

Carta della suscettibilità per instabilità di versante dell'area del foglio "Antrodoco" della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000.

Geological susceptibility map for slope instability of the Sheet n. 348 "Antrodoco", Geological Map of Italy 1:50,000 scale

CHIESSI V. (*), CONTE G.†(*), GUARINO P.M. (*), LUCARINI M. (*), MARTARELLI L. (*),
MONTI G.M. (*), TOTI S. (**), VITALE V. (*), VIZZINI G. (*), AMANTI M. (*)

RIASSUNTO - Il presente lavoro è nato nell'ambito del progetto CARG (CARTografia Geologica) che ha avuto origine alla fine degli anni '80 e prevede la realizzazione della cartografia geologica e geotematica alla scala 1:50.000 (AGATE M. *et alii*, 2010).

Tale progetto prevede un rilevamento dei dati geologici, che viene effettuato in scala 1:25.000 o in alcuni casi, anche al 10.000 ed è svolto in collaborazione con Regioni, Province Autonome, Università, CNR e altri enti di ricerca. Nell'attesa che diventi disponibile il foglio geologico n. 348 Antrodoco in scala 1:50.000 attualmente in corso di realizzazione si è deciso di realizzare la "Carta di suscettibilità geologica per instabilità dei versante" al fine di testare e valutare differenti metodologie per la redazione di linee guida. Nell'area del foglio è stata analizzata la suscettibilità ai fenomeni franosi definita come stima, quantitativa o qualitativa, della tipologia, del volume (o dell'area) nonché della distribuzione delle frane esistenti o che potrebbero verificarsi. Nel presente studio vengono esposti i risultati dell'approc-

cio statistico multivariato effettuato con due diversi modelli: l'analisi condizionale e l'analisi logistica per eventi rari. Nell'ambito della sperimentazione è stato applicato anche il metodo degli alberi decisionali.

Un capitolo a parte è rappresentato dai metodi deterministici, anche in questo caso sono state testate differenti procedure dal pendio infinito in condizioni stazionarie fino a metodi più evoluti che considerano la transitorietà del fenomeno.

Viene inoltre presentato, a titolo di esempio lo studio di due aree caratterizzate dalla presenza di frane di crollo, effettuato tramite la metodologia traiettografica.

Vengono proposti, infine, differenti metodi di classificazione delle mappe di suscettibilità al fine di verificare in che misura la scelta di uno o dell'altro criterio influisca sulla qualità dei risultati.

PAROLE CHIAVE: : Frana, suscettibilità da frana, analisi stabilità, statistica multivariata, Antrodoco

(*) Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia - ISPRA - Via V. Brancati, 48 - 00154 - Roma, Italia

(**) Istituto Nazionale di Statistica - ISTAT - Viale dell'Oceano Pacifico 171 - Roma, Italia

ABSTRACT - This paper was developed within the CARG Project (Geological mapping project in Italy) that originated in the late 80's and supports the realization of geological and geochemical mapping at 1: 50,000 scale (AAVV, 2010).

CARG Project field survey of geological data is made at 1: 25,000 scale or in some cases, even at 1: 10,000 scale and is done in collaboration with Local Authorities, Universities, National Research Council and other Scientific institutes.

Waiting for the completion of the geological survey at 1: 50,000 scale, it was decided to realize the "Map of geological hazard for slope instability" in the area of sheet n. 348 "Antrodoco" in order to test and evaluate different methods for the realization of guidelines.

In this paper the susceptibility to landslides occurrence, defined as an estimation, both quantitative and qualitative, of the distribution of existing or possible landslides .

In the present study we show the results of the statistical multivariate approach, performed using two different models: the conditional analysis and logistic analysis for rare events. As a further metodological approach we also applied method of decision trees.

In a separate chapter we show the results of the use of deterministic methods too; also in this case different procedures are tested, starting from the infinite slope in stationary conditions up to more sophisticated methods that take into account the transitory nature of the phenomenon. Finally two studies in areas characterized by the occurrence of rockfalls, carried out by means of the usual lumped mass methodology are shown. Different methods of classification of the susceptibility maps are proposed and compared, in order to check the choice of one or other criterion influences the quality of the results.

KEY WORDS: Landslide, landslide susceptibility, stability analysis, multivariate statistics, Antrodoco

Del presente lavoro sono in particolare da attribuirsi:

Cap. 1 – INTRODUZIONE – AMANTI M.

Cap. 2 - INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E GEOLOGICO CONTE G. e MARTARELLI L.

Par. 2.2 - SISMICITÀ DELL'AREA – LUCARINI M.

Cap. 3 - CARATTERISTICHE LITOLOGICHE TECNICHE – CHIESSI V., VIZZINI G., CENSI NERI P. e GUARINO P.M.

Cap. 4 - LINEAMENTI GEOMORFOLOGICI - GUARINO P.M.

Cap. 5 - LE FRANE - Guarino P.M.

Cap. 6. - ASPETTI CLIMATICI E PLUVIOMETRICI - CONTE G., MARTARELLI L. e MONTI G.M.

Cap. 7 - LA VALUTAZIONE DELLA PROPENSIONE AL DISSESTO: METODI STATISTICI - CHIESSI V., TOTI S. e VITALE V.

Cap. 8 - LA VALUTAZIONE DELLA PROPENSIONE AL DISSESTO: METODI DETERMINISTICI - CHIESSI V. e VITALE V.

Cap. 9 - CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE - CHIESSI V. e VITALE V.

1. - INTRODUZIONE

Il presente progetto è nato nell'ambito della legge sulla difesa del suolo 183/89 che individua nel bacino idrografico l'unità territoriale idonea per realizzare una azione organica di tutela del territorio e salvaguardia ambientale. A partire dalla legge 183/89 si affidano compiti di pianificazione e programmazione ad un ente, il cui territorio di competenza viene delimitato non su base politico-amministrativa, ma con criteri geomorfologici e ambientali. Tale approccio costituisce un tentativo concreto di superare le suddivisioni amministrative che ostacolavano la possibilità di affrontare i problemi legati al ciclo dell'acqua ed alla difesa del suolo unitariamente e ad una scala territoriale adeguata. Tra i vari criteri per la redazione dei piani di bacino (DPR 18/7/1995) vi è "l'individuazione di Situazioni a rischio idraulico, geologico e sismico". Successivamente, per effetto di alcune disposizioni di legge emanate tra il 1998 ed il 2000 in seguito ad eventi eccezionali (L. 267/1998, L. 226/1999, L. 365/2000) alle Autorità di Bacino è stato affidato il compito di predisporre 'Il Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico' (P.A.I.) che prevede la perimetrazione delle aree a rischio idrogeologico introducendo il concetto di rischio totale R definito come:

$$R = P \cdot V \cdot E$$

- Pericolosità (P): probabilità che un fenomeno avverso (Hazard) di una certa intensità si verifichi in un dato periodo di tempo, in una data area e per determinate cause d'innescio.

- Vulnerabilità (V): grado di perdita atteso su un dato elemento o gruppi di elementi a rischio derivante da un potenziale fenomeno distruttivo di una data intensità (espressa in una scala da 0, nessuna perdita, a 1 perdita totale).

- Elementi a rischio (E): popolazione, proprietà, attività economiche a rischio in una data area.

Il primo aspetto da valutare nell'ambito della strategia della prevenzione è quindi connesso alla valutazione della pericolosità geologica; ovvero alla individuazione della probabilità che uno specifico processo potenzialmente calamitoso si verifichi in una determinata area, in un determinato intervallo temporale e con una determinata intensità. È evidente che la valutazione della pericolosità geologica secondo l'accezione canonica e completa del termine, implica, dal punto di vista dell'applicazione a casi reali, una serie di problemi non trascurabili, a causa della molteplicità e dell'elevato grado di indeterminazione delle variabili in gioco.

In questa area è stata analizzata la suscettibilità ai

fenomeni franosi definita come stima, quantitativa o qualitativa, della tipologia, del volume (o dell'area) nonché della distribuzione delle frane esistenti o che potrebbero verificarsi. Sebbene ci si attenda che le frane accadano più frequentemente nelle aree più suscettibili, nell'analisi della suscettibilità il fattore tempo non è esplicitamente considerato.

La suscettibilità da frana include le frane che presentano la zona d'innescò all'interno dell'area, o quelle che potrebbero innescarsi all'esterno dell'area ma evolvere al di sopra o retrocedere all'interno della stessa (COROMINAS *et alii*, 2008).

Si è optato di operare ad una scala intermedia tra quella locale di dettaglio e quella territoriale e pertanto è stata adottata come scala di lavoro 1:50.000.

Si è scelta un'area della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 il cui rilevamento è in corso di realizzazione a cura del Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia - ISPRA.

L'area *test* utilizzata è quella del Foglio Geologico n. 348 "Antrodoco" caratterizzata dalla presenza di successioni sedimentarie che abbracciano paleoambienti che variano dal bacino alla piattaforma interna, con tutte le facies intermedie di passaggio, ed età dal Triassico superiore al Neogene.

I litotipi sedimentari registrano un'evoluzione tettonico-sedimentaria dei suoi bacini costituente un ciclo orogenetico completo.

L'area è caratterizzata da una orografia piuttosto accidentata, formata da crinali ad andamento meridiano con morfologie molto accentuate e quote che superano i 2000 m s.l.m.

Dal punto di vista sismico, l'area è caratterizzata da una elevata pericolosità, si sono verificati in passato eventi di elevata magnitudo registrati anche nei cataloghi storici.

È stato seguito un approccio di tipo comparativo, sono state applicate metodologie statistiche e deterministiche, confrontate ed analizzate allo scopo di mettere in luce aspetti negativi e punti di forza.

I dati di base utilizzati provengono da banche dati pubbliche e fruibili liberamente, le elaborazioni sono pertanto riproducibili da chiunque.

Il lavoro effettuato ha avuto le seguenti caratteristiche:

- *Analisi Bibliografica.* È stata effettuata una analisi critica preliminare delle metodologie impiegate per la valutazione della pericolosità per frana. Si è proceduto ad una vasta ricerca bibliografica volta alla definizione dello stato dell'arte relativamente alle tecniche usate per la determinazione della pericolosità connessa all'instabilità dei versanti. La ricerca è stata condotta prendendo in considerazione la produzione scientifica nazionale ed internazionale inerente il tema della pericolosità connessa

all'instabilità di versante, sia in termini teorici e metodologici, sia in termini applicativi a piccola scala e a grande scala.

- *Censimento dei fenomeni franosi.* Il censimento dei fenomeni franosi è stato condotto attraverso la revisione e l'aggiornamento del quadro conoscitivo pre-esistente. Sono stati effettuati un rilevamento di campagna, la foto-interpretazione e la verifica delle informazioni disponibili nelle banche dati. L'inventario dei dati è stato strutturato utilizzando la scheda frane IFFI di II livello e realizzando un database con GIS ad esso associato.

- *Carattere sperimentale attribuito allo studio.* Come già detto ciò ha consentito di valutare più approcci e di individuare le metodologie più consone. Si è cercato di seguire un filo conduttore che partisse da metodi generali statistici a quelli più specifici deterministici.

- *Ipotesi semplificative.* Data la complessità del sistema si è operata questa scelta, pur rimanendo in un'ottica di rigore scientifico, di introdurre alcune ipotesi semplificative in modo da poter impiegare procedure di individuazione della pericolosità facilmente applicabili al territorio;

- *Interdisciplinarietà del gruppo di lavoro.* Sono state coinvolte tutte le componenti interessate: il geologo innanzi tutto che contribuisce alla conoscenza dei processi geologici e delle loro interazioni con il territorio, l'ingegnere geotecnico, che affronta il problema delle implicazioni meccaniche, lo statistico, che affronta il problema spesso sottovalutato della gestione dei dati, l'informatico che formalizza il tutto entro un modello concettuale per la progettazione e sviluppo di un Sistema Informativo Territoriale integrato.

- *Utilizzo di dati open source.* È stato utilizzato un Modello Digitale del Terreno a maglia 20 m proveniente dall'IGMI da cui sono state derivate le variabili morfometriche, topografiche ed idrologiche ed altri dati di libero accesso.

- *Utilizzo di strumenti informatici.* La strutturazione e gestione delle informazioni di base si è avvalsa delle funzionalità consentite dai Sistemi Informativi Geografici e sviluppando specifiche interfacce per l'ingegnerizzazione della procedura.

- *Elaborati cartografici e note illustrative.* Si è cercato di predisporre un prodotto cartografico che pur derivando da un approccio scientifico rigoroso sia di facile lettura, impiegando legende semplificate ed avendo come elementi a cornice diversi cartogrammi, schemi e tabelle di supporto all'interpretazione dell'elaborato tematico. Nelle note illustrative sono stati analizzati tutti gli aspetti teorici e pratici e discussi i risultati al fine di fornire utili indicazioni a coloro che dovessero effettuare una analisi di pericolosità

2. - INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E GEOLOGICO

2.1. - SGUARDO GEOLOGICO D'INSIEME

Il territorio ricadente nel Foglio Antrodoco è interessato da quattro principali sistemi orografici ai quali corrispondono altrettante unità litostutturali: lungo il versante occidentale del corso del fiume Velino decorre il bordo orientale dei Monti Sibillini, caratterizzati dalle successioni calcareo marnose mesozoico-paleogeniche del dominio umbro-sabino (Unità dei Monti Sibillini); nella parte centro-meridionale si erge la dorsale di M. Giano-M. Cagno-M. Gabbia alla quale, nel contesto del foglio, può essere attribuito il rango di unità indipendente, con una porzione riferibile alla *facies* Laziale-Abruzzese ed un'altra alla *facies* di transizione; ad E, lungo il margine nord-occidentale dell'articolato sistema orografico del Gran Sasso (Unità strutturale del Gran Sasso-Città Reale), si sviluppa da SO a NE la dorsale carbonatica di M. Marine-C.le Grande, bordata dalla valle del fiume Aterno e caratterizzata in affioramento dalla successione mesozoico-paleogenica di *facies* di transizione. Il quarto settore occupa la porzione nord orientale del foglio, a nord degli abitati di Borbona, Montereale e Capitignano su di una vasta area dove affiorano formazioni marnose paleogeniche e marnoso-arenacee del Miocene superiore (Unità di Acquasanta-M. dei Fiori).

L'analisi delle strutture tettoniche di questo settore dell'Appennino ha portato, nel corso degli anni, a definire un modello interpretativo dell'evoluzione strutturale alquanto complesso di cui viene riportata di seguito solo una breve sintesi.

Alla base delle successioni carbonatiche presenti nell'area del foglio troviamo formazioni calcareo dolomitiche del Trias superiore-Giurassico medio riferibili ad un ambiente di piattaforma carbonatica attiva che si estendeva in altri settori appenninici. In seguito, la piattaforma viene interessata da un progressivo smembramento dovuto a fasi tettoniche distensive con il conseguente instaurarsi di ambienti di margine esterno-scarpata prossimale e di bacino. Sul versante dei Monti Sibillini i termini mesozoici delle successioni presentano caratteri affini a quelli della tipica *facies* umbro-sabina con litotipi variabili dai calcari, ai calcari selciferi, ai diaspri fino alle marne, mentre le omologhe formazioni della dorsale di M. Marine-C.le Grande e di parte dei rilievi posti in posizione intermedia tra i due sistemi orografici, a Sud del foglio, presentano carattere maggiormente detritico. Restano quindi attive, almeno fino al Cretacico medio, solo alcune porzioni della originaria piattaforma organogena, nella zona compresa tra M. Gabbia, Piana della Cascina e Cagnano Amiter-

no. In tale contesto prosegue l'accrescimento dell'imponente edificio carbonatico osservabile in questa parte di dorsale il cui spessore supera ampiamente il migliaio di metri. Nel Cretacico superiore-Paleocene tale processo si interrompe e quindi anche in questo settore si impostano condizioni di sedimentazione calcareo-detritico marnosa.

Nell'Eocene-Oligocene, con il progressivo anegamento degli alti strutturali si delinea su tutta l'area un ambiente di bacino condizionato da apporti clastici, soprattutto nel settore centrale ed orientale del foglio (Formazione della Scaglia Cinearea detritica). Tale situazione, in linea di massima, perdura nel corso del Tortoniano (Marne con Cerrognana, ovvero marne con torbiditi calcaree e Marne ad Orbuline). Nel Miocene medio-superiore, con l'insorgere di intensi processi tettonici legati alla fase compressiva dell'orogenesi appenninica NE vergente responsabile dello scollamento e dell'accavallamento di ampi settori crostali, sopravviene una sedimentazione torbiditica sinorogena in ambiente di avanfossa. I litotipi associati a tale processo sono tipicamente silicoclastici e si presentano in alternanze di peliti, arenarie e conglomerati con geometrie tabulari e lenticolari.

Le principali unità litostutturali citate (fig. 1) sono tra loro separate da importanti discontinuità tettoniche quali la linea di Olevano-Antrodoco che rappresenta l'involuppo di un sistema di *thrust* con sovrapposizione delle unità umbro-sabine su quelle laziali-abruzzesi delle quali M. Giano-M. Cagno-M. Gabbia rappresenta la porzione affiorante nel foglio. A N e a NE di quest'ultima unità è presente un fronte di sovrascorrimento (*thrust* di M. Gabbia) sull'unità strutturale del Gran Sasso-Città Reale.

La dorsale di M. Marine-C.le Grande è in probabile contatto tettonico con i terreni dell'Unità di Acquasanta-M. dei Fiori, mascherato dalle coperture quaternarie.

Nel corso del Pliocene e nel Pleistocene ha avuto inizio un complesso processo evolutivo geomorfologico e sedimentario condizionato dalla tettonica. Quest'ultima ha generato sistemi di faglie di orientazione appenninica interrotte da faglie di trasferimento a componente trascorrente. Si sono quindi formate depressioni tettoniche come la piana di Montereale, nel Quaternario sede di un bacino lacustre, o lungo l'alto corso dell'Aterno, anch'esso interessato da sedimenti fluvio-lacustri. Questo bacino viene interpretato come un *semigraben* bordato, sul versante sinistro, dalla faglia di Monte Marine nel settore compreso tra la frazione di Marana fino a Pizzoli e oltre, verso SE.

All'interno dei rilievi si sono delineate conche e spianate lungo l'asse principale delle dorsali come nella Piana delle Cascine presso Cagnano. Queste

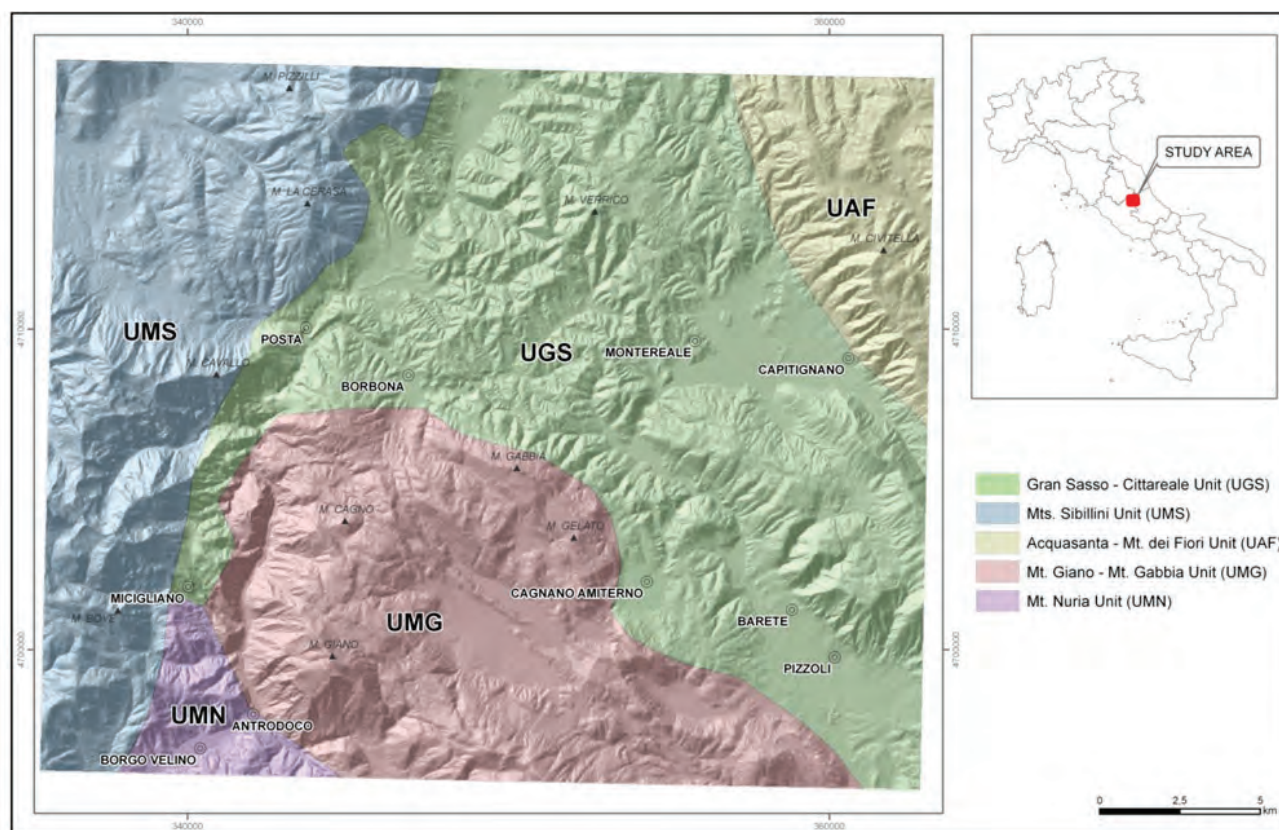


Fig. 1 – Inquadramento geologico del Foglio 348 “Antrodoco”. Legenda: 1) Unità Gran Sasso-Cittareale (UGS); 2) Unità dei Monti Sibillini (UMS); 3) Unità dell’Acquasanta e della Montagna dei Fiori (UAF); 4) Unità di M. Giano- M. Gabbia (UMG); 5) Unità di M. Nuria (UMN).

-Geological Sketch of “348” Antrodoco Sheet. Legend: 1) Gran Sasso - Cittareale Unit (UGS); 2) Sibillini Unit Mts.(UMS); 3) Acquasanta - dei Fiori Unit Mt.(UAF); 4) Mt. Giano - Mt Gabbia Unit (UMG); Mt. Nuria Unit (UMN).

ultime sono state condizionate anche dai processi carsici impostati lungo le discontinuità tettoniche nei litotipi maggiormente carbonatici. I depositi continentali quaternari sono caratterizzati principalmente da terreni fluviolacustri di colmamento delle depressioni tettoniche della stretta valle dell’Aterno, presso gli abitati di Barete e di Pizzoli e della piana di Montereale; da depositi di conoide, presenti soprattutto alla base dei rilievi sovrastanti i due citati centri abitati; da depositi di versante e da modesti depositi glaciali che interessano principalmente il settore dei Monti Sibillini. I maggiori accumuli di terreni residuali si localizzano nelle conche intermontane dove si presentano spesso frammisti a materiali di genesi differente.

2.2. - SISMICITÀ DELL’AREA

In base alla Zonazione Sismogenetica denominata ZS9 (MELETTI C. & VALENSISE G., 2004), l’area oggetto di studio ricade all’interno della zona sismogenetica “923” (terremoti di elevata magnitudo), che comprende settori dell’Appennino centrale caratterizzati da maggiore rilascio di energia e da importanti faglie di tipo distensivo

cui corrispondono le più estese sorgenti sismogenetiche che generalmente provocano terremoti con magnitudo superiore a 6 ed intensità epicentrale maggiore del IX grado della scala MCS. Tali sorgenti hanno in genere espressioni superficiali che consentono la caratterizzazione e la quantificazione degli aspetti cinematici mediante i tradizionali approcci geomorfologici e paleosismologici. La quasi totalità dei comuni ricadenti all’interno del Foglio appartiene dunque alla zona sismica 1.

Le principali caratteristiche di questa zona sismogenetica sono una profondità media compresa tra 8 e 12 km, un meccanismo di fagliazione prevalente normale, nei terremoti di maggiore energia, normale, consistente con il modello sismotettonico di riferimento (MELETTI *et alii*, 2008), ed una magnitudo massima attesa pari a 7.00 da CPTI04, con periodo di ritorno di circa 700 anni; 6.7 su basi tettoniche, da DISS 2.0 (VALENSISE & PANTOSTI, 2001). Da un punto di vista sismotettonico, la sismicità è quella prevalentemente legata a processi di distensione crostale. Il campo deformativo Plio-Quaternario, tuttora attivo, è caratterizzato da un asse di massima estensione sub-o-

rizzontale orientato in direzione SW-NE, come indicato sia da dati geologico-strutturali che da meccanismi focali di terremoti (LAVECCHIA *et alii*, 1994; BONCIO & LAVECCHIA, 2000). Tali processi estensionali sono responsabili della formazione e del movimento, di faglie dirette e transtensive, osservabili in superficie, ben definibili in termini di lunghezza, giacitura e cinematica e spesso caratterizzate da evidenze di attività sismica nel Pleistocene superiore – Olocene (ultimi 125.000 anni; BARCHI *et alii*, 2000), talvolta con evidenze dirette di dislocazione cosismica superficiale in occasione di forti terremoti ad es. Avezzano 1915. Le faglie attive che influenzano la sismicità dell'area sono legate agli allineamenti, aventi direzione media NNW-SSE, localizzati nell'area di catena, all'interno di una fascia interessata da deformazioni distensive.

Per faglie attive si intendono strutture che possiedono almeno uno dei seguenti requisiti: evidenze di attività tardo-aterniana (Pleistocene sup. – Olocene; i.e. ultimi 125.000 anni) da indagini geologiche e morfotettoniche; evidenze di attività storica e preistorica da indagini paleosismologiche; evidenze di attività da dati sismologici strumentali; indizi di attività da dati sismologici storici. Infatti ad una prima analisi, la sismicità dell'area risulta strettamente connessa con il comportamento di alcuni sistemi di faglie principali quali, quelle che bordano la Conca di Rieti, i sistemi connessi col Bacino di Montereale e quelli del Bacino di Pizzoli e del sistema Aquilano s.l.; ed ancora il sistema legato alle faglie della Valle dell'Aterno ed il sistema della Valle del Salto; oltre la Faglia di Monte Gorzano-Campotosto (Sistema dei Monti della Laga) (fig. 2).

La struttura di M. Gorzano-Campotosto ha una lunghezza di circa 28 km, presenta una direzione N150°-N160°, immerge verso WSW con un'inclinazione media in superficie di 50-70° e mostra una cinematica distensiva, con movimenti prevalentemente di tipo *dip slip*. Il rigetto geologico verticale massimo, misurato all'altezza di Amatrice è di ca. 2300 m. Le evidenze di attività quaternaria consistono in scarpate di faglia e faccette triangolari più giovani del Pleistocene inferiore ben conservate sia nel substrato roccioso miocenico che nei depositi continentali quaternari.

Numerose evidenze di attività tardo-aterniana sono documentate nel settore centro-meridionale della struttura, come ad esempio dislocazioni e tilting di depositi palustri datati 39700 ± 3000 anni BP (BACHETTI *et alii*, 1990). Inoltre, dislocazioni di depositi terrazzati olocenici datati al 6550-6380 a.C. sono documentate attraverso trincee paleo-

sismologiche nel settore centro-meridionale, nei pressi di Campotosto (GALADINI & GALLI, 2000, 2003). Secondo BONCIO *et alii* (2004), la faglia di M. Gorzano-Campotosto sarebbe stata attivata in occasione del terremoto storico del 1639, che tuttavia sarebbe relativo alla rottura solo di parte dell'intera struttura (circa la metà).

Per ciò che concerne i lineamenti di Montereale, Pizzoli-M. Pettino e Aquilano s.l., questi in superficie sono caratterizzati da sistemi di faglie con cinematica normale, ad andamento variabile da NW-SE a WNW-ESE. La struttura di Montereale ha una direzione compresa fra N120° e N145°, immerge verso SW e SSW ed ha una inclinazione in superficie di ca. 60°; la lunghezza della struttura è stata stimata in ca. 16 km. La struttura Pizzoli-M. Pettino si compone di due segmenti la cui lunghezza complessiva è di 24 km. Il segmento più settentrionale ha cinematica distensiva con movimenti *dip slip* ed obliqui sinistri; il segmento meridionale ha cinematica distensiva, con movimenti prevalentemente *dip slip* o obliqui destri.

Il rigetto geologico verticale è di ca. 300 m nella parte più settentrionale del tratto a direzione NW-SE, e dell'ordine di 700 m nella porzione a sud, dove la direzione cambia da NW-SE a circa E-W. Le evidenze di attività tardo-aterniana per i segmenti di Pizzoli e M. Pettino consistono in scarpate di faglia al contatto fra substrato roccioso e depositi di versante e dislocazioni di depositi di versante del Pleistocene superiore.

A seguito di studi effettuati su scavi nel settore tra Pizzoli ed Arischia sono stati riconosciuti, lungo la faglia di Pizzoli, effetti superficiali verificatisi durante il sisma aquilano del febbraio 1703 (BLUMETTI, 1995).

La struttura denominata Aquilano s.l. si localizza ad est de L'Aquila, ha orientazione media N150° con immersione occidentale ed è lunga circa 13 km. Non ci sono dati geologici che vincolino con chiarezza la geometria, la cinematica ed il rigetto della faglia, ad eccezione di locali dislocazioni per faglia normale (immergente a SW) dei depositi continentali di Pietralata; a tale struttura viene associato il sisma del 1461 (Intensità del X grado MCS, $M \sim 6.5$).

La Media Valle dell'Aterno è costituita in superficie da un sistema di faglie, con direzione media NNW-SSE ed immersione occidentale, a cinematica normale o transtensiva, e lunghezza totale della struttura pari a 24 km. L'attività quaternaria della struttura è confermata dalla presenza di dislocazioni in depositi tardo-Pleistocenici (GALADINI & GALLI, 2000; BERTINI & BOSI, 1993).

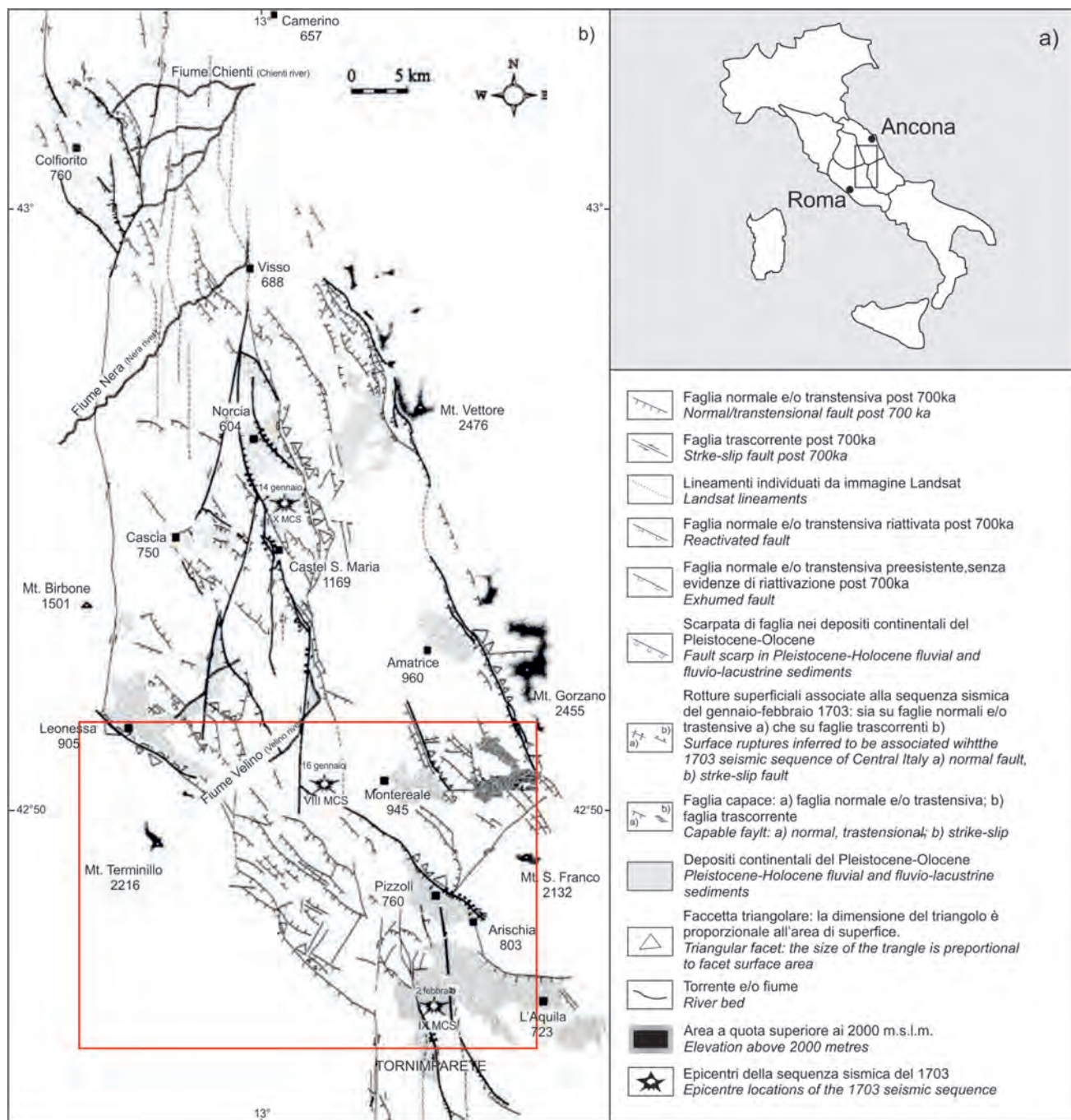


Fig. 2 – a) Ubicazione dell'area; b) sistema di faglie tardo-quaternarie delle zone assiali dell'Appennino centrale (TONDI *et alii*, 1997, modif.). Il riquadro in rosso mostra l'area oggetto di studio.

- a) Localization of the area; b) Late-Quaternary faults' system of Central Apennines axial zones (TONDI *et alii*, 1997, modified). The red rectangle indicates the study area.

La faglia di Rieti affiora in modo discontinuo lungo il bordo orientale della depressione tettonica di Rieti, colmata da depositi continentali di età Pliocene superiore – Quaternario. Complessivamente, la struttura ha una direzione N140°-N160°, immerge verso SW e WSW, ha una lunghezza di ca. 16-17 km e mostra cinematica prevalentemente distensiva (CAVINATO *et alii*, 1989; CAVINATO, 1993). Le evidenze di attività

tardo-quaternaria sono scarse e localizzate in alcuni siti per i quali è stata fatta anche un'analisi paleosismologica (MICHETTI *et alii*, 1995).

La faglia della Valle del Salto è una faglia diretta che borda verso NE l'omonima valle fluviale e che si sviluppa per una lunghezza di ca. 28.5 km. La struttura ha una direzione N140°-N150°, con locali tratti a direzione ca. E-W (settore centrale), immerge verso SW con una inclinazione

in superficie che varia da 45° a 70° e mostra una cinematica distensiva, con movimenti prevalentemente *dip slip*.

Il massimo rigetto geologico verticale, misurato nella porzione centrale della struttura, è di circa 2200 m (MOREWOOD & ROBERTS, 2000). La faglia mostra evidenze di attività tardo-quadernaria nel settore centrale, per la presenza di evidenti scarpate di faglia che dislocano la morfologia del versante (BOSI, 1975; GALADINI & MESSINA, 2001) (tab. 1).

L'elevata attività di tali sistemi sismogenici, come già accennato, è avvalorata dai numerosissimi terremoti che hanno colpito l'area fin da tempi remoti. A partire dal 1300 e fino al 2002 si sono verificati 11 eventi di magnitudo uguale o superiore a 6, il maggiore dei quali è l'evento del 13 gennaio 1915 (Mw 6.99); tre di questi sono avvenuti a breve distanza spaziale e temporale (i due eventi del 1703 e quello del 1706). Il rateo di

sismicità per eventi con $M \geq 6$ è dunque di 1.49 in 100 anni, che corrisponde a un periodo medio di circa 67 anni (STUCCHI *et alii*, 2013).

Tra gli eventi sismici più devastanti quello avvenuto nel settembre 1349 interessò una vasta area dell'Italia centro-meridionale. Uno degli epicentri delle tre scosse principali, localizzato nella zona de L'Aquila, raggiunse il X grado della scala MCS e il numero delle vittime fu stimato intorno alle 800 persone. Nel 1461 furono avvertite due scosse, con epicentro a sud della città de L'Aquila, di uguale intensità a circa due ore di distanza. L'intensità massima osservata fu del X grado della scala MCS. Nel 1639 un terremoto con intensità pari al X grado della MCS colpì l'area di Amatrice (magnitudo stimata pari a 6).

Nel gennaio-febbraio del 1703 l'Italia fu colpita da uno dei più gravi disastri sismici della storia che interessò la parte centrale della penisola. La prima scossa (14 gennaio) ebbe come epicen-

Tab. 1 – Sintesi dei dati disponibili sulle faglie attive dell'Appennino centrale (modificato da GALADINI *et alii*, 2001). In particolare, i sistemi di faglia che interessano l'area in oggetto sono identificati con i seguenti codici: 34, 35, 36, 37, 39, 41. - Data summary on active faults of the Central Apennines (GALADINI *et alii*, 2001, modif.). In more detail, the fault's systems concerning the study area are identified by the following codes: 34, 35, 36, 37, 39, 41.

Faglie e sistemi di faglie	Lunghezza del sistema di faglia (km)	Slip rate verticale (mm/a)	Slip rate verticale minimo (mm/a)	Intervallo cronologico	Intervallo di ricorrenza per eventi di fagliazione di superficie (anni)	Spessore strato sismogenetico (km)
Gubbio (29)	21					
Gualdo Tadino (30)						
Colfiorito (31)	20	0.3-0.4		Quaternario		8-10
Norcia (32)	30	0.5-0.7	0.2	Quaternario		10-12
M. Vettore (33)	18	0.5-0.6	0.25-0.3	0.1 Ma		
Leonessa (34)	21	0.3		12000-3600 BP		
Alta valle dell'Aterno (35)	25	0.47-0.86		Olocene		8-12
M.ti della Laga (36)	18	0.73-0.9	0.3-0.36	31710±760 BP		
Rieti (37)	27	0.5		23330±300 BP		
Campo Imperatore-Assergi M. Cappucciata (38)	40	0.67-1		20000-30000 BP	2500-7000	8-12
Valle del Salto (39)	24	0.3		Olocene		
Campo Felice - Colle Cerasitto/Ovindoli -Pezza (40)	16/12-20	1.1/0.8-1.2/1.2-2.3		Olocene	2760-3200	
Media Valle dell'Aterno (41)	21	0.33-0.43		7000 BP		
Fucino (42)	33	0.7-0.8	0.4-0.5/0.37-0.43	7000-10000 BP	1400-2600	13
Monte Morrone (43)	20		0.5-0.66	1.5 Ma		
Alta valle del Sangro (44)	20		0.17-0.21	0.8-1 MA		
Aremogna-Cinquemiglia (45)	16		0.2	10000 BP		
Sora (46)						
S. Pietro Infine (47)	17					

tro l'area nursina, ma gli effetti furono risentiti anche nell'aquilano. Il 2 febbraio dello stesso anno fu invece l'area aquilana sede di un nuovo epicentro. Le intensità massime raggiunsero l'XI grado della scala MCS e si contarono complessivamente alcune migliaia di vittime.

Nel 1706 un sisma di magnitudo 6,6 interessò tutta la parte meridionale del territorio abruzzese: le vittime furono circa 2400 di cui circa un migliaio nella sola città di Sulmona.

Nel 1762 un nuovo sisma, con intensità massima stimata intorno al IX- X grado della scala MCS, ebbe come epicentro l'area aquilana (magnitudo stimata poco meno di 6).

Il 13 gennaio 1915 l'area del Fucino fu colpita da un terremoto di magnitudo 7, con intensità

massima raggiunta pari all'XI grado della scala MCS nelle località di Avezzano, Cappelle, Gioia dei Marsi e S. Benedetto dei Marsi.

Le vittime furono circa 33.000 e notevoli furono anche gli effetti sull'ambiente quali, la formazione di scarpate di faglia, spaccature nel terreno, frane, liquefazioni, variazioni nella topografia ed anomalie idrologiche (CASTENETTO & GALADINI, 1999).

Infine, gli ultimi eventi che hanno determinato un notevole risentimento nell'area studiata sono quelli del 1997 (Umbria-Marche) e del 2009 (L'Aquila), rispettivamente con magnitudo 6 e 6,3, con notevoli effetti sull'ambiente (ad es., fratture, liquefazioni, anomalie idrologiche, frane, rigetti decimetrici, ecc.) (tab. 2).

Tab. 2 – *Elenco dei principali terremoti avvenuti nell'area di studio o con notevole risentimento all'interno di essa, negli ultimi 700 anni.*

- List of the main earthquakes occurred in the study area or with direct effects inside it, in the last 700 years.

