

Partecipanti al progetto



Regione Piemonte - Direzione Servizi Tecnici di Prevenzione

Vincenzo COCCOLO

Via Pisano, 6 - 10152 TORINO (I)

Settore Meteoidrografico e reti di monitoraggio

Stefano Bovo, Secondo Barbero

Corso Unione Sovietica, 216 - 10134 TORINO (I)

Settore Studi e Ricerche Geologiche-Sistema Informativo Prevenzione Rischi

Ferruccio Forlati, Manlio Ramasco, Stefano Campus, Cinzia Piccioni,
Barbara Coraglia, Ermes Fusetti, Alberto Giglia

Corso Unione Sovietica, 216 - 10134 TORINO (I)

Settore Progettazione interventi geologico-tecnici e sismico

Andrea Lazzari, Giovanni Ruberto

Via Pisano, 6 - 10152 TORINO (I)

Settore Prevenzione territoriale del rischio geologico area TO-NO-VB

Giuseppe Ben, Paolo Tonanzi, Luigi Andrea Bedoni, Riccardo Carlo
Conte

Via Pisano, 6 - 10152 TORINO (I)



Politecnico di Torino

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica

Claudio Scavia, Marta Castelli, Chiara Deangeli, Margherita Ferrero

Dipartimento di Idraulica Trasporti e Infrastrutture Civili

Gennaro Bianco, Luca Franzi

C.so Duca degli Abruzzi, 24 - 10129 TORINO (I)



CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE

ISTITUTO DI RICERCA PER LA
PROTEZIONE IDROGEOLOGICA
NEL BACINO PADANO

Consiglio Nazionale delle Ricerche

Istituto per la Protezione Idrologica del Bacino Padano

Gianni Mortara, Franco Godone, Massimo Arattano, Nicola Vassallo,
Fabio Brunamonte, Paolo Baggio, Gianfranco Joannas, Johanna

F.Walkate, Gabriella De Renzo, Lorenzo Marchi

Strada delle Cacce, 73 - 10135 TORINO (I)

Istituto di Idrobiologia M. De Marchi

Walter Ambrosetti, Alessandro Marchi

Largo Tonolli, 50 - 28922 VERBANIA (I)



Università di Genova - Facoltà di Ingegneria

Centro di ricerca Interuniversitario in Monitoraggio Ambientale

Giorgio Roth, Giorgio Boni, Antonio Parodi, Fabio Tognetti

Via Cadorna, 7 - 17100 SAVONA (I)



CSI-Piemonte

Renata Civera, Silvio Bo, Roberto Cremonini, Herbert Sarri

C.so Unione Sovietica, 216 - 10134 TORINO (I)



Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana Istituto Scienze della Terra

Giorgio Beatrizotti, Andrea Buletti, Alberto Dei, Laura Foglia,
Mariano Lerbini, Sabina Lüthi, Lisa Martinenghi, Renata Müller,
Claudio Pervangher, Stefano Pisani, Giorgio Salvadè, Andrea
Salveti, Silvio Seno, Barbara Sincich, Carlo Spinedi

Centro Studi - via Trevano

6952 Canobbio (CH)



Istituto Svizzero di Meteorologia - Osservatorio di Locarno Monti

Fosco Spinedi

Via Monti della Trinità - 6605 LOCARNO MONTI (CH)

È ancora vivo il ricordo della drammatica situazione dei giorni dell'alluvione dell'ottobre 2000 nell'area del Verbano e dell'Ossola, flagellate da tre giorni di piogge torrenziali, che hanno provocato gravissimi danni sia nell'area montana, nelle Valli transfrontaliere tra Ossola e Vallese e tra Ossola e Ticino, sia nei Comuni rivieraschi del lago Maggiore, interessati da una piena i cui precedenti vanno ricercati quasi centocinquant'anni indietro.

In quel periodo si stavano realizzando in maniera sperimentale i primi collegamenti in tempo reale previsti dall' Azione 1 del Progetto INTERREG II, che qui viene presentato: in quei drammatici momenti le strutture operative preposte al monitoraggio dei rischi naturali e per loro tramite i responsabili della Protezione Civile e dei soccorsi hanno potuto per la prima volta avere a disposizione la mappa costantemente aggiornata delle precipitazioni sull'intero bacino, Ossolano e Ticinese, afferente al lago, la loro immediata trasformazione in portate lungo i principali corsi d'acqua, Toce e suoi affluenti, Maggia, Ticino, e il loro riflesso in termini riscontro e di previsione sul livello lacustre.

Si sperimentava "in campo" la validità della collaborazione transfrontaliera ed interregionale finanziata attraverso i programmi INTERREG, orientata all'interconnessione delle reti informative ed alla condivisione delle esperienze e conoscenze per la gestione del rischio idrogeologico.

Conoscere i meccanismi di innesco dei principali fenomeni di dissesto che interessano l'area alpina, correlare in termini spazio temporali l'evoluzione delle configurazioni meteorologiche critiche, conoscere in tempo reale la situazione in atto al di qua e al di là della linea di confine significa poter mettere a disposizione delle autorità, dei gestori ed operatori di servizi, delle popolazioni residenti un formidabile strumento di valutazione in grado di supportare ai vari livelli decisionali la scelta dei comportamenti e delle azioni più adeguate.

Il programma ha permesso di realizzare una serie di esperienze di collaborazione, confronto e sperimentazione basata sul lavoro comune finalizzata ad approfondire le tematiche della prevenzione del rischio idrogeologico, dagli aspetti di conoscenza della pluviometria, alle metodologie di previsione, alle tecniche di studio e modellazione dei fenomeni di trasporto in conoide, alle metodologie per la valutazione della pericolosità dei versanti in relazione ai processi inerenti la coltre superficiale, e la loro mappatura.

I risultati raggiunti e le relazioni stabilite sono di sicuro sprone a continuare nel cammino intrapreso, con obiettivi di ulteriore stabilizzazione dei legami e di miglioramento delle conoscenze.

Ugo CAVALLERA
Assessore all'Ambiente, Qualità e Agricoltura
Regione Piemonte

La pianificazione e la gestione del territorio nelle regioni che appartengono allo Spazio Alpino impongono al politico molte riflessioni. Egli deve, infatti, conciliare le esigenze di un sistema ecologico molto sensibile e sottoposto a condizioni naturali difficili, con le forti pressioni legate alle attività umane (urbanizzazione, traffico, comunicazioni, approvvigionamento energetico, turismo, ecc.).

La conoscenza, la prevenzione e la lotta contro i fenomeni naturali - i cui effetti sono particolarmente evidenti in queste zone montane dove gli eventi estremi non sono rari - costituiscono così, nel quadro di uno sviluppo sostenibile, una priorità per ogni politica regionale.

Grazie al programma INTERREG - il cui obiettivo è una riduzione delle differenze esistenti in materia di gestione di sicurezza del territorio tra le regioni a cavallo dei confini nazionali - la Regione Piemonte e il Cantone Ticino si sono incontrati per affrontare assieme i problemi causati dai fenomeni naturali sul bacino idrografico del Verbano, punto di incontro delle due regioni.

Questa collaborazione si è incentrata sui seguenti obiettivi:

- condivisione dei dati idrometeorologici acquisiti nel bacino idrografico del Verbano dalla Regione Piemonte e dai diversi Istituti svizzeri (Istituto svizzero di meteorologia, Ufficio idrologico e geologico nazionale) e ticinesi (Istituto Scienze della Terra);
- messa in comune delle conoscenze in merito ai meccanismi di innesco dei principali fenomeni di dissesto che interessano l'area alpina, e alla loro evoluzione;
- realizzazione di una cartografia dei territori esposti a pericolo tra la Maggia e il Toce.

Questi obiettivi sono stati in larga misura raggiunti, gettando così le premesse per un'ulteriore collaborazione, mirata questa volta a utilizzare le conoscenze acquisite per una tutela delle persone e delle cose.

Si tratta ora, pertanto, di passare all'azione concertata e da parte del Dipartimento del territorio non saranno lesinati gli sforzi.

Marco BORRADORI
Consigliere di Stato
Direttore Dipartimento del territorio
Canton Ticino

INTRODUZIONE

Le valli della zona occidentale di confine italo-svizzero sono con notevole frequenza soggette ad episodi meteorici e temporaleschi intensi che spesso innescano fenomeni franosi di vario tipo e disastrosi pieni di fiumi e torrenti sia sul lato italiano che svizzero. Basti citare la piena del settembre 1993 che ha interessato con gravi distruzioni tutta la fascia alpina di confine, dai bacini dalla Stura di Lanzo ed Orco all'Ossola sul versante Italiano e dal Rodano al Ticino sul versante svizzero, o ai nubifragi del settembre 1995 nel Cusio-Verbanò, Ticino e Varesotto.

Un effetto particolarmente gravoso di tali situazioni si verifica conseguentemente nelle aree rivierasche del Lago Maggiore, soggetto a notevoli innalzamenti di livello, con estese esondazioni; queste situazioni sono di gestione assai complessa a causa della tripartizione amministrativa dell'area tra Svizzera ed Italia (Regioni Piemonte e Lombardia).

Per comprendere interamente la genesi di tali situazioni e valutarne le componenti climatiche, è necessario poter disporre di elementi meteorologici ed idrologici comuni nell'area transfrontaliera. Ciò in particolare per il monitoraggio e la previsione in tempo reale delle suddette situazioni, con un notevole vantaggio reciproco.

È dunque evidente il comune interesse a migliorare e facilitare gli scambi di dati tra gli organismi, svizzeri ed italiani, deputati alla raccolta ed elaborazione dei dati di terreno, dell'elaborazione delle basi dati storiche, per la realizzazione di studi climatologici ed idrologici a scala regionale e transfrontaliera.

Il progetto è strutturato attorno ad un nucleo centrale costituito dall'interconnessione delle reti di rilevamento di dati idrometeorologici nelle Alpi centrali ed occidentali (azione 1). Esso comprende numerose azioni il cui obiettivo è quello di approfondire la conoscenza della pluviometria alpina e dei fenomeni idrogeologici connessi alla stessa (inondazioni, trasporto solido, flussi di detrito, frane superficiali e scivolamenti profondi) allo scopo di migliorare la gestione dei rischi nella zona transfrontaliera stabilendo anche delle soglie di pericolosità per ogni tipo di fenomeno.

Il progetto tende prioritariamente a sviluppare i fattori di collegamento tra i territori frontalieri operando per il coordinamento delle reti di servizi italiani e svizzeri, nell'interesse delle popolazioni locali, e più in generale per lo sviluppo transnazionale delle comunicazioni e degli scambi economici e turistici. I risultati attesi sono orientati in due direzioni: lo sviluppo della conoscenza dei fenomeni naturali

influenzanti il territorio, per una miglior pianificazione e gestione della zona frontaliere, e la creazione, a titolo sperimentale, di un primo sistema strutturato di rilevamento, omogeneo sui due versanti alpini.

Tali obiettivi rientrano tra le indicazioni programmatiche alla base della proposta INTERREG II per l'area transfrontaliera tra l'Italia e la Svizzera approvata dall'Unione Europea. L'asse 1, specificatamente dedicato allo sviluppo dei fattori di connessione tra i territori di frontiera, prevede alla misura 1.2 il miglioramento dell'accessibilità reciproca ai servizi localizzati sui due versanti di frontiera, e del loro rispettivo grado di efficienza ed efficacia.

La Direzione dei Servizi Tecnici di Prevenzione della Regione Piemonte, capofila di parte italiana, e la Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana, capofila per parte svizzera, hanno accolto con interesse la proposta decidendo la presentazione del programma "Collegamento delle reti di rilevamento e condivisione delle esperienze per la gestione del rischio idrogeologico" positivamente accolto con un costo per parte italiana di 970 milioni di lire.

Le strutture universitarie e di ricerca quali il Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica e il Dipartimento di Idraulica Trasporti e Infrastrutture Civili del Politecnico di Torino, il Centro di Ricerca Interuniversitario in Monitoraggio Ambientale dell'Università di Genova, l'Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica del Bacino Padano del CNR, l'Istituto di Idrobiologia M. De Marchi del CNR, il CSI-Piemonte e l'Istituto Svizzero di Meteorologia hanno fornito il supporto scientifico elaborando studi specifici.

Il progetto è stato strutturato nel modo seguente:

AZIONE 1 «Condivisione dei dati meteorologici in tempo reale, differita e storici»

AZIONE 2 «Realizzazione di un atlante delle piogge intense sulle alpi occidentali italo-svizzere»

AZIONE 3 «Definizione di una metodologia per la valutazione della pericolosità dei versanti in relazione a processi inerenti la coltre superficiale, impiegando parametri idrologici, geotecnici e morfologici e da sperimentarsi in alcuni bacini campione»

AZIONE 4 «Condivisione di metodi e conoscenze sui processi di lave torrentizie per la difesa dei centri abitati»

AZIONE 5 «Proposta di una metodologia inerente la mappatura e caratterizzazione dei processi di instabilità dei versanti da sperimentarsi sui bacini dell'alto Toce e della Maggia»

AZIONE 6 «Contributo piemontese al progetto Verbanò».

AZIONE 1

Condivisione dei dati meteoidrologici in tempo reale, in differita e storici

Contributo dei partner italiani:

Stefano BOVO, Secondo BARBERO
Regione Piemonte - Settore Meteoidrografico e reti di monitoraggio

Silvio BO, Roberto CREMONINI
CSI-Piemonte

Contributo dei partner svizzeri:

Giorgio SALVADÈ, Anna ROSAZZA, Stefano PISANI, Carlo SPINEDI, Giuseppe FEDON
Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana
- Istituto Scienze della Terra

I-1. INTRODUZIONE

Obiettivo principale dell'azione 1 è la realizzazione di una struttura permanente di raccolta e gestione degli scambi dati tra i centri operativi regionali situati nella zona di frontiera che interessa il bacino imbrifero del lago Verbano.

In effetti, gli scambi di informazioni in tempo reale sono indispensabili per valutare l'ampiezza di un fenomeno che interessa più regioni, mentre lo scambio dei dati storici ha permesso di tarare i modelli previsionali e di comprendere meglio i livelli di pioggia in grado di attivare i fenomeni di alluvionamento e di instabilità dei versanti.

I-2. MISURE IN TEMPO REALE

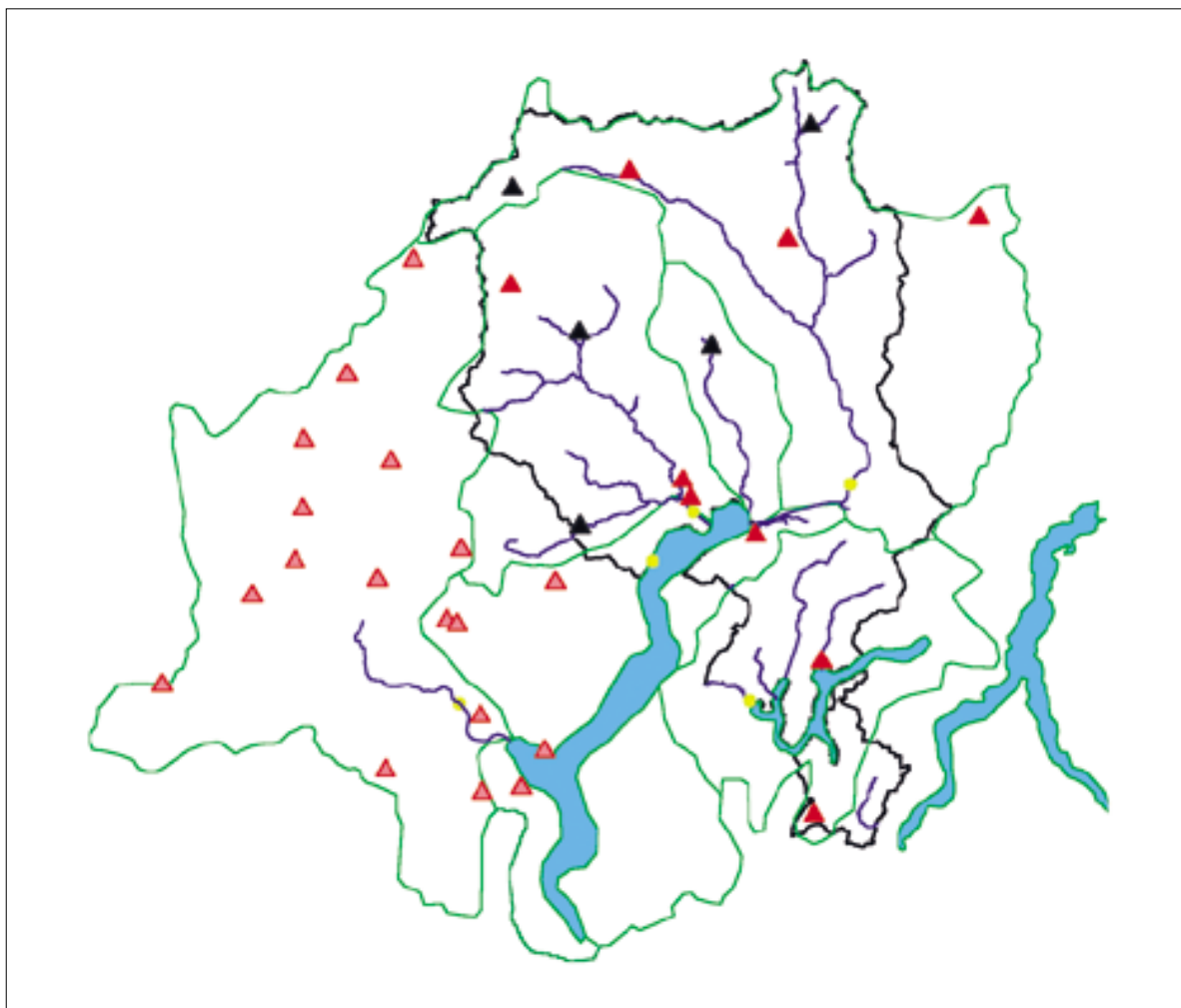
La figura I-1 mostra il bacino del Verbano, la suddivisione in 10 sottobacini (v. azione 6) e la

posizione dei pluviometri e dei limnigrafi di cui sono a disposizione le misure in tempo reale.

La pioggia è misurata in 31 punti: 5 pluviometri (triangoli in nero) sono gestiti direttamente dall'Istituto Scienze della Terra (IST/ SUPSI) di Lugano Trevano (Canton Ticino), 9 pluviometri (triangoli in rosso) dall'Istituto Svizzero di Meteorologia (ISM) di Locarno Monti e 17 pluviometri (triangoli in arancio), situati sul bacino del fiume Toce, dal Settore Meteoidrografico e Reti di Monitoraggio della Regione Piemonte.

Le portate misurate corrispondono a quelle del fiume Ticino a Bellinzona, del fiume Maggia a Solduno, del fiume Toce a Candoglia. Nella figura I-1 sono indicati con un cerchio giallo le posizioni dei rispettivi limnigrafi il cui elenco è riportato nella tabella I-1, la quale contiene anche altri limnigrafi per la misura delle portate alla sezione di chiusura di alcuni sottobacini.

Figura I-1. Posizione dei pluviometri (triangolo) e dei limnigrafi (cerchio)



I-2.1. Pluviometri

La tabella seguente riassume le località in cui si trovano i pluviometri e chi li gestisce.

Pluviometri ISM	Pluviometri IST	Pluviometri Regione Piemonte
Cimetta	Bedretto	Antrona-Alpe Cheggio
Comprovasco	Camedo	Baceno-Alpe Devero
Locarno Monti	Frasco	Bognanco-Pizzanco
Lugano	Fusio	Crodo
Magadino	Luzzone	Corsolo
Piotta		Druogno
Robiei		Stresa-Someraro
Stabio		Varzo – S. Domenico
San Bernardino		Lago Paione
		Domodossola
		Stresa-Mottarone
		Formazza-Piano dei Camosci
		Macugnaga-Passo del Moro
		Mottac
		Sambughetto
		Candoglia
		Pallanza

Tabella I-1. Località pluviometri

I dati dei pluviometri gestiti dall'ISM vengono inviati (via Internet), con frequenza oraria, all'elaboratore dell'IST. I file contengono il quantitativo di pioggia misurata nell'ora precedente nelle diverse località.

I pluviometri gestiti dall'IST vengono interrogati via Modem telefonico dall'elaboratore dell'IST con una frequenza giornaliera (in caso di gestione ordinaria) o oraria (in caso di evento alluvionale). Il datalogger del pluviometro registra ogni istante in cui si accumulano 0,1 mm di pioggia.

Da questi valori viene costruito un file con la pioggia oraria.

I pluviometri gestiti dalla Regione Piemonte vengono interrogati ogni 30 minuti attraverso un collegamento radio troposferico dedicato e vengono concentrati nell'elaboratore di Torino.

I-2.2. Limnigrafi

La tabella seguente riassume la località in cui si trovano i limnigrafi e chi li gestisce.

Limnigrafi IST/SIGN	Limnigrafi Regione Piemonte
Bellinzona (fiume Ticino)	Pallanza (lago Verbano)
Bignasco (fiume Maggia)*	Candoglia (fiume Toce)
Brissago (lago Verbano)*	Pontemaglio (fiume Toce)*
Loderio (fiume Brenno)*	Crevola (torrente Diveria)*
Lumino (fiume Moesa)*	Pontetto (torrente Isorno)*
Melide (lago Ceresio)*	Masera (torrente Melezzo)*
Pollegio (fiume Ticino)*	Pontecaddo (torrente Bogna)*
Rodi (fiume Ticino)*	Villadossola (torrente Ovesca)*
Solduno (fiume Maggia)	Omegna (torrente Strona)*
Tenero (lago Verbano)	
Tresa (fiume Tresa)*	

Tabella I-2. Località limnigrafi
(* non oggetto di interscambio)

I limnigrafi elencati nella prima colonna della tabella (quasi tutti appartenenti al Servizio Geologico e Idrologico Nazionale - SIGN) vengono letti via Modem dall'elaboratore dell'IST con frequenza giornaliera (in caso di gestione ordinaria) o oraria (in caso di evento alluvionale). Gli strumenti inviano l'altezza del livello del fiume (da cui si ricava la portata attraverso una tabella di calibrazione) o la quota della superficie del lago.

La Regione Piemonte acquisisce e invia i propri dati con le stesse frequenze descritte per i pluviometri.

I-3. SCAMBIO DATI IN TEMPO REALE

I-3.1. La rete del Canton Ticino

Lo schema della rete attuale (agosto 2001) di trasmissione dei dati in tempo reale è rappresentato in figura I-2. Sull'elaboratore dell'IST sono concentrati tutti i dati e i modelli previsionali (v. azione 6). Si sta studiando la realizzazione di un secondo elaboratore, situato in un luogo diverso, che sia l'immagine del primo e sempre pronto a sostituirlo in caso d'interruzione di servizio del primo.

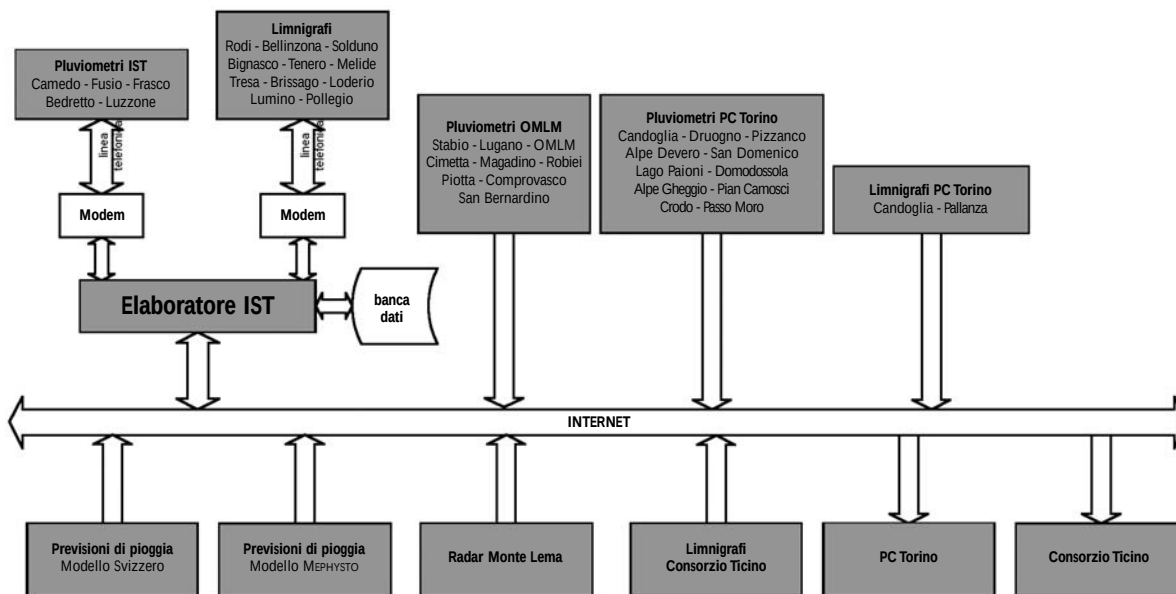
Oltre ai dati di pioggia e di livello elencati nei due paragrafi precedenti, l'elaboratore dell'IST riceve ogni ora le immagini del radar meteorologico del Monte Lema nonché le previsioni di pioggia del Modello Locale Svizzero (ogni 12 ore) e del modello Mephysto dell'ENEL-Ricerca (giornalmente) per le prossime 48 ore. Inoltre vengono inviate (via Internet), una volta al giorno e in caso di evento alluvionale ogni ora, misure alla Regione Piemonte e al Consorzio del Ticino. In situazione di preallarme, l'elaboratore invia i valori dei livelli e delle portate dei fiumi principali assieme alle quote dei

laghi, ogni quattro ore agli enti interessati (v. par. I-3.4).

Data l'importanza della valle del Toce, entro breve tempo, sarà pure realizzato un collegamento diretto con la Regione Piemonte via ISDN.

Questi files vengono poi inviati via FTP a destinazione. La figura I-4 mostra il diagramma di flusso della procedura usata per l'invio. Il file inviato viene ripreso e confrontato con l'originale.

Figura I-2. Rete telematica di trasmissione in tempo reale



Una volta al giorno (in caso di preallarme ogni 2 o 4 ore) vengono estratti automaticamente dalla banca dati i nuovi valori misurati a partire dall'ultimo dato che era stato inviato con successo alla Regione Piemonte. Con questi dati vengono costruiti tre file di tipo testo: uno per i pluviometri dell'IST (pioggia oraria), uno per quelli dell'ISM (pioggia oraria) e uno per i limnigrafi (portate) (la fig. I-3 mostra un esempio di file).

Da notare che le prime due righe del nuovo file corrispondono alle ultime due righe del file inviato precedentemente. Per cui se non ci sono nuovi valori misurati dall'ultima estrazione dalla banca dati, il nuovo file sarà composto di solo due righe (oltretutto già inviate). Questo è stato voluto per permettere al destinatario di capire che, se non arrivano nuovi dati, la causa non è da ricercare nel sistema di trasmissione (problemi con Internet) ma è dovuta a chi misura.

	Bed	Cam	Fus	Fra	Luz
09.06.01 23:00	0.8	2.5	2.9	1.6	2.9
10.06.01 00:00	1.7	3.3	1.7	6.7	999.9
10.06.01 01:00	1.2	9.9	4.0	6.1	4.6
10.06.01 02:00	1.8	6.1	2.4	5.0	3.8
10.06.01 03:00	1.2	7.9	1.2	6.8	3.3
10.06.01 04:00	1.4	4.3	1.6	4.7	3.1
... ..	...	...	...	...	...
999.9 : dato mancante					

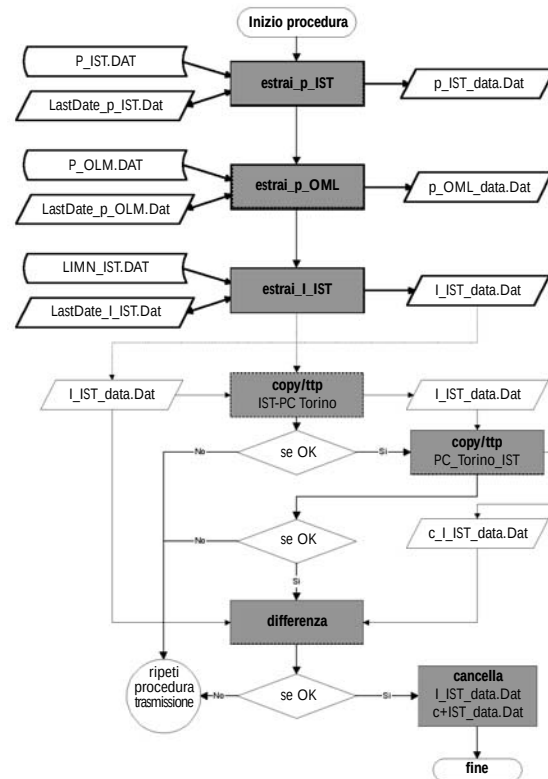


Figura I-3. Esempio di file con le misure (mm/h) dei pluviometri IST inviato alla Regione Piemonte

Figura I-4. Diagramma di flusso della procedura per l'invio dei dati

Se non esistono differenze si ritiene che l'invio sia avvenuto con successo e il file originale eliminato. In caso contrario, alla prossima scadenza, viene ritentato l'invio.

I-3.2. La rete della Regione Piemonte

Il Settore Meteoidrografico della Regione Piemonte ha una propria struttura operativa, la Sala Situazione Rischi Naturali (SSRN) di Torino, che costituisce il punto di riferimento regionale per le reti di monitoraggio meteoidrografico in telemisura dislocate sul bacino idrografico piemontese. La configurazione attuale della rete regionale consta di oltre 300 stazioni con una densità media di rilevamento di una stazione ogni 100 kmq. Le stazioni trasmettono ogni 30 minuti alla SSRN i propri dati attraverso un collegamento radio dedicato in banda UHS e qui vengono caricati in un data-base ORACLE.



Figura I-5. Stazione termopluviometrica in teletrasmissione della Regione Piemonte

e uno con il livello del Toce a Candoglia e il livello del lago Maggiore a Pallanza; questi tre file vengono inviati via FTP all'elaboratore dell'IST una volta al giorno e qualora le procedure di allertamento per rischio idrogeologico emesse dalla SSRN prevedano una situazione critica sull'area del Verbano l'invio viene fatto con cadenza oraria.

La figura I-6 mostra un esempio di file inviato all'IST.

```
CODICE STAZIONE;CODICE SENSORE;DATA;ORA;VALORE;
604;860;2001/06/14;00:00;1.01;
604;860;2001/06/14;01:00;1.02;
604;860;2001/06/14;02:00;1.03;
604;860;2001/06/14;03:00;N/A;
604;860;2001/06/14;04:00;1.02;

.....
N/A : dato mancante
```

Figura I-6. Esempio di file inviato dalla SSRN di Torino all'IST

I-3.3. Visualizzazione dei dati

Per visualizzare i dati del Canton Ticino sono operativi tre modi.

- La quota del lago Verbano a Brissago, la quota del lago Ceresio a Melide e le portate dei fiumi Maggia (a Solduno), Ticino (a Bellinzona) e Tresa (a Ponte Tresa) sono visibili, in forma grafica, presso il sito dell'Istituto di Scienze della Terra all'indirizzo www.ist.supsi.ch scegliendo "Livelli" (figura I-7). Questa pagina è accessibile liberamente.

Figura I-7. Home page IST



- Esiste un secondo indirizzo presso il sito dell'Istituto (figura I-8), accessibile solo con autorizzazione, dove possono essere visualizzati, in modo interattivo, i dati di pioggia (con le previsioni per i prossimi due giorni), di portata dei fiumi e i livelli dei laghi. In caso di preallarme meteorologico sono rappresentate anche le previsioni di portata e di livello.

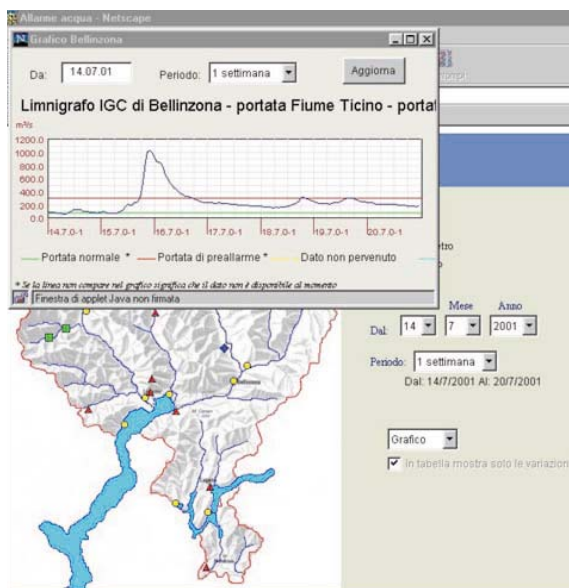


Figura I-8. Applicazione: monitoraggio

- Le banche dati possono essere interrogate in formato testo anche con un comune terminale e, se la connessione Internet non funziona, via linea telefonica. L'accesso è però possibile solo con autorizzazione.

Anche per quanto riguarda i dati della Regione Piemonte esistono due differenti modalità di distribuzione:

- Le misure di pioggia e di livello idrometrico sono consultabili liberamente all'indirizzo www.regione.piemonte.it/meteo per una selezione di stazioni i cui dati vengono aggiornati ogni ora.
- I dati completi di pioggia e livello con associate le relative soglie di attenzione vengono invece prodotti durante le situazioni di emergenza e messi a disposizione delle amministrazioni territoriali (Province, Comuni ecc.) attraverso una connessione alla Rete Unitaria della Pubblica Amministrazione (RUPAR).

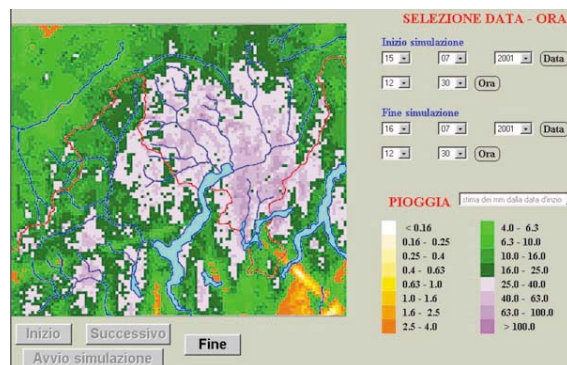
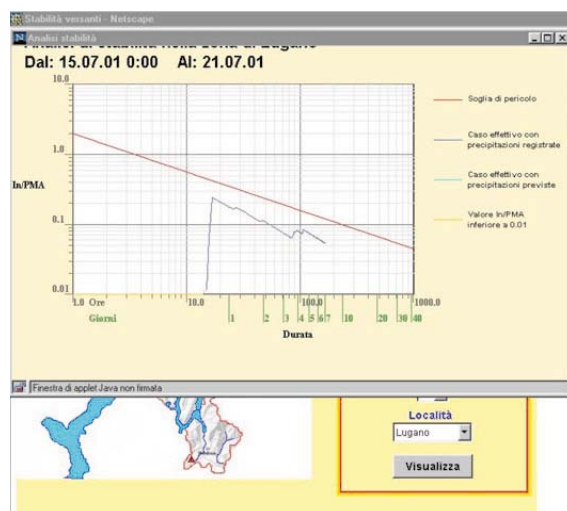


Figura I-9. Applicazione: immagine radar - stima pioggia cumulata

Nell'ambito del monitoraggio del territorio, sul sito dell'IST, per gli utenti autorizzati, è pure possibile consultare le immagini fornite dal radar del Monte Lema. Ogni ora viene inviata all'elaboratore dell'istituto un file contenente una matrice con l'informazione spaziale della precipitazione media al suolo, nel corso dell'ultima mezz'ora, in ogni cella di un reticolo con maglie di 1 km.

Per la gestione del rischio idrogeologico, sempre sul sito dell'IST e solo per gli utenti autorizzati, è stata sviluppata un'applicazione per la stima della stabilità dei versanti nel corso di un evento alluvionale basata su criteri statistici (figura I-10). I criteri statistici tendono a stabilire le caratteristiche delle precipitazioni di soglia per l'innescio di uno scivolamento superficiale a partire dall'analisi di eventi pregressi.

Figura I-10. Applicazione: stabilità dei versanti



L'esame degli eventi pluviometrici che hanno dato origine a dissesti dei versanti o a flussi di detrito ha permesso di tracciare un diagramma dove in ascissa è riportata la durata dell'evento e in ordinata l'intensità media del singolo evento espressa come percentuale della pioggia media annua (Ceriani M. et al., 1994). L'applicazione rappresenta il rapporto percentuale tra l'intensità di pioggia nel corso dell'evento e la pioggia media annua assieme alla linea di soglia stabilita con gli eventi pregressi; al di sopra di questa linea vi è un alto rischio di innesco di movimenti di massa sui versanti.

I-3.4. Bollettini

In caso di preallarme meteorologico viene accesa una procedura automatica che a intervalli regolari (generalmente ogni 4 ore) invia fax, messaggi SMS o e-mail (figura I-11) agli enti interessati con la portata misurata dei fiumi Maggia (a Solduno), Ticino (a Bellinzona) e Tresa (a Ponte Tresa), il livello del lago Ceresio (a Melide) e del Verbano (a Brissago o a Tenero) e la portata del Ticino (a Sesto Calende) calcolata in base al livello del Verbano e supponendo tutte le paratoie alla Miorina abbassate.

I-4. SCAMBIO DATI STORICI

Nella tabella I-3 sono elencati gli eventi alluvionali storici più importanti di cui si conoscono i valori di pioggia, di portata dei fiumi e di livello dei laghi relativi al bacino del lago Verbano e che sono ora a disposizione.

In particolare, la conoscenza dei dati storici relativi al bacino del fiume Toce ha permesso la taratura del modello dell'IST (vedi azione 6) per la previsione in tempo reale della quota del lago Verbano. Senza questa taratura, per esempio, la simulazione in tempo reale dell'evento dell'ottobre 2000 sarebbe stata impossibile.

Nella tabella I-4 sono indicati in dettaglio per quali strumenti sono disponibili delle misure.

Elenco dati storici		
	dal	al
1	20.09.93	30.09.93
2	01.10.93	20.10.93
3	13.05.94	23.05.94
4	13.09.94	30.09.94
5	03.11.94	12.11.94
6	15.05.96	25.05.96
7	10.11.96	24.11.96
8	20.06.96	05.07.97
9	25.08.97	31.08.97
10	05.11.97	20.11.97
11	02.04.98	15.04.98

Figura I-11. Esempio di bollettino

Tabella I-3. Elenco cronologico eventi storici

Da : SUPSI/Istituto di scienze della terra - Cadenazzo											
		Maggia		Ticino		Tresa		Cer.	Ver.	Ses.	
		Solduno		Bellinzona		Tresa		Melide	Briss.	Cal.	
Medio		200.35	25	218.28	70	268.84	24	270.50	193.66		
Preallarme		201.74	300	219.85	300	269.70	90	271.10	194.80		
Allarme		203.73	1000	222.85	1000	270.01	120	271.40	195.10		
Data	Ora	H	Q	H	Q	H	Q	H	H	Q	
		m.s.m	m3/s	m.s.m	m3/s	m.s.m	m3/s	m.s.m	m.s.m	m3/s	
15.10.00	01:10	202.97	711	220.49	432	270.02	122	271.03	196.08	1555	
15.10.00	05:10	202.65	595	220.36	404	270.03	123	271.00	196.19	1614	
15.10.00	08:55	202.79	646	220.08	346	270.06	126	271.03	196.28	1663	
15.10.00	12:11	203.43	883	220.38	408	270.04	124	271.01	196.45	1756	
15.10.00	15:51	203.27	823	220.38	408	270.11	131	271.03	196.60	1841	
15.10.00	19:48	203.40	872	220.38	408	270.17	138	271.07	196.81	1963	
16.10.00	06:16	203.20	797	220.65	467	270.29	151	271.20	197.26	2234	
16.10.00	08:42	203.06	744	220.31	394	270.32	155	271.23	197.32	2271	
16.10.00	11:54	202.97	711	220.38	408	270.32	155	271.23	197.39	2315	
16.10.00	15:39	202.97	711	220.09	348	270.35	158	271.25	197.46	2360	
16.10.00	19:59	202.78	642	220.45	423	270.40	164	271.30	197.51	2398	
17.10.00	00:05	202.45	525	220.39	410	270.40	164	271.33	197.54	2410	
.....											

Riassunto eventi storici

	settembre 1993	ottobre 1993	maggio 1994	settembre 1994	novembre 1994	maggio 1996	novembre 1996	giugno 1997	agosto 1997	novembre 1997	aprile 1998
portata Ticino a Bellinzona	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•
portata Maggia a Solduno	•	•	•		•		•	•	•	•	•
portata Tresa a Ponte Tresa			•	•	•	•	•	•	•	•	•
portata Toce a Candoglia	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
livello Verbano a Locarno	•	•	•	•	•		•	•	•	•	
livello Verbano a Tenero	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
livello Verbano a Brissago											
livello Verbano a Pallanza	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•
livello Ceresio a Melide	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
pluviometro Bedretto			•	•	•	•	•	•	•	•	•
pluviometro Camedo				•	•	•	•	•	•	•	•
pluviometro Fusio					•	•	•	•	•	•	•
pluviometro Frasco			•	•	•	•	•	•	•	•	•
pluviometro Luzzone				•	•	•	•	•	•	•	•
pluviometro Stabio			•	•	•	•	•	•	•	•	•
pluviometro Lugano			•	•	•	•	•	•	•	•	•
pluviometro Magadino	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
pluviometro OMLM	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
pluviometro Cimetia	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
pluviometro Robiei	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
pluviometro Piotta	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
pluviometro Comprovasco			•	•	•	•	•	•	•	•	•
pluviometro S. Bernardino	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
pluviometro Macugnaga	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
pluviometro Formazza	•										
pluviometro Domodossola	•	•				•	•	•	•	•	•
pluviometro Stresa Mottarone	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
pluviometro Varzo	•	•				•	•	•	•	•	•
pluviometro Druogno	•	•				•	•	•	•	•	•
pluviometro Baceno	•	•				•	•	•	•	•	•
pluviometro Crodo	•	•				•	•	•	•	•	•
pluviometro Pizzanco	•	•				•	•	•	•	•	•
pluviometro Cusolo	•	•				•	•	•	•	•	•
pluviometro Antrona											
pluviometro Stresa Someraro	•	•			•	•	•	•	•	•	•
pluviometro Candoglia	•				•	•	•	•	•	•	•
pluviometro Trontano	•	•		•	•		•	•	•	•	•
pluviometro Sambughetto	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
pluviometro Pallanza	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
pluviometro L. Paione								•	•	•	•

I-5. CONCLUSIONE

Lo scambio dati in tempo reale tra la Regione Piemonte e il Canton Ticino relativo alle piogge, alle portate dei fiumi principali e ai livelli del lago è stato attivato a inizio progetto e testato per tutta la durata del programma e sembra funzionare con buona affidabilità. Sarebbe importante, per ovviare

a eventuali interruzioni del collegamento via Internet, implementare una via di comunicazione diretta tra gli elaboratori dei due centri attraverso una linea telefonica ISDN.

Al fine di consentire una maggior fruizione delle informazioni durante la gestione dell'emergenza, le misure sono anche visibili a specifici utenti esterni autorizzati.

Bibliografia

CERIANI M., LAUZZI S. and PADOVAN N., (1994), *Rainfall thresholds triggering debris flows in the alpine area of Lombardia region, Central Alps-Italy*. In: Man and Mountain '94, Ponte di Legno (BS), Italy.

PISANI S., (1997), *Sistema per la previsione in tempo reale delle onde di piena sul Ticino e sulla Maggia e della quota del Verbano*. Rapporto interno dell'Istituto Scienze della Terra-SUPSI, Cadenazzo.

ROSAZZA A., (1998), *Programma allarme acqua*. Rapporto interno dell'Istituto di scienze della terra - SUPSI, Cadenazzo.

SALVADÈ G., PISANI S., DEI A., (1998), *Il monitoraggio, un mezzo per la riduzione dei danni: previsione in tempo reale della quota del Verbano*. Verbano Analisi e gestione di un sistema complesso, Istituto Scienze della Terra - SUPSI, Cadenazzo.

REGIONE PIEMONTE, (1999), *La rete meteoidrografica in tempo reale*. Rapporto interno del Settore Meteoidrografico e reti di monitoraggio.

AZIONE 2

**Sintesi pluviometrica regionale e
realizzazione di un atlante delle
piogge intense sulle Alpi occiden-
tali Italo-Svizzere**

Contributo dei partner italiani:

Giorgio ROTH, Giorgio BONI,
Antonio PARODI, Fabio TOGNETTI
Centro di ricerca Interuniversitario in Monitoraggio
Ambientale, Università degli Studi di Genova

Contributo dei partner svizzeri:

FOSCO SPINEDI
Istituto Svizzero di Meteorologia - Osservatorio di Lo-
carno Monti

II-1. LA CARATTERIZZAZIONE STATISTICA DELLE PRECIPITAZIONI ESTREME

La caratterizzazione statistica delle precipitazioni intense in una determinata porzione di territorio è un problema complesso e, tra i fattori che intervengono a condizionare le scelte metodologiche, le finalità dell'analisi rappresentano senza dubbio l'elemento maggiormente condizionante. Quando, come nel caso delle Alpi occidentali, le analisi sono finalizzate alla caratterizzazione delle portate al colmo di piena per i bacini di una porzione di territorio montano, non si può prescindere da considerazioni che riguardano l'omogeneità della procedura su tutta la porzione del territorio considerata e le scale spaziali e temporali caratteristiche dei bacini idrografici interessati. Tenendo inoltre conto che gli utenti finali della procedura proposta sono sia gli enti pubblici che i professionisti che si trovano ad operare sul territorio, è necessario mettere a punto una procedura standard di valutazione, facilmente riconoscibile. Ciò si collega con il problema dell'omogeneità dei risultati sul territorio: una procedura standardizzata e riconoscibile assicura tale omogeneità, riducendo i gradi di libertà nell'applicazione della stessa e consentendone un facile controllo.

Si è optato quindi per l'applicazione della metodologia ampiamente validata nell'ambito del progetto VAPI (VALutazione delle Piene in Italia) del GNDICI, basato sull'analisi statistica con approccio regionale, la quale assicura omogeneità nella valutazione sulla porzione di territorio analizzato. La base dati utilizzata è stata quella delle precipitazioni massime annuali per le durate di 1, 3, 6, 12 e 24 ore, critiche per le scale dei bacini presenti nell'area in esame.

La valutazione statistica regionale necessita della scelta a priori del modello probabilistico (distribuzione di probabilità genitrice - DPG) e del modello di variabilità spaziale dei parametri di quest'ultimo. Sulla base dei risultati del progetto VAPI, come DPG è stata scelta la distribuzione del valore estremo a doppia componente (TCEV) rivelatasi appropriata per la descrizione statistica dei dati idrologici in Italia, mentre la modellazione della variabilità spaziale è stata effettuata con approccio per regioni omogenee.

La procedura di valutazione statistica, coerentemente con il metodo VAPI, ha comportato i seguenti passi:

1. stima dei parametri della curva di crescita che deriva dalla distribuzione di probabilità genitrice (DPG) prescelta;
2. caratterizzazione della pioggia indice;
3. definizione delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica (LSPP).

Il metodo è stato applicato in modo da estendere

omogeneamente i risultati ottenuti in un precedente progetto del Programma INTERREG II Italia-Francia (Boni e Parodi, 2001)

II-2. APPLICAZIONE DEL METODO ALL'ARCO ALPINO OCCIDENTALE: I RISULTATI

II-2.1. Stima dei parametri della distribuzione di probabilità genitrice

La DPG prescelta nell'ambito del progetto VAPI è la distribuzione del valore estremo a doppia componente (TCEV) elaborata da Rossi et al. (1984). La TCEV si è dimostrata, tra le distribuzioni del valore estremo, quella che meglio interpreta il comportamento osservato dei massimi annuali di precipitazione per le durate da 1 a 24 ore. Il metodo utilizzato per la stima dei parametri della distribuzione TCEV fa riferimento al metodo della Massima Verosimiglianza (Maximum Likelihood) secondo un approccio proposto da Gabriele e Arnell (1991), che perviene alla stima dei parametri per passi successivi, attraverso un approccio gerarchico, che prevede tre diversi livelli di stima.

Elaborazioni precedenti hanno mostrato come, nella regione oggetto di studio, la sola analisi della distribuzione spaziale dei momenti di ordine superiore non sia sufficiente al fine di poter procedere alla definizione delle ipotesi di perimetrazione delle regioni e sottoregioni omogenee al primo e secondo livello di regionalizzazione. Si è quindi fatto riferimento ad un criterio di tipo geografico-meteorologico, che tiene in considerazione quelle che sono le caratteristiche e l'evoluzione della sollecitazione meteorologica che produce eventi estremi nelle varie parti del territorio indagato. Si sono così individuate quattro regioni e sottoregioni coincidenti che sono state oggetto delle successive elaborazioni:

REGIONE PADANA

comprendente l'insieme delle stazioni ricadenti in Piemonte e in Canton Ticino;

REGIONE ALPI SETTENTRIONALI

comprendente l'insieme delle stazioni francesi poste a nord del Massiccio del Pelvoux e le stazioni italiane situate nella zona delle Alpi Graie;

REGIONE ALPI MERIDIONALI

comprendente le stazioni francesi poste nella zona delle Alpi dell'Alta Provenza e le stazioni italiane situate nella zona delle Alpi Cozie;

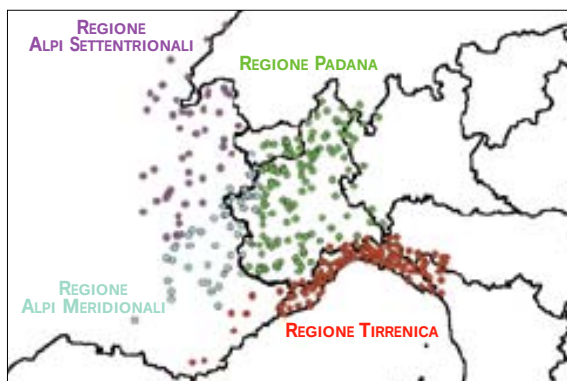
REGIONE TIRRENICA

comprendente le stazioni francesi situate nella zona della Provenza e le stazioni italiane poste in Liguria, Toscana e Lazio.

Il risultato della procedura di individuazione delle regioni omogenee è riportato in figura II-1.

L'applicazione dell'analisi di omogeneità a tali regioni ha dato esito positivo. Le curve di crescita per le diverse durate ottenute con il metodo di stima regionale al primo e secondo livello sono riportate nelle figure dalla II-2 alla II-5.

Figura II-1. Ipotesi di suddivisione del territorio oggetto di studio in regioni e sottoregioni omogenee



II-2.2. Variabilità della distribuzione di probabilità genitrice con la durata

La definizione della variabilità dei parametri della DPG è un passo preliminare alla definizione delle LSPP.

Queste ultime definiscono una relazione tra altezza di precipitazione, periodo di ritorno e durata che dipende quindi fortemente dalla variabilità della forma della DPG in funzione della durata stessa. Le elaborazioni condotte al primo e secondo livello di regionalizzazione hanno mostrato come, nell'ambito di ciascuna regione omogenea, non sia possibile assumere un'unica curva di crescita come rappresentativa. Tale caratteristica è particolarmente marcata nelle regioni Alpi settentrionali e meridionali, come mostrato in figura II-3 e figura II-4.

Figura II-2. Curve di crescita per la regione e sottoregione omogenea padana

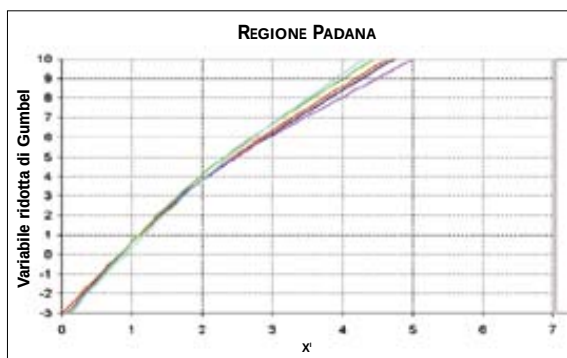


Figura II-3. Curve di crescita per la regione e sottoregione omogenea Alpi settentrionali

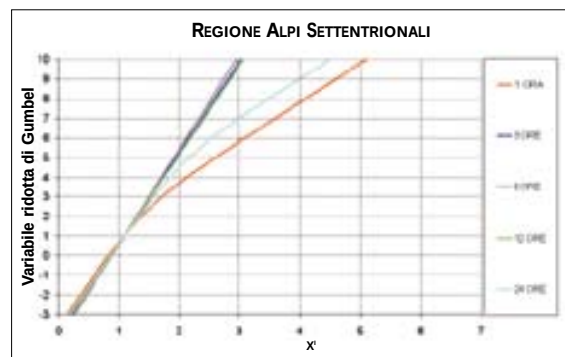


Figura II-4. Curve di crescita per la regione e sottoregione omogenea Alpi Meridionali

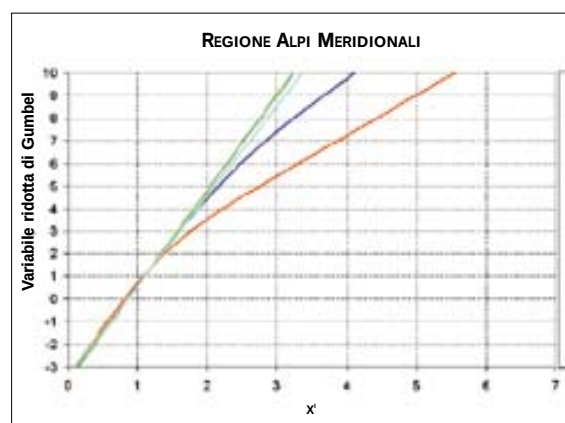
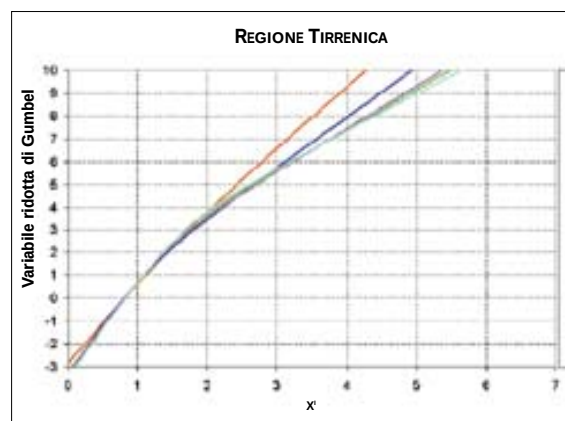


Figura II-5. Curve di crescita per la regione e sottoregione omogenea Tirrenica



Questo risultato fa sì che sia necessario esprimere il quantile dimensionale di pioggia funzione tanto del tempo di ritorno quanto della durata secondo l'espressione $K_{T,d}=K(T,d)$. L'espressione delle LSPP risulta quindi:

$$h(d,T)=\mu*K(T,d)*d^n \quad (1)$$

in cui $h(d,T)$ rappresenta l'altezza di precipitazione massima annuale per durata d e periodo di ritorno T , μ il valore della pioggia indice da dedurre in funzione della localizzazione geografica del sito considerato, $K(T,d)$ il quantile adimensionale di pioggia da dedurre dalla curva di crescita della corrispondente regione omogenea (X' nelle figure dalla II-2 alla II-5), e n l'esponente della relazione di scala anch'esso funzione della localizzazione geografica del sito considerato.

Una volta stimato il quantile adimensionale $K(T,d)$ dalle curve di crescita, è necessario giungere ad una stima della pioggia indice e dell'esponente n . È stata studiata la dipendenza di tali parametri dalla localizzazione geografica, ottenendo le mappe riportate in figura II-6 e figura II-7.

Figura II-6. Carta delle isolinee del parametro pioggia indice nella regione oggetto di studio. I valori crescono a partire dal colore azzurro-verde fino al rosso intenso

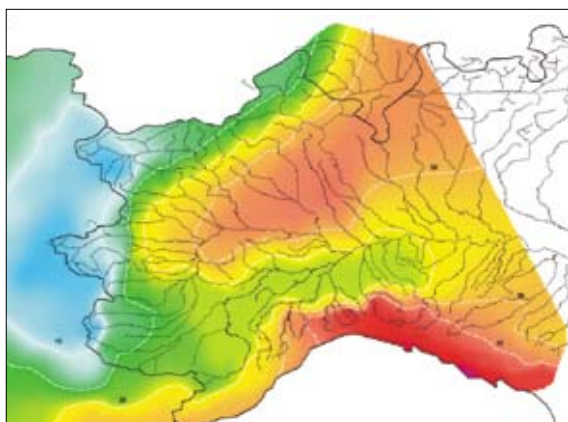
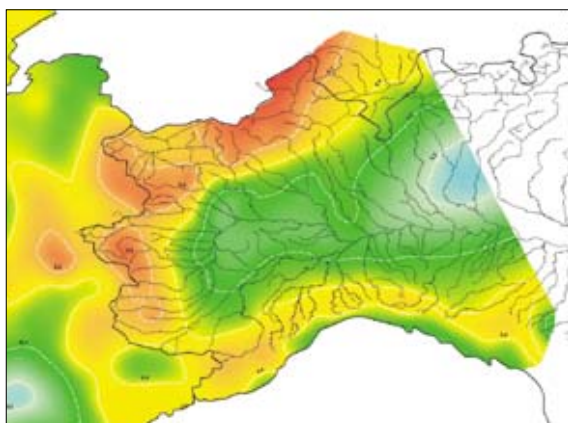


Figura II-7. Carta delle isolinee dell'esponente n delle LSPP. Il colore verde identifica le aree in cui $n < 0.35$. Il giallo identifica i valori di n compresi tra 0.35 e 0.45, mentre il rosso identifica i valori di $n > 0.45$



II-3. VALIDAZIONE FENOMENOLOGICA DEI RISULTATI

II-3.1. La suddivisione in regioni omogenee

Per l'identificazione delle regioni omogenee esistono in letteratura diverse tecniche (Nathan e McMahon, 1990; Cavadias, 1990; Gabriele e Arnell, 1991) le quali, seppur matematicamente robuste, difettano tutte di una base fisica. Le regioni omogenee vengono cioè definite semplicemente sulla base di considerazioni statistiche o matematiche, senza però curarsi di cercare alcuna relazione tra i risultati ottenuti e la fisica dei processi che generano il campo stocastico analizzato.

Nell'ultimo decennio l'evoluzione sia delle tecniche di monitoraggio degli eventi estremi, attraverso l'introduzione dei sensori remoti satellitari, sia della modellistica atmosferica ha consentito un progresso della conoscenza delle caratteristiche delle strutture precipitanti che generano tali fenomeni nel territorio in esame, testimoniata da tutta una serie di rapporti ed articoli scientifici pubblicati in tale periodo (Llasat et al., 1996; Bolla et al., 1996; Reale e Atlas, 2001; Reale e Turato, 2000). Sulla base di tale conoscenza è stata effettuata una serie di considerazioni che ha condotto alla definizione delle varie regioni omogenee per il territorio in esame.

L'ipotesi su cui si è lavorato è che l'omogeneità nella statistica degli eventi estremi sia prodotta da una omogeneità nei processi che generano questi ultimi. Il nodo da risolvere per l'identificazione delle regioni omogenee si riduce quindi, in tale ipotesi, alla identificazione dei domini spaziali interessati dallo stesso processo di formazione degli eventi estremi. Le osservazioni effettuate da satellite meteorologico e le indicazioni presenti in letteratura mettono in luce come sia possibile identificare nel territorio in esame singole regioni colpite da eventi estremi la cui generazione è riconducibile a strutture meteorologicamente simili. In sostanza l'approccio qui seguito associa il concetto di regioni omogenee a quello di esistenza di distinte aree geografiche sottoposte a distinte caratteristiche climatiche: quando tali aree risultano confinate in maniera statica, come ad es. per la presenza di barriere orografiche difficilmente valicabili, allora il concetto classico di regione omogenea viene a coincidere completamente con quello di regione geografica sottoposta ad una fissata sollecitazione climatica.

Sulla base di queste evidenze sperimentali e dell'ipotesi di lavoro precedente si è dunque proceduto, come già esposto al paragrafo II-2.1, alla identificazione di quattro regioni omogenee nell'area delle Alpi Occidentali:

- regione Padana;
- regione Alpi settentrionali;
- regione Alpi meridionali;
- regione Tirrenica.

La regione delle Alpi settentrionali è colpita da eventi estremi generati dai regimi del Nord-ovest, a carattere ciclonico o anticiclonico in grado di produrre precipitazioni intense nel periodo tardo-autunnale e invernale, e dal regime dell'ovest, a carattere anticiclonico e capace di produrre fenomeni intensi nel periodo estivo e autunnale.

Per quanto riguarda la regione Padana si può affermare che la parte alpina nord-occidentale è interessata da due tipi di regimi: i massimi annuali per le durate brevissime (1-3 ore) sono generalmente associati ad eventi estivi di origine convettiva dovuti ad instabilità locale. Gli eventi per durate maggiori, fino a 24 ore, sono invece generati da fenomeni di instabilità convettiva scatenata dal repentino sollevamento orografico indotto dalla barriera alpina, associati a strutture di circolazione atmosferica di tipo ciclonico di origine atlantica (Boni et al., 2001). L'identificazione di una unica regione omogenea per l'area padana è coerente con i risultati prodotti da un analogo studio prodotto dal CUGRI per conto della Regione Piemonte. Per un confronto dettagliato si rimanda al rapporto finale del progetto INTERREG II Italia-Francia (Boni e Parodi, 2001).

Per quanto riguarda la regione Alpi meridionali, facendo riferimento in particolare alle classificazioni di Mertz (1957) e di Blanchet (1990), si può dire che essa risulta interessata da eventi estremi prodotti dai cosiddetti regimi del sud-ovest, a carattere prevalentemente ciclonico e in grado di produrre precipitazioni intense nel periodo tardo-estivo, e del sud, a carattere ciclonico o anticiclonico in grado di generare precipitazioni intense nel periodo tardo-autunnale.

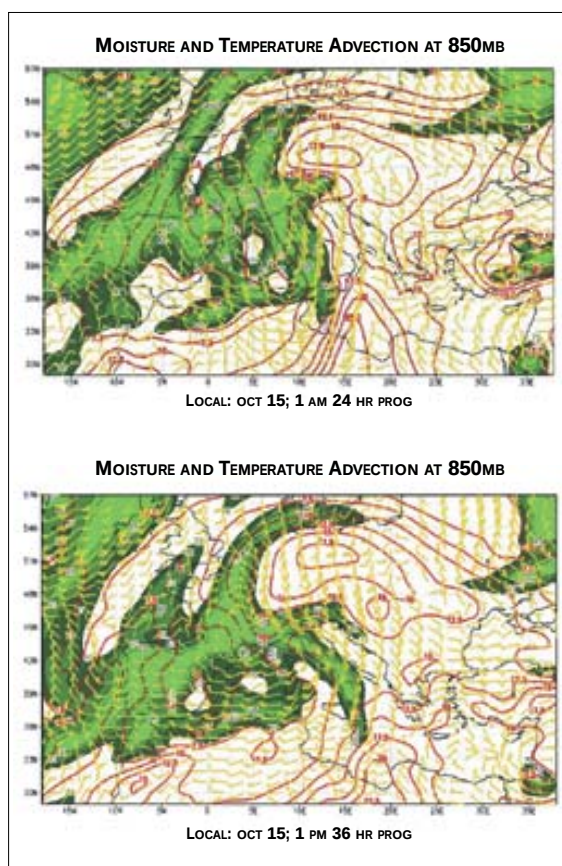
Nel caso della regione Tirrenica gli eventi estremi sono prevalentemente riconducibili ad un regime di tipo sud-ovest, caratterizzato dall'ingresso nell'area mediterranea di perturbazioni di origine atlantica, il cui movimento verso est è molto spesso rallentato dalla presenza di un blocco di alta pressione sull'Europa orientale. In tale situazione all'interno delle perturbazioni si formano delle celle temporalesche che generano precipitazioni di notevole intensità. La permanenza dei fenomeni dovuta al blocco consente lo sviluppo di più celle al di sopra della stessa zona, generando altezze di precipitazioni elevate anche sulle durate fino a 24 ore.

II-3.2. Caratterizzazione della pioggia indice

La caratterizzazione della pioggia indice ha fornito risultati alquanto interessanti, se confrontati con le evidenze sperimentali relative agli eventi intensi caratteristici della regione oggetto dello studio.

I risultati ottenuti nel gruppo di regioni omogenee Padana e Francese settentrionale e meridionale forniscono informazioni concordi tra di loro. In ciascuna di tali regioni si è riscontrato, ad esclusione delle parti di pianura, una dipendenza della pioggia indice con la pendenza dei versanti alla mesoscala, nella direzione prevalente delle correnti in occasione di eventi di precipitazione intensi. È emersa anche una dipendenza da un parametro di quota, da interpretarsi come parametro indicatore della distanza dalla zona pedemontana (Pianura Padana per la regione Padana e valle del Rodano per le regioni Francesi).

Figura II-8. Campo di vento a 850 hPa fornito dalle simulazioni del modello di circolazione globale AVN, per l'evento pluviometrico dell'ottobre 2000. Si osservi la permanenza del flusso da sud nelle 12 ore che intercorrono tra le due immagini (1:00 locali e 13:00 locali del 15 ottobre)



Comportamento a sé ha presentato l'area di pianura nella quale non è stato possibile identificare una dipendenza della pioggia indice da alcun parametro fisico ed è stato possibile imputare la variabilità di esso all'incertezza dovuta alla limitatezza dei campioni disponibili.

L'interpretazione di tipo fenomenologico di tali risultati è stata fornita andando ad analizzare alcune caratteristiche salienti degli eventi di precipitazione intensi nell'area. Osservando la figura II-8, in cui è riportato il campo di avvezione di umidità a 850 hPa relativo all'evento del 15-16 ottobre 2000, si vede come il campo di vento nella zona alpina del Piemonte settentrionale presenti una direzione prevalente sud-nord, la quale è risultata la direzione di massima correlazione tra le pendenze dei versanti ed il valore pioggia indice.

Alla direzione prevalente delle correnti durante gli eventi estremi nelle regioni alpine è già stato fatto cenno: secondo le classificazioni di Mertz (1957) e di Blanchet (1990) la regione alpina meridionale risulta interessata da eventi estremi prodotti dai cosiddetti regimi del sud-ovest, a carattere prevalentemente ciclonico e in grado di produrre precipitazioni intense nel periodo tardo-estivo, e del sud, a carattere ciclonico o anticiclonico in grado di generare precipitazioni intense nel periodo tardo-autunnale.

La regione delle Alpi settentrionali invece è colpita da eventi estremi generati dai regimi del Nord-ovest, a carattere ciclonico o anticiclonico in grado di produrre precipitazioni intense nel periodo tardo-autunnale e invernale, e dal regime dell'ovest, a carattere anticiclonico e capace di produrre fenomeni intensi nel periodo estivo e autunnale.

L'analisi statistica ha mostrato, anche in questo caso, come le direzioni di tali regimi si sono rivelate coincidenti con quelle di massima correlazione tra la pendenza dei versanti e la pioggia indice.

La dipendenza dalla seconda variabile indipendente, e cioè la distanza dalla zona pedemontana, è anche in questo caso interpretabile, in prima approssimazione, con le caratteristiche dei fenomeni atmosferici associati alle precipitazioni intense.

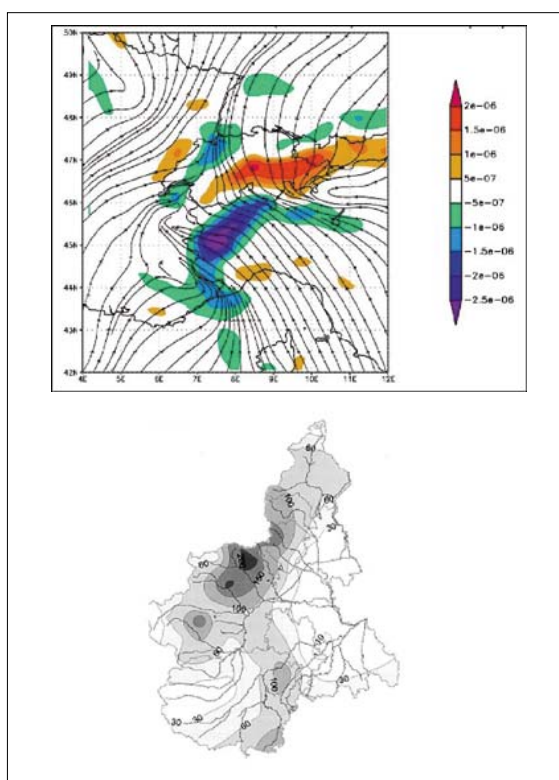
Nell'ipotesi di fenomeni prevalentemente di tipo convettivo, innescati da sollevamento orografico, si può supporre che gli effetti sulla pioggia indice comincino a sentirsi a partire dalla zona ai piedi delle catene montuose. Alcuni studi hanno messo in luce come tali effetti siano crescenti fino alla metà dei versanti (Loukas & Quick, 1996) e che sia decrescente per quote maggiori (Bradley et al., 1998).

In presenza di una catena montuosa di dimensione trasversale notevole e che presenti aree a quote elevate, l'effetto della zona di innesco dei fenomeni diviene

rilevante: la riduzione degli effetti con la quota fa sì che i fenomeni che si generano nelle zone montuose più lontane dalla pianura presentino in media minore intensità, generando quindi la negativa con la quota-distanza dalla base delle catene montuose che si osserva.

La figura II-9 mostra un esempio dei fenomeni sopra descritti qualitativamente. Il campo rappresentato è il campo di convergenza di avvezione di umidità a 850 hPa, il quale può essere messo in relazione all'intensità di precipitazione. Si osserva chiaramente come, sull'intervallo di integrazione del modello meteorologico (3h) i massimi di convergenza di umidità si concentrino nella zona montuosa prossima alla pianura, producendo altezze di precipitazione notevoli sulla stessa area, mentre le zone montuose a quote superiori sono interessate marginalmente dai fenomeni. La zona ad alti valori di convergenza orizzontale (area blu sul versante alpino italiano) a cui possono essere associate le intensità di precipitazione più alte (Holton, 1992), ha scale caratteristiche inferiori a quelle della barriera orografica. Le precipitazioni osservate al suolo (figura in basso, altezze cumulate dalle 12 UTC del 5 alle 00 UTC del 6 Novembre 1994) confermano tali considerazioni.

Figura II-9. In alto è mostrata la struttura del campo di convergenza dell'umidità a 850 hPa del 5 novembre 1994 alle ore 21:00 UTC sul Piemonte settentrionale. In basso, sono riportate le altezze cumulate dalle 12 UTC del 5 alle 00 UTC del 6 novembre 1994



Discorso a parte merita la regione omogenea tirrenica: anche in essa è stata evidenziata una dipendenza della pioggia indice dalla pendenza dei versanti rispetto ad una direttrice da sud-ovest a nord-est, coincidente con la direzione prevalente delle correnti atmosferiche osservate durante gli eventi estremi, e da un parametro rappresentativo della quota media dello spartiacque alla scala spaziale tipica dei fenomeni meteorologici che generano le precipitazioni intense.

Tale risultato può essere facilmente interpretato alla luce di alcune semplici caratteristiche degli eventi di precipitazione estremi nell'area, dei quali la pioggia indice rappresenta una altezza media.

Anche in questo caso, potendo ritenere il sollevamento orografico uno tra i fattori principali per lo sviluppo di eventi convettivi con precipitazioni di forte intensità, una maggiore pendenza (alla mesoscala) dei versanti può essere causa di fenomeni di

maggiore intensità, e quindi produrre sul lungo periodo, valori maggiori della pioggia indice (Boni, 2001; Wotling et al., 2000).

La dipendenza della pioggia indice dai suddetti fattori è risultata significativa, per quanto riguarda la zona tirrenica, su un'area che dalla costa va oltre lo spartiacque, ma non include le zone pianeggianti del basso Piemonte. Se si confronta l'estensione di tale area, trasversalmente alla catena appenninica, essa coincide con l'estensione media delle aree di precipitazione intensa durante gli eventi estremi. L'evidenza sperimentale fornita da diverse fonti di informazione, quali le reti di misura a terra (figura II-10), le immagini da satellite e i risultati della modellazione meteorologica, mostrando come gli eventi estremi che colpiscono tale area abbiano estensione dell'ordine di alcune decine di km, confermano la validità dei risultati raggiunti.

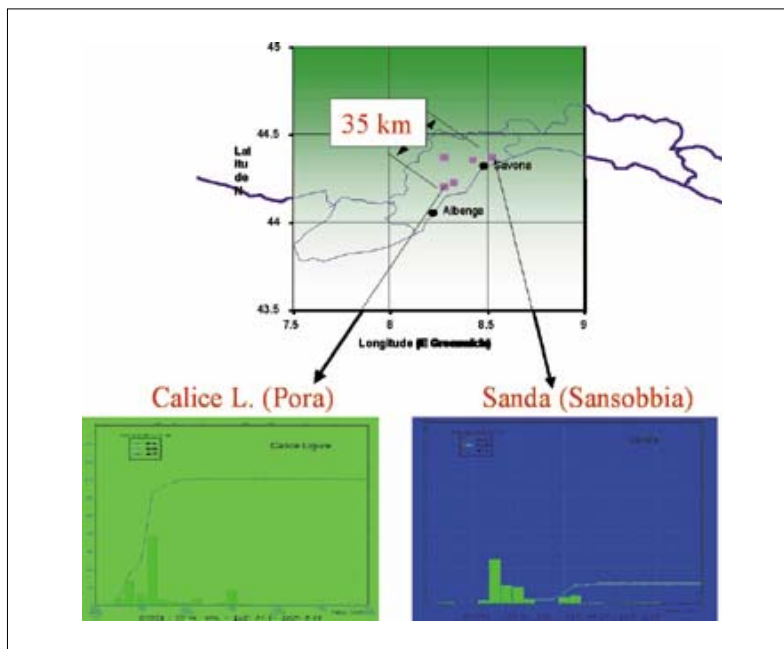


Figura II-10. Estensione dell'area colpita dall'evento del 23-24 settembre 1992, sulla base delle osservazioni a terra

II-4. CONCLUSIONI

I risultati dell'analisi statistica delle precipitazioni intense di durata da 1 ora a 24 ore sono stati esposti nel presente documento. L'analisi ha condotto a risultati alquanto interessanti, che hanno consentito un progresso nella conoscenza del comportamento statistico delle precipitazioni di breve durata sulle Alpi occidentali, e dei fenomeni meteorologici che le generano. L'estensione dell'analisi già effettuata nell'ambito del progetto INTERREG II Italia-Francia (Boni e Parodi, 2001) ha consentito di redigere un atlante delle precipitazioni intense la cui validità può essere estesa a tutto l'arco alpino occidentale, fino alla valle del fiume Ticino.

Tali risultati hanno confermato le deduzioni fatte su basi di dati più limitate, negli studi condotti dal CIMA per conto della Regione Liguria e del CUGRI di Salerno per conto della Regione Piemonte. Tale fatto conferma la affidabilità dei risultati ottenuti ed incoraggia studi più approfonditi.

Uno dei risultati più interessanti è che l'omogeneità statistica si è rivelata fortemente legata ai

fenomeni meteorologici che producono le precipitazioni estreme nella regione.

Un secondo fattore condizionante è la presenza di barriere orografiche, che influenza vari elementi caratterizzanti la statistica degli estremi: la localizzazione degli eventi straordinari caratterizzanti la distribuzione di probabilità; il valore del coefficiente di scala delle LSPP, il quale rappresenta un esponente a cui è legata la crescita delle altezze di precipitazione massime annuali per assegnato periodo di ritorno T ; il parametro pioggia indice, il quale è risultato fortemente dipendente dalla pendenza dei versanti e dalla quota media alla mesoscala dello spartiacque o del versante.

Le stime effettuate sono risultate alquanto robuste in quanto i confronti con i risultati di altri metodi (vedere Boni e Parodi, 2001) hanno evidenziato che le eventuali differenze sono sempre riconducibili ad un errore di stima che dipende dalla limitatezza del campione.

Il metodo di analisi è stato strutturato sull'esempio di quanto fatto per la Regione Liguria (AA.VV., 1999), in modo da consentirne un facile uso da parte di professionisti e tecnici chiamati a fornire valutazioni sulle piogge intense e di breve durata.

Bibliografia

AA.VV., (1999), *Caratterizzazione delle precipitazioni intense e delle portate di piena per i bacini liguri, rapporto finale*. Convenzione tra la regione Liguria e l'Università degli studi di Genova, Centro di ricerca in Monitoraggio Ambientale. Rapporto interno.

BLANCHET G., (1990), *Regimes meteorologiques et diversité climatique dans l'espace Rhonalpin*. Revue de Geographie de Lyon, vol 65, n°2, pp. 106-117.

BOLLA R., BONI G., LA BARBERA P., LANZA L., MARCHESE M. e ZAPPATORE S., (1996), *The Tracking and Prediction of High Intensity Rainstorms*. Remote Sensing Reviews, 14(1-3), 151-183.

BONI G., (2001), *Regional rainfall frequency analysis in northern Mediterranean coast line: a simple underlying physics*. Atti dell'Accademia Ligure di Scienze e Lettere. In stampa.

BONI G. e PARODI A., (2001), *Sintesi pluviometrica regionale: realizzazione di un atlante sperimentale delle piogge intense sulle Alpi franco-italiane*. Rapporto Finale, Progetto INTERREG II Italia-Francia. Azione 3.

BONI G. e PARODI A., (2000), *Sintesi pluviometrica regionale: realizzazione di un atlante sperimentale delle piogge intense sulle Alpi franco-italiane*. Rapporto Intermedio, Progetto INTERREG II Italia-Francia. Azione 3.

BONI G., PARODI A., FURCOLO P., VILLANI P., (2000), *Un modello regionale per l'analisi statistica dei massimi annuali delle precipitazioni di breve durata*. Atti del XXVII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Genova, 12-15 settembre 2000, pagg. 151-160.

BRADLEY S.G., DIRKS K.N., STOW C.D., (1998), *High resolution studies of rainfall on Norfolk Island. Part III. A model for rainfall redistribution*. Journal of Hydrology, 208 (3-4), 194-203.

CAVADIAS G., (1990), *The canonical correlation approach to regional flood estimation*. In Regionalization in Hydrology, pp. 171-178, IAHS publ. No. 191.

GABRIELE S. and ARNELL N., (1991), *A hierarchical approach to regional flood frequency analysis*. Water Resources Research, 27(6), 1281-1289.

LLASAT M.C., RAMIS C. and BARRANTES J., (1996), *The meteorology of high-intensity rainfall events over the West Mediterranean region*. Remote Sensing Reviews, 14 (1-3), 51-90.

HOLTON J.R., (1992), *An Introduction to dynamic meteorology*. Academic Press.

LOUKAS A. and QUICK C., (1996), *Spatial and temporal distribution of storm precipitation in south western British Columbia*. Journal of Hydrology, 174, 37-56.

MERTZ J., (1957), *Essai de classification des types de temps sur les Alpes d'après la disposition des isohypes à 500 mb*. La Meteorologie, Serie VI, n°45-46, pp. 305-315.

NATHAN R.J. and MCMAHON T.A., (1990), *Identification of homogeneous regions for the purpose of regionalisation*. Journal of Hydrology 121, 217-238.

REALE O., TURATO B., (2000), *Dinamica dell'umidità a grande scala e processi sub-sinottici rilevanti per la previsione di eventi estremi*. Atti del XXVII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Genova, 12-15 Settembre, vol II: 395-403.

