

Approccio multidisciplinare per la valutazione della pericolosità di frana: indagini geologico-tecniche, idrogeologiche, geochemiche e isotopiche per la determinazione degli apporti idrici sotterranei nella frana di Cassana in Val di Magra (Massa-Carrara, Italia)

Paolo Cortopassi¹, Giacomo D'Amato Avanzi², Mara Guidotti³, Chiara Marconi⁴, Piera Fanny Milano⁵, Mario Mussi⁶, Alberto Puccinelli⁷

¹Regione Toscana - Ufficio per la Tutela delle acque e del territorio di Massa-Carrara - paolo.cortopassi@mail.regione.toscana.it

²Università di Pisa - Dipartimento di Scienze della Terra - damato@dst.unipi.it

³Università di Pisa - Dipartimento di Scienze della Terra

⁴Università di Pisa - Dipartimento di Scienze della Terra

⁵Regione Toscana - Ufficio per la Tutela delle acque e del territorio di Massa-Carrara - fanny.milano@mail.regione.toscana.it

⁶CNR - Istituto di Geoscienze e Georisorse di Pisa - mussi@igg.cnr.it

⁷Università di Pisa - Dipartimento di Scienze della Terra - pucci@dst.unipi.it

Multidisciplinary approach in evaluating landslide hazard: lithological-technical, hydrogeological, geochemical and isotopic investigations for determining the underground water supply of the Cassana landslide in the Magra River Valley (Tuscany, Italy).

ABSTRACT: Cassana is placed in the Magra River Valley (Tuscany, Italy). A large and slow complex landslide involves the ancient village and causes severe damage and high risk. Many investigations were performed, aiming at gathering data and information and developing methodologies, in order to realize countermeasures and mitigate the risk. Geological and geomorphological investigations, subsurface exploration (core drillings, seismic refraction survey), geotechnical analysis, deformation and piezometer monitoring were carried out. Moreover, chemical and isotopic analyses on the underground waters were performed, aiming at identifying their intake areas and underground ways in the landslide bodies close to the village. The geochemical and isotopic investigations gave a meaningful contribution in reconstructing a geometric, kinematic and hydrogeological model of the Cassana landslide. This allowed the elaboration of a hypothetical outline of the underground water circulation and the individuation of some intake areas and preferential ways of the underground waters, greatly influencing the landslide and village instability. In conclusion, the geochemical and isotopic approach to the slope instability represents a possible and innovative application of the chemical-isotopic technique in investigating the landslide causes.

Key terms: Landslide, Geotechnics, Hydrogeology, Geochemistry, Isotope

Termini chiave: Frana, Geotecnica, Idrogeologia, Geochemica, Isotopi.

Riassunto

Il paese di Cassana in Val di Magra è coinvolto in un vasto e complesso movimento franoso di scorrimento e colamento, attivo e a cinematica lenta, che causa danni ingenti ed una situazione di rischio molto elevato. Sono qui illustrati i risultati di numerosi studi, volti ad acquisire dati e sviluppare metodologie d'indagine sui movimenti franosi ed a fornire i presupposti per un progetto di bonifica del pendio e di mitigazione del rischio. Oltre a indagini geologiche, geomorfologiche, geognostiche e geotecniche, sono state svolte analisi chimiche e isotopiche delle acque, allo scopo di ricostruire le aree di alimentazione e i percorsi idrici sotterranei nei movimenti franosi intorno al paese. Le indagini geochemiche e isotopiche hanno fornito un

contributo importante per la ricostruzione di un modello geologico, geometrico, cinematico e idrogeologico della frana di Cassana, consentendo di elaborare un'ipotesi di circolazione delle acque sotterranee, nonché di localizzare alcune aree di alimentazione e il tragitto preferenziale dei flussi idrici profondi, che influiscono in modo significativo sulla stabilità. Questo approccio, che integra esperienze multidisciplinari, rappresenta una possibile applicazione innovativa delle tecniche chimico-isotopiche allo studio delle frane.

1. Introduzione

Il paese di Cassana, frazione di Mulazzo (Val di Magra, prov. di Massa-Carrara), è coinvolto in un vasto e

complesso movimento franoso di scorrimento e colamento attivo e a cinematica lenta, che provoca danni consistenti ed una situazione di rischio molto elevato. La ricerca svolta, di tipo multidisciplinare, ha avuto come scopo lo studio delle frane e delle acque in esse circolanti, con particolare riguardo alla ricostruzione dei circuiti idrogeologici nella zona di Busatica-Cassana, per risalire poi alla valutazione dell'altezza piezometrica nel tempo in funzione delle piogge. Tale ricerca ha coinvolto competenze diverse. In particolare, Puccinelli, D'Amato Avanzi, Guidotti e Marconi hanno curato gli aspetti geologico-tecnici ed idrogeologici, sintetizzando ed armonizzando i dati; Cortopassi e Milano hanno seguito le indagini geofisiche, geotecniche, geomeccaniche e il monitoraggio del pendio con piezometri ed inclinometri; Mussi, Guidotti e Marconi hanno eseguito le operazioni di campagna e di laboratorio per la caratterizzazione chimica e isotopica della acque e definito il quadro idrogeochimico e di idrologia isotopica dell'area. Per ricostruire il modello geologico-tecnico del pendio e determinare la provenienza dei vari tipi di acqua presenti nel sottosuolo, sono state eseguite indagini geognostiche ed analisi chimiche ed isotopiche. In particolare, si è cercato di discriminare le acque di pioggia

infiltratesi direttamente nel corpo di frana da quelle infiltratesi in aree limitrofe, che circolando nel substrato vanno ad alimentare gli accumuli di frana attraverso circuiti idrogeologici attigui e più profondi. In tal modo l'innalzamento del livello di falda non sarebbe più dovuto soltanto alle piogge locali, ma anche all'apporto di acque circolanti nel substrato. Il modello idrogeologico dell'area in frana non dovrà dunque prendere in considerazione solo l'acqua d'infiltrazione superficiale, ma dovrà tenere conto anche delle connessioni con acquiferi appartenenti ad altri sistemi idrogeologici.