Anno, mese, giorno	Località di riferimento	Intensità massima	Magnitudo
1298. 11.10	Rieti	VIII	6
1328. 12.01	Norcia (PG)	VIII	6
1349. 09.09	L'Aquila	VIII-IX	6,5
1352. 12.25	Città di Castello(PG)	VIII	6
1378	Norcia (PG)	VIII-IX	6,5
1461.11.26	L' Aquila	VIII	6,5
1639.10.07	Amatrice (RI)	VIII	6
1703.01.01	L' Aquila	VII-VIII	5,5
1703.01.14	Norcia (PG)	VIII-IX	6,5
1703.01.16	Monteale (RI)	VIII-IX	6,5
1703.02.02	L' Aquila	VIII-IX	6,7
1706.11.03	Sulmona (AQ)	IX-X	6,6
1730.05.12	Norcia (PG)	VIII-IX	6,5
1762.10.06	Aquilano	IX-X	5,9
1785	Piediluco (RI)	VIII	6
1789	Città di Castello (PG)	VIII-IX	6,5
1832.01.13	Foligno (PG)	VIII-IX	6,5
1859.08	Norcia (PG)	VIII-IX	6,5
1898.06.28	Cupaello (RI)	VII-VIII	5,5
1904.02.24	Marsica	IX	5,6
1915.01.13	Avezzano (AQ)	IX-X	7
1979.09.20	Civita di Norcia (PG)	VIII	6
1984.04.29	Gubbio (PG)	VII-VIII	5,6
1997.09.26	Colfiorito (PG)	VIII-IX	6
2009.04.06	Coppito (AQ)	IX-X	6,3

Per cercare di valutare la potenzialità sismica di una zona è necessario avere pertanto un quadro completo dell'attività sismica passata, basata sulla disponibilità ed attendibilità delle fonti storiche ed archivistiche e, per gli eventi sismici più recenti, basata anche su informazioni inerenti i dati ipocentrali, compresa la geometria della sorgente sismica dei terremoti, grazie a sismografi sempre più sofisticati.

Studi statistico-probabilistici sono stati sviluppati negli ultimi anni per definire la pericolosità sismica di base.

Tali analisi vengono realizzate applicando una metodologia ampiamente consolidata e impiegata a livello internazionale, che prevede l'utilizzo di alcuni dati di base (un catalogo sismico e una zonazione sismogenetica) e l'adozione di criteri e metodi per l'elaborazione di tali dati (calcolo degli intervalli di completezza del catalogo, calcolo dei tassi di occorrenza dei terremoti, relazioni di attenuazione).

L'applicazione di queste metodologie innovative ha come punto di partenza la corretta parametrizzazione delle sorgenti responsabili dei terremoti maggiori, tramite il riconoscimento della struttura indiziata, la quantificazione della sua attività, l'associazione tra terremoto e struttura e l'individuazione del possibile modello di ricarica per gli eventi maggiori.

La definizione delle sorgenti sismogenetiche viene effettuata quindi attraverso la caratterizzazione geometrica e cinematico-energetica delle stesse.

Per le stime di pericolosità sismica, ovvero in termini di scuotimento atteso del suolo, le sorgenti sismogenetiche possono essere suddivise su tre livelli:

- Sorgenti individuali (proiezione in pianta delle faglie attive). Strutture individuali, poten-

zialmente responsabili dei terremoti con $M \geq 5.5$, riconosciute in base alla geometria e cinematica della struttura (correlazione terremoto/struttura e data dell'ultimo evento maggiore associato alla struttura stessa);

- Provincie sismotettoniche a sismicità omogeneamente distribuita e stazionaria. Settori sismogenici che racchiudono tutte le informazioni sui terremoti strumentali e storici non correlati a strutture individuali note ($4.5 < M < 6$);

- Sorgenti basate su sismicità di *background* (celle regolari). Basata sull'analisi della sismicità strumentale ($M \leq 5.5$) degli ultimi 20 anni: utilizzando una finestra variabile di selezione di eventi strumentali, è stato definito un modello di celle adiacenti regolari con valori variabili dei coefficienti a e b di una relazione *Gutenberg-Richter* (tab. 3).

Nel caso del Lazio sono riportate a titolo di esempio le accelerazioni di picco A_{g0rif} , calcolate al 90° percentile dei dati ricadenti all'interno dei singoli confini amministrativi, elaborate sulla base dei valori di accelerazione (tempo di ritorno 475 anni), distribuiti su di una griglia con circa 2 km di lato (Progetto S1 dell'INGV):

Amatrice 0,2600

Antrodoto 0,2550

Leonessa 0,2582

Nel caso dell'Abruzzo vengono riportati come esempio i valori di accelerazione dei due comuni:

L'Aquila 0,260984

Monte reale 0,260382

Una volta identificati i valori delle accelerazioni massime attese al suolo rigido, si cerca di valutare la loro variazione (in generale amplificazione) negli strati più superficiali, ovvero la risposta sismica locale, attraverso la stima di due parametri: categoria di sottosuolo e condizione topografica (fig. 3).

Tab. 3 – *Parametri geometrici e cinematici di alcune master fault dell'area di studio (LAVECCHIA et alii, 2006, modif.).*
- Geometric and kinematics parameters of some master faults of the study area (LAVECCHIA et alii, 2006, modif.)

Master Fault	Giacitura in superficie			Dimensioni (km)		Cinematica	Sisma associato stor./strum.	M	I
	dir.	imm.	incl.	L	W				
M. Gorzano	150-160	SW	60	35	19,5	dip-slip	1639	6	VIII
Monte reale	115-120	SW-SSW	60	16	19,5	dip-slip/transt. dx	1703	6,7	IX
Pizzoli - M. Pettino	100-130	SSW-SW	60-70	24	19,5	dip-slip/transt. dx	1703	6,7	IX
Aquilano s.l.	150	SW	/	13	19,5	/	1461	6,5	VIII
Media Valle dell'Aterno	120-130	SW	50-70	24	19,5	dip-slip			
Rieti	140-160	WSW	80	16,5	13	dip-slip			
Valle del Salto	90-150	S-SW	45-70	28,5	14,5	dip-slip			

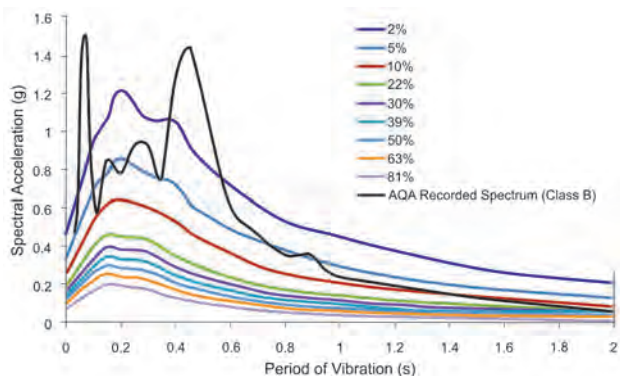


Fig. 3 – Confronto tra il valore medio degli spettri a pericolosità uniforme per diversi periodi di ritorno con lo spettro registrato dalla stazione AQA (terremoto del 6/4/2009).
 - Comparison between the median value of spectra with homogeneous hazard for various return periods and the spectrum of AQA seismic station (6th April 2009 earthquake).

Tab. 4 – Peak Ground Acceleration ($PGA > 25 \text{ cm/s}^2$) e Distanza dall'epicentro del sisma del 6 aprile 2009.
 - Table- Peak Ground Acceleration ($PGA > 25 \text{ cm/s}^2$) and Distance from the L'Aquila earthquake epicenter.

Nome stazione	Categoria Suolo	PGA (cm/s^2)	Distanza Epicentro (km)
Valle Aterno-Centro Valle	B	646,1	4,9
Valle Aterno-Colle Grilli	B	506,9	4,4
Valle Aterno-F. Aterno	B	435,6	4,6
Montereale	A	61,6	22,4
Antrodoco	A	26	23
Leonessa	A	/	40,6

Gli spettri delle norme rappresentano in genere approssimazioni conservative degli spettri a pericolosità uniforme (UHS), ancorati a valori di accelerazione di picco per determinati periodi di ritorno (di solito 475 anni).

Gli spettri delle NTC08 (Norme tecniche per le costruzioni 2008) tendono a approssimare maggiormente gli UHS. Il confronto con gli spettri registrati ha mostrato che in alcuni casi i parametri del moto del suolo hanno superato anche di molto quelli previsti dagli spettri delle NTC08 (per un periodo di ritorno di 475 anni (CROWLEY *et alii*, 2009)

È evidente dal confronto in figura 3 che le ordinate spettrali dello spettro registrato non seguono la forma spettrale a pericolosità uniforme, in quanto le condizioni di sito non sono considerate negli spettri calcolati dalla normativa tecnica. Di seguito si riporta una tabella riassuntiva con i principali dati sull'accelerazione di picco misurata durante l'evento del terremoto di L'Aquila del 2009 (tab. 4).

A titolo di esempio si riporta, in figura 4 l'analisi di pericolosità disaggregata.

Da quanto analizzato, si può in generale osservare che, per ciò che riguarda la pericolosità

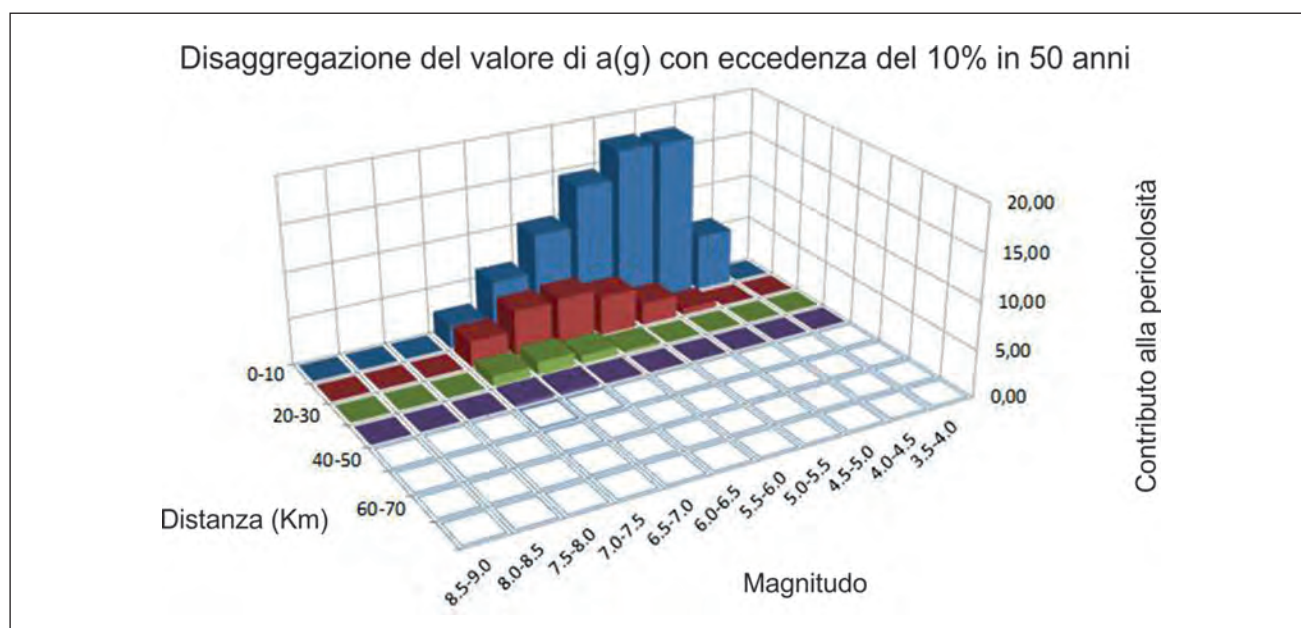


Fig. 4 – La figura presenta la disaggregazione della PGA di progetto con periodo di ritorno 50 anni su roccia che mostra come il terremoto che ha una più alta probabilità di causare il superamento della PGA sia un terremoto di magnitudo circa 4.5-5.5 a 10 km di profondità.
 - The graphic shows the unbundling of the designed PGA with a 50 years return period on rock, expressing that the higher probability of exceeding the PGA is a seismic event characterized by 4.5-5.5 magnitude and 10 km deep.

sismica dell'area, le sorgenti sismogenetiche individuali ricadono in un settore caratterizzato da terremoti relativamente frequenti, con magnitudo strumentale mediamente compresa tra 4.5 e 6 (e magnitudo fino a 7 per sismi storici), con tempo trascorso dall'ultimo forte evento relativamente lungo. Tale sismicità, storica e strumentale si dispone lungo sistemi di faglie normali che caratterizzano appunto il regime tettonico attivo estensionale dell'Italia centrale.

La distribuzione della sismicità risulta concentrata nella crosta superiore a profondità inferiori a 15 km. Dunque, le strutture sismogeniche con più alti valori di PGA e tempi di ritorno abbastanza lunghi dall'ultimo forte sisma occorso possono essere ritenute quelle con più alta probabilità di accadimento.

3. - CARATTERISTICHE LITOLOGICHE TECNICHE

3.1. - CARTA LITOTECNICA

La componente geotecnica riveste un ruolo determinante nella stabilità dei versanti. Per questo motivo, sono stati effettuati numerosi studi volti alla determinazione dei parametri meccanici fondamentali del materiale coinvolto nei fenomeni franosi.

I dati geotecnici inerenti i litotipi del Foglio Antrodoco derivano sia dal reperimento di dati pregressi in possesso dei comuni o Enti di varia natura (ANAS ecc) sia da nuove prove eseguite presso il laboratorio geotecnico.

Per classificare i materiali appartenenti al substrato e alle coperture, essi sono stati esaminati e descritti in base a parametri litologici (composizione, caratteristiche granulometrico-tessiture, addensamento/consistenza), alla struttura e alle caratteristiche geomeccaniche fondamentali.

A tal fine, è stato utilizzato il Foglio n. 139 "L'Aquila" della Carta Geologica d'Italia alla scala 1: 100.000, che costituisce l'unica fonte ufficiale valida per l'intero territorio nazionale, in attesa del completamento della Nuova carta Geologica alla scala 1: 50.000, come previsto dal Progetto CARG.

Successivamente, i diversi litotipi che formano le unità litostratigrafiche affioranti sono stati raggruppati in Unità Litologico-Tecniche (ULT) in base alle caratteristiche fisico-meccaniche fondamentali.

Per gli scopi di questo lavoro, i riferimenti sostanziali si fondano sulle linee guida e considerazioni espresse in AGI (1977), IAEG (1981),

ESU (1977), ISRM (1978), CARRARA *et alii* (1987), CANUTI *et alii* (1992), AMANTI *et alii* (1996).

Pertanto, in considerazione della distribuzione e delle caratteristiche dei fenomeni franosi e, più in generale, della risposta delle formazioni geologiche all'azione dei processi morfogenetici, queste ultime sono state raggruppate, sulla base delle descrizioni riportate in legenda nel Foglio 139 "L'Aquila" nelle seguenti classi litologiche (tab. 5).

La fase successiva è consistita nella verifica delle corrette attribuzioni alle diverse classi litologiche tenendo conto dei seguenti fattori:

- nel Foglio 139, come accade frequentemente nella cartografia geologica in scala 1:100.000, la descrizione di alcune voci in legenda accorpa terreni dello stesso intervallo cronologico ma molto diversi litologicamente;

- nel Foglio 139 sono individuate e riconosciute una *facies umbro marchigiana sabina*, una *facies abruzzese* e infine una *facies di transizione*.

In alcuni casi, l'attribuzione di una unità formazionale (o di parte di essa) ad una delle classi litologiche riconosciute è funzione della *facies* cui appartiene.

È il caso ad esempio della unità cr2 generalmente attribuita alla classe litologica 7, ad eccezione dell'areale in *facies* abruzzese dove è presente come calcari detritici e biodetritici ricristallizzati con intercalazioni di calcari bioclastici grossolani (cfr. CENTAMORE *et alii*, 1991) dove è stata classificata nella classe 9; all'interno della formazione del Flysch della Laga (classe litologica 4), sulla base di quanto diffusamente riportato nella letteratura (CENTAMORE *et alii*, 1991) sono state definite tre diverse sottounità caratterizzate dal diverso prevalere della *facies* arenacea o di quella siltosa.

Per quanto riguarda l'attività di rilevamento in campagna si è tenuto conto di quanto osservato nel corso dei sopralluoghi sul terreno e di quanto emerso dal confronto con i rilevatori del gruppo CARG.

I risultati di questa fase sono riportati in tabella 6 e sono finalizzati alla elaborazione di una Carta delle Unità Litotecniche, nella quale è riportata la distribuzione dei diversi corpi geologici in funzione delle loro caratteristiche geotecniche.

Pertanto, ad ogni classe litologica è stato attribuito un *set* di dati e informazioni utili a caratterizzarla dal punto di vista geotecnico e geomeccanico.

I materiali rocciosi sono stati valutati in base a diversi parametri, raccolti attraverso il rilevamento, prove speditive sul terreno e *test* di laboratorio

Tab. 5 – *Prima suddivisione dei terreni presenti nel Foglio 139 in classi litologiche.*
 - First subdivision of lithotypes present in the 139 sheet in lithological classes.

Sigla	Classe litologica	Voci in legenda corrispondenti
1	Depositi di età quaternaria sciolti o deb. cementati a granulometria prevalentemente medio-grossolana, il cui comportamento dal punto di vista geotecnico è controllato da meccanismi di tipo attritivo	Dt, q2, mo, q1-1, con
2	Depositi di età quaternaria sciolti o deb. cementati a granulometria prevalentemente fine, il cui comportamento dal punto di vista geotecnico è controllato dalla presenza della coesione	a1, a2
3	Depositi di età quaternaria cementati a comportamento litoide o semilitoide	T, tv, br
4	Formazioni strutturalmente complesse a litologia arenaceo-siltosa	m2
5	Marne e marne calcaree	m1
6	Marne argillose	m1a
7	Formazioni strutturalmente complesse a litologia argilloso-marnoso-calcareo	e2-o, l3, cr2
8	Calcari e calcari marnosi fittamente stratificati	cr3-e1, l2, cr1, gs
9	Calcari in strati di spessore pluridecimetrico o in banchi	l1, gc, gc-d
10	Dolomie e calcari dolomitici	cr1-l2, l1-dts

Tab. 6 – *Seconda suddivisione dei terreni presenti nel F. 139 in classi litologiche.*
 - Second subdivision of lithotypes present in the 139 sheet in lithological classes.

Sigla	Classe litologica	Voci in legenda corrispondenti
1	Depositi di età quaternaria sciolti o debolmente cementati a granulometria prevalentemente medio-grossolana, il cui comportamento dal punto di vista geotecnico è controllato da meccanismi di tipo attritivo	Dt, q2, mo, q1-1, con
2	Depositi di età quaternaria sciolti o debolmente cementati a granulometria prevalentemente fine, il cui comportamento dal punto di vista geotecnico è controllato dalla presenza della coesione	a1, a2
3	Depositi di età quaternaria cementati	T, tv, br
4	Formazioni strutturalmente complesse (<i>sensu</i> ESU, 1969) a litologia arenaceo-siltosa: facies pelitica	m2
5	Formazioni strutturalmente complesse (<i>sensu</i> ESU, 1969) a litologia arenaceo-siltosa: facies pelitica-arenacea	m2
6	Formazioni strutturalmente complesse (<i>sensu</i> ESU, 1969) a litologia arenaceo-siltosa: facies arenacea	m2
7	Marne e marne calcaree	m1
8	Marne argillose	m1a
9	Formazioni strutturalmente complesse (<i>sensu</i> ESU, 1969) a litologia argilloso-marnoso-calcareo	e2-o, l3, cr2 (pro parte)
10	Calcari e calcari marnosi fittamente stratificati	cr3-e1, l2, cr1, gs
11	Calcari in strati di spessore pluridecimetrico o in banchi	l1, cr2 (pro parte), gc, gc-d
12	Dolomie e calcari dolomitici	cr1-l2, l1-d, ts

(ISRM, 1978): struttura, resistenza a compressione uniassiale, spaziatura delle discontinuità, condizioni delle discontinuità (persistenza, apertura, rugosità, riempimento, alterazione).

I materiali sciolti sono stati caratterizzati in campagna e in laboratorio, in base a struttura, granulometria, consistenza/addensamento e eventuali discontinuità.

Nella Carta delle Unità Litotecniche, sono stati effettuati alcuni accorpamenti che hanno tenuto conto della effettiva distribuzione sul territorio delle classi, della rappresentatività delle classi e dell'indice di franosità (tab. 7).

Le 8 unità litotecniche definite sono: Depositi quaternari, Depositi quaternari cementati che identificano la classe delle Terre; Flysch, Calcari marnosi, Marne e Marne argillose, Alternanze di calcari Argille e marne, Calcari Stratificati, Calcari dolomitici e Dolomie (fig. 5) che identificano la classe delle Rocce.

3.2. - TERRE

3.2.1. - *Depositi Quaternari a comportamento attritivo*

Le caratteristiche geotecniche relative ai depositi quaternari a grana medio-grossolana sono state ricavate da analisi di laboratorio e studi geologici effettuati da vari autori nella zona in esame. In particolare sono state utilizzate le informazioni provenienti da progetti effettuati dall'ANAS S.p.A. per lavori di adeguamento stradale e da relazioni tecniche commissionate da enti locali (comuni, provincie, etc.).

Da quanto ricavato dalla relazione geotecnica per "lavori di adeguamento in sede della piattaforma stradale al tipo C1" dell'ANAS, redatta nel gennaio 2005, i sedimenti quaternari sciolti sono costituiti da depositi di copertura quali alluvioni attuali e terrazze fluviali e lacustri, conoidi di deiezione e i detriti di versante.

In particolare i depositi alluvionali ricoprono le aree di fondovalle con spessori variabili, ma mediamente intorno ai 10 m. Essi sono costituiti da clasti calcarei eterometrici in matrice sabbiosa calcarea o limo-sabbiosa. Sono presenti, localmente, alcuni orizzonti ad andamento lenticolare costituiti da materiali prevalentemente fini di natura limo-sabbioso-argillosa.

Di norma si presentano da poco a mediamente addensati, almeno nella porzione più superficiale.

Le analisi di laboratorio effettuate hanno permesso di stimare i valori del peso dell'unità di volume naturale (γ_n) che risulta essere compreso tra 18 e 20 kN/m³. Prove di resistenza mecca-

nica effettuate in situ (SPT) hanno permesso di ricavare, tramite correlazioni con l'indice N_{spt} , il valore dell'angolo di attrito che risulta essere compreso tra 33° e 38°.

I depositi di conoide sono costituiti prevalentemente da ghiaie con ciottoli eterometrici in matrice sabbioso-limosa il cui spessore varia dai 20 ai 30 m. Tramite correlazioni con prove effettuate *in situ* e sulla base delle caratteristiche granulometriche e del grado di addensamento è stato possibile assumere per questi terreni i seguenti parametri geotecnici: peso dell'unità di volume (γ_n) compreso tra 19 e 21 kN/m³; angolo di attrito (ϕ') compreso tra 30° e 35°; coesione (c') compresa tra 0 e 5 kPa.

I detriti di versante formano accumuli pressoché continui al piede dei rilievi, sono formati da clasti di natura carbonatica di forma angolare, eterometrici, con dimensione massima di pochi centimetri, in matrice assente o molto ridotta. Le potenze sono variabili da pochi metri fino a più di 20 m di spessore.

Anche in questo caso le prove SPT effettuate dall'ANAS hanno permesso di stimare i seguenti parametri geotecnici medi: peso dell'unità di volume (γ_n) compreso tra 19 e 21 kN/m³; angolo di attrito (ϕ') compreso tra 35° e 37°; coesione (c') compresa tra 0 e 10 kPa. Valori di coesione più elevati (compresi tra 0 e 20 kPa) si riscontrano in alcuni detriti di versante costituiti da matrice limo-sabbioso-argillosa. Essi, di potenza pari a circa 10 m (ma lo spessore localmente è variabile) presentano un più alto addensamento dei granuli e un assetto maggiormente stabile rispetto ai depositi sopra descritti.

3.2.2. - *Depositi Quaternari a comportamento coesivo*

Dati geotecnici sui depositi quaternari sciolti o debolmente cementati, a granulometria prevalentemente fine e a comportamento controllato dalla presenza della coesione, sono stati ricavati da numerosi lavori pubblicati sulla zona in studio e da correlazioni tra campioni aventi la stessa genesi e caratteristiche tecniche, provenienti da zone limitrofe.

Una descrizione dettagliata delle caratteristiche geotecniche di questi campioni, analoghi a quelli presenti nella zona del foglio Antrodoco, è ampiamente riportata nelle Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia Vol. 91/2014 (D'OREFICE *et alii*), dell'ISPRA.

Si tratta di depositi quaternari continentali, in prevalenza di origine lacustre, a granulometria limosa (tra 35% e 60%) e subordinatamente argillosa (10% e 60%), con percentuali basse

Tab. 7– *Suddivisione definitiva dei terreni presenti nel F. 139 in classi litologiche.*
 - Last subdivision of lithotypes present in the 139 sheet in lithological classes.

Sigla	Classe litologica	Voci in legenda corrispondenti	Litotipo Accorpato
1	Depositi di età quaternaria sciolti o debolmente cementati a granulometria da fine a medio-grossolana, il cui comportamento dal punto di vista geotecnico è controllato da meccanismi di tipo attritivo o dalla presenza della coesione	Dt, q2, mo, q1-1 con a1, a2	Depositi quaternari
2	Depositi di età quaternaria cementati a comportamento litoide o semilitoide	T, tv, br	Depositi quaternari cementati
3	Formazioni strutturalmente complesse a litologia arenaceo-siltosa	m2	Flysch
4	Marne e marne calcaree	m1	Calcarei marnosi
5	Marne argillose	m1a	Marne e marne Argillose
6	Formazioni strutturalmente complesse a litologia argilloso-marnoso-calcareo	e2-o, l3, cr2	Alternanza di calcari Argille e Marne
7	Calcarei e calcari marnosi fittamente stratificati e Calcarei in strati di spessore pluridecimetrico o in banchi	cr3-e1, l2, cr1, gs, l1, gc, gc-d	Calcarei stratificati
8	Dolomie e calcari dolomitici	cr1-l2, l1-dts	Calcarei dolomitici e Dolomie

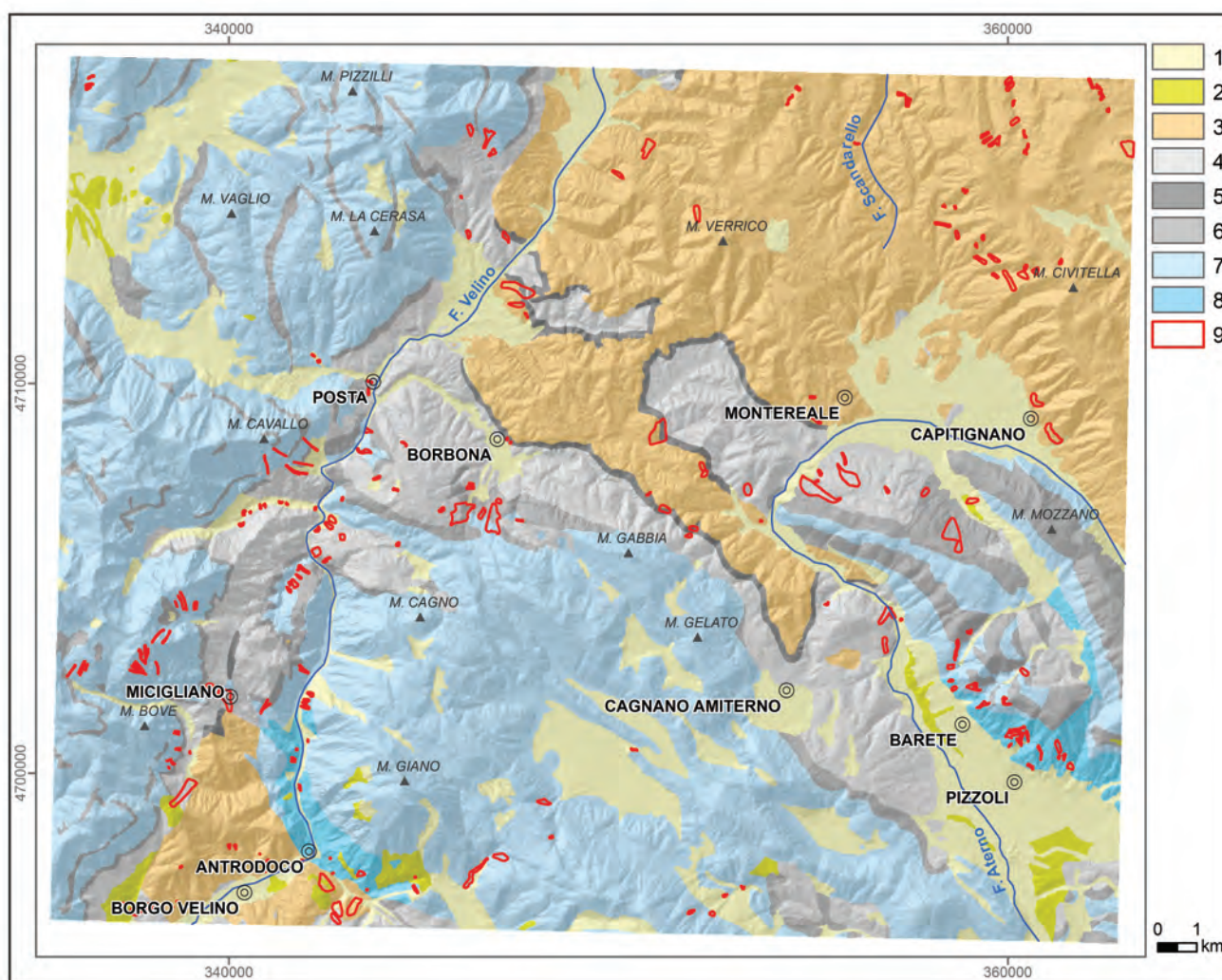


Fig. 5 – Carta litologica. Legenda: (1) Depositi quaternari; (2) Depositi quaternari cementati; (3) Flysch; (4) Calcarei marnosi; (5) Marne e marne Argillose; (6) Alternanza di calcari Argille e Marne; (7) Calcarei stratificati; (8) Calcarei Dolomitici e Dolomie; (9) Frane.
 - Lithological map. Legend: (1) Quaternary deposits; (2) Consolidated Quaternary deposits; (3) Flysch deposits; (4) marly limestones; (5) Marls and clay Marls; (6) Limestones marls and clays alternations; (7) Stratified Limestones; (8) Dolostones; (9) Landslides.

di sabbia fine (0 – 35%). Questi depositi, che in affioramento possono raggiungere uno spessore di alcune decine di metri, si presentano ben stratificati e contraddistinti da alternanze di livelli a granulometria più fine con quelli a granulometria più grossolana.

Le prove geotecniche effettuate dal laboratorio di meccanica delle terre dell'ISPRA hanno permesso di ricavare i principali parametri delle caratteristiche fisiche dei campioni analizzati. Dai dati di laboratorio, risulta che il contenuto d'acqua naturale dei campioni studiati è piuttosto costante, con valori medi pari al 23%, i valori del peso di volume (γ_n) sono compresi tra 19,5 e i 21,0 kN/m³ e le determinazioni dei limiti di consistenza, hanno permesso di classificare tali terreni come argille inorganiche a medio - alta plasticità.

Prove di tipo meccanico realizzate con il taglio diretto su scatola di Casagrande, effettuate su campioni indisturbati, hanno permesso di stimare parametri di resistenza al taglio in condizioni drenate (C' e ϕ').

I valori di coesione c' risultano generalmente bassi ed oscillano tra 6 e 19 kN/m², mentre quelli dell'angolo di attrito ϕ' sono piuttosto elevati rispetto alla norma poiché sono compresi tra 26° e 30°.

Valori di coefficiente di permeabilità ricavato da prove effettuate in cella edometrica permettono di stimare questo parametro per le frazioni più fini (argille e argille limose) compreso tra 10⁻¹⁰ e 10⁻⁸ m/s, mentre per i terreni più schiettamente limosi e limoso - sabbiosi il K è compreso tra 10⁻⁸ e 10⁻⁷ m/s.

3.3. - ROCCE

Al fine di valutare le caratteristiche meccaniche degli ammassi rocciosi e per avere una valutazione preliminare delle principali caratteristiche dell'ammasso roccioso sono stati utilizzati due indici tra i molti proposti l'RMR di Bieniawski e GSI di Hoek.

Il procedimento usato per l'esecuzione del rilievo geomeccanico è quello descritto nelle raccomandazioni della *International Society for Rock Mechanics* (1978).

Secondo queste raccomandazioni, oggi ampiamente diffuse e usate, per caratterizzare le discontinuità di un ammasso roccioso devono essere descritte:

- a) orientazione/giacitura;
- b) spaziatura;
- c) persistenza;
- d) rugosità;

- e) resistenza delle pareti
- f) apertura
- g) riempimenti;
- h) infiltrazioni/condizioni idrauliche;
- i) numero di sistemi di discontinuità;
- j) dimensioni dei blocchi;
- k) caratteri delle discontinuità in sondaggi.

L'indice RMR (*Rock Mass Rating*) o di Bieniawski (BIENIAWSKI, 1974, 1989, 1993) prende in considerazione cinque proprietà:

- a) resistenza alla compressione uniassiale della roccia intatta (A1);
- b) indice RQD (A2);
- c) spaziatura delle discontinuità (A3);
- d) tipo e condizioni delle discontinuità (scabrezza, alterazione delle pareti, apertura, materiali di riempimento) (A4);
- e) condizioni idrauliche (A5);
- f) a seconda della applicazione, una correzione per la giacitura delle discontinuità (A6).

Ciascun parametro è valutato in modo quantitativo e a ciascuno è assegnato un indice parziale. La somma algebrica degli indici parziali relativi ai singoli parametri fornisce l'indice RMR dell'ammasso roccioso:

$$RMR = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + A6$$

In base al valore di questo indice l'ammasso roccioso viene suddiviso in 5 classi. Per ciascuna classe è indicata da Bieniawski una stima, seppur di larga massima, dei parametri di resistenza al taglio dell'ammasso roccioso (coesione e angolo di resistenza al taglio) che viene riportato per ogni classe litologica.

Un sistema alternativo di classificazione degli ammassi rocciosi più adatto a rocce fratturate e stratificate, che soprattutto si basa su osservazioni geologiche sul terreno, sulla struttura e natura della roccia e la sua storia geologica è detto "Indice GSI" (*Geological Strength Index*).

L'indice è stato introdotto da Hoek e collaboratori (HOEK, 1994; HOEK *et alii*, 1995; HOEK & BROWN, 1997) e successivamente perfezionato per includere ammassi di qualità scarsa, rocce eterogenee e stratificate (HOEK *et alii*, 1998; MARINOS & HOEK, 2000, 2001; MARINOS *et alii*, 2005) e ofoliti (MARINOS *et alii*, 2006).

La valutazione dell'Indice GSI si basa sull'uso del grafico riportato per le rocce eterogenee o metamorfiche (fig. 6).

Determinato l'Indice GSI è possibile ricavare mediante una serie di relazioni empiriche la resistenza alla compressione di un ammasso roccioso ed altri parametri (HOEK *et alii*, 1995)

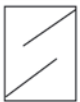



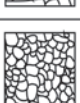

<p>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)</p> <p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GIS. Do not try to be precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35 note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planer structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions, water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		<p>SURFACE CONDITIONS</p> <p>VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces</p> <p>GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces</p> <p>FAIR Smooth, moderately weathered and altered stained surfaces</p> <p>POOR Slit-sided highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments</p> <p>VERY POOR Slit-sided highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings</p>				
<p>STRUCTURE</p>		<p>DECREASING SURFACE QUALITY →</p>				
 <p>INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities.</p>	90			N/A	N/A	
 <p>BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets.</p>	80	70				
 <p>VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faced angular blocks formed by 4 or more joint sets.</p>		60	50			
 <p>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity.</p>			40	30		
 <p>DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces.</p>				20		
 <p>LAMINATED/SHEARED - lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes.</p>	N/A	N/A			10	

Fig. 6 – Geological Strength Index per ammassi rocciosi valutato sulla base delle condizioni e delle connessioni tra giunti (HOEK, 2007).
- Geological Strength Index, GSI, for blocky rock masses on the basis of interlocking and joint conditions (after HOEK, 2007).

Nella tabella 8 sono riportate le caratteristiche meccaniche di ammasso delle litologie che si comportano come rocce derivate dalla classificazione.

Infine è stata condotta una campagna di rilevamento delle discontinuità strutturali presenti nelle unità litologiche.

In campagna è stata misurata la giacitura delle discontinuità, e sono stati raccolti e analizzati i dati relativi alle caratteristiche (ampiezza, presen-

za e natura del riempimento, presenza di acqua, forma, rugosità ecc.).

Nella figura 7 viene allegato il risultato dei rilevamenti delle discontinuità per litologia.

Tutte le misure sono state proiettate utilizzando il reticolo di Schmidt, le proiezioni stereografiche infatti consentono di analizzare le relazioni angolari tra gli elementi geometrici (piani e linee), ma non danno indicazioni sulla loro distribuzione spaziale.

Tab. 8 – *Caratteristiche meccaniche dei litotipi rocciosi derivati dalla classificazione delle rocce.*
 - Mechanical characteristics of the rock lithotypes derived from the rocks classification.

Litologia	Classificazione		Coesione (KPa)	Attrito (°)
	RMR	GSI		
Flysch	RMR	44	220	27
	GSI	39	228	34
Calcari marnosi	RMR	54	270	32
	GSI	39	444	45
Marne e marne argillose	RMR	53	218	32
	GSI	48	247	40
Alternanze di calcari	RMR	44	218	27
	GSI	39	247	36
Calcari stratificati	RMR	48	239	29
	GSI	43	307	39
Calcari Dolomitici e Dolomie	RMR	32	158	21
	GSI	27	35	10

4. - LINEAMENTI GEOMORFOLOGICI

4.1. - INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

Il F. 348 “Antrodoco” è caratterizzato da un paesaggio molto articolato, contraddistinto dal rapido succedersi di rilievi aspri, vallate imperverie ed estesi altopiani blandamente ondulati, tipicamente appenninico *sensu* ALMAGIÀ, (1959) e ARINGOLI, (1997).

All'interno di tale paesaggio è tuttavia possibile individuare settori caratterizzati da una relativa omogeneità dell'assetto morfologico, litologico e strutturale, e dal prevalere di determinati processi morfodinamici rispetto agli altri, che costituiscono le *unità di paesaggio*.

Le *unità di paesaggio* principali presenti nel foglio (fig. 8) richiamano, nel complesso, la distribuzione e l'estensione delle unità tettono-stratigrafiche note in letteratura e riconosciute nel Foglio Antrodoco (BERTI *et alii*, 2013).

Nel settore occidentale e del foglio si estende l'unità dei Rilievi Carbonatici della successione umbro-marchigiano-sabina *Auctorum*.