REALE O., ATLAS R., (2001), *Tropical-like cyclones in the extratropics. Observational evidence and synoptic analysis*. Accepted on Weather and Forecasting. In print.

ROSSI F., FIORENTINO M. and VERSACE P., (1984), *Two Component Extreme Value distribution for flood frequency analysis*. Water Resources Research, 20, 847-856.

WOTLING G., BOUVIER C., DANLOUX J. e FRITSCH J.-M., (2000), *Regionalization of extreme precipitation distribution using the principal components of the topographical environment*. Journal of Hydrology, 233, 86-101.

AZIONE 3

Definizione di una metodologia per la valutazione della pericolosità dei versanti in relazione a processi inerenti la coltre superficiale, impiegando parametri idrologici, geotecnici e morfologici e da sperimentarsi in alcuni bacini campione

Contributo dei partner italiani:

Ferruccio FORLATI, Stefano CAMPUS,
Barbara CORAGLIA, Ermes FUSETTI
Regione Piemonte - Settore Studi e Ricerche Geologiche -
Sistema Informativo Prevenzione Rischi

Rocco PISPICO, Herbert SAPRI,
CSI-Piemonte - Settore Controllo Ambiente - Area Sistema
Informativo Prevenzione Rischi Naturali

Claudio SCAVIA, Marta CASTELLI
Politecnico di Torino - Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica

Gianni MORTARA, Franco GODONE
C.N.R. - Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica del Bacino Padano

Contributo dei partner svizzeri:

Giorgio BEATRIZOTTI, Andrea BULETTI,
Laura FOGLIA, Barbara SINCICH
Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana -
Istituto Scienze della Terra

III-1. PREMESSA

Scopo dell'Azione 3 è la messa a punto di metodologie per la valutazione della propensione all'instabilità dei versanti in un bacino idrografico, in relazione ai processi di mobilitazione della coltre superficiale. Si tratta di fenomeni, modesti per sviluppo areale ed entità dei volumi coinvolti, che avvengono in occasione di eventi pluviometrici intensi e possono rivelarsi molto pericolosi.

Gli studi condotti, a forte connotazione multidisciplinare, hanno affrontato il problema sia dal punto di vista scientifico sia dal punto di vista gestionale fornendo utili strumenti operativi nel campo della prevenzione. Il presente lavoro è stato condotto collegialmente da un gruppo di specialisti italiani e svizzeri aventi esperienze simili e al tempo stesso complementari nel campo dello studio della stabilità dei versanti ed in particolare:

- per gli specialisti italiani il momento caratterizzante del progetto è consistito nella messa a punto di una metodologia capace di valutare il grado d'instabilità di versanti di un più esteso territorio in ambiente alpino;
- gli specialisti svizzeri hanno definito una metodologia che consente di valutare, a livello puntuale, le condizioni di stabilità e l'evoluzione del fenomeno eventualmente innescatosi.

Per tale motivo, il testo è stato articolato in due sezioni dedicate ai due diversi approcci di valutazione dell'instabilità dei versanti:

1. zonazione di un territorio in ambiente alpino (contributo italiano);
2. analisi di situazioni locali (contributo svizzero).

III-2. FRANE SUPERFICIALI

Questa tipologia di processi, noti in letteratura come *shallow landslide* o *soil slip*, si sviluppa con maggior frequenza in ambiente prealpino ed in zone collinari, coinvolgendo per lo più limitate porzioni di terreni non coerenti della copertura superficiale che le acque di infiltrazione hanno portato alla saturazione. La particolare pericolosità di questi fenomeni è da mettere in relazione non solo con la loro rapidità di sviluppo e con la difficoltà di prevederne l'ubicazione, ma anche con l'elevata densità di distribuzione dei singoli fenomeni, le cui traiettorie di discesa sul versante hanno così una notevole probabilità di interferire con aree antropizzate.

Durante l'ultimo secolo in Piemonte quasi il 50% delle vittime causate da dissesti di versante sono

dovute a frane superficiali.

Con il termine *mobilitazione delle coperture detritiche* si intende, a volte in modo imperfetto, sia il fenomeno franoso in senso stretto, sia la successiva evoluzione, peraltro non sempre presente, di trasferimento degli accumuli nella rete idrografica minore, determinando l'innescio o l'esaltazione dei fenomeni di trasporto in massa.

In occasione di particolari condizioni meteorologiche, porzioni di terreno superficiale si staccano dagli strati più addensati sottostanti, o dal tetto del substrato roccioso sul quale giacciono e, muovendosi su una superficie in genere sub-planare, traslano verso il basso evolvendo a volte in colata.



 Figura III-1. Esempio di frana superficiale

Le frane superficiali sono generalmente caratterizzate da:

- spessori limitati (da qualche decina di centimetri fino a 100÷150 cm);
- volumi molto modesti (da qualche metro cubo a qualche centinaio di metri cubi, più raramente > 1000 m³);
- elevata densità di singoli fenomeni per unità di superficie (140 frane/km², in Carnia nel settembre 1983; circa 160 frane/km² nelle Langhe piemontesi nel novembre 1994);
- frequente tendenza alla coalescenza delle nicchie di distacco e/o degli accumuli (aggregazione anche di diverse decine di singole frane);
- frequente trasferimento degli accumuli nella rete idrografica minore (quindi innescio e/o esaltazione dei fenomeni di trasporto in massa);
- rapidità di evoluzione che può essere considerata pressoché istantanea (da qualche decina di secondi a qualche minuto);

- elevata velocità di movimento: prove su modello fisico (Fukuoka et al., 1977) portano a stabilire velocità sino a 15 m/s;
- elevato impatto distruttivo con gli edifici (figura III-2): 4 vittime a Serravalle Scrivia (AL) nell'ottobre 1977, 18 vittime a Tresenda (SO) nel maggio 1983, 11 vittime a Tartano (SO) nel luglio 1987, 14 vittime a Varallo Sesia (VC) nel novembre 1994;
- elevate distanze percorse dalla massa mobilitata: spesso la massa mobilitata si deposita oltre il piede del versante percorrendo ampi tratti pianeggianti;
- fattori innescanti imputabili a severi eventi meteorologici caratterizzati da piogge spesso protratte nel tempo e con elevati valori di intensità oraria;
- assenza di indizi premonitori;
- azione morfogenetica scarsamente incisiva sull'assetto originario dei versanti;
- scarsa probabilità di riattivazione nel medesimo luogo di precedente innesco, ma alta probabilità di accadimento di nuovi fenomeni in aree immediatamente adiacenti;
- pendenza media dei versanti coinvolti compresa nell'intervallo $18 \div 45^\circ$;
- coinvolgimento di settori di versante generalmente privi di vegetazione d'alto fusto, più frequentemente a prato/pascolo o, in zone collinari, a vigneto o frutteto. Per la coltivazione di queste ultime colture si è diffusa l'usanza di terrazzare il pendio e proprio in corrispondenza dell'orlo di questi gradini sono frequentissimi i casi di innesco di frane.

A fronte di una manifesta pericolosità è singolare che a queste frane non sia stata quasi mai associata un'adeguata memoria storica. Rare sono le descrizioni, e tanto più le rappresentazioni cartografiche, di eventi alluvionali che hanno tenuto nella dovuta considerazione le frane che interessano i terreni superficiali. Il motivo di questa scarsa attenzione può forse derivare dalla constatazione che i versanti, quando coinvolti da questa tipologia di frane, rimangono sostanzialmente integri. Pertanto il ricordo di quanto successo svanisce in breve tempo, al pari della traccia delle frane per naturale, rapida obsolescenza della nicchia di distacco e dell'accumulo o, più di frequente, per il rimodellamento indotto dalle pratiche colturali, specie in ambiente collinare (figura III-3).



Figura III-2. Edificio travolto da una colata rapida nel bacino del Torrente Melezzo Orientale, con una vittima (agosto 1978, foto CNR-IRPI)



Figura III-3. Rete stradale intercettata da frane (Langhe piemontesi, novembre 1994, foto CNR-IRPI)

A titolo di informazione, si riporta un elenco di eventi avvenuti nell'ultimo cinquantennio nel bacino padano, recente quello dell'ottobre 2000 (non dimenticando, in altre parti d'Italia, i disastri della Versilia nel 1996 e di Sarno nel 1998), peculiari per le numerosissime frane superficiali, spesso con pesante tributo di vite umane:

- Biellese orientale, novembre 1951 e 1968;
- Pinerolese, maggio 1977;
- Alessandrino meridionale, ottobre 1977;
- Val Vigizzo, agosto 1978;
- Langhe e Valsesia, novembre 1994;
- Valle d'Aosta, ottobre 2000.

III-3. ZONAZIONE DI UN TERRITORIO IN AMBIENTE ALPINO

Come già specificato, lo scopo dello studio consiste nella predisposizione di una metodologia per la zonazione di una porzione di territorio in settori aventi diversa propensione all'instabilità e nella messa a punto di strumenti operativi di salvaguardia e gestione del territorio.

Particolare attenzione è stata rivolta all'utilizzo della metodologia in campo previsionale, per la predisposizione di scenari pre-evento in funzione dei valori di pioggia attesa forniti dal Settore Meteorologico e Reti di Monitoraggio della Direzione Servizi Tecnici di Prevenzione (Regione Piemonte).

È stata scelta una specifica area campione nella quale tarare e verificare la metodologia predisposta.

III-4. SETTORE DI INDAGINE

È stata scelta come area di indagine la testata del bacino del torrente Melezza Orientale in alta Val Vigezzo (Val d'Ossola, Alpi Lepontine). La valle costituisce da sempre un'importante via di comunicazione tra il territorio elvetico e quello italiano grazie alla particolare conformazione geomorfologica.

La Val Vigezzo ha una direzione circa E-O ed è impostata lungo la linea tettonica Centovalli, attiva anche nel Quaternario.

L'asse vallivo della Val Vigezzo è attraversato da uno spartiacque effimero che separa i bacini dei torrenti Melezza Occidentale e Melezza Orientale drenanti rispettivamente verso l'Italia e verso la Svizzera. Tale caratteristica morfologica ha favorito in passato fenomeni di inversioni di drenaggio dei due torrenti. Il torrente Melezza Orientale, la cui testata è collocata a nord dell'asse vallivo, sbocca nella valle principale presso l'abitato di Santa Maria Maggiore: da qui la direzione di deflusso varia e il corso d'acqua defluisce verso est in territorio elvetico dove confluisce nel torrente Isorno.

L'area indagata (figura III-4) è compresa all'interno dei limiti comunali di Tocco, Santa Maria Maggiore e, in minima parte, Craveggia. La distribuzione altimetrica dell'area varia da 2466 m s.l.m. (Pizzo la Scheggia), a circa 1000 m s.l.m. (punto di chiusura del bacino).

La testata del Torrente Melezza Orientale si presenta come un ampio anfiteatro rivolto verso sud con un sistema drenante di forma radiale in cui i rii e i torrenti convergono nei pressi del punto di chiusura del bacino.

Le forme e i depositi legati al modellamento glaciale (cordoni morenici, rocce montonate, till di ablazione, till di alloggiamento, depositi di contatto

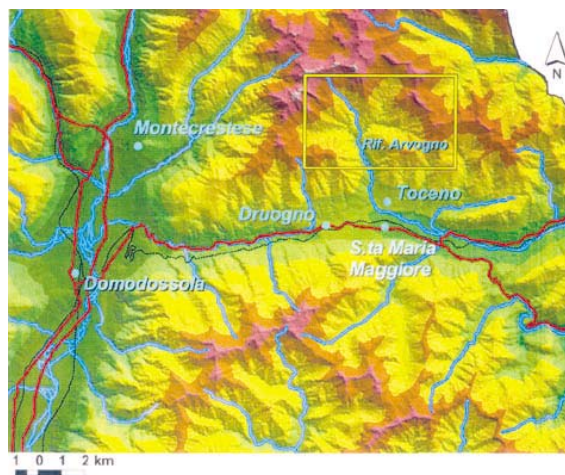


Figura III-4. Inquadramento dell'area di indagine

glaciale, depositi fluvio-glaciali, depositi glacio-lacustri, ecc.), sono in questo settore diffusi e ben conservati, e testimoniano la presenza nel Quaternario di importanti masse glaciali. Sono inoltre diffusi depositi e forme di origine gravitativa (detriti di falda e frane di crollo alle quote superiori, frane di mobilitazione rapida della coltre superficiale alle quote inferiori). Il paesaggio risulta inoltre fortemente influenzato dalla dinamica fluviale recente: i corsi d'acqua principali scorrono all'interno di valli strette e molto incise che testimoniano un approfondimento fluviale molto accentuato. È probabile che l'attività neotettonica della linea Centovalli abbia svolto un ruolo importante nel determinare l'assetto geomorfologico attuale dell'area indagata, interagendo in particolare con la morfodinamica fluviale e glaciale.

Il substrato cristallino pre-quaternario è rappresentato dagli gneiss a grana fine a muscovite e biotite, appartenenti all'unità del Monte Leone (Pennidico Inferiore). La giacitura della scistosità è all'incirca costante in tutta l'area indagata con immersione verso SE di poche decine di gradi. Lo gneiss si presenta tabulare, listato, talora molto fratturato specie in corrispondenza delle discontinuità tettoniche principali.

III-5. EVENTO ALLUVIONALE DEL 7-8 AGOSTO 1978 IN VAL D'OSSOLA (PIEMONTE)

Il 7-8 agosto masse d'aria fredda di origine atlantica, venute a contatto con aria calda e umida a sud

delle Alpi, diedero luogo a precipitazioni di intensità eccezionale (figura III-5). Esse dapprima investirono il tronco intermedio della Valle d'Aosta, l'alta Val Sesia e successivamente il medio bacino del Toce, colpendo con particolare intensità la Val Vigezzo ed esaurendosi quindi nella valle del Melezze Orientale, in territorio svizzero. I caratteri idrologici dell'evento (Tropeano *et al.*, 1999) possono così sintetizzarsi:

- al pluviografo di Larecchio, le altezze di pioggia misurate furono 58 mm/1h, 134 mm/3h, 230 mm/24h;
- al pluviografo di Domodossola, le altezze di pioggia misurate furono 50 mm/1h (tempo di ritorno 47 anni), 138 mm/3h (tempo di ritorno oltre 100 anni), 233 mm/24h;
- il rovescio di massima intensità si ebbe nel pomeriggio del 7 agosto e alle 18 i tributari di destra del Melezze Occidentale erano in massima piena.



Figura III-5. Isoiete (mm/24h) del 7 agosto 1978 (Anselmo 1979)

In tutte le valli più colpite si riscontrò una generale interdipendenza tra i processi d'instabilità sui versanti e i processi torrentizi di tipo parossistico lungo la rete idrografica di ordine inferiore. Persistenti accumuli detritici alla testata di impluvi (coltri eluvio-colluviali), destabilizzati per il rapido incremento delle acque di ruscellamento e d'infiltrazione, spesso concorsero in misura determinante all'esaltazione delle pulsazioni di piena, con la creazione di sbarramenti temporanei ai deflussi concentrati nelle incisioni.

Numerosi furono i danni causati sia dall'attività fluviale e torrentizia sia dai processi di versante. Nell'area coinvolta furono danneggiati venti edifici, molti centri abitati rimasero isolati a causa della distruzione di trenta ponti e per i danni causati a linee di comunicazione.

Carattere peculiare dell'evento fu l'elevata concentrazione di frane avvenute a scapito della coltre

superficiale (figura III-6); in particolare nel dominio di studio una frana superficiale evolutasi in un *mud-debris flow* e denominata "frana del caminetto" (figura III-2) causò una vittima.



Figura III-6. Foto aerea in cui sono visibili gli effetti dell'evento alluvionale del 1978 (Volo post alluvione Ossola agosto 1978)

III-6. INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA

Valutare la propensione all'instabilità dei versanti per un determinato ambito territoriale significa verificare, per ogni elemento in cui è stata discretizzata l'area in esame, le condizioni di stabilità o di instabilità.

Tale risultato è raggiungibile mediante l'impiego di un modello in grado di cogliere gli aspetti fondamentali dei fenomeni indagati, basato su variabili e parametri di facile derivazione. La fase più delicata dell'intero procedimento operativo è rappresentata dalla scelta del modello semplificato che, oltre a rispondere alle esigenze più prettamente gestionali, deve essere applicabile ai più diversi contesti.

Per un'efficace gestione delle informazioni relative ad un settore territoriale più o meno vasto è possibile ricorrere alle tecniche GIS (*Geographic Information System*) che consentono una strutturazione logica della base dati in strati informativi indipendenti. In tal modo, le basi tematiche contenenti informazioni georiferite possono essere messe in relazione tra loro impiegando gli operatori spaziali GIS.

Per la predisposizione di scenari relativi a fenomeni strettamente dipendenti da eventi meteorologici, è opportuno operare mediante l'accoppiamento di un modello di instabilità dei versanti con la previsione meteorologica. L'approccio

proposto è particolarmente adatto a questo impiego in quanto, come si vedrà in seguito, include un termine idrologico in cui tali grandezze devono essere specificate.

III-7. PROPOSTA METODOLOGICA

L'analisi è normalmente condotta attraverso le seguenti fasi consequenziali:

1. analisi delle condizioni al contorno e scelta del modello;
2. individuazione delle unità territoriali di riferimento;
3. valutazione dei parametri di ingresso;
4. discretizzazione del dominio secondo una griglia di elementi (celle quadrate) con dimensioni predefinite e creazione del DTM (*Digital Terrain Model*);
5. derivazione delle variabili topografiche e idrologiche;
6. attribuzione ad ogni cella dei valori corretti per tutti i parametri;
7. valutazione dell'instabilità di ogni cella per un livello di pioggia infiltrata assegnato;
8. interpretazione e verifica dei risultati.

La strategia impiegata per la conduzione del progetto è stata la seguente:

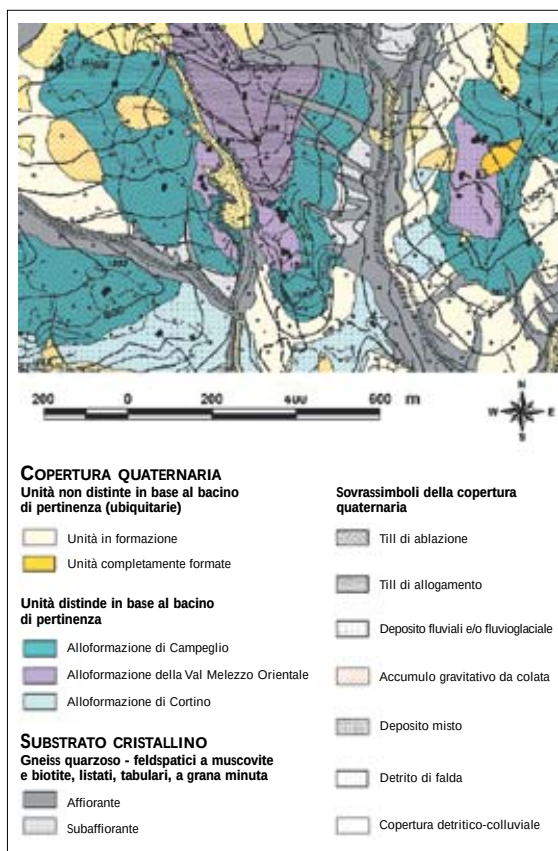
- utilizzo di un modello consolidato ed affidabile;
- valutazione dell'applicabilità del modello ad un contesto territoriale alpino;
- ricorso alle tecniche GIS per la strutturazione dei dati in ingresso in strati informativi;
- contributo multidisciplinare (geologia, pedologia, ingegneria geotecnica, ecc.);
- affinamento delle fasi di scelta ed acquisizione dei parametri di ingresso, per i quali si considera una variabilità spaziale legata al grado di dettaglio del rilevamento;
- verifica delle capacità previsionali del metodo tramite confronto dei risultati ottenuti con gli effetti conseguenti a eventi alluvionali significativi (Evento alluvionale del 7-8 agosto 1978 in Val Vigizzo).

Tutte le discipline coinvolte hanno contribuito alle indagini finalizzate alla definizione dei dati di ingresso, attraverso le fasi e i prodotti intermedi esaminati in seguito.

III-7.1. Rilevamento geologico del Quaternario

Ha permesso di ricostruire l'evoluzione geologico-geomorfologica recente dell'area di studio. I caratteri litologici, geomorfologici e stratigrafici, sintetizzati nelle carte di terreno, costituiscono il supporto di base fondamentale per la conduzione delle successive indagini. In particolare è stato eseguito un rilevamento di un'area di circa 16 km² e sono state realizzate una Carta Geomorfologica secondo le linee guida della Carta Geomorfologica d'Italia e una Carta delle Formazioni Quaternarie utilizzando il metodo Allostratigrafico (NACSN 1983) alla scala 1:10.000 (figura III-7).

Figura III-7. Stralcio della Carta delle Formazioni Quaternarie (dal rilevamento alla scala 1:10.000)



III-7.2. Rilevamento pedologico

Ha avuto come obiettivo la definizione delle unità elementari di riferimento e la stima dei valori di alcuni parametri di ingresso per il modello meccanico-idrologico. Tale obiettivo è stato

raggiunto attraverso più fasi di lavoro: inizialmente è stata realizzata una Carta dell'Uso del Suolo secondo la legenda CORINE (1994) (figura III-8); sono state individuate le principali tipologie pedologiche e sono state condotte indagini finalizzate alla valutazione dei parametri fisici, tra cui l'esame di profili pedologici (figura III-9).

In una seconda fase, attraverso l'incrocio dei dati geomorfologici, geologici e pedologici, è stata realizzata la Carta Pedologica. Il territorio in esame è stato suddiviso in 97 unità elementari di riferimento (figura III-10) appartenenti a 12 unità ambientali (aree relativamente omogenee dal punto di vista pedo-paesaggistico). A ciascuna unità ambientale, benché caratterizzata da una variabilità sia in direzione verticale (presenza di più orizzonti in ciascun suolo) sia orizzontale (presenza di più suoli in ogni unità), è stato attribuito un valore costante per ciascun parametro fisico-meccanico. Il problema della variabilità spaziale delle grandezze considerate all'interno di ogni unità ambientale è stato superato attraverso l'attribuzione del valore considerato più favorevole all'innesco dei fenomeni franosi superficiali e/o del valore medio ponderato. Ad esempio, per ciò che riguarda la permeabilità, inizialmente è stato attribuito a ciascun suolo il valore



Figura III-9. Esame di un profilo pedologico

dell'orizzonte meno permeabile; successivamente è stato calcolato per ciascuna unità ambientale il valore medio ponderato delle permeabilità dei suoli potenzialmente instabili presenti con diversa frequenza all'interno dell'unità stessa.

Figura III-8. Carta dall'Uso del Suolo secondo la metodologia CORINE

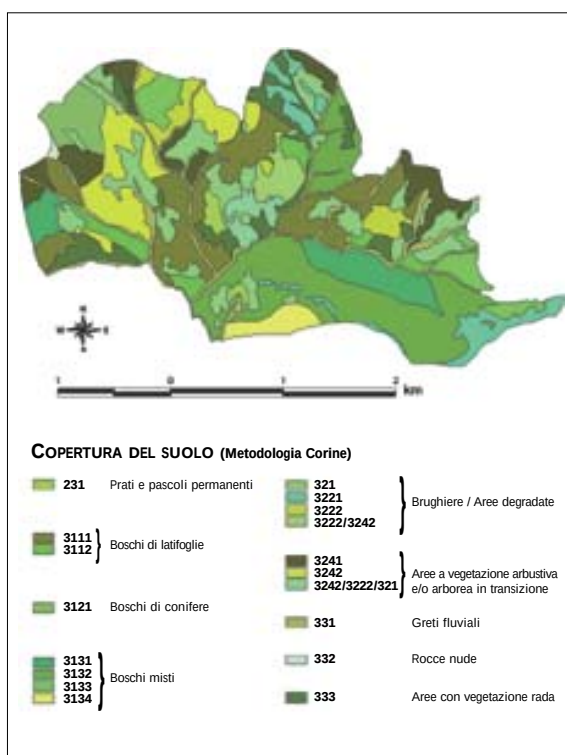
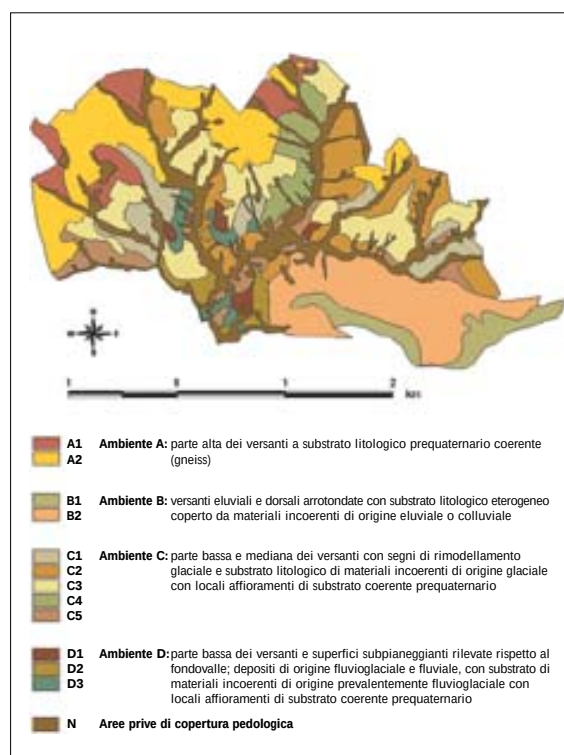


Figura III-10. Carta pedologica: suddivisione dell'area di indagine in unità di terreno elementari e ambientali



III-7.3. Classificazione geotecnica

Su 129 campioni disturbati sono state eseguite analisi granulometriche per setacciatura e sedimentazione. Indipendentemente dal tipo di deposito considerato, si tratta di materiali ghiaioso-sabbiosi con presenza (generalmente debole) di fine (passante al setaccio 200 ASTM). In figura III-11 è riportata a titolo di esempio la curva granulometrica di un campione prelevato dalla coltre superficiale detritica.

Sulla frazione fine di 2 campioni sono state eseguite prove di taglio diretto drenato su provini ricostituiti (lato 60 mm, altezza 20 mm), i cui risultati sono riportati in Tabella III-1.

L'insieme dei risultati ottenuti ha consentito una stima sufficientemente accurata dei parametri meccanici e di confermare le indicazioni fornite dalle osservazioni di terreno per i parametri fisici (peso di volume e conducibilità idraulica).

	c' [kPa]	ϕ' [°]
Picco	15.3	38.2
Residuo	10.0	35.8

Tabella III-1. Risultati delle prove di taglio diretto sulla frazione fine

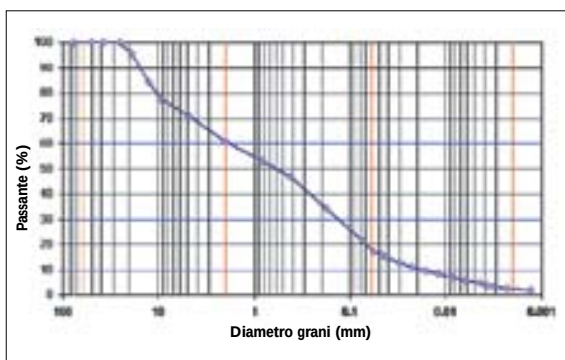


Figura III-11. Curva granulometrica di uno dei campioni prelevati nella copertura pedogenizzata

III-7.4. Modello digitale del terreno (DTM)

A partire dai punti quotati estratti dai livelli vettoriali delle curve di livello della C.T.R. 1:10.000 sono state create due griglie: una a maglia 20 m e una a maglia 10 m. I modelli digitali del terreno da essi ottenuti hanno fornito l'indispensabile supporto

per la derivazione delle variabili topografiche ed idrologiche introdotte nel modello meccanico-idrologico. In figura III-12 è riportata una vista assonometrica del DTM a maglia 20 m relativo alla C.T.R. 052020 "Melezzo Orientale".

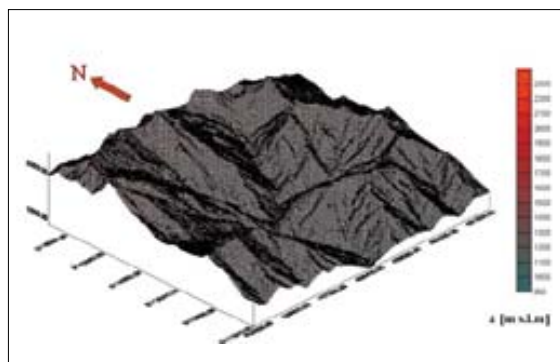


Figura III-12. Vista assonometrica del DTM a maglia 20 m.

III-7.5. Evento alluvionale dell'agosto 1978: il quadro del dissesto

Lo studio è consistito nell'analisi a posteriori del quadro del dissesto al fine di ricavare utili indicazioni in chiave previsionale.

È stata messa a punto una specifica metodologia per il rilevamento dei processi d'instabilità dei versanti e di caratterizzazione dei materiali coinvolti. Il lavoro si è articolato nelle seguenti fasi:

- fotointerpretazione;
- rilevamento di terreno;
- analisi statistica e caratterizzazione dei processi.

Tutte le informazioni raccolte (550 frane cartografate di cui 276 descritte tramite una scheda specifica) sono state informatizzate e georiferite al fine di costruire una base dati apposita.

Tale modalità operativa ha permesso l'analisi statistica (circa 5800 dati) di diverse caratteristiche (parametri geometrici, morfometrici, orizzonti coinvolti, tipologia, ecc.), individuando le situazioni predisponenti l'innescio dei processi di instabilità della coltre superficiale e di valutare la reale applicabilità del modello meccanico-idrologico. Inoltre, la georeferenziazione ha reso possibile la realizzazione dello strato informativo dei dissesti rilevati (figura III-14), utilizzato nella successiva fase di valutazione dei risultati ottenuti.

III-7.6. Il modello di Montgomery e Dietrich

Il modello utilizzato (Montgomery & Dietrich, 1994; Dietrich & Montgomery, 1998) accoppia un modello idrologico ed uno di stabilità dei pendii all'equilibrio limite. Le principali assunzioni alla base della formulazione sono:

- pendio infinito;
- piano di scivolamento e tavola d'acqua paralleli rispetto al versante;
- piano di scivolamento coincidente con il contatto tra colluvium e substrato;
- flusso stazionario sub-superficiale;
- assenza di drenaggio profondo e flusso nel substrato.

In particolare, quando l'altezza dello strato saturo, h , cresce (figura III-13), la tensione normale efficace sul piano di scivolamento diminuisce e, di conseguenza, diminuisce anche la resistenza al taglio disponibile.

Il rapporto h/z , (aliquota di colonna di terreno saturata) per una determinata altezza di pioggia, viene correlato (1):

- al fattore idrologico q/T che descrive la *magnitudo* della precipitazione, rappresentata da q , relativa alla capacità del sottosuolo di smaltire l'acqua verso valle (i.e. la trasmissività);
- al fattore topografico $a/(b \sin \theta)$, che rappresenta gli effetti essenziali della topografia sul deflusso delle acque meteoriche:

$$\frac{h}{z} = \frac{q}{T} \cdot \frac{a}{b \cdot \sin \theta} = W \quad (1)$$

I termini che compaiono nella (1) sono:

- z = spessore della coltre superficiale;
- q = pioggia netta infiltrata nel terreno;
- $T = K \cdot z \cdot \cos \theta$ = trasmissività idraulica saturata;
- K = conducibilità idraulica saturata;
- a = area di drenaggio;
- b = larghezza della sezione di deflusso;
- θ = inclinazione del versante.

Al fine di ottenere un'equazione che includa anche il modello di stabilità viene adottata la classica formulazione (Skempton & De Lory, 1957) che considera pendio infinito con filtrazione parallela al terreno, in unione al criterio di resistenza al taglio alla Mohr-Coulomb, espresso in termini di tensioni efficaci:

$$F = \frac{c' + (\gamma - W \cdot g_w) \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \phi'}{\gamma \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta} \quad (2)$$

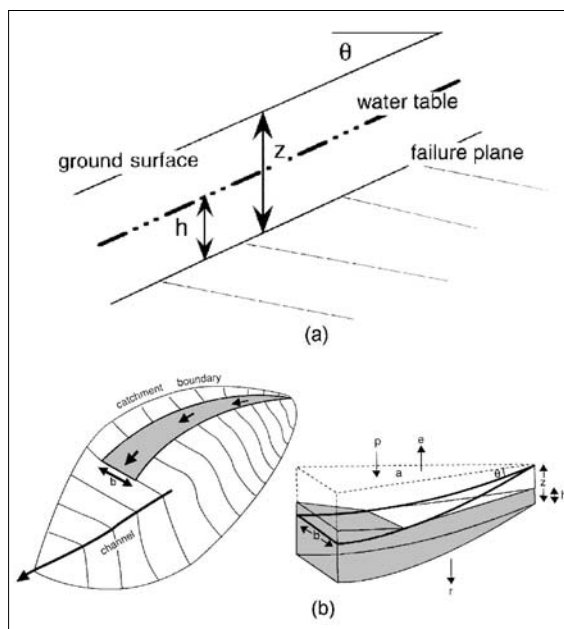
in cui: F è il fattore di sicurezza, c' la coesione, γ e γ_w rispettivamente il peso di volume del terreno

e dell'acqua, ϕ' l'angolo di resistenza al taglio.

I modelli idrologico (1) e di stabilità (2) possono essere combinati, in modo tale da esprimere per ogni cella la condizione di instabilità (3) in funzione dell'area di drenaggio riferita alla larghezza della sezione di deflusso:

$$\frac{a}{b} \geq \left[\frac{c'}{\gamma_w \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \phi'} + \frac{\gamma}{\gamma_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi'} \right) \right] \cdot \frac{T}{q} \cdot \sin \theta \quad (3)$$

Figura III-13. Schema del modello meccanico-idrologico impiegato (Dietrich & Montgomery, 1998).
(a) Modello di stabilità del versante all'equilibrio limite: h e z sono gli spessori dello strato di terreno saturo e della massa potenzialmente instabile, rispettivamente.
(b) Vista piana e sezione del versante con riferimento al modello idrologico: a è l'area di drenaggio, b la larghezza di deflusso. La pioggia netta infiltrata, q , è uguale alla precipitazione, p , meno l'evapo-traspirazione, e , e il drenaggio profondo, r .



III-8. ANALISI E RISULTATI

L'obiettivo della formulazione originaria di Montgomery & Dietrich (1994) era la creazione di un semplice modello non probabilistico in grado di valutare l'influenza della morfologia sull'innescio delle frane superficiali. Per l'utilizzo pratico del modello, quindi, tutti i parametri erano considerati

costanti ed uniformi nell'intero dominio di studio.

In questo lavoro, invece, l'influenza del tipo e dell'uso del suolo sulla stabilità sono stati presi in considerazione e i valori assegnati ai parametri sono funzione di queste caratteristiche. Inoltre, rispetto alla formulazione originaria, il criterio di resistenza al taglio è espresso in termini di coesione ed angolo di resistenza al taglio.

III-8.1. Variabili topografiche ed idrologiche

Le variabili topografiche ed idrologiche sono state calcolate per mezzo del software GIS ArcView® (ESRI 1998). Un DTM (modello digitale del terreno) è stato generato a partire dai punti misurati e, quindi:

- immersione ed inclinazione del versante;
- direzioni di deflusso;
- aree di drenaggio;
- bacini idrografici

sono stati calcolati con riferimento ad una griglia di maglie quadrate con lato 20 m (totale 15.707 celle) e con lato 10 m (62.749 celle) ai cui centroidi sono stati riferiti tutti i valori.

III-8.2. Parametri fisico-meccanici

Le analisi di sensitività svolte preliminarmente hanno permesso di valutare il diverso peso di ciascuno dei parametri nella (3). In relazione a tali risultati, ad ogni unità ambientale sono stati assegnati valori dei parametri valutati in accordo con i seguenti criteri:

- spessore della coltre superficiale (z). Dal rilevamento dei dissesti e dall'indagine pedologica è stato valutato lo spessore dei materiali potenzialmente instabili;
- peso di volume del terreno saturo (γ): da letteratura (Kulhawy & Mayne, 1990; Carter & Bentley, 1991; Montgomery & Dietrich, 1994);
- coesione (c'): da prove di taglio diretto su provini ricostituiti ottenuti dalla frazione fine del materiale prelevato *in situ*. Inoltre, è stato valutato il contributo legato alla presenza della vegetazione secondo informazioni reperite in letteratura (Turner, 1996);
- angolo di resistenza al taglio (ϕ'): dai risultati di prove di taglio diretto su provini ricostituiti ottenuti dalla frazione fine del materiale prelevato *in situ*, integrati da informazioni reperite in lettera-

tura (Montgomery & Dietrich, 1994) e dalla classificazione granulometrica svolta sui campioni prelevati *in situ* (Kulhawy & Mayne, 1990; Carter & Bentley, 1991);

- conducibilità idraulica satura (K): dall'indagine pedologica (§ 7.2). I valori individuati sono in accordo con quelli relativi alle medesime classi granulometriche riportati in letteratura (Kulhawy & Mayne, 1990; Carter & Bentley, 1991).

Al fine di valutare la capacità del modello di prevedere l'innescio di frane superficiali, sono stati considerati tre livelli di dettaglio nella valutazione dei parametri, sintetizzati in Tabella III-2.

Il set I rappresenta l'applicazione del modello così come proposto da Montgomery & Dietrich (1994): per ciascun parametro è stato considerato il valore medio distribuito in maniera omogenea sull'intero dominio.

Nel set II si considera una variabilità di z e K in accordo ai dati forniti dalle indagini precedentemente descritte; tutti i parametri sono comunque costanti all'interno delle unità elementari di riferimento.

Il set III è in pratica un'estensione della situazione precedente, in cui è stato stimato il contributo meccanico alla stabilità dei pendii offerto dalla presenza dei diversi tipi di vegetazione. L'incremento di coesione introdotto è stato valutato in funzione della densità e dell'approfondimento degli apparati radicali in accordo alla Carta di Uso del Suolo riportata in figura III-8.

Set	c' [kPa]	z [m]	γ [kN/m ³]	ϕ' [°]	K [m/s]
I	5	1	22	38	$1.97 \cdot 10^{-4}$
II	5	$0.25 \div 1.06$	22	38	$5.50 \cdot 10^{-6} \div 3.90 \cdot 10^{-4}$
III	$5 \div 20$	$0.25 \div 1.06$	22	38	$5.50 \cdot 10^{-6} \div 3.90 \cdot 10^{-4}$

Tabella III-2. Set di parametri utilizzati nelle analisi. c' è la coesione, z lo spessore della coltre detritica superficiale, γ il peso di volume del terreno saturo, ϕ' l'angolo di resistenza al taglio, K la conducibilità idraulica satura

III-8.3. Descrizione delle analisi

Il primo passo dell'analisi è la valutazione delle capacità di previsione del modello. A tal fine è stato considerato l'evento alluvionale che ha colpito il bacino del Melezzo nel 1978: le frane superficiali verificatesi sono state individuate (tramite foto-interpretazione e rilevamento di terreno), e rappre-

sentate in uno strato informativo che costituisce la “realtà” di riferimento (figura III-14).

Analogamente, lo strato informativo “previsione” per ciascuna analisi è la sintesi del risultato che per ogni singola cella è costituito da una situazione prevista di stabilità o di instabilità, che si può rappresentare mediante carta semaforica (figura III-15). Tutte le zone di affioramento roccioso o di denudamento (il suolo non è più oggettivamente riconoscibile) sono state escluse preliminarmente dall’area di indagine, venendo meno le condizioni per il verificarsi delle instabilità oggetto del presente studio (assenza di coltre superficiale).

Il confronto tra “realtà” e “previsione” (svolto in ambiente GIS mediante un’operazione di *overlay* topologico, in cui vengono considerate le mutue relazioni spaziali di appartenenza ed intersezione tra gli elementi) è uno dei passi fondamentali del lavoro svolto.

Sono stati considerati tre differenti livelli di pioggia netta infiltrata q (150, 200, 250 mm/24h) compatibili con l’evento meteorologico del 1978.

Figura III-14. Carta dei dissesti osservati

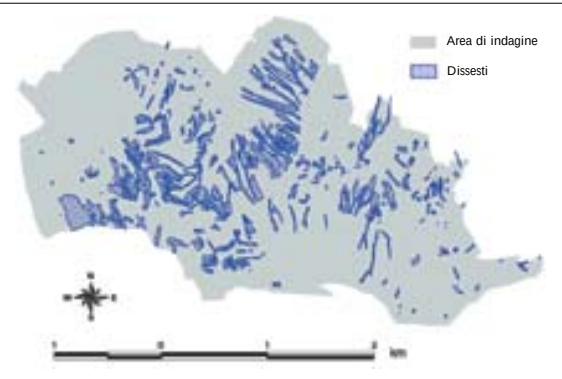
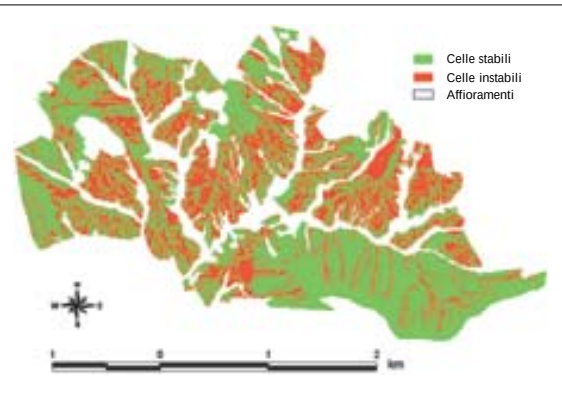


Figura III-15. Carta delle instabilità previste (Set. III, $q=200$ mm/24h, DTM 10 m)



La valutazione dell’aliquota effettivamente infiltrata, partendo dall’altezza di pioggia caduta al suolo misurata, interpolata (figura III-5) o stimata, è una fase molto delicata. Infatti il valore di q è influenzato da numerosi fattori quali intensità e durata della pioggia, tipo, utilizzo e umidità iniziale del suolo, vegetazione, ecc. Come valore di primo tentativo, in attesa di migliorare i criteri che portino a tale valutazione, è stato posto q pari al 75÷80% della precipitazione al suolo considerando i tipi di uso del suolo presenti nell’area indagata (Moisello 1985). In base a tali considerazioni, $q = 200$ mm/24h è il valore maggiormente rappresentativo, a cui nel seguito si farà riferimento.

Naturalmente è necessario un criterio che consenta una valutazione quantitativa della previsione. A tal fine è stata introdotta la “percentuale di successo” Δ , definita come rapporto tra il numero di celle correttamente previste dal modello e il numero totale di celle presenti nel dominio. Il criterio adottato è particolarmente severo poiché alla definizione del “successo” concorrono solo le celle per cui si ha una effettiva coincidenza spaziale tra osservazione e previsione.

Set	instabili		stabili		totale	
	n° corrette	Δ [%]	n° corrette	Δ [%]	n° corrette	Δ [%]
I	2204	59	5421	45	7625	49
II	2885	78	4683	39	7568	48
III	2467	66	6892	58	9359	60

Tabella III-3. Valutazione della previsione fornita dal modello per $q = 200$ mm/24h, tramite confronto con i dissesti osservati in 3721 celle; DTM 20 m.

Set	instabili		stabili		totale	
	n° corrette	Δ [%]	n° corrette	Δ [%]	n° corrette	Δ [%]
I	4818	45	30.986	59	35.804	57
II	7249	68	25.456	49	32.705	52
III	5781	54	34.579	66	40.360	64

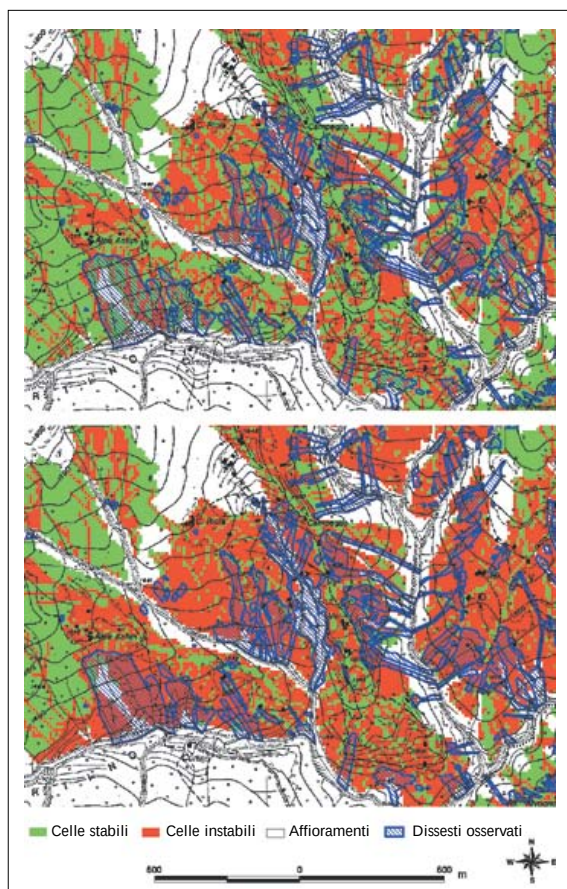
Tabella III-4. Valutazione della previsione fornita dal modello per $q = 200$ mm/24h, tramite confronto con i dissesti osservati in 10.645 celle; DTM 10 m.

In Tabella III-3 e in Tabella III-4 è riportato (per DTM a maglia 20 m e 10 m rispettivamente) il

numero di celle correttamente previste ed il corrispondente valore di Δ , relativamente a celle instabili, stabili e all'intera area oggetto di studio. Sono sintetizzati i risultati delle analisi svolte considerando i tre diversi set di parametri in corrispondenza di $q = 200 \text{ mm}/24\text{h}$. Dal momento che la qualità complessiva della previsione è espressa dal valore Δ totale, risulta immediato che i maggiori sforzi richiesti da una più accurata definizione dei parametri di ingresso (set III) sono giustificati alla luce dei risultati ottenuti, specialmente in considerazione:

- del fatto che il successo non è sensibilmente sbilanciato verso le celle stabili o instabili;
- del risultato molto promettente ottenuto per le zone a vegetazione boschiva (i.e. regioni a NO e SE in figura III-15) in cui i dissesti osservati sono estremamente rari e localizzati in corrispondenza delle incisioni dovute al ruscellamento superficiale, peraltro correttamente individuate del modello.

Figura III-16. Influenza del fattore di sicurezza (particolare 1), set III, $q = 200\text{mm}/24\text{h}$, DTM 10 m. $F = 1$ (in alto); $F = 3$ (in basso)



III-8.4. Applicazione di un fattore di sicurezza

Il fattore di sicurezza rappresentato dall'equazione (2) è stato finora considerato pari all'unità. Si ritiene invece che le imprecisioni legate al calcolo delle variabili e soprattutto alla valutazione dei parametri fisico-meccanici introdotti potrebbero essere controbilanciate da un valore $F > 1$, secondo la prassi tipica della pratica ingegneristica.

L'analisi per il set III, con $q = 200\text{mm}/24\text{h}$, è stata ripetuta ponendo $F = 3$. I risultati ottenuti (Tabella III-5 e Tabella III-6) appaiono estremamente interessanti pensando ad un'eventuale applicazione estesa del metodo, che ovviamente ipotizza un'elevata affidabilità nell'individuazione delle celle instabili. La percentuale di successo Δ relativa alle celle instabili cresce significativamente, mentre la qualità complessiva della previsione non viene alterata in maniera sostanziale. In aggiunta a ciò, i dettagli riportati in figura III-16 e in figura III-17 mostrano come il fattore di sicurezza agisca principalmente nelle zone critiche (quelle con elevata diffusione di dissesti osservati), mentre la previsione nelle aree pronosticate stabili (dove solo la rete di drenaggio superficiale viene individuata come instabile dal modello) non è interessata da variazioni di rilievo.

III-8.5. Osservazioni sui risultati ottenuti

Da un primo esame dei risultati ottenuti emergono le seguenti considerazioni:

1. la "percentuale di successo" Δ pari al 66% per le zone instabili e al 60% complessivo è assolutamente incoraggiante, trattandosi di un modello deterministico;
2. la previsione individua correttamente le zone con propensione al dissesto al di là dei valori Δ ;
3. con il miglior dettaglio disponibile nella fase di valutazione dei parametri (set III), si ottiene la previsione complessivamente migliore, buona sia per le zone instabili sia per quelle stabili;
4. l'utilizzo del fattore di sicurezza migliora la previsione dell'instabilità delle zone critiche senza penalizzare eccessivamente altre aree complessivamente stabili (Tabella III-5, Tabella III-6; figura III-16, figura III-17);
5. l'utilizzo di un DTM a maglia 10 m (derivato sempre dai livelli vettoriali delle curve di livello della C.T.R. 1:10.000) comporta:
 - un maggiore dettaglio nella derivazione delle variabili (immersione, inclinazione e aree di drenaggio);

- una maggiore precisione nella previsione spaziale;
- un modesto aumento della percentuale di successo e della sua qualità, a fronte di una gestione dei dati sensibilmente più impegnativa.

Figura III-17. Influenza del fattore di sicurezza (particolare 2), set III, $q = 200\text{mm}/24\text{h}$, DTM 10 m.
 $F = 1$ (in alto);
 $F = 3$ (sotto)

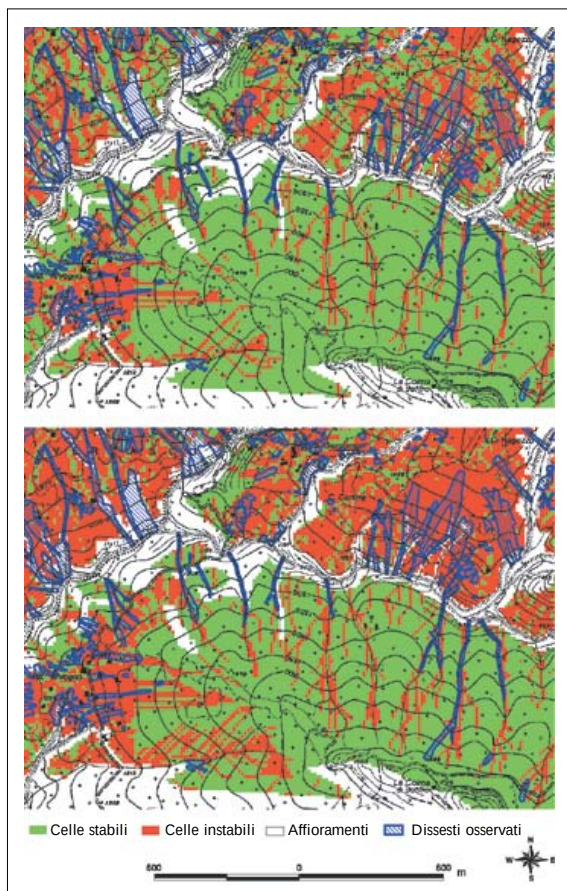


Tabella III-5. Valutazione della previsione fornita dal modello per diversi valori del fattore di sicurezza ($q = 200\text{mm}/24\text{h}$, set III), DTM 20 m.

F	instabili		stabili		totale	
	n° corrette	$\Delta[\%]$	n° corrette	$\Delta[\%]$	n° corrette	$\Delta[\%]$
1	2467	66	6892	58	9359	60
3	3015	81	5467	46	8482	54

F	instabili		stabili		totale	
	n° corrette	$\Delta[\%]$	n° corrette	$\Delta[\%]$	n° corrette	$\Delta[\%]$
1	5781	54	34.579	66	40.360	64
3	8399	79	26.511	51	34.910	56

Tabella III-6. Valutazione della previsione fornita dal modello per diversi valori del fattore di sicurezza ($q = 200\text{mm}/24\text{h}$, set III), DTM 10 m.

III-8.6. Prime ipotesi di applicazioni pratiche

L'applicazione più immediata del modello e della metodologia utilizzati è l'individuazione degli scenari di innesco sulla base di previsioni meteorologiche quali quelle fornite dai bollettini ufficiali (*i.e.* Settore Meteo-Idrografico della Regione Piemonte). Data un'area di indagine, la procedura che si prospetta può essere sintetizzata nei seguenti punti:

1. predisposizione di tutti gli strati informativi necessari (*i.e.* DTM, variabili, parametri);
2. valutazione della pioggia netta infiltrata q sulla base della previsione meteorologica;
3. applicazione del modello per ogni cella e definizione dello scenario d'innesco corrispondente (componente spaziale della pericolosità) in tempi estremamente rapidi, benché dipendenti dall'estensione del dominio di indagine;
4. utilizzo del suddetto scenario, unitamente agli altri strumenti disponibili, per eventuali azioni di protezione civile pre-evento.

Tale applicazione, che richiede modesti affinamenti del metodo, è già di per sé motivo di interesse. Ma i valori riportati in Tabella III-3, sebbene incoraggianti, possono essere affinati. In particolare, il solo confronto cella per cella non permette di cogliere la capacità del modello di individuare correttamente i settori di versante aventi una maggiore propensione all'instabilità.

Oltre a ciò, è chiaro che uno dei risultati attesi dall'utilizzo dell'approccio presentato è costituito dalla zonazione della pericolosità. Proprio in questa ottica gli strati informativi dei dissesti osservati e dei risultati ottenuti sono stati rielaborati calcolando la "densità relativa di celle instabili" Γ definita, per ciascuna unità territoriale di riferimento, come rapporto tra il numero di celle instabili e il numero complessivo di celle. L'intervallo di variazione $0 \leq \Gamma \leq 1$ è stato suddiviso in quattro intervalli di uguale ampiezza e le unità territoriali sono state classificate secondo questo schema. Questa prima macro-zonazione può portare ad una mappa della

componente spaziale della pericolosità come quelle riportate in figura III-18, in cui ad ogni unità elementare è associato per i dissesti previsti (set III, $q=200$ mm/24h, $F=1$ ed $F=3$) e osservati (al fine di valutare il procedimento) l'intervallo di Γ corrispondente.

Si possono definire "a favore di sicurezza" tutte quelle situazioni in cui $\Gamma_{\text{previsione}} \geq \Gamma_{\text{osservazione}}$. Ciò si è verificato rispettivamente nel:

- 75% delle unità per $F=1$
- 95% delle unità per $F=3$

indipendentemente dal DTM utilizzato. Tali risultati testimoniano il buon grado di affidabilità della previsione (si ricorda che il set III garantiva la migliore qualità complessiva di previsione) e la particolare adeguatezza verso una zonazione della propensione all'instabilità.

In questa logica, la migliore applicazione della metodologia seguita e degli strumenti utilizzati è quella di un supporto alla pianificazione che

potrebbe consistere in una carta in cui è rappresentata la componente spaziale della pericolosità.

Per un'appropriata valutazione della pericolosità, è necessario definire, accanto a quella spaziale, anche la componente temporale e quella probabilistica. Una possibile procedura per raggiungere tale obiettivo è costituita dai seguenti passi:

1. predisposizione di tutti gli strati informativi necessari (*i.e.* DTM, variabili, parametri);
2. sulla base dei dati idrologici disponibili, valutazione di eventi meteorologici p_r e dei relativi tempi di ritorno T_r ;
3. valutazione dell'aliquota q_r correlata;
4. applicazione del modello per ogni cella e definizione dello scenario d'innescio corrispondente a T_r ;
5. il ricorso al tempo di ritorno T_r permette di introdurre le due componenti (tempo e probabilità) necessarie alla valutazione della pericolosità.

III-9. METODOLOGIA PER L'ANALISI DI SITUAZIONI LOCALI: APPROCCIO SVIZZERO

L'approccio scelto per la soluzione del problema è stato:

- A. caratterizzazione geologico-geotecnica ed idrogeologica dei pendii soggetti a scivolamenti superficiali (Buletti, 1999; Sincich, 1999a);
- B. messa a punto di un modello matematico deterministico in grado di descrivere il sistema reale sia dal punto di vista idrologico sia da quello della stabilità (Sincich, 1999b);
- C. realizzazione di un campo sperimentale volto alla determinazione della quantità di pioggia effettivamente infiltrata nel terreno rispetto a quella piovuta (Buletti & Sincich, 1999);
- D. messa a punto di un modello matematico che descrive il sistema reale considerando i parametri idrologici e geologici da un punto di vista probabilistico (Sincich, 2000a);
- E. valutazione della dinamica del moto dello

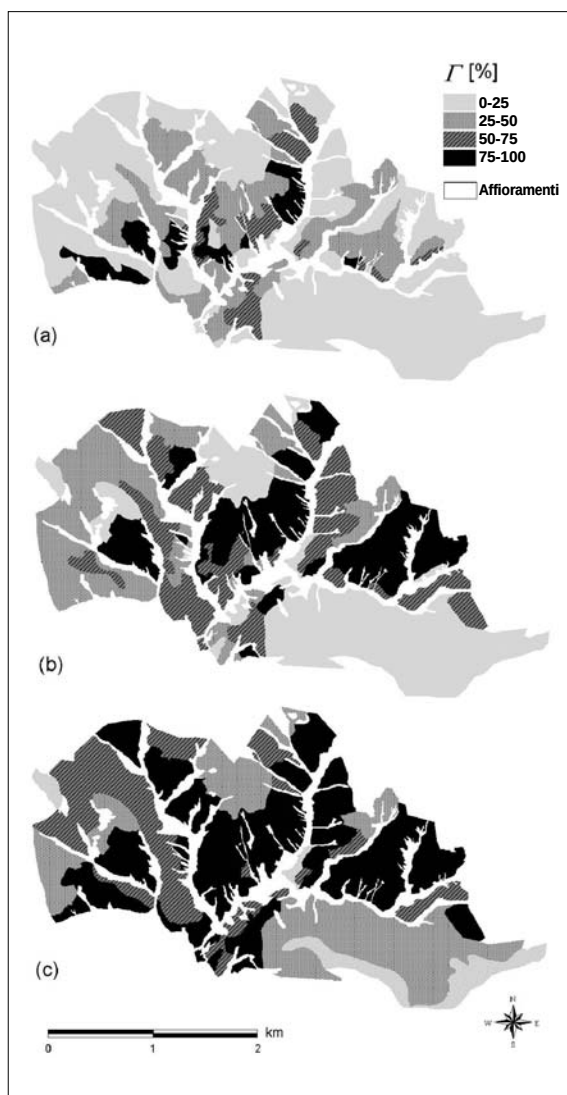


Figura III-18. Macro-zonazione della pericolosità (componente spaziale).
(a) Dissesti osservati (rilievo e fotointerpretazione);
(b) Previsione: DTM 20 m, set III per $q = 200$ mm/24h e $F = 1$;
(c) Previsione: DTM 10 m, set III per $q = 200$ mm/24h e $F = 3$

scivolamento per poterne stabilire l'energia trasmessa e il conseguente pericolo apportato (Sincich, 2000b).

III-9.1. Caratterizzazione geologico - geotecnica

Per confrontare i risultati dello studio con un evento realmente accaduto, si è analizzata l'alluvione che nell'agosto del 1978 ha colpito parte della Svizzera italiana causando ingenti danni.

In tale occasione sulle valli di Campo, Centovalli e Onsernone, cadde un quantitativo di acqua superiore al 100% della somma mensile media pluriennale di tutto il mese di agosto e si innescarono diversi *soil slip* che causarono, oltre alla distruzione di diverse abitazioni, anche delle vittime.

Partendo dalla cartografia antecedente l'alluvione e utilizzando le foto aeree a disposizione si sono potuti ricostruire i danni provocati da tale alluvione.

L'analisi si è concentrata sulla Valle di Vergeletto (Buletti, 1999) nella quale sono state svolte le seguenti indagini geotecniche:

- prove penetrometriche dinamiche per stabilire lo spessore della coltre di copertura interessata dallo scivolamento;
- prove di infiltrazione per poter conoscere il valore della conducibilità idraulica;
- determinazione del peso specifico apparente;
- analisi granulometrica completa.

I risultati delle prove penetrometriche ed il confronto degli stessi con una serie di rilievi eseguiti in altre zone hanno permesso di constatare come in tutto il Cantone lo strato superficiale del terreno, quello compreso tra 0 e $0.40 \div 0.80$ m, presenti delle caratteristiche meccaniche simili e in particolare una densità relativa molto ridotta. La causa di questo può essere cercata o nella giovane età dei depositi o, più probabilmente, nell'azione di gelo e disgelo oltre che nelle variazioni termiche giornaliere e stagionali. Questa situazione, che sembra valere per i terreni non coesivi predominanti lungo le alpi ticinesi, comporta una relativa omogeneità di tutti i depositi superficiali. L'omogeneità della densità relativa ed i meccanismi che l'hanno prodotta implicano: un comportamento omogeneo anche per quanto riguarda la risposta di questi depositi all'infiltrazione dell'acqua, una isotropia della porosità per cui non ci si debbono attendere grandi differenze tra permeabilità orizzontale e verticale, come invece si constata nei depositi alluvionali. Una serie di prove di infiltrazione eseguite sia in montagna che in pianura hanno infatti permesso di fissare dei valori di permeabilità satura attorno a $2 \cdot 10^{-5}$ m/s.

III-9.2. Modello deterministico della stabilità con integrazione dell'idrologia

Una volta avvenuta la caratterizzazione dei pendii soggetti a scivolamenti superficiali, si è passati ad una trattazione teorico-matematica del processo.

Dal momento che l'aumento del contenuto di umidità del terreno dovuto ad una precipitazione fa diminuire la tensione capillare, appesantisce il terreno e di conseguenza fa diminuire il fattore di sicurezza, per poter identificare quali siano i valori di soglia delle precipitazioni oltre ai quali si ha pericolo, è necessario studiare come avvenga il processo idrologico connesso all'infiltrazione della pioggia.

Per far questo si è costruito un modello matematico di infiltrazione (Sincich, 1999a) che calcola la distribuzione di umidità in un terreno in funzione del tempo, nota la quantità di pioggia caduta ed alcuni parametri geotecnici quali la conducibilità e la porosità del materiale in esame.

Il modello monodimensionale realizzato descrive l'infiltrazione della pioggia nei terreni non saturi, l'avanzamento del profilo di umidificazione e l'eventuale formazione di un fronte saturo. Per far questo è stato implementato un codice di calcolo che risolve numericamente l'equazione di Fokker-Plank attraverso un procedimento di tipo iterativo.

Visto che il modello monodimensionale realizzato non è in grado di descrivere le situazioni in cui l'acqua infiltrata, una volta raggiunta la base della copertura, comincia a risalire oppure scorre lungo la copertura stessa, si è elaborato un ulteriore modello monodimensionale che studia il deflusso dell'acqua e l'eventuale formazione di uno strato saturo dovuto al suo accumulo (Sincich, 1999b).

I due modelli vengono applicati "a cascata" l'uno dopo l'altro: in questo modo il movimento dell'acqua all'interno del terreno è come se venisse descritto da un modello bidimensionale.

Come mostrato in figura III-19, prima si considera l'infiltrazione della pioggia lungo l'asse z in una colonnina generica posta lungo il pendio e poi una volta che questa ha raggiunto la base della copertura si studia lo scorrimento e l'accumulo lungo l'asse x ⁽¹⁾.

(1) L'applicazione di un modello tridimensionale che consideri anche il movimento nella direzione y non è stato considerato dal momento che i terreni che vengono utilizzati per studiare l'innescio di frane superficiali hanno sempre pendenze abbastanza elevate. Infatti un terreno con pendenze inferiori ai 15 gradi è considerato essere sempre stabile. Per questo motivo il flusso è stato supposto nullo nella direzione y , vengono quindi trascurati gli scambi idraulici laterali, e la fascia di pendio studiata ha larghezza unitaria in tale direzione.

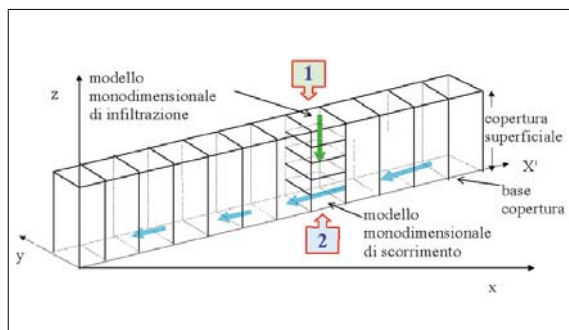


Figura III-19. Come intervengono i due modelli monodimensionali

Questo secondo codice di calcolo risolve l'equazione di Dupuit-Forcheimer opportunamente modificata per tenere conto della presenza di elevate pendenze del substrato; attraverso il suo utilizzo è possibile calcolare l'altezza del livello di falda che si viene a formare una volta che siano stati stabiliti i parametri geologici-idraulici del pendio e siano stati assegnati i dati relativi alle precipitazioni.

Con la modifica effettuata i due modelli numerici monodimensionali descrivono in modo abbastanza completo il fenomeno dell'infiltrazione, dell'accumulo e del deflusso dell'acqua in un substrato inclinato di pendenza variabile.

Una volta analizzata e modellata quella che è la parte idraulica del processo, si è passati allo studio della stabilità per valutare la possibilità o meno di innesco della frana.

Il modello che si è utilizzato è quello del pendio infinito e dell'equilibrio limite per cui il fattore di sicurezza è dato dal rapporto tra le forze stabilizzanti (coesione dovuta agli attriti interni e alla suzione) e quelle destabilizzanti (pendenza del pendio, peso del terreno in condizioni normali e di saturazione).

L'applicazione dei tre modelli appena descritti permette di stabilire il possibile innesco di una frana in funzione del valore delle seguenti variabili:

- parametri geotecnici (coesione, angolo di attrito interno, peso del terreno, porosità)
- parametri idrologici (conducibilità idraulica, umidità iniziale)
- morfologia del pendio (inclinazione del substrato, eventuale presenza di cambiamenti di pendenza, spessore della copertura, presenza di vegetazione)
- valori di precipitazioni.

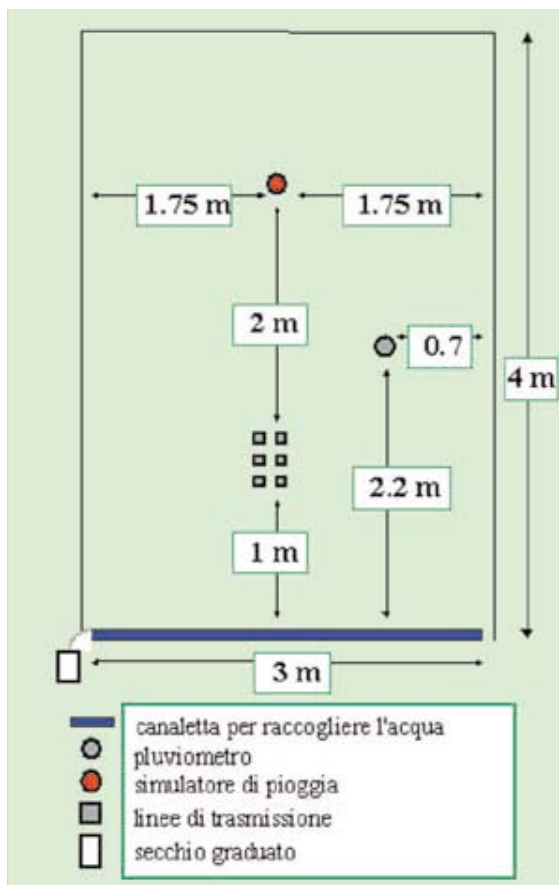
Figura III-20. Apparato sperimentale

III-9.3. Misura dei rapporti tra quantità di pioggia ed acqua infiltrata

Spesso la determinazione dei parametri indicati nel paragrafo precedente non è facile e questo avviene in particolare per i valori da attribuire alle precipitazioni ed all'acqua infiltrata. Attraverso l'utilizzo di pluviometri è possibile eliminare il primo dubbio, mentre resta sconosciuta la percentuale di acqua che si infiltra lungo un versante.

Per risolvere questo problema si è realizzato un apposito campo sperimentale (Bulletti & Sincich, 1999) volto a misurare la quantità di acqua che ruscella lungo un pendio in rapporto all'acqua totale che cade sullo stesso (figura III-20).

Per effettuare questo esperimento si è utilizzato un simulatore di pioggia artificiale che eroga una quantità nota di acqua. Tale simulatore è stato collegato ad un misuratore di flusso che fornisce la quantità di acqua (circa 55 mm/h) buttata su di una superficie pari a 12 m². Per poter eseguire un'ulteriore misura è stato anche posizionato un pluviometro ad una distanza media dal raggio di influenza del simulatore. A valle del pendio è stata posta una canaletta per raccogliere l'eventuale acqua ruscellata. Tale canaletta è posizionata in modo tale che l'acqua possa scorrere e venire raccolta in un opportuno secchio graduato.



Dal momento che l'acqua che non ruscella superficialmente si infiltra nel terreno, sono state poste tre coppie di linee di trasmissione di diversa lunghezza per poter misurare attraverso il TDR (Time Domain Reflectometry) le variazioni dell'umidità relativa del terreno. L'esperimento durato 3 giorni ha fornito un'idea del rapporto esistente fra la quantità di acqua piovuta sul pendio e quella infiltrata, permettendo di accertare che praticamente tutta l'acqua piovuta, circa 55 mm/h, era infiltrata.

III-9.4. Modello probabilistico della stabilità

Un limite del modello deterministico presentato precedentemente è dato dal fatto che, a causa sia degli errori commessi durante le misure sperimentali sia dell'eterogeneità dei terreni, spesso non è possibile disporre degli esatti valori delle variabili che entrano in gioco. Per ovviare a questi inconvenienti si è modificato il codice di calcolo per valutare quale fosse il fattore di sicurezza ottenuto utilizzando dei dati di input probabilistici invece che deterministici (Sincich, 2000a).

Si è ottenuto questo assegnando ai diversi coefficienti una distribuzione di valori, utilizzata poi per calcolare

media e deviazione standard, le stesse hanno permesso di calcolare il fattore di sicurezza più probabile e la sua deviazione in funzione delle distribuzioni ottenute.

In questo modo per ogni gamma di valori assegnati ai coefficienti si ha un range entro al quale può variare il fattore di sicurezza permettendo di avere una visione più completa delle possibili risposte del terreno.

I parametri che si sono fatti variare sono:

- angolo di attrito;
- peso dell'unità di volume del terreno;
- spessore della copertura superficiale;
- inclinazione del pendio;
- rapporto tra la quantità di pioggia infiltrata e la conducibilità di saturazione (P/k).

Alcuni dei risultati ottenuti sono riportati in figura III-21 e in figura III-22 nelle quali è rappresentata la variazione del fattore di sicurezza in funzione della durata della pioggia e la sua deviazione standard. In particolare il grafico di figura III-21 si è ottenuto mantenendo costante l'inclinazione del substrato, mentre in quello di figura III-22 si è fatta variare la pendenza di 5° in un punto posto circa a metà del pendio.

In entrambe le figure si sono considerati quattro valori diversi del rapporto fra la pioggia infiltrata e la conducibilità di saturazione.

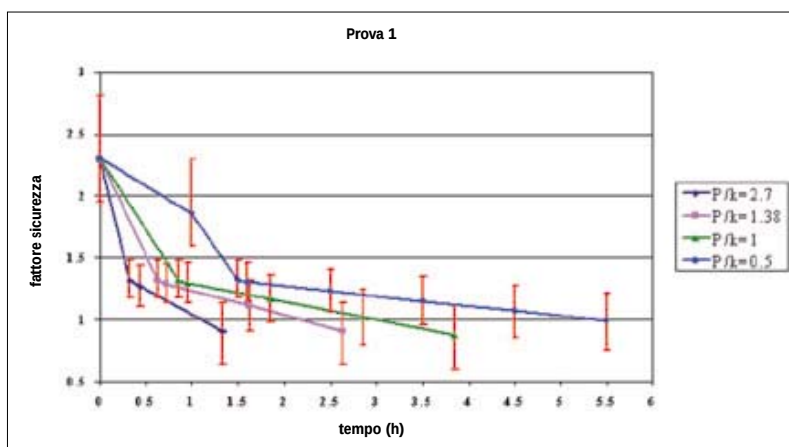


Figura III-21. Variazione del fattore di sicurezza in funzione del tempo per una pendenza costante del pendio pari a 32.5°

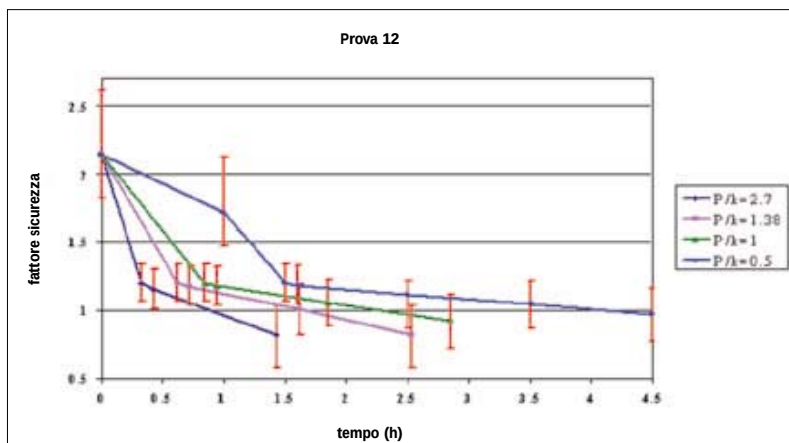


Figura III-22. Variazione del fattore di sicurezza in funzione del tempo per una pendenza variabile del pendio tra 30° e 35°

Come si evince dai grafici il cambiamento di pendenza costituisce un fattore di instabilità per il pendio a causa dell'accumulo di acqua che si può venire a creare.

III-9.5. Intensità del pericolo in funzione dell'energia trasmessa

Fino a questo punto del lavoro ci si è concentrati esclusivamente sulla definizione di stabilità di un versante attribuendogli un fattore di sicurezza che ci dà delle informazioni sul fatto che lo stesso possa mettersi o meno in movimento.

L'ultimo problema affrontato dal nostro lavoro è stato quello di studiare la dinamica del moto, la cui conoscenza è essenziale per stabilire in quale misura l'innescò del *soil slip* sia in grado di produrre danni (Sincich, 2000b).

A tale scopo si è cercato innanzitutto di chiarire come avvenga fisicamente il processo di distacco e di sviluppo dello scivolamento per poter scegliere delle equazioni matematiche adatte per tale descrizione.

Si è scelto di trattare la massa in movimento come rigida in moto traslazionale lungo il pendio, utilizzando un approccio di questo tipo il volume della frana rimane costante durante tutto il suo percorso. Facendo questa ipotesi è stato possibile utilizzare un codice di calcolo già presente in Istituto e scritto per risolvere il moto delle valanghe. Tale codice risolve numericamente le equazioni di Navier-Stokes ed è in grado di fornire per ogni cella in cui è stato suddiviso il pendio, l'altezza della massa e le componenti della velocità con la quale si muove.

Infine si è utilizzata una semplice espressione che fornisce la pressione massima esercitata su un ostacolo in funzione del peso specifico, dell'altezza, della velocità e dell'angolo di incidenza fra la direzione di propagazione del moto e l'ostacolo. In questo modo è possibile conoscere l'energia con la

quale la massa che frana impatta su un eventuale ostacolo che incontra sul suo percorso quale ad esempio una casa.

III-10. RISULTATI OTTENUTI: APPROCCIO SVIZZERO

Seguendo i punti secondo i quali è stato sviluppato il lavoro qui in Istituto, di seguito sono riportati i risultati ottenuti.

A. Dalle misure sperimentali svolte - con particolare riguardo in Valle di Vergeletto - si sono delineate le caratteristiche dei terreni coinvolti da scivolamenti superficiali in Ticino. Secondo la classificazione USCS risultano essere terreni di tipo GP-GM, SP-SM, SM-ML (ghiaie e sabbie mal assortite, ghiaie e sabbie con limo e sabbie limose), generalmente caratterizzati:

1. dalla presenza:
 - di uno strato superficiale di spessore compreso tra i 30 e i 40 cm con una densità relativa compresa tra il 15 e il 35% (depositi di versante);
 - di uno strato più compatto con densità relativa compresa tra 35 e 65% (*till* di alloggiamento);
 - di un substrato roccioso.
2. da una conducibilità idraulica verticale pari a $10^{-4} \div 10^{-5}$ m/s;

B. Dai risultati ottenuti dai due modelli numerici idraulici e da quello di stabilità si è ottenuto che:

1. i parametri che influenzano il fattore di sicurezza sono:
 - l'angolo di attrito interno;
 - l'umidità iniziale;
 - l'inclinazione del pendio;
 - la morfologia del pendio;
 - la quantità di pioggia infiltrata;
 - lo spessore della copertura;
2. la conoscenza dell'umidità iniziale del terreno costituisce un dato molto importante per la corretta simulazione dell'infiltrazione dell'acqua;
3. se la pioggia infiltrata è inferiore alla conducibilità orizzontale l'acqua non si accumula sulla base della coltre di copertura e si ha l'innescò della frana solo nel caso di pendenze molto elevate per cui il solo aumento dell'umidità del terreno dovuto all'infiltrazione crea instabilità (superiori ai 40°);
4. la presenza di variazioni di pendenza favorisce l'accumulo di acqua e il conseguente

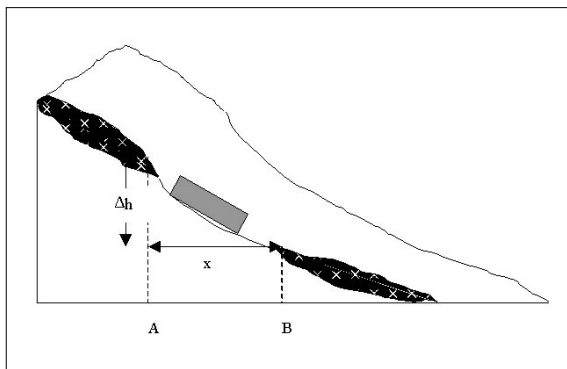


Figura III-23. Geometria di una frana superficiale

appesantimento del terreno, per cui l'innesco delle frane si ha di preferenza in prossimità di:

- concavità del terreno;
- passaggio da un pendio poco inclinato ad uno molto inclinato;
- passaggio da un pendio molto inclinato ad uno poco inclinato (scivolamento al piede);

4. le piogge brevi ed intense favoriscono l'innesco degli scivolamenti superficiali per la loro capacità di far aumentare in poco tempo l'umidità del terreno.

C. Dal campo sperimentale svolto per determinare il rapporto esistente tra la quantità di pioggia che cade e quella che scorre in superficie lungo il pendio si è trovato che la quasi totalità dell'acqua piovuta si infiltra nel terreno. Per questa ragione è ragionevole utilizzare come dato di input del modello per il valore di precipitazione, quello fornito dai pluviometri. Nel caso del nostro campo sperimentale, dai risultati delle misure effettuate con il TDR si vede che in un tempo abbastanza breve il terreno raggiunge la condizione di saturazione dopodiché l'acqua, raggiunta la base della coltre di copertura, comincia a scorrere orizzontalmente lungo di essa (anche in questo caso il valore della conducibilità orizzontale è maggiore della quantità di acqua infiltrata).

D. Attraverso l'utilizzo del modello probabilistico ci si è resi conto di come possa variare il fattore di sicurezza in funzione della combinazione dei valori dei parametri idrologici e geologici. Le differenze che si possono ottenere arrivano ad essere anche dell'ordine del 30% rispetto al valore medio del fattore di sicurezza ottenuto con l'utilizzo del modello deterministico. È importante quindi utilizzare un approccio di questo tipo per evitare di sottovalutare la possibilità di pericolo.