2. Inquadramento geologico

La complessità geologica del territorio indagato è legata alla presenza di tre unità tettoniche appartenenti a domini paleogeografici diversi e strutturate sia durante la fase tettonica ligure (Cretaceo superiore-Eocene), sia durante la fase tettonica toscana (Oligocene superiore-Miocene inferiore), sia durante la successiva fase distensiva (post Miocene inferiore). Le tre unità, elencate in ordine di sovrapposizione geometrica dall'alto verso il basso sono (Fig. 1):

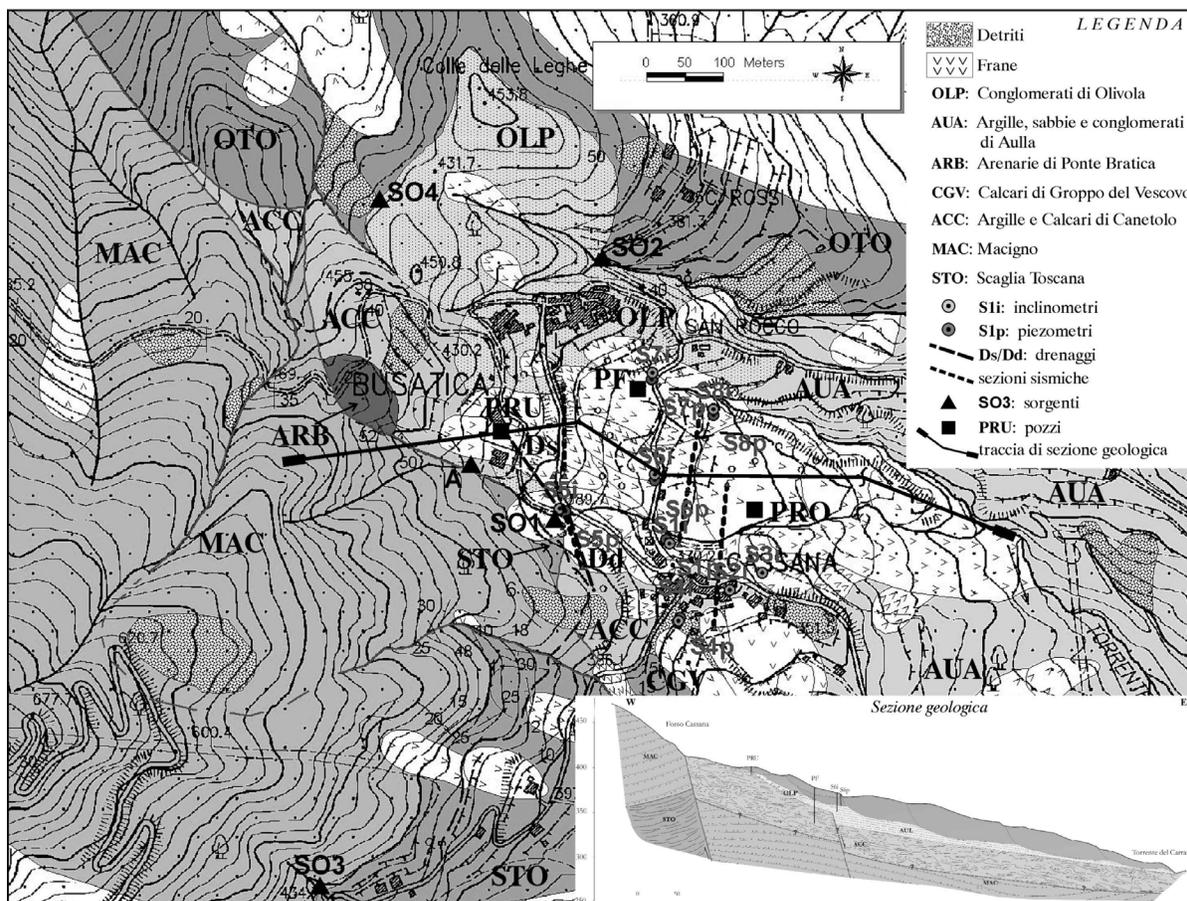


Fig. 1 - Carta geologica dell'area di Cassana-Busatica e sezione geologica
Geological map and cross-section of the Cassana-Busatica area

- Unità Ottone (Dominio Ligure Esterno), costituita dalla formazione del Flysch di Ottone.
- Unità Canetolo (Dominio Subligure), costituita dalle formazioni delle Argille e calcari, dai Calcari di Groppo del Vescovo e dalle Arenarie di Ponte Bratica.
- Falda Toscana (Dominio Toscano), costituita dalle formazioni del Macigno e della Scaglia toscana.

Discordanti su queste unità giacciono i depositi fluvio-lacustri, che si sono depositi durante la fase distensiva, che dal Rusciniense superiore dette origine alla depressione tettonica della Val di Magra, in cui s'instaurarono bacini continentali. Vi sono infine i depositi quaternari prodotti dall'azione della gravità e delle acque correnti superficiali (depositi di versante, frane, depositi alluvionali).

Come illustrato nella sezione geologica (Fig. 1), l'impilamento delle varie unità tettoniche si è prodotto da ovest verso est; la disposizione geometrica vede le unità più esterne (Falda Toscana) alla base, sormontate da unità più interne (Unità Canetolo e Unità Ottone). La loro definitiva strutturazione, riferibile all'ultima fase distensiva, ha contribuito infine a creare le condizioni favorevoli perché sui versanti intorno a Cassana si verificassero i fenomeni d'instabilità. Le formazioni affioranti nell'area di studio sono descritte in successione stratigrafica, procedendo dall'unità tettonica più elevata (Puccinelli et alii, 2003a, 2003b cum bibl.).

2.1 Unità Ottone

Flysch di Ottone: la formazione è caratterizzata da torbiditi calcaree e calcareo-marnose con strati di spessore variabile (da 20-30 cm a 2-3 m), colore generalmente biancastro, base spesso gradata (calcarenitica o litoarenitica) e frattura scheggiata; sono presenti intercalazioni sottili (da 1-3 a 20 cm) di marne, argilliti e siltiti. Lo spessore della formazione regionalmente è assai variabile (da 50 a 300 m), a causa delle frequenti laminazioni tettoniche, mentre localmente non supera i 150 m. Età: Campaniano inferiore-Maastrichtiano inferiore.

2.2 Unità Canetolo

Argille e calcari di Canetolo: questa formazione, sovrascorsa sul Macigno e la Scaglia toscana, si presenta spesso molto scompaginata ed alterata; è costituita da argilliti grigio-scure o nere, fogliettate e spesso con superfici di sfaldamento lucide, a luoghi intercalate da calcari lutitici, talvolta silicei, in strati con spessore da 10 a 40 cm, oppure da brecciole organogene a macroforaminiferi. Lo spessore apparente della formazione è stimato regionalmente in 100-200 m, localmente intorno a 50-100 m. Età: Paleocene superiore-Eocene medio.

Calcari di Groppo del Vescovo: la formazione è costituita da torbiditi calcaree e calcareo-marnose a base calcarenitica ricca di bioclasti con strati da medi a spessi (20-80 cm). Lo spessore, che in aree limitrofe supera i 100 m, qui è limitato a 20 m. Età: Eocene inferiore-medio.