Si tratta di rilievi montuosi molto elevati, con cime generalmente poste a quota maggiore di 1800 m s.l.m. e frequentemente superiore ai 2000 m. Tali rilievi presentano un carattere per lo più aspro, con crinali sottili, arcuati e aguzzi, per

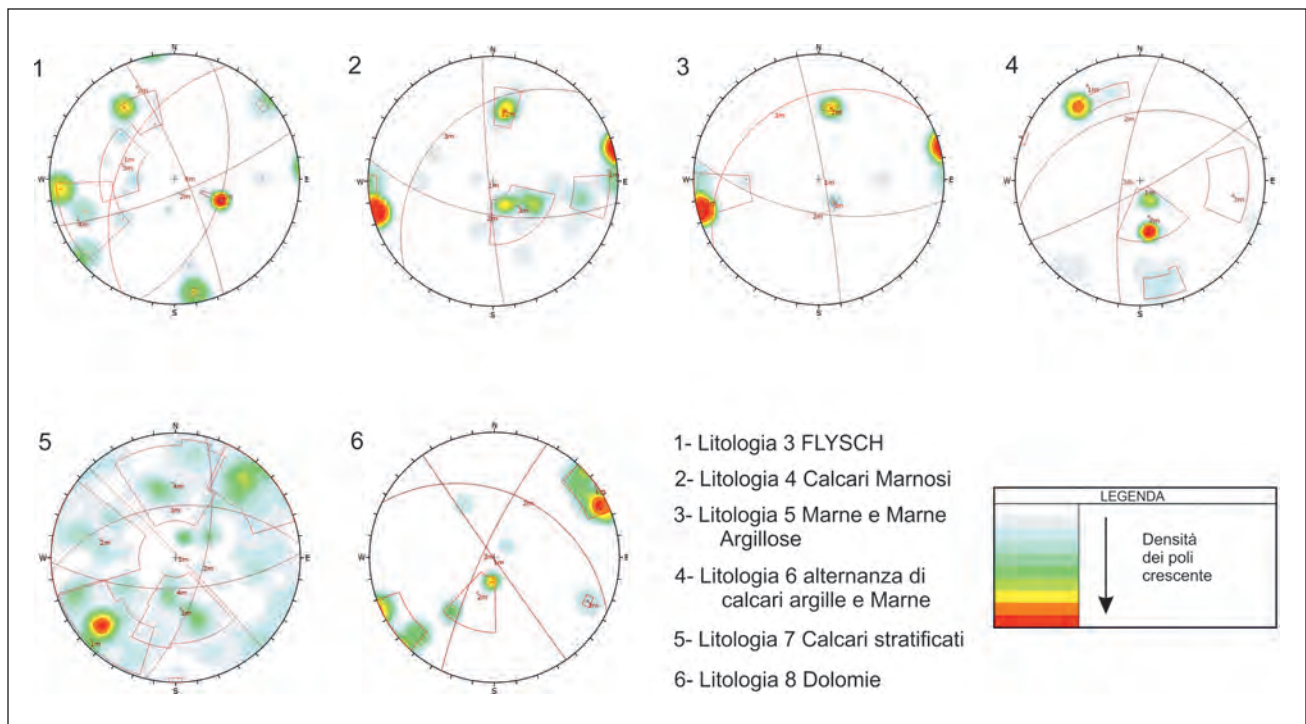


Fig. 7 – *Proiezione delle discontinuità sul reticolo di SCHMIDT aggregate per litologia.*
 - *Projection of structural data on SCHMIDT stereonet aggregated by lithology.*

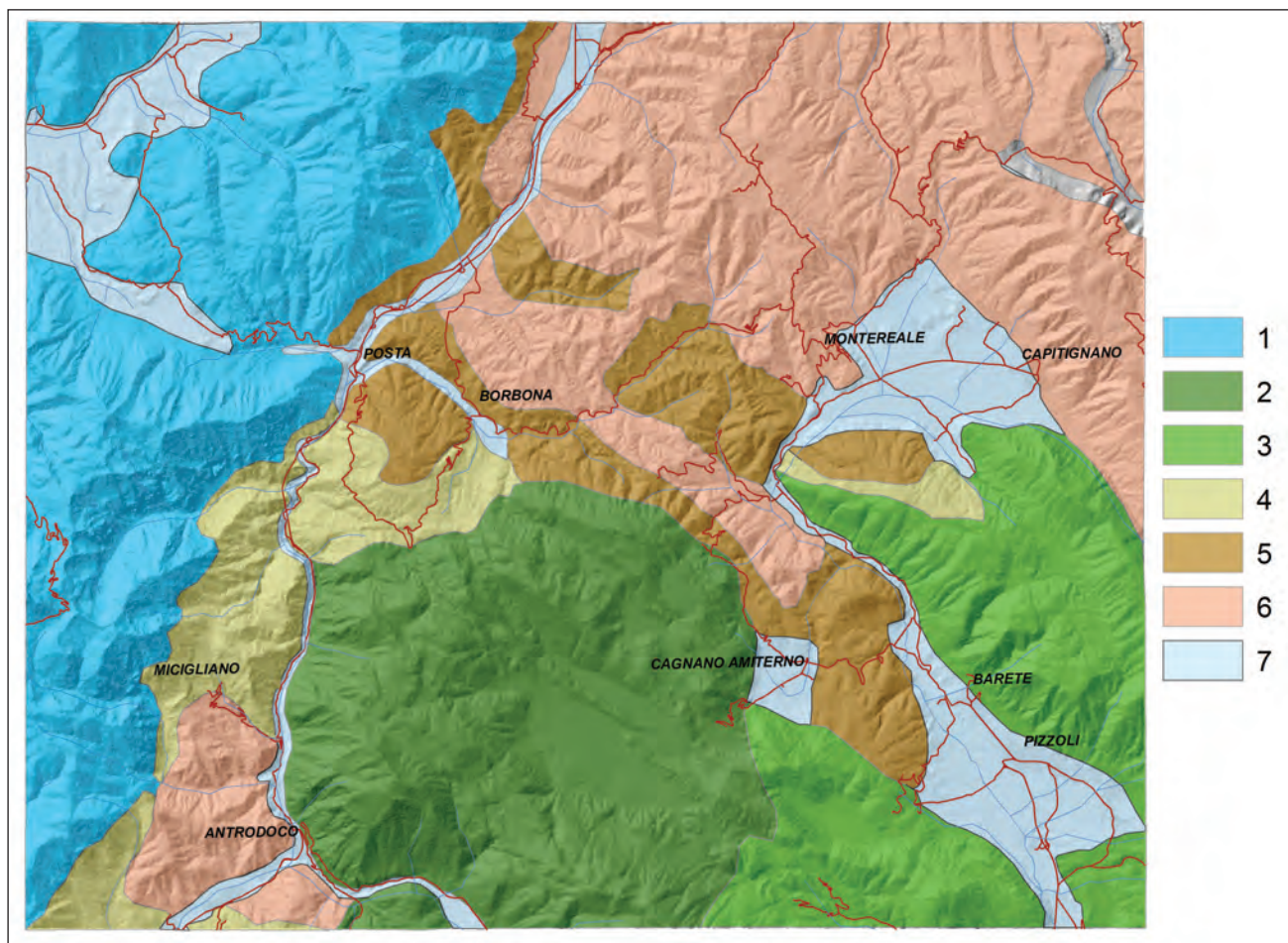


Fig. 8 – Le unità di paesaggio del territorio del foglio 348 “Antrodoco”. Legenda: 1) Rilievi Carbonatici della successione umbro-marchigiano-sabina *Auctt.*; 2) Rilievi Carbonatici dell’unità M. Giano-M. Gabbia; 3) Rilievi su terreni carbonatici appartenenti alla unità Gran Sasso-Cittareale; 4) Rilievi su terreni calcarei, calcareo argillosi e marnosi appartenenti alla unità Gran Sasso-Cittareale ed alla unità M. Giano-M. Gabbia; 5) Rilievi nelle Marne a Cerrognia; 6) Rilievi arenaceo-siltosi del Flysch della Laga; 7) Valli fluviali principali e piane intramontane.

- Landscape units of the area of the Sheet 348. Legend: 1) Carbonatic Reliefs unit in umbro-marchigiana succession; 2) Carbonatic Reliefs of M. Giano-M. Gabbia unit; 3) Carbonatic Reliefs of Gran Sasso-Cittareale unit; 4) Reliefs on calcareous, argillaceous limestone and marl from both Gran Sasso-Cittareale and M. Giano-M. Gabbia unit; 5) Reliefs in Marne a Cerrognia formation; 6) arenaceous-silty Reliefs in Flysch della Laga formation; 7) major river valleys and plains.

effetto dell’azione esercitata dal ghiaccio e dalla neve, soprattutto in corrispondenza della dorsale M. Costa Acera – M. Cavallo, del gruppo dei monti I Porcini, M. Ritornello (fig. 9), M. Elefante e M. Valloni.

I rilievi sono sovente privi di boschi e di vegetazione ben sviluppata, che rimane confinata alle quote inferiori a 1.000 m s.l.m., in essi la dinamica erosiva risulta fortemente condizionata dal prevalere del continuo disfacimento della roccia ad opera dell’azione gelo-disgelo e dai fenomeni di crollo (fig. 10).

Nel complesso i versanti presentano acclività elevate, in cui la classe di acclività maggiormente rappresentata è quella con $i > 45^\circ$, che tendono moderatamente a ridursi verso nord, dove in corrispondenza dei gruppi di M. Santona e M. Tolentino i rilievi presentano creste più smussate e arrotondate e il profilo dei versanti diviene più

regolare. Il reticolo idrografico superficiale è ben sviluppato, costituito da incisioni a forte controllo strutturale.

Ad est del fiume Velino, nel settore centrale del foglio si elevano i Rilievi Carbonatici dell’unità M. Giano-M. Gabbia.

I versanti bordieri che delimitano a sud e a ovest questa unità presentano rigetti complessivi dell’ordine di 600 – 800 m, in taluni casi anche maggiori di 1000 m, ed un profilo aspro, irregolare con un susseguirsi di scarpate.

I versanti bordieri contrastano fortemente con l’ampio altopiano che si estende all’interno di questa unità, a morfologia sub pianeggiante, comprendente all’interno, una serie di creste a controllo strutturale orientate circa NW-SE che individuano le spianate di alta quota della Piana di Cascina (fig. 11), Piana di Termine, Prati di Foce e Piana di S. Nunzio.



Fig. 9 - M. Ritornello (a sinistra), M. Iacci (a destra) e M. Iaccio Crudele (in secondo piano), appartenenti alla unità dei Rilievi Carbonatici della successione umbro-marchigiano-sabina.

- *Ritornello Mt. (left), Iacci Mt. (right) and Iaccio Crudele Mt. (background) belonging to the Carbonatic Reliefs Unit in umbro-marchigiana succession.*



Fig. 10 – Crolli diffusi, favoriti dall'alternarsi del ciclo gelo-disgelo alle quote più elevate dei Rilievi Carbonatici della successione umbro-marchigiana-sabina.

- *Widespread rock falls, induced by the alternation of the freeze-thaw cycle at the highest altitudes of the carbonatic reliefs.*

Nelle spianate di alta quota a deflusso superficiale endoreico, prevalgono i processi di ruscellamento e incisione delle acque superficiali, mentre lungo i versanti che bordano l'unità sono diffusi e ricorrenti i fenomeni franosi da crollo, che sovente interessano le infrastrutture antropiche, come la linea ferroviaria e la SS 17 in località Guardiole, S. Terenziano e in località Gole di Antodoco.

Nel settore nord-orientale del foglio si estende l'unità dei Rilievi arenaceo-siltosi del Flysch della Laga, che comprende rilievi montuosi generalmente non molto elevati e cime a quote inferiori ai 1300 m s.l.m. (La Serra, Colloncia, Colle Cerreto, M. Verrico) ad eccezione della dorsale M. S. Maria – M. Civitella (1609 m). A questa unità appartengono anche i rilievi di Colle del Melo e Colle Colonnella ubicati nel settore sud-occidentale del foglio.

I rilievi arenaceo-siltosi del Flysch della Laga presentano versanti da acclivi a molto acclivi (la classe di acclività maggiormente rappresentata è quella compresa tra 35° e 45°), a profilo irregolare e improvvise rotture di pendenza legate all'affioramento di strati e bancate litoidi arenacee; i suoli sono generalmente molto profondi, su coltri di alterazione superficiale molto sviluppate e la copertura boschiva è molto fitta (fig. 12).



Fig. 11 – L’altopiano di origine tettono-carsica della Piana di Cascina.
- *The Cascina Plain, a tectono-karstic mountain plain.*



Fig. 12 – Caratteristico paesaggio dei Rilievi arenaceo-siltosi del Flysch della Laga.
- *Typic landscape of arenaceous-silty Reliefs on Flysch of Laga formation.*

La circolazione idrica superficiale è caratterizzata da un forte ruscellamento superficiale in concomitanza degli eventi meteorici e dalla presenza di numerose venute d'acqua legate al contrasto di permeabilità tra le bancate arenacee – a elevata permeabilità secondaria per fratturazione – e gli strati a granulometria limoso-argillosa.

Sovente, fenomeni di instabilità interessano la coltre di alterazione superficiale, favoriti dalle mediocri caratteristiche geotecniche della stessa e dalla sua tendenza a saturarsi di acqua, generando movimenti lenti, evidenti laddove interessano infrastrutture antropiche (località Mopolino e Capitignano) o danneggiano le opere di captazione acquedottistica.

In concomitanza degli eventi meteorici più intensi e/o prolungati, i movimenti lenti della coltre di alterazione evolvono in frane da scorrimento traslativo. I crolli, generalmente di dimensioni limitate, interessano i settori di versante caratterizzati dal prevalere all'affioramento delle bancate arenacee o con giacitura a reggipoggio. I rilievi su terreni carbonatici appartenenti alla

unità Gran Sasso-Cittareale si sviluppano nel settore sud-orientale del foglio e comprendono le dorsali di M. Marine - M. S. Lorenzo – M. Mozzano e i rilievi di M. Rua e Colle Alto, rispettivamente a ENE e WSW della Piana di Pizzoli.

Un elemento di carattere strutturale che caratterizza tali rilievi è dato dalla generale immersione verso i quadranti nord-orientali della successione stratigrafica, che fa sì che lungo i versanti rivolti ad ovest, brevi e molto acclivi, affiorino le formazioni più antiche, calcareo-dolomitiche, di età Trias sup. – Lias inf. mentre i versanti rivolti verso i quadranti nord-orientali risultano molto più sviluppati, a profilo regolare, generalmente rettilineo. Frequenti sono i raddoppiamenti di cresta legati all'affioramento delle testate di strato in litotipi maggiormente resistenti all'erosione.

La copertura boschiva è continua e fitta lungo i versanti esposti a nord e ad est, scarsa in corrispondenza delle aree sommitali e dei versanti molto acclivi. Caratteristiche forme di erosione sono presenti nella fascia medio-bassa della dor-



Fig. 13 – Paesaggio di tipo pseudo-calanchivo lungo la fascia medio-bassa della dorsale di M. Marine – S. Lorenzo, appartenente ai Rilievi Carbonatici della Unità Gran Sasso-Cittareale.

- A badlands-like landscape along the M. Marine - S. Lorenzo ridge, in carbonatic reliefs of Gran Sasso-Cittareale Unit.

sale di M. Marine – S. Lorenzo, ove affiorano terreni calcareo-dolomitici molto fratturati e cataclasizzati sui quali l'erosione esercitata dalle acque di ruscellamento meteorico ha dato origine a un paesaggio di tipo pseudo-calanchivo (fig. 13).

Nel settore centrale del foglio, si estendono secondo una fascia orientata circa NW-SE i rilievi nelle successioni marnose della formazione delle Marne a Cerrognna.

Si tratta di rilievi generalmente poco elevati, con quote che raggiungono raramente i 1.000 m s.l.m. comprendenti: I Colli, Colle delle Pianelle, M. Rotondo, Colle Recale, Le Serre e Colle Fiorretti.

I versanti si presentano da poco a mediamente acclivi, con scarpate poco frequenti e di sviluppo limitato, in corrispondenza delle intercalazioni carbonatiche. Le aree sommitali e di cresta sono a morfologia arrotondata, talvolta ampie, così come i displuvi sono generalmente molto regolarizzati (fig. 14). I boschi sono poco diffusi e prevalgono la copertura cespugliosa, gli incolti e l'utilizzo a pascolo. I rilievi in terreni marnosi sono interessati da una intensa fatturazione che

facilita l'azione di disgregazione e degradazione ad opera dei processi morfogenetici, con un processo continuo di allontanamento della parte alterata della roccia, tale da non consentire la formazione di suoli profondi.

Prevalentemente nel settore sud occidentale del foglio, si rinviene l'unità dei rilievi impostati sulle successioni paleogenico-neogeniche calcareo-argillose e marnose dell'Unità Gran Sasso-Cittareale e dell'Unità M. Giano-M. Gabbia. Si tratta di successioni di pelagiti confrontabili, per litofacies e biofacies con quelle della serie umbro-marchigiana, dalle quali si differenziano per la maggiore presenza di intercalazioni argillose e delle facies detritiche.

Caratteristiche di tali rilievi sono una marcata articolazione ed eterogeneità, legate alle variazioni litologiche ed all'assetto strutturale, che originano un paesaggio piuttosto vario, in cui si succedono versanti a profilo regolare ed altri a profilo irregolare ed accidentato.

Il contrasto con l'assetto morfologico dei rilievi a litologia carbonatica prevalente appartenenti alla stessa unità Gran Sasso-Cittareale è ben



Fig. 14 – Aree sommitali a morfologia sub-arrotondata e displuvi molto regolarizzati lungo i Rilievi nelle Marne a Cerrognna.
- *Reliefs in Marne a Cerrognna formation with weaker rounded peaks and regular slopes.*

evidente, ad esempio, confrontando il versante nord-orientale di M. Mozzano (molto regolare, a profilo concavo-rettilineo, in calcari) con quello di M. Castiglione (molto più irregolare, in alternanze calcareo-marnoso-argillose) nelle sezioni topografiche 348020 e 348120.

Per quanto riguarda il reticolo idrografico superficiale del F. 348, esso comprende l'alta valle del fiume Velino e l'alta valle del fiume Aterno.

Si tratta di un reticolo a forte controllo strutturale, che si esprime attraverso percorsi di tipo rettilineo secondo "spezzate" geometriche e frequenti forre scavate nella roccia con pareti a strapiombo.

Un forte controllo di tipo strutturale, legato alla progressiva migrazione verso Est della tettonica estensionale ed al sollevamento tettonico che caratterizzarono la fase finale della costruzione dell'orogene appenninico, è all'origine anche della individuazione e della evoluzione del bacino di Montereale, la principale piana intermontana presente all'interno del Foglio Antrodico.

Lo sviluppo del bacino di Montereale, compreso tra i terreni dell'unità Gran Sasso- Cittareale e il dominio tettonostratigrafico della Laga, è

stato infatti condizionato fortemente dalla attività della Faglia di Capitignano, che borda il settore occidentale della catena di M. Civitella, e della Faglia di S. Giovanni, che borda il versante occidentale di M. Mozzano (CHIARINI *et alii*, 2014). Il recente studio condotto da CHIARINI *et alii* (2014) ha consentito, inoltre, l'individuazione all'interno del bacino di due sottobacini (Piedicolle e Capitignano), gli effetti della attività tettonica pleistocenica e dell'adattamento del reticolo idrografico superficiale al generale sollevamento della catena avvenuto nel Pleistocene medio. In ultimo, a partire dal Pleistocene medio, la fase di aggradazione del bacino è stata sostituita da una serie di fasi erosionali, attive fino ai giorni nostri.

4.2. - I PROCESSI MORFOGENETICI

4.2.1. - *Ruscellamento ed erosione superficiale*

Com'è noto, la rilevanza e la diffusione delle forme connesse al ruscellamento idrico superficiale sono strettamente legate a fattori quali l'erodibilità dei terreni, acclività dei versanti, caratteristiche del sistema suolo-*bedrock* e della copertura vegetazionale; pertanto esse sono molto



Fig. 15 – Forme di erosione superficiale del tipo *rill*.
- *Small channels caused by concentrated flow of water during rains (rills).*

diversificate nell'area del foglio Antrodoco in relazione alle diverse unità di paesaggio (cfr. § Inquadramento geomorfologico).

Alla scala di versante, il ruscellamento idrico superficiale è causa di forme di erosione superficiale del tipo *rill* (fig. 15) o *gully* e di modesti fenomeni di scivolamento del suolo e del *bedrock* alterato in corrispondenza delle rotture di pendenza e delle scarpate, ascrivibili a una azione combinata delle acque meteoriche e della gravità, che si osservano soprattutto nelle area dove le coperture pedologiche sono più sviluppate.

Nelle aree in cui affiora la formazione del Flysch della Laga, la presenza di potenti coltri di alterazione a componente limoso-argillosa favorisce il ruscellamento superficiale a danno della infiltrazione delle acque meteoriche. Stime del *runoff* condotte sulla base del metodo proposto dal U.S. *Soil Conservation Service* nel territorio a componente flyschoidale del comune di Antrodoco conducono a valori del coefficiente di deflusso $> 60\%$ in versanti con suoli limo argillosi e acclività compresa tra 20° e 40° (BIANCHI FASANI, 2005).

Ma, se sui rilievi in terreni flyschoidali le incisioni e le relative forme di accumulo (falde di detrito, conoidi di deiezione) sono molto diffuse, molto meno sviluppate appaiono le forme di incisione superficiale nei rilievi nella formazione marnosa, a causa della maggiore resistenza all'erosione e della presenza di suoli poco profondi.

Per contro, caratteristiche forme di erosione superficiale di tipo pseudocalanchivo legate al ruscellamento delle acque meteoriche sono quelle presenti lungo il settore occidentale della dorsale di M. Marine (fig. 16). In questo caso, è il marcato stato di fratturazione dei terreni – di natura dolomitica – che gioca un ruolo predisponente determinante, in corrispondenza della fascia tettonizzata che borda la base della dorsale, lungo la faglia di Capitignano.

4.2.2. - *Erosione e trasporto solido dei corsi d'acqua*

I processi di erosione e alluvionamento lungo i corsi d'acqua presenti nel territorio del foglio Antrodoco non sono particolarmente energici, trattandosi di corsi con portate modeste e carattere torrentizio. Ciò accade anche relativamente al più importante tra essi, il fiume Velino, poiché questo è per lunghi tratti parzialmente o totalmente asciutto, sia per la dispersione in subalveo dei contributi provenienti dall'alto bacino, che per la presenza di bacini di ritenuta e derivazione ad uso idroelettrico. La presenza di potenti fasce cataclastiche legate ai lineamenti tettonici

favorisce i fenomeni di assorbimento delle acque che scorrono nel letto del fiume; tra Posta e Antrodoco il fenomeno ha presentato in passato fasi parossistiche con lo sprofondamento del letto del fiume e il temporaneo prosciugamento dell'alveo, come accaduto in località S. Giovanni (Posta) nel dicembre dell'anno 2000. Negli ultimi decenni, inoltre, si è assistito ad una marcata riduzione degli apporti in alveo dovuto alle sorgenti, come risulta evidente ad esempio nel tratto delle Gole del Velino a monte di Antrodoco, dove numerose sorgenti prevalentemente lineari alimentano il deflusso fluviale e, tra esse, la sorgente dell'Acqua Cascinese e le sorgenti Prata-grande.

Il contributo complessivo di queste sorgenti lineari si è ridotto da oltre 1000 L/s nel 1986 a circa 500 l/s negli anni 2000-01, scendendo a soli 300 l/s nel 2007, con un minimo storico nel 1990 e nel 2008 inferiore ai 50 l/s (PETITTA, 2008).

Anche più a valle, tra Antrodoco e Borgovellino, esiste una marcata tendenza alla diminuzione della portata per infiltrazione nei sedimenti del letto, fino al prosciugamento totale osservato nel 1990 e nel 2008.



Fig. 16 – Forme di tipo calanchivo prodotte dalla erosione meteorica su terreni calcareo-dolomitici cataclasmizzati in località Tarignano, comune di Barete (AQ).

- *Badlands like landscape, induced by rainwater on dolomitic limestone cataclasmite in Tarignano, municipality of Barete (AQ).*

Lungo le aste torrentizie, i fenomeni del tipo *debris flow* sono invece un evento ricorrente, interessando, di volta in volta, aree circoscritte, per effetto della marcata influenza esercitata dall'assetto orografico sulla distribuzione delle precipitazioni meteoriche e, conseguentemente, sull'innescarsi dei fenomeni e sulla distribuzione del danno (cfr. § Pluviometria).

La disponibilità di informazioni relative ai principali eventi si riduce drasticamente mano a mano che si procede a ritroso nel tempo, ed è legata al verificarsi di danni sulle infrastrutture pubbliche, che sono poco diffuse sul territorio.

Il più recente e più documentato è l'evento del 1-2 dicembre 2010, che ha interessato il ter-

ritorio della Valle Scura.

Questa sottende un bacino idrografico di modeste dimensioni (circa 16 km²) che confluisce nel F. Velino in prossimità dell'abitato di Sigillo del comune di Posta (fig. 17).

Nell'area affiorano i terreni della successione pelagica Umbro-Sabina sovrapposti tettonicamente all'unità Gran Sasso Cittareale (BIGI *et alii*, 1992).

Il settore più elevato del bacino presenta numerosi circhi glaciali formati nel corso dell'ultimo glaciale Würm, con depositi morenici debolmente cementati, mentre nel settore centrale e inferiore del bacino i versanti sono ricoperti da spesse coltri di materiali detritici; depositi al-

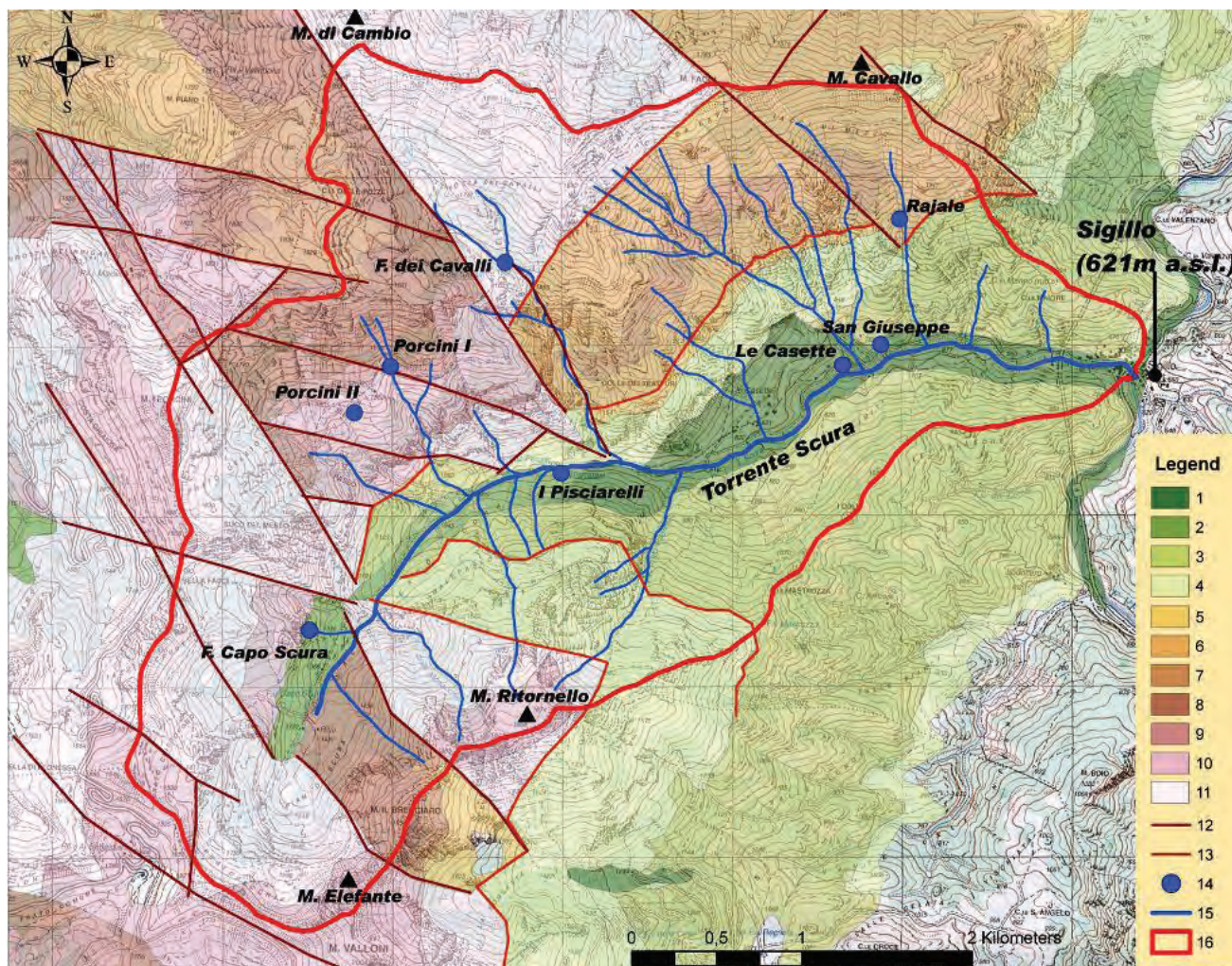


Fig. 17 – Carta geolitologica della Valle Scura. Legenda: 1) depositi alluvionali (Olocene); 2) detrito di versante (Olocene); 3) marne (Scaglia Cinerea, Miocene); 4) calcari marnosi (Scaglia Rossa e Scaglia Variiegata, Eocene-Cretacico); 5) Marne a Fucoidi (Cretacico inf.); 6) calcari e marne (Maiolica, Cretacico inf.-Giurassico sup.); 7) calcari con selce (Scisti ad Aptici); 8) calcari (Giurassico); 9) calcari e marne (Rosso Ammonitico, Giurassico inf.); 10) calcari con selce (Corniola, Giurassico inf.); 11) calcareniti bioclastiche (Massiccio, Giurassico inf.); 12) faglia; 13) sovrascorrimento; 14) sorgente; 15) reticolo idrografico; 16) spartiacque.

Modificato da: F. 139 della Carta Geologica d'Italia.

- Geological sketch map of the Scura Valley. Legend: 1) alluvial deposits (Holocene); 2) slope debris (Holocene); 3) marls of the Scaglia Cinerea formation (Miocene); 4) marly limestones of the Scaglia Rossa and Scaglia Variiegata formations (Eocene-Cretaceous); 5) marls with Fucoidi (Lower Cretaceous); 6) limestones and marls of the Maiolica formation (Lower Cretaceous - Upper Jurassic); 7) limestones with chert of the Scisti ad Aptici formation (Upper Jurassic); 8) limestone (Jurassic); 9) limestones and marls of the Rosso Ammonitico formation (Lower Jurassic); 10) limestones with chert of Corniola formation (Lower Jurassic); 11) bioclastic calcarenites of the Massiccio formation (Lower Jurassic); 12) fault; 13) thrust; 14) spring; 15) hydrographic net; 16) watershed. Adapted from Italian Geological Survey, 139 sheet.

luvionali a granulometria sabbioso-ghiaiosa si estendono lungo il settore inferiore dell'alveo.

L'evento alluvionale del dicembre 2010 ha avuto i suoi effetti maggiori nel settore medio-inferiore del bacino dove sono stati osservati fenomeni di erosione di sponda e scivolamenti al piede dei versanti, escavazione e approfondimento del letto fluviale e, infine, sovralluvionamento delle aree esterne all'alveo.

L'evento non è stato di tipo puramente idraulico, ma è stato caratterizzato da un elevato trasporto solido, in cui l'erosione di sponda ha alimentato il corso d'acqua di una grande quantità di materiale detritico, massi e tronchi che hanno causato il riempimento del letto dell'alveo, la rottura delle briglie e l'abbandono da parte della corrente del letto naturale e il conseguente sovralluvionamento delle aree limitrofe (figg. 18, 19).

L'analisi dei dati pluviometrici (GUARINO *et alii*, 2012) ha evidenziato due elementi principali: la rilevanza delle precipitazioni meteoriche cadute tra il 28 novembre e il 2 dicembre (oltre 210 mm di pioggia) e la concomitanza con un brusco rialzo termico, che ha condotto a un rapido scio-

glimento della coltre nevosa precedentemente accumulata in quota (fig. 20).

La rilevanza degli effetti alla scala di bacino è stata ulteriormente amplificata dalla ridotta estensione del bacino stesso, e quindi da un tempo di corrivazione molto contenuto (COMUNE DI POSTA, 1999), favorendo la parziale sovrapposizione del ruscellamento dovuto agli scrosci d'acqua più intensi.

L'evento alluvionale del dicembre 2010 presenta forti analogie di tipo pluviometrico con un evento verificatosi nel territorio del foglio Antrodoco il 15-16 dicembre 1999.

In questo caso, sono riportate segnalazioni di danni nel territorio dei comuni di Leonessa, Posta e Barete.

In particolare nella relazione tecnica riportata in (COMUNE DI POSTA, 1999), viene descritto l'effetto di sbarramento al deflusso delle acque del T. Scura conseguente ad un vasto movimento franoso sul versante posto in destra idrografica, e la successiva azione di erosione della base dei versanti ad opera delle acque divaganti, con effetti sul terreno molto simili a quelli dell'evento del 2010.



Fig. 18 – Fenomeni di erosione di sponda lungo l'alveo del T. Scura causati dall'evento alluvionale del dicembre 2010.
- *Erosion of bank along T. Scura riverbed, provoked by December 2010 alluvial event.*



Fig. 19 – Alluvionamento delle aree esterne al letto del T. Scura in occasione dell’evento del dicembre 2010.
 - Flooding of the external areas of the T. Scura riverbed, during the December 2010 alluvial event.

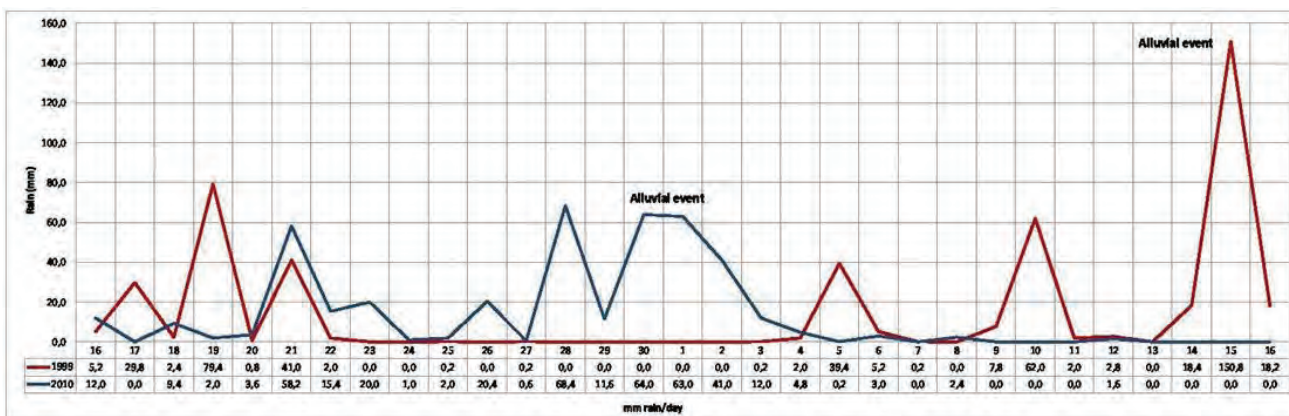


Fig. 20 – Confronto tra i dati meteorici giornalieri riferiti agli eventi alluvionali di novembre-dicembre 1999 (linea rossa) e 2010 (linea blu) registrati presso la stazione meteorologica di Leonessa (RI).
 - Comparison of the daily rainfall for the months of November and December 1999 (red line) and 2010 (blue line), referred to the Leonessa (RI) Meteorological Station.

4.2.3. - Carsismo

Forme di origine carsica sono diffusamente presenti nel territorio del foglio Antrdoco.

Esse, tuttavia, non presentano caratteristiche particolarmente rilevanti dal punto di vista paesaggistico e, conseguentemente, non presentano elementi di grande attrazione turistica; per tale motivo sono oggetto di descrizioni tecniche e

di sintetiche segnalazioni in letteratura (SEGRE, 1948; AMANTI, 2009), oppure sono note soprattutto agli appassionati di speleologia (vedi Il Portale del Catasto Nazionale delle Grotte d’Italia e il Catasto delle Cavità Naturali della Federazione Speleologica del Lazio).

Le più importanti forme di origine carsica sono date dalle estese depressioni chiuse a fondo piatto, di origine tettonica, ubicate sugli altopiani

sommitali del massiccio montuoso di M. Giano – M. Calvo, la cui evoluzione è stata controllata dai processi carsici.

Tali depressioni costituiscono bacini endoreici che drenano verso inghiottitoi, i cui reticoli carsici sotterranei sono tuttavia, ancora poco conosciuti. Le principali depressioni sono: i Piani di Cascina-Palarzano, il Piano di Termine, Prata di Foce, Piani di Cinno, Piano di Nunzio e la Piana di Brignola.

La più estesa piana tettono-carsica è data dalla Piana di Cascina-Palarzano, che si estende per circa 8 km di lunghezza e 4 km di larghezza lungo il versante settentrionale del massiccio di Monte Calvo e del Monte Giano, ad una quota media di circa 950 m s.l.m.; i due pianori, Cascina e Palarzano sono separati dalla cresta dell'Appa-cima che si eleva a circa 1100 m s.l.m.

In posizione quasi baricentrica, è situato l'inghiottitoio di Palarzano, detto localmente *lu gnottetùru* che alimenta le sorgenti cascinesi poste ai piedi di Monte Giano, lungo il corso del F. Velino. Molto più contenute sono le dimensioni della Piana di Prata Cagno, al piede del versante meridionale dell'omonimo rilievo, e dei Piani di Foce, al centro delle quali sono ubicati inghiottitoi attivi.

Ancora poco conosciute sono le forme carsiche ipogee. Tra esse, la Grotta di Zarrante, ubicata nel comune di Cagnano Amiterno, alla quale è legata una leggenda popolare che narra di antiche processioni e riti praticati il giorno della Candelora.

L'ingresso della grotta, chiuso da oltre un trentennio, conduceva attraverso un piccolo cunicolo a un'ampia sala, da cui si diramava un tortuoso cunicolo.

Nel comune di Antrodoco è invece ubicata la Grotta Oscura, il cui ingresso è posto in prossimità della S.S. 4, comprendente una serie di cunicoli di non agevole percorrenza, e pareti ricche in concrezioni.

4.2.4. - Modellamento glaciale e nivale

Processi di modellamento glaciale non risultano attivi all'interno dell'area di studio, dove peraltro sono molto diffuse le tracce di antiche fasi di modellamento glaciale formati nel corso dell'ultimo stadio del *Würm*.

Antichi orli di circo glaciale sono riconoscibili - a partire da nord - sul versante SW e SE di Monte Cambio, di Colle di Pozze e di Iaccio Crudele, e molto estesi, lungo il versante settentrionale del gruppo M. Elefante – M. Valloni.

Frequentemente, nel settore inferiore dei cir-

chi glaciali sono segnalati e cartografati (ANGELINI *et alii*, 2004) depositi di materiale detritico e, più raramente, cordoni morenici. Attualmente, alle quote più elevate, esplicano in maniera energica la loro azione i processi di modellamento di tipo nivale.

I processi erosivi di tipo nivale hanno dato origine a nicchie di nivazione lungo i versanti settentrionali di M. Ritornello e di M. Cambio (fig. 21); in particolare, tracce di valanga risalenti alla stagione invernale 1982-83 sono segnalate lungo la strada statale n. 471 (ANGELINI *et alii*, 2004).

Processi di geliflusso generalizzato sono, infine, presenti in tutto il territorio del foglio nelle fasce altitudinale maggiori.

5. - LE FRANE

5.1. - FRANOSITÀ STORICA

Le principali banche dati attualmente esistenti: IFFI – Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia (ISPRA, 2014) e l'Inventario dei fenomeni franosi e situazioni di rischio da frana del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME TEVERE, 2014) forniscono informazioni relative a eventi franosi relativamente recenti, ovvero avvenuti negli ultimi decenni, a partire dal 1990 circa. Queste informazioni sono state verificate e inserite nella Carta inventario dei fenomeni franosi utilizzata nella definizione della suscettibilità da frana (cfr. § paragrafo 7).

Parallelamente, è stata effettuata una ricerca delle segnalazioni e notizie storiche relative a eventi franosi avvenuti nel passato.

Per quanto riguarda l'intervallo di tempo compreso tra gli inizi del 900 e il 1990 circa, le principali fonti di informazione sono risultate il Progetto AVI – Sistema Informativo sulle Catastrofi Idrogeologiche (CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE, 2014) e uno studio realizzato dal Servizio Geologico d'Italia (CATENACCI, 1992); per contro, presso gli uffici tecnici delle amministrazioni locali non sono state rinvenute segnalazioni di eventi, se non eccezionalmente.

In ogni caso, non risultano acquisite segnalazioni di eventi di particolare rilievo, sia per quanto riguarda le dimensioni dei fenomeni franosi che gli effetti sull'antropizzato. Nel Progetto AVI sono riportate soprattutto segnalazioni di frane da crollo, e conseguenti interruzioni e danni sulla SS n. 4 Salaria (come ad es. la frana del 30/9/1962, con il danneggiamento di una autovettura e il ferimento di due persone, all'altezza del km 111+500).



Fig. 21 – Il versante settentrionale della dorsale M. di Cambio – M. Iacci, interessato da numerose forme di modellamento nivale.
 - The northern slope of Di Cambio Mt – Iacci Mt. ridge, affected by nivation landforms.

In CATENACCI (1992) non sono riportate segnalazioni di eventi di particolare rilievo. Sono presenti, infatti, soltanto generici riferimenti a eventi pluviometrici eccezionali (come quelli del 5 ottobre 1979 in provincia di Rieti e del 13 giugno 1986 in provincia dell'Aquila, in concomitanza del quale il fiume Aterno è disalveato nel territorio del comune di Montereale, allagando alcune abitazioni della frazione di Marana che vennero evacuate) o alla esistenza di movimenti franosi come quelli che nel 1963 coinvolgono la Strada Provinciale Picente e una strada comunale nel comune di Montereale.

Relativamente all'intervallo storico precedente gli inizi del 900, un ruolo importante - come fonte di informazioni - è quello svolto dai lavori di Roberto Almagià sulla distribuzione dei principali fenomeni franosi avvenuti nel corso del XIX secolo (fig. 22).

Parallelamente, è stata svolta una ricerca bibliografica delle segnalazioni di eventi franosi antichi riportate in documenti e cronache con-

sultati presso la Biblioteca Nazionale Centrale Vittorio Emanuele II in Roma, Biblioteca Casanatense, Biblioteca della Società Geografica Italiana, Biblioteca dell'Accademia nazionale dei Lincei e Corsiniana, Biblioteca della fondazione Marco Besso e la Biblioteca dell'Archivio di Stato (FIORE, 2011).

Gli eventi individuati sono i seguenti:

- XII secolo: una grande frana distrugge il villaggio di Firenzuola presso Accumoli, immediatamente a nord del limite settentrionale del Foglio Antrodoco. Il villaggio viene distrutto da una frana, di cui all'inizio del 900 (ALMAGIÀ, 1910a) poteva notare ancora la nicchia di distacco. Secondo l'Autore, la frana era stata originata dalle piogge e dal contemporaneo scioglimento dei ghiacci.

- 1477: una grossa frana danneggia il villaggio di Tufo presso Accumoli nell'alta valle del Tronto. La frana cominciò a distaccarsi la notte del 14 aprile seppellendo sette case (fig. 23). Un'altra frana si verifica nello stesso periodo presso

Mazzancolli, un paese che si trova tra S. Paolo e Poggio d'Alpi. È una frana circoscritta ma molto profonda (CAPPELLO, 1826).

- 14 aprile 1816: tra Accumoli e Arcuata in seguito a copioso scioglimento delle nevi, una frana marnosa scoscese deviando alcuni corsi d'acqua, fino a seppellire alcune case, il movimento dura 3 giorni ed è molto lento (ALMAGIÀ, 1910a).

