Piemonte ha effettuato uno studio del rischio valanghivo sulle vie di comunicazione nell'area olimpica.
Lo studio costituisce un approfondimento delle conoscenze sui fenomeni valanghivi rappresentati nelle CLPV dell'Alta Val di Susa e Alta Val Chisone e contenute nel Sistema Informativo Valanghe condiviso tra Arpa Piemonte e Provincia di Torino.
Esso rappresenta un contributo nella prospettiva di gestione di una situazione in condizioni nivometeorologiche critiche che potrebbero determinare effetti valanghivi sulla viabilità d'accesso all'area olimpica alpina. In considerazione dell'importanza strategica che riveste la mobilità nel contesto dello svolgimento dell'evento olimpico (10-26/02/2006) e paralimpico (10-19/03/2006), i risultati dello studio sono mirati a fornire, attraverso opportune elaborazioni delle conoscenze disponibili sugli eventi valanghivi del passato e della predisposizione morfologica del territorio al distacco di valanghe, l'individuazione dei tratti di viabilità di fondovalle maggiormente esposti a valanghe al verificarsi di condizioni di innevamento critiche.
Gli scenari che ne derivano possono essere impiegati per ottimizzare, da parte degli enti e delle autorità responsabili della sicurezza del traffico sulle strade del territorio alpino coinvolto nell'evento olimpico, le procedure di chiusura preventiva della viabilità e le misure di salvaguardia da adottare per garantire la pubblica incolumità, con l'obiettivo di procedere ad un rapido ripristino della viabilità a emergenza conclusa.
Lo studio è stato condotto anche nella prospettiva di valutare, sito per sito, l'applicabilità di procedure di distacco programmato delle valanghe con esplosivi convenzionali o innovativi elitrasportati. L'adozione di sistemi di distacco programmato, ove attuabili, permetterebbero infatti una più agevole gestione dell'emergenza.

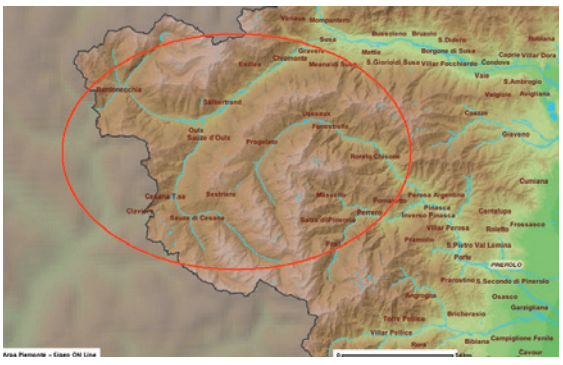


Figura 2.6.14
Individuazione del territorio montano dei Giochi Olimpici Invernali Torino 2006, oggetto dello studio

2.6.5.2 L'area di studio

L'area di studio è compresa nel settore alpino dei Giochi Olimpici Invernali Torino 2006 e riguarda in particolare il territorio montano soggetto ad attività valanghiva **(figura 2.6.14)**.

Nel dettaglio, le valli oggetto di studio sono:

- Alta Val Chisone, dal territorio comunale di Roure fino a quello di Sestriere;
- Alta Val di Susa, territorio a monte di Salbertrand, nei bacini della Dora di Cesana e della Dora di Bardonecchia.

Nell'ambito delle porzioni indicate di queste vallate sono stati studiati esclusivamente i siti valanghivi che interferiscono con le vie di comunicazione strategiche per la mobilità nel periodo olimpico.

2.6.5.3 La metodologia di lavoro

Il lavoro è stato organizzato secondo una classica metodologia scientifica. La prima fase si è sviluppata con la raccolta bibliografica dei dati documentali e di quelli cartografici, presenti negli archivi dell'Area Previsione e Monitoraggio Ambientale di Arpa Piemonte.
I dati storici sono stati raccolti in particolare consultando l'*Archivio Storico-Topografico delle Valanghe Italiane* (Capello, 1980) ed uno studio specifico effettuato su articoli di giornali locali d'epoca (Tomasuolo, 2001).
Per quanto riguarda la cartografia tematica si è fatto riferimento alle CLPV alla scala 1:25.000 dei comuni interessati.

La seconda fase è stata sviluppata con una campagna di rilevamento sul terreno, sito per sito, per la verifica e l'eventuale correzione dei dati pregressi e per la raccolta di dati riguardanti i siti valanghivi non ancora noti o non sufficientemente caratterizzati dalla bibliografia. Tale fase è stata anche

supportata dalla raccolta di testimonianze orali, in particolare di personale addetto allo sgombero neve sulle vie di comunicazione, per ottimizzare la perimetrazione e caratterizzare la frequenza dei fenomeni sui singoli siti valanghivi. Parallelamente all'indagine di terreno si è effettuata l'analisi fotointerpretativa stereoscopica di fotografie aeree a colori risalenti al 1979 e al 2000.
La terza fase è stata sviluppata con l'elaborazione grafica e concettuale dei dati raccolti con le prime due fasi. L'attribuzione di ogni singolo sito a una classe di probabilità (elevata, moderata o bassa) di distacco di valanghe in determinate condizioni d'innevamento di soglia critica, è stata definita sulla base di elementi geomorfologici, topografici e di copertura vegetazionale del sito. Le valutazioni effettuate sono state verificate attraverso un confronto con la documentazione storica disponibile e con gli effetti di un evento di precipitazione di moderata criticità, che agli inizi di marzo del 1993 diede luogo a fenomeni valanghivi di un certo rilievo sulla viabilità della Val Chisone e dei cui effetti si dispone di un dettagliato rilevamento.
La valutazione oggettiva dei valori di inclinazione del terreno per individuare le potenziali aree di distacco è stata ricavata dall'elaborazione del Modello Digitale del Terreno (DTM) con griglia di 10 m di lato, realizzato dal Centro Regionale per le Ricerche Territoriali e Geologiche di Arpa Piemonte, tramite il software ESRI© ArcGis, che ha permesso di suddividere il territorio d'indagine in classi d'inclinazione significative **(figura 2.6.16)**.
Le aree predisposte al distacco, ovvero con inclinazioni comprese tra 28° e 60°, sono state successivamente vagliate verificando la presenza di copertura arborea con l'impiego di ortofotocarte della Carta Tecnica Regionale, permettendo di discriminare le zone in cui la vegetazione arborea garantisce la stabilità del manto nevoso da quelle in cui l'effetto di trattenimento del manto è nullo o trascurabile.

Quale elemento aggravante nella valutazione della pericolosità del sito (intesa come ricorrenza attesa del fenomeno valanghivo e non la sua magnitudo, che non è stata considerata come elemento discriminante in relazione all'esigenza di individuare i tratti di viabilità maggiormente esposti al rischio di interruzione) è stata considerata la predisposizione morfologica delle singole aree di distacco ad essere sede di accumuli di neve ventata, in rapporto alla vicinanza a creste principali o a spartiacque secondari che possono influenzare la dinamica del trasporto e della deposizione della neve da parte del vento.
Ulteriori parametri considerati nel valutare la predisposizione del sito valanghivo al distacco e allo scorrimento su lunghe distanze delle masse nevose sono la rugosità del terreno e la geometria trasversale del pendio, ovvero il suo grado di canalizzazione e la tortuosità in pianta del canale di scorrimento.

SCHEMA METODOLOGICO

1 FASE PRELIMINARE
- RACCOLTA DI:
  - DOCUMENTAZIONE STORICA
  - DOCUMENTAZIONE BIBLIOGRAFICA
  - DOCUMENTAZIONE CARTOGRAFICA
  - DATI NIVO-METEREOLOGICI
- FOTOINTERPRETAZIONE DI RIPRESE AEROFOTOGRAMMETRICHE

2 RILEVAMENTI DI TERRENO
- VALIDAZIONE DELLA DOCUMENTAZIONE PREGRESSA
- ACQUISIZIONE DI DATI MORFOLOGICI E VEGETAZIONALI
- CENSIMENTO DELLE OPERE DI DIFESA ESISTENTI
- CENSIMENTO DEI DANNI PRODOTTI DALLE VALANGHE
- RACCOLTA DI TESTIMONIANZE ORALI

3 ELABORAZIONE DEI DATI
- ANALISI STATISTICA DEI DATI NIVO-METEOROLOGICI
- MODELLIZZAZIONE DEI FENOMENI VALANGHIVI
- DELIMITAZIONE CARTOGRAFICA DEI SITI VALANGHIVI
- STUDIO DELLA RELAZIONE INNEVAMENTO-EFFETTI VALANGHIVI PREGRESSI
- DEFINIZIONE DEGLI SCENARI DI RISCHIO

ATTRIBUZIONE DEL GRADO DI PERICOLOSITÀ AI SINGOLI SITI VALANGHIVI

Figura 2.6.15
Schema della metodologia di lavoro adottata

In casi di dubbia interpretazione, in aree dove la moderata pendenza e lo sviluppo lineare della zona di deposito della valanga non consentiva, sulla base di scarsi dati storici o di valutazioni di tipo semiquantitativo, di definire con la necessaria attendibilità il coinvolgimento della viabilità da parte di un evento valanghivo nelle condizioni d'innevamento configurate, si è proceduto alla modellizzazione della dinamica valanghiva attraverso l'impiego di un modello matematico monodimensionale per individuare le distanze d'arresto di una valanga per determinate altezze di neve al distacco. Il programma di calcolo dinamico numerico AVAL-

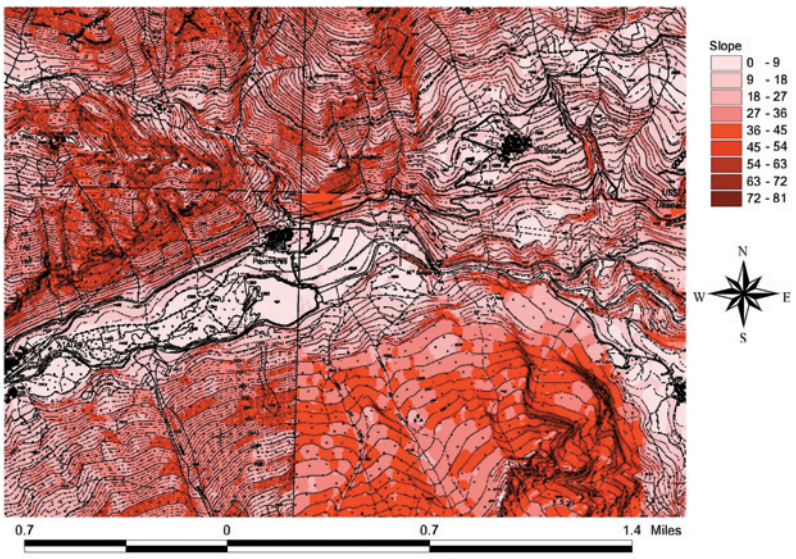


Figura 2.6.16
Stralcio della carta delle inclinazioni dell'area di studio, discriminate con un algoritmo applicato in ESRI© ArcGis

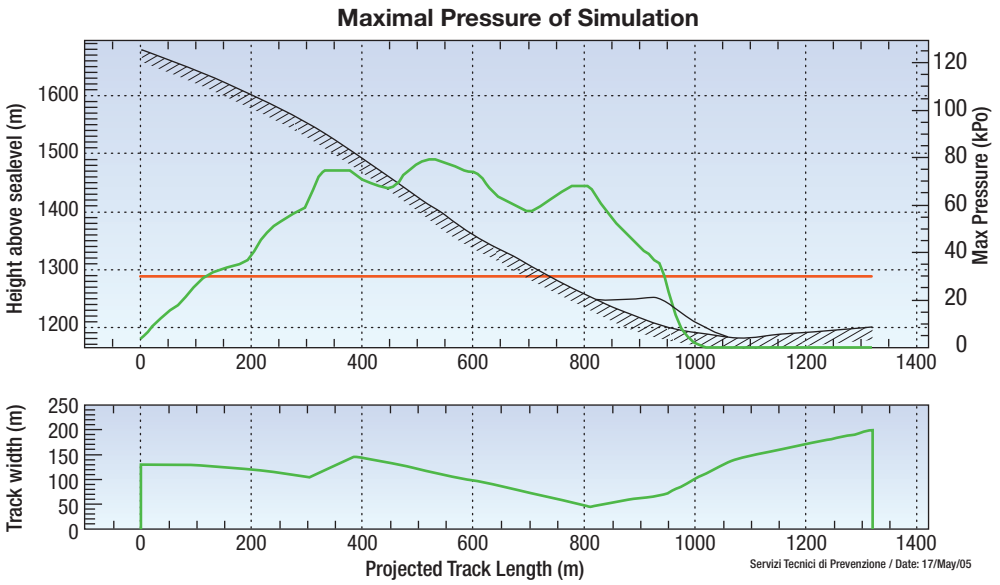


Figura 2.6.17
***Output* di una simulazione modellistica ottenuta con il software AVAL 1D per il calcolo della distanza d'arresto di una valanga**

1D impiegato, sviluppato dall'Istituto Federale per la Neve e le Valanghe di Davos (Christen *et al.*, 2002), permette di calcolare distanze di arresto, velocità e pressioni esercitate da valanghe di neve densa e di tipo polveroso. Sulla base dei risultati ottenuti è stato possibile discriminare le situazioni che presentavano maggiori incertezze, valutando criticamente i risultati della modellistica in modo cautelativo.

2.6.5.4
La documentazione cartografica

Ogni singolo sito valanghivo censito è stato rappresentato graficamente in un Sistema Informativo Geografico con l'applicativo ESRI© ArcView, che permette la gestione in un unico ambiente informatico di tutta la documentazione esistente georiferita per ogni singolo sito. Lo studio ha condotto all'individuazione e caratterizzazione di circa 60 siti valanghivi che interferiscono con la viabilità montana di interesse olimpico.
L'elaborato cartografico è redatto in scala 1:10.000 (con quadro d'insieme in scala 1:25.000): ciascun sito valanghivo cartografato viene definito con un limite e caratterizzato con un determinato colore.

Figura 2.6.18
Scheda di caratterizzazione del sito valanghivo

VALANGA N°
Tavola cartografica
Allegati fotografici

DESCRIZIONE GENERALE
- Provincia
- Comune
- Località
- Denominazione sito
- Bacino idrografico
- Sezione CTR

CARATTERISTICHE TOPOGRAFICHE
- Quota max distacco (m slm)
- Quota min arresto (m slm)
- Dislivello (m)
- Lunghezza reale (m)
- Superficie totale (m^2)

ZONA DI DISTACCO
- Ubicazione
- Morfologia
- Substrato
- Lunghezza max (m)
- Larghezza max (m)
- Inclinazione media (°)
- Esposizione
- Superficie totale (m^2)

ZONA DI SCORRIMENTO
- Ubicazione
- Morfologia
- Substrato
- Inclinazione media (°)
- Profilo
- Andamento planimetrico

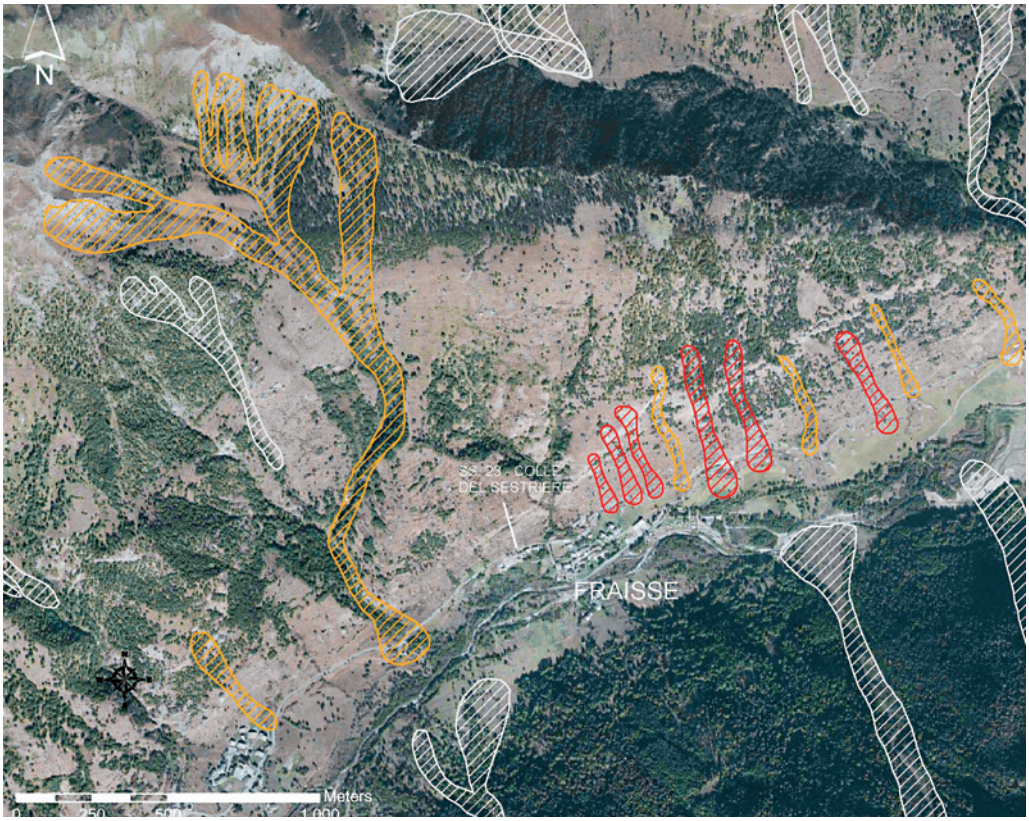
ZONA DI ARRESTO
- Luogo di arresto
- Morfologia
- Inclinazione Media (°)
- Costruzione antropiche
- Presenze di indizi

OPERE DI DIFESA ESISTENTI
- Tipologia

POSSIBILI INTERVENTI DI DIFESA
- Tipologia

DANNI
- Accertati
- Potenziali

Figura 2.6.19
Stralcio di cartografia tematica *Carta di Probabilità di Esposizione della Viabilitàalle Valanghe,* rappresentata su ortofotocarta





	Sito caratterizzato da fenomeni valanghivi con elevata probabilità di raggiungere la viabilità principale in condizioni di innevamento di soglia critica (neve fresca = 60-80 cm in 24/h).
	Sito caratterizzato da fenomeni valanghivi con moderata probabilità di raggiungere la viabilità principale in condizioni di innevamento di soglia critica (neve fresca = 60-80 cm in 24/h).
	Sito caratterizzato da fenomeni valanghivi con bassa probabilità di raggiungere la viabilità principale in condizioni di innevamento di soglia critica (neve fresca = 60-80 cm in 24/h).
	Sito censito nella Carta di Localizzazione Probabile delle Valanghe che, in condizioni di innevamento di soglia critica (neve fresca = 60-80 cm in 24/h), è sede di fenomeni valanghivi che non interessano la viabilità principale.

Figura 2.6.20
Siti valanghivi sulla ex Strada Statale n. 23 della Val Chisone

Per ogni sito è stata compilata una scheda descrittiva che ne riporta le caratteristiche geografiche, morfologiche e dimensionali; inoltre, all'interno della scheda descrittiva vengono riportati, ove conosciuti, i dati relativi ai danni procurati dalle valanghe (data dell'evento, dettaglio dei danni, eventuali feriti e/o vittime). Ogni scheda è suddivisa in campi compilati utilizzando una serie di definizioni codificate.

La documentazione fotografica è costituita da alcune fotografie con didascalia che descrivono nel dettaglio le differenti zone di ciascun sito valanghivo e i danni documentati (ove riscontrati).

2.6.5.5
La Carta di Probabilità di Esposizione della Viabilità alle Valanghe

La *Carta di Probabilità di Esposizione della Viabilità alle Valanghe* è un documento cartografico tematico, redatto in scala 1:25.000 (con dettagli in scala 1:5.000 e/o 1:10.000) su base topografica della Carta Tecnica Regionale.

Ogni sito valanghivo cartografato viene caratterizzato con un determinato colore, rosso, arancione o giallo, secondo la legenda riportata in **figura 2.6.19.** Le tre classi di pericolosità, intesa in questo caso come grado di probabilità che il fenomeno valanghivo, in determinate condizioni d'innevamento critiche, interessi la viabilità principale, sono rapportate a un evento con quantità di precipitazione nevosa giornaliera pari a 60-80 cm caratterizzabile, sulla base di analisi statistiche di serie climatiche riferite a quattro stazioni nivometriche dell'area olimpica, con un tempo di ritorno (Tr) decennale, ovvero, in altri termini, come un evento ha una probabilità pari al 10% di verificarsi annualmente in quest'area.

Nell'elaborazione dello studio tali valori sono stati considerati come una soglia che identifica *condizioni di innevamento critiche* per l'innesco di attività valanghiva spontanea; le tre classi di pericolosità così identificate permettono di individuare i settori di viabilità maggiormente esposti al pericolo di caduta di valanghe, sui quali, al verificarsi di un evento di precipitazione nevosa pari alla

soglia critica, è consigliabile indirizzare prioritariamente le azioni preventive di chiusura al traffico veicolare e sui quali avviare le necessarie operazioni di monitoraggio e di valutazione della stabilità del manto nevoso.

L'obiettivo dello studio è stato quindi quello di delineare uno scenario di moderata criticità per la viabilità dell'area olimpica in relazione al pericolo di valanghe, per definite condizioni d'innevamento, paragonabili a quelle riscontrate durante un evento di precipitazioni nevose intense all'inizio del mese di marzo del 1993, di cui si dispone di un dettagliato rilevamento delle valanghe verificatesi lungo la ex Strada Statale n. 23 in Val Chisone.

2.6.6 Considerazioni conclusive

L'Area Previsione e Monitoraggio Ambientale di Arpa Piemonte copre con le sue funzioni e competenze i vari settori che concernono la prevenzione del rischio valanghivo.
La gestione della rete nivometrica regionale, costituita da oltre 70 stazioni automatiche in teletrasmissione e da circa 40 stazioni gestite da operatori manuali, permette un monitoraggio continuo delle condizioni nivo-meteorologiche sull'intero arco alpino piemontese.

Le attività di previsione del pericolo di valanghe sul territorio regionale costituiscono un servizio informativo al pubblico che frequenta il territorio montano innevato e costituiscono un importante elemento del sistema d'allertamento regionale gestito dal Centro Funzionale regionale previsto dall'ordinanza del D.P.C. del 27/02/2004.

Nello stesso contesto di prevenzione Arpa Piemonte fornisce supporto tecnico-scientifico all'attività di prevenzione svolta dalle Commissioni Locali Valanghe, istituite dalle Comunità Montane ai sensi dell'art. 40 della L.R. 16/1999, nelle loro funzioni di controllo dei fenomeni nivologici ed al fine di segnalare il pericolo di valanghe su centri o nuclei abitati, opere pubbliche ed impianti o infrastrutture di interesse pubblico.

La realizzazione e il continuo aggiornamento del Sistema Informativo Valanghe condiviso rende disponibili tutte le informazioni relative ai siti valanghivi noti sul territorio regionale, rappresentando su diversi strati informativi le conoscenze sintetizzate nella cartografia o la documentazione d'archivio relativa ad ogni singolo sito.

Le conoscenze sui fenomeni valanghivi inserite nel Sistema Informativo permettono di disporre di un quadro aggiornato delle problematiche che possono interferire con l'utilizzo del territorio montano, sia nelle fasi di pianificazione dell'uso del territorio sia nell'adozione di misure di protezione in occasione della realizzazione di interventi edificatori o infrastrutturali.

L'interazione con analoghe strutture tecniche delle regioni e province autonome dell'arco alpino italiano aderenti all'AINEVA permette il confronto reciproco e l'aggiornamento professionale del personale sulle metodologie di prevenzione del rischio valanghivo attuate in ogni singola realtà regionale, sia per gli aspetti tecnici sia per quelli legislativi.

L'attività di ricerca nel campo della pianificazione territoriale promossa dall'AINEVA e a cui Arpa Piemonte partecipa attivamente permette di introdurre nelle procedure istruttorie per l'autorizzazione di impianti di risalita, piste da sci o impianti d'innevamento artificiale principi di prevenzione dei rischi che, per quanto non strettamente previsti dalla normativa regionale, tendono a favorire una progressiva consapevolezza da parte dei gestori dei comprensori sciistici della necessità di adottare misure preventive, sia strutturali che gestionali, per la prevenzione degli incidenti da valanga.

Questo bagaglio di conoscenze in continuo aggiornamento permette ad Arpa Piemonte di assolvere al proprio compito istituzionale di fornire il supporto tecnico-scientifico alla Regione, alle Province e ai Comuni nelle fasi istruttorie di procedimenti per l'autorizzazione di opere e interventi connessi all'uso turistico del territorio montano garantendo l'applicazione di criteri e metodi indispensabili per lo sviluppo sostenibile delle aree alpine della regione.

La profonda conoscenza del territorio montano regionale e delle sue caratteristiche climatiche, supportata dall'impiego di applicazioni modellistiche e di metodologie d'indagine condivise a livello internazionale, permette all'Area Previsione e Monitoraggio Ambientale di svolgere un ruolo di consulenza e di segnalazione sulle problematiche valanghive che possono interessare infrastrutture viarie di importanza strategica, come dimostra lo studio condotto sulla sicurezza da valanghe della viabilità olimpica.

L'adozione di una normativa regionale di settore che preveda la gestione in sicurezza dei comprensori sciistici attraverso l'impiego di metodi e sistemi di prevenzione del rischio valanghivo, ormai consolidati nella prassi e già riconosciuti nelle normative di settore di alcune regioni dell'arco alpino, permetterebbe una più efficace azione di prevenzione degli incidenti da valanga.

Bibliografia

I lavori contrassegnati da asterisco non sono citati esplicitamente nel testo.

Avondo G.V., Castellino D. & Rosselli D. (2003), *Pragelato, il Beth e le sue miniere ad un secolo dalla grande valanga.* Pinerolo, Alzani editore.

Barbolini M. (1996), *Sulla modellazione delle valanghe di neve densa.* Politecnico di Milano. Tesi di Laurea.

Barbolini M. & Cappabianca F. (2003), *Calcolo della pericolosità e analisi di rischi: un nuovo metodo basato sull'utilizzo dei modelli di dinamica,* Neve e Valanghe, n. 50, pp. 62-71.

Barbolini M., Natale L., Cordola M. & Tecilla G. (2004a), *Linee Guida metodologiche per la perimetrazione delle aree esposte al pericolo di valanghe.* Neve e Valanghe, n. 53, pp. 6-13.

*Barbolini M., Cappabianca F. & Savi F. (2004b), *Risk assessment in avalanche prone areas.* Annals of Glaciology, n. 38.

*Bariffi A. (2002), *GIS e modellizzazione del rischio valanga.* Neve e Valanghe, n. 45, pp. 32-41.

Buisson L. & Charlier C. (1993), *Studio dei rischi valanghivi sul comprensorio sciistico Ovest di Macugnaga.* Grenoble (F), CEMAGREF. Relazione di consulenza per la Regione Piemonte.

Capello C.F. (1977), *Archivio storico-topografico delle valanghe italiane (Provincia di Cuneo).* Torino. Istituto di Geografia Alpina dell'Università di Torino.

Capello C.F. (1980), *Archivio storico-topografico delle valanghe italiane (Provincia di Torino).* Torino. Istituto di Geografia Alpina dell'Università di Torino.

Christen M., Bartelt P. & Gruber U. (2002), *Aval 1D – Numerical calculation of dense flow and powder snow avalanches.* Davos (CH). Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research

Cresta R. (2002), *L'esplosivo e la neve.* II ed. Milano, Club Alpino Italiano.

Denza F. (1889), *Relazione sulle valanghe degli anni 1885 e 1888.* Bollettino del Club Alpino, vol. XXII, pp. 181.

*Fontana E. (1991), *Storie di antichi inverni. Varallo,* ed. Club Alpino Italiano, Sezione di Varallo.

*Ghinoi A. (2004), STARTER – *Un metodo per la valutazione della suscettibilità valanghiva.* Neve e Valanghe, n. 51, pp. 12-25.

*McClung, D.M. (2001), *Characteristics of terrain, snow supply and forest cover for avalanche initiation caused by logging.* Annals of Glaciology, n. 32, pp. 223-229.

Serra M. (1997), *Le valanghe del 1885-1888. I terribili inverni dei nostri nonni.* Edito in proprio.

*Sovilla, Bartelt, Barbolini, Christen, Gruber, Maggioni, Tiefenbacher, Turnbull & Amman (2001), *La dinamica delle valanghe: lo stato dell'arte e la ricerca.* Professione Montagna, n. 64.

Tomasuolo E. (2001), *Creazione di un archivio GIS degli eventi valanghivi in Provincia di Torino nel periodo 1885-1951.* Facoltà Scienze Matematiche, Fisiche, Naturali dell'Università di Torino. Tesi di Laurea.

2.7 Le piene fluviali

2.7.1 Introduzione

Le analisi morfologiche sui corsi d'acqua, condotte dal Centro Regionale per gli Studi Territoriali e Geologici di Arpa Piemonte, sono volte soprattutto a fornire un quadro della dinamica evolutiva ed in atto dei corsi d'acqua principali, prevedendo le tendenze future sulla base delle variazioni morfologiche avvenute. Le attività condotte sono essenzialmente il rilevamento morfologico (fotointerpretazione e rilievi di terreno) e gli studi diretti in occasione di eventi di piena per la produzione di carte tematiche volte alla classificazione dell'inondabilità ed all'individuazione delle aree a rischio.
L'Area Previsione e Monitoraggio Ambientale di Arpa Piemonte, attraverso il proprio Centro Funzionale, fornisce un servizio continuativo di previsione delle portate dei principali corsi d'acqua del reticolo idrografico piemontese che consente di prevedere in anticipo l'instaurarsi di condizioni di rischio idraulico, di emettere bollettini previsionali ed allertare le strutture di protezione civile interessate. L'allertamento necessita di una previsione a breve termine, che indichi nel modo più affidabile possibile il *quando* e il *dove* possono manifestarsi situazioni critiche.

L'integrazione delle conoscenze e delle esperienze maturate in seno alle due Strutture di Arpa Piemonte si concretizza in studi interdisciplinari finalizzati alla classificazione del territorio in funzione del rischio idraulico, per completare le previsioni in tempo reale sull'evoluzione temporale dei fenomeni anche con l'indicazione delle aree interessate, soprattutto di quelle a maggior rischio, in funzione delle dinamiche di inondazione e degli effetti e dei danni attesi.

2.7.2 I processi fluviali

La genesi dei corsi d'acqua e la loro evoluzione dipendono da quattro fattori principali: i processi morfodinamici, il controllo strutturale, le variazioni climatiche ed il tempo. Tutti questi fattori operano a diverse scale, anche impercettibili all'uomo, condizionando la forma del paesaggio e la sua evoluzione. I processi che si esplicano sul territorio durante gli eventi di piena sono dunque strettamente connessi e condizionati da questi fattori, pertanto il loro studio e la conoscenza dei loro mutamenti sono fondamentali per prevedere gli effetti delle piene sul tessuto antropico e per poter mettere in atto gli strumenti necessari per una corretta politica di gestione del territorio.

Le variazioni climatiche che hanno interessato la terra hanno avuto fluttuazioni più o meno regolari con cicli millenari, come la successione di periodi glaciali e interglaciali nel Quaternario e con cicli più brevi centennali e decennali, come, per citare gli ultimi, le *piccole glaciazioni* avvenute tra il 1000 ed il 1300 d.C., e tra il 1500 ed il 1850 d.C. Questi ultimi cicli, anche se di breve durata, hanno influenzato notevolmente la vita dell'uomo e la morfologia del territorio.

Recenti studi climatici prevedono l'inizio di un periodo che vede un graduale aumento della temperatura, accentuato dall'immissione in atmosfera dei gas prodotti dai combustibili fossili. Modificazioni ambientali legate all'aumento medio della temperatura si sono già verificate naturalmente, con cicli di circa 150-200 anni. Il periodo attuale rappresenterebbe la transizione climatica tra l'ultima *Piccola Età Glaciale* ed il prossimo *Effetto Serra.* Gli ultimi periodi caldi noti sono relativi all'età romana (150-350 d.C.) ed al medioevo (1000-1300). Studi multidisciplinari hanno consentito di apprezzare quantitativamente, alle diverse latitudini, le modificazioni dell'ambiente fisico succedutesi nelle ultime migliaia di anni: durante i periodi caldo-aridi si sono avute nell'area mediterranea desertificazione lungo le aree costiere con improvvisa riduzione delle piogge dell'80%, mentre nelle aree collinari e montane si è verificata una riduzione delle precipitazioni di oltre il 50%, ed una loro concentrazione in periodi limitati.

Si è quindi ipotizzato, per la prossima modificazione, in base alla storia climatico-ambientale di periodi precedenti e ai vari dati scientifici, insieme ad altre variazioni quali desertificazione delle fasce costiere, riduzione dei processi pedogenetici, riduzione della copertura vegetale aumento dell'erosione del suolo, ecc., anche i seguenti cambiamenti:

- nelle aree montuose e collinari una forte riduzione delle precipitazioni (oltre il 50% dell'attuale) ma una maggiore aggressività delle stesse, con il conseguente aumento delle portate fluviali;
- uno spostamento progressivo del punto neutro verso la parte pedemontana dei corsi d'acqua con diminuzione del trasporto solido;
- un incremento dell'erosione dei litorali sabbioso-ghiaiosi;
- un innalzamento dello zero termico con conse-

guente progressiva fusione del permafrost e incremento delle precipitazioni piovose nelle aree montuose alpine (Ortolani & Pagliuca, 2001).

Anche i processi geologici hanno influenzato e indirettamente ancora influenzano il corso dei fiumi ed i processi ad essi legati. Vengono di seguito riportati tre esempi significativi dei condizionamenti geologici sui corsi d'acqua piemontesi.
Durante il Quaternario l'azione geodinamica ancora in atto è stata la causa principale di tre importanti fenomeni di deviazione fluviale avvenuti in età pleistocenica ed interessanti il reticolo idrografico dell'alta Pianura Padana: la diversione del Po, quella della Dora Baltea e la cattura del Tanaro.
La diversione del Po è stata la conseguenza dell'evoluzione geodinamica della Collina di Torino associata ai processi erosivo-deposizionali del conoide fluvio-glaciale dell'Anfiteatro Morenico di Rivoli-Avigliana durante il Pleistocene inferiore. Questa concomitanza di fattori ha comportato la chiusura verso nord, in corrispondenza della soglia di Moncalieri, del Bacino Piemontese Meridionale. Da quel momento, la direttrice dei deflussi si è impostata a sud della Collina di Torino e dei rilievi del Monferrato (Paleo Po).

L'evoluzione quaternaria ha successivamente prodotto l'incremento della compressione dell'anticlinale della Collina di Torino unitamente ad un incremento dell'inclinazione verso sud-ovest del suo asse. Conseguenza principale di questi processi è stata la subsidenza del settore nord-orientale della Pianura Piemontese Meridionale, che ha provocato una struttura di deformazione, la *Flessura marginale dell'Altopiano di Poirino,* con asse diretto circa nord-sud, unitamente ad un abbassamento tettonico dei rilievi dell'astigiano. Il progressivo fenomeno ha determinato il richiamo del drenaggio del Bacino Piemontese Meridionale verso nord ed ha indotto la diversione del percorso fluviale del Po che ha ripreso a scorrere, per'altro con una conformazione diversa, a nord della Collina di Torino e dei Rilievi del Monferrato (Polino & Sacchi, 1995; Nigrelli, 2005), **(figura 2.7.1)**.

Il Tanaro, che discendendo dalle Alpi Marittime percorreva la pianura confluendo nel Po in corrispondenza dell'abitato di Carignano, alla fine del Pleistocene superiore ha subito una sorta di cattura nei pressi di Bra. La cattura è avvenuta per erosione regressiva dello spartiacque che separava l'antico alveo dalla valle di uno dei torrenti che solcavano le colline ad est. Le acque del fiume abbandonarono il vecchio percorso per confluire nel Po, nella piana alessandrina **(figura 2.7.2).**

La terza e ultima modificazione è quella subita dal Fiume Dora Baltea in corrispondenza della chiusura del suo percorso vallivo. Attualmente la Dora Baltea supera la Città di Ivrea attraverso una stretta forra impostata nelle rocce del substrato cristallino. A nord-est della città il piccolo Rio Ribes scorre in un antico canale del fiume ancora ben inciso. La parte terminale di questo canale è occupato ora dal Torrente Chiusella che in epoca postglaciale aveva subito una cattura per erosione regressiva, dovuta a fenomeni di sollevamento tettonico (Carraro, 1992). È probabile che all'ingresso della piana a monte di Ivrea, l'antico scaricatore glaciale si dividesse già in più rami, uno dei quali passava ad Ivrea secondo l'attuale percorso, mentre altri deviavano verso Fiorano. Probabilmente la concomitanza di movimenti tettonici e di fenomeni erosionali a scapito dei depositi di colmamento della piana a nord di Ivrea, ha causato la formazione dell'attuale superficie terrazzata di Fio-

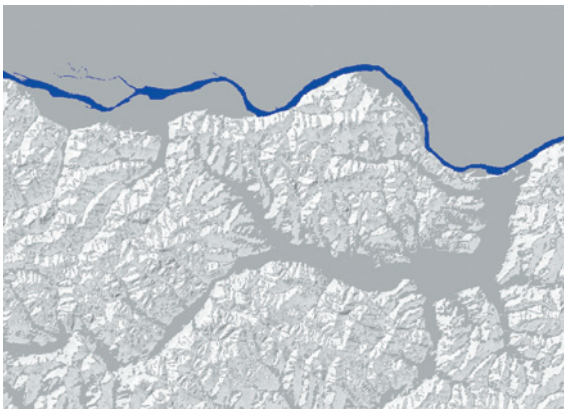


Figura 2.7.1
Percorso attuale del Fiume Po (in blu), a nord della Collina di Torino. Si osservi l'antico percorso del fiume, parallelo all'attuale e inciso con direzione ovest-est tra i rilievi colinari



Figura 2.7.2
Percorso attuale del Fiume Tanaro (in blu), verso est. Si noti l'antico percorso del fiume, che deviava verso ovest, costeggiando l'attuale limite orientale della pianura cuneese

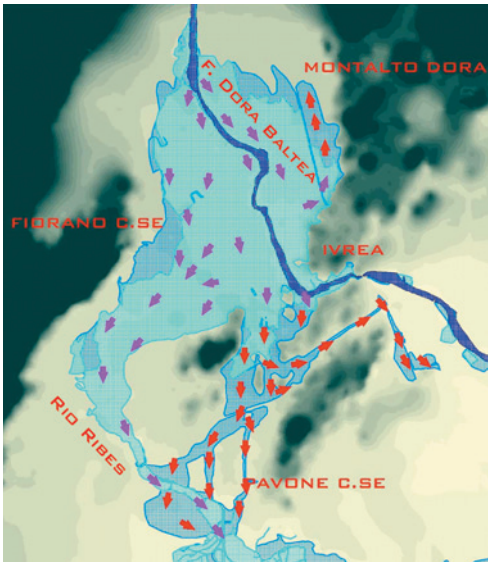


Figura 2.7.3
Percorso attuale del Fiume Dora Baltea (blu scuro), con le aree inondate durante gli eventi del settembre 1993 (retino azzurro chiaro, frecce fucsia) e dell'ottobre 2000 (retini azzurro chiaro e scuro, frecce rosse e fucsia) che evidenziano non solo l'antico percorso verso ovest, lungo la direttrice attualmente occupata dal Rio Ribes e dal Torrente Chiusella, ma anche altri percorsi fluviali, tra Ivrea e Pavone Canavese, riattivati nel 2000

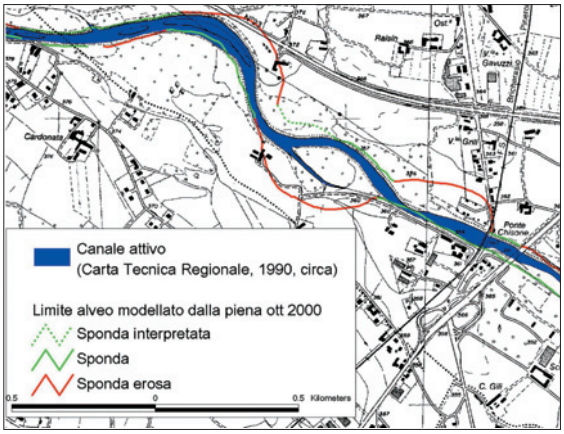


Figura 2.7.4
Torrente Chisone nei pressi di Pinerolo, prima della piena dell'ottobre 2000: il corso d'acqua presentava un unico canale attivo, ad eccezione di un breve canale secondario, ormai in via di abbandono

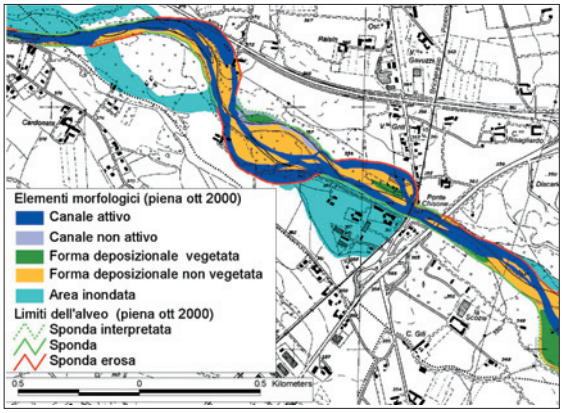


Figura 2.7.5
Torrente Chisone nei pressi di Pinerolo, dopo la piena dell'ottobre 2000: i deflussi sono distribuiti in due canali, in sponda destra, mentre il canale precedentemente attivo è stato abbandonato dai deflussi



Figura 2.7.6
Alveo modellato dalla piena, ripreso pochi giorni dopo l'evento (foto Giraud, deflusso dall'osservatore)

rano e il conseguente abbandono della direttrice del Ribes. La particolare situazione morfologica dovuta alla presenza di un effimero spartiacque rappresentato dal basso terrazzo di Fiorano, determina però fenomeni di *sfioramento*, in occasione di piene con portate superiori ai 2'000 m^3/s, con riattivazione del ramo abbandonato. Così è avvenuto per le piene del settembre 1993 (Bellardone & Forlati, 1996a) e dell'ottobre 2000 (Bellardone & Giampani, 2003), tale riattivazione nel XX secolo, si sarebbe verificata anche nell'ottobre 1920. Altre riattivazioni più antiche sono note nel 1834 e nel 1775 **(figura 2.7.3)**.

Come si è visto, la *magnitudo* dei cambiamenti morfologici può essere molto variabile nel tempo, ma i cambiamenti più evidenti (perché a scala temporale umanamente percepibile) sono associati alle attività antropiche e avvengono più velocemente di quanto possano essere assorbiti dall'ambiente circostante, causando una situazione di disequilibrio dell'intero sistema.

Un fiume *stabile* è in equilibrio dinamico quando, a scala di bacino i processi di sedimentazione e asportazione si compensano. Le condizioni al contorno includono la pendenza della valle, le caratterisitiche geo-litologiche, il tipo di suolo, le caratteristiche della vegetazione ed anche le condizioni climatiche. Modificazioni nella quantità del trasporto solido, nel regime delle piene e delle condizioni al contorno possono disturbare l'equilibrio del corso d'acqua che può rispondere con cambiamenti morfologici evidenti anche repentini, fino al riequilibrarsi del sistema.

Quando i processi erosivi eccedono i processi sedimentari si verifica una naturale incisione del canale. La riduzione dell'apporto di sedimenti può essere collegata a fattori climatici, ma è dovuta anche (e per quanto riguarda gli ultimi 50-60 anni soprattutto) alla creazione di invasi artificiali, alla realizzazione di opere di difesa e all'asportazione di sedimenti in alveo per uso antropico.

Tali azioni se da un lato favoriscono la stabilità planimetrica del canale e il contenimento delle piene ordinarie o con tempo di ritorno decennale, dall'altro causano problemi sia ambientali sia al tessuto antropico. Tra i primi è da ricordare l'abbassamento della superficie piezometrica delle falde freatiche e il conseguente abbassamento della quota raggiunta dalla risalita capillare, che causa l'impoverimento del suolo; tra i problemi al tessuto antropico sono da ricordare i continui danni ai ponti, anche per piene non particolarmente eccezionali (tempo di ritorno 20-50 anni). Inoltre la regimazione dei corsi d'acqua, con la riduzione delle aree interessate dai deflussi, se da un lato determina una riduzione del grado di inondabilità per le aree protette, dall'altro porta ad un aumento della velocità e delle portate a valle con possibilità di inondazioni più estese. Tale problema era già stato affrontato da Visentini (1952): *"La vista di questi ampii territori abbandonati dalle correnti fluviali attira lo sdegno di chi pensa alle pressanti necessità sociali che richiedono di porre a coltivazione sempre nuove terre, ma per quanto si è detto, restringere gli alvei con arginature od altre difese aumenterebbe il valore dei colmi di piena nei fiumi arginati e quindi, almeno nelle condizioni attuali, è da escludere in modo assoluto".*

I corsi d'acqua pluricursali piemontesi hanno subito modificazioni dovute a fattori antropici con scomparsa quasi totale dei tratti a modellamen-

to pluricursale e passaggio a forme monocursali. Tale metamorfosi, ascrivibile anche a variazioni nei regimi idrologici (Maraga, 1989) era già in atto almeno dal XVII secolo, ma è stata accelerata notevolmente negli ultimi decenni del secolo scorso. Questa metamorfosi accelerata, indotta essenzialmente da fattori antropici, può essere interrotta dal verificarsi di piene significative, con il ritorno alle morfologie originarie, come esemplificato dai seguenti casi.

Il Torrente Chisone, nella zona compresa tra lo sbocco in pianura ed il ponte della Strada Statale 559, presentava nel 1858 un alveo con due canali attivi, per un'ampiezza dell'ordine di 300 m, nella zona di massimo sviluppo (Foglio LII, Pinerolo della *Gran Carta degli Stati Sardi in Terraferma* alla scala 1:50.000). A partire dai primi decenni del secolo scorso, si è osservata una progressiva riduzione dell'ampiezza dell'alveo, con concentrazione dei deflussi in un unico canale che, all'inizio degli anni Novanta aveva un'ampiezza di circa 70 m in corrispondenza del ponte e ben minore nelle zone a monte di esso.

Durante l'evento dell'ottobre 2000 (portata stimata a San Martino 980 m^3/s, tempo di ritorno circa 130 anni, (Barbero *et al.,* 2003) in questa zona il torrente ha riacquistato un alveo a più canali, con un'ampiezza, calcolata tra le sponde incise di circa 250 m.

Il Torrente Orco presentava fino agli anni Cinquanta del secolo scorso un alveo ampio a più canali. Dal confronto dell'andamento del torrente in periodi differenti, risulta come una tendenza alla diminuzione dell'ampiezza dell'alveo fosse già evidente, prima degli anni Cinquanta (Maraga, 1986). Successivamente la mutazione verso forme monocursali è persistita, favorita anche dall'escavazione di inerti in alveo e soprattutto dalla realizzazione di opere atte a contenere i deflussi in fasce sempre più ristrette. Alla fine degli anni Settanta, il deflusso era ormai impostato in un unico canale cui erano associati ancora brevi tratti d'alveo con due o più rami, comunque caratterizzati da canali di deflusso principali più incisi rispetto ai laterali che stavano per essere progressivamente abbandonati. Tale tendenza è persistita nel tempo, come si osserva dalle aerofotografie del 1991, dove l'alveo è ormai quasi totalmente caratterizzato da un unico canale di deflusso (Bellardone & Forlati, 1996b).

Dopo l'evento alluvionale del 24-25 settembre 1993, con portata massima al colmo a Pont Canavese di 1'500 m^3/s e tempo di ritorno 50 anni (Ravera *et al.,* 1996), le peculiarità dell'alveo-tipo originario sono prevalse, con il manifestarsi dei caratteristici processi associati alle piene in corsi d'acqua pluricursali: ampliamenti della sezione dell'alveo per erosioni di sponda, neoformazione

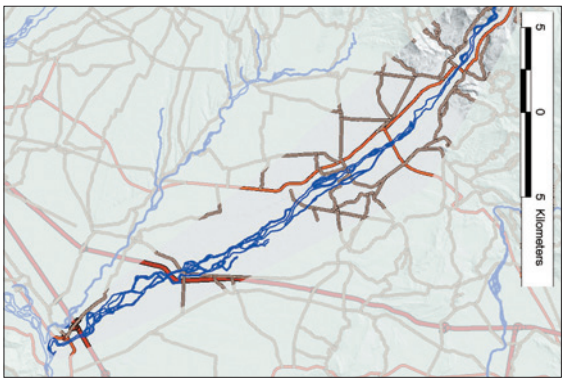


Figura 2.7.7
Torrente Orco, nella metà del XIX secolo. L'ampiezza dell'alveo variava da un minimo di una sessantina di metri al ponte di Cuorgnè, allo sbocco in pianura, fino ad un massimo superiore di 900 m slm, tra i comuni di San Benigno Canavese e Foglizzo

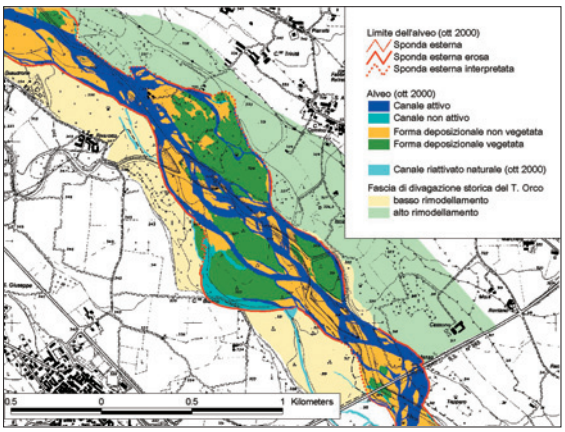


Figura 2.7.8
Alveo del Torrente Orco dopo la piena del 2000 (a monte di Rivarolo Canavese)

di canali, riattivazione di canali secondari non ordinariamente interessati dai deflussi, trasporto solido. Dopo l'evento dell'ottobre 2000, con portata stimata a Cuorgnè di 1'650 m^3/s e tempo di ritorno 80 anni (Barbero *et al.,* 2003), la morfologia dell'alveo era tornata confrontabile per molti tratti con quella della metà del secolo scorso. Non solo, ma anche tratti ormai caratterizzati da un unico canale già da oltre un secolo, quale ad esempio quello prossimo al ponte di Cuorgnè, avevano riacquistato una morfologia a canali plurimi.

Associate alla piena del 2000, modificazioni significative verso l'originario alveo-tipo pliricursale si sono osservate anche lungo il tratto della Dora Baltea, a valle dei depositi glaciali dell'Anfiteatro Morenico di Ivrea (Bellardone & Giampani, 2003).

2.7.3
La diagnosi geomorfologica: un approccio per lo studio dell'inondabilità

Con il Progetto Interreg *CatchRisk: Mitigation of Hydro-Geological Risk in Alpine Catchments,* il Centro Regionale per le Ricerche Territoriali e Geologiche di Arpa Piemonte ha condotto studi morfologici volti all'individuazione e alla classificazione delle fasce ad inondabilità genetica, allo scopo di fornire indirizzi e linee guida da applicarsi in studi analoghi in ambiente di fondovalle e di pianura (AA.VV., 2005a). Il metodo della diagnosi morfologica è orientato all'individuazione delle aree potenzialmente soggette a inondazione e alla loro catalogazione in clas-

si di probabilità relativa, valutando l'assetto morfologico attuale e passato del corso d'acqua (Maraga, 1998).
L'approccio geomorfologico parte dal presupposto che la propagazione dei deflussi possa occupare totalmente l'idrosistema, e che perciò sia necessario prima di tutto individuare questa fascia, definita a *inondabilità genetica,* quindi classificarla per priorità di sommersione e per energia dei deflussi possibili. La propagazione dei deflussi nelle aree geneticamente inondabili è sovente controllata oltre che dalla macro-morfologia anche dalla micro-morfologia, rappresentata dalle forme fluviali relitte, con grado di incisione basso o anche nullo. L'intersezione di tali forme con infrastrutture antropiche che a loro volta condizionano la propagazione dei deflussi, anche in modo discordante rispetto alle prime, può determinare un'esaltazione dell'inondabilità e degli effetti sia nelle zone di influenza di tali condizionamenti sia sulle infrastrutture (soprattutto rilevati stradali e canali artificiali). Collocare spazialmente tali forme è quindi indispensabile e può avvenire solo attraverso un'attenta analisi morfologica volta al riconoscimento degli alvei passati cui esse erano associate.

Il progetto ha previsto l'analisi di due aree campione, selezionando due tratti fluviali distinti sia per caratteristiche morfologico-ambientali sia per la disponibilità di cartografie tematiche. La prima area corrisponde al tratto di Fiume Po compreso tra le confluenze del Fiume Stura di Lanzo e del Torrente Orco (per un tratto di circa 18 km). La seconda area campione è il Fiume Sesia nel tratto alpino compreso tra gli abitati di Alagna Valsesia e Borgosesia (circa 50 km). Per il Fiume Po, la ricostruzione morfologica degli alvei si è fondata essenzialmente su basi topografiche (1858, 1923) e cartografie tematiche esistenti (Dutto, 1993), mentre la ricostruzione dell'alveo e degli elementi morfologici significativi modellati dalla piena dell'ottobre 2000 e delle superfici terrazzate attuali, è stata effettuata tramite fotointerpretazione di riprese aeree. Per la classificazione delle aree inondabili sono state utilizzate anche le mappe esistenti dei campi di inondazione riferiti alle piene del 1992, 1994 e 2000 (Dutto, 1993; Mensio, 1996; Paro, 2003; Susella *et al.,* 2003).

Per la seconda area campione (Fiume Sesia), il riconoscimento delle forme legate al corso d'acqua nel XIX secolo si è basato sull'analisi di carte topografiche (1884-1886). La mappatura dell'alveo e degli elementi morfologici significativi dalla seconda metà del XX secolo al 2000 è avvenuta tramite fotointerpretazione con stereovisore ottico di aerofotografie (4 serie) realizzate tra il 1954 ed il 2000, selezionate anche perché successive a piene significative (1948-1951, 1976-1977, 1993-1994, 2000).

Per il Fiume Sesia, oltre alla ricostruzione planimetrica degli alvei, sono stati valutati, per tratti omogenei, anche parametri morfometrici, quali le altezze delle sponde delimitanti l'alveo del 2000, la larghezza dell'alveo e dei canali attivi, la lunghezza dell'alveo, la lunghezza secondo l'asse della valle, la lunghezza della linea di *thalweg,* l'indice di ramificazione, l'indice di sinuosità, la lunghezza totale delle erosioni di sponda e l'indice di *entrenchment* (trinceramento).

L'evoluzione altimetrica del profilo di fondo del corso d'acqua è stata stimata soprattutto attraverso evidenze planimetriche indirette, quali modificazioni dell'alveotipo, tendenza alla canalizzazione del corso d'acqua, o viceversa tendenza ad un andamento ramificato e instabile in alveo sovralluvionato, in secondo luogo attraverso osservazioni dirette sullo stato di scalzamento o di interrimento delle fondazioni di opere in alveo (pile, difese), infine, ma molto limitatamente, dal confronto delle sezioni trasversali misurate in tempi differenti.

I parametri significativi, per tronco d'alveo a comportamento omogeneo, sono stati infine riassunti in schede descrittive e in tabelle.

Gli elementi di morfologia fluviale sono stati utilizzati quindi per l'individuazione delle aree inondabili, cercando di assegnare ad ogni singola area un grado di propensione alla riattivazione in funzione dell'altezza delle sponde del corso d'acqua e dell'assetto fluviale attuale, considerando anche le tipologie di associazioni vegetazionali (seminativi, arboree, arbustive). Le aree inondabili sono state quindi classificate in:

1) *area con propensione all'inondabilità molto elevata (Classe I).* Corrisponde all'area contenente l'alveo attuale (2000), allargata alle aree ricadenti, per il Fiume Po, entro la fascia di mobilità storica recente dell'alveo (dal 1923). Per il Fiume Sesia tale area è stata estesa alla fascia di mobilità storica (comprendente le forme degli alvei attivi dal 1884-1886) in presenza di sponde con altezze comprese tra 0 e 5 m;
2) *area con propensione all'inondabilità elevata-alta (Classe II).* Per il Fiume Sesia, corrisponde per lo più ai terrazzi di primo e secondo ordine, a cui si associano sponde inferiori a 5 m. Per il Fiume Po, corrisponde all'inviluppo delle aree interessate da inondazione per le piene del 1994 e del 2000 ed alle aree contenenti forme d'alveo riconosciute sulle cartografie più vecchie (1858), in assenza di argini o rilevati in genere;
3) *area con propensione all'inondabilità medio-bassa (Classe III).* Corrisponde alle aree solitamente esterne alla fascia di mobilità storica, delimitate da terrazzi più vecchi e posti a quote più elevate rispetto al corso d'acqua, oppure ad aree prospicienti tratti aventi sponde di altezza tale da considerare il rischio di inondazione limitato a casi di piena particolarmente intensi e violenti;

4) *area potenzialmente inondabile solo per eventi di piena catastrofici con propensione all'inondabilità estremamente bassa (Classe IV).* Corrisponde ad aree di chiara origine fluviale (inviluppo delle forme fluviali antiche incise e non incise), che per distanza o per quota media rispetto al corso d'acqua presentano una propensione genetica all'inondabilità molto limitata.

Per la classificazione dell'inondabilità si è tenuto conto della situazione morfologica più pericolosa, per singola area: ad esempio aree classificabili per caratteristiche generali come a inondabilità medio-bassa sono state inserite in classe II (elevata-alta) per la presenza, nei settori a monte, di punti critici per sponde basse o per il dipartirsi di canali di derivazione, potenziali zone di esondazione o linee di deflusso preferenziale.

2.7.4 Risultati dell'applicazione della diagnosi geomorfologica

Verranno ora brevemente riassunti i risultati delle analisi morfologiche applicate nei due contesti differenti, quali il Fiume Po nella pianura torinese e il Fiume Sesia, nel suo tratto alpino.

Il Fiume Po è classificabile, nel tratto analizzato (da Torino a Chivasso), come monocursale sinuoso meandriforme, tipo C di Rosgen (1994), con indice di sinuosità medio Is=1.14.

Analizzando le carte riferite all'assetto morfologico del corso d'acqua, nei differenti periodi, si osserva come la massima estensione planimetrica dell'area occupata dai canali attivi si sia registrata all'inizio del XX secolo e come, fino agli inizi degli anni '90 si sia assistito ad una sua progressiva diminuzione, interrotta successivamente dalle piene del novembre 1994, con tempo di ritorno 20 anni (Regione Piemonte, 1998), e dell'ottobre 2000, con tempo di ritorno 80 anni (Barbero *et al.*, 2003), in accordo con l'analogo comportamento di altri corsi d'acqua piemontesi.

La classificazione delle aree inondate si è basata non solo sull'analisi delle forme, ma anche sulle mappe di inondazione relative agli eventi di piena del 1994 e del 2000, confrontabili con le piene di riferimento rispettivamente per il Codice di Allertamento 2 (inferiore o uguale a 20 anni per la piena del 1994) e per il Codice di Allertamento 3 (maggiore di 20 anni per la piena del 2000) del Bollettino di Allertamento per rischio idrogeologico della Sala Situazioni Rischi Naturali di Arpa Piemonte. A tutte le aree inondate dagli eventi citati, in assenza di condizionamenti morfologici atti a contenere le inondazioni (quali scarpate di terrazzo) è stata assegnata la classe II di inondabilità. Fanno eccezione quelle zone in cui le inondazioni, causate nel 1994 per rotta degli argini, non si sono più verificate nel

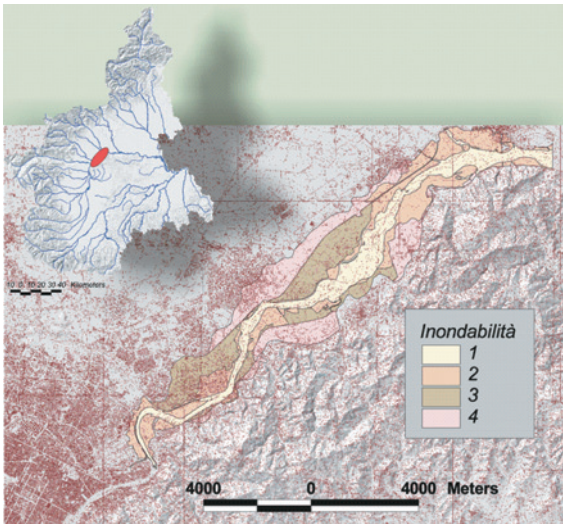


Figura 2.7.9
Tratto di fiume Po analizzato

TABELLA 2.7.1 PARAMETRI MORFOMETRICI RILEVANTI DEL TRATTO ANALIZZATO DI FIUME PO

ELEMENTI RILEVANTI	VALORI
Quota massima	209.0 m
Quota minima	171.0 m
Lunghezza dell'alveo di magra	21.0 km
Lunghezza del tratto, dell'alveo di piena	18.4 km
Pendenza media	0.18%

TABELLA 2.7.2 AREA OCCUPATA DALL'ALVEO DEL FIUME PO NEL XX SECOLO

PERIODO	AREA ALVEO [km²]	RIDUZIONE [%]
1923	6.8	
1958-1988	5.2	24
1992	3.9	43
1994	4.9	28
2000	5.8	15

TABELLA 2.7.3 AREE INONDABILI PER IL TRATTO ANALIZZATO DI FIUME PO

CLASSE	AREA INONDABILE [km²]
Classe I	9.74
Classe II	11.92
Classe III	9.19
Classe IV	9.93
Totale	40.78

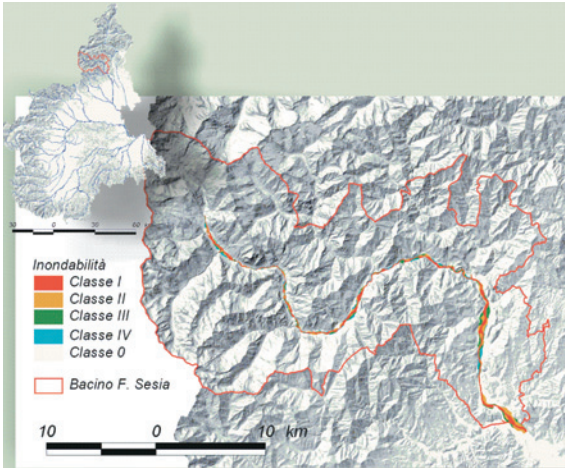


Figura 2.7.10
Seconda area campione: tratto alpino del Fiume Sesia, tra i comuni di Alagna Valsesia e Borgosesia

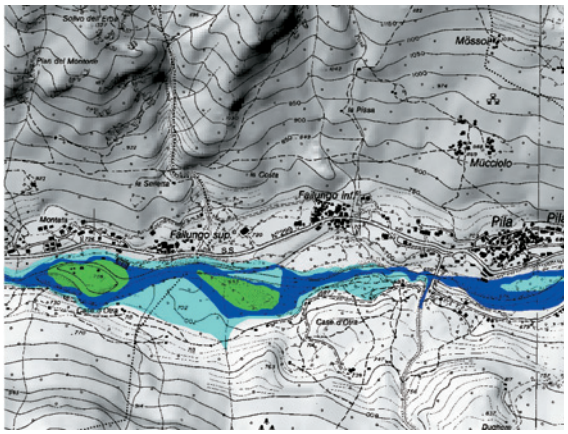


Figura 2.7.11
Alveo del Sesia nel 1884 (base IGM 1:25.000). A quell'epoca tutto il fondovalle era occupato dal Sesia. Per la legenda si faccia riferimento alla figura 2.7.14

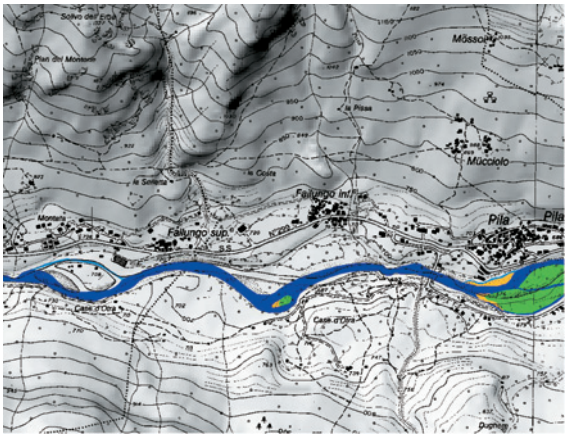


Figura 2.7.12
Alveo del Sesia nel 1978 (base CTR 1:10.000). Si noti come i deflussi siano concentrati in un unico canale. La legenda per le forme costituenti l'alveo è la stessa della figura 2.7.14

TABELLA 2.7.4 ESEMPIO DI SCHEDA RIASSUNTIVA, PER TRATTO OMOGENEO, DELLE PRINCIPALI CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE RILEVATE

EVOLUZIONE PLANIMETRICA DEL CORSO D'ACQUA DAL 1885 AL 2000		
	Situazione pregressa	Situazione attuale
Alveotipo	1954 – pluricursale 1978 – pluricursale 1994 – pluricursale	Pluricursale irregolare localmente ramificato
Larghezza media [m]	1954 – 49.1 1978 – 46.5 1994 – 66.1	65.3
Indice di braiding	1954 – 2 1978 – 2 1994 – 2	2
Erosione di sponda [m]	1994 – sp. sx – 567.6 (15.10%) 1994 – sp. dx – 772.8 (20.28%)	sp. sx - 310.64 (16.50%) sp. dx - 1028.1 (28.54%)
Evoluzione altimetrica del fondo alveo		
Stato attuale		
Evidenze approfondimento		
Riattivabilità delle forme fluviali relitte		
Forme abbandonate recenti	1 sulla sponda sinistra e 1 sulla sponda destra	
Forme abbandonate antiche	assenti	
Composizione granulometrica prevalente		
Massi e ciottoli		
Tipologia di vegetazione lungo asta fluviale		
Arborea e arbustiva		
Interventi antropici		

2000 per la tenuta dei medesimi ricostruiti dopo l'evento; a queste aree è stata assegnata una classe di inondabilità minore (classe III).
In **tabella 2.7.3** sono riportate le estensioni delle aree inondate, per classi di inondabilità:
La seconda area campione scelta per le analisi di inondabilità è il Fiume Sesia, nel suo tratto alpino.

In base agli studi condotti, il Fiume è stato suddiviso in 12 tronchi a comportamento omogeneo. Analizzando l'ampiezza dell'alveo, tra il 1884 e il 1978 si è osservato, per i tratti a sviluppo pluricursale, che i valori medi e massimi sono diminuiti quasi ovunque. Tra il 1978 e il 1994, l'ampiezza sia media sia massima dell'alveo è aumentata per poi, nel 2000, mantenere un'estensione confrontabile a quella del 1994.

Analizzando invece le aree occupate dagli alvei attivi, si osserva che l'estensione massima corrispondente al 1884 ha subito una diminuzione del 20% nel 1978 ed un aumento fino a valori confrontabili con il 1884 nel 1994. Nel 2000 si è registrata una minima riduzione rispetto al 1994. Non è stato considerato l'alveo del 1954 perché non cartografato per tutto il tratto studiato.

In base alle analisi condotte, il Fiume Sesia mostra un'attività laterale limitata, nella maggior parte del suo percorso a sviluppo unicursale (spesso inciso in roccia), mentre nelle parti più ampie di fondovalle, ove acquista un andamento a più canali, l'attività laterale è significativa, in accordo con le tendenze evolutive classiche dei tronchi pluricursali.

Infine, dal valore delle aree degli alvei nel 1994 e nel 2000, si osserva come anche il Fiume Sesia, come la maggior parte dei corsi d'acqua a sviluppo pluricursale piemontesi, in concomitanza di piene con tempi di ritorno anche non particolarmente significativi, quali quelle del 1993, 1994 e 2000, riacquista totalmente o quasi totalmente l'ampiezza che aveva alla fine del XIX secolo, con un riaffermarsi dell'andamento a canali plurimi.
Venendo all'analisi dell'inondabilità genetica, dei 17 km^2 di fondovalle classificati, il 30% si colloca nella classe I (elevata propensione), il 20% in classe II (alta propensione), il 15% in classe III (medio-bassa), l'11% in classe IV (molto bassa) e solo il 16% del fondovalle non sarebbe inondabile.
Associando alle aree a differente classe di inondabilità le informazioni ricavate dalle analisi morfologiche, è stata possibile una loro ulteriore classificazione, in base agli effetti attesi, ponendo particolare riguardo all'individuazione delle aree che potrebbero essere interessate da deflussi concentrati, per la presenza di forme canalizzate, più o meno rimodellate, associate a uno o più alvei attivi nel periodo considerato; le classi di inondabilità I, II e III sono state quindi ulteriormente suddivise in categorie A e B, in funzione della presenza di tali forme.

2.7.5 Analisi interdisciplinari finalizzate alla classificazione delle aree a rischio di inondazione

L'approccio morfologico all'analisi dell'inondabilità permette di individuare le aree ancora di pertinenza fluviale ma non consente di classificarle in funzione della loro probabilità relativa ad essere inondate. Pertanto, per il riconoscimento delle aree a rischio di inondazione è necessario associare alle analisi morfologiche prima descritte altre indagini, finalizzate in particolare alla classificazione delle piene dei singoli corsi d'acqua in termini di portate, frequenze e di impatto sul territorio. Solo attraverso l'integrazione dell'analisi geomorfologica con gli studi idraulici e con il riconoscimento, degli effetti e dei danni indotti dalle piene passate, è possibile giungere alla delimitazione delle aree inondabili per piene con portate note (di riferimento, ad esempio, per le azioni di allertamento) ed al riconoscimento dei corrispondenti elementi a rischio. Tali informazioni, associate ad un sistema di previsione meteorologica e ad un sistema di preannuncio delle piene in tempo reale, permettono di definire degli scenari grazie ai quali è possibile effettuare interventi mirati di salvaguardia nonché di effettuare controlli su opere e infrastrutture, in caso di superamento di soglie di attenzione stabilite.
La sperimentazione di diverse metodologie di studio sui corsi d'acqua piemontesi da parte di Arpa Piemonte ha permesso di mettere a punto una procedura adottabile negli studi finalizzati al riconoscimento delle aree a rischio, fondata su un approccio interdisciplinare che combina informazioni storiche con l'analisi geomorfologica ed idraulica.

Nei prossimi capitoli saranno brevemente riassunti i passi principali di queste analisi.

2.7.5.1 Analisi orientate alla caratterizzazione morfologica dell'idrosistema e degli elementi a rischio idraulico

Come già affermato, gli effetti legati al passaggio delle piene sono conseguenza di fattori fisici e climatici, che perdurano nel tempo e di condizionamenti antropici che possono esaltare o al contrario ridurre i danni da esse causati; perciò le informazioni sugli effetti indotti da piene passate, se analizzate alla luce dell'attuale assetto del territorio, in termini di occupazione del suolo e di presenza delle opere di difesa/regimazione dei deflussi, permettono di prevedere quali potranno essere gli effetti e i danni indotti da piene future.
In generale lo studio delle piene pregresse prevede un'analisi fotointerpretativa per il riconoscimento degli elementi morfologici modellati dai deflussi e delle aree inondate. Le analisi dirette devono essere integrate da informazioni derivate da documentazione storica o tecnico scientifica (disponibile presso i vari archivi, comunali, provinciali, regionali, ecc.), informazioni necessarie soprattutto per l'individuazione delle entità coinvolte e per la determinazione, anche solo qualitativa, dei dan-

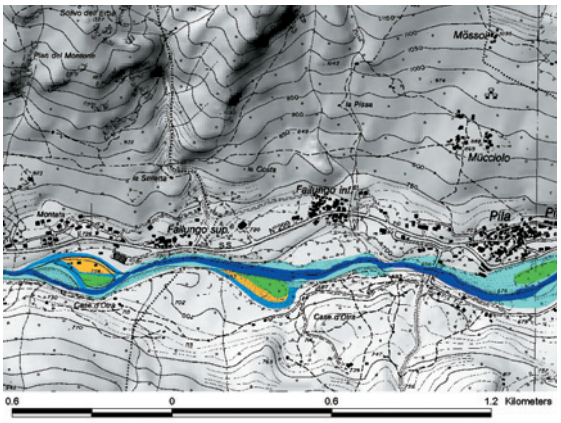


Figura 2.7.13
Alveo del Fiume Sesia nel 1994. Si osservi soprattutto la riattivazione del canale costituente l'ansa di valle (deflussi da sinistra verso destra). La legenda per le forme costituenti l'alveo è la stessa della figura 2.7.14

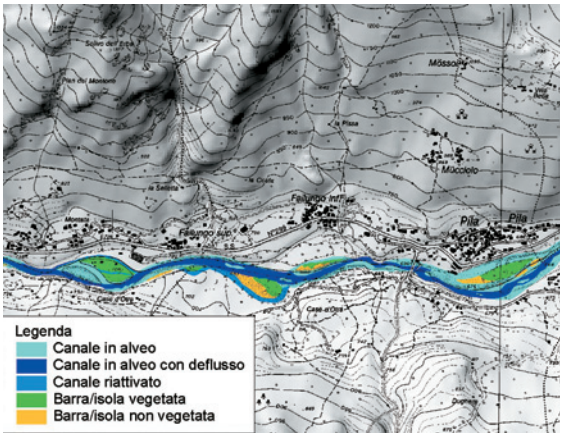


Figura 2.7.14
Il Fiume Sesia nel 2000. L'assetto dell'alveo è confrontabile con quello del 1994, ma si osservi l'abbandono del canale laterale verso monte e la formazione di un piccolo canale laterale nella zona mediana del tratto.

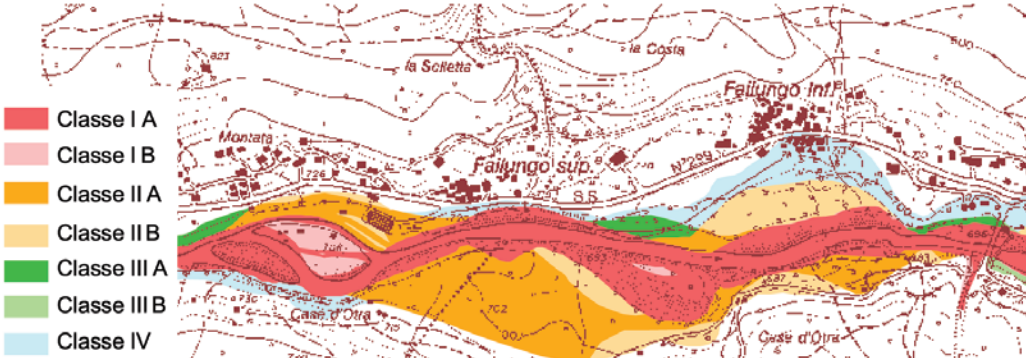


Figura 2.7.15
Classi di inondabilità distinte in categorie A e B, in funzione della presenza (A) o assenza (B) di forme canalizzate associate ad almeno uno degli alvei riconosciuti nel periodo analizzato (1882/86-2000)

ni (zone edificate, infrastrutture stradali, opere di difesa, ecc). Il GIS permette, tramite l'informatizzazione e la stratificazione dei dati, di avere una visione spaziale e multi-temporale dell'idrosistema, di visualizzarne la storia evolutiva e di prevederne gli sviluppi futuri, attraverso opportune e mirate sintesi dei vari strati informativi. L'uso di tali tecniche permette inoltre di evidenziare spazialmente tutti quegli elementi che nel tempo hanno denotato segni di vulnerabilità all'inondabilità, inquadrandoli nel loro contesto ambientale per singoli episodi e di classificarli in classi di rischio.

Le analisi delle modificazioni altimetriche dell'alveo completano la base dati concorrendo a costruire il quadro dell'assetto morfologico attuale e passato del corso d'acqua e delle sue tendenze evolutive, secondo tronchi d'alveo a comportamento omogeneo.

Le informazioni morfologiche sulle piene storiche del corso d'acqua, calate nella situazione attuale e integrate con le informazioni sull'uso del suolo, porteranno alla previsione degli effetti attesi sul tessuto antropico, secondo scenari di rischio, classificati e descritti in base a livelli di pericolosità crescente e nelle specifico associati a portate di riferimento opportunamente individuate.

2.7.5.2
Analisi idraulica

Le portate di riferimento che vengono utilizzate per la descrizione degli scenari sono generalmente ricavate dall'elaborazione statistica delle serie storiche del corso d'acqua in esame. Quando non sono disponibili dati di portata per un periodo sufficiente, le portate di riferimento possono essere desunte dagli studi di regionalizzazione a scala di bacino quali, per esempio, quelli proposti da molte Autorità di Bacino e dalle Unità Operative del Gruppo Nazionale delle Catastrofi Idrogeologiche del Consiglio Nazionale delle Ricerche.
Per ciascun tronco d'alveo a comportamento omogeneo sono individuate almeno le portate di riferimento associate a scenari di moderata ed elevata pericolosità; per queste portate vengono condotte le verifiche idrauliche volte alla determinazione dei livelli di massima piena, attraverso cui esaminare i franchi idraulici delle opere longitudinali (argini, difese ecc.) e trasversali (ponti, viadotti, traverse ecc.); queste portate sono infine quelle da utilizzare nelle analisi per la delimitazione dei campi di inondazione.

L'approccio modellistico applicato dipende dalla complessità del fenomeno da rappresentare: in alcuni casi può essere sufficiente una verifica idraulica in regime permanente con moto monodimensionale, mentre nelle situazioni più complesse può essere opportuno ricorrere a modelli bidimensionali in moto vario che tengano conto delle componenti trasversali del flusso e dei fenomeni di laminazione.

Particolare attenzione va posta ai punti in corrispondenza di tratti critici di probabile esondazione e specialmente:
- in corrispondenza delle opere di attraversamento;
- in corrispondenza di opere di derivazione;
- in corrispondenza di tratti arginati riconosciuti a rischio di sormonto;
- in corrispondenza di strutture che creano impedimento al deflusso delle acque;
- a monte di zone che, in base alle analisi morfologiche precedentemente descritte, sono segnalate come inondabili con alta probabilità relativa.

È sempre opportuno verificare il grado di affidabilità del modello applicato, attraverso il confronto delle simulazioni modellistiche con gli effetti morfologici ed i danni causati da piene passate per le quali è possibile ricostruire i campi di inondazione e rivedere la schematizzazione adottata, qualora si riscontrino scostamenti significativi.

2.7.5.3
Scenari di rischio

La mappatura del rischio di inondazione è un utile strumento per le attività di allertamento se associata ad un adeguato preannuncio delle piene, attività di competenza del sistema di allertamento nazionale e regionale per il rischio idrogeologico ed idraulico, a fini di protezione civile.

Gli indirizzi operativi per la gestione organizzata e funzionale del sistema, prevedono che per ogni rischio sia adottata una scala articolata in almeno due livelli di moderata ed elevata criticità, oltre ad un livello base di situazione ordinaria in cui le criticità possibili sono ritenute comunemente ed usualmente accettabili dalle popolazioni.
Escludendo il livello di base, gli altri livelli possono essere classificati secondo le seguenti definizioni:
- *livello 2:* moderata criticità, che corrisponde al superamento dei livelli di piena ordinaria definita come la portata che transita occupando interamente l'alveo del corso d'acqua con livelli prossimi a quelli del piano campagna o degli argini. Cominciano a diventare significativi i fenomeni di erosione delle sponde più vulnerabili ed iniziano ad essere inondate le aree prospicienti al corso d'acqua;
- *livello 3:* elevata criticità, che corrisponde al superamento del livello di piena straordinaria definita come la portata che non può transitare contenuta nell'alveo e quindi determina gravi fenomeni di inondazione.

Una volta definiti i livelli di criticità e le corrispondenti piene di riferimento, per singolo tronco d'alveo a comportamento omogeneo, sono disegnati i corrispontenti scenari di rischio. Per ciascun livello di allerta adottato sono realizzate opportune cartografie con base topografica adeguata (almeno 1:10.000) che

riporteranno i campi di inondazione previsti in base sia alle analisi morfologiche sia ai modelli idraulici, e le opere coinvolte nelle piene. È di fondamentale importanza che gli scenari di rischio evidenzino anche quei manufatti che possono influenzare la distribuzione dei deflussi, soprattutto se determinano vie preferenziali di tiranti idrici elevati.

2.7.6 Risultati dell'approccio interdisciplinare all'analisi dell'inondabilità: la mappatura del rischio idraulico del Fiume Sesia

La metodologia relativa alla mappatura delle aree a rischio di inondazione, brevemente descritta in precedenza, è stata messa a punto ed applicata a un tratto di Fiume Sesia (da Borgosesia alla confluenza del Torrente Cervo), nell'ambito del Progetto di Ricerca Floodaware (Prevenzione e Previsione delle Piene), facente parte dei programmi di ricerca dell'Unione Europea attivati a seguito degli eventi climatici estremi che hanno interessato l'Europa nei primi anni '90 e dettati dalla necessità di mitigare e gestire gli eventi alluvionali dato il loro elevato impatto socio-economico **(figura 2.7.16)**.
L'obiettivo del progetto era quello di fornire agli organismi preposti alla gestione dell'emergenza uno strumento di supporto alle decisioni, di semplice lettura, chiaro e che, in relazione alla pericolosità della piena prevista, permettesse di individuare le aree a rischio e di mettere quindi in atto le opportune misure di protezione civile.
Nell'ambito del Progetto Floodaware, gli scenari sono stati suddivisi in due classi, corrispondenti ai livelli di criticità prima descritti. Le piene di riferimento associate ai due livelli sono rispettivamente le piene con tempo di ritorno 20 e 200 anni.
In base all'analisi dei principali eventi alluvionali dell'ultimo secolo per il tratto in esame **(tabella 2.7.5)**, sono state analizzate le piene del settembre 1948 e del novembre 1968. Questi eventi, in base alla documentazione analizzata, sono stati caratterizzati da un tempo di ritorno abbondantemente superiore ai 20 anni, nel tratto preso in esame (Autorità di Bacino del Fiume Po, 1997). Tra le due, la piena del 1968 è quella meglio documentata e pertanto è stata considerata come la piena di riferimento per lo scenario di elevata criticità.

Per quanto riguarda la piena del 1968 alla stazione di Vercelli *"il cui idrometrografo – gravemente danneggiato – ha cessato di funzionare prima del colmo, il diagramma di piena è stato in parte ricostruito sulla base delle letture dirette. Durante il colmo, avvenuto alle ore 22 del 2 novembre, il livello fluviale ha raggiunto l'altezza di m 6,90. […]. L'altezza del colmo sarebbe stata certamente maggiore se, poco prima e in concomitanza delle stesse (ndr ore?), non si fossero verificate esondazioni sia negli affluenti che nel Sesia stesso"* (Ministero dei Lavori Pubblici, 1969). Altre fonti indicano valori di portata molto differenti (Carraro *et al.*, 1970): *"L'ondata di piena fu valutata dai tecnici de Consorzio Ovest Sesia intorno ai 6'000 m³/s (altre fonti indicano valori più bassi)"*.

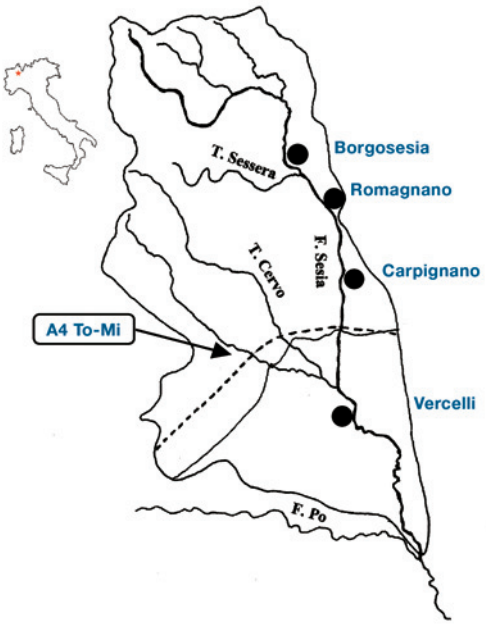


Figura 2.7.16
il Fiume Sesia, affluente alpino del Po nasce sul Monte Rosa ed ha un bacino imbrifero di 3100 km². I contributi principali sono dati dal Torrente Sessera, a valle di Borgosesia, e dal Torrente Cervo (bacino di 1'088 km²), appena a monte di Vercelli. Nel Sesia confluiscono altresì buona parte dei deflussi provenienti dal territorio della pianura vercellese

Come riferimento per gli scenari di moderata criticità è stata presa la piena del settembre 1993, per la quale è stato stimato un tempo di ritorno di circa 20 anni.