Arenarie di Ponte Bratica: la formazione comprende torbiditi arenaceo-pelitiche, dove si alternano strati sottili

(da 5 a 20 cm) di arenarie fini micacee e strati sottili siltitici, più raramente argillitici. Nella zona di studio è presente la porzione basale, comprendente torbiditi arenaceo-pelitiche. Lo spessore non supera i 20 m, mentre regionalmente può raggiungere i 200 m. Età: Oligocene-Miocene inferiore.

2.3 Falda Toscana

Scaglia toscana: la formazione, normalmente è costituita da più litofacies; nell'area di Cassana è presente solo quella sommitale, comprendente argilliti, argilliti silicee, argilliti marnose e marne siltose a frattura prevalentemente aghiforme o scagliosa. Il colore è variabile tra il rosso, il verde e il giallo scuro. Lo spessore affiorante localmente non supera i 100 m, mentre regionalmente raggiunge i 300 m. Età: Aptiano inferiore-Oligocene superiore.

Macigno: la formazione comprende torbiditi prevalentemente arenacee alla base, arenaceo-pelitiche nella parte medio-alta e pelitico-arenacee nella parte alta. Nella zona di studio affiora la porzione inferiore, comprendente arenarie grigie, ocra all'alterazione, da medie a grossolane, con strati spessi (1-5 m), organizzati sovente in corpi canalizzati a geometria lenticolare. La gradazione è scarsa o assente. Lo spessore supera regionalmente i 2.000 m, mentre nella zona studiata è di circa 400 m. Età: Oligocene superiore-Miocene inferiore.

2.4 Depositi fluvio-lacustri Auct. dei bacini di Aulla-Olivola-Pontremoli

Argille, sabbie conglomerati di Aulla: la formazione regionalmente comprende una litofacies argilloso-sabbiosa ed una sabbioso-conglomeratica, con frequenti e molto estese intercalazioni di corpi conglomeratici in matrice sabbioso-limosa. Nella zona di studio è presente la litofacies argilloso-sabbiosa, costituita da sabbie, sabbie siltose e argille grigio-azzurre, spesso lignitifere e con impronte di foglie e molluschi. A varie altezze stratigrafiche sono presenti livelli di conglomerati polimititici matrice-sostenuti. Lo spessore è stimabile in oltre 50 m. Età: Rusciniense superiore-Villafranchiano inferiore.

Conglomerati di Olivola: la formazione è costituita da conglomerati polimititici, con prevalenza di ciottoli di arenaria Macigno, eterometrici, clasto-sostenuti e con un buon grado di cementazione. Lo spessore regionalmente si aggira intorno ai 150 m, localmente intorno ai 50 m. Età: Villafranchiano inferiore-Villafranchiano superiore.

3. Inquadramento geomorfologico

L'area di studio è situata tra gli abitati di Cassana, Busatica e Castagnetoli, a quote comprese tra 700 e 200 m, decrescenti verso est. I corsi d'acqua hanno in prevalenza una direzione est-ovest, con drenaggio più sviluppato verso una destinazione orientale. Essi, a carattere torrentizio, esercitano una maggiore azione erosiva nelle formazioni meno competenti (Argille e calcari e Scaglia toscana) e in misura minore in quelle più competenti (Flysch di Ottone,

Calcari di Groppo del Vescovo, Arenarie di Ponte Bratica, Macigno). La diversa risposta dei litotipi all'erosione determina anche una diversa configurazione del paesaggio: le arenarie del Macigno e i calcari marnosi del Flysch di Ottone danno versanti più ripidi; i depositi argilloso-sabbiosi (Argille, sabbie e conglomerati di Aulla) e conglomeratici (Conglomerati di Olivola) e le rocce argillitiche dell'Unità Canetolo (Argille e calcari) e della Falda Toscana (Scaglia toscana) mostrano forme meno acclivi e più dolci.

3.1 Le frane

Le frane sono assai diffuse nelle rocce meno competenti e s'individuano a est degli abitati di Cassana e Busatica, a valle del contatto per sovrascorrimento tettonico tra il Macigno e le Argille e calcari (Fig. 1). Questa zona è caratterizzata dalla venuta a giorno di acque sotterranee in prossimità del contatto seminascolato tra la Scaglia toscana (impermeabile) e le arenarie del Macigno (con permeabilità limitata per fratturazione).

I fenomeni franosi sono riferibili generalmente a movimenti di tipo rotazionale, caratterizzati da una scarpata principale più acclive e da un accumulo che nella zona sommitale si presenta subpianeggiante o in contropendenza (testata della frana); nella zona di testata possono esserci depressioni strette e allungate, spesso colmate da detrito, con locali ristagni d'acqua e vegetazione palustre. Al piede dell'accumulo sono talvolta riconoscibili rigonfiamenti, crepe e rotture radiali.

Lo scompaginamento del materiale che segue i primi movimenti favorisce l'evoluzione dello scorrimento verso il colamento; pertanto sono presenti anche movimenti di tipo complesso (scorrimento-colata), mentre quasi tutte le frane mostrano una distribuzione di attività sia di tipo retrogressivo che avanzante (WP/WPLI, 1993; Canuti & Esu, 1995; Cruden & Varnes, 1996). Lo stato di attività è tipico di fenomeni pressoché continui o intermittenti, con frequenti riattivazioni, generalmente a carattere stagionale. Ciò è testimoniato da numerosi indizi significativi, come lesioni agli edifici, fratture, cedimenti del manto stradale, alberi inclinati, improvvisa comparsa o scomparsa d'acqua in superficie.

Anche le letture nei tubi inclinometrici (S1, S5 e S6, febbraio-luglio 2004) hanno confermato lo stato di attività dei fenomeni gravitativi; le letture di S4, S7 e S8 hanno dato deformazioni insignificanti o affette da errori; quelle di S2 e S3 hanno registrato deformazioni riferibili ad un incipiente movimento gravitativo. In particolare: S1 spostamento di 3 mm alla profondità di 18 m; S2 spostamento di 2 mm alla profondità di 10 m; S3 spostamento di 6 mm alla profondità di 12 m; S5 spostamento di 2 mm alla profondità di 8 m; S6 spostamento di 6 mm alla profondità di 13,5 m. Occorre inoltre aggiungere che i sondaggi S1, S5 e S6 hanno registrato spostamenti in corrispondenza della superficie basale di scorrimento; che S2 e S3 mettono in evidenza l'incipienza di un movimento franoso di prima generazione nella formazione delle Argille, sabbie e conglomerati di

Aulla. È pure evidente un movimento più superficiale (3-4 metri dal p.c.), probabilmente responsabile del rilevante quadro fessurativo in molte abitazioni di Cassana.