- 1820: frana lungo il fiume Velino presso Posta, essa si verificò la prima volta nel 1820-1821 e si rinnovò in seguito a forti piogge, ostruendo ripetutamente il corso del fiume (ALMAGIÀ, 1910a).

- 1836: l'erosione del Velino in piena origina una frana ad est dell'abitato di Pendenza, che ostruisce il corso del fiume e inonda completamente tutta la Piana di San Vittorino. La frana è

talmente enorme che le fu dato persino un nome nelle piante disegnate per l'occasione: "Borrone Superiore". La pianura fu ridotta ad una enorme palude fangosa, dove le acque continuarono a depositare materiale d'ogni sorta (BERSANI *et alii*, 2008).

- Estate 1845: si verifica una grossa frana sul ripido fianco orientale del monte Corno (ALMAGIÀ, 1910a).

- 1862 piena del fiume Velino: nella notte tra il 4 e il 5 settembre il fiume innalza gli argini di 5 metri e assieme ad una frana ad Antrodoto distrugge una chiesa, un convento, 29 case causando la morte di 39 persone (MOSCA, 1999).

- Giugno 1883: frana presso Isola del Gran Sasso (ALMAGIÀ, 1910a).



Fig. 22 – Stralcio tratto da: Studi geografici sulle frane in Italia. Distribuzione delle principali aree franose nell'Appennino Centrale e Meridionale, scala 1:500.000 (ALMAGIÀ R., 1910b).

- Detail from: Studi geografici sulle frane in Italia. Distribuzione delle principali aree franose nell'Appennino Centrale e Meridionale, scala 1:500.000 (ALMAGIÀ R., 1910b).



Fig. 23 – Rappresentazione di Agostino Cappello, degli eventi franosi del 1477 tratta dal volume XXVIII (1826) del Giornale Arcadico.
- Depiction made by Agostino Cappello regarding the landslides occurred during 1477, coming from volume XXVIII (1826) of the Arcadian Journal.

- 14 aprile 1886: una grande frana seppellisce sette case presso Accumoli nell'alta valle del F. Tronto (ALMAGIÀ, 1910a).

- Febbraio 1888: scende una frana presso Cittaducale danneggiando la linea ferroviaria; ulteriori segni di movimento sono segnalati nel 1903 (ALMAGIÀ, 1910a).

- Luglio 1904: si rinnovano e si accentuano parecchie frane nel territorio compreso tra Posta e Borbona: nelle località Colle della Croce lungo il F. Ratto e Piano di Casale nel comune di Borbona, e in località Cesa Lunga e Cesa arca di Noè nel comune di Posta. Quest'ultima frana, in particolare, nel luglio del 1904 ostruisce il corso del F. Velino (ALMAGIÀ, 1910a).

Nel quadro delle segnalazioni rinvenute relative agli eventi franosi più antichi, che in alcuni casi risalgono al XII secolo, risalta l'assenza di notizie relative all'esteso movimento franoso in località Villa Camponeschi (comune di Borbona), cui peraltro si fa frequentemente riferimento nella narrazione storica delle vicende di quel comune.

Parziale eccezione è data dallo studio di MOSCA (1999) che riferisce, senza tuttavia fornire elementi di dettaglio, il verificarsi di un evento franoso di rilevanti dimensioni intorno al 1200 sul Monte Falascone, che impedì a lungo i collegamenti con il piccolo centro abitato.

Di quest'area si parlerà ulteriormente nel paragrafo seguente.

5.2. - LA CARTA INVENTARIO DEI FENOMENI FRANOSI

Ai fini della definizione della suscettibilità da fenomeni da frana, è stato realizzato un censimento delle frane presenti all'interno del Foglio Antrodoco, i cui dati preliminari sono stati illustrati in AMANTI *et alii*, 2008. Tale censimento fa riferimento ai fenomeni censiti al termine della stagione invernale 2008-2009, ed è stato condotto attraverso l'analisi e la verifica delle informazioni presenti nelle banche di dati esistenti e l'individuazione sul terreno di ulteriori fenomeni franosi precedentemente sconosciuti.

Le principali banche dati di fenomeni franosi consultate sono: IFFI – Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia e l'Inventario dei fenomeni franosi e situazioni di rischio da frana del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) dell'Autorità di Bacino del fiume Tevere.

Il controllo, la verifica e l'integrazione delle informazioni sono stati eseguiti a mezzo di analisi foto interpretativa e rilievi di campagna.

L'analisi foto interpretativa è stata svolta utilizzando il volo base (1965) in scala 1: 33.000 e il volo IGM (1995) in scala 1: 50.000. I rilievi di campagna sono stati svolti alla scala 1: 5.000; i dati raccolti sono stati riportati su una scheda rilevamento IFFI di II livello (AMANTI *et alii*, 1996).

Un ulteriore strumento di acquisizione di dati relativi a fenomeni franosi è consistito nella ricerca bibliografica (MENOTTI *et alii*, 1999; MARTINO *et alii*, 2004) e nella analisi della documentazione acquisita presso le amministrazioni locali e della documentazione dei progetti riportati nel Repertorio Nazionale degli interventi per la Difesa del Suolo (ReNDiS) a cura dell'ISPRA.

I dati raccolti sono stati organizzati in un database e georiferiti in ambiente GIS, utilizzando il software ARC/GIS Esri ©.

Il risultato di tale elaborazione è dato dalla Carta Inventario dei Fenomeni Franosi in scala 1: 10.000, che per esigenze grafiche viene riportata in scala ridotta nella “Carta di Suscettibilità Geologica per Instabilità dei Versanti”

Nel complesso, nell'area del F. Antrodoco sono stati censiti circa 400 fenomeni franosi.

A ciascuna frana è associata una tabella contenente i principali campi di informazione: ubicazione (Provincia, Comune, località); *uso del suolo*; *principali parametri morfometrici* (larghezza e profondità della nicchia, lunghezza totale e volume mobilizzato dalla frana); *litologia*; *tipologia del movimento*; *attività* (stato, stile); *metodologia utilizzata per l'identificazione del fenomeno*; *unità di paesaggio*; *referimento alla scheda IFFI o ad altra banca dati* (quando presente).

Nel corso del lavoro è stato possibile verificare che i dati provenienti dai diversi database consultati sono quantitativamente e qualitativamente molto diversi: nell'area del F. 348, secondo IFFI sono presenti 219 fenomeni franosi; secondo gli studi dell'Autorità di Bacino i fenomeni franosi sono 364. La presenza di un numero di perimetrazioni maggiore nella carta dell'Autorità di bacino si spiega, oltre che per la segnalazione di alcuni fenomeni effettivamente non presenti nell'inventario IFFI, anche per l'inserimento di segnalazioni che non fanno riferimento a fenomeni franosi s.s. ma ad altre tipologie di fenomeni di erosione, come ad es. “area a calanchi”, “fosso in erosione” e “falda di detrito”. Le aree in frana censite si estendono per una superficie complessiva pari a circa il 2% dell'area del foglio.

Numericamente, le frane numericamente interessano prevalentemente la formazione del Flysch della Laga (41%) e le successioni carbonatiche di piattaforma, scarpata e bacino (30%). In misura minore sono interessate la formazione delle Marne a Cerrognana (17%), le successioni calcareo-marnoso-argillose (10%) e i depositi di detrito (2%).

Per quanto riguarda la tipologia del movimento, classificata secondo CRUDEN & VARNES (1996), se si considera il numero degli eventi franosi, prevalgono le frane da crollo (56%), cui seguono gli scivolamenti traslativi (18%).

Se si considera l'estensione delle aree in frana, ponendo a parte le DGPM, i fenomeni di crollo continuano a essere tra i più rappresentati, anche se superati in estensione dalle frane complesse (fig. 24).

L'analisi della distribuzione e della tipologia dei fenomeni in funzione delle unità di paesaggio individuate evidenzia che nei Rilievi carbo-

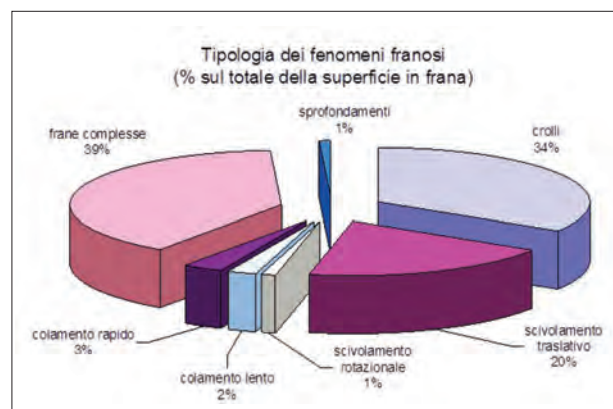


Fig. 24 – Tipologia dei fenomeni franosi censiti nel territorio del F. 348 “Antrodoco”.

- Landslide types censused in the territory of Sheet 348 “Antrodoco”.

natici della successione Umbro-marchigiana e nei Rilievi carbonatici della unità M. Giano-M. Gabbia sono presenti prevalentemente crolli, sovente attivatisi in concomitanza di eventi sismici. Frequentemente, le aree di recapito coinvolgono assi stradali, linee ferroviarie e, talora, aree abitate (figg. 25 e 26). Lungo le falde di detrito presenti al piede dei versanti, sono diffusamente presenti frane da scivolamento del tipo *debris slide o rock avalanche* (fig. 27). Nell'unità dei Rilievi carbonatici della unità G. Sasso-Cittareale, ove come si è già detto un aspetto peculiare è dato dalle caratteristiche forme di erosione pseudocalanchive presenti nelle aree di affioramento delle formazioni calcareo-dolomitiche del Calcare Massiccio e della Corniola, in corrispondenza delle aree maggiormente acclivi, alle forme di erosione superficiale, si accompagnano frane da scivolamento, colate di detrito e crolli.

All'unità Rilievi calcarei, calcareo-argillosi e marnosi appartengono le aree a maggiore franosità del F. 348, quali la Valle dell'Inferno (crolli

e colate di detrito), la Valle Scura e il versante occidentale di M. Falascone, interessato da una DGPV.

Nell'unità dei Rilievi in terreni marnosi, sono state censite prevalentemente frane da scorrimento traslativo, caratterizzate da velocità di movimento molto basse e improvvise accelerazioni, con estensione, in taluni casi, ragguardevole.

Nell'unità Rilievi nella formazione del Flysch della Laga i fenomeni di instabilità interessano sia la potente coltre di alterazione superficiale, che la roccia in posto. Peraltro, trattandosi di una formazione strutturalmente complessa, sono rappresentate tutte le principali tipologie di movimento: dove prevale la componente arenacea, sono frequenti i crolli (fig. 28); dove prevale la componente fine, sono diffusi gli scorrimenti traslativi o rotazionali (figg. 29, 30).

Nell'unità Conche intramontane e valli principali i fenomeni franosi sono localizzati in prossimità delle sponde e del piede dei versanti che individuano le incisioni, e sono legati frequente-



Fig. 25 – Massi del volume di alcuni metri cubi crollati lungo la strada in località Guardiolo (Antròdoco).
- Boulders with a volume of some meter cube fallen on the road (Antròdoco).



Fig. 26 – Al piede del rilievo di Guardiole (Antrodoco), le aree di recapito delle frane da crollo coinvolgono la SS 17 e la linea ferroviaria Terni Sulmona.
 - At the base of Guardiole (Antrodoco) relief, rockfalls invasion area involves the SS 17 and the Terni-Sulmona railway.



Fig. 27– Frane da scivolamento traslativo e da colata nei depositi detritici di versante alla base dei rilievi carbonatici.
 - Debris flow slide and debris flow mobilizing slope deposits at the base of carbonatic reliefs.



Fig. 28 – Frana da ribaltamento lungo le bancate arenacee della formazione del Flysch della Laga.
 - A rock block topple involving arenaceous bank of Flysch della Laga formation.



Fig. 29 – Frane da scivolamento traslativo e frane da colata nella facies pelitica alterata della formazione del Flysch della Laga.
- *Soil slip and compound landslides in weathered silty facies of Flysch della Laga formation.*



Fig. 30 – Frana da scorrimento rotazionale nella formazione del Flysch della Laga.
- *Rotational slide in Flysch della Laga formation.*



Fig. 31– Frane da scivolamento nei depositi di copertura innescate dalla azione di erosione alla base del versante, del Torrente Scura.
- *Debris slide triggered by fluvial erosion at the foot of slope in Scura Valley.*

mente all'azione di scalzamento al piede operata dalla corrente fluviale (fig. 31).

Nella Carta Inventario dei Fenomeni Franosi viene ipotizzata la delimitazione di un fenomeno di deformazione gravitativa profonda di versante che interessa il versante occidentale del rilievo di M. Falascone, in sinistra orografica del F. Velino tra la località Costa della Madonna e la località Aravecchia (fig. 32). Tale area ricade nel comune di Posta e comprende, al suo interno, gli abitati di Laculo e Villa Camponeschi.

Alcune evidenze di carattere geomorfologico inducono a ipotizzare l'esistenza di una fenomenologia di deformazione gravitativa profonda.

In primo luogo, l'andamento del reticolo idrografico. Premesso che il corso del F. Velino presenta nella parte centrale del F. 348 un andamento complessivamente regolare, orientato all'incirca NNE_SSW, che coincide in larga parte con l'importante lineamento strutturale della linea Olevano-Antrodoco *Auctorum*, all'altezza della frazione

di Sigillo, si osserva una improvvisa deviazione del corso del fiume che disegna una pronunciata convessità, che non appare imputabile ad un controllo di tipo strutturale. Anche il reticolo idrografico superficiale minore del versante occidentale di M. Falascone presenta nel settore di cresta alcune forme molto incise che non appaiono tutte impostate su lineamenti tettonici e che non sono giustificabili sulla base dei *normali* processi di erosione superficiale e sembrano riferibili a *trench*.

Infine, il profilo marcatamente convesso del versante, l'intensa produzione di detrito e la presenza di numerosi fenomeni franosi minori e di tracce di movimenti più antichi costituiscono ulteriori indizi morfologici tipici di aree soggette a fenomeni di deformazione gravitativa profonda.

Ai margini dell'area individuata, sono inoltre presenti due grandi forme di sprofondamento indicate con il nome di “Pozzo dell'Arnaro” e “Pozzo dei corvi” (figg. 33a, 33b e 34).



Fig. 32 – Versante occidentale del rilievo di M. Falascone, in sinistra orografica del F. Velino, tra la località Costa della Madonna e la località Aravecchia, interessato da un fenomeno di deformazione gravitativa profonda.

- *The Western slope of Falascone Mt., on the left of Velino River, affected by a deep seated gravitational slope deformation.*



Fig. 33a – Il Pozzo del Larnaro: veduta da SE.

- *The Pozzo del Larnaro: view from SE.*



Fig. 33b – Il Pozzo del Larnaro: particolare dell'interno.
- *The Pozzo del Larnaro: detail of the inner.*



Fig. 34 – Il Fosso dei Corvi.
- *The Fosso dei Corvi.*

Il Pozzo dell'Arnaro è una profonda cavità di forma ellittica, lunga circa 90 m e larga 50 m, allungata in direzione NNE-SSW, la cui origine viene riferita da Parozzani, in una nota del 1887, al terremoto aquilano del 2 febbraio 1703 e confermata, successivamente, da Baratta (BLUMETTI, 1995). Ancora incerta è, invece, la genesi del Pozzo dei Corvi.

All'interno della DGPV principale è riconoscibile un esteso fenomeno di scivolamento rotazionale, di cui è possibile definire due settori di coronamento, posti rispettivamente a quota 1250 e 1050 m s.l.m. In corrispondenza del coronamento inferiore, si estende l'abitato di Villa Camponeschi – da cui la denominazione di “frana di Villa Camponeschi”. Il piede dell'area in frana costituisce, in quel tratto, la sponda sinistra del F. Velino, ed è verosimile che il suo movimento possa avere avuto importanti ripercussioni sulla dinamica fluviale, provocandone l'ostruzione e la formazione di un bacino a tergo. L'assenza di indizi morfologici in tal senso induce a ipotizzare che essi possano essere stati cancellati dall'erosione e che siano, pertanto, molto antichi. È verosimile che la frana di Villa Camponeschi abbia avuto successive fasi di riattivazione, testimoniate dall'esteso macereto di frana presente in località Casale Valenzano, una

delle quali potrebbe corrispondere all'antico evento franoso cui si fa riferimento nella narrazione storica del comune di Posta.

6. - ASPETTI CLIMATICI E PLUVIOMETRICI

La variabilità spaziale del regime stagionale delle piogge, deducibile dai dati delle stazioni considerate, è invece molto contenuta, come illustrato nella sintesi grafica degli indici stagionali riportata in figura 35. L'indice è stato ricavato dalle registrazioni di altezza di pioggia dal 1950 al 2011. Si nota in particolare la sostanziale corrispondenza nell'andamento delle curve delle stazioni ricadenti nel bacino del Velino e dell'Aterno, poste a quote differenti.

Nei due principali bacini idrografici, dell'Aterno e del Velino, le registrazioni decennali delle stazioni meteorologiche testimoniano episodi rilevanti (in termini di apporto alle falde idriche locali) di precipitazione nevosa a quote superiori a 900 metri s.l.m. e dal mese di novembre al mese di aprile. Le acque di fusione si generano sin dalle prime nevi autunnali ma è soprattutto in primavera che il processo raggiunge la massima intensità, condizionando in modo molto marcato il regime dei flussi

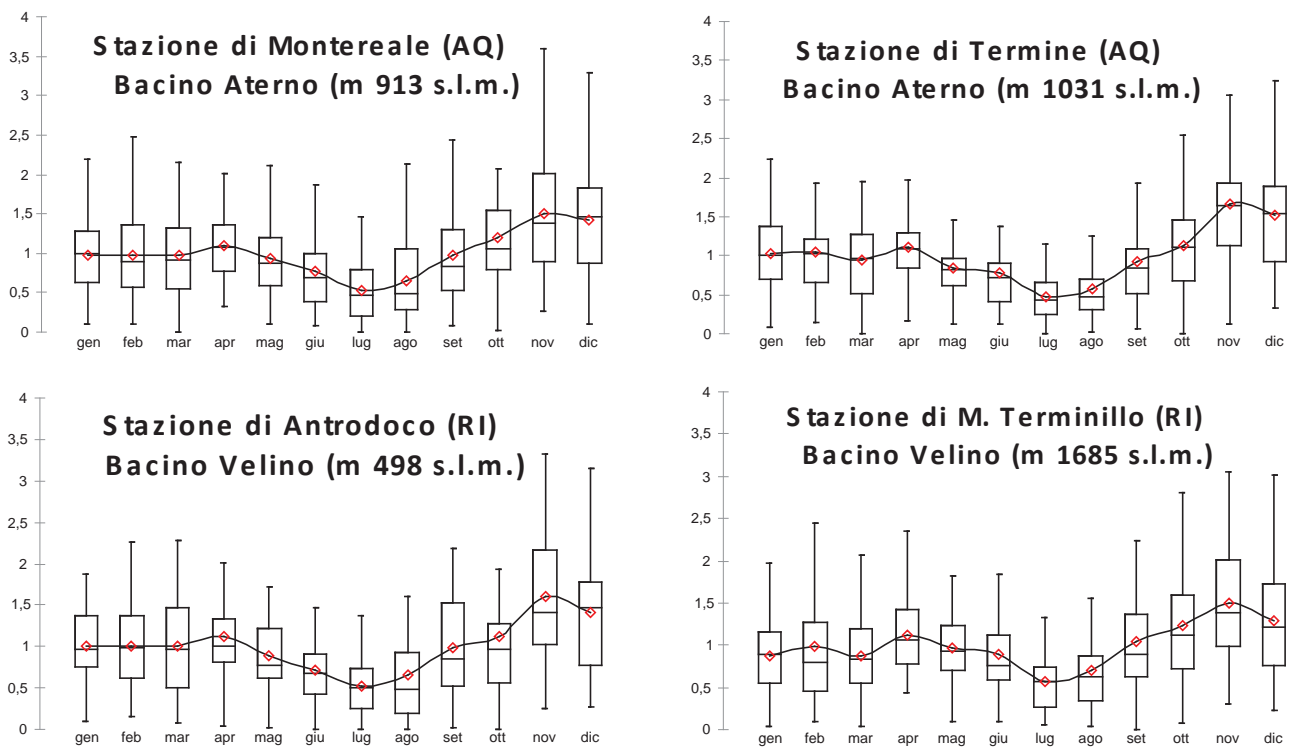


Fig. 35 – Indici stagionali delle piogge in quattro delle stazioni meteo-climatiche rappresentative dell'area studiata ricadenti nei bacini idrografici dei fiumi Aterno e Velino.
 - Seasonal indexes of the rains in four meteorological stations representative of the studied area falling in the catchment areas of the Aterno and Velino rivers.

idrici sotterranei. Il diagramma di figura 36 mostra la relazione esistente tra la media annuale dei valori di temperatura atmosferica calcolata sui dati disponibili degli ultimi 30 anni e la quota delle stazioni termometriche.

Le precipitazioni nevose nell'area del foglio, a causa della loro estrema variabilità, sfuggono a valutazioni attendibili su una possibile evoluzione tendenziale nel tempo. Purtroppo la precipitazione solida misurata nei nivometri riguarda l'altezza cumulata nel periodo di riferimento e non il reale contributo giornaliero. L'esiguo contributo cumulativo annuale della neve alle precipitazioni totali è stato ad ogni modo sommato alle altezze di pioggia. I dati di registrazione di temperatura atmosferica media annuale e di altezza totale di pioggia annuale mostrano, sul lungo periodo, andamenti differenti da zona a zona.

I valori di altezza di pioggia della stazione di Termine (Cagnano Amiterno, L'Aquila), dal 1939 al 2011, e di Campotosto (provincia di L'Aquila; leggermente fuori foglio a NE), dal 1939 al 2011, non forniscono evidenza di una significativa evoluzione tendenziale delle precipitazioni (a parte *trend* locali significativi di breve durata a Campotosto). Anche in corrispondenza delle stazioni di Monte-

reale e di Scoppito (L'Aquila) non si rilevano *trend* significativi fino al 2011.

Alla stazione termopluviometrica di L'Aquila, invece, corrispondono valori totali annui di precipitazione con un *trend* negativo significativo avente un tasso di variazione di $-1,7$ mm/anno. Si nota anche una progressiva riduzione della variabilità dei valori pluviometrici annuali.

Sul versante del Velino i risultati dei *test* condotti sulle serie disponibili forniscono risultati alquanto diversi da quelli del settore dell'Aterno. Nelle tre stazioni di M. Terminillo, di Antrodoco e di Leonessa (Rieti) si osserva, infatti, una debole tendenza negativa che, nelle ultime due stazioni in particolare, è accompagnata da una diminuzione della dispersione dei valori intorno alla media.

Le serie della temperatura atmosferica media mostrano un *trend* positivo statisticamente significativo nella stazione del M. Terminillo (1685 m s.l.m.). Altrettanto non è riscontrabile nella serie di Leonessa, poco distante, ma a quota inferiore (929 m s.l.m.) come illustrato in figura 37. I valori di temperatura atmosferica sono di norma meno dispersi intorno alla media rispetto a quelli delle precipitazioni atmosferiche e quindi un eventuale *trend* che la interessi è più facilmente individuabile.

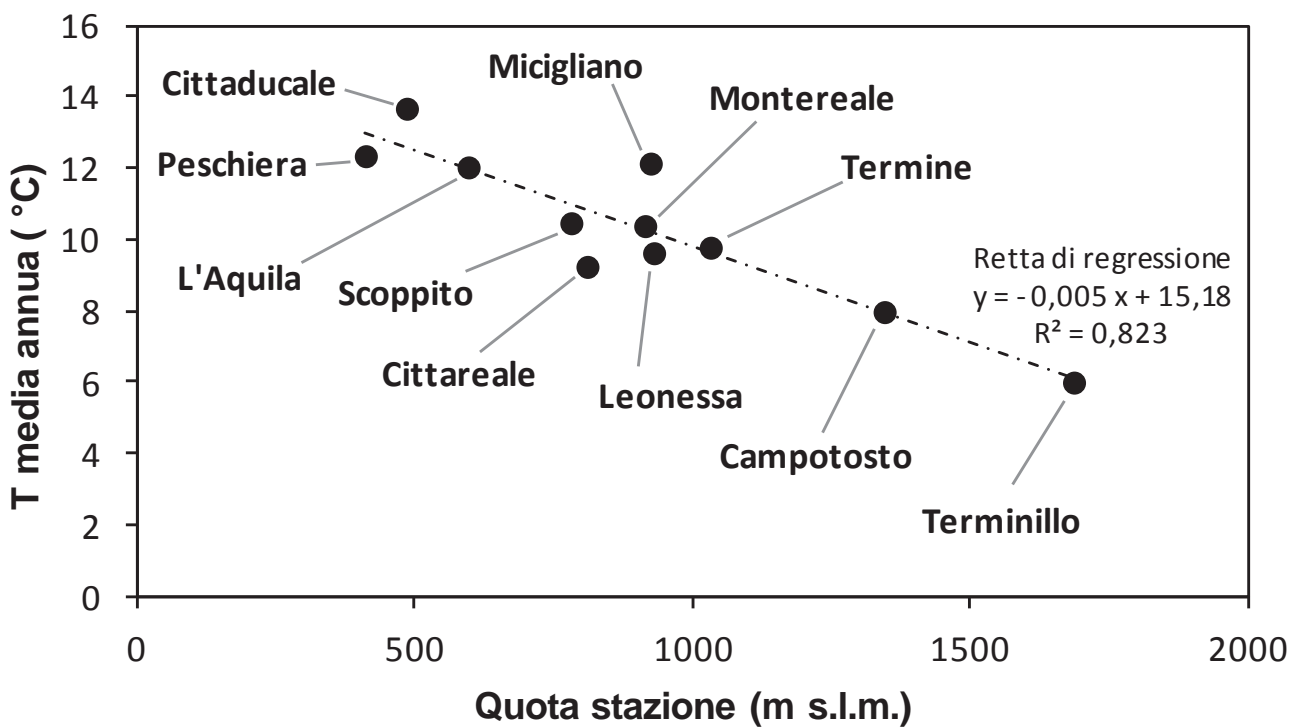


Fig. 36 – Relazione tra i valori di temperatura atmosferica media annua e quota delle stazioni termometriche, calcolata sui dati disponibili degli ultimi 30 anni.
 - Relationship between the values of annual mean atmospheric temperature and altitude of thermometric stations, calculated on available data for the past 30 years.

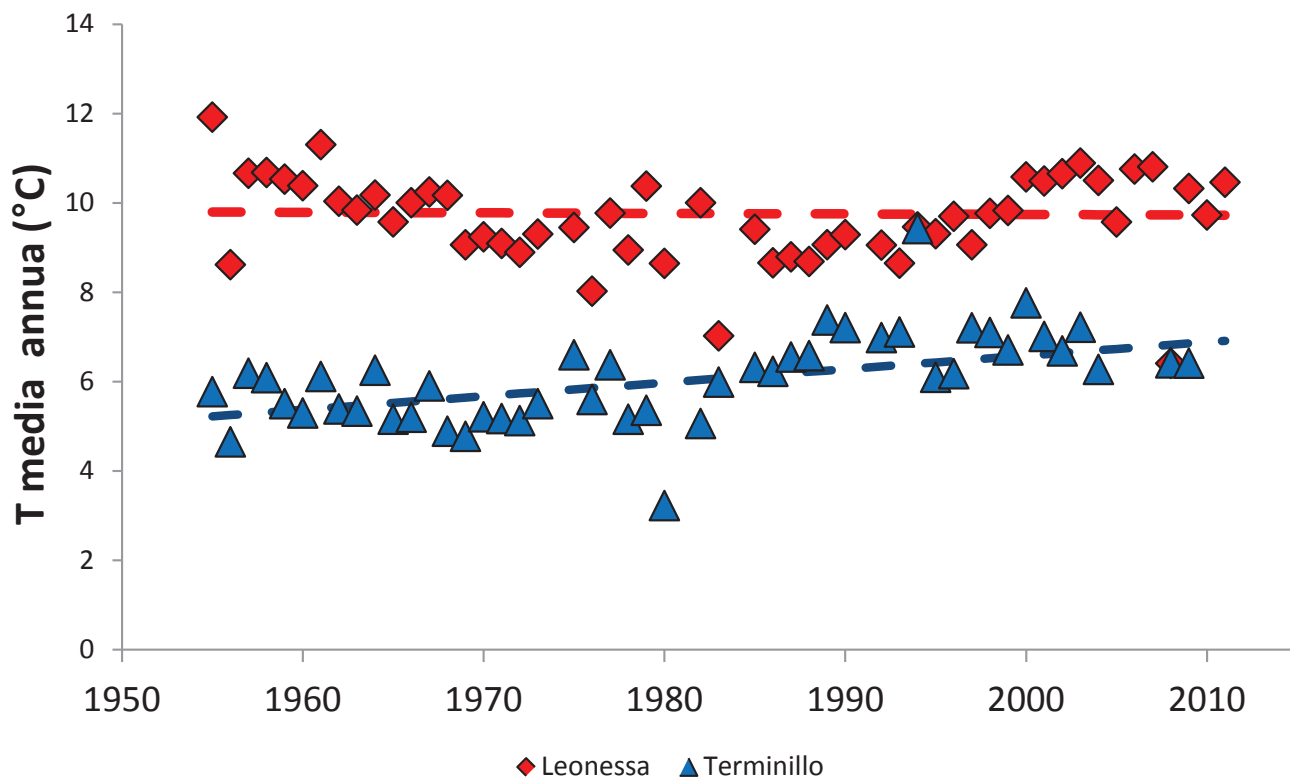


Fig. 37 – Confronto tra le temperature medie annue delle serie temporali delle stazioni di M. Terminillo e Leonessa.
 - Comparison between the mean annual temperature time series of M. Terminillo and Leonessa stations.

Dai dati termometrici e pluviometrici medi annui delle stazioni meteo-climatiche definite nella tabella 9 con rilevazioni di durata pluridecennale sono stati ricostruiti i campi di distribuzione spaziale delle temperature e delle piogge (fig. 38).

Data la buona correlazione tra temperatura atmosferica e quota delle stazioni di rilevamento, le isoterme sono state tracciate nel suddetto elaborato cartografico tramite l'applicazione della funzione di Kernel, ossia una variante dell'interpolazione polinomiale locale. La peggiore correlazione piovosità-quota ha invece comportato la scelta di tracciare manualmente l'andamento delle isoiete in base all'interpolazione dei valori riscontrati nelle singole stazioni, pur utilizzando come riferimento i risultati dell'applicazione sia del metodo sopra descritto sia di quello della triangolazione. Le due elaborazioni ottenute possono essere ritenute, nel complesso, soddisfacenti. L'andamento delle isoterme rispecchia in generale la situazione altimetrica, con valori minimi di temperatura atmosferica in corrispondenza del M. Terminillo e con un evidente aumento verso i settori ad E del Foglio, in particolare verso la Piana Aquilana e nel settore di monte della Valle del F. Velino. Valori relativamente più bassi di temperatura atmosferica si osservano invece nel settore in corrispondenza del lago di Campotosto (quest'ultimo al di fuori dell'area del Foglio), situato all'estremità NW delle pendici del Gran Sasso d'Italia, che probabilmente influenza le condizioni meteo-climatiche locali.

Riguardo alle isoiete, è stato evidenziato un vasto settore con valori più elevati di piovosità

nella parte occidentale dell'area, con un massimo in corrispondenza del M. Terminillo, e nella parte orientale, nel citato settore, meno esteso del precedente, in corrispondenza del lago di Campotosto. Le zone con più bassa piovosità, come prevedibile, si trovano in corrispondenza della Piana Aquilana e del settore di monte della Valle del F. Velino.

Sono stati esaminati i principali elementi meteo-climatici di rilevanza per il bilancio idrico in riferimento agli ambiti territoriali delle principali idrostrutture individuate (tab. 10). Quindi, per ogni idrostruttura sono stati determinati:

a) le precipitazioni, stimate in base ai dati delle stazioni pluviometriche dell'Ufficio Idrografico della Regione Lazio e Abruzzo;

b) l'evapotraspirazione calcolata mediante la formula di Thornthwaite, sulla base delle temperature medie annue valutate dai dati delle suddette stazioni meteo-climatiche;

c) il ruscellamento superficiale, come percentuale degli apporti meteorici (da dati di letteratura per simili situazioni geologiche in ambito regionale; BONI *et alii*, 1986);

d) l'infiltrazione efficace annua (IE), calcolata sulla base dei parametri precedenti, definendo un modello matematico con copertura spaziale sull'intero territorio indagato suddiviso in celle di 20x20 m.

Nel complesso, i discreti valori delle precipitazioni annue e quelli moderati dell'evapotraspirazione potenziale, indicano la disponibilità di risorsa idrica per il deflusso sia sotterraneo sia superfi-

Tab. 9 – *Dati termo-pluvio-nivometrici riassuntivi delle stazioni meteo-climatiche dell'area di studio e dintorni.*
- Main thermo-pluvio-nivometric data of the meteo-climatic stations in the study area and surroundings.

Nome stazione	Quota m.l.s.m.	Numero anni di esercizio	Periodo rilevamento dati		Dati pluviometrici			Dati termometrici		
			Piovosità (P)	Temperatura (T)	Media annua mm	mensile cumulata max e valore in mm	mensile cumulata min e valore in mm	Media annua °C	mensile max e valore in °C	mensile min e valore in °C
Campotosto	1344	87	1908-2011	1933-2005	1120**	nov (139)	lug (52)	8	ago (17)	gen (0)
L'Aquila	595	101*	1900-2011	1927-2005	715	nov (93)	lug (33)	12	lug/ago (22)	gen (3)
Monte Reale	913	84	1920-2011	1971-2005	864**	nov (106)	lug (37)	10	ago (20)	gen (2)
Scoppito	780	64	1950-2011	1951-2011	1031**	dic (149)	lug (39)	11	ago (22)	gen (4)
Termine	1031	67	1950-2011	1951-2004	1130**	nov (145)	lug (43)	10	ago (19)	gen (1)
Antrodoco	498	44*	1954-2001	1990-1995	1160	nov (158)	lug (52)	14	lug (23)	gen (5)
Leonessa	929	60*	1951-2011	1955-2011	1471**	nov (216)	lug (51)	10	ago (19)	gen (2)
Posta	721	27*	1951-2000	-----	1237	dic (168)	lug (44)	-----	-----	-----
Terminillo	1685	56*	1955-2011	1955-2011	1610**	nov (195)	lug (73)	6	ago (15)	feb (-1)
Amatrice	955	92*	1921-2012	1957-2012	888	nov (110)	lug (39)	10	set (19)	feb (2)

* serie con periodi di interruzione anche di relativamente lunga durata
** comprende contributo precipitazione nevosa

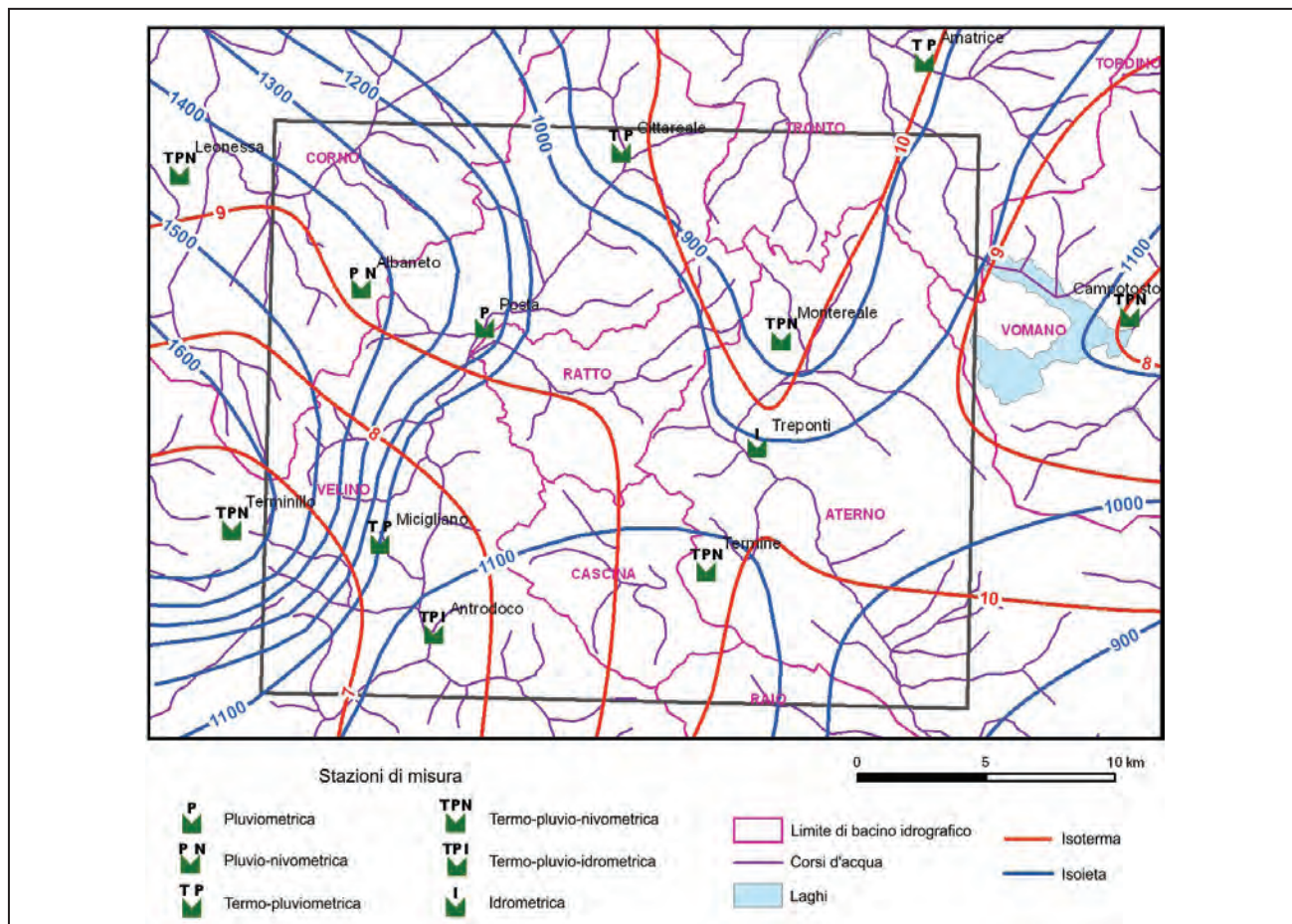


Fig. 38 – Carta delle isoterme e delle isoiete medie annue dell’area di studio, con l’indicazione delle stazioni meteo-climatiche utilizzate.
 - Map of the average annual isotherms and isoiete of the study area, indicating the utilized weather stations.

Tab. 10 – Elementi per la valutazione del bilancio idrico negli ambiti territoriali delle principali idrostrutture individuate.
 - Elements for the evaluation of the water balance in the territorial areas of the main hydrogeological structure identified.

Idrostruttura	Quote (1) m s.l.m.	P (2) mm/a	T (3) °C	E (4) mm/a	R (5) mm/a	IE (6) mm/a
M. Terminillo	700 ÷ 2200	1650	6.0	504	229	900 ÷ 1050
M. Porillo	450 ÷ 1200	1186	13.7	748	263	250 ÷ 350
M. Tolentino	900 ÷ 1550	1464	9.6	624	252	550 ÷ 750
M. Nocella - C.le Moretto	750 ÷ 1600	1186	13.7	748	153	550 ÷ 700
M. Boragine	700 ÷ 1800	1156	13.7	748	175	750 ÷ 800
V. Lunga - Montagnola	900 ÷ 1300	1464	9.6	624	294	600 ÷ 700
M. Poponi - M. Mucchio	700 ÷ 1250	879	10.2	643	165	250 ÷ 300
M. Giano - M. Gabbia	500 ÷ 1800	1100	9.7	627	118	400 ÷ 550
M. Marine - C.le Grande	700 ÷ 1500	1100	9.7	627	142	400 ÷ 500
Rilievi della Laga	850 ÷ 1600	1070	7.9	566	378	50 ÷ 150

(1) intervallo approssimativo delle quote altimetriche dell’idrostruttura
 (2) precipitazione atmosferica
 (3) temperatura dell’aria
 (4) evapotraspirazione (Thornthwaite)
 (5) ruscellamento superficiale
 (6) infiltrazione efficace

ciale, in particolare nei mesi autunnali e primaverili, quando il suolo è solitamente saturo, mentre nei mesi estivi la saturazione del suolo è limitata.

6.1. – ANALISI DEI VALORI ESTREMI PLUVIOMETRICI

Per la definizione di soglie di piovosità che marchino un limite tra il campo di stabilità ed instabilità e che permettano di definire le probabilità di innesco del fenomeno franoso si ricorre spesso ad una metodologia empirica basata sulle “curve di possibilità pluviometrica”.

Con tali curve si rappresenta la relazione fra le altezze di precipitazione e la loro durata, per un determinato valore del periodo di ritorno.

Dagli annali idrologici della Regione Abruzzo e dalla Regione Lazio sono stati acquisiti i valori di massima intensità di pioggia annuale per varie durate di sette stazioni pluviografiche ubicate nell'area in studio, al fine di ricavare, per ciascuna di esse, le curve di possibilità pluviometrica.