La definizione degli scenari del passato si è quindi basata sullo studio dei processi e degli effetti legati alle piene storiche, ricostruiti attraverso l'interpretazione di fotografie aeree relative ai maggiori eventi alluvionali. L'analisi fotointerpretativa ha portato al riconoscimento dei campi di inondazione e degli effetti indotti dalle piene (danni alle opere, erosioni, tracimazioni, rotte arginali). A questi dati, di tipo areale, si sono aggiunte informazioni puntuali provenienti dal Sistema Informativo Geologico di Arpa Piemonte (SIGeo). Le informazioni contenute nel SIGeo, laddove non fossero risultate sufficientemente esaustive, sono state integrate con notizie reperite presso gli archivi di Stato, gli archivi comunali e in loco attraverso interviste.
Anche per il Fiume Sesia, come per altri corsi d'acqua piemontesi, dall'analisi della piene e in particolare

TABELLA 2.7.5 PIENE STORICHE E RELATIVI LIVELLI IDROMETRICI DEL FIUME SESIA

SEZIONE DI MISURA	AGOSTO 1934		SETTEMBRE 1948		NOVEMBRE 1968		SETTEMBRE 1993		NOVEMBRE 1994	
	Q [m³/s]	h [m]	Q [m³/s]	h [m]	Q [m³/s]	h [m]	Q [m³/s]	h [m]	Q [m³/s]	h [m]
Borgosesia	2'990	7.5	3'070	7.9	2'150	6.8	2'400	5.05	1'800	3.37
Vercelli	2'970	6.4	-	-	3'900	6.9	3'400*	5.68*	3'200*	5.65*

* stazione di Palestro (immediatamente a valle di Vercelli)

TABELLA 2.7.6 PORTATE DI ASSEGNATO TEMPO DI RITORNO DEL FIUME SESIA (AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME PO, 1997)

SEZIONE DI MISURA	TR 20 ANNI		TR 200 ANNI	
	Q [m^3/s]	q [$m^3/s\ km^2$]	Q [m^3/s]	q [$m^3/s\ km^2$]
Borgosesia	2'730	3.93	4'220	6.07
Vercelli	3'370	1.48	4'900	2.15

di quella del 1968, è emerso come le piene più sinificative riattivino la morfologia fluviale relitta e come questa influenzi fortemente la distribuzione dei deflussi. I livelli di energia raggiunti dalla corrente nella fascia marginale all'alveo attivo sono maggiori in corrispondenza delle forme fluviali relitte che, dipartendosi dall'alveo, si sviluppano anche per grandi distanze diventando così vie preferenziali per deflussi ad alta energia. In questo modo effetti significativi della piena, si ripercuotono su aree anche molto lontane dal corso d'acqua, talora occupate da insediamenti e infrastrutture.

Gli scenari ricostruiti attraverso i processi e gli effetti indotti dalle piene citate sono stati poi calati nel contesto ambientale odierno, per verificarne la loro validità in base all'assetto territoriale attuale e alle opere di difesa presenti.

L'assetto attuale è stato definito attraverso i seguenti passi:

- è stata analizzata l'evoluzione planoaltimetrica dell'alveo, e sono stati individuati i punti con le variazioni più significative;
- il territorio studiato è stato sottoposto ad un'approfondita analisi morfologica, finalizzata ad evidenziare le forme più importanti per la classificazione dell'inondabilità e per la ricostruzione degli scenari di rischio;
- è stata verificata l'efficacia e l'efficienza degli interventi di difesa idraulica;
- l'analisi fotointerpretativa e le cartografie storiche hanno permesso di ricostruire le modificazioni nel tempo dell'alveo attivo del Fiume Sesia e di riconoscerne la fascia di mobilità storica.

Il confronto dei limiti dell'alveo del Sesia del 1882-1884 con quello del 1994 ha indicato una generale riduzione della sua sezione in quest'ultimo secolo. In particolare, lo studio condotto sulle modificazioni del Fiume Sesia dal 1954 al 1994, ha evidenziato una generale tendenza al restringimento dell'alveo attivo, caratterizzata dall'innesco di processi erosivi di fondo, con possibilità di pesanti conseguenze sulla stabilità di opere quali ponti o attraversamenti di vario genere.

Al fine di valutare con maggiore precisione le variazioni plano-altimetriche del Fiume Sesia, si sono confrontate le sezioni trasversali misurate in anni diversi e i corrispondenti livelli idrometrici, per le piene di riferimento. Le sezioni fino al 1992 sono state ricavate da documentazione disponibile (di proprietà del Magistrato per il Po), mentre per evidenziare le modificazioni altimetriche successive a quella data sono state appositamente rilevate sei sezioni, nel 1997.

Il confronto delle sezioni nel tratto da Romagnano all'autostrada Torino-Milano ha messo in evidenza un generale aumento della sezione di deflusso del canale attivo, in conseguenza all'asportazione di grandi quantitativi di materiale in alveo dal 1971 al 1992.

Tale tendenza è confermata dalla comparazione dei livelli idrometrici per piene di riferimento. Per una piena con tempo di ritorno di 20 anni, il livello raggiunto nelle sezioni del 1992 è generalmente inferiore di 0.5-1 m rispetto a quello delle sezioni del 1971 (un esempio significativo è riportato nella **figura 2.7.17**).

Per le analisi idrauliche sono stati calcolati i livelli idrometrici tramite un modello idraulico che simula la propagazione idrodinamica della piena con schematizzazione monodimensionale in moto vario, il MIKE11® del *Danish Hydraulic Institute* (DHI, 2001-2004).
Nello stesso tratto, il confronto delle sezioni del 1992 e 1997 mostra invece una tendenza inversa volta al ripascimento dell'alveo **(figura 2.7.18)**, in accordo con quanto è emerso dalle analisi morfologiche del tratto alpino del Fiume Sesia, condotte nell'ambito del Progetto CatchRisk prima descritto. Pertanto si può ipotizzare che nel caso si ripetesse un fenomeno di portata analoga a quella del 1968, il corso d'acqua riacquisterebbe la fascia occupata dall'alveo a quella data e l'inondazione potrebbe coinvolgere le stesse aree provocando però danni maggiori, perché nel frattempo è aumentata l'occupazione antropica delle aree prossime al corso d'acqua.

Da Borgosesia a Romagnano e dall'autostrada Torino-Milano alla confluenza del Torrente Cervo, a valle del tratto testè descritto, non è stato possibile fare alcuna considerazione sulle variazioni altimetriche del fondo alveo, per la mancanza di sezioni di confronto.
Un secondo punto focale per la definizione degli scenari di rischio idraulico è stato il riconoscimento dei tratti d'argine a maggior rischio di rottura. L'analisi è stata effettuata in base alle informazioni storiche sulle rotte arginali e all'attuale stato di adeguatezza e manutenzione degli argini. Lo stesso criterio è stato applicato per individuare le opere di difesa più vulnerabili all'erosione.
A partire dai rilievi topografici delle sezioni d'alveo

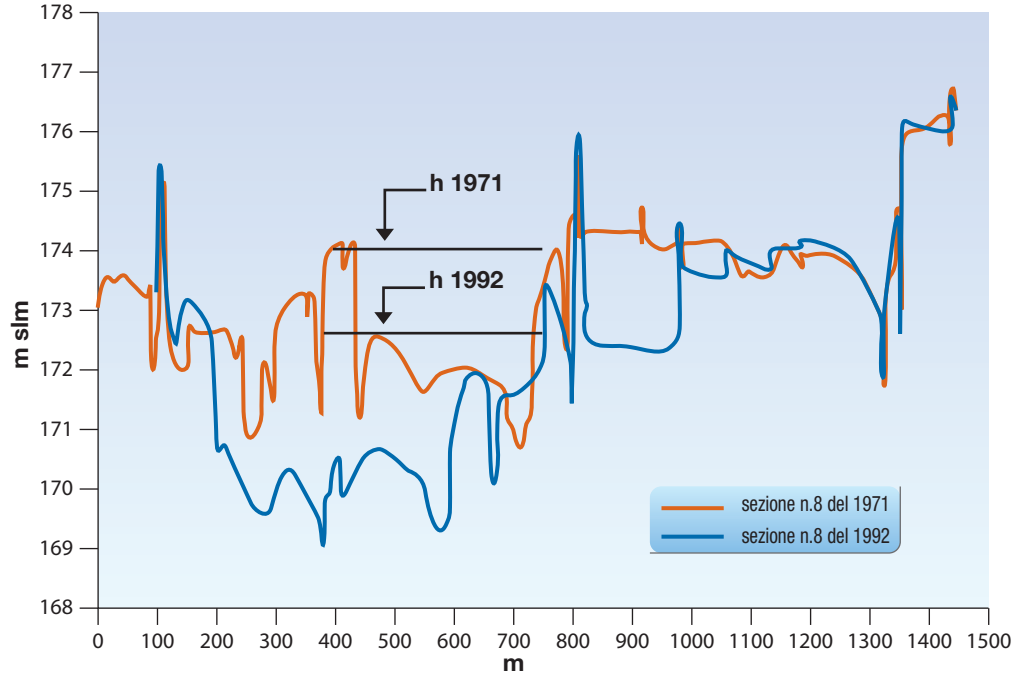


Figura 2.7.17
Sezioni di confronto 1971-1992 del Fiume Sesia a monte dell'autostrada Torino-Milano e livelli idrometrici per una piena con tempo di ritorno 20 anni

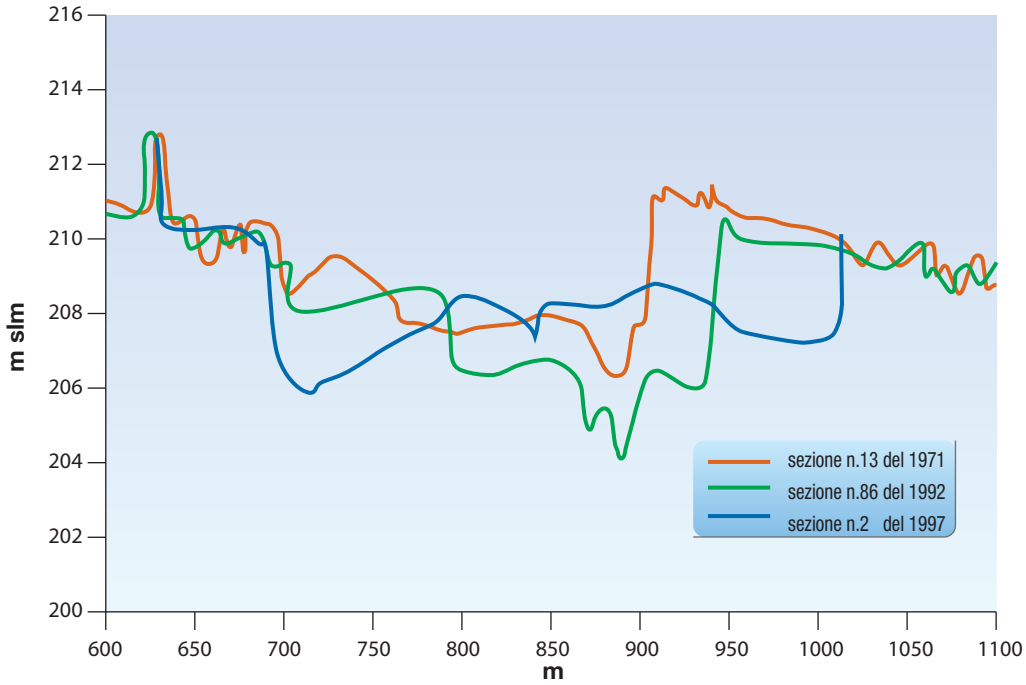


Figura 2.7.18
Sezioni di confronto 1971-1992-1997 del Fiume Sesia a monte di Carpignano

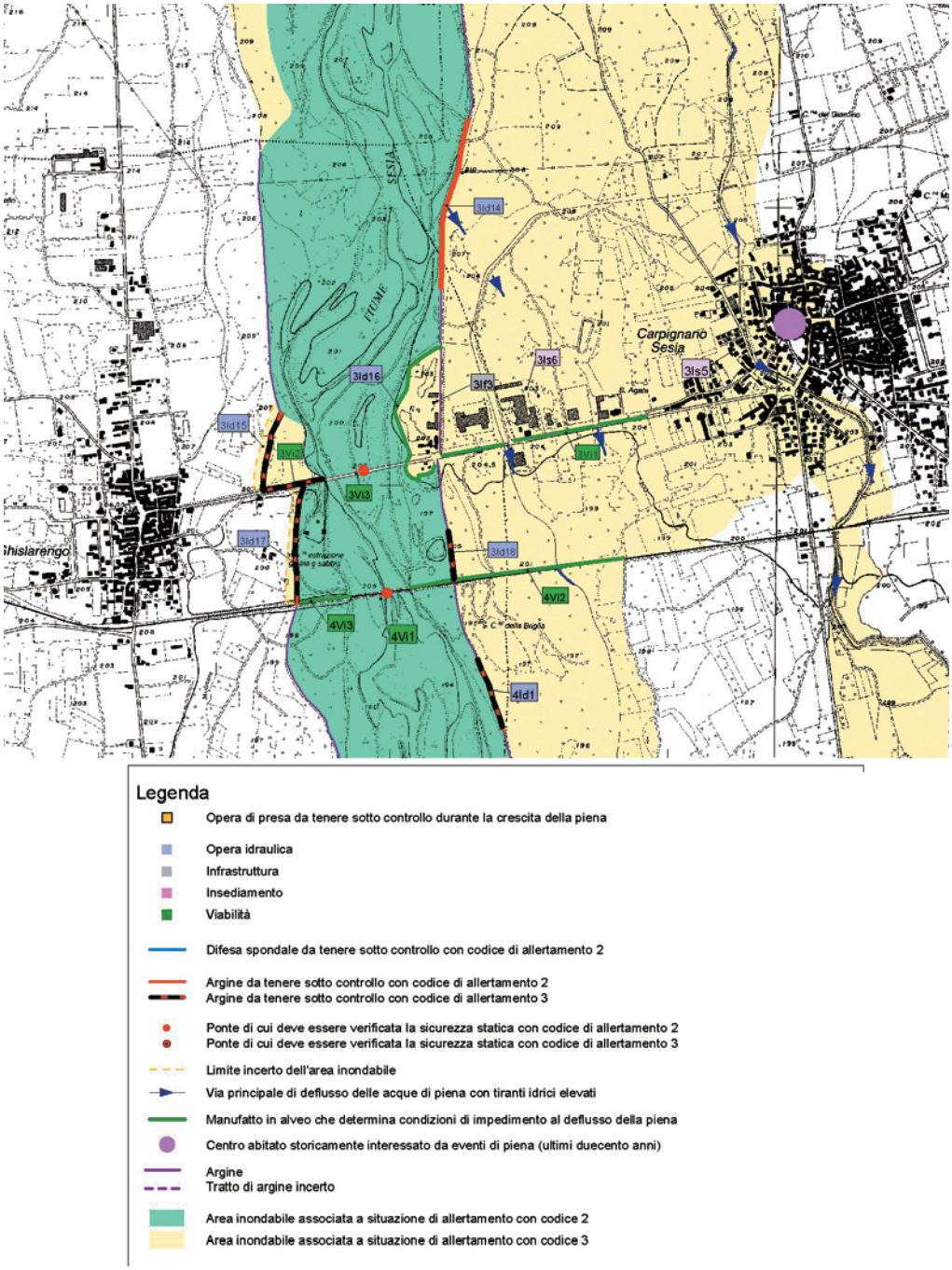
(rilievo 1992 del Magistrato per il Po), integrati con le sezioni dei ponti, attraverso il modello monodimensionale in moto vario, prima citato, sono stati ricostruiti i profili di piena delle portate rispettivamente con tempo di ritorno 20 e 200 anni.

Sono stati quindi verificati i tratti a rischio ed il grado di sicurezza dei ponti. I tratti arginali a rischio di sormonto sono stati individuati confrontando la quota sommitale dell'argine con i profili idraulici delle due piene prese come riferimento. Il grado di sicurezza dei ponti, riferito all'azione dinamica della corrente sull'impalcato, è stato valutato tramite il confronto dei profili di piena con la quota di intradosso del ponte.

Il grado di sicurezza statica dei ponti, riferito allo scalzamento delle fondazioni, è stato classificato in base all'efficienza delle opere di protezione ed all'entità dei fenomeni di erosione in atto.
L'abbassamento generalizzato del fondo alveo è particolarmente evidente in corrispondenza dei ponti; spesso i plinti di fondazione presentano fenomeni di sottoscavazione che in condizioni di piena possono pregiudicare la sicurezza statica dell'opera stessa.

Nell'analisi degli effetti delle piene alcune importanti considerazioni vanno fatte sul ruolo che ha giocato la presenza degli argini lungo il Fiume Sesia. Da Romagnano a Vercelli, nel 1968, era presente un sistema di arginature continuo in sponda destra e

Figura 2.7.19
Esempio di carta del rischio di inodazione



Legenda

- Opera di presa da tenere sotto controllo durante la crescita della piena
- Opera idraulica
- Infrastruttura
- Insediamento
- Viabilità
- Difesa spondale da tenere sotto controllo con codice di allertamento 2
- Argine da tenere sotto controllo con codice di allertamento 2
- Argine da tenere sotto controllo con codice di allertamento 3
- Ponte di cui deve essere verificata la sicurezza statica con codice di allertamento 2
- Ponte di cui deve essere verificata la sicurezza statica con codice di allertamento 3
- Limite incerto dell'area inondabile
- Via principale di deflusso delle acque di piena con tiranti idrici elevati
- Manufatto in alveo che determina condizioni di impedimento al deflusso della piena
- Centro abitato storicamente interessato da eventi di piena (ultimi duecento anni)
- Argine
- Tratto di argine incerto
- Area inondabile associata a situazione di allertamento con codice 2
- Area inondabile associata a situazione di allertamento con codice 3

Figura 2.7.20
Tabella degli scenari associata alla carta del rischio

Identificativo	Comune	Località	Sponda	Tipo di opera	Livello di allertamento	Descrizione
3ls5	Carpignano	Centro abitato	Sinistra	Insediamenti civili	3	Allagamento con elevati tiranti idrici per straripamento del cavo Brusca
3Vl3	Carpignano	S.P Ghislarengo-Carpignano	Sinistra	Viabilità- Rilevato stradale	3	Erosione in corrispondenza dei sottopassi dei canali. L'opera è di impedimento al deflusso della piena
4Vl2	Carpignano	F.S Biella-Novara	Sinistra	Viabilità- Rilevato ferroviario	3	Possibili erosioni. L'opera è di impedimento al deflusso della piena
3ld17	Carpignano/ Ghislarengo	A monte dell'area industriale	Sinistra	Opere idrauliche - Argine	2	Erosione arginale
3ld17	Carpignano/ Ghislarengo	A monte dell'area industriale	Sinistra	Opere idrauliche - Argine	3	Allagamento con elevati tiranti idrici
3lt2	Ghislarengo	Attività estrattiva	Sinistra	Infrastruttura-Cava	2	L'opera è di impedimento al deflusso della piena

TABELLA 2.7.7 ZONE EDIFICATE PER I COMUNI RICADENTI IN AREE GENETICAMENTE INONDABILI O INONDATE NEL 1994 E NEL 2000, LUNGO IL TRATTO DI FIUME PO STUDIATO

COMUNI		EDIFICATO PER CLASSE DI INONDABILITÀ [m²]					EDIFICATO INONDATO [m²]	
Nome	Edificato [km²]	I	II	III	IV	Totale I-IV	1994	2000
Brandizzo	1.29	0	17'565	0	177'059	194'624	17'565	
Castiglione T.se	2.04	115	33'924	480'394	267'792	782'225	33'900	17'183
Chivasso	4.69	6'123	459'884	0	0	466'007	331'746	378'710
Gassino T.se	1.40	0	0	25'962	25'962	26'216		
San Mauro T.se	3.91	47'143	720'008	673'434	414'022	1'854'607	85'666	788'112
San Raffaele Cimena	0.87	0	41	0	374'243	374'284	41	
Settimo T.se	7.10	0	0	360'815	1'039'244	1'400'059		
Torino	53.20	25'686	579'622	1'901'176	494	2'506'978	91'310	596'776

sinistra che, durante la piena del novembre di quell'anno, risultò inadeguato. Le acque, tracimando o sfondando gli argini in più punti, si sono distribuite su aree esterne, considerate quindi protette; le arginature inoltre hanno anche amplificato gli effetti dell'inondazione, impedendo il rientro delle acque nell'alveo. Poiché la funzionalità del sistema di argini non è migliorata nei trent'anni successivi, il problema si potrebbe riproporre per situazioni analoghe.

Integrando le informazioni derivate dalle analisi sopra descritte sono stati definiti gli scenari di rischio associati ai livelli di allertamento.
Per il livello 2 (moderata criticità), l'area inondabile prevista per piena ordinaria è stata fatta corrispondere alla fascia di deflusso della piena del 1993 (tempo di ritorno di circa 20 anni) con estensione fino agli argini laddove continui; in questo scenario il deflusso della piena avviene prevalentemente all'interno dell'alveo inciso con possibilità di riattivazione dei canali secondari prossimi al corso d'acqua e inondazione delle aree limitrofe più depresse. Solo localmente sono previsti effetti sulle strutture ed infrastrutture prospicienti l'alveo.
Per il livello 3 (elevata criticità), l'area inondabile prevista per piene straordinarie è stata ottenuta dall'inviluppo della fascia occupata dai deflussi durante l'evento alluvionale del 2-4 novembre 1968 (tempo di ritorno tra 20 e 200 anni) con l'alveo del 1882; infatti dal confronto delle aree inondate nel 1968 con le aree occupate dai canali attivi del Sesia nel 1882 è emerso come le prime fossero contenute quasi sempre nelle seconde e come le forme ormai relitte, associate all'alveo del 1882, avessero fortemente influenzato la distribuzione dei deflussi. I limiti dell'area inondabile sono stati ulteriormente estesi laddove sono emerse indicazioni di danni frequenti, dall'analisi storica sugli eventi alluvionali. La fascia che ne risulta, in alcuni tratti, è molto ampia in quanto tiene conto della riattivazione di morfologie relitte o di fenomeni di propagazione delle portate attraverso i canali artificiali di derivazione. Il riconoscimento dell'alveo del 1882 ha messo in luce inoltre come molte aree di pertinenza di quest'ultimo siano state via via occupate da insediamenti civili ed industriali. Alcune di queste aree furono inondate durante la piena del 1968 con il coinvolgimento di molti manufatti, altre, antropizzate successivamente, si possono attualmente considerare in una situazione di rischio.

Tutte le informazioni utili nelle fasi di allertamento e monitoraggio degli eventi, derivate dalle analisi morfologiche, idrauliche e storiche, sono state sintetizzate negli scenari di rischio, classificati in funzione del livello di allertamento della piena prevista e rappresentati in una cartografia alla scala 1:10.000 **(figura 2.7.19)**, corredata da tabelle esplicative **(figura 2.7.20)** degli effetti e dei danni attesi. Gli scenari di rischio comprendono anche le opere che devono essere tenute sotto controllo e per le quali sono stati sinteticamente descritti gli effetti dei deflussi, per i due livelli di allertamento.

2.7.7 Conclusione e sviluppi

L'azione condotta da Arpa Piemonte per la previsione delle piene e dei loro potenziali effetti è volta da un lato all'affinamento degli aspetti previsionali meteorologici, idrologici ed idraulici e dall'altro alla realizzazione di una solida base dati geomorfologica concernente i corsi d'acqua e l'ambiente di pertinenza fluviale, base dati di interesse determinante, non solo per le azioni di protezione civile, ma anche per l'ordinaria gestione del territorio. Le analisi morfologiche sui corsi d'acqua, condotte dal Centro Regionale per le Ricerche Territoriali e Geologiche di Arpa Piemonte hanno l'obiettivo di fornire un quadro delle dinamiche in atto e di prevederne le tendenze future sulla base delle variazioni morfologiche avvenute. I risultati degli studi si concretizzano in carte geomorfologiche e in cartografie di sintesi sulla pericolosità e sul rischio di inondazione, da utilizzarsi come supporti decisionali nelle attività di pianificazione e protezione territoriale.

I comuni di Torino e Chivasso ricadono solo parzialmente nell'area di studio, ma i valori delle aree edificate (colonna 2) sono riferite all'intero territorio comunale.
Un esempio di applicazione della classificazione delle aree a inondabilità genetica nelle attività previsionali di competenza di Arpa Piemonte è l'individuazione delle zone urbanizzate, potenzialmente interessate da eventi di piena, classificate in funzione della priorità di sommersione. Queste informazioni sono importanti nelle attività di allertamento, perché permettono di avere un quadro, anche se indicativo sulla distribuzione dei soggetti a rischio; è così possibile infatti porre l'attenzione in particolar modo a quelle municipalità per le quali sia prevedibile il coinvolgimento di zone abitate, soprattutto se in classi di inondabilità I, II.

La classificazione delle aree inondabili in funzione degli effetti attesi, permette inoltre di conoscere a priori le aree che potrebbero essere interessate dal passaggio di correnti ad alta energia, con capacità di danneggiare seriamente le cose e di rendere difficili le operazioni di evacuazione delle persone eventualmente presenti. Infatti, opere trasversali alle zone ove si sono riconosciute forme d'alveo abbandonate ma riattivabili, quali antichi canali, potrebbero essere investite e distrutte, con grave pericolo, qualora si tratti di arginature, per le aree a tergo e con grave rischio di isolamento per le comunità che dovrebbero servire, qualora si tratti di opere stradali. Tale classificazione si basa anche sul riconoscimento di forme abbandonate attualmente per nulla o poco incise, riconoscibili solo attraverso l'analisi specialistica di riprese aeree o delle cartografie più antiche.

Per questo motivo, l'approccio morfologico all'inondabilità permette anche di contestualizzare meglio gli studi idraulici, perché fornisce una visione morfologica del territorio, evidenziando anche le micro-morfologie, irrilevanti dal punto di vista topografico ma estremamente condizionanti le dinamiche dei deflussi.
In situazioni di forte urbanizzazione, nella delimitazione delle aree a rischio di inondazione, l'approccio morfologico d'altro canto trova un'applicazione limitata. Infatti, nel caso in cui le acque di piena coinvolgano zone urbanizzate, l'estensione delle aree allagate, i livelli di energia raggiunti dalla corrente e le vie preferenziali di deflusso vengono influenzati, più che dalla morfologia del terreno, dalla distribuzione e dalla densità di opere strutturali quali edifici, strade, ponti e rilevati. Da qui la necessità di porre in atto altre tipologie di analisi, quali le analisi storiche (Giampani & Loi, 2000) e la modellazione idraulica.
Tutte le analisi territoriali qui descritte sono state effettuate secondo i principi dei Sistemi Informativi Geografici che permettono realizzare basi dati condivisibili e aggiornabili.

Ma per poter sfruttare le potenzialità dei Sistemi Informativi Geografici è indispensabile disporre di basi dati omogenee e semanticamente corrette e univoche, basate su un linguaggio comune e su procedure condivise da applicarsi già nelle fasi di creazione del dato, ovvero già dal momento del rilevamento (di terreno o di fotointerpretazione). Per questo motivo Arpa Piemonte ha predisposto una serie di strumenti e di procedure dedicate ai rilevatori perché possano realizzare già in fase di produzione del dato cartografie numeriche secondo un'ottica GIS. Il risultato di questo lavoro sono strumenti informatici e manuali d'uso volti a trasformare le cartografie dei singoli esperti coinvolti nelle analisi fluviali in un *unicum* di dati omogenei, comprensibili e condivisi da tutti.

Il Progetto *Floodaware* infine rappresenta un esempio metodologico per la mappatura delle aree a rischio di inondazione dove le analisi idrauliche, morfologiche e storiche degli idrosistemi si sintetizzano in un approccio interdisciplinare, per la definizione scenari di rischio reali, calati nel territorio, che indicano vere e proprie azioni da compiersi nelle fasi di allertamento e di emergenza, secondo i livelli di criticità stabiliti nell'ambito sistema di allerta regionale. Questo lavoro si può quindi porre come studio di base del rischio, su cui le amministrazioni territorialmente competenti, possono predisporre i propri piani di protezione civile e definire le azioni di salvaguardia da attivare conseguentemente alle valutazioni previsionali e di sorveglianza del Centro Funzionale regionale deputato a tale compito.

Bibliografia

I lavori contrassegnati da asterisco non sono citati esplicitamente nel testo.

*APAT, Sistema Nazionale di Osservazione ed Informazione Ambientale (2005), *Prima definizione di modelli revisionali per qualificare e quantificare gli effetti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi.* Rapporto 03-19.

*ART, Ambiente Risorse e Territorio (2004), *Fiume Sesia, Relazione metodologica e di Sintesi.* Programma INTERREG IIIB Spazio alpino, Progetto CatchRisk: Mitigation of hydro-geological risk in alpine catchments – Definizione delle aree geneticamente inondabili e della loro pericolosità relativa in ambiente fluviale, pp. 158, Rapporto interno.

*ART, Ambiente Risorse e Territorio (2004), *Fiume Po, Relazione metodologica e di sintesi.* Programma Interreg IIIB Spazio alpino Progetto CatchRisk: Mitigation of hydro-geological risk in alpine catchments – Definizione delle aree geneticamente inondabili e della loro pericolosità relativa in ambiente fluviale, pp. 11, Rapporto interno.

*ART, Ambiente Risorse e Territorio (2004), *Lineeguida.* Programma Interreg IIIB Spazio alpino, Progetto CatchRisk: Mitigation of hydro-geological risk in alpine catchments, Definizione delle aree geneticamente inondabili e della loro pericolosità relativa in ambiente fluviale, pp. 36, Rapporto interno.

*Autorità di Bacino del Fiume Po (1997), *Piano Stralcio per la difesa idrogeologica e della rete idrografica nel bacino del Po.*

AA.VV. (2005a), *Guidelines.* Programma INTERREG IIIB Spazio alpino Progetto Catchrisk: Mitigation of Hydro-Geological Risk In Alpine Catchments, Arpa Piemonte.

*AA.VV. (2005b), *Final Report.* Programma INTERREG IIIB Spazio alpino Progetto Catchrisk: Mitigation of Hydro-Geological Risk In Alpine Catchments, Regione Lombardia.

*Barbero S. & Giampani C. (1998), *Mappatura delle aree a rischio di inondazione finalizzata alla gestione dell'emergenza.* In Atti XXVI Convegno Idraulico e Costruzioni Idrauliche, Catania, 9-12 settembre 1998, vol. III, pp. 3-14, Ed. CUECM.

*Barbero S., Graziadei M. & Rabuffetti D. (2003), *Analisi Idrometrica,* in Regione Piemonte, *Eventi Alluvionali in Piemonte – Evento del 13-16 Ottobre 2000,* vol. I, pp. 45-57, ARES, Arti Grafiche – Torino.

Bellardone G. & Forlati F. (1996a), *Torrente Orco tratto di pianura,* in Regione Piemonte, *Gli eventi alluvionali del settembre – ottobre 1993 in Piemonte,* pp. 71-80, L'artistica di Savigliano, Torino.

Bellardone G. & Forlati F. (1996b), *Bacino della Dora Baltea,* in Regione Piemonte, Gli eventi alluvionali del settembre – ottobre 1993 in Piemonte, pp. 54-62, L'artistica di Savigliano, Torino.

Bellardone G. & Giampani C. (2003), *Fiume Dora Baltea, nel tratto piemontese,* in Regione Piemonte, Eventi Alluvionali in Piemonte – Evento del 13-16 Ottobre 2000, vol. I, pp. 130-142, ARES, Arti Grafiche – Torino.

*Bortolami G.C., Campanino F., Carraro F., Clari P.A., Forno gG., Ferrero E., Ghibaudo G., Maso V. & Ricci B. (1978), *Dati preliminari sulla neotettonica dei Fogli 56 (torino), 68 (Carmagnola) e 80 (Cuneo). Estratto da:* Contributi preliminari alla realizzazione della Carta Neotettonica d'Italia. Pubb. N. 155 del Progetto Finalizzato Geodinamica, pp. 149,180.

Carraro F., Dal Piaz G.V. & Sacchi R. (1970), *Studio geologico di un settore a sud di Vercelli,* in *Studi geologici nel Vercellese e nella Valle Strona,* pp. 121-141, Sirea Print, Torino

Carraro F. (1992), *Evoluzione Plio Quaternaria,* in AAVV, Le Alpi, dal M. Bianco al Lago Maggiore. Guide Geologiche d'Italia, 3/vol. I, pp 84-89, BE_Ma editrice, Roma, 1992.

*Compagnoni R. & Forno M.G (1992), *Significato geologico di depositi fluviali ghiaiosi Pleistocenici medi nella collina di Torino.* Il Quaternario 5, (1), pp. 105-122.

DHI Water & Environment (2001-2004), *MIKE 11© A modelling system for river channels.* Reference Manual.

*Forno M.G. (1980), *Evidenza di un drenaggio abbandonato nel settore settentrionale dell'altopiano di Poirino (prov. Di Torino).* Geografia Fisica e Dinamica del Quaternario, 3 pp. 61-65, 3 ff.

Giampani C. & Loi B. (2000), *L'analisi dei dati storici nella delimitazione delle aree urbane a rischio di inondazione: il caso di Vercelli.* Geam Geoingegneria Ambientale e Mineraria, giugno-settembre 2000 pp. 135-142.

Maraga F. (1989), *Ambiente fluviale in trasformazione: l'alveo-tipo pluricursale verso un nuovo modellamento nell'alta pianura padana,* in Suolo sottosuolo Atti del Congresso "Suolosottosuolo", vol.1, pp. 119-128, Associazione Mineraria Subalpina, Torino 27-30 settembre 1989.

*Maraga F. & Turitto O. (1998), *Diagnosi geomorfologica d'inondabilità in casi di studio sull'idrografia padana,* in: Luino F. (a cura di), *La previsione delle catastrofi idrogeologiche: il contributo della ricerca scientifica.* Atti del Convegno Internazionale "Alba 96", vol. II, p. 313-334, Pubblicazione Gruppo Nazionale Difesa Catastrofi Idrogeologiche, n. 1006, L'Artistica di Savigliano.

Ministero di Lavori Pubblici, Servizio Idrografico (1969) *Alluvione dei giorni 1-3 Novembre 1968 sul territorio della Liguria e del Piemonte,* suppl. al Bollettino Idrografico del mese di Novembre 1968, pp. 14, Tipografia Edigraf, Roma.

Nigrelli G. (2005), Vezzolano: *inquadramento naturalistico.* Natura Web 2005.

Ortolani F. & Pagliuca S. (2001), *Le variazioni climatiche storiche e la prevedibilità delle modificazioni relative all'effetto serra.* Associazione Italiana Nucleare, Roma.

Polino R. & Sacchi R. (1995), Rapporti *Alpi-Appennino,* Atti II Incontro Internazionale dei Giovani Ricercatori in Geologia Applicata, Peveragno (CN).

*Ramasco M., Giampani C. & Aliatta P. (2001), *Analisi comparata dell'evoluzione storica dell'alveo del fiume Sesia e delle piene del novembre 1968 e settembre 1993 finalizzata alla prevenzione degli effetti indotti da eventi alluvionali.* Collana Informativa tecnico Scientifica ARPA Piemonte Quaderno n° 8.

Ravera S., Buffo M., Cavallero E. & Tresso F. (1996), *Aspetti ideologici dell'evento dei giorni 22-24 settembre 1993,* in AA.VV. *Gli Eventi alluvionali del Settembre Ottobre* 1993, in Piemonte, pp. 27-31, L'artistica di Savigliano, Torino.

Regione Piemonte (1998), *Eventi alluvionali in Piemonte - 2-6 novembre 1994, 8 luglio 1996,* 7-10 ottobre 1996, vol. I pag. 414, L'artistica di Savigliano, Torino.

Rosgen D. (1994), *A classification of natural river.* Catena, vol. 22, 169-199.

Visentini M. (1952), Igiene e terapeutica del Po, in La Rotta del Po, Ulisse, Anno, VI, vol. III, Fascicolo XVII, pp. 552-565.

Cartografie

*Bellardone G. & Tamberlani F. *Carta numerica dei processi e degli effetti associati al passaggio della piena del torrente Orco: evento alluvionale del 23-25 settembre 1993, tratto Cuorgné-confluenza Po.* Scala 1:10.000, Regione Piemonte Repertorio Cartografico.

*Bellardone G., Forlati F. & Tamberlani. F. *Carta numerica dei processi e degli effetti associati al passaggio della piena del fiume Dora Baltea: evento alluvionale del 23-25 settembre 1993. tratto Carema-Ivrea.* Scala 1:10.000, Regione Piemonte Repertorio Cartografico.

*Bellardone G. & Giampani C. (2003), *Carta numerica: del campo di inondazione ed effetti indotti dalla piena del 13-16 ottobre 2000 della Dora Baltea nel tratto piemontese,* Scala 1:10.000. Arpa Piemonte.

Dutto F. (1993), *Carta degli alvei attivi del F, Po tra il 1958 e il 1988,* in Piano territoriale del fiume Po, 1993.

*Giampani C. & Ramasco M. *Carta numerica del campo di inondazione ed effetti indotti dalla piena del 2-3 novembre 1968 del fiume Sesia. tratto Borgosesia-confluenza Cervo.* Scala 1:10.000, Regione Piemonte Repertorio Cartografico.

*Giampani C. & Ramasco M. *Carta numerica delle tendenze evolutive del fiume Sesia dal 1954 al 1994, tratto Borgosesia-Vercelli* Scala 1:10.000, Regione Piemonte Repertorio Cartografico.

*Giampani C. & Ramasco M. C*arta numerica delle modificazioni dell'alveo del fiume Sesia dal 1851 al 1994. tratto Romagnano-Vercelli.* Scala 1:10.000, Regione Piemonte Repertorio Cartografico.

Mensio L. (1996), *Carta numerica del campo di inondazione ed effetti indotti dalla piena del 04-06 novembre 1994 del fiume Po in provincia di Torino.* Scala 1:10.000, Regione Piemonte Repertorio Cartografico.

*Giampani C. & Aliatta P. (1996), *Carta numerica dei processi e degli effetti associati al passaggio della piena del fiume Dora Baltea: evento alluvionale del 23-25 settembre 1993, tratto Ivrea-confluenza Po.* Scala 1:10.000, Regione Piemonte Repertorio Cartografico.

*Giampani C., *Carta numerica dei processi e degli effetti associati al passaggio della piena del fiume Sesia: evento alluvionale del 23-25 settembre 1993, tratto Borgosesia-confluenza Po,* inedita.

Paro L. (2003), *Carta numerica del campo di inondazione ed effetti indotti dalla piena del 13-16 ottobre 2000 del fiume Po nel tratto Torino, confluenza Dora Baltea,* Scala 1:10.000. Arpa Piemonte.

Susella G, Bormioli D. & Gallo M. (2003), *Carta numerica del campo di inondazione ed effetti indotti dalla piena del 13-16 ottobre 2000 del torrente Orco nel tratto Cuorgnè, Chivasso,* Scala 1:10.000. Arpa Piemonte.

La previsione e l'allertamento

3

3.1 La previsione meteorologica

3.1.1 Predicibilità

L'atmosfera è un sistema dinamico con un elevato numero di gradi di libertà ed intrinsecamente caotico. Il suo stato in un dato istante è descritto dalla distribuzione spaziale di vento, temperature, pressione, umidità e altre variabili. Essendo un fluido, l'atmosfera rientra in quella branca della fisica che va sotto il nome di *fluidodinamica* e la sua evoluzione può essere descritta in termini matematici da equazioni analitiche, quali la conservazione della massa, dell'energia e del momento.

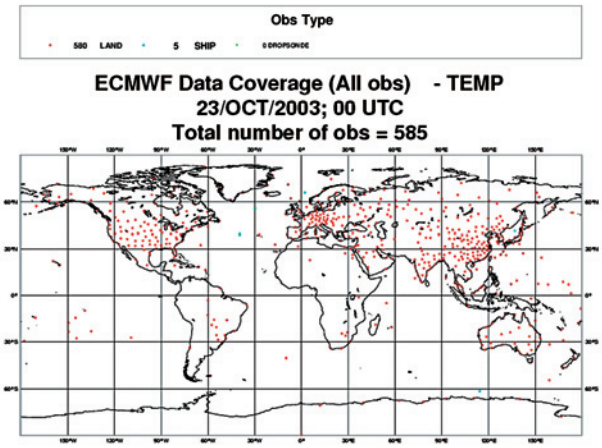


Figura 3.1.1 Esempio di copertura dati provenienti da radiosondaggi del WMO (*World Meteorological Organization*)

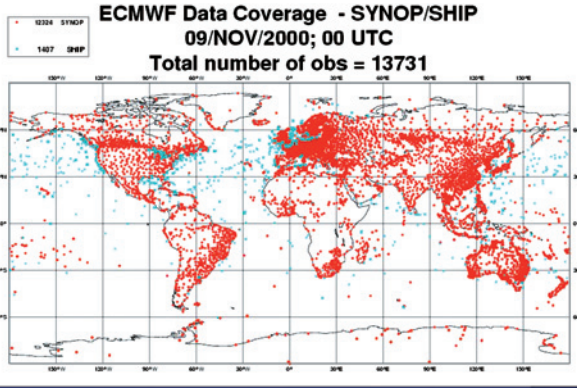


Figura 3.1.2 Esempio di copertura dati provenienti da stazioni di misura al suolo del WMO

Si tratta di equazioni differenziali, la cui soluzione presuppone la conoscenza di un punto di partenza o, matematicamente parlando, condizione iniziale, a partire dalla quale operare un'integrazione nel tempo. Tale condizione iniziale è data da complesse procedure di assimilazione, che producono una stima dello stato dell'atmosfera a partire dalle osservazioni disponibili (la cosiddetta *analisi*). Il fatto che le misure osservate siano disponibili in numero limitato e disuniforme introduce un pesante fattore di incertezza nelle condizioni iniziali, che si ripercuote inevitabilmente sui risultati della previsione, diventando fonte di errore. Per una previsione corretta è inoltre necessario che i modelli siano in grado di riprodurre accuratamente i fenomeni dominanti in atmosfera. Il fatto che essi siano in grado di simulare solo certe categorie di processi, in base alle loro caratteristiche scale spaziali e temporali, è la seconda fonte di errore previsionale.

Infine, nonostante la sorprendente velocità di sviluppo delle risorse informatiche messe a disposizione della comunità scientifica, con computer di anno in anno sempre più potenti e rapidi nel gestire le attività di calcolo, le risorse computazionali costituiscono spesso un limite alla complessità e risoluzione dei modelli numerici e dell'assimilazione dei dati, poiché è necessario raggiungere un compromesso tra accuratezza modellistica e tempo di calcolo richiesto dalla simulazione per finalità operative. Queste tre fonti di errore fanno sì che le previsioni si deteriorino all'aumentare del tempo di previsione. L'incertezza sulle condizioni iniziali, in particolare, non potrà mai essere del tutto eliminata, poiché al limite dato dalla disuniformità della copertura si deve aggiungere l'errore intrinseco dovuto all'accuratezza e sensibilità dello strumento di misura. Questo fa sì che piccole incertezze, legate al sistema osservativo, siano ineliminabili dalle condizioni iniziali. Di conseguenza, anche nell'ipotesi di un sistema di equazioni perfetto, due stati iniziali che differiscano anche di poco tendono a divergere l'uno dall'altro molto rapidamente, all'aumentare del tempo di previsione. Gli errori osservativi si amplificano così fino ad influenzare negativamente l'affidabilità della previsione. Negli ultimi 15 anni l'accuratezza della previsione è migliorata sostanzialmente nei primi 5 giorni, ma la riduzione dell'errore nei giorni successivi è ancora molto contenuta.

L'indirizzo attualmente seguito dalla ricerca scientifica è quello di cercare di risolvere il problema della predicibilità impostando la previsione in termini di probabilità, attraverso il cosiddetto metodo dell'EPS (*Ensemble Prediction System*), che consente di tenere in considerazione la componente caotica del moto atmosferico, non contemplata dai modelli numerici, di per se stessi deterministici. Lorenz (1963) scoprì per primo che, ripetendo la stessa simulazione con valori leggermente diversi, l'evoluzione dell'atmosfera elaborata numericamente si discostava nettamente nei diversi casi. Sulla base di tale esperimento è nata appunto la tecnica di previsione dell'EPS. Esso viene generato producendo un numero elevato di simulazioni che differiscono per le condizioni iniziali, ottenute modificando leggermente quella della simulazione operativa. A ogni scenario ottenuto, che può

differire anche molto dagli altri, viene associata una probabilità; ciò significa che se ad esempio 25 simulazioni su 50 prevedono precipitazione superiore a 20 mm, a tale evento sarà assegnata una probabilità del 50% di verificarsi.

Mentre i modelli ad alta risoluzione hanno dimostrato di essere molto sensibili a piccole variazioni delle condizioni iniziali, l'approccio dato dall'EPS trae un vantaggio da questa incertezza. Tale tecnica è utilizzata presso il servizio meteorologico del Piemonte, che riceve quotidianamente i risultati di un *ensemble* di 51 membri, prodotto dall'ECMWF (*European Centre for Medium-range Weather Forecasts*), per i campi di precipitazione e di temperatura. Tali previsioni, vengono utilizzate per il cosiddetto *medium range forecast,* ovvero le previsioni a medio termine (dal quarto al settimo giorno). Un esempio viene dato nella **figura 3.1.4** che si riferisce alla probabilità di precipitazione relativa ai giorni 15 e 16 ottobre 2000. Tale evento alluvionale fu in effetti previsto con sufficiente anticipo proprio grazie a questo prodotto. Attualmente, in Piemonte, le previsioni a medio termine rivestono una notevole importanza nel bollettino del sistema olimpico per la descrizione della tendenza delle condizioni meteorologiche.

3.1.2 Modelli

Si distinguono due categorie principali di modelli numerici per la previsione del tempo:

- i modelli globali (GCM – *Global Circulation Models*);
- i LAM *(Limited Area Model)* o modelli ad area limitata.

I modelli di circolazione globale (GCM) sono alla base del processo previsionale dei fenomeni atmosferici. Simulano l'evoluzione su scala planetaria, ovvero su tutto il globo, per un'estensione verticale che arriva fino a 30 km dalla superficie terrestre, sebbene l'area di interesse per l'evoluzione del tempo inteso in senso meteorologico sia limitata ai primi 15 km dalla superficie (*Troposfera).* Ciò che rende tale strato atmosferico di peculiare interesse per la meteorologia è la presenza, nella sua composizione, del vapore acqueo; come diretta conseguenza, essa è sede di tutti i fenomeni di cambiamento di fase e flussi di calore che sono alla base degli eventi meteorologici. Avendo un dominio di integrazione vastissimo (l'intero globo), i GCM hanno bassa risoluzione spaziale (dell'ordine delle centinaia di chilometri). Per comprendere il concetto di risoluzione è necessario pensare che, in ambito modellistico, le funzioni continue che rappresentano le diverse variabili dinamiche vengono rappresentate tramite matrici. Queste ultime assumono i loro valori su un dominio, costituito da un insieme di punti nello spazio, i quali costituiscono la cosiddetta griglia del modello.

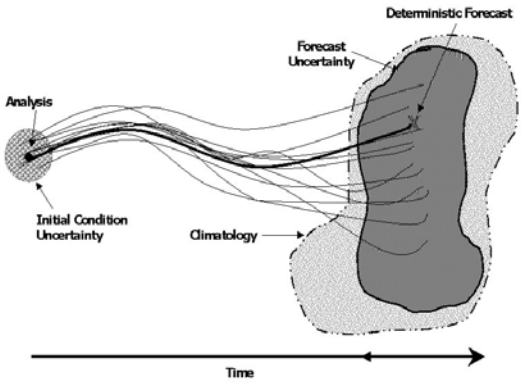


Figura 3.1.3
Schema dell'evoluzione nel tempo di possibili configurazioni atmosferiche in un modello deterministico. Come si nota, a partire da condizioni iniziali che differiscono anche poco le une dalle altre, al passare del tempo le traiettorie che descrivono l'evoluzione nel tempo dell'atmosfera divergono anche sensibilmente; la distanza tra i punti di arrivo dà una misura dell'incertezza previsionale

La risoluzione è data dalla distanza tra due punti contigui: tanto più piccolo è questo intervallo e tanto maggiore è la risoluzione. In base alla risoluzione si può definire il tipo di fenomeni che possono essere simulati correttamente. Di fatto, un modello è in grado di riprodurre realisticamente fenomeni che avvengono su scale dell'ordine del doppio della sua scala caratteristica. D'altra parte, i fenomeni che avvengono nell'atmosfera sono enormemente vari, differendo, oltre che per tipologia, anche per scala spaziale e temporale. Si spazia da quelli cosiddetti di larga scala, che avvengono su scale dell'ordine dei 3'000 km, a quelli di mesoscala, dell'ordine delle centinaia di chilometri, ai fenomeni di brezza e *squall-lines* (decine di chilometri), ai fenomeni convettivi (1-2 km), fino ai moti molecolari. I GCM sono in genere in grado di simulare correttamente i fenomeni di larga scala e mesoscala.

I LAM, invece, si limitano a considerare aree più ristrette. Riducendo il dominio di integrazione diminuisce la mole di calcoli a carico del computer e diventa possibile aumentare la risoluzione spaziale del modello (al di sotto dei 40 km), che in tal modo è in grado di descrivere fenomeni che hanno luogo su scale spaziali e temporali più ridotte. I modelli LAM sono usati per simulare fenomeni di mesoscala, che hanno scale caratteristiche non risolte dai modelli a larga scala. In base alla defi-

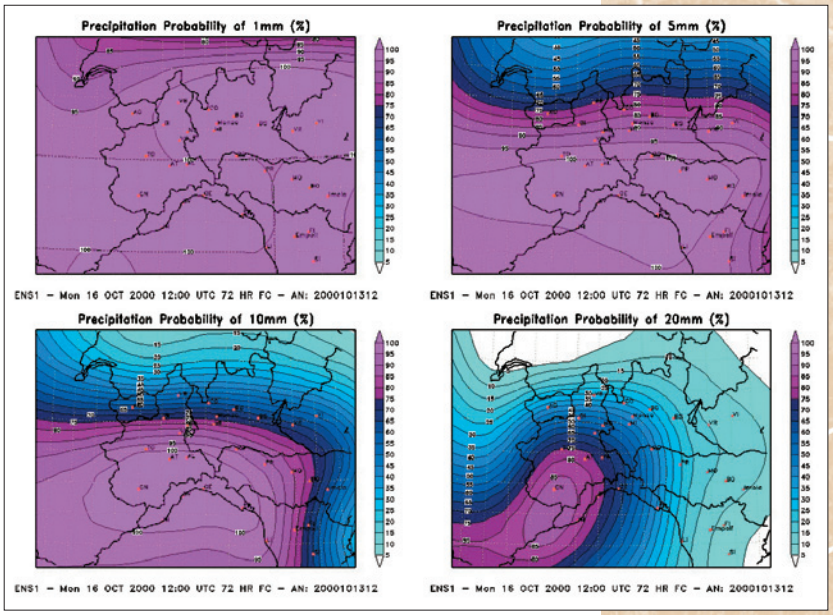


Figura 3.1.4
Probabilità di precipitazione prevista da ECMWF per diverse soglie (1, 5, 10 e 20 mm), fra il 15 e il 16 ottobre 2000

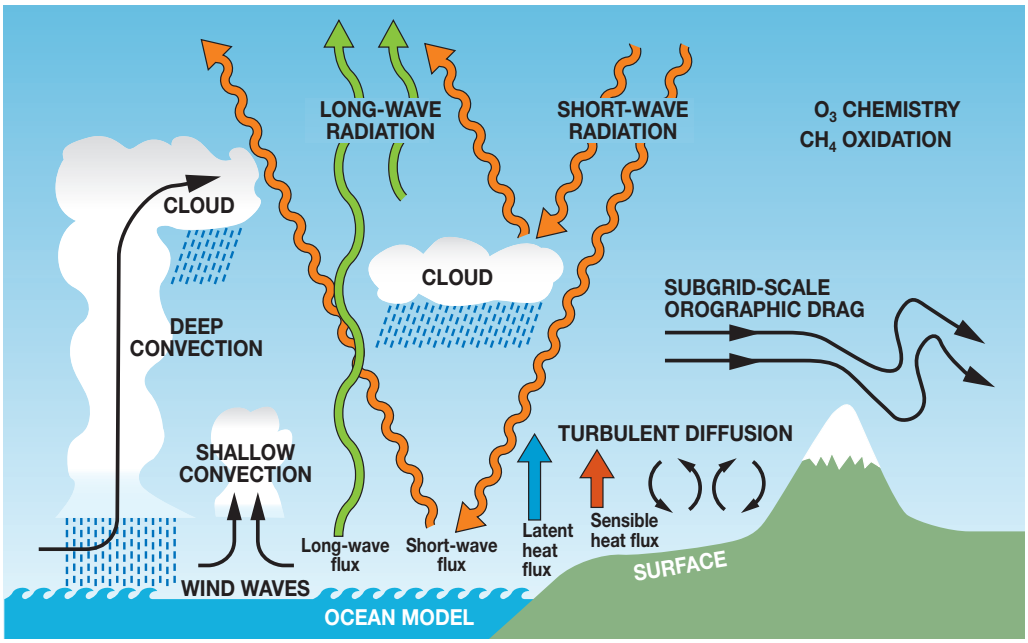


Figura 3.1.5
Rappresentazione schematica dei vari processi atmosferici

nizione di Orlanski (1975), tali fenomeni riguardano le seguenti scale:

- microscala, inferiore a 2 km (ne sono un esempio i vortici turbolenti);
- meso γ, tra 2 km e 20 km (per esempio la convezione temporalesca e i flussi su orografia complessa);
- meso β, tra 20 km e 200 km (di cui sono un esempio le brezze di mare e di terra);
- meso α, tra 200 km e 2'000 km (ad esempio i sistemi frontali e la formazione di aree di bassa pressione).

I modelli GCM hanno tipicamente un numero di scadenze temporali superiore e sono generalmente utilizzati per le previsioni a medio termine, ovvero dal terzo giorno in poi. I primi tre giorni di previsione sono invece meglio simulati dai modelli ad area limitata. I LAM si suddividono a loro volta in idrostatici e non idrostatici, a seconda della loro risoluzione orizzontale. I primi fanno uso della cosiddetta approssimazione idrostatica, un'equazione che assume un bilancio tra la forza peso e il gradiente di pressione. In tal caso, l'accelerazione verticale non viene calcolata tramite un'equazione esplicita, ma attraverso la differenza di velocità verticali diagnosticate dal modello, imponendo la conservazione della massa. Tale approssimazione è valida su scale orizzontali superiori a 10 km.
I processi non idrostatici diventano importanti quando i moti verticali nell'atmosfera cambiano rapidamente, cioè quando le accelerazioni verticali diventano dello stesso ordine di grandezza di quelle orizzontali, come avviene, per esempio, nel caso dei fenomeni convettivi intensi. Il criterio per utilizzare l'approssimazione idrostatica è dato dal rapporto tra scala verticale *(H)* e orizzontale *(L)* del fenomeno in esame: se $H/L << 1$ allora tale approssimazione è valida e le accelerazioni verticali sono trascurabili; alternativamente, se $H/L \geq 1$ siamo in condizioni di non idrostaticità ed è necessaria l'introduzione di ulteriori equazioni che descrivano esplicitamente il moto verticale dell'atmosfera. Normalmente i modelli LAM includono effetti non idrostatici quando la loro scala caratteristica è inferiore ai 10 km.
Aumentando la risoluzione, infatti, l'equazione idrostatica risulta non essere adatta a descrivere fenomeni quali alcuni tipi di *lee-waves* o la dinamica dei cumulonembi. Si rende, così, necessario l'utilizzo di un'altra categoria di modelli: i modelli non idrostatici, nei quali il calcolo dell'accelerazione verticale viene fatto esplicitamente.
Il vantaggio in termini di risoluzione offerto dai LAM è, però, limitato dal fatto che, considerando solo un'area ristretta del complesso sistema atmosfera, essi rischiano di dare risultati irrealistici, in quanto evolvono in modo indipendente dal resto. L'ideale sarebbe, ovviamente, quello di disporre di un GCM con risoluzione elevata quanto quella di un LAM; questo, però, come già evidenziato in precedenza, non è consentito dai limiti computazionali dei computer. Per poter coniugare i vantaggi di risoluzione dei LAM e, contemporaneamente, non rinunciare a quelli dei GCM, si ricorre alla cosiddetta tecnica del *nesting* (annidamento). Il meccanismo di base consiste nell'utilizzare il risultato di un modello a bassa risoluzione come condizione iniziale e al contorno per l'esecuzione di una simulazione effettuata con un modello a risoluzione maggiore. Il *nesting* è usato sia per passare da un GCM ad un LAM, sia per affinare ulteriormente i risultati, aumentando la risoluzione dello stesso LAM, in modo telescopico.
Per quanto elevata sia la risoluzione del modello, la complessità dei fenomeni in esame e la straordinaria varietà di scale spaziali e temporali coinvolte fa sì che esista sempre una varietà di processi che il modello numerico non è in grado di simulare o, tecnicamente, risolvere.

Le cosiddette variabili dinamiche dei modelli, ovvero le variabili atmosferiche esplicitamente calcolate sono tipicamente:

1) le componenti orizzontali della velocità del vento *U* e *V* e, nei modelli non idrostatici, quella verticale *W*;
2) la temperatura *T*;
3) l'umidità relativa (o specifica) *q*;
4) la pressione *p*.

Tali variabili sono ricavate direttamente dalle equazioni di Navier-Stokes:

$$\rho\frac{dv}{dt} = -\nabla p + \rho g - 2\Omega\times(\rho v) - \nabla\cdot(\overline{\rho v' v'})$$

$$\frac{dp}{dt} = -(\frac{c_{pd}}{c_{vd}})p\nabla\cdot v + (\frac{c_{pd}}{c_{vd}} - 1)Q_h$$

$$\rho c_{pd}\frac{dT}{dt} = \frac{dp}{dt} + Q_h$$

$$\rho\frac{dq^v}{dt} = -\nabla\cdot F^v - (I^l + I^f)$$

$$\rho\frac{dq^{l,f}}{dt} = -\nabla\cdot(P^{l,f} + F^{l,f}) + I^{l,f}$$

$$\rho = p\left\{R_d(1 + (\frac{R_v}{R_d} - 1)q^v - q^l - q^f)T\right\}^{-1}$$

(3.1.1)

dove ρ è la densità dell'aria, *v* la velocità vettoriale, *g* l'accelerazione di gravità, Ω la velocità angolare terrestre e i termini contrassegnati da apici rappresentano termini turbolenti non risolti esplicitamente dal modello; C_{pd} rappresenta il calore specifico a pressione costante dell'aria secca, C_{vd} il calore specifico a volume costante, Q_H il flusso di calore, *q* l'umidità specifica (gli apici si riferiscono ai suoi vari stati: vapore, liquido, solido), *I* rappresenta i processi microfisici di formazione delle nubi e della precipitazione mentre *F* è il flusso evaporativo e *P* quello precipitativo, *T* la temperatura e R_d la costante dei gas per aria secca mentre R_v quella per vapore. Tali equazioni prognostiche costituiscono la dinamica del modello.

Altri campi meteorologici, come la precipitazione, la copertura nuvolosa, i flussi radiativi e di quantità di moto nel *planetary boundary layer,* non sono calcolati direttamente, bensì in forma indiretta, dal modello numerico, tramite la parametrizzazione. Essa consiste nell'esprimere l'evoluzione dei processi che avvengono su scale più piccole di quelle risolte dal modello, anziché attraverso le formule matematiche che ne descriverebbero l'evoluzione, ma che richiederebbero calcoli più fini di quelli effettuabili dal modello, attraverso espressioni empiriche, ricavate, cioè, da osservazioni dirette. Ciò significa che, basandosi su andamenti osservati da campagne di misura dirette, si stabilisce una correlazione tra la grandezza in esame ed una o più variabili dinamiche del modello, in modo che la variazione della prima venga espressa in funzione di quella delle seconde.

Un esempio di parametrizzazione è dato nell'equazione seguente, da un'espressione per il calcolo del flusso di quantità di moto τ (Wu, 1982):

$$\tau = \rho_{aria} C_D U_{10}^{\ 2} \qquad (3.1.2)$$

dove ρ_{aria} rappresenta la densità dell'aria, U_{10} rappresenta il modulo del vento previsto dal modello a 10 m e C_D è una costante (coefficiente di *drag*) il cui valore è espresso dalla seguente formula, ancora una volta in funzione di U_{10}

$$C_D = 10^{-3}(0.8 + 0.065\cdot U_{10}) \qquad (3.1.3)$$

In tal modo, anziché l'equazione esplicita per l'evoluzione nel tempo del flusso di quantità di moto, il modello numerico usa una formula che lo descrive in funzione di variabili dinamiche (nel caso specifico la velocità del vento a 10 m).

Un ulteriore punto di discussione sui modelli riguarda la loro inizializzazione. Sia i GCM sia i LAM, infatti, possono tenere conto di alcuni valori osservati all'interno del loro dominio di integrazione. Tramite differenti tecniche di assimilazione dati viene creato un campo di analisi riferito all'istante in cui il modello parte. Tanto più affidabile e dettagliata è questa analisi, quanto più si evita il problema del cosiddetto *spin up,* ossia lo scostamento iniziale che un modello ha con la realtà. Per quanto riguarda i LAM, in pratica, si indica con *cold start* l'utilizzo di un'analisi derivante da un modello globale e ciò comporta che il modello locale costruisca lentamente la circolazione atmosferica. Possono esserci anche oscillazioni nei primi istanti temporali, con le quali il modello assesta le condizioni al bordo che non sono consistenti con la sua dinamica interna; con il *warm start* invece, i modelli usano anche un sistema di assimilazione dei dati osservati per creare un'analisi. Questi dati osservati sono inglobati in maniera omogenea (sia nello spazio che nel tempo, tramite opportune funzioni peso) nel modello, in modo da preservare la sua consistenza interna.

Presso il Centro Funzionale decentrato di Arpa Piemonte, vengono utilizzati operativamente il modello globale IFS di ECMWF, che viene distribuito tramite il centro meteorologico nazionale dell'Aeronautica Militare ed il modello *Lokal Modell* nella sua versione italiana chiamata LAMI (*Local Area Model Italy*) che viene sviluppato nell'ambito del progetto COSMO (*COnsortium for Small-scale MOdelling,* www.cosmo-model.cscs.ch) a cui partecipano i servizi meteorologici nazionali di Italia, Germania, Svizzera, Grecia e Polonia, più alcuni centri locali tra cui Arpa Piemonte e Arpa SIM (Emilia Romagna). Tra questi enti, infatti, esiste una convenzione nel cui ambito si provvede al man-

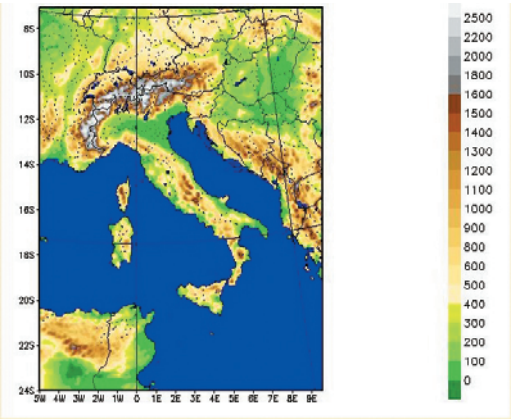


Figura 3.1.6
Dominio del LAMI con altezza dell'orografia

tenimento del modello operativo ed al suo sviluppo. Dal febbraio 2001 il modello produce quotidianamente le previsioni grazie alle simulazioni numeriche che vengono effettuate al centro di calcolo scientifico CINECA di Bologna. La configurazione attuale è la seguente:

- dominio che copre il territorio nazionale;
- 7 km di risoluzione orizzontale;
- 35 livelli verticali;
- 72 ore di previsione;
- *output* ogni 3 ore;
- 2 corse al giorno (00 UTC e 12 UTC);
- condizioni iniziali ed al contorno prese dal modello globale tedesco GME;
- assimilazione iniziale di parametri in quota ma non in superficie nelle 12 ore precedenti l'inizio della corsa.

Il modello utilizza come variabili ricavate direttamente (prognostiche) le componenti longitudinale e latitudinale della velocità, la componente verticale della velocità, la temperatura, la perturbazione della pressione da uno stato di riferimento, l'umidità specifica, il contenuto di acqua nelle nubi; le variabili calcolate in un secondo tempo (diagnostiche) sono, invece, la densità totale ed il flusso delle precipitazioni di pioggia e neve. È presente un sistema di coordinate geografiche ruotate equispaziate nella direzione orizzontale ed un sistema di coordinate generalizzate verticali che tiene conto delle quote superficiali definendo livelli verticali più vicini in corrispondenza di orografie molto ripide. Viene usato uno schema spaziale alle differenze finite del secondo ordine con variabili definite in orizzontale su una griglia del tipo *Arakawa C* ed in verticale su una griglia di *Lorentz*. L'avanzamento nel tempo avviene secondo uno schema del secondo ordine del tipo *Leapfrog*, cioè esplicito, nella direzione orizzontale ed implicito in quella verticale. Le condizioni iniziali e al bordo sono ricavate dai dati interpolati opportunamente da un modello globale con risoluzione orizzontale maggiore e dominio di integrazione più ampio rispetto a quello del LAM. Lo schema di convezione è quello classico di *Tiedtke*.

Sono inoltre utilizzati a scopo di ricerca anche il modello GME (modello a circolazione globale tedesco) e le versioni svizzera (chiamata aLMo) e tedesca (LM-DWD) di *Lokal Modell*. La differenza fra le diverse versioni di LM sono riportate nella **tabella 3.1.1**.

3.1.3 Previsione e validazione: l'importanza del feedback

La verifica delle previsioni, in particolare della QPF (*Quantitative Precipitation Forecast*), è uno degli aspetti importanti delle attività di un Centro Funzionale perché permette di conoscere il comportamento del modello nelle diverse situazioni meteorologiche, evidenziarne le caratteristiche sistematiche, valutarne l'affidabilità, sia in termini medi che estremi, sia su lunghi periodi che nella situazione corrente. Un buon metodo di verifica rappresenta un feedback a vari livelli del sistema di allertamento nel suo complesso e permette non solo di capire dove intervenire per apportare miglioramenti, ma, soprattutto dal punto di vista del Centro Funzionale, utilizzare al meglio i campi previsti dal modello in funzione dell'obiettivo previsionale.
Al fine di verificare la bontà di un qualunque modello previsionale è necessario disporre del maggior numero possibile di dati osservati, in modo

TABELLA 3.1.1 DIFFERENZA FRA LE DIVERSE VERSIONI DI LM

LM CONFIGURATIONS	ARPA	DWD	METEOSWISS
Domain Size (grid points)	234 x 272	325 x 325	385 x 325
Grid Spacing (horizontal)	0.0625° (7 km)	0.0625° (7 km)	0.0625° (7 km)
Number of Layers	35	35	45
Time Step	40 sec	40 sec	40 sec
Forecast Range	72 hrs	48 hrs	72 hrs
Initial Time of Model Runs	00,12 UTC	00,12,18 UTC	00,12 UTC
Lateral Boundary Conditions	GME	GME	IFS
LBC Update Frequency	1 hr	1 hr	3 hr
Initial State	Nudging Scheme	Nudging Scheme	Nudging Scheme
External Analysis	None	SST, Snow Depth, Soil Moisture Analysis	Snow Depth from DWD

da effettuare un confronto su un periodo di tempo sufficientemente lungo e su un'area sufficientemente ampia per poter essere considerato un valido campione statistico. Per ridurre i problemi di rappresentatività nella verifica di modelli alla mesoscala, è auspicabile esaminare dati meteorologici dettagliati come quelli forniti da stazioni non-GTS ad alta risoluzione anche integrati con quelli prodotti dal radar. Per la validazione delle previsioni Arpa Piemonte utilizza i dati osservati delle circa 400 stazioni automatiche al suolo che gestisce **(figura 3.1.7)**, i dati disponibili nell'ambito del progetto COSMO relativi al nord Italia **(figura 3.1.8)** e i dati osservati dalla rete al suolo afferenti al sistema dei Centri Funzionali e attualmente disponibili presso il Dipartimento di Protezione Civile **(figura 3.1.7)**.

La qualità del campo di precipitazione previsto è valutata in base a indici statistici che si basano sulle tabelle di contingenza, tabelle a doppia entrata in cui, fissata una determinata soglia di precipitazione accumulata in un certo intervallo temporale, si vanno a valutare il numero di casi previsti e osservati che superano tale soglia nel seguente modo, dove:

- *A* è il numero di casi in cui l'evento (ovvero il valore di precipitazione superiore alla determinata soglia) non è stato né previsto né osservato;
- *B* è il numero di casi in cui l'evento è stato previsto ma non osservato (falso allarme);
- *C* è il numero di casi in cui l'evento osservato non è stato previsto (mancato allarme);
- *D* è il numero di casi in cui l'evento osservato è stato previsto (previsione corretta).

TABELLA 3.1.2 TABELLA DI CONTINGENZA

		PREVISTI	
		NO	SI
OSSERVATI	NO	A	B
	SI	C	D

Dai valori di cui sopra sulle zone di allerta, si calcolano gli indici di qualità classici (BIAS che indica l'errore di sovrastima o sottostima, ETS che indica l'errore di localizzazione spazio-temporale, FAR che dà il numero di falsi allarmi, HRR che rappresenta il numero di successi), sia sul lungo periodo, per valutare l'affidabilità media del modello, sia stagionalmente, per valutare l'andamento in funzione delle caratteristiche climatiche e fenomenologiche diverse e delle modifiche che il modello, in continua evoluzione, subisce periodicamente.

Per ulteriori approfondimenti circa gli indici standard si può far riferimento a Stanski *et al.* (1989), Wilks (1995), Ebert & McBride (1997, 2000).
Nella **tabella 3.1.3** sono riportati le definizioni ed il valore ideale degli indici statistici classici.
Nelle pagine che seguono sono riportati alcuni dei risultati che sono stati raggiunti nell'ambito del lavoro di verifica della previsione della precipitazione areale del modello non idrostatico *Lokal-Modell,* sviluppato nell'ambito del progetto COSMO la cui versione italiana, denominata LAMI, è il modello ad area limitata di supporto al Dipartimento di Protezione Civile. Inoltre è oggetto di verifica il modello a scala globale del Centro Europeo per le Previsioni a Medio Termine (ECMWF) e la previsione numerica soggettiva dei previsori in Arpa Piemonte.

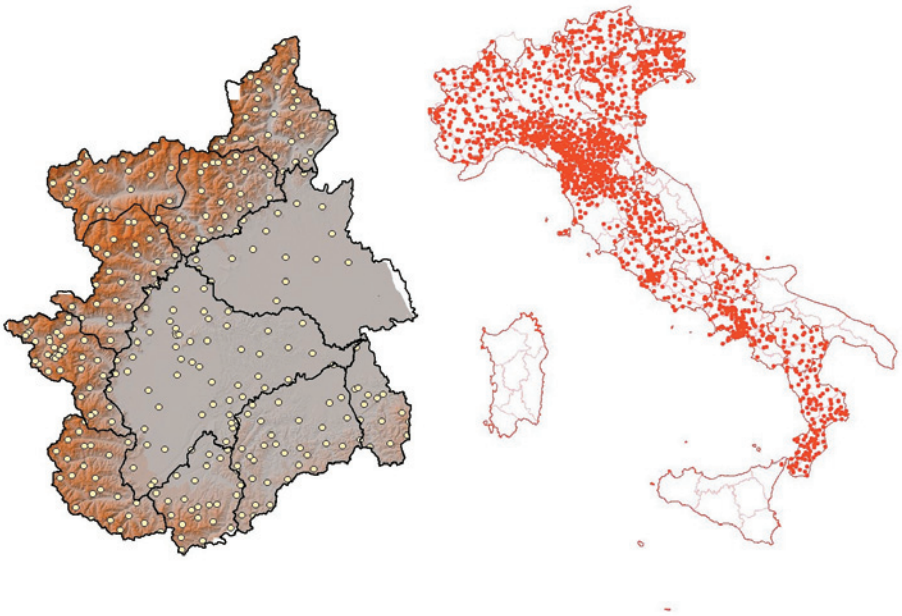


Figura 3.1.7
Distribuzione delle stazioni automatiche e zone di allerta in Piemonte (a sinistra) e pluviometri disponibili presso il Dipartimento di Protezione Civile (a destra)

TABELLA 3.1.3 DEFINIZIONI E VALORE IDEALE DEGLI INDICI STATISTICI CLASSICI

$$BIAS = \frac{B+D}{C+D}$$ BIAS ideale = 1

$$FAR = \frac{B}{B+D}$$ FAR ideale = 0

$$HRR = \frac{D}{C+D}$$ HRR ideale = 1

$$ETS = \frac{D - hits_{random}}{(B+C+D) - hits_{random}}$$

dove

$$hits_{random} = \frac{(B+D)(C+D)}{(A+B+C+D)}$$

ETS ideale = 1

Nei lavori di Oberto *et al.* (2003) e Milelli *et al.* (2003) è stata esaminata la dipendenza delle performance della previsione della precipitazione areale del modello LAMI in funzione delle caratteristiche della zona, in particolare della sua dimensione. Si sono cercati i possibili diversi risultati a seconda che l'*output* del modello sia mediato su *box* di aree diverse (0.25° x 0.25°, 0.50° x 0.50°, 0.75° x 0.75°) o su zone di allerta. In questi studi che riguardano le zone di allerta della rete piemontese, sono state otte-

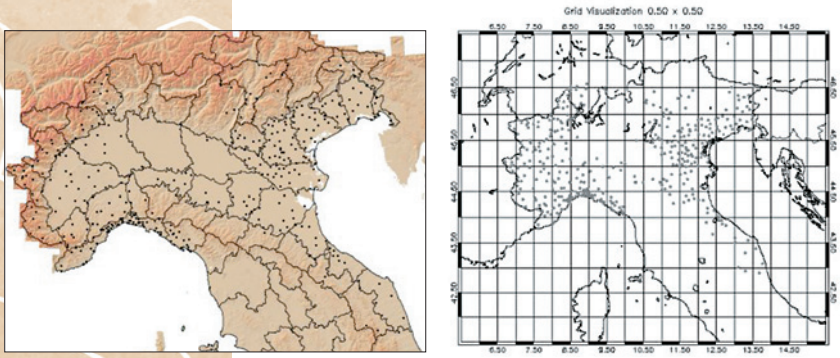


Figura 3.1.8
A sinistra suddivisione in aree di allertamento (circa 3'000 km²); a destra suddivisa in box (circa 50 km di lato) rete osservativa disponibile nell'ambito del progetto COSMO

nute performance diverse a seconda delle aree. Proseguendo il lavoro con le aree di allertamento di prima ipotesi del Nord Italia e il *network* osservativo disponibile nell'ambito del progetto COSMO **(figura 3.1.8)** si sono confermati i suddetti risultati **(figura 3.1.9)**.
Il BIAS delle previsioni quantitative di precipitazione del modello LAMI per soglie maggiori di 35 mm/24h indica minor sovrastima per le QPF mediate per zona di allerta mentre l'indice ETS sottolinea miglior accuratezza per ogni soglia considerando le aree rispetto alle box. Le QPF sulle zone di allerta mostrano risultati migliori rispetto a QPF calcolate su box di dimensioni confrontabili alle zone. Questo risultato rappresenta un importante feedback positivo: i criteri di definizione delle zone di allerta sono validi per ottenere performance migliori nelle previsioni quantitative di precipitazione.
Per valutare i miglioramenti nell'analisi di tipo soggettivo nella quantificazione del dato di precipitazione si confrontano gli *skill* delle previsioni soggettive (PSA, Previsione Sulle Aree) con quelli del modello LAMI. La **figura 3.1.10** mostra gli andamenti al variare della soglia dei vari indici statistici, relativamente alla media areale sulle 24 ore del secondo giorno di previsione (+24/+48 ore di previsione) ed al periodo compreso tra gennaio 2003 e ottobre 2004. In questa analisi è possibile effettuare il test di ipotesi sviluppato da Hamill (1999) in cui si calcola un intervallo di confidenza con il metodo denominato *bootstrap* per stabilire la reale differenza tra *skill score* di due modelli.
La barra d'errore nella **figura 3.1.10** indica i percentili di ordine 2.5 e 97.5 della distribuzione ricampionata assegnata al modello di riferimento. Si nota che il test in questione è simmetrico: il modello di riferimento può essere il modello competitore e viceversa. La differenza di performance è statisticamente significativa se lo *skill score* del modello competitore è all'esterno di un dato intervallo di confidenza (in questo caso 95%) della distribuzione ricampionata.
Dalla **figura 3.1.10** si deduce che entrambe le previsioni sovrastimano le QPF, in particolare il PSA per basse soglie (inferiori a 4 mm/24h); non ci sono differenze significative per soglie superiori a 8 mm/24 h in termini di BIAS, mentre per soglie superiori ai 16 mm/24h il PSA è più accurato del LAMI (indice ETS).

In conclusione, riferendosi anche ai lavori più recenti sulla verifica (Turco *et al.*, 2005), si riporta una sintesi dei risultati di carattere generale che sono stati raggiunti nell'ambito del lavoro di validazione:

- nonostante il generale miglioramento dei modelli a scala globale e ad area limitata e al fatto che la risoluzione sia cresciuta notevolmente negli ultimi anni, la QPF prodotta dai modelli meteorologici non è migliorata in maniera così netta da poterla utilizzare direttamente: la previsione soggettiva della QPF rimane quella più performante;
- su regioni con orografia complessa (special-

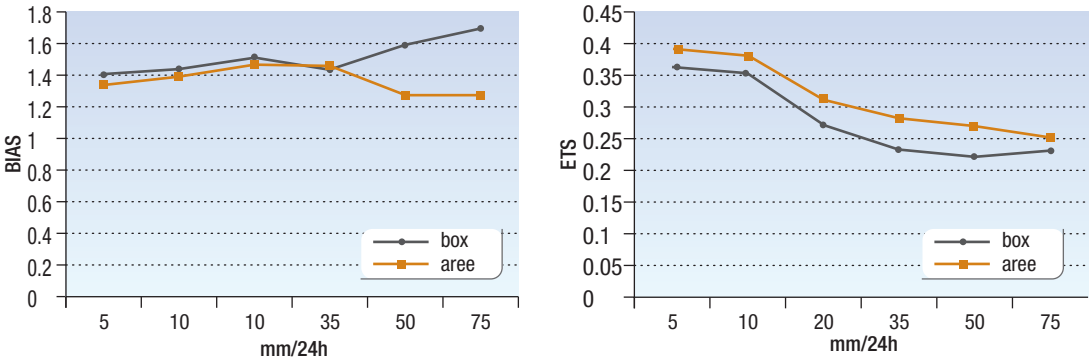


Figura 3.1.9
BIAS (a sinistra) e ETS (a destra) per previsioni quantitative di precipitazione del modello LAMI (corsa delle 12 UTC) mediate su zone di allerta o box di 50 km di lato (figura 3.1.8) relative al periodo giugno 2002 - agosto 2003

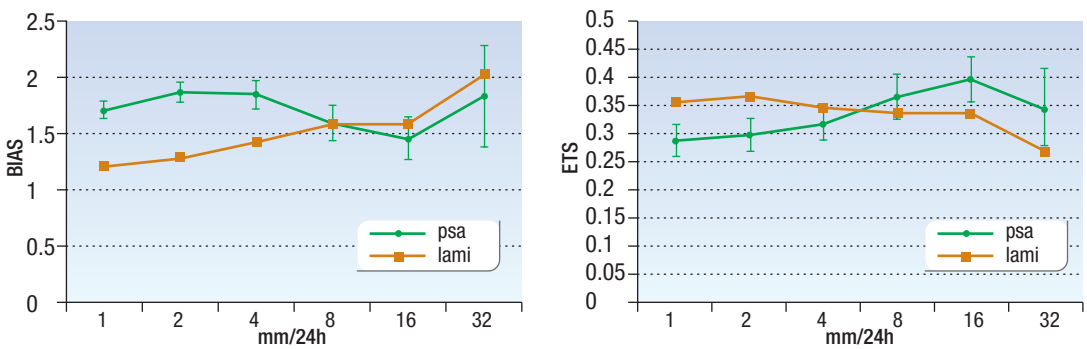


Figura 3.1.10
Andamento degli indici BIAS e ETS in funzione della soglia delle QPF prodotte soggettivamente (PSA), dal LAMI

mente per quanto riguarda i rilievi alpini), il *pattern* di precipitazione previsto non è ancora soddisfacente; in particolare si ha sovrastima nel massimo di precipitazione nel versante sopravento e sottostima in quello sottovento (questo effetto è più pronunciato in inverno che in estate);
- generalmente le corse delle 12 UTC presentano *skill* migliori rispetto alle corse delle 00 UTC. Infatti l'analisi stessa delle 12 UTC può contare su un ciclo di assimilazione dei modelli a grande scala più lungo e le osservazioni disponibili sono in numero maggiore. Inoltre l'inizializzazione del modello da uno stato maggiormente energetico (12 UTC) permette di rappresentare meglio l'innesco delle precipitazioni, consentendo una maggiore destabilizzazione dell'atmosfera;
- si riscontra la tendenza dei modelli ad avere le performance peggiori nel periodo estivo;
- si osserva in generale che le performance diminuiscono al crescere della soglia, cioè lo *skill* della previsione diminuisce per le piogge intense. Questo risultato tuttavia risente anche di un minor numero di dati relativi alle soglie alte, che rende quindi la statistica meno significativa;
- esiste un ciclo diurno dell'errore, in particolare è evidente il peggioramento con il *forecast time;* inoltre si evince una periodicità degli *skill* di 24 con valori di BIAS maggiori nelle ore centrali della giornata;
- considerando più del 60% del territorio italiano, si può asserire che il LAMI sovrastima nella maggior parte delle zone considerate, specie in quelle alpine mentre il modello di ECMWF sottostima nella maggior parte delle aree, specie in quelle costiere;
- le nuove configurazioni introdotte (ad esempio l'analisi di umidità al suolo, lo schema per la precipitazione prognostica, la correzione di alcune variabili previste tramite l'assimilazione di osservazioni GTS attraverso la tecnica del *Nudging*) nelle versioni operative del *Lokal-Modell* hanno apportato miglioramenti significativi nelle QPF.

In riferimento al processo di verifica dell'utilizzo quantitativo della previsione meteorologica nel sistema di allertamento di Arpa Piemonte le maggiori conclusioni sono:
- il valore aggiunto nell'analisi di tipo soggettivo nel fornire la QPF riferita alle zone di allertamento è significativo: la performance della QPF del sistema di allertamento è complessivamente buono;
- le QPF prodotte dai modelli meteorologici sulle zone di allerta mostrano risultati migliori rispetto a QPF calcolate su box di dimensioni confrontabili alle zone. Questo risultato rappresenta un importante feedback positivo: i criteri di definizione delle zone di allerta sono validi per ottenere performance migliori delle QPF;
- è difficile determinare dei trend sistematici di lungo periodo (nel sistema di allertamento piemontese le previsioni quantitative di precipitazione sulle aree di allertamento vengono emesse quotidianamente a partire da marzo 2000) rispetto alle performance della QPF soggettiva data la grande variazione annuale nella prevedibilità e nella quantità della precipitazione;
- si hanno performance migliori per soglie di 10 mm/24 h che per 1 mm/24 h; generalmente è più difficile infatti ottenere buone performance per le previsioni di piogge deboli e locali, che i modelli riescono difficilmente a riprodurre, mentre sono previsti con maggiore precisione gli eventi di precipitazione più consistenti legati a forzanti sinottiche;
- le previsioni quantitative di precipitazione sulle aree di allertamento presentano sovrastima decrescente considerando le zone alpine a nord, poi le aree sud e infine in pianura, dove si ha la miglior localizzazione spazio-temporale.