E. Infine, dal modello che studia l'evoluzione di un terreno soggetto a scivolamento superficiale, si è dedotta l'estrema pericolosità di tale fenomeno. Riportando l'esempio di una delle frane avvenuta in Valle Onsernone (figura III-24 e figura III-25) nell'agosto del 1978, il cui comportamento dinamico è stato simulato dal modello, si vede che a causa dell'elevata velocità raggiunta dalla massa in moto (anche 20 m/s), i *soil slip* trasportano un'enorme quantità di energia. In particolare la simulazione che si è svolta aveva come scopo quello di riprodurre l'abbattimento di una casa a causa della frana (figura III-26). Non essendo a conoscenza del valore esatto di tutti i parametri necessari per il funzionamento del modello, si sono eseguite diverse simulazioni in modo da

poter testare l'influenza della variazione dei coefficienti sui risultati finali. I parametri che si sono fatti variare sono:

- la viscosità cinematica;
- il coefficiente di attrito;
- il volume della massa che frana.

Quello che si è osservato è che nonostante il pendio considerato abbia un'inclinazione di circa 30° (non molto elevata), in tutte le prove effettuate la pressione di impatto della massa mobilitata contro l'edificio è sempre piuttosto alta (200-380 kPa). Utilizzando la suddivisione delle classi di intensità per le valanghe si può vedere che tali valori ricadono nell'intervallo di pericolo medio-alto delle classi di intensità (Tabella III-7).

F. Quanto descritto nei punti precedenti, oltre a confermare una maggior propensione allo scivolamento per i terreni più acclivi, ha permesso di dare una base fisica e idrologica al diagramma di Ceriani-Agostoni, costruito per il meridione delle Alpi (Piemonte, Ticino e Valtellina) su basi statistiche. Il modello numerico ha inoltre permesso di verificare la correlazione tra la piovosità e la probabilità di eventi dannosi, il confronto tra le stazioni di Camedo e Olivone, quelle che rappresentano gli estremi per il Ticino (2200 mm/anno Camedo e 1600 mm/anno Olivone) indica che vi è una probabilità di scivolamenti superficiali del 10% a Camedo contro una dell'1% a Olivone. Le probabilità riscontrate fanno rientrare gli scivolamenti superficiali tra i fenomeni con una frequenza media (tra 30 e 100 anni) nell'ambito della scala utilizzata in Svizzera.

G. La combinazione della frequenza con l'intensità, descritta al paragrafo E, porta a definire gli scivolamenti superficiali sui versanti come dei fenomeni ad alta pericolosità.

Figura III-24. Valle Onsernone, situazione antecedente all'alluvione del 7 agosto 1978





Figura III-25. Valle Onsernone, situazione successiva all'alluvione del 7 agosto 1978

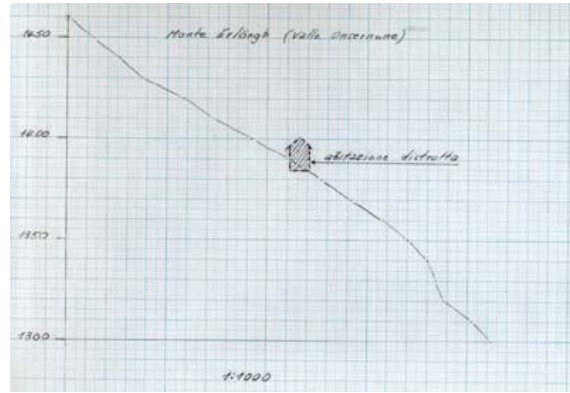


Figura III-26. Profilo del pendio in Valle Onsernone

Classi di intensità	Pressione sull'ostacolo
Alta	> 300 kPa
media	30-300 kPa
bassa	< 30 kPa

Tabella III-7. Classi di intensità in funzione della pressione esercitata sull'ostacolo

Bibliografia

- AA.VV., (1994), Carta Geomorfologica d'Italia 1.50.000 - Guida al rilevamento. *Quaderni SGN*, Serie III, 4.
- ANSELMO V., (1979), *L'alluvione del 7 Agosto 1978 in Val d'Ossola. Aspetti idrologici del nubifragio e considerazioni sui metodi di intervento*. Lions Club of Domodossola.
- BULETTI A., (1999), *Determinazione dei parametri geotecnica della copertura quaternaria presente nella Valle di Vergeletto*. Cadenazzo: IST luglio 1999.
- BULETTI A. & SINCICH B., (1999), *Determinazione della quantità di acqua che ruscella lungo un pendio e di quella che si infiltra*. Cadenazzo: IST.
- CARTER M. & BENTLEY S.P., (1991), *Correlations of soil properties*. London: Pentech Press Limited.
- DIETRICH W.E. & MONTGOMERY D.R., (1998), *SHALSTAB: A digital terrain model for mapping shallow landslide potential*. <http://list-socrates.berkeley.edu/~geomorph/shalstab/>.
- ESRI, (1998), *ArcView & Spatial Analyst*. Redlands CA.
- FUKUOKA M., YOSHIDA Y. & MASUDA T., (1977), *Residual strength and frictional resistance of sliding soil masses*. Journ. Fac. Eng. Univ. Tokio, 34 (1).
- KULHAWY F.H., MAYNE P.E., (1990), *Manual on estimating soil properties for foundations design*. EPRI, Palo Alto, CA.
- MOISELLO U., (1985), *Grandezze e fenomeni idrologici*. Pavia: La Goliadrica Pavese.
- MONTGOMERY D.R. & DIETRICH W.E., (1994), *A physically based model for the topographic control of shallow landsliding*. Water Resources Research 30: 1153-1171.
- NACSN - North American Commission on Stratigraphic Nomenclature., (1983) - *North American Stratigraphic Code*. Am. Ass. Petroleum Geologists Bull., 67 (), 841-875.
- OFFICE PUBLICATIONS OFFICIELLES COMMUNAUTÈS EUROPÉENNES (1994), *CORINE Land Cover, Guide Technique*. Bruxelles.
- SINCICH B., (1999a), *Simulazione mediante modello matematico - monodimensionale dell'infiltrazione dell'acqua nel terreno e applicazione nella valutazione della stabilità di un pendio con riferimento alla Val Vergeletto*. Cadenazzo: IST ottobre 1999.
- SINCICH B., (1999b), *Simulazione mediante modelli matematici-monodimensionali dell'infiltrazione e del deflusso dell'acqua in un substrato inclinato e applicazione nella valutazione della stabilità di un pendio*. Cadenazzo: IST ottobre 1999.
- SINCICH B., (2000a), *Variazione del fattore di sicurezza in funzione della pioggia infiltrata e della pendenza del pendio*. Cadenazzo: IST marzo 2000.
- SINCICH B., (2000b), *Evoluzione di un terreno soggetto a scivolamenti superficiali*. Cadenazzo: IST aprile 2000.
- SKEMPTON A.W., & DE LORY F.A., (1957), *Stability of natural slopes in London Clay*. In Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., 2, 378-381.
- TROPEANO D., GOVI M., MORTARA G., TURITTO O., SORZANA P., NEGRINI G. & ARATTANO M., (1999), *Eventi alluvionali e frane nell'Italia Settentrionale (Periodo 1975-1981)*. Torino: CNR-IRPI.
- TURNER A.K., (1996), *Colluvium and Talus*. In A.K. Turner & R.L. Schuster (eds.), *Landslides investigation and mitigation*: 525-554. Washington D.C.: Nat. Academy Press.

Ringraziamenti

È desiderio degli autori ringraziare gli Ingg. Luca Allavena e Maurizio Giraud per il prezioso contributo offerto.

AZIONE 4

Condivisione di metodi e conoscenze sui processi di lave torrentizie per la difesa dei centri abitati

Contributo dei partner italiani:

Giovanni RUBERTO
Regione Piemonte
Direzione Servizi Tecnici di Prevenzione
Settore Progettazione interventi geologico-tecnici e
sismico

Paolo TONANZI con la collaborazione di Riccardo Carlo
CONTE, Luigi Andrea BEDONI, Paola MAGOSSO
Regione Piemonte
Direzione Servizi Tecnici di Prevenzione
Settore Prevenzione territoriale del rischio geologico
(Area TO, NO, VB). Indagini geotecniche ed idrogeologiche

Gennaro BIANCO, Luca FRANZI
Politecnico di Torino - Dipartimento di Idraulica Trasporti
e Infrastrutture Civili

Massimo ARATTANO, Alessandro MARCHI
C.N.R. - Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologi-
ca del Bacino Padano di Torino

Contributo dei partner svizzeri:

Giorgio BEATRIZOTTI, Andrea SALVETTI, Renata MÜLLER
Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana
- Istituto Scienze della Terra

IV-1. PREMESSA

Considerato che gran parte dei centri abitati in ambiente alpino, sia nazionale che internazionale, si sviluppa su conoidi potenzialmente riattivabili, risulta importante la definizione di una metodologia di lavoro che permetta di valutare il grado di pericolosità di tali ambiti, al fine di fornire utili elementi a livello di pianificazione territoriale. Gli ingenti interessi socio-economici che gravitano in queste zone richiedono una puntuale definizione dei parametri (geologici, idraulici, geomorfologici, ecc.) che permettono di valutare la pericolosità dei siti interessati dagli interventi di urbanizzazione.

Poiché le problematiche delle colate di detrito riguardano gli ambiti territoriali italiani e svizzeri, gli organismi coinvolti nel programma si sono proposti di condividere le proprie conoscenze ed accrescere l'insieme delle osservazioni di campo, sviluppando in particolare i seguenti punti:

- tipologie di *debris-flow*;
- relazioni tra trasporto solido di fondo e *debris-flow*;
- caratteristiche dinamiche dei *debris-flow*;
- analisi delle tipologie di opere necessarie al contenimento, all'arresto e/o alla prevenzione dei potenziali *debris-flow*;
- indicazioni per una gestione ottimale e la manutenzione delle opere di difesa;
- definizione di criteri per la stima dei livelli di pericolo e di conseguenza dei livelli di rischio;
- indicazioni per un'adeguata pianificazione territoriale dei territori soggetti a *debris-flow*.

L'analisi dei dati relativi ad alcuni bacini italiani e svizzeri ha consentito di verificare l'influenza dei fattori che determinano la formazione delle colate, il loro peso relativo (pluviometria e clima precedenti l'evento, morfologia, litologia, sedimentologia, ecc.) ed i parametri geometrici dell'impluvio in cui può avvenire la propagazione.

Il risultato di fondamentale importanza a livello di pianificazione territoriale è la definizione di una metodologia di studio per la valutazione dei diversi gradi di pericolosità a cui sono sottoposte le aree di conoide, urbanizzate e non, che costituisce la base per una corretta azione di pianificazione e prevenzione territoriale.

IV-2. INTRODUZIONE

L'attività del gruppo di lavoro ha trovato applicazione pratica nel bacino del Rio Inferno a Omegna (VB), pesantemente colpito dagli eventi alluvionali del luglio 1996, e si è sviluppata attraverso le fasi di seguito elencate:

- Acquisizione di dati storici su fenomeni di colate (volumi, data e ora dell'evento), fenomeni di trasporto solido e fenomeni di dissesto su versanti.
- Esame delle fotografie aeree, delle cartografie a varia scala, delle documentazioni fotografiche, dei rilievi e dei progetti di sistemazione.
- Esame della pluviometria registrata in stazioni il più possibile vicino al sito di interesse.
- Acquisizione della documentazione e della cartografia geologica.
- Esame della documentazione acquisita e studio retrospettivo.
- Rilievi di dettaglio, *in situ*, di tipo topografico (pendenze e sezioni), granulometrico, geologico e geomorfologico.
- Elaborazione ed esame qualitativo dei dati di pioggia per la determinazione del peso pluviometrico degli eventi associati ai fenomeni gravitativi.
- Riconoscimento delle zone di possibile innesco delle colate con i criteri attualmente disponibili.
- Determinazione dell'ordine di grandezza dei volumi di materiale solido movimentabili lungo i versanti e lungo il reticolo idrografico, fino alle zone di innesco delle colate.
- Studio della movimentazione (modellizzazione numerica in varie condizioni) delle colate, dalle zone di innesco fino all'apice del conoide.
- Analisi dei risultati ottenuti.
- Scelta dei parametri di ingresso per la modellizzazione numerica delle colate in zona di conoide (con vari scenari relativi alla direzione del flusso e volumi di colata uscenti dall'asta torrentizia).
- Analisi dell'estensione delle zone di espansione e deposito del materiale, delle velocità e degli spessori del materiale depositato.
- Studio delle interferenze con opere e/o insediamenti esistenti.
- Studio dei gradi di suscettibilità al danno.
- Studio dei possibili interventi passivi e/o attivi e dei sistemi di allertamento e controllo del fenomeno.
- Studio delle possibili linee programmatiche per la difesa e l'uso della zona di conoide.

IV-3. ATTIVITÀ DELLA DIREZIONE REGIONALE SERVIZI TECNICI DI PREVENZIONE

L'attività della Direzione Servizi Tecnici di Prevenzione nell'ambito del programma INTERREG II è consistita, oltre al coordinamento degli organismi coinvolti nel programma, nell'effettuazione di rilievi di dettaglio in sito con lo scopo di definire le caratteristiche geologiche e geomorfologiche del bacino del Rio Inferno ad Omegna (VB), attraverso i rilievi effettuati nella parte medio-alta del bacino, che si sviluppa sulle pendici del M. Mottarone (1491 m s.l.m.), e lungo l'asta torrentizia principale, dall'apice del conoide (circa 350 m s.l.m.) fino alla cava dismessa presente ad una quota di circa 900 m s.l.m..

Il rilevamento si è sviluppato attraverso un'analisi speditiva delle litologie affioranti nell'area ed una più accurata analisi geomorfologica del bacino, dell'asta torrentizia e del conoide. Durante i sopralluoghi sono stati prelevati, nelle zone di testata del bacino in corrispondenza delle nicchie dei *soil slip*, alcuni campioni disturbati del terreno di copertura, sui quali sono state eseguite prove di laboratorio per la caratterizzazione geotecnica.

Durante l'analisi dell'asta torrentizia è stata posta particolare attenzione all'individuazione ed alla misurazione di alcune sezioni d'alveo.

A seguito del rilevamento geologico-geomorfologico di terreno e degli approfondimenti tecnici successivi, è stata redatta una cartografia rappresentativa delle condizioni geologiche e geomorfologiche del bacino del Rio Inferno.

IV-4. CONSIDERAZIONI GENERALI

Il presente contributo riassume sinteticamente le attività svolte dagli organismi coinvolti nel programma di ricerca. I risultati completi delle attività sono illustrati nei rapporti finali ai quali si rimanda per ogni eventuale approfondimento.

Dall'analisi dell'attività svolta, emerge che la definizione dei livelli di pericolosità presenti in conoide non può prescindere da un esame complessivo di tutte le variabili (morfologiche, geologiche, geomorfologiche, idrauliche, idrologiche, topografiche, ecc.) che concorrono a definire le caratteristiche dei bacini oggetto di studio, integrate, ove necessario e/o possibile, dall'applicazione di modelli matematici.

L'applicazione al caso in esame (Bacino del Rio Inferno a Omegna) di alcuni modelli matematici ha dimostrato l'utilità degli stessi, come strumento di supporto necessario alla definizione complessiva delle problematiche legate alle colate di detrito.

Gli studi effettuati evidenziano, inoltre, che l'utilizzo esclusivo della modellizzazione matematica non consente di fornire adeguate previsioni in merito all'idoneità geologica per l'utilizzazione urbanistica del territorio.

La pianificazione territoriale degli ambiti di conoide necessita, pertanto, di un approccio multidisciplinare in grado di garantire un'analisi completa dei processi e dei conseguenti effetti delle colate di detrito.

**CONTRIBUTO DEL DIPARTIMENTO
DI IDRAULICA TRASPORTI E INFRASTRUTTURE
CIVILI DEL POLITECNICO DI TORINO**

IV-5. PREMESSA

L'attività di ricerca svolta è stata finalizzata alla definizione di una metodologia di studio a livello di singolo bacino per la valutazione del grado di pericolosità da colate detritiche. Tale conoscenza è determinante per la successiva valutazione del rischio da colata e per l'individuazione delle misure e interventi necessari per la sua mitigazione, tra cui la limitazione alle attività di trasformazione e uso del suolo.

La definizione di una metodologia, cui il DITIC ha contribuito con metodologie idrauliche, rappresenta la naturale evoluzione dei precedenti studi sviluppati nell'ambito dell'INTERREG II Italia - Francia rivolti alle modalità di riconoscimento e quantificazione delle grandezze e fattori deterministici e casuali da cui dipende una colata detritica e delle possibilità di intervento con misure di tipo attivo e passivo, per la riduzione della pericolosità in conoide. Essa è stata applicata al Rio Inferno, corso d'acqua già interessato da tale tipologia di evento, mostrando le peculiarità della stessa sia per studi a carattere retrospettivo sia previsionali con particolare riguardo alle questioni pluviometriche, alla valutazione dei volumi solidi inizialmente mobilizzati, a quelli depositati in conoide ed alla modellizzazione numerica delle colate lungo l'asta torrentizia, da parte del DITIC, e sul conoide da parte dell'Istituto di Scienze della Terra del Canton Ticino.

In questa sede viene presentata una sintesi del lavoro svolto, contenuto integralmente nel Rapporto Finale degli Studi, mostrando attraverso l'applicazione le potenzialità ed i limiti sia nei riguardi degli aspetti previsionali sia di quelli retrospettivi.

IV-6. IL CASO IN STUDIO

Nella figura IV-1 sono rappresentati il bacino del Rio Inferno (che si sviluppa sul versante del monte Mottarone in destra idrografica del torrente Strona nel comune di Omegna provincia di Verbania), la rete idrografica naturale, e il conoide investito dalla colata detritica sviluppatasi nel luglio 1996.

Essa ha rilasciato in conoide, e sulla infrastruttura stradale che lo attraversa, un volume stimato compreso tra 30.000 e 50.000 m³ nell'ambito di un importante evento pluviometrico che ha interessato la zona del lago d'Orta con maggiore concentrazione sul Monte Mottarone sul quale, in testata al bacino, sono presenti due pluviometri. Per il primo, indicato nel seguito con PR e gestito dal Servizio Meteoidrografico e Reti di Monitoraggio della Regione Piemonte, sono disponibili i dati pluviometrici dal 1988 al 1998; per il secondo, PC, gestito dall'Istituto di Idrobiologia di Pallanza del CNR, sono invece disponibili i dati registrati dal 1982 al 1998.

Dal 1897 al 1996 ben sei eventi parossistici hanno interessato il Rio Inferno. Il volume depositato in conoide storicamente conosciuto è 35.000 m³, mentre quello associato all'evento del luglio 1996 è stato stimato dai Tecnici della Direzione Servizi Tecnici di Prevenzione della Regione Piemonte in 50.000 m³.

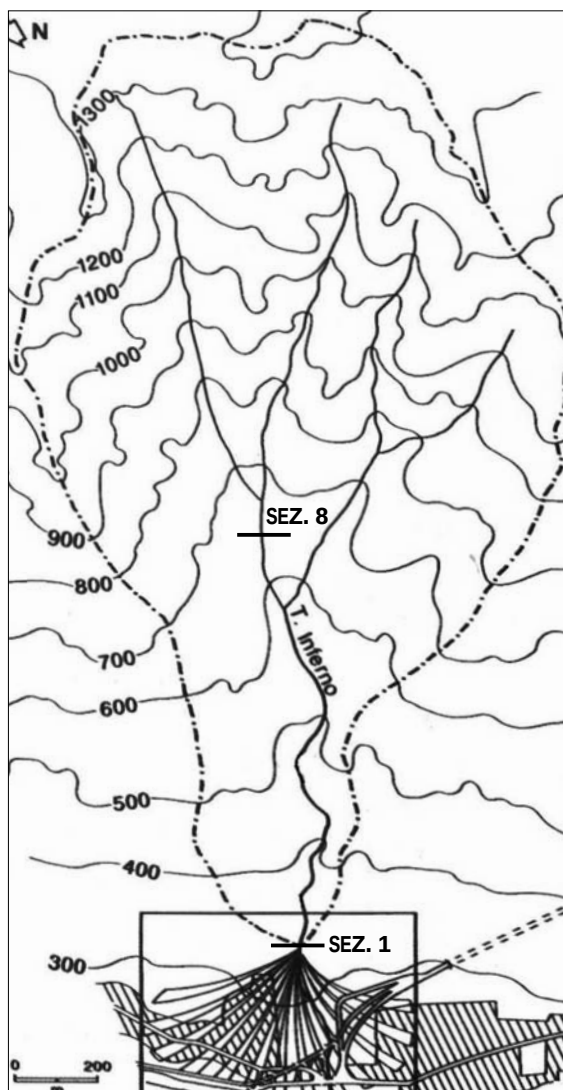


Figura IV-1. Bacino e conoide del Rio Inferno (da Chiarle e Luino, 1996 - modificato)

Dall'esame della documentazione tecnica e dei dati raccolti per l'esecuzione degli studi sono stati dedotti:

- a. i principali parametri morfometrici del bacino: area topografica 1.89 km², 1.76 km² all'apice conoide, area effettiva 2.08 km², pendenza media bacino 95%, pendenza media dell'asta torrentizia 47%, quota max 1437 m s.l.m., quota apice conoide 319 s.l.m., quota confluenza nello Strona 256 m s.l.m., pendenza conoide 16% (valutata lungo la bisettrice);
- b. le caratteristiche geolitologiche, geomorfologiche lo stato attuale del bacino e dell'asta torrentizia principale:
 - bacino: substrato granitico affiorante o subaffiorante, discontinuità che isolano speroni rocciosi anche di notevole dimensione instabili e soggetti a fenomeni di crollo, fratture da azione criogena, disaggregazione meccanica con produzione di sabbione arcosico, copertura detritica vegetata con potenza media di 1 metro arealmente poco estesa, nicchie di *soil-slip* in testata, discariche di cave dismesse, aree potenzialmente instabili, decisamente instabili alle testate dei canaloni;
 - asta torrentizia principale: alveo che si estende per circa 2,5 km in cui sono presenti ancora con evidenza i segni lasciati dal deflusso della corrente nel luglio 1996; sezioni di tipo raccolto con forma tra la trapezoidale e la semiellittica con larghezze mediamente di 10 metri; evidenti tracce di erosione spondale, materiale residuo in alveo con locali spessori anche di 2 metri e fino a 3-4 metri con diametro rappresentativo intorno al metro. L'asta da monte a valle è sufficientemente rettilinea per i primi 2/3 della lunghezza; a valle sinuosa con curve a S e doppia S. Poco a monte dell'apice del conoide, nell'ultimo salto in roccia di circa 10 metri, è presente una briglia.

Al momento il bacino è ancora ricco di materiale mobilizzabile, posto in zone ad elevata pendenza; il conoide dopo l'evento del '96 è stato sistemato con una briglia e una piazza di deposito della capacità di circa 20.000 - 25.000 m³.

Si tratta sostanzialmente di un bacino che presenta valori di grandezze e parametri ricadenti nei campi di valori tipici dei bacini nei quali possono essere presenti correnti classificabili come *debris-flow*.

Ciò è confermato dai risultati dell'applicazione di quattro noti criteri attualmente disponibili:

1. un criterio geomorfologico che riconduce il problema al calcolo del numero di Melton, che nel caso in esame è risultato

$$Me = 0.84 > 0.5, \quad (2.1)$$

o con un criterio più accurato, come suggerito da Marchi e al. e successivamente da D'Agostino che fanno rientrare i bacini appartenenti alla categoria a rischio di *debris-flow/debris-flood*, quelli per i quali i valori di Me ed S (espressi in gradi sessagesimali) soddisfano la disequazione:

$$S > 7 - 14 Me \quad (2.2)$$

che nel caso in esame con $S = 9.09^\circ$ risulta verificata;

2. la metodologia usata nello studio promosso dall'Autorità di Bacino del fiume Po "Sottoprogetto S.P1.2 Stabilità dei Versanti", da cui risulta un grado di intensità del fenomeno pari a 4;
3. il criterio del Ministero dei Lavori Pubblici Giapponese (PWRI), dall'applicazione del quale si riconosce che il bacino in esame è caratterizzato da un alto pericolo di occorrenza di *debris-flows* e che la situazione inerente all'innescio di possibili frane è da giudicarsi pericolosa;
4. il criterio di Aulitzky, ultimamente utilizzato dalla Provincia Autonoma di Trento per cartografare le aree di conoide da considerare alluvionabili, con il quale resta confermato che il torrente Inferno è potenzialmente a rischio di *debris flows* e che l'area in conoide verrebbe inclusa nella classe *zona rossa*, cioè a maggior rischio nei riguardi di possibili accadimenti di fenomeni ad elevato potere distruttivo.

I quattro criteri applicati si differenziano per il grado di accuratezza, crescente dal primo al quarto; essi forniscono valutazioni di carattere generale sulla maggiore o minore propensione di un bacino al verificarsi di fenomeni parossistici di colata, e pertanto utili allorquando deve essere esaminata una vasta porzione di territorio, e quindi un grande numero di bacini. Tuttavia al primo rapido screening devono seguire gli studi di dettaglio, che devono essere svolti attraverso fasi successive di carattere interdisciplinare cui concorrono competenze diverse. Nel seguito vengono riportate le valutazioni effettuate nell'ambito delle discipline idrauliche.

IV-7. ESAME DELLE CARATTERISTICHE PLUVIOMETRICHE DELL'EVENTO ASSOCIATO ALLA COLATA DETRITICA VERIFICATASI NEL BACINO DEL RIO INFERNO NEL LUGLIO 1996

IV-7.1. Caratteristiche dell'evento

A valle dell'evento dell'8 luglio 1996 fu reso disponibile, quasi immediatamente, lo studio eseguito dai Servizi Tecnici di Prevenzione della Regione Piemonte nel quale veniva esaminata la serie storica delle massime precipitazioni registrate nell'area della Bassa Ossola-Verbanò nel periodo 1913-1996. L'evento veniva definito come "caratterizzato da una intensità eccezionale (circa 150 mm in due ore)" con "probabilità inferiore all'1% ovvero un tempo di ritorno plurisecolare".

Ciò veniva confermato dallo studio di regionalizzazione delle precipitazioni proposto dall'Autorità di Bacino del fiume Po, che suddividendo il Piemonte in 23 aree pluviometriche omogenee, fa ricadere l'area di interesse nella zona pluviometrica n°3 per la quale ad un tempo di ritorno di 200 anni è associata una precipitazione di circa 142 mm in due ore, poco inferiore, quindi, ai 150 mm registrati al Monte Mottarone.

L'ordine di grandezza del tempo di ritorno veniva anche confermato dall'applicazione del modello TCEV; ed infine una elaborazione delle massime precipitazioni di durata 1, 3, 6, 12, 24 ore registrate negli anni dal 1931 al 1968 nella stazione di Gignese, ritenuta quella più vicina al centro di scroscio dotata di una serie sufficientemente lunga di osservazioni, permetteva di ricavare addirittura un tempo di ritorno millenario, ovviamente da prendersi solo ed esclusivamente come indicatore di un evento di carattere eccezionale.

Le suddette valutazioni a larga scala, certamente di interesse per inquadrare l'evento nella sua globalità nell'ambito del regime pluviometrico della zona geografica di appartenenza, vanno integrate con un'analisi a piccola scala temporale corrispondente a frazioni dell'ora.

Come già detto erano disponibili le registrazioni di due pluviografi posizionati in testata al bacino: il "pluviometro RP" che registra dati a scansione 10' ed il "pluviometro CNR" che registra dati a scansione 30'. Tali registrazioni seppure con lievi differenze nella durata e altezza cumulata, da ascrivere perlopiù al differente posizionamento dei due strumenti di misura, mostrano che l'evento pluviometrico del 7 ed 8 luglio è stato caratterizzato da 3 scrosci successivi, come si evince dalla figura IV-2 nella quale, per il pluviografo RP, sono riportate

l'andamento della pioggia cumulata e le intensità su base temporale 10'.

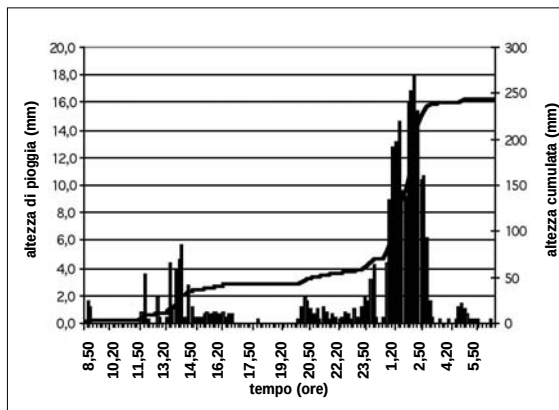


Figura IV-2. Andamento temporale delle altezze di precipitazione e dell'altezza cumulata (Evento pluviometrico 7-8/7/96 - Monte Mottarone)

Nell'ambito del terzo scroscio, che rappresenta anche la parte dell'evento di pioggia del 7-8 luglio in corrispondenza del quale si è verificata la colata di detrito, si possano riconoscere tre fasi, ciascuna caratterizzata da valori differenti di intensità media di pioggia come riportato nella tabella IV-1 seguente.

La prima fase copre un intervallo di tempo di circa 4.5 ore e presenta una intensità di pioggia inferiore; la seconda fase presenta una durata di circa 2.5 ore, successiva alla prima fase e avente un'intensità di pioggia superiore. La terza fase rappresenta la "coda" dello scroscio, con una bassa intensità di precipitazione. I valori medi di intensità e la durata delle tre fasi sono riportati in tabella IV-1, per entrambi i pluviometri.

Tabella IV-1. Valori di intensità media e di durata del terzo scroscio. Stazioni pluviometriche CNR e Regione Piemonte

	Pluviometro CNR			
	intensità media	durata	dalle ore	alle ore
I FASE	6,35 mm/h	4h 30'	20,30	1,00
II FASE	63,04 mm/h	2h 30'	1,00	3,30
III FASE	2,6 mm/h	3h	3,30	6,30
	Pluviometro Regione Piemonte			
	intensità media	durata	dalle ore	alle ore
I FASE	5,8 mm/h	4h 40'	20,10	0,50
II FASE	71,3 mm/h	2h 20'	0,50	3,10
III FASE	2,3 mm/h	3h 20'	3,10	6,30

La suddivisione in tre fasi ed il riferimento ai valori medi di intensità di pioggia sono stati utilizzati per il calcolo della portata massima defluente nei collettori (principale e secondari) del Rio Inferno.

Tale metodologia si è mostrata utile per riconoscere quali siano le condizioni di precipitazione necessarie a provocare i deflussi idrici minimi per destabilizzare gli ammassi granulari al fondo alveo dei collettori, e si è dimostrata essere uno strumento utile per la ricostruzione della dinamica degli eventi che causarono la colata detritica dell'8 luglio 1996.

IV-7.2. Confronto dell'evento pluviometrico dell'8 luglio 1996 con gli eventi pluviometrici ante e post l'8 luglio 1996

L'evento pluviometrico concomitante la colata è stato analizzato nel contesto delle precipitazioni di grande intensità verificatesi storicamente sul Monte Mottarone. Attraverso un'analisi dei dati pluviometrici (periodo 1982-1998) registrati alla stazione del CNR-Stresa, è stato possibile caratterizzare l'evento dell'8 luglio, con riferimento sia all'intensità di precipitazione di picco e sia all'intensità media riferita a diverse basi temporali.

Per ciò che riguarda l'intensità di picco di precipitazione, sono stati individuati negli anni suddetti gli eventi pluviometrici che hanno fatto registrare la massima intensità di picco in un intervallo di mezz'ora. L'analisi ha indicato una maggiore frequenza nei mesi estivi, con la massima frequenza nel mese di agosto. Ciò sembra sottolineare una tipologia di precipitazione a carattere più spiccatamente temporalesco. Per tali eventi, nella figura IV-3, è riportato il confronto tra le intensità di picco e le intensità medie; si può notare come l'evento del 7-8 luglio 1996, seppure caratterizzato da un'intensità media non elevata, presenti un'intensità di

picco sulla mezz'ora superiore a tutti i casi verificatisi negli anni esaminati.

Da ciò emerge come il solo riferimento all'intensità media di precipitazione (intesa come il rapporto tra l'altezza di pioggia cumulata dell'evento e la sua durata) non sia un criterio sufficientemente descrittivo della tipologia dell'evento, ma sia necessario considerare anche la distribuzione dell'intensità della precipitazione durante l'evento, considerando intervalli temporali anche di gran lunga inferiori a quelli dell'intera durata di precipitazione.

Ciò per riconoscere all'interno dell'evento la durata degli intervalli di tempo nei quali si sono verificate intensità elevate e persistenti. Infatti forti intensità persistenti per tempi più o meno lunghi (2 ore, 3 ore o mezz'ora) danno luogo a sollecitazioni differenti che influiscono sulla stabilità degli ammassi granulari.

Pertanto si è proceduto a caratterizzare l'evento dell'8 luglio anche considerando basi temporali superiori alla mezz'ora. In particolare si è visto come sia possibile individuare, all'interno del pluviogramma, una fase di pioggia (indicata come II fase) in cui è stata registrata una ragguardevole intensità per un esteso lasso di tempo, ovvero 2.5 ore.

Con tale base temporale sono stati nuovamente analizzati i pluviogrammi del pluviometro CNR, individuando gli eventi che tra il 1987-1998 hanno fatto registrare una "ragguardevole" intensità di pioggia in 2.5 ore. Dall'estesa indagine è emerso come la maggior parte degli eventi di precipitazione siano caratterizzati da intensità medie (su base 2.5 ore) inferiori ai 30 mm/(2.5 ore), cioè 12 mm/h.

I risultati dell'indagine riportati in figura IV-4 e limitatamente ai casi caratterizzati da una intensità superiore a 12 mm/h mostrano che, anche considerando una base temporale più ampia della mezz'ora, l'evento dell'8 luglio 1996 è stato comunque caratterizzato da intensità di pioggia superiori a quelle verificatesi negli anni a disposizione.

Figura IV-3. Massimi annuali delle intensità medie di precipitazione e delle intensità di picco

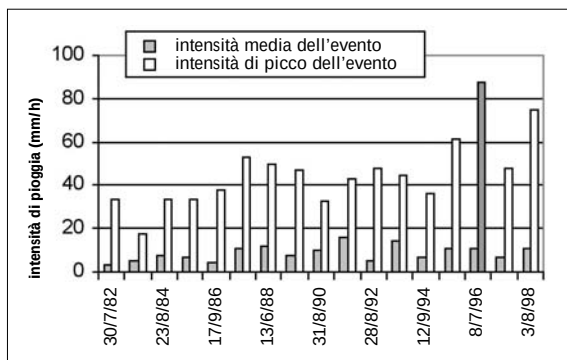
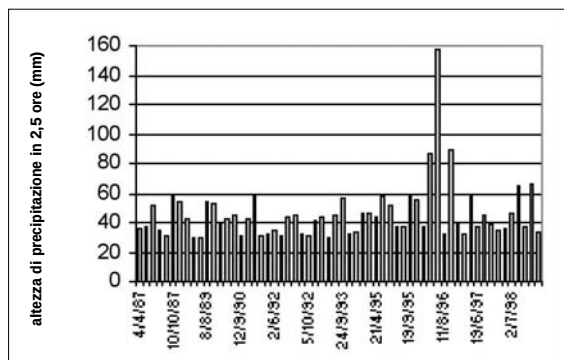


Figura IV-4. Altezze di precipitazione per durate di pioggia di 2,5 ore per gli eventi ad intensità media superiore ai 12 mm/(2,5 ore)



Il 46,7% dei casi trattati presenta un'intensità tra i 30 e i 40 mm/(2.5 ore) (corrispondenti a 12-16 mm/h) mentre si è verificato un solo evento (quello del 7-8 luglio) ad intensità di pioggia superiore ai 150 mm/(2.5 ore) cioè 60mm/h.

Si noti infine che sono state presenti negli anni esaminati elevate intensità di pioggia che non hanno fatto registrare eventi di *debris flows*; esse ricadono nell'intervallo 80-90 mm/(2.5ore), cioè 32-36 mm/h.

IV-7.3. Soglie pluviometriche di innesco

I dati di pioggia, attualmente disponibili, significativi per lo studio della pluviometria di elevata intensità associata a fenomeni gravitativi nel bacino del Rio Inferno, sono quelli già usati per le elaborazioni precedenti che coprono il periodo di tempo dal 1982 al 1998. In tali anni, già in questo particolare e fortunato caso, il solo evento gravitativo verificatosi nel bacino è quello dell'8 luglio 1996 e pertanto la ricerca di una soglia limite più utile per bacino del Rio Inferno risulta vana.

Il campo pluviometrico nel quale possono verificarsi eventi gravitativi è spesso individuato da soglie espresse dalla relazione $i_m = a D^b$ definita utilizzando le durate e le intensità medie degli eventi desunte dalle registrazioni di strumenti posti il più possibile vicino ai luoghi in cui tali eventi sono già stati registrati.

L'informazione desumibile da tali espressioni, per le argomentazioni prima riportate, e ancor più per la distanza degli strumenti misuratori rispetto ai luoghi in cui gli eventi gravitativi si sono verificati, è di tipo orientativo.

Tuttavia considerato che nell'intorno dell'area in esame è presente un discreto numero di strumenti, si potrebbe tentare una raccolta di dati pluviometrici concomitanti l'innesco dei fenomeni in parola; ciò darebbe la possibilità di determinare una espressione del tipo $i_m = a D^b$ che indicherebbe approssimativamente il limite oltre il quale si ricade nel campo pluviometrico degli eventi parossistici entro il quale presumibilmente, se risultano verificate tutte le altre condizioni richieste, è possibile che nell'area geografica indagata si verifichino *debris-flow*.

IV-8. RICONOSCIMENTO DELLE POSSIBILI ZONE DI INNESCO DI COLATE DETRITICHE

Sono stati seguiti due approcci al problema:

1. il primo, indicato come "metodo delle pendenze" deriva dalla conoscenza del campo di pendenze

di innesco acquisita sia tramite conoscenze teoriche, sia dall'osservazione empirica di casi reali;

2. il secondo, invece, è basato sulla teoria della stabilità degli ammassi granulari in questa sede limitata alla stabilità del materiale presente lungo l'asta torrentizia.

IV-8.1. Metodo delle pendenze

Indipendentemente dai meccanismi che portano alla formazione delle colate, è noto che l'innesco delle colate detritiche risulta correlata con valori di pendenza superiori ai 15°, in un campo approssimativamente compreso tra 15° e 30°.

Attraverso l'utilizzo della cartografia disponibile a scala 1:5000 è stato possibile evidenziare le aree di bacino in cui la pendenza dei versanti e dei rami della rete idrografica ricade nel campo sopra indicato.

I risultati ottenuti hanno evidenziato che la totalità della superficie del bacino (chiuso alla sezione all'apice del conoide) è interessata da pendenze superiori al 14%, con valori più elevati (maggiori del 30%) in corrispondenza della parte alta del bacino stesso. Per ciascun collettore della rete idrografica, e per l'asta principale è stato costruito un profilo evidenziando la fascia di pendenze comprese tra il 27% ed il 58%, cioè tra i valori di pendenza corrispondenti agli angoli di inclinazione d'alveo di 15° e di 30° rispettivamente.

Dai risultati ottenuti si evince che la quasi totalità dell'asta principale del Rio Inferno può essere soggetta a fenomeni di colata detritica, così come i numerosi affluenti laterali, che presentano, nella maggior parte dei casi, pendenze elevate per le quali la mobilitazione del materiale avviene sotto forma di *land-slide* anche in condizione di parziale saturazione.

IV-8.2. Metodo basato sulla meccanica della stabilità

La questione è stata trattata limitatamente alla stabilità del materiale presente lungo l'asta torrentizia, in quanto uno dei meccanismi di innesco più frequenti è proprio quello della mobilitazione dei detriti presenti nel letto del torrente per il raggiungimento di valori di portata liquida che compatibilmente con la granulometria presente e le pendenze ivi esistenti fanno osservare valori di concentrazioni tali da classificare la corrente nell'ambito dei *debris-flow*. Si è fatto riferimento alla seguente nota relazione:

$$\tan(\theta) = \frac{c^* (\sigma - \rho) \tan(\phi)}{c^* (\sigma - \rho) + \rho \left(1 + \frac{h_0}{a_s}\right)} \quad (4.1)$$

che individua, date le caratteristiche σ e $\tan\phi$ del materiale detritico, l'altezza h_0 della lama d'acqua defluente e la pendenza dell'alveo $\tan\theta$, lo strato di materiale a_s in incipiente movimento. Se a_s risulta inferiore al diametro del materiale in alveo, allora il fondo è stabile, e non vi può essere erosione. In esso solo le particelle di diametro inferiore presenti sulla superficie dell'alveo sono coinvolte nel trasporto. Questo fenomeno è classificato da Takahashi come *bed load* (Takahashi, 1994). Affinché si possa parlare di *debris flow* occorre che sia

$$a_s = nd \text{ dove } n \gg 1 \quad (4.2)$$

Tuttavia, anche quando la condizione $n > 1$ è soddisfatta, se a_s è molto inferiore ad h_0 , le particelle solide di dimensioni maggiori non possono essere disperse nella profondità della corrente, ma si concentrano, per la maggior parte, in prossimità del fondo della profondità della corrente stessa. Pertanto occorre che

$$a_s > kh_0 \quad (4.3)$$

in cui k è una costante vicina all'unità.

Ciò premesso, è stata applicata tale metodologia al caso del Rio Inferno, individuando la tipologia di corrente, che si è potuta manifestare in concomi-

sezioni di interesse si è fatto ricorso ad una trasformazione afflussi-deflussi sulla base del metodo della corrivazione, adatto per il caso in studio. Nella tabella IV-2 sono riportati i valori massimi della portata defluente ritenuta costante durante tutto lo sviluppo della seconda fase dell'evento pluviometrico, caratterizzato da una intensità media affluente di 71.3 mm/h.

La conoscenza del tirante idrico permette di conoscere il valore di a_s della eq. (4.1) e conseguentemente lo spessore dello strato al fondo che può essere movimentato.

Il calcolo è stato effettuato per valori differenti di densità del fluido interstiziale ρ_m . Per i differenti valori di ρ_m si sono ricavate le rispettive concentrazioni del materiale solido poste variabili da 0% al 24%, e per ognuno dei casi si è proceduto al calcolo degli strati erosi al fondo alveo nelle condizioni descritte. Il calcolo del peso specifico del miscuglio, assunto che il peso specifico delle particelle fosse 2650 kg/m³, ha fornito valori variabili da 1000 a 1400 kg/m³.

In figura IV-5 e in figura IV-6 sono rappresentati rispettivamente gli andamenti di $n = a_s/d$ e gli spessori degli strati che, nello schema proposto da Takahashi, possono essere erosi (con $d = d_{50}$).

Tabella IV-2. Portate defluenti dalle sezioni di chiusura alle diverse sezioni di chiusura del bacino del Torrente Inferno

Sottobacino	Sezione di chiusura	Sezione	Area (m ²)	Portata (m ³ /s)
A1	Confl.za asta principale-T6	S8	881.600	16.9
A5	Confl.za asta principale-T5	S7	955.850	18.3
A2	Confl.za asta principale-T2	S7	1.284.350	24.6
A3	Confl.za asta principale-T3	S6	1.334.975	25.6
A4	Confl.za asta principale-T4	S4	1.505.475	28.8
Aint3	Sezione S3	S3	1.531.725	29.4
Aint2	Sezione S2	S2	1.531.725	30.4
Ac	Sezione S1	S1	1.588.500	33.8

tanza dell'evento di pioggia considerato, nelle varie sezioni d'alveo rilevate da quota di circa 325 m s.l.m. a quota 650 m s.l.m..

Per la conoscenza degli idrogrammi liquidi nelle

Dalla figura IV-5 si possono individuare tratti soggetti alla destabilizzazione del materasso alluvionale e tratti soggetti al solo trasporto solido ordinario, anche se gli uni e gli altri dipendono dal

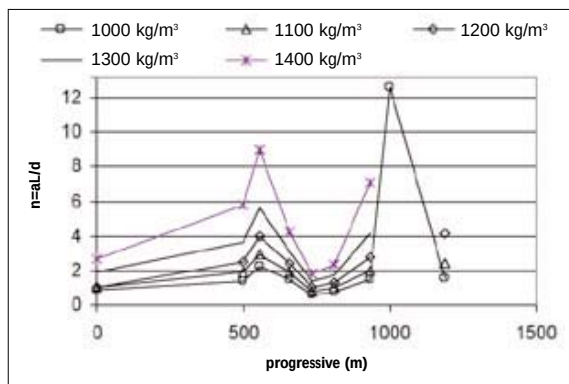


Figura IV-5. Andamento di $n=aL/d$ lungo l'asta principale del T. Inferno, per differenti valori di peso specifico del fluido interstiziale. Dal valore di n si riconoscono i tratti soggetti a semplice erosione superficiale, altri a destabilizzazione dell'ammasso granulare e, al limite, a frana

valore del peso specifico del fluido interstiziale mobilizzante l'ammasso detritico.

Utilizzando le indicazioni di Takahashi, i casi in cui $n < 1$ sono caratterizzati dal solo trasporto solido in quanto lo strato che viene movimentato è dell'ordine di grandezza del diametro dei sedimenti presenti in alveo.

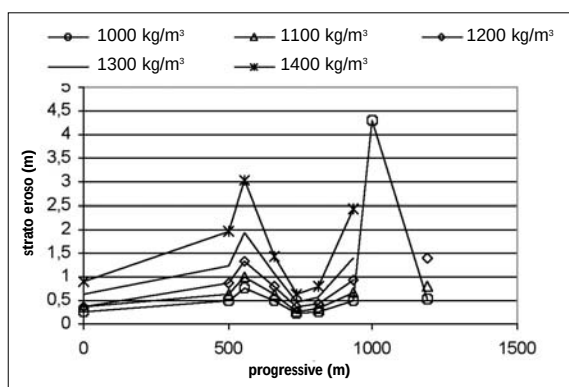


Figura IV-6. Andamento dello strato eroso lungo l'asta principale del T. Inferno, per differenti valori di peso specifico del fluido interstiziale. I valori in corrispondenza della prog. 1000 non sono stati riportati in quanto, in essa, si verificano destabilizzazioni dell'intero ammasso granulare

Nel caso in studio è sembrato più opportuno elevare tale limite a $1.5 \div 2.0$, poiché la forma degli elementi litici non è perfettamente sferica ma grossolanamente ellittica e che la distribuzione delle particelle del fondo alveo non segue lo schema "a quadrato", ma piuttosto uno schema simile a quello "a palle di cannone".

Il tratto dell'asta principale nell'intorno della progressiva 1000 m (sez. 8) presenta (per una miscela solido-liquida defluente avente un peso specifico superiore a 1000 kg/m^3) spessori di materiali erosi che si estendono fino al primo contrasto roccioso sottostante. L'applicazione del modello di erosione di Takahashi indicherebbe, nell'intorno di quella progressiva, addirittura situazioni di movimentazione di materiale di tipo franoso.

IV-8.3. Considerazioni sull'uso dei metodi proposti per la ricerca delle zone di innesco di colate

Il metodo proposto al punto IV-4.2 costituisce un esempio di trasferibilità delle conoscenze dal campo scientifico a quello applicativo; l'applicazione del metodo richiede l'assunzione di ipotesi che, se formulate correttamente, permettono di riconoscere i tratti di alveo dove ci si può aspettare trasporto solido e quelli in cui è prevedibile l'innesco di una colata o addirittura la movimentazione sotto forma di destabilizzazione dell'alveo fino al basamento roccioso.

Il metodo delle pendenze, di facile applicazione, risulta limitativo poiché permette il solo riconoscimento di una delle grandezze da cui dipende l'innesco di una colata. Peraltro, il riconoscimento del numero di tratti, con la relativa ampiezza, ed il riconoscimento dell'estensione delle zone di versante da cui può derivare materiale al reticolo idrografico, possono risultare utili se rapportate rispettivamente alla lunghezza della rete idrografica ed all'estensione del bacino, quali indicatori da aggiungersi ad altri per apprezzare la maggiore o minore propensione nei riguardi di innesco di colate.

IV-9. VOLUMI SOLIDI

Le prime valutazioni sono state rivolte alla determinazione dell'effettivo volume solido depositato in conoide a seguito dell'evento del luglio 1996 attraverso le cartografie disponibili ante e post evento. Esse risultavano di diversa precisione planimetrica e altimetrica, cosa che ha comportato una stima del volume depositato nella quantità $G_s = 35.000 \pm 20\% \text{ m}^3$. Da ciò deriva un'ulteriore conferma alla necessità di disporre, almeno per

quei conoidi che presentano una forte suscettibilità alla fenomenologia in parola, di un rilievo topografico di dettaglio della situazione ante e post-evento.

Successivamente è stata eseguita una valutazione di tipo idraulico del possibile volume solido mobilizzato nella zona di innesco, rispetto a quello depositato in conoide, utilizzando la metodologia suggerita da Takahashi già citata (per i dettagli della quale si rimanda al Rapporto finale sugli studi eseguiti).

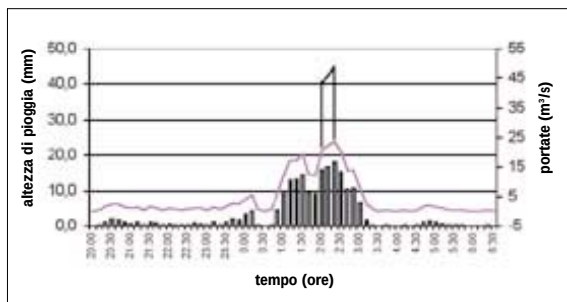


Figura IV-7. Diagrammi di precipitazione, di portate liquide e solide

Seguendo tale approccio, sommando i contributi di materiale solido trasportati da ogni singola portata liquida defluente (rappresentativa di quelle presenti nell'intervallo di tempo 10' di registrazione di precipitazione), si ottiene che il volume solido totale mobilitizzato dalla sola azione della corrente superficiale è di 17.500 m³.

Il confronto con quello depositato in conoide, porta a riconoscere un accrescimento di volume compreso tra 10.500 m³ e 24.500 m³.

Esso in parte è dovuto a fenomeni di aratura e di deposito-erosione lungo l'alveo, limitati però al tempo di propagazione della colata (di gran lunga inferiore alla durata dell'evento pluviometrico), ed in parte alla movimentazione del materiale, sotto altre forme di trasporto, negli intervalli di tempo ante e post colata.

Il metodo ha notevoli potenzialità per la previsione del volume inizialmente mobilizzabile dalla zona di innesco. La stima del volume risulta necessaria per definire con un buon grado di attendibilità l'idrogramma solido-liquido necessario alla modellizzazione numerica della colata lungo l'alveo fino al conoide. Tuttavia, occorre segnalare che i risultati sono fortemente dipendenti sia dallo scenario pluviometrico assunto sia dallo scenario di innesco che ipotizza la sola mobilitazione del materiale in alveo.

Successivamente si è provveduto a selezionare tra le espressioni disponibili in letteratura per la previsione del possibile volume in conoide, quelle

più adatte per l'area geografica piemontese.

Sono state segnalate le espressioni suggerite da Bianco e Franzi (2000) in grado di fornire in funzione di uno o più fattori deterministici un campo di valori di volume atteso in conoide, di Tropeano e Turconi (1999) che tengono conto della frequenza delle colate, di Brochot (2000) messa a punto nell'ambito del programma INTERREG II Italia-Francia, che deriva dall'interpolazione di dati ritenuti associabili a tempi di ritorno centennali ed infine una metodologia messa a punto da Franzi che affronta il problema da un punto di vista probabilistico (Franzi, 2000; Franzi e Bianco, 2000) accompagnando in tal modo il volume previsto con la relativa significatività statistica.

Per i dettagli si rimanda al già citato Rapporto Finale; tuttavia in questa sede riteniamo utile segnalare che l'espressione suggerita da Bianco e Franzi (2000) ha la seguente struttura (5.1):

$$Gs_{\max-\min} = 14.000 A^{i(1.5-i)} I.G.^{(1+0.1 I.G.)} \pm 13.000 A^{0.6}$$

che fornisce un campo di valori variabile da bacino a bacino. In generale bisogna orientarsi empiricamente sul valore minore in quei casi caratterizzati da una elevata frequenza di colate, sul valore maggiore se il bacino in esame è caratterizzato da una bassa frequenza, tenendo comunque in debito conto lo stato del bacino nei riguardi della stabilità dei versanti e della disponibilità del materiale in alveo.

In tale espressione:

Gs è il volume di materiale solido espresso in m³;

A è l'area del bacino, espressa in km²;

i è la pendenza media dell'asta principale;

I.G., indice geologico, parametro in grado di descrivere la maggiore o minore propensione del bacino a produrre materiale, definito come prodotto tra gli indici di erodibilità delle specie litologiche presenti (si veda Tabella 6.1.a nel Rapporto Finale) e le aree delle superfici da queste occupate rapportate all'area totale del bacino.

La metodologia probabilistica messa a punto da Franzi (Franzi, 2000; Franzi e Bianco, 2000) può essere utilizzata per completare la stima effettuata con la precedente espressione, o usata in maniera indipendente anche a livello previsionale, scegliendo un valore di probabilità di non superamento; difatti, ammesso che in un determinato bacino di area A possa verificarsi una colata, il metodo permette, scelto un valore di Gs, di conoscere la probabilità di superamento e di non superamento di tale valore in casi caratterizzati dalla stessa area A, a fronte di un ampio numero di casi osservati, o viceversa assunto un valore di probabilità si può dedurre il Gs ad esso associato.

Per l'uso pratico è stato fornito il diagramma seguente.

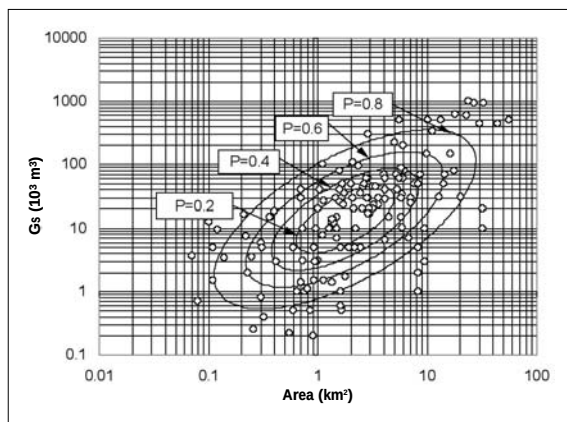


Figura IV-8.  Rappresentazione in diagramma bilogarithmico dell'insieme dei valori Gs-A e delle curve di isofrequenza cumulata

Tale metodo, seppure condizionato dai limiti delle attuali conoscenze sui valori degli altri parametri da cui dipende Gs, si presenta nei riguardi della correlazione Gs-A, come l'unico metodo che associa una significatività statistica, dedotta in maniera razionale, al generico valore Gs.

Occorre però sottolineare che l'applicazione delle espressioni prima citate e del metodo suggerito, pur agevolando la valutazione del possibile volume atteso in conoide, a rigori non esaurisce il problema. È determinante infatti la sensibilità dell'operatore accompagnata da verifiche di campo e diretta conoscenza dello specifico ambiente fisico, con particolare riferimento alla frequenza delle colate, alle condizioni di stabilità dei versanti e del materiale in alveo, alla presenza di fattori antropici o altre condizioni particolari.

Infine nel corso del lavoro svolto è stato evidenziato che le complicazioni più importanti per la definizione di efficaci strumenti previsionali derivano da una scarsa disponibilità di dati statistici quantitativamente e qualitativamente significativi relativi a zone omogenee dal punto di vista climatico e geologico, da utilizzarsi sia per la determinazione della frequenza nel tempo e nello spazio, sia per la definizione della relativa intensità.

IV-10. MODELLIZZAZIONE MATEMATICA DELLA COLATA DI DETRITO LUNGO L'ASTA PRINCIPALE DEL TORRENTE INFERNO

IV-10.1. Equazioni differenziali utilizzate e modello reologico

Si è fatto uso delle equazioni di De Saint Venant,

generalizzate per il caso di un alveo in cui la pendenza non sia trascurabile, che ipotizzato il moto della corrente nell'asta principale del Rio Inferno approssimativamente monodimensionale, sono:

- equazione del moto (6.1):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} \cos(\theta) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gAS_f - gA \tan(\theta) = 0$$

- equazione di continuità del miscuglio (6.2):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{b} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

- equazione di continuità della fase solida (6.3):

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial (CUh)}{\partial x} + \frac{1}{b} \frac{\partial Z_b}{\partial t} = 0$$

in cui i simboli utilizzati indicano:

Q = portata del miscuglio,
h = altezza dello strato di corrente in moto,
b = larghezza dell'alveo,
x = l'ascissa curvilinea,
t = il tempo,
A = area occupata, nella generica sezione, dalla corrente superficiale defluente,
Z_b = quota del fondo alveo,
tan(θ) = pendenza dell'alveo,
S_f = pendenza del pelo libero.

Le tre equazioni scritte sono sufficienti per descrivere il comportamento delle correnti di *debris flows* nel caso in cui siano verificate le seguenti ipotesi: a) fluido defluente omogeneo, b) distribuzione idrostatica delle pressioni nella generica sezione, c) alveo gradualmente prismatico.

Il termine, gAS_f, rappresenta i fenomeni dissipativi che avvengono sia all'interno del miscuglio (collisioni tra particelle, interazione tra il fluido interstiziale e le particelle, ecc.) sia sulla superficie di contatto tra corpo di colata e l'alveo stesso. La sua esplicitazione richiede l'assunzione di un adeguato modello reologico. Nel caso in esame si è ritenuto che il comportamento della corrente nel Rio Inferno sia stato, nel suo complesso, più vicino a quello di uno *stony debris flow* che a un *mud debris flow* (Coussot, 1994). Tale ipotesi può considerarsi valida anche per colate che si possono verificare in un futuro più remoto, stante al tipo di materiale ancora mobilizzabile.

Pertanto il modello reologico adottato è quello di un fluido non-Newtoniano a comportamento dilatante. Per questa ragione per S_f si è adottata

l'espressione proposta da Takahashi (1997). Essa stringe un rapporto univoco tra la velocità della colata e il tirante della stessa, in funzione di parametri geometrici (come la pendenza dell'alveo), di caratteristiche proprie della colata stessa (come la concentrazione) e del materiale solido trasportato (come il diametro medio degli elementi litici trasportati e del loro peso specifico) ed è ricavabile dalla seguente espressione (6.4):

$$u = \frac{2}{5d} + \left[\frac{gSf}{a \cdot \sin(\alpha)} \left\{ C + (1-C) \frac{\rho_m}{\sigma} \right\} \right]^{1/2} \left\{ \left(\frac{C^*}{C} \right)^{1/3} - 1 \right\} h^{3/2}$$

con "a" costante numerica pari a 0.04, α angolo di attrito interno dinamico ($\tan(\alpha)=0.6$), C^* massima concentrazione del materiale solido, valore che si è assunto pari a 0.7 (vedere paragrafi precedenti).

IV-10.2. Condizioni al contorno

L'integrazione numerica delle equazioni complete di De Saint Venant, unite all'equazione di continuità della fase solida, necessita della definizione delle condizioni al contorno e delle condizioni iniziali.

Come noto la definizione di tali condizioni determina la risposta fornita dal sistema in termini di velocità della corrente, portate defluenti, altezze della corrente defluente ecc...

Pertanto, a differenti condizioni al contorno corrispondono, in generale, risposte del modello anche marcatamente differenti. Ciò è di fondamentale importanza per il raggiungimento delle finalità ultime che ci si propongono, prime fra tutte la definizione delle aree a rischio sul conoide del bacino.

Ciò posto le suddette condizioni sono descritte dai due seguenti gruppi di equazioni:

Condizioni iniziali	Condizioni al contorno
$q(x,0) = f_1(x)$ per $0 < x < L$	$q(0,t) = f_4(t)$ per $0 < t < T$
$y(x,0) = f_2(x)$ per $0 < x < L$	$y(0,t) = f_5(t)$ per $0 < t < T$
$C(x,0) = f_3(x)$ per $0 < x < L$	$C(0,t) = f_6(t)$ per $0 < t < T$

(in cui L è la lunghezza del collettore principale e T è il tempo in cui il fenomeno viene studiato).

IV-10.3. Ipotesi e criteri per la definizione dell'idrogramma solido-liquido in ingresso

Si è voluto ricorrere ad uno scenario gravosissimo, sinteticamente indicato nella tabella seguente.

Caratteristiche dell'idrogramma	
Durata della movimentazione	12 minuti
Durata del ramo di salita	8 minuti
Durata del ramo di discesa	4 minuti
Portata liquida di inizio movimentazione	definita idrologicamente
Portata liquida di fine movimentazione	definita idrologicamente
Portata di picco	definita con l'eq. 6.e.

 Tabella IV-3. Dati caratterizzanti la movimentazione di materiale detritico in sez. 8 a quota 650 circa

È stato ipotizzato che l'idrogramma solido-liquido verificatosi all'apice del conoide del Rio Inferno nel luglio 1996 potesse verificarsi in futuro intorno a quota 650 (sezione S8 già individuata come più presumibile sezione in cui si è innescata la colata).

Poiché l'intervallo di tempo in cui presumibilmente c'è stato l'innescò della colata di detritico, per sola mobilitazione del materiale solido presente sul fondo alveo, si estende per circa 12 minuti (dei quali 8 minuti per la fase ascendente) si può ritenere che sia stato raggiunto il colmo in concomitanza della massima intensità di pioggia.

Ciò posto, facendo riferimento all'intera area del bacino chiusa all'apice del conoide, le portate idriche massime che si sono verificate, istante per istante, durante la seconda fase del terzo scroscio dell'evento pluviometrico sono indicate in tabella IV-4.

Esse sono state ottenute con un modello di trasformazione afflussi-deflussi a cui si è fatto cenno.

A tale idrogramma è associato il corrispondente andamento delle portate solide sopra indicate, ottenute seguendo la metodologia di seguito riportata.

La portata di colata che si raggiunge al colmo è data dalla seguente relazione, più volte proposta da Takahashi ed Armanini (6.e):

$$Q_{df} = \frac{C^*}{C^* - C} Q_o \quad (6.5)$$

dove si indica: con Q_{df} la portata solido liquida della colata, con Q_o la portata idrica di innescò, con C^* la concentrazione di massimo impaccamento del materiale solido a riposo, e con C la concentrazione della colata posta uguale a $C=0.55$. Tale

valore corrisponde ad una elevata concentrazione solida del miscuglio solido-liquido (circa uguale a 0.8 C*) e corrisponde al valore ricavabile applicando l'equazione (6.e) allorché si consideri, come

Tabella IV-4. Caratteristiche dell'idrogramma solido liquido

Riferimento ore	Tempo	Portate liquide (idrologiche)	Portate solide (Bed load-imm.debris-flow)	Portate di debris flows Q _{df}	Portate solido-liquide	Concentrazioni (Q _{sol} /Q _{tot})
1.5	(sec)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
	0	24.3	ooo	ooo	24.3	ooo
	600	42.2	ooo	ooo	42.2	ooo
	825	43.0	12.9	ooo	55.9	0.23
	1200	44.3	13.3	ooo	57.6	0.23
	1320	44.7	13.4	inizio colata	58.2	0.23
	1800	47.52(picco)		221.76÷83.16		0.55÷0.30
	2040	44.7	13.4	fine colata	58.2	0.23
	2100	44.1	13.2	ooo	57.3	0.23
	2200	43.0	12.9		56.0	0.23
	2400	40.65	ooo	ooo	40.6	ooo
2.5	3000	27.45	ooo	ooo	27.4	ooo

pendenza dell'alveo, il valore massimo riscontrato lungo il corso dell'asta stessa (43%) e $\phi=41^\circ$.

Inoltre, poichè il fenomeno di colata detritica è in genere preceduto e/o seguito da un trasporto di materiale solido, considerare la sola colata non può essere un procedimento esaustivo della complessità del fenomeno. Ciò in quanto occorre definire, seppure limitatamente alle ore 1.50 – 2.50 ricadenti nella seconda fase del terzo scroscio in cui essa si è manifestata, anche la percentuale di materiale solido che, presumibilmente, è stata trasportata sul conoide del Rio Inferno mediante i meccanismi noti propri del *bed-load* e dell'*immature debris-flow*.

A tal fine, tra le formule disponibili in letteratura, quella proposta da Smart e Jaegge dà ragione del carico solido fino a concentrazioni tipiche dell'*immature debris-flow*. Essa si presenta nella seguente forma:

$$\frac{q_s}{\sqrt{g(s-1)d_{50}^3}} = 4 \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2} i^{0.6} \sqrt{8/\theta}^{0.5} (\theta - \theta_{cr}) \quad (6.6)$$

con g accelerazione di gravità, d diametro del materiale solido, s il rapporto tra il peso specifico del materiale solido e il peso specifico dell'acqua, i pendenza media del fondo, q_s la capacità di trasporto per unità di larghezza dell'alveo, q_l la portata liquida per unità di larghezza dell'alveo, e q il parametro di Shield. Ponendo $s=1.65$, si ottiene,

sviluppando i termini dell'espressione sopra riportata:

$$\frac{q_s}{q_l} = 2,42 \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2} i^{1.6} \quad (6.7)$$

nella quale posto $d_{90}/d_{30}=10$ ed $i=0.2$ (valore massimo di pendenza per cui è valida la formula di Smart e Jaegge) si ottiene: $q_s=0.3 q_l$ da cui risulta che la concentrazione totale solida nella miscela solido liquida è:

$$q_s/(q_s + q_l) = 0.3q_l/(0.3q_l+q_l) = 0.3/1.3 = 0.23 \quad (6.8)$$

La formula proposta va utilizzata con cautela (cfr. Rapporto Finale); difatti, se si operasse il calcolo del trasporto solido nell'intero intervallo di precipitazione, si otterrebbero valori di volumi solidi mobilitati estremamente elevati rispetto a quelli effettivamente depositati. Inoltre, in tal modo, si ascriverebbe alla sola tipologia di trasporto solido ordinario la causa del fenomeno.

In realtà si verifica un istante in cui dall'*immature debris-flow* si passa al *mature* ovvero alla colata. A tal fine è stato adottato il minimo valore del rapporto $\theta/\theta_{cr} = 18$ ricavato dagli Autori sperimentando con valori di pendenza del 20%. Per valori superiori, infatti, si osservavano sempre correnti classificabili come *debris-flow*. Tale modo di procedere è giustificato sia dalla complessità del fenomeno sia dalla schematizzazione che se ne è fatta e pertanto corretto nell'ambito delle finalità che si

sono intese perseguire. Nel caso in esame tale condizione viene raggiunta nella sezione n°8, in prossimità della quale sono poste le condizioni al contorno per portate defluenti pari a 43 m³/s.

In tale posizione e con i valori di portata liquida e di concentrazione indicati, sono stati ricavati i valori delle grandezze riportate nella tabella IV-4. L'ordine di grandezza dei volumi solidi trasportati attraverso il trasporto *bed load+immature debris-flow*, e per *debris-flows*, possono essere ottenuti interpolando i valori riportati in tabella IV-5.

Nel caso in cui $C=0.55$ si ricaverebbero i volumi di materiale solido trasportati indicati in tabella IV-6.

Questi risultati, seppur indicativi, si avvicinano notevolmente alla valutazione dei volumi solidi V_{tot} che sono stati depositati sul conoide del Rio Inferno ed indicano che il procedimento seguito per la definizione dell'idrogramma solido liquido in ingresso al modello, a prescindere dalle schematizzazioni numeriche del modello (più sofisticate), possa essere anche un valido strumento per una prima valutazione dell'ordine di grandezza dei volumi solidi associati ad una colata.

Tipologia di trasporto	Intervallo di tempo (sec)	Volumi solidi (m³)
Bed load/imm. debris-flow	da t=825" a t=1320"	6517
Debris flow	da t=1320" a t=1800"	26204÷9160
Debris flow	da t=1800" a t=2040"	13102÷4580
Bed load/imm. debris-flow	da t=2040" a t=2200"	2106

Tabella IV-5. Tipologie di trasporto e volumi solidi

Tipologia di trasporto	Volumi trasportati (m³)
Debris flow	39300
Bed load/imm.debris-flow	8623

Tabella IV-6. Tipologia di trasporto e volumi trasportati

IV-10.4. Implementazione del modello e risultati ottenuti con la simulazione

Il modello matematico è stato implementato su calcolatore seguendo un metodo di approssimazione dei termini differenziali alle differenze finite. Il

metodo di integrazione è di tipo *one-step* implicito e porta alla scrittura di un sistema algebrico di 2N equazioni in 2N incognite, risolto mediante i noti metodi proposti dal Calcolo Numerico.

Per la definizione delle condizioni iniziali del modello (funzioni f_1, f_2), si è supposto che, per la portata di 24.3m³/s, siano raggiunte lungo tutta l'asta principale del Rio Inferno condizioni di moto permanente. Questa condizione non limita la validità del modello matematico, in quanto il successivo moto vario (di sole correnti liquide con trasporto solido) che si propaga lungo l'asta modifica notevolmente le condizioni iniziali, tanto che la successiva colata di detrito si inserisce in un sistema idraulico caratterizzato da condizioni di moto vario. La funzione f_4 è facilmente ricavabile dalle condizioni al contorno di tabella IV-4 mentre per la funzione f_5 , si è imposto che le condizioni di deflusso siano di tipo uniforme.

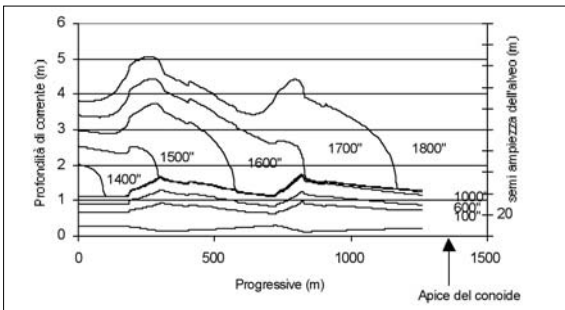
Per la valutazione delle concentrazioni solide della corrente defluente, è stato necessario utilizzare una relazione con la quale determinare, istante per istante e sezione per sezione, la concentrazione del materiale solido associata alla colata. La relazione, che si basa su considerazioni teorico-sperimentali e permette di associare alla pendenza motrice S_f una concentrazione C del miscuglio solido-liquido, è la seguente (Franzi, 2000):

$$C = 3,3 \frac{(1-\theta_{cr}/\theta) \cdot S_f^{1,6}}{1 + (1-\theta_{cr}/\theta) \cdot S_f^{1,6}} \quad (6.9)$$

in cui, oltre ai parametri S_f e C di cui è già stata data la definizione, si aggiunge il parametro di Shields. Questa relazione permette di associare alla corrente solido-liquida un valore di concentrazione, in qualunque istante e in tutte le sezione dell'alveo schematizzato nel modello; essa è stata utilizzata per la definizione delle funzione prima indicate con f_3 e con f_6 . Una formula simile ma tarata su dati sperimentali di concentrazione di correnti defluenti su basse pendenze, è stata proposta da Armanini e Fraccarollo (1999).

Le figure IV-9 e IV-10 mostrano l'andamento del

Figura IV-9. Andamento del pelo libero in diversi istanti



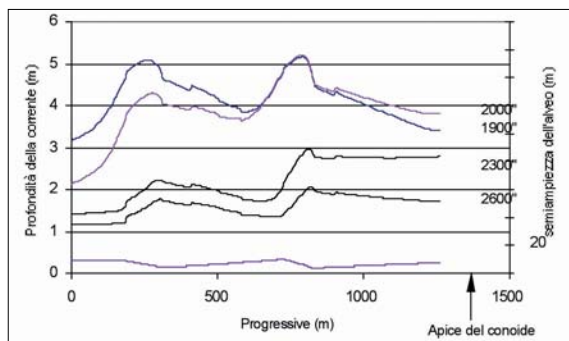


Figura IV-10. Andamento del pelo libero in diversi istanti

pelo libero della corrente solido-liquida in diversi istanti. L'intervallo temporale di rappresentazione dei profili è stato ridotto durante la propagazione della colata lungo l'alveo, al fine di rappresentare quest'ultima il più fedelmente possibile. La formazione del caratteristico "muso" della colata di detrito è dovuta sia all'improvvisa variazione di portata defluente proveniente da monte, sia alla variazione della concentrazione della corrente stessa e sia al conseguente aumento delle resistenze al moto.

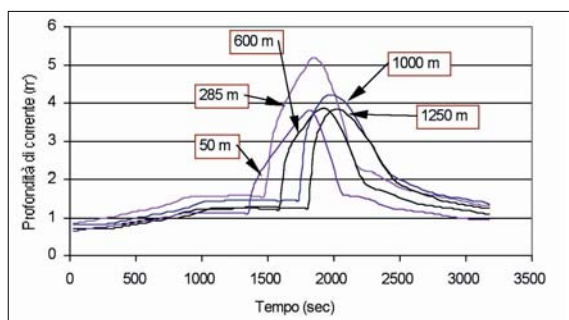


Figura IV-11. Andamento del pelo libero in cinque sezioni

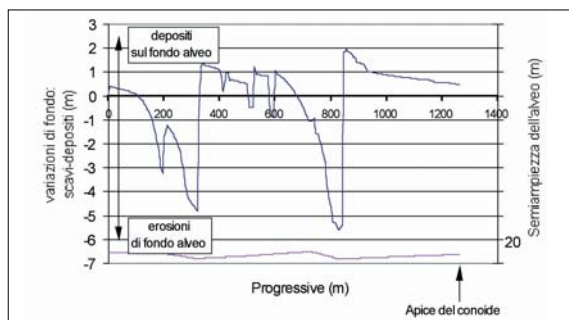


Figura IV-12. Andamento delle erosioni e depositi

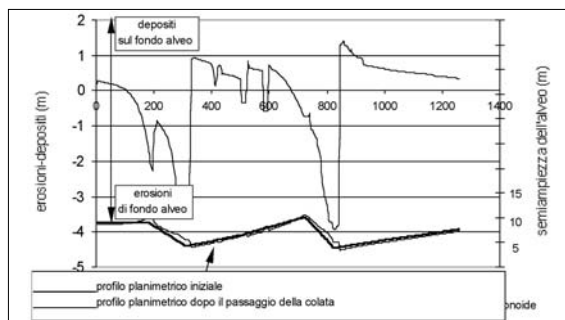


Figura IV-13. Valori di erosioni e depositi

Dai profili che sono stati rappresentati è evidente l'influenza che le variazioni di sezione d'alveo hanno sulla propagazione della corrente.

La figura IV-11 mostra l'andamento delle altezze di pelo libero in cinque sezioni dell'alveo. Si nota come il massimo di profondità di corrente non si verifica in corrispondenza del fronte della colata, bensì nella parte centrale della stessa, come conseguenza della scelta operata riguardo l'idrogramma solido-liquido in ingresso al modello. Dalla figura si può notare anche come la morfologia del torrente (in particolare, la larghezza dello stesso) influenzi notevolmente il massimo di altezza di pelo libero.

La figura IV-12 mostra l'andamento delle erosioni e dei depositi che, presumibilmente, avvengono lungo l'asta. Si noti l'influenza su di essi degli allargamenti e dei restringimenti dell'alveo: nel primo caso avvengono depositi, nel secondo forti erosioni. Il calcolo è stato effettuato supponendo che sia presente un sufficiente quantitativo di materiale solido erodibile, e che esso sia localizzato esclusivamente sul fondo alveo. In altri termini i depositi e le erosioni che si verificano avvengono esclusivamente attraverso alterazioni altimetriche del collettore principale del Rio Inferno (cioè variazioni z_b), senza alterazioni di larghezza del torrente stesso. Pertanto è evidente che i valori anche molto elevati di erosioni sono da ascrivere, oltre che alle erosioni del fondo alveo, anche ai contributi di materiale solido dovuti a frane laterali, crolli per scalzamento al piede ecc.

Supponendo invece, in maniera del tutto qualitativa, che circa il 70% del volume di erosione o depositato avvenga con variazioni del fondo alveo e che il rimanente 30% avvenga con variazioni della larghezza dell'alveo stesso, si ottengono i valori di erosione o deposito del fondo alveo e delle pareti laterali del canalone indicati in figura IV-13.

Sezione	Volume totale transitato (m³)
8	44500
1	48200
a) Volume totale depositato lungo il percorso	7600 m³
b) Volume totale eroso lungo il percorso	11300 m³
Volume eroso al netto dei depositi: b)-a)	3700 m³

Tabella IV-7. Bilancio di volumi

È risultato inoltre che circa il 50% dei depositi avviene nella parte terminale dell'asta del Rio Inferno, a valle della briglia, a causa della riduzione di pendenza che il corso d'acqua subisce.

IV-11. POSSIBILI INTERVENTI PASSIVI E/O ATTIVI E DEI SISTEMI DI ALLERTAMENTO E CONTROLLO DEL FENOMENO

Sono stati esaminati interventi

- di tipo diffuso che impediscano la produzione di materiale detritico (interventi di ingegneria naturalistica) o ne limitino il trasporto (ad esempio briglie selettive);
- di protezione passiva (arginature, vasche d'espansione, ecc.);
- di tipo pianificatorio;
- di allertamento mediante misuratori dei livelli idrometrici.

In particolare l'attenzione è stata posta sulle:

- azioni dirette sui fattori che generano il fenomeno (sistemazione dei versanti, consolidamento di depositi in alveo, ecc.);
- opere che limitano o controllano il trasporto di materiale detritico con particolare riguardo alle strutture di intercettazione individuandone: tipologia, efficacia, sollecitazioni e criteri di dimensionamento.

Per i dettagli di quanto sopradescritto rimandiamo al Rapporto Finale.

In questa sede con riferimento alle briglie a fessure, ai bacini o piazze di deposito, alle arginature e cunettoni opere più frequentemente realizzate, rammentiamo:

“Le briglie impermeabili hanno il grande inconveniente che la capacità di accumulo del materiale

a monte della struttura può risultare drasticamente ridotta a causa dei depositi di eventi ordinari, per cui tali strutture possono risultare inadeguate a intercettare successive colate detritiche. Per questo motivo vengono spesso utilizzate strutture semipermeabili, costruite con aperture larghe così che ritengano solo i detriti più grossi insieme al materiale vegetale in genere sempre presente. Tali aperture hanno dimensioni tali da consentire il passaggio del trasporto solido ordinario (almeno due volte il diametro medio caratteristico del materiale trasportato dalle piene ordinarie), ma non devono comunque eccedere una dimensione pari a 1,5-2 volte la dimensione dei massi presumibilmente convogliati dalle colate. La scelta della struttura ottimale deriva quindi da un compromesso fra la necessità di intercettare le colate di detriti, quantomeno il fronte che trasporta il materiale di maggiori dimensioni, e la necessità di evitare una completa occlusione delle aperture a seguito della deposizione di una colata.

In base agli esperimenti condotti da Senoo e Mizuyama (1984) risulta che se il rapporto tra le dimensioni delle aperture e il massimo diametro del materiale è inferiore a 1,5 la riduzione del picco di portata di sedimenti rispetto al valore osservato in assenza di strutture di intercettazione è pari a quella che si avrebbe in una diga impermeabile, per cui la colata viene completamente intercettata e l'occlusione delle aperture non consente il passaggio della frazione più fine.

Per valori del rapporto compresi tra 1,5 e 2 si realizza una soddisfacente riduzione del picco di portata (più del 50%) evitando la completa ostruzione delle aperture. In ogni caso tali strutture semi-permeabili devono poter consentire il sicuro smaltimento per tracimazione della portata prevedibile qualora le aperture risultino completamente ostruite dal materiale depositato a monte.”