In particolare sono state analizzate le serie pluridecennali delle stazioni di Campotosto, L'Aquila, Montereale, Termine, Leonessa, Posta e M.Terminillo. Le altre stazioni delle due reti idrografiche regionali non dispongono di un numero sufficiente di dati. Negli annali sono riportati i valori delle massime altezze annuali di pioggia per durate pari a 1,3, 6, 12 e 24 ore.

Le curve sono definite attraverso la formula:

$$h_{tT} = a^t \quad (1)$$

dove t è la durata della precipitazione in ore, T il periodo di ritorno in anni, h_{tT} è la precipitazione di durata t e periodo T mentre i due coefficienti a ed n dipendono dal periodo di ritorno T .

Le curve vengono ricavate applicando alle curve di frequenza delle serie storiche dei massimi annuali delle piogge di ciascuna durata un determinato modello probabilistico come il log-normale, TCEV, Gumbel, etc. tramite la stima dei parametri del modello. In tutti i casi è necessario effettuare un *test* statistico di verifica di adattamento dei dati reali al modello prescelto. Nel caso in questione è stato adottando il modello di Gumbel, che esprime la probabilità che una variabile aleatoria X sia superiore a una soglia prefissata x , secondo la seguente formula a doppio esponenziale:

$$P(X \leq x) = e^{-\alpha(x-\mu)}$$

Per ricavare i parametri, α ed μ , è stato applicato il metodo dei momenti in cui si assume che la media e la varianza campionaria siano uguali a quelle della popolazione.

I due parametri di Gumbel si ricavano quindi dalle relazioni che li legano alla media ed alla varianza:

$$\alpha_t = \frac{1282}{s}$$

$$u_t = \mu - 0.45s$$

dove s è la deviazione standard e μ è la media.

Infine, il valore h_{tT} si ottiene per ogni durata t , fissato il periodo di ritorno T (anni), dalla seguente relazione:

$$h_{t,T} = u_t - \left(\frac{1}{\alpha_t} \ln \left(\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right) \right)$$

Con i valori di h_t , T ottenuti dalle serie storiche delle sette stazioni pluviometriche sono state costruite per interpolazione le curve di possibilità pluviometrica riportate nei grafici sottostanti per tempi di ritorno pari a 5, 10, 20, 50 e 100 anni.

Da tali curve si ricavano i parametri a ed n della funzione di potenza (1) che, oltre a caratterizzare ciascuna stazione, possono risultare utili quando si presenti l'esigenza di regionalizzare i dati puntuali dei massimi annuali delle stazioni.

I risultati ottenuti, riportati in figura 39, mostrano che l'intensità massima delle piogge annuali è più elevata nelle stazioni ubicate nel settore occidentale del foglio. Si evidenzia che i risultati relativi alle stazioni di Posta e di Leonessa, nel settore del Velino, siano molto simili tra loro mentre alla stazione del Terminillo, ubicata poco al fuori dai limiti del foglio, corrispondono valori inferiori, probabilmente a causa dell'altitudine dove più significativi sono gli apporti nevosi stagionali.

Le curve di possibilità pluviometrica, ai fini pratici, assumono interesse soprattutto quando si voglia marcare delle soglie critiche di precipitazione associate a determinati tempi di ritorno. È necessario quindi individuare una relazione causa-effetto tra piogge generatrici e conseguenze al suolo con una *back analysis* degli eventi meteorici e franosi. Nel caso in questione, non essendo disponibili informazioni relative ad una cronologia dei dissesti nell'area del foglio, non si è potuto procedere ad una stima di valori critici di pioggia.

A questo proposito si sottolinea che i valori di soglia sono considerati puntuali se riferibili ad un intorno di limitata estensione rispetto alla stazione di misura o areali se estendibili ad un bacino. Il primo caso interessa i dissesti di limitata ampiezza, come le frane, mentre fenomeni più estesi come le piene fluviali rientrano nel secondo caso.

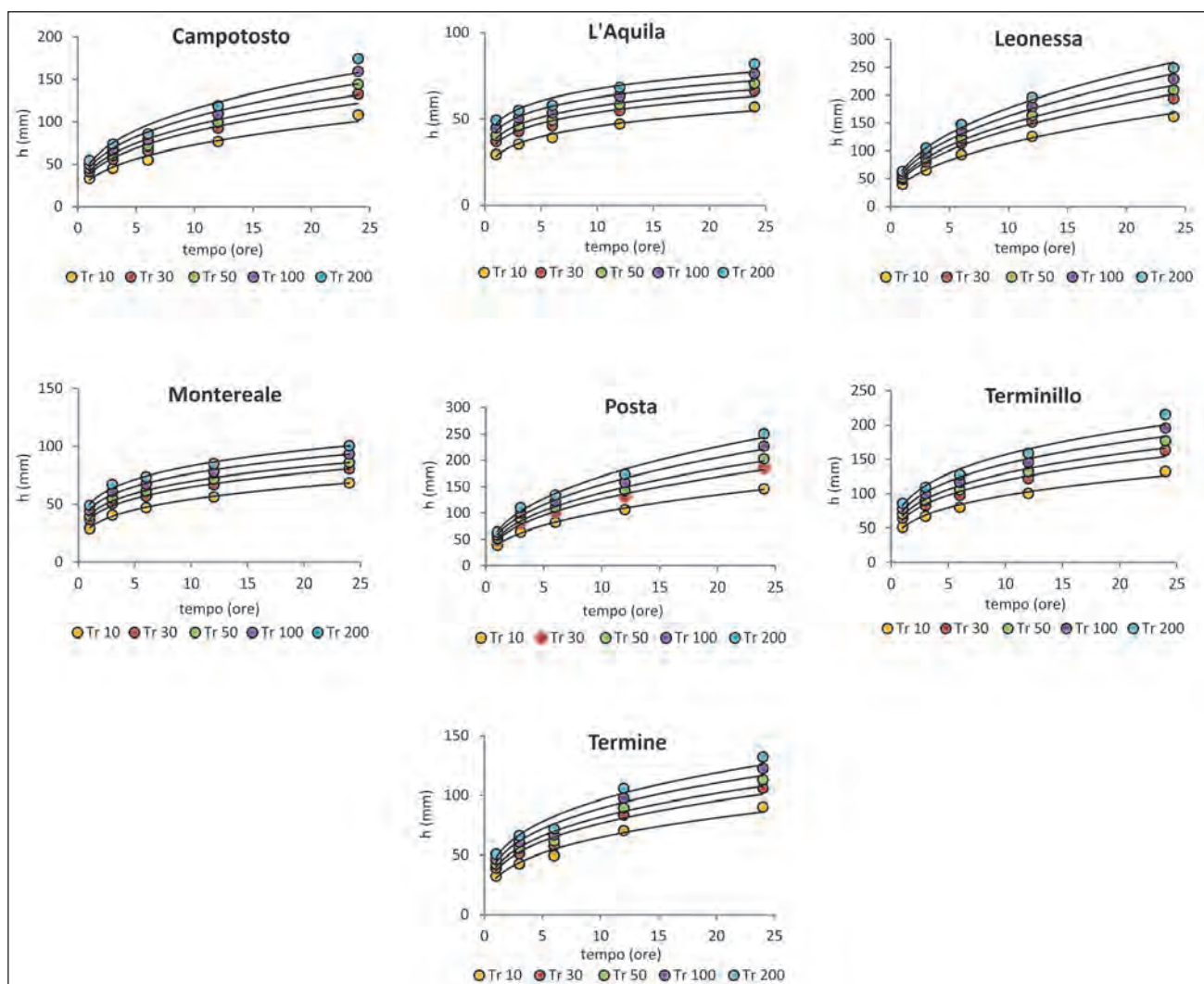


Fig. 39 – Curve di possibilità pluviometrica con Tempi di ritorno 10, 30, 50, 100, 200 anni per le sette stazioni indagate.
- Pluviometric possibility curves with return time 10, 30, 50, 100, 200 years for the seven investigated stations.

7. - LA VALUTAZIONE DELLA PROPEN- SIONE AL DISSESTO - METODI STATI- STICI

7.1. - INTRODUZIONE ALLE METODOLOGIE DI VALU- TAZIONE

Gli approcci per la valutazione della suscettibilità da fenomeni di dissesto possono essere classificati in deterministici, che tengono conto delle relazioni fisico-meccaniche note a priori tra le determinanti geologiche del fenomeno, o statistici, volti ad individuare quali fattori sono associati maggiormente all'evento franoso.

Mentre i primi si basano in generale sulla valutazione del fattore di sicurezza per un modello di pendio indefinito dato (HAMMOND *et alii*, 1992), i secondi sono basati su diverse metodologie afferenti alla statistica multivariata, come per

esempio la regressione logistica (CHAU & CHAN 2005, REGMI *et alii* 2014, AKBARI *et alii* 2014, BAIE *et alii*, 2010), l'analisi discriminante (GUZZETTI *et alii* 2005b, GUZZETTI *et alii*, 2006) fino alle più recenti tecniche basate su reti neurali (LEE *et alii*, 2007, PRADHAN & LEE 2010, MELCHIORRE *et alii*, 2008, FALASCHI *et alii*, 2009).

La finalità di questo lavoro è stata quella di testare differenti metodologie e diversi approcci: da una parte l'approccio di tipo deterministico utilizzando il modello di pendio infinito in condizioni stazionarie e non stazionarie, dall'altra l'approccio statistico multivariato effettuato con tre diversi modelli: l'analisi condizionale, l'analisi logistica per eventi rari e la segmentazione gerarchica (alberi classificatori).

Per ogni tipo di approccio è stata valutata la *performance* in termine di capacità predittiva e di comprensione del fenomeno.

Essendo la finalità del lavoro una comparazione di metodi vengono presentate anche le elaborazioni di metodi caratterizzati da *performance* medio-basse.

Sono stati anche proposti differenti metodi di classificazione delle mappe di suscettibilità al fine di verificare in che misura la scelta di uno o dell'altro criterio influisca sulla qualità dei risultati.

7.2. - DATI DI BASE

La maggior parte delle variabili esplicative considerate fanno parte di banche dati nazionali, di facile reperibilità e a basso costo di acquisizione, al fine di rendere l'elaborazione il più generale e ripetibile.

Ove questo non sia stato possibile le informazioni sono state acquisite *ex novo*.

Tutti i livelli informativi sono stati inclusi in un database geografico con sistema di riferimento UTM ED50 fuso 33.

7.2.1. - *Inventario dei fenomeni franosi*

Di questo aspetto è stato diffusamente trattato in precedenza, si citeranno solamente gli aspetti principali.

Partendo dall'Inventario dei Fenomeni Franosi Italiani (IFFI) (ISPRA, 2008), i dati relativi ai fenomeni di versante sono stati acquisiti attraverso verifiche e osservazioni di campagna, rilievi foto interpretativi ed indagini storiche su archivi.

Da tale analisi è stata realizzata la Carta della distribuzione dei dissesti, con un grado di dettaglio alla scala 1:10.000 (fig. 40).

Dal database delle frane sono stati eliminati gli elementi codificati come scarpate ad alto angolo soggette a crollo, deformazioni gravitative profonde di versante (DGPV), crolli e *debris flows* ottenendo quindi un dataset di 159 frane per una superficie complessiva di circa 3,9 km². Dal punto di vista areale le frane interessano prevalentemente le successioni carbonatiche di piattaforma, scarpata e bacino (58%) e la formazione del flysch della Laga (29%). In misura minore interessano le successioni marnoso-arenacee del Miocene (5%) e i depositi di detrito (8%). Per quanto riguarda la tipologia del movimento, se si considera il numero degli eventi franosi, prevalgono gli scivolamenti traslativi (30%) cui seguono frane di tipo complesso (27%). Se si considera l'estensione delle aree in frana, ponendo a parte le DGPV, i fenomeni classificati come colate lente sono tra i più rappresentati (44%) e a seguire le frane complesse (29%).

7.2.2. - *Carta litologica*

Di questo aspetto è stato trattato nel cap. 3, in sintesi si riepiloga quanto segue.

Per definire gli aspetti litologici è stata utilizzato il Foglio n. 139 "L'Aquila" della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000, che rimane al momento l'unica fonte geologica ufficiale del territorio nazionale, in attesa del completamento della Nuova Carta Geologica del foglio Antrodoco alla scala 1:50.000 (progetto CARG).

La qualità del dato risulta piuttosto bassa, a causa della scala di rilevamento e del mancato aggiornamento della cartografia, che risale ai primi anni '50.

Sono stati effettuati degli accorpamenti su litologie con analogo comportamento meccanico, in particolare su formazioni carbonatiche a spiccato comportamento litoide, definendo in tal modo 8 classi (Depositi quaternari, Depositi quaternari cementati, Flysch, Calcari marnosi, Marne e Marne argillose, Alternanze di calcari Argille e marne, Calcari stratificati e Calcari Dolomitici Dolomie) la cui distribuzione è riportata in figura 40.

7.2.3. - *Accelerazione sismica*

L'azione sismica viene valutata a partire da una "pericolosità sismica di base", ovvero in condizioni ideali di sito di riferimento rigido, con superficie topografica orizzontale. Il dato di pericolosità sismica del territorio nazionale è fornito dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), pubblicato sul sito <http://esse1.mi.ingv.it/>.

I dati sono determinati in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento) i cui nodi distano circa 10 km tra loro.

Adottando un intervallo di riferimento di 30 anni, i valori sono piuttosto uniformi, (oscillano tra 22 e 26 g*100), e risultano distribuiti in maniera crescente proseguendo da SE verso NE (fig. 41). Questo strato informativo non rappresenta la vera risposta sismica locale, che dipende invece da molti altri parametri, ma è stato comunque inserito nell'analisi, in considerazione del fatto che l'area di studio è una delle zone a più elevato rischio sismico in Italia.

7.2.4. - *DTM*

Il modello digitale del terreno (DTM) utilizzato è quello realizzato dall'Istituto Geografico Militare (IGM) con copertura nazionale, ottenuto interpolando i dati orografici IGM in modo da

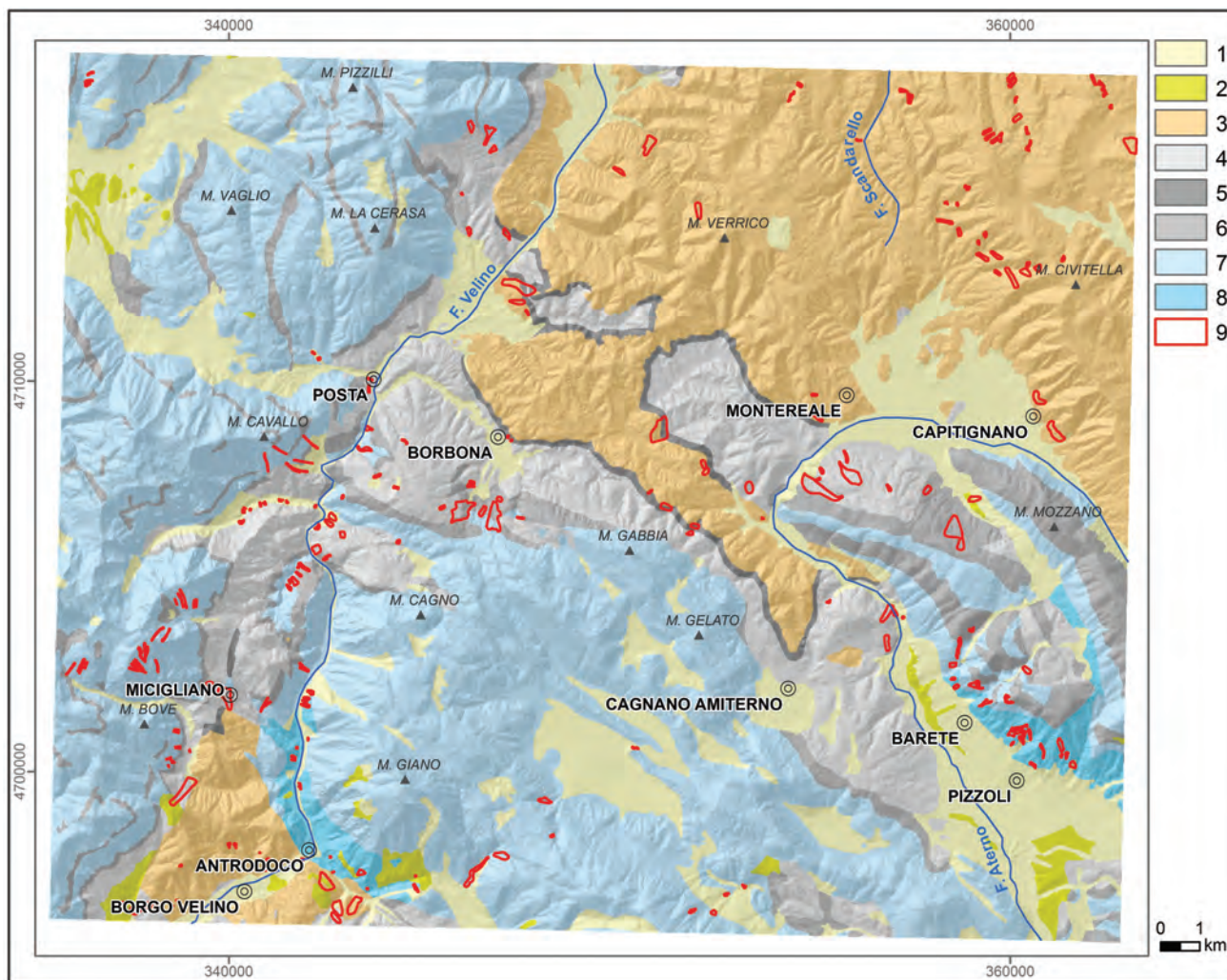


Fig. 40 – Carta litologica e Distribuzione frane. 1 Depositi quaternari; 2 Depositi quaternari cementati; 3 Flysch; 4 Calcari marnosi; 5 Marne e Marne argillose; 6 Alternanze di calcari, Argille e marne; 7 Calcari stratificati; 8 Calcari Dolomitici e Dolomie; 9 Frane.
 - *Lithological and landslide inventory map: (1) Quaternary deposits; (2) Consolidated Quaternary deposits; (3) Flysch deposits; (4) Marly limestones; (5) Marls and clay marls; (6) Limestones, marls and clays alternations; (7) Stratified limestone; (8) Dolostones; (9) Landslide inventory.*

ottenere una matrice di passo regolare di 20 m.

La variabile di tipo continuo è stata categorizzata in 6 modalità all'interno del *range* (min = 449 m slm; max = 2150 m slm), (fig. 42).

Dai valori di quota, attraverso l'utilizzo di ArcGis (Esri) con estensione *Spatial Analyst* (McCoy J. et alii, 2004), sono stati ricavati la pendenza, l'esposizione e la curvatura del territorio in studio.

7.2.5. - Pendenza

Nella mappa in figura 43 è visibile la distribuzione dell'acclività i cui valori sono compresi tra 0 e 75 gradi con i massimi localizzati nella porzione di territorio posta a SO dell'area di studio.

Dal punto di vista morfologico, le pendenze dei versanti rivestono una notevole importanza nel concorrere a determinare l'entità dei deflussi,

in particolar modo per quanto riguarda la loro velocità di scorrimento.

La variabile continua è stata discretizzata in 7 classi (0-5; 5-10; 10-20; 20-30; 30-40; 40-50; 50-75).

7.2.6. - Esposizione

L'esposizione dei versanti identifica la direzione, secondo la massima pendenza, del massimo tasso di cambiamento del valore altimetrico di ogni cella rispetto a quelle vicine (fig. 44). Tale variabile è misurata in gradi con valori continui da 0° a 360° in senso orario.

La suddivisione adottata prevede l'utilizzo di 4 modalità aventi ciascuna una ampiezza di 90° e pertanto la suddivisione è 0-90, 90-180, 180-270, 270-360.

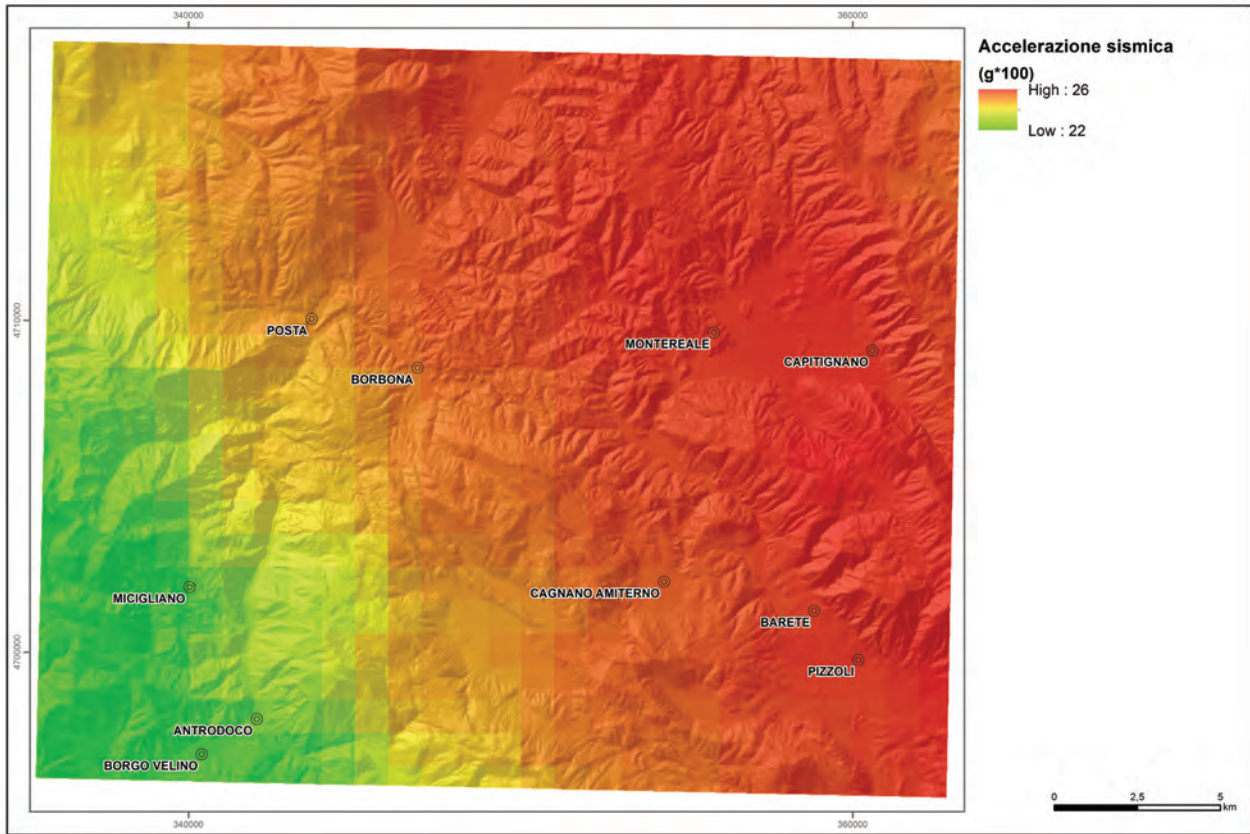


Fig. 41 – Mappa dell’accelerazione sismica.
- Seismic acceleration map.

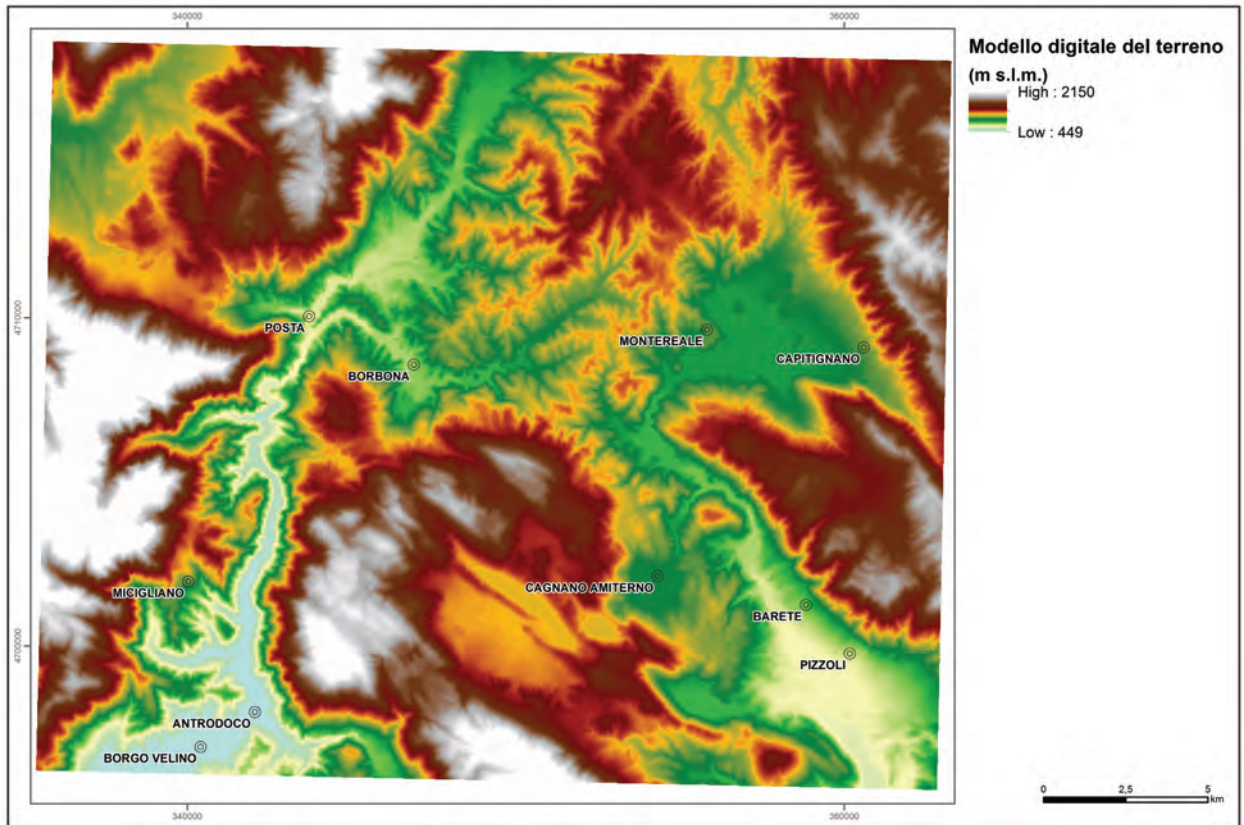


Fig. 42 – Modello digitale del terreno.
- Digital elevation model.

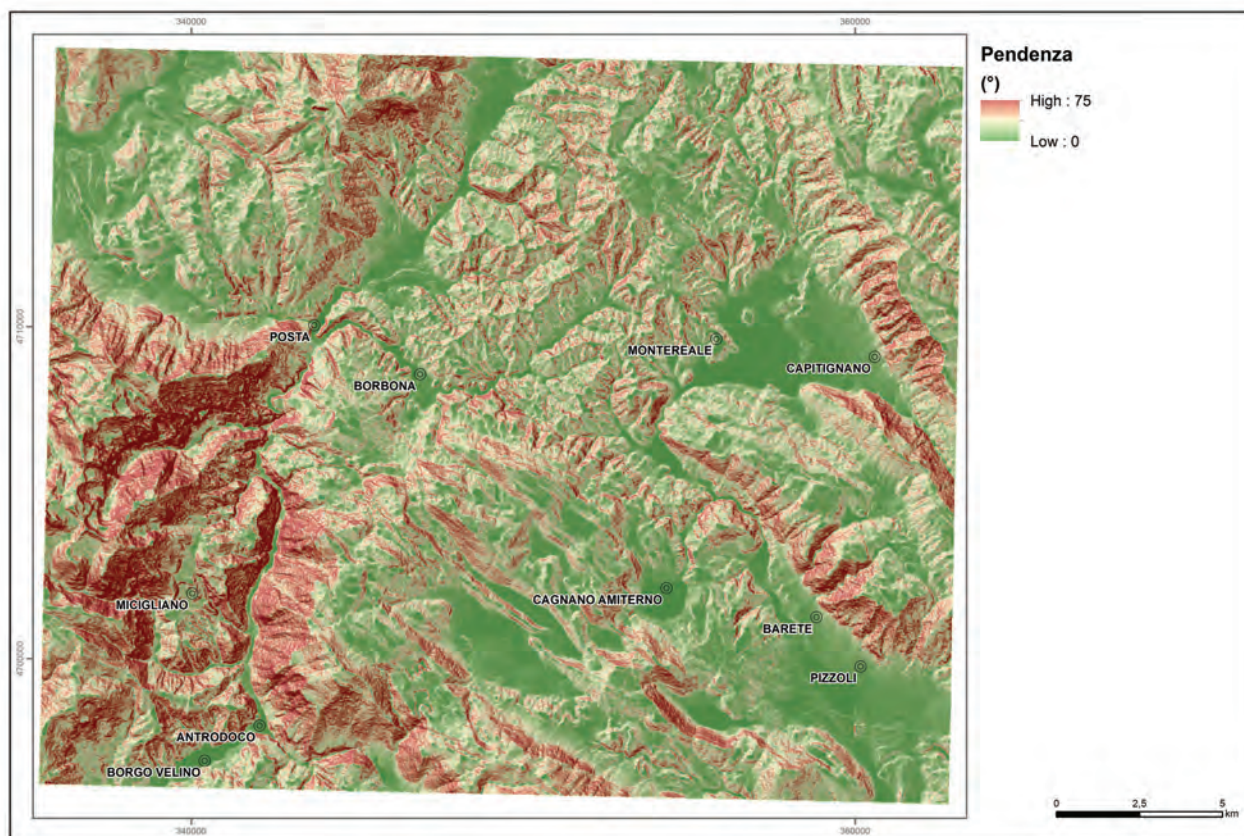


Fig. 43 – Mapa della pendenza.
- Slope map.

7.2.7. - Curvatura

La curvatura dei versanti (fig. 45) esprime la derivata seconda della curva di superficie passante in ogni cella. Valori positivi esprimono la convessità del versante, quelli negativi la sua concavità, e valori prossimi allo zero un flesso, cioè una superficie né concava né convessa. Dal punto di vista applicativo questa variabile può essere usata per descrivere le caratteristiche fisiche di un bacino di drenaggio (intensità di drenaggio, azione erosiva dei corsi d'acqua, ecc.), consentendo di analizzare l'accelerazione e la decelerazione dei deflussi, o la loro convergenza e divergenza.

È stata operata una suddivisione in 3 classi in modo da identificare i versanti come concavi, piani o convessi.

7.2.8. - Pluviometria

Questa variabile utilizzata è stata derivata dall'elaborazione di curve di probabilità climatica che mettono in relazione una data durata di pioggia avente un fissato tempo di ritorno con la relativa altezza. Questo aspetto è stato approfondito nel cap. 6 a cui si rimanda per gli approfondimenti.

In questa sezione si richiama sommariamente lo schema di lavoro. Partendo dai dati pluviometrici forniti da una stazione di misura, è possibile eseguire le elaborazioni necessarie per ottenere le curve che descrivono l'altezza delle precipitazioni (h) in funzione della loro durata (t).

L'equazione che collega queste due variabili ha la seguente forma:

$$h \text{ (mm)} = a t^n$$

dove

a = variabile funzione del tempo di ritorno;

n = costante per un dato valore di t ;

e prende il nome di curva segnalatrice di possibilità climatica o pluviometrica.

L'analisi è stata effettuata utilizzando le curve di possibilità pluviometrica come proposto da GUMBEL (1958). I dati pluviometrici necessari al calcolo sono stati reperiti sugli Annali Idrologici delle stazioni pluviografiche (disponibili al sito Ispra: <http://www.acq.isprambiente.it/annali-pdf/>) definite nella tabella 11; l'intervallo temporale di riferimento è 1970-2002 e l'ubicazione è visibile in figura 46.

Il numero di stazioni utilizzate è superiore a

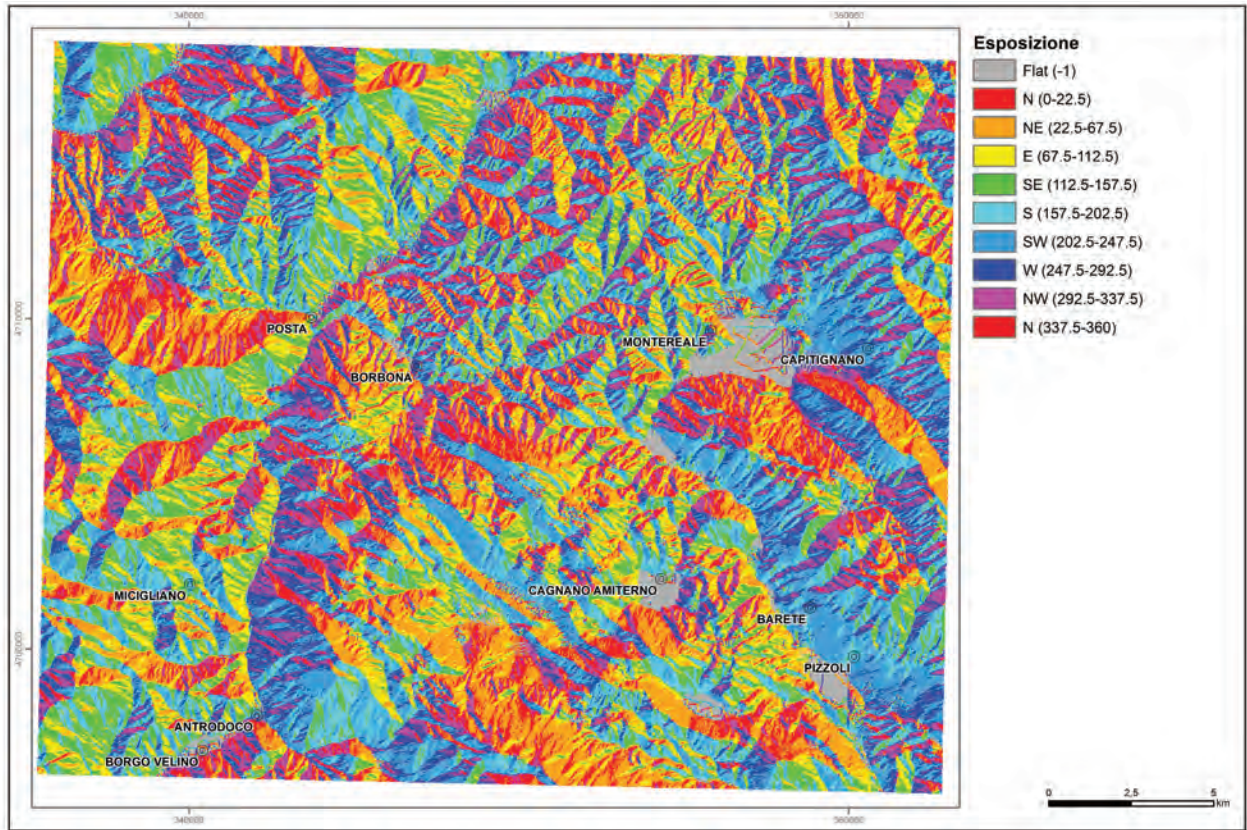


Fig. 44 – Mappa dell'esposizione.
- Exposition map.

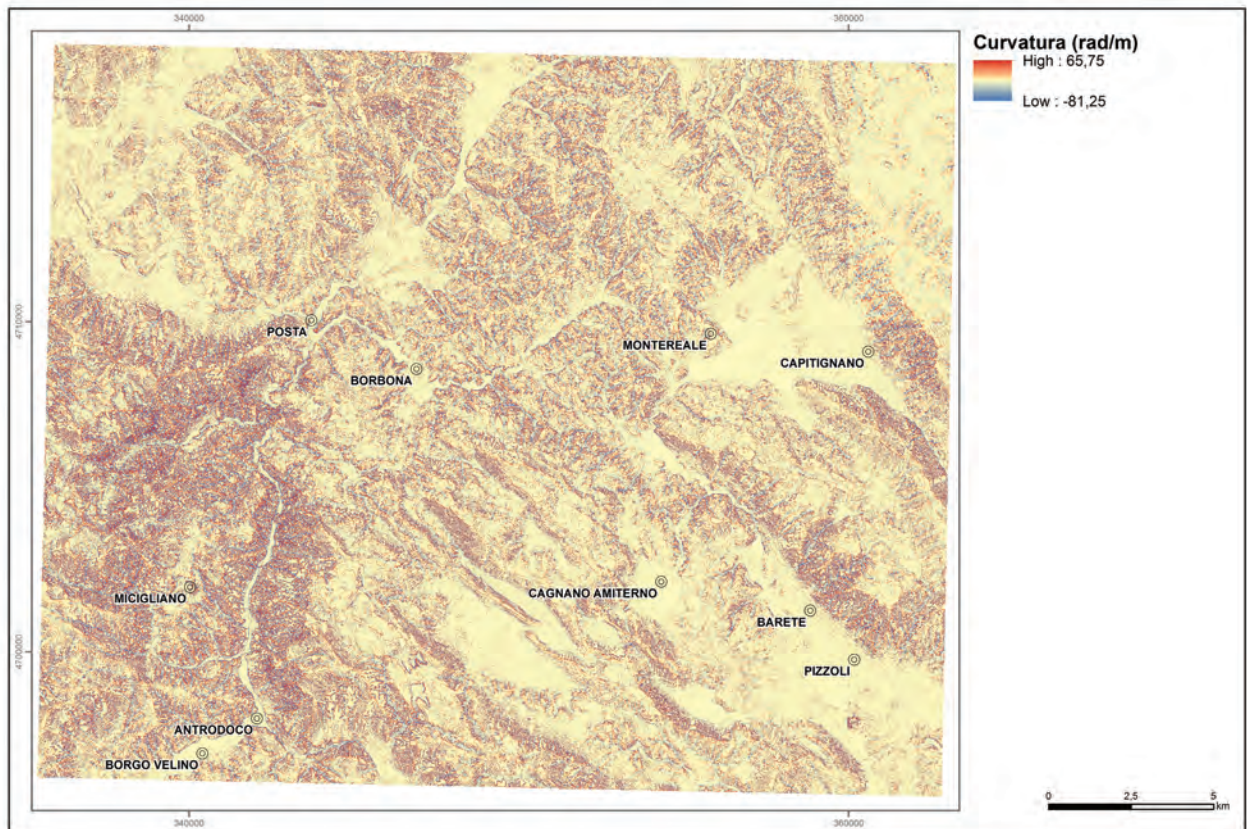


Fig. 45 – Mappa della curvatura dei versanti.
- Curvature map.

Tab. 11 – *Stazioni utilizzate per la generazione della mappa pluviometrica.*
 - Pluviometric stations used to achieve the pluviometric map.

ID	Nome stazione	Comune	Località	Lat (m)	Lon (m)	Quota (m s.l.m.)
0	Albaneto	Leonessa	Albaneto	4716466	832567	1055
1	Leonessa	Leonessa	Leonessa	4719448	825018	974
2	Posta	Posta	Posta	4714443	836782	721
3	M. Terminillo	Rieti	M. Terminillo	4707308	827234	1750
4	Sella di Corno	Scoppito	Sella di Corno	4698104	844177	990
5	Antrodoco	Antrodoco	Antrodoco	4703257	835673	510
6	Lugnano	Rieti	Lugnano	4704895	823224	580
7	Campotosto	Campotosto	Campotosto	4719953	857919	1430
8	Motereale	Motereale	Motereale	4715051	849108	948
9	Passo Capannelle	Pizzoli	Passo Capannelle	4708720	856023	1300
10	Termine	Cagnano Amiterno	Termine	4705960	845440	1050
11	San Pelino già Treponti	Cagnano Amiterno	San Pelino già Treponti	4708511	851910	751
12	Amatrice	Amatrice	Amatrice	4726282	851011	955
13	Cascia	Cascia	Cascia	4736302	828332	743
14	Civita	Cascia	Civita	4731143	836793	1191
15	Monteleone di Spoleto	Monteleone di Spoleto	Monteleone di Spoleto	4729406	823729	990
16	Pescia	Norcia	Pescia	4733524	839963	900
17	Posticciola	Rocca Sinibalda	Posticciola	4732661	821934	540
18	Cantoniera_Ortolano	Crognaleto	Tottea	4715723	862256	1010
19	Nerito	Crognaleto	Nerito	4720468	867773	800
20	Cantoniera_Porcinaro	Campotosto	Marruci	4712178	858319	1160

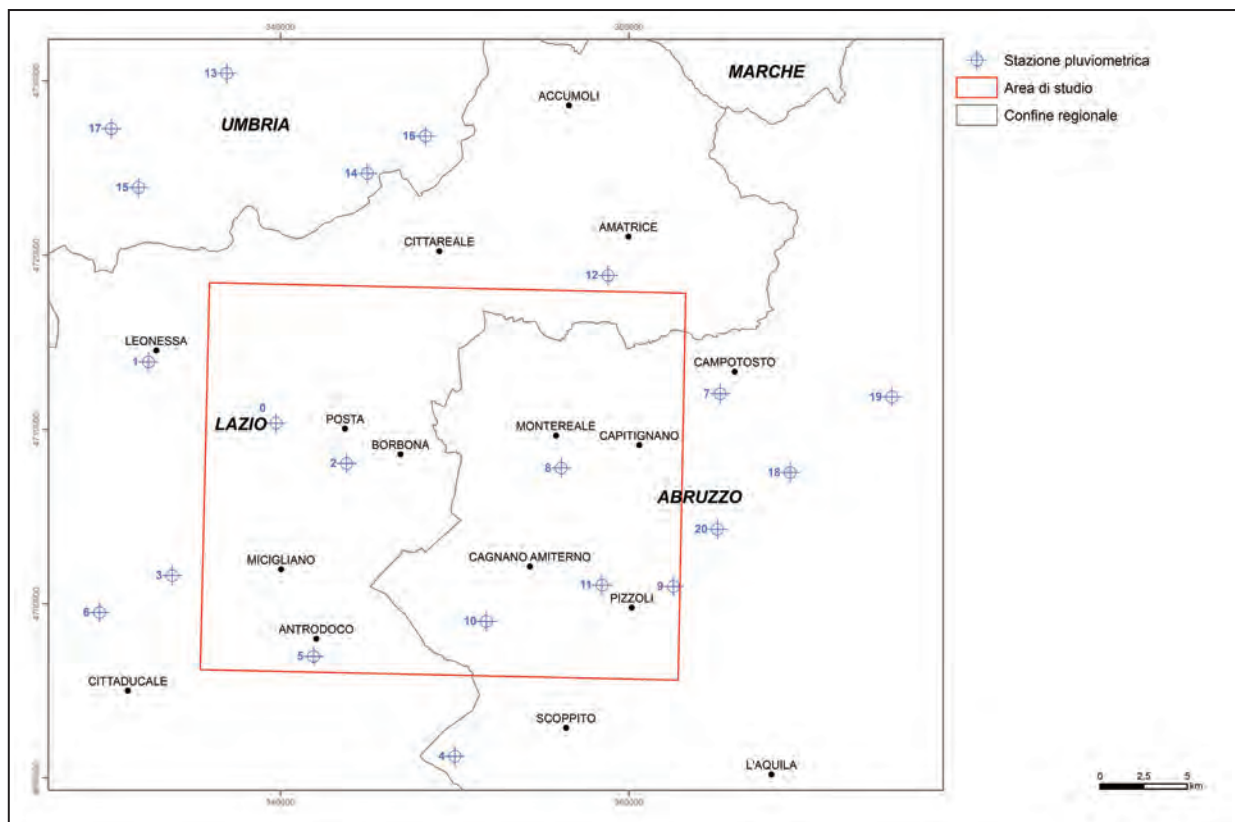


Fig. 46 – Ubicazione delle stazioni pluviometriche.
 - Location of the pluviometric stations.

quello del cap. 6 in quanto era necessario caratterizzare anche l'ambito esteso dell'area con stazioni fuori area per eliminare, in fase di interpolazione dei dati, l'effetto di bordo.