3.1.4 Prospettive e tecniche di miglioramento della previsione meteorologica

Un modello meteorologico non è uno strumento statico ed immobile nel tempo, ma un sistema dinamico che si evolve in funzione delle più recenti innovazioni della scienza e della tecnica. I metodi di miglioramento di un modello si possono distinguere in due categorie:
1) agendo dall'interno tramite lo sviluppo di nuovi schemi di parametrizzazione, nuovi schemi numerici, un aumento della risoluzione spazio-temporale o inserendo migliori tecniche di assimilazione dati;
2) agendo dall'esterno con tecniche di *post-processing* applicate all'uscita diretta del modello.

Per quanto riguarda lo sviluppo di nuovi schemi, nell'ambito del progetto Interreg IIIB *Hydroptimet,* il modello è stato testato su alcuni eventi di pioggia intensa che hanno interessato il Piemonte. In particolare viene qui preso in considerazione il caso del 25 novembre 2002 (Milelli & Mercogliano, 2005). Sono state effettuate diverse simulazioni che differiscono dalla simulazione di riferimento (nominata semplicemente *s4*) per cambiamenti o di parametrizzazione di alcuni processi fisici o di schemi numerici. Lo scopo è di evidenziare quali di questi schemi influenzi maggiormente la previsione della pioggia. I risultati ottenuti dalle diverse simulazioni sono principalmente analizzati in termini di confronto tra valori di precipitazioni previsti e osservati sulle aree di allertamento del Piemonte.
In particolare sono stati cambiati: lo schema di convezione, il valore del filtro di Raymond applicato sulla quota orografica e il numero di livelli verticali definiti nel modello; inoltre, sono state introdotte, ulteriori variabili prognostiche cioè la fase ghiaccio nelle nubi (prodotta per sublimazione del vapore acqueo) e la precipitazione di pioggia e di neve.

Il set di simulazioni prodotte è dato dal seguente schema:

TABELLA 3.1.4 ELENCO DELLE PROVE EFFETTUATE

S4	Riferimento
S5	Senza filtro orografico
S6	Filtro orografico più forte
S7	Con fase ghiaccio e neve calcolata prognosticamente
S8	Con tutte le fasi dell'acqua calcolate prognosticamente
S9	Schema convettivo di Kain Fritsch
SA	Senza schema convettivo
SB	45 livelli verticali senza filtro orografico
SC	45 livelli verticali senza filtro e tutte le fasi dell'acqua calcolate prognosticamente
SD	45 livelli verticali senza filtro e fase ghiaccio e neve calcolate prognosticamente

Dai risultati ottenuti con questo set di simulazioni, limitatamente a questo caso studio, risulta che la parametrizzazione che ha maggiori effetti sulla localizzazione e sui quantitativi di pioggia previsti è la definizione delle nuove variabili prognostiche. Questo in particolare è vero in una zona con orografia complessa in cui diviene fondamentale l'esatta considerazione dell'avvezione della precipitazione attraverso i rilievi. I risultati in questa configurazione risultano ulteriormente migliorati aumentando il numero di livelli verticali.
Il modello meteorologico operativo presso Arpa Piemonte ha una risoluzione di circa 7 km, ma in principio può produrre risultati ad una risoluzione più alta, ferma restando la necessità in tal caso di alcuni cambiamenti sostanziali nelle equazioni che descrivono i fenomeni fisici. Una possibilità (da un punto di vista puramente numerico) per aumentare la risoluzione del modello è quella di usare un approccio a multiscala, ovvero griglie multiple a risoluzioni spaziali (e temporali) che possono variare anche di ordini di grandezza e che si trasmettono informazioni le une con le altre. Il vantaggio è un'interazione dinamica tra scale diverse a costo computazionale ridotto, una migliore rappresentazione della geometria del dominio e delle forzanti fisiche, una migliore conservazione della massa, una simulazione più accurata e robusta di fenomeni dinamici di piccola scala, con miglioramento anche della simulazione di grande scala. Per questo motivo, è partita una fase di test con esperimenti numerici ed applicazioni a casi rilevanti per le simulazioni olimpiche. In pratica la finalità di questo lavoro, tuttora in progresso, è di ottenere previsioni ad altissima risoluzione (fino ad 1 km) utilizzando delle tecniche innovative di raffinamento di griglia.

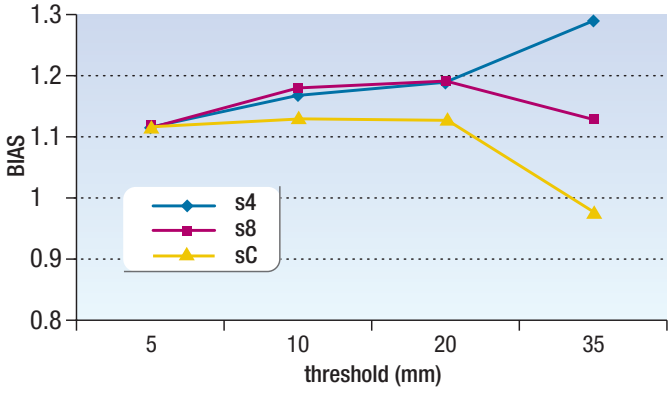


Figura 3.1.11
BIAS medio sul Piemonte dalle 00 UTC del 25/11/02 alle 00 UTC del 26/11/02 per diverse configurazioni del modello meteorologico

Dal punto di vista della modellistica meteorologica e della sua applicazione, la prospettiva è quella di arrivare, nei prossimi anni, ad una risoluzione operativa dell'ordine del chilometro su aree sufficientemente grandi da rappresentare fenomeni come la formazione e propagazione delle nubi temporalesche. Oltre ad aumentare la risoluzione per permettere di descrivere i moti turbolenti con sempre maggiore dettaglio, è necessario affinare la descrizione di quei processi fisici che avvengono nell'atmosfera e alla superficie terrestre e che determinano gli scambi di energia e la trasformazione dell'acqua nelle sue diverse fasi. Per questo occorre mettere a punto altre tecniche di parametrizzazione che oggi sono tra le più studiate a livello di ricerca sul campo. L'analisi dell'interazione dei parametri geomorfologici superficiali (sia i fattori meteo-climatici sia i parametri inerenti la vegetazione ed il suolo) con lo strato superficiale dell'atmosfera, con particolare riferimento ai processi di interazione aria-terra e geosfera-biosfera dal punto di vista idrologico, può essere condotta con l'ausilio di modelli SVAT *(Soil Vegetation Atmosphere Transfer)*. Tali modelli simulano i processi fisici all'interfaccia suolo-atmosfera, riproducendo i bilanci energetici ed idrici.

Arpa Piemonte utilizza un modello SVAT per le applicazioni operative agro-meteorologiche, in particolare LSPM *(Land Surface Process Model)*, sviluppato presso l'Università di Torino (Loglisci *et al.*, 2001). La struttura di LSPM può essere così schematizzata: il dominio spaziale è limitato in alto da un livello di riferimento nell'atmosfera sopra la vegetazione ed in basso dallo strato di terreno sottostante il sistema radicale delle piante. Nell'atmosfera, i parametri al contorno sono: temperatura, umidità, vento, radiazione globale, pressione e precipitazione dell'aria all'altezza della vegetazione. La vegetazione è considerata come uno strato uniforme (approssimazione *big-leaf*) sia nell'atmosfera che nel sottosuolo, mentre il suolo può essere suddiviso in tre o più strati (a scelta dell'utente). Entrambi sono descritti da una serie di parametri fisici.
Il modello LSPM assume che la precipitazione che arriva al suolo si infiltri (infiltrazione) parzialmente nel primo strato di suolo fino alla sua saturazione (la parte di acqua eccedente scorre via per *run off*), e che le radici estraggano umidità dagli strati di suolo che contengono le radici (traspirazione). I flussi di calore sensibile e latente vengono

calcolati secondo la formulazione dell'analogia con i circuiti elettrici. Le uscite tipiche del modello sono: radiazione netta, flussi di calore, temperatura ed umidità nel sottosuolo, nell'aria ed a livello della vegetazione. L'utilizzo del modello sopra descritto è importante per la previsione di variabili fisiche non facilmente misurabili, ma di fondamentale importanza dal punto di vista agricolo, come il contenuto di umidità o la temperatura del suolo e trova applicazione nella previsione, ad esempio, di gelate tardive e precoci o dell'instaurarsi delle condizioni agro-meteorologiche critiche per la crescita di particolari parassiti delle piante.

Il futuro della ricerca nel campo della matematica applicata alla meteorologia è, inoltre, anche legato alle tecniche di assimilazione dei dati meteorologici che sono rivolte all'utilizzo ottimale di tutti i dati di osservazione dell'atmosfera che ogni giorno provengono da stazioni fisse e mobili, palloni sonda, aerei, navi, boe, satelliti.
Utilizzare al meglio tutte queste osservazioni, soprattutto quelle da satellite, che pur essendo affette da notevoli errori di precisione sono molto dense nello spazio e nel tempo, richiede strumenti matematici che si basano su versioni particolari degli stessi modelli previsionali e su algoritmi cosiddetti variazionali. Per risolvere tali problemi occorre una potenza di calcolo molto maggiore di quella utilizzata per far correre un modello meteorologico.
Soltanto mediante l'utilizzo di tali sistemi di assimilazione si sono potute sfruttare al meglio certe osservazioni come quelle da satellite. I satelliti, infatti, effettuano moltissime misure della radianza proveniente dalla superficie sottostante, dalle quali è possibile derivare indirettamente stime di temperatura ed umidità dell'atmosfera. Per molti anni queste misure remote sono state di utilità limitata, perché difficili da tradurre in informazioni che fossero utili alla previsione atmosferica; per migliorare la situazione ci sono volute successive generazioni di satelliti meteo e nuovi strumenti di misura molto più articolati e sofisticati (radiometri).

Un altro campo in cui si lavora per migliorare i risultati dei modelli è il cosiddetto *post-processing*, ovvero il trattamento (solitamente su base statistica) delle uscite dirette dei modelli meteorologici.
I metodi di *post-processing* utilizzati nell'ambito del servizio erogato da Arpa sono:
- Filtro di Kalman;
- *Multimodel Ensemble* e *SuperEnsemble*.

Essi si applicano attualmente ai parametri meteorologici superficiali che presentano variabilità a scale spaziali e temporali inferiori a quelle risolte dai modelli a circolazione generale o ad area limitata. Pertanto i processi fisici che descrivono la loro evoluzione non possono essere calcolati esplicitamente dal modello, ma devono essere parametrizzati *off-line* tramite opportuni schemi. Infatti, l'utilizzo diretto dell'*output* proveniente da un modello non fornisce ancora previsioni soddisfacenti; inoltre tali tecniche, mirando ad avvicinare la *traiettoria* del modello a quella delle osservazioni, valorizzano l'utilizzo di queste ultime.
Per tenere conto dell'estrema variabilità atmosferica si potrebbero utilizzare predittori e predittandi solo delle ultime 2-3 settimane e valutare ogni giorno il loro legame statistico. In questo contesto, i metodi ricorsivi sono i migliori.

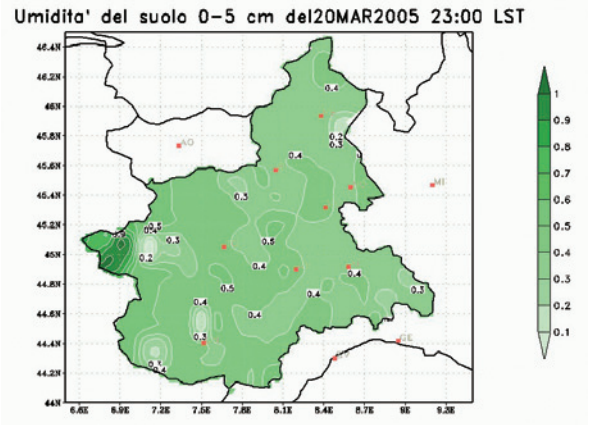


Figura 3.1.12
Esempio di umidità del suolo calcolata con il modello LSPM

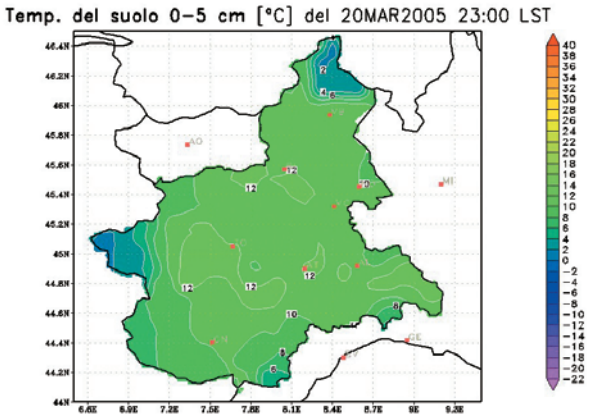


Figura 3.1.13
Esempio di temperatura del suolo calcolata con il modello LSPM

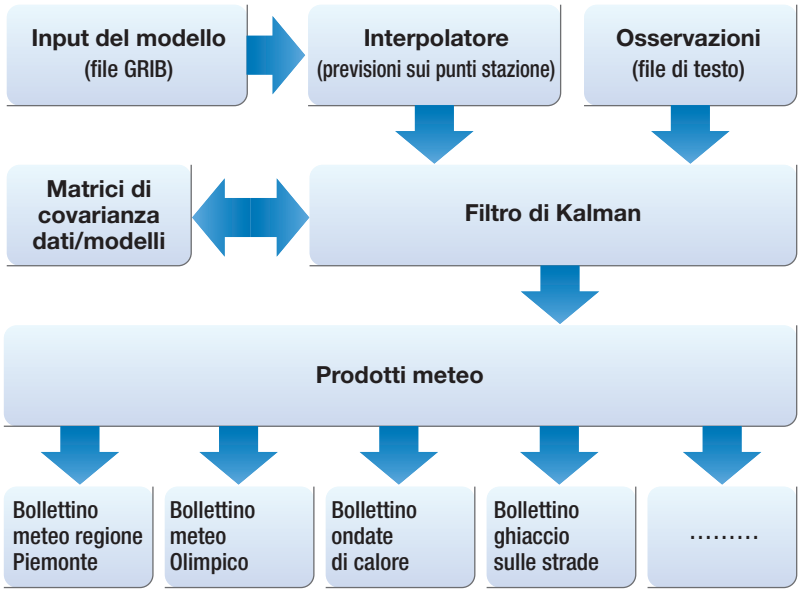


Figura 3.1.14
Diagramma di flusso dell'algoritmo di Kalman

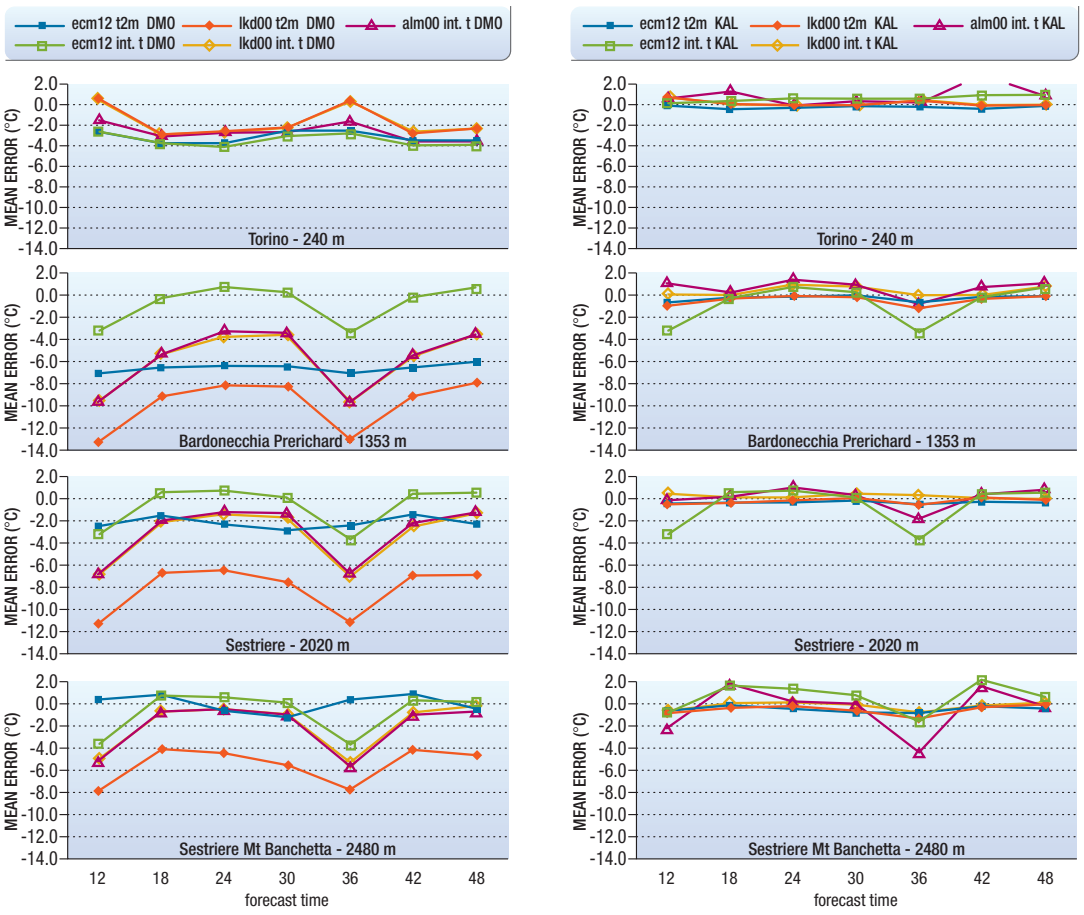


Figura 3.1.15
Errore medio della previsione di temperatura rispetto alle osservazioni di quattro stazioni della rete regionale a diverse quote (una in pianura, una in media montagna e due in alta montagna). A sinistra: *output* diretto dei modelli; a destra: *output* del filtro di Kalman. ecm12 t2m: temperatura a 2 m del ECMWF IFS; ecm12 int.t: temperatura interpolata del ECMWF IFS, lkd00 t2m: temperatura a 2 m del LM-DWD; lkd00 int.t: temperatura interpolata del LM-DWD; alm00 int.t: temperatura interpolata di aLMo

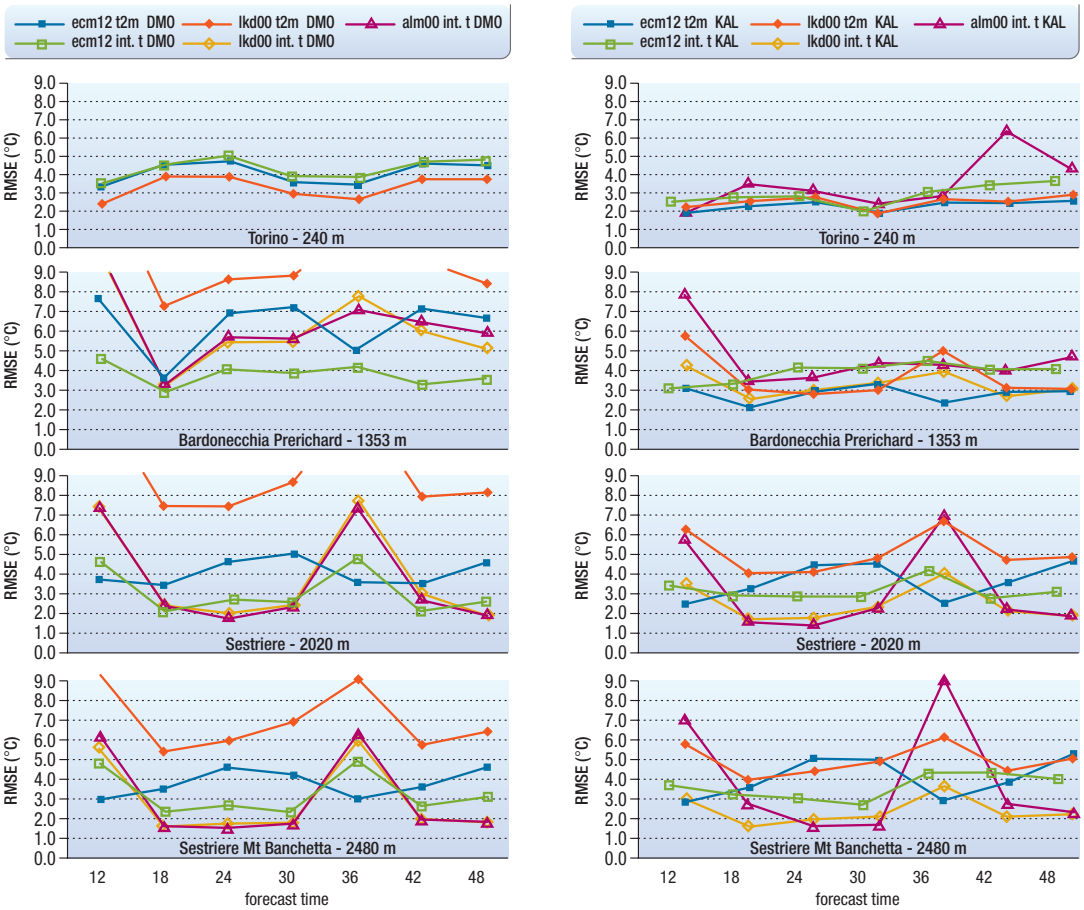


Figura 3.1.16
Errore quadratico medio della previsione di temperatura rispetto alle osservazioni di quattro stazioni della rete regionale a diverse quote (una in pianura, una in media montagna e due in alta montagna). A sinistra: output diretto dei modelli; a destra: output del filtro di Kalman. ecm12 t2m: temperatura a 2 m del ECMWF IFS; ecm12 int.t: temperatura interpolata del ECMWF IFS, lkd00 t2m: temperatura a 2 m del LM-DWD; lkd00 int.t: temperatura interpolata del LM-DWD; alm00 int.t: temperatura interpolata di aLMo

Attribuendo ai dati recenti un peso maggiore si ha un maggiore impatto sulle stime dei coefficienti, che riflette più fedelmente le condizioni presenti. La tecnica del filtro di Kalman (Kalman, 1960; Kalman & Bucy, 1961) permette di costruire uno schema ricorsivo ottimale.
Nel dettaglio, l'algoritmo del filtro di Kalman è il seguente:

- calcolo della matrice di guadagno del filtro;
- calcolo dell'innovazione;
- calcolo del guadagno del filtro;
- aggiornamento dei parametri del filtro;
- aggiornamento della matrice di covarianza;
- aggiornamento della matrice di guadagno del filtro;
- calcolo della previsione corretta.

Attualmente presso il servizio meteorologico regionale sono operative più corse del filtro di Kalman su diversi modelli (ECMWF IFS, LAMI, nelle corse delle ore 00 UTC e 12 UTC) e diverse variabili meteorologiche (temperatura dell'aria, umidità, temperatura di rugiada, temperatura di bulbo bagnato, *heat index, humidex, discomfort index*).
La previsione di temperatura del filtro di Kalman nelle stazioni in quota non è sufficientemente accurata, per cui si è lavorato in due direzioni per migliorarne le prestazioni:

- modifiche ai parametri interni del filtro (*x* e *p*), per dare maggiore libertà alla risposta del filtro alle variazioni dell'*input*; non si sono riscontrati buoni risultati perché buone e cattive previsioni si alternano molto spesso nelle performance dei modelli e quindi il filtro presenta una risposta a queste variazioni che induce risonanza e quindi il successivo peggioramento delle previsioni;
- miglioramento dell'*input (Direct Model Output)*: invece di usare la temperatura a 2 m calcolata dal modello, si utilizzano le previsioni di temperatura sui livelli di pressione superiore e inferiore rispetto alla quota della stazione e si interpolano alla quota della stazione utilizzando il geopotenziale. Così facendo stata ottenuta una riduzione dell'errore del DMO e, soprattutto, una riduzione nella variabilità giornaliera delle previsioni che permette un migliore funzionamento del filtro di Kalman. Le **figure 3.1.15** e **3.1.16** mostrano rispettivamente la riduzione dell'errore medio e dell'errore quadratico medio ottenuti con l'interpolazione delle temperature per quattro stazioni della rete piemontese.

Un secondo metodo di *post-processing* utilizzato presso Arpa Piemonte è l'approccio *Multimodel*, che, come dice il nome, consiste nell'utilizzo simultaneo di più modelli per la stima di parametri meteorologici. Tale metodo è stato proposto da Krishnamurti *et al.* (1999) con l'utilizzo di un *Ensemble* di modelli opportunamente mediati. Krishnamurti *et al.* (2000) propongono inoltre il *Multimodel SuperEnsemble,* che utilizza pesi diversi per ciascun modello considerato. Tali pesi vengono calcolati per ogni modello, in ogni punto e ad ogni istante temporale sulla base di un certo periodo pregresso (cosiddetto di apprendimento). Successivamente si ipotizza che l'errore sistematico medio ed il peso di ciascun modello si mantengano costanti anche per il periodo di previsione seguente.

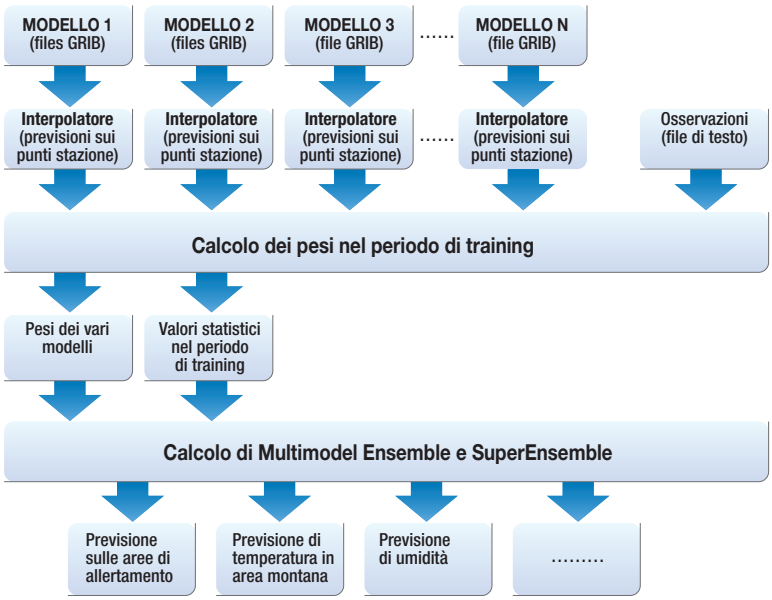


Figura 3.1.17
Diagramma di flusso dell'algoritmo di *SuperEnsemble*

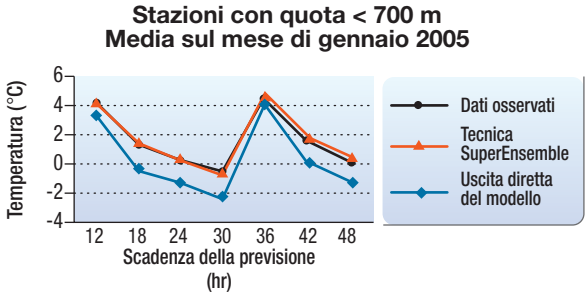


Figura 3.1.18
Confronto tra i dati previsti dall'output diretto del modello (in azzurro) e dal Multimodel SuperEnsemble (in rosso) con i dati osservati dalla rete di Arpa Piemonte. Temperatura per le stazioni di pianura (quota < 700 m)

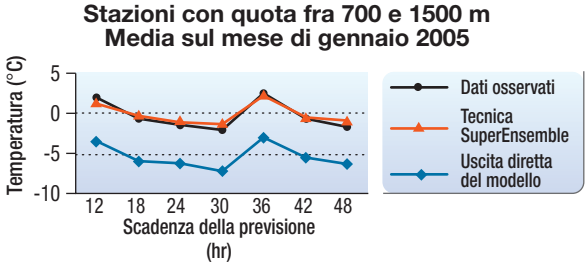


Figura 3.1.19
Confronto tra i dati previsti dall'output diretto del modello (in azzurro) e dal Multimodel SuperEnsemble (in rosso) con i dati osservati dalla rete di Arpa Piemonte. Temperatura per le stazioni di media montagna (700 m < quota < 1'500 m)

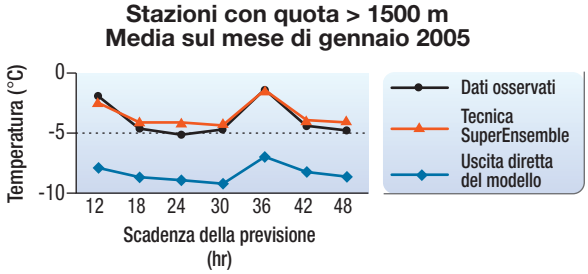


Figura 3.1.20
Confronto tra i dati previsti dall'output diretto del modello (in azzurro) e dal Multimodel SuperEnsemble (in rosso) con i dati osservati dalla rete di Arpa Piemonte. Temperatura per le stazioni di alta montagna (quota > 1'500 m)

Nel dettaglio, l'algoritmo del *Multimodel Ensemble e SuperEnsemble* è il seguente:

1) calcolo delle medie delle previsioni di ciascun modello e della media delle osservazioni nel periodo di *training*;
2) calcolo dei pesi del *SuperEnsemble*;
3) calcolo della previsione per l'*Ensemble* e per il *SuperEnsemble*.

Tale tecnica è stata implementata per la previsione di temperatura a 2 m (Cane & Milelli, 2005a) e attualmente è allo studio la possibile estensione ad altre variabili quali l'umidità relativa e la precipitazione (Cane & Milelli, 2005b). Va sottolineato che la previsione di temperatura dei modelli ad area limitata contiene dei grossi errori nella determinazione dell'andamento del ciclo diurno, in special modo nelle aree di mezza e di alta montagna, come si nota nelle figure riportate di seguito.

Con l'applicazione di questa tecnica, invece, si ottengono notevoli miglioramenti a tutte le quote **(figure 3.1.18, 3.1.19** e **3.1.20)**, con risultati paragonabili a quelli ottenuti con il filtro di Kalman, ma con il vantaggio di potere essere estesi anche ad altre variabili. Il filtro di Kalman infatti è una tecnica complessa e non può essere generalizzata ad altri parametri. Inoltre, un altro svantaggio del filtro di Kalman rispetto al *SuperEnsemble* è che non riesce a tenere conto della variazioni improvvise delle condizioni meteorologiche.

3.1.5 Il Bollettino di vigilanza meteorologica

Il Sistema Nazionale dei Centri Funzionali promosso dal Dipartimento della Protezione Civile si propone di realizzare una rete di centri operativi per il sistema di allertamento nazionale distribuito ai fini di protezione civile che, attraverso attività di previsione, monitoraggio e sorveglianza in tempo reale degli eventi meteorologici e dei conseguenti effetti relativi sul territorio, sia di supporto alle decisioni delle autorità preposte all'allertamento.

La Direttiva del P.C.M. del 27/02/2004 (supp. G.U. n. 59 dell'11/03/2004) modificata dalla Direttiva del P.C.M. del 25/02/2005 (G.U. n. 55 dell'8/03/2005) detta gli indirizzi operativi per la gestione di tale sistema di allertamento. In particolare definisce i soggetti istituzionali e gli organi territoriali coinvolti e stabilisce gli strumenti e le modalità di trasmissione delle informazioni.

Il sistema di allerta nazionale prevede dunque una fase previsionale costituita dalla valutazione della situazione meteorologica attesa nonché degli effetti che tale situazione può determinare al suolo, seguita da una fase di monitoraggio e sorveglianza. Sulla base di ciò, il Dipartimento deve emettere, in forma pubblica, un Bollettino di Vigilanza Meteorologica giornaliera nazionale e, in forma riservata, un Bollettino di criticità nazionale. I singoli servizi meteorologici o le aree di previsione meteorologica dei Centri Funzionali decentrati devono invece emettere, in forma riservata, qualora si verifichino le condizioni, Avvisi di avverse condizioni meteo e di criticità contestualizzati sulle proprie zone di allerta, definite come ambiti territoriali significativamente omogenei per l'atteso manifestarsi della tipologia e della severità degli eventi meteoidrologici intensi e dei relativi effetti. In ogni zona e per ciascuna tipologia di rischio vengono identificati indicatori del probabile manifestarsi di prefigurati scenari d'evento, nonché dei conseguenti effetti al suolo.
Conseguentemente viene definito un insieme di valori degli indicatori che determinano, per ogni tipologia di rischio, un sistema di soglie articolato su due livelli di moderata ed elevata criticità, oltre che un livello base di situazione ordinaria, in cui le criticità possibili sono ritenute accettabili dalle popolazioni. A seguito di un Avviso di avverse condizioni meteo vengono infine date le proprie valutazioni del livello di criticità atteso nelle diverse zone di allerta in cui è classificato il territorio regionale.

Il Bollettino di Vigilanza Meteorologica del Centro Funzionale della Regione Piemonte, da cui può eventualmente seguire un Avviso di criticità regionale, riporta la possibilità di accadimento dei fenomeni meteorologici di seguito elencati, per le successive 60 ore (oggi mezza giornata, domani, dopodomani) riferite alle zone di allerta.

Temporali, fenomeni intensi e localizzati
Sono presi in considerazione fenomeni di precipitazione molto intensa in limitati intervalli di tempo e molto localizzati, come possono essere rovesci o temporali di intensità forte o molto forte. Tali fenomeni possono portare al superamento dei livelli idrometrici critici della rete idrografica minore (a carattere torrentizio) con sviluppo di fenomeni di inondazione in ambito urbano per insufficiente smaltimento della pioggia, di fenomeni di trasporto di massa e di fenomeni franosi localizzati sui settori montuosi e collinari. Il fenomeno

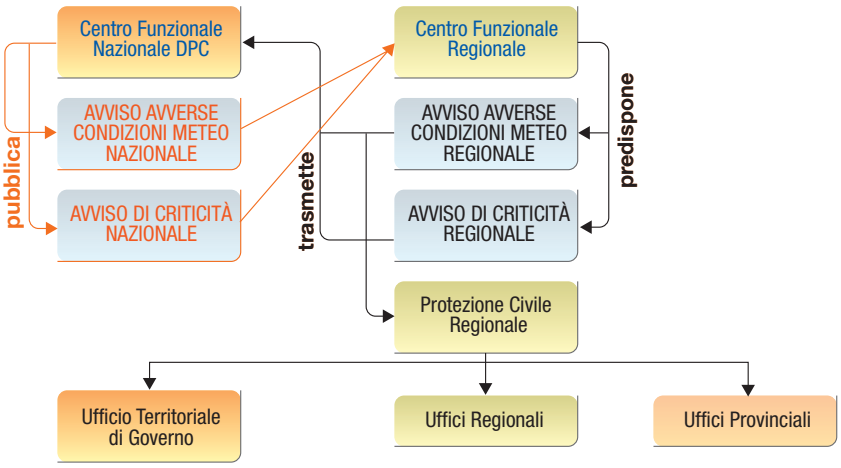


Figura 3.1.21
Diagramma del flusso di informazioni

temporalesco può comprendere anche forti raffiche di vento, soprattutto in corrispondenza delle celle più attive, con conseguente disagio per le attività umane e, in particolare, danni alla vegetazione, ai pali della luce ed ai tetti degli edifici.

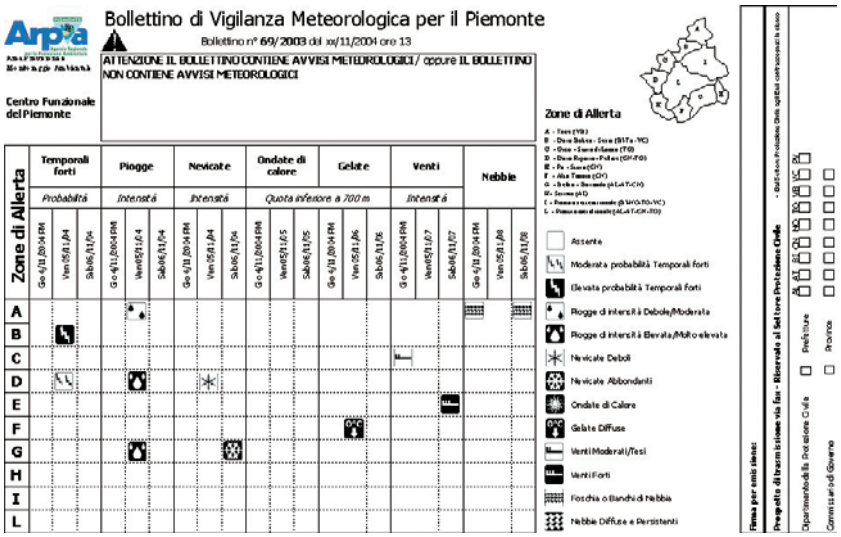
Inoltre è possibile che ai fenomeni temporaleschi più intensi siano associati eventi di grandine che possono produrre danni alle coltivazioni, alla viabilità stradale nonché alle persone. In considerazione del grande impatto che hanno sul territorio, sono stati effettuati studi specifici per la caratterizzazione qualitativa e quantitativa dei fenomeni temporaleschi, con l'obiettivo di creare uno strumento operativo utile per l'allertamento in caso di eventi convettivi significativi, in grado di predire in termini probabilistici o deterministici (con un limitato ma noto margine di errore) l'approssimarsi di un evento temporalesco. In particolare, è già stato effettuato uno studio degli indici termodinamici più noti operativamente (K, CAPE, Lift, SWEAT) come predittori di eventi temporaleschi a partire da campi di analisi ECMWF e da dati osservati sia di fulminazioni, sia di precipitazioni.

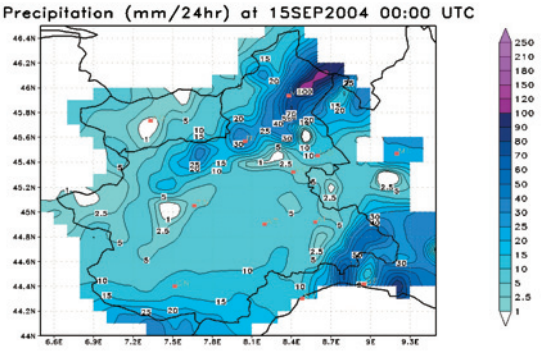
Tale analisi è stata eseguita su più casi studio e su più periodi di tempo, in modo da verificare e validare la bontà dei rispettivi indici e soprattutto individuare valori soglia che siano rappresentativi localmente. Attualmente è in corso la verifica della capacità del modello locale LAMI nel predire gli eventi temporaleschi, mediante gli indici più significativi ottenuti con l'analisi precedentemente descritta.

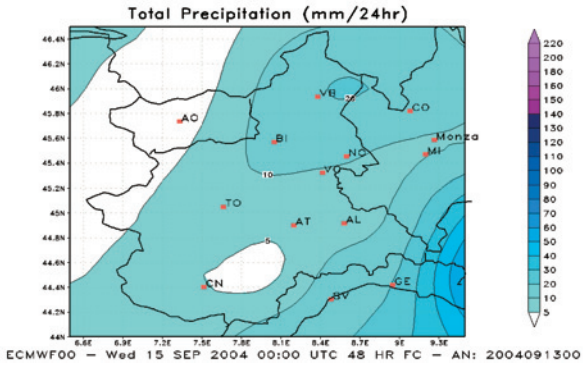
Pioggia

Vengono presi in considerazione eventi di precipitazione intensa media suddivisa in classi. La precipitazione viene calcolata per ciascuna delle aree di allertamento come valore medio di precipitazioni previsto sull'intervallo di 12 o di 24 ore. Vengono individuati i quantitativi di precipitazione riconosciuti come superiori a soglie di riferimento. Le soglie sono differenziate per ogni zona di allerta e sono rappresentate da una frazione della soglia per moderata criticità.

Il superamento di tali soglie può portare al superamento dei livelli idrometrici critici lungo i corsi d'acqua principali, con conseguente sviluppo di fenomeni alluvionali, di trasporto di massa lungo i corsi d'acqua a regime torrentizio e franosi sui settori montuosi e collinari. Per la previsione di tale grandezza il campo più importante è chiaramente il valore di precipitazione prevista dai modelli. In particolare il modello a circolazione globale fornisce una migliore indicazione dei valori medi ed è più affidabile per previsioni a lungo termine, mentre le quantità più intense di precipitazione sono previste meglio dai modelli ad area limitata, anche se i valori massimi previsti risultano spesso molto diversi da quelli osservati,







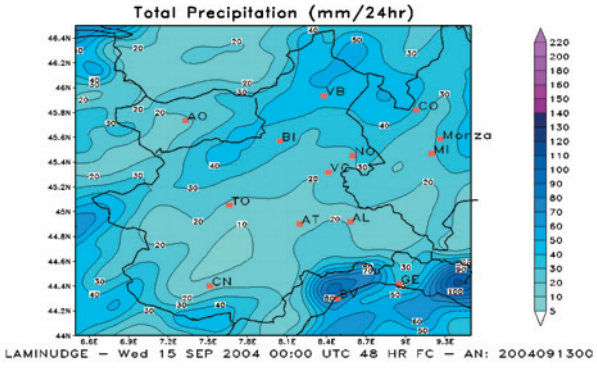


Figura 3.1.22
Esempio di Bollettino di Vigilanza Meteorologica

Figura 3.1.23
Campo di precipitazione osservato

Figura 3.1.24
Campo di precipitazione previsto dal modello globale di ECMWF (UK)

Figura 3.1.25
Campo di precipitazione previsto dal modello LAMI (IT)

sia come localizzazione spazio-temporale sia come quantità, come si evince dall'esempio riportato nelle **figure 3.1.23** e **3.1.25**, durante l'evento convettivo del 15 settembre 2004.
Per questi motivi, è indispensabile da parte del previsore non utilizzare direttamente il campo previsto dai modelli, ma elaborare (e filtrare) l'informazione sulla base di una serie di considerazioni preliminari quali:

- confronto fra le configurazioni sinottiche previste dai diversi modelli con attenzione al flusso sulla regione a tutti i livelli (coerenza);
- valutazione dello scostamento fra le prime scadenze previste (+12/+6 h) e le misure (immagini satellitari e dati osservati a scala sinottica);
- confronto delle configurazioni previste dallo stesso modello con orari di inizializzazione diversa e con le previsioni del giorno precedente (consistenza interna);
- valutazione delle caratteristiche stagionali;
- valutazione della performance dei modelli nei giorni precedenti (validazione);
- confronto con situazioni precedenti di riferimento (in casi dubbi e/o critici).

L'analisi della situazione meteorologica e della sua probabile evoluzione viene quindi definita con maggiore dettaglio. Si prende in considerazione specificatamente l'area regionale e ci si concentra su ciascuna delle singole scadenze su cui si estende la previsione (attualmente si giunge al secondo giorno successivo a quello di emissione) focalizzando l'attenzione su alcuni aspetti specifici:

- presenza di instabilità (convettiva e frontale);
- interazione del flusso con l'orografia (induzione, modificazione, intensificazione, controllo della precipitazione);
- localizzazione minimi di pressione (suolo/quota).

Solamente alla fine di questo processo evolutivo, il meteorologo è in grado di produrre una ragionevole previsione quantitativa di precipitazione sulla regione.

Un ulteriore dato importante associato all'intensità della precipitazione è la previsione della quota al di sopra della quale la precipitazione ha carattere nevoso. La previsione di tale quota si basa in primo luogo sulla previsione del livello dello zero termico nell'atmosfera: sapendo che il fiocco di neve in caduta può rimanere allo stato solido fino a circa 2-3 °C, il livello della quota neve è determinato di conseguenza e normalmente situato a circa 400-500 m al di sotto del livello dello zero termico. Tuttavia la stratificazione termica dell'atmosfera può essere molto differente dal profilo termico standard che è pari a circa 6 °C/1'000 m. Nel corso dell'attività svolta in questi anni si è riscontrato che in condizioni di un profilo di temperatura quasi isotermo oppure con una debole diminuzione di temperatura con la quota o ancora in presenza di inversioni termiche, la differenza di livello tra lo zero termico e la quota neve può arrivare fino a 1'500 m. Viceversa se l'atmosfera si presenta in una stratificazione fortemente instabile, con una marcata diminuzione di temperatura con la quota, la quota neve può essere di soli 100-200 m al di sotto dello zero termico.
Per la previsione della stratificazione termica vengono utilizzati i radiosondaggi termodinamici previsti su tutti i livelli dal modello meteorologico ad area limitata LAMI sui siti di Torino, Cuneo, Alessandria, Novara, Verbania, Susa, Cesana, Domodossola ed Aosta. Un'altra utile indicazione è fornita dall'esame degli ultimi radiosondaggi osservati sui siti di Milano Linate e Cuneo Levaldigi e dal loro confronto con i radiosondaggi previsti dall'ultima corsa del modello e più prossimi all'istante osservato.

Per le varie località ed in particolare per quelle pianeggianti, occorre ricordare che i valori della temperatura a 2 m, anch'essi fondamentali per discriminare il tipo di precipitazione prevista sulla località, sono soggetti a variazioni nel corso della giornata determinate da effetti radiativi. Pertanto per ottenere una previsione della temperatura il più possibile corretta sulle singole località, occorre applicare alle uscite dirette della variabile temperatura, elaborate dai modelli meteorologici, degli opportuni filtri statistici che ne correggano l'errore sistematico e minimizzino l'errore casuale.

Nevicate
Si prende in esame l'intensità della nevicata prevista per classi. Le soglie di riferimento variano in base alla quota (al di sotto o al di sopra di 700 m) e in base all'intervallo temporale considerato (12 o 24 ore). Il superamento delle soglie prefissate comporta gravi difficoltà di svolgimento di fondamentali attività umane quali ad esempio i trasporti, sia pubblici che privati.
In particolare, possono insorgere problemi di mobilità causata dai rallentamenti della circolazione e dallo svolgimento delle operazioni di sgombero neve, interruzione di fornitura di servizi (energia elettrica, telefonia fissa, ecc.) per danni alle linee aeree di distribuzione dovuti al sovraccarico della neve, isolamento temporaneo di borgate e case sparse. Inoltre, in seguito al perdurare di nevicate abbondanti, si possono verificare cedimenti delle coperture di edifici e capannoni.

Gelate in pianura
Si intende segnalare le gelate precoci o tardive (prima di dicembre e dopo febbraio) con riferimento in particolare alle ricadute nell'ambito dell'agricoltura (con possibili danni alle coltivazioni) e della circolazione stradale (con difficoltà di transito su tutte le arterie di comunicazione, principali e secondarie). A questo riguardo l'Area Previsione e Monitoraggio Ambientale di Arpa si è occupata dell'implementazione e della messa a punto di un

modello attraverso il quale si ottiene un prodotto previsionale numerico a 24 h della temperatura e dello stato della superficie stradale, a partire dai valori osservati di temperatura dell'aria, punto di rugiada, umidità relativa, nuvolosità, velocità del vento e precipitazioni.

Vento

Si intende segnalare situazioni rilevanti in montagna che possono portare disagi alle attività umane in alta quota e situazioni rilevanti sulle pianure, in particolare in caso di *foehn* con possibili danni locali alla vegetazione e agli edifici. Vengono definite le soglie di riferimento in base alla quota (1'500 m o 3'000 m). La criticità è legata a possibili danni alle strutture provvisorie, a disagi alla viabilità, a possibili crolli di padiglioni, a disagi allo svolgimento di attività umane soprattutto in alta quota, a problemi per la sicurezza dei voli. La maggiore criticità riguarda la previsione del vento di caduta *(foehn)* in quanto fortemente dipendente dalla complessa orografia della regione. Sono in corso studi per determinare empiricamente un indice di *foehn* che tenga conto dei parametri previsti di velocità del vento, pressione al suolo, umidità e temperatura.

Per la sua previsione un ottimo supporto è costituito dall'*output* diretto del vento alle varie quote fornito dai modelli, in particolare da quelli ad area limitata che hanno una rappresentazione dell'orografia con una maggiore risoluzione e quindi più fedele alla realtà. Un'altra indicazione è fornita dall'esame della presenza di forti gradienti barici (maggiori di 4 hPa, responsabili del vento intenso) e termici (4.5 °C a 925 e 850 hPa e 6 °C a 700 hPa, che comportano un'atmosfera stabile sottovento) tra Pianura Padana ed Alpi.

Nebbia

Si intende segnalare la scarsa visibilità con particolare riferimento ai problemi della viabilità stradale (sia principale che secondaria) e della sicurezza per il volo (aeroporti). Attualmente, tale parametro viene stimato principalmente sulla base dei dati osservati di visibilità ed umidità al suolo.

Dal punto di vista previsionale è importante tenere in considerazione che le situazioni di nebbia si verificano normalmente in condizioni anticicloniche con presenza o afflusso di umidità nei bassi strati. L'esame della situazione, unita alla visione dei radiosondaggi previsti per determinare lo sviluppo di inversioni termiche, fornisce utili indicazioni. Nel caso di nebbia persistente le immagini del satellite geostazionario METEOSAT nella banda del visibile e l'analisi dei radiosondaggi osservati sono di grande supporto nell'identificazione del fenomeno e nella previsione della sua evoluzione a breve termine. La previsione delle nebbie postfrontali risulta essere più difficile rispetto a quella delle nebbie di radiazione in quanto occorre una previsione precisa della tempistica del rasserenamento e dell'eventuale arrivo di vento in pianura; ritardi o anticipi dell'ordine di poche ore possono determinare situazioni radicalmente diverse dal punto di vista della visibilità. Anche in questo caso un valido aiuto è costituito dall'esame dettagliato dell'atmosfera nei bassi strati attraverso i radiosondaggi previsti.

È in studio una prima definizione di un indice statistico per la previsione delle nebbie basato sulla correlazione tra umidità relativa, velocità del vento, temperatura, presenza di un'inversione termica nei bassi strati previsti dal modello LAMI ed i corrispondenti valori di visibilità. Sono stati inoltre avviati i primi contatti con l'Università di Bonn per lo sviluppo di un nuovo modello di microfisica delle nubi da inserire nel modello meteorologico operativo, anche se la previsione modellistica diretta di tale variabile risulta molto dispendiosa dal punto di vista del tempo di calcolo e quindi non utilizzabile operativamente.

Ondate di calore in pianura

Vengono riportate in questo ambito le valutazioni effettuate nei *Bollettini di Previsione delle Ondate di Calore* per i capoluoghi di provincia. Tale variabile prende in considerazione il disagio avvertito dalla popolazione in conseguenza di prolungate condizioni di caldo con elevati valori di umidità e assenza di ventilazione.

Le condizioni meteorologiche di caldo estremo ed il loro impatto sulla salute costituiscono infatti un problema molto attuale in Italia, specie dopo gli eventi dell'estate del 2003, quando l'Italia settentrionale è stata interessata da lunghi periodi caratterizzati da temperature ed umidità elevate, con valori al di sopra delle medie stagionali, sia durante le ore diurne, sia durante le ore notturne. Studi epidemiologici indicano che queste condizioni provocano disagio fisiologico alla popolazione: i soggetti più a rischio sono le persone affette da malattie cardio-respiratorie e le persone anziane che sono dotate di una ridotta capacità di termoregolazione.

La possibilità di prevedere variazioni meteorologiche a breve periodo con il loro potenziale impatto sulla salute umana, consente la pianificazione e la gestione di interventi di prevenzione e riduzione del danno. Al fine di dotare la città di Torino e la regione Piemonte di un sistema di allertamento peculiare, per la prevenzione degli effetti delle ondate di calore sulla salute, l'Area Previsione e Monitoraggio Ambientale in collaborazione con il Servizio di Epidemiologia Ambientale ha attivato un progetto di analisi e studio di dati storici climatologici ed epidemiologici finalizzato alla realizzazione di un modello previsionale delle criticità dovute a condizioni meteorologiche avverse per la presenza di ondate di calo-

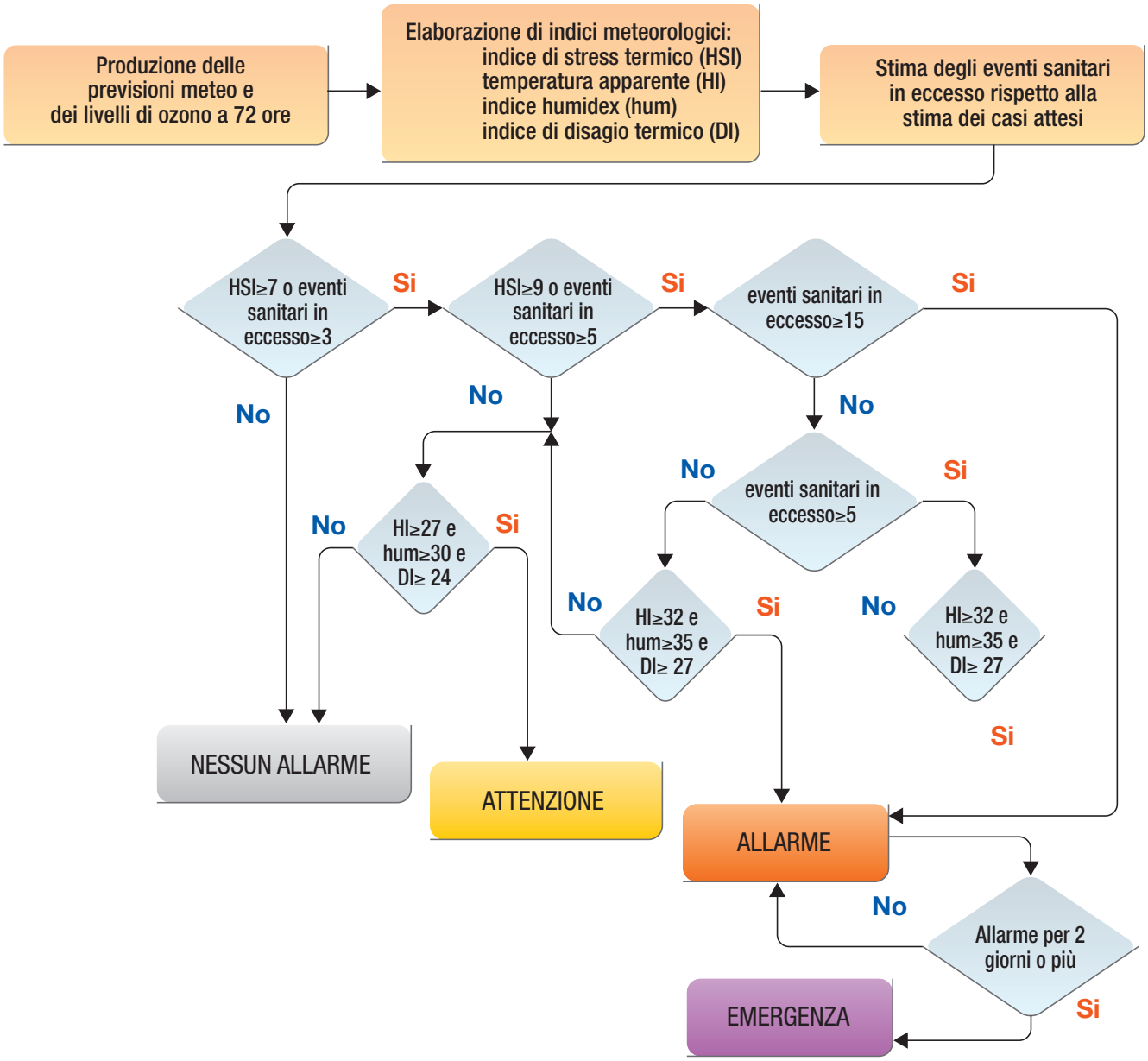


Figura 3.1.26
Albero decisionale dei livelli di rischio

re ed in particolare per l'area urbana di Torino rivolto a stimare l'impatto delle ondate di calore sulla mortalità.

I parametri meteorologici utilizzati dal modello sono: temperatura massima, temperatura apparente massima e minima (Steadman, 1984), numero di giorni consecutivi con temperatura apparente elevata, livello di ozono ed altri parametri meteorologici necessari al calcolo di alcuni indici di *benessere*. Le soglie biometeorologiche di tali indici sono scelte in funzione delle condizioni climatiche locali e da criteri di specificità e di sensibilità che non derivano direttamente da valori di letteratura. La percezione del disagio dovuta alle condizioni meteorologiche è peculiare alla regione ed all'area locale ed è per queste ragioni che si è deciso di utilizzare un indice relativo, *Heat Stress Index* (Kalkstein, 2003). L'*Heat Stress Index* è un indice biometeorologico che valuta la risposta fisiologica della popolazione alle variabili meteorologiche, basandosi sia sulla localizzazione che sul periodo stagionale attraverso l'analisi della distribuzione di probabilità delle variabili meteorologiche misurate nel passato.

Da questo sviluppo deriva un servizio in grado di fornire informazioni previsionali di diverso tipo:

- *meteorologiche:* tipo di caldo (in base alla temperatura prevista ed all'umidità relativa attesa), temperatura massima, umidità media giornaliera, temperatura percepita (massima e minima), livello di ozono massimo giornaliero ed indice sintetico di stress da calore;
- *sanitarie:* numero di eventi sanitari in eccesso;
- *livelli di rischio:* nessun allarme, attenzione, allarme o emergenza.

Per fornire una previsione dei parametri temperatura, umidità e vento più accurata sono utilizzati schemi di post-elaborazione, attraverso correlazioni statistiche tra le grandezze previste dal modello ad area limitata LAMI ed i parametri meteorologici al suolo e per tenere in conto l'estrema variabilità atmosferica si

NESSUN ALLARME 0	0) Condizioni meteorologiche non critiche e nessun eccesso di eventi sanitari previsto rispetto agli attesi	ALLARME 2	5) Condizioni meteorologiche associate a HSI>=9 e a indici bioclimatici sintetici nella classe "estrema cautela"
ATTENZIONE 1	1a) 15%<EM<=30% degli attesi, condizioni meteo associate a HSI<7 e indici bioclimatici sintetici nella classe "cautela" 1b) 30%<EM<=100% degli attesi, condizioni meteo associate a HSI<7 e a indici bioclimatici sintetici che non rientrano nella classe "estrema cautela" 1c) 30%<EM<=100% degli attesi, condizioni meteo associate a HSI>=7 e a indici bioclimatici sintetici che rientrano nella classe "benessere"	ALLARME 2	6a) 15%<EM<=100% degli attesi, condizioni meteo associate a HSI>=7 e a indici bioclimatici sintetici che rientrano nella classe "estrema cautela" 6b) EM>100% degli attesi, condizioni meteo associate a HSI>=7 e a indici bioclimatici sintetici che rientrano nella classe "cautela"
ATTENZIONE 1	2) Condizioni meteorologiche associate a HSI>=7 e a indici bioclimatici sintetici nella classe "cautela"	EMERGENZA 3	7) Livello di rischio "Allarme" per eccesso di eventi sanitari con persistenza del livello di allarme per due o più giorni consecutivi
ATTENZIONE 1	3) 15%<EM<=100% degli attesi, condizioni meteo associate a HSI>=7 e a indici bioclimatici sintetici che rientrano nella classe "cautela"	EMERGENZA 3	8) Livello di rischio "Allarme" per condizioni meteorologiche critiche con persistenza del livello di allarme per due o più giorni consecutivi
ALLARME 2	4a) EM>100% degli attesi, condizioni meteo associate a HSI<7 4b) EM>100% degli attesi, condizioni meteo associate a HSI>=7 e a indici bioclimatici sintetici che rientrano nella classe "benessere" 4c) 30%<EM<=100% degli attesi, condizioni meteo associate a HSI<7 e a indici bioclimatici sintetici che rientrano nella classe "estrema cautela"	EMERGENZA 3	9) Livello di rischio "Allarme" per eccesso di eventi sanitari e condizioni meteorologiche critiche con persistenza del livello di allarme per due o più giorni consecutivi

Figura 3.1.27
Legenda dei livelli di rischio

sono utilizzati predittori e predittandi delle ultime 2-3 settimane precedenti la previsione.
Con i valori previsti viene calcolata la temperatura apparente o percepita di Steadman (1984): un indice che permette di stimare il disagio fisiologico dovuto all'esposizione a condizioni meteorologiche caratterizzate da alte temperature ed elevati livelli igroscopici dell'aria, nonché da ridotta velocità del vento al suolo.

Il modello previsionale delle ondate di calore utilizza come variabili di *input* i valori massimi e minimi giornalieri di temperatura percepita. Da studi epidemiologici è stato infatti verificato che temperatura ed umidità elevate durante le ore notturne non permettono al corpo umano il recupero fisiologico del disagio accumulato nelle ore diurne.
I giorni consecutivi di caldo estremo vengono osservati quando la temperatura percepita massima supera di una deviazione standard il valore medio climatologico del periodo 1990-2003 senza soluzione di continuità. Un altro dato di ingresso al modello è la massima concentrazione giornaliera di ozono prevista attraverso un modello statistico a rete neurale.

Come indice sintetico di stress da caldo si utilizza l'*Heat Stress Index* (HSI), indice biometeorologico relativo, che viene calcolato seguendo la procedura indicata da Kalkstein (2003) ed utilizzando i dati di una stazione di misura posta nel centro urbano della città di Torino.

Le variabili derivate da questi dati e funzionali all'elaborazione dell'HSI sono: la temperatura apparente, i gradi di raffreddamento giornaliero, il numero di giorni consecutivi di caldo estremo e la copertura nuvolosa.
Dall'analisi dei dati climatologici misurati negli ultimi 14 anni e relativi alla decade centrata sul giorno in esame, viene determinata la distribuzione statistica di ogni variabile e la corrispondente curva di probabilità cumulativa. Per ogni valore assunto dalla variabile in esame viene quindi calcolato il corrispondente percentile. Il valore percentile di ogni variabile viene quindi sommato dando origine alla grandezza SUM.
L'HSI non è altro che il valore percentile associato alla posizione del valore giornaliero di SUM sulla relativa curva di probabilità cumulativa. Per la sua previsione, oltre ai dati meteorologici precedentemente descritti, si utilizzano i valori di copertura nuvolosa previsti attraverso il LAMI, verificati soggettivamente.

Il modello epidemiologico associato è un modello multivariato che stima il numero di eventi sanitari in eccesso (gli eventi sanitari sono intesi come numero di decessi giornalieri di persone con età superiore ai 64 anni, l'eccesso è definito come differenza tra il numero di eventi atteso e il numero stimato dal modello teorico, gli eventi attesi giornalieri – in media 15 – sono calcolati sulla base della serie storica maggio-settembre 1990-2002, con metodi di regressione non parametrica lungo l'asse degli anni su un intorno di 5 giorni e, successivamente, lungo periodi estivi di 153 giorni).

Metodi di regressione multivariata hanno portato alla selezione dei casi osservati in rapporto agli attesi: HSI del giorno, temperatura apparente massima registrata o prevista dei due giorni precedenti, giorni consecutivi di caldo estremo, livello massimo di ozono del giorno e del giorno precedente. Il modello multivariato ha poi suggerito i parametri da inserire nell'algoritmo di stima del numero di casi in eccesso, intorno ai quali sono state definite quattro classi possibili: nessuno, basso, medio o alto. È importante osservare come il modello tenga conto anche di variabili di *input* relative ai giorni precedenti la data di previsione: è stato infatti osservato frequentemente un intervallo di tempo tra le condizioni meteorologiche severe ed i conseguenti eccessi di mortalità. Un albero decisionale complesso sintetizza il livello di rischio atteso (0-1-2-3) unendo le informazioni meteorologiche e sanitarie previsionali, che può derivare da condizioni meteorologiche critiche, da un eccesso di eventi sanitari o da entrambi.
L'obiettivo di tale bollettino è quello di fornire al servizio sanitario locale le informazioni necessarie per l'organizzazione degli interventi medici e di prevenzione nel caso di ondate di calore previste.

Bibliografia

I lavori contrassegnati da asterisco non sono citati esplicitamente nel testo.

*Bluestein H.B. (1992), *Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes.* Oxford University Press, Oxford.

Cane D. & Milelli M. (2005a), *A new method for T2m forecast in complex orography areas.* COSMO Newsletter, submitted.

Cane D. & Milelli M., (2005b), *Use of Multimodel SuperEnsemble Technique for Mountain-area weather forecast in the Olympic Area of Torino 2006.* Croatian Meteorological Journal 40.

Ebert E.E. & McBride J.L. (2000), *Verification of precipitation in weather systems: Determination of systematic errors.* J. Hydrology, vol. 239, pp. 179-202.

Ebert E.E. & McBride J.L. (1997), *Methods for verifying quantitative precipitation forecasts: Application to the BMRC LAPS model 24-hour precipitation forecasts.* BMRC Techniques Development Report n. 2, pp. 87.

Hamill T.M. (1999), *Hypothesis tests for evaluating numerical precipitation forecasts.* Wea. Forecasting, vol. 14, pp. 155-167.

Kalkstein L.S. & Watts J. (2003), The *Development of a Warm Weather Relative Stress Index for Environmental Applications.* University of Delaware, Newark.

Kalman R.E. (1960), *A new approach to linear filtering and prediction problems.* Trans. ASME. J. BasicEngrg, Series D, vol. 82, pp. 35-45.

Kalman R.E. & Bucy R.S. (1961), *New results in linear filtering and prediction problems.* Trans. ASME. J. BasicEngrg, Series D, vol. 83, pp. 95-108.

*Trenberth K. (1993) (ed.), *Climate System Modelling.* Cambridge University Press, pp. 818.

Krishnamurti T.N. *et al.* (1999), Science, vol. 285, pp. 1548-1550.

Krishnamurti T.N. *et al.* (2000), J. Climate, vol. 13, pp. 4196-4216.

Loglisci N., Cassardo C., Balsamo G.P. & Qian M.W. (2001), *A technical description of the Land Surface Process Model (LSPM version 2000).* University of Turin DFG Report.

Lorenz E.N. (1963), *Deterministic non-periodic flow.* J. Atmos. Sci., vol. 20, pp. 130-141.

Milelli, M. & Mercogliano, P. (2005), to be published in Natural Hazards and Earth System Sciences.

Milelli M., Oberto E., Bertolotto P. & Pelosini R. (2003), *Verification of QPF over Piedmont and Northern Italy using high-resolution non-GTS data.* Proceedings of Ecam, 15-19 September, Rome.

Molteni F., Buizza R., Palmer T.N., & Petroliagis T. (1996), *The new ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation.* Q.J.R. Meteorol. Soc., vol. 122, pp. 73-119.

Oberto E., Milelli M., Bertolotto P. & Pelosini R. (2003), *High Resolution QPF Verification of LM Using Non-GTS Data over Piedmont and Central-Northern Italy.* COSMO NEWSLETTER n. 3.

Orlansky I. (1975), *A rational subdivision of scales for atmospheric processes.* Bull. Amer. Meteor. Soc., vol. 56, pp. 527-530. NP; Unterteilung in macro-, meso-, mikro-Skala.

Steadman R.G. (1984), *A universal expression of apparent temperature.* J. Appl. Meteor., vol. 23, pp. 1674-87.

Stanski H.R., Wilson L.J. & Burrows W.R. (1989), *Survey of common verification methods in meteorology.* World Weather Watch Tech. Rept. n. 8, WMO/TD n. 358, WMO, Geneva, pp. 114.

Turco M., Oberto E. & Bertolotto P. (2005), *Progresses on LAMI, LM-DWD, aLMo verification over Northern Italy.* Submitted to COSMO NEWSLETTER n. 5.

Wilks D.S. (1995), *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. An Introduction.* Academic Press, San Diego, pp. 467.

Wu J. (1982), *Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane.* J. Geophy. Res. C87, pp. 9704-9706.

3.2 Gli indicatori di pericolosità pluviometrica

3.2.1 Introduzione

La Direttiva del P.C.M. del 27/02/2004 (G.U. n. 59 del 11 marzo 2004) per la gestione organizzativa e funzionale del sistema di allertamento nazionale e regionale per il rischio idrogeologico ed idraulico ai fini di protezione civile, prevede che ciascuna Regione identifichi, sul proprio territorio, adeguate grandezze e relativi valori, quali precursori ed indicatori del probabile manifestarsi di prefigurati scenari d'evento.

La Regione deve definire, per ogni tipologia di rischio, un insieme di soglie articolate almeno su due livelli di moderata ed elevata criticità, oltre ad un livello base di situazione ordinaria, in cui le criticità possibili sono ritenute comunemente ed usualmente accettabili dalla popolazione.
Ad ogni livello di criticità, la Regione deve poi far corrispondere i livelli di allerta del sistema della protezione civile ovvero le azioni previste nei Piani di Emergenza che devono essere attivate progressivamente ai vari livelli territoriali (nazionale, regionale, provinciale e comunale).

3.2.2 Il significato delle soglie pluviometriche a supporto delle allerte

Le precipitazioni rappresentano un indicatore fondamentale nell'insorgenza del rischio idrogeologico ed idraulico. Pertanto le soglie pluviometriche *(SP)* costituiscono una componente importante nel sistema di allerta; in un piano cartesiano *(P vs d)*, in cui *P* rappresenta la precipitazione cumulata e *d* la durata progressiva dell'evento meteorico, le soglie pluviometriche si rappresentano come una curva che delimita i possibili stati: al di sopra la precipitazione determina una situazione che si può considerare potenzialmente critica, al di sotto invece l'evento meteorico non ha le caratteristiche di intensità tali da innescare uno stato di allerta.
Teoricamente è possibile individuare una famiglia di curve le quali definiscono una serie di stati a pericolosità crescente, ma nella pratica ci si limita ad un numero ridotto di livelli di pericolosità, anche per semplificare l'organizzazione dei piani operativi di Protezione Civile (Cipolla & Sebastiani, 2000). Per il Piemonte, sono previsti due livelli, moderata ed elevata criticità, cui corrispondono le due relative soglie pluviometriche.

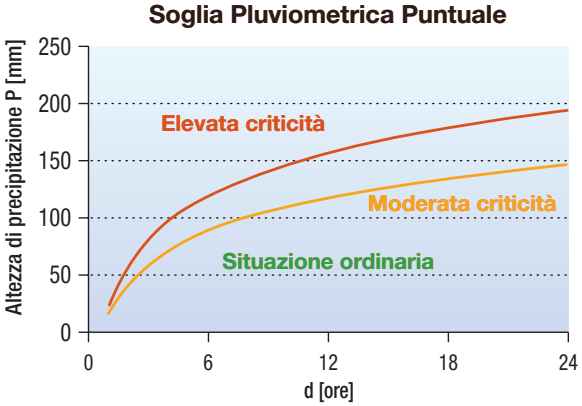


Figura 3.2.1
Soglie pluviometriche puntuali associate a moderata ed elevata criticità

Nella **figura 3.2.1** si riporta a titolo di esempio, una soglia pluviometrica con delimitazione di due stati di criticità.

Un approccio per la determinazione delle *SP*, associate specificamente all'innesco dei movimenti franosi, consiste nell'identificazione di relazioni tra le variabili precipitazione-durata che dividono il campo di stabilità rispetto a quello di instabilità a partire da eventi franosi in cui sia nota la precipitazione e l'ora di innesco.
La definizione di soglie pluviometriche viene essenzialmente affrontata utilizzando due tipologie di modelli:

a) *modelli empirici,* basati su elaborazioni di tipo statistico volte all'individuazione di rapporti diretti tra le precipitazioni e gli inneschi dei fenomeni franosi, avvalendosi solo di valutazioni di tipo statistico e qualitativo per quanto riguarda le variabili ambientali sopra citate;
b) *modelli deterministici,* basati sull'utilizzo di modelli numerici in grado di fornire una valutazione delle condizioni di stabilità di un versante tramite l'analisi quantitativa delle variabili in gioco quali il bilancio idrologico, le altezze piezometriche e la ricarica delle falde, i dati geotecnici e morfometrici del versante.

L'approccio empirico vede come parametro fondamentale la precipitazione cumulata (solitamente espressa in millimetri), in un dato intervallo di tempo (solitamente espresso in ore o giorni).
Il passo successivo consiste nell'associare una funzione del tipo:

$$y(t) = f\left[x(t)\right] \qquad (3.2.1)$$

che dipende dalle piogge cadute prima dell'istante *t*, dalla probabilità *P* di innesco di un fenomeno franoso *E* all'istante *t*.
In letteratura esistono molti esempi a riguardo, in particolare si individuano due famiglie di soglie:

1) *soglie di 1° ordine,* definite tramite l'inviluppo o l'interpolazione delle quantità minime di pioggia necessarie per l'attivazione di fenomeni franosi;
2) *soglie di 2° ordine,* analoghe alle precedenti, ma distinte da queste poiché vengono considerati anche aspetti riguardanti la geologia, la geomorfologia, i regimi pluviometrici e il contributo delle piogge pregresse.

L'approccio deterministico tenta di individuare le condizioni per cui un versante è o non è in equilibrio tramite la definizione del *Fattore di Sicurezza,* che definisce appunto l'equilibrio limite, dato dal rapporto tra i fattori stabilizzanti e destabilizzanti. Per ricavare il *Fattore di Sicurezza* vengono utilizzati modelli completi di versante basati sulla modellazione fisica dei fenomeni franosi, per i quali si rende necessaria una dettagliata caratterizzazione geotecnica e geomeccanica del versante oggetto della modellazione. L'impiego di tali modelli è quindi da ritenersi, al contrario dei modelli empirici, non applicabile su scala regionale ma solamente a ristretti ambiti territoriali ben definiti (scala del sito interessato dai movimenti franosi o del singolo versante). Esistono comunque approcci numerici molto più complessi basati non sull'equilibrio delle forze come nel caso del Metodo dell'Equilibrio Limite, ma in cui sono considerate tensioni e deformazioni che consentono di seguire l'evoluzione di un versante anche in condizioni di post rottura.

Per la determinazione delle *SP* associate ai fenomeni di esondazione dei corsi d'acqua si può ricorrere a simulazioni numeriche: si parte da un modello idrologico del suolo che simula i processi fisici che determinano la risposta del bacino preso in considerazione; successivamente tale modello viene tarato e validato sulla base delle informazioni idrometriche e pluviometriche disponibili in sezioni di controllo è utilizzato per risolvere il *problema idrologico inverso*, ovvero la valutazione delle precipitazioni in grado di generare la portata al colmo critica (Rosso, 2002).

3.2.3 La metodologia per la definizione delle soglie pluviometriche

Le soglie pluviometriche utilizzate per il sistema di allerta della regione Piemonte sono state ricavate utilizzando un metodo semplificato rispetto a quelli sopra elencati, in cui SP è funzione di un numero limitato di parametri:

$$SP = f(d, TR_H, A, I) \qquad (3.2.2)$$

dove d è la durata della precipitazione, TR_H è il tempo di ritorno relativo a ciascun livello di pericolosità H, A è l'estensione areale dei processi attesi e infine I è l'indicatore dello stato idrologico.

Il modello adottato per la determinazione delle *SP* è un modello concettuale all'interno del quale il tempo di ritorno *TR* rappresenta il parametro di taratura. Esso deve essere ricavato in modo da minimizzare il numero dei mancati allarmi e dei falsi allarmi tenendo conto che un aumento del *TR*, con corrispondente aumento della soglia, si traduce in un aumento dei mancati allarmi a fronte della riduzione dei falsi allarmi e viceversa. Nel presente lavoro è stato definito *mancato allarme (MA)* la situazione in cui a fronte di un danno, la precipitazione associata non supera la soglia pluviometrica mentre è stato definito *falso allarme (FA)* il verificarsi del superamento della soglia senza alcun effetto sul territorio.

Il tempo di ritorno ottimale risulta essere quello per il quale la funzione obiettivo Φ, definita dalla seguente relazione:

$$\Phi = p_1 \cdot MA_{(TR)} + p_2 \cdot FA_{(TR)} \qquad (3.2.3)$$

assume il valore minimo.
La scelta dei pesi p_1 e p_2 della funzione obiettivo rappresenta un aspetto particolarmente delicato in quanto legata a valutazioni non propriamente di natura tecnica ma piuttosto socio-economiche; infatti un mancato allarme determina un ritardo nell'attivazione delle procedure di emergenza e quindi una riduzione dell'efficacia delle azioni di salvaguardia per i beni e soprattutto per la pubblica incolumità (Becchi & Castelli, 1998). Un falso allarme al contrario non comporta un danno diretto, ma un costo sociale legato all'attivazione di livelli di operatività delle strutture di protezione civile e contribuisce a diminuire l'efficacia dell'allertamento.
Con riferimento all'estensione areale *A*, le soglie vengono suddivise rispetto alla valenza spaziale:
1) soglie pluviometriche puntuali (*SPp*) da riferirsi al punto/stazione e come tali rappresentative dei fenomeni quali frane, attività torrentizia e piene limitatamente al reticolo idrografico minore;
2) soglie pluviometriche areali (*SPa*) da intendersi come precipitazioni ragguagliate all'area alla quale si riferiscono e che rappresentano i fenomeni di piena del corso d'acqua che sottende il bacino considerato.

Infine l'indicatore dello stato idrologico *I*, che viene introdotto per tenere conto della dipendenza dei processi idrologici e idrogeologici dallo stato del sistema ovvero dal grado di saturazione dei suoli, fa riferimento alla precipitazione caduta nei giorni precedenti l'evento. Vengono qui considerati due valori dell'indicatore: stato secco o stato umido. Per valutare l'indicatore in caso di processi di tipo puntuale si è fatto ricorso alla formulazione di Moser (Honensinn & Moser, 1983) ricavata per le Alpi austriache e ripresa da Cancelli e Nova nelle Alpi Valtellinesi (1985) estendendola all'area

in studio attraverso l'applicazione di un fattore di normalizzazione:

$$I = \left(44.66 D^{(-0.78)}\right) N \qquad (3.2.4)$$

dove I è l'intensità di pioggia espressa in mm/h, D la durata espressa in ore ed N il fattore di normalizzazione pari al rapporto tra la pioggia media annua dell'area in esame e quella dell'area in cui è stata ottenuta la relazione.
Tale formulazione di natura empirica, che ha una validità generale e separa il campo di stabilità da quello dove è alta la probabilità dei fenomeni franosi, in questo studio viene utilizzata esclusivamente per assegnare il valore dell'indicatore dello stato idrologico per le *SPp*.
Quale indicatore dello stato idrologico per le *SPa* è stata utilizzata la pioggia cumulata nei giorni precedenti ragguagliata all'area considerata e normalizzata rispetto alla pioggia media annua.

3.2.3.1 Le zone di allerta

Ai fini delle attività di allerta ogni Regione, tramite il proprio Centro Funzionale, provvede ad aggregare i bacini idrografici o parti di essi, in ambiti territoriali significativamente omogenei per l'atteso manifestarsi nel tempo reale della tipologia e della severità degli eventi meteoidrologici intensi e dei relativi effetti. Tali ambiti territoriali sono denominati zone di allerta.
Il processo di definizione delle zone di allerta, si svolge attraverso più fasi di affinamento nelle quali giocano un ruolo fondamentale criteri di natura idrografica, meteorologica ed orografica, tenendo conto della risposta del territorio agli effetti meteorologici e dei limiti amministrativi.
Le zone di allerta sono individuate in base alle scale spaziali caratteristiche delle previsioni meteorologiche tenendo conto delle caratteristiche pluviometriche e climatiche; tale criterio può rendere necessario introdurre una perimetrazione che tenga conto dell'orografia separando aree montuose da quelle di pianura laddove l'orografia gioca un importante ruolo nella distribuzione delle precipitazioni intense.
In generale, la perimetrazione avviene seguendo i limiti dei bacini idrografici: il criterio idrografico consente di individuare aree omogenee dal punto di vista dell'evoluzione dei processi di piena, in quanto la pioggia caduta all'interno di un bacino idrografico genera effetti sul territorio del bacino stesso. In altre parole gli effetti al suolo di piogge cadute sulla testata del bacino possono ripercuotersi anche nei settori di pianura, indipendentemente dalla distribuzione delle piogge all'interno del bacino stesso.
Le zone di allerta sono "ritagliate" sui confini amministrativi regionali. La valutazione della pericolosità e del rischio viene poi effettuata sulle "aree di riferimento" ad esse associate che possono anche ricomprendere territori esterni alla regione, facendo così riferimento alle precipitazioni previste/osservate sull'intero bacino idrografico.
Nella **figura 3.2.2** sono riportate le zone di allerta adottate dalla Regione Piemonte.

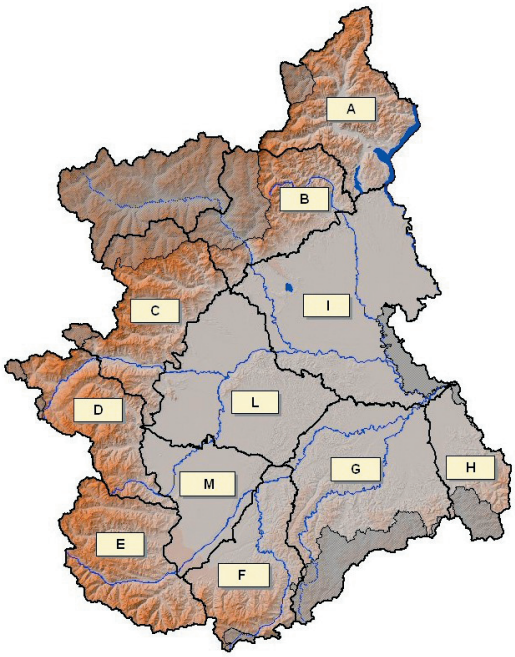


Figura 3.2.2
Suddivisione del territorio della Regione Piemonte in zone di allerta

3.2.3.2 Caratterizzazione delle piogge intense

Per la determinazione delle precipitazioni di assegnato periodo di ritorno, ovvero delle *Linee Segnalatrici di Probabilità Pluviometriche* (LSPP), sono stati utilizzati i risultati del Progetto *Valutazione delle Piene in Italia* e per il Piemonte *l'Atlante delle Piogge Intense sulle Alpi Occidentali* (Boni *et al.*, 2002).
La procedura *Valutazione delle Piene in Italia* (VAPI) è stata messa a punto dalla Linea di Ricerca sulla Previsione e Prevenzione dagli Eventi Idrologici Estremi (Linea 1) del Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (GNDCI) del Consiglio Nazionale delle Ricerche.

I rapporti VAPI sono stati sviluppati per tutta l'Italia, seppure con disomogeneità di applicazione, dalle varie Unità Operative del GNDCI e contengono una base statistica che consente l'individuazione dei tempi di ritorno associati alle altezze massime di precipitazione di durata pari a 1, 3, 6, 12 e 24 ore su tutto il territorio nazionale. Per la realizzazione del Rapporto VAPI si è fatto ricorso a due distribuzioni, la *Two Components Estreme Value* (TCEV) e la GEV (Valori Estremi Generalizzata), quest'ultima usata solo per il compartimento di Parma e Genova.

L'Atlante delle Piogge Intense sulle Alpi Occidentali è stato prodotto dal Centro di Ricerca Interuniversitario in Monitoraggio Ambientale dell'Università di Genova nell'ambito del Progetto Interreg II *Italia-Confederazione Elvetica*. I dati pluviometrici alla base di tale lavoro sono relativi a tutte le sta-

zioni ricadenti in Piemonte e in aggiunta quelle del Canton Ticino e le stazioni francesi poste a nord del massiccio del Pelvoux per un totale di 537; tali stazioni ricoprono l'area considerata con una densità di circa una stazione ogni 100 km^2. Dopo un'attenta analisi a posteriori sono state scartate le serie il cui unico *outlier* fosse prodotto da un evento già descritto dal dato di un'altra serie in una stazione vicina, arrivando così ad avere una base di 365 stazioni pluviometriche.