“Per ciò che riguarda il dimensionamento delle dighe di intercettazione, si può segnalare che viene effettuato utilizzando come valori di riferimento per la velocità delle colate nel tratto terminale dei torrenti, 5-10 m/s per “*stony debris flow*” (cioè *debris flow* in cui è prevalente il materiale di grandi dimensioni) e 15 m/s per i “*mud flow*” (ove la componente fine è predominante).

L'azione dinamica del fluido è esercitata invece sull'intero corpo diga e viene quantificata attraverso la seguente relazione (PWRI, 1984) :

$$P_D = k(\sigma u^2/g) B/B_d \quad (7.1)$$

dove P_D è la forza di impatto per unità di superficie, σ è la densità del miscuglio (il valore di riferimento è 2 kg/dm³), u è la velocità della colata in

arrivo, B e B_d sono rispettivamente la larghezza del torrente e quella della diga; valori di k pari a 2 consentono una stima di PD che risulta in buon accordo con i valori misurati.

Armanini e Scotton (1993), comunque, confermano l'utilità della regola empirica, in uso in diversi paesi europei che insistono sull'arco alpino, di assumere la forza sollecitante in 7-11 volte la spinta idrostatica."

"I bacini di deposito dei detriti, che vengono inseriti sul conoide di deiezione o poco a monte del suo apice, hanno lo scopo di realizzare un temporaneo o definitivo deposito dei materiali trasportati dalla colata, lasciando però passare la maggior parte del carico solido trasportato durante le condizioni di deflusso ordinarie.

Si conoscono due possibili configurazioni di posizionamento:

- in serie, quando il bacino è situato sul corso abituale del torrente;
- in parallelo, quando il bacino è posto di fianco o su una derivazione del corso d'acqua e perciò non è normalmente percorso dal torrente ma è interessato solo in caso di piena.

Le tecniche di realizzazione dei bacini di deposito possono essere molto diverse e fare ricorso a rilevati in materiali sciolti che risultano vantaggiosi per il basso costo e per la facilità di mascheramento con inerbimento e vegetazione.

Le parti essenziali che costituiscono detti bacini sono una struttura di ingresso al bacino, il bacino stesso, la diga che intercetta il flusso in uscita e un'eventuale contro diga a valle.

L'aspetto più importante da tener presente è che ogni bacino compie la sua funzione tanto più a lungo quanto più esso è libero di materiale; a ciò concorre il periodico svuotamento del bacino.

A tal fine è stato segnalato l'iter burocratico necessario per realizzare uno svuotamento e gli attuali orientamenti delle Autorità preposte alle autorizzazioni, ultimamente orientate verso procedure snelle anche nei riguardi degli aspetti economici che lasciano spazio a procedure di compenso tra i costi sostenuti per lo svuotamento ed il valore di mercato del materiale estratto.

Relativamente alla forma da assegnare al bacino di deposito si è visto che due sono le forme migliori: quella a pera col picciolo situato a monte o a valle. Se si vuole raggiungere lo scopo di ottenere la "*self-cleaning degradation*", la forma a pera col picciolo a monte è la migliore poiché ciò è adatto alla tendenza del flusso a oscillare cercando la via ottimale, con punto di fulcro costituito dalla struttura di ingresso. Dal punto di vista invece del massimo

volume di deposito, la soluzione migliore è una forma a semicerchio con centro nella struttura di ingresso e diametro intero posto di traverso al flusso.

Per determinare in fase di progetto il volume da assegnare al bacino di deposito, occorre valutare il volume di materiale solido atteso in conoide a seguito della colata, con le procedure illustrate al punto 5.

Arginature e cunettoni: spesso non si riesce a trattenere la colata a monte di centri abitati, ma si riesce tuttalpiù a rallentare la colata stessa o a mantenere i massi di dimensione maggiore. È necessario allora a valle delle opere di trattenuta canalizzare opportunamente il torrente o costruire canali artificiali in grado di fare defluire la colata di detriti (cunettoni).

Assai problematica è la gestione dell'innalzamento che una colata defluente ha nel percorrere un tratto in curva di un canale o di un cunettone. Il rialzo in curva viene calcolato con riferimento al carico cinetico della colata:

$$\Delta h = \alpha b U^2 / r g \quad (7.2)$$

b ed r sono rispettivamente la larghezza del canale ed il raggio di curvatura ed α un coefficiente che secondo le raccomandazioni del Ministero dei Lavori Pubblici Giapponese può raggiungere anche il valore 10, e ciò in dipendenza della tipologia della colata attesa.

IV-12. POSSIBILI LINEE PROGRAMMATICHE PER LA DIFESA E L'USO DELLA ZONA DI CONOIDE

Le possibili linee programmatiche per la difesa e l'utilizzo della zona conoide di un bacino torrentizio, da ricercarsi nell'ambito delle attuali conoscenze sulle colate detritiche, devono soddisfare gli indirizzi in materia di pianificazione territoriali contenuti nelle recenti disposizioni, sia regionali che nazionali (Es. C.P.G.R. n. 7/LAP/96, P.A.I.).

Si evidenzia la necessità di procedere a livello del singolo conoide a studi di dettaglio rivolti al riconoscimento e quantificazione degli elementi che concorrono alla definizione della pericolosità e successivamente del rischio; ciò per la migliore individuazione e scelta delle misure e interventi necessari per la sua mitigazione cui è strettamente connesso il successivo grado di uso del suolo.

Si ritiene quindi necessario, per i corsi d'acqua montani e soprattutto per i conoidi soggetti a trasporto di massa e sovralluvionamento che comportano grave rischio, procedere alle seguenti attività:

- a. caratterizzazione litologico-strutturale di dettaglio del bacino con individuazione delle aree più degradate in relazione allo stato di fratturazione ed alterazione delle rocce ed alla presenza di depositi sciolti sui versanti e lungo le aste;
- b. studio geologico applicato sulla franosità reale e potenziale dei versanti;
- c. studio forestale sia sul grado di copertura vegetale e boscosa che sulle caratteristiche di erodibilità dei suoli;
- d. studio idrologico ed idraulico del bacino con valutazione delle portate solide e della dinamica delle piene in relazione ai fenomeni di deposizione nella zona di conoide in funzione delle caratteristiche geometriche e della presenza di abitazioni ed infrastrutture sulla stessa nonché in funzione delle opere di protezione prevedibili.”

Gli studi eseguiti sul Rio Inferno, allo stato attuale delle conoscenze, hanno permesso di mostrare l'applicazione di diverse metodologie di indagine, applicabili a scala di singolo bacino, utili per la definizione del livello di pericolosità.

Relativamente al punto d. sopraindicato, le metodologie idrauliche utilizzate per la ricostruzione del possibile scenario nell'ambito del quale si è innescata e propagata la colata fino al conoide del Rio Inferno hanno richiesto un certo numero di ipotesi e la conoscenza dello scenario pluviometrico sotto cui si sono sviluppati i deflussi solido-liquidi fino alla colata.

Come più volte evidenziato nel corso degli studi, ciascun caso è diverso dagli altri, e pertanto nel

caso di studi previsionali l'applicazione delle suddette metodologie è fortemente affetta dallo scenario assunto nell'ambito del quale spicca quello pluviometrico.

I margini di incertezza sia nei riguardi delle ipotesi assunte sia dello stato evolutivo della modellizzazione numerica, bidimensionale in conoide, consigliano di non affidarsi unicamente ai risultati numerici per la definizione delle fasce di rischio.

Ciò è emerso dalle simulazioni numeriche sul conoide del Rio Inferno effettuate dall'Istituto Scienze della Terra del Canton Ticino alle quali si rimanda.

Tuttavia le peculiarità di tale strumento che permettono in tempi brevi e costi contenuti di studiare più scenari inducono ad affinare tale metodologia, come evidenziato nel rapporto dell'Istituto di Scienze della Terra del Canton Ticino e come confermato dalle recenti iniziative intraprese dalle Autorità di Bacino preposte alla gestione del territorio.

L'uso di tali strumenti, come già accennato, richiede la definizione delle condizioni al contorno e iniziali, ovvero appositi idrogrammi solido-liquidi in una sezione di monte del corso d'acqua laddove si ipotizza l'innescio del flusso di colata.

La conoscenza dei volumi inizialmente posti in movimento è quindi elemento indispensabile per la modellazione; quelli attesi in conoide costituiscono, invece, dato di progetto con cui avviare la scelta delle misure da adottare per la mitigazione della pericolosità in conoide, realizzabile con le opportune opere indicate in precedenza, e tra queste i bacini di raccolta in conoide.

CONTRIBUTO DEL C.N.R.-I.R.P.I. DI TORINO

IV-13. PREMESSA

L'attività svolta dal C.N.R. I.R.P.I. di Torino nell'ambito del presente studio ha riguardato i seguenti aspetti:

1. raccolta e validazione dei dati storici e delle informazioni risultanti da precedenti studi sui dissesti nel bacino del Torrente Inferno;
2. determinazione del volume di materiale solido mobilizzabile;
3. stima della velocità media e della profondità di flusso all'apice del conoide;
4. studio delle possibili misure di tipo passivo per la mitigazione del rischio.

Nelle pagine seguenti verranno sinteticamente presentati i risultati ottenuti. I metodi utilizzati sono invece descritti in dettaglio nei lavori citati in bibliografia e nella relazione di Arattano e Marchi (2001).

Saranno inoltre fornite alcune indicazioni per la difesa delle zone di conoide dei bacini torrentizi e sui rilievi post-evento da effettuare in bacini interessati da colate detritiche.

IV-14. ACQUISIZIONE DATI

Sono stati reperiti presso l'Archivio Comunale di Omegna, l'Ufficio di Novara del Genio Civile e l'Archivio di Stato della Provincia di Novara i documenti contenenti segnalazioni ed informazioni relative ad eventi alluvionali e frane nel bacino del Torrente Inferno. Nessuno dei documenti acquisiti contiene dati relativi ai volumi depositati ed alle portate al colmo osservate; inoltre la tipologia dei processi appare di non univoca determinazione: risulta difficile distinguere tra piene con trasporto solido e colate detritiche.

La colata detritica dell'8 luglio 1996 è stata studiata da Chiarle e Luino (1998) ed Arcuri et al. (1998). Sono state reperite presso l'Istituto di Idrobiologia "De Marchi" del CNR di Pallanza le piogge relative alla stazione pluviografica del Rifugio CAI sul M. Mottarone. Sono state acquisite anche le sezioni trasversali rilevate da Chiarle e Luino (1998).

IV-15. VALIDAZIONE DEI DATI ACQUISITI

I volumi detritici depositati dalla colata detritica del luglio 1996 sono stati valutati in 30.000 m³ da Chiarle e Luino (1998) ed in 50.000 m³ da Arcuri et al. (1998). Chiarle e Luino (1998) hanno stimato in 750 m³/s la portata al colmo, Q_c , della colata del

luglio 1996. Il metodo della soprelevazione in curva (Johnson e Rodine 1984) da loro usato per tale stima consente di ottenere stime di velocità e portata preziose per l'attività di progettazione di misure di difesa e di previsione di eventi futuri. Occorre, tuttavia, una certa cautela nel suo utilizzo e soprattutto nella scelta delle sezioni ove effettuare le misure (Arattano e Marchi, 2001).

Le colate detritiche si formano talvolta per sbarramento del corso d'acqua e accumulo progressivo di un miscuglio solido liquido alle spalle dello sbarramento. Il metodo del *dambreak*, che prende in esame uno scenario di questo tipo, (Hungar et al., 1984; Armanini, 1999) stima Q_c in 278 m³/s. Con il *metodo volumetrico* (Armanini, 1999; Hungar, 1984; Meunier, 1991) si otterrebbe una Q_c pari a 190 m³/s. Il metodo volumetrico sottostima la portata di picco rispetto al valore di Chiarle e Luino (1998) poiché considera la massima quantità di detrito mobilizzabile dalla portata liquida, senza tener conto della natura impulsiva delle colate detritiche. Secondo VanDine (1985), in bacini di dimensioni ridotte, la portata solida può arrivare a 40 volte quella liquida e dunque, nel caso in esame, a 760 m³/s, valore prossimo a quello stimato da Chiarle e Luino (1998). Anche Mizuyama et al. (1992) indicano un elevato rapporto tra portate di picco delle colate detritiche e relative portate liquide: tale rapporto può a loro avviso arrivare fino a circa 35 volte la Q_l . Vi sono anche altri riscontri in letteratura che possono rendere ragione del valore di Q_c stimato da Chiarle e Luino (1998). Sempre VanDine (1996) pubblica un grafico che stima la portata di picco in funzione del volume: ad una colata di 50.000 m³ corrisponderebbe, in base a tale grafico, una $Q_c = 600$ m³/s. Takahashi (1991) ha invece osservato sul Monte Sakurajima portate di 500 m³/s per volumi di circa 30.000 m³.

Uno scattergramma delle relazioni fra volume delle colate e portata di picco è stato presentato da Rickenmann e Zimmermann (1993): ad un volume V di 50.000 m³ corrisponderebbe un valore medio di Q_c di 650 m³/s, un valore minimo di 400 m³/s ed un valore massimo di 900 m³/s. Ad un volume di circa 30.000 m³ corrisponderebbe invece un valore medio di Q_c di 600 m³/s, un valore minimo di 500 m³/s ed un valore massimo di 700 m³/s.

Elementi più precisi per la valutazione delle relazioni fra volume e portata di picco delle colate detritiche si possono trovare in Mizuyama et al. (1992). Mizuyama et al. (1992) presentano infatti due distinte relazioni, corrispondenti a colate detritiche a matrice fangosa ed a colate detritiche di tipo granulare. I *debris flow* del Torrente Inferno appartengono a quest'ultima tipologia. In base alla

relazione di Mizuyama et al. (1992) ad un volume di 50.000 m³ corrisponderebbe un valore medio di Q_c pari a 624 m³/s, un valore minimo di 400 m³/s ed un valore massimo di 1000 m³/s. Ad un volume di 30.000 m³ corrisponderebbe invece un valore medio di Q_c di 419 m³/s, un valore minimo di 260 m³/s ed un valore massimo di 700 m³/s.

Il grafico di Mizuyama et al. (1992) può anche essere utilizzato, nota la portata di picco, per determinare i volumi depositati dalle colate. Questo approccio è già stato seguito da Bovis e Jakob (1999).

Ad una portata di 750 m³/s nel Torrente Inferno corrisponderebbe, in base al grafico di Mizuyama et al. (1992), un volume depositato di 63.200 m³. I risultati ottenuti con le diverse formule precedentemente discusse sono sintetizzati nella sottostante tabella IV-8.

Tabella IV-8. Valori della portata di picco risultante dall'applicazione di diversi metodi

	Q_c minima [m ³ /s]	Q_c [m ³ /s]	Q_c massima [m ³ /s]
Valore ricostruito da Chiarle e Luino (1998)		750	
Metodo volumetrico *		190	
Metodo volumetrico (Meunier, 1991) *		133	
Metodo grafico (VanDine, 1985) *		760	
Equazione dambreak		(343)	
Grafico Q_c - V (VanDine, 1996) **		600	
Grafico Q_c - V (VanDine, 1996) ***		450	
Grafico Q_c - V (Takahashi, 1991) ***		500	
Grafico Q_c - V (Rickenmann e Zimmermann, 1993) **	400	650	900
Grafico Q_c - V (Rickenmann e Zimmermann, 1993) ***	500	600	700
Equazione Mizuyama et al. (1992) **	400	624	1000
Equazione Mizuyama et al. (1992) ***	260	419	700
* $Q_0 = 19 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ** $V = 50.000 \text{ m}^3$ *** $V = 30.000 \text{ m}^3$			

IV-16.1. Valori unitari di riferimento e metodi empirici di inviluppo

I metodi empirici di inviluppo delineano i massimi volumi detritici attesi in un bacino in base ad alcuni semplici parametri del bacino e/o del conoide alluvionale. I metodi in questione, non diversamente, peraltro, dalle formule semi-empiriche e correlative che saranno considerate in seguito, si basano su campioni di dati relativi a particolari regioni geografiche. Particolari cautele sono necessarie, pertanto, qualora si intenda procedere ad applicazioni di tali metodi in altre zone.

L'Università di Berna e Geo7 - Geoscientists (1996) forniscono alcune indicazioni sui massimi valori unitari osservati in un campione di bacini svizzeri. Un valore di 20.000 m³ km⁻² è indicato come limite superiore del volume prodotto per unità di superficie. Un limite superiore pari a 70.000 m³ km⁻² è stato indicato da Marchi e Tecca

IV-16. DETERMINAZIONE DEL VOLUME DI MATERIALE SOLIDO MOBILIZZABILE

Una valutazione sufficientemente affidabile dei volumi delle colate detritiche richiede l'applicazione critica di approcci differenziati. Per la valutazione dei volumi delle colate detritiche nel Torrente Inferno sono state utilizzate formule empiriche, semi-empiriche ed un approccio di tipo geomorfologico.

(1996) per i volumi unitari delle colate detritiche in bacini delle Alpi Orientali Italiane. VanDine (1985) ha indicato un volume unitario di 10.000 m³ km⁻², basato però su un campione assai esiguo di dati sperimentali, per i bacini della British Columbia (Canada). Rickenmann (1997) ha proposto un metodo per la valutazione approssimativa del massimo volume delle colate detritiche in base alla pendenza media del conoide ed alla lunghezza del

collettore fra il possibile punto d'innescio ed il punto inferiore della zona di deposito. I massimi volumi si hanno, a parità di lunghezza percorribile dalla colata, per conoidi con una pendenza media del 15%. Conoidi molto acclivi (pendenza superiore al 15%) risultano associati a bacini piccoli a forte pendenza, con estesi affioramenti rocciosi, che presentano generalmente modesta disponibilità di sedimento. All'estremo opposto, nei bacini con conoidi a pendenza più bassa (inferiore al 15%), la probabilità di maggiori apporti detritici risulta compensata dalle minori pendenze che tendono a favorire la rideposizione del materiale trasportato all'interno del bacino.

Fra i metodi empirici di inviluppo può essere compresa anche la formula di Hampel (1977). Tale formula presenta una notevole sensibilità a variazioni del valore della pendenza del conoide.

IV-16.1.1. Applicazione al bacino del Torrente Inferno

I valori massimi di riferimento per unità di superficie proposti per i bacini Svizzeri ($20.000 \text{ m}^3/\text{km}^2$) e per i bacini dell'Italia Nord-orientale ($70.000 \text{ m}^3/\text{km}^2$) danno luogo, per il Torrente Inferno, a stime pari a, rispettivamente, 37.800 m^3 e 132.000 m^3 . Basso appare il valore risultante dalla relazione proposta da VanDine (1985), pari a soli 18.900 m^3 . La linea di inviluppo proposta da Rickenmann porta, per una lunghezza dell'asta principale di 2.280 m (Arattano e Marchi, 2001), ad un volume pari a 142.500 m^3 . Considerando anche il percorso della colata sul conoide (lunghezza asta di 2.500 m), si ottiene un volume di circa 156.000 m^3 . Dall'applicazione della formula di Hampel (1977) si ottiene un volume pari a 166.700 m^3 .

Le forti differenze nei risultati si devono al fatto che i metodi sono stati sviluppati in diverse regioni geografiche. In particolare, i valori determinati dalla formula di VanDine (1985) appaiono decisamente bassi per i bacini delle Alpi Italiane.

IV-16.2. Metodi semi-empirici e correlativi

I metodi semi-empirici e correlativi sono basati su procedure di tipo statistico che determinano la forma analitica delle espressioni e, in alcuni casi, stabiliscono quali, fra le variabili relative alle caratteristiche del bacino, sono significative ai fini del calcolo dei volumi delle colate. Fra le numerose espressioni esistenti, sono state impiegate quelle di Takei (1984), Kronfellner-Kraus (1985), D'Agostino et al. (1996), D'Agostino (1996), Tropeano e Turconi (1999) e Bianco (1999).

IV-16.2.1 Applicazione al bacino del Torrente Inferno

Oltre alle variabili morfometriche del bacino e dell'asta torrentizia, alcune delle formule considerate richiedono dei parametri particolari, che sono stati determinati come descritto in Arattano e Marchi (2001). I risultati sono riportati nella tabella IV-9.

Formula	Volume calcolato	Formula	Volume calcolato
Takei (1984)	20.000 m^3	D'Agostino (1996)	44.600 m^3
Kronfellner-Kraus (1985)	47.200 m^3	Tropeano e Turconi (1999)	25.000 m^3
D'Agostino et al. (1996)	51.400	Bianco ⁽¹⁾ (1999)	max 47.000 m^3 medio 28.000 min 8.900

 Tabella IV-9. Risultati dell'applicazione dei metodi semi-empirici e statistici

La formula di Takei (1984) ha prodotto il valore più basso perchè si basa su eventi in parte di carattere non eccezionale, mentre gli altri metodi considerati sono orientati al calcolo dei volumi per eventi di forte intensità.

Basso appare anche il valore ottenuto con l'espressione di Tropeano e Turconi (1999).

Prossimi fra loro, e compresi approssimativamente fra 45.000 e 50.000 m^3 , sono i valori forniti dalle formule di Kronfellner-Kraus, di D'Agostino ed il valore massimo ottenuto da Bianco (1999).

IV-16.3. Approccio geomorfologico

Una determinazione dei volumi delle colate detritiche, basata su osservazioni dirette di campagna, integrate dall'interpretazione di foto aeree e dall'utilizzo di carte geomorfologiche e dei dissesti, presenta spesso maggiore affidabilità rispetto all'applicazione di formule empiriche e semi-empiriche.

Un metodo che perviene alla valutazione del volume di una colata a partire dal rilievo del sedimento mobilizzabile nel bacino è stato proposto da Hungr et al. (1984) per i torrenti della British

(1) I valori ottenuti con questa formula sono leggermente diversi da quelli pubblicati da Bianco (1999), a causa del diverso valore adottato per l'area del bacino.

Columbia (Canada). Seguendo il metodo di Hungr et al. (1984) la rete idrografica del bacino viene suddivisa in tratti omogenei per caratteristiche di erodibilità per i quali vengono determinati i valori del tasso di erosione unitario che indica il volume erodibile per unità di lunghezza. Il volume complessivo mobilizzabile è quindi dato dalla somma dei contributi dei vari tratti considerati.

Hungr et al. (1984) suggeriscono valori del tasso di erosione unitario per varie situazioni morfologiche. Questi valori appaiono validi, almeno in prima approssimazione, anche nei nostri bacini alpini.

L'approccio geomorfologico in questione ipotizza che tutte le potenziali aree sorgenti di sedimento contribuiscano alla formazione della colata e che non si abbia rideposizione del materiale eroso. Particolari evidenze geomorfologiche rilevate sul campo, come la presenza di tratti d'alveo a bassa pendenza favorevoli alla deposizione del sedimento, possono portare a valutazioni diverse da quelle risultanti dall'applicazione integrale di queste due ipotesi di tipo cautelativo.

Concettualmente simile all'approccio proposto da Hungr et al. (1984), ma operativamente più semplice e meno dettagliata, è la procedura proposta da Scheuringer (1988) sulla base di esperienze maturate in Austria.

Rilievi geomorfologici lungo la rete idrografica sono raccomandati anche da Spreafico et al. (1999), nell'ambito di una comprensiva procedura per la valutazione del materiale mobilizzabile da piene idriche e da colate detritiche nei bacini Svizzeri. Un approccio geomorfologico è stato proposto da Thouret et al. (1995) per definire i volumi potenzialmente mobilizzabili da parte di colate detritiche di grande entità in un bacino delle Alpi Francesi.

IV-16.3.1. Applicazione al bacino del Torrente Inferno

Una valutazione del volume mobilizzabile nel bacino del Torrente Inferno è stata effettuata utilizzando il metodo geomorfologico di Hungr et al. (1984). Tale applicazione si è basata su relazioni, documentazione fotografica e cartografia predisposte dalla Regione Piemonte (Ben et al., 2000). Il calcolo del volume mobilizzabile è stato effettuato per i tratti d'alveo e le parti di versante risultati attivi in occasione della colata detritica dell'8 luglio 1996. La parte superiore della rete idrografica è costituita da strette incisioni torrentizie nelle quali la copertura detritica presenta uno spessore solita-

mente molto limitato. Nella parte medio-superiore del bacino l'asta torrentizia principale lambisce una discarica di cava il cui materiale ha fornito un rilevante apporto alla colata detritica dell'8 luglio 1996 (Chiarle e Luino, 1998). Il tratto di asta torrentizia al piede della discarica della cava è stato attribuito alla classe in cui rientrano normalmente i tratti di rete idrografica con sponde in frana. Il calcolo del volume mobilizzabile è presentato in (Arattano e Marchi, 2001).

Il volume ottenuto (52.000 m^3) è prossimo a quello indicato dalla Regione Piemonte (Ben et al., 2000) per il sedimento presente lungo l'alveo a monte del conoide e ritenuto suscettibile di mobilizzazione unitamente al materiale delle discariche di cava.

IV-16.4. Utilizzo di dati storici - relazioni fra volume e frequenza

Dati storici sulle colate detritiche raccolti in diverse parti delle Alpi Italiane (Govi et al., 1992; Arattano et al., 1996) hanno fornito indicazioni sull'entità dei fenomeni e sulla loro frequenza. Tali dati non consentono in generale un'analisi quantitativa delle relazioni fra volumi depositati e frequenza dei fenomeni nei singoli torrenti. Le serie storiche sono infatti caratterizzate da scarsità e discontinuità delle informazioni che rendono particolarmente problematica la determinazione dei volumi corrispondenti a dati periodi di ritorno. Gli studi sulle relazioni fra frequenza e volumi delle colate detritiche sono, proprio per questa ragione, poco numerosi.

Van Steijn (1996) riporta relazioni fra frequenza, espressa come tempo di ritorno delle colate detritiche, e volumi depositati che sono stati ottenuti in diverse regioni europee. Tali relazioni hanno un valore prevalentemente qualitativo. Brochot (1998) ha articolato in due fasi uno studio su alcuni bacini della Savoia. Un'analisi delle caratteristiche morfometriche, geolitologiche e di uso del suolo di tali bacini, gli ha consentito di raggrupparli in classi a comportamento omogeneo. All'interno di ogni classe è stata poi effettuata una regolarizzazione probabilistica dei volumi per unità di superficie con la distribuzione di Gumbel, sopperendo così alla limitatezza delle singole serie storiche disponibili.

Nella stessa regione geografica indagata da Brochot (1998), un'indagine di dettaglio è stata poi condotta su un singolo bacino (Torrent du Poucet) (Brochot et al. 2001).

Un campione di 29 piccoli bacini della regione

di Los Angeles (California, USA) è stato utilizzato da Johnson et al. (1991) per un'analisi delle relazioni fra frequenza e volumi delle colate detritiche. I volumi per unità di superficie corrispondenti a determinati tempi di ritorno sono stati stimati utilizzando la distribuzione log-normale e sono state sviluppate equazioni di regressione che correlano i volumi con alcuni parametri morfometrici dei bacini.

Una elevata frequenza delle colate detritiche si osserva solitamente in bacini nei quali si abbia una abbondante disponibilità di materiale in grado di non esaurirsi a causa di una o più colate (Bovis e Jakob, 1999). I *debris flow* in questi bacini sono condizionati solo dal verificarsi di adeguate situazioni idrologiche. In questi casi è possibile stabilire almeno approssimativamente le relazioni fra entità dei fenomeni e loro frequenza.

Al contrario, bacini con ridotta disponibilità di detrito necessitano di tempi relativamente lunghi perché avvenga una "ricarica" delle aree sorgenti di sedimento. In questi bacini la raccolta di dati storici rivela solitamente una scarsa frequenza degli eventi: ciò rende problematica o impossibile l'analisi probabilistica delle relazioni fra volumi e frequenze e le misure di difesa verranno concepite con riferimento ad un evento di elevata intensità ed associato ad una bassa frequenza, pur nell'impossibilità di definire più esattamente quest'ultima.

V-16.4.1. Considerazioni relative al bacino del Torrente Inferno

Lo studio retrospettivo sugli eventi alluvionali nel bacino del Torrente Inferno è stato presentato in dettaglio in Arattano e Marchi (2001). Come è stato ricordato nel paragrafo dedicato all'acquisizione dei dati, la serie storica dei fenomeni alluvionali del Torrente Inferno riporta pochi eventi e di non sempre univoca interpretazione. Non è pertanto possibile un'analisi statistica delle relazioni fra frequenza e volumi trasportati, e ciò anche per la frequenza relativamente bassa degli eventi stessi. È pertanto impossibile definire degli scenari di maggiore o minore intensità dei fenomeni legati a tempi di ritorno.

Il disporre di un dato quantitativo relativo ad un solo evento, purché di elevata intensità come quello dell'8 luglio, risulta tuttavia utile in vista della definizione di adeguate misure di difesa, se non altro per identificare il possibile ordine di grandezza delle colate detritiche che possono interessare un torrente.

IV-16.5. Sintesi dei risultati

Dall'insieme delle elaborazioni effettuate emerge che per le successive analisi modellistiche si può utilizzare un volume di circa 50.000 m³.

I valori più elevati, risultanti dall'applicazione di alcuni metodi empirici di inviluppo, non sembrano trovare riscontro né in una valutazione del sedimento mobilizzabile basata su informazioni di tipo geologico e geomorfologico, né dall'analisi dei dati storici, dai quali l'evento dell'8 luglio 1996 sembra emergere come il maggiore fra quelli avvenuti negli ultimi 100 anni.

Colate detritiche di volume più elevato potrebbero aversi se si verificassero ingenti crolli di roccia nella zona di testata del bacino. Periodici sopralluoghi dovrebbero consentire di osservare tale evenienza: la stima del volume potrebbe essere conseguentemente aggiornata aggiungendo alla stima proposta il volume di materiale detritico che si fosse eventualmente reso disponibile.

IV-17. VELOCITÀ MEDIA E PROFONDITÀ DI FLUSSO DELL'APICE DEL CONOIDE

In riferimento all'evento del 7-8 luglio 1996, per operare una ricostruzione dei valori di Q_c , della altezza massima, h_{max} e della velocità media, U in corrispondenza all'apice del conoide, si può assumere che la Q_c non sia diminuita tra la sezione di stima della portata e l'apice conoide. Se dunque si ipotizza una Q_c di 760 m³/s, il valore più alto fra quelli stimati (tabella IV-8), ne deriverebbe una portata per unità di larghezza del canale q_c pari a 41 m³/s/m. Tenuto conto di una pendenza media a monte della sezione 1 rilevata dal SPRGMS della Regione Piemonte (Ben et al., 2000), pari a circa 17° è possibile stimare una h_{max} , facendo ricorso al grafico riportato in figura IV-14, che correla la portata per unità di larghezza del canale alla profondità di flusso per fluidi di diverse caratteristiche reologiche.

Ipotizzando un comportamento di tipo laminare, h_{max} risulterebbe prossima a circa 4 m, ipotizzando un comportamento dilatante, h_{max} arriverebbe a 4.6 m.

Appare opportuno tener conto dell'altezza con cui i 750 m³/s sono transitati in corrispondenza alla sezione dove è stata stimata la portata, in quanto maggiormente indicativa del comportamento della colata effettivamente verificatasi nel Torrente Inferno. Così facendo si ottiene una h_{max} di 6.4 m. Nota h_{max} , U risulta pari a 6.5 m/s (Arattano e Marchi, 2001).

I valori così stimati possono essere utilizzati per simulare l'espansione sul conoide di un evento dello stesso ordine di grandezza di quello dell'8 luglio 1996.

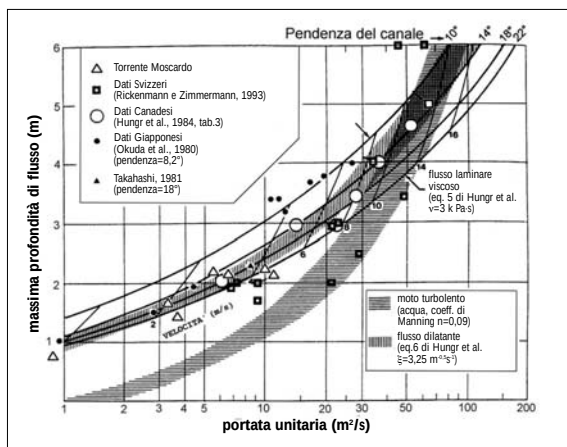


Figura IV-14. Relazione fra portata unitaria e profondità di flusso (modif. da Hungr et al., 1984)

IV-18. STUDIO DEI POSSIBILI INTERVENTI PASSIVI E DEI SISTEMI DI ALLERTAMENTO E CONTROLLO DEL FENOMENO

Le misure per la difesa di infrastrutture ed abitati dalle colate detritiche si possono suddividere in interventi di tipo *attivo* e interventi di tipo *passivo*. Gli interventi di tipo *passivo* sono così chiamati perché non prevedono interventi diretti sul fenomeno pericoloso volti ad arrestarlo, cambiarne il percorso e simili. Gli interventi di tipo *attivo* richiedono invece un diretto intervento sul fenomeno fonte di pericolo, in modo da controllarne e ridurne i possibili danni.

Gli interventi di tipo *passivo* includono la delimitazione e la mappatura delle aree a rischio e la conseguente formulazione di disposizioni pianificatorie che facciano divieto di utilizzare l'area minacciata sia in modo permanente che soltanto in condizioni di pericolo imminente.

I *sistemi di allertamento* non prevedono interventi diretti sul fenomeno che determina il pericolo e possono essere fatti dunque rientrare nella categoria degli interventi di tipo *passivo*.

In molti casi le misure di tipo *attivo* contro le colate detritiche, quali costruzione e manutenzione di bacini di deposito, di briglie, di rivestimenti di sponda ecc., oltre a risultare alquanto onerose, possono non essere in grado di garantire completa sicurezza per gli abitanti dei paesi ubicati sui conoidi e per gli utenti delle infrastrutture viarie che li attraversano. Dunque un loro abbinamento a misure di tipo *passivo* risulta a volte indispensabile per una più efficace e completa azione di prevenzione e difesa.

In alcuni casi, particolarmente per le infrastrutture

di tipo viario, e specialmente per la viabilità secondaria, le misure di tipo *passivo* possono risultare le uniche praticabili nell'immediato, a causa dei ristretti tempi di intervento a seguito di un evento, dell'eccessiva onerosità degli interventi strutturali rispetto al valore dei beni da proteggere ed alla bassa probabilità di danni alle persone.

A loro volta, le misure di tipo *passivo* non sono sempre affidabili; in particolare i falsi allarmi talvolta provocati dai sistemi di allertamento automatico fanno sì che essi siano non di rado malvisti dai responsabili della loro gestione e manutenzione (Hungr. et al., 1987). Ulteriori studi volti a migliorare tali sistemi (Arattano, 1999) appaiono dunque di notevole utilità ed interesse.

Nel seguito saranno brevemente esaminati gli interventi di difesa di tipo *passivo*.

IV-18.1. Delimitazione e mappatura delle aree a rischio

Tra le diverse tipologie di misure di difesa di tipo *passivo* verranno esaminate nel seguito quelle più adatte ad essere eventualmente applicate alla attuale situazione presente sul Torrente Inferno.

Una colata detritica può arrecare danno in tre modi diversi:

1. quando la pendenza è sufficientemente elevata ed il moto è confinato, manufatti ed altri oggetti possono essere distrutti a causa del violento impatto dinamico prodotto dalla colata stessa.
2. nelle parti esterne della zona di deposizione la velocità delle colate è relativamente bassa e tale è anche la forza di impatto che esse possono esercitare, tuttavia grandi volumi di detriti in moto possono seppellire terreni e manufatti.
3. a valle della zona di deposizione sussiste un'area relativamente ampia esposta al pericolo di sovralluvionamento nel caso in cui eventi di piena verificatisi tra una colata e l'altra, oppure successivamente ai fenomeni di colata, dovessero incanalarsi lungo percorsi inattesi.

La mappatura delle aree soggette a rischio, dunque, dovrebbe individuare zone soggette a questi tre tipi di danno potenziale.

A tal fine si dovrebbe in primo luogo delimitare l'area di deposito.

IV-18.1.1. Delimitazione dell'area di deposito

Numerosi metodi, di diversa complessità, sono stati proposti per valutare ubicazione ed estensione

delle aree di deposito delle colate detritiche. Nel seguito si prende in esame un approccio sviluppato da Hungr et al. (1987) nel Canada Occidentale.

Per Hungr et al. (1987) il punto più elevato in corrispondenza al quale la fase di deposizione può iniziare è denominato *“punto di deposizione”*. Il *“limite della zona di deposito”* è invece definito come la linea che delimita i confini estremi del possibile percorso della colata.

Il *punto di deposizione* è ubicato in corrispondenza al punto del torrente dove la pendenza scende al di sotto di un limite di 8-12° in presenza di confinamento laterale dell'alveo e 16-20° in assenza di quest'ultimo (Hungr et al., 1987).

Il *limite della zona di deposito* può essere identificato stimando il massimo volume di progetto della colata ed assumendo uno spessore medio per il deposito. L'area di deposito così ottenuta può essere quindi distribuita sul conoide a valle del punto di deposizione, tenendo conto della topografia. Hungr et al. (1987) consigliano un rapporto di 1 (larghezza) a 2 (lunghezza) per tale area. Spessori medi del deposito variabili tra 1.0 e 1.5 m sono ragionevoli per magnitudo delle colate che oscillano tra i 10.000 ed i 50.000 metri cubi (Hungr et al., 1987). I 50.000 m³ di materiale depositato nel luglio 1996 (Arcuri et al., 1998), si sono distribuiti su una superficie di 0.04 km² corrispondenti ad uno spessore medio di 1.25 m.

Per la determinazione della estensione dell'area di deposito è possibile utilizzare anche la formula proposta da Takahashi e Yoshida (1979) e ripresa da Hungr et al. (1984).

IV-18.2. Sistemi di allarme

I sistemi di allarme risultano più adatti a difendere le infrastrutture viarie che i centri abitati, in quanto risulta più semplice impedire in tempo l'utilizzo di una strada ai conducenti in transito su di essa di quanto non lo sia allontanare in tempo gli abitanti di una costruzione in pericolo.

Davies (1997) sottolinea come si renda necessaria un'accurata conoscenza del tempo disponibile dall'eventuale segnalazione d'allarme all'arrivo della colata e del tempo necessario per l'evacuazione per sapere se un sistema di allarme possa o meno costituire un'affidabile e sostenibile strategia di abbattimento del rischio.

In ogni caso è in generale importante affermare con chiarezza che l'uso di sistemi di allarme richiede una accurata educazione della popolazione interessata.

Seguendo le indicazioni di Hungr et al. (1987) i

sistemi di allarme possono essere classificati in tre differenti categorie: sistemi di allertamento anticipato, sistemi di allertamento in corso di evento e sistemi di allertamento post-evento.

I sistemi di allertamento anticipato si propongono di predire il possibile verificarsi di un fenomeno prima che questo avvenga, monitorando le condizioni predisponenti il manifestarsi dello stesso. I più comuni sistemi di questo tipo utilizzano correlazioni tra dati di pioggia ed il verificarsi dei fenomeni (Hungr. et al., 1987; Hall & Davies, 1992; Zhang, 1993; Wilson et al., 1993). Recenti studi hanno tuttavia sottolineato l'estrema difficoltà nell'identificare con precisione attendibili soglie di innesco che derivino da correlazioni tra piogge ed il manifestarsi delle colate (Deganutti et al., 2000). Esperienze maturate nei bacini alpini indicano che i sistemi di allarme basati su misure pluviometriche sono utili per indicare ai responsabili dei servizi di protezione civile il verificarsi di situazioni di preallarme, mentre decisamente minore è la loro affidabilità per la diretta diffusione di allarmi destinati alla popolazione o per l'attivazione automatica di misure di emergenza, quali l'interruzione della circolazione stradale e ferroviaria.

I sistemi di allertamento in corso di evento prevedono il monitoraggio in tempo reale degli eventi e, dunque, individuano il manifestarsi di una colata mentre questa sta già avvenendo, dando l'allarme in modo che le persone interessate possano essere informate.

I sistemi di allertamento post-evento sono invece intesi ad individuare le colate detritiche una volta che queste si siano manifestate, in modo da poter intraprendere appropriate contro-misure successivamente all'evento. Tali sistemi vengono dunque utilizzati in condizioni di limitato rischio per le vite umane, come per esempio lungo reti ferroviarie non intensamente trafficate per informare di intervenute esigenze di manutenzione della linea (Hungr et al., 1987).

Questi tre diversi tipi di sistemi allarme sono stati analizzati in dettaglio da Arattano e Marchi (2001).

IV-19. LINEE PROGRAMMATICHE PER LA DIFESA E L'USO DELLA ZONA DI CONOIDE

Per l'individuazione di corrette procedure di analisi e studio di bacini soggetti a fenomeni di colata detritica e per la difesa della zona di conoide è importante raccogliere una buona base di dati di campagna nell'ambito del territorio regionale interessato. La stima dei massimi volumi mobilizzabili, delle massime velocità e portate solide comporta

ancora oggi un notevole grado di approssimazione. Un passo in avanti potrà essere compiuto a livello locale operando un'attenta ed accurata raccolta di dati a seguito di eventi parossistici.

Le ricerche condotte in bacini appositamente attrezzati (Arattano et al., 1997) costituiscono una fonte insostituibile di dati, fornendo valori sperimentali di parametri quali velocità, portate, volumi defluiti, forze di impatto. La conoscenza di questi parametri può essere utilizzata per lo sviluppo di misure di difesa di tipo attivo (opere di sistemazione) e passivo (sistemi di allarme). Peraltro, l'impegno richiesto dalla loro gestione e la difficoltà di trovare siti idonei limita tali ricerche a pochi casi.

Emerge dunque l'importanza dei rilievi da eseguire immediatamente dopo gli eventi alluvionali. Tali rilievi sono spesso effettuati da istituti di ricerca impegnati nel settore, quali gli Istituti CNR IRPI, e dai servizi tecnici di amministrazioni particolarmente attente. Recentemente, un progetto denominato DOMODIS, promosso dalla International Association of Geomorphologists, si è prefisso l'obiettivo di affinare le procedure per i rilievi in corso di evento e nelle fasi immediatamente successive. Fra i risultati di DOMODIS si segnala un manuale, attualmente in fase di preparazione, che descrive le modalità di esecuzione dei rilievi di campagna in corso di evento e nelle fasi immediatamente successive.

Di particolare importanza risulta la stima del volume di materiale depositato sui conoidi ogni volta che fenomeni di colata interessino il territorio regionale. I metodi per la stima del volume delle colate detritiche esposti in precedenza nel paragrafo 4 devono infatti potersi basare su dati originali raccolti nella regione da esaminare. A tal fine servirebbe poter disporre di una dettagliata descrizione topografica del conoide ante-evento e poter ricorrere a rilievi topografici o tramite GPS successivamente ad un evento e prima della rimozione del materiale. Qualora il dettaglio delle carte topografiche disponibili non fosse sufficiente, cartografie in scala 1:2000 o superiore potranno essere ottenute tramite la restituzione fotogrammetrica di foto aeree ottenute da voli eseguiti a quote sufficientemente basse. Si potrà ricorrere anche al rilievo dei conoidi tramite tecniche aerofotogrammetriche eseguendo un volo ad hoc prima della rimozione del materiale.

Sarebbe inoltre di estrema utilità effettuare, ove possibile, una stima della velocità media e della portata al colmo individuando tratti curvilinei del torrente ove la colata abbia lasciato tracce del suo passaggio. Si può in tal caso ricorrere al metodo di stima di velocità di Johnson e Rodine (1984) basato

sul rilievo topografico del sovranzo che si verifica in presenza di una curva per effetto della forza centrifuga, come hanno fatto Chiarle e Luino (1998) per il Torrente Inferno. Gli elementi fondamentali del metodo di Johnson e Rodine (1984) per la stima della velocità di una colata detritica basata sul rilievo del sovranzo in curva sono riportati in Arattano e Marchi (2001).

Disporre di una misura di portata al colmo e di una misura di volume per uno stesso evento consentirebbe una validazione reciproca dei valori ottenuti. Nel tempo si potrebbe giungere alla compilazione, per la regione piemontese, di grafici simili a quelli presentati in Arattano e Marchi (2001) ed ottenuti da VanDine (1996), Hungr et al. (1984), Takahashi (1991), Mizuyama et al. (1992) e Rickenmann e Zimmermann (1993) in Canada, Giappone e Svizzera.

Un metodo per la misura della velocità e del volume certamente più preciso di quello della sopraelevazione è costituito dall'uso di due sensori ad ultrasuoni disposti lungo il torrente ad una distanza nota tra di loro. Tale metodo è stato impiegato da Arattano et al. (1997) per la stima dei volumi defluiti nel Torrente Moscardo, attrezzato dal CNR IRPI per il monitoraggio delle colate detritiche.

Gli elementi fondamentali per il calcolo del volume tramite sensori ad ultrasuoni sono riportati in Arattano e Marchi (2001).

Il principale limite del metodo è il requisito di un torrente che garantisca una frequenza di colate detritiche tale da giustificare il costo delle installazioni di rilevamento.

IV-19.1. Ulteriori osservazioni e misure post-evento in bacini interessati da colate detritiche

Riassumiamo nel seguito le ulteriori osservazioni e misure post-evento che risultano essere utili in bacini interessati da colate detritiche. Vengono segnalati solo i rilievi più importanti: indagini più dettagliate potrebbero risultare di difficile realizzazione poichè la gestione dell'emergenza impone solitamente altre priorità. Quanto rilevato in campagna deve venire riportato su supporti cartografici in scala adeguata. Le varie fasi dei rilievi devono essere anche integrate da un'adeguata documentazione fotografica.

Nella zona di innesco si dovrà procedere all'individuazione delle zone da cui ha avuto inizio il fenomeno e al riconoscimento delle modalità di innesco.

Lungo il canale di deflusso interessato dalla colata devono essere effettuati alcuni rilievi topografici

di sezioni trasversali e del profilo longitudinale dell'asta torrentizia, oltre ai rilievi richiesti per la ricostruzione indiretta della portata di picco. Sempre lungo il canale interessato dalla colata detritica vanno inoltre rilevate le principali aree instabili o in erosione che hanno operato come sorgenti di sedimento in occasione dell'evento alluvionale.

Il rilievo dei depositi terminali, solitamente accumulati sul conoide alluvionale del torrente, è necessario per la valutazione del *runout* della colata (massima estensione longitudinale del deposito) e per la determinazione dei volumi di detrito depositati.

I rilievi di campagna comprendono la delimita-

zione cartografica dell'estensione dei depositi, la valutazione degli spessori sulle varie parti del conoide e l'esecuzione di rilievi granulometrici. La caratterizzazione granulometrica dei depositi è essenziale per una corretta descrizione dei fenomeni.

Inoltre, il riconoscimento di colate a matrice fangosa rispetto a colate di tipo granulare è molto importante per le successive analisi quantitative dei fenomeni.

I rilievi granulometrici della frazione grossolana vengono eseguiti con procedure di tipo numerale sui depositi superficiali, adottando il metodo del quadrillage (Cailleux et Tricart, 1959).

CONTRIBUTO DELL'ISTITUTO SCIENZE DELLA TERRA DEL CANTON TICINO

IV-20. INTRODUZIONE

I flussi di detrito e, più in generale, i pericoli legati all'attività torrentizia in ambiente alpino rappresentano per gli insediamenti e le vie di comunicazione un ingente pericolo, il quale può essere tuttavia sensibilmente ridotto attraverso un'attenta attività pianificatoria e la determinazione delle zone di pericolo. Per la pianificazione territoriale ad ampia scala (livello regionale) si rivelano assai utili carte aventi carattere indicativo dei pericoli e dei rischi presenti; è a questo livello, soprattutto a causa dei costi altrimenti proibitivi dei sopralluoghi, che trovano applicazione modelli matematici semplificati e metodi che fanno uso di grandezze morfologiche e delle proprietà del terreno. A livello comunale devono al contrario essere oggetto di analisi i singoli torrenti e deve essere prodotta una dettagliata carta dei pericoli.

In questo ampio spazio di pianificazione e di verifica di dettaglio trova applicazione, accanto ai sopralluoghi mirati e all'esperienza del geologo, la modellistica matematica dei processi in esame.

È in questo contesto e in quest'ottica che all'interno dell'azione 4 del programma INTERREG di ricerca fra Regione Piemonte e Cantone Ticino si è

inserita una parte specificatamente modellistica, armonizzata e strettamente collegata agli altri punti del programma di ricerca.

IV-21. IL CASO DI STUDIO

Il bacino del Rio Inferno si trova sul versante del Monte Mottarone in destra idrografica del torrente Strona, nel comune di Omegna e presenta un'estensione pari a 1.89 km². L'altitudine massima è di 1435 m s.l.m., quella minima di 269 m s.l.m., con pertanto un'escursione altimetrica di poco inferiore ai 1200 metri. La lunghezza dell'asta principale è di 2288 m.

Il bacino oggetto di studio e in particolare l'evento dell'8 luglio 1996 sono descritti e documentati in dettaglio nella relazione della Direzione dei Servizi tecnici di prevenzione regione Piemonte (Ben et al., 1999) a cui si rimanda per maggiori particolari.

L'evento pluviometrico dell'8 luglio del 1996 ha interessato i versanti del monte Mottarone e del Monte Zeda nelle province di Novara e Verbania. Tra mezzogiorno e la mezzanotte del 7 luglio nella regione erano già piovuti 50 mm. Il giorno 8 sono state misurate in 6 ore precipitazioni cumulate oltre i 150 mm, raggiungendo localmente i 200 mm. L'evento più intenso è stato registrato tra le ore 1:00 e le ore 3:00.

Il flusso di detrito formatosi sul Rio Inferno ha lasciato segni tipici di questo fenomeno, quali cordoni laterali, depositi a granulometria eterogenea e grossi blocchi in conoide. Il totale del materiale depositato sul conoide è stato stimato pari a 50.000 m³, le altezze di deposito hanno raggiunto in alcuni punti gli 8 metri di spessore. Sono stati trasportati a valle blocchi di considerevoli dimensioni con volume fino ad alcuni m³.



Figura IV-15. Il conoide del Rio Inferno dopo l'evento dell'8 luglio 1996

IV-22. METODOLOGIA

Nel campo della modellizzazione delle colate di detrito esistono le più svariate ipotesi, dettate essenzialmente dal grado di accuratezza richiesto dall'analisi.

La complessità del modello è quindi determinata dall'entità dei processi fisici che sono considerati e incorporati nel modello.

Nella tabella IV-10 sono riassunti i principali modelli in diversi tipi di classi, facendo riferimento alla classificazione proposta da Zimmermann et al. (1997) e da Kleemayr (1996).

All'interno dell'Azione 4 sono stati testati sull'area di studio, il bacino del Rio Inferno, due differenti modelli: il primo, *debris*, sviluppato all'Istituto di Scienze della Terra (Pisani, 1996) appartiene alla classe dei modelli reologico-idraulici fisicamente basati; il secondo, *dfwalk* (Gamma, 1999), fa uso di diverse ipotesi di lavoro nella descrizione dei processi e può essere classificato fra i modelli empirico-concettuali.

Tabella IV-10. Classificazione dei principali modelli di simulazione dei flussi di detrito

Classe	Ipotesi di base	Riferimenti
Modelli empirico-statistici	I diversi processi coinvolti sono descritti per mezzo di distribuzioni probabilistiche	Price (1976) Ward (1994) Bathurst et al. (1997)
Linea di energia	Fanno riferimento alla pendenza della zona interessata dal distacco e dalla deposizione di materiale, assumendo tale grandezza come rappresentativa dell'energia posseduta dalla massa in movimento	VAW (1992) Zimmermann et al. (1997) Bathurst et al. (1997) Heinimann et al. (1998)
Modelli reologici e fisico-matematici 1. Modelli "Voellmy" 2. Modelli reologici/idraulici	Ipotesi di Voellmy (1955) originariamente utilizzato per simulazione di valanghe Processo governato dalle leggi idrauliche con parametri derivati da ipotesi sulla reologia del materiale	Perla et al. (1980) Takahashi et al. (1991) O'Brien & Julien (1997) Mizuyama et al. (1984)

IV-22.1. Il modello Debris

Il programma per la simulazione della dinamica di un flusso di detrito messo a punto da Pisani, chiamato *debris*, è descritto in dettaglio nel relativo manuale (Pisani, 1996). Qui vengono brevemente riassunti gli elementi fondamentali.

Il programma è basato sul modello dilatante di Bagnold che meglio descrive il comportamento della miscela dal profilo reologico. Due parti compongono il codice di calcolo: una monodimensionale riguardante l'asta del torrente fino allo sbocco sul conoide e una bidimensionale riguardante il conoide stesso.

a. Il primo modulo calcola portata, velocità e altezza del flusso di detrito attraverso una sezione a partire dall'idrogramma di acqua pura. Questo modulo assume una dinamica monodimensionale e un fondo fisso. Il modello fa uso di un'ipotesi relativamente semplice e, in funzione della pendenza della zona in cui avviene l'innescò della colata, della granulometria, dell'angolo di attrito interno del materiale e della concentrazione del deposito da mobilitare, nonché delle caratteristiche della sezione dell'alveo al punto di fuoriuscita, calcola la concentrazione del flusso di detriti, la sua portata e la sua velocità allo sbocco sul conoide.

b. Un secondo modulo per il calcolo del moto, bidimensionale, su un cono alluvionale, necessita di una topografia iniziale di dettaglio (misure spaziate 10-30 metri con una risoluzione dell'ordine dei 10 centimetri), serve a calcolare la dinamica della miscela sul cono in modo da potere delimitare diverse zone sul territorio in funzione del grado di intensità del fenomeno. Questo modulo tiene conto dei processi di deposizione ed erosione che avvengono nel corso dell'evento. In questa parte viene simulato il comportamento del flusso una volta fuoriuscito dall'alveo, ciò che si suppone avvenga all'apice del conoide dove diminuisce la pendenza e l'alveo è meno inciso. Il conoide viene suddiviso in celle quadrate, per ognuna delle quali deve essere nota la quota iniziale. In base alla concentrazione, alla portata e alla velocità del flusso tracimato vengono calcolate diverse grandezze per ogni singola cella: altezza del deposito, altezze e velocità di scorrimento, pressioni, concentrazione e direzione del flusso, nonché i valori massimi di altezza, velocità di flusso e pressione raggiunti durante la simulazione.

I due moduli non valutano la possibilità di innescò ma simulano il moto una volta che esso si sia

innescato. Per valutare la possibilità di innescò si è fatto ricorso ad un approccio fisico. Questo approccio parte dal calcolo dello sforzo di taglio e dello sforzo resistente per valutare lo spessore di materiale distaccato in funzione dell'altezza d'acqua (che potrà essere valutata con un modello idrologico) e stabilisce la classe di moto in cui si ricade. Occorre stabilire a priori le zone nelle quali si ritiene vi sia materiale sufficiente per alimentare il flusso.

All'interno della classificazione generale dei flussi di detrito (cfr. p.es. Costa, 1984), i fenomeni riscontrati in Ticino ed in Italia settentrionale ricadono nell'intervallo degli *stony debris flows*, per i quali verrà adottato il modello dilatante di Bagnold (Takahashi et al., 1991). Da esperimenti di laboratorio (Bagnold, 1954) è stata dedotta la seguente curva reologica (valida per il range pienamente inerziale, nel quale si ricade per granulometrie medie dell'ordine di qualche millimetro):

$$\tau = a \cdot \sin \alpha \cdot \sigma \cdot \lambda^2 \cdot d_{30}^2 \cdot \left(\frac{dv}{dz} \right)^2 \quad (1)$$

$$\text{ove: } \lambda = \left(\left(\frac{C_b}{C} \right)^{1/3} - 1 \right)^{-1}$$

è la concentrazione lineare della frazione solida nella miscela.

IV-22.1.1. Moto su un cono

Per descrivere il moto della miscela sul cono si è fatto ricorso ad un sistema di equazioni più complesse per tenere conto del fatto che:

- La dinamica è bidimensionale.
- I fenomeni di deposizione diventano rilevanti.
- È importante la fase transitoria nel meccanismo di deposizione.

Poiché le caratteristiche del flusso di detrito sul cono sono molto simili a quelle di un fluido continuo prima dell'arresto è possibile utilizzare un sistema di equazioni che tratti la conservazione della massa e della quantità di moto di un fluido in moto gradualmente variato. Pertanto viene utilizzato il seguente sistema di equazioni:

a. Equazioni per la conservazione della massa:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = i \cdot C_s \quad (2)$$

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial CM}{\partial x} + \frac{\partial CN}{\partial y} = i \cdot C_s \quad (3)$$

$$i = -\frac{dz}{dt}$$

ove:

$$M = v_x \cdot h$$

$$N = v_y \cdot h$$

C_s = Concentrazione di scambio

i = Termine di erosione (>0) o deposizione (<0)

z = Altezza del fondo

b. Equazioni per la conservazione della quantità di moto

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial v_x M}{\partial x} + \beta \frac{\partial v_y M}{\partial y} = g \cdot h \cdot \sin \theta_x - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m} \quad (4)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \beta \frac{\partial v_x N}{\partial x} + \beta \frac{\partial v_y N}{\partial y} = g \cdot h \cdot \sin \theta_y - \frac{\tau_{by}}{\rho_m} \quad (5)$$

con:

$$\tau_{bx} = \rho_m \cdot f \cdot h^2 \cdot v_x \cdot \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (6)$$

$$\tau_{by} = \rho_m \cdot f \cdot h^2 \cdot v_y \cdot \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (7)$$

ove $\beta = 1.25$: fattore correttivo della quantità di moto (1.2 per fluidi newtoniani).

$$\rho_m = C \cdot (\sigma \cdot \rho) + \rho$$

IV-22.1.2. Condizioni al contorno

Al bordo sono previsti tre tipi di condizioni al contorno:

- Bordo impermeabile:** celle per le quali non avviene alcuno scambio attraverso i lati esterni della cella stessa. Questa condizione può essere utilizzata per il bordo a monte del dominio o per i bordi a valle in corrispondenza dei quali vi sia un ostacolo naturale o artificiale.
- Bordo assorbente:** celle per le quali non viene effettuato il calcolo dell'altezza di flusso (che viene sempre assunta pari a zero) e della topografia (che viene assunta sempre pari a quella iniziale), ma verso le quali può avvenire uno scambio da parte delle celle adiacenti. Queste celle sono poste in generale in corrispondenza dei bordi a valle del sistema o di corsi d'acqua sufficientemente grandi che possono ricevere l'apporto di materiale, senza però fornirlo.
- Bordo di immissione:** celle in corrispondenza

delle quali viene immesso un flusso di detrito nel sistema. Per queste celle va specificata la portata di flusso di detrito immessa e la direzione di immissione. Il preprocessore calcola anche la velocità di ingresso del flusso di detrito che servirà come condizione al contorno per le equazioni (4)-(5).

Celle impermeabili e assorbenti possono essere inserite anche all'interno del dominio. Le celle impermeabili possono essere poste in corrispondenza di edifici, mentre quelle assorbenti in corrispondenza di grossi corsi d'acqua.

IV-22.1.3. La topografia

Uno degli elementi critici nell'ambito della simulazione si è rivelata la topografia della zona di conoide. Nel caso presente si disponeva del Modello Altimetrico Digitale Regionale del servizio cartografico della Regione Piemonte. Le altitudini sono date ai nodi di un reticolo formato da maglie quadrate di 50 m di lato. Si tratta di un rilievo fotogrammetrico a partire dalle riprese aeree utilizzate per la costruzione della carta tecnica regionale in scala 1:10.000.

La risoluzione a 50 m è risultata insufficiente; si è perciò proceduto ad una digitalizzazione a schermo della carta 1: 5000, sulla quale figurano le isoipse ogni 5 m. L'immagine ottenuta con la digitalizzazione, riportata in figura 16, è risultata di qualità superiore a quella ottenuta dal modello altimetrico digitale regionale, in particolare per quel che concerne l'incisione dell'alveo, elemento importante per la simulazione. Si sono riscontrate piccole differenze tra la griglia di 5 m e di 10 m la cui influenza sui risultati è stata oggetto di verifica.

IV-22.1.4. I dati di Output e la loro utilizzazione

Il livello di vulnerabilità, legato più in generale alla magnitudo del fenomeno, è principalmente connesso alla quantità di materiale che eccede la capacità di trasporto del canale da un lato ed alle velocità con cui la massa si propaga e si deposita dall'altro. Il fenomeno di deposizione non interessa solitamente tutto il conoide, ma si presenzia in posizione distale con lobi laterali di varia dimensione (Maraga et al., 1998). Hungr et al. (1987) hanno identificato due livelli di pericolosità: *direct impact zone*, nella zona prossima al torrente, e una *indirect impact zone*, dove la propagazione della colata si esaurisce. Integrando i criteri sopra esposti, il programma *debris* fornisce in uscita, su

Tabella IV-11. Classi di intensità relative alla colata di detrito

Tipo di moto	Condizione	Intensità	Codice
Moto fluido	$v \cdot h < 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ e $h < 0.5 \text{ m}$	bassa	1
	$0.5 \text{ m}^2/\text{s} \leq v \cdot h < 2 \text{ m}^2/\text{s}$	media	2
	e/o $0.5 \text{ m} \leq h < 2 \text{ m}$		
	$2 \text{ m}^2/\text{s} \leq v \cdot h$ e/o $2 \text{ m} \leq h$	alta	3
Flusso di detrito	$P < 30 \text{ kPa}$ e $z < 1 \text{ m}$	bassa	4
	$30 \leq P < 300 \text{ kPa}$	media	5
	e/o $1 \text{ m} \cdot z < 2 \text{ m}$		
	$300 \text{ kPa} \leq P$ o $2 \text{ m} \leq z$	alta	6

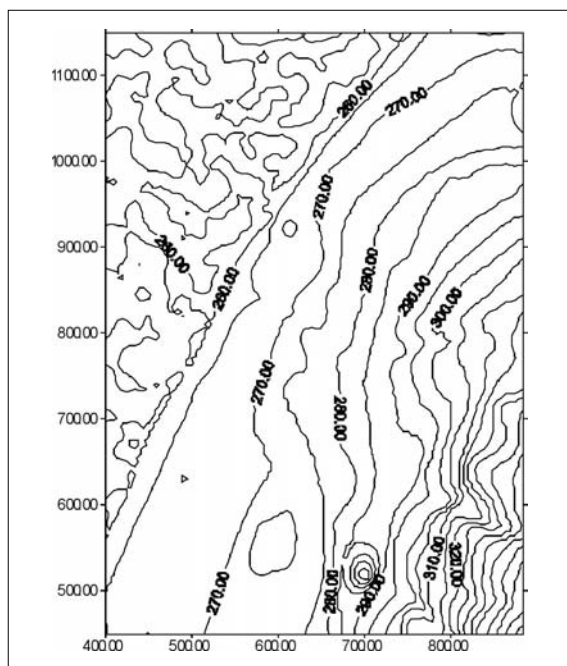


Figura IV-16. Interpolazione
dei dati digitalizzati,
maglie di 5 m.

Essendo le condizioni di moto (colata di detrito o moto fluido) fortemente influenzate dal diametro medio (d_{50}) utilizzato, si sono effettuate ulteriori simulazioni con un d_{50} prima pari a 100 mm, poi pari a 10 mm. I risultati di quest'ultima simulazione sono riportati in figura IV-17 per quanto riguarda le classi di intensità calcolate in uscita dal modello *debris*.

Per la simulazione con un d_{50} di 10 mm il fenomeno di flusso di detrito raggiunge il fondo del conoide. Si nota inoltre che l'altezza di deposito di 8 m, riscontrata nell'evento reale, non viene mai raggiunta nelle simulazioni.

I risultati delle prime simulazioni hanno evidenziato come il movimento sotto forma di flusso di detrito si fermi quasi subito, mentre a valle si ha solo moto fluido, mostrando una scarsa corrispondenza con quanto documentato dal rilievo post-evento.

IV-22.1.6. Simulazioni con un'esonazione in più punti

I risultati ottenuti dalle prime simulazioni sono da imputare, come sopra già ricordato, a diverse fonti di incertezza e di errore. Oltre a quelle ricordate è importante analizzarne una in maggior dettaglio. Il modello è in grado di simulare due possibilità:

- Il flusso di detrito abbandona totalmente il letto del torrente in corrispondenza di una precisa sezione.

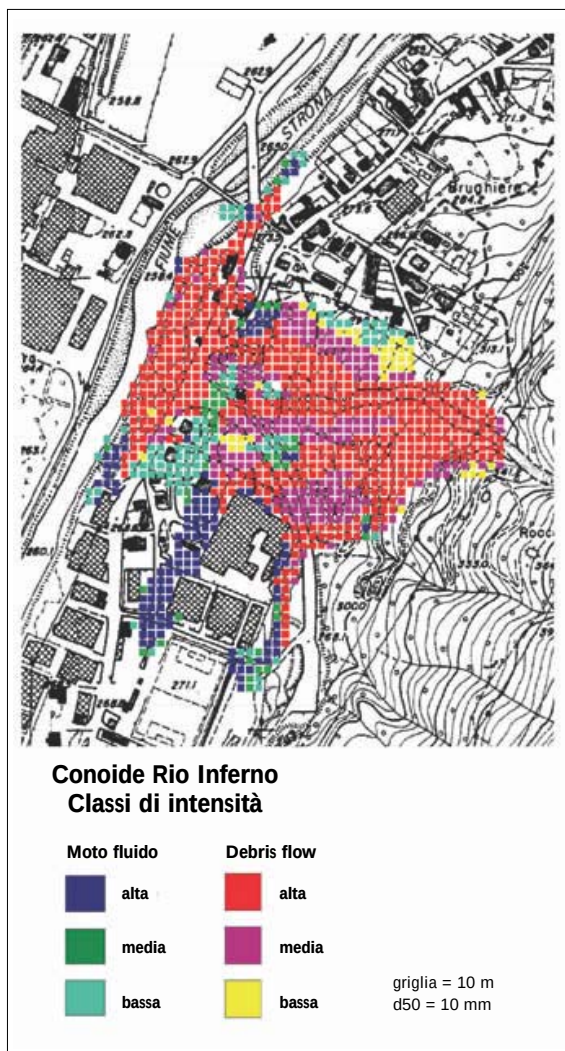


Figura IV-17. Simulazione con un punto di esondazione - modello debris

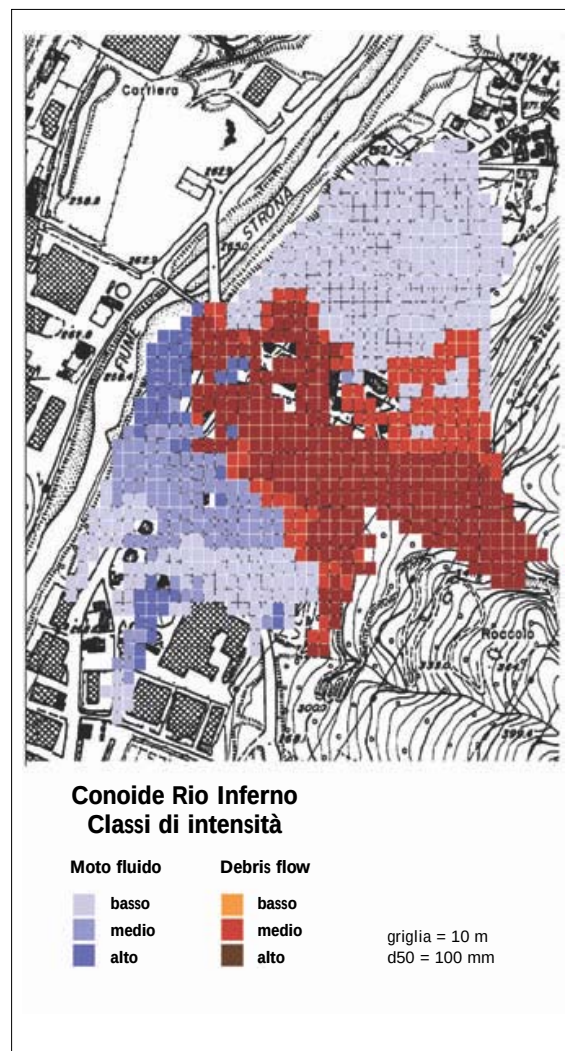


Figura IV-18. Simulazione con più sezioni di esondazione - modello debris

- Il flusso di detrito continua a scorrere nell'alveo e solo una parte, che eccede la capacità di trasporto della sezione, invade il conoide.

In realtà quello che si osserva durante un evento è spesso una situazione intermedia, dove successive esondazioni si accompagnano a un parziale scorrimento della colata nell'alveo del torrente.

Per considerare questo fenomeno il programma *debris* è stato modificato in modo da permettere la fuoriuscita del materiale in più di una cella.

La simulazione condotta in queste condizioni, mantenendo invariati gli altri parametri di riferimento ha fornito risultati senz'altro migliori e molto vicini alla realtà. I risultati della simulazione sono riportati in figura IV-18.

Il flusso di detrito interessa ora tutto il conoide fino alla confluenza nel fiume Strona. La parte toccata dalla deposizione di materiale risulta ancora ridotta rispetto alla realtà in sponda destra, dove il modello simula solamente flusso di acqua e sedimenti. Anche le altezze di deposito raggiunte risultano in questo caso confrontabili con quelle osservate, con un'altezza massima simulata di quasi 9 metri ed osservata di circa 8 metri; i problemi riguardanti l'erosione risultano molto più limitati che precedentemente.

Il calcolo del volume depositato in base all'ultima conformazione del modello indica un valore di 58.900 m³ depositati, non molto discosto dalle stime ottenute dai rilievi in situ effettuati dai Servizi Tecnici della Regione Piemonte, che indicano un

volume mobilizzato di circa 50.000 m³.

L'area interessata complessivamente da deposizione è stimata dal modello pari a circa 5 ha.

È interessante osservare come l'ultima simulazione sia in grado di riprodurre almeno parzialmente l'erosione di fondo osservata durante il rilievo e visibile nel rilievo morfologico post-evento (Ben et al., 1999). Sul lobo destro della colata vi è infatti una zona con altezze di deposizione negative, riportate in figura IV-19, rappresentata in colore verde. Tale osservazione richiede peraltro ulteriori affinamenti e studi al fine di meglio definirne le caratteristiche e l'entità.

IV-22.2. Il modello Dfwalk

Dfwalk è un modello empirico-concettuale per il calcolo delle superfici potenzialmente interessate da un flusso di detrito. Il modello, nello stato attuale di sviluppo, è costituito da una combinazione di diversi modelli e/o approcci, in parte già largamente conosciuti e applicati con successo. Esso fa uso infatti della tecnica *random walk* (cammino casuale) e del metodo di simulazione Montecarlo, del modello di velocità a due parametri (Perla et al., 1980), dell'ipotesi della pendenza media e di un semplice modello per simulare la sedimentazione del flusso di detrito (Scheidegger, 1975).

Le diverse componenti così collegate forniscono un modello relativamente semplice e robusto per la determinazione delle zone di pericolo.

Le simulazioni del modello si basano principalmente su un modello digitale del terreno in formato raster, sulla direzione del flusso derivata da tale modello digitale, sulla definizione e/o conoscenza delle celle di innesco della colata, così come eventualmente sulla conoscenza spaziale delle zone ad alta suscettibilità al rischio, come per esempio insediamenti abitativi, vie di comunicazione, ecc. Dfwalk può essere applicato anche per quelle zone dove non è disponibile

alcuna informazione riguardo la reologia delle colate oppure dove i rilievi topografici dell'alveo risultano scarsi o assenti.

Le diverse tecniche utilizzate dal programma per simulare i processi coinvolti possono essere riassunte nella tabella IV-12 qui di seguito riportata.

L'algoritmo di calcolo può essere suddiviso in 5 passi:

1. Una o più celle di innesco vengono definite, in base all'esperienza di un esperto o utilizzando un modello di predisposizione.
2. A partire da ogni celle definita "di innesco" viene eseguito un *random walk*, nel quale la cella successiva nel percorso viene definita casualmente fra l'insieme delle celle confinanti e a quota inferiore. La possibilità di selezione delle celle è proporzionale alla pendenza locale e tiene conto anche della direzione del flusso fino a quell'istante. Il criterio di interruzione del *random walk* si basa sul criterio della pendenza media (cfr. paragrafo 3.2.1).
3. Il percorso così risultante in corrispondenza di alcuni punti base viene suddiviso in segmenti di uguale lunghezza.
4. Per ogni segmento così definito viene determinata la velocità in base al modello a 2 parametri di Perla (Perla et al., 1980). Il primo segmento in corrispondenza del quale la velocità risulta nulla definisce il raggio d'azione della colata.
5. Utilizzando la funzione di sedimentazione il materiale viene depositato in maniera inversamente proporzionale alla velocità calcolata al punto 4. Il modello digitale del terreno viene modificato in base all'avvenuta deposizione e si procede al calcolo con il successivo *random walk*, fino ad esaurimento del materiale potenzialmente mobilizzabile.

Tabella IV-12. Processi di un flusso di detrito e approccio utilizzato all'interno del modello dfwalk

Componente	Ipotesi	Tipo di approccio
Moto del flusso di detrito	Modello a 2 parametri di Perla et al. (1980)	Fisico
Espansione sul conoide	Random walk, simulazione Montecarlo	Empir.-probabilistico
Sedimentazione	Modello funzione della velocità e della pendenza	Empirico-fisico

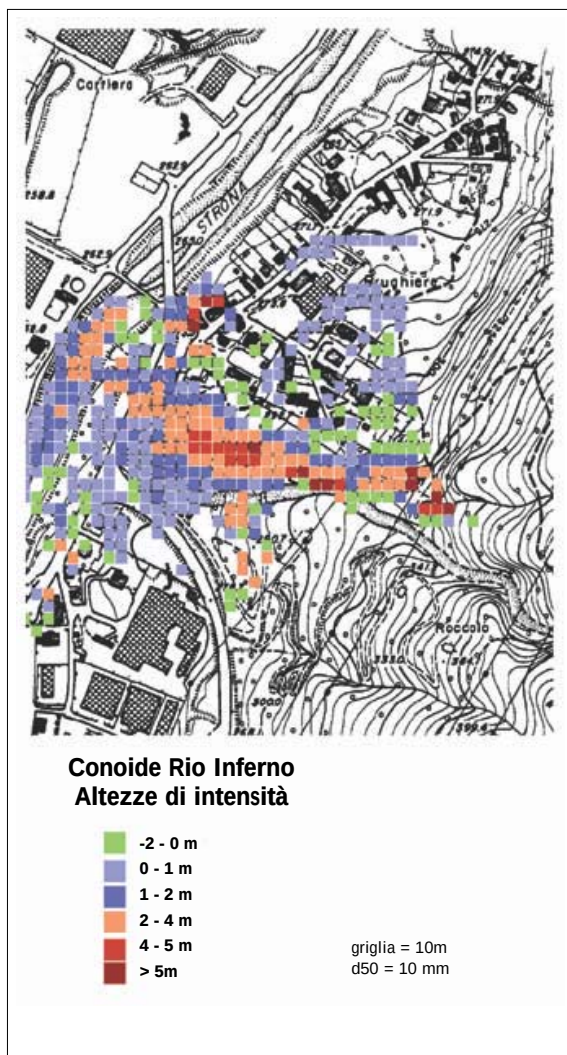


Figura IV-19. Altezze di deposito simulate - modello debris

IV-22.2.1. Modellizzazione della velocità e determinazione del raggio di azione della colata

Come sopra ricordato, il modello di Perla et al. (1980) è un modello sviluppato originariamente per il calcolo della velocità e dell'estensione massima di valanghe. Ipotesi di base rimane quella formulata da Voellmy (1955), ipotesi idraulica cosiddetta *open channel flow*. L'andamento della velocità lungo il percorso è regolato da due parametri di resistenza, μ e ξ . μ è funzione delle proprietà del materiale e della velocità, ξ dipende invece soprattutto dalla geometria della traiettoria.

Il modello di Voellmy venne modificato da Perla et al., introducendo il parametro M/D al posto di ξ ,

dove M rappresenta la massa in movimento e D l'attrito (*mass-to-drag ratio*). La modifica introdotta da Perla consente di svincolarsi dalla problematica della determinazione del punto in corrispondenza del quale la colata comincia a ridurre la sua velocità. Buone indicazioni sull'affidabilità del modello sono state dimostrate da Rickenmann (1990) per la ricostruzione degli eventi accaduti in Svizzera nel 1987, così come durante un ampio confronto di diversi modelli su un bacino naturale altamente strumentato (Rickenmann & Koch, 1997).

IV-22.2.2. Modellizzazione del moto sul cono

Altro aspetto di estrema importanza per la determinazione delle zone di pericolo è rappresentato dal calcolo del moto della colata sul conoide di deiezione. Si intende in questo caso quando la colata abbandona l'alveo naturale e ricopre le superfici limitrofe. Tutte le superfici potenzialmente interessate dal passaggio della colata sono quelle che mostrano una topografia cosiddetta divergente. Tale fenomeno può pertanto essere descritto solamente in funzione di grandezze topografiche, e risulta indipendente dalla velocità e dai volumi della colata (evidentemente la velocità al momento dell'uscita dall'alveo riveste un'importanza nella determinazione del percorso massimo del materiale e, di conseguenza, nella determinazione del volume accumulato).

È in questo punto che la qualità del modello digitale del terreno riveste un ruolo di primaria importanza, come si è già avuto modo di sottolineare a riguardo del modello *Debris*.

IV-22.2.3. Ipotesi utilizzate

Il moto sul cono viene simulato in *dfwalk* tramite l'utilizzo di successive traiettorie casuali (*random walks*), in cui ogni traiettoria differisce dalla precedente tramite piccole modifiche casuali della topografia (Tecnica Montecarlo). Nella sovrapposizione delle differenti traiettorie si ottiene un'immagine complessiva dell'estensione sul conoide. Per la definizione delle differenti traiettorie è necessario definire un criterio per la scelta della cella successiva. Ciò viene eseguito tramite l'utilizzo di numeri casuali. Nel caso il passaggio possa avvenire solo singolarmente da cella a cella si parla di *single flow directions*, nel caso di più celle possibili a valle si usa il termine *multiple flow directions*.

Diversi sono gli algoritmi sviluppati negli ultimi anni e disponibili in letteratura per la determinazione di grandezze relative a modelli distribuiti e in

particolare per la determinazione del percorso di una particella d'acqua sulla base della topografia. Essi si basano principalmente sul metodo della direzione di massima pendenza, anche se presentano differenti caratteristiche e algoritmi di ricerca [Gamma, 1999], di volta in volta più adatti per l'obiettivo specifico della simulazione.

IV-22.2.4. Multiple flow direction for debris flows (mddf)

L'utilizzo di un codice di calcolo del tipo *multiple flow directions* risulta evidentemente necessario nel caso di simulazione di colate di detrito, in quanto l'algoritmo deve essere in grado di fornire, all'interno di un range di pendenze che variano da 0° ad una pendenza limite β_{lim} , una serie di potenziali celle candidate ad essere le celle occupate dal flusso allo step successivo della simulazione. Devono perciò essere soddisfatte alcune condizioni:

- Nell'ambito di pendenze elevate, in prossimità della pendenza β_{lim} i flussi di detrito seguono primariamente la linea di massima pendenza; deviazioni da questo percorso sono ammesse solamente verso celle con pendenza comunque vicina a quella massima.
- Per pendenze di media entità vengono considerate come celle candidate ad accogliere il flusso anche celle con pendenza ridotta; in questo modo viene conferito alla colata la possibilità di espandersi.
- In un terreno piatto o a debole pendenza praticamente tutte le celle possono essere interessate dal flusso, permettendo così un'espansione pressoché illimitata sulla parte terminale del conoide.

La definizione di pendenza elevata o ridotta è effettuata in riferimento alla pendenza β_{lim} . Per pendenze superiori a questo valore è ammessa solo la traiettoria che segue il percorso più ripido.