4. Caratteri idrogeologici

Le caratteristiche idrogeologiche dell'area di studio sono fortemente condizionate dall'assetto strutturale e dalla permeabilità delle formazioni rocciose, dei depositi fluvio-lacustri e delle coperture. Facendo riferimento alla sezione geologica (Fig. 1) lungo il versante in frana tra Busatica e Cassana, si può osservare che la parte alta del pendio è compresa nelle arenarie del Macigno, con permeabilità secondaria medio-bassa e che esso è limitato inferiormente da un battente impermeabile appartenente alle argilliti della Scaglia toscana e lateralmente da un'altra barriera impermeabile appartenente alle argilliti della formazione delle Argille e calcari. Le acque circolanti nel Macigno in prossimità della faglia diretta vengono a giorno alla sorgente A con portata di circa 10 l/min e alla sorgente SO1 con portata minore di 0,5 l/min; sono presenti inoltre emergenze diffuse, che vanno ad alimentare direttamente i corpi di frana.

Una situazione analoga può verificarsi al contatto tra il Flysch di Ottone e le Argille e calcari nella zona di Busatica, dove le acque circolanti nei calcari marnosi sono costrette ad emergere per la presenza di un barriera impermeabile sottostante e laterale, formata da argilliti; l'acqua può venire a giorno (Sorgente Lavatoio, con portata di circa 0,5 l/min) oppure andare ad infiltrarsi direttamente nei Conglomerati di Olivola e da questi passare nei corpi di frana. Viste le condizioni di alterazione e di estremo scompaginamento tettonico, le argilliti della formazione delle Argille e calcari potrebbero essere sede di un acquifero di modesta importanza e di limitata circolazione, alimentato direttamente dal Macigno. La parte media del pendio è compresa nei Conglomerati di Olivola, con permeabilità primaria elevata; quella medio-bassa nelle Argille, sabbie e conglomerati di Aulla a permeabilità bassa. In base alle misure effettuate nei piezometri a tubo aperto S1, S4, S5, S6, S7, S8 e nel pozzo Fusi tra dicembre 2003 e agosto 2004 (Fig. 2), si è constatato che:

- il piezometro S1 non presenta sensibili variazioni di livello nel periodo più secco. Ciò si potrebbe spiegare ammettendo che nel foro giungano acque provenienti dal Macigno. Le più marcate variazioni registrate nel dicembre 2003, quando il pozzo con caratteri di artesianità di tipo fluente ha avuto una diminuzione di livello di oltre 1 m, sono legate probabilmente al riequilibrio del livello piezometrico della falda freatica e di quello della falda confinata in un orizzonte di sabbie posto tra 12 e 13 m di profondità;
- il piezometro S4, nella stessa condizione strutturale del pozzo S1, non presenta significative variazioni di livello nei periodi meno piovosi;
- nei piezometri S6 e S7, e S5 a partire dal mese di giugno, si ha una progressiva e lenta diminuzione del livello

di falda a causa della riduzione di piovosità nel periodo estivo (Fig. 3); la contenuta diminuzione della piezometrica (circa 1 m) è dovuta all'apporto di acqua che viene a giorno in prossimità del contatto Macigno-Scaglia toscana;

- nel pozzo Fusi si ha una maggiore diminuzione del livello a partire da giugno, poiché esso trae alimentazione dall'acquifero contenuto nella parte più calcarea della

formazione delle Argille e calcari, che, avendo una modesta area di alimentazione, risente in modo più marcato delle variazioni pluviometriche;

- il piezometro S8 presenta marcate variazioni del livello piezometrico; ciò è dovuto sia alla diminuite portate del vicino torrente Carrara, in connessione idraulica con la falda, sia al modesto contributo delle acque profonde.

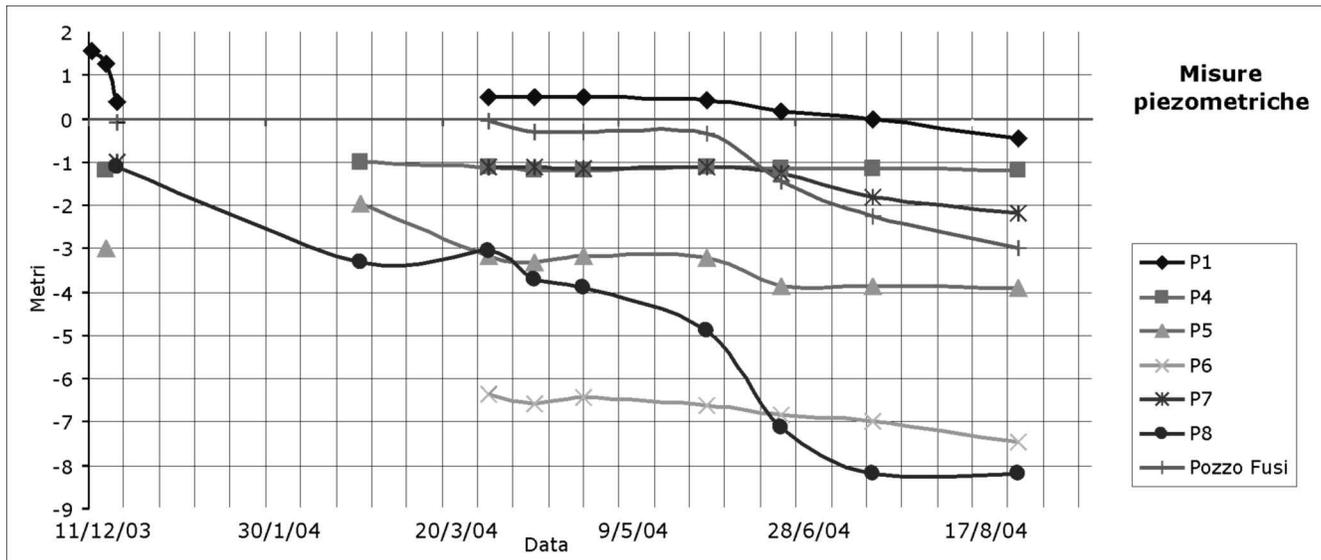


Fig. 2 - RegISTRAZIONI piezometriche del periodo dicembre 2003 - agosto 2004
Piezometer records of the December 2003 - August 2004 period.