L'approccio utilizzato è quello dell'analisi regionale così come già proposto nel Rapporto VAPI perché quest'ultimo è stato ritenuto il più adatto per la stima affidabile dei quantili dei massimi di precipitazione per elevato tempo di ritorno. La distribuzione utilizzata è la TCEV (Rossi *et al.*, 1982) e la sua peculiarità è quella di tradurre in termini statistici la differente provenienza degli estremi idrologici riconducendosi formalmente al prodotto di due funzioni di probabilità di tipo Gumbel: la prima denominata *componente base* assume valori non elevati ma frequenti, mentre la seconda genera eventi più rari ma mediamente più rilevanti *(componente straordinaria)*. La TCEV dipende da 4 parametri (Θ_1, Θ_2, Λ_1, Λ_2) i quali combinati opportunamente fra loro forniscono il coefficiente di asimmetria *(CS)* e quello di variazione *(CV)*. La presenza di quattro parametri conferisce al modello probabilistico caratteristiche di maggior flessibilità, tuttavia vanno tenute in conto le maggiori difficoltà connesse al metodo di stima dei parametri e la notevole variabilità di questa stima con la dimensione della serie storica disponibile. Tali parametri sono stati calcolati per ogni regione omogenea e per ogni durata da 1 a 24 ore.
Con un'analisi qualitativa della distribuzione spaziale sul territorio dei parametri che definiscono la forma della TCEV si sono individuate le regioni omogenee (regione padana, tirrenica e Alpi meridionali) all'interno delle quali la distribuzione di probabilità genitrice può essere assunta nella sua forma adimensionale.
L'espressione delle *LSPP* utilizzata è:

$$h(d,TR) = mK(d,TR)d^n \qquad (3.2.5)$$

dove $h(d, TR)$ è l'altezza di precipitazione massima annuale per durata d e tempo di ritorno TR, m è il valore della pioggia indice da dedurre in funzione della locazione geografica del sito, $K(d, TR)$ è il quantile adimensionale ricavabile facendo riferimento direttamente all'espressione che fornisce la probabilità cumulata in funzione dei parametri della distribuzione TCEV. Infine n è l'esponente della relazione di scala anch'esso funzione della localizzazione geografica del sito. Nella **figura 3.2.3** è riportato l'andamento della pioggia indice su tutto il territorio italiano.
Per il calcolo dell'altezza di precipitazione areale bisogna considerare che con l'aumentare della superficie diventano non trascurabili le caratteristiche della scala di evoluzione spaziale dell'evento

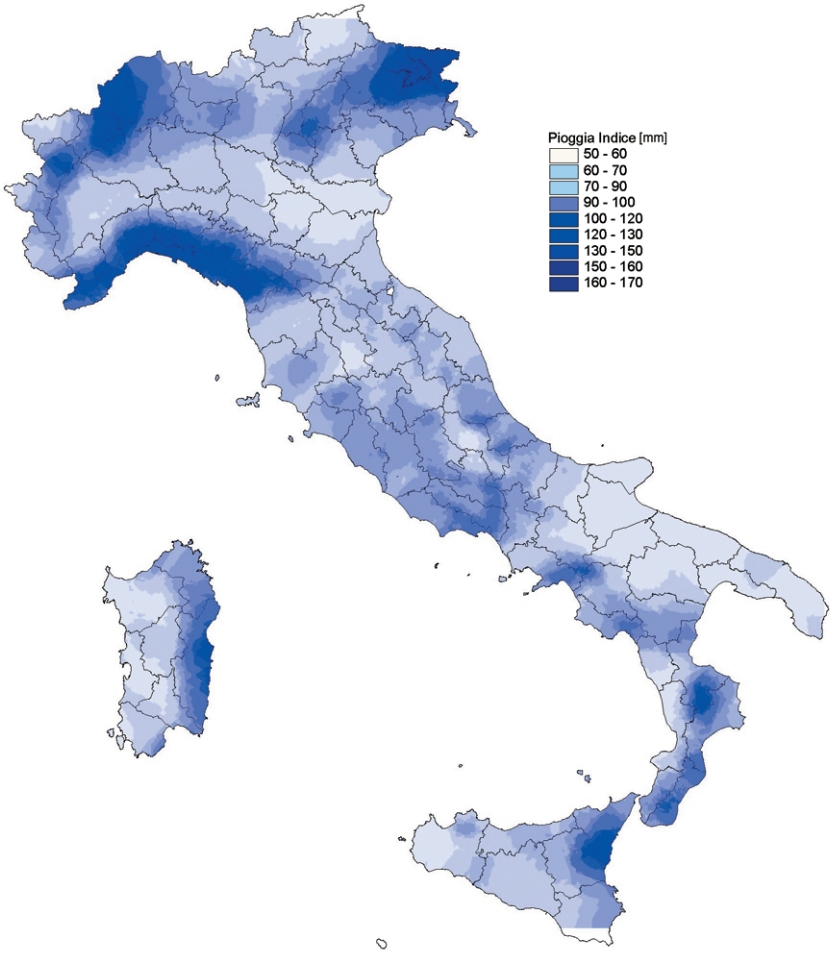


Figura 3.2.3
Andamento della pioggia indice *m*

di pioggia ed occorre considerare un fattore di ragguaglio areale che trasformi la stima puntuale in areale. Nell'estendere l'analisi della precipitazione misurata dal punto stazione all'area si è utilizzato il metodo proposto da Eagleson del U.S. National Weather Service nel quale il coefficiente di ragguaglio r, anche detto fattore di riduzione areale ARF, è espresso nella forma seguente (Eagleson, 1972):

$$r = 1 - e^{\left(-1.1d^{1/4}\right)} + e^{\left(-1.1d^{1/4} - 0.01A\right)} \qquad (3.2.6)$$

dove d è la durata espressa in ore e A è l'area espressa in km^2.
La **figura 3.2.4** mostra, per le diverse durate esaminate, l'andamento del coefficiente di ragguaglio con l'area da cui si osserva che, per aree superiori a 500 km^2, r è pressoché costante rispetto all'area.
Studi specifici, condotti sui campi di precipitazione in Emilia Romagna (Brath, 2004), hanno consentito di ricavare una espressione del fattore ARF specifica per il bacino del Fiume Reno chiuso a Casa-

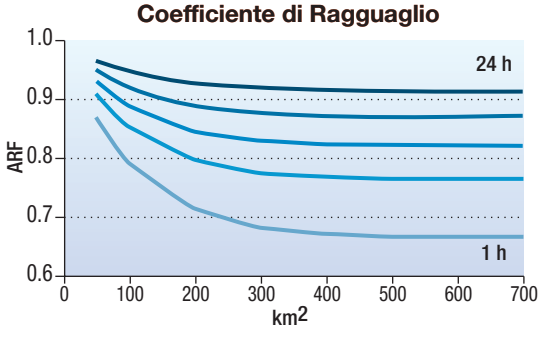


Figura 3.2.4
Andamento del Fattore di Ragguaglio ARF in funzione dell'area per le durate di 1, 3, 6, 12 e 24 ore

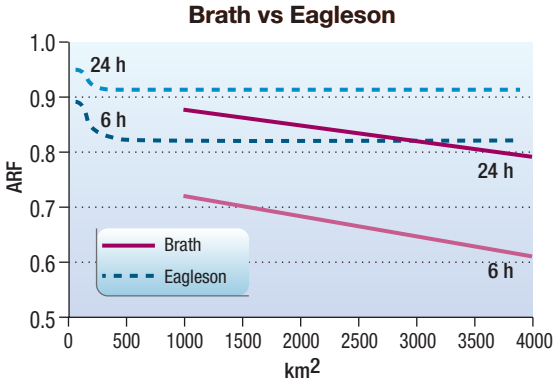


Figura 3.2.5 Confronto tra l'andamento del Fattore di Ragguaglio ARF di Eagleson e quello proposto da Brath per il bacino del Reno

lecchio (1'051 km^2). Nella **figura 3.2.5** viene riportato un confronto tra l'ARF proposto da Eagleson e quello di Brath: si evidenziano forti limitazioni del metodo proposto dal primo per le scale spaziali d'indagine. Per ovviare a ciò sono auspicabili specifici studi per la caratterizzazione dei campi di precipitazione spazio-temporali nel contesto italiano.
Introducendo la formula di ragguaglio, l'espressione del calcolo dell'altezza di precipitazione massima areale, specificato per le durate da 1 a 24 ore, diventa:

$$ha_T(d) = m(d)K_T(d)r(d) \qquad (3.2.7)$$

Mentre per le *SPp* le durate di pioggia rappresentative dei fenomeni che si considerano vanno tipicamente da 1 a 24 ore, per le *Spa* si considerano anche durate di più giorni in funzione della dimensione dell'area considerata; per il presente studio le durate indagate vanno da 6 a 48 ore.
L'estensione alle durate superiori alle 24 ore è stata calcolata estrapolando i valori per le durate note attraverso una legge di potenza nella forma:

$$ha_T(d) = ad^n \qquad (3.2.8)$$

3.2.3.3 Eventi storici e precipitazioni caratteristiche

Come già ampiamente descritto, il tempo di ritorno rappresenta il parametro di taratura del modello concettuale in modo da minimizzare il numero dei mancati allarmi e dei falsi allarmi. La funzione obiettivo (3.2.3) può essere ricostruita attraverso l'indagine storico retrospettiva degli eventi e dei danni storici.
Le tipologie dei dati ricercati e poi elaborati sono:
- dati di pioggia alla scala oraria;
- processi di versante;
- processi sui corsi d'acqua.

Una banca dati sugli effetti per rischi idrogeologici disponibile a scala nazionale è il Progetto *Aree Vulnerate Italiane da Frane ed Inondazioni* (AVI) del GNDCI che, nonostante le numerose limitazioni dovute alla disomogeneità delle notizie, risulta essere il più importante archivio di notizie sulle inondazioni e sulle frane in Italia, che può essere utilizzato nelle regioni in cui non è disponibile una banca dati organica ed informatizzata a più piccola scala.

Tutte le notizie censite sono state raccolte in un archivio digitale continuamente aggiornato che è arrivato a contenere fino al 2001 oltre 22'000 informazioni relative a frane con 18'500 località colpite ed oltre 7'500 informazioni relative ad inondazioni con 12'000 località colpite. Le schede di censimento del progetto AVI sono anche disponibili su Internet (http://avi.gndci.pg.cnr.it/) con informazioni di vario genere (amministrative e generali sull'evento, cartografiche, cause innescanti, morfologiche, geologiche, geotecniche sui danni).

Esistono poi banche dati a livello regionale come quella di Arpa Piemonte che raccoglie in maniera organica e georiferita le informazioni inerenti i processi di versante (frane), torrentizi e fluviali (piene) che interessano ed hanno interessato il territorio piemontese ed organizzate nel Sistema Informativo Geologico (SIGeo). All'interno del SIGeo, il sottosistema *processi ed effetti,* in particolare, si occupa di strumenti finalizzati alla gestione delle informazioni inerenti i processi di versante, fluviali e torrentizi che interessano o hanno interessato il Piemonte, in termini tipologici e di effetti e danni indotti. I dati sono tratti da varie fonti (pubblicazioni, perizie tecniche, articoli di giornale) e da rilevamento ed osservazioni dirette dei processi di instabilità naturali.
Sebbene si disponga di notizie di danni a partire dall'inizio del secolo scorso, la difficoltà nel reperire i dati di pioggia alla scala oraria per gli eventi storici e il notevole cambiamento della vulnerabilità del territorio avvenuta negli ultimi decenni, ha portato a concentrare l'attenzione sul periodo successivo al 1990. I processi naturali sono stati classificati in due insiemi in funzione della tipologia: puntuali (frane, attività torrentizia, reticolo idrografico secondario) e areali (piene); in funzione dell'entità del danno associato, in due livelli di criticità definiti nel sistema di allertamento.
Sono stati considerati di moderata criticità quelli relativi a danneggiamenti modesti alle opere, alle infrastrutture e le occupazioni di aree agricole, e di elevata criticità i casi di consistenti o diffusi danneggiamenti oppure distruzioni di edifici, strade, opere idrauliche, ponti, infrastrutture o ancora casi di perdite di vite umane dovute alla magnitudo dell'evento.

Dopo aver selezionato gli eventi significativi si è proceduto con la caratterizzazione pluviometrica degli stessi. Ad ogni danno sono state abbinate una o più registrazioni pluviometriche con l'obiettivo di individuare i tempi di ritorno caratteristici delle precipitazioni che hanno causato i singoli danni. Dall'insieme di tutte le segnalazioni disponibili per il periodo analizzato, sono poi stati considerati solo i fenomeni direttamente riconducibili alle precipitazioni.
Per quanto riguarda i danni puntuali, la scelta delle stazioni pluviometriche rappresentative per il fenomeno si è basata sulla distanza, sulla quota

planimetrica e sull'assenza di rilievi orografici di separazione. I casi in cui non è stato possibile disporre del dato di pioggia in un intorno significativo dell'area coinvolta, sono stati scartati dalle successive analisi. Per gli eventi di piena sono state utilizzate tutte le stazioni di pioggia presenti in posizione utile per la determinazione del volume di afflusso al bacino idrografico.

3.2.4 Applicazione ad alcune regioni italiane

La metodologia descritta è stata applicata ai dissesti idrogeologici avvenuti in Piemonte, in Emilia Romagna e in Calabria. Di seguito vengono esposti i singoli casi ed i risultati ottenuti.

3.2.4.1 Regione Piemonte

L'analisi per il Piemonte è stata condotta utilizzando le informazioni reperite nel SIGeo dal 1990 al 2002 ed i dati pluviometrici della rete meteoidrografica regionale. Per ciascun evento considerato sono stati ubicati su base cartografica i danni ed i pluviometri di riferimento: nella **figura 3.2.6** si riporta un esempio della cartografia prodotta.

Al fine di individuare la funzione obiettivo (3.2.3) di tutti gli eventi, sono stati conteggiati i mancati e i falsi allarmi per diversi tempi di ritorno. Per valutare i falsi allarmi per le *SPp*, sono stati conteggiati i superamenti registrati da tutte le stazioni pluviometriche raggruppate per aree di allertamento rispetto alle piogge con tempo di ritorno pari a 2, 5, 10 e 20 anni per le durate 1, 3, 6, 12 e 24 ore. Per quanto riguarda le *SPa*, sono state calcolate le piogge ragguagliate ai bacini idrografici dello stesso periodo e conteggiati i superamenti rispetto alle piogge con *TR* pari a 2, 5, 10 e 20 anni per le durate 6, 12 e 24 ore. I superamenti così ottenuti sono poi stati raggruppati per aree di allertamento e per evento e sono stati considerati falsi allarmi quelli per i quali non sono stati rilevati danni.

La scelta dei pesi p_1 e p_2 della funzione obiettivo, come detto, è legata a valutazioni di tipo socio-economiche; in ogni caso è logico ipotizzare $p_1 > p_2$ in quanto un mancato allarme comporta ripercussioni certamente più pesanti di un falso allarme. È quindi stato calcolato l'andamento della funzione obiettivo per diversi valori del rapporto p_2/p_1. Nella **tabella 3.2.1** sono riportati i valori della funzione obiettivo, associata a danni di entità moderata ed estensione puntuale. Nella **tabella 3.2.2** sono riportati i valori della funzione obiettivo associata a danni di entità elevata ed estensione puntuale. Nella **tabella 3.2.3** sono riportati i valori della funzione obiettivo, associata a danni di estensione areale e moderata entità. Nella **tabella 3.2.4** sono riportati i valori della funzione obiettivo associata a danni di entità elevata ed estensione areale.

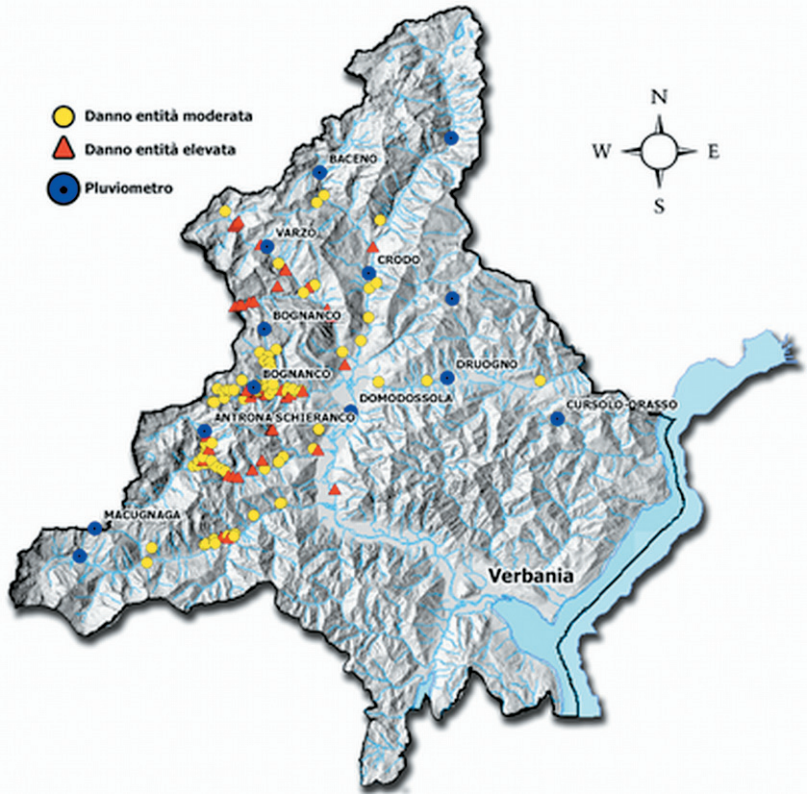


Figura 3.2.6
Evento alluvionale del 13-16 ottobre 2000 provincia del Verbano Cusio Ossola

TABELLA 3.2.1 VALORI DELLA FUNZIONE OBIETTIVO PER DANNI DI ESTENSIONE PUNTUALE E MODERATA CRITICITÀ

TR [ANNI]	MEDIA ANNUA *FA*	MEDIA ANNUA *MA*	p_2/p_1 0.4	0.3	0.2	0.1
2	63	1.8	27	20	14	8
5	44	5.9	23	19	14	10
10	37	6.7	22	18	14	10
20	33	7.8	21	17	14	11

TABELLA 3.2.2 VALORI DELLA FUNZIONE OBIETTIVO PER DANNI DI ESTENSIONE PUNTUALE ED ELEVATA CRITICITÀ

TR [ANNI]	MEDIA ANNUA *FA*	MEDIA ANNUA *MA*	p_2/p_1 0.4	0.3	0.2	0.1
5	44	0.7	18	14	10	5
10	37	0.8	16	12	8	5
20	33	0.9	14	11	8	4

TABELLA 3.2.3 VALORI DELLA FUNZIONE OBIETTIVO PER DANNI DI ESTENSIONE AREALE E MODERATA CRITICITÀ

TR [ANNI]	MEDIA ANNUA *FA*	MEDIA ANNUA *MA*	p_2/p_1 0.4	0.3	0.2	0.1
2	27.5	0.5	12	9	6	3
5	14	2.4	8	7	5	4
10	9	2.9	7	6	5	4
20	6	3.8	6	6	5	4

TABELLA 3.2.4 VALORI DELLA FUNZIONE OBIETTIVO PER DANNI DI ESTENSIONE AREALE ED ELEVATA CRITICITÀ

TR [ANNI]	MEDIA ANNUA *FA*	MEDIA ANNUA *MA*	p_2/p_1 0.4	0.3	0.2	0.1
5	14	1.6	6	5	3	2
10	9	2.2	5	4	3	3
20	6	3.6	5	4	3	3

3.2.4.2
Regione Emilia Romagna

Per l'Emilia Romagna l'unico archivio sugli effetti disponibile era il progetto AVI. Sono state estratte le schede di circa 450 frane e circa 40 eventi di piene verificatesi nel periodo compreso tra il 1990 e il 2000. Dall'analisi critica del contenuto di ogni singola scheda, sono state scartate tutte quelle che non presentavano dettagli né risultavano esaurienti sulle cause scatenanti, sul tipo di movimento e di terreno coinvolto, sulla tipologia ed entità dei danni o riferite a riattivazioni di vecchie frane, di crolli in roccia e di fenomeni sismici: ciò ha portato in definitiva all'utilizzo del 60% delle schede inizialmente selezionate.
Sono quindi stati acquisiti i dati pluviometrici di circa 150 stazioni pluviometriche degli ex Uffici Idrografici dei Compartimenti di Parma e di Bologna, ora Arpa Emilia Romagna, dal 1990 al 2000 ma non per tutte le stazioni i dati risultavano completi.

Ad ogni danno segnalato sono state abbinate una o più registrazioni pluviometriche per un totale di 98 pluviometri di cui l'80% significativo per livelli di criticità moderata e il 20% significativo per livelli di criticità elevata.
Di essi sono state calcolate sia le altezze di pioggia per durate pari a 1, 3, 6, 12 e 24 ore registrate durante i giorni dell'evento meteorico, sia le cumulate giornaliere dei giorni precedenti all'inizio dello stesso e calcolato il tempo di ritorno delle precipitazioni associate. Sono quindi stati calcolati i falsi allarmi ed i mancati allarmi a partire dai superamenti puntuali di circa 150 stazioni pluviometriche ubicate sul territorio emiliano riferito alle sole soglie puntuali. Nelle **tabelle 3.2.5** e **3.2.6** si riportano i risultati ottenuti.

3.2.4.3
Regione Calabria

Anche per la Calabria i dati relativi ai dissesti idrogeologici sono stati desunti dal Progetto AVI. Sono state selezionate circa 450 schede di danni di estensione puntuale avvenuti tra il 1990 e il 2001. La validazione ha poi portato a scartare quelle che non presentavano dettagli né risultavano esaurienti sulle cause scatenanti o erano riferite a cause non direttamente correlate alle precipitazioni, contando così 300 schede AVI di cui l'80% rappresentativo per danni di criticità moderata e il 20% di criticità elevata. Ad ogni dissesto sono state abbinate una o più stazioni pluviometriche e per esse sono stati acquisiti sia i dati di pioggia per durate da 1 a 24 ore che le cumulate giornaliere dei giorni precedenti all'inizio dell'evento meteorico. Tali dati sono stati forniti da Arpa Calabria che ha l'onere di gestire le stazioni pluviometriche dell'ex Ufficio Idrografico di Catanzaro.
È stato possibile stimare il tempo di ritorno della precipitazione di durata da 1 a 24 ore per 82 pluviometri di cui 64 associati a danni di criticità moderata e 18 a dissesti di criticità elevata. Non disporre delle serie continue delle precipitazioni ha limitato l'applicazione della metodologia ai danni avvenuti in Calabria in quanto non è stato possibile calcolare i falsi allarmi. I risultati dei mancati allarmi sono riportati nella **tabella 3.2.7**.

TABELLA 3.2.5 VALORI DELLA FUNZIONE OBIETTIVO PER DANNI DI ESTENSIONE PUNTUALE E MODERATA CRITICITÀ

TR [ANNI]	MEDIA ANNUA *FA*	MEDIA ANNUA *MA*	p_2/p_1 0.4	0.3	0.2	0.1
2	48.6	1.8	21	16	11	7
5	22.1	4.6	13	11	9	7
10	11.7	5.4	10	9	8	7
20	7.2	6	9	8	7	7

TABELLA 3.2.6 VALORI DELLA FUNZIONE OBIETTIVO PER DANNI DI ESTENSIONE PUNTUALE ED ELEVATA CRITICITÀ

TR [ANNI]	MEDIA ANNUA *FA*	MEDIA ANNUA *MA*	p_2/p_1 0.4	0.3	0.2	0.1
5	22.1	1	10	8	5	3
10	11.7	1.3	6	5	4	2
20	7.2	1.4	4	4	3	2

3.2.5
Conclusioni

I risultati ottenuti per gli eventi associati ad uno scenario di moderata criticità per rischio idrogeologico ed idraulico indicano che il numero medio annuo di falsi allarmi è particolarmente elevato per tempo di ritorno pari a 2 anni, mentre al crescere di esso non sono più trascurabili i mancati allarmi (soprattutto per TR>5 anni). Se il rapporto p_2/p_1 è pari a 0.1, la funzione Φ è minima per tempo di ritorno uguale a 2 anni, mentre per valori maggiori di tale rapporto si ritiene prudente assumere *TR* pari a 5 anni.
Per gli eventi associati a scenari di elevata criticità, la funzione Φ assume un minimo per tempo di ritorno pari a 5 anni solamente nell'ipotesi di p_2/p_1=0.1, mentre in tutti i restanti casi il minimo corrisponde ad un tempo di ritorno uguale a 20 anni.
I risultati ottenuti dall'analisi completa degli eventi del Piemonte e parziale per quanto riguarda l'Emilia Romagna e la Calabria, suggeriscono di adottare i tempi di ritorno indicati nella matrice di contingenza riportata nella **tabella 3.2.8**.

TABELLA 3.2.7 MEDIA ANNUA DEI MANCATI ALLARMI PER DANNI DI ESTENSIONE PUNTUALE

TR [ANNI]	MODERATA CRITICITÀ	ELEVATA CRITICITÀ
2	1.0	-
5	2.5	0.8
10	3.5	0.9
20	3.7	1.1
50	-	1.1

TABELLA 3.2.8 TEMPI DI RITORNO ASSOCIATI ALLE SOGLIE PLUVIOMETRICHE

VALIDITÀ DELLA VALUTAZIONE			TEMPO DI RITORNO SOGLIE TR_H [ANNI]			
SOGLIA	AMBITO TERRITORIALE	DURATA [ORE]	MODERATA CRITICITÀ		ELEVATA CRITICITÀ	
			suolo secco	suolo umido	suolo secco	suolo umido
Puntuale	Massimo	6, 12, 24	5	2	20	5
Areale	Media areale	6, 12, 24, 48				

Lo studio mette inoltre in evidenza come l'ipotesi di una relazione causale tra forzante meteorica ed effetti al suolo non consenta di spiegare tutti i casi esaminati. Infatti l'osservazione di falsi allarmi e mancati allarmi in corrispondenza della medesima soglia indica i limiti dell'approccio proposto. Ciononostante la metodologia rappresenta un valido strumento speditivo come dimostrato dai risultati della sua applicazione nella Regione Piemonte fin dal 1996.
Il lavoro descritto è il risultato di un'attività svolta da Arpa Piemonte per conto del Dipartimento Nazionale della Protezione Civile quale Centro di Competenza nell'ambito del sistema di allertamento nazionale e regionale per il rischio idrogeologico ed idraulico ai fini di protezione civile con lo scopo di sviluppare strumenti per la valutazione delle criticità che assicurino una unitarietà a scala nazionale. La generalizzazione ad ambiti territoriali diversi da quelli analizzati dovrà essere seguita da un approfondimento puntuale e di verifica con l'ausilio di banche dati di maggiore dettaglio non disponibili al momento dello studio.

Bibliografia

Becchi I. & Castelli F. (1998), *Sulla gestione economicamente ottimale di misure anti-alluvioni integrate di tipo strutturale e non.* XXVI Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Catania.

Boni G., Messori C., Morando M. & Siccardi F. (2002), *L'uso del Vapi in meteoidrologia.* XXVIII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Potenza.

Boni G., Parodi A., Roth G. & Tognetti F. (2002), *Sintesi pluviometrica regionale e realizzazione di un atlante delle piogge intense sulle Alpi occidentali Italo-Svizzere,* Progetto Interreg II Italia-Svizzera 1994-99 Collegamento delle reti di rilevamento e condivisione delle esperienze e delle conoscenze per la gestione del rischio idrogeologico, Torino.

Brath A. (2004), *Sistema regionale di monitoraggio, valutazione speditiva del rischio idraulico e allertamento ai fini di protezione civile — Seconda Fase: perfezionamento del sistema.* Rapporto inedito della Regione Emilia Romagna, aprile 2004.

Cancelli A. & Nova R. (1985), *Landslides in Soil Debris Cover Triggered by Rainstorms in Valtellina (Central Alps- Italy).* Department of Structural Engineering Technical University of Milano, Italy.

Cipolla F. & Sebastiani C. (2000), *Linee guida per la redazione di un piano di Protezione Civile dal rischio idro-geologico,* Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche.

Arpa Piemonte – Area Previsione e Monitoraggio Ambientale (2004), *Soglie pluviometriche,* Convenzione tra il Dipartimento per la Protezione Civile e Arpa Piemonte per l'assistenza alla gestione delle situazioni di rischio idro-meteorologico sul territorio nazionale, Rapporto ad uso interno, Torino, 2004.

Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 27 febbraio 2004, *Indirizzi operativi per la gestione organizzativa e funzionale del sistema di allertamento nazionale e regionale per il rischio idrogeologico e idraulico ai fini di protezione civile.* Gazzetta Ufficiale n. 59 del 11 marzo 2004 – Supplemento Ordinario n. 39 Roma.

De Michele C. & Rosso R. (1999), *La valutazione delle piene nell'Italia Nord-Occidentale: bacino padano e Liguria tirrenica.* CNR-GNDCI.

Eagleson P.S. (1972), *Dynamics of flood frequency. Water Resour.* Res. 8, pp. 878-898.

Honensinn F. & Moser M. (1983), *Geotechnical Aspects of soil slips in Alpine Regione.* Eng.Geol., vol. 19, pp. 185-211.

Kottegoda N.T. & Rosso R. (1997), Statistics, *Probability and Reliability for Civil and Environmental Engineers.* Mc-Graw-Hill Publishing Company, New York.

Rosso R. (2002), *Manuale di Protezione Idraulica del Territorio.* Cusl, Milano.

Rossi F. & Versace P. (1982), *Criteri e metodi per l'analisi statistica delle piene. Valutazione delle piene.* C.N.R. P.F. conservazione del suolo n. 165.

3.3 Verso un differente approccio ai metodi di previsione

La previsione di un evento naturale richiede l'applicazione di un criterio di comportamento, la conoscenza di variabili e parametri, il controllo delle condizioni al contorno. Il sistema di riferimento è quello delle complesse interazioni tra suolo ed acqua, in cui i fenomeni in gioco sono riconducibili alle precipitazioni meteoriche, all'infiltrazione e circolazione dell'acqua negli acquiferi sotterranei, all'evapo-traspirazione, al ruscellamento e alla concentrazione dei deflussi. L'evoluzione più o meno rapida di questi fenomeni è frequentemente alla base di eventi critici.

Se da una parte è estremamente complesso interpretare matematicamente i fenomeni in modo corretto, d'altra parte è possibile molto spesso ricondurre ad un solo agente naturale la principale causa dei pericoli geologici e idrologici: la pioggia.

Infatti l'approccio più semplice consiste nel correlare ad un unico fattore che sinteticamente si pensa legato all'evento naturale gli effetti che l'evento stesso provoca. Generalmente si attribuisce alla pioggia misurata da una rete di pluviometri il compito di sintetizzare le cause di innesco di un fenomeno complesso come una frana o l'esondazione di un corso d'acqua.

Tale approccio permette così di legare direttamente la misura di una precipitazione alla possibilità del verificarsi di un pericolo naturale, approntando un sistema di *soglie pluviometriche* che sia funzionale agli scopi di allertamento propri di una struttura di prevenzione.

Nel caso specifico di Arpa Piemonte, il territorio regionale è stato suddiviso in zone pluviometricamente omogenee (zone di allertamento) per le quali sono state identificate soglie distinte in corrispondenza delle quali è possibile che avvengano dissesti idrogeologici di versante o sulla rete idrografica.

La scelta delle zone di allertamento e relativa delimitazione rispecchiano anche l'esigenza di spazializzare in maniera conveniente il precursore individuato, cioè la previsione meteorologica.

Dunque l'approccio *causa-effetto* si rivela uno strumento utile ed efficace poiché non è necessario conoscere tutte le leggi che governano un determinato fenomeno, ma si ipotizza una legge di tipo diretto tra il verificarsi di un avvenimento e un'azione che "riassume" in sé le cause.

L'esigenza di un passaggio da un approccio di tipo semplificato come quello delle soglie ad uno più complesso e sofisticato risiede nella consapevolezza dei limiti insiti nel metodo. Si tratta infatti di un approccio a *scatola nera,* in cui vengono volutamente ignorate le leggi che governano il fenomeno e soprattutto si è consapevoli che molte situazioni sfuggono alla previsione di queste soglie. Infatti non è infrequente che, a parità di condizioni, non si abbia la stessa risposta di una zona a parità di soglie prefissate.

Questo perché comunque esiste una marcata non linearità di risposta tra evento e soglia e dunque capita di avere delle situazioni difformi a quanto ci si aspetterebbe, cui vanno aggiunti anche fattori amplificatori degli effetti che agiscono in maniera differente nei vari contesti territoriali.

Da qui nasce la necessità di comprendere il fenomeno che si vuole prevedere e trovare alcuni criteri in grado di rappresentarne il comportamento. Si possono individuare due diversi indirizzi metodologici finalizzati ad aumentare criteri della capacità predittiva degli approcci:

1) partire dal criterio delle soglie già esistenti e specializzarle per tipologia di dissesto e di contesto territoriale/geologico, geomorfologico. In questo modo, si passa da un approccio a *scatola nera* ad uno a *scatola grigia,* poiché si "sporca" l'approccio causa-effetto, tenendo conto dell'ambito e tipo di dissesto che si vuole prevedere;
2) costruire modelli del fenomeno/processo. Questi possono essere di tipo meccanico, statistico, empirico, ma comunque si cerca di entrare dentro il problema cercando di evidenziare le caratteristiche che governano il fenomeno e in base a queste trovarne le modalità di previsione.

Per quanto riguarda quest'ultimo indirizzo, storicamente il primo approccio è stato quello dell'interpretazione su base strettamente fisica dei meccanismi che sembrano regolare lo sviluppo degli eventi.

Al di là delle difficoltà connesse alla risoluzione di complessi sistemi matematici, gli ostacoli maggiori sono costituiti dall'assegnazione dei valori ai parametri in gioco, spesso valutati a scala del campione di laboratorio e non interpretabili alla scala reale, a causa delle intrinseche eterogeneità del sistema, della non significatività delle misure puntuali e delle perturbazioni spesso introdotte nelle fasi di campionamento.
L'approccio statistico si fonda invece su un'analoga consapevolezza di incapacità intellettuale nel comprendere completamente "la natura delle cose" e valuta le condizioni di pericolosità e rischio associando ad esse un errore presunto. Anche in questo caso è necessario disporre di lunghe serie storiche di eventi per poter valutare i comportamenti attesi.

Questo salto di qualità non significa abbandonare un metodo di analisi che comunque si rivela soddisfacente, ma si affianca ad esso, costituendo un momento di approfondimento per quei tipi di fenomeni e per quelle zone che evidenziano condizioni di criticità.

Infatti, il ricorso a modelli più sofisticati migliora certamente la possibilità di prevedere alcuni fenomeni, ma comporta oneri (computazionali, di tempo, economici) che talora è impensabile sostenere indistintamente per tutto il territorio regionale. Pertanto le esperienze che Arpa Piemonte sta conducendo hanno il fine di migliorare il grado di conoscenza di alcuni fenomeni per poterli prevedere e per poter disporre di strumenti più sofisticati per quelle zone che effettivamente hanno maggiori probabilità di trovarsi in condizioni di criticità.

Rispetto al metodo generale delle soglie, è possibile quindi migliorare spazialmente la previsione e specializzarla per alcuni tipi di dissesto.

Va infine sempre tenuto presente che qualunque approccio si adotti, è importante ricordare che ricostruire il passato è la chiave per prevedere gli effetti futuri seguendo un ciclo interattivo e iterativo in cui il criterio osservazionale si affianca e supporta ogni metodo previsionale.

Allo stesso modo va osservato che, quando le cause siano squisitamente naturali, gli eventi debbano essere interpretati come processi evolutivi del paesaggio che da sempre sono avvenuti e avverranno. Sono quindi nella sostanza assolutamente inevitabili, poiché tendono ad un finale equilibrio geomorfologico del territorio.

Nel seguito sono descritte le esperienze che Arpa Piemonte sta conducendo proprio nel campo del superamento del concetto di *causa-effetto* nel campo della prevenzione dei rischi naturali.

Ciò che emerge da queste sperimentazioni è la consapevolezza che il ricorso ad approcci maggiormente specialistici e specializzati per le differenti tipologie di dissesto è il traguardo cui tendere per ottenere indicatori di criticità del territorio che siano il più possibile affidabili e precisi.

3.4 La previsione delle piene

3.4.1 I processi di formazione delle piene

Il dominio di studio dell'idrologia tecnica è rappresentato dal bacino idrografico, sistema costituito da quella porzione di territorio il cui suolo e sottosuolo convogliano l'afflusso idrico che li interessa in una data sezione di chiusura, individuata normalmente come sezione trasversale di un corso d'acqua.
I processi di formazione delle portate idriche dei corsi d'acqua possono essere classificati dal punto di vista teorico in idrologici ed idraulici. I primi comprendono tutti i meccanismi di trasformazione dell'afflusso al bacino idrografico in portata immessa nel reticolo idrografico, i secondi il trasferimento di tale portata all'interno dei singoli alvei e nella rete idrografica nel suo complesso.

I meccanismi idrologici riguardano molteplici processi di interazione tra suolo, sottosuolo, vegetazione e atmosfera. Questi definiscono i flussi di massa d'acqua, illustrati in **figura 3.4.1**, e di energia dall'atmosfera verso il bacino idrografico e viceversa, così come fra le diverse componenti del bacino medesimo.
Per quanto riguarda i flussi di massa, gli afflussi al sistema dall'esterno sono costituiti principalmente dalle precipitazioni meteoriche in fase liquida, cui si deve aggiungere il contributo della massa liquida proveniente dalla fusione nivo-glaciale; in particolari contesti si deve inoltre tenere conto della condensazione diretta del vapore acqueo come rugiada o galaverna. Tale afflusso idrico successivamente si ripartisce in diversi altri flussi interni al bacino stesso subendo numerose trasformazioni.

Una parte degli afflussi non intercettata dalla vegetazione che giunge alla superficie del suolo, si infiltra nel sottosuolo mentre una parte defluisce in superficie fino a raggiungere il corso d'acqua. Ancora, una parte del flusso infiltrato nel primo strato di terreno raggiunge il corso d'acqua filtrando nel terreno saturo e/o insaturo come deflusso ipodermico, l'altra parte percola nell'acquifero sottostante, o falda, che, a propria volta, interagisce con il reticolo idrografico di fondovalle e di pianura, producendo deflusso profondo e portata nel corso d'acqua, detta *portata di base,* ovvero drenando portata dal corpo idrico.

Non tutta la massa che affluisce al bacino si trasforma in portata: una parte degli afflussi ritorna in atmosfera prima di giungere al reticolo per evaporazione dal suolo o tramite traspirazione dalla vegetazione, oppure evapora direttamente dalle superfici dei corpi idrici.
I processi evapotraspirativi dipendono fortemente dalla dinamica dei flussi di energia in ingresso: fra questi la radiazione solare a onde corte incidente al suolo rappresenta il principale contributo in ingresso al sistema idrologico, cui si sommano i flussi energetici a onde lunghe da e verso l'atmosfera. Inoltre l'evapotraspirazione risente della disponibilità idrica nel suolo ed anche delle condizioni degli strati di atmosfera prossimi al suolo:

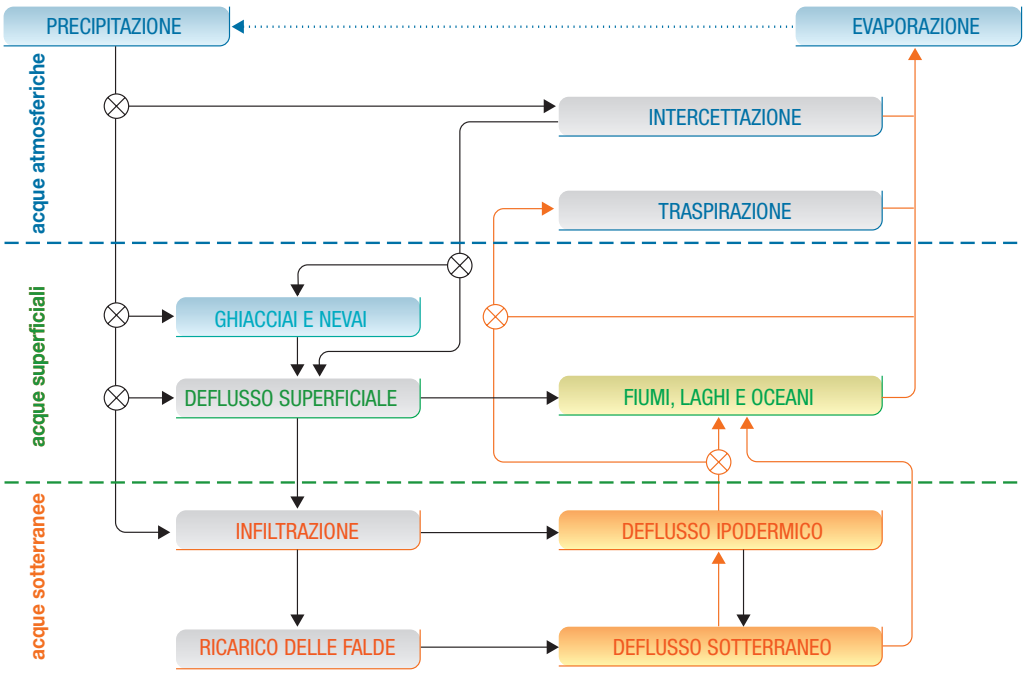


Figura 3.4.1
Schema del ciclo idrologico

umidità dell'aria e ventilazione costituiscono importanti fattori predisponenti o inibenti. Tutto ciò rende l'interazione tra suolo e atmosfera estremamente complessa (Penman, 1948; Priestley & Taylor, 1972).

Le varie componenti fin qui brevemente descritte hanno pesi diversi in funzione dello specifico regime idrologico d'interesse. Nell'idrologia di piena solo i fenomeni dalla dinamica veloce risultano significativi alla scala temporale dell'evento della piena medesima (ore o giorni): il ramo di crescita ed il colmo sono dovuti essenzialmente al deflusso superficiale mentre il deflusso ipodermico influenza principalmente il ramo discendente dell'idrogramma ma può così incidere sulla dinamica delle piene immediatamente successive.

L'influenza del deflusso superficiale cresce al diminuire delle dimensioni dei bacini, divenendo cruciale nelle piene improvvise dei piccoli bacini, note in letteratura come *flash floods;* viceversa il deflusso ipodermico condiziona la dinamica di piena in modo crescente al crescere delle dimensioni del bacino. Nell'analisi dei fenomeni di magra, che definiscono la curva di durata delle portate determinando la risorsa idrica effettivamente disponibile nel dato bacino, ci si riferisce invece alla formazione della portata di base che a sua volta deriva dall'interazione con i sistemi di falda: tali interazioni hanno dinamiche molto lente (mesi o anni) e dipendono fortemente dai flussi evapotraspirativi.

Nello studio dei fenomeni di piena, molta attenzione deve quindi essere posta alla corretta identificazione dei processi dalla dinamica veloce che determinano la formazione dei deflussi superficiali e ipodermici: fra questi l'infiltrazione e la filtrazione sono i più importanti aspetti da rappresentare attraverso opportuna modellazione.
Una descrizione fisica del processo è teoricamente possibile riferendosi agli studi relativi al moto dell'acqua nei mezzi porosi, anche se questo impone di caratterizzare le proprietà idrauliche del mezzo, in questo caso del suolo, valutandone, in primo luogo, la permeabilità e la capacità di ritenzione. Tali capacità generalmente non sono costanti, ma dipendono dallo stato del contenuto idrico del suolo stesso rendendo il fenomeno altamente non lineare (Richards, 1931; Brooks & Corey, 1964, 1966; Van Genucten, 1980). Quindi il fenomeno particolarmente complesso per essere descritto e costringe di fatto ad apportare semplificazioni analizzando il processo integrato almeno alla scala di particella di suolo.

In più, tali caratteristiche idrauliche sono difficilmente misurabili sia in laboratorio sia in campo e soprattutto presentano un'elevata variabilità spaziale, sia planimetrica sia sul profilo verticale (Santini *et al.*, 1995), comportando ulteriori approssimazioni quando il processo deve essere studiato alla scala del bacino idrografico, che invece rappresenta la scala d'interesse per le piene.

Comunemente si adottano due approcci complementari che stanno alla base dei diversi modelli descrittivi del processo dell'infiltrazione. In un caso, i meccanismi di rifiuto della precipitazione da parte del terreno vengono legati all'eccessiva intensità della precipitazione medesima che supera la capacità di assorbimento del suolo (Horton, 1933). Le caratteristiche principali del suolo che determinano questo meccanismo sono riassunte nella curva di permeabilità che descrive come varia la permeabilità del suolo in funzione del suo grado di saturazione; questa è fortemente legata sia al tipo di suolo, in particolare alla tessitura, sia all'uso del suolo stesso, cioè alla presenza di materia organica o di apparati radicali.

Nell'altro caso i meccanismi di rifiuto della precipitazione da parte del terreno vengono legati allo stato di progressiva saturazione del suolo che via via non consente ulteriore assorbimento (Dunne, 1978). In questo caso le caratteristiche del suolo predominanti risultano essere riassunte dalla struttura e dalla porosità che quantifica i volumi idrici che il suolo stesso può trattenere. In ogni caso risulta evidente che per descrivere correttamente il processo di infiltrazione è necessario definire in modo appropriato le caratteristiche del suolo, la loro variabilità spaziale e contemporaneamente la variabilità spaziale della precipitazione che innesca il processo.

Il primo approccio ben si presta a descrivere le piene originate da piogge brevi ed intense, il secondo meglio spiega l'effetto di piogge prolungate. Non mancano ovviamente modelli in cui sono sviluppati entrambi gli approcci al fine di poter gestire entrambe le tipologie di evento.
In particolare il territorio del Piemonte è caratterizzato da una elevata variabilità sia dal punto di vista del territorio fisico sia da quello climatico che impone l'analisi del processo di formazione a diverse scale temporali. La catena alpina con le maggiori cime e profonde valli è caratterizzata da piccoli bacini con regimi idrologici nivo-glaciali e nivo-pluviali, con piene improvvise dovute a fenomeni temporaleschi estivi e spesso causa di forte trasporto solido.

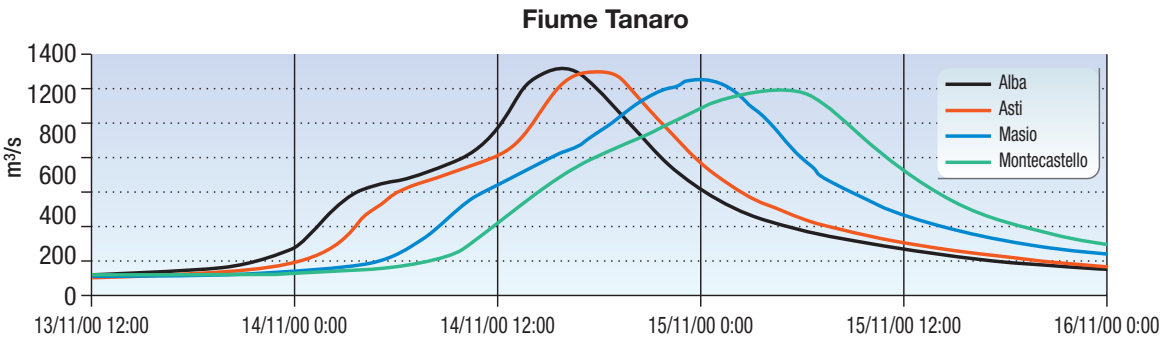


Figura 3.4.2
Esempio di laminazione dell'onda di piena lungo l'asta del Fiume Tanaro

Nella zona prealpina, dove le valli alpine confluiscono nei maggiori fondivalle e i bacini hanno dimensione maggiore e regime decisamente pluviale, le piene tipicamente primaverili e autunnali sono causate da precipitazioni prolungate. Tuttavia, fenomeni convettivi ed elevate intensità di precipitazioni si verificano spesso a causa della risalita orografica delle correnti umide mediterranee: data la forte presenza antropica esse possono spesso risultare estremamente rischiose. La formazione delle onde di piena in questi bacini assume fondamentale importanza per determinare la piena nel reticolo idrografico principale. In questo caso, oltre alla simulazione del processo di infiltrazione, è basilare la corretta quantificazione della quota oltre la quale la precipitazione assume forma nevosa non producendo così deflusso immediato. Infine le zone collinari e di pianura sono caratterizzate dalla maggiore concentrazione delle precipitazioni nel periodo autunnale in cui le piene sono spesso legate alla saturazione dei suoli.

Al contrario, i processi idraulici riguardano principalmente la propagazione della portata nel corso d'acqua e la determinazione dei tiranti idrici e della velocità della corrente. I tempi di trasferimento delle onde di piena nei diversi rami costituiscono una variabile fondamentale in quanto oltre a determinare il tempo di arrivo del picco di piena, influenzano lo sfasamento delle onde degli affluenti e quindi anche la forma dell'onda ed il valore al colmo dei corpi idrici ricettori. In particolare nella propagazione delle piene nei reticoli naturali risulta di fondamentale importanza tenere conto principalmente di due fenomeni che concorrono a modificare in modo significativo la traslazione delle onde di piena alla scala del reticolo: la laminazione dell'onda e l'influenza dei profili di rigurgito.

Con il termine *laminazione* si indica il fenomeno di progressiva riduzione del colmo dell'onda di piena durante la traslazione della stessa lungo il corso d'acqua. Tale fenomeno è dovuto alla dinamica del progressivo invaso dei volumi idrici nell'alveo e viene correttamente descritto nelle equazioni di idrodinamica. Questo fenomeno è tanto più evidente quanto più gli alvei divengono larghi e poco pendenti ed è quindi molto importante in tutte le porzioni di pianura dei corsi d'acqua regionali (un esempio è riportato in **figura 3.4.2**).

Il fenomeno del *rigurgito* si manifesta a causa dell'innalzamento dei tiranti idrici dovuto a livelli idrici particolarmente elevati a valle e viene descritto implicitamente dalle equazioni del moto. Questi innalzamenti sono generalmente dovuti alla confluenza in un corso d'acqua anch'esso in piena ovvero all'innalzamento dei livelli in concomitanza di notevoli restringimenti dell'alveo sia naturali sia antropici. In presenza di rigurgito l'andamento del livello idrometrico non rispecchia il relativo andamento delle portate provocando il permanere di un livello elevato anche quando le portate in alveo diminuiscono (un esempio è riportato in **figura 3.4.3**).
Di nuovo questo fenomeno è significativo soprattutto in pianura dove in particolari condizioni topografiche il rigurgito può essere risentito per molti chilometri a monte. In particolare, nella rete idrografica piemontese, i rigurgiti sono importanti in corrispondenza di tutte le confluenze in Po: ad esempio quelle della Dora Baltea, del Sesia, del Tanaro, dello Scrivia; della confluenza in Tanaro della Stura di Demonte, del Belbo e della Bormida; della confluenza dell'Orba in Bormida e della confluenza del Toce in Verbano.

Inoltre l'effetto del rigurgito può assumere occasionalmente e localmente grande importanza in corrispondenza di strutture come i ponti, le cui luci subiscono forti variazioni di sezione a causa di occlusioni dovute al trasporto solido e quindi provocare intensi ed improvvisi fenomeni di esondazione. Tali fenomeni sono spesso legati all'idrologia dei versanti e rappresentano un ulteriore stretto legame tra fenomeni idrologici e fenomeni idraulici. In questo caso la difficoltà che si incontra nella corretta previsione dell'esondazione è legata all'estrema difficoltà di prevedere l'occasionalità delle cause che determinano il rigurgito.

Per concludere è importante sottolineare che numerosi altri fenomeni possono interagire con la naturale propagazione della piena e produrre estese esondazioni come ad esempio le rotte arginali o l'occlusione dell'alveo a causa di frane o smottamenti. Anche in questo caso la difficoltà di previsione è legata all'impossibilità di prevederne le cause. Tali fenomeni devono per questo essere considerati fuori linea nel momento della definizione degli scenari di rischio.

3.4.2
I modelli di previsione

I fattori principali che determinano la scelta dei modelli matematici utilizzabili per costruire un sistema di previsione delle piene dei corpi idrici superficiali sono molteplici. Pertanto la scelta delle tipologie modellistiche utilizzabili non è univoca e deve essere valutata attraverso un'analisi multi-obiettivo che tenga conto delle esigenze e delle potenzialità dei singoli modelli, in termini di dati occorrenti e di precisione dei risultati.
In particolare è fondamentale analizzare il territorio che si vuole modellare da un punto di vista geomorfo-climatico e quindi definire i processi fisici prevalenti che condizionano la dinamica della piena nelle sezioni fluviali di interesse e la relativa scala spazio-temporale di riferimento.
Inoltre è necessario e fondamentale valutare quali risposte deve poter fornire il sistema di simulazione ed i relativi tempi di calcolo, in funzione delle esigenze di tipo operativo relative alle azioni preventive che si possono intraprendere a valle dell'allertamento, per mitigare l'esposizione e la vulnerabilità del territorio.

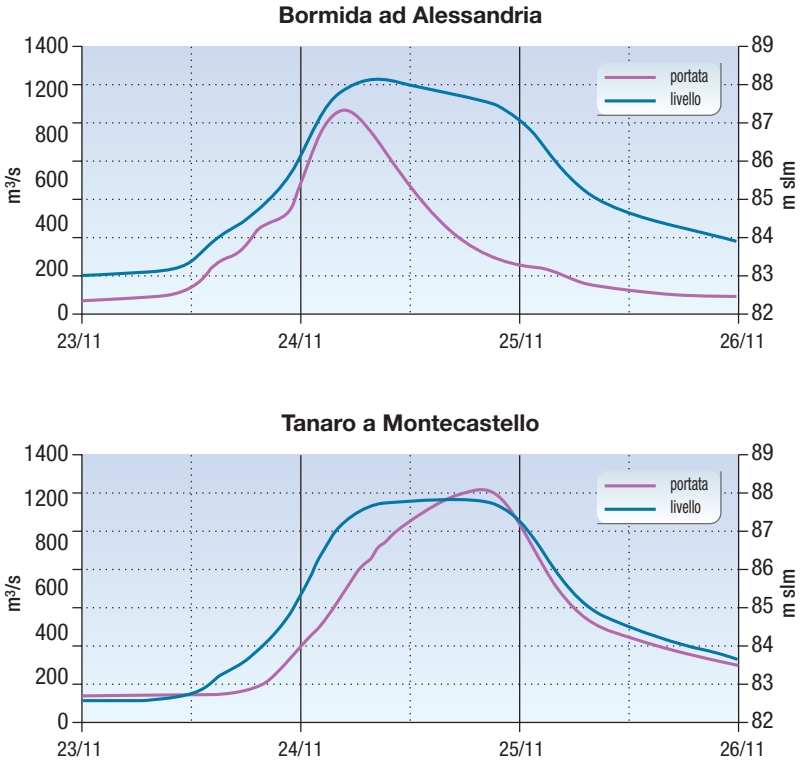


Figura 3.4.3
Rigurgito dei livelli del Torrente Bormida ad Alessandria causati della piena del Fiume Tanaro. Il livello idrico del Bormida si mantiene elevato, condizionato dal livello in Tanaro, mentre le portate diminuiscono rapidamente

3.4.2.1
I modelli idrologici di formazione del deflusso superficiale

In generale i fenomeni di tipo idrologico sono di fondamentale importanza per studiare le piene dei bacini idrografici montuosi di piccole dimensioni dalla dinamica estremamente rapida (piccola scala: superficie minore di 100 km^2 e tempi di risposta minore di 3-6 ore; media scala: superficie minore di 1'000 km^2 e tempi di risposta minore di 18-24 ore). In questo tipo di studio è necessario poter considerare accuratamente, con particolare attenzione alla marcata variabilità spazio-temporale, tutti i processi che concorrono alla trasformazione dell'afflusso meteorico in deflusso nella rete idrografica (Siccardi, 1995; Barbero *et al.*, 2002).

In letteratura sono presenti innumerevoli modelli utilizzabili per la simulazione dell'infiltrazione superficiale, della filtrazione profonda, del deflusso sui versanti e di quello ipodermico. In generale, ancora prima di entrare nel merito del singolo modello analizzandone le equazioni ed i metodi numerici utilizzati per risolverle, esercizio spesso complesso che esula dagli obiettivi del presente capitolo, è opportuno classificare i modelli secondo alcune categorie tipicamente utilizzate in idrologia.
Sulla base delle equazioni risolte nel codice di calcolo, si distinguono *modelli fisici*, basati sulla descrizione accurata dei diversi processi alla scala spaziale e temporale adeguata; *concettuali*, basati su approssimazioni della dinamica dei fenomeni attraverso similitudini con sistemi più semplici; *empirici*, basati sull'uso di equazioni ricavate dall'interpretazione diretta di evidenze sperimentali. In questo caso la complessità è maggiore per modelli fisici e via via inferiore per quelli concettuali ed empirici ed è legata alla soluzione numerica delle equazioni: la scelta di equazioni più semplici porta generalmente ad aumentarne la parametrizzazione e quindi la necessità di taratura.
Si distinguono inoltre modelli *concentrati*, in cui i processi sono risolti ad una scala integrale molto maggiore di quella propria, generalmente si utilizza l'intero bacino idrografico come unità di base, o *distribuiti*, dove le unità di base sono le parcelle di suolo di grandezza opportuna. In questo caso la maggiore complessità dei modelli distribuiti è legata al fatto che la più fine risoluzione spaziale del modello consente di per sé una maggiore accuratezza nella descrizione fisica dei fenomeni e comporta in generale un elevato costo computazionale.

Infine, relativamente alla descrizione del ciclo idrologico, si considerano modelli a simulazione continua in cui i diversi processi sono simulati nella loro dinamica complessiva riproducendo l'intero ciclo idrologico per lunghi periodi e rappresentano tutte le componenti da quelle superficiali a quelle di falda e quindi determinando direttamente istante per istante lo stato idrologico del bacino. A questi modelli complessi si affiancano diverse semplificazioni legate allo studio delle piene, detti anche *ad evento*, limitando la descrizione agli aspetti del ciclo idrologico che hanno maggiore influenza sulla formazione della piena: alcuni modelli studiano i deflussi superficiale ed ipodermico e trascurano le dinamiche della per-

colazione e le oscillazioni di falda, altri ancora simulano unicamente il deflusso superficiale e considerano come perdita le precipitazioni che si infiltrano nel suolo. Questa schematizzazione consente generalmente di avere un modello più semplice che però di contro necessita di conoscere o ipotizzare lo stato di imbibimento iniziale dei suoli che condiziona fortemente il processo di infiltrazione **(figura 3.4.4)**.

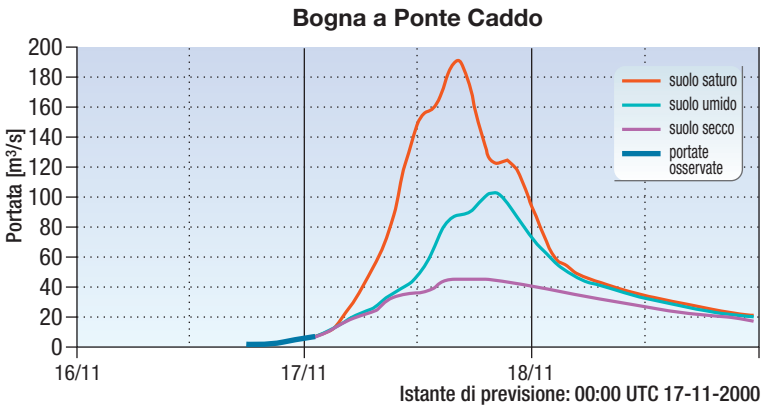


Figura 3.4.4
Influenza delle condizioni iniziali sulla previsione di piena in un piccolo bacino

In generale i modelli a simulazione continua comportano una maggiore complessità in quanto richiedono la simulazione dell'intero ciclo idrologico su lungo periodo; tuttavia la scelta di un modello ad evento può essere legata non tanto alle esigenze di semplificazione, ma alla necessità di studiare con accuratezza i processi principali che determinano le piene isolandoli dal contesto del ciclo idrologico complessivo sfruttando la diversa scala temporale di questi. In questo caso le semplificazioni introdotte risultano spesso assolutamente trascurabili.
L'analisi comparata di vantaggi e svantaggi offerti da ciascuna tipologia è ampiamente documentata in letteratura (Chow *et al.*, 1988).

3.4.2.2 I modelli idrodinamici di propagazione della piena

I fenomeni di tipo idraulico sono determinanti nello studio della rete idrografica di fondo valle e di pianura caratterizzata da bacini di grosse dimensioni e tempi di risposta più lunghi (grande scala: superficie maggiore di 1'000 km^2 e tempo di risposta maggiore di 1 giorno) (Barbero *et al.*, 2002). In questo caso la letteratura propone un limitato numero di possibili approcci. Ciò è sostanzialmente dovuto al fatto che il fenomeno fisico del moto dei fluidi viene descritto in modo molto accurato dalle equazioni di Stokes. Nella trattazione delle piene fluviali, in particolare, tali equazioni vengono semplificate nelle equazioni di De Saint-Venant considerando che il moto delle correnti idriche naturali è assolutamente turbolento e sfruttando l'ipotesi di mono-dimensionalità o bidimensionalità del moto. La caratteristica che distingue maggiormente questa tipologia di modelli è il metodo numerico di soluzione delle equazioni di base che ne determina il costo computazionale, la stabilità e l'accuratezza.
I modelli idraulici hanno prestazioni fortemente condizionate dalla qualità dei rilievi topografici disponibili. In generale per quanto riguarda i modelli di tipo mono-dimensionale, la descrizione geometrica delle sezioni fluviali è facilmente ottenibile da rilievi topografici specifici, mentre il parametro di scabrezza deve essere calibrato sulla base della simulazioni di eventi storici.

3.4.2.3 La catena previsionale idro-meteorologica

L'insieme dei dati relativi alle forzanti meteorologiche osservate e previste, con i vari trattamenti necessari dei modelli idrologici e di quelli idraulici, costituisce la cosiddetta catena previsionale idro-meteorologica.
I dati idrometrici in tempo reale sono il punto di partenza per una previsione della propagazione delle piene nei grandi corsi d'acqua (bacini a grande scala e lunghezza dell'asta dell'ordine delle centinaia di chilometri) basata su modelli idraulici. In questo caso i tempi di traslazione delle onde di piena nel reticolo fluviale sono sufficientemente elevati per consentire un adeguato anticipo previsionale. Queste applicazioni sono consolidate nella letteratura scientifica e tecnica con numerosi esempi operativi. La conoscenza precisa della geometria degli alvei fluviali consente generalmente di ottenere previsioni ad elevata precisione.

Le osservazioni meteorologiche in tempo reale consentono, attraverso modelli idrologici e idraulici, di effettuare previsioni sul reticolo idrografico dei bacini di media scala; in questo caso, l'utilizzo di previsioni meteorologiche a breve e medio termine, consente di aumentare l'anticipo previsionale a fronte di una minore accuratezza del sistema dovuta all'incertezza delle previsioni meteorologiche. L'interazione tra idrologia e meteorologia nella previsione degli eventi estremi è attualmente un ambito di ricerca applicata che da alcuni anni trova molto spazio nella comunità scientifica. Gli esempi di applicazione non sono numerosi sia nella letteratura sia nella realtà operativa (WMO, 2002).

Infine, le informazioni che provengono dai radar meteorologici e dalle previsioni meteorologiche a brevissimo termine risultano di particolare importanza in quanto i tempi caratteristici di formazione della piena nei piccoli bacini montani sono tali da non consentire sufficiente preavviso alla popolazione; in questo caso le incertezze legate alla previsione meteorologica si sommano a quelle della modellistica idrologica ad alta risoluzione, pertanto i risultati devono essere attentamente analizzati. Queste applicazioni rappresentano un

campo di ricerca applicata molto avanzata, con esempi disponibili che nella grande parte sono allo stadio di prototipi.
In ogni caso, il punto cruciale nella gestione di una catena operativa previsionale è quello relativo alla necessità di tenere conto che le previsioni fornite dalle simulazioni modellistiche delle piene fluviali non sono esatte bensì affette da notevoli incertezze. Queste essenzialmente sono dovute: all'utilizzo delle previsioni meteorologiche, alla stima della condizione iniziale di imbibimento del suolo, alle approssimazioni implicite nella modellazione idrologica e idraulica. Tali incertezze producono inevitabilmente fallanze nel sistema di previsione, con mancati e falsi allarmi, pertanto, per una corretta gestione degli allertamenti, devono essere quantificate direttamente dal modello di simulazione in modo oggettivo ovvero nel sistema di previsione delle piene tramite l'analisi della previsione da parte di un esperto.

La previsione deterministica
Si parla di previsione deterministica quando il modello numerico non tiene conto direttamente dell'incertezza delle stime prodotte, cioè tratta le variabili che descrivono l'evoluzione del sistema in modo deterministico; questo significa che una volta date le condizioni iniziali e note le forzanti al sistema, la soluzione fornita dal modello è unica e determinata. La propagazione delle incertezze presenti nelle tre componenti ora citate, forzanti, condizioni iniziali e al contorno, ai valori di portata nel reticolo non viene perciò quantificata.

Quando le incertezze presenti sono accettabili, come nel caso della previsione idraulica a breve termine, la simulazione deterministica non necessita di interpretazione. Al contrario, quando il peso delle incertezze aumenta, come nella previsione idrologica a medio-lungo termine, solo un'analisi del comportamento e della precisione del modello nell'utilizzo operativo sugli eventi passati consente di interpretare le simulazioni numeriche da parte di un esperto alla luce della situazione in atto e di emettere previsioni qualitative relative alla magnitudine dei fenomeni di piena.

La previsione probabilistica
Per superare i limiti di una previsione qualitativa e soggettiva, si rende indispensabile la quantificazione dell'incertezza della previsione in modo oggettivo e quantitativo. Questo si ottiene utilizzando modelli capaci di gestire nella soluzione delle equazioni variabili di tipo aleatorio e fornendo soluzioni in termini probabilistici, cioè specificando la probabilità che una certa variabile, ad esempio la portata in una determinata sezione, sia superiore ad un valore fissato di pericolo.
Dal punto di vista applicativo, la complessità di un modello capace di caratterizzare l'intera distribuzione di probabilità della soluzione risulta spesso tale da non poter affrontare lo studio in questi termini. In generale si utilizzano modelli che si limitano a determinare i momenti del secondo ordine, o varianza, di questa distribuzione. Questa rappresenta un indice dell'affidabilità della soluzione e fornisce un intervallo di confidenza entro il quale le previsioni possono variare. Tuttavia anche in questo caso il ruolo del previsore esperto non viene eluso in quanto l'interpretazione della soluzione alla luce dell'allertamento necessita comunque di un'analisi attenta.

Alternativamente una metodologia operativa, semplice da realizzare ma efficace, per ottenere una stima dell'attendibilità della previsione si basa sull'ipotesi che la maggiore fonte di incertezza sia legata alla previsione meteorologica ed è quella di utilizzare diverse corse del modello idrologico-idraulico con diversi scenari pluvio-meteorologici per la successiva verifica della variabilità delle portate previste. In questo modo il previsore ha una stima indiretta dell'incertezza e può ponderare meglio la sua previsione qualitativa.

3.4.2.4 Il modello operativo in Piemonte

Il Sistema Informativo di Previsione delle Piene (SIPP) attualmente operativo è stato messo a punto, verificato e validato nel corso dei Progetti Interreg IIC e IIIB per rispondere alle esigenze delle attività di allertamento del Centro Funzionale.
L'obiettivo del SIPP è quello di prevedere in tempo reale le portate ed i relativi livelli lungo tutto il reticolo idrografico principale del Piemonte, ai fini della valutazione del rischio.

Il cuore del sistema di previsione e gestione delle piene è costituito da un software, chiamato FLOOD WATCH (letteralmente *sorvegliare le piene*), che gestisce il flusso delle informazioni, organizza e controlla i dati di ingresso ai modelli di previsione e prepara la pubblicazione dei risultati delle simulazioni modellistiche. FLOOD WATCH è costruito in ambiente ESRI® ArcView.
La previsione delle portate fluviali (non solo delle piene, in quanto il sistema si riferisce anche ai regimi ordinari) è effettuata attraverso l'applicazione di una serie di modelli numerici che, in base ai dati di *input* costituiti dalle osservazioni della rete idro-meteorologica, è in grado di simulare i processi di trasformazione afflussi-deflussi e di ricostruire la dinamica degli alvei fluviali.
I modelli di simulazione con cui è costruito il SIPP sono deterministici e fisicamente basati. Il sistema di modellazione è costituito da tre moduli del codice di simulazione MIKE11®, del Danish Hydraulic Institute (DHI, 2001-2004):

- il modulo idrologico *Rainfall-Runoff* (RR), che simula il processo di trasformazione afflussi-deflussi sui sottobacini idrografici;

- il modulo idrodinamico *Hydrodynamics* (HD) che simula lo scorrimento delle acque negli alvei fluviali e nelle aree di esondazione (DHI, 2001);
- il modulo di correzione *Data Assimilation* (DA) che tramite l'acquisizione di dati idrometrici consente di stimare gli errori compiuti dal modello e di correggerne la previsione.

In particolare, RR è un modello idrologico concettuale, *a serbatoi*, concentrato. Il flusso dell'acqua sul singolo sottobacino è simulato per mezzo dei processi di riempimento e svuotamento di quattro serbatoi in serie che rappresentano rispettivamente:

- i processi di formazione e fusione della neve, in funzione dell'altitudine e della temperatura;
- l'invaso temporaneo di parte dell'acqua piovana sulla superficie del bacino;
- l'imbibizione dello strato superficiale del terreno, il cui stato regola la formazione del deflusso superficiale (coefficiente di deflusso variabile nel tempo);
- la raccolta ed il rilascio nel sistema delle falde sotterranee dell'acqua che percola nel terreno.

I parametri che regolano i modelli matematici dei processi fisici descritti da RR sono in parte dedotti da misure e dati sulle caratteristiche intrinseche dei bacini e in parte oggetto di calibrazione.

Il modulo di formazione e fusione della neve tiene conto della distribuzione del bacino in fasce altimetriche, apportando un'adeguata correzione della temperatura con la quota. L'eccesso di pioggia che il terreno non è in grado di assorbire scivola sulla superficie del bacino, seguendo la pendenza dei versanti e confluisce verso la sezione di chiusura. Il processo di scorrimento superficiale è rappresentato per mezzo di due serbatoi in cascata (sistema di Nash non lineare) funzione dalle caratteristiche geometriche del terreno. Oltre allo scorrimento superficiale è calcolata anche la quota parte di deflusso ipodermico.
L'acqua che penetra nel terreno è raccolta e rilasciata nel tempo dal sistema idrico sotterraneo: il deflusso di base sostiene la fase di esaurimento delle piene e garantisce le portate fluviali in tempo di deflussi medi e di magra. La **figura 3.4.5** illustra la concettualizzazione del ciclo idrologico adottata nel modulo RR.
Ogni sottobacino idrologico in cui è stato suddiviso il territorio di studio è collegato alla rete idrografica secondo due modalità: bacini di testata, sono quelli che recapitano il deflusso in modo concentrato nel punto più a monte di un ramo della rete idrografica o in una confluenza puntuale; bacini laterali, che recapitano il loro deflusso in modo

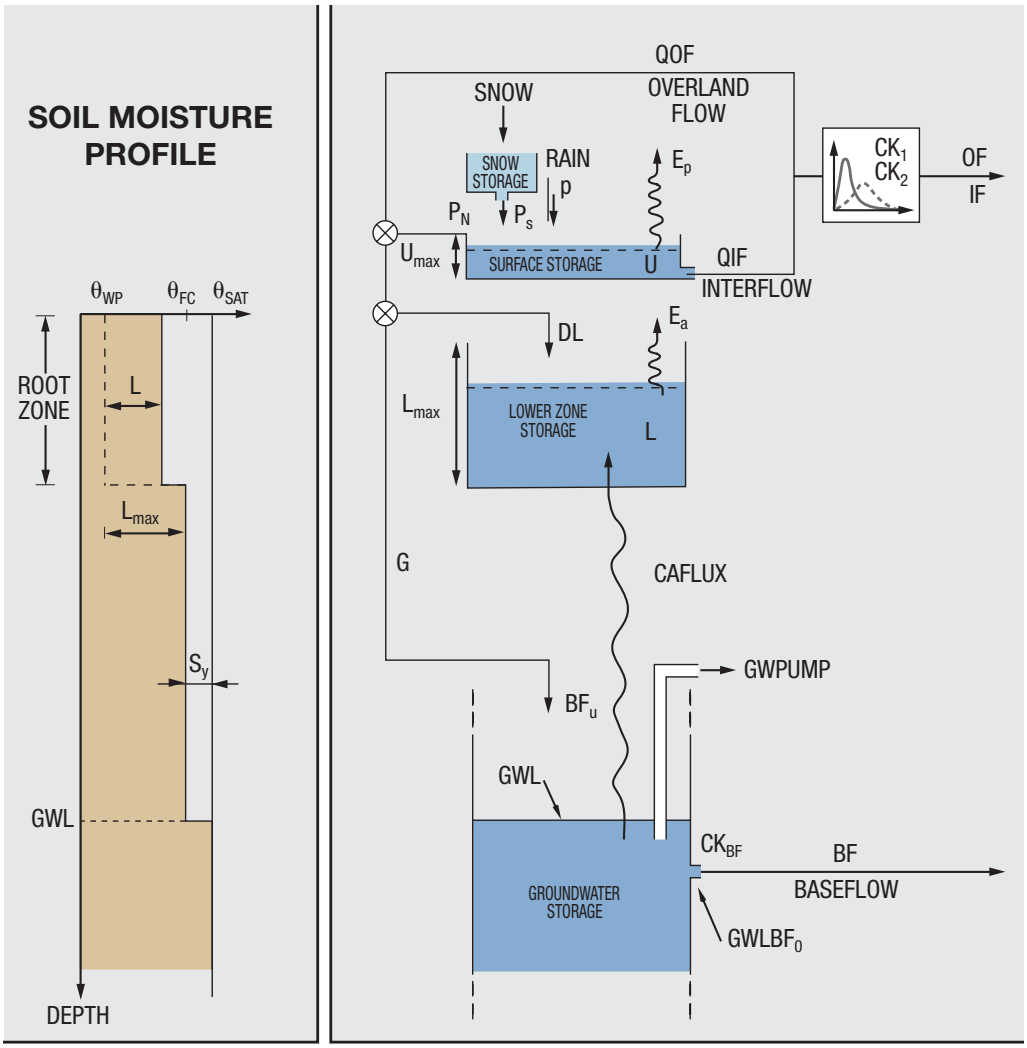


Figura 3.4.5
Concettualizzazione del ciclo idrologico adottata nel modulo RR

distribuito lungo un determinato segmento di un corso d'acqua.
Lungo la rete idrografica il moto dell'acqua ed i processi di composizione e traslazione delle onde di piena sono simulate dal modulo HD, che implementa le note equazioni di De Saint-Venant del moto non stazionario in sistemi idrici a pelo libero. I tratti della rete idrografica oggetto di simulazione sono rappresentati per mezzo di sezioni trasversali. Alcune sezioni derivano da rilievi topografici e batimetrici diretti, recenti o storici, altre, lungo segmenti della rete minore, sono state dedotte dalla cartografia. Oltre alla geometria dei corsi d'acqua nel modello sono implementate le caratteristiche geometriche delle aree golenali che contribuiscono alla laminazione delle portate di piena. Il modello HD riceve, compone e trasla i contributi di deflusso che derivano dai sottobacini idrologici calcolando e prevedendo l'andamento dell'onda di piena verso valle, in termini di variazioni nel tempo e nello spazio del livello idrometrico e della portata.

Per quanto riguarda l'applicazione operativa, come ingresso al modello, il SIPP può disporre dei dati della rete idro-meteorologica automatica in tempo reale del Piemonte integrata con la rete della Valle d'Aosta, della Liguria e del Cantone Svizze-

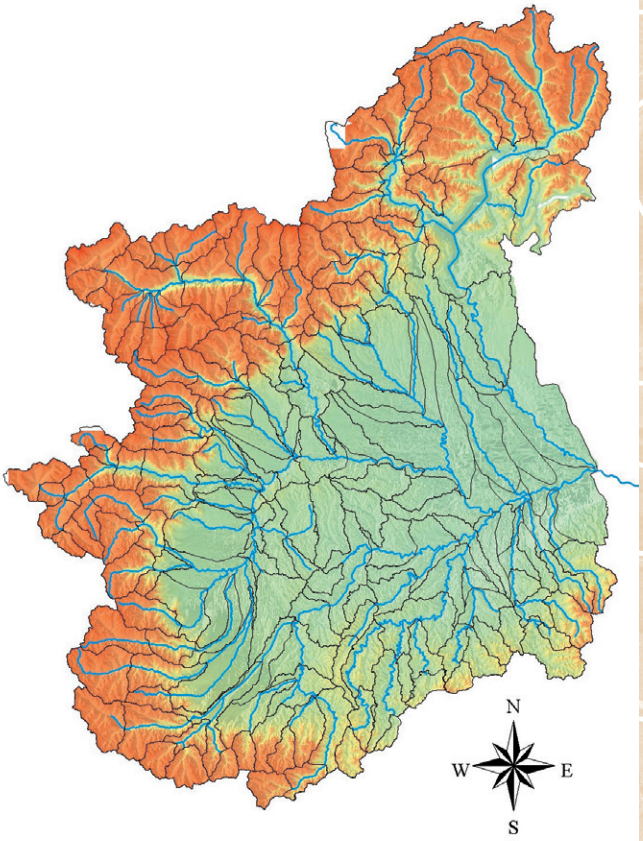


Figura 3.4.6
Struttura del modello. In evidenza la partizione del bacino in sottobacini unitari ed il reticolo idrografico simulato

TABELLA 3.4.1 SEZIONI FLUVIALI ANALIZZATE NELL'ANALISI DELLE PRESTAZIONI DEL MODELLO

FIUME	SEZIONE FLUVIALE	AREA DEL BACINO [km^2]	TEMPO DI CORRIVAZIONE [h]
Po	Cardè	510	7.7
	Carignano	3'976	18.0
	Torino	5'362	23.8
	Crescentino	13'230	27.0
	Isola Sant'Antonio	25'857	44.4
	Becca	36'770	51.9
Chisone	San Martino	581	6.0
Banna	Santona	361	18.3
Dora Riparia	Susa	827	6.3
Stura di Lanzo	Lanzo	580	5.5
Orco	Cuorgnè	630	5.8
Dora Baltea	Tavagnasco	3'313	11.6
Sesia	Borgosesia	696	7.0
	Palestro	2'587	18.8
Scrivia	Serravalle	619	10.0
Tanaro	Piantorre	499	9.0
	Farigliano	1'508	14.8
	Alba	3'379	17.8
	Masio	4'534	25.3
	Montecastello	7'994	36.4
Stura di Demonte	Fossano	1'249	9.5
Belbo	Castelnuovo	422	15.1
Bormida	Mombaldone	392	12.2
	Cassine	1'521	23.2
Orba	Casalcermelli	798	14.2
Toce	Candoglia	1'475	9.0
Diveria	Crevoladossola	321	3.8

ro del Ticino con una consistenza di circa 350 stazioni di misura pluvio-termometriche (densità media di una stazione ogni 100 km^2) ed un centinaio di stazioni idrometriche. Ai dati osservati si aggiungono poi le previsioni quantitative di pioggia elaborate dal gruppo dei meteorologi del Centro Funzionale.

Per gestire la variabilità spaziale delle forzanti atmosferiche e della risposta dei bacini idrografici si è costruito un sistema ad albero suddividendo il bacino idrografico complessivo in una serie di 267 sottobacini indipendenti che costituiscono le unità di base per la modellazione.
Dal punto si vista idraulico, il reticolo coperto dalla simulazione è formato da circa 80 corsi d'acqua e tre grandi laghi prealpini ed ha una lunghezza complessiva di circa 3'500 km. I punti di controllo, costituti dalla rete regionale di monitoraggio idrometrico, consistono in un centinaio di stazioni distribuite su tutto il reticolo.

Le previsioni meteorologiche utilizzate sono fornite dal servizio meteorologico regionale e consistono nei valori di precipizione media areale relativamente alle zone di allerta su finestre di 6 ore, per un orizzonte previsionale di 48 ore. In **tabella 3.4.1** sono riportate le sezioni per cui sono state eseguite le analisi delle prestazioni del modello.

Le prestazioni del sistema sono costantemente valutate e, nel caso di eventi di piena significativi, le valutazioni vengono archiviate e vanno a costituire il punto di partenza per definire gli sviluppi del sistema stesso.

Le analisi delle prestazioni vengono eseguite fuori linea cercando di valutare sia il comportamento del modello idrologico in sé, sia il peso degli errori presenti nelle previsioni meteorologiche sulle previsioni del SIPP. Per fare questo si utilizzano sia le osservazioni delle stazioni meteorologiche, sia le previsioni meteorologiche fornite da diversi modelli, ad esempio il modello del centro meteorologico europeo (ECMWF), il modello operativo ad area limitata italiano (LAMI) ed una sua versione sperimentale ad alta risoluzione (s4) (Hydroptimet, 2004). L'esempio del caso studio dell'evento del novembre 2002 rappresenta un utile riferimento in cui si sono verificate le prestazioni della catena previsionale.

Come mostrato in **figura 3.4.7**, per sintetizzare i risultati delle simulazioni del modello idrologico forzato con differenti previsioni quantitative di precipitazione, sono stati definiti un errore relativo (3.4.1) e un indice di anticipo normalizzato che tiene conto dell'anticipo della previsione, intervallo tra l'istante di previsione *(TOF)* e l'istante di picco *T(Qmax)* e del tempo di corrivazione dei singoli bacini *(Tc)* (3.4.2)

$$error = \frac{Q_{forecast} - Q_{observed}}{\max\left(Q_{observed}\right)} \qquad (3.4.1)$$

$$i_a = \frac{T(Q\max) - TOF}{Tc} \qquad (3.4.2)$$

In **figura 3.4.8** sono riportati i risultati delle simulazioni considerando l'errore, come sopra definito, in relazione all'indice normalizzato. Come si può notare la sottostima della portata prevista non è strettamente legata all'anticipo della previsione a causa dell'importanza degli errori delle previsioni meteorologiche.

Nella **tabella 3.4.2** sono riportati i risultati delle simulazioni in termini di errore medio e di deviazione standard. L'errore nella previsione della portata risulta quasi sempre negativo evidenziando così la tendenza a sottostimare; la previsione ottenuta con i dati di pioggia osservata (previsione perfetta) mostra in entrambi i casi il minimo errore medio. Quella ottenuta con le previsioni di pioggia da modello globale (ECMWF) mostra l'errore maggiore confermando la difficoltà della loro applicabilità alla scala dei bacini in esame.