Un parametro importante di simulazione del modello è pertanto la definizione della pendenza limite β_{lim} .

Tutte le pendenze delle celle adiacenti alla cella in esame vengono riferite a questo valore, tramite un valore di pendenza relativa che permette di svincolare il metodo da una dipendenza locale e ne consente l'applicazione a casi con topografia molto differente.

Per ogni cella adiacente i viene definita la pendenza relativa γ_i come rapporto fra la tangente locale e la tangente relativa alla pendenza limite fissata:

$$\gamma_i = \frac{\tan \beta_i}{\tan \beta_{lim}}, \quad \beta_i \geq 0, i \in N \quad (8)$$

La pendenza relativa massima risulta pertanto:

$$\gamma_{max} = \text{Max} (\gamma_i) \quad (9)$$

Tramite il criterio *mddf* è possibile definire quali celle, oltre a quella di pendenza massima sono le possibili candidate per essere occupate dal flusso di detrito:

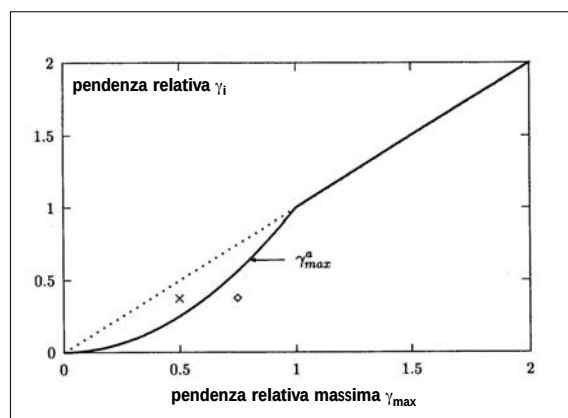
$$\gamma_i \geq (\gamma_{max})^a \quad (0 < \gamma_{max} < 1, a \geq 1) \quad (10)$$

dove a rappresenta il cosiddetto esponente di espansione. Tutte le celle per cui la condizione (10) è soddisfatta sono direzioni consentite di sviluppo della colata. Il numero di celle potenziali risulta pertanto definito:

$$N = \left\{ n_i \left| \begin{cases} \gamma_i \geq (\gamma_{max})^a & \text{se } 0 \leq \gamma_{max} \leq 1 \\ \gamma_i = \gamma_{max} & \text{se } \gamma_{max} > 1 \end{cases} \right. \right\}, i \in N, a \geq 1 \quad (11)$$

Il significato di questo criterio è illustrato graficamente in figura IV-20.

Figura IV-20
Rappresentazione del criterio *mddf* con esponente a pari a 2. Fanno parte delle possibili celle da occupare solo quelle celle adiacenti che, in base alla pendenza limite, sono sufficientemente ripide per soddisfare il criterio *mddf*. La x rappresenta una cella con γ_i pari a 0.375 ($\gamma_{max} = 0.5$) che in questo caso è una delle possibili celle occupabili dal flusso; il segno $\diamond$ mostra una cella con identica pendenza γ_i , ma con un γ_{max} maggiore; poiché il punto si trova al di sotto della funzione limite la cella non può essere invasa dal flusso [da Gamma, 1999]



Sono pertanto possibili percorsi multipli unicamente se la pendenza massima locale è minore della pendenza β_{lim} . Se risulta superiore (cioè $\gamma_{max} > 1$) l'unica traiettoria consentita è quella che segue il percorso di massima pendenza.

Riassumendo questo criterio presenta le seguenti caratteristiche:

- Grazie al valore β_{lim} il criterio *mfd* è calibrabile e utilizzabile per bacini ad elevata pendenza così come per bacini a pendenza ridotta.
- L'ampiezza dell'espansione in zona conoide è controllata tramite il parametro a nel range di pendenze $0-\beta_{lim}$.
- Per valori superiori a β_{lim} non avviene nessuna espansione, vale il criterio *single flow direction*.
- Questo criterio è particolarmente adeguato per l'utilizzo dell'approccio *random walk*, fornendo una lista di possibili celle "candidate" ad essere attraversate dal flusso. In combinazione con un peso associato al valore di pendenza si può così ottenere una tendenza nella direzione di massima pendenza.

Una indicazione sul valore della pendenza limite è fornito dalla ripidezza del conoide da modellizzare. Un conoide rappresenta infatti il risultato integrale della tendenza all'espansione dei precedenti eventi registrati. Perciò la pendenza costituisce il miglior punto di riferimento per la scelta di β_{lim} . Se si impone al modello un valore di β_{lim} alcuni gradi superiore alla pendenza media del conoide, il fenomeno di espansione si comporterà in maniera simile alla realtà.

IV-22.2.5. Modellizzazione della sedimentazione

La zona di conoide rappresenta il principale luogo candidato alla sedimentazione e raccolta di un flusso di detrito. Teoricamente esiste una tendenza alla esondazione in ogni cella del conoide, nel caso il corso d'acqua non sia particolarmente inciso. Esondazioni possono essere causate sia da una successiva deposizione in zone a scarsa pendenza, sia da improvvisi accumuli di materiale e formazione di serre in corrispondenza di strettoie e/o ponti. Per la valutazione del pericolo su un conoide è di fondamentale importanza la stima del comportamento di una colata all'istante di uscita dalla sezione del corso d'acqua.

Il calcolo delle possibili traiettorie della colata, descritto nel paragrafo precedente, non consente evidentemente la simulazione di una fuoriuscita dal corso d'acqua: esso infatti determina le traiettorie in

base alle *flow directions*, definite confrontando le quote della cella con quelle delle celle limitrofe, a quote inferiori. Il meccanismo di ostruzione viene pertanto simulato attraverso un'ipotesi di sedimentazione, ricavata in base a quanto segue.

1. Se la velocità o la pendenza scende sotto un valore limite, vengono depositati sedimenti nelle celle che costituiscono il *random walk*.
2. Esiste una proporzionalità inversa tra velocità e pendenza e il materiale depositato. La deposizione è massima con velocità nulla e raggiunge il valore nullo in corrispondenza della velocità limite di moto, sopra la quale è ancora possibile il moto.
3. Questo principio consente la ricostruzione di una classica "lingua di deposizione", spesso osservata nella realtà, con spessori via via decrescenti verso monte, e la formazione di "argini naturali" che verranno considerati come ostacoli topografici nel corso del successivo *random walk*, essendo il modello digitale del terreno continuamente aggiornato.
4. All'interno e all'esterno del letto del corso d'acqua viene utilizzato lo stesso criterio: questo consente di mantenere semplice il procedimento di deposizione.

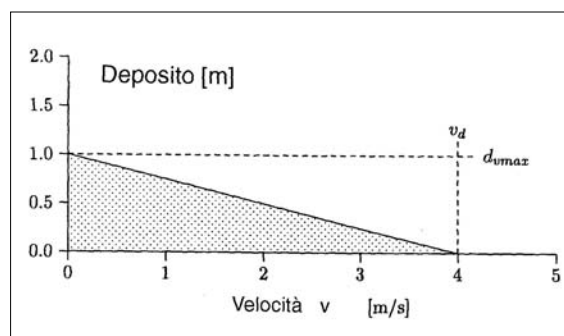


Figura IV-21. Esempio di quantità di deposito sedimentato in funzione della velocità (da Gamma, 1999)

IV-22.2.6. Taratura della velocità

I due parametri di taratura μ e M/D possono essere stimati in maniera ricorsiva per tentativi, valutando graficamente la velocità in funzione della distanza raggiunta dal flusso e la sensibilità dei due parametri di taratura.

Il parametro M/D esercita la sua influenza principalmente sulla velocità nei tratti a pendenza maggiore, al contrario il parametro μ consente di variare

Parametro	Descrizione	Valore finale
μ_{PG}	Pendenza media per la determinazione del raggio di azione	0.1 [-]
μ	Parametro di resistenza al moto del modello di Perla et al.	0.18 [-]
M/D	Mass-to-Drag-Parameter	70 [-]
β_{lim}	Pendenza limite per l'inizio della deposizione	20°
A	Esponente di espansione	2.5 [-]
P	Fattore di persistenza della direzione del flusso	1.5 [-]
F	Numero delle fasi	4 [-]
V_{run}	Volume sedimentato per ogni random walk	100 m ³
V_{max}	Velocità limite per l'inizio della deposizione	7 m/s
$D_{v, max}$	Deposito massimo consentito per velocità nulla	1 m

Tabella IV-13. Valori finali dei parametri utilizzati per la simulazione del Rio Inferno

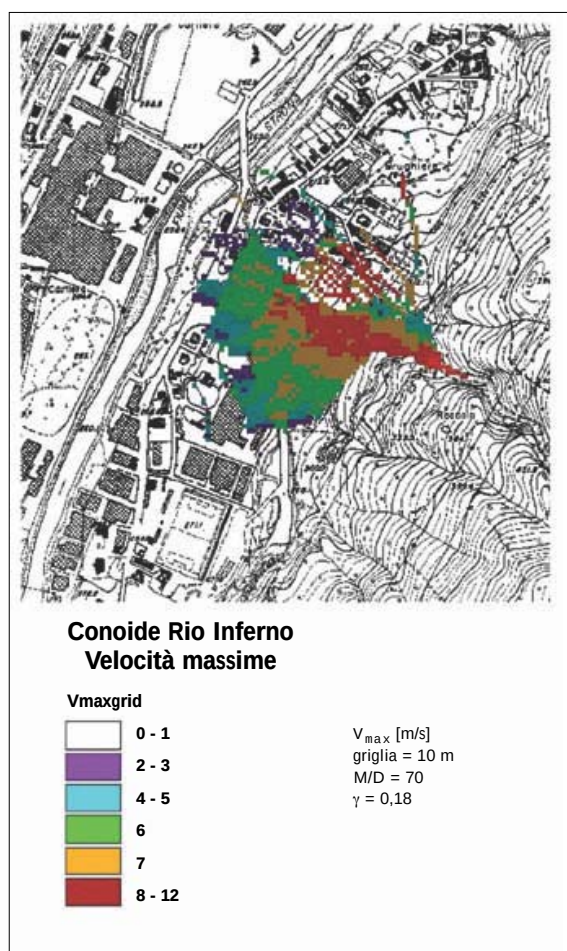


Tabella IV-22. Velocità massime simulate - modello dvfalk

la distanza massima percorsa dal flusso di detrito.

La calibrazione per il bacino del Rio Inferno ha fornito un valore di μ pari a 0.18 e un valore per M/D di 70. Questi valori risultano compresi nell'intervallo di variazione ottenuto da Gamma

(1999) analizzando decine di eventi nella Svizzera occidentale e settentrionale e consentono di classificare l'evento che ha interessato il Rio Inferno come un evento da medio-alto ad alto per quanto riguarda la magnitudo del fenomeno.

I valori di tutti i parametri ottenuti al termine del processo di calibrazione sono riportati in tabella IV-13. Con questo set di parametri sono state condotte le simulazioni i cui risultati sono riportati in figura IV-22 e figura IV-23.

IV-23. CONFRONTO DEI RISULTATI

Analizzando più in dettaglio i risultati delle simulazioni si può osservare e commentare i risultati riportati in figura IV-22, dove sono riportate le velocità massime raggiunte dal flusso di detrito durante la simulazione. Nella zona centrale, principalmente lungo l'alveo del torrente Inferno sono simulate velocità tra 8 e 12 m/s, valori decrescenti si osservano nella parte terminale del conoide, prima dello sbocco nel torrente Strona e allo stesso modo lungo il lobo laterale in sinistra orografica. Da notare in sponda destra singole traiettorie con velocità massima simulata superiore a 7 m/s. Questo risultato è in buon accordo con quanto rilevato dopo l'evento; una conferma che la topografia del territorio e vie di scorrimento artificiali quali strade possono contribuire sensibilmente al rischio di alluvionamento in caso di difese idrauliche sottodimensionate in prossimità degli argini.

I dettagli sulla probabilità di invasione delle singole celle sul conoide sono riportati in figura IV-23.

Sulla base di 500 *random walk*, la cartina mostra le celle interessate dal flusso e il numero di attraversamenti registrati. Oltre alla parte superiore del conoide, dove il flusso rimane sostanzialmente

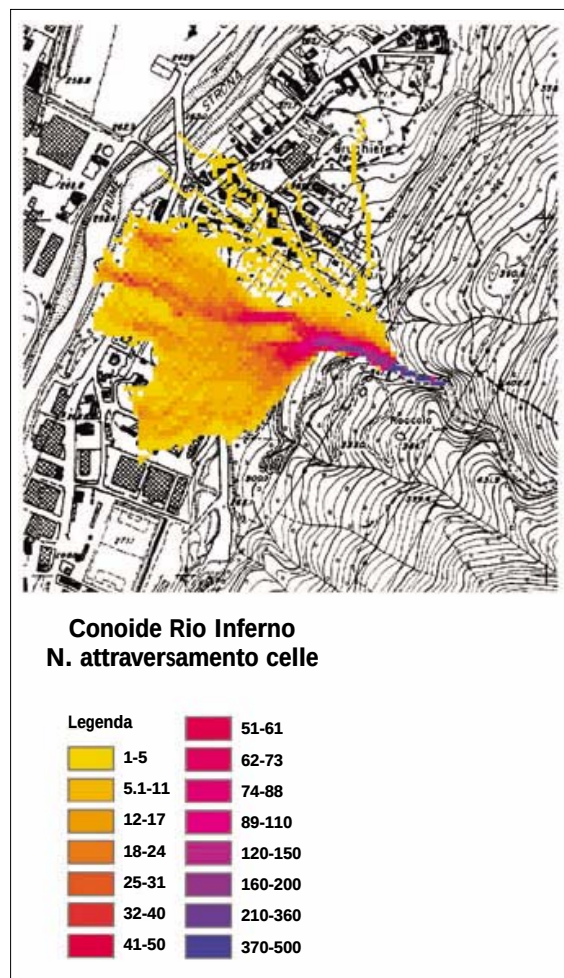
in alveo, si riconoscono due principali direzioni di sviluppo, la prima lungo l'alveo originario, la seconda meno definita e più ampia in sponda sinistra; la sponda destra risulta interessata da un numero di traiettorie limitato, inferiore a 10 (2% dei casi).

Il percorso di massima pendenza, ricavato dall'informazione topografica, mostra come l'alveo del torrente (in blu prima dell'evento) ha subito in seguito alla deposizione uno spostamento verso la sponda sinistra.

La direzione di massima deposizione del materiale ottenuta con il modello *dfwalk* corrisponde sorprendentemente con quella ricavata fisicamente dal modello *Debris*.

Questa può essere considerata un'indicazione importante del progetto: utilizzando la stessa topografia iniziale un modello fisicamente basato (idraulico-reologico) e un modello fisico-empirico-statistico forniscono un risultato molto simile per un evento documentato. Le conseguenze pratiche sull'implementazione e l'utilizzo in parallelo o in alternativa dei due modelli sono riassunte nel paragrafo successivo.

Figura IV-23. Distribuzione delle probabilità assolute di attraversamento delle singole celle in base a 500 random walks - modello *dfwalk*



IV-24. CONCLUSIONI

I modelli idraulico-reologici, quale quello sviluppato all'IST e testato sul caso del Rio Inferno nell'ambito del progetto INTERREG II, costituiscono senza dubbio un'utile e necessario strumento per l'interpretazione e la ricostruzione a posteriori di eventi di *debris flows*.

Si è però constatato durante il progetto come, considerata la caratteristica di aleatorietà propria dei processi che inducono un flusso di detrito (processo stocastico di precipitazione, alta variabilità spaziale e temporale del fenomeno, condizioni locali di instabilità dei versanti, eventualità di un'ostruzione della sezione in alveo a seguito di accumulo di legname, ...), la procedura di identificazione e calibrazione dei parametri sia soggetta a notevole incertezza.

Anche nel caso di eventi pregressi, per la calibrazione dei modelli si deve fare riferimento a delle caratteristiche medie del fenomeno, essendo tuttavia ben documentato in letteratura come le colate presentino spesso un comportamento impulsivo:

all'interno di un singolo evento le principali grandezze in gioco come la velocità, la concentrazione dei sedimenti e la granulometria mostrano una variabilità estrema. La stessa traiettoria seguita dal flusso e la successiva deposizione del materiale sul conoide sono soggette ad estrema incertezza.

Si è potuto constatare dalle simulazioni effettuate che, per quanto riguarda l'influenza di ostacoli come edifici ed altre infrastrutture sul moto della colata, è richiesto un ulteriore affinamento della base topografica e la definizione di accurate condizioni al contorno in corrispondenza di questi ostacoli.

In un contesto previsionale, dove l'interesse è maggiormente rivolto alla determinazione delle aree di pericolo e alla conseguente suddivisione del territorio in zone soggette a diversi livelli di pericolosità, i modelli fisicamente basati si rivelano troppo sofisticati e la calibrazione assai esigente. La parametrizzazione di tali modelli richiede, infatti, la conoscenza approfondita della geometria del letto fluviale, un modello digitale del terreno assai dettagliato, soprattutto nella zona di conoide, e indicazioni precise sulla granulometria e la

concentrazione del materiale movimentato; tali informazioni risultano solitamente non disponibili o richiederebbero in ogni caso un investimento finanziario non confrontabile con l'obiettivo.

Per questa ragione in un contesto pianificatorio si rivelano maggiormente appropriati modelli più semplificati del tipo *dfwalk*, che, accanto ad un approccio empirico-concettuale nella descrizione delle condizioni di innesco e delle caratteristiche fisico-idrauliche del moto, fanno uso di un approccio statistico (simulazione Montecarlo) per la determinazione dell'area soggetta a deposizione sul conoide.

L'utilizzo di due modelli diversi (*debris* e *dfwalk*) all'interno di questo programma di ricerca ha permesso di raggiungere una prima conoscenza di

carattere qualitativo e al tempo stesso quantitativo del grado di pericolo a cui può considerarsi soggetto il conoide del Torrente Inferno, con riferimento in particolare all'evento alluvionale del luglio 1996.

Una integrazione delle classi di intensità definite dal programma DEBRIS in termini di flusso di detrito e moto fluido da una parte, e della probabilità di alluvionamento dall'altra calcolata con il modello probabilistico rappresenta un passo successivo, attualmente in fase di implementazione.

L'elaborazione di carte di rischio, legate sia a parametri fisici e misurabili di intensità del fenomeno (come altezza di deposizione e velocità), che ad una informazione probabilistica costituisce infatti uno strumento ormai indispensabile per pianificatori e decisori (*BUWAL*, 1999).

Bibliografia

ARATTANO M., DEGANUTTI A.M. & MARCHI L., (1997), *Debris Flow Monitoring Activities in an Instrumented Watershed of the Italian Alps*. In: C. Chen (ed), *Debris-flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*: 506-515. Water Resources Engineering Division/ASCE.

ARATTANO M., CHIARLE M., FIORASO G., MARCHI L., MORTARA G., TURITTO O. & TETAMO G., (1996), *Analysis of recent and past debris flow events in the Italian Alpine Region. European Programme in the field of Environment 1990-94*. CE Contract EV5V CT94 0453. Final Report: 31 pp.

ARATTANO M., (1999), *Recenti avanzamenti nelle misure di protezione di tipo passivo contro le colate detritiche torrentizie*. GEAM - Geoingegneria Ambientale e Mineraria 36(1): 57-64.

ARATTANO M. & MARCHI L., (2001), *Relazione Finale Progetto INTERREG II 1994/1999 Italia - Confederazione Elvetica. Collegamento delle reti di rilevamento e condivisione delle esperienze e conoscenze per la gestione del rischio idrogeologico. Azione 4: condivisione di metodi e conoscenze sui processi di lave torrentizie per la difesa dei centri abitati*.

ARCURI G., BARBERO S., BEDONI L.A., BEN G., DRAGO D., LAZZARI A., MAGOSSO P., MARCHISIO C., NEGRO N., PERRONE R., PESCIO R., PONZA M., RUBERTO G., TROISI C., (1996), *Gestione di un evento alluvionale: il caso dell'8 luglio 1996 nel Cusio-Verbanò, Piemonte*. Atti Convegno La prevenzione delle catastrofi idrogeologiche: il contributo della ricerca scientifica: Alba 5-7 Novembre 1996, pp. 89-100.

ARMANINI A., (1999), *Previsione e prevenzione del rischio da colata di detriti*. In: Il rischio idrogeologico e la difesa del suolo: 13-44. Accademia Nazionale dei Lincei, Atti dei Convegni Lincei, n. 154.

BAGNOLD R.A., (1954), *Experiments on a gravity free dispersion of a large solid spheres in a Newtonian fluid under shear*. Proc. R. Soc. London, A 225: 49-63.

BARBERO S. & MARCHISIO C., (1996), *Le precipitazioni del giorno 8 luglio del 1996 sul monte Mottarone*. Pubblicazione del "Servizio Meteo-idrografico e Reti di Monitoraggio" della Regione Piemonte.

BATHURST J., BURTON A. & WARD T., (1997), *Debris flow run-out and landslide sediment delivery model test*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 123(5): 410-419.

BEN G., BEDONI L.A., CONTE R., MAGOSSO P., RUBERTO G., TONANZI P., (1999), *Relazione generale sul bacino del Rio Inferno nel Comune di Omegna (VB)*. INTERREG II; 1994-1999 – Italia Confederazione Elvetica.

BIANCO G., (1999), *Sulla valutazione dei volumi di materiale solido associati a eventi di debris-flow (quale elemento conoscitivo per la scelta delle misure relative al controllo e alla difesa idraulica dei territori e della rete idrografica di fondovalle)*. Atti dell'Accademia delle Scienze di Torino- Vol. 133, pp.1-28.

BIANCO G. & FRANZI L., (2000), *Sui volumi di materiale solido associati ad eventi di debris-flow per la progettazione delle piazze di deposito*. Atti del XXVII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche - Genova, 12-15 settembre.

BIANCO G. & FRANZI L., (2000), *Estimation of debris-flow volumes from storm events*. Proc. Second International Conference on Debris Flows Hazard Mitigation, Taipei, Taiwan, 16-18 agosto, 2000.

BIANCO G. & FRANZI L., (2000), *Collegamento delle reti di rilevamento e condivisione delle esperienze e conoscenze per la gestione del rischio idrogeologico in ambiente alpino*. Programma Interreg II Italia-Confederazione Elvetica, Azione 4, Rapporto conclusivo DITIC Politecnico di Torino.

BIANCO G., (2001), *INTERREG II Italia - Francia - Pubblicazione finale - Volet 5 - Condivisione di metodi e conoscenze sui processi di lave torrentizie per la difesa dei centri abitati*.

BOVIS M.J. & JAKOB M., (1999), *The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity*. Earth Surface Landforms and Processes 24: 1039-1054.

BROCHOT S., (1998), *Etude hydraulique de l'arc de Maurienne de Modane a l'Isere - Estimation des apports sédimentaires des torrents affluents*. Cemagref - Département Equipements pour l'eau et l'environnement, Division Erosion torrentielle neige et avalanches - Groupement de Grenoble.

BROCHOT S., (1998), *Approches globales pour l'estimation de l'érosion torrentielle (apports des versant et production de sédiments)*. Ingénieries-EAT n° 15, septembre 1998, pp. 61 à 78.

BROCHOT S., (2000), *Estimation de la production de sédiments des torrents ; application aux affluents de l'Arc de Maurienne (Savoie, France)*. Internationales symposium Interpraevent 2000, Villach, band3, pp 57-68.

BROCHOT S., MARCHI L. & LANG, M., (2001), *L'estimation des volumes des laves torrentielles: méthodes disponibles et application au torrent du Poucet (Savoie)*. Article proposé au Bulletin de l'AIIG.

BUWAL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, (1999), *Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren*, Umwelt Materialien NR. 107/I e II.

CAILLEU A. & TRICART J., (1959), *Initiation à l'étude des sables et des galets*. C.D.U.: Paris, Tome I: 376 pp.

CHIARLE M. & LUINO F., (1996), *Colate detritiche torrentizie sul monte Mottarone innescate dal nubifragio dell'8 luglio 1996 (Lago D'Orta – Piemonte)*. Atti Convegno: La prevenzione delle catastrofi idrogeologiche: il contributo della ricerca scientifica - Alba 5-7 Novembre 1996- pp.231-245.

CHEN C.L., (1987), *Comprehensive review of debris flow modeling concept in Japan*. Geol. Sic. Am. Rev. Eng. Geol. Vol. VII: 13-29.

COSTA J. E., (1984), *Physical Geomorphology of Debris Flow*. In J.E. Costa & P.J. Fleisher (ed.). Developments and Applications of Geomorphology, 268-317.

D'AGOSTINO V., (1996), *Analisi quantitativa e qualitativa del trasporto solido torrentizio nei bacini montani del Trentino Orientale*. In: Scritti dedicati a Giovanni Tournon: 111-123. Associazione Italiana di Ingegneria Agraria - Associazione Idrotecnica Italiana.

D'AGOSTINO V., CERATO M. & COALI R., (1996), *Il trasporto solido di eventi estremi nei torrenti del Trentino Orientale*. Internationales Symposium Interpraevent 1996, vol. 1: 377-386.

DAVIES T.R., (1997), *Using hydroscience and hydrotechnical engineering to reduce debris flow hazards*. In: C. Chen (ed), Debris-flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment: 787-810. Water Resources Engineering Division/ASCE.

DEGANUTTI A.M., MARCHI L. & ARATTANO M., (2000), *Rainfall and debris flow occurrence in the Moscardo basin (Italian Alps)*. In G. Wieczorek & N. Naeser (eds), Proceedings, Second International Conference on Debris-flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment: 67-72. Rotterdam: Balkema.

FRANZI L., (2000), *Correnti iperconcentrate in ambiente montano: aspetti modellistici*. Ph. Thesis dissertation, XIII Ciclo, Politecnico di Milano, 2000.

FRANZI L. & BIANCO G., (2001), *A statistical method to predict debris-flow volumes deposited on a debris fan*. Journal of Physic, Chemistry and Physics of Earth – Vol. 28. n°9, pp. 683-688, 2001.

GAMMA P., (1999), *Dfwalk – Ein Murgang-Simulationsprogramm zur Gefahrenzonierung*. Inaugural-dissertation der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern.

GOVI M., MARCHI L., MORTARA G. & TURITTO O., (1992), *Ricerche sulle colate detritiche torrentizie (debris flow) in ambiente alpino*. 405-420. GNDICI, Rapporto 1990/91 dell'U.O. 1.29.

HALL R.J. & DAVIES T.R., (1992), *Realistic strategies for disaster prevention*. Internationales Symposium Interpraevent 1992, vol. 3: 381-390.

HAMPEL R., (1977), *Geschiebewirtschaft in Wildbächen*. Wildbach und Lawinenverbau 41: 3-34.

HEINIMANN H.R. et al., (1998), *Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren*. Umwelt-Materialien Nr. 85, Naturgefahren. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).

HUNGR O., MORGAN G.C. & KELLERHALS R., (1984), *Quantitative analysis of debris torrent hazard for design of remedial measures*. Canadian Geotechnical Journal 21: 663-677.

HUNGR O., MORGAN G.C., VAN DINE D.F. & LISFER R.D., (1987), *Debris flow defenses in British Columbia*. In Costa J.E. & Wieczorek (ed.). Debris Flow/Avalanches: Process, Recognition and Mitigation, Geol. Soc. of America, Rev. In Eng. Geol., Vol. 7: 201-222.

JOHNSON A.M., & RODINE J.R., (1984), *Debris flow*. In: D. Brunsten, & D.B. Prior (eds), *Slope instability*. New York: John Wiley & Sons.

JOHNSON P.A., MC CUEN R.H. & HROMADKA T.V., (1990), *Magnitude and frequency of debris flows*. Journal of Hydrology 123: 69-82.

KLEEMAYR K., (1996), *Übersicht über die Lawinenberechnungsmodelle und Bewertung hinsichtlich des Einsatzes in der Gefahrenzonenplanung*. International Symposium Interpraevent 1996: 3-18.

KRONFELLNER-KRAUS G., (1985), *Quantitative estimation of torrent erosion*. International Symposium on Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention: 107-110, Tsukuba, Japan.

MARAGA F., MARCHI L., MORTARA G. & MOSCARIELLO A., (1998), *Colate detritiche torrentizie: aspetti granulometrici e influenza sul territorio*. Mem. Soc. Geol. Ital., Vol. 53: 75-96.

MARCHI L. & TECCA P.R., (1996), *Magnitudo delle colate detritiche nelle Alpi Orientali Italiane*. Geingegneria Ambientale e Mineraria 33: 79-86.

MARIE R./CEMAGREF GRENOBLE, (1984), *Méthodologie de programmation des actions de Restauration des terrains en montagne. Phase d'élaboration des éléments techniques d'aide à la décision. Le cas de la Maurienne*. CERREP.

MEUNIER M., (1991), *Éléments d'hydraulique torrentielle*. CEMAGREF. Etudes, Série Montagne, n. 1 : 278 p, Gap.

MIZUYAMA T., IKEYA H. & IMAMURA R., (1984), *Methods for zoning debris flow vulnerable areas*. Symposium on effects of forest land use on erosion and slope stability, East West Center, Hawaii: 281-287.

MIZUYAMA T., KOBASHI S. & Ou G., (1992), *Prediction of debris flow peak discharge*. Internationales Symposium Interpraevent 1992, vol. 4: 99-108.

O'BRIEN J. & JULIEN P., (1997), *On the importance of mudflow routing*. American Society of Civil Engineers Publi.: 677-686.

PERLA R., CHENG T. & MCCLUNG D., (1980), *A two-parameter model of snow avalanche motion*. Journal of Glaciology, 26(4): 197-207.

PISANI S., (1996), *Programma per la simulazione di un flusso di detrito su un cono*. Istituto di scienze della terra, Cadenazzo.

PRICE W.E., (1976), *A Random-Walk Simulation Model of Alluvial-Fan Depositino*. In Merriam D.F. (ed.). *Random Processes in Geology*. New York: Springer-Verlag.

PWRI, (1984), *Basics of planning measures against debris flow; planning countermeasures against debris flow, Design Booklet, Technical Standards for Erosion and Sediment Control*. Public Works Research Institute, Ministry of Construction, Japan.

RICKENMANN D., (1990), *Debris flows 1987 in Switzerland: modelling and sediment transport*. International Association of Hydrological Sciences Publi.: 371-378.

RICKENMANN D., (1997), *Estimation des laves torrentielles*. Ingénieurs et Architectes Suisses 19 : 386-392.

RICKENMANN D., ZIMMERMANN M., (1993), *The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis*. Geomorphology 8: 175-189.

RICKENMANN D. & KOCH T., (1997), *Comparison of debris flow modelling approaches*. In Cheng lung Chen (ed.). *Proceedings of First International Conference Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, ASCE: 576-585.

SCHEIDEGGER A., (1975), *Physical aspects of natural catastrophes*. Amsterdam-New-York: Elsevier.

SCHEURINGER E., (1988), *Ermittlung der massgeblichen Geschiebefracht aus Wildbach-Oberlauten*. Wildbach und Lawinenverbau 109: 87-95.

SPREAFICO M., LEHMANN Ch. & NAEF O., (1999), *Recommandations concernant l'estimation de la charge sédimentaire dans les torrents*. 48 pp. plus annexes. Berne: Groupe de travail pour l'hydrologie opérationnelle.

TAKAHASHI T., (1978), *Mechanical characteristics of debris flow*, J. Hydr. Div., ASCE, 104, pp. 1153-1169.

- TAKAHASHI T. & YOSHIDA H., (1979), *Study on the deposition of debris flows, Part 1 – Deposition due to abrupt change of bed slope*. Annuals, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Japan, 22 B-2.
- TAKAHASHI T., (1980a), *Evaluation of the factors relevant to the initiation of debris flow*. Proc. International symposium on Landslides, New Delhi, pp. 136-140.
- TAKAHASHI T., (1980b), *Debris flow on prismatic open channel*. J. Hydr. Div., ASCE, 106, pp. 381-396.
- TAKAHASHI T., (1981a), *Estimation of potential debris flow and their hazardous zones; soft countermeasures for a disaster*. Journal of Natural Disaster Science, 3, 1, pp. 57-89.
- TAKAHASHI T., (1981b), *Debris flow*. Ann.Rev. Fluid Mechanics, 13, pp. 57-77.
- TAKAHASHI T., (1991), *Debris Flows*. IAHR/AIRH monograph, Rotterdam. Balkema: 165 p.
- TAKEI A., (1984), *Interdependence of sediment budget between individual torrents and a river-system*. Internationales Symposium Interpraevent 1984, vol. 2 : 35-48.
- THOURET J.-C., VIVIAN H. & FABRE D., (1995), *Instabilité morphodynamique d'un bassin-versant alpin et simulation d'une crise érosive (L'Eglise-Arc 1800, Tarentaise)*. Bull. Soc. géol. France 166: 587-600.
- TROPEANO D. e TURCONI L., (1999), *Valutazione del potenziale detritico in piccoli bacini delle Alpi Occidentali e Centrali*: 151 pp. Torino - CNR Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica nel Bacino Padano.
- UNIVERSITY OF BERN - INSTITUTE OF GEOGRAPHY, GEO7 GEOSCIENTISTS, (1996), *Debris Flows*. EC Environment Research Program, Contract EV5V-CT94, Final Report: 135 pp.
- VANDINE D.F., (1985), *Debris flow and debris torrents in the Southern Canadian Cordillera*. Canadian Geotechnical Journal 22: 44-68.
- VANDINE D.F., (1996), *Debris flows control structures for forest engineering*: 68 pp. Res. Br., B.C. Min. For., Victoria, B.C. Work Paop. 22/1996.
- VAN STEIJN H., (1996), *Debris-flow magnitude-frequency relationships for mountainous regions of Central and Northwest Europe*. Geomorphology 15: 259-273.
- VAW, (1992), *Mürgänge 1987 - Dokumentation und Analyse*. Bericht im Auftrag des Bundesamt für Wasserwirtschaft (non pubblicato). Bericht 97.6, ETH Zürich.
- VOELLMY A., (1955), *Über die Zerstörungskraft von Lawinen*. Schweizerische Bauzeitung, Jahrgang 73(12): 159-162; (15): 212-217; (17): 246-249; (19): 280-285.
- WILSON R.C., MARK R.K. & BARBATO G., (1993), *Operation of a real-time warning system for debris flows in the San Francisco Bay area, California*. In H.W. Shen, S.T. Suand F. Wen (eds.), Hydraulic Engineering '93, vol. 2: 1908-1913.
- WARD T.J., (1994), *Modeling delivery of landslide materials to stream.*, New Mexico Water Resources Research Institute Report, 288, New Mexico State University, Las Cruces, New Mexico.
- ZHANG S., (1993), *A comprehensive approach to the observation and prevention of debris flows in China*. Natural Hazards, vol. 7, 1-23.
- ZIMMERMANN M., MANI P., GAMMA P. et al., (1997), *Murganggefahr und Klimaänderung – ein GIS basierter Ansatz*, Schlussbericht NFP 31, vdf Hochschulverlag Zürich.

Ringraziamenti

Si ringrazia P. Gamma e lo studio Geo7, Berna per aver messo a disposizione il codice dfwalk e le loro conoscenze sulle colate di detrito, risultate assai utili per l'applicazione del modello al caso specifico di studio.

AZIONE 5

Proposta di una metodologia inerente la mappatura e caratterizzazione dei processi di instabilità dei versanti da sperimentarsi sui bacini dell'alto Toce e della Maggia

Contributo dei partner italiani:

Manlio RAMASCO, Cinzia PICCIONI, Alberto GIGLIA
Regione Piemonte - Settore Studi e Ricerche Geologiche
Sistema Informativo prevenzione Rischi

Giovanni MORTARA, Gabriella DE RENZO
CNR - Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica
del Bacino Padano

Claudio SCAVIA, Marta CASTELLI,
Chiara DEANGELI, Margherita FERRERO
Politecnico di Torino - Dipartimento di Ingegneria
Strutturale e Geotecnica

Contributo dei partner svizzeri:

Silvio SENO*, Giorgio BEATRIZOTTI, Mariano LERBINI,
Sabina LÜTHI, Lisa MARTINENGHI, Alberto MAZZUCHELLI
Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana
- Istituto Scienze della Terra

*Università di Pavia - Dipartimento di Scienze della Terra

Laura SCESI, Umberto GIOIA
Politecnico di Milano - Dipartimento di Ingegneria
Idraulica, Ambientale e del Rilevamento

Pier Francesco BERTOLA
Lombardi SA Ingegneri Consulenti, Minusio, Svizzera

V-1. PREMESSA

Di seguito sono riportati i risultati delle ricerche dell'azione 5 che i partecipanti italiani e svizzeri hanno condotto sul tema dell'instabilità dei versanti in due ambiti territoriali adiacenti (il bacino dell'alto Toce ed il bacino della Maggia, rispettivamente). La scelta di operare in aree distinte e su aspetti diversi delle frane, il cui rischio è tuttavia percepito sui due versanti delle Alpi con uguale sensibilità, oltre che logisticamente più funzionale, ha consentito il reciproco trasferimento di esperienze e di risultati maturati su realtà territoriali differenti con indubbio arricchimento culturale.

Pur con approcci metodologici diversificati, comune intento dei due gruppi di lavoro è stato operare sia a livello territorialmente esteso che su situazioni locali, integrando queste diversità in un unico filo conduttore che, partendo da un'analisi generale del problema frane, conducesse gradualmente fino a studi di grande dettaglio. In quest'ottica gli specialisti italiani hanno realizzato una carta-inventario delle frane alla scala 1:25.000 informatizzata riguardante una ampia porzione della Val d'Ossola. Da parte loro gli specialisti svizzeri hanno realizzato un Sistema Informativo Territoriale riguardante i pericoli naturali - con particolare attenzione posta all'instabilità dei versanti rocciosi - basato sulla zonazione effettuata a partire dagli anni Novanta su tutto il territorio del Canton Ticino del quale il bacino della Maggia ha rappresentato l'area di partenza del progetto.



Figura V-1. Inquadramento geografico

A livello arealmente più circoscritto, da parte italiana è stata messa a punto una metodologia di studio multidisciplinare dei grandi movimenti di massa che mira alla valutazione dei possibili scenari di rischio. Tale metodologia è stata applicata al caso di Ceppo Morelli evidenziandosi criticamente nel corso dell'evento alluvionale dell'ottobre 2000. Da parte svizzera, è stato invece messo a punto un sistema di valutazione delle priorità di intervento lungo una importante via di comunicazione transfrontaliera esposta a pericolo di crolli. Inoltre il presente progetto ha fornito l'occasione per raccogliere, in maniera organica e fruibile dall'intera comunità scientifica interessata alla problematica delle grandi frane in roccia, la vasta mole di dati disponibile su Campo Vallemaggia, dando particolare risalto al confronto pre e post-intervento di sistemazione.

V-2. PROCESSI DI INSTABILITÀ DEI VERSANTI NELL'ALTO BACINO DEL TOCE

V-2.1. Introduzione

Attualmente lo studio dei versanti instabili viene affrontato sempre più di frequente con studi multidisciplinari che sopperiscono ai limiti insiti in ogni specifico approccio (morfologico, geologico, geomeccanico, idrologico, idrogeologico, storico), attenuando la soggettività dell'operatore o l'incertezza del dato e coagulando, al contempo, i punti di forza delle differenti metodologie di approccio al problema (Regione Piemonte & Univ. J. Fourier, 1996; Barla et al., 1998). Obiettivo finale è la visione globale e dinamica dei fenomeni naturali che è presupposto indispensabile per pianificare coerenti interventi sul territorio e predisporre adeguati piani di protezione civile.

Allo stato attuale delle conoscenze sulle frane si può dire che è:

- buona la capacità di riconoscimento di situazioni di instabilità;
- buona la capacità di classificazione tipologica;
- discreta la capacità di delimitazione di masse potenzialmente instabili;
- modesta la capacità di riconoscimento dell'area di invasione in caso di collasso;
- molto scarsa (se non nulla) la capacità di previsione del momento del collasso in assenza di monitoraggio.

A tutte le frane va prestata debita considerazione, è tuttavia indubbio che un'attenzione del tutto particolare va posta alle grandi frane, intendendo come tali quelle che coinvolgono masse rocciose o detritiche solitamente di volume dell'ordine di molte decine di migliaia o centinaia di migliaia sino a decine di

milioni di m³ e dalle quali possono derivare, in caso di collasso dell'intera massa o di parte di questa, conseguenze catastrofiche per la vita e le attività umane, sia dirette che indirette, di rilevanza non solo locale: esempi a tutti noti sono i disastri del Vajont (1963) e della Val Pola (1987), senza contare molti altri casi storicamente documentati.

L'area-campione scelta per gli studi previsti dall'Azione 5 ricade nella Val d'Ossola, settore del Piemonte alpino dove le frane di grandi dimensioni, oltre ad avere particolare diffusione, sono state in alcune occasioni responsabili di gravissime distruzioni e perdita di vite umane, con rilevanti effetti morfologici anche permanenti. Si ricordano a tal proposito le valanghe di roccia di Antronapiana (1642) e di S. Giovanni (1951 e 1958). L'interesse per i fenomeni di instabilità naturale del bacino ossolano è oltre modo giustificato dal fatto che il tessuto antropico, malgrado le asprezze morfologiche, è diffuso in ogni convalle ed annovera la presenza di due importanti vie di comunicazione internazionali (Ferrovia e Strada Statale del Sempione) e di numerosi invasi idroelettrici.

L'indagine ha riguardato in particolare il territorio del medio e alto bacino del F. Toce, includente valli tributarie di destra (Antrona, Bognanco, Diveria, Cairasca e Devero) e di sinistra (Isorno), nonché la Valle Formazza s.s., tutte confinanti con il territorio svizzero.

Il prodotto cartografico si è concretizzato in 12 tavole alla scala 1:25.000 per un totale di 36 sezioni e in una carta d'insieme alla scala 1:75.000. A titolo esemplificativo la carta d'insieme (Tav. I) e tre tavole alla scala 1:25.000 (Tavv. II-III-IV) sono presentate sul CD allegato al presente rapporto.

L'attività dell'Azione 5 si è sviluppata su più fronti, in funzione delle diverse competenze dei soggetti partecipanti. Gli argomenti sono stati affrontati fondamentalmente dal punto di vista geologico-geomorfologico (Regione Piemonte, CNR) e dal punto di vista

geotecnico (Politecnico di Torino), tenendo anche conto delle esperienze nel campo emerse da una preventiva rassegna bibliografica ragionata che è stata estratta dalla letteratura scientifica nazionale ed internazionale.

V-2.2. Analisi storica: criteri, scheda tipo, esempi

L'approccio geologico-geomorfologico, al quale è dedicato il capitolo successivo, è stato indirizzato al riconoscimento di quei settori di versante che, per l'insieme di indizi desunti dall'osservazione di aerofotografie e da rilevamenti di terreno possono essere considerati sede di movimenti più o meno veloci. Le valutazioni sullo stato di attività hanno in diversi casi trovato conferma dalle informazioni ricavate dalla Banca Dati della Regione Piemonte e da una specifica indagine storica retrospettiva.

In Val d'Ossola, forse più che in altri settori delle Alpi Piemontesi, i fenomeni gravitativi sono chiaramente correlabili a fattori litologico-strutturali e a fattori morfologico-topografici, i primi dipendenti dalle vicende geologiche, i secondi anche dal rilevante retaggio del modellamento glaciale. Alla fragilità geologica di quest'area non va disgiunto il ruolo che può giocare la piovosità che, nei valori medi annui, è tra le più elevate dell'arco alpino centro-occidentale (da 1800 a 2400 mm/anno).

La conoscenza di quanto è avvenuto in tempi più recenti, fermo restando il ruolo predisponente e/o determinante dei fattori sopra ricordati, è resa possibile dai documenti storici. Le date di accadimento di un evento di instabilità naturale e gli effetti che ne conseguono consentono infatti proiezioni sulla ripetitività dell'evento, sull'intensità (magnitudo), sull'entità degli spostamenti, sul rischio per le attività umane, ecc.

REGIONE PIEMONTE
SETTORE PREVENZIONE DEL RISCHIO GEOLOGICO, METEOROLOGICO E SISMICO
 Sistema Informativo Geologico - Processi-effetti

INFORMAZIONI A CARATTERE GENERALE

Riassunto	Comune di Formazza località Morasco (abitato attualmente sommerso dalle acque dell'omonimo lago artificiale): durante l'alluvione del 27/08/1834 le acque dei torrenti distrussero alcuni edifici in cima al paese, verso il fiume
Comune	Formazza
Località	Morasco
Tavoletta IGM	
Sezione CTR	
Coordinata X	
Coordinata Y	
Bacino	Lago Maggiore
Sottobacino	Fiume Toce
Data inizio periodo	27/08/1834
Data fine periodo	27/08/1834
Commento date	
Fonte d'informazione	01 Bibliografia
Titolo	Cronaca e descrizione degli principali fatti accaduti in Val formazza (1750-1923) Tratto da "Almanacco Ossolano 1997" - Grossi Editore Domodossola, pp. 222-235

CARATTERISTICHE GEOLOGICHE, GEOMORFOLOGICHE E DESCRIZIONE FENOMENO

Unità morfologica	06 Fondovalle
Unità litologica	01 Depositi alluvionali
Attività	02 Attività fluviale e torrentizia
Tipologia	14 Piena

CAUSE ED EFFETTI

Tipo segnalazione	02 Fenomeno verificatosi
-------------------	--------------------------

DANNI ED INTERVENTI

Descrizione danni	01 Edifici distrutti
Interventi	

OSSERVAZIONI

--	--

INFORMAZIONI SULLA COMPILAZIONE DELLA SCHEDA

Autore	Alessandro Pirocchi - Domodossola
Data	06.12.1999

Figura V-2. Esempio di schedatura di dato storico

Essendo dunque nota l'importanza della conoscenza della storia evolutiva di un territorio a fini pianificatori e di protezione civile, è parso opportuno svolgere un'indagine retrospettiva su frane ed alluvioni presso 19 archivi locali della Val d'Ossola, ad integrazione della documentazione già in possesso del CNR-IRPI e della Regione Piemonte.

L'arco temporale indagato è di circa 200 anni, pur risultando in maggioranza le notizie del sec. XX. I dati raccolti, oltre ad integrare quanto già noto su eventi alluvionali gravosi, riferiscono di frane non conosciute, talora modeste, ma con conse-

guenze anche gravi per la vita umana, o di riattivazioni di fenomeni più estesi e noti.

Alcune delle informazioni raccolte hanno consentito di datare frane riconoscibili sulle fotografie aeree o di venire a conoscenza di episodi di notevole importanza, ma che, per la difficile interpretazione o le ridotte dimensioni, non sono stati messi in luce dall'analisi delle fotografie aeree. Viceversa, l'analisi fotointerpretativa multitemporale ha permesso l'individuazione e la datazione di modificazioni morfologiche significative non segnalate da documenti.

V-2.3. Approccio geomorfologico

Considerata la vastità dell'area da indagare e la complessità morfologica dei luoghi, il riconoscimento dei corpi instabili è stato effettuato prevalentemente attraverso analisi di riprese aerofotografiche multitemporali, accompagnata da controlli a campione sul terreno.

È noto che attraverso l'analisi di aspetti morfologici distintivi, quali rotture di pendio, depressioni, contropendenze, stato di fratturazione della roccia, campi detritici, anomalie della rete idrografica, ecc., è possibile individuare e delimitare corpi di frana e pertanto realizzare "carte-inventario". In letteratura queste carte sono generalmente costituite da documenti analitici nei quali viene fissata la situazione esistente al momento dell'osservazione e l'eventuale distinzione tipologica dei movimenti, mentre non sono solitamente fornite indicazioni di grandezze quali intensità, frequenza e quindi probabilità di occorrenza dei fenomeni stessi.

Pur riconoscendo la validità di documenti di questo tipo, peraltro indispensabili nella fase conoscitiva di un territorio, il presente lavoro si è posto l'obiettivo di aggiungere alla tradizionale carta-inventario altre informazioni, quanto meno qualitative ed orientativamente quantitative, sulle caratteristiche evolutive delle frane, espresse in termini relativi di velocità di movimento e volumi in gioco. Questo tipo di approccio è stato affrontato nella prospettiva di fornire informazioni utili ad una successiva definizione del grado di pericolosità, passaggio, quest'ultimo, rigorosamente dipendente da una sistematica attività di rilevamento di terreno.

Lo sforzo compiuto, impostato sulla falsariga di esperienze maturate in Svizzera dal Servizio Idrologico e Geologico Nazionale (Bollinger & Noverraz, 1996), è stato quello di elaborare una legenda nella quale, in particolare, fossero contenute due categorie principali di significato evolutivo e non tradizionalmente tipologico, distinte in *fenomeni istantanei rapidi* (ricorrenti od occasionali) e *fenomeni permanenti o più lenti*. Per quest'ultima categoria sono state introdotte ulteriori distinzioni sulla stima della profondità e della velocità di movimento. Per soddisfare a questa esigenza, nella fase di fotointerpretazione si sono dovute rintracciare con sistematicità quelle caratteristiche morfologiche che potevano essere messe in relazione con tali parametri, in quanto connesse alla pericolosità dei fenomeni franosi.

Nelle intenzioni degli autori si è inteso pertanto creare una legenda che, oltre a superare la classica distinzione tipologica delle frane:

- costituisse un agile e versatile strumento di lavoro

per fotointerpreti e rilevatori;

- offrisse criteri di valutazione semplici e comprensibili anche ai più svariati utilizzatori.

Per procedere correttamente è stato fondamentale aver ben chiare quali fossero le informazioni da ricercare e, allo stesso tempo, possedere la giusta chiave di lettura per poterle comprendere. Ritenendo che l'approccio morfologico, volto essenzialmente a rilevare effetti indotti sulle forme del rilievo, non può essere applicato indistintamente per ogni tipologia di frana, ma deve tenere conto di alcune caratteristiche fondamentali dei fenomeni stessi, come già sopra anticipato, sono state introdotte due categorie principali di frane:

- *frane istantanee rapide*: fenomeni occasionali o ricorrenti che prevalentemente si innescano ed esauriscono nel corso dell'evento che li ha attivati, caratterizzati da grande rapidità di movimento, significativo percorso della massa spostata, bassa instabilità residua, dislocazioni di massa generalmente di limitato volume (ad eccezione dei grandi crolli in massa e delle valanghe di roccia);
- *frane permanenti o più lente*: fenomeni con attività che si sviluppa nel tempo e nello spazio in modo permanente, esplicandosi alternativamente con cicli di attività e di inattività, con dislocazione di tutta la massa o di parte di essa e spostamenti generalmente contenuti. Le velocità di movimento non sono mai molto elevate e i volumi coinvolti possono anche raggiungere dimensioni rilevanti (milioni di mc).

LEGENDA							
		zona di provenienza	zona di transito ed accumulo		fenomeno non cartografabile	possibili scenari evolutivi	
FENOMENI ISTANTANEI RAPIDI (ricorrenti od occasionali)	1	crollo o ribaltamento di elementi lapidei [V<10 ³ m ³ ca.]		su aree diffuse 	incanalato 		Possibile distacco e rotolamento a valle di singoli elementi lapidei o di piccoli ammassi rocciosi che possono raggiungere, in funzione delle caratteristiche morfologiche del pendio, settori difficilmente individuabili
	2	crollo in massa [10 ³ m ³ <V<10 ⁶ m ³ ca.]					?
	3	valanga di roccia [V>10 ⁶ m ³ ca.]					
	4	aree soggette ad erosione e denudamento					Possibile distacco e rotolamento a valle dei singoli elementi lapidei che possono raggiungere, in funzione delle caratteristiche morfologiche del pendio, settori difficilmente individuabili
	5	fenomeni gravitativi rapidi dei depositi sciolti di copertura					Possibile coinvolgimento di settori distanti dall'area sorgente in funzione delle caratteristiche morfologiche del pendio
FENOMENI PERMANENTI O PIÙ LENTI		ESTREMAMENTE LENTO (a) [V<cm./anno ca.]	MOLTO LENTO (b) [cm./anno<V<cm./mese ca.]	LENTO e/o MOLTO LENTO SOGGETTO A FORTI ACCELERAZIONI (c) [V>cm./mese ca.]			
		le velocità indicate sono da considerarsi valori medi annui a lungo termine					
	6	fenomeni gravitativi profondi [D>15 m. ca.]					Possibilità di evoluzione, prevalentemente per settori localizzati e nelle zone marginali, in fenomeni di tipo rapido
	7	fenomeni gravitativi di profondità moderata [3 m.<D<15 m. ca.]					
	8	fenomeni gravitativi superficiali [D<3 m. ca.]					
9	rock glacier						

SEGNI CONVENZIONALI

LIMITE DELLE GEOMETRIE AREALI



CORONAMENTO E PRINCIPALI SISTEMI DI FRATTURA



TRINCEA E FRATTURA BEANTE



CIGLIO DI PARETE CHE INSISTE SUL FONDOVALLE



AMMASSO ROCCIOSO DISARTICOLATO e/o CARATTERIZZATO DA INTENSA FRATTURAZIONE



ELEMENTO LAPIDEO DI DIMENSIONI RILEVANTI



DATA DELL'EVENTO PIÙ SIGNIFICATIVO

1956

V-2.3.1 Frane istantanee rapide (fenomeni occasionali o ricorrenti)

TIPOLOGIA 1: crollo o ribaltamento di elementi lapidei

Distacco da pareti rocciose o versanti molto ripidi per scivolamento o ribaltamento e successiva saltazione e/o rotolamento, di singoli elementi, o di ammassi rocciosi di modesto volume approssimativamente non superiore al migliaio di metri cubi. Il movimento può essere occasionale od avvenire con periodica frequenza in conseguenza delle cicliche variazioni stagionali e forti escursioni termiche in alta quota.

$$V < 1000 \text{ m}^3 \quad 5 < v < 30 \text{ m/s} \\ (V = \text{volume}; v = \text{velocità})$$

TIPOLOGIA 2: crollo in massa

Movimento prevalente per caduta più o meno libera di ammassi rocciosi con volume compreso tra il migliaio ed il milione di metri cubi. In casi eccezionali possono essere coinvolti volumi sensibilmente maggiori. Il meccanismo di mobilitazione è simile a quello del crollo di elementi lapidei.

$$1000 < V < 10^6 \text{ m}^3 \quad 10 < v < 40 \text{ m/s}$$

TIPOLOGIA 3: valanga di roccia

Fenomeno di grandi dimensioni caratterizzato da movimento complesso. Caratteristiche peculiari di questi fenomeni sono le velocità estremamente elevate ($> 40 \text{ m/s}$) e la grande distanza percorsa dalla massa franata (anche di ordine chilometrico). Questi fenomeni, non rari in Val d'Ossola, possono modificare radicalmente il paesaggio, lasciando marcate cicatrici nella zona di distacco e accumuli in grado di sbarrare le valli con conseguente formazione di laghi temporanei (es.: S. Giovanni, 1951) o permanenti (es.: Antrona, 1642).

$$V > 10^6 \text{ m}^3 \quad v > 40 \text{ m/s}$$

Per queste tre tipologie di fenomeni vengono indicate e distinte l'area sorgente da quelle di transito ed accumulo.

TIPOLOGIA 4: aree soggette ad erosione e denudamento

Si tratta di settori di versante su cui si instaurano fenomeni di tipo erosivo, connessi tanto al dilavamento meteorico quanto al disseccamento e al crioclastismo, sui quali non attecchisce alcuna forma di vegetazione. Interessano prevalentemente depositi sciolti (poco o nulla cementati), talora rocce tenere e rocce cristalline intensamente fratturate o tettonizzate. Sono soggetti a periodici distacchi di elementi lapidei singoli o di piccole

porzioni di materiale con fenomeni di rotolamento, colamento detritico e arretramento gravitativo delle scarpate sommitali.

TIPOLOGIA 5: fenomeni rapidi dei depositi sciolti in copertura

In questa tipologia vengono raggruppati i fenomeni di scivolamento e colamento rapido che interessano i terreni e le coltri detritiche superficiali (*soil slip, rapid earth flow, debris avalanche, debris flow*, ecc.). Si tratta di frane strettamente dipendenti dagli eventi pluviometrici severi, generalmente caratterizzate da ridotte dimensioni areali e volumetriche che prevalentemente si innescano su pendii stabili, ma talora costituiscono un'evoluzione rapida e localizzata di movimenti di massa di maggiori dimensioni. La loro azione morfogenetica è scarsamente incisiva sull'assetto dei versanti per cui sono facilmente delimitabili sul terreno o su foto aeree quando i rilievi e le riprese non sono troppo successivi all'accadimento. Centinaia di frane superficiali interessarono la Val d'Ossola, e segnatamente la Val Vigizzo, nel corso dell'evento alluvionale del 7-8 agosto 1978. Sia pure in numero inferiore, frane di questo tipo si originarono anche in eventi alluvionali più recenti (agosto 1987 e ottobre 2000).

V-2.3.2 Fenomeni gravitativi permanenti o più lenti

TIPOLOGIA 6: fenomeni gravitativi profondi

$$[D > 15 \text{ m ca}]$$

TIPOLOGIA 7: fenomeni gravitativi di profondità moderata

$$[3 \text{ m} < D < 15 \text{ m}]$$

$$(D = \text{profondità})$$

Sono stati compresi in queste due categorie gli scivolamenti roto-traslativi, gli espandimenti laterali e i colamenti lenti in roccia (deformazioni gravitative profonde di versante) o detritici, vale a dire i fenomeni gravitativi, solitamente di grandi dimensioni e di profondità quantomeno plurimetrica, che esplicano la loro attività in modo permanente sia nel tempo sia nello spazio. La loro evoluzione è caratterizzata da cicli nei quali si alternano periodi di inattività (situazioni caratterizzate da assenza di movimento o da presenza di movimento estremamente lento e non apprezzabile) a periodi di attività (ripresa o accelerazione del movimento). Tali manifestazioni si sviluppano generalmente in un ambito spaziale abbastanza ben delimitabile, trasformandosi in alcuni casi ed in situazioni del tutto particolari

(collasso dell'intera massa o di parte di questa) in fenomeni franosi di altro tipo. In queste due categorie sono compresi anche tutti quei fenomeni di scivolamento di dimensioni generalmente più ridotte, che esplicano la loro attività prevalentemente nel corso dell'evento che li ha generati e sono caratterizzati da velocità di movimento variabile da lenta a rapida nella scala delle velocità di Varnes.

La caratterizzazione dei fenomeni gravitativi si attua tenendo conto della tipologia di movimento, ma soprattutto ricorrendo all'analisi dello stato di conservazione delle manifestazioni morfologiche, definibile attraverso un determinato grado di rimodellamento. Ovviamente questo tipo di analisi non è facilmente codificabile e risente molto dell'esperienza e della sensibilità dell'operatore. I concetti ed i criteri di seguito espressi non devono pertanto essere intesi come assoluti, ma piuttosto come elementi di riferimento utili per rendere la interpretazione del fenomeno meno soggettiva possibile.

L'attività delle frane permanenti è accompagnata dallo sviluppo, sulla superficie del corpo (zona di distacco e di accumulo) e nelle aree contigue, di una serie di forme caratteristiche quali scarpate, dorsali, depressioni, fenditure ed ondulazioni del terreno, ecc. che rappresentano l'espressione superficiale delle deformazioni che si realizzano per effetto del movimento.

L'analisi della tipologia e della configurazione geometrica di queste forme, unitamente alla determinazione del senso di movimento delle strutture che esse sottendono, consente di interpretare il quadro deformativo superficiale e descrivere la cinematica del corpo franoso (Giardino, 1996). Individuata la tipologia del movimento sarà necessario effettuare un'analisi del "grado di conservazione" (o di rimodellamento) degli elementi in modo da poter interpretare il fenomeno stesso.

Il grado di rimodellamento esprime "quanto" (in termini qualitativi) forme e corpi, le cui origini sono legate ad un particolare processo, risultino modificati dall'azione di processi di altro o dello stesso tipo. Il grado di rimodellamento esprime in pratica l'evidenza che gli elementi bi- e tridimensionali hanno.

Nello schema proposto di seguito per la classificazione dei processi in oggetto (movimenti rototraslativi, complessi, di espansione laterale e di colamento lento) è stata adottata una suddivisione che tiene conto del grado di rimodellamento delle forme e quindi della velocità del fenomeno stesso.

Se le forme presentano caratteri ben evidenti, mantenendo in pratica l'aspetto originale (grado di rimodellamento da nullo a basso), è molto probabile che siano soggette a movimenti più rapidi o a forti accelerazioni (velocità di modellamento $>$ della velocità del rimodellamento).

I fenomeni che presentano queste caratteristiche ricadono nelle tipologie 6c e 7c della *legenda*.

Se le forme risultano in parte modificate dal rimodellamento (grado di rimodellamento da basso a medio) è ragionevole ritenere che i processi gravitativi responsabili della genesi di tali forme siano "molto lenti" (velocità di modellamento $\approx$ velocità del rimodellamento).

I fenomeni che presentano caratteristiche di questo tipo ricadono nelle tipologie 6b e 7b.

Se le forme risultano profondamente modificate dai processi di rimodellamento (grado di rimodellamento da medio ad elevato) è molto probabile che tali forme siano legate a movimenti estremamente lenti (velocità di modellamento $<$ velocità del rimodellamento).

I fenomeni che presentano caratteristiche di questo tipo ricadono nelle tipologie 6a e 7a.

Un discorso a parte deve essere fatto per le deformazioni gravitative profonde di versante (DGPV), diffuse in tutte le catene montuose, che si manifestano attraverso lenti e continui meccanismi deformativi dell'ammasso roccioso a carico di estese e profonde porzioni di versante. Le espressioni morfologiche che le contraddistinguono, messe in relazione con dati strumentali rilevati per alcuni di questi fenomeni, consentono di stabilire che questi processi deformativi avvengono, come già detto in precedenza, con movimenti estremamente lenti e continui nel tempo, generalmente non influenzabili in modo significativo dalle naturali, cicliche variazioni climatiche. Questi fenomeni ricadono nella tipologia 6a.

È doveroso precisare che le velocità indicate sono da considerarsi valori medi annui a lungo termine, ai quali riferirsi senza pretesa di assolutezza.

TIPOLOGIA 8: *fenomeni gravitativi superficiali* [D<3m ca]

Si tratta di tutti quei fenomeni di colamento e/o scivolamento lento di masse incoerenti di terreni superficiali lungo i versanti. Si verificano quando il terreno superficiale è generalmente imbevuto d'acqua e contiene discrete quantità della frazione limoso-argillosa

in una certa proporzione minima. Sono caratterizzati dalla formazione di leggere lobature più o meno regolari e talora dalla presenza di fratture di trazione.

TIPOLOGIA 9: *rock glacier*

Nella carta delle frane della Val d'Ossola si è ritenuto opportuno riportare anche i principali *rock glacier* ("ghiacciai di pietre" o "pietraie semoventi" dei vecchi Autori italiani), vale a dire quei caratteristici corpi detritici lobiformi costituiti da blocchi angolari organizzati in rughe, solchi e lobi in superficie, diffusamente presenti nelle parti alte dei bacini (ambiente periglaciale). Le evidenti strutture di flusso sulla superficie denunciano la possibilità di movimento che i *rock glacier* hanno avuto (r.g. antichi) o possono ancora avere (r.g. attivi) per la presenza di ghiaccio di varia origine. Esulava dagli obiettivi stabilire l'attività o meno di questi corpi: tuttavia, tenuto conto del riscaldamento globale in atto che si sta traducendo nella degradazione della fascia del permafrost e nella conseguente, possibile fusione della frazione ghiacciata, è utile sapere che la velocità di movimento di questi corpi detritici, che possono essere sede di infrastrutture (tralicci, impianti sciistici, strade), può variare da pochi centimetri a pochi decimetri/anno.

Bibliografia di riferimento

AMANTI M., CASAGLI N., CATANI F., D'OREFICE M. & MOTTERAN G., (1996), *Guida al censimento dei fenomeni franosi ed alla loro archiviazione*. Presidenza del Consiglio dei Ministri, Servizio Geologico, Miscellanea, VII, 109 pp.

BARLA G., BARBERO M. & MORTARA G., (1998), *Previsione e prevenzione degli eventi franosi a grande rischio*. Atti MIR98 "il ruolo della meccanica e dell'ingegneria delle rocce nella protezione del territorio e dell'ambiente" (Politecnico di Torino, 25-26 novembre 1998). Pàtron Ed. , 91-108.

BOLLINGER D. e NOVERRAZ F., (1996), *Pilotstudie Karte der Bodenbewegungsgefahren 1:25.000 Blatt 1247 Adelboden*. Geologische Berichte Nr. 20. 40 pp. e Allegati.

CANUTI P. & CASAGLI N., (1994), *Considerazioni sulla valutazione del rischio da frana*. Estratto da "Fenomeni Franosi e Centri Abitati", Atti del Convegno di Bologna del 27 Maggio 1994, CNR-GNDCI - Regione Emilia Romagna.

CRUDEN D. M. & VARNES D. J., (1996), *Landslide types and processes*. Landslides, investigation and mitigation, Special Report 247, ed. A. C. Turner & R. L. Schuster, Transportation Research Board, National Research Council; National Academy Press, Washington, D.C.; pp. 36÷75.

GIARDINO M. (1996), *Validità e limiti del rilevamento geomorfologico di deformazioni superficiali per l'analisi cinematica di fenomeni franosi: il caso della frana di Slumgullion, Colorado (USA)*. Atti Convegno "La prevenzione delle catastrofi idrogeologiche, il contributo della ricerca scientifica" (Alba, 5-7 nov. 1996). Vol. I, 285-294, Pubbl. GNDCI n.1600.

GIGLIA A., PARO L. & RAMASCO M., (2001), Progetto IFFI: determinazione dello stato di attività dei fenomeni gravitativi nelle schede di I livello. Non pubblicato.

REGIONE PIEMONTE & UNIVERSITE J. FOURIER GRENOBLE, (1996), *Rischi generati da grandi movimenti franosi*. Programma INTERREG I Italia-Francia, 207 pp.

VARNES D.J., (1978), *Slope movements types and processes*. In Schuster R.L. & Krizek R.J. eds. Landslides, analysis and controll. Transp. Res. Board Special Report n. 176, Nat. Acad. Sc., 11-33.

V-2.3.3 Considerazioni conclusive

L'applicazione sperimentale della legenda qui proposta ha consentito di inserire nella carta dei movimenti gravitativi della Val d'Ossola nuove informazioni che hanno dimostrato di poter aver significato nella valutazione della pericolosità dei singoli fenomeni. Informazioni che non possono ovviamente assumere il peso ed il significato di dati forniti da indagini geognostiche, ma che tuttavia possono fornire elementi di valutazione propedeutici ad eventuali successivi progetti di indagine in occasione di pianificazione territoriale e/o di realizzazione di opere.

Un riscontro sull'applicabilità dei criteri sui quali si fonda la legenda si è avuto in occasione dell'evento alluvionale dell'ottobre 2000 che in Val d'Ossola ha riattivato alcuni movimenti gravitativi (Montescheno, Ceppo Morelli, Trasquera) con modalità fondamentalmente coerenti con le previsioni prospettate.

La possibilità sperimentata di integrare ancora i risultati della fotointerpretazione con nuovi dati ed informazioni di tipo diverso (tratti dalla letteratura, dall'analisi storica, acquisiti durante sopralluoghi o forniti da indagini strumentali) consentirà, in ogni momento, l'aggiornamento e l'affinamento della carta per la quale il dato da fotointerpretazione assumerà sempre più il ruolo di dato-base di riferimento.

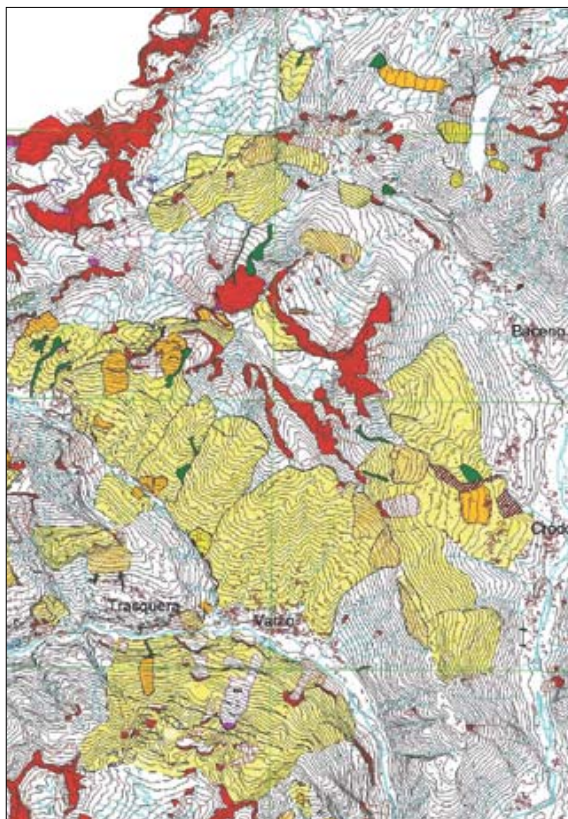


Figura V-4. Estratto della carta
inventario delle frane
alla scala 1:75.000

V-2.4. Casi di studio

Il lavoro è proseguito con l'individuazione di alcuni fenomeni di instabilità di particolare significato per i quali, in caso di rapida evoluzione, si presume possano avere interferenza con fondovalle antropizzati, impianti idroelettrici, direttrici stradali o ferroviarie, ecc. Per i casi considerati, scelti anche in funzione della relativa semplicità delle geometrie, sono stati ipotizzati possibili scenari evolutivi. Le ipotesi si basano su valutazioni forzatamente soggettive che, tuttavia, derivano dall'esperienza acquisita anche in questo lavoro, il quale ha dato modo di osservare l'amplessima variabilità delle situazioni di instabilità e delle modalità di evoluzione. Si precisa che gli scenari evolutivi sono stati delineati esclusivamente su criteri geomorfologici e pertanto hanno significato del tutto orientativo, in totale mancanza di dati strumentali sulle velocità dei movimenti e di indagini geognostiche in profondità.

I casi esaminati rappresentano soltanto alcuni esempi di situazioni abbastanza note e descrivibili con modelli geologici relativamente semplici. Ciò nonostante la definizione di attendibili scena-

ri evolutivi e l'individuazione di precisi limiti di espansione dei materiali in caso di collasso presenta molti margini di incertezza. La definizione di scenari evolutivi realistici per fenomenologie di questo tipo deve quindi essere fatta in modo approfondito, integrando studi e conoscenze pluridisciplinari, caso per caso, ogni qualvolta se ne presenti la necessità e considerando sempre che questi fenomeni oltre a produrre effetti diretti e immediati, possono anche indurre effetti e indiretti successivi all'evento principale altrettanto gravi e distrosi come nel caso della frana di San Giovanni.

Il caso di Ceppo Morelli, illustrato più avanti, pur utilizzando i criteri sopra esposti, non è scevro dei limiti imposti dalla situazione di emergenza venutasi a creare durante l'evento alluvionale dell'ottobre 2000.

A titolo di esempio si riporta il caso di S. Giovanni, episodio ancora ben vivo nella memoria dei locali per le conseguenze catastrofiche e fenomeno tutt'altro che stabilizzato.

V-2.4.1. La valanga di roccia di S. Giovanni

Uno dei più imponenti movimenti gravitativi nella storia recente della Val d'Ossola è indubbiamente quello noto come "frana di S. Giovanni" in comune di Crevaladossola, all'imbocco della Valle Diveria in area di affioramento di gneiss occhiadini. Il giorno 12 novembre 1951, dal versante sinistro del tributario Rio di Burra (o Rido), in prossimità dell'Alpe Marghino, al margine SE di un'area interessata da deformazione gravitativa e in un settore già sede di antichi movimenti ed in cui, prima dell'evento, erano state osservate "larghe e profonde crepe" (Zoppetti, 1952), si innescò una disastrosa valanga di roccia con iniziale meccanismo di scivolamento planare su superficie di scistosità in parte già esposta. La massa rocciosa coinvolta, valutata in circa 1 milione di m³, si incanalò nel sottostante vallone, sbarrando il corso del T. Burra, proseguì quindi la sua corsa sino all'inserzione con il fondovalle del T. Diveria, distruggendo alcune abitazioni della frazione S. Giovanni (4 vittime) e interrompendo la ferrovia e la strada statale del Sempione.

Marginalmente alla zona di distacco comparvero "numerosi e vaste screpolature della roccia" (Zoppetti, 1959), ma fu la presenza dello sbarramento detritico all'interno del bacino del Rio di Burra a creare, sette anni più tardi, i presupposti per un'ulteriore, imprevista evoluzione dell'area coinvolta dalla frana del 1951. Il 19-20 agosto 1958 piogge particolarmente intense contribuirono a far

Figura V-5. Veduta d'insieme della frana di S. Giovanni un anno dopo la caduta, avvenuta il 12 novembre 1951 (Aerofotografia IGM, Conc. Aeron. Mil. - R.G.S. n. 51, 9-2-1999)



colmare rapidamente l'invaso a monte della sbarramento che, per fenomeni erosivi, cedette dando origine ad una colossale colata detritica la quale, a sua volta, bloccò il deflusso del T. Diveria in piena impetuosa. Il sormonto e l'erosione di questo sbarramento di neoformazione sul fondovalle principale provocò la distruzione di alcune case con la morte di 13 persone e fu causa di gravissimi danni.

V-2.4.1.1 *La situazione attuale e la possibile evoluzione dell'area*

A distanza di cinquant'anni, l'area coinvolta dalla frana del 1951 è ancora perfettamente riconoscibile in corrispondenza dell'area di distacco e di scivolamento, mentre l'accumulo, rimodellato dall'episodio del 1958, è ampiamente colonizzato da vegetazione arborea. L'evento del 1951 ha conferito al versante una situazione di instabilità diffusa, apprezzabile soprattutto lungo tutta la scarpata rocciosa che delimita nettamente il fianco destro della frana. In questo settore il gioco di intersezione tra famiglie di giunti di frattura favorisce l'isolamento di setti rocciosi di dimensioni anche decametriche, suscettibili di ribaltamento e crollo in direzione grosso modo SW-NE con scarse possibilità di lunghe percorrenze per la accentuata rugosità

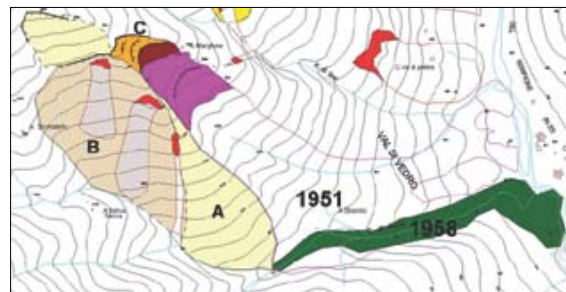


Figura V-6. Estratto della carta inventario delle frane

dell'alveo della frana del 1951, tappezzato da blocchi rocciosi di grandi dimensioni.

Sempre sulla parte destra, distacchi e scivolamenti di bancate rocciose nel settore più direttamente prospiciente l'incisione torrentizia (laddove era avvenuto lo sbarramento del 1951), potrebbe essere contenute nell'incisione stessa, per volumi dell'ordine delle migliaia di metri cubi. Uno sguardo più allargato della situazione attuale del versante sinistro del vallone del Rio di Burra evidenzia un settore triangolare (A), fittamente boscato, interposto tra un settore in deformazione con substrato roccioso totalmente disarticolato (B) ed il fianco destro della frana di S. Giovanni. Non si può escludere che anche questo settore di versante, su cui insistono alcuni alpeggi, diventi suscettibile di futuri movimenti.

Nella prefigurazione di un ipotetico scenario di collasso di questo settore si è tenuto conto di alcuni aspetti morfologici (collocazione topografica dell'ammasso roccioso A; direzione di scivolamento tendenzialmente verso S, quindi circa normale all'asse del T. Burra; modesta energia del rilievo rispetto; rugosità del percorso lungo l'incisione del Rio di Burra): si potrebbe ipotizzare lo sbarramento del Rio di Burra per altezze presumibilmente pluridecametriche, data la ristrettezza della valle in cui scorre. Più a valle, per le considerazioni sopra esposte, la velocità di traslazione dovrebbe ridursi e di conseguenza anche l'elongazione dell'accumulo. Tuttavia non è da escludere la fuoruscita di materiali dal bacino, e, quindi, il possibile coinvolgimento della ferrovia del Sempione che corre addossata al piede del versante destro della Valle Diveria in prossimità del nodo di confluenza.

È tuttavia il settore di versante (C) immediatamente a monte della nicchia di distacco della frana del 1951 a focalizzare su di sé l'attenzione per uno scenario evolutivo di maggior gravità. Questo settore presenta evidenti segni di instabilità per la forte

disarticolazione dell'ammasso roccioso (già segnalata da Zopetti e ben riconoscibile sulla foto aerea del 1952). Nel caso di un coinvolgimento in massa di questa porzione di versante di volume confrontabile quello della frana 1951 e ipotizzabili analoghi

meccanismi evolutivi, tenuto conto della maggior energia del rilievo rispetto alla situazione del 1951, non si può escludere che la frana potrebbe raggiungere nuovamente il fondovalle principale, riproponendo verosimilmente gli effetti avutisi nel 1951.

Bibliografia

ZOPPETTI L., (1952), *La frana che interrompe il Sempione*. L'Universo, XXXII (3), 345-351.

ZOPPETTI L., (1959), *L'Ossola e le sue frane. La frana di S. Giovanni nel 1958*. L'Universo, XXXIX (3), 601-610.

V-3. LA VALUTAZIONE DEI PERICOLI NATURALI IN TICINO

V-3.1. Premessa

In Svizzera, dove sembra che le zone esposte a pericoli naturali occupino tra il 6% e l'8% del territorio, si è giunti alla conclusione che, in linea di principio, l'uso del suolo debba adattarsi alle condizioni ambientali e che le misure di protezione si giustificano solo dove si ha già un'occupazione del territorio tale da richiederne una tutela, oppure dove un cambiamento di destinazione è assolutamente indispensabile. In tutti gli altri casi sono invece previste esclusivamente delle misure pianificatorie.

V-3.2. Nozione di pericolo

- Pericolo elevato - Zona rossa: zona di divieto. Persone in pericolo di vita sia all'interno sia all'esterno delle costruzioni. Probabile distruzione delle costruzioni.
- Pericolo medio - Zona blu: zona di regolamentazione. Persone in pericolo al di fuori delle costruzioni, ma poco o per nulla al loro interno. Danni principali alle costruzioni.
- Pericolo basso - Zona gialla: zona di sensibilizzazione. Danno debole o inesistente per le persone. Danni lievi alle costruzioni.
- Pericolo residuo - Zona gialla tratteggiata: ancora zona di sensibilizzazione. Danni con una probabilità di evenienza molto remota ma con forte intensità.

V-3.3. Basi tecniche

Gli uffici federali della pianificazione, dell'economia delle acque e dell'ambiente, delle foreste e del paesaggio, hanno formulato delle raccomandazioni sull'identificazione dei pericoli, sulla loro valutazione e sulle misure di protezione.

V-3.3.1. Valutazione della pericolosità

A livello nazionale, la pericolosità è definita attraverso una valutazione combinata di frequenza e intensità:

1 FREQUENZA:

- Alta (periodo di ritorno: 30 anni)
- Media (periodo di ritorno: 30 - 100 anni)
- Bassa (periodo di ritorno: 100 - 300 anni)

Il periodo di ritorno (T) integrato con la probabilità di accadimento (p) di un evento:

$$(1-p) = 1 - (1 - 1/T)^n$$

permette di stabilire la probabilità che nell'arco di vita di un'opera (n) questa sia interessata da un evento con un periodo di ritorno assegnato (es. piena centenaria)

- Alta (100 ÷ 82 %)
- Media (82 ÷ 40 %)
- Bassa (40 ÷ 15 %)

2 INTENSITÀ:

è misurata attraverso una grandezza fisica. In particolare per la caduta di pietre o blocchi si utilizza l'energia cinetica (E) espressa in kJ.