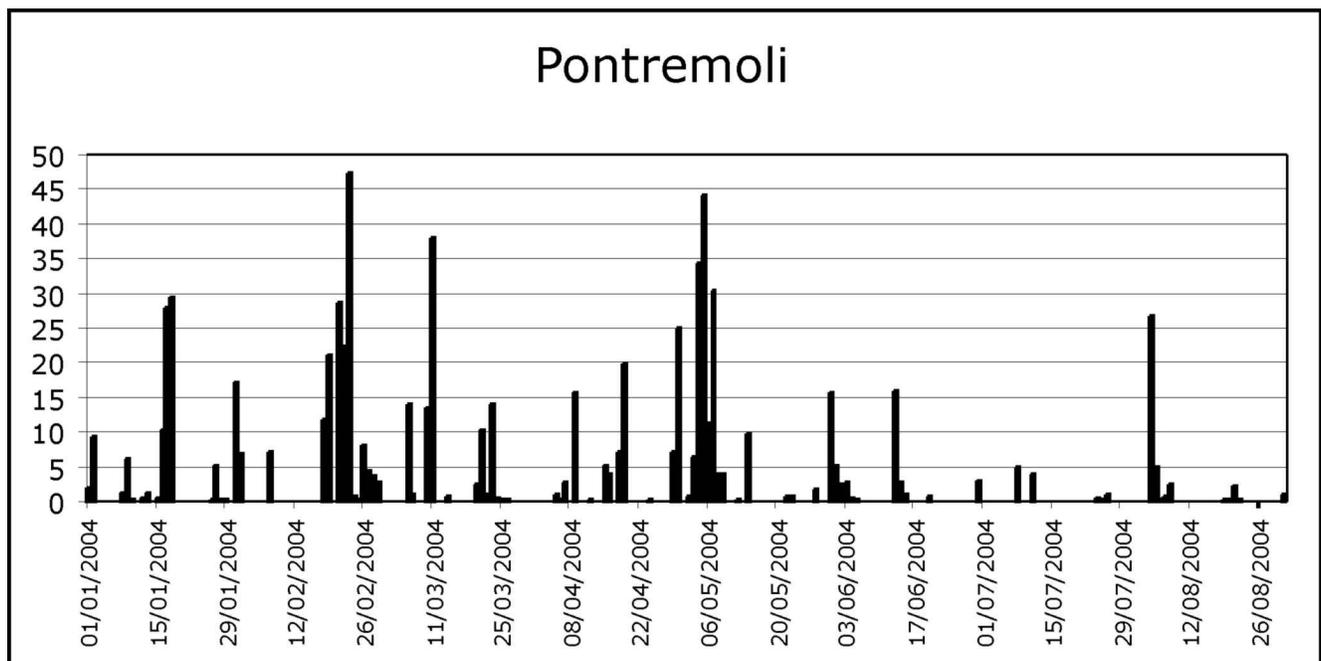


Fig. 3 - RegISTRAZIONI pluviometriche del periodo dicembre 2003 - agosto 2004 alla stazione di Pontremoli
Rain gauge records of the December 2003 - August 2004 period.

5. Indagini geognostiche

Le indagini geognostiche utilizzate in questo studio (sismica a rifrazione e perforazioni a carotaggio continuo) non erano state programmate a integrazione di studi geologici di dettaglio, ma sulla base di un censimento frane redatto dall'Autorità di Bacino Interregionale del Fiume Magra. Pertanto non tutte le prospezioni si sono rivelate utilizzabili ai fini del lavoro; le ragioni sono da ricercare prevalentemente nella loro scarsa profondità, in certe situazioni del tutto insufficiente ad individuare le superfici di scorrimento ed a caratterizzare la struttura geologica del substrato.

5.1 Sondaggi meccanici

Sono state eseguite le seguenti perforazioni:

- 8 sondaggi a carotaggio continuo, con prelievo di campioni indisturbati e rimaneggiati, spinti a profondità variabili tra 12 e 22,5 m per un totale di 123,80 m. Questi sondaggi sono stati strumentati con tubi inclinometrici;
- 6 sondaggi a distruzione di nucleo, spinti a profondità variabili tra 9 e 18 m; su tre di essi sono state eseguite prove di permeabilità a carico variabile. Questi sondaggi sono stati strumentati con piezometri a tubo aperto.

5.1.1 Stratigrafia dei sondaggi

I logs dei sondaggi a carotaggio continuo sono stati reinterpretati e riassunti di seguito:

Sondaggio 1: da 0 a 3 m: terreno vegetale; da 3 a 3,50 m: accumulo di frana superficiale; da 3,50 a 18 m: accumulo di frana; da 18 a 22 m: Argille, sabbie e conglomerati di Aulla.

Sondaggio 2: da 0 a 1,10 m: terreno di riporto; da 1,10 a 4 m: parte superiore alterata delle Argille, sabbie e conglomerati di Aulla; da 4 a 13,30 m: Argille, sabbie e conglomerati di Aulla.

Sondaggio 3: da 0 a 0,80 m: terreno agrario; da 0,80 a 5,70 m: accumulo di frana superficiale; da 5,70 a 15 m: Argille, sabbie e conglomerati di Aulla.

Sondaggio 4: da 0 a 0,40 m: terreno di riporto; da 0,40 a 3 m: detrito; da 3 a 12 m: Argille, sabbie e conglomerati di Aulla.

Sondaggio 5: da 0 a 0,40 m: terreno agrario; da 0,40 a 7,30 m: accumulo di frana; da 7,30 a 13 m: Argille e calcari.

Sondaggio 6: da 0 a 0,30 m: terreno agrario; da 0,30 a 3,50 m: accumulo di frana; da 3,50 a 13,60 m: accumulo di frana; da 13,60 a 18 m: Argille, sabbie e conglomerati di Aulla.

Sondaggio 7: da 0 a 0,25 m: terreno agrario; da 0,25 a 4 m: accumulo di frana; da 4 a 10 m: intervallo riferibile ai Conglomerati di Olivola; da 13,60 a 18 m: Argille, sabbie e conglomerati di Aulla.

Sondaggio 8: da 0 a 0,50 m: terreno agrario; da 0,50 a 4 m: accumulo di frana; da 4 a 15 m: probabile accumulo di frana.

5.2 Prove di permeabilità in foro

Sono state eseguite delle prove di permeabilità a carico variabile: nel sondaggio S4, alla profondità compresa tra 2,50 e 3 m, è risultato un coefficiente di permeabilità $K = 10^{-6} - 10^{-7}$ m/s; nel tubo S7, alla profondità compresa tra 2,50 e 3 m, è stata riscontrato un coefficiente di permeabilità $K = 3,5 \times 10^{-5}$ m/s; nel sondaggio S8, alla profondità compresa tra 4 e 4,50 m, è risultato un coefficiente di permeabilità $K = 7,9 \times 10^{-6}$ m/s.