Dal punto di vista operativo è fondamentale capire quanto l'errore nella previsione della portata influenzi il sistema di allertamento e quindi la corretta gestione dell'emergenza in termini di falsi o mancati allarmi. Infatti su ciascuna sezione viene prevista una portata che, confrontata con dei valori soglia, definisce il livello di rischio atteso. Sono stati calcolati gli indici statistici *Threat Score* e BIAS (Murphy & Winkler, 1997) sulla base dei mancati e falsi allarmi generati dalla catena idrometeorologica durante le simulazioni dei due eventi considerati come casi studio. La **tabella 3.4.3** riporta i risultati ottenuti.
I risultati evidenziano la difficoltà di una buona previsione su bacini di estensione medio-piccola come quelli colpiti dagli eventi presi in esame: si può inoltre notare come la previsione migliori, nel

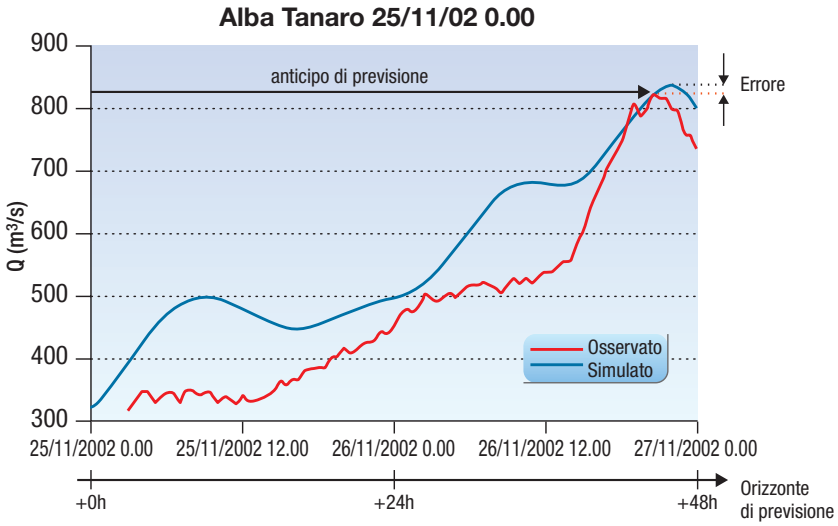


Figura 3.4.7
Confronto tra previsione e osservazione per il Fiume Tanaro ad Alba

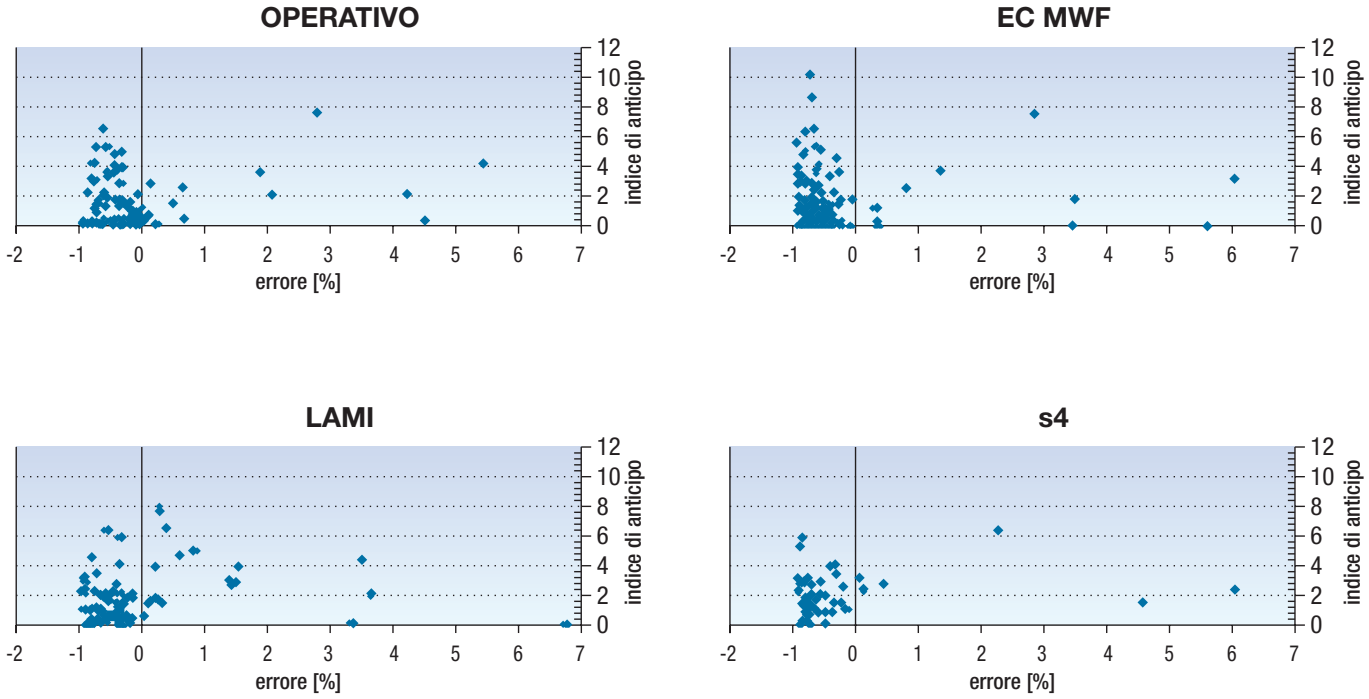


Figura 3.4.8
Errori normalizzati di previsione in relazione all'indice di anticipo

TABELLA 3.4.2 SINTESI DEGLI ERRORI DI PREVISIONE DI PORTATA

MODELLO METEOROLOGICO	EVENTO 14-16/11/2002		EVENTO 23-25/11/2002	
	ERRORE MEDIO	DEVIAZIONE STANDARD	ERRORE MEDIO	DEVIAZIONE STANDARD
previsione perfetta	-0.01	1.10	0.04	0.46
operational	-0.14	1.03	-0.03	0.57
ECMWF	-0.31	1.15	-0.28	0.41
LAMI	-0.27	1.12	-0.18	0.62
s4	-0.29	1.26	-0.16	0.44

TABELLA 3.4.3 PRESTAZIONI DEL SISTEMA DI ALLERTAMENTO

MODELLO METEOROLOGICO	EVENTO 14-16/11/2002		EVENTO 23-25/11/2002	
	TS	BIAS	TS	BIAS
previsione perfetta	0.15	0.15	0.33	0.33
operational	0.46	0.46	0.00	0.00
ECMWF	0.00	0.00	0.00	0.00
LAMI	0.13	0.50	0.13	0.50
s4	0.08	0.08	0.25	0.25

caso del modello operativo, per gli eventi di più lunga durata, questo perché in corso di evento le elaborazioni dei meteorologi per la stima della pioggia prevista sono supportate dai dati osservati.

L'analisi dei due casi studio conferma, da una parte, che l'utilizzo della previsione quantitativa della precipitazione da modelli globali come forzante per la previsione delle portate su bacini di piccole e medie dimensioni produce errori significativi, dall'altra che, per tali bacini, il modello idrologico in sé presenta incertezze dovute alla semplificazione dei processi fisici e alle condizioni iniziali.

Le incertezze presenti, ovviamente, provocano anche una diminuzione dell'affidabilità del sistema di allertamento in termini di previsione delle piene. Tuttavia, almeno per questi casi studio, l'emissione di mancati e falsi allarmi non è strettamente legata all'entità dell'errore nella previsione. Gli sforzi futuri saranno rivolti a sviluppare e migliorare i modelli numerici, ma anche all'utilizzo di una previsione di tipo probabilistico della portata.

3.4.3 Il radar meteorologico nella previsione delle piene improvvise nei piccoli bacini

3.4.3.1 L'osservazione e il *nowcasting* radar meteorologico

Il radar meteorologico è uno strumento per l'osservazione delle nubi e delle precipitazioni. L'onda elettromagnetica emessa dal radar sotto forma di impulsi viene retrodiffusa dalle nubi che costituiscono il bersaglio meteorologico. La misura della potenza e della fase *(radar Doppler)* della radiazione ricevuta permette di caratterizzare la natura del bersaglio meteorologico. In particolare la misura di potenza, che viene quantificata per mezzo dell'unità logaritmica dBZ, risulta legata alla quantità d'acqua presente nella nube, mentre la misura della fase permette di ricavare un'informazione legata alla velocità di spostamento della nube.

Non effettuando il radar una misura diretta di parametri meteorologici, per ottenere informazioni di maggiore utilità in ambito idro-meteorologico è necessaria l'applicazione di opportuni algoritmi: per questa ragione si parla ad esempio di *stima* radar della precipitazione.

Il campo elettromagnetico generato dal radar è normalmente polarizzato sul piano orizzontale. Negli ultimi anni sono stati realizzati e resi commercialmente disponibili sistemi che permettono di variare il piano di polarizzazione dell'onda trasmessa (radar polarimetrici). In particolare la trasmissione alternata di impulsi polarizzati orizzontalmente e verticalmente consente di ricavare informazioni più dettagliate sul bersaglio, rendendo possibile un'accurata distinzione tra echi meteorologici e non meteorologici e, tramite il riconoscimento della forma delle idrometeore, l'identificazione del tipo di precipitazione. Infatti le gocce d'acqua, caratterizzate da una forma schiacciata dovuta al moto di caduta, retrodiffondono la radiazione radar maggiormente nel piano orizzontale, mentre la neve e la grandine, mediamente di forma sferica, retrodiffondono in modo simile nelle due polarizzazioni.
Arpa Piemonte gestisce il radar di Bric della Croce e, in collaborazione con Regione Liguria, il radar di Monte Settepani (Bechini & Cremonini, 2002). Entrambi i sistemi sono di tipo Doppler e polarimetrico ed inviano i loro dati in tempo reale al Centro Funzionale. Il radar di Bric della Croce si trova sulla sommità della collina torinese nel Comune di Pecetto (TO), mentre il radar di Monte Settepani è installato ad un'altezza di 1'400 m nel comune di Osiglia (SV).
L'elaborazione in tempo reale delle misure radar permette la stima di alcuni significativi parametri meteorologici sull'intero territorio regionale e la realizzazione di prodotti specifici per le attività di monitoraggio e previsione. Le più comuni applicazioni dei radar meteorologici sono:

- il monitoraggio in tempo reale di intensità di precipitazione, velocità del vento, presenza di grandine, entro un raggio di 120-150 km dal sito radar e con una definizione dell'ordine di 1 km^2;
- le previsioni di piena; l'utilizzo congiunto dei radar e della rete di monitoraggio al suolo permette, attraverso una stima ottimale della quantità di precipitazione sull'intero territorio regionale, l'inizializzazione di modelli idrologici.
- le previsioni a brevissimo termine (fino a 3-6 ore) di fenomeni temporaleschi associati a precipitazioni intense, grandine, ecc.

Il radar, fornendo una misura continua sul territorio e con elevata frequenza temporale, è lo strumento che meglio si presta all'elaborazione di previsioni a breve termine, in particolare relativamente ai fenomeni convettivi.

Il termine *nowcasting* è utilizzato proprio per enfatizzare la breve scadenza della previsione, da 0 a 6 ore. Storicamente le attività di *nowcasting* si sono basate prevalentemente su tecniche di estrapolazione applicate a immagini radar e satellitari. Tali tecniche, utilizzate fin dagli anni Settanta, prevedono il calcolo della *cross-correlazione* tra immagini successive per l'identificazione della traiettoria dell'eco radar: si possono applicare sia a livello areale (Kessler, 1966), sia a livello di singola cella (Barklay & Wilk, 1970), nel qual caso viene preso come riferimento il centroide dell'eco.
Più recentemente sono stati sviluppati algoritmi sofisticati che permettono di gestire anche l'unione e la divisione di celle temporalesche (Dixon & Wiener, 1993).

Un approccio alternativo consiste nell'utilizzo di dati da modellistica numerica, eventualmente, come nel caso dell'algoritmo NIMROD del *Met Office* (Golding, 1998) congiuntamente a tecniche convenzionali di estrapolazione. Per i tempi di previsione brevi viene pesata maggiormente la parte di estrapolazione, mentre per tempi più lunghi acquista maggiore importanza la dipendenza dal modello. Per periodi superiori a 6 ore il metodo è quasi completamente dipendente dal modello.

3.4.3.2 Modelli idrologici ad alta risoluzione

Per la gestione del rischio idrogeologico, le stime di precipitazione da radar sono utilizzate come forzante in un modello idrologico distribuito. Come già detto, in un bacino idrografico la trasformazione degli afflussi (precipitazioni meteoriche) in deflussi (portate alla sezione di chiusura), è regolata da un insieme complesso di fenomeni fisici. La loro modellazione matematica completa richiederebbe l'uso di un gran numero di equazioni differenziali

e la conoscenza esatta di tutte le grandezze in gioco. La modellistica idrologica distribuita (Abbot *et al.*, 1987; Beven, 1985; Rosso, 1994) supera tali difficoltà riproducendo l'effettiva dinamica dei diversi processi idrologici descrivendoli alla scala delle varie componenti elementari in cui viene discretizzato. L'alta risoluzione spaziale deriva dalle dimensioni della cella elementare in cui si suddivide la superficie del bacino che operativamente può essere di 1'000 m, 100 m o anche 10 m per i bacini più piccoli: il limite alla risoluzione non è legato alla struttura del modello piuttosto alla scarsità di informazioni territoriali ed è imposta dai limiti delle capacità di elaborazione dei calcolatori elettronici. L'alta risoluzione spaziale consente implicitamente una migliore descrizione temporale della dinamica dei fenomeni, ciò offre inoltre la possibilità di descrivere accuratamente i diversi processi e la loro variabilità spazio-temporale.

All'interno di ciascuna cella le proprietà topografiche idrologiche ed idrauliche sono ipotizzate continue ed omogenee in modo da permettere la parametrizzazione delle equazioni dei singoli processi fisici per la cella in esame e di valutarne poi gli effetti complessivi in termini di portata alle sezioni del reticolo idrografico. Di norma, nelle pratiche applicazioni, si fa uso di una scomposizione del bacino di tipo *raster*, ottenuta suddividendo l'area di interesse in celle elementari di forma rettangolare. Questo porta all'analisi del processo integrale introducendo ipotesi e semplificazioni ad un livello più o meno spinto.
L'approccio distribuito ha inoltre il grande vantaggio di permettere lo studio contemporaneamente sia dell'intero bacino sia delle sue componenti parziali in quanto il modello fornisce informazioni sull'evoluzione dei fenomeni in ogni punto del dominio.

Appare evidente che l'uso di un modello di tipo distribuito richiede l'acquisizione di una grossa quantità di dati: il numero totale dei parametri in gioco è infatti dato dal numero delle grandezze utilizzate per descrivere la singola cella elementare, moltiplicato per il totale delle celle presenti. Anche il peso computazionale del modello è quindi gravoso: si deve simulare, per ogni passo di calcolo, il funzionamento di tutte le celle presenti. Per contro, tale onere viene ripagato da una più accurata descrizione dei fenomeni, soprattutto dal momento che è stato evidenziato (Beven, 1985; Rosso, 1994) come la variabilità spaziale dei processi in gioco (assorbimento, propagazione, ecc.) abbia grande influenza sulla risposta del bacino.

La fase di taratura, inoltre, è maggiormente controllabile, dato che i parametri hanno un significato fisico ben preciso: oscillano, quindi, in un intervallo di valori noti. In più si sottolinea che solo una piccola parte di essi saranno effettivamente parametri da calibrare, mentre la gran parte sono dati direttamente misurabili sul campo (quote, pendenze, ecc.).

3.4.3.3 Utilizzo operativo e accuratezza dei risultati

Il sistema di previsione delle piene improvvise, basato sulla modellistica idrologica distribuita e la stima delle forzanti tramite radar meteorologico, è attualmente operativo sul territorio regionale solo su alcuni bacini campione ed è finalizzato ad una analisi delle prestazioni di un tale dispositivo. L'obiettivo è di capire i vantaggi che una previsione a brevissimo termine possa avere nella migliore gestione delle emergenze.
Il modello utilizzato per la stima della formazione della piena e della propagazione dell'onda di piena nel reticolo idrografico è il FEST (Mancini *et al.*, 2000; Ravazzani *et al.,* 2002), messo a punto presso il Politecnico di Milano. È costituito da una serie di moduli che simulano le varie componenti del ciclo idrologico. La sua prerogativa è quella di lavorare su base GIS secondo uno schema distribuito che permette di considerare la variabilità spazio-temporale dei processi idrologici quali quello dell'evaporazione, della precipitazione, dell'infiltrazione, della fusione nivale e della propagazione lungo la rete di drenaggio superficiale e sotterranea. Il modello risolve il sistema di equazioni del bilancio di massa e del bilancio di energia e permette di lavorare in continuo e per evento utilizzando, per ciascuno dei processi idrologici esaminati, moduli specifici in modo da scegliere quelli che meglio interpretano le diverse condizioni naturali che si vogliono rappresentare. In particolare in questa applicazione se ne utilizza una versione *ridotta ad evento,* in cui si simulano solo i processi che portano alla formazione di deflusso superficiale, in quanto ben rappresentativa della formazione delle piene dei piccoli bacini dove i deflussi di base risultano generalmente trascurabili ai fini della determinazione dell'onda di piena.

L'architettura del modello è costituita da due blocchi principali schematizzati in **figura 3.4.9**. Nel primo blocco viene elaborata l'informazione pluviometrica e valutata la risposta del suolo in termini di infiltrazione e deflusso superficiale per ciascuna cella. Il modello d'infiltrazione implementato è quello concettuale del SCS-CN molto utilizzato nelle applicazioni idrologiche (USDA, 1972, 1986). L'elaborazione pluviometrica, fornita alla scala puntuale dalle stime radar sul bacino è utilizzata come precipitazione distribuita sulle singole celle di calcolo. Nel secondo blocco, sono utilizzate le equazioni che descrivono la propagazione del deflusso superficiale sui versanti, nel reticolo idrografico alveato ed eventualmente attraverso gli invasi naturali e artificiali. La simulazione della propagazione del deflusso sui versanti è basata sul modello concettuale dell'invaso lineare mentre quella del deflusso alveato si basa sul modello Muskingum-Cunge a celerità variabile (Ponce, 1989). L'analisi del modello digitale del terreno permette di gene-

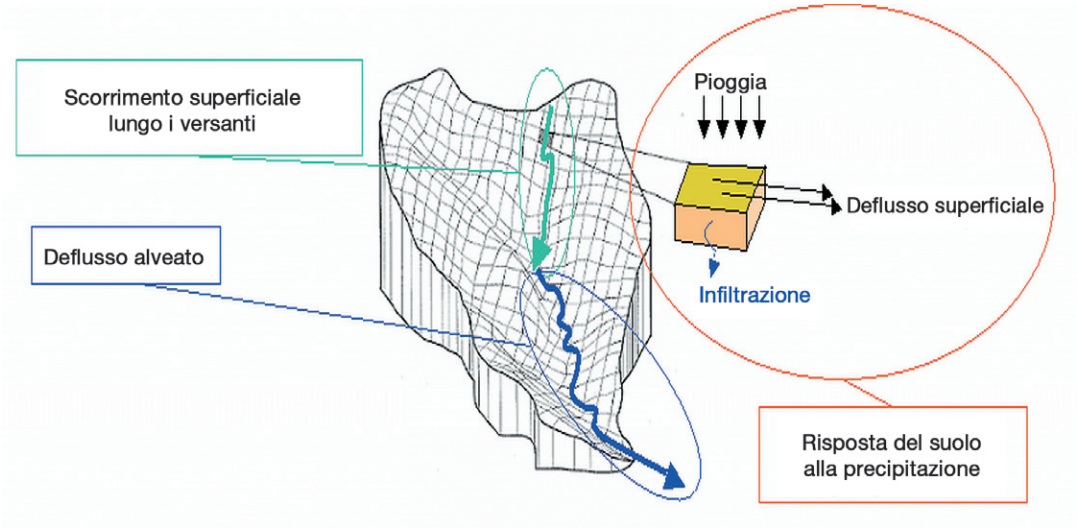


Figura 3.4.9
Schema dei processi descritti nella specifica applicazione del modello FEST

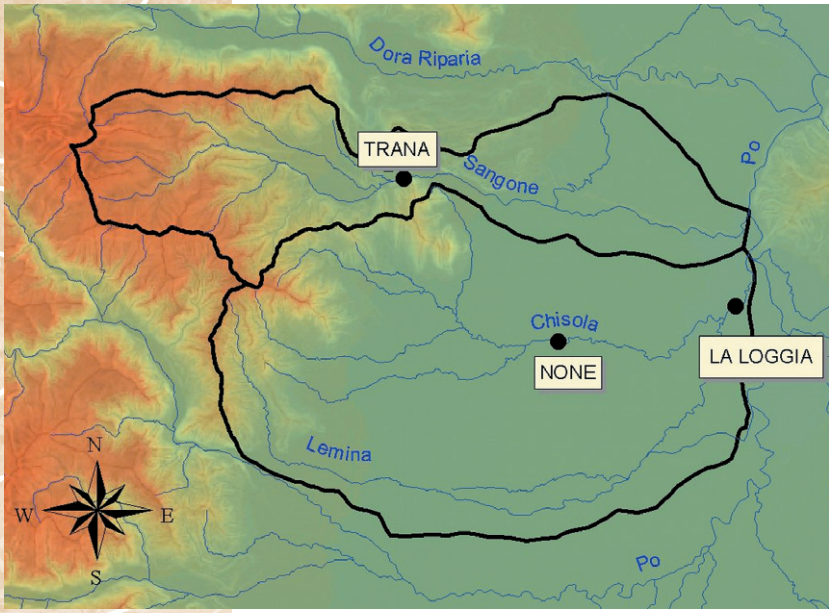


Figura 3.4.10
Corografia dei bacini utilizzati con, in evidenza, le sezioni considerate

rare in modo automatico il reticolo idrografico in base all'identificazione delle direzioni di scorrimento per ciascuna cella tramite il calcolo della direzione di massima pendenza ed alla definizione dei versanti e del reticolo alveato (Carrara, 1988; Tarboton, 1997). Quest'ultima distinzione è ottenuta stabilendo un'area di drenaggio minima oltre la quale le celle in cui è suddivisa la superficie del bacino si considerano appartenere al reticolo di drenaggio alveato.

Un esempio di applicazione del sistema accoppiato radar-modello idrologico è rappresentato dal caso di studio dell'evento del settembre 2002 nel Bacino del Torrente Chisola in cui, a causa di precipitazioni intense di origine convettiva si sono verificate estese esondazioni nel Comune di Nole. Tale evento è stato osservato in modo ottimale dal radar del Bric della Croce che dista solamente 30 km dal centro di scroscio. Per l'analisi si sono considerati i bacini adiacenti del Torrente Chisola e del Torrente Sangone per cui si dispone di due stazioni di misura idrometrica, rispettivamente a Trana e a La Loggia. L'efficienza del sistema è stata valutata sulla base del confronto fra i risultati ottenuti dal medesimo modello idrologico utilizzando una prima volta i campi di precipitazioni stimati tramite radar e una seconda volta utilizzando campi ricostruiti a partire dalle registrazioni pluviometriche.

Il primo controllo riguarda il volume di piena calcolato nelle due simulazioni, sintetizzato in **tabella 3.4.4**. Il buon accordo tra i volumi osservati e simulati dall'utilizzo del radar sottolineano sia il buon andamento del modello idrologico sia consentono di affermare che le stime prodotte dal radar sono coerenti con le osservazioni a terra.

Il secondo controllo riguarda il confronto diretto fra gli idrogrammi di portata stimati dalle osservazione idrometriche con quelli simulati dal modello idrologico. In questo caso si valuta la capacità del modello idrologico di rappresentare i diversi processi che concorrono alla formazione dell'onda di piena.

L'analisi dei risultati alla sezione di Trana **(figura 3.4.11-A)** mostra un buon comportamento di entrambe le simulazioni per quanto riguarda il primo colmo di piena mentre per il secondo colmo la simulazione con i dati radar mostra una leggera sovrastima. Per quanto riguarda i risultati relativi alla sezione di La Loggia **(figura 3.4.11-B)**, si osserva come in entrambi i casi non si abbia una buona riproduzione dell'onda che risulta avere una maggiore durata ed un picco meno accentuato. Questo è dovuto al fatto che le esondazioni a None, che si trova a monte di La Loggia, producono una laminazione dell'onda che non può essere descrit-

TABELLA 3.4.4 VOLUMI DI PIENA: CONFRONTO TRA OSSERVAZIONI E SIMULAZIONI

BACINO	VOLUME DI PIENA [10^6 m^3]		
	OSSERVATO	SIMULATO TRAMITE RADAR	SIMULATO CON PLUVIOMETRI
Torrente Chisola a La Loggia	21.05	20.44 (errore -3%)	25.11 (errore +19%)
Torrente Sangone a Trana	2.33	2.11 (errore -9%)	2.34 (errore +2%)

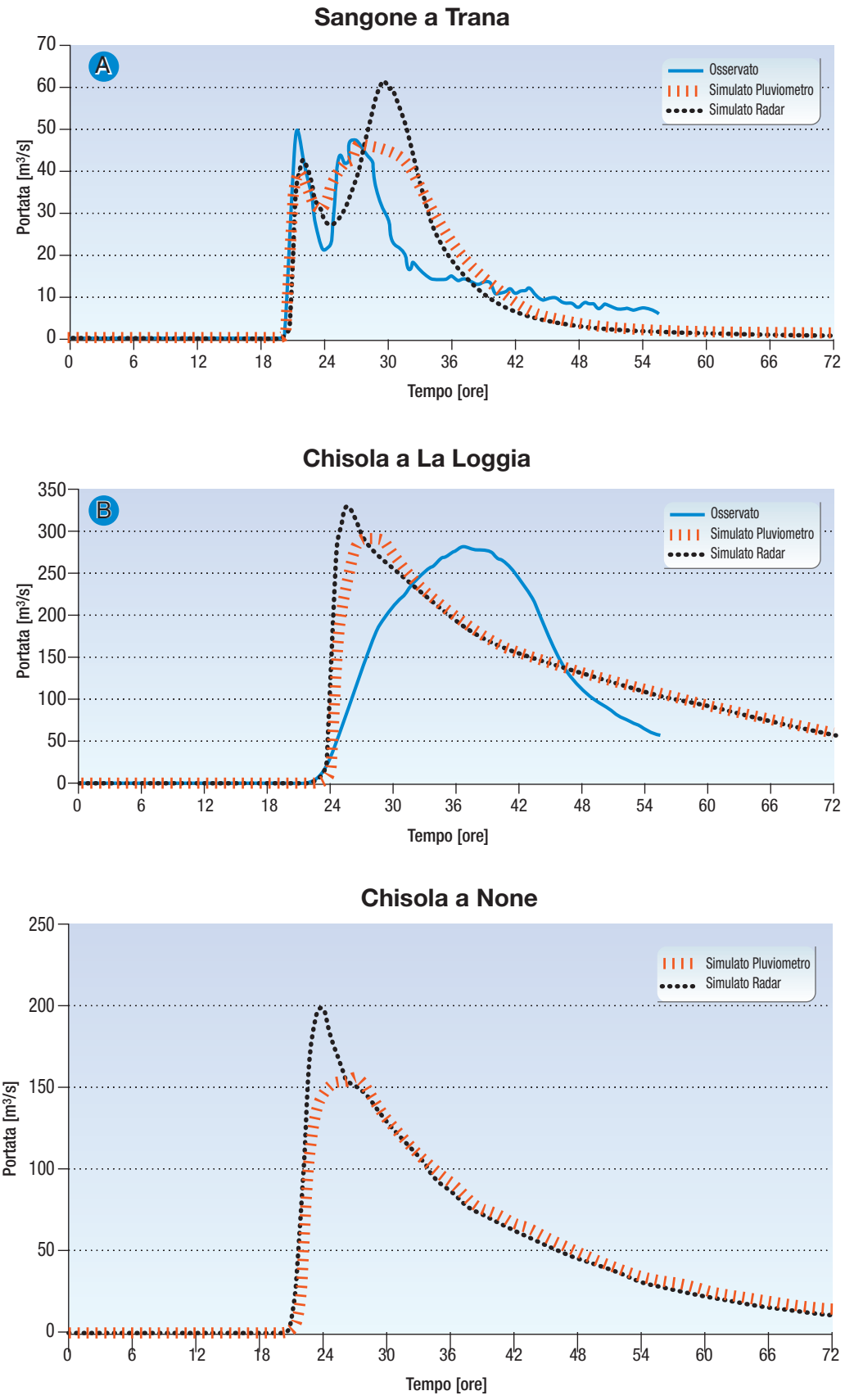


Figura 3.4.11
Idrogrammi osservati e simulati per il Torrente Sangone a Trana (A) e per il Torrente Chisola a La Loggia (B)

Figura 3.4.12
Idrogrammi osservati e simulati per il Torrente Chisola a None

ta dal modello. Le osservazioni in questa sezione non sono perciò molto rappresentative ai fini di una valutazione delle prestazioni del modello. Un'ulteriore verifica dei risultati può essere condotta in via qualitativa considerando la sezione immediatamente a monte di None, ciò è possibile grazie alle potenzialità del modello distribuito. In questo caso non sono disponibili osservazioni dirette, tuttavia è nota la capacità di smaltimento dell'alveo in quella sezione che risulta pari a circa 150 m^3/s.
Come si nota in **figura 3.4.12**, la simulazione ottenuta sulla base dei dati radar supera notevolmente tale valore limite e porta correttamente alla previsione di una esondazione in quel tratto del cor-

so d'acqua, conclusione cui non si giunge considerando la simulazione basata sui dati pluviometrici tradizionali; ciò evidenzia l'importanza di un data ad elevata risoluzione spazio-temporale nell'analisi di fenomeni convettivi e dei loro effetti su bacini piccoli e medi.
Questo esempio mostra come il radar possa portare ad un netto miglioramento della capacità previsionale del modello idrologico. Tuttavia un utilizzo operativo di tale strumento risulta ancora poco affidabile a causa delle già descritte numerose fonti di errore che influiscono sulla stima della precipitazione.
A questo proposito sono attualmente in fase di sviluppo strumenti operativi che consentano di utilizzare congiuntamente la stima radar e le osservazioni pluviometriche a terra per la costruzione di campi di precipitazione tramite algoritmi di correzione e filtraggio (Cremonini *et al.*, 2004); questo consente di ottenere un prodotto molto robusto utile per una previsione idrologica operativa.

3.4.4 La gestione delle piene

Per una corretta gestione dei fenomeni di inondazione è necessario prevedere un'adeguata pianificazione d'intervento e disporre di un servizio di preannuncio che segnali con anticipo il verificarsi dei fenomeni di piena.
Le valutazioni dei campi di inondazione e del rischio connesso generalmente vengono condotte per un numero limitato di scenari e per ogni scenario i piani di emergenza definiscono le procedure di intervento da adottare (livelli di allerta). La previsione di piena a sua volta viene fatta definendo un numero limitato di classi di valutazione (livelli di criticità).

La correlazione di questi due livelli consente al sistema di protezione civile di attivare preventivamente quelle azioni che consentono di trovarsi pronti a fronteggiare le situazioni di emergenza. Questo significa che i piani di emergenza devono essere sviluppati in accordo con il sistema di allerta adottato.
Nel seguito viene presentato il servizio di preannuncio di Arpa Piemonte nel contesto nazionale ed i possibili utilizzi della cartografia relativa ai campi di inondazione, quale momento di raccordo fra la fase di valutazione e quella di previsione.

3.4.4.1 Il preannuncio

Le recenti disposizioni normative prevedono che le Regioni predispongano le attività necessarie alla prevenzione e riduzione del rischio idraulico, se del caso con il concorso del Dipartimento della Protezione Civile ed assolvono ad un adeguato governo delle piene, cui devono concorrere le attività di:

- preannuncio e sorveglianza poste in essere attraverso la rete dei Centri Funzionali;
- presidio territoriale idraulico attraverso adeguate strutture e/o soggetti;
- regolazione dei deflussi.

La gestione delle piene per eventi che coinvolgono bacini di interesse sovraregionale che per la loro natura ed estensione comportino l'intervento coordinato di più amministrazioni competenti, deve passare attraverso accordi per la condivisione delle informazioni e dei dati, della previsione e della sorveglianza in tempo reale dei Centri Funzionali interessati.

In questo quadro, il servizio svolto dalla rete dei Centri Funzionali in tempo reale diventa di supporto per la gestione e si articola in tre fasi principali. La prima è quella previsionale, sostenuta da una adeguata modellistica numerica e consiste nella valutazione dei fenomeni meteorologici attesi, valutazione delle criticità attese, nonché degli effetti che tale situazione può determinare sull'integrità della vita, dei beni, degli insediamenti e dell'ambiente. La seconda fase è quella di monitoraggio e sorveglianza e comprende il monitoraggio strumentale dell'evento in atto ed osservazione qualitativa e quantitativa diretta e la sorveglianza delle situazioni impreviste e previsione a breve dei relativi effetti attraverso il *nowcasting* con l'ausilio di modelli inizializzati con misure raccolte in tempo reale. Infine la terza riguarda la valutazione delle criticità idrauliche dei corsi d'acqua principali.
Il Centro Funzionale del Piemonte, utilizzando i modelli idrologici ed idraulici disponibili ed in particolare il sistema informativo di previsione delle piene sopra descritto, valuta attraverso un servizio continuativo il rischio idraulico e, in caso di avviso di criticità idrogeologica ed idraulica, emette uno specifico bollettino di previsione delle piene il quale contiene una stima puntuale del livello previsto riferita ai corsi d'acqua principali. I livelli di criticità anche in questo caso sono ripartiti in tre classi: situazione ordinaria, piena ordinaria (livello 2) e piena straordinaria (livello 3).

Le previsioni delle portate sono attualmente operative relativamente a 24 sezioni significative. Nella **figura 3.4.13** è rappresentato un esempio del bollettino di previsione delle piene.

Il bollettino di previsione costituisce un complemento al bollettino idrogeologico ed idraulico e consente di specificare se e dove il pericolo legato a situazioni meteorologiche avverse può coinvolgere il reticolo idrografico principale. Durante i maggiori fenomeni di piena, possono poi essere fornite informazioni aggiuntive ed aggiornamenti con previsioni a medio-breve termine.

Infine, per la gestione di eventi di interesse sovraregionale ed in particolare che interessano l'intera

asta del Fiume Po, sono stati posti in essere una serie di iniziative che garantiscono la condivisione delle informazioni e delle previsioni su tutto il bacino. L'accordo del 13/03/2002 tra le Regioni del Bacino del Po definisce un sottoinsieme delle reti idro-meteo-pluviometriche regionali quale rete *fiduciaria* alla scala di bacino e costituisce un Comitato Interregionale del Po con il compito di coordinare e sovrintendere al corretto ed efficiente scambio dei dati di monitoraggio tra le Regioni e lo Stato.
La convenzione del 16/02/2005 tra i Centri Funzionali delle Regioni Valle d'Aosta, Piemonte, Lombardia, Emilia Romagna, Veneto, il Dipartimento della Protezione Civile Nazionale, l'Autorità di Bacino del Po e l'Agenzia Interregionale per il Fiume Po prevede poi la realizzazione di un sistema di modellistica idraulica per la previsione e controllo delle piene fluviali dell'asta principale del Fiume Po e l'istituzione di un Centro Operativo che elabora le proprie valutazioni utilizzando in ingresso le previsioni delle piene fornite da ogni singolo Centro Funzionale Regionale.
In questo modo, sfruttando in particolare i sistemi previsionali già in uso, attraverso la sinergia delle varie strutture sarà possibile giungere in tempi relativamente brevi a fornire anche un adeguato supporto allo svolgimento del servizio di Piena di tutta l'asta arginata di Po.

3.4.4.2 La valutazione del rischio idraulico per i piani di emergenza

Il *Regolamento regionale di programmazione e pianificazione delle attività di protezione civile,* approvato con Decreto del P.G.R. 18/10/2004 n. 7/R, prevede la predisposizione dei piani di emergenza provinciali e dei piani di protezione civile comunali o intercomunali.
Compito fondamentale delle Istituzioni, in materia di protezione civile, è la tutela dell'integrità della vita, dei beni e dell'ambiente inteso in senso lato, rispetto all'eventualità dell'insorgenza di un potenziale evento calamitoso.

Una conoscenza approfondita dell'assetto del territorio, delle sue tendenze evolutive, nonché delle condizioni di criticità è, dunque, di grande importanza strategica per la definizione degli strumenti di programmazione e pianificazione di protezione civile.
Le responsabilità derivanti dalle disposizioni di legge in materia, nonché un livello sempre crescente di sensibilità e consapevolezza della classe amministrativa, evidenziano l'importanza che rivestono gli Enti Locali nell'ambito delle attività di previsione e prevenzione dei rischi.
Predisporre un piano di protezione civile significa, quindi, per un Amministratore Locale, la possibilità di avvalersi di un utile strumento di supporto alle decisioni in fase di emergenza ma anche l'opportunità di programmare le più adeguate politiche di mitigazione del rischio e di sviluppo e gestione del territorio.
Il regolamento prevede che i piani di emergenza contengano al loro interno la valutazione del rischio attraverso la predisposizione di scenari di rischio; per quanto riguarda il rischio idraulico, le metodologie per la valutazione dei campi di inondazione e costruzione delle carte del rischio sono state diffusamente descritte sopra.

Un esempio è dato dalla cartografia prodotta sul Fiume Sesia nell'ambito del Progetto Floodaware in cui sono stati costruiti due scenari di rischio direttamente correlati ai livelli di criticità del sistema di allerta regionale ovvero:

- *livello 2,* moderata criticità, che corrisponde ad una piena ordinaria definita come la portata che transita occupando interamente l'alveo del corso d'acqua con livelli prossimi a quelli del piano campagna o degli argini. Cominciano a diventare significativi i fenomeni di erosione delle sponde più vulnerabili ed iniziano ad essere inondate le aree prospicienti al corso d'acqua;
- *livello 3,* elevata criticità, che corrisponde ad una piena straordinaria definita come la portata che non può transitare contenuta nell'alveo e quindi determina gravi fenomeni di inondazione.

Area Previsione e Monitoraggio Ambientale
Centro Funzionale del Piemonte

Bollettino di Previsione delle Piene — Regione Piemonte

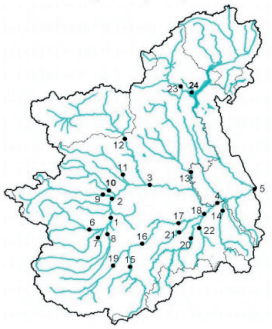
Bollettino n° 07/04 di giovedì 04/11/2004 ore 14:00
Fine validità: venerdì 05/11/2004 ore 24
Aggiornamento: venerdì 05/11/2004 ore 14

CRITICITA' IDRAULICA PREVISTA

Bacino	Corso d'acqua	Sezione	Livelli di criticità
Po	1 - Po	Carignano	1
	2 - Po	Torino - Murazzi	1
	3 - Po	Crescentino	1
	4 - Po	Isola S. Antonio	1
	5 - Po	Ponte Becca	1
	6 - Pellice	Villafranca	1
	7 - Varaita	Polonghera	1
	8 - Maira	Racconigi	1
	9 - Dora Riparia	Torino	1
	10 - Stura di Lanzo	Torino	1
	11 - Orco	S. Benigno	1
	12 - Dora Baltea	Tavagnasco	1
	13 - Sesia	Palestro	1
	14 - Scrivia	Guazzora	1
Tanaro	15 - Tanaro	Farigliano	1
	16 - Tanaro	Alba	1
	17 - Tanaro	Masio	1
	18 - Tanaro	Montecastello	1
	19 - Stura di Demonte	Fossano	1
	20 - Belbo	Castelnuovo	1
	21 - Bormida	Cassine	1
	22 - Orba	Casal Cermelli	1
Verbano	23 - Toce	Candoglia	1
	24 - Lago Maggiore	Verbania	2

Note: Il Lago Maggiore permane ai livelli di attenzione anche se in calo.

Reticolo idrografico principale

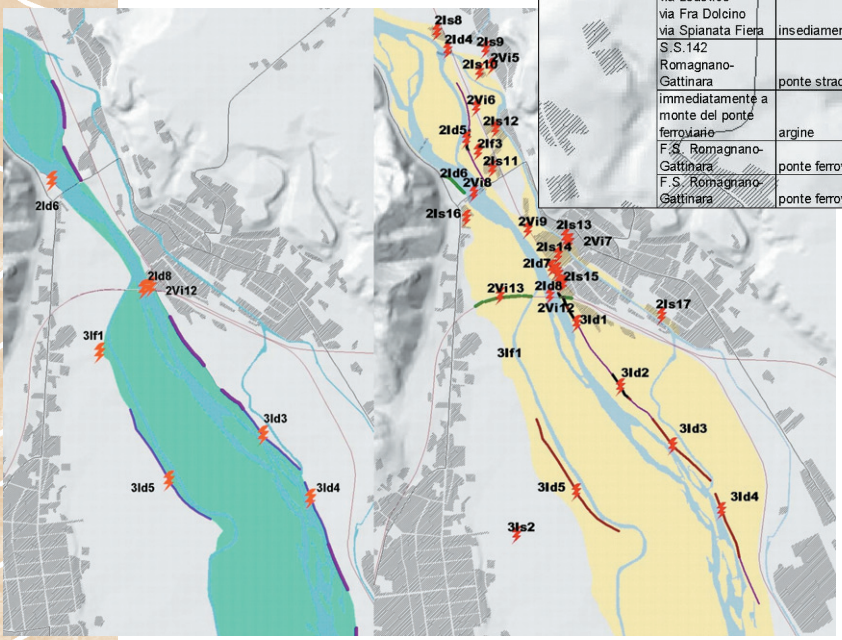


Per una corretta interpretazione consultare sempre il disciplinare

Legenda dei livelli di criticità	
1	Situazione Ordinaria
2	Piena Ordinaria
3	Piena Straordinaria

Il documento è disponibile all'indirizzo **www.rupar.piemonte.it/meteo/** oppure **http://intranet.ruparpiemonte.it/meteo/** con password di accesso

Figura 3.4.13
Bollettino di previsione delle piene



OPERA					SCENARIO
COMUNE	LOCALITA'	DESCRIZIONE DELL'OPERA	IDENTIFICATORE	CODICE DI ALLERTAMENTO	DESCRIZIONE
Romagnano	regione Ceriagli	argine	2ld5	3	rottura
	regione Ceriagli	area sportiva	2lf3	3	allagamento
	regione Ceriagli	insediamento civile	2ls11	3	allagamento diffuso
	Cotonificio	insediamento industriale	2ls12	3	allagamento diffuso dovuto alle acque tracimate dal canale Mora
	via Lodovico via Fra Dolcino via Spianata Fiera	insediamento civile	2ls13	3	allagamento diffuso dovuto alle acque staripate dal canale Mora
	S.S.142 Romagnano-Gattinara	ponte stradale	2Vi8	3	pregiudicata la sicurezza statica della struttura
	immediatamente a monte del ponte ferroviario	argine	2ld8	2	erosione
	F.S. Romagnano-Gattinara	ponte ferroviario	2Vi12	2	erosioni localizzate alle opere di fondazione mancanza del franco idraulico
	F.S. Romagnano-Gattinara	ponte ferroviario	2Vi12	3	sommersione di parte dell'impalcato del ponte

Figura 3.4.14
Scenari di rischio di inondazione del Fiume Sesia a Gattinara per piena ordinaria (sinistra) e straordinaria (destra) e relativa tabella descrittiva

Un esempio delle carte prodotte è riportato nella **figura 3.4.14.** Gli scenari delineati sono direttamente collegati al servizio di preannuncio delle piene ed ai livelli di allerta emessi dal Centro Funzionale Regionale e quindi possono essere alla base della realizzazione dei piani di protezione civile.
Questi scenari predefiniti sono certamente utili per la programmazione degli interventi, ma è fondamentale che a seguito dell'emissione di un avviso di criticità vengano avviate le attività di presidio territoriale volte ad osservare in sito la reale dinamica dell'evento in corso, attività che va intensificata man mano che la situazione si fa più critica.

Infatti la complessità dei fenomeni in gioco e le perturbazioni generate da fenomeni non prevedibili possono anche impattare sensibilmente sulle inondazioni. Un esempio per tutti è dato dall'interferenza dei ponti con il materiale flottante che per le piene maggiori può determinare la parzializzazione delle sezioni di deflusso ed incrementare significativamente i livelli idrici a monte con il risultato che territori normalmente in sicurezza possono essere interessati dall'inondazione.

Per i corsi d'acqua arginati il presidio diventa ancora più importante per la verifica della tenuta arginale, attività peraltro già prevista dai Regi Decreti n. 523/1904 e n. 2669/1937 in termini di servizio di piena e di pronto intervento idraulico per i tronchi classificati di prima e seconda categoria. Infine è importante ricordare la necessità di una verifica permanente del rischio attuale da parte delle amministrazioni che utilizzano i piani per tener conto degli inevitabili cambiamenti nel tempo della pericolosità e della vulnerabilità del territorio. Per questo è bene prevedere un programma di periodico aggiornamento degli scenari per tenere conto di eventuali modificazioni del corso d'acqua come possono essere le modificazioni morfologiche, la realizzazione di nuove opere di difesa e nuovi insediamenti.

Bibliografia

Abbott M.B., Bathurst J.C., Cunge J.A., O'Connell P.E. & Rasmussen J. (1987a), *An introduction to the European Hydrological System* – Système Hydrologique Européen. "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system, Journ. of Hydrol., pp. 87.

Barclay P.A. & Wilk K.E. (1970), *Severe thunderstorm radar echo motion and related weather events hazardous to aviation operations.* ESSA Tech. Mem, ERLTM-NSSL, pp. 46-63.

Bechini R. & Cremonini R. (2002), *The weather radar system of north-western Italy: an advanced tool for meteorological surveillance.* Proc. of ERAD, pp. 400-404, Copernicus GmbH 2002.

Beven K.J. (1985), *Distributed models,* in Hydrological forecasting.

Barbero S., Boni G., Crosta A., Ferraris L. & Rabuffetti D. (2002), *Modelli idrologico-idraulici per la previsione operativa delle piene: valutazioni sugli*

effetti delle scale della modellazione idrologica. Atti del 28° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Potenza, Italia, vol. 1, pp. 419-428.

Brooks, R.H. & Corey, T. (1964), *Hydraulic properties of porus media.* Hydrology Paper No. 3, Colorado State Univ., Ft. Collins, Colorado.

Brooks, R.H. & Corey T. (1966), *Properties of porous media affecting fluid flow.* J. Irrig. Drainage Div. A.S.C.E. IR2; pp. 61-88.

Carrara A. (1988), *Drainage anddivide networks derived from high fidelity digital terrain models.* In Quantitative analysis of mineral and energy resources, edited by C.F.Chung, NATO-ASI series C, pp. 223.

Chow V.T., Maidment D.R. & Mays L.W. (1988), *Applied Hydrology.* McGraw-Hill International.

Cremonini R., Bechini R., Campana D., Rabuffetti D. & Giudici I. (2004), *An implementation of kalman filter in north-western italy for radar calibration using 3-hourly gauges measuremements and polarimetric c-band radar estimates.* Proc. of the 3rd European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD), pp. 352-355.

Dixon M. & Wiener G. (1993), *TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis and nowcasting – a radarbased methodology.* J. Atmos. Oceanic Tech., pp. 10, 785-797.

DHI Water & Environment MIKE 11 (2001-2004), *A modelling system for river channels.* Reference Manual.

Dunne T. (1978), *Field studies of hillslope processes.* In Hillslope Hydrology edited by Kirby M. J., John Wiley, New York, pp. 227-293.

Golding B.W. (1998), *Nimrod: A system for generating automated very short range forecasts.* Meterorol. Appl., vol. 5, pp. 1-16.

Horton R.E. (1933), *The role of infiltration in the hydrologic cycle.* Trans. Am. Geophys. Unoin, vol 14, pp. 446-460.

Hydroptimet (2004), *Final report.* In press.

Kessler E. (1966), *Computer program for calculating average lengths of weather radar echoes and pattern bandedness.* J. Atmos. Sci., vol. 23, pp. 569-574.

Mancini M., Montaldo N. & Rosso R. (2000), *Effetti di Laminazione di un sistema di invasi artificiali nel bacino del fiume toce. l'Acqua,* vol. IV.

Murphy A.H. & Winkler R.L. (1997), *A general framework for forecast verification.* Monthly Weather Review, pp. 115.

Penman H.L. (1948), *Natural evapotranspiration from open water, bare soil and grass.* Proc. Roy. Soc. London, A193, pp. 120-145.

Ponce V.M. (1989), *Engineering Hydrology.*

Priestley C.H.B. & Taylor R.J. (1972), *On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters.* Monthly Weather Rev., vol. 100, pp. 81-92.

Ravazzani, G., Montaldo, N. & Mancini, M. (2002), *Modellistica idrologica distribuita per il caso di studio del bacino del fiume Toce.* Atti del 28° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Potenza, Italia, vol. 1, pp. 341-348.

Richards L.A. (1931), *Capillary conduction of liquids through porous mediums.* Physics, I, pp. 318-333.

Rosso R. (1994), *An introducton to spatial distributed modeling of basin response.* In Advances in Distributed Hydrology, ed. by Rosso R., Peano A., Becchi I. & Bemporad G., Water Resources Publications.

Santini A., Romano N., Ciollaro G. & Comegna (1995), *Evaluation of laboratory inverse method for determining unsaturated hydraulic properties of a soil under different tillage practices.* Soil Science, vol. 160, pp. 340-351.

Siccardi F. (1995), *Rainstorm Hazard and Related Disasters in the North-West Mediterranean Region.* Remote Sensing Reviews, vol. 14, pp. 5-21.

Tarboton D.G. (1997), *A new method for the determination of flow direction and upslope areas in grid digital elevation models.* Water Resources Research, vol. 33, pp. 309-319.

USDA (1972 e 1986), [U.S. Department of Agriculture] Soil Conservation Service, National *Engineering Handbook,* Section 4, Hydrology, Rev. ed., U.S. Department of Agriculture, Washington D.C., U.S.A.

Van Genucten M.T. (1980), *A closed-for equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.* Soil Sci. Soc. Am. J., vol. 44, pp. 892-898.

WMO (2002), *Associated Programme on Flood Management.*

3.5 La previsione delle frane

Studi condotti negli ultimi anni hanno consentito di classificare i fenomeni franosi caratteristici del Piemonte individuando le tipologie elencate di seguito
(Progetto IFFI *Inventario Fenomeni Franosi in Italia,* 2004).

3.5.1 Principi e metodi per la previsione dei fenomeni franosi

Il criterio di classificazione è basato sull'accorpamento dei fenomeni per tipologia di movimento:
- crolli e ribaltamenti;
- colamenti rapidi;
- scivolamenti traslativi e rotazionali;
- fenomeni complessi;
- colamenti lenti;
- deformazioni gravitative profonde di versante.

La stabilità di un versante dipende dalle condizioni geo-strutturali dell'ammasso roccioso o geotecniche dei terreni ed è talora influenzata in maniera anche significativa dall'azione di fenomeni che ne condizionano o ne determinano l'insorgenza, quali precipitazioni, fusione del manto nevoso, sollecitazioni sismiche, escursioni termiche (cicli di gelo e disgelo), erosione fluviale al piede di un versante, modificazioni incaute del territorio da parte dell'uomo, ecc.

In generale non esiste una corrispondenza biunivoca tra fenomeni franosi e cause d'innesco, in quanto l'evoluzione di una frana può essere condizionata da differenti fattori che frequentemente concorrono alla compromissione della stabilità di un versante, attraverso interazioni complesse. In alcuni casi tuttavia può essere individuata una connessione diretta e traducibile in termini quantitativi tra fenomeno franoso e cause d'innesco, come avviene ad esempio tra colamenti rapidi e piogge; tale relazione appare più complessa nel caso degli scivolamenti traslativi in roccia tipici delle Langhe piemontesi e nel caso dei colamenti lenti in formazioni argillose tipici di certi settori della provincia di Alessandria ma incerta nel caso dei crolli.

Un primo aspetto dell'attività previsionale consiste, ove possibile, nell'individuazione e quantificazione delle cause d'innesco e nella comprensione delle circostanze nelle quali la loro azione è tale da compromettere la stabilità del versante. Qualora la complessità del fenomeno renda problematica l'individuazione delle cause, l'attività previsionale può utilizzare indicatori correlati alle caratteristiche evolutive del fenomeno.

Solitamente la previsione si esprime in termini di probabilità di accadimento di un determinato fenomeno ed è caratterizzata da tre componenti fondamentali che devono essere analizzate unitamente: lo spazio, il tempo e l'intensità. A seconda delle finalità, ciascuna componente può assumere maggiore rilevanza rispetto alle altre: in attività di prevenzione, quali la pianificazione territoriale e la mitigazione, risulta fondamentale la previsione spaziale e di intensità; in attività di protezione civile risulta fondamentale anche la componente temporale.

In letteratura, sono noti diversi tipi di metodi per la valutazione della stabilità/pericolosità dei versanti con caratteristiche che differiscono per complessità, numero di parametri utilizzati ed ambito territoriale di validità. Un elenco dei metodi utilizzati da Arpa Piemonte, descritti in dettaglio nei paragrafi che seguono, è riportato in **tabella 3.5.1**. Il grado di complessità e il numero di parametri sono espressi in forma relativa. Per ambito territoriale di validità si intende la risoluzione spaziale della previsione: un ambito *puntuale* si riferisce alla capacità della previsione di localizzare singoli fenomeni franosi; un ambito *areale* si riferisce invece alla proprietà del metodo di localizzare, più genericamente, le aree soggette ad instabilità, ciascuna caratterizzata da un contesto omogeneo, senza tuttavia riuscire a discernere, all'interno di esse, singoli siti di innesco.

TABELLA 3.5.1 METODI DI PREVISIONE DELLA STABILITÀ DEI VERSANTI UTILIZZATI DA ARPA PIEMONTE

METODI	COMPLESSITÀ	NUMERO DI PARAMETRI	AMBITO TERRITORIALE DI VALIDITÀ
Metodo empirico - pluviometrico di I ordine*	Bassa	Basso	Areale
Metodo empirico - pluviometrico di II ordine**	Medio	Medio	Areale
Metodo empirico - idrologico	Alta	Moderato	Areale
Metodo statistico	Alta	Alto	Puntuale
Metodo meccanico - idrologico	Media	Medio	Puntuale

** I ordine: il metodo considera solo la variabile pioggia*
*** II ordine: il metodo considera la pioggia ed altre variabili del contesto fisico*

L'applicazione dei metodi ai diversi contesti del territorio regionale dipende sia dalla finalità che la previsione intende perseguire, sia dalle caratteristiche del fenomeno franoso. Ad esempio, le previsioni a fini di protezione civile, oltre a richiedere valenza puntuale, qualora siano riferite a singoli fenomeni noti e particolarmente critici, possono anche avere valenza areale, qualora, ad esempio, si riferiscano ai colamenti rapidi che interessano in modo generalizzato ed indifferenziato determinati settori montuosi e collinari.

È possibile estendere l'applicazione dei metodi utilizzati da Arpa Piemonte, in alcune aree campione (puntualmente su un singolo fenomeno, o arealmente su gruppi di fenomeni con caratteristiche simili), ad altri ambiti territoriali in cui si disponga del medesimo dettaglio informativo.

Al riguardo bisogna tenere conto che i metodi per i quali è necessario disporre di un elevato numero di parametri e di una conoscenza approfondita dell'ambiente di sviluppo del fenomeno, possono essere applicati prevalentemente in ambiti puntuali o arealmente circoscritti; viceversa, i metodi per i quali è sufficiente un numero basso di parametri possono essere impiegati più facilmente in ambiti territoriali estesi. D'altro canto, l'adozione di metodi più sofisticati o che richiedono un maggior numero di parametri consente di fornire indicazioni previsionali potenzialmente più accurate.

3.5.2 Metodo empirico-pluviometrico

3.5.2.1 Descrizione del metodo

Il metodo consiste in un approccio semplificato volto all'individuazione di una correlazione tra la pioggia e l'innesco del fenomeno franoso, prescindendo dalla conoscenza delle leggi fisiche che governano i meccanismi di instabilità dei versanti.

Qualora il metodo consideri esclusivamente le piogge, non avvalendosi di un'analisi approfondita di tutti gli elementi di natura morfologica, di uso e copertura del suolo, nonché dei caratteri geologici, geometrici ed idrologici del versante coinvolto, consente di fissare soglie che nella letteratura scientifica sono definite di *I ordine*.
Si definiscono invece di *II ordine* qualora il metodo consideri altre variabili del contesto fisico, valutando come le piogge critiche varino in base alle caratteristiche dell'ambiente di sviluppo del fenomeno.

La descrizione del metodo può essere strutturata distinguendo tra raccolta ed elaborazione dei dati. La raccolta del dato coinvolge aree in cui:
- in concomitanza con eventi pluviometrici intensi si sia innescato un numero significativo di fenomeni franosi;
- sia disponibile l'informazione circa la data e l'ora di innesco delle frane;
- siano presenti stazioni pluviometriche sufficientemente prossime ai fenomeni franosi, con dati caratterizzati da completezza e sufficiente dettaglio temporale.

Per quanto riguarda l'elaborazione, dato un evento pluviometrico nel corso del quale si è innescato un fenomeno franoso, il metodo si basa sulla:
- individuazione di un pluviometro situato in prossimità del fenomeno franoso;
- individuazione della data e dell'ora di innesco del fenomeno franoso;
- individuazione della data e dell'ora di inizio dell'evento pluviometrico e determinazione dell'intervallo critico compreso tra queste e l'innesco del fenomeno franoso, nell'ipotesi che sia significativa la pioggia a scala d'evento; oppure, utilizzando un approccio più complesso, determinazione del tempo d'influenza delle precipitazioni sulla stabilità del versante, caratteristico di ciascun fenomeno, nell'ipotesi che sia significativa la pioggia ad una scala maggiore di quella dell'evento;
- determinazione della pioggia critica caduta nell'intervallo di tempo definito al punto precedente. La pioggia critica può essere espressa per mezzo di grandezze pluviometriche quali pioggia con assegnato tempo di ritorno, massimi di pioggia, pioggia cumulata, intensità oraria media. Tali grandezze, per essere più efficacemente confrontate tra ambiti territoriali diversi, possono essere normalizzate, cioè rapportate ad altre grandezze pluviometriche rappresentative del comportamento medio di un certo ambito territoriale, come ad esempio la Precipitazione Media Annua (PMA).

Il metodo empirico pluviometrico solitamente associa la probabilità $P[L_t]$ che un fenomeno franoso L_t si inneschi all'istante t ad una funzione $Y(t)$ dipendente dalle precipitazioni che hanno preceduto l'istante t:

$$P\left[L_t\right] = f\left[Y(t)\right] \qquad (3.5.1)$$

Per i colamenti rapidi, la funzione $Y(t)$ viene frequentemente identificata con l'intensità oraria media I mentre il tempo t con la durata delle precipitazioni D ed è espressa con la seguente formulazione:

$$Y(t) \rightarrow I = a \cdot D^b \qquad (3.5.2)$$

nella quale a e b sono costanti che dipendono dalle caratteristiche dell'ambito indagato **(figura 3.5.1).**

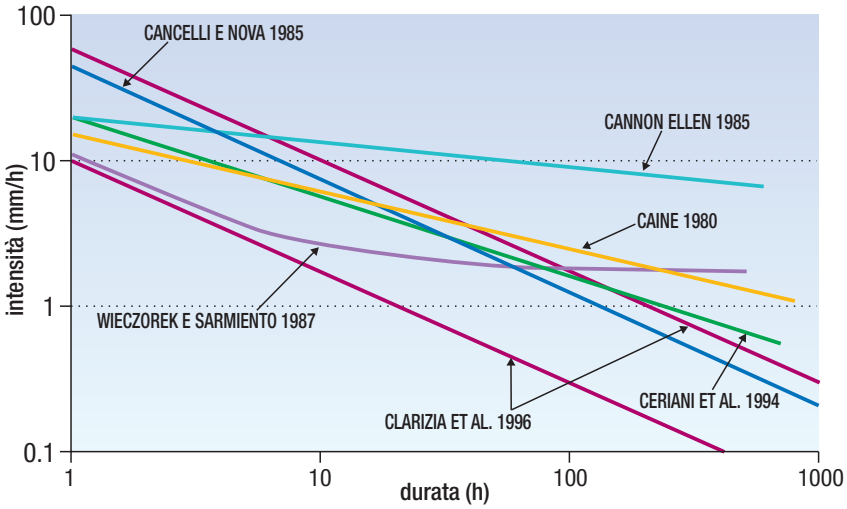


Figura 3.5.1
Rappresentazione di alcune tra le correlazioni disponibili in letteratura sul piano *Intensità vs Durata*

3.5.2.2 Considerazioni sull'applicabilità del metodo

Il metodo empirico pluviometrico basato su soglie di I di II ordine fornisce buoni risultati se applicato a quelle tipologie di frana il cui innesco è direttamente correlato alle precipitazioni. Rientrano in questa categoria i colamenti rapidi, ossia quelli che interessano le coperture detritico-colluviali ed eluvio-colluviali per cui i meccanismi di circolazione idrica sub-superficiale non sono condizionati da situazioni idrogeologiche complesse.
I colamenti rapidi per saturazione e fluidificazione della coltre superficiale sono quelli che meglio rispondono ad entrambi gli approcci, mentre per fenomeni più profondi e/o con dinamiche più articolate si ottengono risultati incoraggianti esclusivamente con il metodo empirico basato su soglie di II ordine che, come specificato nei paragrafi precedenti, tengono conto di più fattori come le caratteristiche geologiche, idrogeologiche, morfometriche, ecc. Per altre tipologie di fenomeni come ad esempio le frane complesse, i crolli, i colamenti lenti e gli scivolamenti rotazionali che coinvolgono porzioni di substrato, l'applicabilità di entrambe le metodologie risulta molto problematica ed in alcuni casi impossibile, data la difficoltà di comprendere appieno il ruolo che la pioggia svolge, indirettamente, nel concorrere all'instabilità di tali fenomeni.

Il contenuto informativo a corredo di un fenomeno franoso richiede una certa consistenza affinché sia garantita la fattibilità delle analisi volte alla determinazione delle soglie di innesco. La precisione del dato cronologico è indispensabile per determinare le esatte quantità di pioggia critica che, a seconda della tipologia della frana, può essere rappresentata dai valori registrati nel corso dell'evento, o nel corso di un periodo più lungo, dipendente dal tempo d'influenza caratteristico del fenomeno.
Per la maggior parte degli inneschi noti verificatisi in Piemonte dal secolo scorso fino ad oggi, il dato orario è sconosciuto ed è raramente disponibile quello giornaliero, in particolar modo per gli inneschi più antichi. Un altro problema che si presenta per inneschi di vecchia data è imputabile alla qualità del dato di pioggia fornito dall'antiquato sistema di registrazione delle piogge e alla ridotta densità della rete pluviometrica utilizzata fino alla seconda metà degli anni Ottanta. Contrariamente alla rete pluviometrica moderna, il dato veniva acquisito manualmente con frequenza di lettura giornaliera o tramite pluviografi a pennino che ne rendono l'utilizzo difficoltoso a fronte della necessità di analizzare intere serie storiche per numerosi pluviometri.

Inoltre, malgrado l'elevata densità delle rete pluviometrica attuale sul territorio regionale, non è sempre affidabile l'attribuzione di un dato di pioggia misurata in un punto ad una frana verificatasi nel suo intorno, data la variabilità spaziale delle precipitazioni. L'affidabilità delle correlazioni tra grandezze pluviometriche e punti di innesco di fenomeni franosi diminuisce in funzione della distanza tra il pluviometro di riferimento e il sito in frana ed è condizionata anche dalla componente orografica. Tali difficoltà risultano meno vincolanti per eventi pluviometrici caratterizzati da precipitazioni prolungate e diffuse, mentre possono rendere problematica l'analisi per precipitazioni localizzate, brevi ed intense.

Per ovviare ai limiti legati alla registrazione puntuale del dato di pioggia operata dalle stazioni pluviometriche, viene in aiuto il radar meteorologico, in grado di osservare e quantificare in modo distribuito le precipitazioni. Incrociando i dati dei pluviometri con quelli del radar, è possibile ottenere un'informazione più affidabile sulla distribuzione delle piogge, salvo per quelle aree che costituiscono una zona d'ombra per il segnale radar (blocco del segnale da parte degli orogeni).

La determinazione del tempo d'influenza delle piogge sulla stabilità dei fenomeni richiederebbe la conoscenza dei parametri idrogeologici, a loro volta dipendenti da numerosi fattori legati alle caratteristiche dei depositi, alla circolazione idrica profonda, al tipo di vegetazione e alle caratteristiche intrinseche dei versanti (morfometria, concavità-convessità, esposizione, ecc.). Tuttavia, la mancanza di dati sufficientemente dettagliati impone che l'identificazione del tempo d'influenza avvenga mediante un'analisi incrociata delle serie storiche degli inneschi e delle piogge.
Alle piogge, in situazioni idrogeologiche particolari (ambienti carsici, idrotermali, periglaciali o ambienti caratterizzati da complessi sistemi multifalda, ecc.) si aggiungono altre tipologie di apporti idrici difficilmente quantificabili che possono rendere talvolta subordinato il ruolo delle precipitazioni nell'innesco dei fenomeni franosi.

3.5.2.3
Applicazione del metodo ai fenomeni di colamento rapido

Al fine di individuare una correlazione empirica valida a livello regionale, sono stati presi in considerazione i colamenti rapidi innescatisi nel corso dei seguenti eventi pluviometrici:

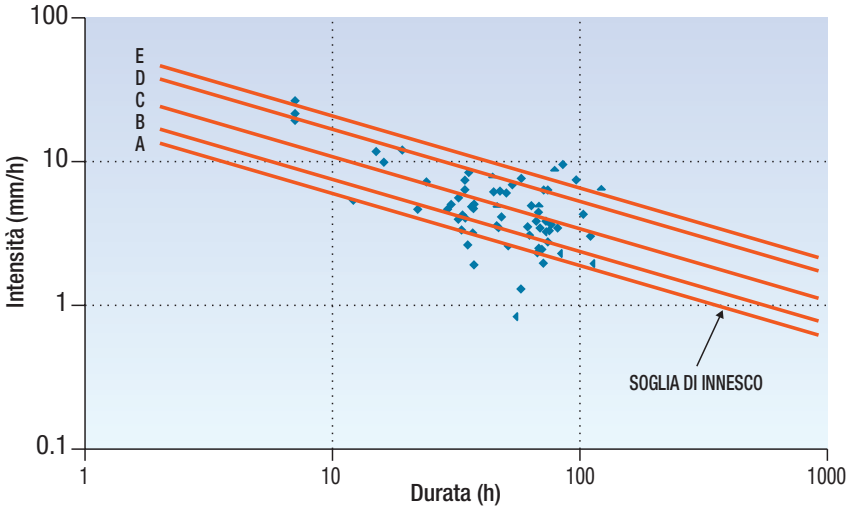
- novembre 1994, cuneese, torinese, astigiano e biellese;
- luglio 1996, Cusio;
- luglio e settembre 1998, verbano, vercellese ed alessandrino;
- aprile 2000, torinese;
- giugno 2000, cuneese e basso torinese;
- ottobre 2000, Ossola, vercellese, biellese e torinese;
- maggio 2002, Ossola, Sesia, biellese ed alessandrino;
- giugno 2002, Ossola, Sesia, biellese ed Alto Canavese;
- luglio 2002, cuneese;
- agosto 2002, Ossola ed alessandrino.

Nella **figura 3.5.2**, dove ciascun punto rappresenta la pioggia dimostratasi critica per l'innesco di un fenomeno franoso, è stata determinata una curva di interpolazione e, parallelamente a questa, con il criterio dell'inclusione parziale dei punti a percentuale predefinita, la curva che inviluppa un dato numero di punti.

La scelta della percentuale più idonea da utilizzare in attività previsionali dipende dalle contrapposte esigenze di considerare da un lato, il maggior numero di casi possibili e di escludere dall'altro, i casi sporadici e poco rappresentativi di un comportamento medio.

La relazione empirica, definita in base allo studio degli eventi pluviometrici del passato, è stata associata a ciascuno dei pluviometri della rete regionale automatica, afferente al Centro Funzionale per la Previsione ed il Monitoraggio dei Rischi Naturali di Arpa Piemonte ed utilizzata per realizzare un software sperimentale di visualizzazione in tempo reale della criticità sui versanti indotta da intense precipitazioni **(figura 3.5.3)**. L'esempio che segue mostra la valutazione del software alle ore 08:50 UTC del 04/12/2003: il colore attribuito a ciascuno dei punti-pluviometro in base ad una scala di criticità, che tiene conto della relazione empirica di cui sopra, consente di visualizzare quali intorni dei pluviometri raggiungono livelli di pioggia dimostratisi critici in passato.

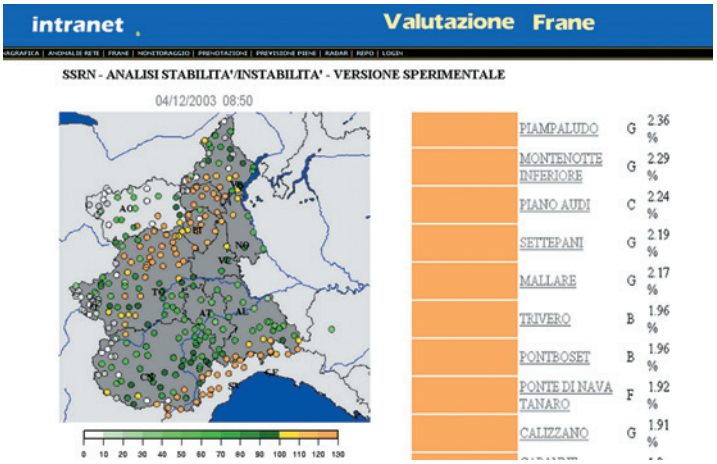
Nel corso di attività di approfondimento tese alla definizione di soglie di II ordine, si è cercato di osservare se la distinzione delle piogge critiche in base a discriminanti di natura geografica, geologica, morfologica e di uso del suolo, consentisse una zonizzazione del territorio regionale tale da permettere la definizione di soglie a valenza sub-regionale. Lo studio è stato condotto sui seguenti eventi:



giugno 1992, ottobre 1992, settembre 1993, novembre 1994, luglio 1996, giugno 1998, luglio 1998, settembre 1998, aprile 2000, giugno 2000, ottobre 2000, febbraio 2002, maggio 2002, giugno 2002, luglio 2002, agosto 2002, aprile 2004, maggio 2004.

Figura 3.5.2
Diagramma *Intensità vs Durata* valido per il territorio piemontese con curve a diversa percentuale di inviluppo: *A* 90%, *B* 75%, *C* 50%, *D* 25%, *E* 10%

Si sottolinea come il tentativo di differenziare le soglie d'innesco, osservando la distribuzione dei punti rappresentativi delle piogge critiche su un diagramma di stabilità, necessiti di un'analisi incrociata con altre variabili del contesto fisico, che, se trattate singolarmente, forniscono un'indicazione parziale dell'influenza che esercitano sulla pioggia critica.
Si riportano a titolo di esempio i risultati relativi a due elaborazioni.



Nel primo caso, le piogge critiche sono state cromaticamente distinte in base al substrato sulla cui copertura si sono innescati i fenomeni franosi: si osserva che i punti rappresentativi del substrato cristallino (simboli blu - Anfiboliti, Gneiss, Sieniti) occupano, rispetto alla distribuzione complessiva dei punti, la parte superiore del diagramma e che la corrispondente curva di inviluppo, valida per l'80% dei casi, ha uno scarto minimo del 45% rispetto a quella regionale di pari percentuale **(figura 3.5.4)**.

Figura 3.5.3
Software sperimentale di visualizzazione in tempo reale della criticità sui versanti indotta da intense precipitazioni (1999). In giallo i pluviometri che hanno raggiunto valori di pioggia corrispondenti al 100% della soglia critica

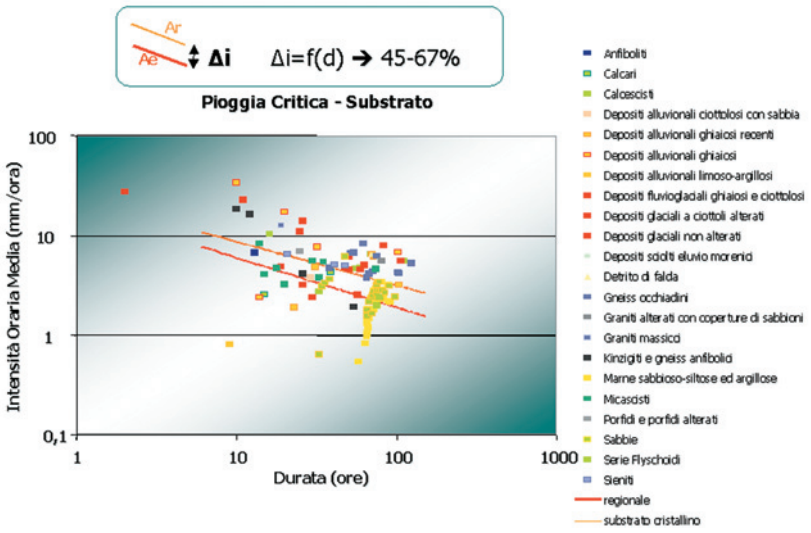


Figura 3.5.4
Diagramma di stabilità *Intensità vs Durata* con piogge critiche distinte in base al substrato

Nel secondo caso le piogge critiche sono state cromaticamente distinte in base all'uso del suolo dei versanti nei quali si sono innescati i fenomeni franosi **(figura 3.5.5)**: si osserva che i punti rappresentativi delle superfici boscate (simboli viola) occupano, rispetto alla distribuzione complessiva dei punti, la parte superiore del diagramma e che la corrispondente curva di inviluppo, valida per l'80% dei casi, ha uno scarto minimo del 46% rispetto a quella regionale di pari percentuale.

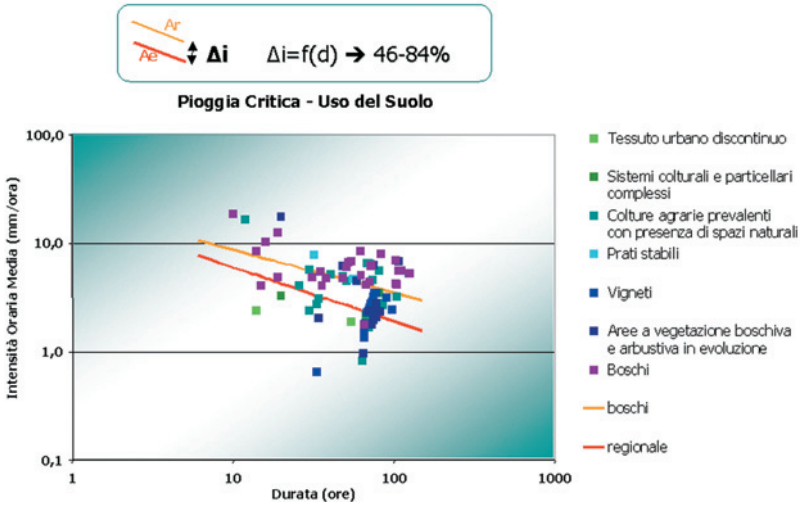


Figura 3.5.5
Diagramma di stabilità *Intensità vs Durata* con piogge critiche distinte in base all'uso del suolo

3.5.2.4
Applicazione del metodo ai fenomeni di scivolamento traslativo

Studi condotti negli ultimi anni nel territorio piemontese hanno messo in evidenza l'esistenza di specifiche relazioni tra l'innesco degli scivolamenti traslativi (noti anche come *scivolamenti planari*) tipici delle Langhe piemontesi ed il relativo regime pluviometrico. La storia evolutiva dei fenomeni evidenzia infatti una particolare concentrazione delle attivazioni nei periodi autunnale e primaverile, sottolineando un marcato carattere stagionale del fenomeno e suggerendo un quadro delle relazioni causa-effetto che frequentemente evidenzia un ruolo importante delle precipitazioni. Al fine di verificare sperimentalmente e in via preliminare tale relazione, è stato selezionato un campione di frane innescatesi nel corso degli ultimi 40 anni in un'area che si estende tra le province del cuneese e dell'astigiano, soddisfacenti i seguenti requisiti:

- causa scatenante rappresentata da un evento pluviometrico;
- presenza di più attivazioni storiche;
- disponibilità di dati pluviometrici in grado di documentare il regime pluviometrico;
- alto valore informativo del sito legato all'esistenza di un'approfondita documentazione storica.

Per i casi selezionati è stata condotta un'analisi dei dati pluviometrici giornalieri aggregati su scala mensile o pluri mensile (pioggia stagionale), distinti in base allo stadio evolutivo del fenomeno (incipiente o evoluto). L'approccio sperimentale ha evidenziato significative differenze nella quantità di pioggia necessaria per attivare le frane a seconda dello stadio evolutivo considerato. In particolare, per la comparsa delle prime fratture di trazione, dei rigonfiamenti e degli avvallamenti tipici dello stadio incipiente è stato necessario un quantitativo di pioggia superiore rispetto a quello responsabile della successiva evoluzione consistente nel distacco e nella mobilizzazione di blocchi lungo le superfici di scivolamento, effetti tipici dello stadio evoluto.
Nel diagramma di **figura 3.5.6** compare un esempio di elaborazione empirica pluviometrica di piogge stagionali critiche. La pioggia cumulata su un periodo di quattro mesi è stata messa in relazione con il periodo dell'anno nel quale si è osservato l'innesco del fenomeno ed è stata distinta in base allo Stadio Evolutivo del fenomeno: Stadio Incipiente (simboli triangolari rossi) e Stadio Evoluto (simboli triangolari neri).

3.5.3
Metodo empirico-idrologico

3.5.3.1
Descrizione del metodo

Il metodo non analizza gli aspetti più strettamente idrogeologici e geotecnici, legati all'andamento delle falde sotterranee, o più in generale al regime delle pressioni interstiziali che intervengono nei processi di instabilità, ma si limita all'individuazione empirica di relazioni tra piogge e movimenti franosi, considerando, indirettamente, la quantità d'acqua infiltratasi nel sottosuolo prima dell'innesco.
In particolare, su due aree campione del territorio regionale, Arpa Piemonte ha utilizzato il modello idrologico *FLaIR (Forecasting of Landslides Induced by Rainfalls),* proposto da Sirangelo & Versace (1992) e successivamente sviluppato dagli stessi autori in altri lavori più recenti (Sirangelo *et al.*, 1996; Versace *et al.*, 2002), che consente di

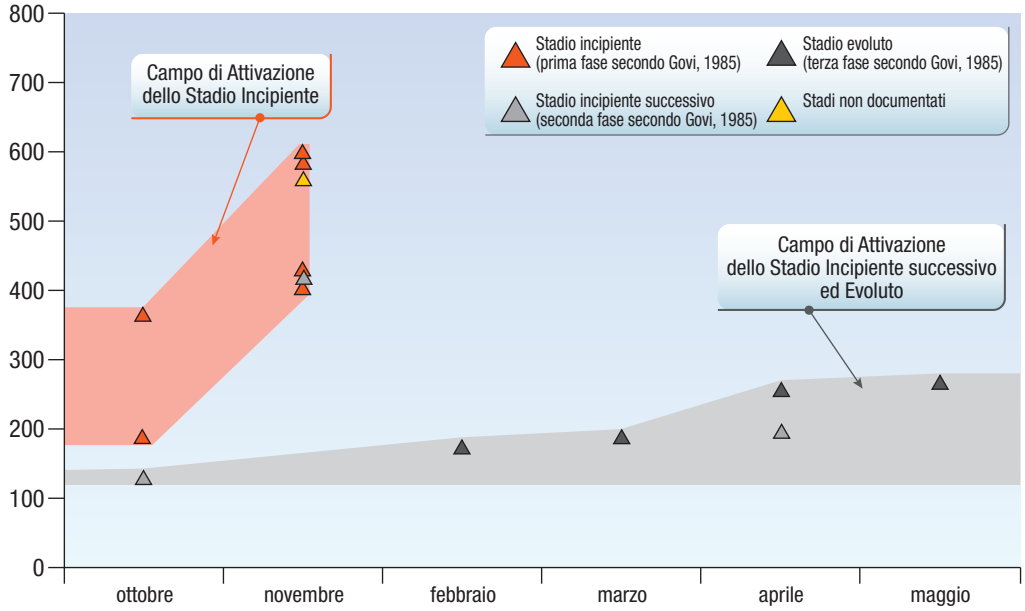


Figura 3.5.6
Diagramma di stabilità *Pioggia cumulata vs Mesi*. La posizione dei simboli (triangoli rossi: stadio incipiente, triangoli neri: stadio evoluto) consente di individuare sulla superficie del diagramma aree a simile comportamento, differenziando di fatto le soglie di attivazione

prevedere l'innesco di movimenti franosi sulla base delle precipitazioni misurate o previste con modelli stocastici e/o meteorologici. Il modello, applicabile ad una singola frana o ad aree omogenee soggette alla medesima tipologia di fenomeno, si basa sull'identificazione di una funzione di mobilizzazione *Y(t)* che dipende dalle precipitazioni antecedenti e tiene conto, in maniera sintetica, delle caratteristiche del corpo franoso. Definita la funzione di mobilizzazione, è possibile identificare valori critici al cui superamento è associata la maggiore o minore probabilità di movimento.
La funzione di mobilizzazione dipende, in ogni istante di tempo *t*, dalla quantità d'acqua infiltratasi nel sottosuolo prima dell'istante stesso:

$$Y(t) = f\left[I(u)\right] \qquad (3.5.3)$$

essendo *I (u)* l'intensità dell'infiltrazione al tempo *u*.
La funzione di mobilizzazione rappresenta un indicatore sintetico del rischio di attivazione indotto dalle piogge cadute in precedenza sul versante e viene definita analiticamente in modo da assumere solo valori non negativi. Trattandosi, inoltre, di un indicatore non è importante la conoscenza del suo valore assoluto, essendo il suo impiego legato al rapporto tra i valori assunti in diversi istanti. Ne consegue che la funzione *Y(t)* può essere definita a meno di inessenziali costanti moltiplicative.
Il modello *FLaIR* assume come relazione tra la funzione di mobilizzazione *Y(t)* e l'intensità dell'infiltrazione *I(u)* un legame di tipo convolutivo:

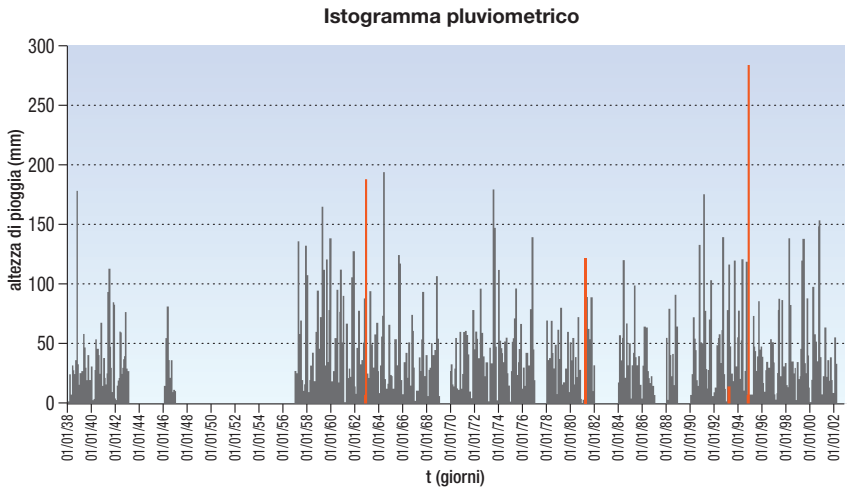
$$Y(t) = c\int_0^t \psi(t-u)I(u)\,du \qquad (3.5.4)$$

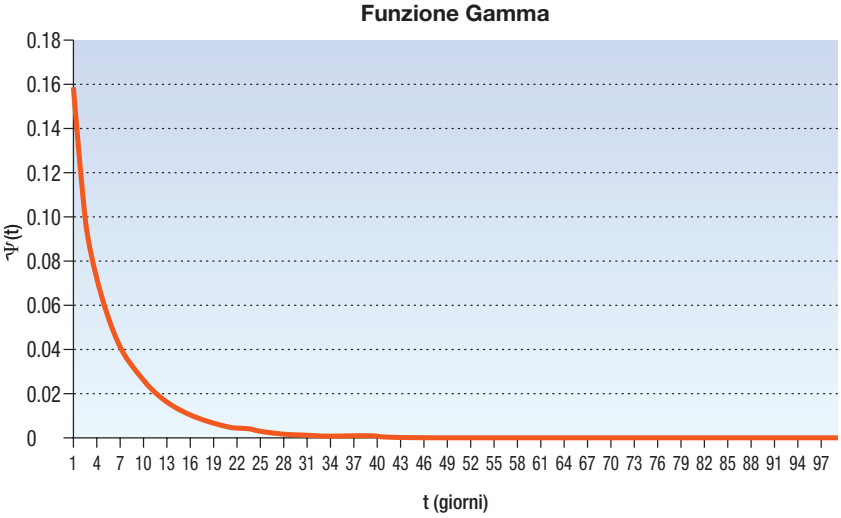
dove $\psi(t\text{-}u)$ è la funzione di trasferimento (o filtro), e *c* è un'inessenziale costante moltiplicativa citata in precedenza. La funzione di trasferimento tiene conto in modo sintetico delle relazioni che intercorrono tra la stabilità del pendio e le precipitazioni meteoriche. Si possono adottare varie espressioni per la funzione di trasferimento, assicurando così al modello *FLaIR* grande flessibilità e, quindi, la capacità di modellare situazioni caratterizzate da meccanismi di innesco anche molto diversi tra loro.

3.5.3.2 Considerazioni sull'applicabilità del metodo

La stima dei parametri della funzione di trasferimento è uno degli aspetti più delicati del modello *FLaIR*. La difficoltà principale consiste nella possibilità di reperire informazioni complete sulle mobilizzazioni storiche dei fenomeni sottoposti ad analisi. In mancanza di un quadro informativo completo, può accadere che, a parità di struttura analitica della funzione di trasferimento, esistano molti valori dei parametri che risultano compatibili con il criterio di stima adottato. Non è possibile, quindi, identificare un particolare vettore dei parametri ma può essere solo individuata una regione di ammissibilità dei parametri.