- Alta E > 300 kJ
- Media E > 30 kJ

- Bassa $E < 30 \text{ kJ}$

Per le valanghe di roccia si utilizza la pressione (P) misurata in kPa:

- Alta $P > 30 \text{ kPa}$
- Media $P > 3 \text{ kPa}$
- Bassa $P < 3 \text{ kPa}$

Al momento non si è invece ancora riusciti a stabilire una scala di pericolosità per gli scivolamenti profondi.

I processi causa dei pericoli idrogeologici possono essere suddivisi in:

- 1 Periodici (alluvioni, valanghe, flussi di detrito, ecc.), per cui la nozione di periodo di ritorno si adatta molto bene.
- 2 Continui (deformazioni gravitative e scivolamenti profondi), ove la nozione di periodo di ritorno è sostituita con il fattore di sicurezza del versante.
- 3 Sporadici (crolli di roccia e caduta sassi), si applica una valutazione probabilistica della stabilità.

In termini molto schematici la nozione di pericolosità di crolli di roccia può essere rappresentata dal seguente diagramma (figura V-7).

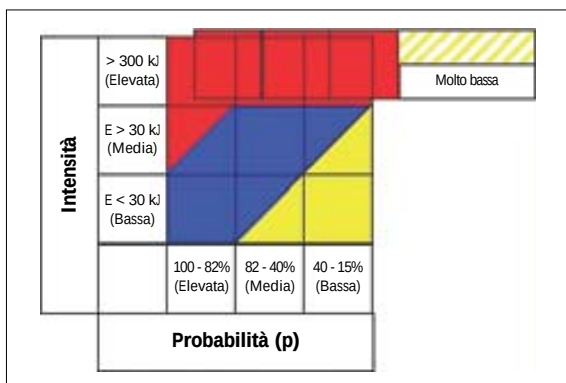


Figura V-7. Valutazione della pericolosità di un'area in funzione dell'intensità di un evento e della sua probabilità di accadimento. I tre campi in cui è suddiviso il diagramma (rosso, blu e giallo) corrispondono, rispettivamente, a un grado di pericolo alto, medio e basso. Il giallo rigato corrisponde al pericolo residuo che deriva da eventi caratterizzati da elevate intensità ma con una probabilità di accadimento molto bassa

V-3.4. Gestione

Il Cantone Ticino, a seguito dei danni subiti (1978 e 1987), ha affrontato il problema dei pericoli in anticipo sugli altri Cantoni e sulla Confederazione, dotandosi di una Legge specifica per il trattamento dei pericoli naturali, che prevede i seguenti passi:

- 1 accertamento dei territori esposti a pericolo con una procedura pubblica ("catasto"), realizzazione di una carta dei territori esposti a pericolo fondata su realizzazione di una carta geomorfologica:
 - presentazione alla popolazione;
 - esame dei ricorsi e decisione;
 - riedizione della carta;
 - iscrizione a registro fondiario della menzione di diritto pubblico (territorio esposto a pericoli naturali).
- 2 Piano per la realizzazione degli interventi di prevenzione: Piano cantonale di premunizione e risanamento (PCPR).
- 3 Realizzazione degli interventi.

V-3.4.1. Gli interventi

La seconda tappa per la gestione dei territori a rischio è data dalla preparazione di un piano di intervento che, in accordo col piano finanziario, permetta una programmazione delle opere. L'Autorità politica ha fissato dei particolari criteri di intervento secondo delle priorità, 0 massima 3 minima.

V-3.4.2. Uso del suolo

Per quanto riguarda l'uso del suolo toccato dall'instabilità dei versanti, si sono scelti i seguenti indirizzi:

- territorio non insediato: in linea di principio, dovrebbe essere lasciato allo stato naturale, qualora altri interessi spingano verso un altro tipo di uso, la carta dei pericoli costituisce comunque un punto di partenza per l'analisi costi benefici;
- territorio già insediato: la gestione è fatta secondo i criteri presentati nella tabella V-1:

	Pericolo		
	Alto	Medio	Basso
Attività di incidenza territoriale			
Nuove zone edificabili	no	no (o)	sì (p)
Nuovi edifici	no	no (o)	sì (p)
Nuove costruzioni	no (m)	sì (o)	sì (p)
Cambiamenti di destinazione	no (n)	sì (o)	sì (p)
Modifiche senza cambiamento			
destinazione	sì (n)	sì (n)	sì (p)
Manutenzione	sì	sì	sì
Costruzione accessi e posteggi	sì	sì (p)	sì (p)

Tabella V-1. Uso del suolo in territorio già insediato

- (m) ubicazione vincolata (+ p)
- (n) non deve esservi un sostanziale aumento di persone soggette a pericolo (+p)
- (o) indice di sfruttamento inferiore a 0.2 (+ p)
- (p) misure costruttive di protezione diretta organizzazione di un sistema di allarme

A conclusione di questa seppur sintetica presentazione degli approcci seguiti in Svizzera per affrontare il tema dei pericoli naturali, si vuol sottolineare la necessità di un progresso tecnico che dovrebbe toccare in particolare i seguenti settori:

- il rilievo geomorfologico
- le tecniche di misura
- la modellistica (con le sue implicazioni sia fisiche sia numeriche)
- la progettazione delle opere di difesa.

V-3.5. Archiviazione delle informazioni

Già dagli anni '70 si è provveduto alla realizzazio-

ne di schede, al cui interno sono indicati i processi e le formazioni geologiche interessate (figura V-8).

Nel 1991, al momento dell'entrata in vigore della Legge sui territori esposti a pericoli naturali, si è ampliata la Banca Dati delle caratteristiche fisiche del Cantone realizzando anche un progetto "pericoli naturali" in grado di assicurare:

- una notevole facilità di aggiornamento
- il disegno informatizzato
- la possibilità di correlare e rappresentare graficamente più informazioni.

Attualmente tutte le informazioni riguardanti il Cantone si stanno trasferendo su un GIS che dovrebbe contenere linee, superfici e schede: un esempio tratto da questo GIS si trova nel CD Rom allegato che contiene la carta della distribuzione dei dissesti che interessano i versanti in roccia nel Bacino della Maggia, oggetto del presente Programma INTERREG.

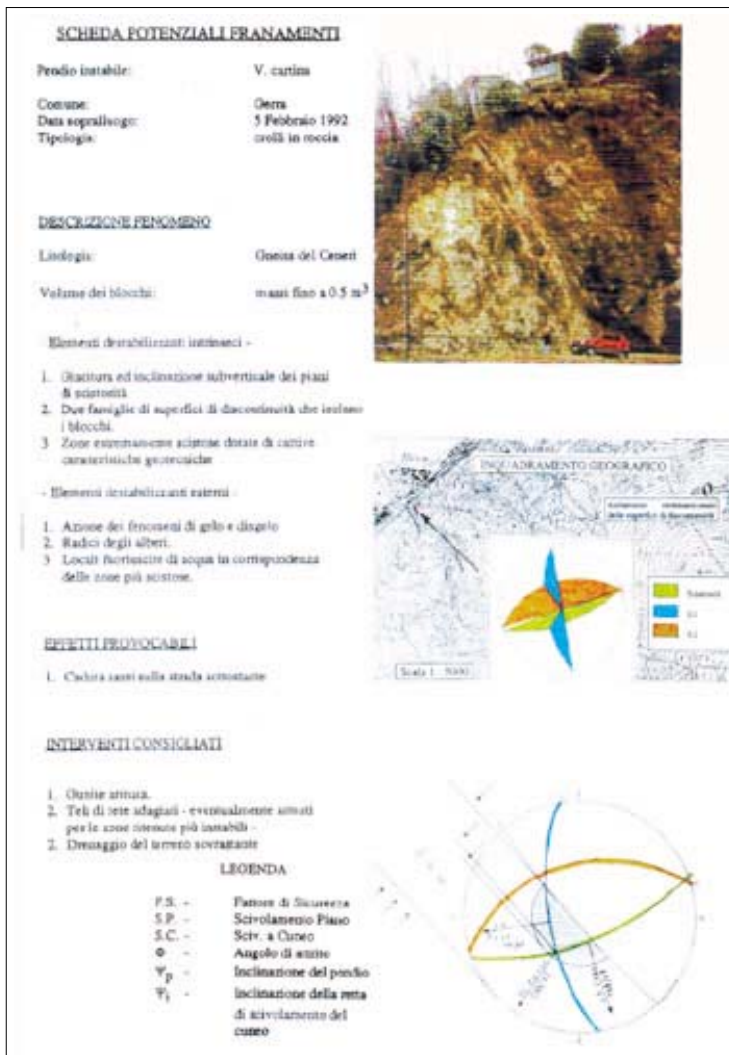


Figura V-8. Esempio di scheda per il censimento degli eventi franosi

V-4. DUE TIPOLOGIE DI INSTABILITÀ DEI VERSANTI

V-4.1. I grandi movimenti di massa

Con il termine “Grandi Movimenti di Massa” si intendono essenzialmente quei fenomeni che coinvolgono porzioni di ammasso di volume superiore al milione di metri cubi.

Simili volumetrie pongono, dal punto di vista della stabilità, una serie di problemi aggiuntivi rispetto ai pendii di dimensioni più ridotte:

- la determinazione dell'estensione della zona potenzialmente instabile;
- l'individuazione delle cause del dissesto (tettonica, azione dei ghiacciai);
- la definizione dei parametri meccanici dell'ammasso roccioso costituente il versante (effetto di scala).

In ragione di tali problemi, lo studio di tali fenomeni richiede l'utilizzo di una serie di approcci (geologico, geotecnico, idrogeologico...) che devono integrarsi tra loro.

Nel presente capitolo vengono riportate un'analisi statistica relativa all'influenza dei parametri geometrici e meccanici sull'insorgere di grandi movimenti di massa, e una metodologia multidisciplinare di studio degli stessi. Vengono inoltre ripor-

tati lo studio del caso di Ceppo Morelli, nel bacino del Toce, svolto in condizioni di emergenza legata all'alluvione dell'ottobre 2000 e lo studio del caso di Campo Valle Maggia, nel bacino del Maggia.

V-4.1.1. Analisi statistica

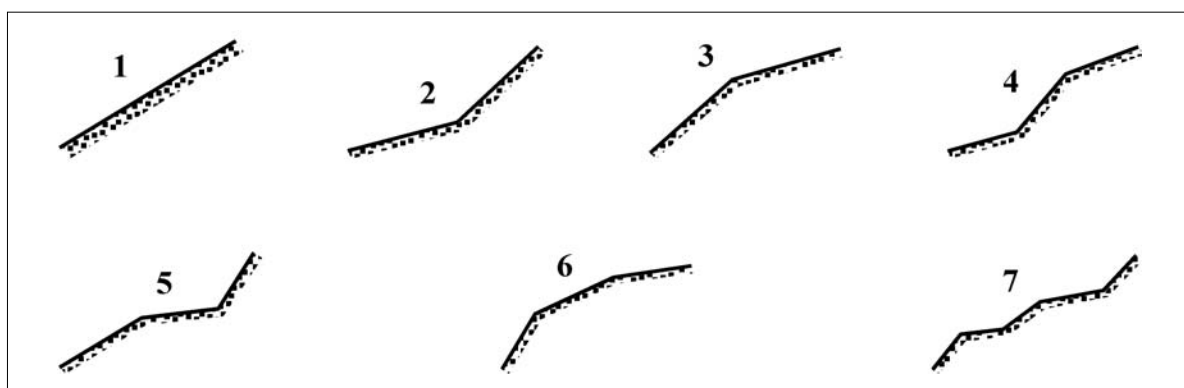
Ai fini di individuare i principali fattori geometrici e litologici predisponenti l'insorgenza di grandi movimenti di massa sono stati analizzati 152 casi segnalati dal Settore Studi e Ricerche Geologiche della Regione Piemonte.

Sono stati elaborati statisticamente i seguenti parametri: litotipo, configurazione a franapoggio o a reggipoggio, angolo tra la scistosità ed il pendio, dislivello, pendenza media ciglio-valle, tipo di configurazione ciglio-valle (figura V-9), angolo tra la valle glaciale ed il pendio.

I risultati ottenuti mostrano che:

- 1 per i calcescisti e gli gneiss minuti la configurazione a franapoggio è predisponente;
- 2 per i calcescisti possono presentarsi le configurazioni ciglio-valle 1, 2, e 3, con dislivelli compresi tra 800 e 1000 m;
- 3 per gli gneiss minuti sono possibili solo le configurazioni ciglio-valle 1 e 2, con dislivelli compresi tra 600 e 800 m.

Figura V-9. Configurazioni ciglio-valle considerate per le analisi



V-4.1.2. Metodologia di analisi di un grande movimento di massa

Lo studio di un grande movimento di massa deve comportare una serie di approcci tra di essi interagenti e deve condurre alla valutazione del rischio per le aree minacciate.

La metodologia proposta si compone dei seguenti punti:

- 1 analisi storica, modello geologico e fotointerpretazione, per la determinazione della zona potenzialmente instabile;
- 2 modello idrogeologico, per la determinazione della circolazione d'acqua nel versante;
- 3 modello geometrico, cinematico e geomeccanico, sulla base di indagini in superficie per l'individuazione dei sistemi di discontinuità e

dell'estensione della zona in movimento, e di indagini in profondità per il campionamento di materiale da sottoporre a prove di laboratorio e l'individuazione dello stato dell'ammasso roccioso e della superficie di scivolamento;

- 4 modello di calcolo dell'innescò dell'instabilità, analitico e/o numerico;
- 5 modello di calcolo evolutivo della massa instabile per la determinazione dell'intensità del fenomeno e delle zone di invasione;
- 6 inventario dei beni presenti nelle zone di invasione;
- 7 grado di vulnerabilità dei beni di cui al punto 6;
- 8 definizione del rischio;
- 9 opere di mitigazione del rischio

V-4.1.3. Il caso di Ceppo Morelli

La metodologia brevemente sintetizzata nel paragrafo precedente è stata applicata al caso di Ceppo Morelli, ubicato in Valle Anzasca nella zona nord-orientale del Piemonte.

Il fenomeno franoso si colloca nell'ambito più generale dell'instabilità, in atto da tempi remoti, dell'intero versante del Monte Rupio (figura V-10) ed ha assunto carattere di emergenza in seguito all'evento alluvionale dell'ottobre 2000.

Esso potrebbe coinvolgere nella sua evoluzione globale gli abitati di Campioli e Prequarera, evacuati in seguito all'alluvione, e la strada statale SS 549 per Macugnaga, già interessati in passato e nell'ottobre 2000 da fenomeni di caduta massi (figura V-12).

In relazione al carattere di emergenza dello studio, che ha mirato a fornire indicazioni per la gestione del rischio, la metodologia è stata applicata in parte, privilegiando la stima dei volumi coinvolti e delle aree di possibile invasione.

L'ammasso roccioso è costituito in massima parte di gneiss ed è formato da un insieme disarticolato di massi di grosse dimensioni. La fotointerpretazione ha permesso (figura V-12) di individuare un'area potenzialmente instabile di 150.000 m² su un dislivello di 600 m.

Il rilievo geostrutturale di superficie ha permesso l'individuazione di 5 sistemi di discontinuità, la giacitura dei quali è riportata in Figura.

Facendo riferimento alla figura, si individua la possibilità di scivolamento della massa disarticolata sul piano 2, passante per il piede della zona potenzialmente instabile. Tale massa è contrastata in parte nel suo movimento dalla parete rocciosa situata alla sua destra e coincidente con la direzione del piano 3. Sulla base di tale ipotesi è stato stimato un volume instabile di circa 5 milioni di m³.



Figura V-10. Vista d'insieme del versante in frana

Figura V-11. Foto d'archivio in cui è rappresentato un masso distaccatosi nell'ottobre 1971

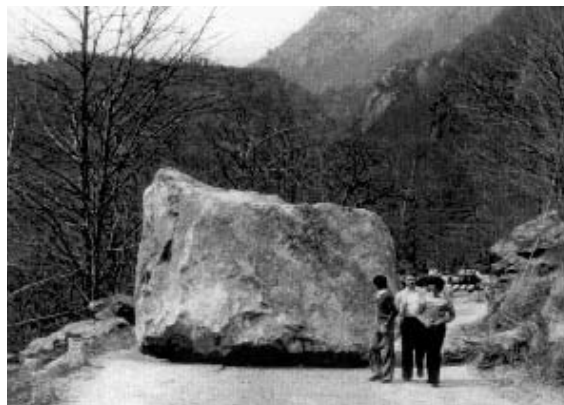
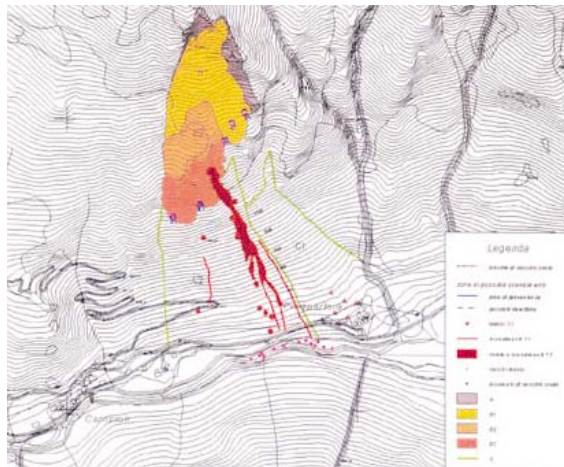
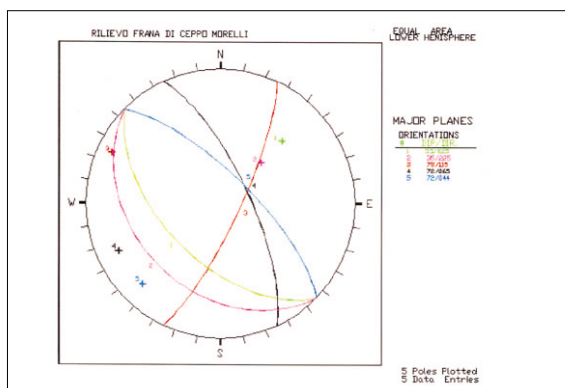


Figura V-12. Carta di supporto alla caratterizzazione degli elementi morfostrutturali del corpo di frana



Mancando gli elementi necessari alla definizione della probabilità di innesco (assenza di modello idrogeologico e di indagini in profondità), ai fini di fornire una risposta preliminare, ci si è limitati a valutare l'evoluzione a valle della massa di roccia qualora essa si destabilizzi.

Figura V-13. Rappresentazione dei principali piani di discontinuità evidenziati presso il sito in studio (giacitura rappresentativa del fronte: direzione di immersione 180°, inclinazione 50°)



A tale scopo si è fatto riferimento al metodo degli Automi Cellulari, applicato comunemente a modellazioni fisiche (Deangeli, 1997; Deangeli & Giani, 1998) e a casi reali di *debris flow* (Deangeli & Grasso, 1996). I risultati della modellazione sono riportati in figura V-14¹.

Dalla figura emerge quanto segue:

- la Frazione di Prequarera risulta essere interamente coinvolta nel fenomeno;

1)Le analisi numeriche sono state effettuate da M. Ferrero e C. Deangeli del Dipartimento di Georisorse e Territorio del Politecnico di Torino.

Bibliografia

AA. VV., (2000), *Frana di Prequarera - Comune di Ceppo Morelli, Gruppo interdisciplinare per lo studio del movimento franoso e la valutazione delle potenziali fasi evolutive*. Rapporto Confidenziale: Regione Piemonte, Torino.

DEANGELI C. & GRASSO N., (1996), The Evolutive mechanism of debris flow: analysis and protection works. In *Proc. 7th Int. Symposium on Landslides*, Trondheim, Balkema: 2, 1183-1188.

DEANGELI C., (1997), *Metodologia di studio delle colate rapide: modelli fisici matematici e numerici*. Tesi di Dottorato - Politecnico di Torino, Dipartimento di Georisorse e Territorio.

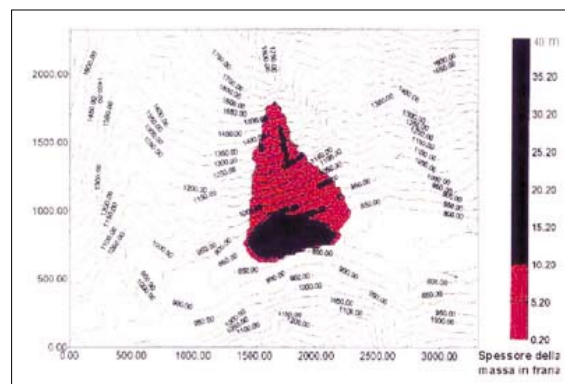
DEANGELI C. & GIANI G.P., (1998), *Analisi dei meccanismi di innesco e di propagazione di colamenti di detrito: modelli fisici e numerici*. Atti MIR98 " il ruolo della meccanica e dell'ingegneria delle rocce nella protezione del territorio e dell'ambiente" (Politecnico di Torino, 25-26 novembre 1998). Pàtron Ed., 237-252.

- l'abitato di Campioli risulta parzialmente coinvolto;
- un tratto significativo della Strada Statale 549 viene investito;
- un tratto dell'alveo del Torrente Anza è occluso dall'accumulo detritico.

Occorre però evidenziare come tali risultati debbano considerarsi preliminari, in relazione ad una serie di limitazioni legate all'esigua quantità di tempo disponibile per lo studio. In particolare:

- i dati di ingresso del modello sono limitati e da integrare;
- è necessario effettuare diverse simulazioni numeriche, in modo da valutare parametricamente l'influenza dei parametri in gioco.

Figura V-14. Area d'invasione del movimento franoso, nell'ipotesi di un collasso generale dell'intera area instabile



Sulla base dei risultati esposti si è provveduto a:

- mantenere evacuati gli abitati di Prequarera e Campioli;
- costruire una nuova strada sulla sponda opposta al movimento franoso.
- progettare una galleria sul lato sinistro della valle, che permetta di evitare la zona pericolosa.

V-4.2. La stabilizzazione dello scivolamento di Campo Vallemaggia

V-4.2.1. Introduzione

Lo scivolamento più importante presente nel Cantone Ticino è sicuramente quello nella zona di Campo Vallemaggia, alla cui base scorre un piccolo affluente del fiume Maggia, il Rovana. Lo scivolamento, che interessa un volume totale di circa 400 milioni di metri cubi, ha un fronte di 1200 m, uno spessore di 170 m ed un'estensione di 2 km.

Le conseguenze dello scivolamento sono:

- pericolo latente per il paese di Campo Vallemaggia ed i suoi abitanti;
- pericolo di sbarramento della valle e conseguente minaccia del fondovalle (possibile formazione di un lago).

Sono stati quindi eseguiti:

- studio del problema
- determinazione cause instabilità
- proposta di soluzioni idonee per la stabilizzazione.

V-4.2.2. Piano delle ricerche

- 1897 Prime ricerche (Prof. Albert Heim)
- 1927 Misure geodetiche
- 1962-63 Due sondaggi carotati di 200 m
- 1986-88 Profili sismici a riflessione
- 1986 Profili elettrici
- 1986 Rilievo geologico
- 1987 Tre sondaggi a distruzione di nucleo e posa d'inclinometri
- 1988 Installazione sistema di monitoraggio continuo (STAU)
- 1989 Due sondaggi all'altezza del Rovana
- 1990-91 Nove profili sismici a riflessione
Un profilo sismico a riflessione
Tre perforazioni profonde carotate e
posa d'inclinometri, piezometri e celle
a pressione.

V-4.2.3. Geologia

I sondaggi geognostici hanno permesso di rilevare quanto segue:

- strato superiore (30 ÷ 130 m), di roccia alterata ove però si riconoscono gli andamenti strutturali e litologici;
- strato intermedio (ca. 80 m), di roccia dislocata con permeabilità pari a $10^{-5} \div 10^{-6}$ m/s, sede principale della circolazione idrica;

- strato di base, di gneiss leucocratici intercalati da sottili strati di micascisto a granato, staurolite e distene ($25^\circ \div 30^\circ$ d'inclinazione), impermeabile.

L'andamento strutturale permette quindi di spiegare l'origine dello scivolamento: gli strati, sul fianco sinistro della valle, sono a franapoggio e perciò una situazione poco favorevole per la stabilità.

V-4.2.4. Idrologia e circolazione idrica

V-4.2.4.1. Precipitazioni

L'analisi dei dati storici delle precipitazioni (1931 ÷ 1986) ha permesso di determinare:

- media annua: 1861 mm (100%)
- minimo: 1255 mm (70%)
- massimo: 3002 mm (171%)
- ottobre - marzo: 1/3 delle precipitazioni
- aprile - settembre: 2/3 delle precipitazioni

Per quanto riguarda il deflusso del fiume Rovana questo può essere classificato come nivale:

- massimo da maggio a giugno
- minimo a febbraio

V-4.2.4.2. Idrologia superficiale

Per quanto riguarda l'analisi dei dati storici della portata del Rovana (misure prof. Gygax) si ha

- Portata media: 4 m³/s
- Portata massima: 93 m³/s (22.08.1954)

V-4.2.4.3. Idrologia sotterranea

- Circolazione idrica ridotta
- Presenza di acqua sotterranea in pressione (10 l/s e 3.5 atm.)

V-4.2.4.4. Analisi di stabilità

Il problema dell'analisi di stabilità è stato affrontato applicando i metodi dell'equilibrio limite (Morgenstern, Fellenius e Bishop). I risultati ottenuti evidenziano come la causa principale di questo dissesto sia l'acqua in pressione.

V-4.2.5. Stabilizzazione dello scivolamento

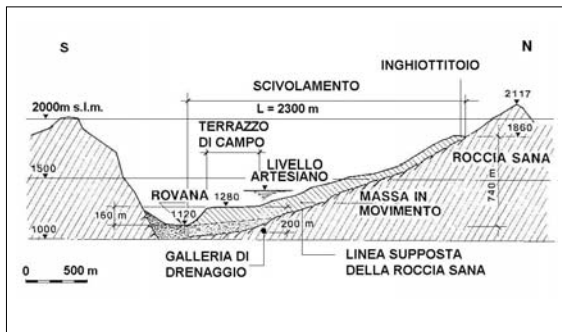
Essendo la causa principale del dissesto l'acqua in pressione si è provveduto alla realizzazione di:

- una galleria di drenaggio; il cui tracciato, nella roccia sana, è stato realizzato imponendo una copertura minima di 35 m. La lunghezza è di

1810 m e la sezione è di 10,5 m².

- Perforazioni di drenaggio: data la presenza di forti pressioni sono stati realizzati, ogni 100 m di galleria, 374 m di dreni subverticali. Per controllare l'evoluzione delle pressioni si sono eseguiti piezometri attrezzati con manometri e si è posizionata una cella di pressione all'interno di un sondaggio (CVM6).

Figura V-15. Sezione attraverso la frana di Campo Vallemaggia e posizione della galleria di drenaggio



V-4.2.6. Modello cinematico

Grazie alle ultime ricerche sulla geologia e l'idrologia della frana è stato possibile, attraverso la teoria di Vuillet & Hutter (1988), spiegarne l'evoluzione del movimento. Infatti, per movimenti lenti di versante si ipotizza una parte superiore rigida che scivola su un piano fisso, dove i due strati sono separati da un terzo strato detto di transizione, che si deforma nello scivolamento (materiale a comportamento viscoso).

V-4.2.7. Misure di controllo (2000-2001)

PIANO DI MONITORAGGIO

Per quanto riguarda la galleria di drenaggio si eseguono:

- misure manuali della portata delle perforazioni di drenaggio (mensilmente)
- misure manuali delle pressioni sui paramenti della galleria (mensilmente).

Il monitoraggio del corpo di frana prevede:

- misure automatiche in tempo reale degli sposta-

menti della stazione automatica STAU

- raccolta dei dati pluviometrici
- misure geodetiche di precisione una volta all'anno
- livellazioni lungo la strada con frequenza trimestrale
- misura delle portate delle sorgenti
- misure delle pressioni nel cunicolo
- misure della cellula a pressione installata nel sondaggio CVM6 (mensilmente).

PLUVIOMETRIA

Il regime pluviometrico del periodo 2000 - 2001, si situa nell'ambito dei valori pluriannuali tranne che per i mesi di settembre, ottobre e novembre 2000 dove, questi sono stati superati nella misura del 270 ÷ 320 % (periodo di ritorno T = 50 anni).

Parallelamente a queste precipitazioni si è avuto un incremento pressoché istantaneo, 0.75 ÷ 0.9 l/s, (progressiva 1250 e 1290 m). A metà dicembre però, questo incremento era pari a metà di quello iniziale. Il deflusso risulta quindi essere di natura principalmente subsuperficiale ("ipodermico").

DEFORMAZIONI DEL CORPO FRANA

Il cambiamento di direzione del moto (SW), conseguente all'entrata in funzione del cunicolo di drenaggio, ha reso inutile la stazione di rilevamento automatica (STAU).

MISURE GEODETICHE

Il confronto tra gli spostamenti del 2000 - 2001 e quelli del 1999 - 2000 confermano il progressivo arresto del movimento di Campo. Ci si trova infatti entro l'ellisse d'errore.

LIVELLAZIONE

È necessario rivalutare l'impostazione della rete di livellazione (abbassamento del punto di appoggio)

V-4.2.8. Idrologia sotterranea e pressioni nel corpo frana

- L'azione dei drenaggi si è mantenuta sui valori dell'anno precedente.
- Nel periodo in esame (da giugno 2000 a giugno 2001) il cunicolo di drenaggio ha scaricato ca. 920'000 m³ d'acqua pari a 29 l/s.
- La quantità d'acqua che penetra nel sottosuolo è compresa tra il 25 ed il 30% delle precipitazioni entrate ed uscite d'acqua nel corpo frana.
- Pressioni nel sondaggio CVM6 sono rimaste abbondantemente al di sotto della soglia dei movimenti (ca. 12 bar), attestandosi attorno ai 7 bar.

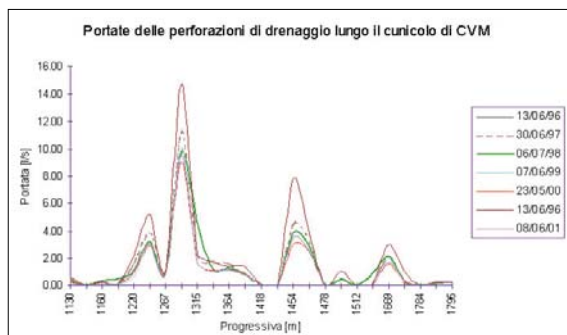


Figura V-16. Andamento delle portate

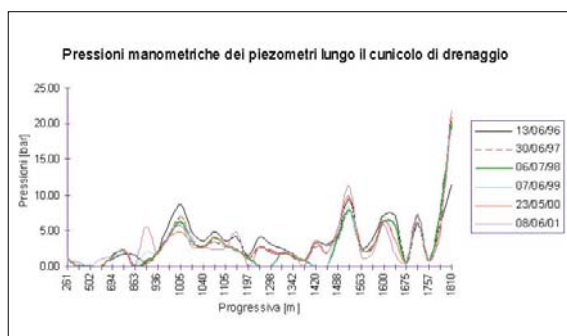


Figura V-17. Andamento delle pressioni

V-4.2.9. Conclusioni

- Vi è stata una riduzione del deflusso attraverso il cunicolo e una diminuzione delle pressioni (svuotamento del serbatoio e assestamento della frana).
- Prosegue invece l'erosione dell'orlo del terrazzo di Cimalmotto (inclinazione fronte scarpata maggiore dell'angolo di naturale declivio).
- Nel periodo tra settembre - novembre 2000, il sistema è stato sottoposto ad una prima prova di carico, e le misure registrate confermano il raggiungimento degli obiettivi.
- In termini operativi è confermata la validità del drenaggio come metodo di risanamento delle grandi frane dove la sottopressione si combina con la forza di gravità per provocarne il movimento.
- Da un profilo più teorico si vogliono segnalare da un lato una conferma delle teorie che interpretano gli scivolamenti lenti come degli scorrimenti di tipo viscoso, dall'altro però che le teorie più classiche sulla stabilità dei versanti permettono di arrivare a valide soluzioni progettuali.

Bibliografia

VULLIET L. & HUTTER K., (1988), *Viscous-type sliding laws for landslides*. Can. Geotech. J. 25, 467-477.

V-4.3. Le frane da crollo

Nelle aree montuose di vari paesi, ed in particolare nello spazio alpino, i crolli di elementi rocciosi rappresentano uno degli aspetti più comuni tra quelli legati alla stabilità dei versanti. L'accresciuta urbanizzazione e, in particolare, l'aumentata densità della rete stradale e ferroviaria hanno fatto sì che siano diventate molteplici le situazioni caratterizzate da elevati livelli di pericolo.

Se a questo aspetto si aggiunge anche il fatto che il fenomeno è difficile da prevedere, dato che un ammasso roccioso è caratterizzato da un grande numero di variabili che possono mutare sia nello spazio che nel tempo, si ha un'idea della complessità che lo studio dei crolli comporta dal punto di vista della pianificazione del territorio, in particolare per la definizione del perimetro delle aree sottoposte a pericolo e del grado di intensità di quest'ultimo.

Si ricorda che con il termine "frana di crollo" si

intende il distacco da una parete rocciosa o da un pendio ad elevata acclività di una massa di dimensione variabile, con spostamento di taglio lungo la superficie di distacco nullo o trascurabile, seguito da un moto vario per caduta libera in aria, salto, rimbalzo o rotolamento, da rapido ad estremamente rapido, eventualmente preceduto da movimenti minori nella fase precedente il distacco (Varnes 1978).

Nel capitolo V-4.3.1 sono presentati alcuni degli approcci più comunemente utilizzati per affrontare le problematiche legate alle frane di crollo, mentre nel capitolo V-4.3.2 si fa cenno ad alcune delle metodologie messe a punto negli ultimi anni da diversi autori per valutare sia l'estensione delle aree sottoposte a tali eventi franosi sia il grado di pericolo che ne può derivare. Infine nel capitolo V-4.3.3 viene affrontato un aspetto particolare del problema dei crolli, vale a dire quello legato alla presenza di opere viarie.

V-4.3.1. Gli approcci utilizzati per affrontare le problematiche legate alle frane da crollo

V-4.3.1.1. Classificazioni geomeccaniche

Un modo per caratterizzare in via preliminare un ammasso roccioso dal punto di vista della sua potenziale instabilità può essere quello di utilizzare una delle classificazioni geomeccaniche, ormai diventate classiche, attualmente finalizzate a scopi applicativi (progettazione di gallerie stradali, ferroviarie, ecc.): questo tipo di approccio non consente di individuare specifiche situazioni di instabilità ma, piuttosto, di ottenere un'informazione generale sulle condizioni dell'ammasso.

I sistemi di classificazione esistenti sono molteplici e sono stati sviluppati a cominciare dalla fine degli anni '40 da Terzaghi (1946), Lauffer (1958) e Deere *et al.* (1967), ma è a partire dall'inizio degli anni '70, con il metodo RSR proposto da Wickham *et al.* (1972), che tali classificazioni cominciano ad essere di tipo quantitativo (attribuzione di un punteggio ai diversi parametri che caratterizzano l'ammasso roccioso). Successive, ma dello stesso tipo, sono le classificazioni RMR di Bieniawski (1989), Q-system di Barton *et al.* (1974) e SMR sviluppato da Romana (1985). Ciascuno di questi tre metodi si basa sulla suddivisione preliminare dell'ammasso roccioso in "zone strutturali" omogenee ed individua, sostanzialmente, un indice numerico che determina la qualità dell'ammasso roccioso a partire da un predeterminato numero di parametri.

V-4.3.1.2. Analisi cinematica

L'analisi cinematica ha il pregio di consentire una rapida definizione dei tipi di eventuali instabilità; si basa sul principio che i movimenti avvengono lungo blocchi delimitati da fratture piane ed infinitamente estese, che lo spostamento si attui per effetto del peso dei blocchi, ostacolato dall'attrito lungo le fratture che li delimitano. Un modo per valutare i cinatismi possibili in relazione alle discontinuità presenti in una massa rocciosa è quello di utilizzare le proiezioni stereografiche; in tal caso sono necessari i seguenti dati: orientazione delle discontinuità, orientazione del pendio, angolo d'attrito sulle discontinuità.

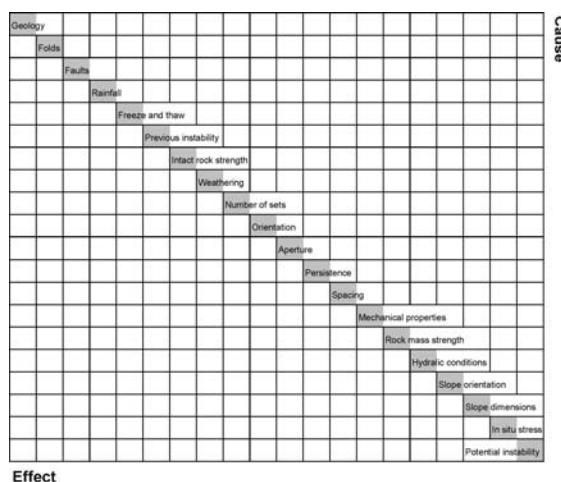
In generale l'analisi cinematica è adatta ad una valutazione preliminare della stabilità e consente, anche in fase di rilevamento, di poter operare una selezione dei siti che mostrano di avere situazioni di potenziale pericolo e sui quali occorre condurre analisi più approfondite.

V-4.3.1.3. Matrici RES

Il metodo RES (Rock Engineering Systems; Hudson, 1992) consente, mediante l'uso di una matrice (figura V-18), di esaminare i mutui rapporti tra i vari parametri che caratterizzano il sistema, cioè l'ammasso roccioso, e di capire il meccanismo che li coinvolge.

Si articola, normalmente, attraverso i seguenti passi: scelta dei parametri rilevanti per il problema caduta massi; analisi delle interazioni tra i parametri; valutazione dell'importanza e dell'influenza reciproca tra i parametri; definizione delle classi di valori che può assumere ciascun parametro; calcolo finale di un indice di pericolosità "R.M.I.I." (Rock Mass Instability Index).

Figura V-18. Esempio di matrice RES applicata alla stabilità di versanti in roccia (da Mazzoccola & Hudson, 1996, modificata)



V-4.3.1.4. Analisi della stabilità

Viene determinato il fattore di sicurezza, ad esempio con i metodi all'equilibrio limite, per un tratto di pendio che è, o si considera, uniforme.

Questo tipo di approccio ha significato solo se applicato ad aree molto piccole: una zonazione basata sulla verifica di stabilità può essere affrontata sia dal punto di vista deterministico (distribuzione del fattore di sicurezza) sia da quello probabilistico (distribuzione della probabilità che il fattore di sicurezza sia minore di uno).

V-4.3.2. Zonazione del pericolo

V-4.3.2.1. Matterock

Basandosi sul principio che nel caso di pendii rocciosi non esiste instabilità senza che siano presenti sistemi di discontinuità, il metodo Matterock (Roullier & Marro, 1997; Roullier et al. 1998; figura V-19) consiste nel determinare l'assetto strutturale delle pareti rocciose per poi confrontarlo successivamente con la topografia.

I settori che mostrano situazioni favorevoli allo scivolamento oppure al ribaltamento vengono identificati come instabilità (aléas).

A questa prima fase fa seguito:

- lo studio geomeccanico delle situazioni di instabilità;
- l'individuazione dei possibili cinematismi per ciascuna instabilità e dei volumi potenzialmente instabili;
- l'attribuzione di un grado di pericolosità sulla

base della valutazione di persistenza delle discontinuità, grado di attività passata, presenza di acqua, grado di sensibilità del sistema rispetto a fattori di degrado oppure, di segno opposto, rispetto a fattori stabilizzanti, fattore di sicurezza.

V-4.3.2.2. Metodo del LPC (Laboratoire Central des Pontes et des Chaussées)

Questo metodo (LPC 1978), che riprende alcuni principi che ispirano il più generale sistema di cartografia ZERMOS (Zones Exposées à des Risques liés aux Mouvements du Sol et du sou-sol), prevede una prima fase di raccolta di dati di base che riguardano la topografia, la litologia, la frequenza e la tipologia degli eventi passati, compresi gli eventuali danni che questi hanno provocato. A questa fa seguito una indagine di dettaglio che consiste nell'identificare e classificare gli eventi potenziali e nel definire il volume delle masse rocciose poten-

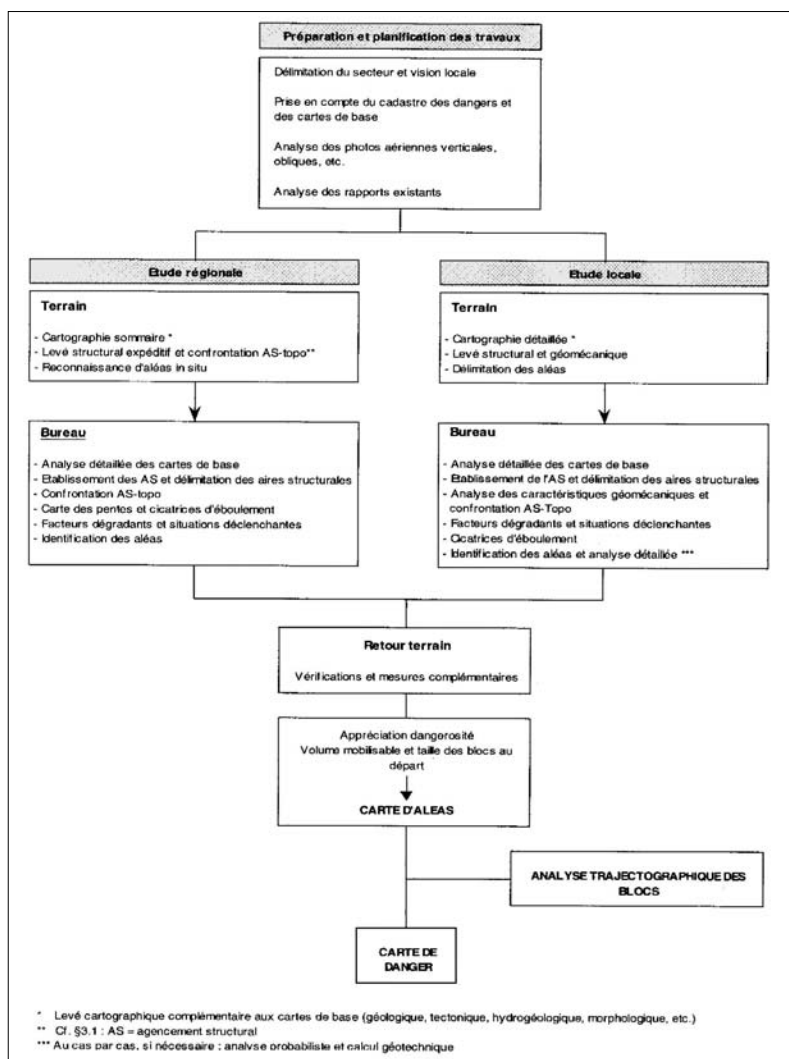


Figura V-19. Andamento delle pressioni

zialmente instabili.

Tutte le informazioni precedenti vengono trasferite su una base cartografica sulla quale vengono così definiti il pericolo, la probabilità che questo ha di verificarsi (hazard) e l'area di invasione.

V-4.3.2.3. R.H.A.P.

La procedura R.H.A.P. (Rockfall Hazard Assessment Procedure; Regione Lombardia 2000) è stata messa a punto per effettuare una zonazione basata sulla pericolosità ed ha come obiettivo quello di essere utilizzata dal punto di vista della pianificazione. Essa si adatta ai crolli di volume inferiore a 1000 m³ e si applica sia alla zona di alimentazione, valutando la predisposizione di una parete a generare situazioni di instabilità, che al pendio sottostante, in termini di probabilità che vengano raggiunte determinate distanze lungo le traiettorie di rotolamento dei blocchi.

Vengono sviluppati i seguenti passaggi:

- individuazione delle pareti rocciose che possono produrre crolli;
- delimitazione sulla parete di aree omogenee in termini di caratteristiche geomeccaniche e morfologiche;
- identificazione delle aree raggiungibili dai blocchi mediante simulazioni di caduta con modelli numerici;
- suddivisione del pendio in tre settori in funzione della percentuale di arresto del 70, 95 e 100% dei blocchi;
- in aggiunta si valuta la probabilità di distacco del crollo in ciascuna delle aree omogenee;
- la classe di pericolosità viene poi incrementata, lasciata invariata oppure diminuita di 1 a seconda del fatto che a monte sia presente una parete rocciosa ad attività alta, media oppure bassa: in questo modo sono possibili 5 classi di pericolosità.

V-4.3.2.4. Rockfall Hazard Rating System e Ontario Rockfall Hazard Rating System (RHRON)

Tra i metodi che utilizzano un sistema di classificazione per attuare una zonazione del pericolo va segnalato il Rockfall Hazard Rating System (R.H.R.S.) messo a punto dal Dipartimento dei Trasporti dell'Oregon (Pierson et al. 1990; Pierson & Van Vickle 1993): esso è destinato alla valutazione del pericolo legato ai crolli che possono interessare il sistema viario autostradale o ferroviario ed ha la peculiarità di abbinare una valutazione di parametri legati alla situazione geologica delle pareti con una valutazione di alcune caratteristiche della strada che vi soggiace.

Ogni sito considerato potenzialmente instabile

riceve così un punteggio che tiene conto sia della gravità del dissesto sia di alcuni parametri (in totale nove) legati alle caratteristiche dell'infrastruttura. Il confronto fra i punteggi ottenuti per ogni sito analizzato mette quindi in evidenza le aree potenzialmente più pericolose, al fine di indirizzare, nel modo più appropriato possibile, gli eventuali interventi di sistemazione.

Il metodo viene trattato diffusamente nel capitolo successivo al quale si rimanda per gli ulteriori dettagli. In questa sede va ricordata una versione modificata in Ontario, il RHRON (Franklin & Senior, 1997): quest'ultimo risulta più sensibile ai dissesti che si trovano su pareti di limitate dimensioni e contiene cinque categorie in più rispetto alle nove del metodo RHRS.

V-4.3.3. Uno degli aspetti del problema: crolli e viabilità stradale

Parte dell'attività svolta nell'ambito del presente progetto INTERREG in tema di crolli e di viabilità nelle regioni di montagna è stata rivolta alla verifica dell'efficacia del metodo RHRS e della sua applicabilità in ambito alpino e, successivamente, alla messa a punto di un metodo alternativo più adatto alla tipologia della nostra rete viaria; per far ciò è stata presa in esame la strada di collegamento tra Locarno (Canton Ticino - Svizzera) e Domodossola (Verbania - Italia), che si snoda in parte sul territorio elvetico, con il nome di Strada Cantonale delle Centovalli, ed in parte sul territorio italiano, con il nome di S.S. n. 337 della Val Vigezzo (figura V-20). Tale scelta deriva da una serie di motivazioni quali, ad esempio, il fatto che si tratta di un'arteria di collegamento transfrontaliero quasi completamente delimitata da pareti rocciose particolarmente soggette ad attività di frana.

 **Figura V-20. Ubicazione della strada Centovalli - Vigezzo**



V-4.3.3.1. Il metodo RHRS (Rockfall Hazard Rating System)

Si sviluppa sui seguenti sei passaggi:

1. La creazione di una banca dati con i siti in cui si sono verificate cadute di elementi rocciosi.
2. L'analisi preliminare dei fronti rocciosi con lo scopo di differenziarli in base alla loro pericolosità geologica ed alla loro evoluzione pregressa. Durante questa fase, importante perché consente di ridurre drasticamente il numero di situazioni alle quali applicare i passi successivi della procedura, le pareti rocciose vengono suddivise in tre classi (A, B, C) di pericolosità geologica, "alta", "moderata" o "bassa".
3. L'analisi dettagliata delle zone precedentemente identificate come instabili (pareti "A"); per ogni zona vengono valutati, con un punteggio, nove parametri: presenza ed efficacia della trincea laterale della strada; rischio medio del veicolo; percentuale dello spazio di arresto (è in relazione alla visuale che un guidatore ha a disposizione e spazio di reazione e frenata); larghezza della carreggiata; altezza della parete; dimensione media (o volume complessivo) degli elementi instabili; caratteristiche geologiche della parete (cioè condizioni strutturali dell'ammasso roccioso e caratteristiche delle discontinuità predisponenti il movimento); dati storici (cioè clima ed analisi storica del versante. Al termine di questa fase, sulla base della somma dei punteggi ottenuti dai nove parametri precedenti viene definita una scala di pericolosità.
4. Il progetto preliminare di consolidamento e/o difesa.
5. Il progetto definitivo e l'attuazione dell'intervento di risanamento.
6. La revisione e l'aggiornamento annuale della banca dati.

V-4.3.3.2. Modifiche apportate al metodo RHRS

Il lavoro che abbiamo effettuato ha permesso di mettere in evidenza alcuni aspetti critici del metodo RHRS, che non lo rendono del tutto trasferibile alla realtà di un sistema stradale alpino.

Il principio generale su cui si basa, vale a dire l'abbinamento di informazioni di natura diversa, organizzate in un sistema di giudizi standardizzato, è senza dubbio idoneo a fornire uno strumento di decisione efficace. Tuttavia esso è stato ideato per un sistema stradale a scorrimento veloce di dimensioni notevolmente superiori rispetto a quelle del sistema viario ordinario. Ciò comporta almeno due ordini di differenze: il primo, di tipo "stradale",

influisce sui valori critici da assegnare a parametri quali "larghezza della carreggiata", "visuale", ecc... Il secondo, "geologico", deriva ad esempio dal fatto che, in genere, un'autostrada ha uno sviluppo di diverse centinaia di chilometri e può quindi attraversare contesti lito-strutturali anche molto disomogenei, differenziabili tra loro sulla base di pochi elementi, anche solo qualitativi.

Proprio in ragione di una migliore caratterizzazione geologica dei siti, che nel metodo RHRS standard ci è apparsa troppo sommaria, è derivata l'esigenza di apportare alcune modifiche alla procedura di analisi. Tale esigenza ci ha portato a proporre un sistema alternativo, meno qualitativo, per condurre l'"analisi preliminare", come mostrato in sintesi dalla figura V-21, e due approcci differenti per la definizione del parametro "caratteristiche geologiche" nell'analisi di dettaglio. Il primo, applicato al tratto svizzero della strada Vigezzo - Centovalli, sfrutta alcuni principi delle classificazioni geomeccaniche e dell'analisi cinematica delle instabilità, il secondo è un'applicazione del metodo delle matrici RES di Hudson (1992) ed è riferito al tratto italiano della stessa strada, vale a dire la S.S. n. 337 della Val Vigezzo. È rimasta invece invariata l'analisi degli altri parametri compresi nel metodo, la cui valutazione di rappresentatività ed efficacia appartiene a competenze più di ingegneria dei trasporti.

V-4.3.3.3. La Strada delle Centovalli: approccio geometrico-geomeccanico

Lungo tutto il tracciato della strada Vigezzo-Centovalli è stato dapprima verificato l'assetto geologico e strutturale generale e sono stati raccolti ed analizzati i dati relativi agli eventi pregressi ed ai più importanti fenomeni di instabilità. In seguito è stata realizzata una graduatoria della pericolosità tra i siti esaminati, così come viene definita mediante i nove parametri RHRS: essa dovrebbe costituire la base tecnica per definire una scala di priorità circa le opere di stabilizzazione da realizzare.

La strada delle Centovalli ha rappresentato l'occasione per applicare l'approccio geometrico-geomeccanico che è mostrato nella figura V-22.

Inizialmente sono state prese in considerazione 45 pareti rocciose situate nel tratto svizzero compreso tra Camedo ed Intragna (figura V-23) e la loro predisposizione a generare processi di instabilità è stata verificata sottoponendole alla "analisi preliminare" secondo la metodologia di figura V-21. Tale operazione ha permesso di ridurre a 21 le pareti da studiare nel dettaglio, cioè classificate "A": per ciascuna di esse sono poi stati misurati e/o valutati

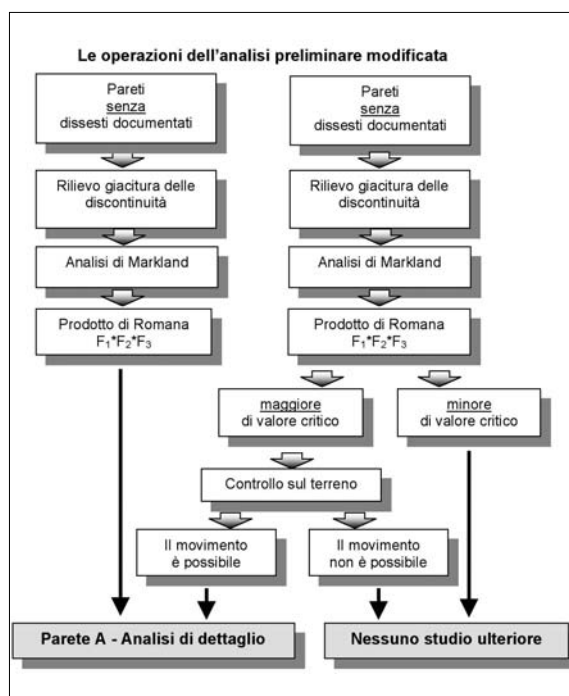


Figura V-21. Diagramma di flusso per l'analisi preliminare modificata

Figura V-22. Diagrammi di flusso del percorso attraverso cui calcolare il punteggio per "condizioni strutturali" e "caratteristiche delle discontinuità" nell'ambito del parametro "caratteristiche geologiche della parete"

tutti i nove parametri necessari all'analisi. I risultati sono sintetizzati dall'istogramma "B" di figura V-23.

Il punteggio ottenuto costituisce l'indicatore della pericolosità assoluta del tratto stradale che la parete sovrasta.

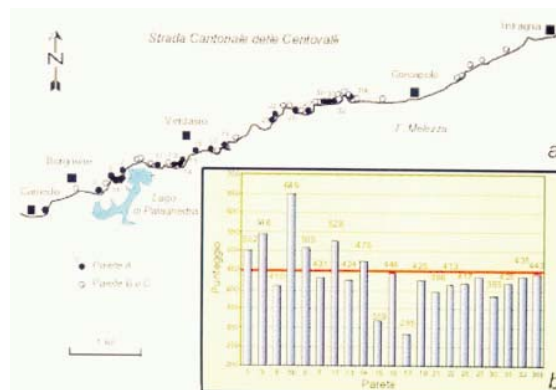
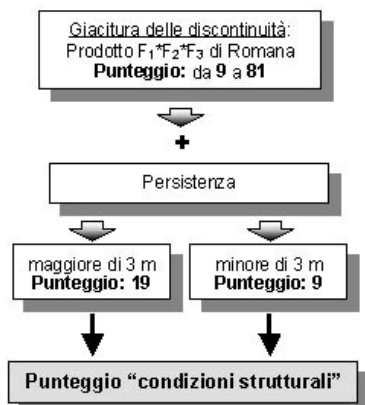
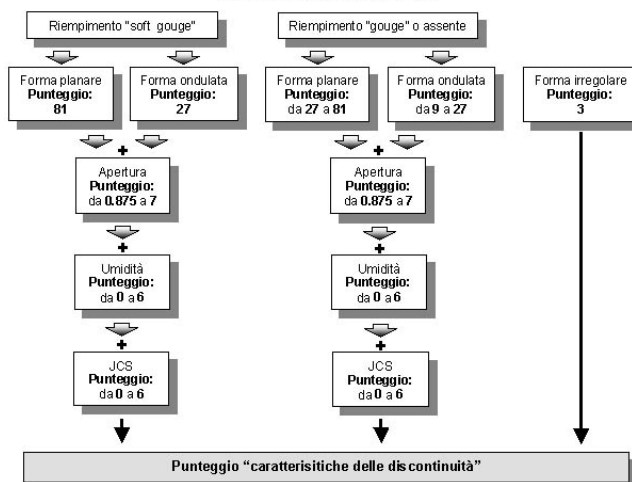


Figura V-23. a: ubicazione delle pareti analizzate mediante l'approccio geometrico-geomeccanico lungo la Strada Cantonale delle Centovalli (Svizzera); b: istogramma dei punteggi ottenuti: le pareti che si trovano sopra la linea marcata dovrebbero essere studiate nel dettaglio oppure risanate

Come si ottiene il punteggio per "condizioni strutturali"



Come si ottiene il punteggio per "caratteristiche delle discontinuità"



Sulla base di quanto suggerito dagli autori del metodo RHRS e dell'esperienza maturata durante questo studio, il punteggio-soglia al di sopra del quale sarebbero auspicabili verifiche di stabilità più approfondite ed eventuali interventi di sistemazione è pari a 450. Lungo la strada delle Centovalli si riscontrano sei siti con punteggio RHRS maggiore di 450: essi si identificano con le pareti 5b, 3, 11, 6, 1, 14, disposte in ordine di priorità decrescente. A tale proposito si deve osservare che quattro dei sei siti citati hanno già prodotto dissesti (5b, 3, 11, 1); viceversa altri due siti, le pareti 6 e 14, ricadono oltre la soglia di attenzione, pur non avendo fino ad ora manifestato problemi di instabilità. In generale nell'area studiata, gli aspetti che concorrono in maggior misura a determinare le differenze esistenti tra i punteggi totali dei vari siti sono essenzialmente legati alla situazione geologica, essendo le caratteristiche tecniche del tracciato stradale relativamente simili lungo tutto il percorso.

V-4.3.3.4. La Strada della Val Vigizzo: approccio mediante le matrici R.E.S.

Un secondo modo per affrontare la determinazione del punteggio relativo alle caratteristiche geologiche è stato invece definito tramite il RES ed applicato alla strada della Val Vigizzo; esso consente di analizzare tutti gli elementi che costituiscono il sistema (cioè l'ammasso roccioso) attraverso l'utilizzo di una matrice delle interazioni, in cui i termini della diagonale rappresentano i parametri presi in esame e gli altri termini le loro interazioni reciproche.

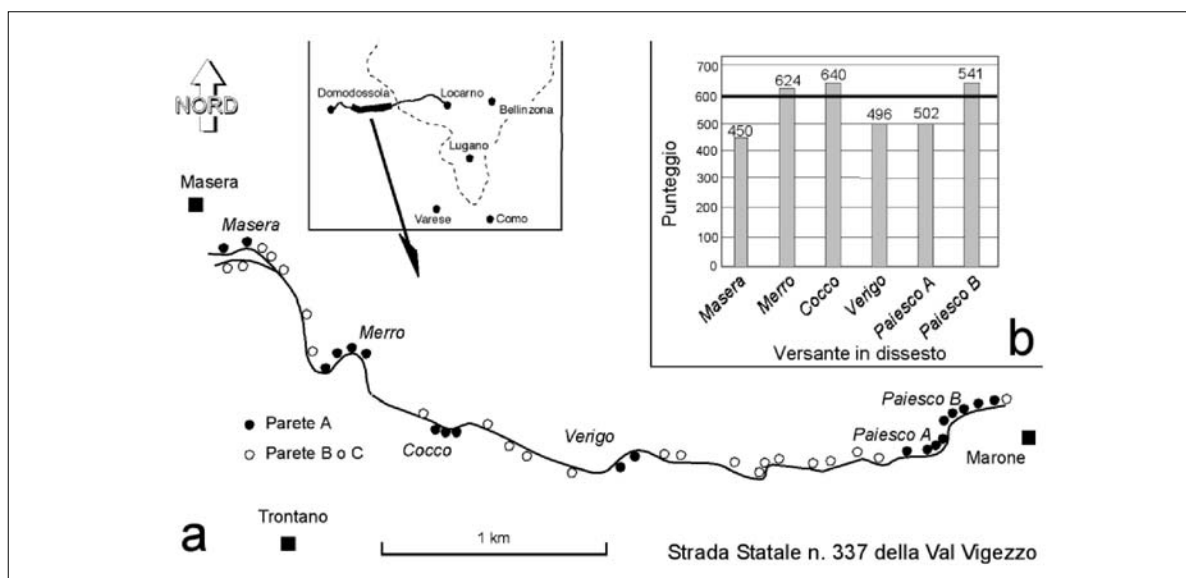
Per ogni stazione esaminata è così possibile calcolare l'indice di instabilità potenziale RMII (Rock Mass Instability Index).

Nello studio in esame sono stati presi in considerazione 16 parametri: la litologia, le precipitazioni, i cicli di gelo e disgelo, la presenza di faglie, il numero di famiglie di discontinuità (Jn), l'apertura, la spaziatura ed il riempimento delle discontinuità, la rugosità (JRC) e la resistenza a compressione dei giunti (JCS), l'orientazione delle discontinuità rispetto al pendio (Markland), la resistenza al taglio lungo i giunti (tj), l'angolo d'attrito dell'ammasso (f), la resistenza a compressione del materiale roccia (ricavata tramite il Point Load Test), la permeabilità dell'ammasso roccioso e l'instabilità pregressa (figura V-24).

litologia	0	1	2	2	1	3	1	1	2	3	3	1	2	2	1	25
precipitazioni	0	0	4	0	0	3	0	3	1	0	3	4	0	3	0	22
cicli gelo disgelo	0	0	1	1	1	0	2	2	1	1	4	2	0	4	0	19
faglie	0	0	0	4	2	4	1	3	4	4	1	1	4	4	4	36
Jn	0	0	0	0	0	4	0	0	0	4	0	0	4	4	4	20
apertura	0	0	2	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	8
spaziatura	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	4	3	4	15
riempimento	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	2	0	6	6
JRC	0	0	0	0	0	3	0	2	2	1	1	0	4	0	3	14
JCS	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	2	2	0	0	0	8
Markland	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	2	4	10	10
f	0	0	0	2	0	1	0	1	0	0	4	4	0	1	0	13
tj	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	5
Point Load Test	0	0	0	0	1	0	1	3	2	2	3	1	2	1	2	18
permeabilità	0	0	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2	0	0	6
instabilità pregressa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	9	8	9	12	13	19	11	14	25	16	25	14	30	225

Figura V-24. Matrice RES: un esempio relativo alla località Merro (Valle Vigizzo - Italia, v. figura 25)

Figura V-25. a: ubicazione delle pareti analizzate mediante l'approccio con le matrici RES lungo la S.S. 337 della Val Vigizzo (Italia); b: istogramma dei punteggi ottenuti: le pareti che si trovano sopra la linea marcata dovrebbero essere studiate nel dettaglio oppure risanate



Anche in questo caso, lungo il tratto di strada esaminato (Masera-Paiesco) si è proceduto all'individuazione delle pareti di classe "A" sulle quali è stata applicata la metodologia RHRS-RES. I risultati (figura V-25b) evidenziano che i versanti caratterizzati dal punteggio più elevato (Cocco, Paiesco B, Merro) sono quelli che mostrano, o hanno mostrato, l'instabilità e la pericolosità più marcate. Tali versanti sono anche quelli in cui più massiccio è stato l'intervento di sistemazione; fa eccezione il pendio di Cocco, dove un intervento anche parziale sul versante sarebbe auspicabile nonostante l'alveo del torrente agisca da trincea naturale a protezione del solido stradale. L'analisi è risultata efficace anche nei confronti delle situazioni di maggior pericolo potenziale. Solo la pericolosità del versante Paiesco A, sede del dissesto più recente, risulta a nostro avviso sottostimata. Inferiore alle aspettative è anche il punteggio RHRS del versante di Masera (nonostante l'indice RMII risulti analogo a quello dei due pendii di Paiesco): la distanza di visuale disponibile permette infatti di limitare il pericolo per i veicoli in transito.

V4.3.3.5. Conclusioni

Il metodo RHRS, con le modifiche e le integrazioni proposte, rappresenta uno strumento conoscitivo rapido per l'analisi delle condizioni delle pareti rocciose sovrastanti un'infrastruttura viaria, e come tale va giudicato. In altre parole non sostituisce lo studio di dettaglio che deve necessariamente precedere la progettazione di eventuali opere di protezione, mentre ha la funzione di identificare in modo preliminare le situazioni per le quali programmare un approfondimento.

Si può senz'altro affermare che la procedura per l'esecuzione dell'analisi preliminare proposta nel presente studio è più efficace per definire le caratteristiche strutturali delle pareti rocciose di quanto non lo sia quella originariamente prevista dal metodo RHRS, garantendo nel contempo una maggiore 'scrematura' dei siti da sottoporre ad indagini di dettaglio fondata su dati geologici più obiettivi e significativi. Questo procedimento consente inoltre di riutilizzare i dati emersi nel corso dell'analisi preliminare nella successiva fase rappresentata dall'analisi di dettaglio, riducendo così i tempi di esecuzione.

Per quanto riguarda la procedura modificata dell'analisi di dettaglio si possono fare alcune considerazioni:

1. la maggior parte delle situazioni risultate più pericolose erano già note per aver prodotto, in tempi più o meno recenti, dissesti di varia entità.

Ciò si presta a due chiavi di lettura: una positiva, come conferma del fatto che i parametri utilizzati sono adeguati per identificare situazioni effettivamente problematiche, ed una negativa, secondo la quale il metodo porterebbe semplicemente a riaffermare situazioni già altrimenti conosciute. In realtà il sistema ha lo scopo principale proprio di stabilire, anche nell'ambito di situazioni già note, una scala di priorità negli interventi di sistemazione.

2. La scelta di approfondire gli aspetti geologici del metodo seguendo due differenti procedure deriva in parte dalla volontà di sperimentarne l'efficacia in un simile contesto e in parte dall'esigenza di limitare quanto più possibile la soggettività nella definizione di tali aspetti. L'esperienza maturata nel corso di questo lavoro ci ha portato a concludere che entrambe le metodologie, pur nella loro diversità, sono adeguate ad identificare le situazioni di instabilità e possono essere utilizzate indifferentemente.
3. Sebbene esuli dagli scopi di questo studio, va sottolineato come l'attribuzione dei punteggi ai parametri tecnici di natura stradale perda parzialmente significato in contesti come quello esaminato, dove la carreggiata mantiene caratteristiche simili per tutta la tratta studiata. Questo limite è facilmente spiegabile con gli obiettivi originari del metodo RHRS (confronto di ampia casistica relativa a strade differenti, in contesti geologici differenti, ecc.); è dunque necessario incrementare le potenzialità del metodo introducendo opportune modifiche anche ai fattori stradali, in adeguamento alle caratteristiche basilari di una normale strada montana europea.

Bibliografia

- BARTON N., LIEN R. & LUNDE J., (1974), *Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support*. Roch. Mech., 6, 183-236.
- BIENIAWSKI Z.T., (1989), *Engineering Rock Mass Classification*. Wiley, New York, 251 pp.
- DEERE D.U., HENDRON A.J., PATTON F.D. & CORDING E.J., (1967), *Design of Surface and Near Surface Construction in Rock*. Proc. 8th U.S. Symp. Rock Mech., AIME. New York., 237-302.
- FRANKLIN J.A. & SENIOR S.A., (1997), *Outline of RHON, the Ontario Rockfall hazard rating system*. Proceedings International Symposium on Engineering Geology and the Environment, Athens, Greece, 657-663.
- HUDSON, J.A., (1992), *Rock engineering systems: theory and practise*. High Plains Press (JAH), pp. 185.
- LAUFFER H., (1958), *Gebirgsklassifizierung für den Stollenbau*. Geol. Bauwesen, 74, 46-51.
- LPC. 1978 *Eboulements et chutes des pierres sur les routes, Méthode de cartographie Groupe d'études des Falaise*, Laboratoire Central des Pontes et des Chaussées. Rapport de recherche LPC 80, 63 pp.
- MAZZOCCOLA D. & HUDSON J.A., (1996), *A new rock mass characterisation method for indicating large scale instability with an example application in the Italian Alps*. Quarterly Journal of Engineering Geology, 29, 37-56.
- PIERSON L.A., DAVIS S.A., VAN VICKLE R., (1990), *Rockfall Hazard Rating System*. Implementation Manual, Federal Highway Administration (FHWA), Report FHWA-OR-EG-90-01. FHWA, U.S. Department of Transportation.
- PIERSON L.A. & VAN VICKLE R., (1993), *Rockfall Hazard Rating System*. Participant's Manual, Federal Highway Administration (FHWA), Report FHWA-SA-93-057. FHWA, U.S. Department of Transportation.
- REGIONE LOMBARDIA, *Struttura Rischi Idrogeologici. 2000 Procedure per la valutazione e la zonazione della pericolosità del rischio da frana in Regione Lombardia*. Bollettino Ufficiale della Regione Lombardia, 51.
- ROMANA M., (1985), *New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes*. In Proc. Int. Symp. on the Role of Rock Mech. Zacatecas, pp. 49-53.
- ROULLIER J.P., & MARRO C., (1997), *Application de la méthodologie Matterock à l'évaluation du danger lié aux falaises*. Eclogae geol. Helv., 90, 393-399.
- ROULLIER J.P., JABOYEDO M., MARRO C., PHILIPPOSIAN F. & MAMIN M., (1998), *Pentes instables dans le Pennique Valaisan. Matterock: une méthodologie d'auscultation des falaises et de détection des éboulements majeur potentiels*. Rapport final PNR 31. Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 239 pp.
- TERZAGHI K., (1946), *Rock Defects and Loads on Tunnel Support*. Rock Tunneling with Steel supports, (R. V. Proctor and T. White eds), Commercial Shearing Co. Youngstown, OH, pp. 15-99.
- VARNES D.J., (1978), *Slope movements. Types and process. Landslides Analysis and Control* (R.L. Schuster & R.J. Krizek, eds.), Nat. Acad. of Sciences, Transp. Res. Board. Washington D.C., Special Report 176, 11-35.
- WICKHAM G.E., TIEDEMANN H.R. & SKINNER E.H., (1972), *Support Determination based on Geologic Predictions*. Proc. Rapid Excav. Tunneling Conf., AIME. New York.

V-5. ALTRI TEMATISMI

Lo studio dei fenomeni di instabilità sui versanti della Val d'Ossola è stato integrato con altre informazioni ricavate dall'analisi fotointerpretative riguardanti le *principali discontinuità geologiche* dell'area e la *propensione della rete idrografica a generare piene torrentizie con elevato carico solido* in funzione del grado di fratturazione e di disarticolazione del substrato roccioso indotto dai movimenti gravitativi. Questi ulteriori livelli di informazione (scorporate dalla carta-inventario delle frane) completano le informazioni sulla pericolosità dei versanti instabili e possono fornire dati di supporto all'Azione 4 che affronta il tema specifico delle colate detritiche, sviluppato da altri soggetti operanti nel Progetto INTERREG II.

Un ulteriore contributo alla conoscenza dell'instabilità naturale della Val d'Ossola è venuto dall'analisi fotointerpretativa della ripresa aerofotografica eseguita successivamente all'intenso evento alluvionale che interessò soprattutto la Val Formazza nella seconda decade di agosto 1987, con grande prevalenza di fenomeni torrentizi. Dallo studio ne è conseguita la realizzazione di una *"Carta degli effetti dell'evento alluvionale del 25-26 agosto 1987"* alla scala 1:25.000.

L'evento alluvionale dell'agosto 1987 fu responsabile dell'innescò di numerose colate detritiche e di occasionali frane in Val Formazza e, più sporadicamente, in altre valli tributarie del medio F. Toce.

Gli effetti morfologici di questo evento ed i danni conseguenti, documentati da una specifica ripresa aerofotografica di poco posteriore e dal volo IGM 1988 per le parti periferiche, sono stati riportati su quattro tavole riguardanti l'area più significativamente colpita. In merito si rileva:

- un'intensità di evento probabilmente paragonabile con quella raggiunta dall'evento del 26 agosto 1834, almeno per la Val Formazza;
- una particolare concentrazione di colate detritiche torrentizie nel comune di Formazza, generate dai tributari del Toce con apporti anche consistenti di sedimenti prevalentemente grossolani sui conoidi;
- il singolare riprodursi dell'"effetto cascata o manicotto" (*fire-hose effect*) in apice conoide di tributari che si raccordano al fondovalle con un salto roccioso;
- la modesta reazione dei versanti a piogge che pure hanno raggiunto valori giornalieri superiori anche a 200 mm in diverse stazioni: le frane

superficiali sono state sporadiche, anche se in più casi esse sono state motivo di innescò di colate detritiche;

- l'attivazione del reticolo idrografico si è manifestata già nella fascia glacializzata: sulla superficie dei ghiacciai si sono talora arrestati cumuli detritici provenienti dai canaloni sovrastanti, mentre le morene si sono rivelate aree sorgenti di colate detritiche, talora cospicue.

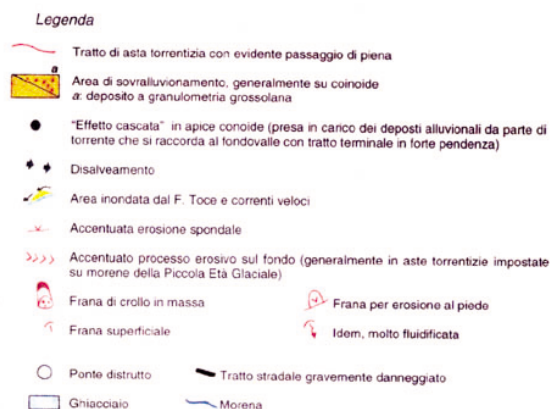


Figura V-26. Legenda della Carta dell'evento alluvionale del 25-26 agosto 1987 in Val Formazza

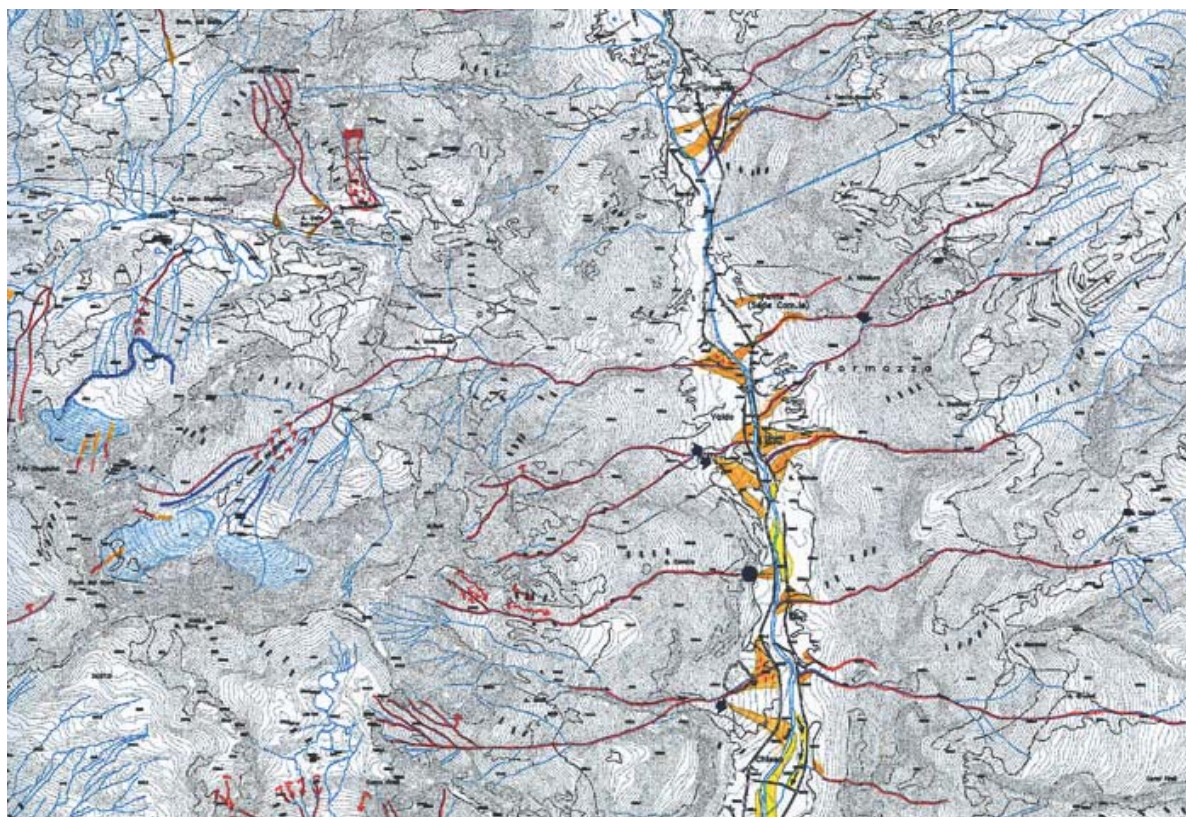


Figura V-27. Estratto della
Carta dell'evento alluvionale
del 25-26 agosto 1987
in Val Formazza

Quest'ultimo aspetto accomuna l'evento alluvionale dell'agosto 1987 in Val Formazza a quello che, negli stessi giorni, coinvolse altri bacini glacializzati italiani (Valtellina, Val Venosta), austriaci e svizzeri. La copiosa letteratura prodotta su questo evento collega la grande diffusione di fenomeni di instabilità accaduti nella fascia altimetrica di pertinenza glaciale e periglaciale alla collocazione dell'isoterma 0°C a quote insolitamente elevate (superiori a 3500 m), attribuendone le cause al probabile riscaldamento globale. Analoghe manifestazioni di instabilità si sono ripetuti in anni più recenti nell'intero arco alpino (es. settembre 1993 in Piemonte, luglio 1996 in Valle d'Aosta) e sempre più frequentemente sono segnalati crolli da creste sommitali e da speroni rocciosi in pieno ambiente glaciale.

La progressiva deglaciazione dei bacini alimentatori, in atto dalla fine della Piccola Età Glaciale (circa 1820-1860), sta comportando anche una modificazione termica e meccanica delle masse rocciose: in particolare la riduzione di spessore del ghiaccio, dell'ordine di metri o decine di metri, determina una significativa diminuzione dell'azione di confinamento esercitata dal ghiacciaio sulle pareti rocciose adiacenti; al contempo cicli di gelo-disgelo, come conseguenza della fusione del permafrost, favoriscono e accelerano la fratturazione della roccia.

A queste cause sono presumibilmente da attribuire gli incessanti crolli di roccia e ghiaccio che, a oltre 4000 m di quota e da circa due anni, anche in piena stagione invernale, stanno modificando la parete ossolana del Monte Rosa.

AZIONE 6

**Contributo piemontese al progetto
Verbano: ottimizzazione della
regolazione del lago Maggiore
finalizzata alla riduzione dei danni
alluvionali ed alla valorizzazione
delle risorse umane**

Contributo dei partner italiani:

Secondo BARBERO

Regione Piemonte - Settore Meteoidrografico e reti di
Monitoraggio

Alessandro MARCHI, Valter AMBROSETTI

CNR - Istituto di Idrobiologia M. De Marchi

Contributo dei partner svizzeri:

Giorgio SALVADÈ, Laura FOGLIA,

Stefano PISANI, Claudio PERVANGHER

Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana

- Istituto Scienze della Terra

VI-1. INTRODUZIONE

Le problematiche di regolazione del Lago Maggiore sono state affrontate nel progetto “Verbano”, sviluppato nell’ambito dei programmi INTERREG II, che ha avuto come obiettivo la ricerca di soluzioni attraverso la realizzazione di interventi strutturali e di una nuova politica di gestione dei livelli del lago. Tali soluzioni devono minimizzare i danni causati da eventi alluvionali tanto a monte quanto a valle del lago, minimizzare i danni causati dalla mancata fornitura idrica agli utenti irrigui e idroelettrici di valle nonché quelli subiti dalla navigazione e dal turismo quando si deprimono eccessivamente i livelli e contemporaneamente garantire un deflusso minimo del Ticino a valle dello sbarramento di Pamperduto.