5.3 Indagini sismiche a rifrazione

Sono state eseguite 4 prospezioni sismiche, due di 120 m e due di 180 m, per una lunghezza totale di 600 m.

L'analisi delle velocità di propagazione delle onde P nei vari corpi geologici, ha portato all'individuazione di quattro sismostrati: il primo, con velocità P compresa tra 225 e 820 m/s e con spessore esiguo, è attribuibile a materiale di riporto o a terreno prevalentemente agrario; il secondo, con velocità P compresa tra 1.070 e 1.830 m/s e con spessore variabile da pochi metri a 18 m, può essere riferito ad un accumulo di frana; il terzo, con velocità P compresa tra 1.945 e 2.780 m/s e con spessore variabile da 10 a 15 m, è riferibile alle Argille, sabbie e conglomerati di Aulla, alterate e scompagnate; il quarto, con velocità P compresa tra 2.575 e oltre 3.400 m/s, può essere attribuito ad un substrato litoide appartenente alle Argille e calcari.

6. Indagini geochimiche e isotopiche

La ricostruzione di un modello geologico e idrogeologico dell'area di Cassana-Busatica, illustrato dalla carta e dalla sezione geologica (Fig. 1) ha fornito i presupposti per lo svolgimento di una serie di indagini geochimiche e isotopiche, nel periodo compreso tra dicembre 2003 e agosto 2004. Sono state effettuate misure in situ (temperatura, pH, conducibilità ed alcalinità), con prelievo di campioni d'acqua per analisi chimiche (Ca, Mg, Na, K, Cl, NO₃, SO₄, NH₄) ed isotopiche ($\delta^{18}\text{O}$) alle sorgenti, nei piezometri, nei pozzi privati e nelle trincee drenanti. Nel prelievo dei campioni d'acqua sono stati adottati alcuni accorgimenti, quali, per esempio, la scelta del periodo quanto più possibile lontano dalle precipitazioni e l'accortezza di non prelevare in pozzi dove fossero ancora presenti fluidi di circolazione utilizzati durante le perforazioni. I risultati delle analisi hanno permesso di distinguere differenti gruppi di acque, in base ai quali si è cercato d'individuare l'area di alimentazione e la relativa circolazione sotterranea.

6.1 Risultati e discussione dei dati isotopici

La caratterizzazione isotopica dell'area è stata effettuata individuando alcune sorgenti di piccola portata e con diverse quote di emergenza, per le quali è stata determinata su base geomorfologica la quota media di bacino e misurati i contenuti isotopici (Mussi et alii, 1998).

Le sorgenti individuate a questo scopo, ubicate a poche centinaia di metri a nord-ovest della zona interessata dai

movimenti franosi, sono Castagnetoli (SO4), Bagatella (SO5), Iara (SO6) e Ronchetto (SO7), che hanno permesso di costruire la retta di variazione del $\delta^{18}\text{O}$ con la quota. Per risalire alla quota media d'infiltrazione delle acque e per individuarne l'origine, sono stati prelevati per l'analisi isotopica campioni dalle sorgenti Castagno (SO1), Cassana (A) e Lavatoio (SO2), dai piezometri S1, S4, S5, S6, S7 e S8, dai pozzi Fusi (PF), romano (PRO) e Rubini (PRU) e da scavi dove era presente la falda superficiale (dreno destro - Dd, dreno sinistro - Ds, buca presso pozzo Fusi).

Sulla base dei dati relativi al $\delta^{18}\text{O}$, sono stati individuati quattro gruppi di acque con contenuti isotopici differenziati e in gran parte costanti nel tempo: il primo gruppo (S1, S4, SO1 e Ds) con $\delta^{18}\text{O}$ pari a - 6,0; il secondo (S8 e SO2) con $\delta^{18}\text{O}$ di - 6,1; il terzo (S5, PF e PRU) con $\delta^{18}\text{O}$ di - 6,2; il quarto (A, SO6 e SO7) con $\delta^{18}\text{O}$ - 6,4. Delle altre acque analizzate, dobbiamo ricordare che il Pozzo romano (PRO) e il Dreno destro (Dd), con contenuti variabili nel tempo (Longinelli & Selmo, 2003), e la buca presso il pozzo Fusi, in cui è presente acqua esclusivamente nei periodi piovosi, rappresentano punti d'acqua che hanno risentito direttamente delle piogge.

Dal grafico della Fig. 4, dove sono stati inseriti i dati isotopici riuniti in gruppi, sono state ricavate le quote medie d'infiltrazione. Non sempre si ottiene una perfetta relazione tra la quota d'infiltrazione delle acque dedotta dalla carta geologica e i valori ricavati dalle analisi isotopiche, per cui può risultare un'apparente incongruenza senza un'adeguata spiegazione.

- I piezometri S6 e S7 hanno valori di $\delta^{18}\text{O}$ pari a - 6,4 corrispondenti ad una quota d'infiltrazione media di circa 800-850 m. Tale quota risulta del tutto incompatibile con quella dei corpi di frana dove sono infissi i pozzi stessi (<400 m) e con quella media del versante (500 m circa), in

cui s'infiltrano le acque che poi ritornano a giorno nella zona di contatto Macigno-Scaglia toscana e che vanno successivamente a reimmettersi nei corpi di frana. Questa anomalia è dovuta ad prelievo di campioni d'acqua in sondaggi dove erano presenti ancora i residui dello spurgo fatto con acque dell'acquedotto alimentato dalla sorgente Cassana ($\delta^{18}\text{O}$ di - 6,5) che ha effettivamente una quota media di infiltrazione di circa 850 m. Questo è comunque indice di una zona con scarsa capacità di rinnovo delle acque.

- I pozzi Rubini (PRU) e Fusi (PF) e il piezometro S5 hanno valori di $\delta^{18}\text{O}$ pari a - 6,2 corrispondente ad una quota d'infiltrazione media di circa 650-700 m, indicativi di un significativo contributo di acque che si infiltrano negli affioramenti di Macigno e che vanno poi a circolare nelle Argille e calcari.

- Il piezometro S8 e la sorgente Lavatoio (SO2) hanno valori di $\delta^{18}\text{O}$ pari a - 6,1 corrispondente ad una quota d'infiltrazione media di circa 550-600 m. Queste quote presuppongono un contributo non trascurabile di acque infiltratesi nel Macigno e nei Conglomerati di Olivola. Si tratta quindi di circuiti che si alimentano al di fuori delle zone interessate dai movimenti franosi e che recapitano le acque in parte nella sorgente Lavatoio e in parte nei detriti di frana (S8).