Il campo di ammissibilità dei parametri può essere delimitato utilizzando un criterio detto *ranking*, valutando cioè la funzione di mobilizzazione *Y(t)* su tutto l'intervallo di variabilità dei parametri e ritenendo ammissibili tutti quei valori che inducano *Y(t)* ad assumere, in corrispondenza delle *k* mobilizzazioni storiche, valori che si posizionino nei primi *k* posti del suo *ranking* o, in altre parole, che si situino nelle prime *k* posizioni della sequenza dei valori della funzione di mobilizzazione riordinati in senso decrescente. La stima parametrica consente anche di individuare un valore limite inferiore $Y_{cr,li}$, ed un valore limite superiore $Y_{cr,ls}$. Il primo corrisponderà al massimo *Y(t)* che non ha dato luogo a mobilizzazione, mentre il secondo corrisponderà al minimo *Y(t)* verificatosi in concomitanza con le mobilizzazioni storicamente note.





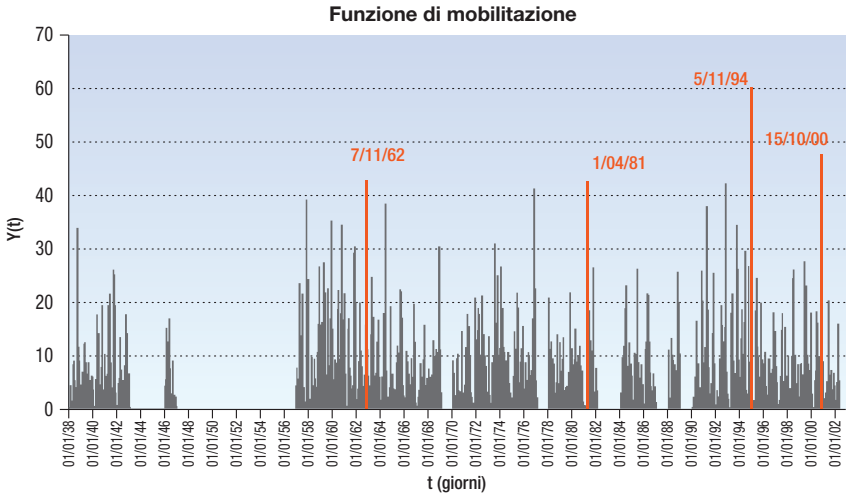


Figura 3.5.7
Esempi di istogramma pluviometrico giornaliero con indicazione degli inneschi (picchi rossi) e delle associate funzioni di trasferimento e di mobilizzazione

3.5.3.3 Applicazione del metodo ai fenomeni di colamento rapido e di scivolamento traslativo

Il metodo *FLaIR* è stato applicato a due aree del territorio piemontese:
- Valli di Lanzo per i colamenti rapidi;
- Langhe per gli scivolamenti traslativi.

La scelta dei fenomeni franosi è stata fatta considerando che il modello non risulta applicabile quando si verifica una delle seguenti condizioni:
- movimento provocato da cause diverse dalle precipitazioni meteoriche;
- assenza di informazione circa le date di mobilizzazione storica;
- mancanza di dati pluviometrici relativi all'intero periodo considerato;
- evidenti modifiche dei luoghi che rendono poco plausibile l'ipotesi di stazionarietà del fenomeno;
- la frana si sviluppa in roccia.

In seguito all'identificazione dei fenomeni franosi ammissibili sono stati condotti approfondimenti di dettaglio inerenti gli ambienti di sviluppo dei dissesti e gli eventi pluviometrici in coincidenza dei quali si sono verificati gli inneschi. Le frane selezionate sono state sottoposte ad analisi con il modello *FLaIR*, identificando per ogni fenomeno o per ogni gruppo di fenomeni appartenenti ad ambiti ritenuti omogenei, la struttura della funzione di trasferimento ed il valore dei suoi parametri.

Lo studio ha consentito di associare una funzione di mobilizzazione ai fenomeni studiati e di realizzare un software sperimentale di monitoraggio e visualizzazione in tempo reale della criticità sui versanti indotta da intense precipitazioni, denominato *MoniFLaIR*. L'esempio che segue mostra la valutazione del software alle ore 08:30 UTC del 04/08/2004: il colore attribuito a ciascun ambito in base ad una scala di criticità semaforica consente di visualizzare quali ambiti raggiungono livelli di pioggia dimostratisi critici in passato **(figura 3.5.8)**.

3.5.4 Metodo statistico

3.5.4.1 Descrizione del metodo

Il metodo statistico si propone di prevedere il fenomeno franoso non dal punto di vista fisico ma individuando le relazioni esistenti tra caratteristiche del territorio e la frana. Qualora il fenomeno investigato abbia una sufficiente ripetitività spaziale e temporale e presenti caratteristiche tipologiche omogenee, è possibile descrivere statisticamente queste proprietà e, in ragione della loro forte connotazione spaziale, impiegare al meglio le funzionalità offerte da una gestione dei dati in ambiente GIS.
Il vantaggio dell'applicazione di tali metodi su porzioni di territorio statisticamente rappresentative è la possibilità di estendere i risultati in modo predittivo anche ad altri contesti simili.
Data la complessità dei fenomeni in gioco, si ricorre generalmente all'analisi multivariata che è una tecnica di elaborazione dei casi statistici mediante l'impiego contemporaneo di più variabili (ed in ciò si contrappone all'analisi univariata), fino a deter-

Indicazioni contenute nei quadranti

Finestra del Monitoraggio: indica la massima criticità registrata nelle aree 1 e 2 con aggiornamento dei dati ogni 30 minuti a partire dal 15° e 45°.

Finestra della Previsione: indica la massima criticità prevista nelle aree 1 e 2 a partire da +6H, +12h, +18h, +24h.

Finestra del Dettaglio Geografico: indica la criticità registrata o prevista in ognuno degli ambiti dell'Area o i singoli fenomeni dell'Area 2. La dimensione dei simboli circolari rappresentativi dell'ambito è proporzionale all'estensione del territorio conivolto dai fenomeni franosi.

Finestra del Dati: fornisce un'indicazione quantitativa della criticità osservata e prevesta su ogni ambito o frana per mezzo dell'indice Flair (I.F), calcolato come rapporto tra la Funzione di Mobilitazione osservata o prevista e quella limite.

minare eventuali correlazioni multiple tra variabili ed a stabilire il peso statistico delle stesse. In particolare, l'analisi discriminante si rivela uno strumento particolarmente utile per individuare quali variabili discriminino tra due o più gruppi naturali e per classificare i casi in gruppi *differenti* con un'accuratezza migliore che la semplice scelta casuale.
Ciò permette di individuare una relazione tra avvenimento e una serie di parametri e di variabili prescindendo dal significato fisico che tali relazioni assumono. Stabilito a priori se ogni elemento del territorio è attualmente *Stabile* o *Instabile* (a partire dai rilevamenti sistematici degli eventi pregressi), il modello statistico *impara* da tale situazione iniziale già nota, capitalizzando così al massimo le informazioni esistenti sullo stato del dissesto. Combinando in modo opportuno le variabili a disposizione, il modello statistico riesce a ricostruire la situazione originaria, dando origine a semplici equazioni polinomiali di primo grado che possono essere usate in fase predittiva in altre zone.

Nell'ambito del progetto CARG, già descritto in § 2.4, è stato applicato un metodo statistico per la previsione di frane per scivolamento traslativo, che, quantunque riconducibili ad una semplice schematizzazione geometrica e meccanica, sono caratterizzate da parametri che ne governano l'innesco di difficile quantificazione.

Oltre alle oggettive problematiche di determinare questi parametri (difficoltà di campionamento nelle zone di taglio), sussiste anche una reale impossibilità di applicare un modello meccanico appropriato e generalizzabile ad un contesto territoriale ampio, caratterizzato da una molteplicità di situazioni di instabilità. Avendo quindi a disposizione molti dati storici relativi alla distribuzione spaziale e temporale degli eventi franosi, si è deciso di impiegare un approccio puramente statistico grazie al quale è possibile trovare una relazione tra avvenimento di frana e parametri che ne influenzano l'innesco usando la statistica multivariata.

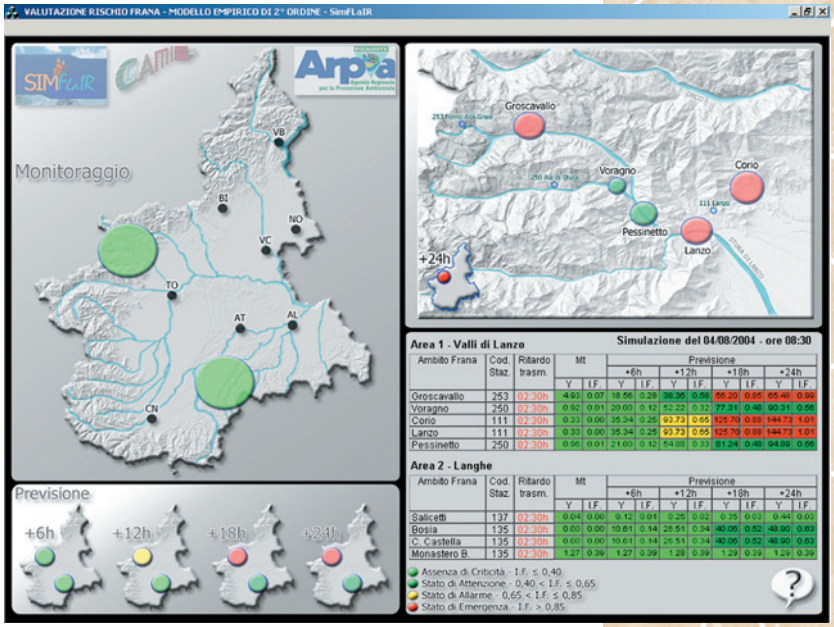


Figura 3.5.8
Interfaccia del modulo *MoniFLaIR*, 2004

3.5.4.2 Considerazioni sull'applicabilità del metodo

L'Analisi Discriminante è uno strumento molto utile per individuare le variabili che permettono di discriminare tra differenti gruppi e per classificare i casi in gruppi differenti con una accuratezza migliore che la semplice scelta casuale. Essa considera i fenomeni (biologici, clinici, fisici, economici, sociali, ecc.) nella loro interezza, tenendo quindi conto delle diverse caratteristiche (cioè le variabili) che meglio servono a descrivere i fenomeni stessi: da tre o quattro variabili sino, in casi particolari, a diverse centinaia di variabili.
La possibilità di analizzare più variabili simultaneamente non significa tuttavia che ad un alto numero di variabili corrisponda un'analisi migliore. Se alle variabili di interesse (supposto) vengono aggiunte altre di scarso significato si causa una diluizione dell'informazione che rende più difficile l'analisi dei dati. Esistono, è vero, anche metodi che aiutano a valutare l'importanza relativa delle diverse variabili (come l'analisi fattoriale), ma devono comunque essere ponderate alla luce dell'esperienza e del buon senso.
L'idea di base sottostante all'analisi delle funzioni discriminanti è quella di determinare se i gruppi differiscono rispetto alla media di ogni variabile e quindi usare tali variabili per predire l'appartenenza di nuovi casi ai gruppi. Si tratta quindi di minimizzare la variabilità degli elementi all'interno dei gruppi e di massimizzarla tra i gruppi.
Ad esempio, supponendo di aver misurato le altezze in un campione casuale di 50 uomini e 50 donne, risulterà che le donne sono, in media, meno alte degli uomini.
Tale differenza si rifletterà nella differenza tra le *altezze* medie e pertanto la variabile altezza per-

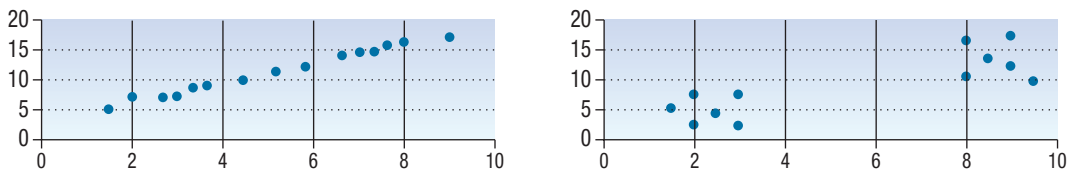


Figura 3.5.9
Esempio di variabili correlate (a sinistra) e casi raggruppati (a destra)

mette di discriminare tra uomini e donne con una probabilità migliore della semplice casualità. Se una persona è alta, allora è probabilmente un uomo, se invece è bassa, allora è probabilmente una donna. Nella **figura 3.5.9**, a sinistra si nota una forte correlazione tra le due variabili. I soggetti (punti del grafico) sono allineati in forza della relazione tra le variabili e non si intravedono raggruppamenti particolari. Viceversa il grafico a destra dimostra una evidente relazione (gruppi, parentele) tra i soggetti a scapito della relazione tra le variabili. Infatti nessuno potrebbe pensare di rappresentare il grafico a destra mediante una retta di regressione. Si può quindi dire che variabili fortemente correlate sono poco utili a svelare relazioni tra i soggetti, mentre variabili poco correlate (indipendenti) mettono spesso in luce interessanti relazioni tra soggetti.

Le principali assunzioni del modello sono la indipendenza delle variabili tra di loro e la loro distribuzione normale. Mentre la normalità è una caratteristica richiesta ma non fatale per l'analisi se non presente, l'indipendenza delle variabili è una caratteristica necessaria. Per indipendenza si intende che una variabile non è una combinazione lineare di nessuna delle altre o per meglio dire, utilizzando un concetto geometrico, le variabili sono a due a due ortogonali. Tale assunzione dà un significato più intuibile dell'Analisi Discriminante: ogni variabile corrisponde ad un asse di uno spazio n-dimensionale e ogni caso è individuato dalla combinazione lineare delle proprie distanze (euclidee o di altro tipo) da ciascun asse. Disponendo di un sistema di assi ortogonali, la distanza euclidea corrisponde all'ipotenusa di un triangolo rettangolo, i cui cateti sono quindi le differenze tra i valori delle due variabili. Quanto detto vale se e solo se gli assi (variabili) sono ortogonali (altrimenti sarebbe come applicare il teorema di Pitagora ad un triangolo non rettangolo). In termini di variabili, la condizione di ortogonalità (90°) corrisponde alla indipendenza delle variabili. Quanto più due variabili sono correlate, tanto più il loro spazio vettoriale si chiude con un angolo sempre più stretto. Paradossalmente, se si applica la stessa variabile a entrambi gli assi, lo spazio vettoriale si riduce ad una retta. Con metodi matematici è possibile rendere le variabili ortogonali, in modo da calcolare valide distanze.
Specificamente, ci si può chiedere se due o più gruppi sono significativamente differenti tra loro rispetto alla media di una particolare variabile. Dunque se le medie per una variabile sono significativamente differenti in gruppi differenti, allora si può dire che questa variabile discrimina tra i due gruppi.

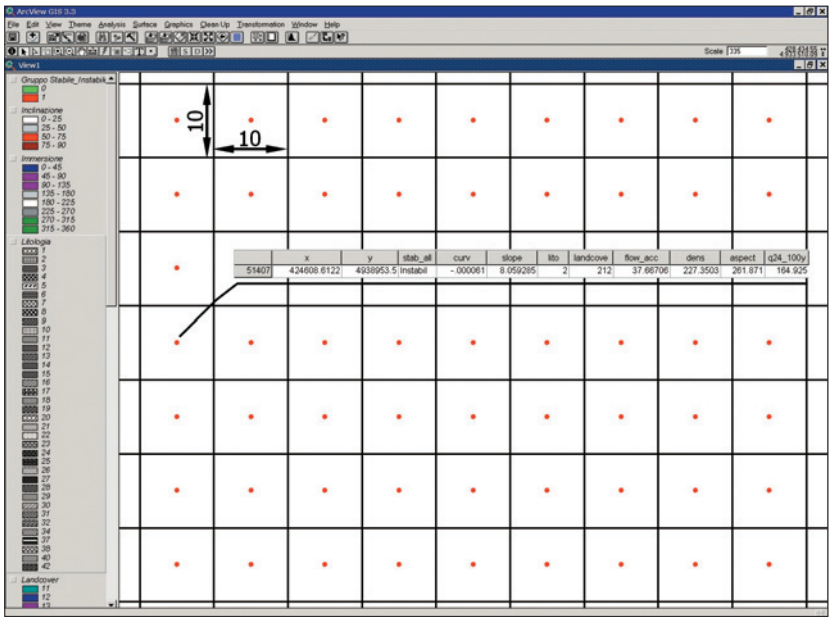


Figura 3.5.10
Esemplificazione della discretizzazione del dominio di studio ed attribuzione dei valori delle variabili al baricentro di ciascuna cella

Classificazione
Un altro degli obiettivi per cui è applicata l'Analisi Discriminante è quello della classificazione dei casi non utilizzati per la creazione del modello statistico. Una volta completato il modello e derivate le funzioni discriminanti, è possibile utilizzare le funzioni di classificazione per determinare a quale gruppo appartiene con maggiore probabilità ogni caso. Vi sono tante funzioni di classificazione quanti sono i gruppi. Ogni funzione permette di calcolare punteggi di classificazione per singolo caso di ciascun gruppo, applicando la formula:

$$S_i = c_i + w_{i1}x_1 + w_{i2}x_2 + \ldots + w_{im}x_m \qquad (3.5.5)$$

dove:
il pedice i denota il gruppo rispettivo;
i pedici $1, 2, \ldots, m$ indicano le m variabili;
c_i è una costante per l'i-mo gruppo;
w_{ij} è il peso per la j-ma variabile nel calcolo del punteggio di classificazione per l'i-mo gruppo;
x_j è il valore osservato per il rispettivo caso per la j-ma variabile;
S_i è il risultante punteggio di classificazione.

È dunque possibile adoperare le funzioni di classificazione per calcolare direttamente i punteggi di classificazione per alcune nuove osservazioni. Una volta calcolati i punteggi per un caso, esso verrà classificato come appartenente al gruppo per cui ottiene il punteggio più elevato.

3.5.4.3 Applicazione del metodo ai fenomeni di scivolamento traslativo

Il metodo è stato applicato con successo nell'ambito del progetto CARG all'intero Foglio *Dego* alla scala 1:50.000. Per eseguire l'Analisi Discriminante è stato necessario innanzi tutto individuare una variabile di gruppo cui attribuire la classificazione a priori del campione. Ciò significa, in pratica, attribuire ogni cella del dominio di studio ad uno dei Gruppi scelti come base per la discriminazione. Come variabile di gruppo è stata scelta l'appartenenza di ogni cella al Gruppo *Stabile* o al Gruppo

Instabile, ottenuta mediante *overlay* topologico della maglia regolare di 10 m di lato in cui è stato discretizzato il Foglio Dego con il rilevamento delle frane per scivolamento traslativo avvenute in occasione degli eventi alluvionali del 1968, 1972, 1974 e del 1994. Per ogni cella è stato così possibile individuare *a priori* l'appartenenza al Gruppo *Stabile* o al Gruppo *Instabile*. Tale variabile rappresenta la condizione iniziale di discriminazione che il modello statistico cerca di ricostruire attraverso la combinazione delle variabili disponibili. Operativamente, in ambiente GIS Esri ArcView© 3.3, tutti gli strati informativi che rappresentano una variabile sono stati ricondotti ad un'unica matrice, in cui ogni riga è una cella elementare e quindi un caso statistico, mentre ogni colonna è una variabile.

Nella **figura 3.5.10** è riportato un dettaglio del dominio di studio, in cui si esemplifica il concetto di cella elementare derivata dalla griglia del Modello Digitale del Terreno e le caratteristiche attribuite al baricentro della cella stessa, mentre nella **figura 3.5.11** è riportata la matrice di 2'249 righe per 2'683 colonne, per un totale di 6'034'067 celle, così come si presenta entro l'ambiente di analisi statistica SPSS©. Si noti che ogni cella è individuata univocamente dalla coppia di coordinate X e Y, espresse in metri nel sistema di riferimento UTM ED 1950, che permette di mantenere la corrispondenza spaziale tra cella e caratteristiche di tipo statistico che si ottengono dopo l'analisi in SPSS©. I risultati ottenuti sono contenuti nelle tabelle seguenti, in cui sono riportati le percentuali di successo **(tabella 3.5.2)**, *il potenziale discriminante* di ciascuna variabile **(tabella 3.5.3)** e i valori dei coefficienti delle Funzioni di Classificazione relative al Gruppo *Stabile* e al Gruppo *Instabile* **(tabella 3.5.4)**.

La **tabella 3.5.2** fornisce tutti i dettagli per valutare la bontà dell'Analisi Discriminante effettuata. Infatti si può leggere che il 74.2% delle celle dichiarate *stabili* prima dell'analisi, cioè a *priori*, sono state effettivamente ri-classificate nel Gruppo *Stabile*, mentre il 78.9% delle celle dichiarate instabili a *priori* sono state correttamente ri-classificate nel Gruppo *Instabile*. Complessivamente il rapporto tra le celle correttamente riclassificate (2'415'687 *stabili* e 902'301 *instabili*) e tutte le celle del dominio oggetto dell'analisi è di 75.4%, che può essere assimilata ad una valutazione globale di successo.

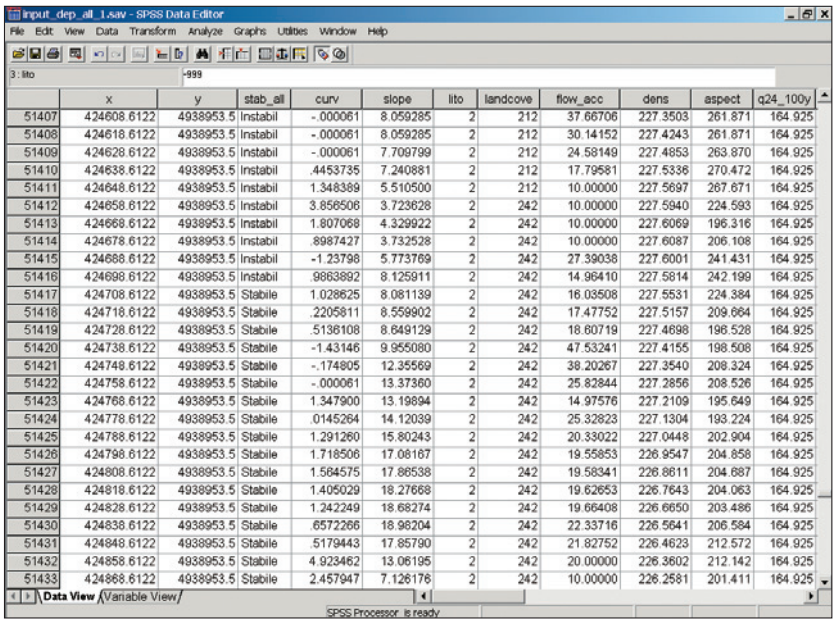


Figura 3.5.11
Matrice di analisi entro l'ambiente SPSS©. Ogni riga corrisponde ad un elemento del Modello Digitale del Terreno e ciascuna cella mostra il valore di ciascuna variabile in quel punto. Si noti che l'univocità di ogni elemento è garantita dalla coppia di coordinate X e Y

TABELLA 3.5.2 RISULTATI DELL'ANALISI DISCRIMINANTE

		PREVISIONE DI APPARTENENZA		
	GRUPPO STABILE-INSTABILE	STABILE	INSTABILE	TOTALE
Numero	Stabile	**2'415'687**	841'053	3'256'740
Numero	Instabile	240'589	**902'301**	1'142'890
%	Stabile	**74.2**	25.8	100.0
%	Instabile	21.1	**78.9**	100.0

Il 75.4% dei casi originali è stato correttamente classificato

TABELLA 3.5.3 COEFFICIENTI STANDARDIZZATI E COEFFICIENTI DI STRUTTURA DERIVATI DALL'ANALISI DISCRIMINANTE

	COEFFICIENTI STANDARDIZZATI DELLA FUNZIONE DISCRIMINANTE CANONICA	MATRICE DI STRUTTURA
Immersione del versante	-0.682	-0.733
Inclinazione del versante	0.468	0.580
Pioggia max annuale attesa in 24 h con Tempo di Ritorno 100 anni	0.329	0.417
Landcover	0.130	0.334
Litologia	0.137	0.333
Densità dei lineamenti telerilevati	-0.048	-0.044
Curvatura totale del versante	0.024	0.016
Area contribuente	0.024	0.004

TABELLA 3.5.4 COEFFICIENTI DELLE FUNZIONI DI CLASSIFICAZIONE

VARIABILI DISCRIMINANTI		GRUPPO	
		Stabile	Instabile
Immersione del versante	imm	2.167E-02	3.050E-02
Inclinazione del versante	incl	0.226	0.156
Pioggia max annuale attesa in 24 h con Tempo di Ritorno 100 anni	24h100y	0.420	0.404
Landcover	lc	1.994E-02	1.833E-02
Litologia	lit	-0.867	-0.892
Densità lineamenti telerilevati	dens	6.516E-03	6.815E-03
Curvatura totale del versante	curv	2.197E-02	8.516E-03
Area contribuente	flow	1.782E-05	1.565E-05
Costante		-47.881	-44.979

La **tabella 3.5.3** riporta nella prima colonna, per ogni variabile discriminante, i coefficienti standardizzati della funzione discriminante canonica. Tali coefficienti potranno essere interpretati in maniera tale da capire in che modo le singole variabili contribuiscono a discriminare: maggiore è il coefficiente standardizzato, maggiore è il contributo della variabile nel discriminare tra i gruppi. Comunque, questi coefficienti non indicano tra quali gruppi essi discriminano, ma rivelano il contributo unico (parziale) di ogni variabile sulle funzioni discriminanti.
Nella seconda colonna della **tabella 3.5.3** sono riportati i coefficienti strutturali che indicano le correlazioni semplici tra le variabili e le funzioni. La matrice di struttura dei fattori è un altro modo per determinare quali variabili *marcano* o definiscono una particolare funzione discriminante. I coefficienti di struttura dei fattori sono le correlazioni tra le variabili nel modello e la funzione discriminante. Si può pensare a queste correlazioni come ai pesi fattoriali delle variabili su ogni funzione discriminante. Pertanto:

- *i coefficienti di struttura* indicano le semplici correlazioni tra le variabili e le funzioni discriminanti;
- *i coefficienti delle funzioni discriminanti* indicano il contributo unico (parziale) di ciascuna variabile alle funzioni discriminanti.

Se si desidera assegnare etichette di *significato* alle funzioni discriminanti, allora dovrebbero essere adoperati, cioè interpretati, i coefficienti di struttura; se si desidera invece sapere quale è il contributo unico di ciascuna variabile alla funzione discriminante, si usano i coefficienti della funzione discriminante. Sulla base delle considerazioni fatte, dall'analisi della **tabella 3.5.3** si ricava che le variabili che più contribuiscono alla discriminazione sono l'*immersione* e *l'inclinazione* del versante, mentre quella meno importante è *l'area contribuente.*
Come descritto, uno degli obbiettivi per cui è applicata l'Analisi Discriminante è quello della classificazione predittiva dei casi. Una volta completato il modello e derivate le funzioni discriminanti, quanto bene si può prevedere a quale gruppo appartiene un particolare caso?
L'Analisi Discriminante calcolerà automaticamente le Funzioni di Classificazione che possono essere utilizzate per determinare a quale gruppo appartiene con maggiore probabilità ogni caso. Vi sono tante funzioni di classificazione quanti sono i Gruppi.
La **tabella 3.5.4** riporta per ciascun gruppo i coefficienti delle Funzioni di Classificazione. Una volta calcolati i punteggi di classificazione per un caso, esso verrà classificato come appartenente al gruppo per cui ottiene il punteggio più elevato ed è possibile calcolarne la probabilità di appartenenza, che sono dette *a posteriori* e forniscono la probabilità che il rispettivo caso appartenga ad un gruppo particolare, in base alla conoscenza dei valori delle altre variabili. Tale probabilità costituisce la pericolosità in senso stretto, espressa in termini spaziali e, indirettamente, temporali, poiché una delle variabili discriminante, la *Pioggia max annuale attesa in 24 h con Tempo di Ritorno 100 anni,* ha un significato temporale.
In questo modo è possibile estrapolare il modello statistico anche a zone teoricamente sconosciute, che abbiano però caratteristiche ragionevolmente omogenee rispetto alla zona in cui il modello statistico è stato generato. Tale opportunità deve comunque essere bene calibrata rispettando i vincoli e le condizioni d'uso del modello.
Nel caso specifico i due polinomi che rappresentano le Funzioni di Classificazione per il Gruppo *Stabile* e per il Gruppo *Instabile* sono:

$$Gruppo_{stabile} = 2.167 \cdot 10^{-2} \cdot (imm) + 0.226 \cdot (incl) + 0.420 \cdot (24h100y) + 1.994 \cdot 10^{-2} \cdot (lc) + \\ -0.867 \cdot (lit) + 6.516 \cdot 10^{-3} \cdot (dens) + 2.197 \cdot 10^{-2} \cdot (curv) + 1.782 \cdot 10^{-5} \cdot (flow) - 47.881 \quad (3.5.6)$$

$$Gruppo_{instabile} = 3.050 \cdot 10^{-2} \cdot (imm) + 0.156 \cdot (incl) + 0.404 \cdot (24h100y) + 1.833 \cdot 10^{-2} \cdot (lc) + \\ -0.892 \cdot (lit) + 6.815 \cdot 10^{-3} \cdot (dens) + 8.516 \cdot 10^{-3} \cdot (curv) + 1.565 \cdot 10^{-5} \cdot (flow) - 44.978 \quad (3.5.7)$$

La **figura 3.5.12** riporta per ogni cella la classificazione *a priori* (colonna *stab_all*), la previsione eseguita dal modello statistico (colonna *dis_2*) e la probabilità di appartenere al Gruppo *Stabile* associata alla previsione. Ad esempio nel caso della cella numero 51'407, si ha che la cella è stata classificata come Instabile ed effettivamente il modello la ri-classifica come *Instabile* con una probabilità di appartenere al Gruppo *Stabile* pari al 15%. Poiché i Gruppi sono solo due, la probabilità che la cella appartenga al Gruppo *Instabile* è il complemento a 100 della probabilità di appartenere al Gruppo *Stabile,* cioè 85%. Questo caso verrà valutato come un successo, poiché classificazione a *priori* e la classificazione a *posteriori* coincidono.
Viceversa ad esempio nel caso della cella numero 51'417, la previsione eseguita dal modello statistico non porta alla corretta ri-classificazione del caso stesso, poiché era stato dichiarato come appartenente al Gruppo *Stabile*, mentre il modello lo ha collocato nel Gruppo *Instabile*, con una probabilità del 80%, che è il complemento a uno della probabilità del 20% di appartenere al Gruppo *Stabile*, come riportato nella colonna *dis1_4*.

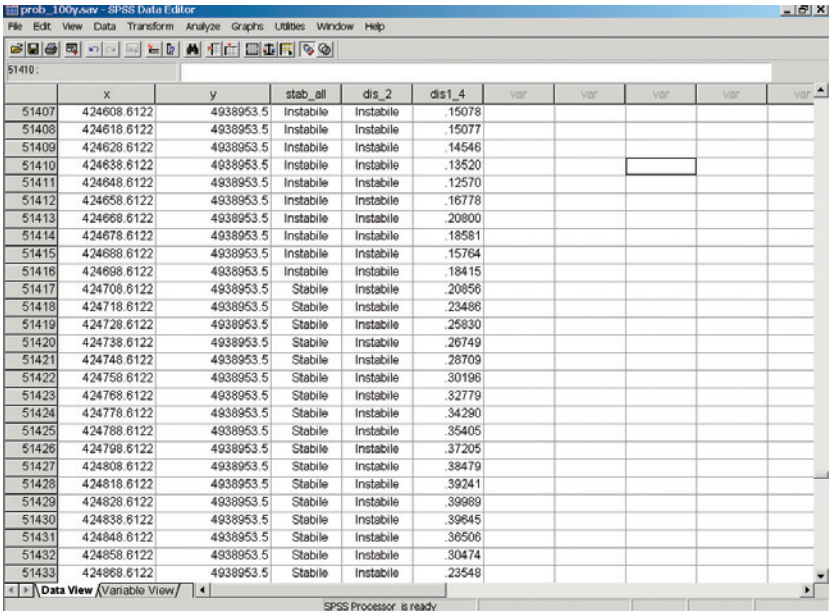
Tralasciando la corretta classificazione o meno, ciò che è importante in questi risultati è l'opportunità di valutare quanto un caso sia effettivamente *dentro* un Gruppo. Infatti, una probabilità di appartenenza al Gruppo *Stabile* pari all'80% rende ragionevolmente fiduciosi sul fatto che quella cella sia realmente stabile, mentre una probabilità intorno al 50% dà la misura della situazione di incertezza nell'effettiva classificazione in quel Gruppo. Dal punto di vista statistico, significa che le distribuzioni dei valori dei punteggi della Funzione Discriminante si sovrappongono e pertanto l'interferenza delle code rende difficoltosa la corretta attribuzione ad un Gruppo.

3.5.5 Metodo meccanico-idrologico

3.5.5.1 Descrizione del metodo

L'utilizzo di questo metodo implica l'applicazione di componenti modellistiche dedicate a:
1) analisi delle componenti meccanica e idrologica (modello di stabilità);
2) valutazione del contributo dell'infiltrazione delle piogge.

Per una determinata area il metodo consente di:
1) simulare gli effetti di un evento pluviometrico pregresso di cui è noto il solido di pioggia, in termini di perimetrazione di aree instabili;
2) calcolare le soglie critiche di pioggia responsabili dell'innesco di fenomeni franosi;
3) simulare gli effetti di un evento pluviometrico previsto che si caratterizza per una distribuzione spaziale presunta di valori di pioggia.


prob_100y.sav - SPSS Data Editor

File Edit View Data Transform Analyze Graphs Utilities Window Help

51410 :

	x	y	stab_all	dis_2	dis1_4	var	var	var	var	var
51407	424608.6122	4938953.5	Instabile	Instabile	.15078					
51408	424618.6122	4938953.5	Instabile	Instabile	.15077					
51409	424628.6122	4938953.5	Instabile	Instabile	.14546					
51410	424638.6122	4938953.5	Instabile	Instabile	.13520					
51411	424648.6122	4938953.5	Instabile	Instabile	.12570					
51412	424658.6122	4938953.5	Instabile	Instabile	.16778					
51413	424668.6122	4938953.5	Instabile	Instabile	.20800					
51414	424678.6122	4938953.5	Instabile	Instabile	.18581					
51415	424688.6122	4938953.5	Instabile	Instabile	.15764					
51416	424698.6122	4938953.5	Instabile	Instabile	.18415					
51417	424708.6122	4938953.5	Stabile	Instabile	.20856					
51418	424718.6122	4938953.5	Stabile	Instabile	.23486					
51419	424728.6122	4938953.5	Stabile	Instabile	.25830					
51420	424738.6122	4938953.5	Stabile	Instabile	.26749					
51421	424748.6122	4938953.5	Stabile	Instabile	.28709					
51422	424758.6122	4938953.5	Stabile	Instabile	.30196					
51423	424768.6122	4938953.5	Stabile	Instabile	.32779					
51424	424778.6122	4938953.5	Stabile	Instabile	.34290					
51425	424788.6122	4938953.5	Stabile	Instabile	.35405					
51426	424798.6122	4938953.5	Stabile	Instabile	.37205					
51427	424808.6122	4938953.5	Stabile	Instabile	.38479					
51428	424818.6122	4938953.5	Stabile	Instabile	.39241					
51429	424828.6122	4938953.5	Stabile	Instabile	.39989					
51430	424838.6122	4938953.5	Stabile	Instabile	.39645					
51431	424848.6122	4938953.5	Stabile	Instabile	.36506					
51432	424858.6122	4938953.5	Stabile	Instabile	.30474					
51433	424868.6122	4938953.5	Stabile	Instabile	.23548					

Data View / Variable View /

SPSS Processor is ready

Figura 3.5.12
Risultato dell'Analisi Discriminante in termini di probabilità

L'attività 1 è una fase propedeutica alle altre due, che sono tra loro indipendenti, poiché comprende anche la taratura dei parametri d'ingresso al modello. La fase 2, presentando come risultato i valori soglia di pioggia di innesco delle frane esprimibili in termini di tempi di ritorno, consente di connotare il territorio in termini di pericolosità spaziale e temporale. L'utilizzo in chiave previsionale del modello è rappresentato dalla terza delle possibili applicazioni succitate. Il margine di incertezza dei risultati di tale applicazione è legato:
- all'incertezza dei dati di base in ingresso al modello;
- ai limiti dell'approccio modellistico che, in quanto tale, semplifica il fenomeno naturale che vuole rappresentare;
- all'incertezza della previsione meteorologica.

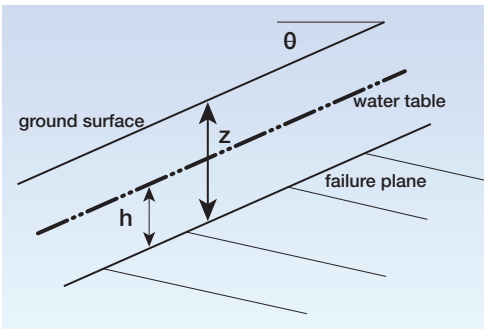
L'analisi dell'incertezza dei dati di base non vuole essere oggetto di questa trattazione. Si vuole invece focalizzare l'attenzione sugli altri due aspetti limitanti di cui si deve necessariamente tenere conto ai fini di un corretto utilizzo di tale metodologia nell'ambito della previsione delle frane.

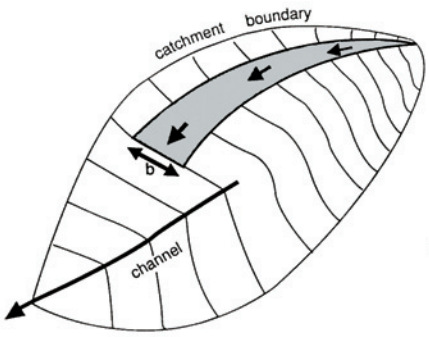
La componente inerente al modello di stabilità
L'approccio proposto è quello di Montgomery e Dietrich (Montgomery & Dietrich, 1994; Dietrich & Montgomery, 1998) integrato per la componente di coesione efficace.
Il metodo accoppia un modello idrologico ed uno di stabilità dei pendii all'equilibrio limite. Le principali assunzioni alla base della formulazione sono:
- pendio infinito;
- superficie di rottura piana parallela al pendio e localizzata al contatto tra coltre detritica alterata superficiale e substrato (roccia o deposito quaternario);
- criterio di resistenza del terreno secondo Mohr-Coulomb espresso in termini di tensioni efficaci;
- flusso stazionario parallelo al pendio;
- assenza di drenaggio profondo e di flusso nel substrato.

In particolare **(figura 3.5.13)** al crescere dell'altezza *h* dello strato di terreno saturo corrisponde una diminuzione della tensione agente normalmente al piano di rottura e, di conseguenza, della resistenza al taglio disponibile. Tale altezza viene riferita allo spessore totale della coltre detritica *(z)* mediante la relazione:

$$\frac{h}{z} = \frac{q}{T} \cdot \frac{a}{b \cdot \sin\theta} = W \qquad (3.5.8)$$

in cui:
q = pioggia netta infiltrata;
$T = K \cdot z \cdot \cos\theta$ = trasmissività idraulica;
K = coefficiente di permeabilità del terreno saturo;
a = area contribuente (totale delle celle con flusso diretto verso la cella in esame);
b = larghezza della sezione di deflusso;
θ = inclinazione del versante.
Nel prodotto al secondo membro nella relazione **3.5.8**, il primo fattore è definito termine idrologico, il secondo termine topografico; il significato di tale distinzione è più chiaro facendo riferimento agli schemi riportati in **figura 3.5.13.** Al fine di valutare con il massimo rigore possibile la componente di pioggia netta infiltrata (q) si fa riferimento ad un modello di infiltrazione dettagliato nel seguito.





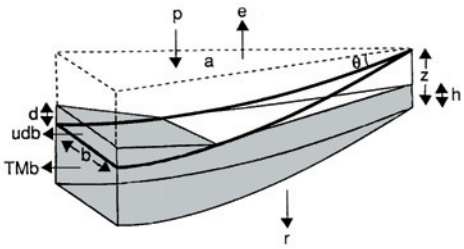


Figura 3.5.13
Valutazione del contributo idrologico (Dietrich & Montgomery, 1998). *h* e z sono rispettivamente gli spessori dello strato saturo e della massa potenzialmente mobilizzabile, mentre *b* è la larghezza della sezione di deflusso. La precipitazione infiltrata, *q*, è uguale alla precipitazione, *p*, meno l'evapotraspirazione, *e*, ed il drenaggio profondo, *r*

Con lo scopo di ottenere un'equazione che includa, oltre al modello idrologico, anche il modello di stabilità, il fattore di sicurezza *F*, nel caso di pendio indefinito con filtrazione parallela alla superficie, formulando la resistenza al taglio secondo il criterio di Mohr-Coulomb, può essere espresso (Skempton & De Lory, 1957):

$$F = \frac{c' + (\gamma - W \cdot \gamma_w) \cdot z \cdot \cos^2\theta \cdot \tan\phi'}{\gamma \cdot z \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta} \qquad (3.5.9)$$

c' = coesione efficace (intercetta dell'inviluppo di rottura);
z = profondità verticale della superficie di scivolamento;
γ = peso del suolo umido per unità di volume;
γ_w = peso dell'acqua per unità di volume;
ϕ' = angolo di resistenza al taglio.
In relazione alle ipotesi enunciate ed alla struttura del modello, la condizione di instabilità per ciascuna cella del dominio è espressa dalla seguente relazione:

$$\frac{a}{b} \geq \left[\frac{c'}{\gamma_w \cdot z \cdot \cos^2\theta \cdot \tan\phi'} + \frac{\gamma}{\gamma_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi'}\right) \right] \cdot \frac{T}{q} \cdot \sin\theta \qquad (3.5.10)$$

La condizione di instabilità espressa nella **(3.5.10)** viene verificata esclusivamente su quelle celle che non soddisfano le condizioni di assoluta stabilità e assoluta instabilità espresse rispettivamente nelle disequazioni **(3.5.11)** e **(3.5.12)**]:

(assoluta stabilità)

$$\tan\theta \leq \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma}\right) \tan\phi' \qquad (3.5.11)$$

(assoluta instabilità)

$$\tan\theta \geq \frac{c'}{\gamma \cdot z \cdot \cos^2\theta} + \tan\phi' \qquad (3.5.12)$$

La condizione di assoluta stabilità individua quegli elementi topografici che vengono classificati stabili anche quando il terreno risulti completamente saturo (W = 1). Occorre notare che la **(3.5.12)**, priva del termine di coesione, è definita in modo conservativo. La condizione di assoluta instabilità è definita per quegli elementi topografici che vengono classificati come instabili anche in assenza di pioggia.

Imponendo l'uguaglianza tra il primo ed il secondo termine della disequazione **(3.5.10)**, ovvero stabilendo un fattore di sicurezza pari all'unità e risolvendo l'equazione rispetto a q, si ottiene la soglia di infiltrazione critica che porta a condizioni di equilibrio limite:

$$q_{cr} = \left[\frac{c'}{\gamma_w \cdot z \cdot \cos^2\theta \cdot \tan\phi'} + \frac{\gamma}{\gamma_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi'}\right) \right] \cdot \frac{T \cdot b}{a} \cdot \sin\theta \qquad (3.5.13)$$

La componente inerente al contributo delle piogge: il modello di infiltrazione

Per la valutazione della componente di pioggia netta infiltrata, *q*, necessaria al modello di stabilità si è fatto riferimento al modello di infiltrazione di Green & Ampt (1911). Tale modello stima il tasso di infiltrazione ipotizzando un profilo di umidità nel suolo di tipo semplificato che consente di

ottenere una soluzione analitica dell'equazione che descrive il processo fisico dell'infiltrazione. Gli Autori ipotizzano che lungo la verticale, *z*, il fronte di infiltrazione sia orizzontale **(figura 3.5.14)** e separi una zona sovrastante satura, dove il contenuto d'acqua è quindi pari alla porosità ($\theta = n$), da quella inferiore non satura, dove il contenuto d'acqua sia pari a quello iniziale ($\theta = \theta_i$).

Le ipotesi semplificative introdotte non pregiudicano la rappresentatività del metodo in particolare quando si considerano suoli sabbiosi. Tali suoli sono generalmente caratterizzati da bassa capacità di ritenzione e minima risalita capillare; ciò porta ad avere fronti di infiltrazione con caratteristiche molto simili a quelli ipotizzati nel modello.
Detta *L* la distanza lungo la verticale *z* tra la superficie del suolo e la posizione del fronte di infiltrazione il volume infiltratosi, *F(t),* al tempo *t*, è dato da:

$$F(t) = L(n - \theta_i) = L(\Delta\theta) \qquad (3.5.14)$$

La velocità di infiltrazione viene rappresentata dalla legge di Darcy scritta per la sola zona satura, tra la superficie e il fronte di infiltrazione a profondità *L*:

$$q = -K\left(\frac{h_0 - h_1}{L}\right) \qquad (3.5.15)$$

dove: h_0 è il tirante idrico sulla superficie del suolo e h_1 è il carico agente sul fronte di infiltrazione somma del carico capillare, ψ, e del carico gravitazionale, *L*. Questa equazione si può quindi scrivere come:

$$q = -K\left(\frac{h_0 - (-\psi - L)}{L}\right) \qquad (3.5.16)$$

Generalmente h_0 è trascurabile rispetto ad *L* e pertanto:

$$q = -K\left(\frac{\psi + L}{L}\right) \qquad (3.5.17)$$

Sostituendo la **(3.5.14)** nella **(3.5.17)** si ottiene:

$$\frac{dF}{dt} = K\left(\frac{\psi\Delta\theta + F}{F}\right) \qquad (3.5.18)$$

Il volume infiltrato si ottiene integrando la **(3.5.18)** scritta nella forma seguente:

$$Kdt = dF\left(\frac{F}{F + \psi\Delta\theta}\right) = dF\left(\frac{F + \psi\Delta\theta - \psi\Delta\theta}{F + \psi\Delta\theta}\right) = dF\left(1 - \psi\Delta\theta\frac{1}{F + \psi\Delta\theta}\right) \qquad (3.5.19)$$

si ottiene quindi

$$[Kt]_0^t = \left[F - \psi\Delta\theta\ln(F + \psi\Delta\theta)\right]_0^F \qquad (3.5.20)$$

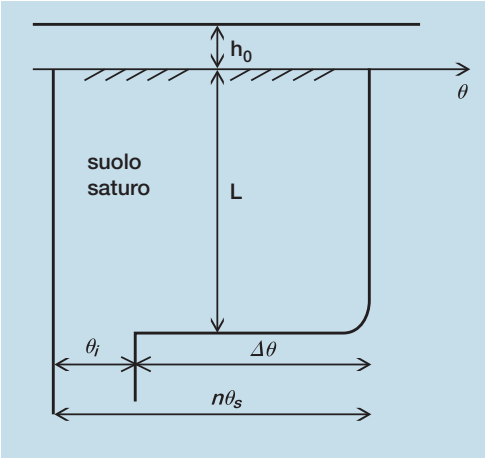


Figura 3.5.14
Schema di infiltrazione di Green & Ampt

$$Kt = F - \psi\Delta\theta\left[\ln(F + \psi\Delta\theta) - \ln(\psi\Delta\theta)\right] = F - \psi\Delta\theta\ln\left(1 + \frac{F}{\psi\Delta\theta}\right) \qquad (3.5.21)$$

Si noti che la **(3.5.21)** è un'equazione non lineare in *F*, che può essere risolta, per esempio, con metodi iterativi.
Il modello così costruito presuppone che sulla superficie del suolo esista una sottile lama d'acqua (pozzangheramento) e che tutta l'acqua che potenzialmente potrebbe infiltrarsi sia effettivamente disponibile. Per tenere in considerazione il fatto che per intensità di pioggia basse, comunque minori del tasso di infiltrazione potenziale, non si ha pozzangheramento, è necessario applicare una correzione al metodo di Green & Ampt (Mein & Larson, 1973).
Ipotizzando che prima del pozzangheramento tutta la pioggia si infiltri e che il pozzangheramento inizi quando il tasso di pioggia supera la capacità di infiltrazione del suolo, considerando inoltre che il tasso di infiltrazione potenziale è legato al volume infiltrato *(F)* secondo la **(3.5.18)**, il transitorio iniziale è facilmente descrivibile. Ad esempio considerando un tasso di pioggia costante, *i,* all'inizio dell'evento si ha F = i·t fintantoché non si ha i = dF/dt. L'istante di inizio pozzangheramento, t_p, si ottiene dalla **(3.5.18)** sostituendo:

$$i = K\left(\frac{\psi\cdot\Delta\theta + i\cdot t_p}{i\cdot t_p}\right) = K\left(1 + \frac{\psi\cdot\Delta\theta}{i\cdot t_p}\right) \qquad (3.5.22)$$

da cui:

$$t_p = \frac{K\cdot\psi\cdot\Delta\theta}{i\cdot(i - K)} \qquad (3.5.23)$$

A partire dall'istante di pozzangheramento è possibile applicare il metodo di Green & Ampt come descritto in precedenza. Per l'applicazione del modello proposto si rende necessaria la stima di tre parametri che caratterizzano le proprietà idrologiche del suoli di interesse.

Questi parametri compaiono nelle equazioni utilizzate ed hanno una forte connotazione fisica e, come visto sono: la porosità, *n,* la conducibilità idraulica, *K,* che corrisponde alla permeabilità del suolo saturo, la tensione matriciale al fronte di infiltrazione, ψ, che corrisponde alla risalita della frangia capillare satura. La disponibilità di informazioni pedologiche di dettaglio ed una nutrita bibliografia in merito (Rawls *et al.,* 1983) consente di desumere il valore di questi parametri evitandone la calibrazione. A questo proposito l'incertezza più elevata riguarda la stima del valore di *K.* Il modello meccanico idrologico infatti mostra un'elevata sensitività a tale parametro mentre una sua valutazione a scala di versante o a scale ancora maggiori risulta estremamente difficoltosa. L'influenza degli apparati radicali nel suolo e della macroporosità costituisce un elemento di difficile quantificazione data la sua elevata aleatorietà e variabilità spaziale. In questo contesto, il parametro *K* assume il significato di risposta integrale del suolo e come tale riassume in sé l'insieme delle diverse caratteristiche del fenomeno di infiltrazione richiedendo un più attenta fase di taratura.

Calcolo della pioggia lorda *(P_{cr})* assegnata l'infiltrazione *(q_{cr})*

Una volta determinato il tasso di infiltrazione critico sulla base della soluzione del problema geotecnico **(3.5.13)** si deve ricercare la soluzione del calcolo della pioggia lorda che lo genera. La soluzione di questo problema inverso risulta essere meno immediata rispetto alla soluzione del problema diretto a causa della non linearità del modello idrologico di infiltrazione. Si rende pertanto necessario utilizzare un processo di soluzione ricorsivo: si ipotizza un valore della pioggia lorda, si risolve il problema diretto, si confronta infine se l'infiltrazione così calcolata è uguale, a meno di una tolleranza, all'infiltrazione voluta. Se il confronto non dà esito positivo si corregge la pioggia incrementandola o diminuendola secondo il caso (il legame tra pioggia e infiltrazione è monotono, maggiore è la pioggia e maggiore risulta l'infiltrazione) e si riesegue la procedura prima descritta fino ad ottenere la soluzione.
Non si è resa necessaria una particolare ottimizzazione del processo di soluzione ricorsivo in quanto i tempi di calcolo non sono elevati ed il calcolo converge in poche iterazioni.

3.5.5.2 Considerazioni sull'applicabilità del metodo

I risultati che si ottengono dal modello accoppiato meccanico-idrologico presentano alcuni limiti che devono essere tenuti in considerazione nell'analisi dei risultati. In particolare l'assunzione di un flusso idrico nel versante di tipo stazionario, in equilibrio con l'afflusso medio nelle 24 ore precedenti, implica la necessità di considerare eventi pluviometrici di lunga durata superiori almeno alle 24 ore che non siano preceduti da periodi prolungati privi di precipitazioni. Solo in questo modo l'ipotesi di base del modello può essere ritenuta plausibile. Inoltre il transitorio legato all'infiltrazione della pioggia nel pendio viene sostanzialmente trascurato. Tale fenomeno è fortemente condizionato dalle piogge di forte intensità e breve durata e deve essere trattato e descritto con approcci modellistici dedicati.

Nell'ambito della previsione di scenario d'evento, i risultati ottenuti consentono la definizione di indici di pericolosità utili nel medio-lungo periodo (anni o decenni) e legati al tempo di ritorno caratteristico della pioggia critica in ciascuna porzione del territorio. La pericolosità così derivata tuttavia non deve essere intesa in termini assoluti in quanto conservativa. Come detto, le piogge critiche calcolate devono infatti essere precedute da precipitazioni sufficientemente prolungate per essere veramente causa di innesco di movimenti franosi.

Nell'ambito delle previsioni a breve termine (scala oraria), le osservazioni pluviometriche dell'evento meteorologico in corso non consentono l'applicazione diretta del modello con sufficiente anticipo per la valutazione dello scenario di pericolosità a causa delle limitazioni dovute all'assunzione di stazionarietà del flusso idrico nel versante del modello che, come si è detto, richiede piogge di durata superiore alla 24 ore.
Nell'ambito delle previsioni a scala giornaliera, il modello può essere utilizzato come strumento a supporto delle attività di allertamento poichè è in grado comunque di evidenziare i settori di versante maggiormente vulnerabili. Inoltre un utilizzo inverso del modello, cioè l'impiego delle simulazioni per determinare soglie pluviometriche d'innesco dei fenomeni franosi, può affinare soglie di derivazione empirica.

3.5.5.3 Applicazione del metodo ai fenomeni di colamento rapido

Il metodo è stato sperimentato con successo in diversi contesti geomorfologici per una serie di eventi alluvionali:
- agosto 1978, Val Vigezzo;
- novembre 1994, Alta Langa;
- giugno 2002, Valle Cervo.

La sperimentazione ha dimostrato la robustezza della metodologia nella corretta individuazione di aree con diversa propensione al dissesto, apprezzabili anche alla luce dei limiti di applicazione dettagliati nelle pagine precedenti.
Di seguito vengono illustrati i risultati della sperimentazione per il caso del contesto collinare delle Langhe, correlato all'evento alluvionale del

novembre 1994.
La simulazione è stata condotta su piattaforma GIS *raster based,* ovvero discretizzando il dominio spaziale in studio in celle a maglia quadrata di 10 m di lato.
Dell'evento alluvionale del novembre 1994 erano note:

- le altezze di pioggia (precursore meteorologico);
- l'ubicazione delle aree instabilizzate per effetto delle piogge.

Dato il precursore meteorologico, il modello è stato alimentato con quattro diverse configurazioni di parametri e variabili e se ne sono ricavate altrettante simulazioni di scenari di instabilità che sono state messe a confronto con la realtà delle aree in frana del 1994. Il confronto tra accaduto e previsione ha consentito di selezionare la configurazione ottimale dei parametri in ingresso al modello (taratura) e di passare alla fase del lavoro inerente alla valutazione delle soglie di infiltrazione critica di innesco **(figura 3.5.15)**.

In **tabella 3.5.5** sono riportati i risultati della simulazione effettuata con la configurazione ottimale dei dati. A fronte di un buon risultato di previsione delle celle in frana, si ottengono ottime previsioni delle celle stabili e totali. Si noti che il metodo tende a sovrastimare l'instabilità (cfr. *totale delle celle valutate instabili*) e tale peculiarità è imputabile all'ipotesi di stazionarietà del flusso idrico nel versante discussa nei paragrafi precedenti.
Poiché il riconoscimento e la georeferenziazione delle frane dell'evento di riferimento sono stati condotti principalmente mediante fotointerpretazione, si è voluto tenere conto, nelle procedure di calcolo del successo della simulazione, anche delle inesattezze cartografiche contestuali a tale modalità di rilevamento.

TABELLA 3.5.5 RISULTATI DELLA SIMULAZIONE

INDICATORE	VALORE
Totale celle	4'707'028
Totale delle celle in frana dell'evento di riferimento	199'522
Totale delle celle valutate instabili dal modello	1'412'108
Totale delle celle stabili dell'evento di riferimento	4'507'506
Totale delle celle valutate stabili dal modello	3'294'920
Percentuale delle celle in frana dell'evento di riferimento previste correttamente dal modello [%]	60.4
Percentuale celle stabili dell'evento di riferimento previste correttamente dal modello [%]	71.4
Percentuale del successo totale del modello [%]	70.9
Percentuale celle instabili previste correttamente (valutazione con finestra mobile) [%]	79.8

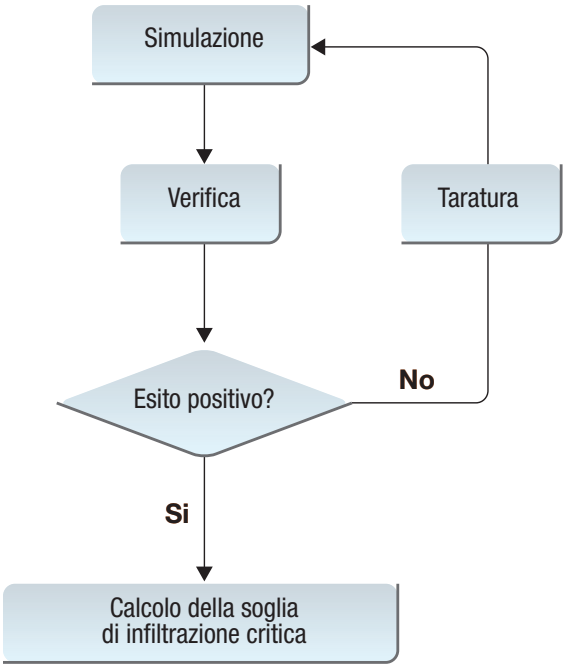


Figura 3.5.15
Schema di valutazione delle soglie di infiltrazione critica. Occorre tenere presente che l'intero ciclo elaborativo può essere ripetuto qualora dall'analisi delle soglie di infiltrazione critica emergano incongruenze con i valori di innesco dell'evento dedotti, ad esempio, attraverso metodi empirici

È così stata messa a punto una modalità alternativa di valutazione della bontà dello scenario dissestivo riprodotto dal modello. In sintesi tale modalità prevede che il successo delle celle instabili venga calcolato non verificando la precisa corrispondenza spaziale tra cella in frana e cella prevista instabile dal modello come viene fatto di norma, ma utilizzando l'espediente di una finestra mobile circolare di raggio 15 m centrata su ciascuna cella in frana, all'interno della quale verificare la presenza di almeno una cella instabile calcolata dal modello.

Con tale modalità alternativa la percentuale di celle in frana previste correttamente dal modello sale al 79.7%, indicando che esso, per un'elevata percentuale dei casi, individua correttamente le aree connotate da condizioni di equilibrio limite tali da determinarne la mobilizzazione delle coltri superficiali di terreno per altezze di pioggia pari a quelle dell'evento alluvionale del 1994.

Uno degli indicatori significativi per valutare la bontà del metodo è altresì, come suggerito dagli stessi autori (Dietrich & Montgomery, 1998), il rapporto q/T, ovvero il valore di pioggia efficace normalizzato rispetto alla trasmissività. Secondo gli autori il metodo ha successo se:

1) la maggior parte delle nicchie di frana dell'evento di riferimento si verifica nelle celle caratterizzate da valori di q/T bassi e coerenti con le soglie di innesco note per l'area in studio;
2) le nicchie dell'evento di riferimento mostrano una maggior concentrazione intorno a un dato valore di q/T rispetto ad un campione di nicchie generate in maniera completamente casuale.

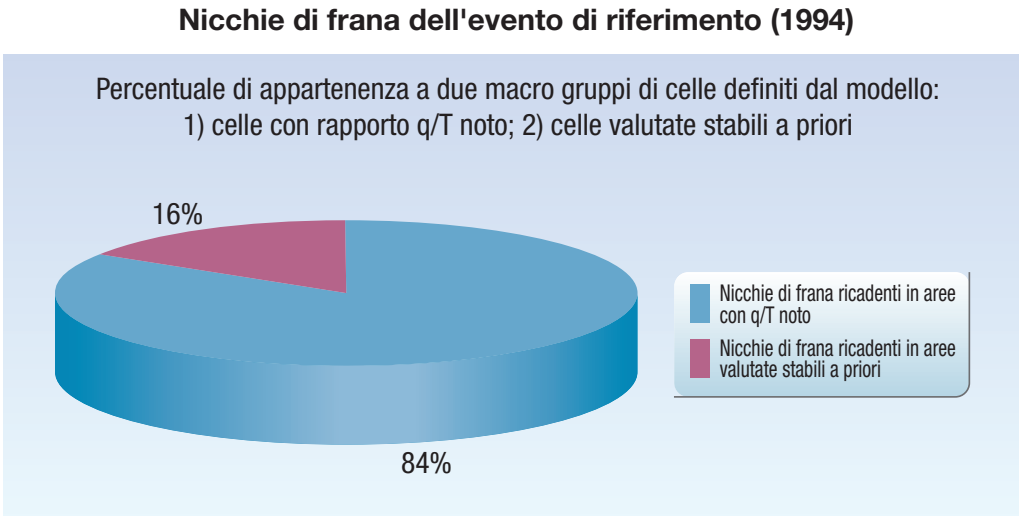
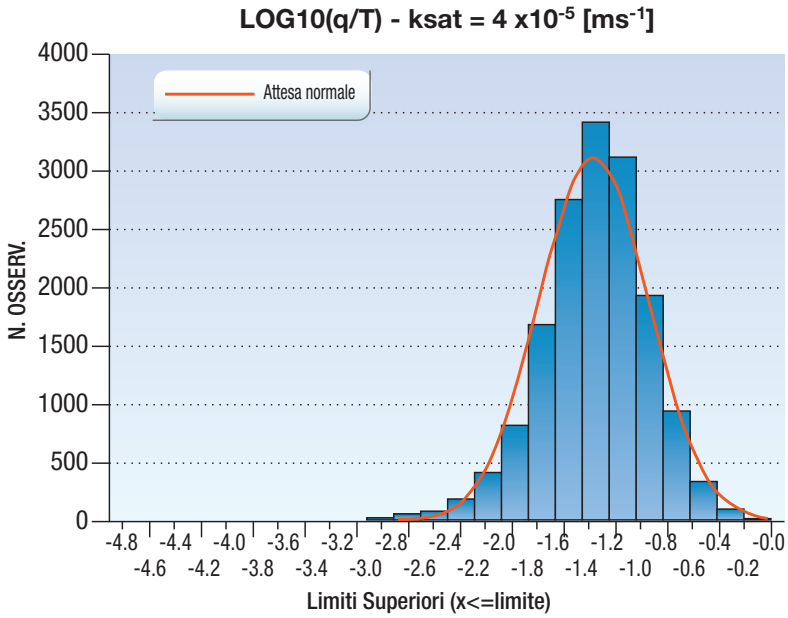


Figura 3.5.16
Percentuali di nicchie di frana ricadenti nei due macro gruppi valutati dal modello: celle valutate stabili a priori; celle per le quali è noto il valore di *q/T*

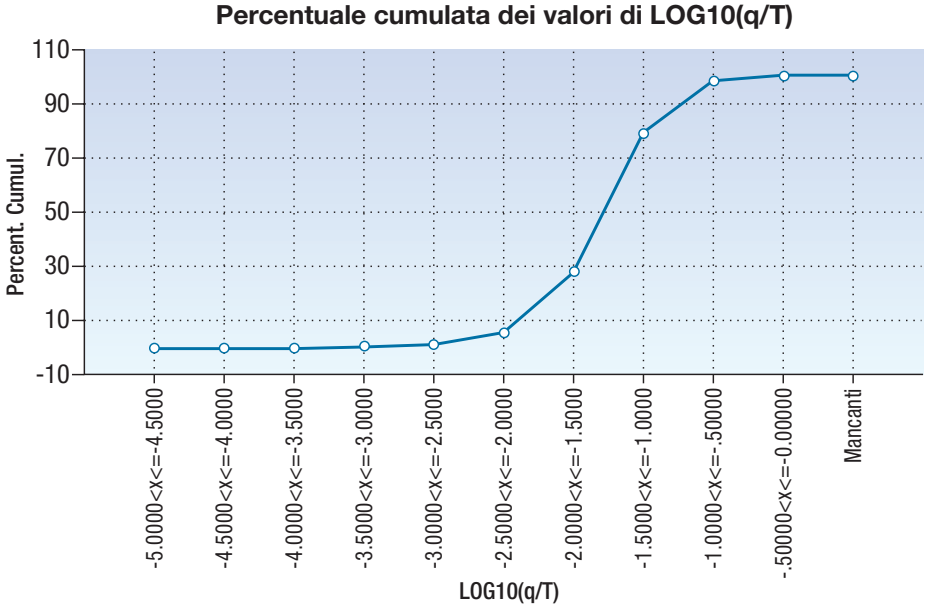


Analizzando nello specifico le circa 19'000 nicchie di frana del 1994 identificabili distintamente dal corpo d'accumulo, si può osservare che **(figura 3.5.16)**:

1) l'84% è ubicato in aree non giudicate stabili a priori dal modello per le quali è noto il valore di *q/T*;
2) il 16% di tali nicchie insiste su aree valutate stabili a priori dal modello.

Le frequenze dei valori di *q/T* per le nicchie non insistenti su celle valutate stabili a priori e trasformati per comodità di rappresentazione in forma logaritmica, sono riportati in **figura 3.5.17**. In **figura 3.5.18** le stesse frequenze sono riportate cumulate. La mediana dei $\log_{10}(q/T)$, valore di soglia del 50% degli inneschi, risulta pari a circa -1.3. La distribuzione inoltre presenta il 60% ed il 70% circa dei dissesti con valori di $\log_{10}(q/T)$ rispettivamente inferiori a -1.2 e -1.1.

Figura 3.5.18
Frequenze cumulate per i valori di log10(q/T) per le nicchie di frana dell'evento di riferimento

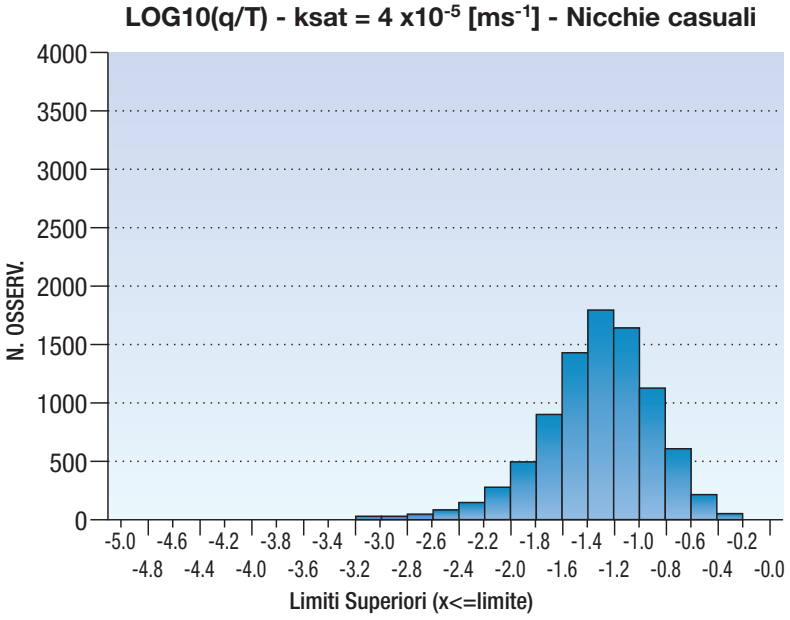


Considerando che la potenza media della coltre di suolo per l'area in studio risulta intorno a 0.7 m, dato un valore medio di permeabilità satura di $4 \cdot 10^{-5}$ m s^{-1}, si ottengono per valori di $\log_{10}(q/T)$ di -1.3, -1.2 e -1.1, altezze di pioggia critica rispettivamente di 124 mm/24h, 152 mm/24h e 192 mm/24h, coerenti con le soglie pluviometriche di innesco ricavate mediante metodi empirici (AA.VV., 2005).

Come è stato sopra menzionato uno dei test della robustezza del modello consiste nel confrontare le distribuzioni di frequenza del valore $\log_{10}(q/T)$ relative alle nicchie delle frane dell'evento di riferimento (istogramma di **figura 3.5.17**) ad un campione equivalente di nicchie generate in maniera casuale **(figura 3.5.19)**.
Da tale confronto risulta evidente che le frane osservate mostrano una più alta concentrazione in corrispondenza dei valori centrali della distribuzione; questo è interpretabile come una prova del successo del modello.
Un modo per comprendere meglio questa affermazione è quello di osservare che mentre per le frane osservate solo il 16% del campione risulta collocato in aree giudicate stabili a priori dal modello, per il campione di nicchie casuali questo quota sale al 53%.
Un ulteriore approfondimento d'analisi è stato dedicato al 16% di frane ricadenti nelle aree giudicate stabili a priori dal modello.

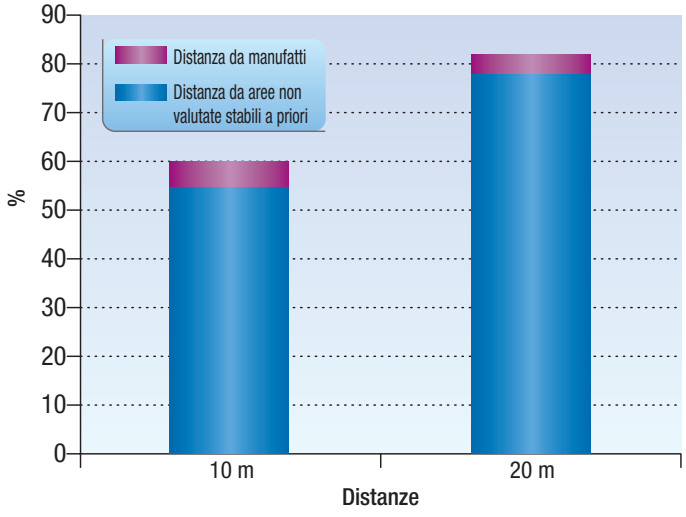
Attraverso un'analisi di prossimità, è stato verificato che il 55% di queste è collocato ad una distanza massima di 10 m da aree non giudicate stabili a priori; un ulteriore 5% risulta a non più di 10 m da infrastrutture stradali e/o edifici; se si considera una distanza massima di 20 m, la percentuale di nicchie prossime ad aree non giudicate stabili a priori arriva al 78%; un ulteriore 4% di frane risulta a non più di 20 m da manufatti **(figura 3.5.20)**.
Queste cifre sembrano indicare che una cospicua parte delle frane ricadenti in aree giudicate stabili a priori dal modello sono interpretabili come inesattezze cartografiche ed in misura minore probabilmente imputabili anche all'impatto negativo sul territorio delle opere antropiche di cui il modello digitale del terreno non ha tenuto conto.

Figura 3.5.20
Risultati dell'analisi di prossimità delle nicchie di frana ubicate in aree valutate stabili a priori dal modello.
Sono stati considerati due casi:
1) percentuali di nicchie di frana per distanze inferiori a 10 m e 20 m dal confine con aree per cui è noto il valore di *q/T*;
2) percentuali di nicchie di frana per distanze inferiori a 10 m e 20 m da manufatti, calcolate sulle nicchie che non rientrano nel caso 1).



Contributi
Si ringraziano il prof. Pasquale Versace e l'ing. Giovanna Capparelli, Dipartimento Difesa del Suolo, Università della Calabria, per il prezioso contributo nello sviluppo dell'argomento inerente al Metodo FlalR.
Si ringrazia Francesco Palamara, Area Previsione e Monitoraggio Ambientale, Arpa Piemonte, per il fondamentale contributo nell'attività di sviluppo del software sperimentale di visualizzazione in tempo reale della criticità sui versanti indotta da intense precipitazioni.
Si ringraziano il dott. Ferruccio Forlati, il dott. Pierfranco Sorzana, il dott. Dario Fontan, il dott. Fabrizio Piana e il dott. Michele Morelli per il contributo dedicato alla fase conoscitiva delle tipologie di frana del contesto collinare delle Langhe.

Figura 3.5.19
Istogramma di frequenza di $\log_{10}(q/T)$ per un campione di nicchie generate in maniera casuale



Bibliografia

I lavori contrassegnati da asterisco non sono citati esplicitamente nel testo.

AA.VV. (2002) *Progetto Interreg II Italia Svizzera 1994-99 – Collegamento delle reti di rilevamento e condivisione delle esperienze e delle conoscenze per la gestione del rischio idrogeologico.* Unione Europea – Regione Piemonte – Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana.

AA.VV. (2005), *Note Illustrative alla Carta di Pericolosità per Instabilità dei Versanti del Foglio 1:50.000 Dego,* Arpa Piemonte – Apat

Cancelli A. & Nova R. (1985), *Landslides in soil debris cover triggered by rainstorm in Valtellina (Central Alps, Italy).* Proc. 4th Int. Conf. on Landslides, Tokyo, pp. 1-267, 272.

Cannon S.H. & Ellen S.D. (1985), *Rainfall conditions for abundant debris avalanches, San Francisco Bay region, California.* California Geology, vol. 38 (12): pp. 267-272.

Ceriani M., Lauzi S. & Padovan N. (1994), *Rainfall thresholds triggering debris flows in the alpine area of Lombardia Region Central Alps – Italy.* In: "Man and Mountain"94", I Convegno internazionale per la protezione e lo sviluppo dell'ambiente montano, pp. 123-139.

Clarizia M., Gullà G. & Sorbino G. (1996), *Sui meccanismi di innesco dei soil slip.* Atti del Convegno Internazionale *La prevenzione delle catastofi idrogeologiche: il contributo della ricerca scientifica*, Alba (CN), 5-7 Novembre 1996, vol. 1, pp. 585-597.

*Dietrich W.E. & Montgomery D.R. (1998), SHALSTAB: *A digital terrain model for mapping shallow landslide potential.* Technical Report by NCASI - http://ist-socrates.berkeley.edu/~geomorph/shalstab/

Govi M., Mortara G. & Sorzana P. (1985), *Eventi idrologici e frane.* Geol. Appl. e Idrol., XVIII, pp. 3.

*Green W.H. & Ampt G.(1911), *Studies of soil physics, Part I – The flow of air and water through soils.* The Journal of Agricultural Science vol. 4, pp. 1-24.

Mein, R. G., and Larson, C. L. 1973. *Modeling Infiltration During Steady Rain*, Water Resources Research, vol. 2, pp. 384-394.

*Montgomery D.R. & Dietrich W.E. (1994), *A physically based model for the topographic control of shallow landsliding.* Water Resources Research, vol. 30, pp. 1153-1171.

Progetto IFFI (2004) http://www.webgis.csi.it/arpagis/index.htm; http://www.apat.gov.it/site/it-IT/Progetti/IFFI/.

*Rawls W.J., Brakensiek D.L. & Miller N. (1983), *Green-Ampt infiltration parameters from soils data.* Journal of Hydraulic Engineering 109(1), pp. 62-70.

Sirangelo B. & Versace P. (1992), *Modelli stocastici di precipitazione e soglie pluviometriche di innesco dei movimenti franosi.* Atti del XXIII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Firenze, vol. 3, pp. D361-D373.

Sirangelo B., Liritano G. & Versace P. (1996), *Il preannuncio dei movimenti franosi innescati dalle piogge. Valutazione della probabilità di mobilizzazione in presenza di indeterminatezza nell'identificazione del modello FLaIR.* Atti del XXV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Torino, vol. 3, pp. 378-391.

Sirangelo B. & Versace P. (2002), *Un modello probabilistico per la predizione in tempo reale delle altezze di precipitazione a scala oraria.* Atti del XXVIII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Potenza, vol. 2, pp. 395-414.

*Sirangelo B., Capparelli G. & Versace P. (2002), *Modellazione idrologica dei movimenti franosi innescati dalle piogge.* Atti del Convegno "Conservazione dell'Ambiente e Rischio Idrogeologico", Assisi, pp. 11-12.

*Skempton A.W. & De Lory F.A. (1957), *Stability of natural slopes in London Clay, 4th* Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., vol. 2, pp. 378-381.

Versace P., Sirangelo B. & Capparelli G. (2002), *Forewarning model of the landslides triggered by rainfall.* Atti del convegno "New Trends in Hydrology" – 1st Italian – Russian Workshop", Rende (CS), Italy.

Wieczorek G.F. & Sarmiento J. (1983), *Significance of storm intensity-duration for triggering of debris flows near La Honda, California,* Geological Society of America Abstracts with Programs, vol. 15, n. 5, pp. 289.

4

L'incertezza dei metodi di previsione e valutazione

4.1 Limiti e vincoli della previsione

«...In quell'impero, l'Arte della Cartografia raggiunse una tale perfezione che la mappa di una sola provincia occupava tutta una Città e la mappa dell'Impero tutta una Provincia. Col tempo codeste mappe smisurate non soddisfecero e i Collegi dei Cartografi eressero una mappa dell'Impero che uguagliava in grandezza l'Impero e coincideva puntualmente con esso. Meno dedite allo studio della cartografia, le generazioni successive compresero che quella vasta Mappa era inutile e non senza empietà la abbandonarono all'Inclemenze del Sole e degl'Inverni. Nei deserti dell'Ovest rimangono lacere rovine della Mappa, abitata da animali e mendichi; in tutto il paese non è altra reliquia delle discipline geografiche».

Da Jeorge Luis Borges, *L'artefice,* Ed. Mondadori i Meridiani, vol. 1, p. 1253

Questo brano di Borges bene illustra l'impossibilità di rappresentare tutti gli aspetti della realtà (l'Impero) con un modello (la Mappa). Infatti, lo studio di un oggetto reale dal punto di vista scientifico ha bisogno di considerare un piccolo numero di aspetti, trascurando tutti gli altri. I problemi principali e le assunzioni sulle relazioni fra loro costituiscono il modello.
L'impiego di modelli per riprodurre il mondo naturale deriva quindi dalla necessità di dotarsi di strumenti in grado di cogliere differenti aspetti in maniera quanto più completa e verosimile. Alla base dei modelli c'è appunto il concetto di *verosimiglianza*: si cerca di ricostruire un fenomeno, un processo o un effetto nella maniera più conforme alla realtà, adottando approcci semplificati.
Proprio per la natura intrinsecamente semplificata, i modelli, siano essi fisici, numerici, deterministici, empirici o statistici, si basano su ipotesi di partenza che riducono il grado di complessità della realtà affinché possa emergere più chiaramente quanto si vuole rappresentare. Ad esempio, una classica semplificazione di questo tipo, è lo studio della caduta di un grave per il quale si trascura l'effetto dell'aria. Questo non significa che i modelli siano di per sé semplicistici, ma possono essere complicati e sofisticati. Dunque, la distinzione tra *complesso* e *complicato* è uno dei principali fattori di scelta nell'adozione di un modello rispetto ad un altro.

Nello studio dei processi morfo-dinamici (frane ed attività fluvio-torrentizie), l'impiego di modelli nasce, come già illustrato nel capitolo 1, dall'esigenza di rispondere innanzi tutto alle classiche domande "perché accadrà?", "come accadrà?", "dove accadrà?" e "quando accadrà?".
Sfortunatamente, la predizione di *dove* e *quando* non sempre è possibile. Questo non solo è particolarmente evidente nel caso delle frane, ma anche per altri fenomeni naturali come, per esempio, i terremoti. La teoria della tettonica a placche ha permesso di capire perché accadono i terremoti ed in particolare perché gli epicentri sono concentrati in tutto il mondo in zone ristrette, ma si è ancora lontani dalla previsione di dove e quando il prossimo terremoto avrà luogo. La ragione del perché è difficile predire *dove* e *quando* accadrà un fenomeno naturale è che tali risposte dipendono dalla conoscenza esatta di un numero di parametri e di condizioni di contorno che è conosciuto molto approssimativamente. L'incertezza che deriva da questi problemi rende tale previsione molto difficoltosa se non impossibile.

La scelta di un modello deve basarsi innanzi tutto sull'obiettivo che si vuole perseguire e sulla difficoltà nel reperire tutti gli "ingredienti" necessari al suo funzionamento. Esiste comunque la possibilità di effettuare una previsione senza una comprensione diretta ed approfondita della natura del fenomeno come nel caso dei fenomeni ripetitivi. Qualunque sia l'approccio seguito, la risposta di un modello è caratterizzata perciò da incertezze non eliminabili. Il grado di incertezza che si è disposti ad accettare è una funzione del problema ma anche delle domande formulate da parte dell'autorità decisionale.
Esiste comunque la possibilità di effettuare una previsione senza una comprensione diretta e completa della natura del fenomeno per alcune tipologie di eventi naturali, quali gli eventi alluvionali. Essi presentano, in un quadro meteo-climatico mediterraneo, caratteri comuni, manifestandosi ciclicamente con una certa regolarità, con maggiore o minore intensità e con meccanismi simili, determinando effetti al suolo di norma confrontabili.
Anche se la variabilità spaziale di tali eventi è tale per cui la loro previsione deterministica risulta impossibile, è tuttavia lecito basare un sistema di allertamento sulla conoscenza di tali caratteristiche. In funzione del riconoscimento di analoghi precursori il sistema di allertamento prevede gli effetti in termini di entità e localizzazione, secondo un meccanismo che incroci gli indicatori naturali derivati dalla misura delle precipitazioni con i fattori antropici incombenti sul territorio.
Le strategie messe in campo dai servizi di prevenzione del rischio idrogeologico hanno affrontato queste problematiche su più fronti: quello della comprensione dei processi geologici, quello del-

la modellazione geologica, geotecnica, idrologica ed idraulica, ritenendo l'idrometeora il principale fattore di innesco.
Ciascuno degli approcci porta con sé differenti livelli di incertezza, legati non solo allo stato delle conoscenze o alla razionalità del metodo, ma anche ad impressioni soggettive connesse alle aspettative di risultato. Considerando la questione da una prospettiva di causa-effetto, è stata attribuita un'affidabilità decrescente dalla modellistica idraulica considerata ormai prassi consolidata nella previsione della propagazione delle onde di piena lungo i grandi corsi d'acqua, alla previsione meteorologica, attendibile verso la stima degli eventi a scala sinottica, alla valutazione della pericolosità connessa all'instabilità dei versanti, talora puntuale sui grandi fenomeni monitorati.

Il processo prende avvio dagli eventi alluvionali della fine degli anni Settanta (pinerolese-TO, Ossola-VB): le conclusioni dei rapporti dell'attività del nascente Servizio Geologico regionale evidenziavano lo stretto rapporto tra eventi meteorologici e fenomeni di dissesto in una relazione causa-effetto, sulla cui base impostare procedure di previsione con finalità di allertamento. L'analisi statistica degli eventi del passato, evidenziando da una parte il ciclico ripetersi di situazioni di criticità in associazioni ricorrenti di bacini (Tanaro, Sesia, Dora Baltea, Toce, Orco, Stura di Lanzo, Scrivia), e dall'altra la differente risposta di ciascuno di essi alle sollecitazioni pluviometriche, ha guidato la suddivisione del territorio piemontese in aree omogenee dal punto di vista della risposta. La riorganizzazione delle misure pluviometriche del Servizio Idrografico Nazionale, completata nel 1986 con la revisione critica, digitalizzazione e pubblicazione dell'archivio dei dati dei bacini piemontesi dal 1913, ha permesso di alimentare le opportune tecniche di analisi per la definizione delle caratteristiche peculiari delle precipitazioni su ciascuna di esse.
L'approccio iniziale è assai semplice: legare gli effetti di un evento alla precipitazione, quale parametro più sinteticamente legato all'evento stesso. Nella fattispecie si è direttamente correlata la sua misura e, conseguentemente la sua previsione numerica, alla possibilità di verificarsi di un pericolo naturale, approntando un sistema di soglie pluviometriche funzionale agli scopi di allertamento di una struttura di prevenzione. Il territorio regionale è stato suddiviso in zone pluviometricamente omogenee (zone di allertamento) per le quali sono state identificate distinte soglie, rispondenti all'esigenze di spazializzare in maniera conveniente il precursore individuato.