La gestione dei livelli del lago richiede la conoscenza dei contributi idrici forniti dagli affluenti tra cui il fiume Toce che si sviluppa in Piemonte; l’azione 6 ha la finalità di integrare appunto sull’area piemontese gli studi per la gestione in tempo reale dei rischi alluvionali nel Verbano.

Nello specifico l’azione 6 ha riguardato:

1. la taratura e l’integrazione del bacino del fiume Toce nel modello idrologico previsionale della quota del lago Verbano durante eventi alluvionali, sviluppato presso l’Istituto Scienze della Terra di Cadenazzo (Canton Ticino) nell’ambito del progetto “Verbano”;
2. la definizione di soglie pluviometriche nella Valle Ossola per l’interpretazione dei dati di monitoraggio pluviometrico in tempo reale.

VI-2. MODELLO IDROLOGICO

Il modello idrologico, sviluppato presso l’Istituto Scienze della Terra, cerca di dare una risposta, basata su ipotesi ben definite, alla protezione civile e alle autorità politiche che, in caso di preallarme alluvionale, desiderano essere informate sull’evoluzione futura delle portate dei fiumi e sull’eventuale esondazione del lago.

A causa del corto tempo di risposta (tra 4 e 6 ore) del bacino imbrifero del Verbano a un impulso di pioggia, una previsione a lungo termine non può essere fatta senza tenere conto delle piogge previste. La difficoltà consiste nella trasformazione del quantitativo di precipitazione in portata in entrata al lago, dovuta alle differenze morfologiche tra i bacini e alla non uniformità areale della pioggia.

Per la trasformazione pioggia/deflussi è stato scelto il metodo di Nash e del CN (Chow, 1988).

Basilare per lo sviluppo dell’azione 6 è stata la

realizzazione dell’azione 1: Condivisione dei dati meteoroidrologici in tempo reale, in differita e storici. In effetti, gli scambi di informazioni in tempo reale sono indispensabili per valutare l’ampiezza di un fenomeno che interessa più regioni, mentre lo scambio dei dati storici ha permesso di tarare il modello previsionale dell’idrogramma delle portate del Toce, ossia di trovare quei parametri fisici che caratterizzano i metodi di trasformazione della pioggia in deflussi.

VI-2.1. Distribuzione areale delle piogge

Avendo a disposizione un unico punto di misura di portata del fiume Toce a Candoglia, si è dovuto considerare il bacino imbrifero come un unico bacino, con sezione di chiusura a Candoglia. L’area stimata del bacino è di 1537 km².

La tabella VI-1 e la figura VI-1 elencano le stazioni pluviometriche di cui la Regione Piemonte invia i dati in tempo reale.

Questi dati puntiformi devono essere poi estrapolati su scala areale per determinare la quantità di pioggia caduta su tutto il bacino.

Diversamente da quanto fatto per i bacini del Canton Ticino, per i quali si è utilizzato in parte il metodo di Thiessen, per il bacino del Toce è stato fatto riferimento alla “Carta delle potenzialità pluviometriche di 12 mesi” elaborata dal Consiglio Nazionale delle Ricerche (Istituto Italiano di Idrobiologia).

Il bacino è stato diviso in quattro zone a seconda della piovosità e si è calcolato la percentuale rappresentata da ciascuna zona rispetto all’estensione totale del bacino (Foglia L., 2000).

 Tabella VI-1. Località pluviometri

Pluviometri Regione Piemonte
Antrona - Alpe Cheggio
Baceno - Alpe Devero
Bognanco - Pizzanco
Crodo
Corsolo
Druogno
Stresa - Someraro
Varzo - S. Domenico
Lago Paione
Domodossola
Stresa - Mottarone
Formazza - Piano dei Camosci
Macugnaga - Passo del Moro
Mottac
Sambughetto
Candoglia
Pallanza

STAZIONI PLUVIOMETRICHE

- 1 Pian dei Camosci
- 2 A. Devero
- 3 S. Domenico
- 4 Crodo
- 5 L. Paione Sup.
- 6 Pizzanco
- 7 Domodossola
- 8 Druogno
- 9 A. Cheggio
- 10 Alpe Mottac
- 10b In La Piana
- 11 Cursolo
- 12 Lunecco
- 13 P.sso del Moro
- 14 Candoglia
- 14b Mergozzo

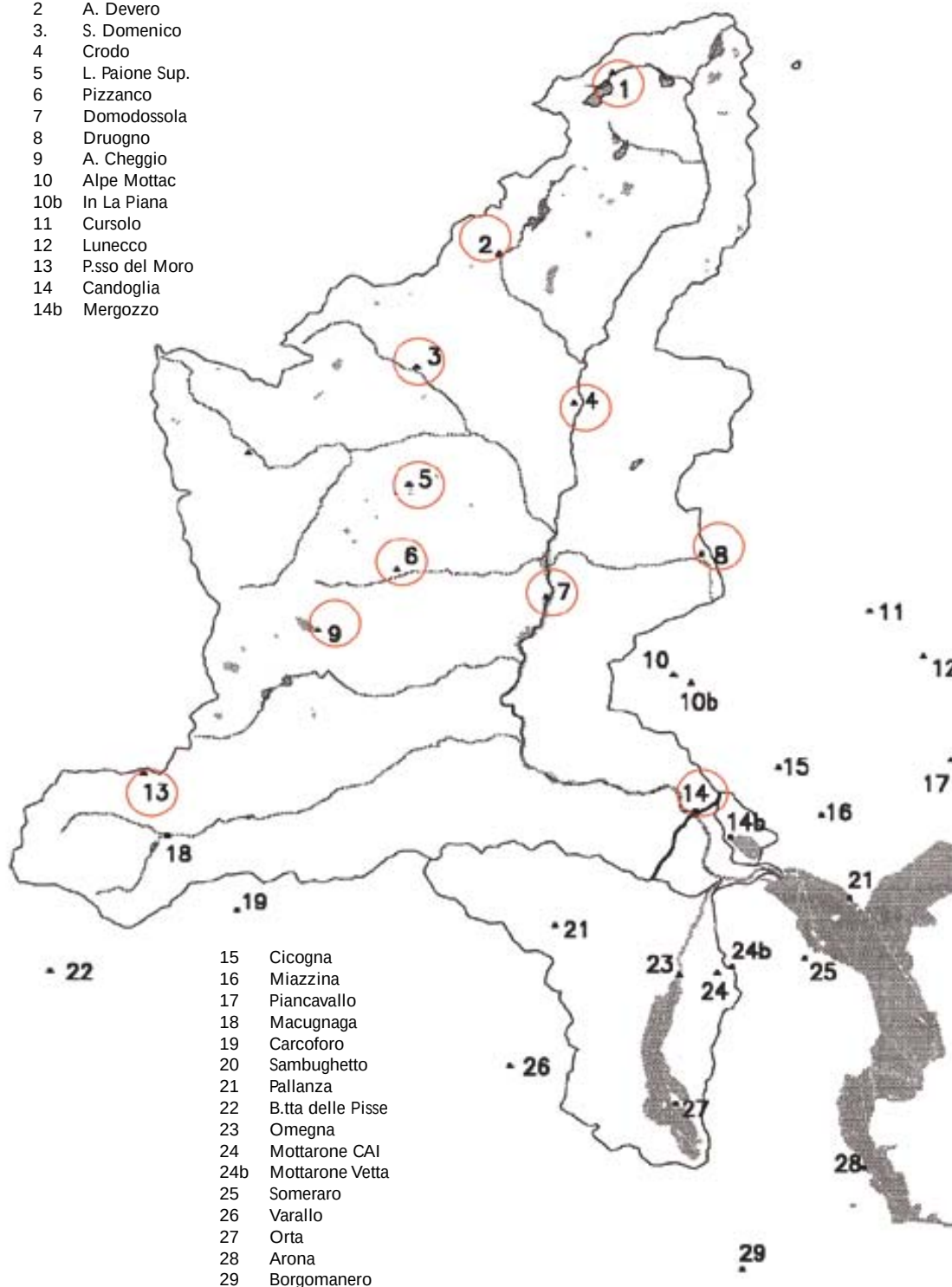


Figura VI-1. Ubicazione pluviometri

Per determinare il valore medio della pioggia caduta sul bacino, viene prima calcolata la media fra i pluviometri appartenenti alla stessa zona e poi eseguita una media pesata fra i quattro valori medi in base alla percentuale rappresentata da ciascuna zona rispetto all'estensione totale del bacino. La tabella seguente descrive le quattro zone pluviometriche con le rispettive estensioni e i pluviometri (cerchio rosso di figura VI-1), appartenenti al bacino chiuso a Candoglia, associati a ciascuna di esse.

mm/annui	Estensione		No.	Pluviometri
	(km ²)	(%)		
<1300	286,2	18,4	3	Pian dei Camosci, Crodo, Passo del Moro
1300-1700	1044,1	68,0	5	Alpe Devero, Varzo Lago Paione, Domodossola, Alpe Chiggio
1700-2000	136,7	9,0	2	Druogno, Pizzanco
2000-2500	70,0	4,6	1	Candoglia

Tabella VI-2. Descrizione zone pluviometriche

Attualmente si sta studiando la possibilità di integrare le misure del radar del Monte Lema con le misure puntiformi dei pluviometri nell'estrapolazione su scala areale delle piogge.

VI-2.2. Trasformazione pioggia/deflusso

Lo scopo del modello è di trasformare lo ietogramma delle piogge, determinato in base alle considerazioni del punto 2.1, nell'idrogramma della portata che attraversa la sezione di chiusura a valle del bacino.

Per questa trasformazione è stato utilizzato un modello di tipo concettuale, ossia un modello dove la schematizzazione del bacino imbrifero avviene tramite un sistema fisico molto semplificato in cui l'effetto di tutti i processi è descritto da poche equazioni con pochi parametri.

Il calcolo dell'idrogramma alla sezione di chiusura avviene in due fasi:

- depurazione delle piogge: separazione della frazione che ruscella superficialmente da quella che si infiltra. Per il modello idrologico previsionale della quota del Verbano e quindi anche per il bacino del Toce, è stato applicato il metodo del CN;

- convoluzione delle piogge depurate: calcolo dello spostamento della frazione ruscellante dal punto in cui precipita fino alla sezione di chiusura del bacino. Per il modello previsionale è stato applicato il metodo di Nash.

VI-2.2.1. Metodo del CN

Questo metodo, sviluppato dal Soil Conservation Service, parte da un'equazione di bilancio (Chow, 1988) valida per ogni istante t dopo l'inizio delle precipitazioni:

$$Q = P - S' \quad (1)$$

dove Q è la frazione di pioggia (in mm) ruscellante fino all'istante t , P è la pioggia (in mm) complessiva caduta fino all'istante t e S' la frazione di pioggia (in mm) complessivamente infiltrata fino all'istante t .

Si ipotizza, quindi, che le uniche perdite (oltre al taglio iniziale che sarà discusso dopo) siano per infiltrazione.

Il calcolo delle perdite per infiltrazione S' parte dalla seguente relazione:

$$S' = S \cdot P/Q \quad (2)$$

dove S (in mm) è il volume massimo immagazzinabile dal terreno a saturazione e viene anche detta capacità di campo. S viene fatto dipendere da un parametro CN tramite una relazione del tipo:

$$S = 25400/CN - 254 \quad (3)$$

Inserendo l'equazione (2) nella (1) si ottiene:

$$Q = \frac{P^2}{P+S} \quad (4)$$

Occorre ancora tenere conto che una parte delle precipitazioni si invasa nelle depressioni superficiali e che una parte si infiltra prima che il deflusso (ruscellamento) abbia inizio. Indicando con I (in mm) la pioggia che deve cadere prima che possa avere inizio il ruscellamento, l'equazione (4) diventa:

$$Q = \frac{(P-I)^2}{P-I+S} \quad (5)$$

Nella procedura standard si assume che I sia una frazione fissa di S : $I = 0.2S$. Spesso, soprattutto se il terreno ha già un certo grado di saturazione, I assume un valore inferiore e, pertanto, è più opportuno

inserirlo come parametro nel programma.

Le simulazioni effettuate con i dati di eventi storici hanno evidenziato che il parametro CN varia da evento a evento, dipendendo fortemente dalle condizioni di saturazione del terreno all'inizio dell'evento. Per cui nel tentativo di prevedere la portata futura del fiume (che è lo scopo del modello idrologico previsionale), il modello tenta di determinare il valore del CN che più avvicina la portata simulata a quella misurata all'istante di inizio della previsione.

VI-2.2.2. Metodo di Nash

Dopo aver calcolato con il metodo del CN quanta acqua affluirà alla vasca di ritenzione, occorre stabilire quando quest'acqua giungerà alla sezione di chiusura del bacino imbrifero. Il metodo di Nash è uno dei metodi per realizzare questo calcolo. Esso si basa su due ipotesi.

- Il bacino è schematizzato come una serie di n serbatoi lineari in cascata. Con serbatoio lineare si intende un serbatoio nel quale la portata q uscente dallo stesso è direttamente proporzionale al volume immagazzinato V: $V = k \cdot q$ dove k è la costante caratteristica del bacino.
- Vale l'equazione di continuità:

$$\frac{dV}{dt} = i - q \quad \text{dove } i \text{ è la portata entrante} \quad (6)$$

Combinando queste due ultime relazioni (v. Chow, 1988) è possibile mettere in relazione la portata uscente con quella entrante per un singolo serbatoio lineare:

$$q(t) = \int_0^t i(\tau) u(t - \tau) d\tau \quad (7)$$

dove:

$$u(t - \tau) = \frac{1}{k} e^{-\frac{t-\tau}{k}}$$

è chiamato idrogramma istantaneo unitario.

La relazione (7) esprime il fatto che la portata q al tempo t è data dalla sovrapposizione di una serie di impulsi in ingresso $i(\tau)$ che sono emessi tra l'istante 0 e l'istante t e che sono trasportati alla sezione di chiusura del bacino tramite una funzione di risposta impulsiva $u(t - \tau)$ dipendente dal tempo t - τ intercorso dall'emissione dell'impulso.

Poiché il bacino di raccolta è schematizzato con una serie di n serbatoi in cascata, la porta-

ta q(t) in uscita dal primo serbatoio viene utilizzata come portata in ingresso per il secondo serbatoio per calcolare, con la relazione (7), la portata uscente dal secondo serbatoio e così di seguito.

La portata $\bar{q}(t)$ all'uscita dal n-esimo serbatoio, ossia la portata in funzione del tempo che affluirà alla sezione di chiusura, è calcolabile dalla relazione:

$$\bar{q}(t) = \int \bar{i}(\tau) \cdot \bar{u}(t - \tau) d\tau \quad (9)$$

dove:

$$\bar{u}(t - \tau) = \frac{1}{k \cdot (n - 1)!} \left(\frac{t - \tau}{k} \right)^{n-1} e^{-\frac{t-\tau}{k}} \quad (10)$$

e $\bar{i}(\tau)$ è la frazione ruscillante di pioggia in funzione del tempo (in mm/h).

Con questo metodo, che schematizza tramite i parametri k e n tutti i processi fisici, si riesce a simulare due effetti:

- il tempo necessario alle particelle d'acqua per spostarsi dal punto in cui precipitano alla sezione di chiusura;
- l'appiattimento del picco (laminazione) di pioggia poichè le piogge che cadono nello stesso istante (ad esempio nell'istante di intensità massima) arrivano sfasate alla sezione di chiusura.

L'analisi di eventi storici ha mostrato che questi due parametri per lo stesso bacino variano poco da evento a evento, dipendendo quasi esclusivamente dalle caratteristiche morfologiche del bacino (almeno per portate simili) e quindi possono essere determinati come media fra i valori ottenuti calibrando il modello su eventi noti.

VI-2.3. Calibrazione del modello idrologico

L'applicazione del modello idrologico agli eventi storici, noti tramite l'azione 1, ha permesso di identificare i parametri fisici che caratterizzano il bacino del Toce (Foglia L., 2000). Alcuni eventi, presentando diversi picchi di portata, sono stati divisi in più parti. In effetti nelle simulazioni si è mirato a riprodurre il meglio possibile il picco dell'evento in quanto questo è lo scopo del modello previsionale. Per ciascuno degli eventi si è cercato l'insieme dei parametri che riproducesse al meglio l'idrogramma misurato. La tabella seguente elenca gli eventi storici analizzati e il valore identificato dei parametri fisici.

Evento	Periodo	CN	k	n
Settembre 1993	20.09-23.09	43	3,4	1,7
	24.09-30.09	72	4,8	1,7
Ottobre 1993	01.10-05.10	49	3,1	2,0
	06.10-07.10	44	3,7	2,1
	08.10-12.10	76	4,4	2,2
	12.10-13.10	67	3,9	2,0
	13.10-20.10	77	4,1	2,1
Maggio 1996	15.05-25.05	63	4,2	1,8
Novembre 1996	10.11-24.11	51	4,3	2,2
Giugno-Luglio 1997	20.06-25.06	49	4,5	1,9
	25.06-05.07	51	4,1	1,9
Agosto 1997	25.08-31.08	44	4,2	1,7
media			4,1	1,9

Tabella VI-3. Eventi storici analizzati

Dalla tabella si vede come per i parametri (k,n) legati alla convoluzione delle piogge si possono identificare dei valori medi applicabili a tutti gli eventi, mentre il valore di CN varia in modo significativo da evento a evento. La differenza tra le portate di picco calcolate con il set di parametri ottimali e quelle ottenute con il set di parametri medi è dell'ordine dell'1%. Come confronto, i valori di k e n per il bacino del fiume Ticino fino alla sezione di chiusura di Bellinzona valgono 4,8 rispettivamente 2,2.

La figura VI-2 mostra, come esempio, la simulazione di uno degli eventi usati per la calibrazione: per i parametri di convoluzione sono stati usati i valori medi indicati nella tabella precedente. La curva in colore rosso indica la portata del fiume Toce misurata a Candoglia, quella in nero la portata simulata dal modello usando come dati in entrata le piogge orarie misurate, indicate in colore blu.

VI-2.4. Evento alluvionale dell'ottobre 2000

Il modello idrologico previsionale viene attivato per stimare la portata futura dei fiumi. Il modello si calibra, ossia ricerca il miglior valore del parametro CN, usando tutte le misure a disposizione fino all'istante della previsione, in modo da riprodurre nel modo migliore la portata misurata. In seguito usa le previsioni di pioggia oraria fornite dai modelli meteorologici per stimare l'andamento futuro della portata.

Nel corso dell'evento alluvionale dell'ottobre 2000, il modello è stato usato per i bacini dei fiumi Ticino e Maggia e un modello analogo, ma comprendente anche il comportamento delle aste fluviali e dei bacini di ritenzione, è stato impiegato per prevedere la quota del lago Verbano (Salvadè G., ottobre 2000).

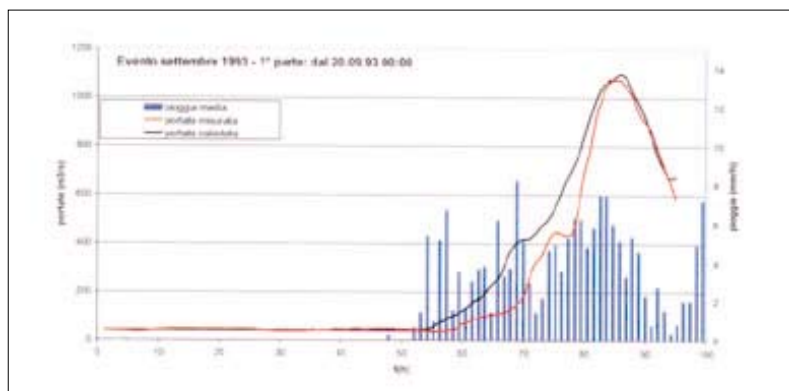


Figura VI-2. Evento settembre 1993

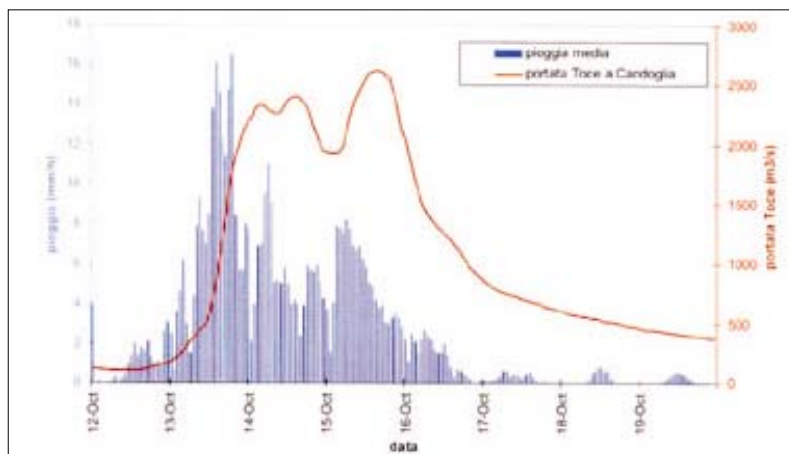


Figura VI-3. Evento ottobre 2000

Non è stato invece possibile applicare il modello per la previsione della portata del fiume Toce in quanto, pur conoscendo in tempo reale il livello del fiume, la relazione per la trasformazione del livello in portata sovrastimava quest'ultima per cui il modello non riusciva a calibrarsi. L'evento alluvionale è riassunto in figura VI-3 dove la portata del Toce a Candoglia è stata calcolata a posteriori dopo la correzione della relazione livello/portata.

A posteriori, dopo la correzione della relazione livello-portata, sono state eseguite anche alcune simulazioni di previsione. Le previsioni di pioggia sono fornite dal modello meteorologico svizzero (SwissModel) il cui reticolo ha maglie di 14 km di lato e si estendono su un periodo di 48 ore a partire da mezzanotte o da mezzogiorno. Di seguito sono rappresentate e brevemente discusse alcune previsioni effettuate in istanti successivi nel corso dell'evento. Non è stato effettuato nessun ritocco a posteriori delle previsioni. Nei grafici seguenti, in rosso è indicato l'andamento misurato della portata del fiume Toce a Candoglia, che assieme a tutte le misure di pioggia a disposizione fino all'istante della previsione, serve al modello per autotararsi.

In nero è indicata l'evoluzione futura della portata, calcolata dal modello in base alle piogge previste. La freccia indica l'istante della previsione.

La curva tratteggiata in blu rappresenta l'andamento della portata misurata a posteriori come confronto tra previsione e realtà.

Poiché le previsioni di pioggia dello SM si estendono solo su 48 ore, anche la previsione della quota termina con la fine temporale della previsione di pioggia.

VI-2.4.1. Previsione del 13 ottobre - ore 8:00

La figura VI-4 mostra la previsione del modello eseguita con i dati noti fino al 13 ottobre alle ore 08:00.

Il modello avrebbe azzeccato il valore della portata dopo due giorni ma avrebbe sbagliato completamente il valore di picco. In effetti la previsione di pioggia dello SwissModel per il 13 e 14 ottobre ha sottostimato l'evento, come è mostrato in figura VI-5. Calcolando la pioggia totale che sarebbe caduta sul bacino del Toce in quei due giorni usando i dati previsti, si ottiene un valore di 331.000 migliaia di m^3 , mentre lo stesso calcolo eseguito con i valori di pioggia misurati danno il valore di 505.000 migliaia di m^3 . Essendo il quantitativo di pioggia prevista molto minore di quanto poi effettivamente precipitato, anche la portata prevista rimane molto inferiore alla realtà. Il parametro CN, usato dal modello per calibrarsi, vale 56.

Figura VI-4. Previsione
13 ottobre - ore 8:00

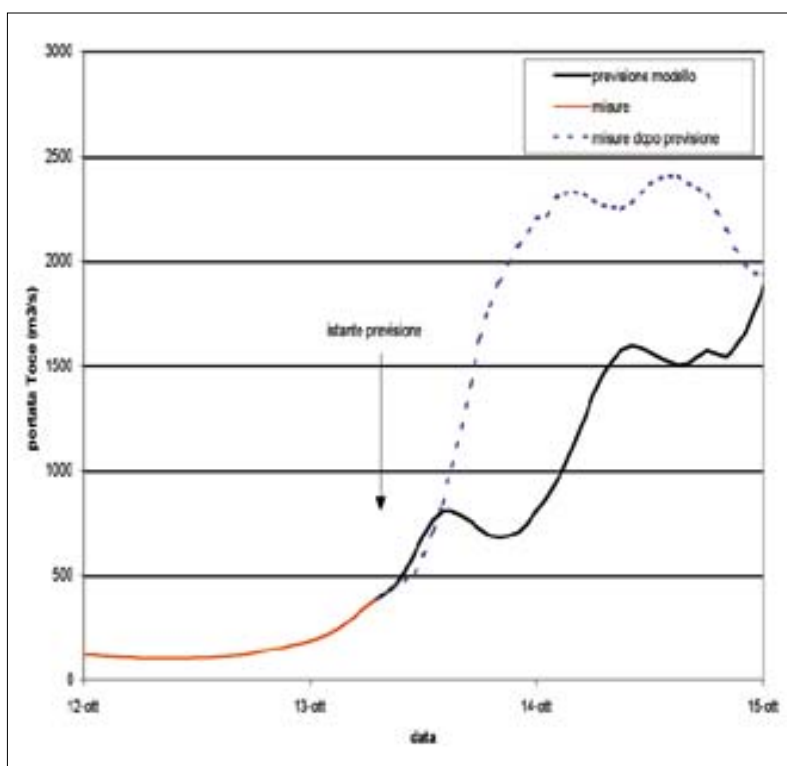
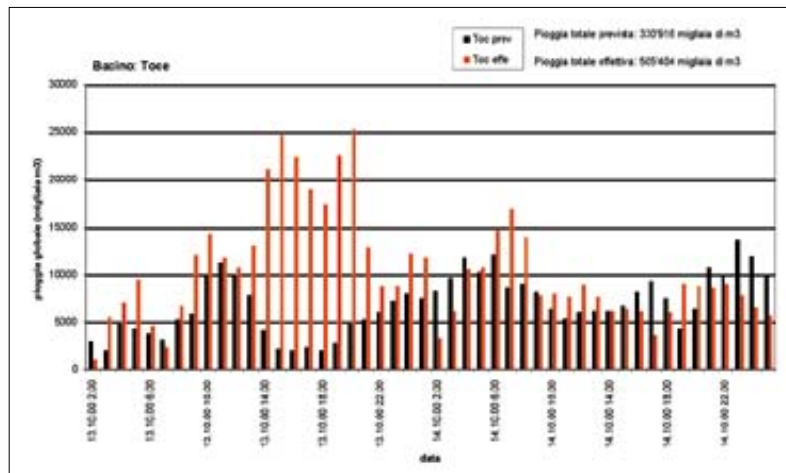


Figura VI-5. Confronto pioggia prevista - pioggia misurata per il 13 e 14 ottobre



VI-2.4.2. Previsione del 14 ottobre - ore 8:00

La figura VI-6 mostra la previsione del modello eseguita con i dati noti fino al 14 ottobre alle ore 08:00.

Il modello sbaglia completamente la previsione. Pur trovando un valore accettabile dei parametri (CN = 47) per la calibrazione della portata al

momento della previsione, il modello prevede una notevole riduzione della portata per i prossimi due giorni.

Il confronto (figura VI-7) tra pioggia totale prevista e misurata dà i valori di 264.000 rispettivamente 385.000 migliaia di m³, per cui il modello continua a sottostimare la portata del fiume Toce.

Figura VI-6. Previsione 14 ottobre - ore 8:00

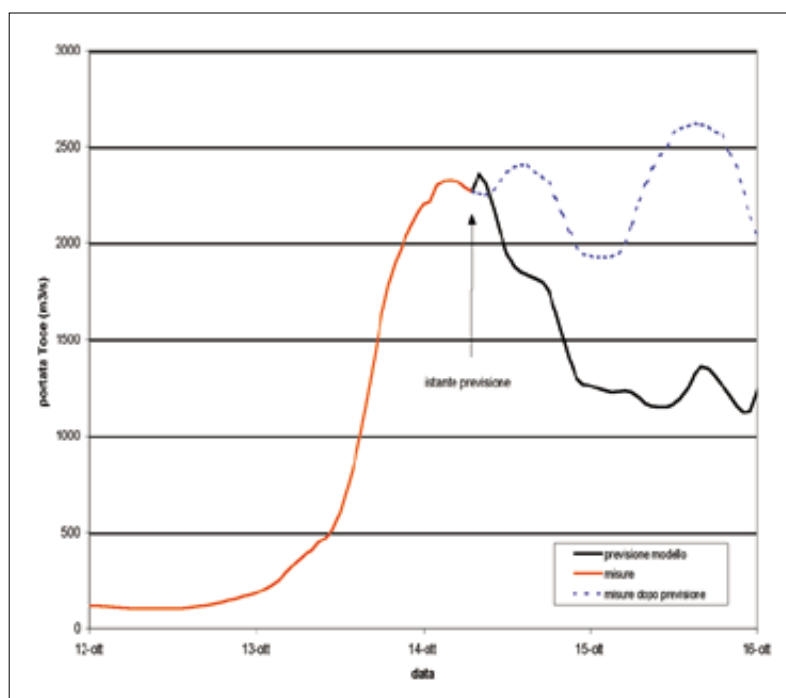
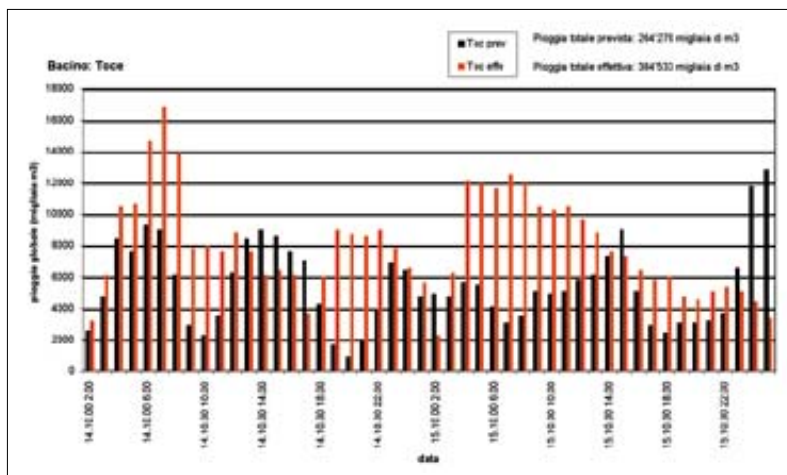


Figura VI-7. Confronto pioggia prevista - pioggia misurata per il 14 e 15 ottobre



VI-24.3. Previsione del 15 ottobre

La figura VI-8 mostra la previsione del modello eseguita con i dati noti fino al 15 ottobre alle ore 08:00. Il modello sottostima leggermente il picco di

portata, azzecandone però l'istante.

La pioggia prevista era di 131.000 migliaia di m^3 mentre quella misurata di 228.000 migliaia di m^3 , per cui la portata prevista si mantiene sotto la portata misurata.

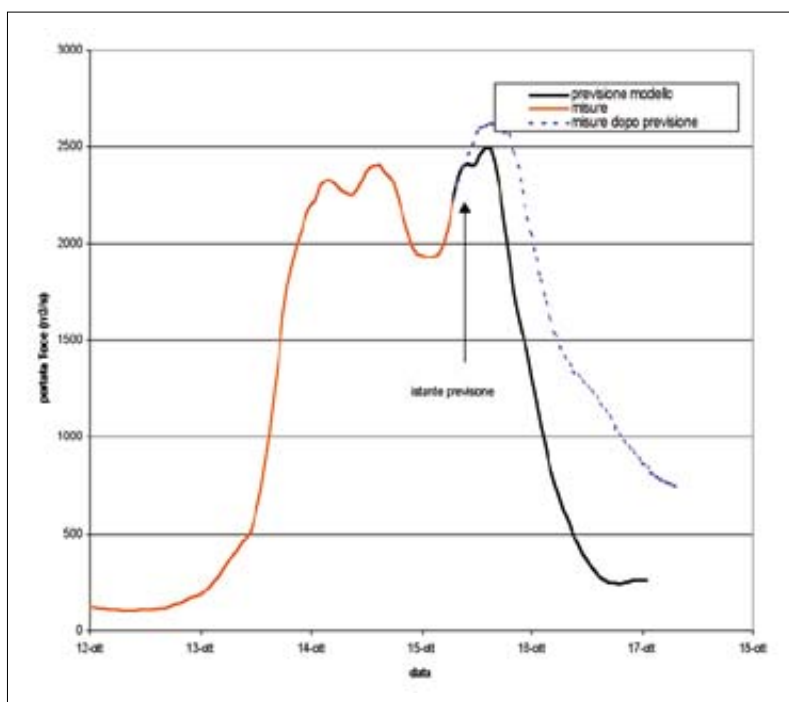


Figura VI-8. Previsione 15 ottobre - ore 8:00

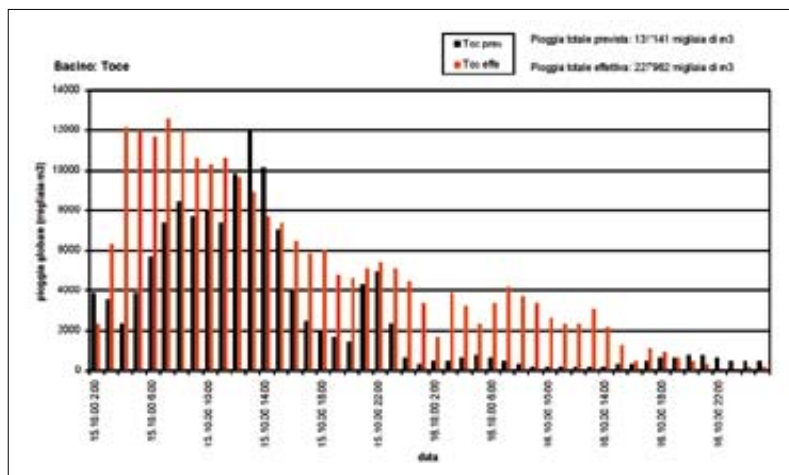


Figura VI-9. Confronto pioggia prevista - pioggia misurata per il 15 e 16 ottobre

VI-2.4.4. Simulazione con piogge effettive

La figura VI-10 mostra la simulazione completa dell'evento dell'ottobre 2000 usando come dati d'ingresso del modello le piogge misurate. Il valore del parametro CN (curva in colore nero) è stato imposto uguale a quello usato nella simulazione della quota del lago

Verbano e che ha dato buoni risultati: il modello sovrastima il primo picco di portata e sottostima il secondo.

Il modello non è in grado di gestire la coda dell'evento perché non contiene il meccanismo di scambio tra falda e fiume alla fine delle precipitazioni e quindi la portata diminuisce più rapidamente di quanto avvenga in realtà.

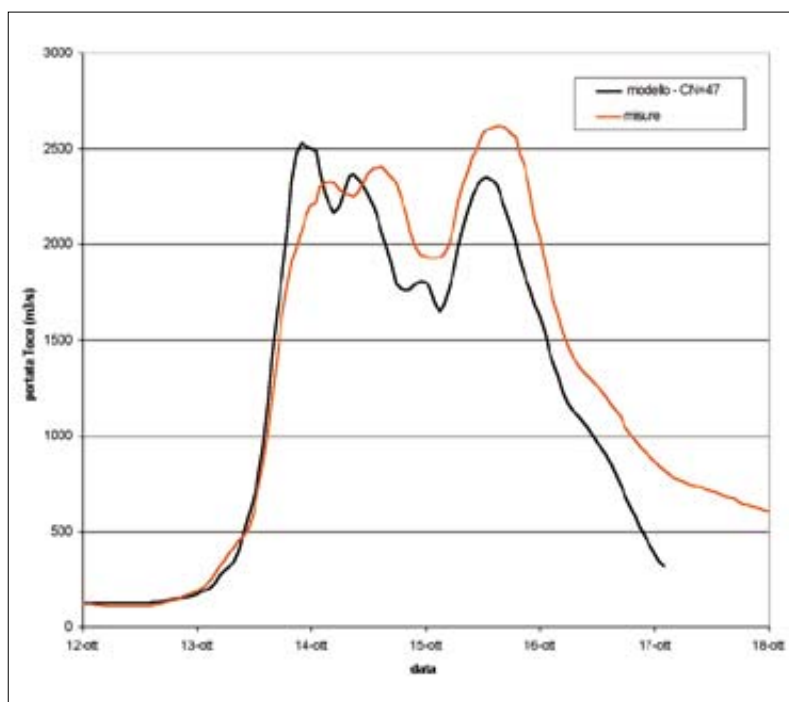


Figura VI-10. Simulazione con piogge misurate - CN = 47

VI-2.5. Conclusione

L'attendibilità del modello idrologico previsionale è legata a due categorie di errori: l'errore di modello e l'errore delle previsioni.

L'errore di modello è dovuto essenzialmente alla schematizzazione del bacino imbrifero reale in un sistema semplificato (metodo del CN e di Nash) e all'estrapolazione areale delle piogge. Analisi eseguite presso l'IST sulle portate del fiume Ticino e della Maggia (con calibrazione a posteriori) hanno mostrato che questo errore è tollerabile: il modello riesce a simulare il colmo di piena con un errore (mediato su diversi eventi storici) relativo alla portata di picco dell'ordine del 1% per il Ticino e del 4% per la Maggia.

Nella previsione in tempo reale intervengono altri tipi di errore dovuti al fatto che l'andamento del picco di portata va simulato prima di avere le informazioni sulla sua durata. L'errore nelle previsioni è essenzialmente dovuto a due motivi:

- la mancata conoscenza delle portate future impone la calibrazione sulla forma della curva prima del picco. Essendo la parte iniziale dell'evento fortemente influenzata dal comportamento

degli invasi di ritenzione, questa calibrazione introduce un fattore di incertezza aggiuntivo, anche se si conoscessero con assoluta precisione le piogge future. La calibrazione all'inizio dell'evento fa aumentare l'errore relativo medio di modello a circa il 6% sul valore dei picchi nelle portate dei fiumi;

- l'errore nella previsione della pioggia futura. Il tempo di risposta del bacino è di circa 6 ore per cui il peso delle piogge previste risulterà preponderante dopo poche ore dall'istante della previsione rispetto alla pioggia pregressa che interessa solo la prima parte dell'intervallo di previsione. Per un singolo pluviometro i meteorologi stimano l'errore massimo delle previsioni dello Swiss Model compreso tra -60% e +100%. Essendo però la pioggia che conta agli effetti del deflusso quella media sul bacino, è possibile che gli errori sulle diverse aree si compensino e, analogamente, potrebbero compensarsi gli errori nel tempo.

In ogni caso la qualità della previsione in tempo reale della portata dipenderà principalmente dalla qualità di previsione delle precipitazioni.

Bibliografia

VEN TE CHOW, David R. MAINDMENT, LARRY W., (1988), *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.

PISANI S., giugno (1997), *Sistema per la previsione in tempo reale delle onde di piena sul Ticino e sulla Maggia e della quota del Verbano*. Rapporto interno dell'Istituto Scienze della Terra-SUPSI, Cadenazzo.

SALVADÈ G., PISANI S., DEI A., (ottobre 1998), *Il monitoraggio, un mezzo per la riduzione dei danni: previsione in tempo reale della quota del Verbano, Verbano Analisi e gestione di un sistema complesso*, Istituto Scienze della Terra-SUPSI, Cadenazzo.

FOGLIA L., (febbraio 2000), *Bacino del Toce: Identificazione dei parametri fisici per la trasformazione pioggia/deflussi*. Rapporto interno dell'Istituto Scienze della Terra-SUPSI, Cadenazzo.

FOGLIA L., (febbraio 2000), *Analisi dell'errore relativo sulle portate in dipendenza dalla variazione di CN, k e n*. Rapporto interno dell'Istituto Scienze della Terra-SUPSI, Cadenazzo.

SALVADÈ G., (ottobre 2000), *Evento alluvionale 12-17 ottobre 2000, Risultati del modello per la previsione della quota della superficie del lago Verbano*. Rapporto interno dell'Istituto Scienze della Terra-SUPSI, Cadenazzo.

VI-3. SOGLIE PLUVIOMETRICHE

La finalità dello studio è stata quella di ricercare un possibile legame fra le altezze di precipitazione nell'area del Verbano Cusio Ossola e l'entità dei loro effetti negativi sul territorio provinciale da utilizzare nell'ambito del sistema di allertamento della Regione Piemonte sia nella fase previsionale, sia durante il monitoraggio dell'evento per l'interpretazione dei dati acquisiti.

Il risultato atteso dal lavoro è quindi quello di trovare dei valori soglia di precipitazione che discriminano la possibilità del verificarsi di fenomeni di erosione e/o esondazione dei corsi d'acqua appartenenti all'intero reticolo idrografico nonché del potenziale innesco di processi di instabilità di versante.

Di fondamentale importanza per lo svolgimento della ricerca sono quindi i dati di altezza di precipitazione e le segnalazioni di fenomeni di dissesto-erosione-esondazione relativi al territorio provinciale.

VI-3.1. Banca dati geologica della Regione Piemonte

La principale fonte da cui si sono attinti i dati relativi ai fenomeni di dissesto è la banca dati geologica della Regione Piemonte.

In tale banca dati sono raccolte circa un migliaio di segnalazioni relative ai fenomeni di dissesto verificatisi nel territorio della provincia del Verbano Cusio Ossola. Le principali informazioni raccolte per ciascuna segnalazione consistono nella localizzazione spaziale dell'evento mediante l'identificazione del comune, località, bacino e sottobacino di appartenenza, la data di inizio e fine evento oltre alla descrizione del tipo di fenomeno, degli effetti e dei danni causati al territorio.

In particolare nelle schede sono riportati i seguenti parametri:

- attività, cioè natura del fenomeno che può riguardare processi di instabilità di versante, attività fluviale o torrentizia, avvallamenti di sponda ecc.;
- tipologia dell'attività ossia crolli, colate di terreno, di detriti ecc., frane di varia natura, piena, trasporto di massa torrentizio ecc.;
- tipo di segnalazione che può riguardare un fenomeno verificatosi, potenziale o in atto;
- effetti determinati sul territorio che possono essere erosioni di sponda, di fondo, ecc., disallineamento, allagamento, deviazione alveo, ostruzione parziale di alveo, trasporto solido ecc.;
- danni determinati sul territorio antropizzato intesi come edifici, tronchi stradali, infrastrutture, opere idrauliche ecc. distrutti, danneggiati o

minacciati, presenza di vittime ecc.

Ad integrazione di questi dati è stata condotta una ricerca specifica presso gli archivi del CNR-Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica nel Bacino Padano (IRPI) di Torino che ha consentito di estrarre oltre 500 segnalazioni classificate con la stessa modalità sopra descritta (Brunamonte F., Vassallo N., marzo 2001).

VI-3.2. Individuazione e classificazione degli eventi significativi

Gli eventi che hanno determinato danni sul territorio sono stati individuati selezionando, fra quelli appartenenti alle banche dati indicate nei paragrafi precedenti, quelli che, per lo stesso evento catastrofico, hanno interessato un areale importante per estensione e/o sono stati interessati da più segnalazioni e in più località.

La necessità di disporre contemporaneamente dei dati pluviometrici e di quelli relativi alla tipologia ed entità degli effetti sul territorio, ha determinato un ridimensionamento degli eventi inizialmente presi in considerazione. Infatti, in prima battuta dall'analisi dei dati geologici erano stati selezionati 32 eventi che abbracciavano il periodo compreso fra gli anni 1640 e 2000, ridimensionati successivamente a 19 per la carenza di contemporanee informazioni attendibili relative ai dati pluviometrici, in particolare per gli eventi appartenenti ai secoli passati e fino alla prima metà del 1900. D'altra parte eventi verificatesi in tempi molto lontani dai giorni nostri sono meno interessanti per lo scopo dello studio perché hanno interagito con un territorio antropizzato profondamente diverso da quello di oggi, a causa della sostanziale modificazione delle aree urbanizzate e del reticolo delle infrastrutture che hanno subito un notevole sviluppo negli ultimi decenni. Infatti queste aree, che sono in continua evoluzione, sono le porzioni di territorio più delicate e alle quali un sistema di allertamento per situazioni pluviometriche di particolare attenzione deve prioritariamente rivolgersi: per ottenere un risultato attendibile è consigliabile pertanto utilizzare dati che hanno interagito con un territorio configurato il più possibile simile all'attuale.

I periodi utilizzati sono stati i seguenti:

- 13-17 maggio 1926
- 02-04 settembre 1948
- 02-04 settembre 1951
- 19-20 agosto 1958
- 09-11 settembre 1965
- 02-04 novembre 1968
- 01-07 ottobre 1976
- 06-21 ottobre 1977
- 07-08 agosto 1978

- 14-16 ottobre 1979
- 21-27 settembre 1981
- 10-11 settembre 1983
- 26-28 aprile 1986
- 23-26 agosto 1987
- 26-30 settembre 1991
- 22 settembre - 12 ottobre 1993
- 04-07 novembre 1994
- 08 luglio 1996
- 13-16 ottobre 2000

Le segnalazioni relative ai fenomeni di dissesto appartenenti agli eventi così selezionati sono state distinte secondo i due criteri sotto descritti.

- a) Entità del danno, con la suddivisione in danni ingenti ("danno +") e danni modesti ("danno -"). Questa suddivisione è stata operata sulla base della maggiore o minore gravità degli effetti che si sono avuti sul territorio secondo la seguente modalità:
- 1.danno ingente: eventi che hanno provocato gravi danneggiamenti e distruzioni, anche parziali, di centri abitati, opere viarie e infrastrutture in genere, anche con presenza di vittime e su una estesa porzione di territorio;
 - 2.danno modesto: eventi che hanno minacciato e provocato danneggiamenti parziali di centri abitati, opere viarie e infrastrutture in genere su una modesta porzione di territorio.
- La complessità dei fenomeni trattati viene così affrontata realizzando una semplice classificazione che consente un agevole utilizzo dei dati nel rispetto delle esigenze del presente lavoro.

- b) Sottobacino idrografico di appartenenza, definito nello specifico dai seguenti sottobacini appartenenti al territorio provinciale: Valle Anzasca, Valle Antrona, Valle Bognanco, Val Divedro, Valle Antigorio-Devero-Formazza, Valle Vigezzo-Cannobina, Ossola (compresa fra gli abitati di Domodossola e Gravellona Toce), Verbano (comprendente l'areale racchiuso fra gli abitati di Gavellona Toce e Cannobio oltre che la parte sud della Val Grande) e Cusio (comprendente anche la Valle Strona e l'alto Vergante).

Questa scelta si è rivelata soddisfacente in quanto per uno stesso evento alluvionale nel caso di presenza di più segnalazioni relative ai fenomeni di dissesto, queste sono pressoché concordi nell'attribuzione del tipo di entità del danno all'interno dello stesso sottobacino di appartenenza mentre cambiando sottobacino in generale cambia anche la gravità dei danni. Inoltre questo tipo di approccio si ritiene che realizzi un buon compromesso riguardo le due contrastanti esigenze di mantenere un buon dettaglio in merito al comportamento degli

areali appartenenti al territorio provinciale e la necessità di raggruppare le segnalazioni in areali aventi una certa estensione, utile per ottenere una buona visione d'insieme dei fenomeni in oggetto.

VI-3.3. Attribuzione altezza di precipitazione - entità danni

Per quanto riguarda i dati relativi alle stazioni pluviometriche sono state raccolte le altezze di precipitazione significative per la caratterizzazione dell'evento catastrofico e relative alle durate di 1, 3, 6, 12, 24 e 48 ore. Per ogni singolo evento sono state utilizzate le altezze di precipitazione relative alle durate che risultavano essere più critiche caso per caso.

Per far ciò sono state utilizzate le Linee Segnalatrici di Probabilità Pluviometrica (LSPP) di assegnato tempo di ritorno e confrontate con i valori di pioggia misurata. Le LSPP per un determinato sito possono essere ricavate dall'elaborazione statistica delle serie storiche di pioggia misurate in quella stazione, ma, in generale, dove non si dispone delle misure si ricorre ad un approccio regionale che stima i parametri delle leggi di distribuzione su aree omogenee e poi vengono ricavate le LSPP su qualunque punto della regione attraverso tecniche di interpolazione geostatistiche. Per questo lavoro è stata utilizzato il programma RAP (Raifall Analysis Package) (Burlando et al., 1996) e nella figura VI-11 è riportato un esempio di confronto.

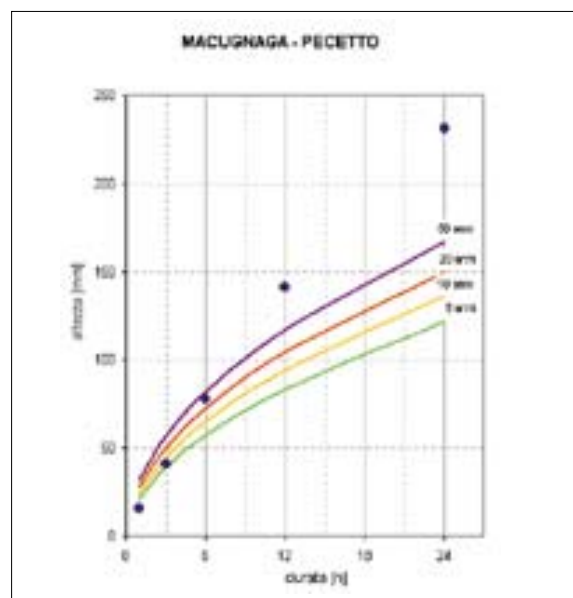


Figura VI-11. Confronto tra le precipitazioni del 13-16 ottobre 2000 a Macugnaga (rappresentate con il simbolo circolare) e le LSPP di assegnato tempo di ritorno

Sono state utilizzate le stazioni appartenenti all'areale definito dal relativo sottobacino ad eccezione di quei casi in cui la scarsità dei dati di precipitazione ha reso necessario il ricorso ad altre stazioni vicine all'areale interessato.

Il passo successivo riguarda l'attribuzione dell'entità del danno commisurato con le altezze di precipitazione per le diverse durate relativamente ai sottobacini interessati per gli eventi selezionati.

È questo il passaggio fondamentale del lavoro e che richiede maggior attenzione nelle valutazioni che in alcuni casi necessitano una verifica dei dati a posteriori con il raffronto dei risultati globali ottenuti.

La metodologia operativa seguita è la seguente.

Per i sottobacini che dispongono di più valori di altezza di precipitazione per ciascuna durata si attribuisce un unico valore pari al massimo dei valori per tutte le durate di 1, 3, 6 e 12 ore e pari alla media dei singoli valori per le durate di 24 e 48 ore.

Le casistiche normalmente riscontrabili e che non determinano situazioni di incertezza sull'attribuzione del tipo di danno sono: danni moderati associati ad altezze di precipitazione modeste e danni ingenti associati ad altezze di precipitazione elevate.

Occasionalmente si verifica il caso di danno moderato associati ad altezze di precipitazione elevate; in questo caso è stato attribuito "danno -". La situazione non determina contraddizioni con la finalità ultima di ricercare dei valori soglia per la definizione dei quali interessano i valori minimi. Dal punto di vista fisico questa situazione si può spiegare con il fatto che la precipitazione è una grandezza estremamente variabile oltre che nel tempo anche nello spazio e quindi il dato registrato dalla stazione pluviometrica essendo puntuale può essere anche molto diverso da quello che si potrebbe misurare nelle aree circostanti. Occorre però rilevare anche che, per la complessità dei fenomeni trattati, la sola grandezza "precipitazione" può risultare limitante soprattutto in casi simili per i quali occorrerebbe prendere in considerazione anche gli altri parametri fisici che intervengono (temperature, vento, natura dei detriti di versante, ricorrenza media delle frane ecc.).

Infine il caso di danno ingente associato ad altezze di precipitazione modeste viene generalmente scartato se la misura non è sufficientemente vicina al luogo dove si sono registrati i danni in quanto diversamente si otterrebbe un dato che falserebbe i valori soglia ricercati. Per il significato fisico anche in questo caso vale quanto osservato al punto precedente.

VI-3.4. Valori soglia delle altezze di precipitazione

L'esame dei dati così ottenuti consente di pervenire alla fase conclusiva dello studio che prevede l'attribuzione di un valore soglia delle altezze di precipitazione per ciascuna durata e per le due tipologie di danni considerati.

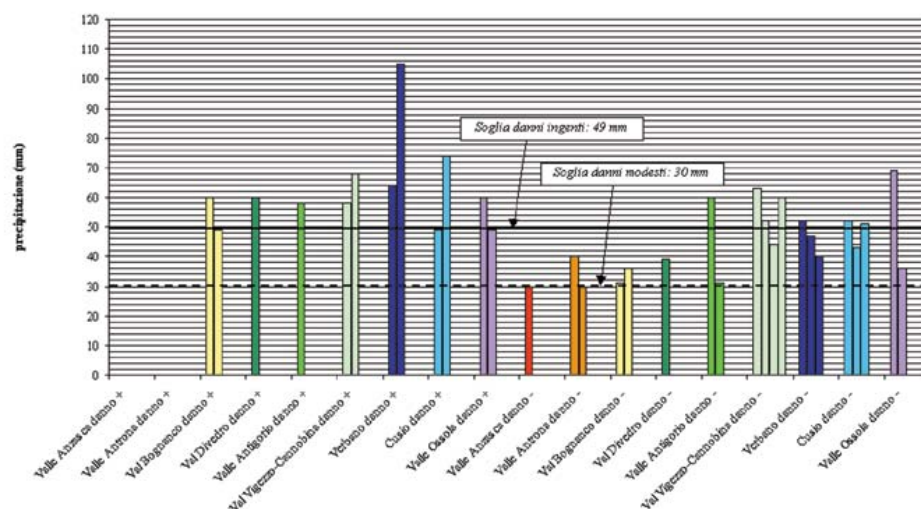
Raggruppando tutti i sottobacini considerati e ricercando il valore minimo dell'altezza di precipitazione per ciascuna durata si ottengono i seguenti valori soglia.

Entità dei danni	Altezza di precipitazione (mm)					
	1 ora	3 ore	6 ore	12 ore	24 ore	48 ore
Danno modesto	30	51	80	109	160	214
Danno ingente	49	92	122	169	223	264

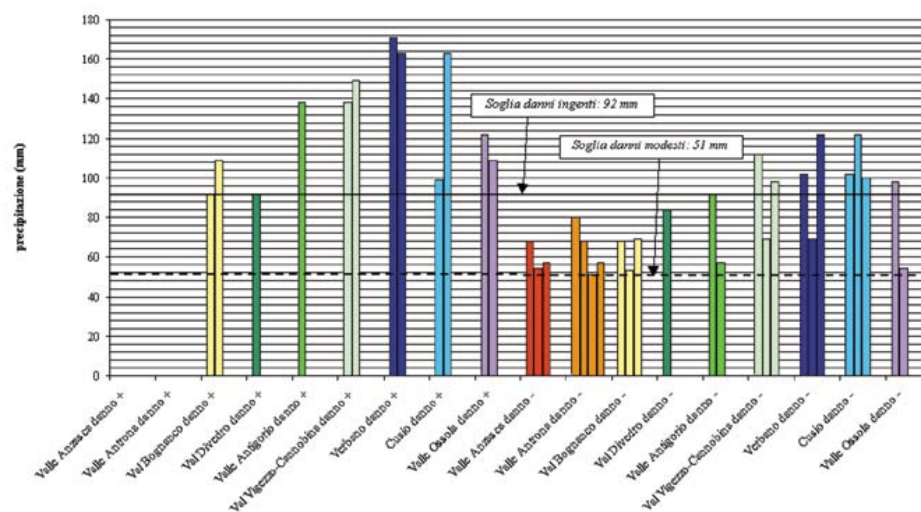
I risultati ottenuti vengono meglio visualizzati nei grafici della figura VI-12 la quale riporta tutti i valori utilizzati ed i valori soglia. In particolare il primo grafico riporta le altezze di precipitazione in ordinata e le rispettive durate in ascissa per tutti i sottobacini e per i valori soglia, definiti questi ultimi dalla retta inviluppo inferiore mentre negli istogrammi che seguono si riportano le altezze di precipitazione distinte per sottobacino e tipologia di danno per ciascuna delle sei durate considerate.

Figura VI-12.
Precipitazione
che ha dato
origine a danni
e relative soglie
per varia durata
a) 1 ora,
b) 3 ore,
c) 6 ore,
d) 12 ore,
e) 24 ore,
f) 48 ore

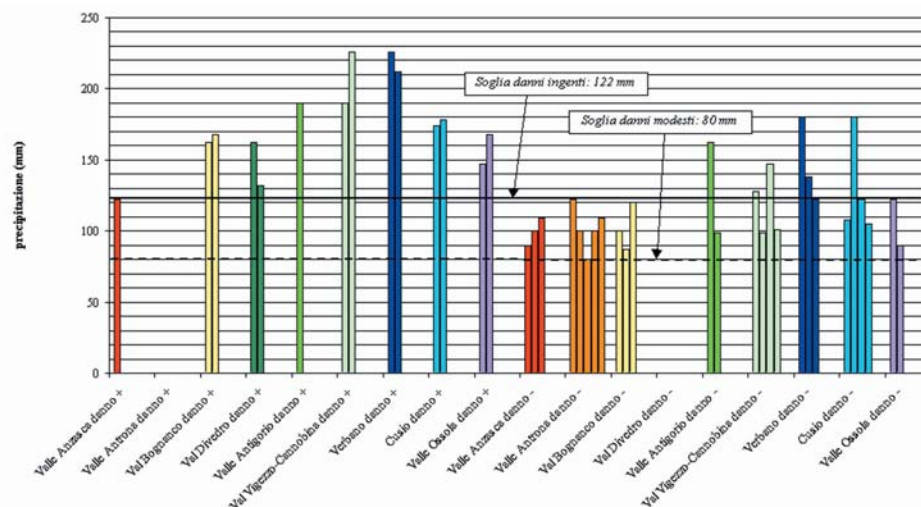
a) Precipitazione (d=1ora) che ha originato danni nella Provincia del Verbano Cusio Ossola (anni 1926-2000)



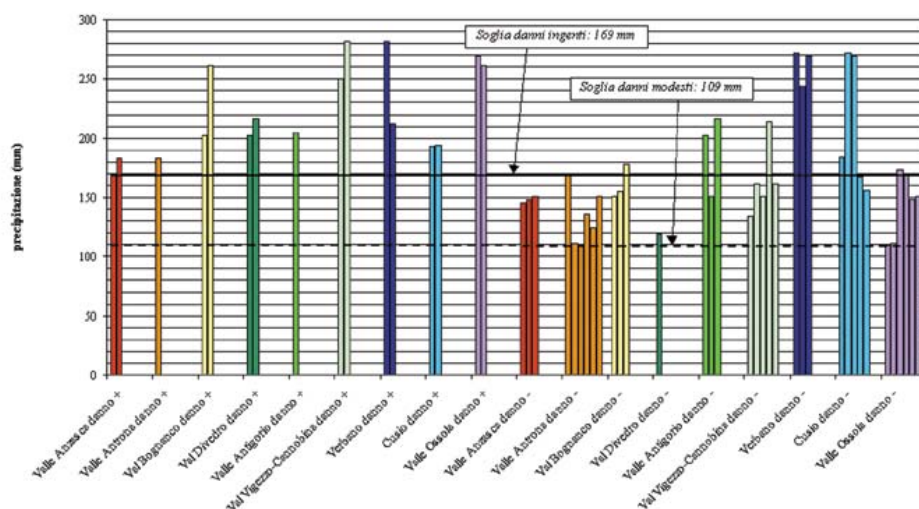
b) Precipitazione (d=3ore) che ha originato danni nella Provincia del Verbano Cusio Ossola (anni 1926-2000)



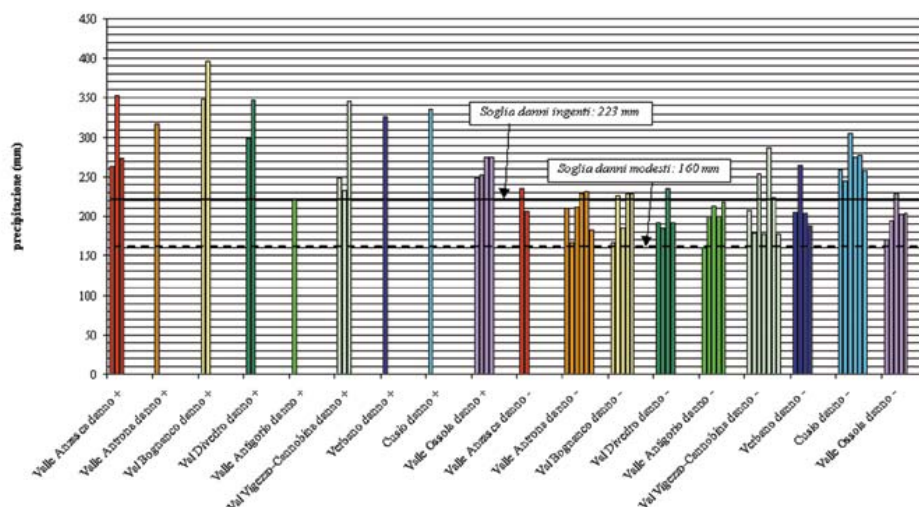
c) Precipitazione (d=6 ore) che ha originato danni nella Provincia del Verbano Cusio Ossola (anni 1926-2000)



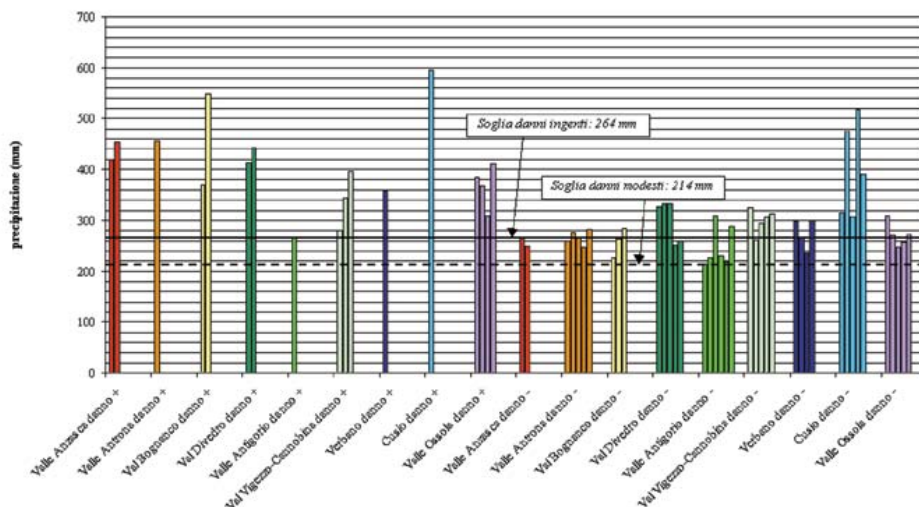
d) Precipitazione (d=12 ore) che ha originato danni nella Provincia del Verbano Cusio Ossola (anni 1926-2000)



e) Precipitazione (d=24ore) che ha originato danni nella Provincia del Verbano Cusio Ossola (anni 1926-2000)



f) Precipitazione (d=48 ore) che ha originato danni nella Provincia del Verbano Cusio Ossola (anni 1926-2000)



Bibliografia

SERVIZIO IDROGRAFICO E MAREOGRAFICO NAZIONALE, (1913-1985), *Annali idrologici del bacino del Po - parte I*.

REGIONE PIEMONTE, (2001), *Precipitazioni e Temperature dal 1990 al 1999*. Collana studi climatologici in Piemonte - Direzione dei Servizi Tecnici di Prevenzione - Settore Meteoidrografico e reti di monitoraggio;

REGIONE PIEMONTE, (ottobre 2000), *Rapporto sull'evento del 13-16 ottobre 2000 - parte I - L'attività di previsione e monitoraggio meteo-idrometrica*. Direzione Servizi Tecnici di Prevenzione.

REGIONE PIEMONTE, (ottobre 2000), *Rapporto sull'evento del 13-16 ottobre 2000 parte II - Effetti sulle aree antropizzate*. Direzione Servizi Tecnici di Prevenzione.

REGIONE PIEMONTE, (1990), *Banca dati geologica*. Settore Prevenzione del Rischio Geologico, Meteorologico e Sismico.

BRUNAMONTE F., VASSALLO N., (marzo 2001), *Fenomeni storici di dissesto nel Verbano Cusio Ossola (VCO)*. Rapporto interno CNR-Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica nel Bacino Padano (IRPI).

BURLANDO P., OLIVA G., ROSSO R., (ottobre 1996), *RAP (Raifall Analysis Package) Valutazione Automatica del rischio idrometeorologico sul Territorio*. Manuale Teorico e Manuale Utente.

1 ESEMPIO DI APPLICAZIONE DEL METODO DI STIMA DELL'ALTEZZA DI PRECIPITAZIONE ASSEGNATI DURATA E PERIODO DI RITORNO

In questo paragrafo vengono esemplificate quelle che possono essere le due possibili applicazioni del metodo di caratterizzazione statistica delle precipitazioni intense e di breve durata proposto per l'area oggetto di studio:

- 1 determinazione della pioggia di progetto per assegnati durata e tempo di ritorno in un generico sito del territorio in esame;
- 2 determinazione del periodo di ritorno di un massimo annuale per brevi durate di cui siano note la durata e l'altezza di pioggia cumulata su tale finestra temporale;

1.1 Determinazione della pioggia di progetto per assegnati durata e tempo di ritorno in un generico sito del territorio in esame

Consideriamo il primo caso e supponiamo che un progettista debba stimare il valore della pioggia di progetto per la città di Vercelli ricadente nella Regione Padana, per durata $d=12$ ore e $T=100$ anni. In primo luogo si dovrà procedere a individuare la posizione spaziale del sito scelto tramite la sua longitudine e latitudine. Nello specifico esse valgono $8^{\circ}25'00''$ e $45^{\circ}19'00''$. Noti tali valori si procede, sulla base dell'espressione:

$$h(d, T) = m * X'(t, d) * d^n \quad (1),$$

a valutare:

- 1 Dalla tavola 2 il valore del parametro pioggia indice μ che nel caso in esame vale 34 mm;
- 2 Dalla tavola 3 il valore dell'esponente di scala n che nel caso in esame vale 0.30;

A questo punto resta da stimare il valore del quantile adimensionale $X'(T, d)$ per il tempo di ritorno T e la durata d di interesse. A tale fine è necessario fare riferimento direttamente all'espressione che fornisce la probabilità cumulata di un assegnato quantile adimensionale di pioggia in funzione dei parametri della distribuzione TCEV. Tale relazione è la seguente:

$$F_{X'}(d, x') = \exp \left[-\Lambda_1 \exp(-h * x') - \Lambda_* (\Lambda_1)^{\frac{1}{\Theta_*}} \left(\exp - h \frac{x'}{\Theta_*} \right) \right] \quad (2)$$

i cui parametri Θ_* , Λ_* , Λ_1 e h dipendono dalla durata e dalla regione omogenea considerata, come risulta dalle tabelle dalla 1 alla 4. Nel caso particolare, ricadendo la località nella regione Padana (vedi tavola 1), i valori dei parametri si desumono dalla Tabella 1, per la durata di 12 ore, e sono pari a: $\Theta_*=2.525$, $\Lambda_*=0.1703$, $\Lambda_1=31.632$ e $h=4.291$

	Q*	L*	L ₁	h
1	1.778	0.1934	19.554	3.840
3	1.966	0.2611	26.848	4.291
6	2.219	0.1480	29.852	4.254
12	1.915	0.160	31.632	4.291
24	1.638	0.168	27.666	3.897

Tabella 1. Valori dei parametri della distribuzione TCEV per assegnata durata, Regione Padana.

	Q*	L*	L ₁	h
1	2.384	0.2442	39.021	4.725
3	1	0	58.768	4.650
6	1.009	0.0070	70.728	4.843
12	0.833	0.0451	49.981	4.530
24	2.344	0.0520	45.293	4.496

Tabella 2. Valori dei parametri della distribuzione TCEV per assegnata durata, Regione Alpi settentrionali.

	Q*	L*	L ₁	h
1	2.537	0.2309	31.660	4.521
3	1.960	0.0527	35.502	4.237
6	0.982	0.0259	37.283	4.221
12	0.995	0.0180	37.087	4.208
24	1.313	0.0106	30.707	4.014

Tabella 3: Valori dei parametri della distribuzione TCEV per assegnata durata, Regione Alpi Meridionali

	Q*	L*	L ₁	h
1	1.486	0.5018	15.092	3.874
3	2.148	0.5118	26.979	4.726
6	2.393	0.2539	29.817	4.476
12	2.525	0.1703	32.311	4.417
24	2.662	0.1169	32.393	4.323

Tabella 4: Valori dei parametri della distribuzione TCEV per assegnata durata, Regione Tirrenica

A questo punto tenendo conto del fatto che vale la seguente relazione:

$$F_{x'}(d, x') = \frac{T-1}{T} \quad (3)$$

e che quindi risulta $F_{x'}(d, x')=0.99$, si può desumere per tentativi il valore di $x'(d, T)$ dall'espressione (2), particolarizzata per la regione Padana e per la durata $d=12$ ore, sulla base dei valori della Tabella 1. Il valore che si desume è $x'(d, T) \approx 2.18$ e questo consente di stimare, mediante l'espressione (1), il valore della pioggia di progetto per $T=100$ anni e $d=12$ ore nel sito di interesse, pari a $h(d, T) \approx 156$ mm.

Nel caso si intenda procedere al calcolo dell'altezza di precipitazione per assegnato periodo di ritorno e durata diversa da quelle tabellate, si procede al calcolo di $x'(d, T)$ mediante interpolazione tra i valori ricavati per le durate immediatamente precedente e successiva.

1.2 Determinazione del periodo di ritorno di un massimo annuale per brevi durate di cui siano note la durata e l'altezza di pioggia cumulata su tale finestra temporale

Supponiamo di essere interessati a valutare il periodo di ritorno di un'altezza di precipitazione registrata per una certa durata in un generico sito del territorio in esame.

Ad esempio ipotizziamo che si tratti dell'altezza di precipitazione cumulata su 6 ore registrata al pluviometro di Torino Millefonti (longitudine 8°5', latitudine 45°3') pari a $h(d, T)=116$ mm.

In primo luogo si procederà a stimare dalle tavole 2 e 3 i valori, per il sito in esame del parametro pioggia indice μ e dell'esponente di scala n , ottenendo:

$$\mu \approx 30 \text{ mm}$$

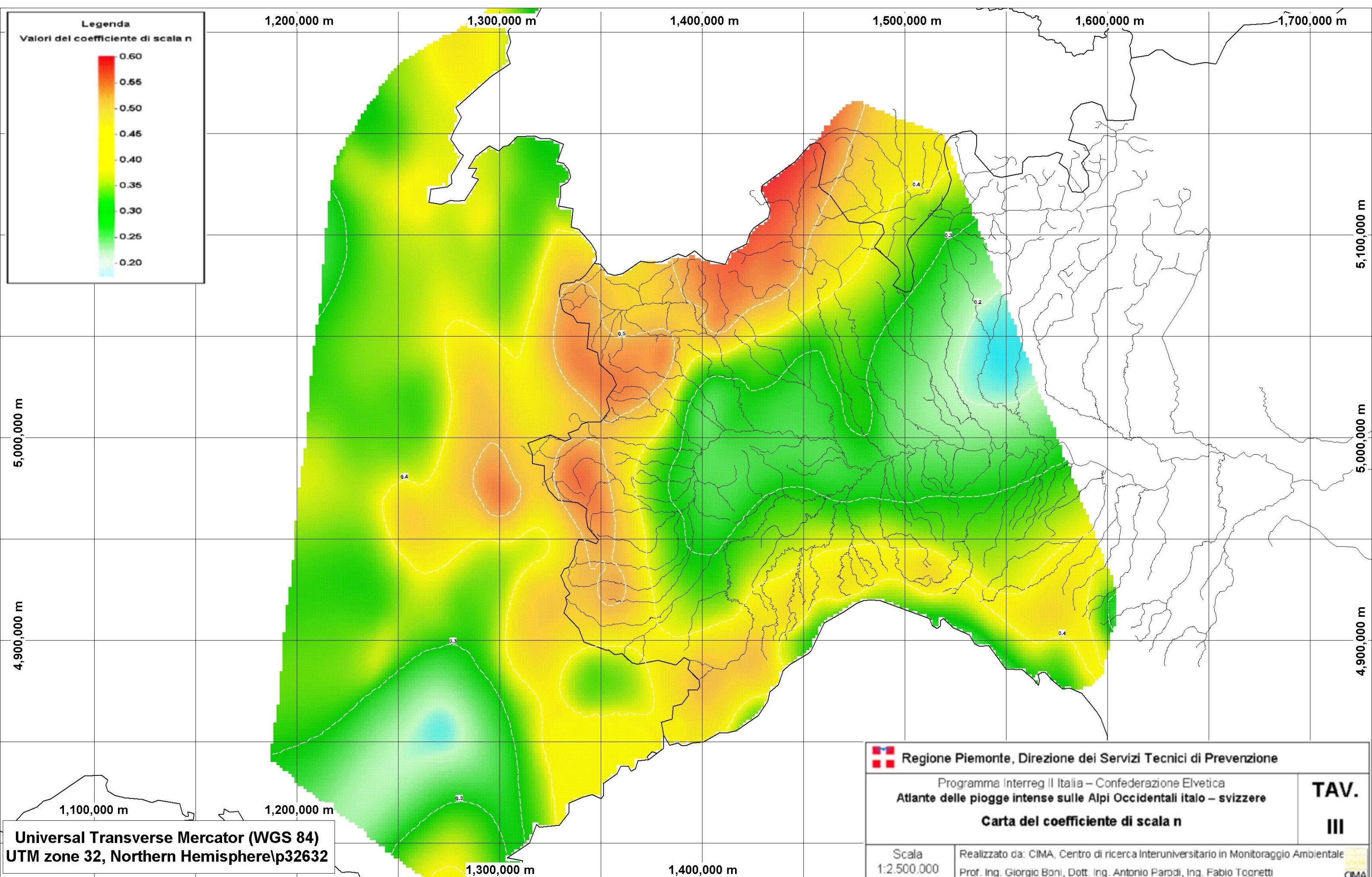
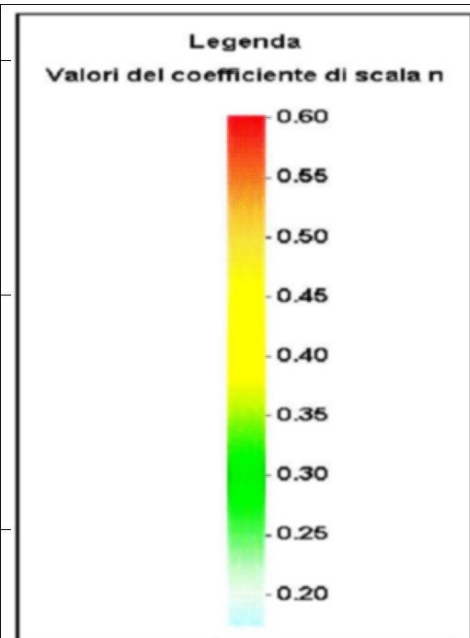
$$n \approx 0.30$$

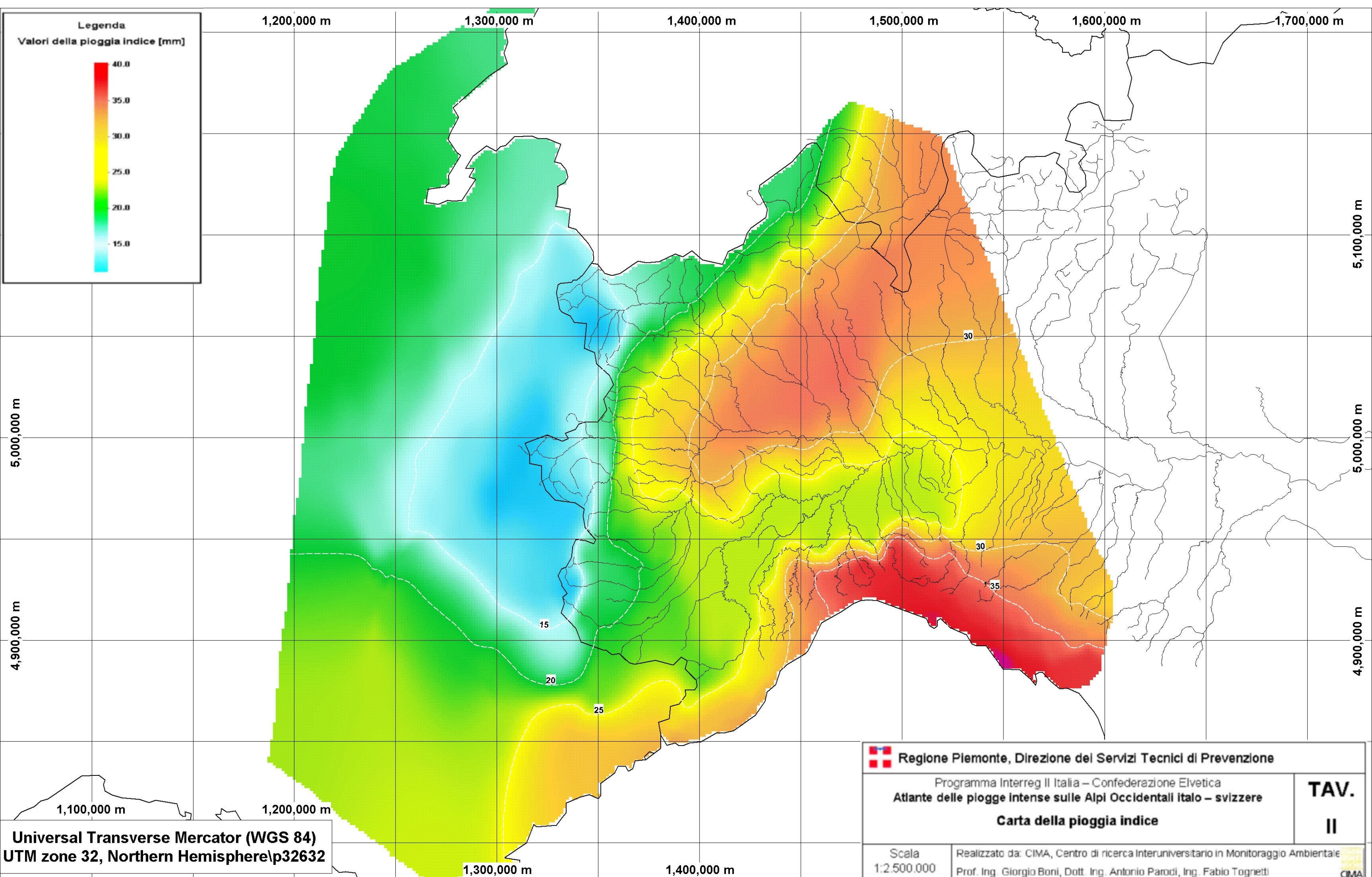
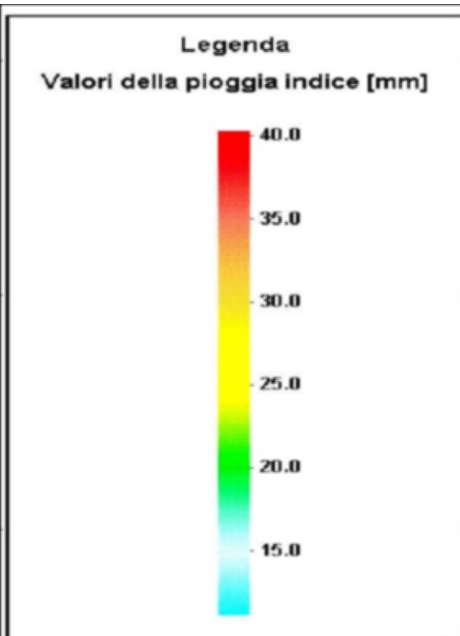
Grazie a questi valori è possibile valutare, in base all'espressione (1) e ai valori della tabella 3 per la durata $d=6$ ore (regione Padana), il quantile adimensionale $X'(d,T)$ che risulta

$$x'(d,T)=h(d,T)/(\mu*d^n)=116/(30*6^{0.30})=2.26.$$

A questo punto facendo uso dell'espressione (2) si può desumere la probabilità cumulata $F_{X'}(d,x')$ associata al valore del quantile stimato che risulta pari a circa 0.99. Da tale valore, usando la (3), si ricava il valore del tempo di ritorno T uguale a circa 100 anni.