Le durate di riferimento sono di 1, 3, 6, 12 e 24 ore nel caso di precipitazioni orarie ed il tempo di ritorno adottato è di 30 anni.

I dati sono stati interpolati attraverso l'utilizzo del metodo del *Kriging* ordinario ottenendo la mappa di figura 47; i valori ottenuti variano tra 93 e 157 mm di pioggia, aumentando procedendo da O verso E dell'area in esame.

Sono state definite 4 classi (93-102; 102-115; 115-128; 128-157) utilizzando l'algoritmo di classificazione di Jenks che ottimizza la distribuzione in classi minimizzando la varianza all'interno delle classi e massimizzando la varianza tra le stesse.

7.2.9. - *Uso del suolo*

Questo tematismo, visibile in figura 48, è stato ottenuto utilizzando i dati provenienti dal progetto *Corine Land Cover* (CLC) disponibile *online* al sito: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/explore-interactive-maps/corine-landcover-2006>. Il progetto prevede essenzialmente la

produzione del database di uso del suolo tramite fotointerpretazione, con una scala di lavoro pari a 1:100.000 ed unità minima cartografata pari a 25 ettari. In questo studio è stata realizzata una versione semplificata della legenda aggregando i dati partendo dal secondo livello. In particolare sono state accorpate al primo livello tutti i Territori modellati artificialmente, per quanto riguarda i territori Agricoli sono stati accorpate al secondo livello Seminativi e prati stabili, mentre sono rimaste separate le zone Agricole eterogenee. Per quanto riguarda i territori boscati e ambienti seminaturali è stata utilizzata *tout court* la suddivisione al secondo livello.

Alla fine dell'aggregazione il livello informativo risulta costituito da 6 modalità (Aree artificiali, Aree agricole Seminativi, Prati stabili, Zone Agricole eterogenee, zone Boscate, Zone a vegetazione arbustiva, zone a Vegetazione rada).

7.2.10. - *Flow accumulation*

La variabile è stata ottenuta dal DEM utilizzando le funzioni *flow direction* e *flow accumulation* comprese nel *toolset Hydrology* di ArcGis (McCoy *et alii* 2004). La prima funzione utilizza il DEM

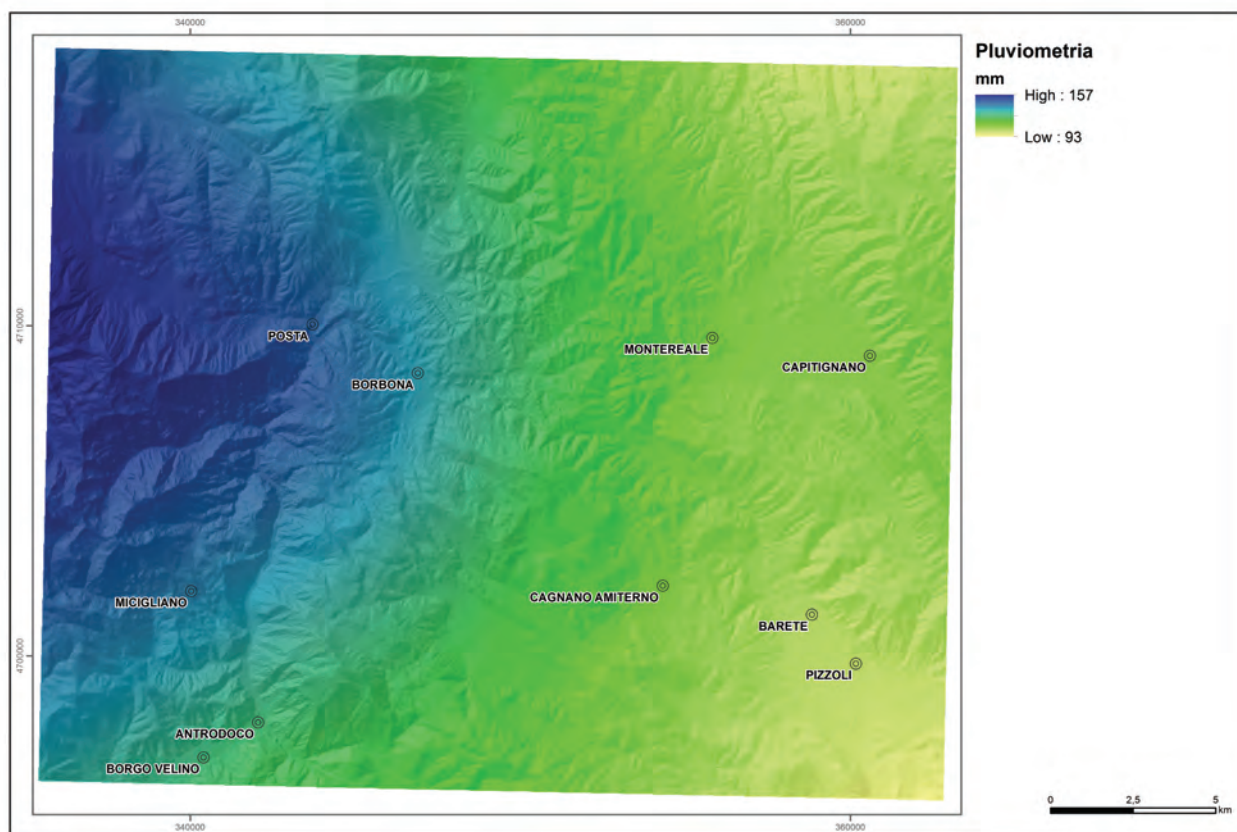


Fig. 47 – Mappa pluviometrica.
- *Pluviometric map.*

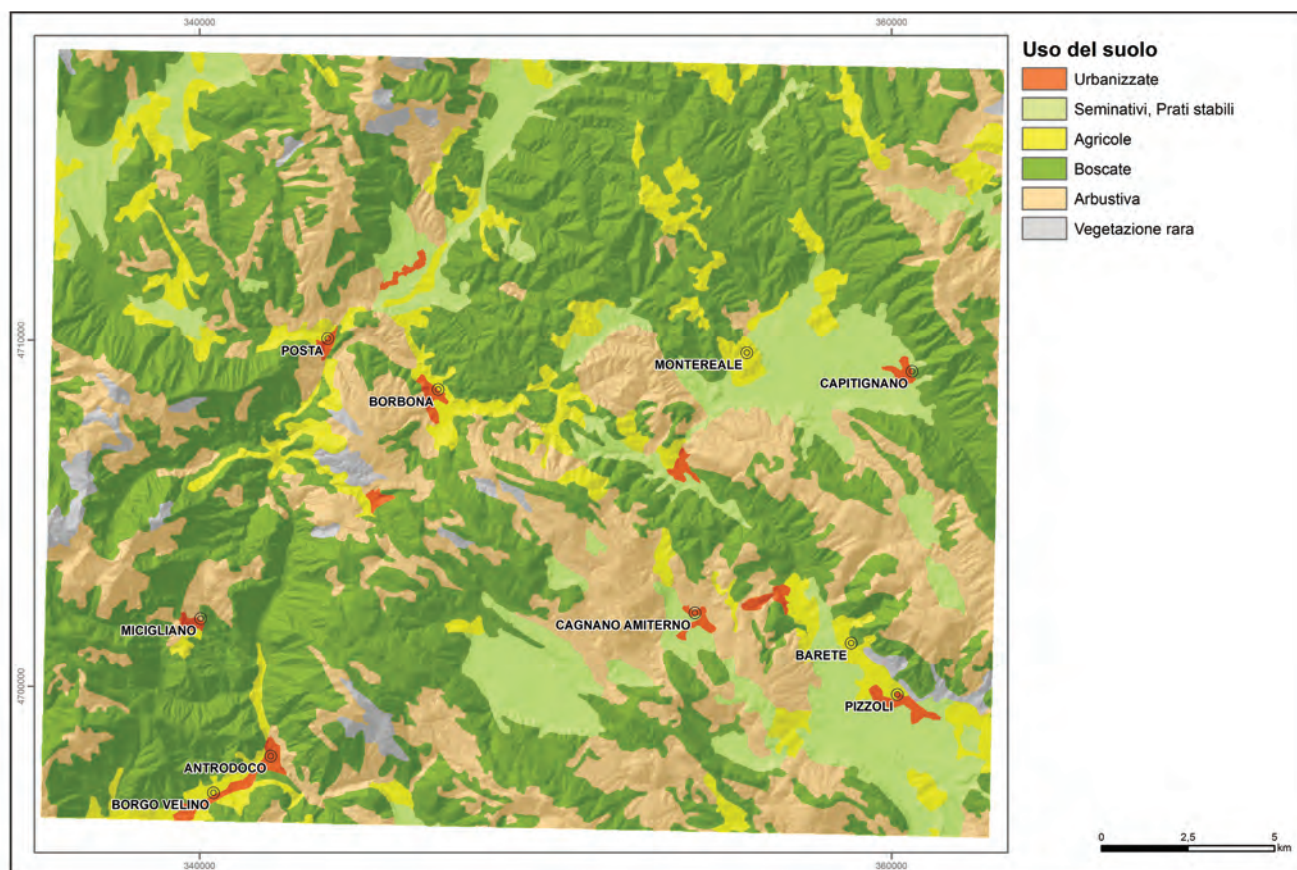


Fig. 48 – Mappa dell’uso del suolo.
- Land use map.

per determinare la direzione di deflusso di ogni cella del raster mentre la seconda calcola il numero di celle a monte che fluiscono all’interno di ogni cella (fig. 49).

Il livello informativo risulta costituito da 4 classi:

(0 – 1, 1 – 10, 10 – 100 e 100 – 58745)

7.3.- DISCRETIZZAZIONE SPAZIALE

I livelli informativi descritti nel paragrafo precedente sono costituiti da modelli di dati sia vettoriali che *raster*. L’analisi è stata realizzata trasformando tutti i *layer* vettoriali in *raster* con dimensioni della cella pari a 20x20 metri.

Le unità territoriali utilizzate nel presente lavoro sono: le celle (*pixel*) e le UCU (UNIQUE CONDITION UNITS) (CARRARA *et alii*, 1995; CHUNG *et alii*, 1995; VAN DEN EECKHAUT *et alii*, 2009).

7.3.1. - *Pixel*

Le variabili esplicative considerate nell’analisi sono 9: il modello digitale del terreno, l’esposizione, la curvatura, il *flow accumulation*, l’uso del

suolo, la pluviometria, la pendenza, l’accelerazione sismica ed infine la litologia.

In tabella 12 sono riportate le frequenze assolute e percentuali delle celle totali, di quelle che sono in frana e di quelle che non lo sono.

7.3.2. - UCU

Le Unità di Condizioni Uniche (UCU), sono costruite a partire da tutte le possibili combinazioni esistenti tra le classi dei piani informativi considerati.

In particolare, esse rappresentano domini omogenei del territorio, cioè aggregazioni di *pixel* con stessi valori del *set* di parametri scelti come variabili caratterizzanti il territorio stesso (HANSEN, 1984).

La loro individuazione è stata ottenuta utilizzando le funzioni di map algebra di ArcGis (Esri), avvalendosi dell’estensione *Spatial Analyst* e, nello specifico, dello strumento “*raster calculator*” (McCOY *et alii*, 2004).

A ciascuna UCU è stato attribuito un codice unico a 9 cifre, corrispondenti a ciascuno dei 9 fattori predisponenti scelti. Il codice identifica-

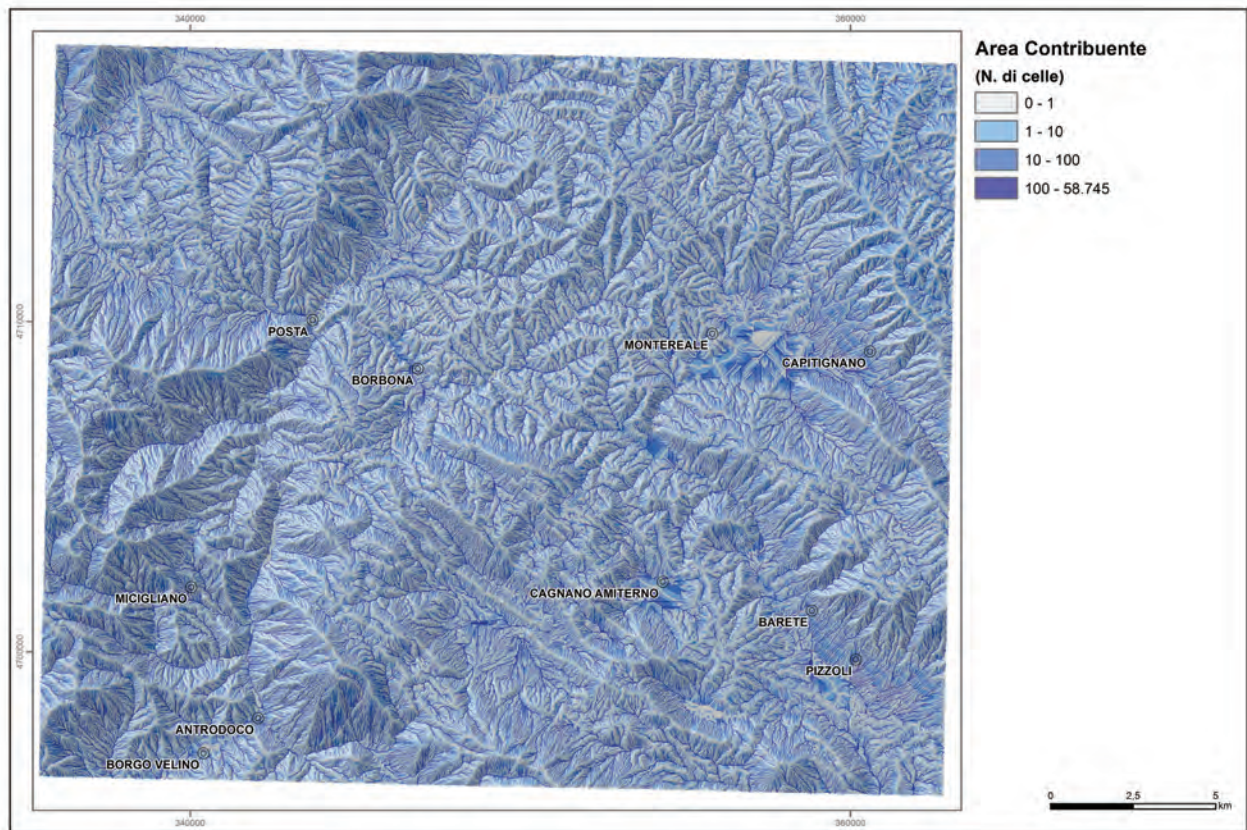


Fig. 49 – Mappa di distribuzione del *flow accumulation*.
- *Flow accumulation map*.

tivo risultava così costituito da 9 *digit* con la seguente struttura:

d1, d2, d3, d4, d5, d6, d7, d8, d9

dove “di” identifica la modalità della variabile *i*, dunque, nell’ordine: il modello digitale del terreno (d1), l’esposizione (d2), la curvatura (d3), la *flow accumulation* (d4), l’uso del suolo (d5), la pluviometria (d6), la pendenza (d7), l’accelerazione sismica (d8) ed infine la litologia (d9).

Sono state così individuate 53106 UCU, un numero molto elevato che comporta una forte frammentazione del territorio.

Al fine di trovare un compromesso tra il numero di fattori e delle loro modalità presi in considerazione ed il numero di unità statistiche (UCU) prodotte, è stata condotta una analisi univariata confrontando ogni variabile con la distribuzione dei dissesti, calcolando il valore della statistica *V* di Cramer (KENDALL & STUART, 1979)

$$V = \sqrt{\frac{X^2}{N \min(R-1, C-1)}}$$

dove *N* è il numero totale di unità statistiche, *R* è il numero di righe della tabella di contingenza e *C* è il numero di colonne della stessa.

Dall’analisi effettuata (tab. 13) risulta che le variabili litologia, modello digitale del terreno, pendenza, uso del suolo e esposizione, risultano le più associate alla variabile presenza/assenza dei dissesti assumendo i valori più elevati dell’indice *V* di Cramer.

Sono state quindi ridefinite le UCU, considerando i cinque fattori individuati e associando a ciascuna unità il codice “d1 d2 d3 d4 d5” dove “di” identifica la modalità della variabile *i*, dunque, nell’ordine: l’esposizione (d1), l’uso del suolo (d2), il modello digitale del terreno (d3), la pendenza (d4) ed infine la litologia (d5). Il numero di UCU risultante è pari a 3644.

7.4. - ANALISI STATISTICA

7.4.1. - *Analisi condizionale*

L’analisi condizionale è stata applicata alle UCU con l’obiettivo di valutare la relazione di tipo probabilistico esistente tra i fattori ambientali e il verificarsi dei dissesti all’interno della

Tab. 12 – Variabili considerate nell'analisi e distribuzione delle frequenze delle relative modalità.
 - Variables considered in the analysis and distribution of the frequencies of related modalities.

Variabile	Classi	Descrizione	N. pixel totali	N. pixel in frana	N. pixel non in frana
Distribuzione frane	0 / 1	Assenza / Presenza fenomeno	1520450 (100%)	9840 (0,6%)	1510610 (99,4%)
Litologia	1	Depositi quaternari	239216 (100,0%)	645 (0,3%)	238571 (99,7%)
	2	Depositi quaternari cementati	19328 (100,0%)	248 (1,3%)	19080 (98,7%)
	3	Flysch	370870 (100,0%)	3272 (0,9%)	367598 (99,1%)
	4	Calcarei marnosi	200747 (100,0%)	2998 (1,5%)	197749 (98,5%)
	5	Marne, marne argillose	15808 (100,0%)	529 (3,3%)	15279 (96,7%)
	6	Alternanze di calcari, argille e marne	105007 (100,0%)	1360 (1,3%)	103647 (98,7%)
	7	Calcarei stratificati	544635 (100,0%)	1630 (0,3%)	543005 (99,7%)
	8	Dolomie	24839 (100,0%)	523 (2,1%)	24316 (97,9%)
Accelerazione sismica g*100	1	22-23	26619 (100,0%)	256 (1,0%)	26363 (99,0%)
	2	24	164621 (100,0%)	1951 (1,2%)	162670 (98,8%)
	3	25	969836 (100,0%)	6106 (0,6%)	963730 (99,4%)
	4	26	359374 (100,0%)	2892 (0,8%)	356482 (99,2%)
DTM (m s.l.m.)	1	449-700	60107 (100,0%)	1333 (2,2%)	58774 (97,8%)
	2	700-900	355118 (100,0%)	3147 (0,9%)	351971 (99,1%)
	3	900-1100	473416 (100,0%)	4488 (0,9%)	468928 (99,1%)
	4	1100-1300	315147 (100,0%)	1395 (0,4%)	313752 (99,6%)
	5	1300-1500	201476 (100,0%)	561 (0,3%)	200915 (99,7%)
	6	1500-2150	115186 (100,0%)	281 (0,2%)	114905 (99,8%)
Pendenza (°)	1	0 - 5	268839 (100,0%)	229 (0,1%)	268610 (99,9%)
	2	5 - 10	182601 (100,0%)	855 (0,5%)	181746 (99,5%)
	3	10 - 20	439473 (100,0%)	4782 (1,1%)	434691 (98,9%)
	4	20 - 30	400377 (100,0%)	3152 (0,8%)	397225 (99,2%)
	5	30 - 40	185410 (100,0%)	1605 (0,9%)	183805 (99,1%)
	6	40 - 50	38752 (100,0%)	551 (1,4%)	38201 (98,6%)
	7	50 - 75	4998 (100,0%)	31 (0,6%)	4967 (99,4%)
Esposizione (°)	1	0 - 90	445836 (100,0%)	3656 (0,8%)	442180 (99,2%)
	2	90 - 180	350739 (100,0%)	2243 (0,6%)	348496 (99,4%)
	3	180 - 270	419353 (100,0%)	2033 (0,5%)	417320 (99,5%)
	4	270 - 360	304522 (100,0%)	3273 (1,1%)	301249 (98,9%)
Curvatura (rad/m)	1	-81 / -1,50	143594 (100,0%)	1482 (1,0%)	142112 (99,0%)
	2	-1,50 / 1,50	1228190 (100,0%)	8614 (0,7%)	1219576 (99,3%)
	3	1,50 / 66	148666 (100,0%)	1109 (0,7%)	147557 (99,3%)
Pluviometria (mm)	1	93 - 102	117924 (100,0%)	948 (0,8%)	116976 (99,2%)
	2	102 - 115	496469 (100,0%)	3730 (0,8%)	492739 (99,3%)
	3	115 - 128	310874 (100,0%)	2427 (0,8%)	308447 (99,2%)
	4	128 - 157	595183 (100,0%)	4100 (0,7%)	591083 (99,3%)
Uso del suolo	1	Urbanizzate	12986 (100,0%)	148 (1,1%)	12838 (98,9%)
	2	Seminativi, Prati stabili	189538 (100,0%)	332 (0,2%)	189206 (99,8%)
	3	Agricole	118367 (100,0%)	1037 (0,9%)	117330 (99,1%)
	4	Boscate	797509 (100,0%)	6129 (0,8%)	791380 (99,2%)
	5	Arbustiva	373832 (100,0%)	3379 (0,9%)	370453 (99,1%)
	6	Vegetazione rara	28218 (100,0%)	180 (0,6%)	28038 (99,4%)
Flow accumulation (n. celle)	1	0 - 1	698849 (100,0%)	4315 (0,6%)	694534 (99,4%)
	2	1 - 10	490992 (100,0%)	3291 (0,7%)	487701 (99,3%)
	3	10 - 100	248217 (100,0%)	2662 (1,1%)	245555 (98,9%)
	4	100 - 58745	82392 (100,0%)	937 (1,1%)	81455 (98,9%)

Tab. 13 – Risultati della statistica V-Cramer applicata alle variabili considerate.

- Results of the Cramer's V statistics applied to the variables considered.

Variabile	V di Cramer
Litologia	0,065
DTM	0,048
Pendenza	0,043
Uso del suolo	0,026
Esposizione	0,025
Flow accumulation	0,022
Accelerazione sismica	0,021
Curvatura	0,011
Pluviometria	0,005

regione considerata (REICHENBACH *et alii*, 2002). La probabilità di accadimento viene calcolata stimando la probabilità del verificarsi della frana utilizzando la frequenza di frana, all'interno di ogni unità di mappa. Si ha dunque che:

$$P(Y = 1 | d_1, d_2, d_3, d_4, d_5) = \text{area in frana} / \text{area unità di mappa}$$

dove P rappresenta la probabilità condizionata di frana (Y=1) data una certa combinazione dei fattori predisponenti all'interno dell'unità di mappa (d_1, d_2, d_3, d_4, d_5).

L'analisi condizionale ha permesso di associare ad ogni UCU un indice di suscettibilità da frana calcolato attraverso il conteggio del numero di *pixel* in frana presenti in una UCU ed il numero di *pixel* totali costituenti la UCU stessa, utilizzando lo strumento di analisi spaziale "Zonal Statistics" di ArcGis (ESRI) (McCoy *et alii*, 2004).

Assumendo come soglia di instabilità per una UCU la franosità media (1,39%), le UCU con indice di franosità maggiore di tale soglia, e dunque instabili, sono risultate 459, pari al 12,6% del n. totale di UCU (3644).

In tabella 14 viene riportato un estratto della tabella che associa ad ogni codice identificativo UCU a 5 cifre, il numero di *pixel* in frana e totali e l'indice di suscettibilità (espresso in termini percentuali).

Il numero delle UCU con 0 *pixel* in frana sono 2776 su 3644 totali, cioè circa il 76%, con una dimensione mediana pari a 37 *pixel* per UCU (numero di *pixel* per UCU: minimo 1, massimo 21450, media 228,56).

Per quanto riguarda le UCU con almeno 1 *pixel* in frana, esse sono 868, cioè il restante 24%, con una dimensione mediana pari a 369 *pixel*

per UCU (minimo 2, massimo 16413, media 1021,90).

Sulla base delle probabilità condizionate stimate per ogni UCU, si è proceduto alla suddivisione del territorio in quattro classi di suscettibilità, utilizzando due diversi criteri di classificazione ed ottenendo le carte della suscettività da frana visibili nelle figure 50 e 51.

Il primo algoritmo di classificazione utilizzato è il NATURAL BREAKS (JENKS & CASPALL, 1971) che ottimizza la distribuzione delle classi minimizzando la varianza interna e massimizzando quella fra di esse.

Nel secondo approccio i limiti tra classi sono stati definiti secondo quanto proposto da CHUNG & FABBRI (2003) costruendo le curve di *success/prediction* ed utilizzando il *ratio of effectiveness* definito come:

$$qt/r\alpha$$

dove q è l'area in frana relativa ad una classe i-esima, t l'area in studio totale, r è l'area della classe i-esima e α l'area in frana totale.

Per una data classe, q/r rappresenta la probabilità che ha un *pixel* interno alla classe di essere inte-

Tab. 14 – Esempio della tabella di attributi associata alle UCU.

- UCU's attribute table example.

ID	codice UCU	N. <i>pixel</i> totali	N. <i>pixel</i> in frana	Indice di franosità
1	11111	313	0	0
2	11112	5	0	0
3	11114	3	0	0
4	11118	77	0	0
5	11121	7	0	0
...
1326	24334	2221	20	0,903751
1327	24335	579	3	0,518135
1328	24336	891	61	6,88488
1329	24337	4317	6	0,13905
1330	24338	99	13	13,6842
...
3640	46647	597	0	0
3641	46651	6	0	0
3642	46656	1	0	0
3643	46657	234	0	0
3644	46667	36	0	0

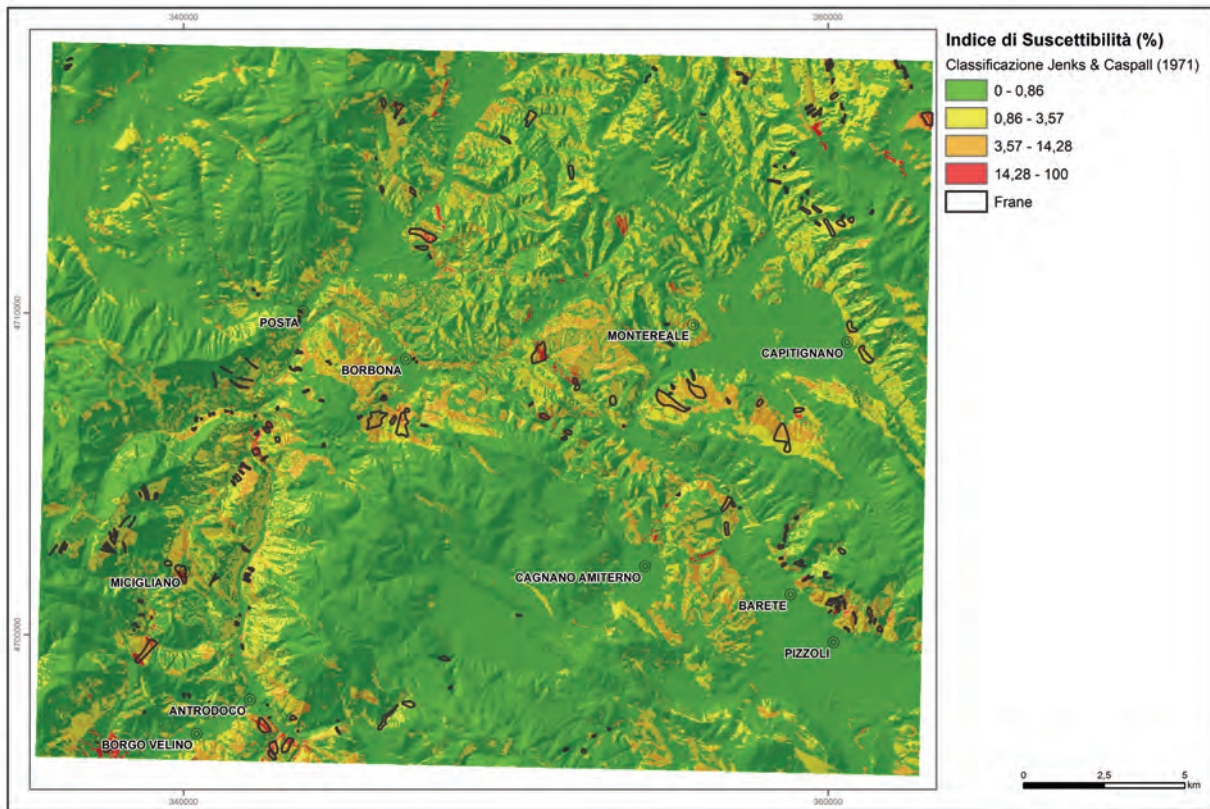


Fig. 50 – Mappa di suscettibilità ottenuta attraverso il modello condizionale con algoritmo di classificazione Natural Breaks (JENKS & CASPALL, 1971).
 - Susceptibility map obtained through the conditional analysis and Natural Breaks classification algorithm (JENKS & CASPALL, 1971).

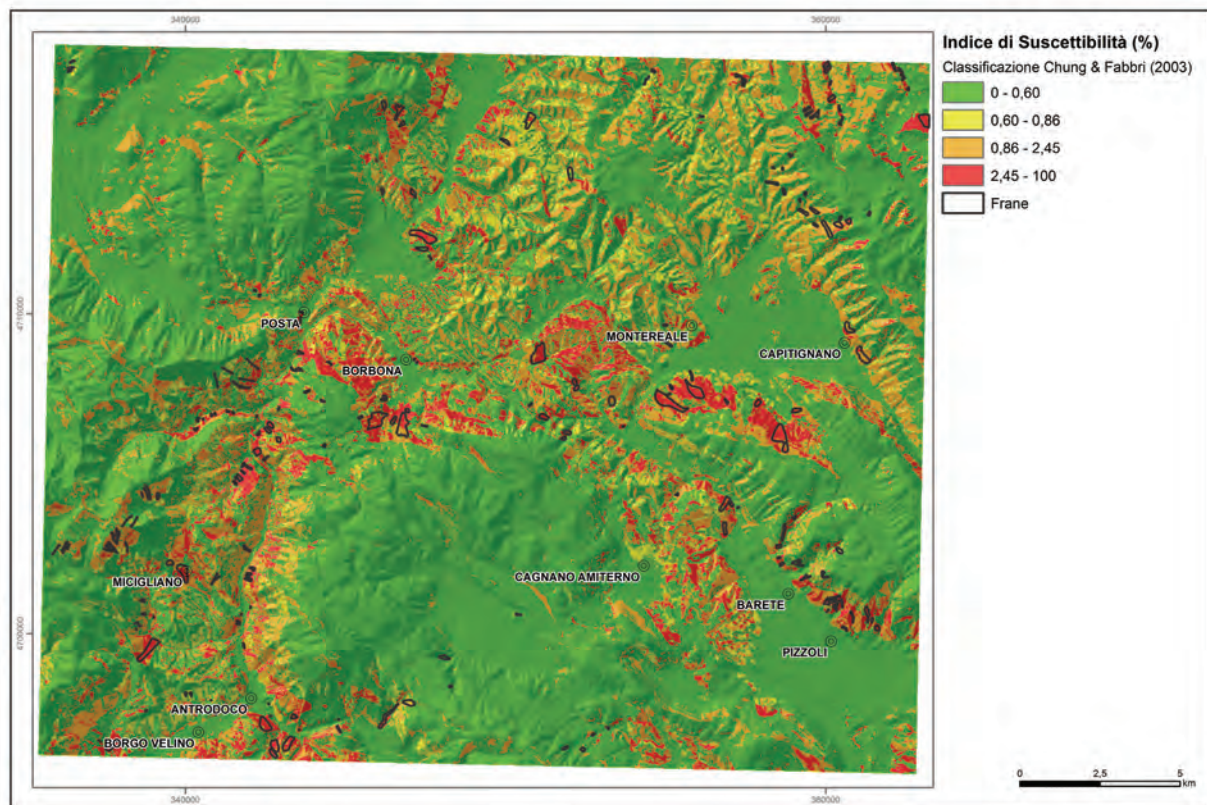


Fig. 51 – Mappa di suscettibilità ottenuta attraverso il modello condizionale con metodo di classificazione proposto da CHUNG & FABBRI (2003).
 - Susceptibility map obtained through the conditional analysis and classification method proposed by CHUNG & FABBRI (2003).

ressato da una frana in futuro.

Essa viene comparata con la probabilità di ogni *pixel* nell'area di studio di essere interessata da una frana in futuro (α/t). Affinché le classi predette presentino un elevato potere discriminante, gli Autori indicano un valore di ratio superiore a 6 o inferiore a 0.1, comunque accettabile se superiore a 3 o inferiore a 0.2; il campo di valori intermedio, è stato in ogni modo diviso in due porzioni, al solo scopo di evidenziare le aree da sottoporre a maggiore attenzione e per rendere comparabili gli *output* cartografici provenienti dalle varie elaborazioni.

7.4.1.1. - Validazione del modello condizionale

Con l'intento di valutare la qualità di adattamento del modello ai dati e la capacità previsionale dello stesso, è stata utilizzata la seguente metodologia che fa uso di tecniche di cross-validazione (CHUNG & FABBRI 2003; CHUNG & FABBRI, 2008; VAN WESTEN *et alii*, 2003; BRENNING, 2005).

Ciascuna delle UCU appartenenti all'area di studio è stata suddivisa, in maniera casuale, in un

gruppo *training* ed uno di *test*, di pari numerosità, ed è stato assegnato un valore di indice di suscettibilità, in funzione della densità di area in frana riscontrata nelle celle *training*.

Riportando in un grafico la porzione cumulata di celle *training* in frana, in funzione della porzione cumulata delle celle *training* totali, ordinate secondo indici di franosità delle celle *training* decrescenti, è possibile valutare la qualità dell'adattamento del modello, in funzione delle caratteristiche geometriche della curva che si ottiene (*success rate curve*) (fig. 52).

Per valutare l'abilità previsionale del modello è stata costruita la *prediction rate curve*, ottenuta tracciando la porzione cumulata di celle *test* in frana, in funzione della porzione cumulata delle celle *test* totali, tenendo immutato il criterio di ordinamento desunto dall'indice di franosità delle celle *training*.

Se il modello definito nel *dataset* di *training* è corretto, e quindi la suscettibilità delle UCU è ben classificata, le curve di validazione presenteranno forti gradienti nel tratto iniziale (la percentuale di area in frana prevista sarà maggiore per le classi a suscettibilità maggiore) e un andamento line-

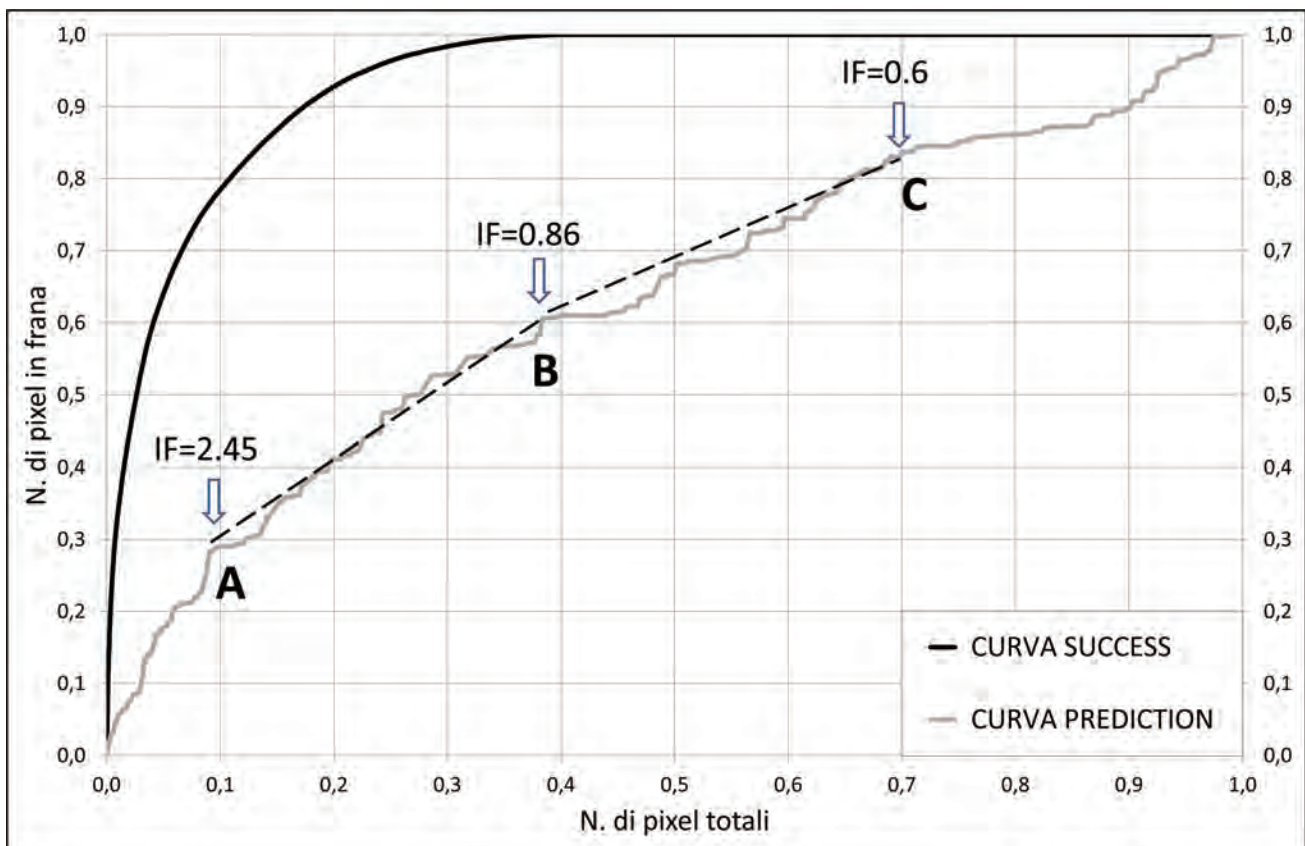


Fig. 52 - Validazione dei risultati dell'analisi condizionale.
- Validation of the results of the conditional analysis.

armente decrescente, via via che si prendono in considerazione le risposte delle UCU meno suscettibili.

Un andamento secondo una retta a 45° corrisponde ad una previsione del tutto casuale ed indica che la porzione di area in frana è costante per ciascuna area analizzata, senza che la scala di suscettibilità secondo la quale le UCU vengono disposte lungo l'asse delle ascisse, ne influenzi l'andamento.

Dal grafico si nota che al 10% delle zone classificate come più suscettibili corrispondono circa il 30% del territorio realmente in frana.

In funzione del *ratio of effectiveness* con valori maggiore di 3 o minore di 0.2 è possibile individuare due classi, che corrispondono arealmente ad una superficie rispettivamente del 10% e del 30% del territorio.

In questa analisi sono stati rilevati valori del *ratio of effectiveness* accettabili solamente per quanto riguarda le zone a suscettibilità elevata; per quanto riguarda le zone a bassa suscettibilità non è possibile individuare delle classi con un buon potere discriminante in quanto il ratio assume valori maggiori della soglia 0.2.