- I piezometri S1 e S4, la sorgente Castagno (SO1) e il dreno sinistro (Ds) hanno valori di $\delta^{18}\text{O}$ costanti nel tempo, pari a - 6,0 corrispondenti ad una quota d'infiltrazione media di circa 500 m. I contenuti isotopici indicano quindi un contributo dominante da acque infiltratesi alle quote medio-basse del versante di Macigno che, oltre a emergere in corrispondenza del contatto Macigno-Scaglia toscana, vanno ad alimentare i corpi franosi per travaso. L'infiltrazione diretta di acqua piovana nelle zone a detrito è da considerarsi secondaria.

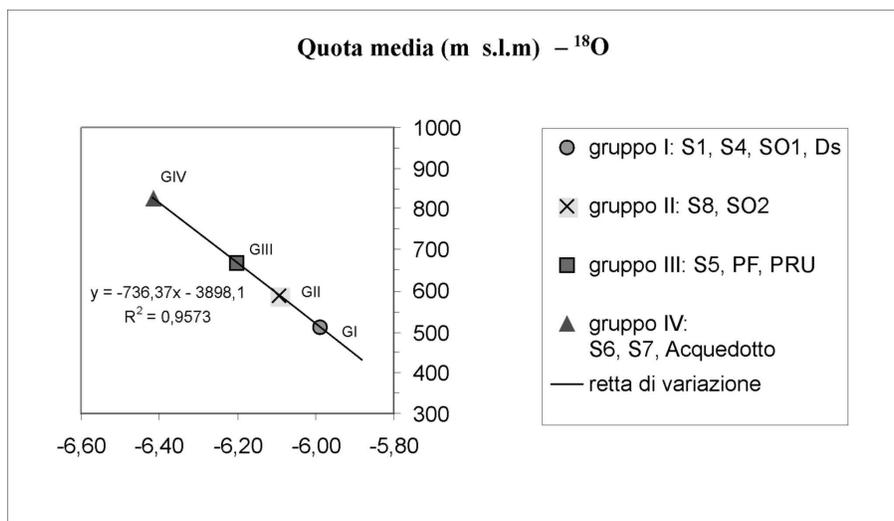


Fig. 4 - Grafico $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ - quota media d'infiltrazione stimata dei punti d'acqua considerati $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ vs. infiltration altitude for the considered water points

6.2 Risultati e discussione dei dati chimici

Il chimismo delle acque è strettamente legato ai minerali con cui vengono a contatto e con i quali tendono a raggiungere condizioni di equilibrio. Le composizioni chimiche delle acque studiate sono state riportate nel diagramma di Piper-Hill in Fig. 5; la maggior parte delle acque rientrano nel campo delle bicarbonato-alcaline, mentre le acque circolanti nei movimenti franosi hanno una tendenza ad evolvere verso le bicarbonato-sodiche. Le acque delle sorgenti Castagno (SO1) e Lavatoio (SO2) e del pozzo Fusi (PF) hanno una posizione nel diagramma e un grado di mineralizzazione compatibili, come evidenziato in studi condotti in altre aree dell'Appennino (Doveri, 2000; Marconi, 2004), rispettivamente con le formazioni del Macigno, dei Conglomerati di Olivola e delle Argille e calcari, con le quali vengono a contatto le acque profonde per gran parte del loro circuito fino alla captazione. La sorgente Castagno (SO1) e il dreno sinistro (Ds) presentano gradi di mineralizzazione confrontabili tra loro, a riprova di

un medesimo circuito idrico sotterraneo, che trova la sua emergenza in prossimità del contatto Macigno-Scaglia toscana. Il pozzo romano (PRO), che, come detto, è sensibilmente influenzato dalle precipitazioni, mostra gradi di mineralizzazione ampiamente variabili nei diversi prelievi. Le acque dei piezometri, ubicati nella zona interessata dai movimenti franosi, mostrano un arricchimento relativo in Na^+ e K^+ per una corrispondente diminuzione di Ca^{++} , mentre Mg^{++} mostra minori variazioni. Ciò è dovuto allo scambio ionico con gli orizzonti argillosi molto rimaneggiati della formazione delle Argille, sabbie e conglomerati di Aulla. Insieme allo scambio ionico si osserva un corrispondente aumento del grado di mineralizzazione a partire da S4 e S5, posti a quote più alte rispetto agli altri. Infine, in tutti i piezometri si è rilevata la presenza di ammoniaca, dovuta alla decomposizione di materiale organico presente nella formazione interessata dai movimenti franosi.