Gli eventi alluvionali del 1993 e del 1994 hanno dimostrato l'utilità e l'efficacia dell'approccio causa-effetto. Gli eventi sono stati previsti correttamente nella loro complessità spazio-temporale ed i quantitativi sicuramente valutati coerentemente con le soglie di innesco dei fenomeni. Tuttavia, l'analisi dettagliata delle singole criticità locali evidenzia come esse siano conseguenti a situazioni parossistiche particolari che implicano una non chiara complicazione del meccanismo causale.
L'efficacia della previsione basata sull'approccio causa-effetto è insita nel rapporto diretto tra il verificarsi dell'evento ed il parametro che riassume in sé le cause, senza che sia necessario conoscere tutte le leggi che lo governano. In ciò si ha consapevolezza che molte situazioni sfuggono alla previsione e non è infrequente che a parità di condizioni non si abbia la stessa risposta di una zona a parità di soglie prefissate.
Tuttavia, come si è visto nel capitolo dedicato agli indicatori di pericolosità pluviometrica, il metodo è soddisfacente; alle soglie pluviometriche individuate per le regioni Piemonte, Emilia Romagna e Calabria per il preannuncio di eventi associati ad uno scenario di moderata ed elevata criticità per rischio idrogeologico ed idraulico, corrispondono tempi di ritorno coerenti con le ricorrenze documentate. In questi casi, il rapporto tra falsi allarmi e mancati allarmi risulta compatibile con una gestione efficace dei sistemi di allertamento.

La Direttiva del P.C.M. del 27/02/2004 impone pertanto ad ogni Centro Funzionale di stabilire i propri livelli di criticità *"in base al superamento da par-*

te delle precipitazioni, previste e/o strumentalmente osservate, delle corrispondenti soglie pluviometriche differenziate nelle diverse zone di allerta sulla base di criteri che tengono conto del numero di aree a rischio elevato o molto elevato per unità di superficie presenti in ciascuna zona di allerta e dell'estensione di territorio da queste coinvolto relativamente all'estensione delle zone di allerta stessa". Tuttavia identifica anche chiaramente il limite della previsione meteorologica ed in particolare della sua previsione modellistica a rappresentare direttamente gli effetti al suolo a prescindere da qualsiasi valutazione di questi ultimi.

Il primo caso studio presentato, relativo alle intense precipitazioni sul bacino del Torrente Scrivia del settembre 2004 evidenzia il limite del LAM (Modello ad Area Locale) nel risolvere, in termini quantitativamente corretti alla scala dell'area di allertamento, una situazione ben riconoscibile alla scala sinottica. L'episodio si verifica alla fine dell'estate 2004, caratterizzata da un persistente flusso umido sud-occidentale, sul quale ripetute avvezioni di aria fredda hanno innescato un susseguirsi di eventi di precipitazione intensa. Tali situazioni hanno determinato una serie di avvisi per fenomeni temporaleschi perlopiù sulle aree settentrionali del Piemonte, con quantità previste dal modello ad area limitata al limite della soglia, in genere verificati ma con valori mediamente più bassi di quelli attesi.

Nell'episodio del 15 settembre si evidenzia invece come diverse concause hanno concorso a formulare una previsione quantitativa di precipitazione, in termine di massimi valori attesi, molto inferiore a quella osservata, senza l'emissione di alcuna nota. Un piccolo errore nella sinottica del modello a grande scala ha indotto nel modello ad area limitata uno spostamento dell'area di precipitazione più intensa verso ovest che, associato alla difficoltà intrinseca dei modelli nella propagazione della precipitazione nella zona sottostante al flusso principale, ha determinato un'importante sottostima, in alcune zone di allertamento ed una sovrastima di entità paragonabile in altre.

Le precipitazioni sono infatti apparse subito più consistenti e spazialmente più ampie di una serie di temporali interessando più stazioni delle aree Scrivia, Orba-Bormida e dei relativi alti bacini liguri non solo come picchi orari ampiamente superiori alle soglie di 36 ore in molte stazioni di misura, ma anche come cumulata complessiva con valori prossimi ai 200 mm.
Grazie al contesto stagionale ed alla elevata capacità di smaltimento dell'area, gli effetti sono stati fortunatamente limitati. L'analisi evidenzia una caratteristica ricorrente di sottostima della previsione di precipitazione fornita dai modelli ad area limitata sulle aree meridionali ed in particolare sullo spartiacque con la Liguria (in associazione il modello tende inoltre a collocarne i massimi sul versante sopravento allo spartiacque), di cui l'episodio costituisce un'abnorme conferma, resa ancor più inquietante dal confronto dei differenti risultati che si possono ottenere con lo stesso modello implementato in modo diverso.

Il secondo caso studio, relativo all'episodio di trasporto torrentizio in massa (colata fangoso-detritica) che si è verificato nell'agosto 2004 lungo il Rio Frejus e che ha interessato l'abitato di Bardonecchia, pone invece in evidenza una tipologia di processi il cui innesco sfugge alle attuali capacità di previsione.
L'analisi pluviometrica dell'evento ha evidenziato valori di precipitazione di durata inferiore all'ora e di intensità moderata, inferiori ai valori di soglia di *criticità moderata* definiti dal Sistema di Allertamento Regionale, sia per la fase previsionale sia per quella di monitoraggio, relativamente alla stazione pluviometrica di Camini Frejus (in prossimità della testata del bacino) ed alle altre stazioni dell'area dell'Alta Dora Riparia. I dati derivanti da un significativo numero di stazioni di misura, associati alla rappresentazione spaziale del campo di precipitazione rilevato dal radar meteorologico di Bric della Croce, hanno permesso di quantificare con precisione la pioggia caduta e di stabilirne la coerenza con il valore previsto.
Inoltre le registrazioni idrometriche lungo l'asta del-

la Dora Riparia ed in particolare in corrispondenza della stazione di Beaulard prossima alla chiusura del bacino hanno fornito ulteriore conferma di tale coerenza.

Nella stessa area, un analogo fenomeno di trasporto torrentizio in massa ha interessato pressoché contemporaneamente il Rio Fenils, tributario di destra della Dora Riparia e che ha origine dalle pendici orientali del Monte Chaberton, evidenziando ancor più i limiti dell'applicazione generalizzata delle soglie pluviometriche quale indice rappresentativo delle condizioni di pericolosità di un'intera zona di allertamento.
D'altro canto le notizie storiche ed i documenti tecnici più recenti indicano che in entrambi i casi i processi verificatisi non presentano caratteristiche di eccezionalità, denotando l'elevata ricorrenza di simili accadimenti in tali aree nel periodo estivo.

La rappresentazione spaziale del campo di precipitazione attraverso l'utilizzo del radar meteorologico suggerisce, in questo caso, un ridimensionamento del ruolo scatenante, generalmente attribuito ad un nucleo concentrato di precipitazione di particolare intensità nell'area di innesco del fenomeno. Di conseguenza è necessario riconsiderare il ruolo svolto da altri fattori, quali le precipitazioni del periodo precedente l'evento, le condizioni geologico-geomorfologiche del bacino, la presenza di accumuli nevosi nel periodo estivo, le variazioni termiche, gli apporti idrici improvvisi, lo svuotamento di invasi effimeri, ecc.
Ne consegue che ai fini di previsione ed allertamento, la sola informazione meteorologica, in particolare quella pluviometrica, deve essere opportunamente integrata. Infatti, nel caso di fenomeni intensi e di breve durata che determinano condizioni di criticità nel reticolo idrografico minore montano e collinare, il superamento delle corrispondenti soglie pluviometriche ed idrometriche da parte delle precipitazioni attese o strumentalmente osservate, qualora prevedibile, non è più sufficiente a discriminare tra la situazione di equilibrio da quella di criticità.

In questi contesti e per tali fenomenologie il significato dell'allertamento è dato esclusivamente in termini di probabilità areale che si possa verificare un evento in un ambito territoriale esteso. La localizzazione puntuale dell'innesco, che al momento non è possibile attraverso la previsione meteorologica, può avvenire solo grazie all'attività del Centro Funzionale in fase di monitoraggio e sorveglianza, attraverso Avvisi Straordinari di Criticità. Alla pianificazione di protezione civile va affidata l'individuazione delle situazioni di acclarata pericolosità e potenziale criticità presenti nei bacini allertati.

Ai fini preventivi, in attesa di un affinamento dei metodi previsionali, in alcuni bacini è possibile integrare il Sistema di Allerta Regionale con sistemi di preannuncio locali, basati su una rete di strumenti in grado di rilevare l'innesco e la propagazione delle colate. Monitorando in tempo reale l'altezza idrometrica e la velocità della colata è possibile attivare sistemi automatici di allerta (quali ad esempio barriere automatiche o segnali semaforici ad impedire il traffico sugli attraversamenti), anche quando il fenomeno sia sfuggito ai criteri dell'allertamento meteorologico ed indipendentemente da esso.
È importante ribadire che questi sistemi non possono in alcun modo essere basati sulla relazione causa-effetto: il farlo costituisce un errore gravissimo, ripetutamente commesso nel passato. Organizzare l'evacuazione di un campeggio posto su un conoide dell'Alta Val Susa sulla base della misura della precipitazione in testata del bacino può avere in termini di successo lo stesso effetto ottenuto giocandone i valori delle soglie alla roulette. Poiché le soglie vanno prudenzialmente tenute piuttosto basse, ne discende un numero elevato di falsi allarmi e conseguenti sgradevoli evacuazioni, ma, come insegna il Rio Frejus, tutto ciò non è comunque in grado di garantire la sicurezza dell'insediamento. La colata disastrosa potrebbe verificarsi con deboli piogge la settimana successiva ad una evacuazione senza effetti, quando gli ospiti sono ormai rientrati e tranquilli.

4.2 Il caso del 15-16 settembre 2004 sullo Scrivia

4.2.1 Descrizione meteorologica dell'evento

Viene di seguito preso in esame un caso studio di evento intenso a carattere temporalesco che ha interessato il Piemonte durante le giornate del 15 e 16 settembre 2004. Le zone che sono state maggiormente colpite dai forti fenomeni precipitativi sono state la pianura settentrionale e, in maniera particolare, le zone dell'Appennino Ligure e dell'Alessandrino (area di allertamento corrispondente allo Scrivia). Risulta pertanto interessante esaminare nel dettaglio tutte le fasi che hanno caratterizzato l'evoluzione sinottica dell'evento, analizzando con particolare attenzione gli effetti dell'interazione del flusso con un'orografia complessa come quella presente nella nostra regione. Le zone del basso Piemonte quali Scrivia, Belbo-Orba e Alto Tanaro risentono maggiormente di tale interazione a causa della complessa conformazione morfologica del terreno che vede in un territorio molto ristretto catene montuose di differente altitudine e molto vicine al mare.

I modelli di previsione meteorologica, anche quelli ad area limitata, non sono in grado di rappresentare così nel dettaglio gli effetti al suolo di una situazione così complessa, in cui le variabili in gioco sono molte e spesso di difficile quantificazione. In un caso come quello preso in esame, infatti, diventa di fondamentale importanza associare agli strumenti predittivi l'esperienza e l'interpretazione del meteorologo per ottenere una previsione quantitativa il più possibile corretta ed affidabile. Di seguito è riportata una breve descrizione meteorologica dell'evento e degli effetti derivati al suolo, con un'analisi più completa e dettagliata del comportamento dei modelli meteorologici ed infine qualche considerazione di carattere generale sulla intrinseca impredicibilità dei fenomeni temporaleschi.
Nei giorni antecedenti l'evento, un intenso flusso di correnti sudoccidentali interessa le regioni tirreniche, in particolare tutte le zone appenniniche, e favorisce un notevole accumulo di umidità in tutti i livelli atmosferici causando un considerevole aumento dell'instabilità.

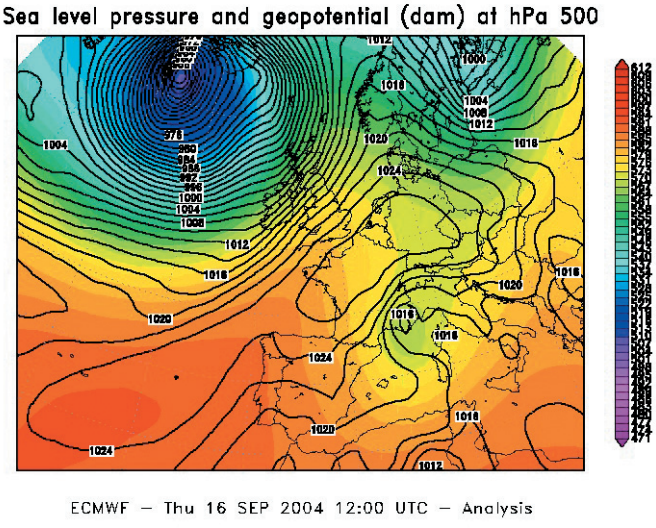


Figura 4.2.1
Pressione al suolo e altezza di geopotenziale a 500 hPa il 16 settembre 2004 alle 12 UTC

Nelle giornate del 15 e 16 settembre 2004 una profonda saccatura di origine nord atlantica si estende dalla Scandinavia fino all'Europa centro-meridionale e convoglia masse d'aria più fredde ed umide sul Piemonte. L'irruzione di aria più fredda associata alla struttura depressionaria proveniente dal nord Europa favorisce ed alimenta i fenomeni convettivi su gran parte del territorio regionale.
In particolare, durante la serata del 15 settembre da tale struttura depressionaria si isola un minimo sul Golfo del Leone che favorisce l'innesco di precipitazioni a carattere prevalentemente convettivo, di intensità moderata con valori localmente forti o anche molto forti, sulla pianura settentrionale e sulle zone appenniniche. L'interazione del flusso con l'orografia gioca un ruolo fondamentale in casi come questi, quando una forzante di tipo sinottica di matrice strettamente avvettiva sviluppa fenomeni locali di matrice anche convettiva. Tali precipitazioni interessano il territorio piemontese per gran parte della giornata del 16 settembre, seguite da una progressiva attenuazione dei fenomeni solamente nella serata, per l'allontanamento del minimo **(figura 4.2.1)**. L'analisi delle singole mappe radar mostrano che i fenomeni temporaleschi sono stati più intensi nelle ore centrali della notte tra il 15 ed il 16 settembre.

4.2.2 Descrizione degli effetti al suolo

Le precipitazioni che dal primo pomeriggio del 15 settembre accompagnano i temporali sono localmente di forte intensità con valori elevati nelle tre ore su vercellese e Appennino Ligure dove si registrano 77.6 mm/3h a Capanne Marcarolo (AL), 76.4 mm/3h a Fraconalto (AL) e 46.0 mm/3h a Vercelli. Nella giornata successiva le precipitazioni sono più diffuse, con interessamento maggiore delle zone pianeggianti e valori ancora elevati nelle prime ore della giornata seguiti da attenuazione nella serata **(tabella 4.2.1)**.

La **figura 4.2.2** illustra, invece, la precipitazione misurata dalla rete meteoidrografica regionale, cumulata durante le 24 ore in cui si è verificato l'evento, cioè dalle 12 UTC del 15 alle 12 UTC del 16. Si ottiene così una visione d'insieme del *pattern* precipitativo, dove si può distinguere il carattere diffuso dei rovesci temporaleschi, le zone maggiormente interessate quali i versanti liguri e piemontesi dell'Appennino e le pianure orientali del vercellese e novarese ed i picchi massimi di precipitazione, raggiunti nelle 24 ore, a Fraconalto (186.2 mm), a Capanne di Marcarolo (145.2 mm), a Roccaforte Ligure (127.8 mm) ed a Busalla (114.8 mm).

Oltre ai rovesci ed alle locali grandinate, in prossimità delle zone temporalesche si registra vento forte con raffiche ma su intensità ordinarie: specialmente nella notte a cavallo delle giornate del 15 e 16 settembre, vengono misurate raffiche con valori massimi raggiunti a Susa (TO) di 59.4 km/h e a Cabella Ligure (AL) di 55.8 km/h. Forte vento di caduta, accompagnato da ampi rasserenamenti, si registra nella giornata del 16 settembre in corrispondenza dello spostamento del minimo verso levante, con punte di 75.2 km/h a Cabella Ligure (AL) ed a Garessio (CN) con 64.8 km/h.
Dall'analisi dei CAPPI (*Constant Altitude Plan Position Indicator*) di riflettività a 5'000 m, acquisiti dal radar di Bric della Croce (TO) è possibile effettuare una valutazione qualitativa delle aree interessate da grandine.
In **figura 4.2.3** è riportata la mappa riassuntiva delle grandinate che interessano il territorio piemontese nella giornata di mercoledì 15 settembre dalle 00 alle 24 UTC.

L'analisi dei dati mostra grandinate localizzate, con fenomeni che interessano le pianure tra torinese ed astigiano, le zone pianeggianti settentrionali e le zone del genovese sopravento all'Appennino ligure-piemontese. In **figura 4.2.4** è riportata invece la mappa riassuntiva delle grandinate che hanno interessato il territorio piemontese nella giornata di mercoledì 16 settembre dalle 00 alle 24 UTC. L'analisi dei dati mostra ancora grandinate localizzate, con fenomeni localizzati che hanno interessato le pianure tra torinese ed astigiano, le zone del genovese sopravento all'Appennino ligure-piemontese e lo spartiacque tra il bacino ligure e lo Scrivia.

TABELLA 4.2.1 PRECIPITAZIONI CUMULATE SULLE 12 ORE SU ALCUNE STAZIONI CRITICHE PER LE GIORNATE DEL 15 E 16 SETTEMBRE 2004

DATA	ORA	STAZIONE	PROV	PIOGGIA (mm/12h)
15/09/2004	24:00	Capanne Marcarolo	AL	83.6
15/09/2004	24:00	Fraconalto	AL	78.6
15/09/2004	24:00	Verdelli	VC	59.8
15/09/2004	24:00	Carmagnola	TO	30.2
16/09/2004	12:00	Capanne Marcarolo	AL	61.6
16/09/2004	12:00	Roccaforte Ligure	AL	118.2
16/09/2004	12:00	Covone	AL	36.2
16/09/2004	12:00	Pian Audi	TO	34.6

Figura 4.2.2
Precipitazioni cumulate sulle 24 ore dalle 12 UTC del 15 alle 12 UTC del 16 settembre 2004 sull'intera rete regionale

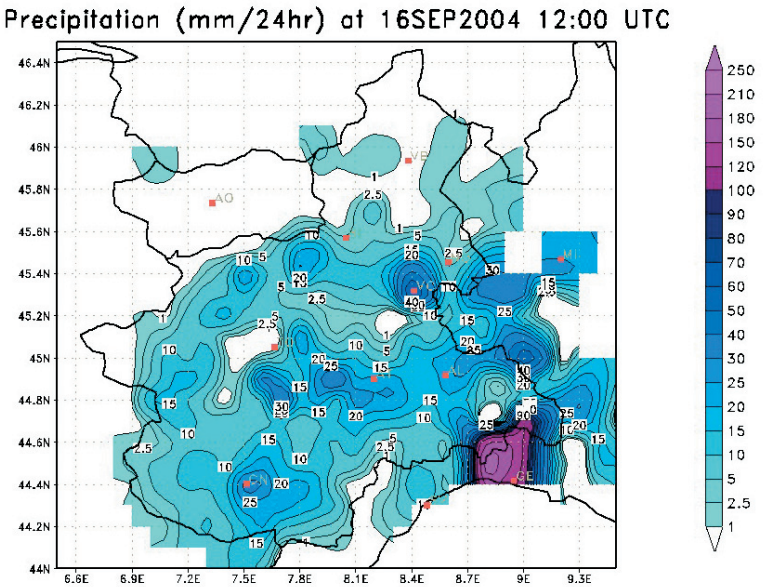


Figura 4.2.3
Zone interessate da grandine (colore giallo) nella giornata del 15 settembre 2004

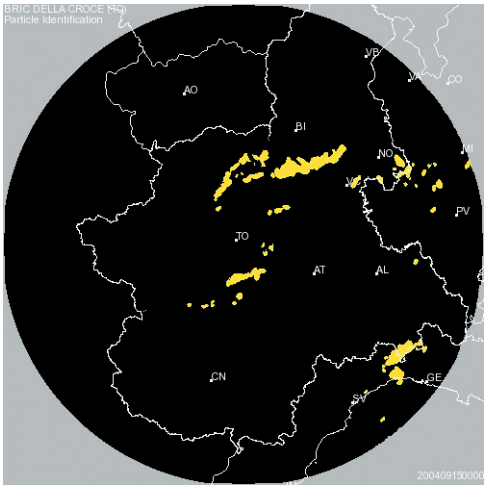
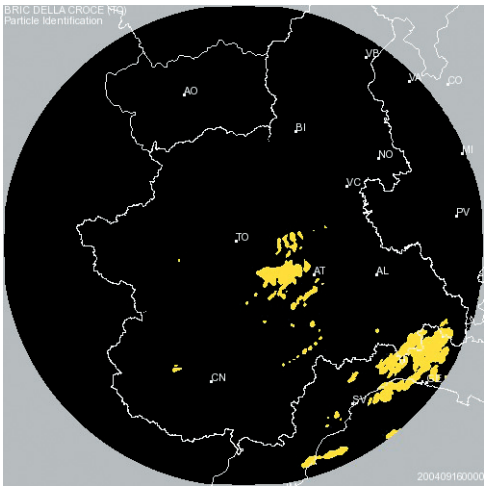


Figura 4.2.4
Zone interessate da grandine (colore giallo) nella giornata del 16 settembre 2004



4.2.3
Analisi del comportamento dei modelli meteorologici

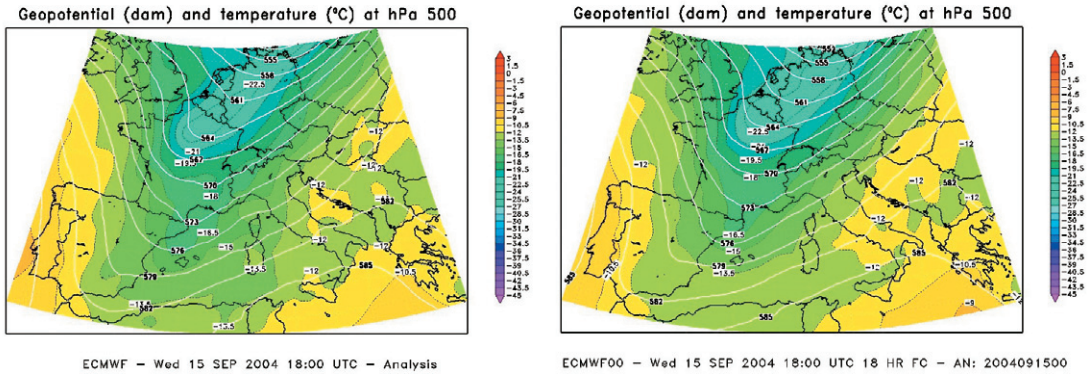


Figura 4.2.5
Carte di analisi (sinistra) e previsione (destra) della corsa del ECMWF del 15 settembre 00 UTC, dell'altezza di geopotenziale e temperatura a 500 hPa relative alle ore 18 UTC del 15 settembre

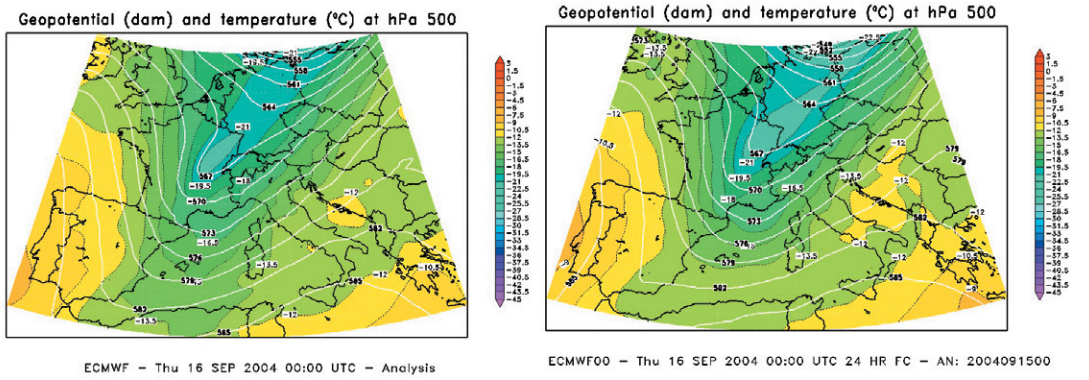


Figura 4.2.6
Carte di analisi (sinistra) e previsione (destra) della corsa del ECMWF del 15 settembre 00 UTC, dell'altezza di geopotenziale e temperatura a 500 hPa relative alle ore 00 UTC del 16 settembre

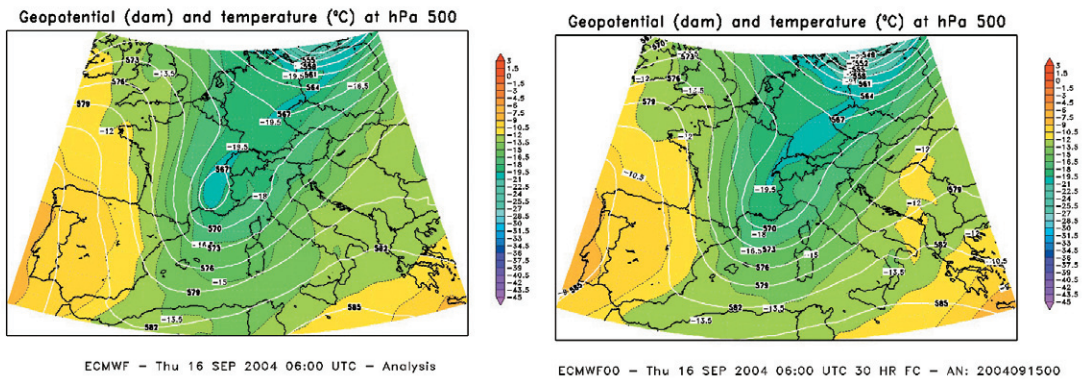


Figura 4.2.7
Carte di analisi (sinistra) e previsione (destra) della corsa del ECMWF del 15 settembre 00 UTC, dell'altezza di geopotenziale e temperatura a 500 hPa relative alle ore 06 UTC del 16 settembre

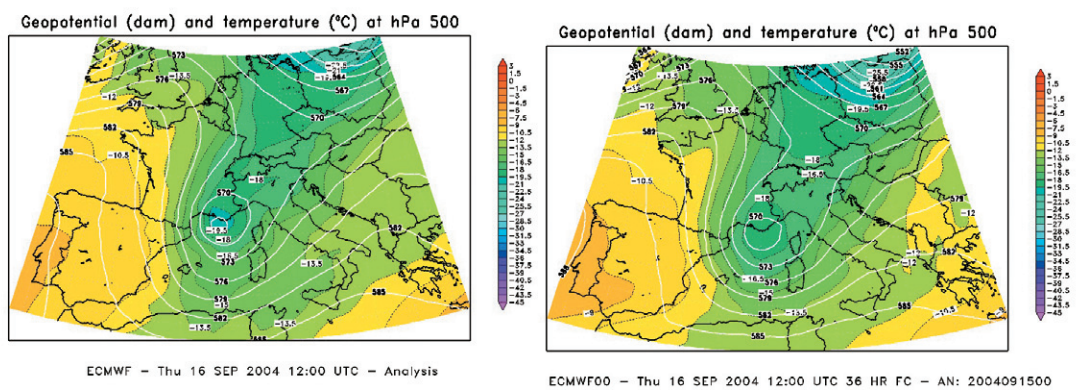


Figura 4.2.8
Carte di analisi (sinistra) e previsione (destra) della corsa del ECMWF del 15 settembre 00 UTC, dell'altezza di geopotenziale e temperatura a 500 hPa relative alle ore 12 UTC del 16 settembre

Il momento fondamentale dell'elaborazione di una previsione è rappresentato dall'esame e dalla valutazione della situazione meteorologica a scala sinottica (fenomeni di tipo continentale o planetario, che si caratterizzano per scale di grandezza superiori ai 1'000 km e per scale temporali dell'ordine della settimana), per individuare le configurazioni prevalenti dell'atmosfera e determinarne la più probabile evoluzione.
Una struttura sinottica come quella considerata in questo caso studio, avendo una scala spaziale più grande rispetto alla risoluzione del modello globale utilizzato durante la fase di analisi previsionale (*European Centre Medium Weather Forecast*), viene ben rappresentata nella sua evoluzione spazio-temporale. Come si può notare dalle **figure 4.2.5** e **4.2.8**, un primo confronto puramente visivo tra la carta dell'analisi di altezza di geopotenziale e temperatura a 500 hPa con la relativa previsione di ECMWF (corsa emessa alle 00 UTC del 15 settembre), suggerisce, per quel che riguarda le scadenze delle 18 UTC del 15 settembre e delle 00 UTC del 16 settembre, un discreto accordo tra previsione ed analisi, mentre, per le scadenze delle 06 UTC e delle 12 UTC, si evince una sottostima della profondità del minimo e del calo di temperatura in quota.
Inoltre, la localizzazione stessa del minimo non risulta correttamente prevista: esso si colloca, infatti, più ad ovest di quanto verificato e, di conseguenza, anche il *pattern* precipitativo previsto. In ultimo, tale imprecisione del modello non è di secondaria importanza, poiché risolvere l'interazione del flusso con un complesso montuoso più alto quali sono le Alpi marittime rispetto all'Appennino ligure-piemontese determina effetti al suolo di gran lunga differenti: la morfologia del territorio, se pur ristretto, è diversa e le risposte dei bacini coinvolti sono diverse.

Un successivo confronto tra l'analisi e la previsione dell'evoluzione sinottica, elaborata da un altro modello globale a scala europea, il DWD-GME (*Deutcher Wetter Dinst*) sviluppato nell'ambito del servizio meteorologico tedesco, fornisce un'ulteriore conferma al disaccordo tra modello e analisi in termini di profondità e localizzazione del minimo e di intensità del calo di temperatura **(figure 4.2.9** e **4.2.10)**.
La descrizione dell'effetto al suolo dei fenomeni risulta essere, d'altra parte, complessa e non di facile predicibilità in termini di localizzazione, temporizzazione e quantificazione dell'evento stesso. La previsione nel dettaglio di fenomeni forzati dall'orografia e legati alla convezione viene effettuata con l'ausilio di modelli ad area limitata che hanno una risoluzione (verticale, orizzontale e temporale) sufficiente, o quantomeno confrontabile con la scala dei fenomeni temporaleschi.

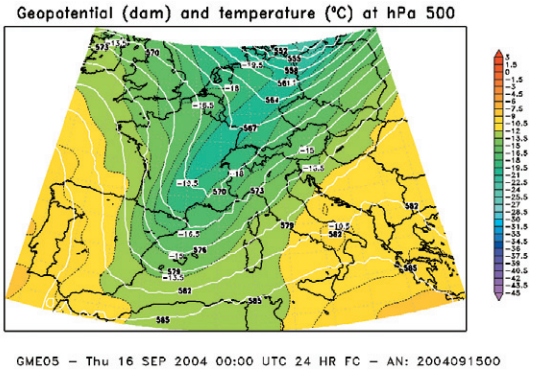


Figura 4.2.9
Corsa del DWD-GME emessa il 15 settembre ore 00 UTC: previsione a +24h (16 settembre ore 00 UTC) dell'altezza di geopotenziale e temperatura a 500 hPa

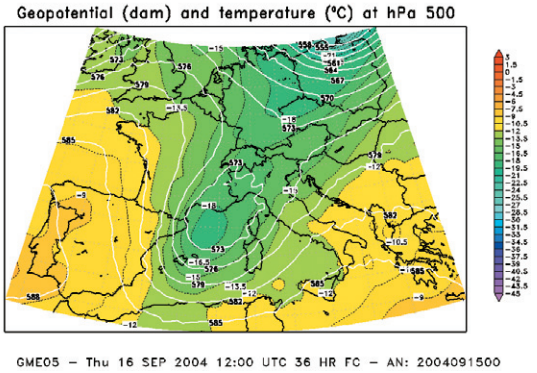


Figura 4.2.10
Corsa del DWD-GME emessa il 15 settembre ore 00 UTC: previsione a +36h (16 settembre ore 12 UTC) dell'altezza di geopotenziale e temperatura a 500 hPa

Il Sistema di Allertamento si basa sull'utilizzo di previsioni quantitative di precipitazione (QPF) sulle aree di allertamento definite, in termini di valore medio areale e massimo atteso su periodi temporali diversi, con un intervallo minimo per l'accumulo delle precipitazione di sei ore. In casi come quello analizzato, oltre alla non corretta configurazione a grande scala prevista, entrano in gioco forzanti per l'innesco e l'intensificazione dei processi precipitativi, come l'interazione del flusso con l'orografia, lo *shear* del vento negli strati bassi dell'atmosfera e così via, che non sono ben simulati, nell'area considerata. In alcuni casi la precipitazione prevista dai modelli numerici ad area limitata risulta quindi affetta da errori che alterano in modo significativo l'avviso per una situazione di criticità determinando falsi allarmi e mancate allerte su zone adiacenti.

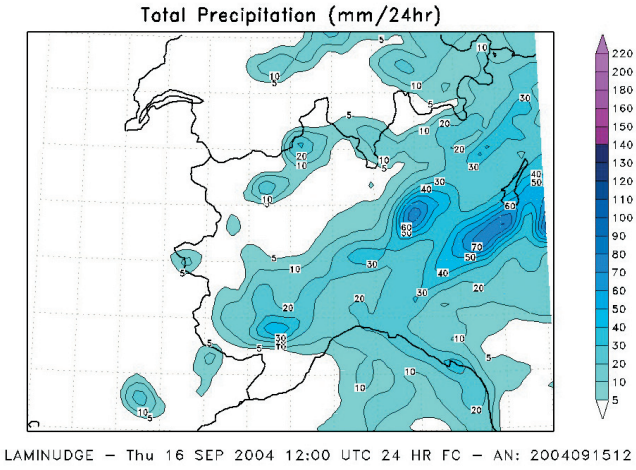


Figura 4.2.11
Campo di precipitazione previsto dal modello LAMI (IT), sviluppato nell'ambito del Consorzio Europeo COSMO, nella configurazione italiana

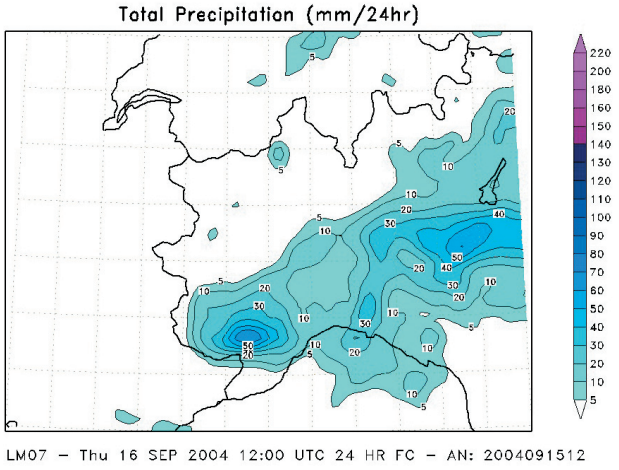


Figura 4.2.12
Campo di precipitazione previsto dal modello aLMo (CH), sviluppato nell'ambito del Consorzio Europeo COSMO, nella configurazione svizzera

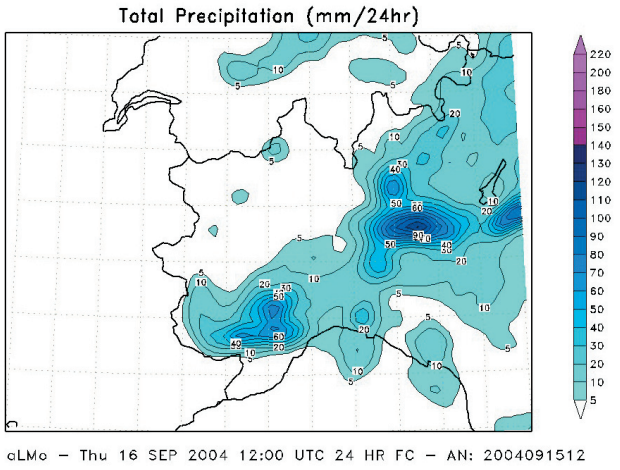


Figura 4.2.13
Campo di precipitazione previsto dal modello LM (DE), sviluppato nell'ambito del Consorzio Europeo COSMO, nella configurazione tedesca

Analizzando più nel dettaglio la previsione quantitativa fornita dai LAM nel caso sopra descritto, è interessante notare come, da uno stesso modello, implementato però in modo diverso, si ottengano risultati differenti sulle medesime zone d'interesse.
Nello specifico, vengono riportati i campi di precipitazione prevista cumulata in 24 ore dalle diverse configurazioni di LM relativamente alle corse delle 12 UTC del giorno 15 settembre **(figure 4.2.11**, **4.2.12**, **4.2.13)**.

Dovendo fornire una previsione quantitativa di valore medio e massimo sulle aree di allertamento, si comprende molto facilmente da questo esempio come risulti complesso e non di utilizzo immediato l'*output* dei modelli meteorologici, ma come questo necessiti di una continua interpretazione ed elaborazione dei dati forniti dai modelli, attraverso un'analisi di tipo soggettivo, anche e soprattutto a fronte delle caratteristiche geofisiche e climatiche della regione o della zona d'interesse, apportando così un valore aggiunto quantificabile ed un aumento della qualità del prodotto previsionale.

Il trasporto in massa del Rio Frejus Evento del 6 agosto 2004 (Bardonecchia) 4.3

4.3.1 Introduzione

Nell'ambito della valutazione dell'incertezza legata ai metodi di previsione, risulta particolarmente significativo lo studio dei processi torrentizi che caratterizzano i piccoli bacini montani. In tali contesti, infatti, l'estrema variabilità delle caratteristiche geologico-geomorfologiche e meteo-pluviometriche rende difficile, e talvolta impossibile, impiegare con successo modelli previsionali del tipo causa-effetto.
L'evento di colata che ha interessato il bacino del Rio Frejus nel Comune di Bardonecchia (TO) il 6 agosto 2004 riassume in modo esemplificativo la situazione sopra accennata: a fronte di precipitazioni registrate di modesta entità si sono prodotti effetti dannosi che hanno destato particolare preoccupazione nella popolazione **(figura 4.3.1)**.

In seguito ad una prima fase di analisi realizzata immediatamente dopo l'evento e finalizzata alla redazione del relativo rapporto (Arpa Piemonte, 2004b) si sono resi necessari ulteriori approfondimenti al fine di caratterizzare le condizioni predisponenti ed innescanti i processi torrentizi del Rio Frejus.
Nel presente lavoro sono sintetizzati i risultati di un approccio multidisciplinare che ha permesso di analizzare il ruolo svolto dai vari fattori nell'evoluzione dei processi di colata. Lo studio è stato caratterizzato da analisi pluviometrico-idrologiche e geologico-geomorfologiche, condotte in sinergia tra i tecnici del Centro regionale per le ricerche territoriali e geologiche e dell'Area delle attività regionali per l'indirizzo ed il coordinamento in materia di previsione e monitoraggio ambientale di Arpa Piemonte, utilizzando dati e metodologie derivanti anche dai seguenti progetti:

- Progetto nazionale CARG (Cartografia Geologica d'Italia alla scala 1:50.000);
- Progetto nazionale IFFI (*Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia*);
- Progetto europeo per la valutazione di pericolosità e rischio dei fenomeni naturali e predisposizione di piani comunali di Protezione Civile (Programma Interreg IIC);
- Progetto europeo *CatchRisk – Mitigazione dei rischi idrogeologici nei bacini alpini* (Programma Interreg IIIB – Spazio Alpino).

In conclusione vengono proposte una serie di considerazioni sulle condizioni generali di pericolosità del bacino ed alcuni spunti per eventuali sviluppi futuri nell'ambito della previsione dei processi trattati.



Figura 4.3.1
Ripresa da elicottero del Rio Frejus (deflusso verso sinistra della fotografia) in conoide a Bardonecchia, il giorno successivo l'evento di colata del 06/08/04. Sono evidenti le tracce della tracimazione della colata in destra idrografica (depositi grigio scuro sulla strada che costeggia il canale, v. anche figura 4.3.4) in prossimità del ponte di via Europa (fonte: Consorzio Forestale Alta Valle Susa)

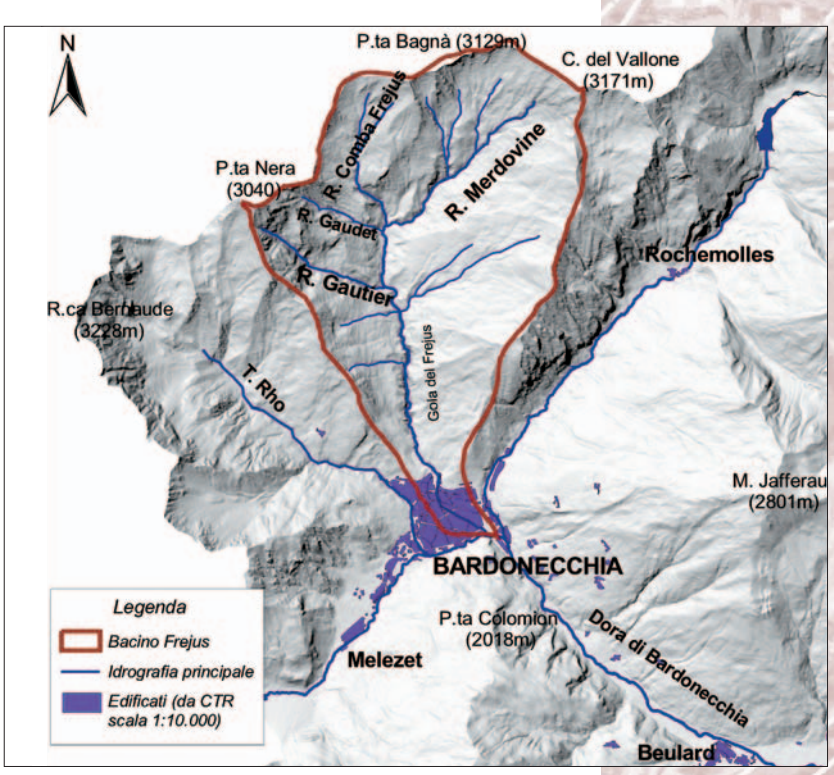


Figura 4.3.2
Il bacino del Rio Frejus



Figura 4.3.3
Ripresa verso monte del Rio Frejus dal ponte di via Europa (fase decrescente della colata del 6 agosto 2004) in cui sono ben evidenti le tracce della tracimazione (fonte: Consorzio Forestale Alta Valle Susa)



Figura 4.3.4
Sponda destra del Rio Frejus, immediatamente a monte del ponte di via Europa. Depositi limoso-sabbiosi di colore grigio scuro, abbandonati dalla colata nel punto di tracimazione (fonte: Consorzio Forestale Alta Valle Susa)

4.3.2
Il fenomeno di trasporto in massa del Rio Frejus del 6 agosto 2004

Il Rio Frejus, tributario di sinistra della Dora di Valle Stretta (comune di Bardonecchia), è stato interessato tra le 20:00 e le 20:30 UTC circa di venerdì 6 agosto 2004 da un processo di colata di fango e detriti che, innescatosi principalmente nella zona di testata dei bacini del Rio Merdovine e del Rio Comba Gautier, ha raggiunto l'abitato di Bardonecchia **(figura 4.3.2)**.
Il passaggio della colata nell'area abitata ha provocato lievi danni alla viabilità ed alle opere, costituendo fonte di preoccupazione per la popolazione che, in considerazione del periodo turistico, era particolarmente numerosa. La colata ha colmato in alcuni tratti la sezione libera del canale, le cui sponde ed il fondo sono completamen-



Figura 4.3.5
Ripresa verso valle del Rio Frejus nel tratto mediano del conoide, durante la fase decrescente della piena. Si notino le tracce di color grigio scuro, legate a spruzzi di fango prodotti dal moto turbolento della colata che hanno superato la sponda destra e raggiunto l'adiacente via Einaudi (fonte: Consorzio Forestale Alta Valle Susa)

te artificiali, tracimando in più punti lungo la sponda destra, soprattutto nel settore distale **(figura 4.3.3)**.
Le tracimazioni più importanti si sono verificate in prossimità dei ponti di via Europa e di via Torino con conseguente deposizione di alcune decine di metri cubi di materiale detritico, di granulometria prevalentemente limoso-sabbiosa e di colore grigio scuro, nelle aree immediatamente adiacenti il canale **(figura 4.3.4)**. In prossimità del ponte di via Medail, invece, la colata ha minacciato di tracimare in sponda sinistra, in corrispondenza del condominio Le Pleiadi.

Depositi dello stesso tipo di quelli sopra descritti, ma in quantità decisamente inferiori, sono stati osservati esternamente al canale lungo tutto il tratto in conoide: tali depositi sono stati prodotti da "spruzzate" legate al moto turbolento della colata che in alcuni casi hanno superato di circa 2 m il pelo libero della massa fluente **(figura 4.3.5)**.
La colata ha inoltre sormontato il ponte di via Torino, interrompendone l'agibilità per più di un'ora. Al termine dell'evento, tale attraversamento risultava praticamente occluso dai depositi ghiaiosi grossolani (clasti di circa 10-20 cm – **figura 4.3.6**) con matrice limoso-sabbiosa di colore grigio e anche l'attraversamento a monte (via Europa) risultava avere una luce assai ridotta a causa dei depositi presenti. Ulteriori danni localizzati sono stati riscontrati lungo il canale nel settore apicale del conoide, rappresentati dall'asportazione di alcuni blocchi delle scogliere di difesa spondale e dalla sottoescavazione della base della briglia immediatamente a monte dell'apice.

In generale, in tutti i corsi d'acqua interessati dall'evento, il passaggio della colata ha lasciato sulle sponde tracce evidenti costituite essenzialmente da uno strato di limo sabbioso grigio, di spessore variabile, osservabile in più punti anche lungo l'alveo della Dora di Bardonecchia a valle dell'abitato. A monte di Bardonecchia, invece, la propagazione della colata ha prodotto localizzate erosioni delle sponde e modesti accumuli detritici, soprattutto in corrispondenza delle piazze di deposito artificiali create a monte delle briglie; localmente sono stati osservati, lungo le sponde e fuori alveo, lembi allungati di depositi prevalentemente ghiaiosi, talvolta ricoperti con matrice limoso-sabbiosa.

Alla testata del bacino del Rio Frejus sono state osservate numerose attivazioni di colate detritiche **(figura 4.3.7)**, presumibilmente collegate all'evento del 6 agosto 2004, le più importanti delle quali sono state rilevate lungo le aste del Rio Merdovine e del Rio Comba Gautier. In particolare, dalle osservazioni dei depositi è emerso che il contributo proveniente da quest'ultimo ha fornito un decisivo incremento al trasporto solido lungo il Rio Frejus. La natura dei depositi della colata in prossimità della confluenza tra Rio Comba Gautier e Rio Frejus (**figura 4.3.8**) è risultata sostanzialmente differente nelle due aste: nell'alveo del Rio Comba Gautier sono stati osservati abbondanti ghiaie eterogenee ed alcuni blocchi di dimensioni maggiori (raramente oltre un metro cubo) con matrice prevalentemente sabbiosa di colore nero e di aspetto scaglioso; i depositi presenti nell'alveo del Rio Frejus presentano una maggiore quantità di blocchi di dimensioni oltre un metro cubo, immersi in una matrice limoso-sabbiosa di colore grigio.



Figura 4.3.6
Ripresa del 10 agosto 2004 a valle del ponte di via Torino sul Rio Frejus. Sono osservabili le ostruzioni delle luci dell'attraversamento da parte dei depositi della colata del 6 agosto 2004 e le tracce del passaggio della colata al di sopra dell'opera





Figura 4.3.7
Colate detritiche attivatesi in corrispondenza di alcuni canaloni alla testata del bacino del Rio Frejus

Figura 4.3.8
Ripresa verso monte della confluenza tra il Rio Comba Gautier (a sinistra) e il Rio Frejus (a destra), dove è possibile confrontare le differenti caratteristiche dei depositi nei due corsi d'acqua

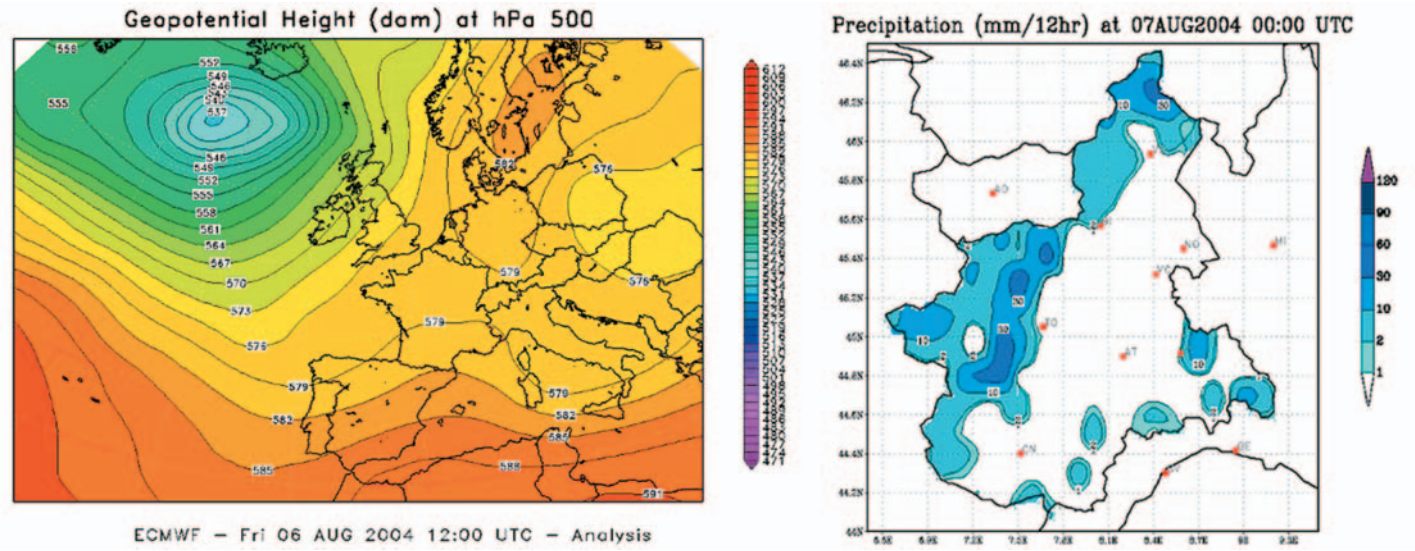


Figura 4.3.9
Analisi dell'altezza di geopotenziale a 500 hPa delle ore 12:00 UTC del 6 agosto; mappa delle precipitazioni cumulate sulle 12 ore, dalle 12:00 UTC del 6 alle 00:00 UTC del 7 agosto

4.3.3 Analisi pluviometrica

Inquadramento meteorologico dell'evento pluviometrico del 6 agosto 2004

Dal 25 luglio al 1 agosto 2004 un promontorio anticiclonico di origine africana ha interessato il bacino centro-occidentale del Mediterraneo determinando condizioni di tempo stabile e soleggiato sul Piemonte con alti valori dello zero termico e delle temperature. La configurazione meteorologica ha iniziato a cambiare dal 2 agosto. Un primo afflusso di aria fredda in quota e l'apporto di umidità hanno determinato nel pomeriggio lo sviluppo di fenomeni temporaleschi, localmente di forte intensità sul Piemonte occidentale. Il giorno 3 agosto persisteva il flusso moderatamente umido da ovest-sud-ovest sul Piemonte e si assisteva al nuovo sviluppo di temporali nelle ore pomeridiane, con maggiori estensione areale ed intensità rispetto al giorno precedente. Un mutamento più radicale avveniva il giorno successivo con le correnti che si disponevano dai quadranti meridionali convogliando umidità dal mare e con un afflusso di aria fredda instabile in quota. Nella seconda parte della giornata del 4 e nella mattinata del 5 i fenomeni temporaleschi hanno interessato sostanzialmente tutta la regione, raggiungendo picchi localmente molto forti. Il giorno 5 il nucleo della depressione si spostava verso l'Italia centrale e nella serata si attenuavano le condizioni di instabilità sul Piemonte. Nella mattinata del 6 agosto si assisteva ad una rimonta dell'anticiclone africano verso la Francia **(figura 4.3.9)** con un conseguente temporaneo miglioramento delle condizioni atmosferiche sul Piemonte.

L'atmosfera si manteneva comunque relativamente umida: entrambi i radiosondaggi osservati a Milano Linate ed a Cuneo Levaldigi alle ore 12:00 UTC (quelli disponibili più prossimi all'area in esame) denotavano un'umidità relativa prossima al 75% per uno strato di circa 5'000 m al di sopra della superficie terrestre. Il rasserenamento diurno enfatizzava le condizioni favorevoli alla convezione tipiche del periodo estivo. In presenza di tale situazione termodinamica, nel tardo pomeriggio un nuovo afflusso di aria fredda in quota causava lo sviluppo di temporali sulle zone montane e pedemontane di tutta la regione. Le registrazioni rilevate dai pluviometri della rete pluviometrica di Arpa Piemonte, indicavano il raggiungimento di valori di picco localmente forti sul Toce e molto forti nelle valli di Lanzo; in Val Susa i valori rilevati sono stati al più moderati.

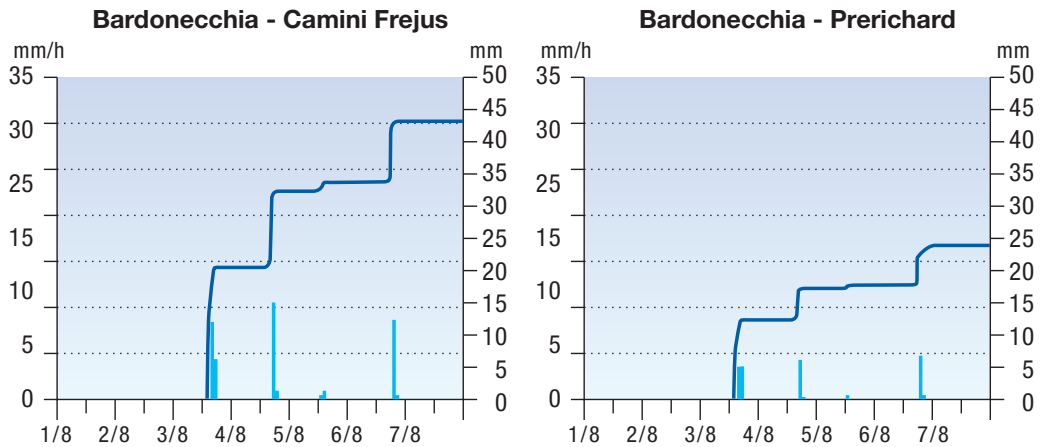


Figura 4.3.10
I letogrammi registrati dalle stazioni Camini Frejus e Prerichard per il periodo 1-7 agosto 2004

TABELLA 4.3.1 MASSIME ALTEZZE DI PRECIPITAZIONE PER DIFFERENTI DURATE REGISTRATE NEI GIORNI 3 E 6 AGOSTO 2004

Stazione	Massima altezza di pioggia [mm]									
	3 agosto 2004					6 agosto 2004				
	10 min.	30 min.	1 ora	3 ore	6 ore	10 min.	30 min.	1 ora	3 ore	6 ore
Camini Frejus	5.8	10.8	14.0	20.8	20.8	3.6	7.2	8.8	9.4	9.4
Prerichard	2.8	5.0	6.2	12.4	12.4	2.2	4.4	4.8	5.4	6.2

L'evento temporalesco del 6 agosto 2004 si è inserito all'interno della situazione meteorologica che ha caratterizzato il passaggio dalle condizioni di tempo stabile ed anticiclonico dell'ultima settimana di luglio 2004 al tempo instabile, perturbato e con frequenti episodi di precipitazione a carattere temporalesco della prima metà del mese di agosto 2004. Il fattore rilevante dell'evento è stato l'afflusso di aria fredda instabile in quota (circa 1.5 °C a 500 hPa, valore apparentemente basso ma in linea con quelli riscontrati in eventi analoghi) che ha causato la saturazione e la condensazione della colonna di aria umida esistente fino a 5'000 m, con lo sviluppo di temporali la cui intensità è stata enfatizzata dalla convezione presente.

Il vento era disposto a tutte le quote dai quadranti settentrionali e si è mantenuto su valori prevalentemente deboli. L'identificazione della direzione del vento è stata utile per determinare la traiettoria delle celle temporalesche; in particolare quella responsabile delle precipitazioni in Val Susa si era originata in Francia.

Analisi pluviometrica dell'evento del 6 agosto 2004

L'analisi pluviometrica si è basata sull'elaborazione di piogge orarie e sub-orarie registrate nel corso dell'evento e di piogge cumulate su più giorni precedenti l'innesco del fenomeno. Si sono evidenziate in corso d'evento piogge di durata inferiore all'ora, di intensità moderata e precipitazioni discontinue nell'arco di alcuni giorni precedenti l'evento, caratterizzate da valori deboli o moderati. I dati pluviometrici utilizzati sono stati registrati dalle stazioni della Rete di Monitoraggio Regionale Automatica di Arpa Piemonte installate nella zona: Camini Frejus (Bardonecchia) sita in prossimità della testata del Rio Frejus e Prerichard (Bardonecchia) sita in prossimità della confluenza della Dora di Valle Stretta con la Dora di Bardonecchia.

Essendosi innescato il fenomeno in testata del Rio Frejus, in prossimità dello spartiacque coincidente con il confine italo-francese, si sono ricercati i dati registrati dalle stazioni pluviometriche della rete di monitoraggio di *Météo France* per integrare ed estendere le osservazioni della rete piemontese relative all'evento. La stazione di Frejus-Modane (1'228 m slm) in Savoie (situata a circa 6 km a NW dalla testata del Rio Frejus) è l'unica installata in posizione significativa rispetto alla zona in esame **(figura 4.3.11)**.

Nella **figura 4.3.10** si riportano gli ietogrammi registrati dalle stazioni Camini Frejus e Prerichard per il periodo 1-7 agosto 2004; i valori di pioggia cumulata misurati alle due stazioni risultano essere rispettivamente 43.8 mm e 23.8 mm, di cui 9.4 mm e 6.2 mm caduti il giorno 6 agosto. In concomitanza con l'innesco del fenomeno sono stati misurati 8.8 mm a Camini Frejus (17:30-18:20 UTC) e 4.6 mm a Prerichard (17:30-18:10 UTC), mentre i valori di precipitazione oraria misurati a Frejus-Modane presentano un massimo pari a 1.2 mm registrato dalle 18:00 alle 19:00 UTC del 6 agosto, contribuendo al totale giornaliero di 1.4 mm. La stazione risulta quindi non essere stata interessata dal medesimo rovescio registrato da Camini Frejus e da Prerichard.

Nella **tabella 4.3.1** si riportano le massime altezze di precipitazione, calcolate su finestra mobile, per le differenti durate (10 e 30 minuti, 1, 3, 6 ore) registrate i giorni 3 e 6 agosto 2004; si evidenzia come le maggiori altezze di pioggia per l'intervallo di tempo considerato siano relative al giorno 3 agosto.

Il sistema di Allertamento Idrogeologico ed Idraulico regionale, utilizza in fase di previsione valori di soglia definiti per ciascuna delle 11 aree di allertamento, per durate da 6 a 24 ore, ed in fase di monitoraggio valori di soglia relative a tutte le stazioni pluviometriche appartenenti alla Rete di monitoraggio, per durate da 1 a 24 ore; i valori sono differenti in funzione dello stato idrologico ovvero del grado di saturazione dei suoli (secco, umido). Per entrambi i casi le soglie si riferiscono ai livelli di criticità moderata (2) ed elevata (3).
Nella **tabella 4.3.2** sono indicati i valori delle soglie pluviometriche espressi in millimetri, per uno stato idrologico che è risultato essere secco, relative alle stazioni di Camini Frejus e dell'area Alta Dora Riparia-Po, all'interno della quale ricade il bacino in esame.

TABELLA 4.3.2 SOGLIE PLUVIOMETRICHE UTILIZZATE PER IL MONITORAGGIO E PER LA PREVISIONE

			Livello di criticità	Soglia [mm di precipitazione]		
				1 ora	3 ore	6 ore
Area di allertamento	Alta Dora Riparia Po	Soglie verificate in fase di previsione	2	-	-	47.8
			3	-	-	65.6
Stazione	Camini Frejus	Soglie verificate in fase di monitoraggio	2	14	23	31.0
			3	20	30	40.0

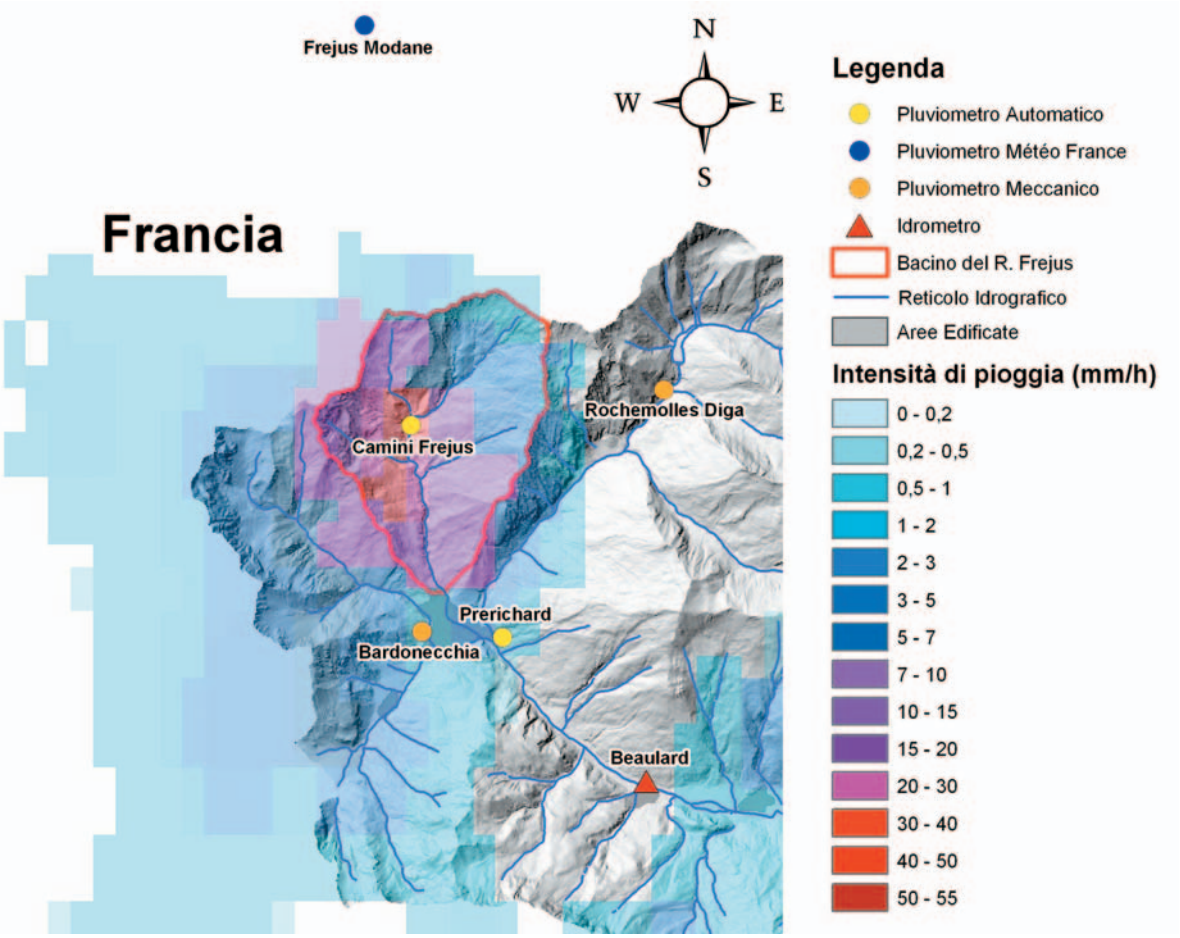


Figura 4.3.11
Mappa di intensità di pioggia osservata alle 17:30 UTC (6 agosto 2004) dal radar Meteorologico di Bric della Croce e stazioni pluviometriche ed idrografiche utilizzate per il bacino del Rio Frejus con chiusura all'apice del conoide

Dal confronto di queste con i massimi di precipitazione registrati, si evidenzia per il giorno 3 agosto il raggiungimento della soglia corrispondente al livello di criticità 2 e durata 1 ora per la stazione di Camini Frejus.
Come noto, gli eventi pluviometrici caratterizzati da precipitazioni brevi ed intense sono in genere estremamente localizzati, per cui risulta importante una valutazione combinata dei dati registrati da reti meteo-pluviometriche e sistemi radar-meteorologici. Tale approccio rende in linea di massima più precisa la valutazione degli eventi pluviometrici su ambiti territoriali caratterizzati da buona visibilità radar, sia per quanto riguarda l'individuazione dei fenomeni che la stima della loro intensità, mentre in ambiti montani, come quello trattato, le immagini radar possono essere utilizzate prevalentemente per la valutazione della distribuzione spaziale dei campi di precipitazione. In occasione dell'evento del 6 agosto, il radar del Bric della Croce, situato sulla collina torinese, ha individuato la cella temporalesca che si è formata sulla zona interessata, evidenziando il nucleo di maggior intensità localizzato proprio alla testata del bacino del Rio Frejus ed in corrispondenza del pluviometro di Camini Frejus (**figura 4.3.11**).

Analisi del regime pluviometrico caratteristico dell'area in studio

L'analisi è stata svolta utilizzando i dati di pioggia registrati dalle stazioni meccaniche di Bardonecchia e Rochemolles Diga **(figura 4.3.11)** dell'ex Ufficio Idrografico del Po, in grado di fornire una serie storica di dati sufficientemente lunga, dal 1913 al 1986. Si è svolto un confronto tra i dati osservati nel periodo in esame ed i massimi valori registrati dalle stazioni storiche **(tabella 4.3.3)**, successivamente, ricorrendo ai metodi di regionalizzazione statistica degli estremi idrologici, si è calcolato il tempo di ritorno caratteristico delle precipitazioni di interesse. Le serie storiche utilizzate nel presente studio costituiscono un campione significativo per le durate da 1 a 6 ore (circa 40 valori), mentre per la durata di 10 minuti si dispone di un numero di dati non sufficiente per le elaborazioni statistiche.

Confrontando i dati di massima altezza di pioggia per le differenti durate con i dati storici, si nota che per la durata di 10 minuti il valore massimo (5.8 mm) del pluviometro di Camini Frejus registrato il giorno 3 agosto, è il terzo più alto dopo gli 8 mm del giugno 1952 e i 7.4 mm del luglio 1964, men-

TABELLA 4.3.3 MASSIMI STORICI DI PIOGGIA PER DURATE 10 MINUTI, 1, 3, 6 ORE. PERIODO 1913 – 1986

Stazione	10 min		1 ora		3 ore		6 ore	
	mm	data	mm	data	mm	data	mm	data
Rochemolles diga	8.0	12/6/1952	29	05/9/1942	43	05/8/1985	53	26/9/1947
Bardonecchia	8.2	14/8/1971	23	10/7/1970	35	25/9/1946	57	25/9/1946

TABELLA 4.3.4 TEMPI DI RITORNO CALCOLATI UTILIZZANDO DIFFERENTI METODI PER LA STAZIONE DI CAMINI FREJUS RELATIVI ALLE PRECIPITAZIONI DEL 3 E 6 AGOSTO 2004 PER LE DURATE 1, 3, 6 ORE

Metodi statistici	Tempi di ritorno [anni]					
	3 agosto 2004			6 agosto 2004		
	1 h	3 h	6 h	1 h	3 h	6 h
Gumbel (QR)	3	2	<2	<2	<2	<2
Log-normale (QR)	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Gumbel (IS)	2	2	<2	<2	<2	<2
Log-normale (IS)	3	2	<2	<2	<2	<2
VAPI	3	2	<2	<2	<2	<2
Atlante delle Piogge Intese	5	4	2	<2	<2	<2
RAP	8	3	<2	<2	<2	<2

tre per le durate maggiori i valori sono stati più volte superati negli ultimi anni.

Le massime altezze di precipitazione registrate il giorno 6 agosto per le durate considerate, risultano essere sempre inferiori ai dati storici. Sono quindi stati calcolati i valori dei tempi di ritorno (il numero medio di anni in cui la precipitazione di una certa durata e intensità è raggiunta o superata almeno una volta) per le massime precipitazioni registrate tra l'1 ed il 7 agosto 2004 per durate di 1, 3, 6 ore con diversi metodi. In questo caso non è possibile valutare il tempo di ritorno della precipitazione relativa alla brevissima durata di 10 minuti in quanto non sono disponibili serie storiche sufficientemente lunghe. Il calcolo è stato svolto con i metodi VAPI GNDCI (De Michele & Rosso, 1999), *Atlante delle Piogge Intense* (CIMA, 2001) e RAP *Rainfall Analysis Package* (Burlando *et al.*, 1997) e con le distribuzioni di probabilità Gumbel e Log-normale utilizzando l'invarianza di scala (IS) e i quantili regolarizzati (QR). Il dettaglio dei valori dei tempi di ritorno per la stazione di Camini Frejus è riportato nella **tabella 4.3.4**.

Per la pioggia registrata da entrambe le stazioni il giorno 6 agosto i tempi di ritorno calcolati risultano sempre inferiori a 2 anni per tutte le aggregazioni; medesimi risultati sono stati ottenuti per la pioggia registrata il 3 agosto dalla stazione di Perichard, mentre per Camini Frejus i tempi di ritorno risultano leggermente superiori a 2 anni per l'aggregazione di 1 ora. In particolare VAPI, *Atlante delle Piogge Intense* e RAP forniscono tempi di ritorno più alti: rispettivamente 3, 5 e 8 anni per la pioggia di 1 ora. La causa di ciò è da ricercare nel modello di distribuzione probabilistica che sta alla base del modello adottato, nel numero di stazioni utilizzate e nella loro distribuzione sul territorio. Il Progetto VAPI ha un database di dati appartenenti a 366 stazioni di misura (270 nel bacino padano e 96 in Liguria) con almeno 20 anni di osservazione e numerosità media di 34. L'Atlante dispone dei dati registrati da tutte le stazioni ricadenti in Piemonte e in aggiunta quelle del Canton Ticino e le stazioni francesi poste a nord del massiccio del Pelvoux per un totale di 537; tali stazioni ricoprono l'area considerata con una densità di circa 10^{-2} per km^2. I risultati forniti dal confronto tra i dati di precipitazione osservati e i massimi storici concordano comunque con i tempi di ritorno ottenuti tramite l'inferenza statistica.

L'integrazione dei dati acquisiti nelle stazioni pluviometriche della rete regionale piemontese con quelli della rete di *Météo France* e dei dati radar, conferma che l'evento meteorologico occorso in occasione del fenomeno di colata lungo il Rio Frejus del 6 agosto 2004 è stato caratterizzato da una cella temporalesca di dimensioni ridotte e di non rilevante intensità, che ha generato sullo spartiacque precipitazioni con carattere di rovescio.

Per quanto riguarda invece l'analisi statistica svolta tramite regionalizzazione, essa porta ad attribuire un ruolo predisponente alle precipitazioni che hanno caratterizzato i giorni precedenti l'innesco. Infatti i tempi di ritorno ottenuti, compresi tra 3 e 8 anni, evidenziano la criticità delle precipitazioni registrate il giorno 3 agosto per la durata di 1 ora, mentre le precipitazioni del giorno 6 agosto, ovvero quando si sono verificati gli effetti al suolo, hanno tempi di ritorno inferiori a 2 anni, quindi una ricorrenza maggiore.

Analisi pluviometrica storica dei fenomeni che hanno interessato l'area in passato

Dal Sistema Informativo Geologico di Arpa Piemonte (SIGeo) sono state estratte le informazioni relative ai processi e ai danni indotti dal Rio Frejus nel Comune di Bardonecchia. In tale archivio è disponibile la documentazione di eventi che hanno interessato il bacino in esame a partire dal 1934; sono stati quindi considerati i dati di pioggia giornaliera conservati nell'archivio dell'ex Ufficio Idrografico del Po, registrati dalle stazioni della Rete di Monitoraggio ad esso afferente relativamente ai giorni in cui si sono verificati gli eventi indicati nel SIGeo. In particolare nell'area in esame sono presenti le stazioni di Bardonecchia (quota 1'275 m slm, in prossimità dell'abitato) e di Rochemolles Diga (quota 1'926 m slm, nel limitrofo bacino del Torrente Rochemolles). Per gli eventi posteriori al 1990 si hanno a disposizione i dati acquisiti dalla Rete Automa-

TABELLA 4.3.5 ANALISI PLUVIOMETRICA DEGLI EVENTI STORICI

Processi e danni indotti nel Comune di Bardonecchia dal Rio Frejus			Stazione pluviometrica di riferimento	Pioggia [mm]			
Data	Effetti	Danni		1 g	7 gg	15 gg	30 gg
03/08/1934	Erosione di sponda	Opere di attraversamento danneggiate, opere idrauliche distrutte, tronco stradale danneggiato	Bardonecchia	16.0	37.8	53.6	56.7
26-28/05/1951	Erosione di sponda Erosione di fondo Allagamenti	Opere di attraversamento danneggiate, opere idrauliche danneggiate, coltivi distrutti, tronco stradale distrutto, opere di attraversamento, edifici minacciati	Bardonecchia	50.0	51.0	80.0	125.2
21/06/1954	Trasporto solido Disalveamento Allagamento - Erosione	Edifici danneggiati, opere idrauliche danneggiate, opere di attraversamento distrutte	Bardonecchia	11.0	18.4	39.4	52.8
21/08/1954	Alluvionamento	Edifici minacciati	Bardonecchia	23.0	65.0	89.0	89.6
07-09/06/1955	Erosione di sponda Allagamento Alluvionamento	Edifici minacciati, tronco stradale distrutto	Bardonecchia	52.6	92.8	100.8	139.8
18-19/10/1966	—	Edifici minacciati	Bardonecchia	9.2	54.0	100.2	119.0
02-04/11/1968	Erosione di sponda Trasporto solido Allagamento Alluvionamento	Edifici minacciati, opere idrauliche danneggiate, coltivi minacciati	Bardonecchia	19.4	50.0	56.0	86.4
07/08/1997	Trasporto solido Ostruzione parziale dell'alveo	Opere di attraversamento minacciate	Camini Frejus	12.2	43.2	44.0	72.8
21/06/2002	Trasporto solido	–	Camini Frejus	0.0	3.6	17.4	148.6
06/08/2004	Trasporto solido Ostruzione dell'alveo	Opere di attraversamento minacciate	Camini Frejus	9.4	43.6	43.6	67.2

tica Regionale di Monitoraggio Meteo-idrologico di Arpa Piemonte (stazioni di Camini Frejus, 1'740 m slm e Prerichard, 1'353 m slm). Si riporta in **tabella 4.3.5** uno schema riassuntivo degli eventi documentati per i quali è stato possibile associare le quantità di pioggia misurate il giorno del dissesto e nei giorni precedenti. Nella tabella non sono stati inseriti gli eventi verificatisi nell'immediato dopoguerra (12/06/1947, 04-05/09/1948, 02/05/1949) per i quali non sono disponibili dati di pioggia acquisiti dalla Rete dell'ex Ufficio Idrografico, gli eventi per i quali nel SIGeo non è indicato il giorno di innesco (10/1977) e ovviamente tutti gli eventi dei quali non si dispone di documentazione sufficiente per affrontarne un'analisi pluviometrica correttamente riferita.

Nonostante l'inevitabile incompletezza ed incertezza della documentazione disponibile relativa ai dissesti, si osserva che la zona, in particolare l'abitato di Bardonecchia, è stata interessata nell'arco di settant'anni da frequenti processi torrentizi lungo l'asta del Rio Frejus, sottolineando la predisposizione del bacino a questo tipo di fenomeni. La scarsa accuratezza nell'indicazione di data e ora in cui un fenomeno si è verificato influisce sulla determinazione delle altezze di pioggia ad esso correlabili. Le stazioni della Rete Automatica acquisiscono ogni dieci minuti le precipitazioni cadute e pertanto consentono di definire in maniera accurata i valori di pioggia precedenti l'innesco di un fenomeno, purché sia nota ovviamente anche l'ora di innesco di quest'ultimo.

La cumulata di pioggia giornaliera registrata dalla Rete dell'ex Ufficio Idrografico è invece calcolata dalle 9:00 del mattino del giorno precedente alle 9:00 del mattino del giorno a cui è attribuita; non essendo inoltre noti gli orari di innesco dei fenomeni passati, risulta dunque talvolta problematico definire gli esatti valori di pioggia che li precedono. Considerando quindi i casi in cui le informazioni possono essere reputate affidabili, le quantità di pioggia, registrate nel corso degli eventi passati dalla stazione di Bardonecchia, risultano essere dello stesso ordine di grandezza di quelle misurate relativamente al 6 agosto 2004, in particolare in occasione di eventi caratterizzati da trasporto solido (21/06/1954, 02-04/11/1968, 07/08/1997). Si tenga inoltre presente che la stazione di Bardonecchia non è collocata in posizione ottimale, a differenza della stazione di Camini Frejus, ai fini dell'analisi di eventi pluviometrici che interessano il bacino del Rio Frejus.

Sulla serie storica dei dati pluviometrici della stazione di Bardonecchia, nei periodi compresi tra il 1914 e il 1941 e tra il 1951 e il 1986, si è calcolato il numero medio annuo di giorni piovosi, risultante pari a 86 e la Pioggia Media Annua (PMA), pari a 744 mm. Distribuendo la PMA sul numero medio annuo di giorni piovosi, si ottengono circa

TABELLA 4.3.6 MASSIME ALTEZZE DI PRECIPITAZIONE PER DIFFERENTI DURATE REGISTRATE NEI GIORNI 6 E 7 AGOSTO 1997

Stazione	Massima altezza di pioggia [mm]									
	6 agosto 1997					7 agosto 1997				
	10 min	30 min	1 ora	3 ore	6 ore	10 min	30 min	1 ora	3 ore	6 ore
Camini Frejus	5.2	13.2	16.8	17.2	17.2	5.0	6.4	6.4	7.2	9.2

8.7 mm di pioggia media giornaliera: le cumulate giornaliere attribuite agli eventi descritti in tabella risultano tutte superiori a questo valore e generalmente non si discostano molto, ma hanno lo stesso ordine di grandezza; ciò evidenzia ulteriormente la non straordinarietà degli eventi pluviometrici che anche in passato hanno causato l'instaurarsi di processi torrentizi.

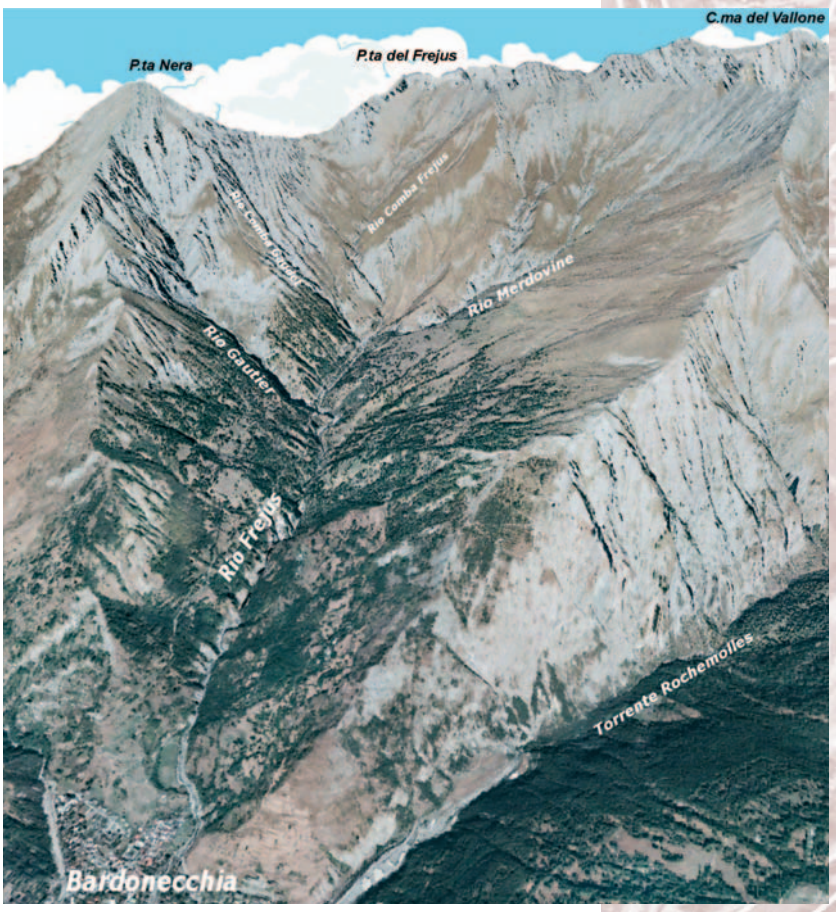
La cumulata giornaliera misurata a Camini Frejus il 6 agosto 2004 è superiore al valore medio. Per quanto riguarda i casi storici riportati in **tabella 4.3.5**, sono disponibili solamente i dati di cumulata giornaliera che, come già precisato, si riferiscono alla precipitazione caduta dalle 9:00 del giorno precedente, quindi i totali misurati dalle stazioni meccaniche non sono omogenei con quelli delle stazioni automatiche.
Particolarmente significativo è il confronto dell'evento del 7 agosto 1997 con quello in esame, considerata la vicinanza temporale, la manifestazione di effetti analoghi (trasporto solido, ostruzione dell'alveo), la coincidenza del periodo di innesco in riferimento all'anno solare e la disponibilità della medesima rete di riferimento per la registrazione dei dati pluviometrici. I valori registrati a Camini Frejus in occasione dei due eventi mostrano scarti inferiori allo 0.1% per le cumulate dei 7 e dei 15 giorni precedenti gli inneschi, quindi gli eventi pluviometrici associati ai due fenomeni di trasporto in massa sono del tutto confrontabili. Si sono analizzate quindi le piogge sub-giornaliere cadute nei giorni precedenti l'innesco del 7 agosto 1997, manifestatosi in corrispondenza dell'abitato di Bardonecchia intorno alle ore 14:45 UTC. Si riportano in **tabella 4.3.6** i valori massimi associati all'evento registrati dalla stazione di Camini Frejus, per sottolineare che, analogamente all'evento del 6 agosto 2004, le precipitazioni del giorno di innesco presentano valori inferiori a quelli registrati nei giorni immediatamente precedenti; anche in questo caso risulta infatti critico il valore della massima altezza di pioggia oraria misurato nei giorni precedenti a quello d'innesco (16.8 mm/1h il 06/08/1997, valore superiore ai 14 mm/1h della soglia – **tabella 4.3.2**).

Più recente ancora è il fenomeno verificatosi il 21 giugno 2002, per il quale i valori di pioggia indicati sono decisamente inferiori a quelli apprezzati negli altri casi e soprattutto si nota che nel giorno di innesco non sono state misurate precipitazioni dalla stazione di riferimento. Inoltre per riscontrare altezze di pioggia significative è necessario considerare il valore relativo ai 30 giorni precedenti.

4.3.4 Inquadramento geologico-geomorfologico e caratterizzazione delle aree di innesco

Al fine di analizzare le varie componenti che caratterizzano i processi torrentizi è stato adottato un approccio multi-criteriale, tratto dai classici metodi di valutazione della pericolosità geomorfologica (Varnes & IAEG, 1984), che integra informazioni provenienti da rilevamenti di terreno, da informazioni d'archivio (SIGeo di Arpa Piemonte) e da elaborazioni in ambiente GIS (sulla base di un Modello Digitale del Terreno). L'obiettivo principale è l'individuazione del ruolo che l'assetto geologico-strutturale e geomorfologico hanno sulla propensione all'innesco dei processi di trasporto solido in massa e di verificare le condizioni di deflusso lungo le aste torrentizie.
Di seguito vengono, pertanto, dapprima presentati i caratteri salienti geologici e geomorfologici del bacino del Rio Frejus e successivamente le analisi di dettaglio che hanno permesso di individuare e caratterizzare le principali aree di innesco dei fenomeni di colata.

Figura 4.3.12
Elaborazione tridimensionale del bacino del Rio Frejus



Il bacino del Rio Frejus, allungato in direzione N-S, ha una superficie di circa 22 km^2 ed è articolato in diversi sottobacini, i principali dei quali sono quelli del Rio Merdovine, del Rio Comba del Frejus, del Rio Comba Gaudet e del Rio Gautier **(figura 4.3.12)**. Il bacino del Frejus confina ad est con quello del Torrente Rochemolles, ad ovest con il bacino del Torrente Rho e a nord con alcuni sottobacini francesi del Torrente Arc. Lungo lo spartiacque principale, che segna anche il confine italo-francese, sono ubicate le cime più elevate: la Cima del Vallone (3'171 m slm), la Punta Bagnà (3'129 m slm), la Punta Nera (3'041 m slm) e la Punta del Frejus (2'936 m slm).