Al fine di rendere comparabili le mappe di suscettibilità, il dominio spaziale è stato comunque suddiviso in 4 categorie; le due classi intermedie non hanno un reale contenuto informativo (il valore di *ratio of effectiveness* è prossimo all'unità), il valore che separa le due classi è il valore in corrispondenza del quale si osserva una diminuzione di pendenza nella spezzata corrispondente ai tratti A-B e B-C visibili in figura 52.

7.4.2. - Logistica degli eventi rari

Il modello di regressione classico che associa ad una combinazione di variabili categoriali, il valore di una variabile dipendente dicotomica, opportunamente trasformata, è il modello logistico. La stima dei parametri di tale modello permette di individuare le variabili significativamente associate alla presenza/assenza delle frane, da un lato, e di fornire uno strumento di previsione, basato sulla stima dei parametri del modello stesso, dall'altro.

Gli ingredienti sono dunque gli stessi dell'analisi statistica precedente, ma con due importanti differenze tra il precedente approccio, non parametrico, ed il presente modello di regressione: la modellazione esplicita della variabilità casuale delle osservazioni, da una parte, e la stima del contributo di ogni regressore al valore atteso della variabile risposta, tenuti fermi i contributi degli altri regressori.

Se si indica con P la probabilità di un *pixel* di

essere in frana dato che presenta le modalità x_1, x_2, \dots, x_k per i k regressori in studio, il modello logistico può essere scritto come segue:

$$P(Y=1|x_1, \dots, x_k) = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k)}}$$

Nel caso in studio, la stima del modello logistico non fornisce risultati soddisfacenti. La probabilità di frana viene infatti sottostimata dal modello a causa della proporzione esistente tra *pixel* in frana e *pixel* non in frana, essendo, questi ultimi, in un rapporto di circa 6 per 1000 rispetto ai primi, pari a 9840 *pixel* in frana su 1520450 *pixel* totali.

Questo problema è noto in letteratura (KING & ZENG, 2001; VAN DEN EECKHAUT *et alii*, 2006; VAN DEN EECKHAUT *et alii*, 2009) e l'insieme degli accorgimenti utilizzati per superarlo vanno sotto il nome di analisi del modello logistico per eventi rari.

Il modello di regressione logistica per eventi rari prevede tre correttivi all'approccio *standard*. In primo luogo, al posto del campione casuale iniziale, si costruisce un campione in cui il numero di unità in frana e di quelle non in frana siano fissate in una proporzione di 1:5.

Poiché i *pixel* in frana sono 9840, si campiona casualmente, tra i *pixel* non in frana, un campione di $9840 \times 5 = 49200$. Il campione in studio avrà dunque una dimensione di 59040.

Tale campione viene diviso in due sottocampioni per poter valutare, una volta stimato il modello, la sensibilità e la specificità. Il sottocampione di calibrazione sarà composto dall'80% del campione (47232 *pixel* di cui 7872 in frana), ed il sottocampione di validazione dal 20% del campione (11808 *pixel* di cui 1968), ottenuti con estrazione casuale.

L'utilizzo di un campione non casuale, richiede l'introduzione dei restanti due correttivi, specifici per il modello per eventi rari, alle usuali stime dell'intercetta e delle probabilità fornite dal modello.

Indicando con τ la proporzione di *pixel* in frana nella popolazione, con \bar{y} la proporzione di *pixel* in frana nel campione e con $\hat{\alpha}$ la stima non corretta dell'intercetta, si ha :

$$\alpha = \hat{\alpha} - \ln \left[\left(\frac{1-\tau}{\tau} \right) \left(\frac{\bar{y}}{1-\bar{y}} \right) \right]$$

La probabilità di frana nella regione τ viene stimata con la frequenza relativa dei *pixel* in frana sul totale dei *pixel* del campione originale, pari a

9840 su 1520450 (circa 0.00647).

Infine, le nuove probabilità di frana, correggono la stima usuale \tilde{p} , nel modo seguente:

$$P(Y=1|x_1, \dots, x_k) = \tilde{p} + C_i$$

con fattore di correzione C_i funzione di \tilde{p} , del vettore delle x e della matrice di covarianza Σ del vettore degli stimatori di β (KING & ZENG, 2001).

Per la stima del modello logistico per eventi rari per i dati del Foglio Antrodoco, si è fatto ricorso alla funzione `relogit` della libreria *Zelig* (IMAI *et alii*, 2013) del programma R (R CORE TEAM). Le covariate considerate sono le stesse utilizzate anche nell'analisi precedente: l'esposizione (d1), l'uso del suolo (d2), il modello digitale del terreno (d3), la pendenza (d4) ed infine la litologia (d9), di seguito indicato con d5.

Il modello finale stimato è il seguente:

$$\text{Logit}(P(Y=1|d_1, \dots, d_5)) = \alpha + \beta_1 d_1 + \dots + \beta_5 d_5$$

In tabella 15 sono riportati le stime dei parametri, l'errore *standard* associato, il valore della statistica *test* z ed il *p-value*.

Le modalità delle variabili non riportate sono da considerarsi come le modalità di riferimento, rispetto alle quali sono calcolati i parametri di regressione.

Tutte le variabili considerate risultano fortemente significative, ad eccezione della vegetazione rara (modalità 6) della variabile uso del suolo. In particolare, le stime dei coefficienti di regressione relativi alla variabile esposizione suggeriscono un debole effetto di associazione negativa ai dissesti dei versanti esposti a sud (modalità 2 e 3) rispetto ai versanti a nord (modalità 1 e 4). Per la variabile uso del suolo, si osserva, invece, una generale diminuzione della probabilità di frana per i *pixel* che appartengono a tutte le classi, rispetto ai *pixel* relativi a zone urbanizzate, ad eccezione della classe 6 di cui già si è detto.

La stima dei coefficienti relativi alle modalità della variabile DTM indica un aumento nell'associazione negativa al fenomeno all'aumentare della quota; tale aspetto potrebbe essere indice di un catalogo dei fenomeni franosi incompleto connesso all'inaccessibilità dei siti posti a quote più elevate.

La pendenza risulta associata positivamente al fenomeno, con maggior forza in corrispondenza delle classi relative a acclività tra 30° e 75° (modalità 5, 6 e 7). Infine, per la variabile litologia, la classe con più forte effetto differenziale positivo

Tab. 15 – *Stima dei parametri, errore standard, valore della statistica test z e p-value ottenuti attraverso il modello logistico.*

- The results of rare events logistic regression: the estimates of the regression parameters, their standard errors, the corresponding value of the test statistic z and the p -values.

	Stima (β)	Errore Std.	z value	Pr(> z)
Intercetta (α)	-5.40	0.15	-36.82	<0.01
Esposizione_2	-0.44	0.03	-12.33	<0.01
Esposizione_3	-0.66	0.04	-17.97	<0.01
Esposizione_4	0.10	0.03	3.10	<0.01
Uso_suolo_2	-1.71	0.14	-12.26	<0.01
Uso_suolo_3	-0.66	0.13	-5.08	<0.01
Uso_suolo_4	-0.79	0.12	-6.33	<0.01
Uso_suolo_5	-0.30	0.13	-2.42	0.01
Uso_suolo_6	0.20	0.16	-1.31	0.19
DTM_2	-0.85	0.05	-16.73	<0.01
DTM_3	-1.00	0.05	-20.24	<0.01
DTM_4	-1.66	0.06	-28.91	<0.01
DTM_5	-2.07	0.07	-29.76	<0.01
DTM_6	-2.09	0.09	-23.29	<0.01
Pendenza_2	1.51	0.09	17.15	<0.01
Pendenza_3	2.26	0.08	28.01	<0.01
Pendenza_4	2.08	0.08	25.33	<0.01
Pendenza_5	2.30	0.09	26.67	<0.01
Pendenza_6	2.98	0.10	29.43	<0.01
Pendenza_7	2.47	0.24	10.34	<0.01
Litologia_2	0.86	0.11	8.14	<0.01
Litologia_3	0.76	0.06	13.46	<0.01
Litologia_4	0.86	0.06	15.16	<0.01
Litologia_5	2.10	0.09	23.62	<0.01
Litologia_6	1.10	0.06	17.21	<0.01
Litologia_7	-0.18	0.06	-3.02	<0.01
Litologia_8	1.18	0.08	14.05	<0.01

rispetto alla classe dei depositi quaternari (classe 1 di riferimento), è quella delle Marne e marne argillose (modalità 5), mentre l'unica associazione negativa, dunque la classe che risulta maggiormente stabile, è quella dei calcari stratificati (modalità 7).

7.4.2.1. - Validazione del modello logistico

Per valutare il modello stimato, si sono calcolate le probabilità predittive per il campione di validazione.

Fissata una griglia di possibili valori, si è cercato quel valore capace di dicotomizzare tali probabilità in 0 (assenza di frana) e 1 (presenza di frana) in modo da massimizzare il numero di Veri Positivi (il *pixel* è in frana e la probabilità stimata dal modello è maggiore della soglia) e minimizzare quello di Falsi Negativi (il *pixel* è in frana ma la probabilità stimata dal modello è minore della soglia). Riportando su un grafico i valori di Sensibilità (Veri Positivi/Positivi) e 1-Specificità (1 - Falsi Negativi/Negativi) per ogni valore di soglia considerato nella griglia, si ottiene la curva ROC (RECEIVER OPERATING CHARACTERISTIC) (FAWCETT 2006, LASKO *et alii*, 2005; BEGUERIA 2006; VAN DEN EECKHAUT *et alii*, 2006) visibile in figura 53.

Il valore soglia così identificato è 0.008918 cui corrispondono Sensibilità = 0.70 e 1-Specificità = 0.68.

Le probabilità di frana condizionate alle modalità dei cinque regressori, stimate tramite mo-

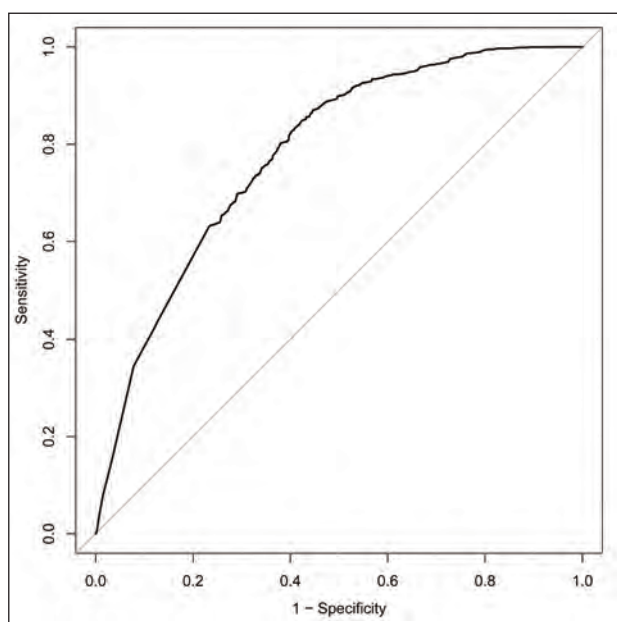


Fig. 53 – Validazione del modello logistico (Curva ROC).
- ROC curve for the validation dataset.

dello logistico per eventi rari, vengono ripartite in quattro livelli di suscettibilità per ragioni operative, così come si è proceduto a fare per quelle stimate col metodo non parametrico del paragrafo precedente.

Anche in questo caso è stata operata una classificazione secondo due metodi: l'algoritmo *Natural Breaks* (JENKS & CASPALL, 1971) ed il metodo proposto da CHUNG & FABBRI (2003) con la costruzione della *prediction curve* ed il calcolo del *ratio of effectiveness*.

La curva *prediction* è stata costruita riportando in un grafico la porzione cumulata di celle in frana, in funzione della porzione cumulata delle celle totali, ordinate in funzione della probabilità stimata dal modello logistico. Le mappe relative ai due tipi di approcci sono riportate nelle figure 54 e 55.

7.4.3. - Confronto tra metodi di classificazione e modelli

Nei paragrafi precedenti sono stati presentati due approcci per l'analisi dei dati di Antrodoco, quello condizionale e quello basato sul modello di regressione logistica che hanno prodotto, per ciascuna UCU, cioè per ciascuna combinazione di modalità dei 5 regressori considerati, l'indice di franosità e quello di probabilità logistica di frana, rispettivamente.

La scelta operativa di distinguere quattro classi di suscettibilità ha condotto all'utilizzo di due metodi di discretizzazione del valore continuo delle probabilità stimate.

In particolare, la probabilità stimata tramite metodo non parametrico è stata suddivisa in quattro classi di suscettibilità utilizzando il metodo di Jenks e quello di Chung & Fabbri, ottenendo così le due mappe delle figure 50 e 51.

Invece, la probabilità stimata tramite modello logistico per eventi rari, ripartita in quattro classi dagli stessi due metodi di classificazione, ha fornito le due mappe riportate nelle figure 54 e 55.

Nella tabella 16 sono riportate le percentuali di *pixel* totali e di *pixel* in frana rappresentati nelle quattro mappe, classificati in funzione della suscettibilità per ognuna delle quattro analisi.

Nell'interpretare i risultati riportati in tabella 16, occorre tener presente come il dominio spaziale sia stato suddiviso in 4 categorie ordinate di suscettibilità, per fini puramente cartografici. Per il metodo di Jenks, questo ha significato imporre all'algoritmo che il numero di classi fosse quattro, ottenendo dunque una suddivisione ottimale, dato tale numero di classi.

Per il metodo di Chung & Fabbri, si è detto esplicitamente che il limite tra le classi medio-alta

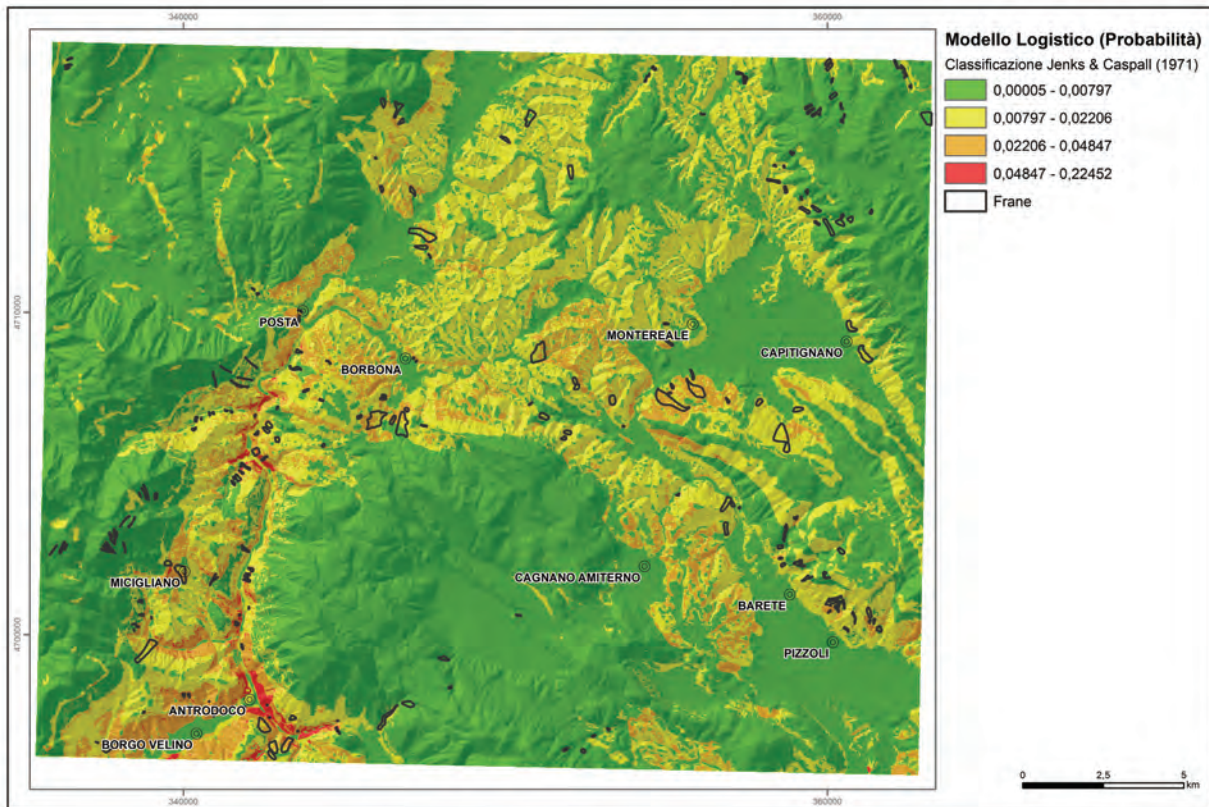


Fig. 54 – Mappa di suscettibilità ottenuta attraverso il modello logistico con algoritmo di classificazione *Natural Breaks* (JENKS & CASPALL, 1971).
 - *Susceptibility map obtained through logistic model and Natural Breaks classification algorithm.*

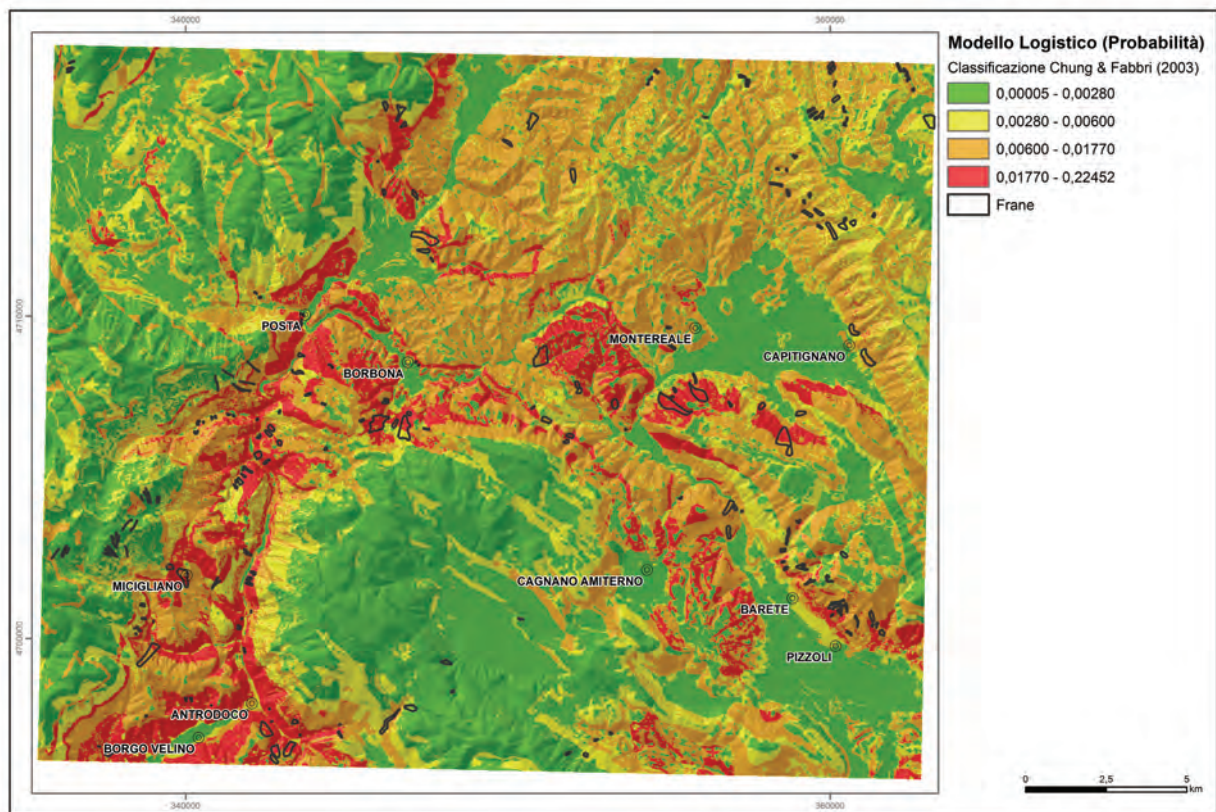


Fig. 55 – Mappa di suscettibilità ottenuta attraverso il modello logistico con metodo di classificazione proposto da CHUNG & FABBRI (2003).
 - *Susceptibility map obtained through logistic model and classification method proposed by CHUNG & FABBRI (2003).*

Tab. 16 – *Analisi delle frequenze percentuali di pixel totali e di pixel in frana ottenuti nelle quattro mappe.*
 - Analysis of the percentages of total pixels and pixels with landslide obtained in the four maps.

	Modello Condizionale Classi Jenks & Caspall		Modello Condizionale Classi Chung & Fabbri		Modello Logistico Classi Jenks & Caspall		Modello Logistico Classi Chung & Fabbri	
	N. <i>pixel</i> totali (%)	N. <i>pixel</i> in frana (%)	N. <i>pixel</i> totali (%)	N. <i>pixel</i> in frana (%)	N. <i>pixel</i> totali (%)	N. <i>pixel</i> in frana (%)	N. <i>pixel</i> totali (%)	N. <i>pixel</i> in frana (%)
	<i>1a</i>	<i>1b</i>	<i>2a</i>	<i>2b</i>	<i>3a</i>	<i>3b</i>	<i>4a</i>	<i>4b</i>
Suscettibilità								
Bassa	84.4	13.9	83.0	9.5	69.0	29.8	40.0	6.0
Medio - Bassa	8.0	36.2	1.4	4.3	24.5	40.9	20.3	13.4
Medio - Alta	4.8	34.5	6.1	29.0	5.7	25.0	29.9	41.2
Alta	2.8	15.4	9.4	57.1	0.8	4.4	9.9	39.4

e medio-bassa non possiede un reale contenuto informativo ed è stato individuato approssimando il tratto di curva residua compresa tra le classi estreme ad una spezzata composta da due segmenti.

Nel seguito dunque si procederà nell'analisi facendo particolare riferimento alle classi estreme, capaci di caratterizzare più fortemente i risultati ottenuti. Si noti che la soglia che bipartisce la probabilità di frana del modello logistico per eventi rari, calcolata tramite la curva ROC in modo da massimizzare sensibilità e specificità contemporaneamente, cade nella classe medio bassa di entrambe le classificazioni.

Se si considerano le colonne a della tabella 16, si può notare come le classi di suscettibilità identificate dal metodo di Jenks sembrano descrivere correttamente la distribuzione delle frane nel territorio, con un'alta percentuale di superficie a bassa probabilità di frana ed una piccola percentuale relativa all'alta probabilità di frana, sia per il modello condizionale, colonna 1a, che per quello logistico, colonna 3a.

Per quest'ultimo, è particolarmente evidente la differenza nella distribuzione della superficie nelle quattro classi, passando dalla classificazione di Jenks a quella di Chung & Fabbri: la distribuzione delle frequenze percentuali riportate in colonna 3a sembra più realistica, data la rarità del fenomeno in studio, di quella riportata nella colonna 4a. Se si considerano però le colonne b della stessa tabella, relative alla presenza di frane nella superficie identificata dalle quattro classi di suscettibilità, si osserva come il numero di frane presenti nelle superfici classificate a basso e medio basso rischio sia decisamente più elevate nel caso delle classi di Jenks rispetto a quelle di Chung-Fabbri (si guardi, ad esempio, come la

classificazione applicata alle probabilità stimate tramite modello logistico, passa da 70.7% di frane nelle classi a basso e medio basso rischio con Jenks, a 19.4% di frane con la classificazione secondo il metodo di Chung-Fabbri).

Dunque, il metodo di Jenks produce per i dati in studio una classificazione decisamente meno fedele di quella ottenuta col metodo di Chung-Fabbri, con entrambi i metodi di stima delle probabilità di frana.

Se si adotta allora il metodo di classificazione di Chung-Fabbri, considerato preferibile in base alle considerazioni del paragrafo precedente, si può procedere alla valutazione della capacità discriminatoria dei due modelli di stima. Le probabilità fornite dal modello condizionale attribuiscono basso rischio all'83% dei *pixel*, cui corrisponde il 9.5% di quelli in frana, classificandone invece il 57.1% come alto rischio per il 9.4% di superficie. Invece, per le probabilità stimate tramite modello logistico per eventi rari, solo il 40% della superficie viene indicata a basso rischio, tra i quali ricade il 6% del totale dei *pixel* in frana, mentre nella classe alta ricade il 39.4% dei *pixel* in frana, su una superficie pari al 9.9% del totale.

Dunque, il metodo di stima condizionale, soprattutto (ma non solo) in congiunzione con il metodo di classificazione di Chung-Fabbri, discrimina meglio tra *pixel* in frana e non in frana, rispetto a stime logistiche con entrambe le classificazioni.

7.4.4. - *Alberi classificatori*

Un albero classificatorio è un modello gerarchico costituito da regole di classificazione che operano ricorsivamente una suddivisione del collettivo in sottoinsiemi massimamente omoge-

nei al loro interno e massimamente diversi tra loro, rispetto alla variabile dipendente.

L'obiettivo di tale analisi è individuare quali interazioni tra le modalità delle variabili esplicative influenzano la variabile target e produrre regole di previsione o di classificazione in grado di assegnare una classe ad un dato di classe sconosciuta sulla base delle informazioni fornite da un campione di dati di classe invece nota.

La procedura consente inoltre, attraverso tecniche di individuazione della dimensione ottimale (*pruning*), di eliminare l'informazione ridondante. L'utilizzo di tale metodologia non parametrica è diffusa in molte discipline scientifiche poiché non necessita di assunzioni che riguardano la distribuzione statistica dei dati e produce *output* grafici facilmente interpretabili (SAITO, 2009; PANG, 2012; PRADHAN, 2013).

Esistono vari algoritmi di segmentazione, differenziati in base alla natura qualitativa o quantitativa della variabili considerate e alla tipologia di segmentazione utilizzata (binaria o multipla); in questo lavoro verrà utilizzato l'algoritmo CART (CLASSIFICATION AND REGRESSION TREE) introdotto da BREIMAN *et alii* (1984), in particolare si tratteranno gli alberi classificatori poiché le variabili in studio sono tutte categoriali.

L'*output* dell'analisi produce un diagramma ad albero dove per ogni nodo vengono specificati il numero di unità e la distribuzione della variabile dipendente, mentre, per ogni ramo, le modalità e i predittori che sono responsabili della segmentazione.

Partendo dal nodo radice, si cerca la variabile che produce la migliore suddivisione della totalità delle unità statistiche in due nodi figli aventi una maggiore omogeneità rispetto al nodo genitore. Esistono vari indici che misurano l'omogeneità (impurità), associata ad un determinato nodo, in generale assumono valore minimo quando tutte le unità presentano la stessa modalità (caso di massima omogeneità) mentre raggiungono il valore massimo se le modalità sono equamente ripartite (caso di minima omogeneità).

Nei CART vengono comunemente utilizzati:

1. l'indice di GINI:

$$I_G = 1 - \sum_{j=1}^m p_j^2$$

2. l'entropia di SHANNON:

$$I_E = - \sum_{j=1}^m p_j \log(p_j)$$

dove p_j è la proporzione dei casi di classe j presenti nel nodo t .

Nel presente lavoro si utilizzerà l'entropia ed in particolare l'*information gain* che rappresenta la differenza tra il valore iniziale di entropia ed il valore di entropia dopo aver partizionato i *record* utilizzando una determinata variabile.

Il criterio di scelta dei nodi di un albero di classificazione consisterà nello scegliere di volta in volta la variabile che da una maggiore diminuzione di entropia o che, analogamente, massimizza l'*information gain*.

Se non si definisce una regola di arresto, la suddivisione procede fin quando i nodi terminali (foglie) contengono solo casi appartenenti alla stessa modalità della variabile dipendente. Il criterio di arresto può consistere nell'imposizione di una dimensione minima di numerosità dei gruppi, nell'individuazione di un decremento significativo dell'impurità al nodo, nella definizione della massima profondità dell'albero o nell'utilizzo di procedure di *pruning* per eliminare i rami meno utili. Se le regole di arresto sono ampie si otterranno alberi molto ramificati di difficile interpretazione, viceversa se risultano troppo limitative potrebbero non individuarsi suddivisioni rilevanti per la comprensione del fenomeno. Pertanto il criterio è quello di usare una o più regole in maniera congiunta al fine di ottenere un albero stabile e facilmente interpretabile.

Al termine del processo di costruzione dell'albero ad ogni nodo terminale verrà assegnata la classe della variabile dipendente che presenta frequenza massima; nei casi in cui le classi sono equamente ripartite nella foglia, si ricade in una zona di indecisione e l'assegnazione avverrà in modo casuale.

7.4.4.1. - Implementazione in R

Il *software* utilizzato nell'implementazione dell'albero classificatorio è R (R CORE TEAM) con il pacchetto aggiuntivo RATTLE, un'interfaccia grafica per analisi dei dati che implementa la funzione `rpart()`. La sintassi di tale funzione è la seguente:

`rpart(formula, data, method, parms, control)`

dove:

formula = permette di definire quale è la variabile di interesse e quali sono i predittori;

data = specifica il *dataset* utilizzato;

method = indica la natura dell'albero che si vuole generare (di regressione o di classificazione);

parms = è una lista di tre elementi: *split*, per-

mette di inserire l'indice da utilizzare per la segmentazione, *prior*, è possibile specificare delle probabilità a priori per le modalità della variabile dipendente diverse dal valore di *default* rappresentato dalle frequenze relative ed infine *loss*, che consente l'utilizzo di una matrice dei costi di misclassificazione.

control = permette di specificare i criteri di crescita dell'albero: l'argomento *cp* (*complexity parameter*), impedisce tutti gli *split* che non generino un decremento di impurezza totale maggiore del valore settato; *maxdepth*, indica la profondità massima ammissibile per le foglie.

In particolare per la generazione dell'albero relativo al *dataset* in studio i parametri sono stati settati come di seguito riportato:

1. *method* è stato valorizzato con “*class*” per ottenere un albero classificatorio;

2. *split* è stato impostato con “*information*” al fine di utilizzare l'*information gain* (variazione di entropia) come indice di impurità;

3. *prior* è stato posto pari a 0.5/0.5 per le modalità frana e non frana al fine di considerare un *dataset* indipendente dalla frequenza relativa delle due modalità essendo nel caso in studio fortemente sbilanciato in direzione dei casi non frana;

4. *cp* è stato impostato al minimo valore possibile (0.00001) al fine di ottenere un albero non potato;

5. *maxdepth* è stato impostato a 4 per ottenere un albero facilmente interpretabile.

I parametri *minsplit* e *minbucket*, che definiscono rispettivamente il numero minimo di casi che permettono ad un nodo di essere ulteriormente suddiviso e il numero minimo di casi che un nodo figlio deve avere affinché lo *split* associato possa essere preso in considerazione, sono stati impostati secondo i valori di *default* (*minsplit* = 20 e *minbucket* = 7).

L'albero generato utilizzando i parametri sopra specificati è riportato nella figura 56.

Ogni gruppo è rappresentato con tonalità dell'azzurro (gruppi classificati in frana) e del verde (gruppi classificati non in frana), progressivamente più scure al crescere della proporzione delle classi in frana/non in frana all'interno del gruppo individuato.

Di seguito si riportano alcuni esempi di regole di classificazione ottenute nell'elaborazione:

Relativamente al nodo 29:

Regola numero: 29 [FRANA = 1 cover = 86569 (7%) prob = 0.68]
LITOLOGIA = 2, 3, 4, 5, 6, 8

PENDENZA = 2, 3, 4, 5, 6, 7

ESPOSIZIONE = 2, 3

LITOLOGIA = 4, 5, 8

Dalla lettura si vince che il nodo terminale 29 classifica il 7% dei *pixel* come sicuramente in frana (percentuali all'interno del gruppo: 32% non in frana e 68% in frana) attraverso la seguente combinazione di modalità dei regressori:

- variabile litologia: modalità 4 (Calcari marnosi), 5 (Marne e marne argillose) e 8 (Dolomie);

- variabile esposizione: modalità 2 (90 – 180 gradi) e 3 (180 – 270 gradi) ovvero esposizione a sud del versante;

- variabile pendenza: tutte le modalità tranne la prima (0-5 gradi).

Relativamente al nodo 31:

Regola numero: 31 [FRANA = 1 cover = 185146 (15%) prob = 0.74]

LITOLOGIA = 2, 3, 4, 5, 6, 8

PENDENZA = 2, 3, 4, 5, 6, 7

ESPOSIZIONE = 1, 4

PENDENZA = 3, 4, 6

Vengono classificati il 21% dei *pixel* come sicuramente in frana (percentuali all'interno del gruppo: 29% non in frana e 71% in frana) attraverso la combinazione:

- variabile litologia: tutte le modalità tranne la 1 (Depositi quaternari) e la 7 (Calcari stratificati);

- variabile esposizione: modalità 1 (0 – 90 gradi) e 4 (270 – 360 gradi) ovvero esposizione a nord del versante;

- variabile pendenza: modalità 3 (10-20), 4 (20-30) e 6 (40-50) ovvero pendenze medio-elevate.

Relativamente al nodo 61:

Regola numero: 61 [FRANA = 1] cover = 47585 (4%) prob = 0.63]

LITOLOGIA = 2, 3, 4, 5, 6, 8

PENDENZA = 2, 3, 4, 5, 6, 7

ESPOSIZIONE = 1, 4

PENDENZA = 2, 5, 7

DTM = 1, 2, 3

Vengono classificati il 4% dei *pixel* come sicuramente in frana (percentuali all'interno del gruppo: 37% non in frana e 63% in frana) attraverso la combinazione:

- variabile litologia: tutte le modalità tranne la 1 (Depositi quaternari) e la 7 (Calcari stratificati);

- variabile esposizione: modalità 1 (0 – 90 gradi) e 4 (270 – 360 gradi) ovvero esposizione

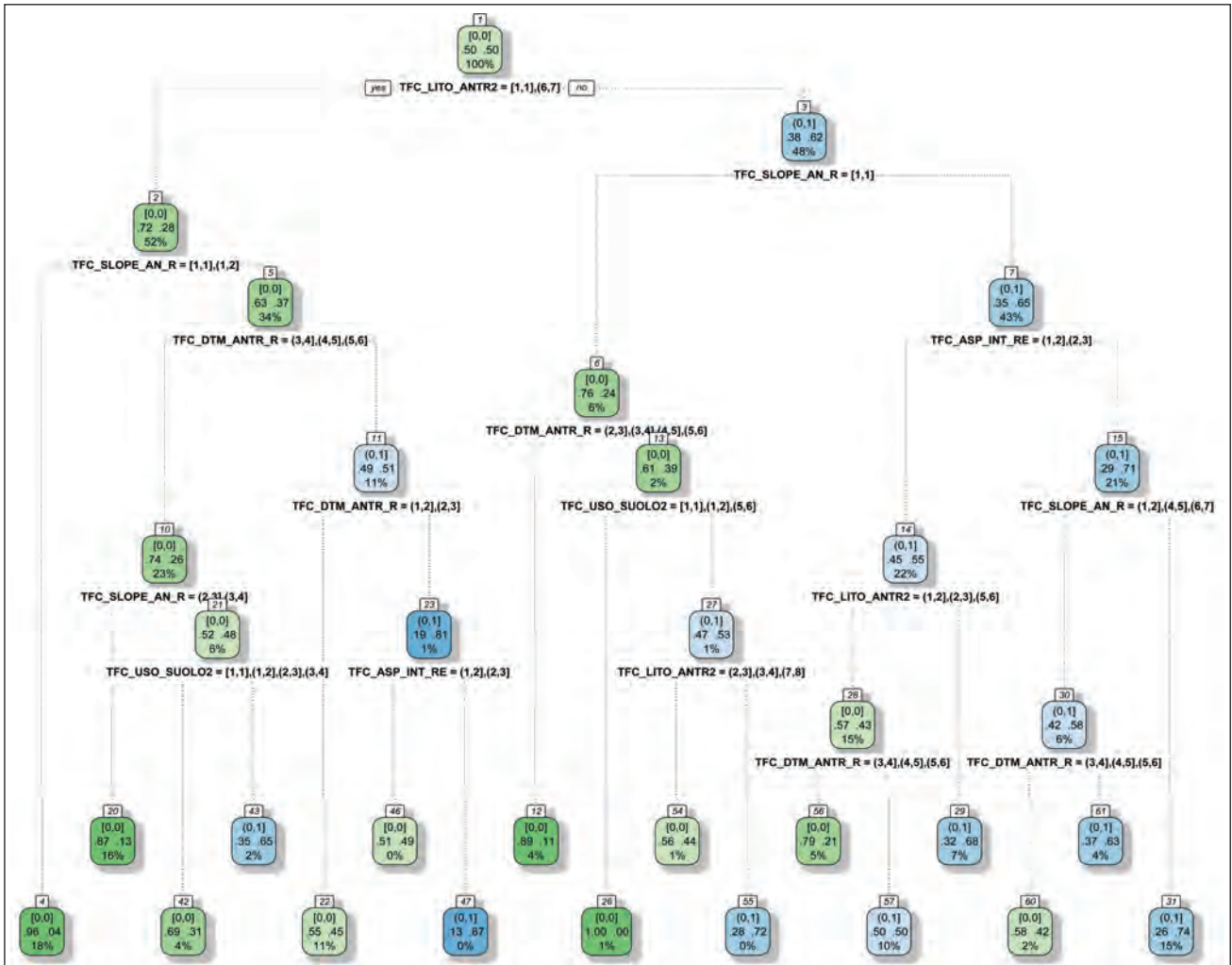


Fig. 56 – Diagramma con le regole di classificazione ottenute.
 - Plot with the classification rules resulting.

a nord del versante;

- variabile pendenza: modalità 2 (5-10), 5 (30-40) e 7 (50-75) ovvero pendenze medio-elevate.
- variabile DTM: modalità 1, 2 e 3 ovvero quote comprese tra 449 e 1100 m s.l.m.

Per quanto riguarda la validazione, come negli altri modelli descritti nel presente lavoro, è stato suddiviso casualmente il dataset in un subset di apprendimento (*training*), con il quale è stato generato l'albero, ed un subset di validazione (*TEST*) al quale è stato applicato il modello costruito in precedenza.

Successivamente è stata effettuata un'analisi sull'errata classificazione dei casi (misclassificazione) attraverso la generazione di matrici di confusione e curve ROC visibili in figura 57 dove è riportato anche il valore di AUC (0.781).

Ad ogni record del dataset è stato attribuito una probabilità utilizzando l'apposita funzione di score prevista dall'interfaccia Rattle, effettuato

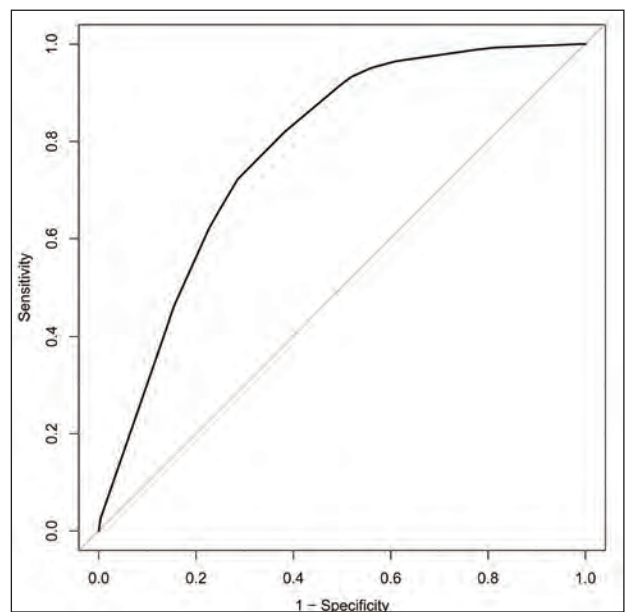


Fig. 57 – Curva ROC con la valutazione del modello degli alberi decisionali.
 - ROC curve for the CART model validation.