Analogamente al primo dei casi esposti, per durate differenti a quelle tabellate il valore di T può essere desunto dalla curva di probabilità cumulata $F_{X'}(d,x')$ relativa alla durata d più prossima a quella considerata tra quelle tabellate.

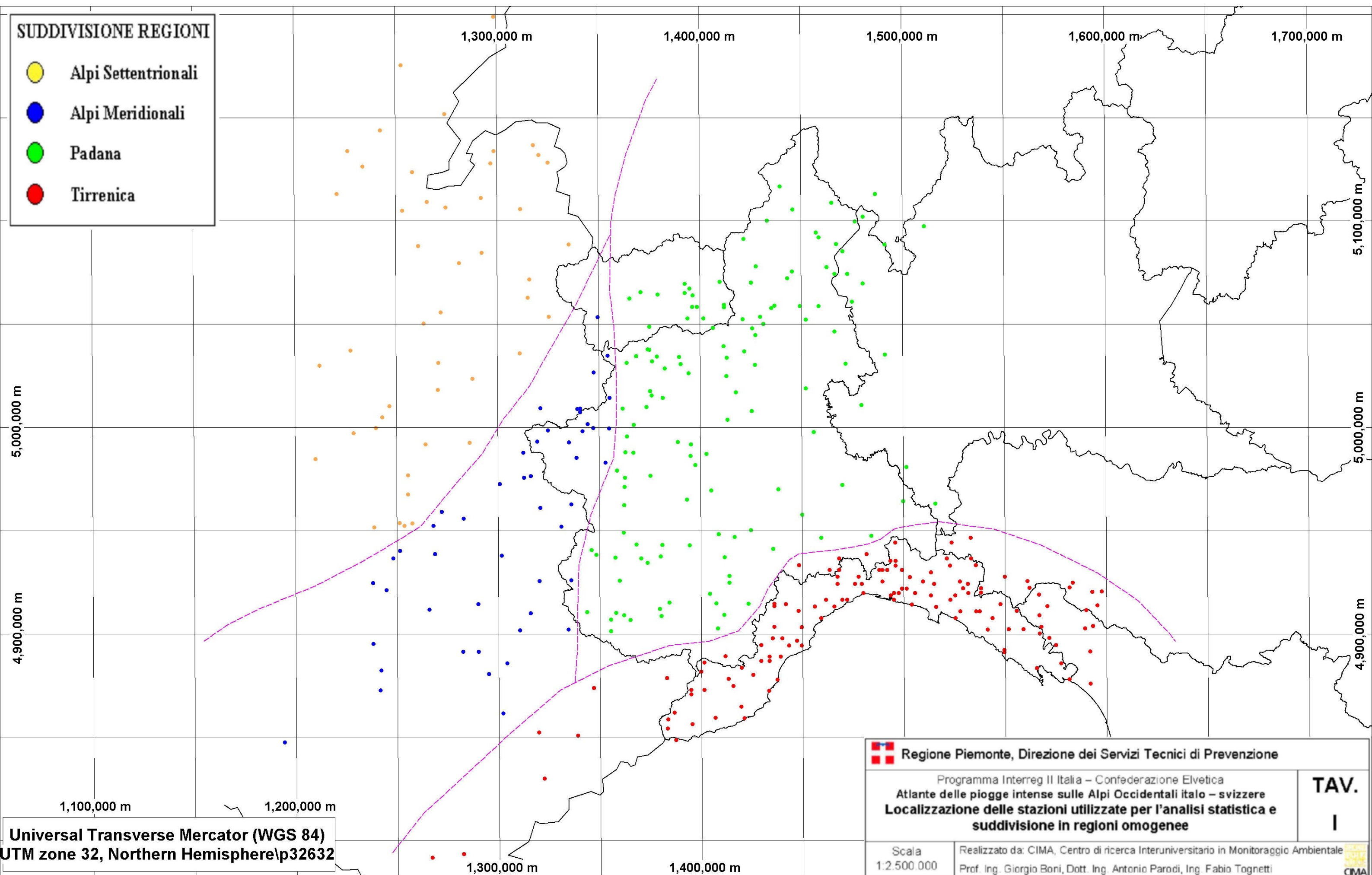


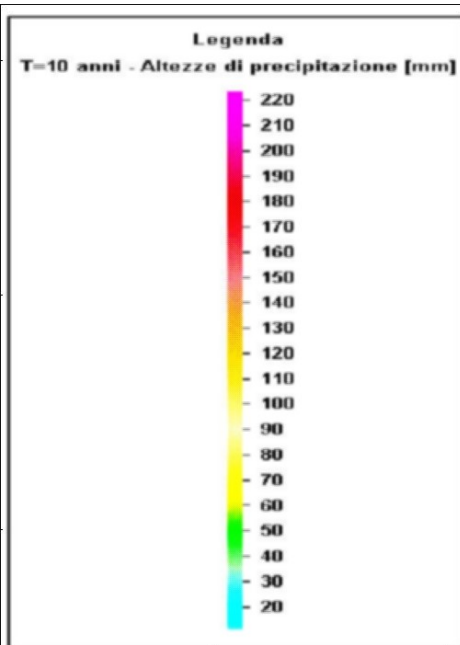


Universal Transverse Mercator (WGS 84)
UTM zone 32, Northern Hemisphere\p32632

 Regione Piemonte, Direzione dei Servizi Tecnici di Prevenzione	
Programma Interreg II Italia – Confederazione Elvetica	
Atlante delle piogge intense sulle Alpi Occidentali italo – svizzere	
Carta della pioggia indice	
Scala 1:2.500.000	Realizzato da: CIMA, Centro di ricerca Interuniversitario in Monitoraggio Ambientale Prof. Ing. Giorgio Boni, Dott. Ing. Antonio Parodi, Ing. Fabio Tognetti
TAV. II	

CIMA



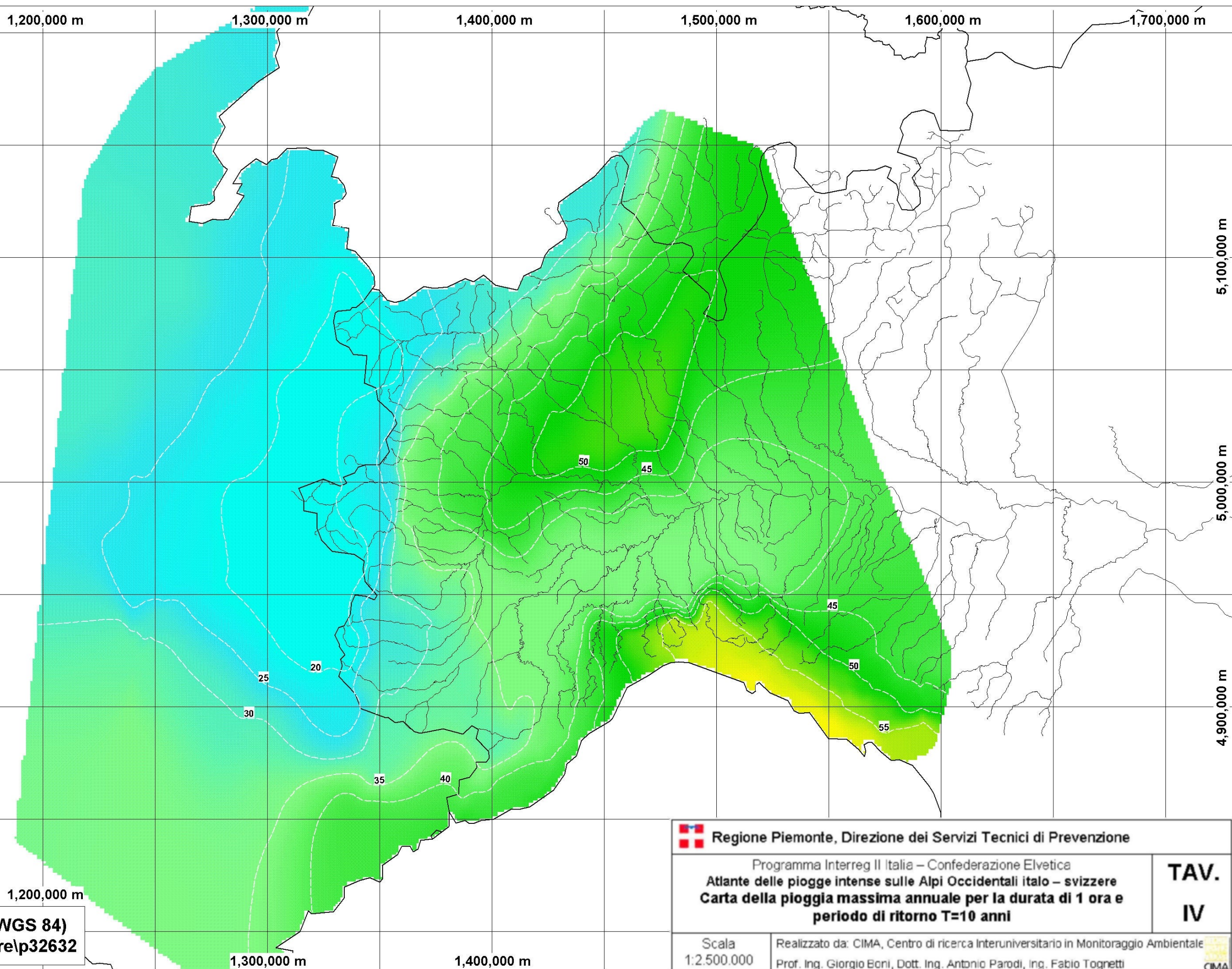


5,000,000 m

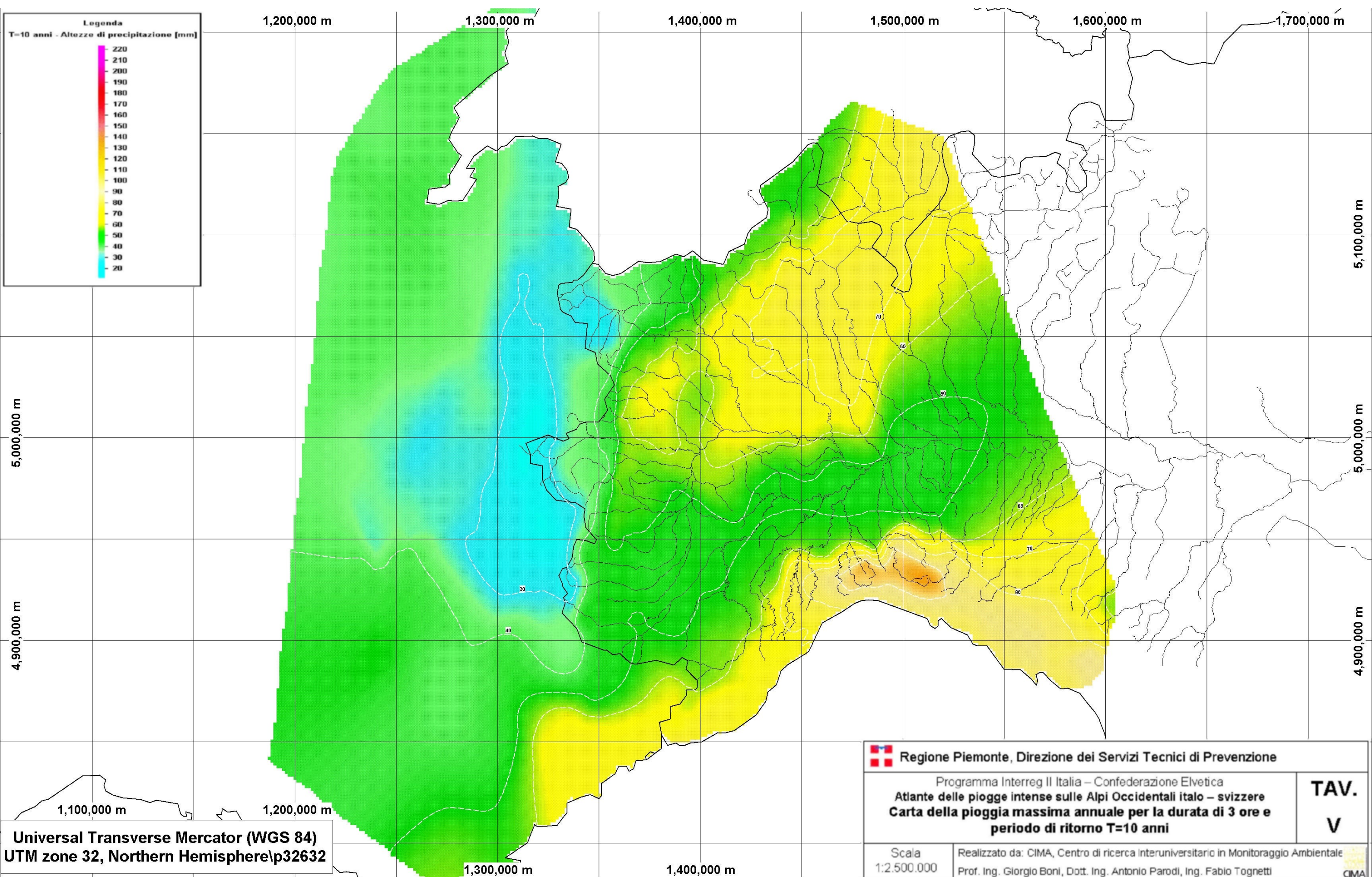
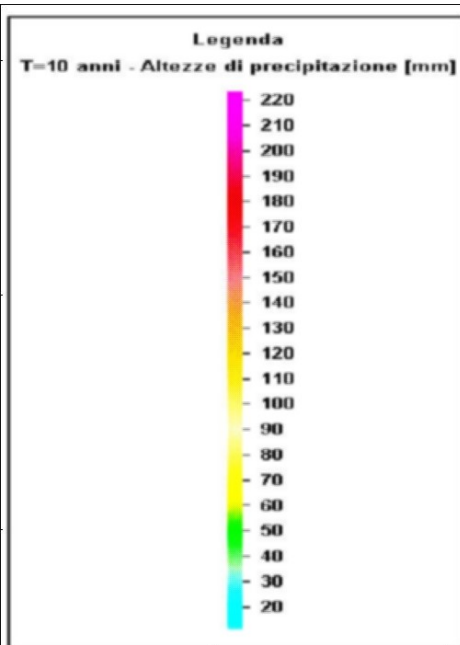
4,900,000 m

1,100,000 m 1,200,000 m

Universal Transverse Mercator (WGS 84)
UTM zone 32, Northern Hemisphere

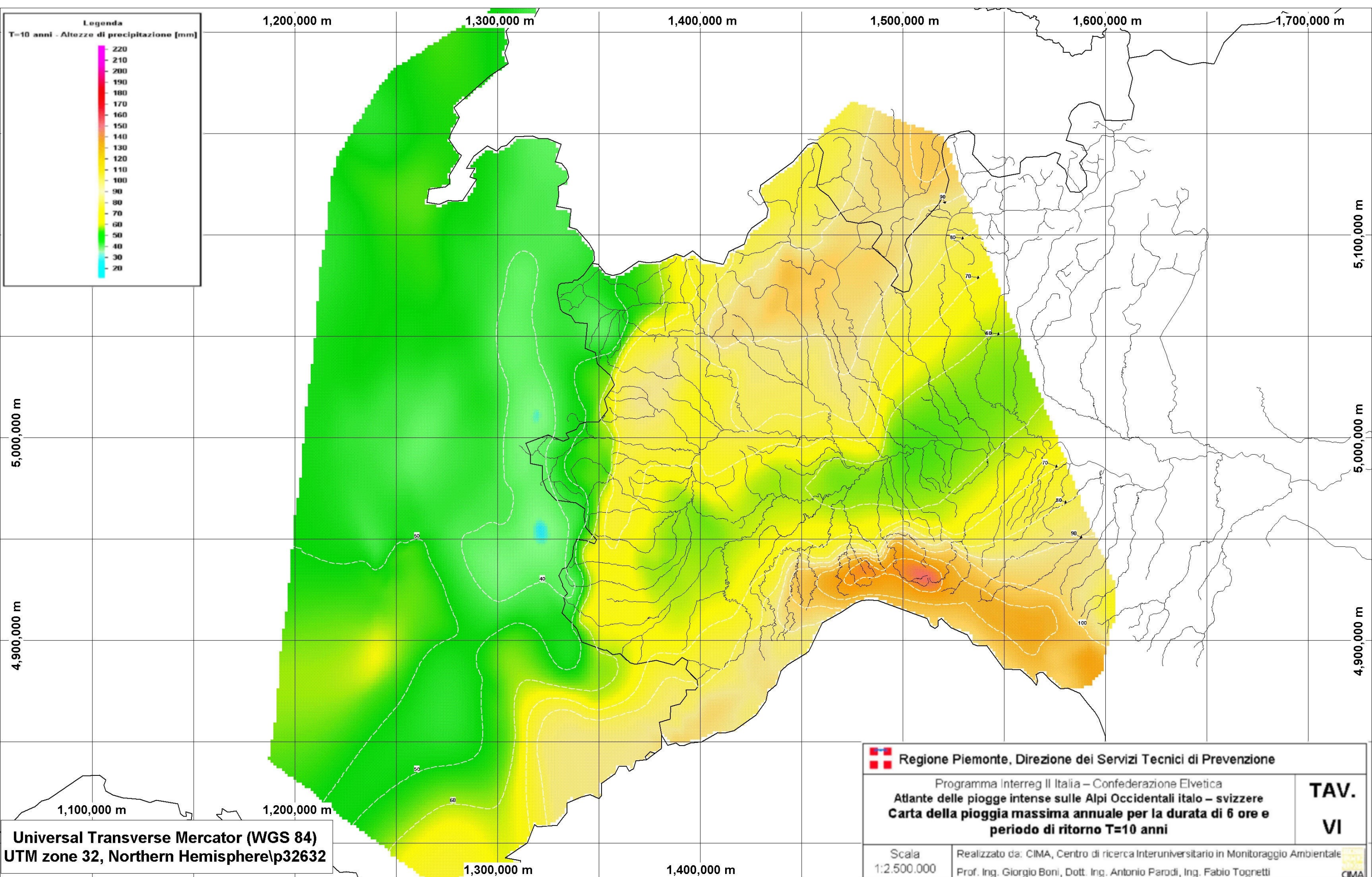
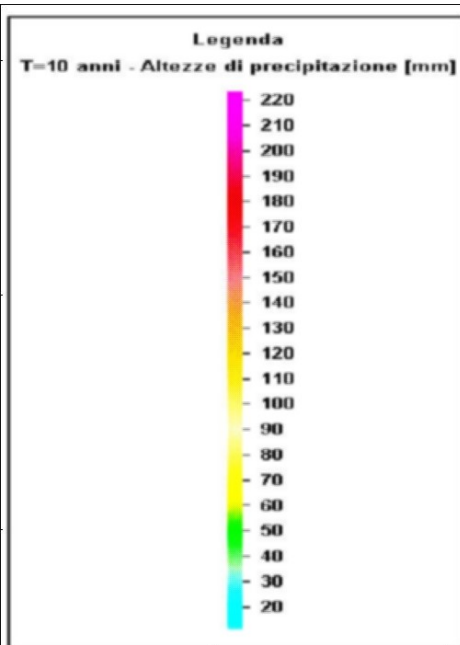


 Regione Piemonte, Direzione dei Servizi Tecnici di Prevenzione	
Programma Interreg II Italia – Confederazione Elvetica	
Atlante delle piogge intense sulle Alpi Occidentali italo – svizzere	
Carta della pioggia massima annuale per la durata di 1 ora e periodo di ritorno T=10 anni	
Scala 1:2.500.000	Realizzato da: CIMA, Centro di ricerca Interuniversitario in Monitoraggio Ambientale Prof. Ing. Giorgio Boni, Dott. Ing. Antonio Parodi, Ing. Fabio Tognetti
TAV. IV	



Universal Transverse Mercator (WGS 84)
UTM zone 32, Northern Hemisphere

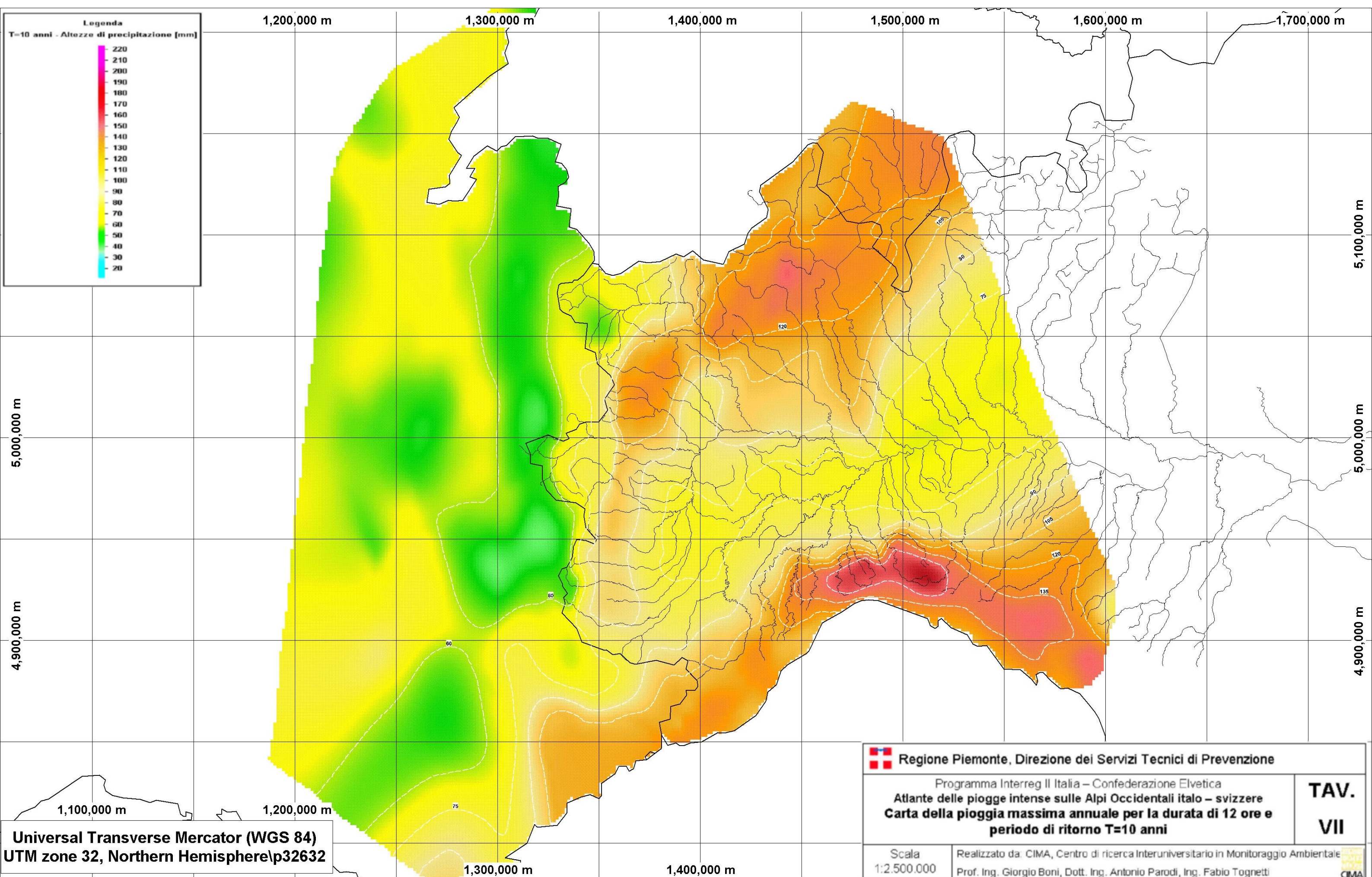
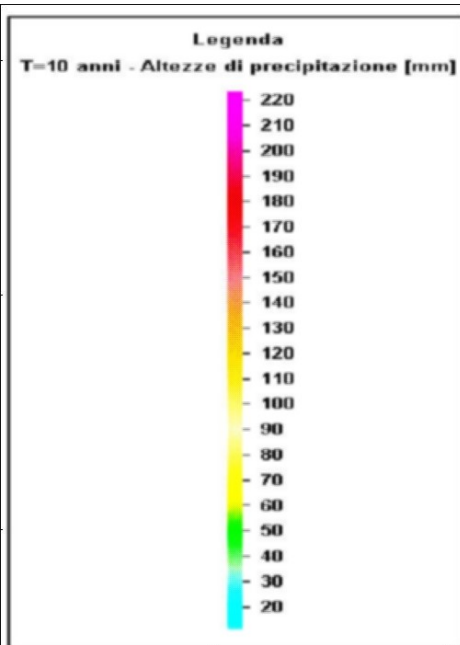
 Regione Piemonte, Direzione dei Servizi Tecnici di Prevenzione	
Programma Interreg II Italia – Confederazione Elvetica	
Atlante delle piogge intense sulle Alpi Occidentali italo – svizzere	
Carta della pioggia massima annuale per la durata di 3 ore e periodo di ritorno T=10 anni	
Scala 1:2.500.000	Realizzato da: CIMA, Centro di ricerca Interuniversitario in Monitoraggio Ambientale Prof. Ing. Giorgio Boni, Dott. Ing. Antonio Parodi, Ing. Fabio Tognetti
TAV. V	



Universal Transverse Mercator (WGS 84)
UTM zone 32, Northern Hemisphere

 Regione Piemonte, Direzione dei Servizi Tecnici di Prevenzione	
Programma Interreg II Italia – Confederazione Elvetica	
Atlante delle piogge intense sulle Alpi Occidentali italo – svizzere	
Carta della pioggia massima annuale per la durata di 6 ore e periodo di ritorno T=10 anni	
Scala 1:2.500.000	Realizzato da: CIMA, Centro di ricerca Interuniversitario in Monitoraggio Ambientale Prof. Ing. Giorgio Boni, Dott. Ing. Antonio Parodi, Ing. Fabio Tognetti
TAV. VI	

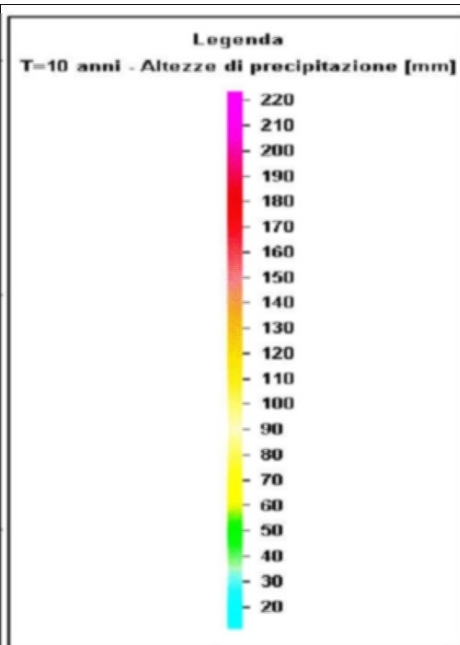




Universal Transverse Mercator (WGS 84)
UTM zone 32, Northern Hemisphere

 Regione Piemonte, Direzione dei Servizi Tecnici di Prevenzione	
Programma Interreg II Italia – Confederazione Elvetica	
Atlante delle piogge intense sulle Alpi Occidentali italo – svizzere	
Carta della pioggia massima annuale per la durata di 12 ore e periodo di ritorno T=10 anni	
Scala 1:2.500.000	Realizzato da: CIMA, Centro di ricerca Interuniversitario in Monitoraggio Ambientale Prof. Ing. Giorgio Boni, Dott. Ing. Antonio Parodi, Ing. Fabio Tognetti
TAV. VII	





5,000,000 m

4,900,000 m

Universal Transverse Mercator (WGS 84)
UTM zone 32, Northern Hemisphere

1,200,000 m

1,300,000 m

1,400,000 m

1,500,000 m

1,600,000 m

1,700,000 m

5,100,000 m

5,000,000 m

4,900,000 m

1,300,000 m

1,400,000 m

 Regione Piemonte, Direzione dei Servizi Tecnici di Prevenzione

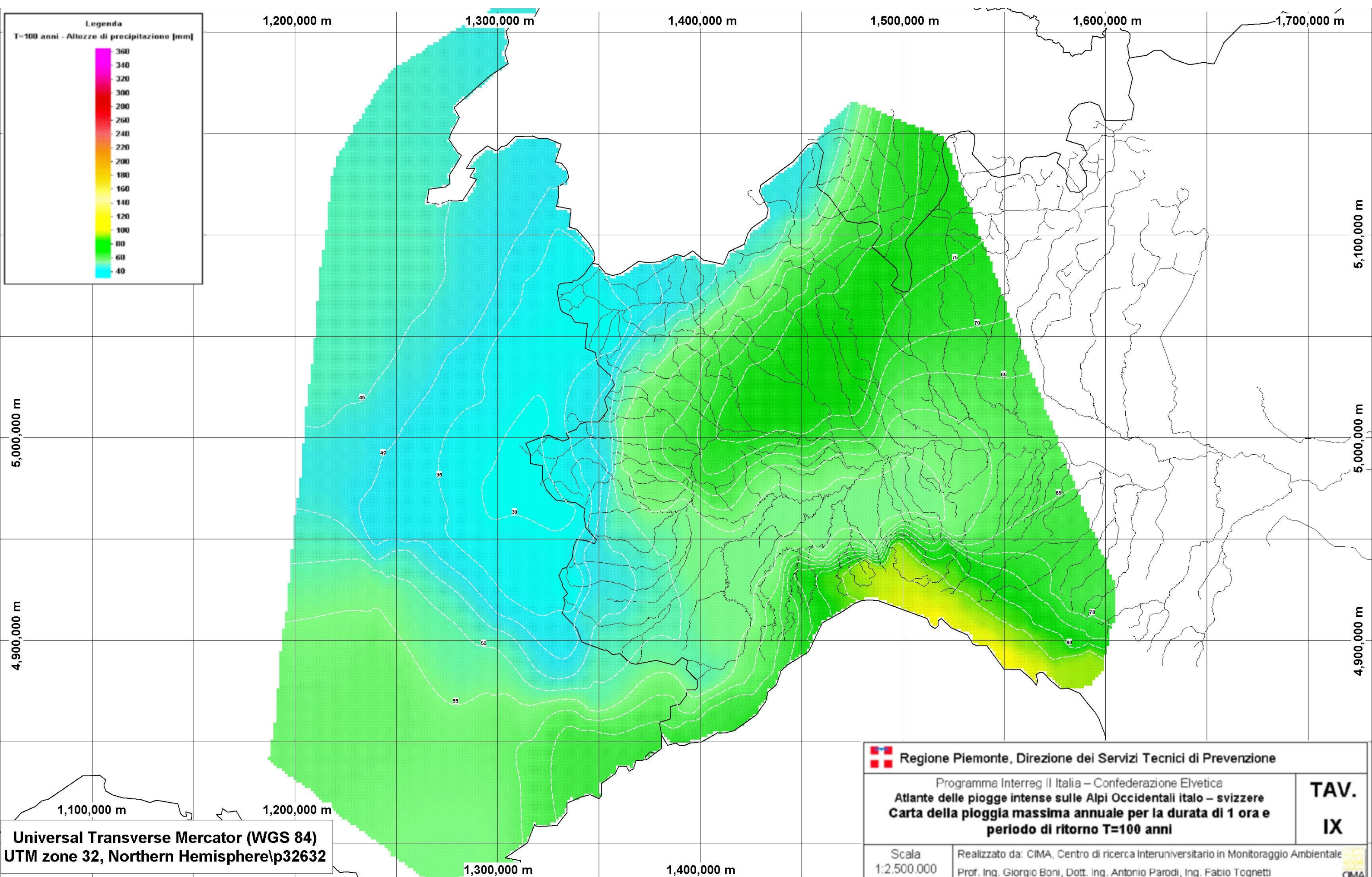
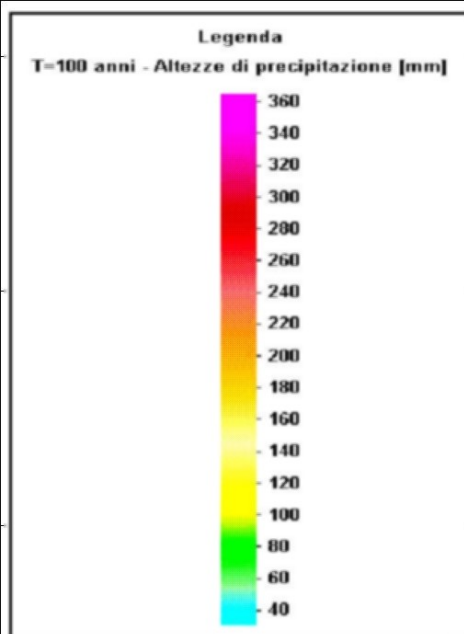
Programma Interreg II Italia – Confederazione Elvetica
Atlante delle piogge intense sulle Alpi Occidentali italo – svizzere
**Carta della pioggia massima annuale per la durata di 24 ore e
periodo di ritorno T=10 anni**

**TAV.
VIII**

Scala
1:2.500.000

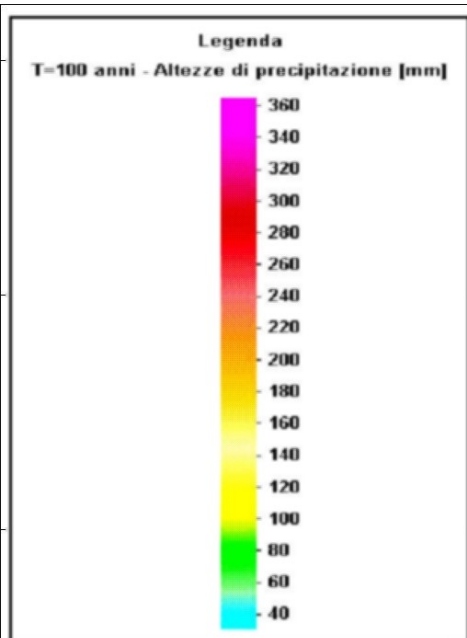
Realizzato da: CIMA, Centro di ricerca Interuniversitario in Monitoraggio Ambientale
Prof. Ing. Giorgio Boni, Dott. Ing. Antonio Parodi, Ing. Fabio Tognetti

 CIMA



Universal Transverse Mercator (WGS 84)
UTM zone 32, Northern Hemisphere

 Regione Piemonte, Direzione dei Servizi Tecnici di Prevenzione	
Programma Interreg II Italia – Confederazione Elvetica	
Atlante delle piogge intense sulle Alpi Occidentali italo – svizzere	
Carta della pioggia massima annuale per la durata di 1 ora e periodo di ritorno T=100 anni	
Scala 1:2.500.000	Realizzato da: CIMA, Centro di ricerca Interuniversitario in Monitoraggio Ambientale Prof. Ing. Giorgio Boni, Dott. Ing. Antonio Parodi, Ing. Fabio Tognetti
TAV. IX	



5,000,000 m

4,900,000 m

Universal Transverse Mercator (WGS 84)
UTM zone 32, Northern Hemisphere

1,200,000 m

1,300,000 m

1,400,000 m

1,500,000 m

1,600,000 m

1,700,000 m

5,100,000 m

5,000,000 m

4,900,000 m

1,300,000 m

1,400,000 m

 Regione Piemonte, Direzione dei Servizi Tecnici di Prevenzione

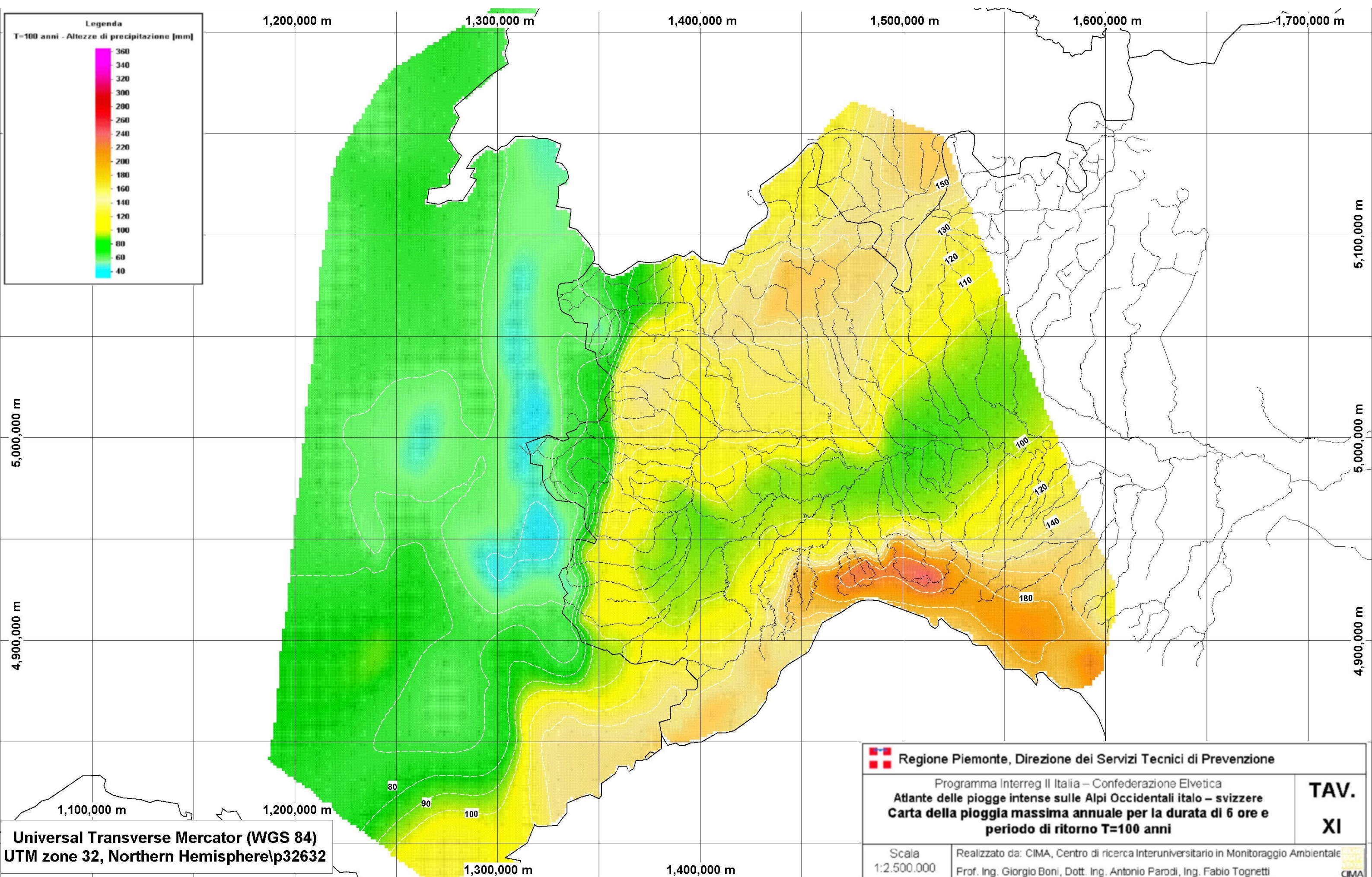
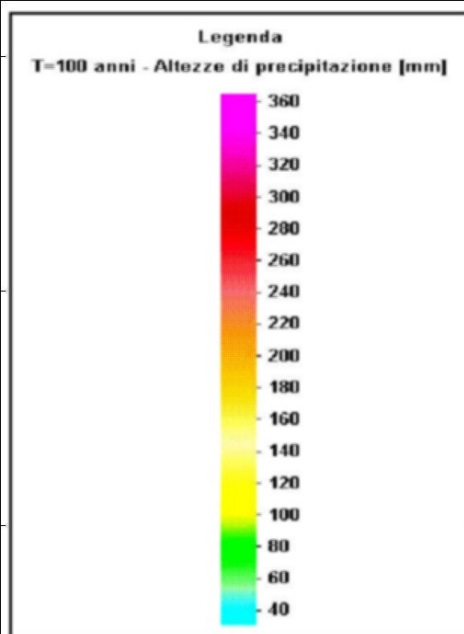
Programma Interreg II Italia – Confederazione Elvetica
Atlante delle piogge intense sulle Alpi Occidentali italo – svizzere
**Carta della pioggia massima annuale per la durata di 3 ore e
periodo di ritorno T=100 anni**

Scala
1:2.500.000

Realizzato da: CIMA, Centro di ricerca Interuniversitario in Monitoraggio Ambientale
Prof. Ing. Giorgio Boni, Dott. Ing. Antonio Parodi, Ing. Fabio Tognetti

TAV.
X

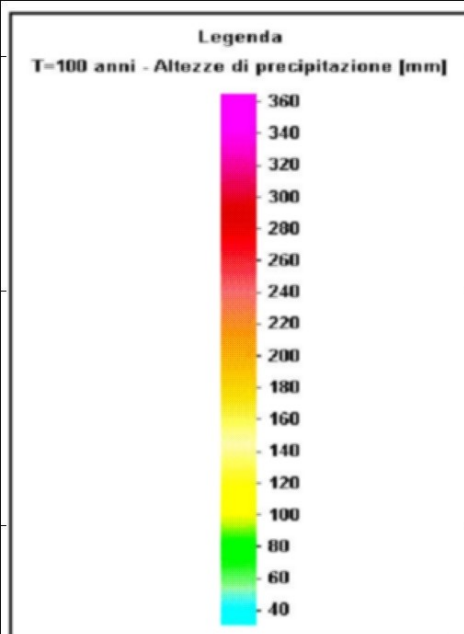
CIMA



Universal Transverse Mercator (WGS 84)
UTM zone 32, Northern Hemisphere

 Regione Piemonte, Direzione dei Servizi Tecnici di Prevenzione	
Programma Interreg II Italia – Confederazione Elvetica	
Atlante delle piogge intense sulle Alpi Occidentali italo – svizzere	
Carta della pioggia massima annuale per la durata di 6 ore e periodo di ritorno T=100 anni	
Scala 1:2.500.000	Realizzato da: CIMA, Centro di ricerca Interuniversitario in Monitoraggio Ambientale Prof. Ing. Giorgio Boni, Dott. Ing. Antonio Parodi, Ing. Fabio Tognetti
TAV. XI	





5,000,000 m

4,900,000 m

Universal Transverse Mercator (WGS 84)
UTM zone 32, Northern Hemisphere

1,200,000 m

1,300,000 m

1,400,000 m

1,500,000 m

1,600,000 m

1,700,000 m

5,100,000 m

5,000,000 m

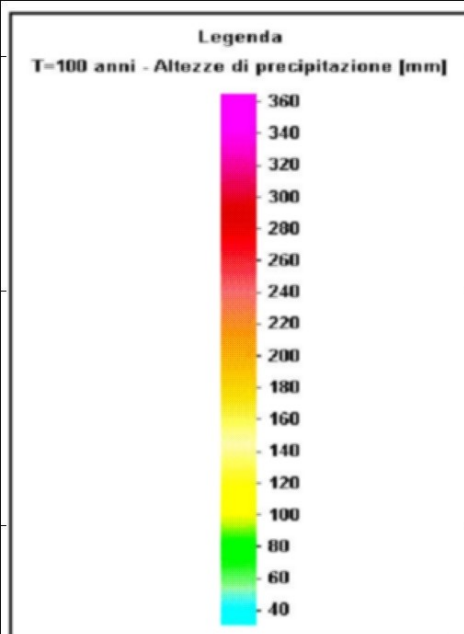
4,900,000 m

1,300,000 m

1,400,000 m

 Regione Piemonte, Direzione dei Servizi Tecnici di Prevenzione	
Programma Interreg II Italia – Confederazione Elvetica	
Atlante delle piogge intense sulle Alpi Occidentali italo – svizzere	
Carta della pioggia massima annuale per la durata di 12 ore e periodo di ritorno T=100 anni	
Scala 1:2.500.000	Realizzato da: CIMA, Centro di ricerca Interuniversitario in Monitoraggio Ambientale Prof. Ing. Giorgio Boni, Dott. Ing. Antonio Parodi, Ing. Fabio Tognetti
TAV. XII	

CIMA

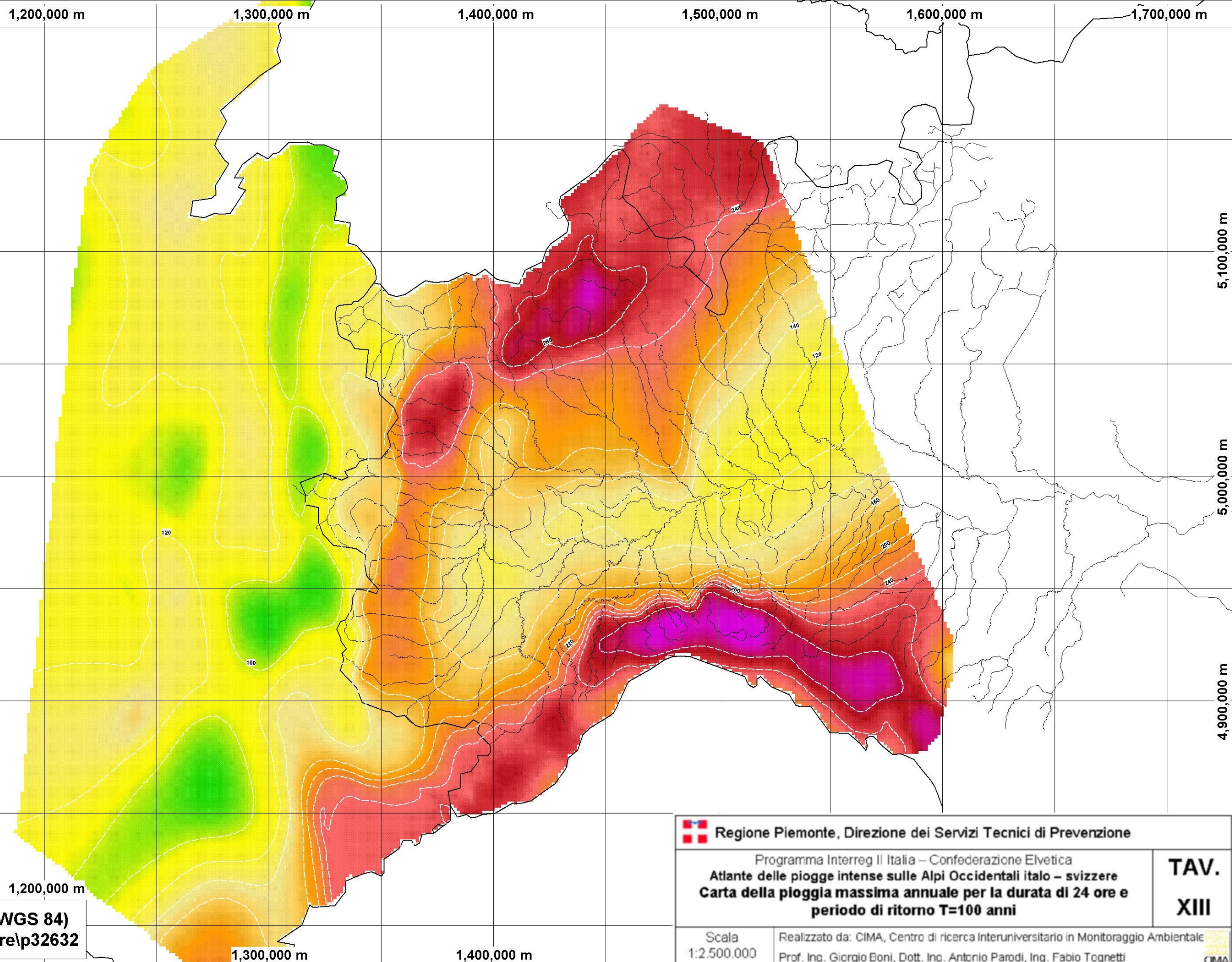


5,000,000 m

4,900,000 m

1,100,000 m 1,200,000 m

**Universal Transverse Mercator (WGS 84)
UTM zone 32, Northern Hemisphere**



5,100,000 m

5,000,000 m

4,900,000 m

 Regione Piemonte, Direzione dei Servizi Tecnici di Prevenzione	
Programma Interreg II Italia – Confederazione Elvetica	
Atlante delle piogge intense sulle Alpi Occidentali italo – svizzere	
Carta della pioggia massima annuale per la durata di 24 ore e periodo di ritorno T=100 anni	
Scala 1:2.500.000	Realizzato da: CIMA, Centro di ricerca Interuniversitario in Monitoraggio Ambientale Prof. Ing. Giorgio Boni, Dott. Ing. Antonio Parodi, Ing. Fabio Tognetti
TAV. XIII	



DIREZIONE Servizi Tecnici di Prevenzione

Settore Studi e Ricerche Geologiche - Sistema Informativo Prevenzione Rischi

Programma Interreg II Italia-Confederazione Elvetica
Azione 5
Proposta di una metodologia di analisi e di studio inerente i processi di instabilità
dei versanti da sperimentarsi nel Bacino dell'Alto Toce

CARTA INVENTARIO DELLE FRANE
(Sintesi delle carte rilevate alla scala 1:25.000)

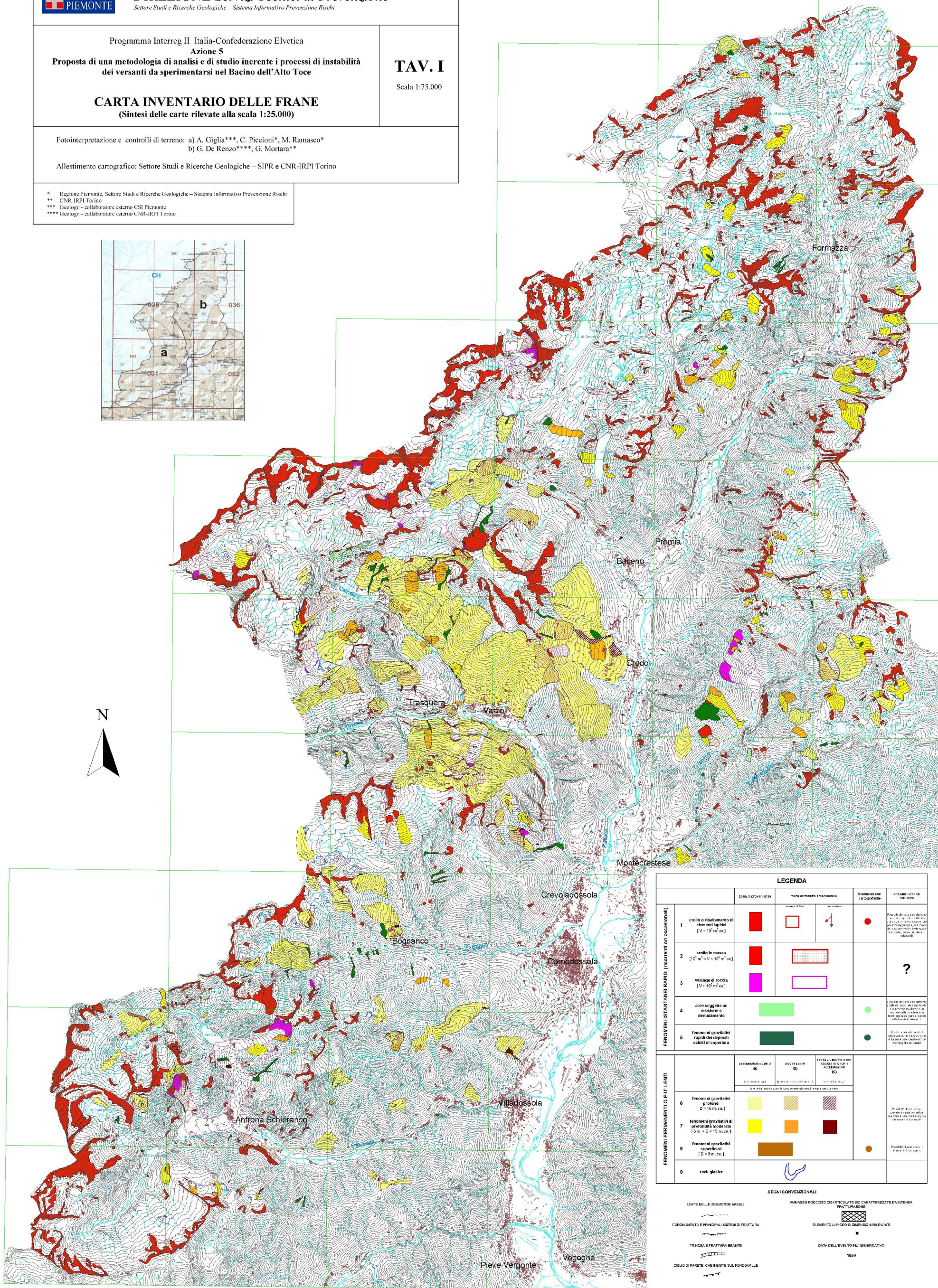
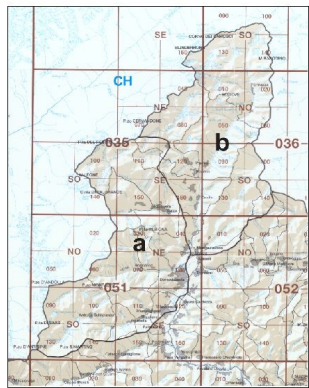
TAV. I

Scala 1:75.000

Fotointerpretazione e controlli di terreno: a) A. Giglia***, C. Piccioni*, M. Ramasco*
b) G. De Renzo****, G. Mortara**

Allestimento cartografico: Settore Studi e Ricerche Geologiche - SIPR e CNR-IRPI Torino

* Regione Piemonte, Settore Studi e Ricerche Geologiche - Sistema Informativo Prevenzione Rischi
** CNR-IRPI Torino
*** Geologo - collaboratore esterno CSI Piemonte
**** Geologo - collaboratore esterno CNR-IRPI Torino



LEGENDA				
FENOMENI ISTANTANEI RAPIDI (fenomeni ad occasionalità)	zona di provenienza	zona di transito ed accumulo	fenomeno non cartografabile	fenomeno istantaneo
	1	2	3	4
	5	6	7	8
	9	10	11	12
	13	14	15	16
FENOMENI PERMANENTI O PIU' LENTI	ESISTENZE E LORO LOCALIZZAZIONE			FENOMENI PERMANENTI O PIU' LENTI
	(A)	(B)	(C)	
	17	18	19	
	20	21	22	
23	24	25	26	27
28	29	30	31	32
33	34	35	36	37
38	39	40	41	42
43	44	45	46	47
48	49	50	51	52
53	54	55	56	57
58	59	60	61	62
63	64	65	66	67
68	69	70	71	72
73	74	75	76	77
78	79	80	81	82
83	84	85	86	87
88	89	90	91	92
93	94	95	96	97
98	99	100	101	102
103	104	105	106	107
108	109	110	111	112
113	114	115	116	117
118	119	120	121	122
123	124	125	126	127
128	129	130	131	132
133	134	135	136	137
138	139	140	141	142
143	144	145	146	147
148	149	150	151	152
153	154	155	156	157
158	159	160	161	162
163	164	165	166	167
168	169	170	171	172
173	174	175	176	177
178	179	180	181	182
183	184	185	186	187
188	189	190	191	192
193	194	195	196	197
198	199	200	201	202
203	204	205	206	207
208	209	210	211	212
213	214	215	216	217
218	219	220	221	222
223	224	225	226	227
228	229	230	231	232
233	234	235	236	237
238	239	240	241	242
243	244	245	246	247
248	249	250	251	252
253	254	255	256	257
258	259	260	261	262
263	264	265	266	267
268	269	270	271	272
273	274	275	276	277
278	279	280	281	282
283	284	285	286	287
288	289	290	291	292
293	294	295	296	297
298	299	300	301	302
303	304	305	306	307
308	309	310	311	312
313	314	315	316	317
318	319	320	321	322
323	324	325	326	327
328	329	330	331	332
333	334	335	336	337
338	339	340	341	342
343	344	345	346	347
348	349	350	351	352
353	354	355	356	357
358	359	360	361	362
363	364	365	366	367
368	369	370	371	372
373	374	375	376	377
378	379	380	381	382
383	384	385	386	387
388	389	390	391	392
393	394	395	396	397
398	399	400	401	402
403	404	405	406	407
408	409	410	411	412
413	414	415	416	417
418	419	420	421	422
423	424	425	426	427
428	429	430	431	432
433	434	435	436	437
438	439	440	441	442
443	444	445	446	447
448	449	450	451	452
453	454	455	456	457
458	459	460	461	462
463	464	465	466	467
468	469	470	471	472
473	474	475	476	477
478	479	480	481	482
483	484	485	486	487
488	489	490	491	492
493	494	495	496	497
498	499	500	501	502
503	504	505	506	507
508	509	510	511	512
513	514	515	516	517
518	519	520	521	522
523	524	525	526	527
528	529	530	531	532
533	534	535	536	537
538	539	540	541	542
543	544	545	546	547
548	549	550	551	552
553	554	555	556	557
558	559	560	561	562
563	564	565	566	567
568	569	570	571	572
573	574	575	576	577
578	579	580	581	582
583	584	585	586	587
588	589	590	591	592
593	594	595	596	597
598	599	600	601	602
603	604	605	606	607
608	609	610	611	612
613	614	615	616	617
618	619	620	621	622
623	624	625	626	627
628	629	630	631	632
633	634	635	636	637
638	639	640	641	642
643	644	645	646	647
648	649	650	651	652
653	654	655	656	657
658	659	660	661	662
663	664	665	666	667
668	669	670	671	672
673	674	675	676	677
678	679	680	681	682
683	684	685	686	687
688	689	690	691	692
693	694	695	696	697
698	699	700	701	702
703	704	705	706	707
708	709	710	711	712
713	714	715	716	717
718	719	720	721	722
723	724	725	726	727
728	729	730	731	732
733	734	735	736	737
738	739	740	741	742
743	744	745	746	747
748	749	750	751	752
753	754	755	756	757
758	759	760	761	762
763	764	765	766	767
768	769	770	771	772
773	774	775	776	777
778	779	780	781	782
783	784	785	786	787
788	789	790	791	792
793	794	795	796	797
798	799	800	801	802
803	804	805	806	807
808	809	810	811	812
813	814	815	816	817
818	819	820	821	822
823	824	825	826	827
828	829	830	831	832
833	834	835	836	837
838	839	840	841	842
843	844	845	846	847
848	849	850	851	852
853	854	855	856	857
858	859	860	861	862
863	864	865	866	867
868	869	870	871	872
873	874	875	876	877
878	879	880	881	882
883	884	885	886	887
888	889	890	891	892
893	894	895	896	897
898	899	900	901	902
903	904	905	906	907
908	909	910	911	912
913	914	915	916	917
918	919	920	921	922
923	924	925	926	927
928	929	930	931	932
933	934	935	936	937
938	939	940	941	942
943	944	945	946	947
948	949	950	951	952
953	954	955	956	957
958	959	960	961	962
963	964	965	966	967
968	969	970	971	972
973	974	975	976	977
978	979	980	981	982
983	984	985	986	987
988	989	990	991	992
993	994	995	996	997
998	999	1000	1001	1002

SEGNALI CONVENZIONALI

LINEE DELLE GEOMETRIE AREE

CONTOURNO E PRINCIPALI SISTEMI DI FRATTURA

TRACCE E FRATTURE DEBILI

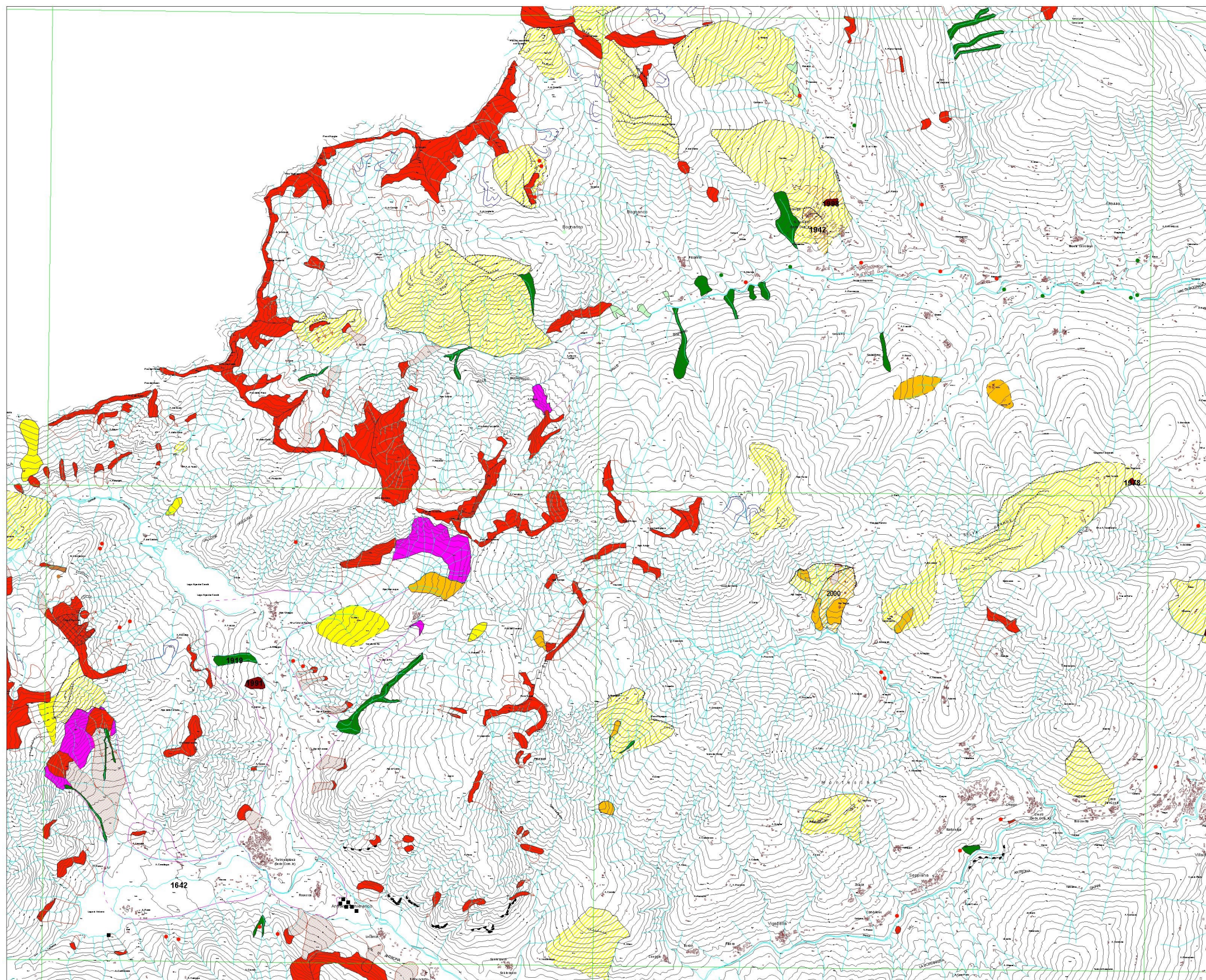
CICLI DI PARTE CHE INSISTE SUL FONDOVALLE

ANASSO PICCOLOSO DEARTICOLATO ED CARATTERIZZATO DA INTENSA FRATTURAZIONE

ELEMENTO LARICO DI DIMENSIONI RILEVANTI

DATA DELL'EVENTO PIU' SIGNIFICATIVO

1996



DIREZIONE Servizi Tecnici di Prevenzione
Settore Studi e Ricerche Geologiche - Sistema Informativo Prevenzione Rischi

Programma Interreg II Italia-Confederazione Elvetica
Azione 5
Proposta di una metodologia di analisi e di studio inerente i processi di instabilità
dei versanti da sperimentarsi nel Bacino dell'Alto Tice

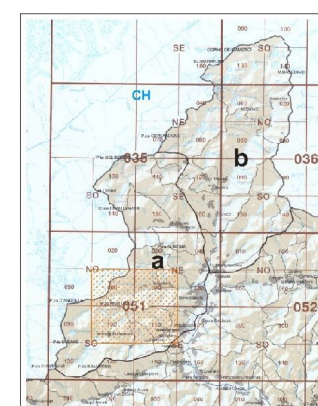
TAV. II

Scala 1:25.000

CARTA INVENTARIO DELLE FRANE
(Sezioni CTR n° 51060-51070-51100-51110)

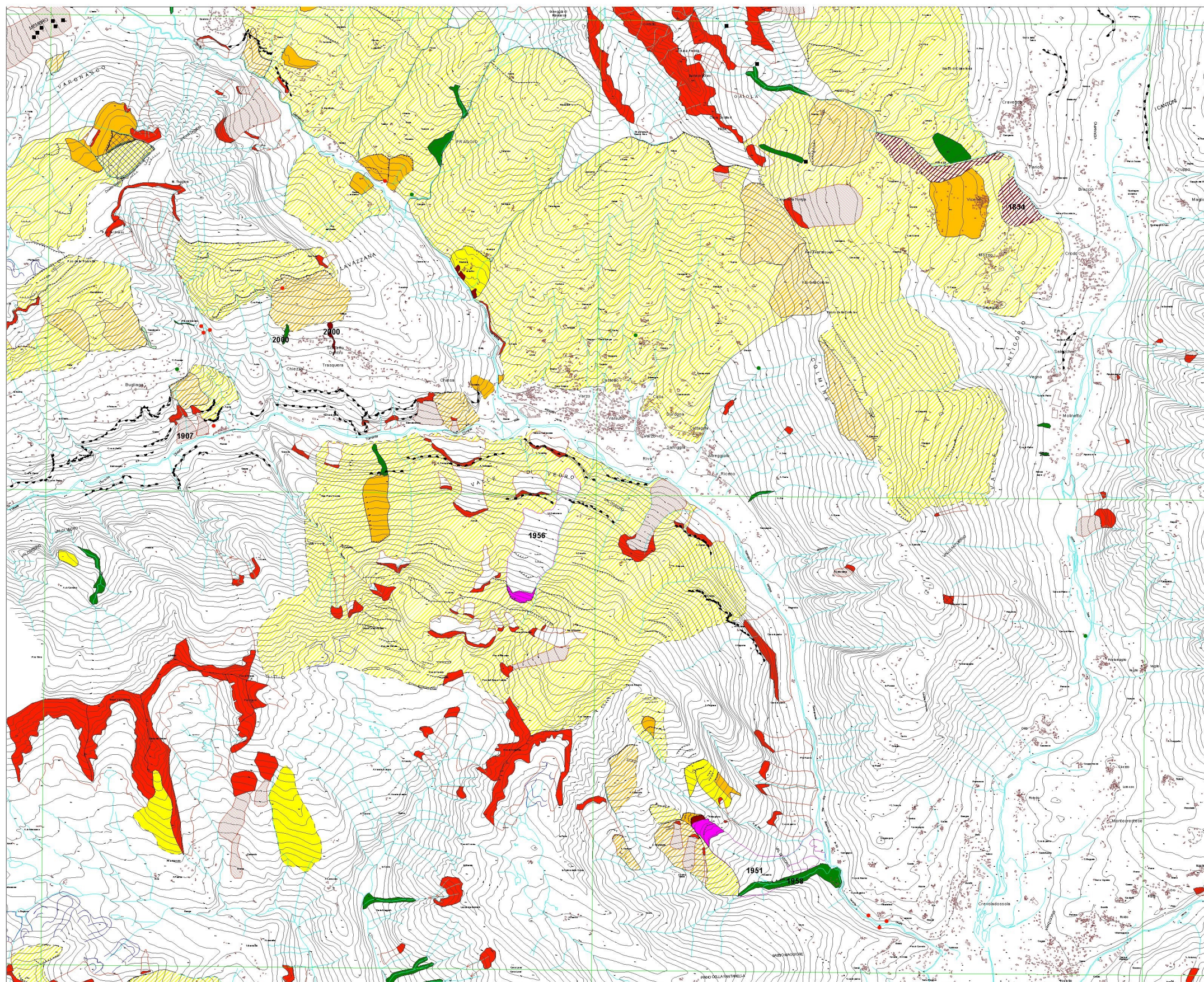
Fotointerpretazione e controlli di terreno: A. Giglia**, C. Piccioni*, M. Ramusco*
Allestimento cartografico: Settore Studi e Ricerche Geologiche - SIPR e CNR-IRPI Torino

* Regione Piemonte, Settore Studi e Ricerche Geologiche - Sistema Informativo Prevenzione Rischi
** Geologo - collaboratore esterno CSM Piemonte



Legenda

- Elemento lapideo di dimensioni rilevanti
- Crollo o ribaltamento di elementi lapidei (fenomeno non cartografabile)
- Fenomeni gravitativi rapidi dei depositi sciolti di copertura (fenomeno non cartografabile)
- Fenomeni gravitativi superficiali (fenomeno non cartografabile)
- Crollo o ribaltamento di elementi lapidei - zona di transito ed accumulo - incanalato
- Rock glacier
- coronamento e principali sistemi di frattura
- Trincea e frattura beante
- Ciglio di parete che insiste sul fondovalle
- limiti delle geometrie areali**
- limite certo
- limite incerto
- Ammasso roccioso disarticolato e/o caratterizzato da intensa fratturazione
- Crollo o ribaltamento di elementi lapidei/crollo in massa - zona di provenienza
- crollo o ribaltamento di elementi lapidei - zona di transito ed accumulo
- crollo in massa - zona di transito ed accumulo
- Valanga di roccia zona di provenienza
- Valanga di roccia zona di transito ed accumulo
- Aree soggette ad erosione e denudamento
- Fenomeni gravitativi rapidi dei depositi sciolti di copertura
- Fenomeni gravitativi superficiali
- Fenomeni gravitativi di profondità moderata-lento oppure molto lento soggetto a forti accelerazioni
- Fenomeni gravitativi di profondità moderata - molto lento
- Fenomeni gravitativi di profondità moderata - estremamente lento
- Fenomeni gravitativi profondi - molto lento
- Fenomeni gravitativi profondi - estremamente lento



**DIREZIONE Servizi Tecnici di Prevenzione**
Sottosegretaria e Ricerche Geologiche - Sistema Informativo Prevenzione Rischio

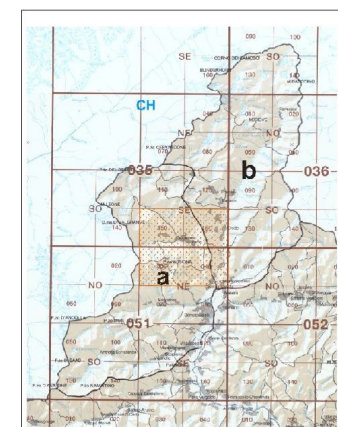
Programma Interreg II Italia-Confederazione Elvetica
Azione 5
**Proposta di una metodologia di analisi e di studio inerente i processi di instabilità
dei versanti da sperimentarsi nel Bacino dell'Alto Toce**

CARTA INVENTARIO DELLE FRANE
(Sezioni CTR n° 35150-35160-51030-51040)

Fotointerpretazione e controlli di terreno: a) A. Giglia***, C. Piccioni*, M. Ramasco*
b) G. De Renzo****, G. Mortara*
Allestimento cartografico: Settore Studi e Ricerche Geologiche - SIPR e CNIR-IRPI Torino

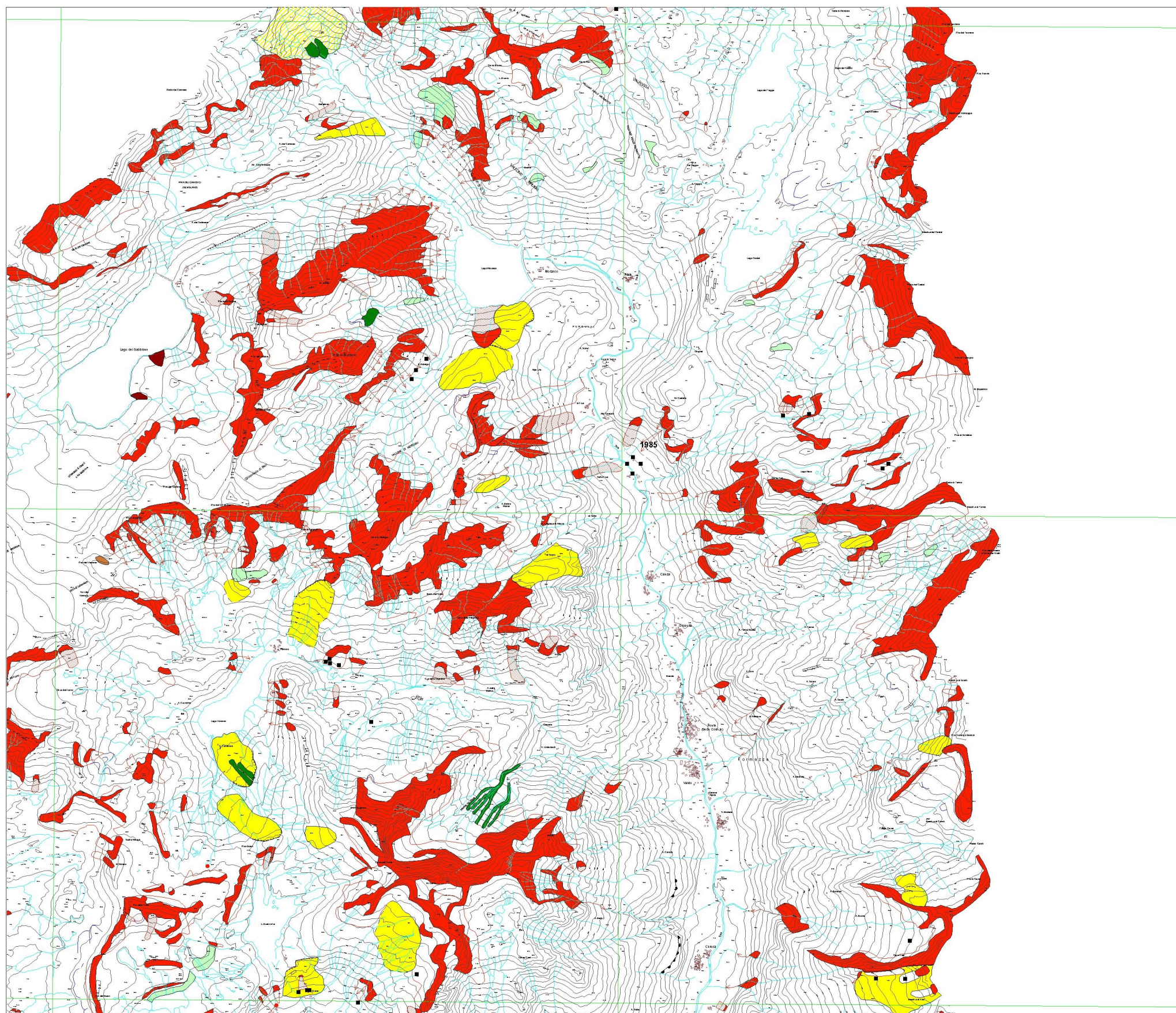
* Regione Piemonte, Settore Studi e Ricerche Geologiche - Sistema Informativo Prevenzione Rischio
** CNIR-IRPI Torino
*** Geologo - collaboratore esterno CSR Piemonte
**** Geologo - collaboratore esterno CNIR-IRPI Torino

TAV. III
Scala 1:25.000



Legenda

- Elemento lapideo di dimensioni rilevanti
- Crollo o ribaltamento di elementi lapidei (fenomeno non cartografabile)
- Fenomeni gravitativi rapidi dei depositi sciolti di copertura (fenomeno non cartografabile)
- Crollo o ribaltamento di elementi lapidei - zona di transito ed accumulo - incanalato
- Rock glacier
- coronamento e principali sistemi di frattura
- Trincea e frattura beante
- Ciglio di parete che insiste sul fondovalle
- limiti delle geometrie areali**
 - limite certo
 - limite incerto
 - Ammasso roccioso disarticolato e/o caratterizzato da intensa fratturazione
 - Crollo o ribaltamento di elementi lapidei/crollo in massa - zona di provenienza
 - crollo o ribaltamento di elementi lapidei - zona di transito ed accumulo
 - crollo in massa - zona di transito ed accumulo
 - Valanga di roccia zona di provenienza
 - Valanga di roccia zona di transito ed accumulo
 - Fenomeni gravitativi rapidi dei depositi sciolti di copertura
 - Fenomeni gravitativi di profondità moderata-lento oppure molto lento soggetto a forti accelerazioni
 - Fenomeni gravitativi di profondità moderata - molto lento
 - Fenomeni gravitativi di profondità moderata - estremamente lento
 - Fenomeni gravitativi profondi - lento oppure molto lento soggetto a forti accelerazioni
 - Fenomeni gravitativi profondi - molto lento
 - Fenomeni gravitativi profondi - estremamente lento



DIREZIONE Servizi Tecnici di Prevenzione
Servizi Studi e Ricerche Geologiche - Sistema Informativo Prevenzione Rischio

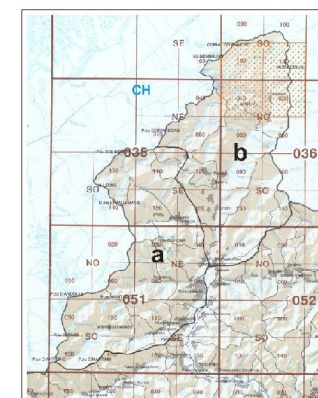
Programma Interreg II Italia-Confederazione Elvetica
Azione 5
Proposta di una metodologia di analisi e di studio inerente i processi di instabilità
dei versanti da sperimentarsi nel Bacino dell'Alto Tice

TAV. IV
Scala 1:25.000

CARTA INVENTARIO DELLE FRANE
(Sezioni CTR n° 20130-20140-36010-36020)

Fotointerpretazione e controlli di terreno: G. De Renzo*, G. Mortara*
Allestimento cartografico: Settore Studi e Ricerche Geologiche - SIPR e CNR-IRPI Torino

* CNR-IRPI Torino
** Geologo - collaboratore esterno CNR-IRPI Torino



Legenda

- Elemento lapideo di dimensioni rilevanti
- Crollo o ribaltamento di elementi lapidei - zona di transito ed accumulo - incanalato
- Rock glacier
- coronamento e principali sistemi di frattura
- Trincea e frattura beante
- Ciglio di parete che insiste sul fondovalle
- limiti delle geometrie areali**
- limite certo
- limite incerto
- Crollo o ribaltamento di elementi lapidei/crollo in massa - zona di provenienza
- crollo o ribaltamento di elementi lapidei - zona di transito ed accumulo
- crollo in massa - zona di transito ed accumulo
- Aree soggette ad erosione e denudamento
- Fenomeni gravitativi rapidi dei depositi sciolti di copertura
- Fenomeni gravitativi di profondità moderata-lento oppure molto lento soggetto a forti accelerazioni
- Fenomeni gravitativi di profondità moderata - estremamente lento
- Fenomeni gravitativi profondi - estremamente lento

Distribuzione dei dissesti che interessano i versanti rocciosi del bacino della Maggia