Il bacino oggetto del presente studio è caratterizzato da una morfologia piuttosto articolata e complessa connessa alla sovrapposizione di numerose fasi di modellamento legate a processi di origine diversa. In particolare, i depositi e le forme connesse al modellamento glaciale risultano assai scarse e per lo più completamente rimodellate ed obliterate dall'azione dei corsi d'acqua e dei fenomeni gravitativi. Questi ultimi due processi risultano a loro volta collegati in quanto la generalizzata tendenza all'approfondimento dei corsi d'acqua è una delle cause principali della estesa instabilità dei versanti. L'importanza del modellamento da parte delle acque incanalate risulta particolarmente evidente nei settori di cresta, dove si possono osservare i caratteri di generale ampliamento del bacino del Rio Frejus a spese dei bacini adiacenti e nel tratto a monte di Bardonecchia, dove il Rio Frejus si approfondisce in una stretta gola con pareti verticali in roccia alte fino a 200 m. Al termine della gola e immediatamente a monte della confluenza con la Dora di Valle Stretta, si trova l'esteso conoide (coalescente con quello del Torrente Rho) su cui sorge Bardonecchia: in questo tratto il canale attivo del Rio Frejus risulta scarsamente inciso e completamente regimato da opere di difesa.

I litotipi che caratterizzano il substrato prequaternario nel bacino del Rio Frejus **(figura 4.3.13)** appartengono principalmente all'Unità Tettonostratigrafica del Lago Nero (Servizio Geologico d'Italia, 2002; Polino *et al.*, 2002), costituita in questo areale da calcescisti più o meno carbonatici, localmente ricchi di alternanze filladiche. Sono decisamente subordinati gli affioramenti di serpentiniti massicce ed oficalci (cava abbandonata del Rio Comba del Frejus) e di quarziti (in prossimità della Punta del Frejus). I principali elementi strutturali del substrato evidenziati dalla Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 (Servizio Geologico d'Italia, 2002), sono rappresentati da contatti tettonici a debole inclinazione (piani di sovrascorrimento) e da faglie subverticali. Queste ultime hanno direzione NW-SE e sono particolarmente evidenti nel vallone di Rochemolles, mentre lungo il versante sinistro del bacino del Frejus la loro continuità è presunta; faglie con la stessa direzione ma di estensione minore

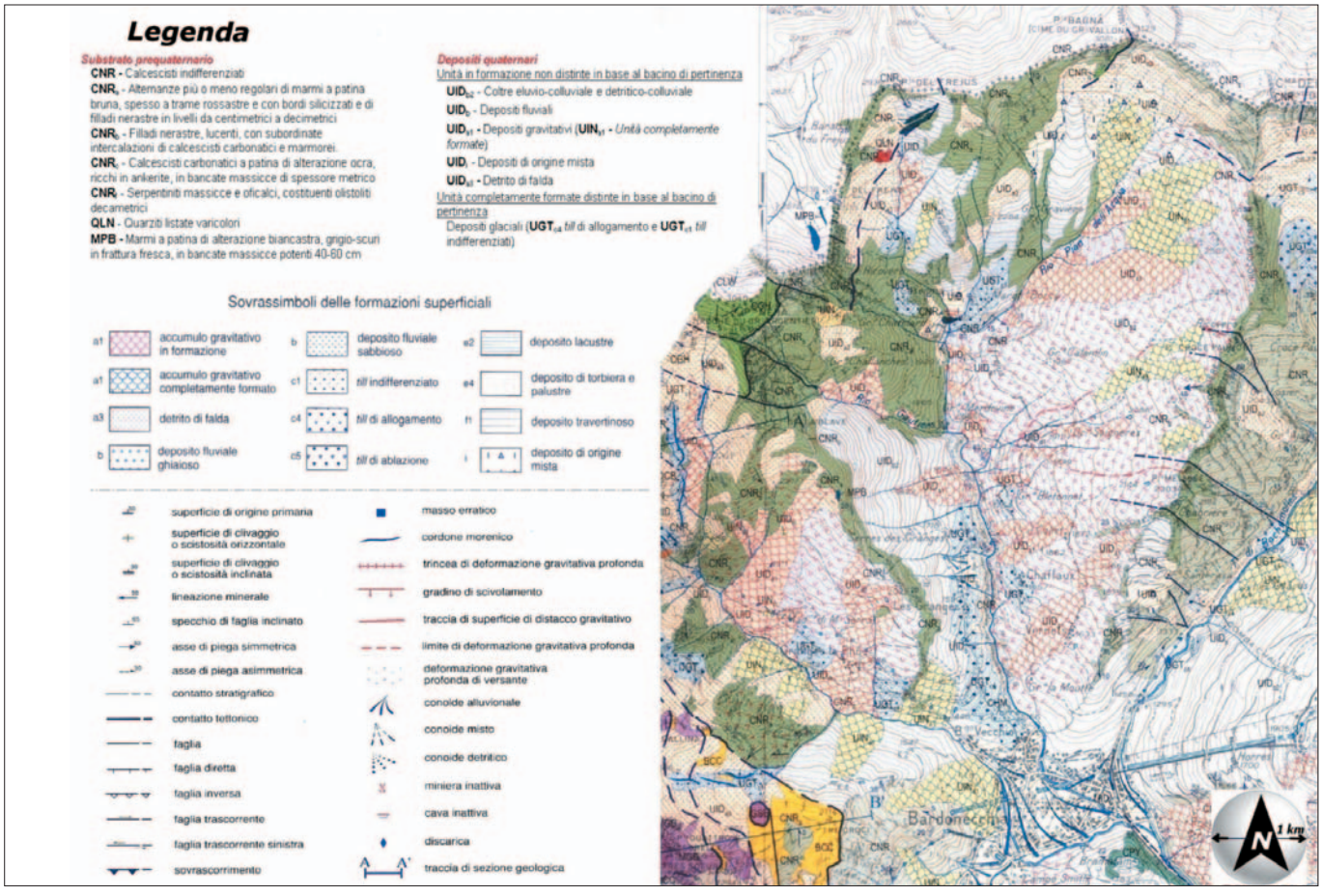


Figura 4.3.13
Stralcio della Carta Geologica d'Italia, Foglio 153 *Bardonecchia*, scala 1:50.000 (Servizio Geologico d'Italia, 2002)

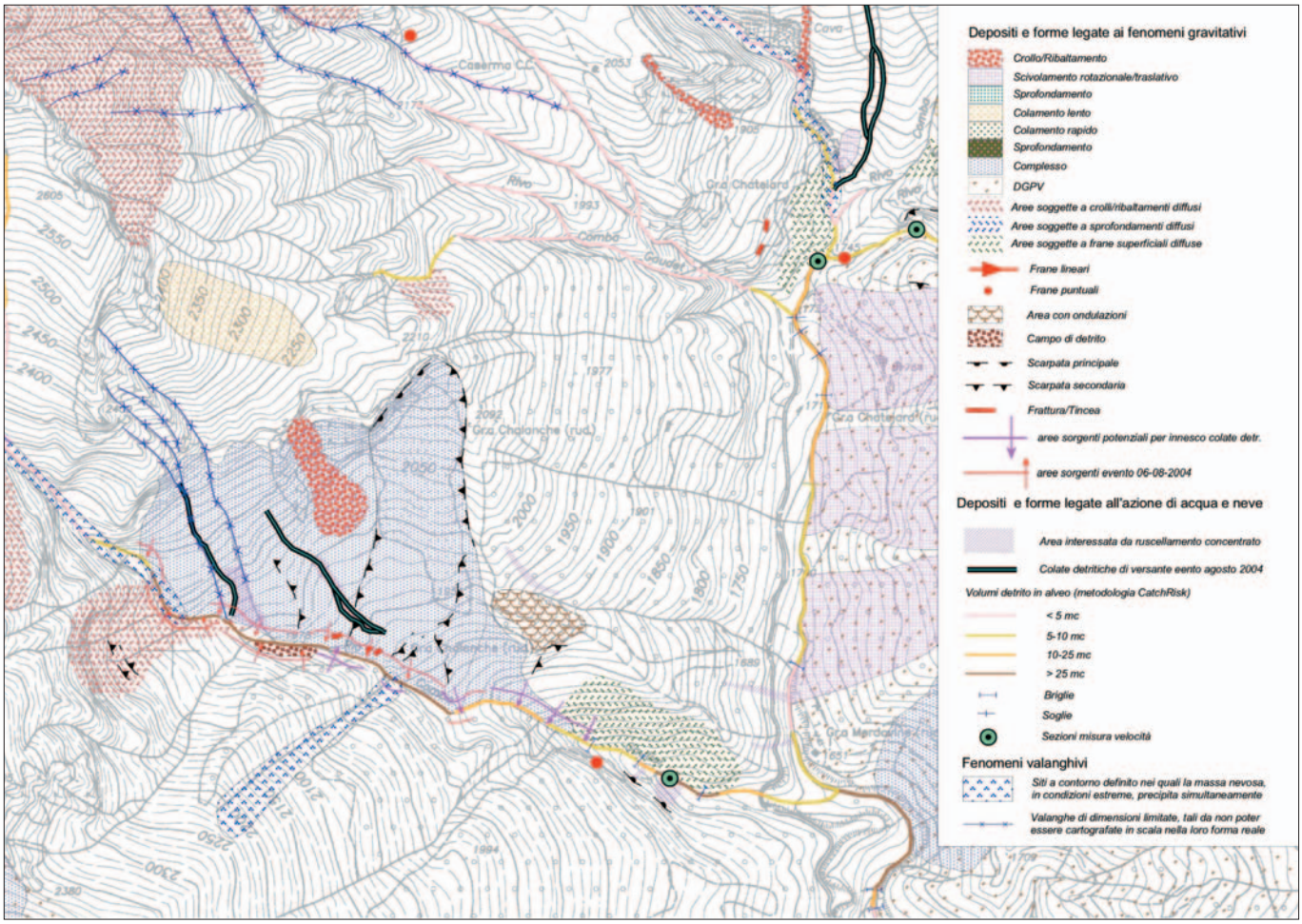


Figura 4.3.14
Stralcio della Carta geomorfologica di sintesi del bacino del Rio Frejus

sono indicate anche negli alti settori dei bacini dei rii Gautier e Comba Gaudet. Gli ammassi rocciosi presentano pessime caratteristiche geomeccaniche in quanto interessati da una intensa deformazione fragile, che si manifesta attraverso una serie di discontinuità presente a tutte le scale. In modo particolare, le alternanze a filladi risultano estremamente degradate, con ammassi rocciosi che possono essere classificati da molto *fratturati* ad *allentati*. Laddove le condizioni strutturali e di pendenza dei versanti risultano predisponenti per l'instabilità gravitativa, tali ammassi assumono un grado di allentamento via via crescente fino alla completa disarticolazione.

Esiste, inoltre, una forte convergenza fra le forme e le strutture causate dalla tettonica gravitativa e le manifestazioni geodinamiche di stile fragile. Ciò risulta particolarmente evidente lungo il versante sinistro della Valle del Frejus, dove estesi fenomeni di deformazione gravitativa profonda dimostrano una stretta connessione geometrica con i principali sistemi di deformazione recente del substrato, sviluppandosi soprattutto in corrispondenza delle principali zone di taglio (Polino *et al.*, 2002).

Come precedentemente accennato, sono state effettuate analisi di dettaglio che hanno interessato in modo particolare le zone di innesco della colata del 6 agosto 2004 e le testate dei bacini; sono state inoltre attentamente valutate le caratteristiche dell'asta del Rio Frejus al fine di quantificare i volumi di detrito presenti in alveo (in grado di alimentare il trasporto solido delle colate) e le condizioni di efficacia ed efficienza delle opere di difesa. Per quanto riguarda l'analisi geomorfologica in conoide e la relativa valutazione di pericolosità si è fatto riferimento a quanto realizzato nel Programma Interreg IIC, *Progetto raccolta e organizzazione di dati territoriali; valutazione di pericolosità e rischio dei fenomeni naturali e predisposizione di piani comunali di Protezione Civile* (Regione Piemonte, 2001), i cui prodotti sono stati riallineati secondo standard regionali nel successivo Progetto *CatchRisk* (AA.VV., 2005a; 2005b).

I risultati di questo approfondimento hanno contribuito alla realizzazione della *Carta geomorfologica di sintesi* e sono stati integrati con le elaborazioni in ambiente GIS finalizzate alla caratterizzazione delle aree di innesco. Tale carta **(figura 4.3.14)** riporta alcune informazioni utili per la definizione delle condizioni di pericolosità del bacino ed è stata realizzata sulla base sia di informazioni già presenti nel SIGeo di Arpa Piemonte, sia di nuovi dati relativi ai sopralluoghi condotti post-evento. I principali elementi riportati nella carta suddetta, suddivisi in gruppi omogenei, sono i seguenti:

- *depositi e forme legate ai fenomeni gravitativi*. Tali informazioni derivano dall'aggiornamento del Progetto nazionale IFFI (*Inventario dei Feno-*



Figura 4.3.15
Settori di cresta del bacini del Rio Merdovine. Sono visibili gli accumuli detritici alla base delle pareti di calcescisti filladici nei quali sono impostate profonde incisioni torrentizie



Figura 4.3.16
A monte del conoide di Bardonecchia, il Rio Frejus attraversa una profonda gola in roccia con pareti verticali talvolta superiori a 50-70 m di altezza. Tale tratto, lungo circa 1.5 km, presenta una inclinazione media inferiore ai 6° ed in alcuni punti la larghezza della sezione è inferiore a 2 m. Questa morfologia genera una sorta di imbuto naturale con "effetto filtro" che condiziona l'evoluzione dei processi torrentizi (potenziale formazione di ostruzioni temporanee e rilasci improvvisi di ingenti volumi di acqua e detrito)

meni Franosi in Italia; Arpa Piemonte, 2004a), in cui sono stati distinti in particolare la tipologia di movimento e lo stato di attività dei fenomeni gravitativi ed alcuni elementi morfologici significativi (scarpate, trincee, ecc.). Dall'analisi di questi dati risulta in frana il 58% del territorio del bacino del Rio Frejus, di cui il 35% con fenomeni attivi. I sopralluoghi hanno evidenziato che le aree sorgenti delle colate si trovano principalmente in corrispondenza dei settori di versante interessati da estesi fenomeni gravitativi, in cui si riscontrano movimenti in atto che interessano depositi eterometrici caotici, la cui componente ghiaioso-sabbiosa risulta prevalente;

- *localizzazione probabile delle valanghe.* Sono riportate le aree nelle quali si incanalano le masse nevose durante i processi di valanga, derivanti dalla cartografia realizzata da Arpa Piemonte per il territorio comunale di Bardonecchia. È stato deciso l'inserimento di tali informazioni in ragione dell'importanza che le masse nevose, presenti nei canaloni fino in estate avanzata, possono avere nell'evoluzione dei fenomeni di colata detritica;
- *aree detritiche instabili in prossimità delle aste torrentizie.* Sono state indicate le principali aree sorgenti che hanno fornito un contributo solido durante l'evento dell'agosto 2004 ed i settori di copertura instabili ed in equilibrio precario, in grado di alimentare futuri fenomeni di colata;
- *depositi e forme legate all'azione delle acque di ruscellamento.* Lungo i versanti e le incisioni secondarie sono riportate le aree a ruscellamento concentrato e quelle dove si sono verificate, nell'agosto 2004, colate detritiche minori;
- *stima del volume dei depositi presenti in alveo.* È stata effettuata la stima del volume dei depositi presenti in alveo e potenzialmente mobilizzabili durante eventi di piena, secondo il criterio definito nel Progetto *CathRisk* (per la descrizione del metodo si veda il § 2.5.2). Tale volume di detrito, quantificato in sezioni rappresentative dei vari tratti d'alveo considerando un tratto longitudinale unitario, esprime la *magnitudo unitaria*, classificata per esigenze di sintesi nelle seguenti classi: < 5 m^3, 5-10 m^3, 10-25 m^3, > 25 m^3. L'analisi della variazione di tale parametro lungo l'asta torrentizia consente di visualizzare con immediatezza le zone preferenziali di accumulo di materiale detritico e di stimare il volume totale potenzialmente rimobilizzabile.

Descrizione delle aree sorgenti

In tutto il bacino del Rio Frejus sono state osservate estese coperture detritiche da cui possono avere origine fenomeni di colata. In particolare, i settori di cresta compresi tra i bacini del Rio Merdovine ed il Rio Gautier presentano imponenti accumuli detritici di origine mista alla base di pareti rocciose ad elevato grado di fratturazione ed alterazione. Tali accumuli risultano profondamente incisi da numerosi corsi d'acqua e rappresentano importanti sorgenti di materiale facilmente erodibile **(figura 4.3.15)**.

Lungo i versanti meno acclivi sono presenti coperture detritico-eluvio-colluviali di potenza modesta (in genere < 2 m) nelle quali si evidenziano estesi fenomeni sia gravitativi sia erosivi (ruscellamento diffuso). I fenomeni gravitativi comprendono meccanismi di colamento lento e di scivolamento; in questi ultimi la superficie di scivolamento è impostata prevalentemente in corrispondenza del contatto copertura/substrato.

Anche all'interno degli alvei del reticolo idrografico sono diffusamente presenti ingenti quantitativi di detriti eterometrici incoerenti provenienti dai versanti o già in alveo a causa del fatto che il corso d'acqua incide accumuli detritici. Nell'alveo principale del Rio Frejus sono stati rilevati elevati valori di volumi unitari di materiale rimobilizzabile (classi da 10-25 m^3 a > 25 m^3 per metro lineare) a partire dalle principali confluenze fino all'imbocco della gola in roccia, a monte di Bardonecchia **(figura 4.3.16)**. I volumi totali medi ricavati con il "metodo *CatchRisk*" lungo le aste del Rio Merdovine e del Rio Gautier sono rispettivamente di $80 \cdot 10^3$ m^3 e $48 \cdot 10^3$ m^3.

Particolare attenzione è stata rivolta proprio alla caratterizzazione di questi due bacini interessati in modo significativo dall'evento dell'agosto 2004 e di seguito descritti nel dettaglio.

Rio Gautier (per l'ubicazione dei punti descritti si veda la **figura 4.3.17**)

- *Punto 0.* Tratto con inclinazioni superiori a 35° nel quale sono state individuate, nel corso dei sopralluoghi effettuati alla fine di agosto 2004,

cospicue masse nivali prevalentemente ricoperte da detriti **(figura 4.3.18)**. La quantità di detrito osservata sopra i residui nevosi rappresenta un indice di ricarica stagionale del detrito in alveo. La rottura o lo scioglimento in modo repentino dei ponti di neve può essere causa di rilasci improvvisi di acqua e detrito in grado di innescare fenomeni di colata.

- *Punto 1*. Tratto d'alveo con inclinazioni di 22°-25° circa ed in cui è presente un'elevata quantità di materiale detritico incoerente (> 25 m³ per metro lineare). La sponda destra presenta pendenze da molto elevate a sub-verticali ed è incisa in detrito di falda debolmente incoerente, caotico ed eterometrico. La falda detritica presenta generalizzati indizi di instabilità (scarpate e rigonfiamenti) ed alcuni impluvi generati dal ruscellamento concentrato.
- *Punto 2*. Tratto caratterizzato dalla presenza sul versante sinistro di un esteso movimento gravitativo complesso ed attivo. In questo tratto, le sponde sono alte 8-10 m e sono costituite da detrito eterometrico (con matrice sabbioso-ghiaiosa prevalente), incoerente o debolmente cementato. Le condizioni di instabilità delle sponde e l'elevata quantità di materiale (in alveo e sulle sponde) svolgono un ruolo sostanziale nella formazione e/o alimentazione delle colate detritiche **(figura 4.3.19)**.
- *Punto 3*. Tratto inciso al piede dell'esteso fenomeno gravitativo descritto al punto 2, caratterizzato da forte inclinazione (> 30°) e da accentuata erosione della sponda in detrito. L'analisi della carta dell'area del drenaggio, realizzata secondo il metodo di Tarboton (1997, 2002), evidenzia che in questo tratto vi sono zone preferenziali di deflusso e ristagni d'acqua che indicano la predisposizione alla saturazione delle coltri superficiali **(figura 4.3.20)**.
- *Punto 4*. Confluenza con il Rio Frejus caratterizzata dalla prevalenza di processi deposizionali a causa della brusca riduzione della pendenza. Le tracce delle massime altezze raggiunte dalla colata dell'agosto 2004, misurate nel canale principale immediatamente dopo l'evento, raggiungono in questo settore 4-5 m da fondo alveo; i depositi che costituiscono i lobi laterali, esterni al canale principale, hanno uno spessore poco superiore al metro **(figura 4.3.8)**.

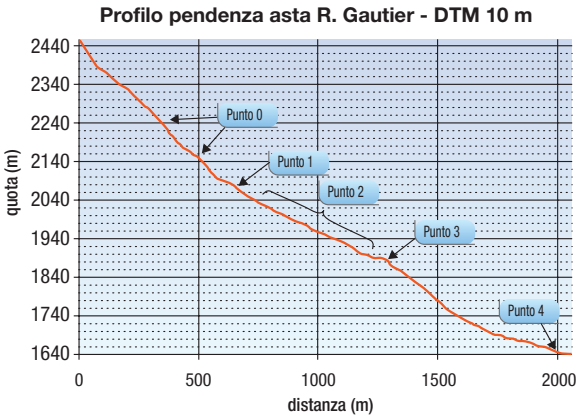


Figura 4.3.17
Profilo longitudinale dell'asta principale del Rio Gautier. I punti da 0 a 3 evidenziano le principali aree sorgenti dell'evento dell'agosto 2004. Il punto 4 indica la confluenza con il Rio Frejus



Figura 4.3.18
Ponti di neve ricoperti da materiale detritico osservati a quota 2'250 m circa nell'alveo del Rio Gautier alla fine di agosto 2004



Figura 4.3.19
Ripresa verso valle dell'asta principale del Rio Gautier a quota 1'940 m circa. Sono osservabili le caratteristiche geometriche e sedimentologiche delle sponde in cui si evidenziano alcune recenti erosioni (in primo piano su entrambe le sponde)

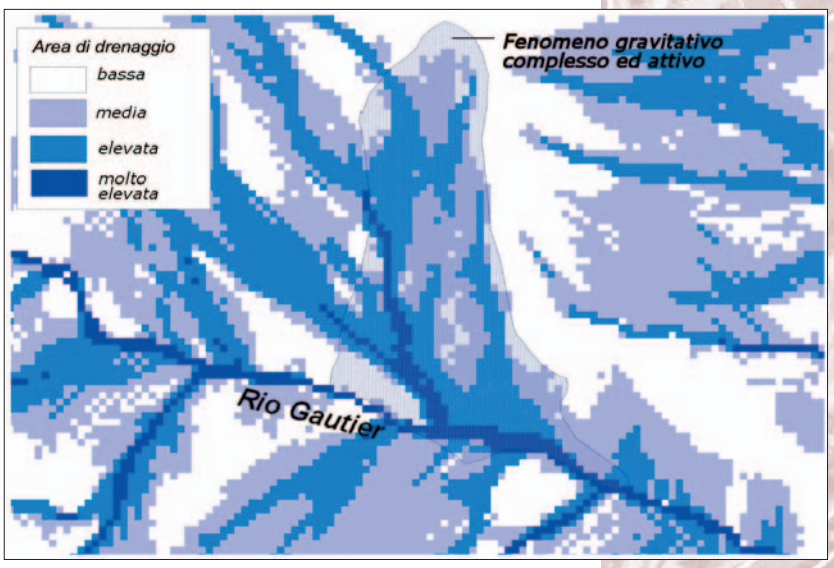


Figura 4.3.20
Stralcio della carta delle aree di drenaggio relativo al tratto del versante sinistro del Rio Gautier interessato da un esteso fenomeno gravitativo.
La carta deriva da elaborazioni in ambiente GIS in cui l'area di studio è suddivisa in celle di 10 m di lato, ad ognuna delle quali è assegnato un valore corrispondente al numero di celle il cui deflusso converge sulla cella considerata (Tarboton, 1997; 2002). Ad elevati valori di numero di celle (area da elevata a molto elevata) corrisponde un deflusso superficiale intenso e concentrato. In corrispondenza dell'instabilità del versante si evidenzia un intenso deflusso superficiale che, in relazione alle caratteristiche e condizioni di stabilità del materiale presente, ha un importante ruolo predisponente nell'innesco dei fenomeni di colata

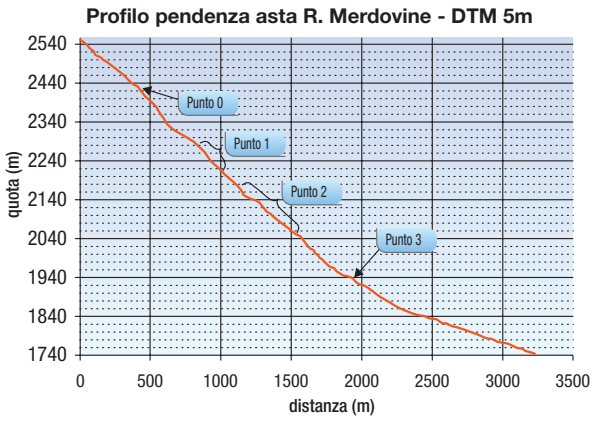


Figura 4.3.21
Profilo longitudinale dell'asta principale del Rio Merdovine. I punti da 0 a 3 evidenziano le principali aree sorgenti dell'evento dell'agosto 2004

Rio Merdovine (per l'ubicazione dei punti descritti si veda la **figura 4.3.21**)

- *Punto 0.* Rottura di pendenza in corrispondenza della quale l'alveo diventa molto acclive (> 30°) ed è inciso in *diamicton* con grado di addensamento da basso a nullo **(figura 4.3.22)**; in alveo sono stati stimati oltre 25 m^3 per metro lineare di depositi immediatamente rimobilizzabili. A valle di questa rottura di pendenza, l'alveo presenta spiccate differenze tra le due sponde: la sponda sinistra delimita un settore particolarmente evoluto di un'estesa *Deformazione Gravitativa Profonda di Versante* (DGPV) ed è costituita prevalentemente da depositi di frana in equilibrio precario **(figura 4.3.23)**; la sponda destra è costituita da affioramenti di calcescisti più o meno carbonatici alternati a modesti depositi detritico-colluviali.
- *Punto 1.* Tratto con inclinazione di 20°-25° circa inciso al piede di uno scivolamento rotazionale attivo (sponda sinistra) in cui si evidenziano numerose scarpate, fenditure, trincee, emergenze idriche. Il volume instabile complessivo, direttamente afferente al corso d'acqua, è di oltre 60'000 m^3 **(figura 4.3.24)**.
- *Punto 2.* Tratto di 500-600 m di lunghezza, caratterizzato dalla presenza in sinistra idrografica di numerosi fenomeni gravitativi complessi la cui origine è legata alla estesa DGPV (*Auct.*) che coinvolge tutto il versante sinistro del bacino del Rio Frejus **(figure 4.3.23** e **4.3.24)**. Tale sponda, alta alcune decine di metri, è costituita da blocchi e ciottoli immersi in abbondante matrice sabbioso-limosa derivante dall'alterazione e disgregazione dei calcescisti filladici. Talvolta sono rilevabili porzioni rocciose di alcune centinaia di metri cubi. L'analisi della carta delle aree di drenaggio (**figura 4.3.25)** mette in evidenza come l'area in deformazione gravitativa sia soggetta a un deflusso superficiale intenso e diffuso.
- *Punto 3.* Tratto a moderata inclinazione (10°-12°) e con sezione trasversale moderatamente più ampia del tratto a monte. In questo settore sono state osservate, nelle foto aeree del luglio 2001, cospicue masse nevose in parte mascherate dal sovrastante detrito, presumibilmente originate dall'accumulo di valanghe provenienti dal bacino del Rio Graviere.



Figura 4.3.22
Ripresa del 18 agosto 2004 dell'asta principale del Rio Merdovine, a quota 2'430 m circa.
Sono evidenti le tracce del passaggio della colata del 6 agosto (erosioni e depositi) e, sullo sfondo, il settore ad elevata pendenza da cui ha avuto origine. La sponda sinistra, alta in questo tratto 6-10 m, è costituita da depositi di frana in equilibrio precario



Figura 4.3.23
Versante meridionale del monte Roccia Verde (sullo sfondo) in cui si evidenziano (linee rosse) morfologie tipiche legate ai fenomeni di Deformazione Gravitativa Profonda di Versante (DGPV Auct.)

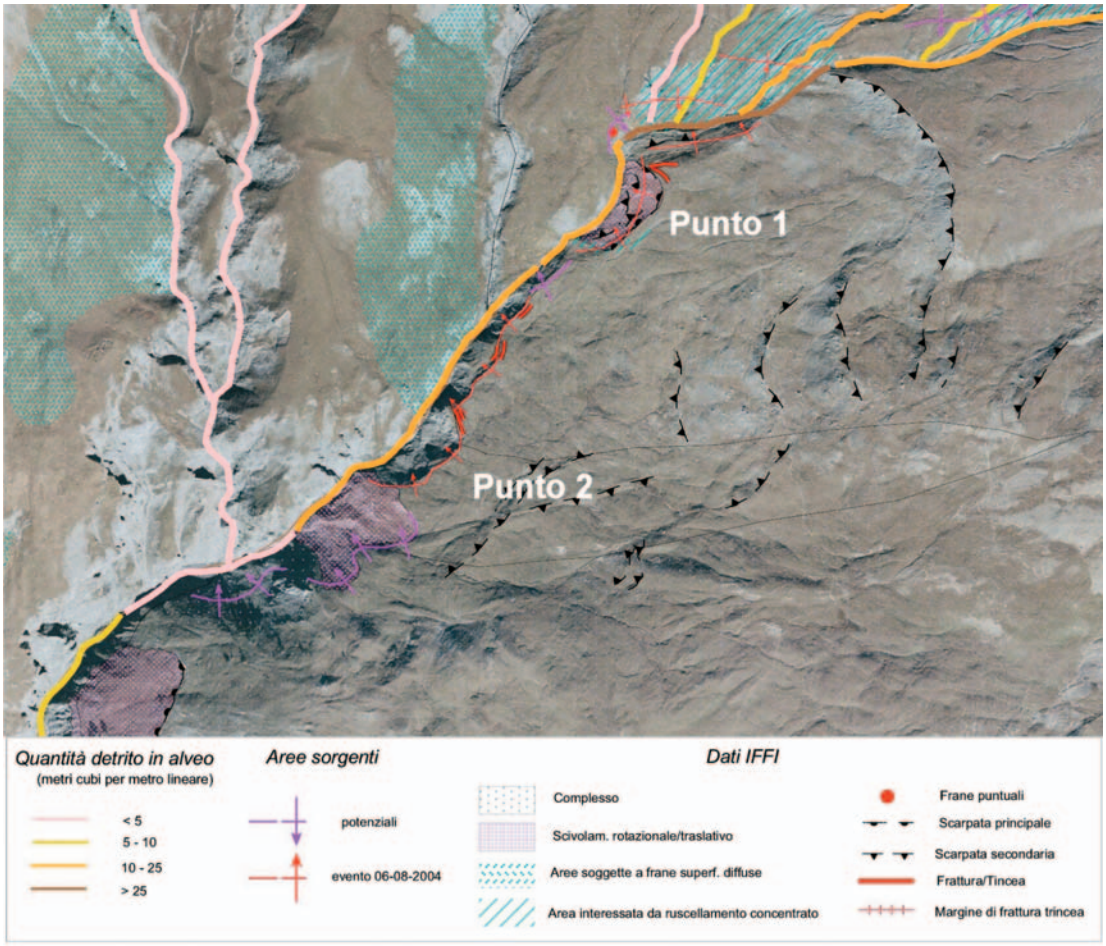


Figura 4.3.24
Estratto della carta geomorfologica sovrapposta alla fotografia aerea del Volo Regione Piemonte Alluvione 2000

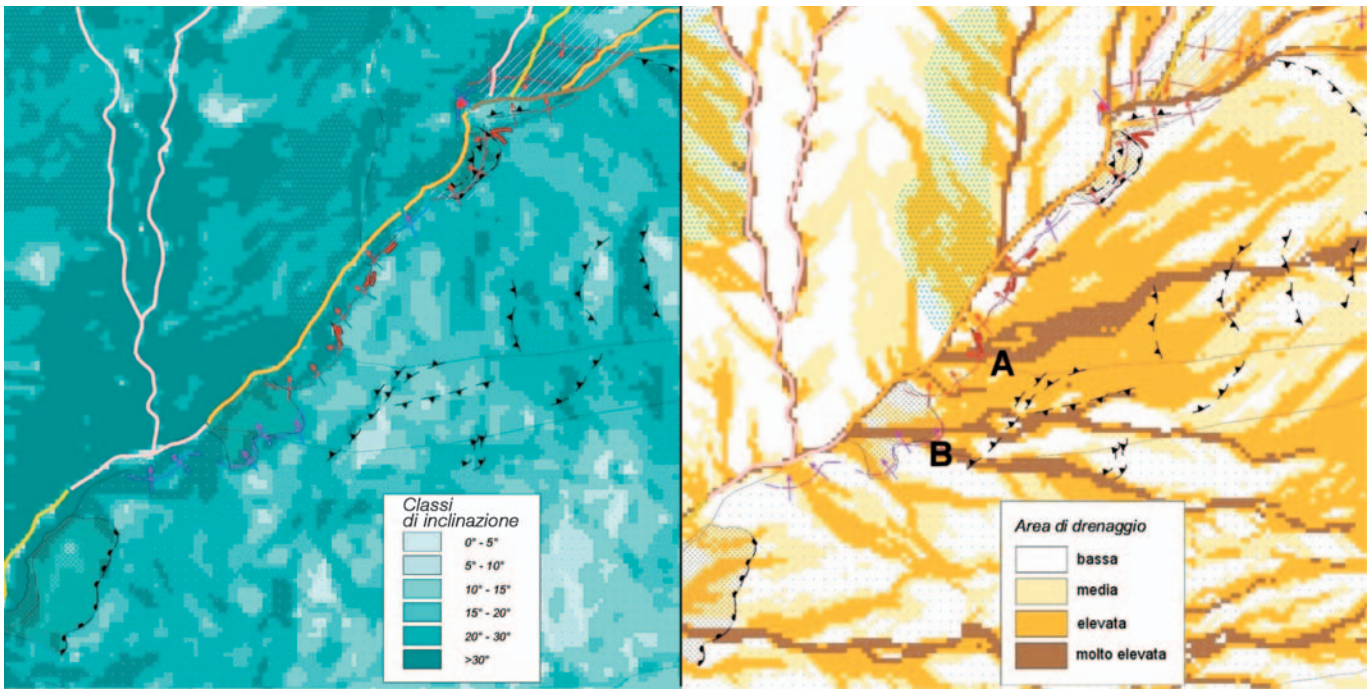
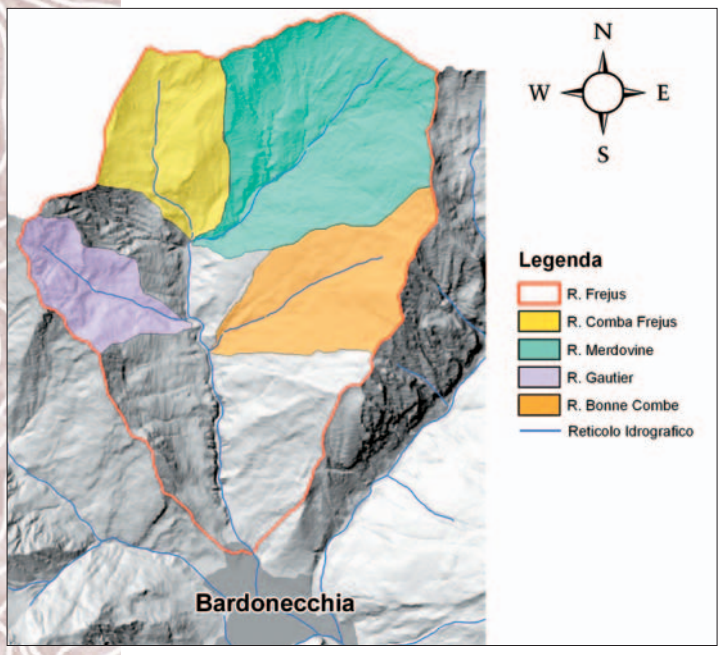


Figura 4.3.25
Estratto delle carta delle inclinazioni (a sinistra) e dell'area di drenaggio (a destra, per la descrizione del metodo – figura 4.3.20) riferito all'area in figura 4.3.24. Come esempio vengono indicate con A e B le zone dove si correla rispettivamente l'arretramento delle scarpate di erosione e l'innesco di scivolamenti gravitativi con deflussi superficiali particolarmente intensi. Da questa immagine risulta evidente il ruolo del reticolo idrografico superficiale, ancorché poco sviluppato, nel modellamento dei versanti e nell'attivazione dei fenomeni gravitativi

4.3.5 Analisi idrologica

Al fine di completare l'analisi dell'evento del 6 agosto 2004, sono stati applicati due differenti approcci idrologici per la valutazione delle portate. Un primo approccio si basa sui quantitativi di pioggia osservati e conduce al calcolo delle portate liquide, mentre il secondo approccio fornisce, da un'analisi a posteriori, una portata di picco sulla base della tipologia del processo e delle tracce della colata. In questo secondo caso, attraverso l'applicazione di formule empiriche, è stato possibile distinguere tra componente solida e componente liquida, quest'ultima confrontata successivamente con quella calcolata con il primo approccio.

Figura 4.3.26
Localizzazione dei bacini e relative sezioni di chiusura



Calcolo delle portate liquide basato sulle precipitazioni

La stima delle portate al colmo è stata condotta attraverso due differenti procedure: una metodologia analitica ed una modellazione idrologica distribuita. Sono state individuate le sezioni corrispondenti alle confluenze dei principali affluenti del Rio Frejus ed i relativi sottobacini contribuenti **(figura 4.3.26)**, di cui sono riportate nella **tabella 4.3.7** alcune informazioni morfometriche ed il tempo di corrivazione.
L'approccio analitico è consistito nell'utilizzo della formula razionale, di frequente applicazione per i piccoli bacini, che consente la valutazione della portata di piena Q_{max} [m³/s] mediante la seguente relazione:

$$Q_{max} = \frac{C \cdot i_{max} \cdot A}{3.6} \qquad (4.3.1)$$

in cui C è il coefficiente di deflusso che tiene conto della riduzione dell'afflusso meteorico per effetto delle caratteristiche di permeabilità dei suoli ricadenti nel bacino, i_{max} [mm/h] è il valore di precipitazione pari alla massima intensità registrata il giorno 6 agosto 2004, di durata pari al tempo di corrivazione del bacino, quest'ultimo ottenuto applicando la formula di Giandotti (1934), A [km²] è la superficie del bacino.
Nel caso oggetto di studio si è ipotizzato un valore del coefficiente di deflusso per tutti i bacini pari a 1, considerando quindi un suolo completamente saturo tale per cui la totalità della precipitazione contribuisce al deflusso superficiale generando la massima portata liquida.

Il secondo approccio, il modello idrologico FEST (Mancini, 1990), utilizzato per il calcolo delle portate in corrispondenza delle sezioni considerate, è un modello distribuito, ad evento, basato sul metodo del CN (*curve number*) del *United Soil Conservation Service* (Bingner & Theurer, 2001) per il calcolo del deflusso superficiale e sul metodo Muskingum Cunge (Cunge, 1969; Ponce & Chaganti, 1994) per la sua propagazione.

Il parametro CN, stimato definendo le caratteristiche idrologiche dei suoli e della copertura vegetale, assume valori compresi tra 0 e 100 e rappresenta l'attitudine del bacino esaminato a produrre deflusso. I dati disponibili hanno una risoluzione di 100 m per quel che riguarda il parametro CN e di 10 m per le caratteristiche morfologiche del terreno. Il metodo tiene conto delle condizioni di umidità del suolo antecedenti l'inizio dell'evento che nella simulazione in oggetto si è ipotizzata una classe AMC pari a 3 che corrisponde a terreno molto umido.

I valori di precipitazione utilizzati in ingresso al modello sono relativi al giorno 6 agosto e derivano da misurazioni dirette registrate dalle stazioni pluviometriche (Camini Frejus e Prerichard) e dalle mappe di pioggia fornite dal radar meteorologico del Bric della Croce. Queste ultime forniscono per la loro natura una forzante pluviometrica spazialmente distribuita, in grado quindi di descrivere l'effettivo volume di pioggia per l'area considerata (Cremonini *et al.*, 2003), mentre le misure puntuali necessitano dell'applicazione di metodi per il calcolo delle superfici d'influenza delle stazioni pluviometriche. Nel caso di studio analizzato, la situazione della rete di monitoraggio risulta essere ideale in quanto il pluviometro di Camini Frejus

TABELLA 4.3.7 BACINI E LORO CARATTERISTICHE

Bacino	Superficie [km²]	Lunghezza asta principale [km]	Altitudine media [m slm]	Tempo di corrivazione [h]
R. Comba Frejus	2.82	2.20	2'414	0.5
R. Merdovine	6.38	3.39	2'475	0.7
R. Gautier	1.87	2.12	2'287	0.4
R. Bonne Combe	3.25	2.50	2'150	0.6
R. Frejus	22.0	7.80	2'180	1.3

si trova nelle vicinanze dei sottobacini considerati e all'interno del bacino del Rio Frejus, inoltre il confronto con le osservazioni del radar meteorologico confermano la coerenza dei dati di precipitazione osservati. Nella **tabella 4.3.8** si riportano i valori di portata al colmo per i bacini considerati ottenuti utilizzando la formula razionale ed il modello idrologico distribuito (FEST) in cui le forzanti meteorologiche sono ricavate rispettivamente dalla rete di monitoraggio al suolo e dalle mappe radar.

I risultati forniti dall'applicazione del metodo razionale consentono una stima approssimata delle massime portate liquide transitate nelle sezioni considerate relative alle precipitazioni del giorno 6 agosto 2004 che, per la sezione di chiusura posta a quota 1'330 m in corrispondenza dell'apice del conoide di Bardonecchia, risulta essere pari a 40 m^3/s. Il valore di portata al colmo ottenuta dall'utilizzo del modello FEST per la sezione di chiusura, ipotizzando come forzante meteorologica le precipitazioni fornite dal radar meteorologico, risulta essere di circa 17 m^3/s con un orario del picco stimato alle 18:30 UTC del 6 agosto 2004; mentre utilizzando i dati della stazioni pluviometriche si ottiene un valore di 21 m^3/s alle 18:40 UTC del 6 agosto 2004.

Infine, i dati idrometrici registrati durante l'evento (idrometro di Beaulard sito sulla Dora di Bardonecchia con frequenza di rilevazione del dato di 5 minuti) riportano alle ore 18:50 UTC un picco di 0.58 m rispetto allo zero idrometrico, da cui si ricava un valore di portata pari a 20 m^3/s. Il massimo osservato risulta essere inferiore al livello corrispondente all'ordinaria criticità (1.6 m).

TABELLA 4.3.8 VALORI DI PORTATA AL COLMO OTTENUTI DALL'UTILIZZO DELLA FORMULA RAZIONALE E DEL MODELLO FEST

Bacino	Formula razionale (C=1)		FEST	
	Intensità di pioggia [mm/h]	Portata [m^3/s]	Mappe Radar Portata [m^3/s]	Dati da Pluviometri Portata [m^3/s]
R. Comba Frejus	14.1	11	3	4
R. Merdovine	10.0	18	4	6
R. Gautier	14.0	7	2	3
R. Bonne Combe	11.4	10	2	3
R. Frejus	6.5	40	17	21

Stima della portata di picco della colata dal rilievo delle tracce d'evento

La stima della portata di picco dell'evento 2004, effettuata a posteriori in base all'analisi delle evidenze morfologiche e delle tracce del passaggio della colata, è stata condotta attraverso l'applicazione di equazioni del moto specifiche per il tipo di processo torrentizio considerato. Prima di procedere con i calcoli è necessario, pertanto, caratterizzare il processo che ha interessato il Rio Frejus il 6 agosto 2004. Sulla base dei rilievi di terreno, delle testimonianze verbali e delle fotografie scattate in corso d'evento, si sono evidenziate delle differenze tra le caratteristiche del deflusso in conoide e lungo le aste tributarie in cui ha avuto origine il processo. Infatti, sul conoide si può ragionevolmente supporre che si sia verificato un processo in moto turbolento, a componente liquida rilevante, ricadente nelle correnti detritiche inerziali ibride pietroso-fangose **(figura 4.3.27)**; mentre i bacini dei rii Gautier e Merdovine sono stati interessati da correnti detritiche mature (per la classificazione si veda Takahashi, 1991 e 1999 in Ghilardi *et al.*, 1999).
Per la stima della portata di picco si è fatto riferimento alla correlazione tra portata di picco unitaria e massima profondità di flusso, in funzione della velocità di propagazione del flusso e la pendenza del canale (Hungr *et al.*, 1984; Rickenmann & Zimmermann, 1993).



Figura 4.3.27
Ripresa verso valle del Rio Frejus dal ponte di via Torino, durante la fase conclusiva della colata del 6 agosto 2004 (fonte: Consorzio Forestale Alta Valle di Susa)

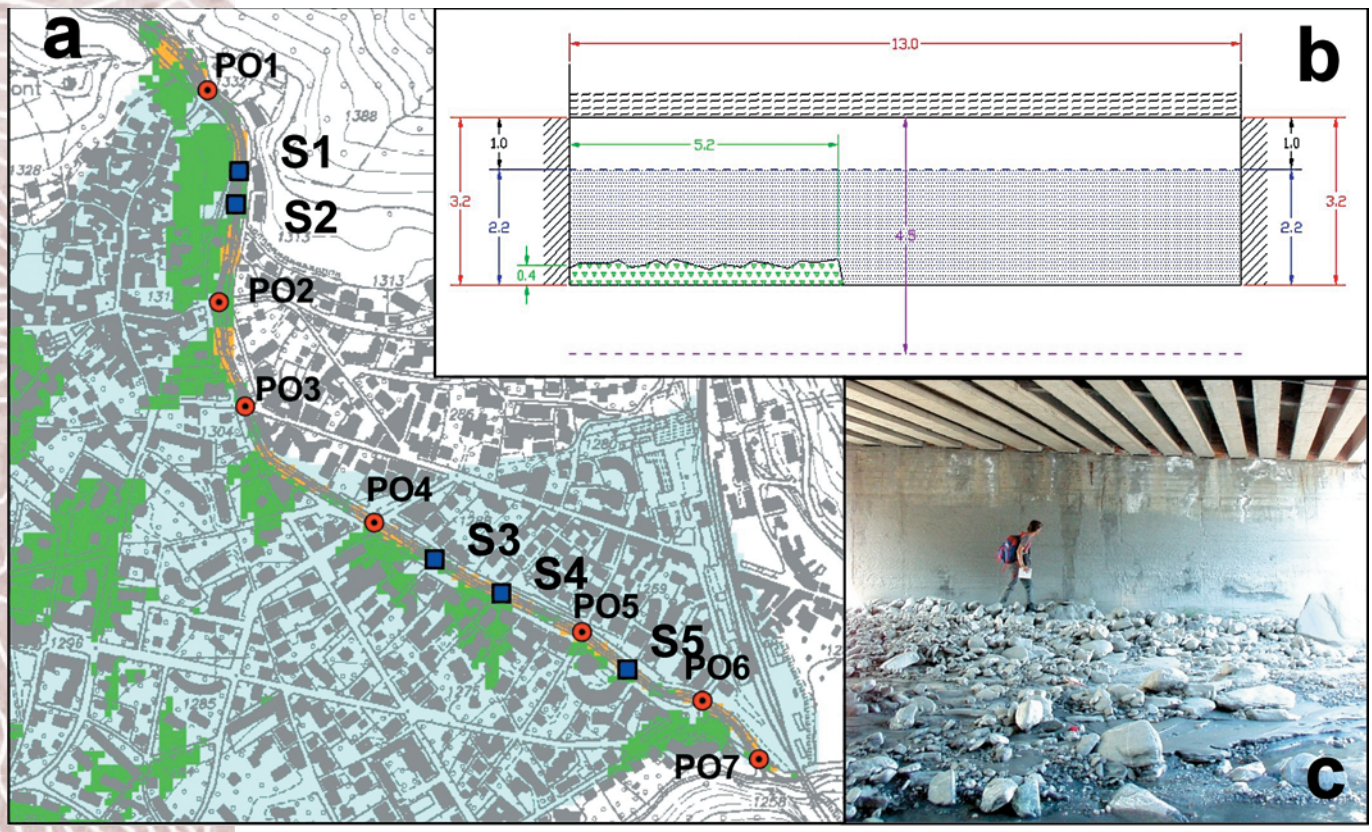


Figura 4.3.28

a) *Carta del pericolo per il conoide di Bardonecchia* prodotta nel Progetto *CatchRisk* (AA.VV., 2005a; 2005b): arancio = pericolo elevato, verde = pericolo moderato, azzurro = pericolo basso. Sono, inoltre, evidenziati i punti in cui sono state rilevate le sezioni di transito della colata (PO: attraversamenti, S: tratti rettilinei).

b) Particolare della sezione del ponte PO4: in blu il livello raggiunto dalla colata del 6 agosto 2004; in fucsia l'altezza dell'infradosso da fondo alveo misurata nel febbraio 2001; in verde i lembi di depositi terrazzati osservati in occasione delle misurazioni 2004.

c) Dettaglio fotografico delle tracce della colata rilevate in sinistra idrografica sotto l'impalcato dell'attraverso PO4. Dal confronto delle condizioni dell'alveo in conoide tra la situazione post-evento 6 agosto 2004 e del febbraio 2001 (Regione Piemonte, 2001), si evince che le riduzioni della luce degli attraversamenti aumentano progressivamente da monte verso valle: riduzione delle sezioni di deflusso < 20% per PO1, PO2, PO3, PO4; riduzione della sezione di deflusso di circa il 50% in corrispondenza del ponte PO5 e > 80% in PO6 e PO7

Le tracce di percorrenza della colata sono state rilevate in una serie di sezioni trasversali sia nel canale principale del conoide, in corrispondenza dei manufatti di attraversamento e di alcuni tratti canalizzati subrettilinei (rispettivamente PO ed S in **figura 4.3.28**), sia nell'alveo dei sottobacini dei rii Gautier e Merdovine, in corrispondenza di tratti in curva.

In conoide è stata ricavata una portata unitaria di picco di circa 6 m^2/s, corrispondente ad una portata di picco complessiva (solido-liquida) di circa 75 m^3/s, sulla base dei seguenti dati:

- la profondità di flusso media relativa alla portata di picco è compresa tra 2.2–2.5 m con una larghezza media dell'alveo nel tratto considerato di 13 m;
- l'inclinazione dell'alveo ha un valore medio < 6°;
- la velocità della colata, per la quale non sono disponibili precise rilevazioni in corso d'evento, è ipotizzabile fosse compresa tra 2 m/s e 3 m/s, in considerazione del tipo di processo considerato e dei valori di pendenza dell'alveo in conoide (Rickenmann & Zimmermann, 1993).

Lungo le aste tributarie dei rii Gautier e Merdovine, invece, è stato misurato il sovralzo in curva della colata al fine di effettuare stime di velocità in base ai metodi proposti da Johnson & Rodine (1984) e da Hungr *et al.* (1984): entrambi i metodi sono basati sulla differenza di altezza della colata misurata sulle due sponde in un tratto curvo (infatti, per effetto della forza centrifuga la colata in corrispondenza delle curve raggiunge un'altezza maggiore sulla sponda esterna rispetto a quella raggiunta in sponda interna). In base ai dati di sovralzo, del raggio di curvatura della linea che individua

TABELLA 4.3.9 DATI DI VELOCITÀ PER I RII COMBA GAUTIER E MERDOVINE

Rio Comba Gautier*			Rio Merdovine**		
i = 14°	Rc = 18 m	v [1] = 5.5 m/s v [2] = 3.4 m/s	i = 8°	Rc = 13 m	v [1] = 3.6 m/s v [2] = 2.4 m/s

** a monte della confluenza nel Torrente Frejus*

*** a monte della confluenza con il Rio Comba del Frejus*

[1] Johnson & Rodine (1984) e [2] Hungr *et al.* (1984)

il centro alveo (*Rc)* e della inclinazione del canale (*i*), si può dedurre la velocità della colata (in m/s). Sulla base dei valori medi di velocità calcolati **(tabella 4.3.9)**, la portata di picco complessiva calcolata per i due tributari considerati, risulta di 105 m^3/s circa per il Rio Comba Gautier e di 78 m^3/s circa per il Rio Merdovine.

Stima delle componenti solido/liquida

Partendo dai dati di portata di picco complessiva, è stata effettuata una suddivisione indicativa della portata nelle componenti liquida e solida in riferimento ad un approccio computazionale che mette in relazione la portata liquida e la portata totale attraverso valori di concentrazione volumetrica (Takahashi, 1981).

La massima portata totale (solida e liquida) della colata Q_d (m^3/s) è correlata alla portata liquida dalla seguente relazione:

$$Q_d = Q_l \cdot [c^* / (c^* - c_v)] \qquad (4.3.2)$$

dove:

Q_l è la portata massima liquida [m^3/s];

c_v è la concentrazione volumetrica di equilibrio dei solidi (fini e grossolani) nella corrente in moto uniforme;

c^* è la concentrazione volumetrica della fase solida di massimo impaccamento (c^* = 0.8 sul conoide del Rio Frejus e c^* = 0.7 sul Rio Gautier e Merdovine).

La concentrazione volumetrica dei solidi grossolani nella corrente detritica *matura* in moto uniforme c_{df} è fornita dall'equazione di Takahashi, confermata sperimentalmente da vari Autori, è la seguente:

$$c_{df} = \rho_m \cdot \tan\theta / (\rho_s - \rho_m) \cdot (\tan\varphi - \tan\theta) \qquad (4.3.3)$$

dove:

θ è l'inclinazione del terreno nel tratto considerato [°];

φ è l'angolo di attrito statico del terreno [°];

ρ_s è la densità dei solidi grossolani (di norma 2600-2700 kg/m^3);

ρ_m è la densità del fluido interstiziale, costituito da acqua e sedimenti fini [kg/m^3].

Nelle colate detritiche *immature*, la concentrazione di trasporto c_q (rapporto tra portata solida e portata totale della corrente detritica) può essere stimata in base ad una formula empirica proposta dallo stesso Takahashi (1981), per cui:

$$c_q = 6.7 \cdot (c_{df})^2 \qquad (4.3.4)$$

Vista la notevole difficoltà nella corretta valutazione dei parametri di *input* (la variazione anche minima di alcuni di questi parametri influenza in modo sensibile le portate), i risultati esposti sono da considerarsi puramente indicativi per il confronto con quanto ricavato dalla modellazione idraulica. Le portate massime complessive risultano in queste ipotesi scomposte nelle due componenti – portata liquida e solida – mediamente attestate intorno ai valori percentuali riportati in **tabella 4.3.10**.

TABELLA 4.3.10 RAPPORTI RELATIVI TRA PORTATA COMPLESSIVA (100%) E COMPONENTI LIQUIDA E SOLIDA

	Rio Gautier	Rio Merdovine	Rio Frejus
Q liquida	20%	55%	75%
Q solida	80%	45%	25%

Alla luce delle analisi e delle stime effettuate, è importante sottolineare che le tracce osservate sono relative alla portata di picco mentre i valori che caratterizzano la colata (c^*, φ, ρ_m) sono stati assegnati considerando l'evoluzione complessiva della stessa. La distinzione tra la componente liquida e quella solida dipende in modo determinante dalla pendenza del canale, dalla granulometria del materiale solido e dalla densità e dal grado di addensamento del miscuglio della colata. In particolare il valore della portata solida aumenta all'aumentare del valore di pendenza del canale e del valore di densità attribuito al fluido interstiziale della colata e al diminuire del valore dell'angolo di attrito statico del materiale solido mobilizzabile e del coefficiente di massimo impaccamento della colata (c^*).

Considerazioni sulle portate liquide

Dal confronto tra le portate liquide calcolate con il metodo indiretto di Takahashi ed il modello idrologico FEST, in tutte le sezioni prese in considerazione risulta una notevole discrepanza tra i valori. In particolare, sul conoide del Rio Frejus (in prossimità dell'apice) la portata liquida stimata con il metodo indiretto è superiore di circa tre volte rispetto a quella dedotta con il modello FEST; mentre sul Rio Merdovine e sul Rio Gautier le portate stimate con il metodo indiretto sono superiori di circa 7 volte rispetto alle portate calcolate utilizzando i dati delle stazioni pluviometriche e di 10 volte circa rispetto alle portate calcolate mediante i dati delle mappe radar. Tale situazione è interpretabile, oltre che per problemi connessi all'applicazione delle formule empiriche nel metodo indiretto, agli effetti di amplificazione che il processo torrentizio subisce in corso d'evento che conduce ad una sovrastima delle portate.

Infatti, il carattere impulsivo del *trasporto solido iperconcentrato* comporta estrema variabilità temporale e spaziale dei processi, con ondate di piena violente ed intense alternate a momenti con portate minori, come osservato in occasione dell'evento dell'agosto 2004. Tali riflessioni hanno importanti ricadute sulla valutazione della *magnitudo* dell'evento di cui non è possibile definire con precisione il valore (ordine di grandezza di alcune migliaia di metri cubi).

4.3.6
Considerazioni conclusive

In conclusione, sulla base dei risultati conseguiti, è necessario puntualizzare alcuni aspetti importanti relativi sia alle caratteristiche specifiche dell'evento dell'agosto 2004, sia agli elementi che in generale condizionano l'innesco e l'evoluzione dei fenomeni di colata nel bacino del Rio Frejus. In particolare, pur lasciando aperte alcune importanti questioni, le analisi hanno fornito interessanti spunti di riflessione per l'affinamento dei metodi di previsione e prevenzione di tali fenomeni.
La colata dell'agosto 2004, pur avendo destato preoccupazione per i danni che si sono verificati, non ha certo rivestito carattere di eccezionalità in quanto si inserisce in un quadro del dissesto ormai ben noto. Infatti, le notizie storiche ed i documenti tecnici più recenti indicano chiaramente che tali fenomeni si verificano con elevata frequenza, soprattutto nel periodo estivo (da maggio a settembre), procurando ogni volta danni di varia gravità.

L'analisi delle altezze di pioggia registrate nel corso degli eventi che hanno accompagnato l'innesco dei fenomeni, sia per l'evento 2004 sia per quelli storici, fornisce un quadro nel quale, in relazione ai sistemi di riferimento delle piogge critiche adottate a livello regionale, le precipitazioni del giorno d'innesco appaiono poco significative come elemento determinante.

Durante le osservazioni in fase di monitoraggio dell'agosto 2004, solamente la pioggia del giorno 3 ha raggiunto la soglia pluviometrica di moderata criticità adottata nel Sistema di Allerta Regionale. L'analisi statistica ha evidenziato per tale data una pioggia con tempo di ritorno compreso tra 3 e 8 anni, mentre le precipitazioni del giorno 6, in cui si è verificata la colata, sono di poco superiori alla pioggia del giorno medio piovoso.

D'altro canto, il bacino del Frejus presenta evidenti elementi geologici e geomorfologici predisponenti all'innesco ed alla propagazione delle colate, il principale dei quali risulta essere la presenza di imponenti accumuli detritici in diretta interferenza con il reticolo idrografico. Le analisi condotte per la caratterizzazione delle aree sorgenti della colata dell'agosto 2004 hanno evidenziato un quadro tipico dei bacini alpini impostati nelle unità di calcescisti, in cui i versanti risultano spesso interessati da estesi fenomeni gravitativi. Tali fenomeni, di differente tipologia e grado evolutivo, sono infatti i principali responsabili della produzione di materiale detritico presente sia in alveo sia sulle sponde dei corsi d'acqua. Ciò è verificabile principalmente lungo le aste torrentizie dei sottobacini Merdovine, Comba Gautier e Comba del Frejus, incise all'interno o ai margini di imponenti accumuli di origine gravitativa.

L'origine principale delle colate che interessano il bacino in esame risulta pertanto essere all'interno degli alvei, spesso intasati da abbondanti materiali sciolti in cui prevale la componente fine (limoso-sabbiosa), derivante dai processi di disgregazione ed alterazione dei calcescisti ricchi in livelli filladici. Più in generale le principali aree di innesco sono localizzate dove si osservano contemporaneamente elevati valori di: (1) volumi di materiale detritico, (2) pendenza delle aste torrentizie e (3) aree sottese contribuenti al deflusso (analisi dell'area di drenaggio). Meno significativo pare, invece, l'innesco di colate detritiche a partire dai fenomeni gravitativi interessanti le coperture superficiali sui versanti.
In questo contesto, affinché si inneschino le colate, è necessario un apporto idrico sufficientemente elevato ed improvviso in grado di mobilizzare repentinamente grandi quantitativi di materiale, prelevati in più punti lungo il corso d'acqua. È possibile ipotizzare che l'energia per la mobilizzazione del materiale sia fornita dallo svuotamento repentino di sbarramenti temporanei che si possono produrre lungo l'alveo. Tali sbarramenti possono prodursi a monte di fenomeni gravitativi, di precedenti fenomeni di colata detritica oppure ancora di accumuli nivali. L'evoluzione di queste piene improvvise e della propagazione verso valle della colata, con la potenziale formazione di ulteriori sbarramenti e rilasci repentini, amplifica gli effetti del fenomeno torrentizio lungo il suo percorso. Le caratteristiche geometriche e morfologiche del bacino, unitamente alla presenza di opere di sistemazione, condizionano l'equilibrio dei processi erosivo-deposizionali con importanti conseguenze in conoide, dove risiedono i principali elementi a rischio.

Particolarmente significative sono risultate le osservazioni in corso d'evento ed i rilevamenti effettuati nei giorni seguenti che hanno permesso di verificare che le caratteristiche reologiche della colata del 2004 si sono modificate lungo l'asta torrentizia, passando da una corrente detritica matura (nelle parti alte del bacino) ad una corrente detritica inerziale ibrida pietroso-fangosa (in conoide). In altri termini, il fenomeno si è evoluto passando da un processo più ricco in componente solida ad un processo in moto turbolento a componente liquida prevalente. Tale evoluzione è legata alle dimensioni del bacino (con estensione areale superiore ai 22 km^2) e dell'asta percorsa dalla colata (lunga circa 8 km, di cui gli ultimi 2 km a monte del conoide con inclinazione inferiore ai 10°), che favoriscono la deposizione del materiale trasportato. Questo aspetto viene particolarmente enfatizzato in corrispondenza della forra presente a monte del conoide, in cui la ridotta sezione di deflusso (non oltre 1.5-2 m) e la bassa inclinazione (circa 5°) diminuiscono la velocità della colata e la granulometria del materiale in transito.

In base alle considerazioni sopraesposte, la probabilità temporale di questi eventi subisce l'influenza di numerose variabili che, al momento attuale, sono di difficile valutazione e quantificazione. Infatti, per la comprensione dei meccanismi di innesco delle colate è necessario considerare sia le precipitazioni sia le caratteristiche del bacino in un modello assai complesso e dinamico che ha validità esclusivamente per il bacino indagato. D'altronde, anche nella vasta letteratura disponibile sull'argomento, non è possibile reperire una metodologia univoca ai fini previsionali, valida su estesi ambiti territoriali; anzi, la maggior parte di questi lavori evidenzia la necessità di approfondire accuratamente la conoscenza del bacino, l'analisi degli eventi storici ed il monitoraggio delle cause innescanti.
In tale contesto, sono in fase di predisposizione da parte di Arpa Piemonte alcuni progetti volti a dettagliare i legami tra cause predisponenti e scatenanti nei fenomeni di colata, al fine di poter valutare la fattibilità di un approccio di tipo previsionale sull'instaurarsi di condizioni critiche.

Allo stato attuale delle conoscenze, un'azione possibile ai fini di un'adeguata azione preventiva per la riduzione dei rischi nel territorio di Bardonecchia è la predisposizione di un sistema di preannuncio locale basato su una rete di strumenti (idrofoni, geofoni, ecc.) in grado di monitorare la propagazione di colate già innescate. Infatti, tale sistema è in grado di rilevare l'altezza idrometrica e la velocità della colata e, sulla base di parametri preventivamente calcolati e dei tempi di percorrenza stimati, di attivare sistemi acustici e visivi di allerta (ad esempio segnali semaforici ad impedire il traffico sugli attraversamenti).
Ciò ovviamente non può sostituire la necessaria opera di manutenzione degli alvei che principalmente deve riguardare il mantenimento e ripristino delle opere di sistemazione idraulica (briglie, soglie e difese spondali) e la pulizia del canale in conoide, soprattutto in corrispondenza degli attraversamenti.

Contributi
Si ringrazia il dottor Nicola Quaranta per la preziosa collaborazione fornita.

Bibliografia

AA.VV. (2005a), *Final Report*. Programma Interreg IIIB Spazio Alpino, Progetto CatchRisk: Mitigation of Hydrogeological risk in alpine catchments. Regione Lombardia.

AA.VV. (2005b), *Guidelines*. Programma Interreg IIIB Spazio Alpino, Progetto CatchRisk: Mitigation of Hydrogeological risk in alpine catchments. Arpa Piemonte.

Arpa Piemonte (2004a), *Il Progetto IFFI in Piemonte: Inventario dei fenomeni franosi in Italia*. Archivio Centro regionale per le ricerche territoriali e geologiche (http://www.webgis.csi.it/arpagis).

Arpa Piemonte (2004b), *Rapporto sui fenomeni di trasporto in massa dei rii Fenils e Frejus del 06-07 agosto 2004.* A cura dell'Area Previsione e Monitoraggio Ambientale e del Centro Regionale per le Ricerche Territoriali e Geologiche, Torino, Pubblicazioni Arpa Piemonte; pp. 28 più allegati.

Bingner R.L. &. Theurer F. D. (2001), *AnnAGNPS TECHNICAL PROCESSES. Documentation*, Version 2.

Burlando P., Oliva G. & Rosso R. (1997), *RAP Rainfall Analysis Package. Valutazione automatica del rischio idrometeorologico sul territorio*, Milano.

CIMA [Centro di ricerca Interuniversitario in Monitoraggio Ambientale] (2001), *Realizzazione di un atlante delle piogge intense sulle Alpi occidentali italo-svizzere*, Genova.

Cremonini R., Bechini R., Barbero S. & Rabuffetti D. (2003), *Use of weather radar data in Regione Piemonte for hydrological risk management*, ECAM.

Cunge J.A. (1969), *On the subject of a flood propagation computation model*, Journal of Hydraulic Research.

De Michele C. & Rosso R. (1999), *La valutazione delle piene nell'Italia Nord-Occidentale: bacino padano e Liguria tirrenica*, CNR-GNDCI.

Ghilardi P, Natale L. & Savi F. (1999), *Il rischio idraulico nelle aree di conoide*, a cura della Direzione Generale Presidenza, Servizio Programmazione e Sviluppo della Regione Lombardia.

Giandotti M. (1934), *Previsione delle piene e delle magre dei corsi d'acqua*, "Memorie e studi idrografici", Pubbl. 2 del Servizio Idrografico Italiano, vol. VIII, pp. 107.

Hungr O., Morgan G.C. & Kellerhals R. (1984), *Quantitative analysis of debris torrent hazard for design of remedial measures*. Can. Geotech J., vol. 21, pp. 663-677.

Johnson A.M. & Rodine J.R. (1984), *Debris flow.* In Brunsden D. & Prior D.B. [eds] (1984), Slope instability. Chichester, Wiley; pp. 257-362.

Mancini M. (1990), *La modellazione della risposta idrologica: effetti della variabilità spaziale e dalla scala di rappresentazione del fenomeno dell'assorbimento*, Tesi di dottorato, Politecnico di Milano.

Servizio Geologico d'Italia (2002), *Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000 Foglio 132-152-153 Bardonecchia*, Servizio Geologico Nazionale, Ente realizzatore Regione Piemonte – Direzione Regionale Servizi Tecnici di Prevenzione.

Polino R., Dela Pierre F., Borghi A., Carraro F., Fioraso G. & Giardino M. [a cura di] (2002), *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio 132-152-153 Bardonecchia*, Servizio Geologico d'Italia, Ente realizzatore Regione Piemonte – Direzione Regionale Servizi Tecnici di Prevenzione.

Ponce V.M. & Chaganti P.V. (1994), *Variable – parameter Muskingum – Cunge method revisited*, Journal of Hydrology, vol. 162, pp. 433-439.

Regione Piemonte (2001), *Progetto Raccolta e organizzazione di dati territoriali; valutazione di pericolosità e rischio dei fenomeni naturali e predisposizione di piani comunali di Protezione Civile*, Programma Interreg IIC Italia – Francia.

Rickenmann D. & Zimmermann M. (1993), *The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysi*, Geomorphology, vol. 8, pp. 175-189.

Takahashi T. (1981), *Estimation of potential debris flow hazardous zones: soft countermeasures for a disaster*, Journal of Natural Disaster Sciences, vol. 3(1), pp. 57-59.

Tarboton D.G. (1997), *A New Method For The Determination Of Flow Directions And Upslope Areas In Grid Digital Elevation Models. Water Resources Research*, American Geophysical Union, vol. 33(2), pp. 309-319.

Tarboton D.G. (2002), *Some Potential Terrain Analysis Tools for ArcGIS*, Presentation at Symposium on Terrain Analysis for Water Resources Applications, The University of Texas at Austin, December 16-18, 2002.

Varnes D. J. & IAEG [Int. Ass. of Eng. Geology Commission on Landslides and other Mass Movements] (1984), *Landslide hazard zonation; a review of principles and practice*. Paris, UNESCO.

5 Conclusioni generali

5.1 Conclusioni generali

Γλαῦχ', ὅρα· βαθὺς γὰρ ἤδη κύμασιν ταράσσεται
πόντος, ἀμφὶ δ' ἄκρα Γυρέων ὀρθὸν ἵσταται νέφος,
σῆμα χειμῶνος· κιχάνει δ' ἐξ ἀελπτίης φόβος.[1]

(Archiloco, frammento 56)

[1] Glauco, vedi: su dal fondo tutto il mare si agita/va sull'alto delle Giree erto un nembo: un indice/di tempesta. La paura coglie a un tratto l'anima. (Traduzione di F.M. Pontani, 1969).

La prima data della letteratura greca ricorda un evento naturale: l'eclissi di sole del 6 aprile del 648 a.C., di cui Archiloco è testimone. Poeta di grandi passioni, ma anche attento osservatore della natura, nell'incalzante susseguirsi dei tetrametri, in un altro frammento ci fornisce, con l'individuazione di precisi precursori, il preannuncio di una tempesta che sta per abbattersi sulle Cicladi. Di fronte a tali avvenimenti, all'uomo del secolo VII a.C. l'unico atteggiamento concesso è la paura, che irrompe repentina.
Duemilasettecento anni dopo, in un'epoca in cui il rischio naturale viene ancora percepito come un evento anomalo ed eccezionale, incompatibile con gli schemi dello sviluppo tecnologico e paradossalmente in aumento con la crescita economica e sociale, è opportuno un momento di riflessione sullo stato delle conoscenze, da una parte al fine di valorizzare gli importanti progressi della scienza nel campo della comprensione dei fenomeni, delle tecniche e degli interventi di difesa, ma anche per evidenziarne criticità, limiti e prospettive di evoluzione.

In occasione di catastrofi naturali, l'informazione alla collettività è da un lato molto amplificata e dall'altro mostra forti imprecisioni e molte lacune: la complessità dei fenomeni viene banalizzata, favorendo l'impressione che i rimedi siano semplici ed ovvi.
I risultati del Programma Operativo Interreg IIC *Assetto del territorio e prevenzione delle inondazioni* che ha visto cooperare le strutture tecniche di Francia, Spagna ed Italia nell'elaborazione di strumenti comuni per la mitigazione dei rischi e l'organizzazione dei sistemi di allertamento, hanno evidenziato che in molti casi le popolazioni insediate su aree a rischio tendono a considerare come remota la possibilità di essere coinvolte in un evento. Le zonizzazioni del rischio sono considerate troppo scientifiche per una chiara comprensione e vengono quindi ritenute ininfluenti e le misure di limitazione all'uso di porzioni di territorio potenzialmente soggette agli effetti degli eventi vengono considerate impopolari e viste come una indebita limitazione della libertà. La previsione meteorologica viene percepita come troppo generica e conservativa per suscitare allerta credibili, ma ad alluvione avvenuta non si esiterà ad accusare i governi, o chi per loro, di non essere adeguatamente intervenuti per impedire gli effetti dell'evento. Tutto ciò accompagnato quasi sempre dall'insistente e reiterata richiesta di interventi (opere lungo i corsi d'acqua, argini, scogliere, briglie, interventi su corpi di frana ecc.) per la messa in sicurezza delle infrastrutture.
È in questo contesto che si è sviluppata la scelta strategica di Arpa Piemonte verso azioni non strutturali nel campo della prevenzione condotte in stretta connessione con la pianificazione degli studi di valutazione dei rischi, dei sistemi di sorveglianza, dei sistemi d'allertamento, dei sistemi di controllo, nonché dei sistemi finalizzati alla gestione dell'emergenza.

Questo volume è nato dall'idea di rappresentare il percorso evolutivo della previsione dei rischi naturali sotto il duplice aspetto della metodologia e degli esempi, rimarcando l'impegno venticinquennale dei Servizi Tecnici di Prevenzione, svolto contestualmente nel campo della ricerca e dell'applicazione operativa, evidenziandone il rapporto continuo di interscambio e reciproco stimolo ed arricchimento, attraverso la descrizione dei più significativi risultati ottenuti.

Al termine dell'illustrazione degli approcci metodologici e dei servizi operativi presentati nel testo

si ritiene opportuno formulare in queste pagine una serie di riflessioni per porre la cultura della previsione, in senso generale, in una giusta prospettiva.

Le attività di previsione si devono innestare su adeguati sistemi di preannuncio che consentano di individuare, con sufficiente anticipo e precisione, la possibile evoluzione dei fenomeni temuti e degli effetti verso una fase parossistica in modo da rendere possibile l'attivazione dell'emergenza. La fase gestionale dell'emergenza rappresenta il punto più critico dell'intera attività previsionale. Essa deve far riferimento a modelli agili, facilmente gestibili: sono appunto da preferirsi i modelli più elementari ed essenziali, ma di facile ed immediato impiego, rispetto a quelli più complessi e sofisticati, ma di difficile utilizzo.

La funzionalità di un modello di previsione territoriale deve anche basarsi sulla possibilità di aggiornamento e di integrazioni che provengono dai progressi nella comprensione dei meccanismi che governano lo sviluppo e l'evoluzione dei fenomeni che si vuole prevedere, ampliando così le opzioni di ingresso della matrice causa-effetto.

I Sistemi Informativi Geografici rappresentano oggi uno dei principali strumenti di gestione, elaborazione ed analisi delle conoscenze in campo ambientale grazie alla loro specifica capacità di rappresentare e modellare nello spazio fenomeni naturali complessi. Il loro utilizzo è fondamentale ed insostituibile per realizzare e gestire i livelli informativi di base, topografici e tematici, per l'analisi delle problematiche di rischio idrogeologico, per l'elaborazione delle carte numeriche di pericolosità e rischi utilizzabili per la pianificazione ed il governo del territorio.

Tutti i modelli di valutazione della pericolosità proponibili e tutti gli scenari che vengono formulati, derivando da una rappresentazione semplificata e sintetica della realtà, presentano caratteri di soggettività e devono pertanto essere letti ed interpretati tenendo conto delle ipotesi di partenza.

Una classificazione del territorio basata su previsioni e valutazioni di pericolosità espresse in termini di probabilità rappresenta in ogni modo un approccio non facilmente gestibile ed è pertanto destinato a essere utilizzato come strumento di gestione del territorio da tecnici esperti nei diversi campi di pertinenza, dalla dinamica gravitativa alla programmazione urbanistica e alla protezione civile. Solo uno specialista può, infatti, gestire correttamente l'incertezza insita nei modelli esplicitandone il procedimento, chiarendone i limiti, i vantaggi e le problematiche e prospettandone le corrette modalità d'impiego ai fini dell'utilizzo previsto.

Nei capitoli dedicati alla valutazione dei rischi, è stata posta in risalto ai fini del miglioramento qualitativo del prodotto previsionale, l'importanza del contributo dell'esperto nell'interpretazione ed elaborazione dei dati forniti dai modelli a fronte delle caratteristiche fisiche e climatiche della regione. L'interazione tra meteorologia ed idrologia nella previsione degli eventi estremi è una realtà operativa ormai consolidata per la migliore gestione del tempo che precede la formazione dell'onda di piena. Lo studio geologico e la caratterizzazione geotecnica dei materiali sono essenziali per la individuazione dei potenziali fenomeni di trasporto in massa nei piccoli bacini montani.

Nell'affrontare il tema del rischio idrogeologico, si ritiene indispensabile una visione globale del pro-

blema, che deve prevedere il sinergico coinvolgimento di conoscenze e competenze multidisciplinari (meteorologi, idrologi, ingegneri idraulici e geotecnici, geologi, ecc.).

Oltre alla varietà di competenze non si può prescindere da un corretto approccio culturale al problema della mitigazione del rischio idrogeologico. Non ha senso scomporre e disarticolare in ambiti separati, o comunque poco correlati, i diversi aspetti legati al problema nella sua interezza: la conoscenza di base dei processi naturali, le attività di previsione dei fenomeni (individuazione e quantificazione dei precursori di evento), i processi di modellamento naturale del territorio (movimenti franosi, attività fluvio-torrentizia), le azioni e le misure di prevenzione (pianificazione territoriale, strategie e tipologie degli interventi, predisposizione dei piani di emergenza) e le attività da svolgersi in fase di emergenza (realizzazione dei piani di emergenza, predisposizione degli interventi strutturali e non strutturali).

Il complesso quadro relativo alla previsione ed alla prevenzione della calamità naturali impone la necessità di uno stretto rapporto di collaborazione di collaborazione tra l'Ente Pubblico, con funzione di indirizzo e coordinamento e in qualità di depositario del patrimonio conoscitivo a scala regionale, e il Professionista che opera a scala locale. Solo le sinergie tra queste due figure *Ente-Professionista*, nel pieno rispetto dei propri ruoli, potranno fornire e mettere a punto gli strumenti necessari per una più efficace politica di salvaguardia del territorio dai disastri naturali.

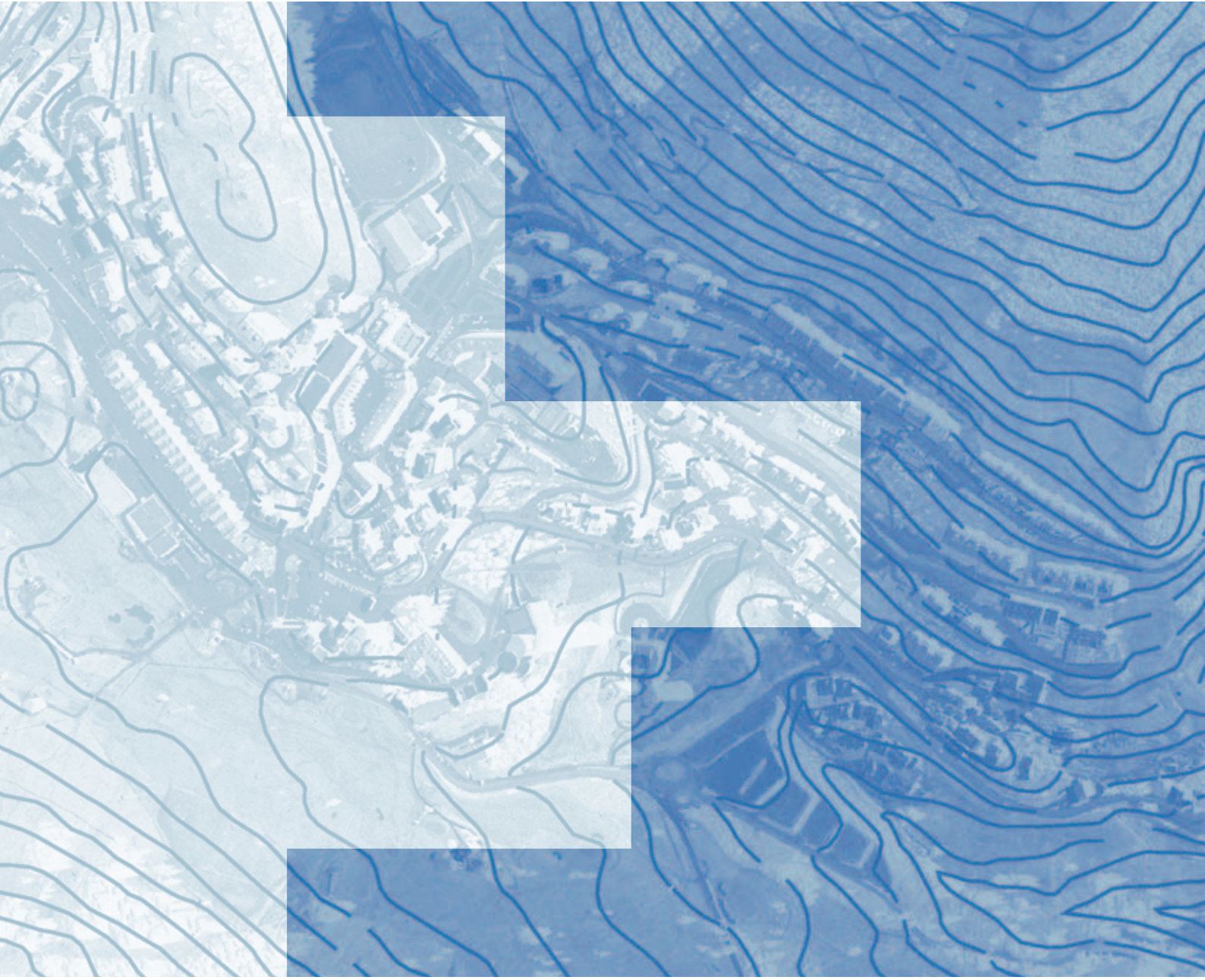
Il ricorso, nei vari campi, a modelli previsionali complessi migliora certamente la possibilità di prevedere alcuni fenomeni, ma comporta oneri (computazionali, di tempo, economici) che sono in ogni caso impensabili da sostenere indistintamente per tutto il territorio regionale. Pertanto, Arpa Piemonte ha scelto di adottare modelli relativamente semplificati e generali a scala regionale (esempio relazioni piogge-frane e piogge-portate fluviali) ed utilizzare strumenti più complessi per quei settori che effettivamente hanno maggiori probabilità di trovarsi in condizioni di criticità.

Queste riflessioni guidano Arpa Piemonte nella prosecuzione dell'attività, in una prospettiva di evoluzione individuata dalle politiche strutturali comunitarie destinate allo sviluppo sostenibile. Indirizzi e finanziamenti del Fondo di Sviluppo Regionale sono stati allocati in maniera prioritaria dalla Commissione Europea sui temi dell'ambiente e del *risk-management*: la risoluzione delle incertezze circa gli impatti locali specifici del cambiamento climatico nei prossimi trent'anni è la principale sfida di cui tener conto nella programmazione a medio e lungo termine. È una priorità strategica cui il territorio alpino ed il suo ecosistema risultano particolarmente sensibili.

Il problema dei cambiamenti climatici e del loro impatto, infatti, non chiede solo indagini e soluzioni globali, ma la comprensione degli effetti sull'uomo e sull'ambiente in aree geografiche specifiche. I cambiamenti climatici alterano il paesaggio naturale modificando l'intensità, la dimensione e la frequenza dei fenomeni associati ai rischi naturali. Così come le misure di contrasto e mitigazione, anche il processo di allertamento, dalla definizione di rischio a quella di soglie di pericolosità, deve tenere in considerazione condizioni al contorno variabili: la dimensione climatica tanto quanto l'evoluzione degli attributi socio-economici delle aree esposte.



FINITO DI STAMPARE
NEL MESE DI GIUGNO 2005
PRESSO
AGES ARTI GRAFICHE
TORINO



PIEMONTE

Arpa

Agenzia Regionale
per la Protezione Ambientale