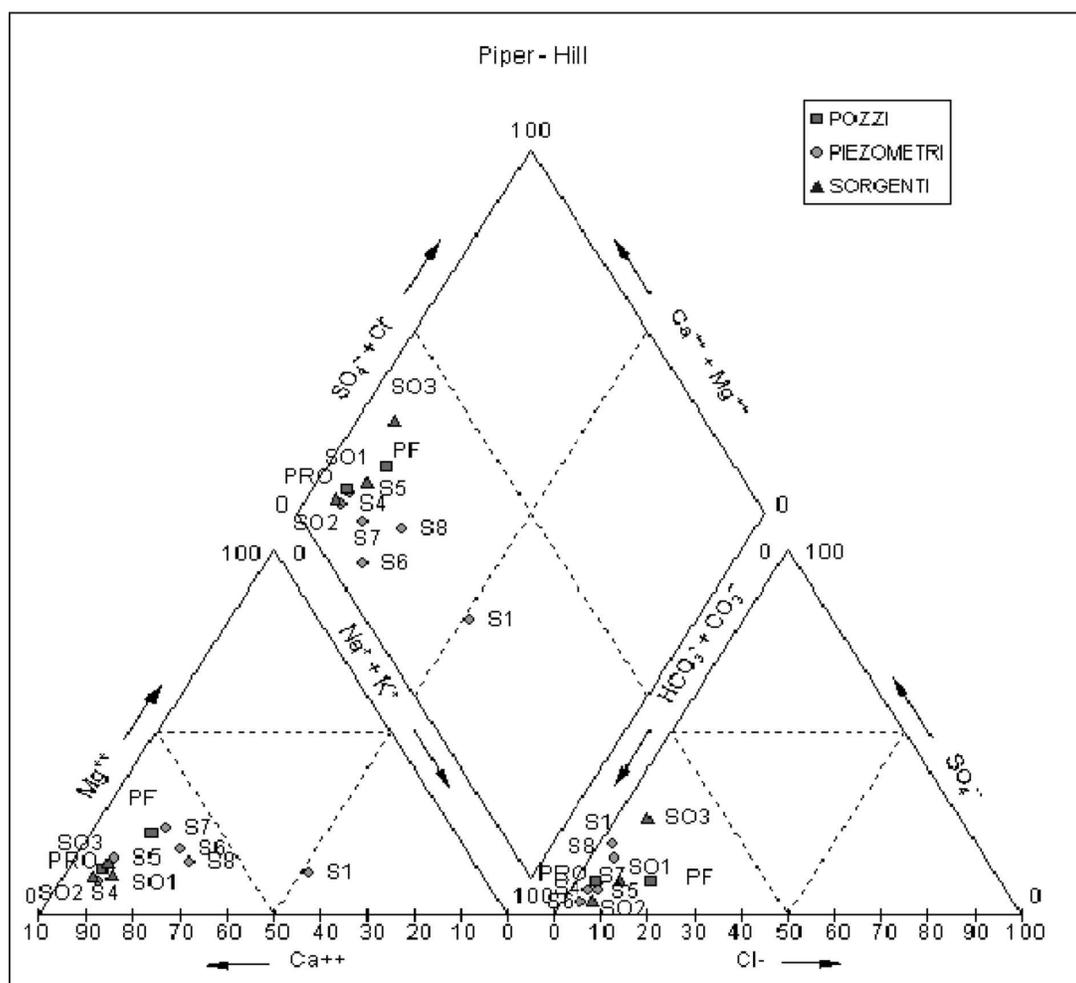


Fig. 5 - Diagramma di Piper-Hill delle acque campionate
Piper-Hill diagram of the sampled waters

7. Conclusioni

In questo studio, oltre alle indagini normalmente usate (rilevamento geologico e geomorfologico, sondaggi sismici e meccanici, monitoraggio con piezometri ed inclinometri dei pendii in frana), sono state utilizzate tecniche idrochimiche e di idrologia isotopica, per avere informazioni sulla qualità e sulla provenienza delle acque sotterranee presenti nei corpi di frana.

Le indagini idrochimiche e di idrologia isotopica hanno consentito di discriminare le acque di infiltrazione locale da quelle di origine profonda e appartenenti ad altri circuiti idrogeologici. In particolare è emerso che, nella zona interessata dai movimenti franosi, sono proprio le acque appartenenti ad altri circuiti idrogeologici quelle più diffusamente presenti, mentre sembra secondario il contributo da parte di acque legate all'infiltrazione locale delle precipitazioni.

I limiti al quadro idrochimico e di idrologia isotopica tracciato sono essenzialmente legati ai seguenti aspetti: la mancanza di indagini propedeutiche alla realizzazione dei sondaggi per definire il quadro conoscitivo iniziale; la carenza di informazioni per alcuni pozzi privati e per i dreni campionati; il periodo ristretto in cui si è realizzato lo studio, per cui altri sondaggi, oltre ad S6 ed S7, potrebbero essere stati influenzati dalle acque utilizzate per lo spurgo. Ne consegue la necessità di proseguire le indagini, per verificare i risultati ottenuti ed individuare e/o realizzare nuovi punti di prelievo per completare il quadro di conoscenze raggiunto.

Verosimilmente, una programmazione geognostica, fondata su un quadro geologico e geomorfologico più approfondito e mirata al completamento del modello geologico, avrebbe senz'altro fornito risultati più attendibili e ridotto i casi d'incongruità. Nonostante queste difficoltà, si può affermare che, nel caso studiato, l'approccio geochimico e isotopico ha fornito contributi significativi nella definizione e conferma del modello geologico, geometrico, cinematico e idrogeologico della frana di Cassana. Ciò ha permesso l'elaborazione di un'ipotesi di circolazione delle acque sotterranee, nonché di individuare alcune aree di alimentazione e il tragitto preferenziale delle acque sotterranee, che hanno un'influenza determinante sulle condizioni di stabilità.

Si può osservare inoltre che questo tipo di indagini potrà trovare applicazione anche nella determinazione delle soglie critiche d'innescio delle frane, la cui valutazione, strettamente legata a un modello attendibile d'infiltrazione delle acque nel sottosuolo, dovrà tener conto anche delle effettive aree di alimentazione delle acque presenti nei corpi di frana. Infatti, in vari casi l'origine di tali acque può essere principalmente legata a circuiti idrogeologici esterni, mentre le acque d'infiltrazione diretta dalle precipitazioni rivestono un ruolo secondario. In conclusione, l'approccio illustrato, che integra esperienze multidisciplinari, rappresenta una possibile applicazione innovativa delle tecniche chimico-isotopiche allo studio delle cause delle frane, alla definizione delle soglie pluviometriche critiche e alla valutazione della pericolosità di frana.

Bibliografia

- Canuti, P., Esu, F., 1995 - Glossario Internazionale per le frane. Riv. It. Geotec., 29 (2), 143-150.
- Cruden, D.M., Varnes, D.J., 1996. Landslides Types and Processes. In: "Landslides: Investigation and Mitigation". Transportation Research Board. National Academy of Sciences.
- Doveri, M., 2000. Studio idrogeochimico di sistemi acquiferi superficiali e profondi delle Alpi Apuane e della Valle del Serchio. Tesi di laurea ined., Univ. Pisa, 245 pp.
- Guidotti, M., 2004. Studio geologico e idrogeochimico della zona di Cassana, comune di Mulazzo (MS): relazione delle acque superficiali e profonde con i depositi di frana. Tesi di Laurea ined., Univ. Pisa, 242 pp.
- Longinelli, A., Selmo, E., 2003. Isotopic composition of precipitation in Italy: a first overall map. *Journal of Hydrology*, 270, 75-88.
- Marconi, C., 2004. Studio idrogeochimico ed isotopico delle sorgenti del settore meridionale del bacino del Fiume Magra. Tesi di Laurea ined., Univ. Pisa, 243 pp.
- Mussi, M., Leone, G., Nardi, I., 1998. Isotopic geochemistry of natural waters from the Alpi Apuane-Garfagnana area, Northern Tuscany, Italy. *Min. Petr. Acta*, 51, 163-178.
- Puccinelli, A., D'Amato Avanzi, G., Perilli, N., 2003a. Carta Geologica d'Italia a scala 1:50.000. Note illustrative del Foglio 233 Pontremoli. Servizio Geologico d'Italia (in stampa).
- Puccinelli, A., D'Amato Avanzi, G., Perilli, N., 2003b. Carta Geologica d'Italia a scala 1:50.000. Note Illustrative del Foglio 234 Fivizzano. Servizio Geologico d'Italia (in stampa).
- WP/WLI - Working Party for World Landslide Inventory, 1993. Multilingual Landslide Glossary. BiTech Publishers, Richmond, British Columbia, Canada, 59 pp.