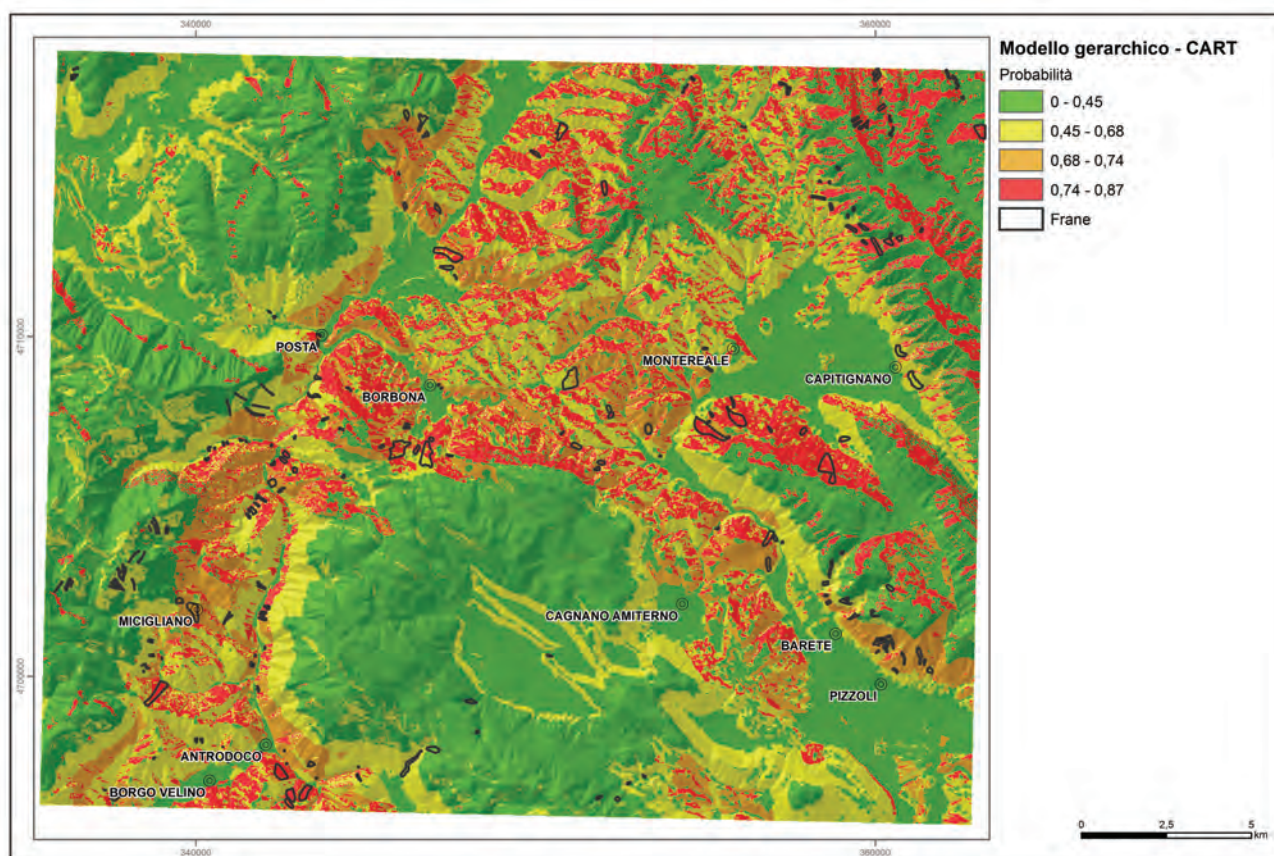


Fig. 58 – Mappa di suscettibilità ottenuta attraverso il modello gerarchico CART e classificazione secondo il metodo Chung & Fabbri.
- Susceptibility map obtained through gerarchic CART model and classification method proposed by Chung & Fabbri.

l'export in formato .csv ed importato in ambiente GIS con successiva generazione della mappa visibile in figura 58; la suddivisione in classi di probabilità è stata effettuata utilizzando il metodo di Chung & Fabbri attraverso la costruzione della curva ordinatrice.

In conclusione delle analisi, si pone l'attenzione sul fatto che l'algoritmo utilizzato nei CART è di tipo ricorsivo e le scelte effettuate ad un passo influenzano anche quelle dei passi successivi. Inoltre, al crescere delle partizioni, i nodi diventano instabili perchè basati su un numero limitato di osservazioni.

Queste caratteristiche possono comportare una instabilità dell'albero generato. Per ovviare a tali limitazioni si utilizzano di norma tecniche di *ensemble learning* (come ad esempio le *Random Forest*) che si propongono di determinare regole di classificazione costruendo e aggreando più versioni di alberi classificatori ottenute dallo stesso *training set*.

Tali metodologie sono attualmente oggetto di studio e costituiscono uno scenario di sviluppo futuro dell'analisi esposta nel presente paragrafo.

8. - LA VALUTAZIONE DELLA PROPENSIONE AL DISSESTO - METODI DETERMINISTICI

8.1.- MODELLI DETERMINISTICI - PENDIO INFINITO

La valutazione della suscettibilità per frana può essere fatta anche utilizzando la modellazione fisica del fenomeno, in questo caso si utilizzano modelli deterministici.

I modelli deterministici possono essere monodimensionali, bidimensionali o tridimensionali a seconda della complessità del sistema di equazioni utilizzato per la risoluzione delle leggi fisiche che descrivono le condizioni di rottura, lo spostamento e l'arresto dei corpi in frana.

Per la soluzione di queste leggi viene richiesta la conoscenza di dati geotecnici o geomeccanici puntuali specifici per le diverse tipologie di frana (crolli, scivolamenti, colate etc.). Per ottenere questi dati si richiedono pertanto rilevamento in sito e prove di laboratorio.

Per queste ragioni, i modelli deterministici vengono applicati su siti specifici e per fenomeni particolari (scala di versante), e generalmente

non sono molto utilizzati per effettuare una reale valutazione spaziale della suscettibilità (AAVV 2011).

I modelli per l'analisi di suscettività da frana in terreni sono solitamente composti da un modulo geo-meccanico (che di solito si rifà alla trattazione del Pendio Infinito) e uno idrologico accoppiati, generalmente questi modelli si differenziano per l'aspetto idrologico.

Nel presente lavoro vengono presentati 3 modelli tra i più diffusi implementati per l'analisi di stabilità distribuita effettuata con l'ausilio di Sistemi informativi territoriali.

L'unità territoriale di base su cui viene effettuata l'elaborazione come per l'analisi statistica è il *pixel* di dimensione 20×20m.

8.2. - MODELLO STAZIONARIO

Il più semplice modello utilizzato è di tipo stazionario, accoppia un modello idrologico come proposto da BEVEN & KIRBY (1979) ed uno di stabilità dei pendii all'equilibrio limite.

Le principali assunzioni alla base della formulazione sono:

- pendenza costante del pendio;
- superficie di rottura piana e parallela al pendio tipicamente localizzata all'interfaccia tra due litologie con resistenza molto differente;
- resistenza del terreno espressa dal criterio di rottura Mohr-Coulomb;
- flusso stazionario parallelo al pendio;
- assenza di flusso tra substrato e coltre.

In particolare al crescere dell'altezza h_w dello strato di terreno saturo corrisponde una diminuzione della tensione agente normalmente al piano di rottura e , di conseguenza, della resistenza al taglio disponibile.

Questo approccio fa riferimento alla stabilità di un pendio indefinito applicabile a frane di ridotto spessore in relazione alla estensione longitudinale (scivolamenti traslativi, colate, *debris flows*) trascurando il contributo di resistenza dato dalle parti laterali, sommitali e basali della coltre.

I processi di instabilità investigati interessano spesso i terreni sciolti della copertura eluvio-coluviale, contraddistinti da una associazione con le acque meteoriche; tali dissesti si manifestano come uno scivolamento di suolo ed evolvono in colate entro le incisioni torrentizie.

È evidente che fenomeni roto-traslativi non possono essere adeguatamente modellati con questo algoritmo.

Il fattore di sicurezza per un pendio infinito per un materiale dotato di coesione ed in presenza di falda è il seguente:

$$F_s = \frac{c + (\gamma \cdot h - \gamma_w \cdot h_w) \cos^2 \beta \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\gamma \cdot h \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta}$$

dove:

c = coesione

γ = peso di volume del terreno

γ_w = peso di volume dell'acqua

h = profondità della superficie di rottura

h_w = altezza piezometrica in corrispondenza alla superficie di rottura

β = pendenza del versante

φ = angolo di attrito sulla superficie di rottura

In questa relazione i parametri che sono necessari sono di tre tipi differenti:

Caratteristiche meccaniche, c , ϕ , γ ottenuti da una caratterizzazione geomeccanica;

Caratteristiche geometriche, β dal modello digitale del terreno e h spessore massimo dal rilevamento geologico;

h_w altezza piezometrica che è ottenuta dal modello idrologico utilizzato ed è funzione delle caratteristiche idrauliche e dall'apporto meteorico. I valori utilizzati sono sintetizzati nella tabella 17.

Il modello idrologico di BEVEN & KIRBY (1979) prevede un meccanismo di saturazione che procede dal basso verso l'alto e la definizione di un'area di drenaggio per unità di larghezza misurata lungo le isoipse.

Questo valore è definito dal modello idrologico secondo le seguenti assunzioni:

- il deflusso segue i gradienti topografici ricavati dal modello digitale del terreno e dipende dalla relativa area di contributo a ;
- il deflusso è in equilibrio con un apporto dato dalla piovosità efficace R ;
- la capacità di deflusso è pari a $T \sin \theta$, dove

Tab. 17 – *Caratteristiche geotecniche dei litotipi.*
- Geotechnical characterization of soil.

Litologia	Peso volume (kN/m ³)	Coesione (kPa)	Attrito(°)	Spessore
Depositi quaternari	18	10	30	3
Depositi quaternari cementati	18	20	25	3
Flysch	26	220	27	2
Calcari marnosi	27	270	32	1
Marne e Marne argillose	27	165	32	3
Alternanza calcari	26	218	27	2
Calcari stratificati	27	239	29	1
Dolomie	26	158	21	2

T è la trasmissività del suolo.

L'altezza relativa di acqua nella coltre potenzialmente instabile si definisce come:

$$w = \frac{h_w}{h} = \text{Min} \left(\frac{Ra}{T \sin \theta}, 1 \right)$$

Attraverso funzioni di map algebra del software ArcGis (Esri) ed in particolare attraverso lo strumento "raster calculator", è possibile determinare il fattore di sicurezza per *pixel*, sotto le ipotesi precedentemente definite.

I risultati ottenuti mostrano le aree a maggiore propensione all'instabilità in funzione del fattore di sicurezza, visibili nella mappa di figura 59, dove sono state identificate 4 classi a suscettibilità decrescente (Molto alta, alta, media e bassa).

I limiti adottati per definire le classi sono i seguenti:

$$<1, 1.0-1.5, 1.5-3, >3$$

8.2.1. - *Afflusso critico (Shalstab)*

Tale modello (DIETRICH & MONTGOMERY 1998) utilizza la medesima teoria di quello precedentemente esposto, ovvero di stabilità di un pendio infinito con una coltre che si mobilita su un basamento stabile. A differenza del modello precedente, l'output del modello è costituito dalle altezze critiche di afflusso meteorico che generano instabilità. Combinando infatti le equazioni di Darcy con quella relativa alla valutazione della stabilità di un pendio infinito si perviene alla seguente espressione:

$$\frac{h}{z} = \frac{q}{T} \cdot \frac{a}{b \sin \theta}$$

in cui è rilevante il rapporto q/T che ingloba caratteristiche idrauliche rappresentate dalla trasmissività T e l'apporto stazionario q inteso come afflusso meteorico critico tale da instabilizzare la cella; le altre variabili geometriche sono contemplate nel fattore $a/b \sin \theta$.

Nella figura 60 viene esplicitata la simbologia adottata. Il livello di saturazione necessario per la valutazione della stabilità risulta dal prodotto di questi fattori; si può pertanto esprimere la stabilità in funzione dei predetti parametri idraulici e naturalmente di quelli meccanici.

Esplicitando il valore di q si ottiene:

$$q = \frac{Tb}{a \sin \theta} \left[\frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \left(1 - \frac{C}{\rho_w g z \sin \theta \cos \theta} \right) \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \right]$$

Come indicato dagli autori è stato assunto un intervallo temporale pari a 24 ore necessario a raggiungere le condizioni di stazionarietà.

Il metodo per la determinazione delle direzioni di deflusso fa riferimento all'algoritmo MFD (QUINN *et alii*, 1991).

Come nel caso precedente utilizzando lo strumento di calcolo "raster calculator" è stato possibile determinare il valore di piovosità critica per *pixel* che produce instabilità.

Nell'ipotesi che l'afflusso meteorico non subisca perdite nella sua trasformazione in afflusso efficace alla falda, q rappresenta la variabile predittiva del modello, chiamata "pioggia critica", intesa come quantità di pioggia richiesta per attivare un processo di franamento superficiale, ovviamente i valori più bassi indicano una maggiore propensione all'instabilità mentre i valori più alti indicano una maggiore propensione alla stabilità.

La dimensione temporale dei processi non viene colta esplicitamente dalla metodologia.

I risultati ottenuti sono stati sovrapposti alle frane effettivamente rilevate al fine di valutare la modellazione.

Nella figura 61 vengono mostrati i risultati ottenuti in termine di infiltrazione critica espressa in *mm/day*, necessaria per produrre instabilità.

Secondo quanto proposto dagli autori sono identificate delle zone stabili e instabili *a priori* (indipendentemente dalle infiltrazioni) in funzione della pendenza e delle caratteristiche meccaniche, le rimanenti possono essere stabili o instabili a seconda dell'infiltrazione.

Per potere realizzare una mappa di suscettibilità analoga a quanto già prodotto con 4 classi da bassa ad alta, non avendo come *output* dalla modellazione un valore di Fattore di Sicurezza, si è fatto uso del metodo delle curve ordinatrici proposto da CHUNG & FABBRI (2003).

La definizione delle classi è stata effettuata in funzione del valore di *Ratio of Effectiveness* precedentemente definito, che ha permesso l'individuazione di 4 classi di suscettibilità aventi i seguenti limiti: $<5 \text{ mm/day}$, $5-100 \text{ mm/day}$, $100-300 \text{ mm/day}$ e $>300 \text{ mm/day}$, corrispondenti a suscettibilità molto alta, alta, media e bassa.

8.3. - PENDIO INFINITO IN CONDIZIONI TRANSITORIE - TRIGRS

Un'ulteriore evoluzione dei modelli precedentemente descritti è rappresentato da TRIGRS (*Transient Rainfall Infiltration and Grid based Regional slope stability model*, BAUM SAVANE & GODT 2008).

Tale modello utilizza un *software* proprietario,

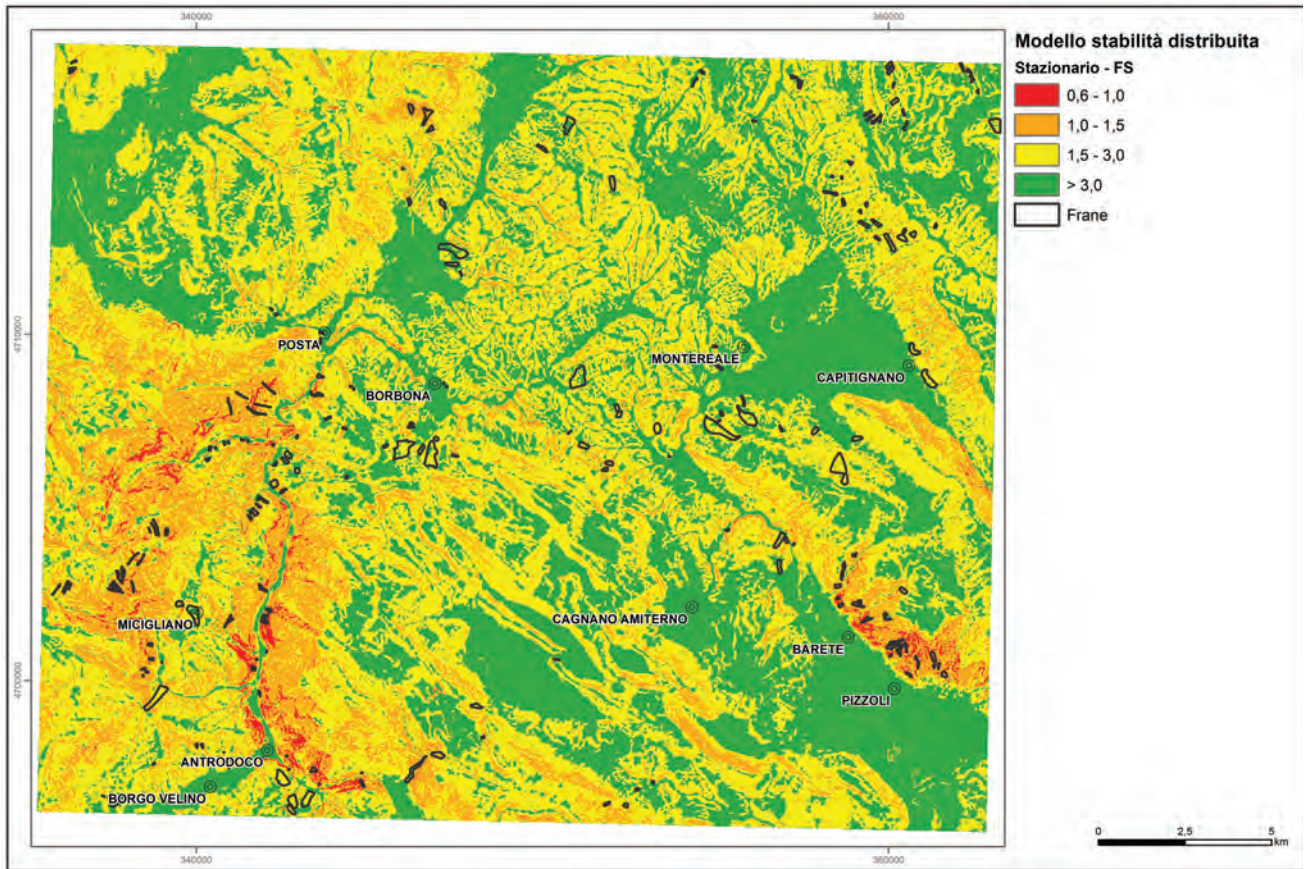


Fig. 59 – Valutazione del fattore di sicurezza utilizzando il modello di stabilità a pendio infinito.
 - Evaluation of the safety factor by using the model of infinite slope stability.

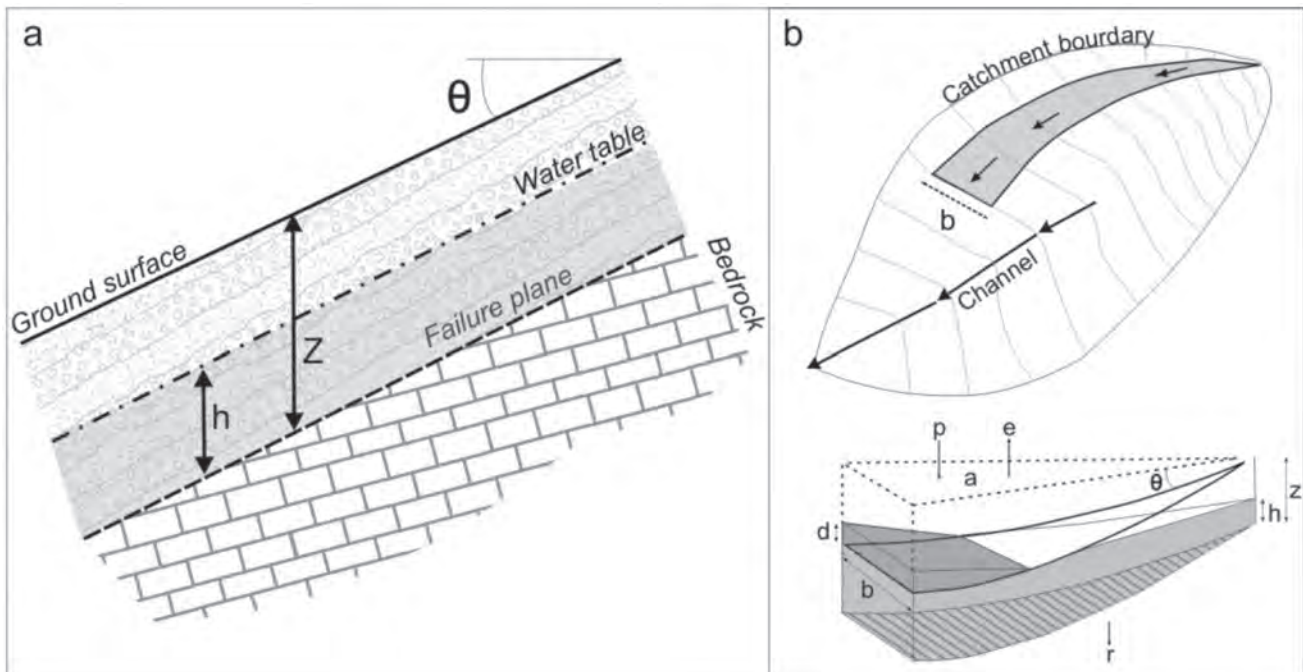


Fig. 60 – Schema riportante la simbologia adottata in *Shalstab* (da DIETRICH, 1992).
 - Scheme showing the notation in *Shalstab* (by DIETRICH, 1992).

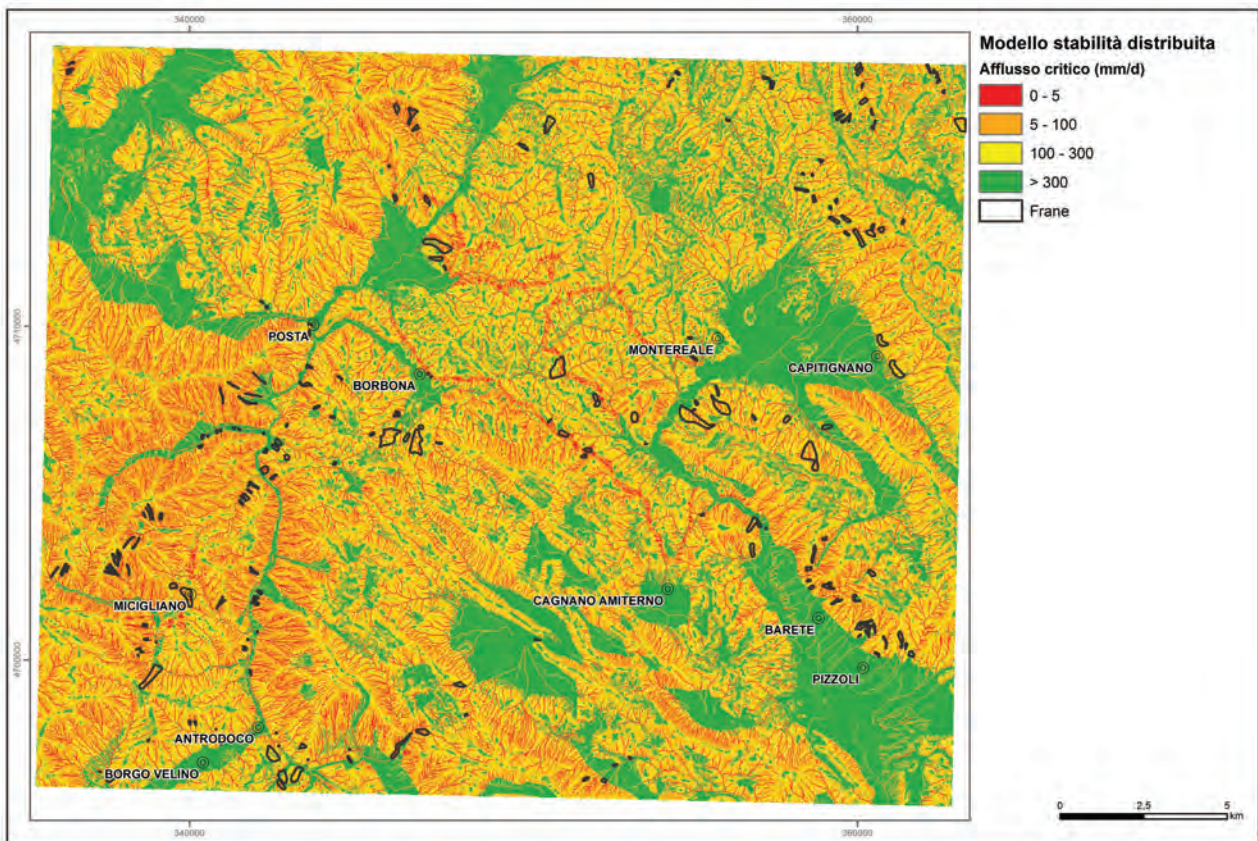


Fig. 61 – Valutazione del fattore di sicurezza utilizzando il modello di stabilità secondo lo schema dell’infiltrazione critica (Shalstab).
 -Evaluation of the safety factor by using the stability model according to the scheme of critical infiltration (Shalstab).

sviluppato in *Fortran*, che permette l’analisi del cambiamento della pressione dei pori e della variazione del fattore di sicurezza nel tempo dovuto all’infiltrazione meteorica, usando il metodo proposto da IVERSON (2000).

Il programma utilizza i seguenti parametri di *input* che vengono discretizzati cella per cella: intensità della precipitazione, pendenza, spessore della coltre, altezza dell’acqua iniziale, conducibilità idraulica verticale, diffusività idraulica, coesione, angolo di resistenza al taglio e peso di volume del suolo.

Il *software* combina modelli di infiltrazione, di flusso subsuperficiale e ruscellamento e di stabilità per valutare gli effetti di eventi meteorici critici su vaste aree.

La procedura utilizza un modello di stabilità e di infiltrazione come successivamente specificati.

8.3.1. - *Modello di infiltrazione*

Il processo è modellato attraverso la sovrapposizione di una componente transitoria ed una stazionaria che dipende dalle condizioni iniziali (fig. 62).

Il modello di infiltrazione è basato sulla soluzione linearizzata di Iverson della equazione di RICHARDS (1931).

La soluzione adottata per ottenere il carico idraulico al tempo *t* e alla profondità *Z* è:

$$\varphi(z,t) = [Z - d] \beta + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_{nz}}{K_z} \left[H(t - t_n) \left(D_n(t - t_n) \right)^{\frac{1}{2}} \operatorname{erfc} \left[\frac{Z}{2[D_n(t - t_n)]^{\frac{1}{2}}} \right] \right] - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_{nz}}{K_z} \left[H(t - t_{n+1}) \left(D_n(t - t_{n+1}) \right)^{\frac{1}{2}} \operatorname{erfc} \left[\frac{Z}{2[D_n(t - t_{n+1})]^{\frac{1}{2}}} \right] \right]$$

dove

Ψ = carico relativo alla pressione dell’acqua

t = tempo

Z = *z*/cosδ con *Z* profondità e *z* profondità normale all’angolo di pendenza δ

d = profondità dell’acqua misurata nella direzione *z*

I_{zLT} = flusso superficiale stazionario

$\beta = \cos^{2\delta} - [I_{zLT} / K_z]$

K_z = conduttività idraulica nella direzione *Z*

I_z = flusso stazionario iniziale

I_{nz} = flusso superficiale di data intensità per

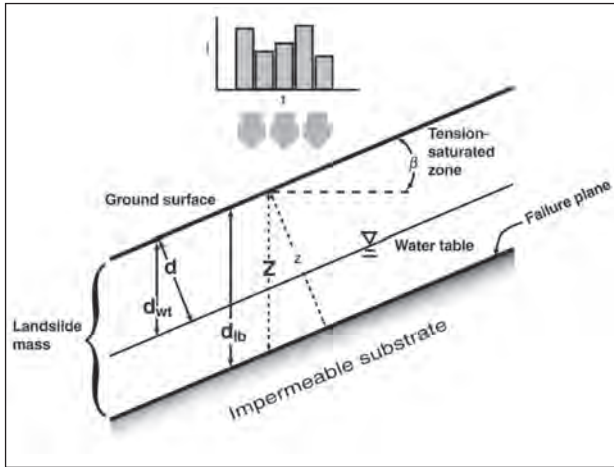


Fig. 62 – Schema con il sistema di coordinate e le condizioni di infiltrazione in un pendio sopra un limite impermeabile (GODT *et alii*, 2008).
 - *Schets showing the coordinate system and groundwater conditions in hillslope above an impermeable lower boundary.*

l'intervallo n

$$D_1 = D_0 \cos^{2\delta}$$

dove D_0 è la diffusività idraulica

N = numero di intervalli

$H(t-t_n)$ = funzione di HEAVYSIDE

Il primo termine dell'equazione rappresenta la parte stazionaria, il rimanente quella transitoria.

8.3.2. - *Modello di flusso e ruscellamento*

L'infiltrazione I quindi è la somma della Precipitazione P più un eventuale ruscellamento proveniente da monte R_u con la condizione di non superare la conduttività idraulica K_s secondo la seguente relazione:

$$I = P + R_u \quad \text{se } P + R_u \leq K_s$$

Da ogni cella dove $P + R_u$ è maggiore di K_s si genera un ruscellamento R_d che viene indirizzato alle celle sottostanti seguendo le seguenti condizioni:

$$R_d = P + R_u - K_s \quad \text{se } P + R_u - K_s \geq 0$$

$$R_d = 0 \quad \text{se } P + R_u - K_s < 0$$

8.3.3. - *Modello di stabilità*

Come nei casi precedenti viene utilizzata la relazione per la valutazione della stabilità di un pendio infinito

$$F_s = \frac{\tan \phi}{\tan \beta} + \frac{c - \phi(Z, t) \gamma_w \tan \phi}{\gamma_s Z \sin \beta \cos \beta}$$

dove

c = coesione

ϕ = angolo di resistenza

γ_w = peso di volume dell'acqua

γ_s = peso di volume del terreno

β = pendenza

Z = spessore della coltre

L'elaborazione prevede questi *step*:

- inizializzazione del *file* contenente il DTM attraverso un modulo del programma denominato TopoIndex necessario per il funzionamento della *routine di runoff* in TRIGRS.

Questa *routine* genera una griglia di fattori di peso che determinano quale porzione del ruscellamento è trasferita a ciascuna cella adiacente. Dopo una serie di tentativi il sistema che ha dato migliori risultati tra tutti quelli possibili è quello del D_{inf} di TARBOTON (1997) che assume che il flusso proceda dalla pendenza maggiore, calcola la direzione del pendio e ripartisce il flusso attraverso due celle con la pendenza maggiore.

8.3.4. - *Definizione dei dati di input.*

Le caratteristiche geotecniche ed idrauliche delle coltri sono le stesse utilizzate nelle precedenti simulazioni. Nella tabella 18 vengono sintetizzati i parametri di Permeabilità (K) e Diffusività (D_0), non considerati dai precedenti modelli.

Per quanto riguarda l'altezza iniziale dell'acqua è stata assunta coincidente con il *bedrock*, ipotizzando che precedentemente all'evento le coltri allo stato di pre-evento fossero asciutte.

In assenza di informazioni di dettaglio, i parametri idraulici necessari alla modellazione sono stati determinati attraverso una analisi parametrica.

Tab. 18 – *Caratterizzazione idraulica dei litotipi nel modello TRIGRS.*

- Hydraulic characterization of soil in TRIGRS model.

Litotipo	K (m/s)	D ₀ (m/s)
Depositi quaternari	1,00E-04	10 ⁻³
Depositi quaternari cementati	1,00E-06	10 ⁻⁵
Flysch	1,00E-07	10 ⁻⁶
Calcari marnosi	1,00E-07	10 ⁻⁶
Marne e Marne argillose	1,00E-08	10 ⁻⁷
Alternanza calcari	1,00E-07	10 ⁻⁶
Calcari stratificati	1,00E-07	10 ⁻⁶
Dolomie	1,00E-07	10 ⁻⁶

trica avente per finalità la massimizzazione della rapporto celle instabili correttamente classificate/celle instabili totali. Il fattore di sicurezza viene calcolato in diversi intervalli temporali e per diverse profondità della coltre. Tra tutti gli *output* possibili, relativi a diversi *step* temporali e per differenti spessori, nella figura 63 è riportato il Fattore di sicurezza minimo.

Sono state effettuate diverse elaborazioni tramite le quali è stato possibile valutare l'evoluzione dell'evento, nell'analisi dei risultati si fa riferimento a quella finale delle 24 ore.

I limiti delle classi di suscettibilità sono gli stessi utilizzati nel modello del pendio infinito.

do tra i risultati del modello e dei dati osservati (FRATTINI *et alii* 2010).

Tale confronto è realizzato attraverso la costruzione della tabella di contingenza che confrontando i valori reali (le frane censite nell'inventario) e quelli prodotti dal modello permette il conteggio dei veri negativi (TN), veri positivi (TP), falsi negativi (FN) e falsi positivi (FP). L'unità spaziale utilizzata è il *pixel* pertanto il lavoro sopracitato consiste nel conteggio dei correttamente e non correttamente classificati. Un *pixel* valutato instabile dal modello, se sovrapposto ad una frana censita, dà luogo ad un TP, altrimenti ad un FP. Viceversa, un *pixel* valutato stabile, se

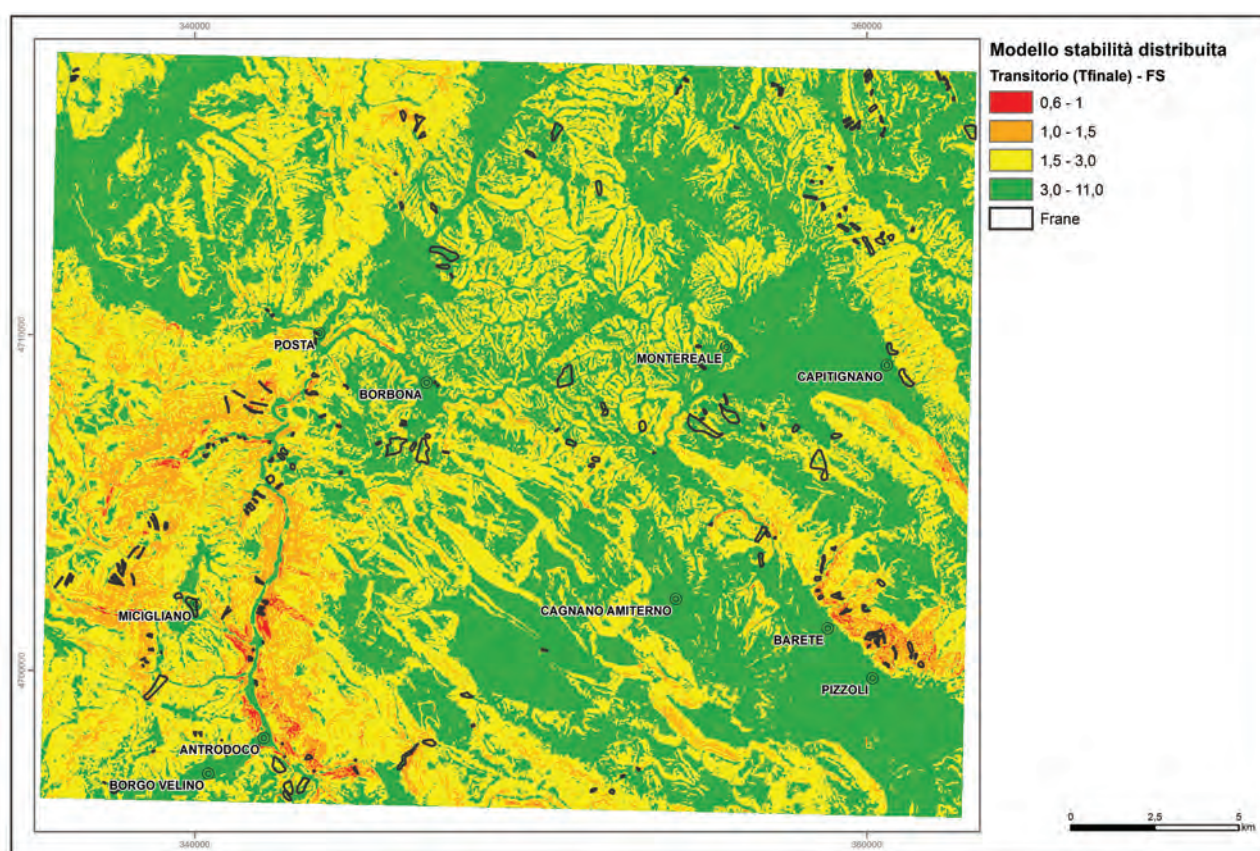


Fig. 63 – Valutazione del fattore di sicurezza utilizzando il modello di stabilità in condizioni transitorie TRIGRS.
-Evaluation of the safety factor by using the stability model in transient conditions (TRIGRS).

8.4. - ANALISI DELLE ELABORAZIONI

La valutazione dell'affidabilità e della *performance* di un modello costituisce un aspetto fondamentale nella modellazione della suscettibilità per frana.

Il criterio più rilevante per la valutazione della qualità è la valutazione della precisione del modello, che viene eseguita analizzando l'accor-

sovrapposto ad una frana censita, dà luogo ad un FN, altrimenti ad un TN.

Molti sono gli indici statistici sintetici che vengono utilizzati, in questo lavoro si intende presentare i risultati di due indici che utilizzano tutti i 4 gli elementi della tabella di contingenza.

In particolare è stato calcolato l'*Odd ratio skill score* (YULÈS Q; YULE, 1900) e il *k* di Cohen (HEIDKE, 1926), come visibile in tabella 19; il pri-

Tab. 19 – *Valutazione degli indici di performance nei modelli di calcolo adottati.*

- Evaluation of *performance* indexes in computational models adopted.

	Yule's Q	Cohen's K
Stazionario (FS = 1)	0,56	0,2
Transitorio (FS = 1)	0,7	0,021
Afflusso critico (AC = 5)	0,42	0,016
Afflusso critico (AC = 100)	0,36	0,006

mo indice è collegato all'*Odds Ratio*, che misura il rapporto di *Odds* tra predizioni vere e false, ma normalizzato ed oscillante tra i valori di +1 e -1.

Mentre il secondo misura la frazione di classificazione corretta dopo avere eliminato la parte dovuta unicamente ad una scelta casuale.

Il valore di *cut-off* utilizzato è Fs pari a 1 per i primi due metodi, per quanto riguarda l'Afflusso critico sono stati utilizzati 2 valori di *cut-off*:

a) 5 mm/day, soglia che si ottiene dalla curva ordinatrice tale che il *Ratio of Effectiveness* sia significativo (CHUNG & FABBRI, 2003);

b) 100 mm/day, desunta dalla curva ROC, considerando il punto più prossimo allo spigolo in alto a sinistra.

Dalla sola analisi di questi valori si dovrebbe osservare che il migliore metodo risulta essere quello Transitorio, con un valore di k di Cohen pari a 0.7 piuttosto soddisfacente.

In realtà dall'analisi dei valori di k di Cohen è evidente un'altra situazione: le differenze tra i diversi tipi di modellazione sono molto più sfumate e soprattutto i bassi valori che si evidenziano sono sintomo di una bassa *performance* in termini di concordanza tra dato simulato e reale.

Questa osservazione trova riscontro quando, anziché utilizzare un indicatore che ha la limitazione di considerare un solo valore di *cut-off*, si stima la *performance* attraverso la definizione di una curva ROC utilizzando differenti valori di *cut-off* (BEGUERIA, 2006) e calcolando il parametro AUC (AREA UNDER CURVE) come stima integrale del modello (fig. 64).

In modo controintuitivo, la modellazione che utilizza Shalstab, avente i più bassi valori di K di Cohen e Q di Yule, è caratterizzata da valori di AUC migliori degli altri modelli (AUC=0.63); il modello stazionario e quello transitorio hanno invece valori simili ma leggermente inferiori, rispettivamente 0.60 e 0.59.

Dalla forma delle curve si evince che gli ultimi

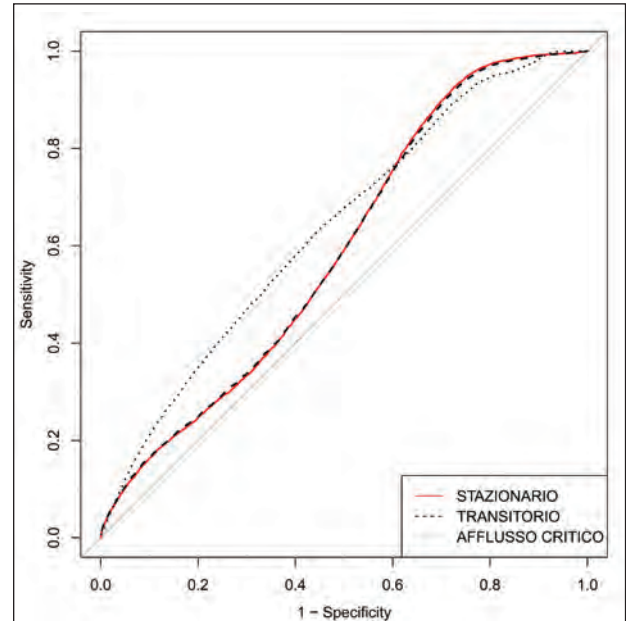


Fig. 64 – Curva ROC realizzata per i modelli di calcolo adottati.
- ROC curve created for the adopted calculation models.

due modelli sono molto simili, risultato in linea con il fatto che utilizzano lo stesso modello di stabilità e pertanto in condizioni di totale saturazione anche se ottenuta da modelli di infiltrazione differenti tendono a dare risultati analoghi. È evidente che dati i valori di AUC la *performance* di queste modellazioni è medio-bassa, risultato che è in concordanza con i bassi valori del k di Cohen. È evidente che i modelli proposti non corrispondono in modo adeguato alle tipologie di fenomeni avvenuti ma sicuramente più rilevante ancora è la bassa risoluzione del DTM, la caratterizzazione geotecnica insufficiente per un'areale così vasto e soprattutto la definizione delle regioni basate su una carta litologica avente una scala non di dettaglio.

I risultati delle analisi suggeriscono che, nell'area di studio per la determinazione della suscettività alle frane, il contributo di un modello fisicamente basato, completo di componente geo-meccanica e componente idrologica accoppiate, è assolutamente trascurabile rispetto ad un semplice modello geo-meccanico basato sulla pendenza e sulle caratteristiche meccaniche come quello del Pendio Infinito. La variabile pendenza contiene quindi quasi tutta l'informazione disponibile, come indicato anche dall'analisi statistica effettuata. I modelli che ipotizzano, nella componente idrologica, un movimento dell'acqua sub-superficiale prevalentemente parallelo al versante come SHALSTAB non sono adatti alle permeabilità molto basse caratteristiche delle argille. I modelli che ipotizzano il flusso verticale

come TRIGRS, basato sul lavoro di Iverson che si basano su assunzioni più adatte a litologie a bassa permeabilità, dovrebbero dare migliori risultati, ma come si è mostrato il contributo aggiuntivo che possono dare allo studio di suscettività (quindi solo alla localizzazione spaziale) è trascurabile rispetto al solo Pendio Infinito.

8.5. - ANALISI CINEMATICA – VERSANTI IN ROCCIA

È stato effettuato un rilevamento geomeccanico, secondo le metodiche Standardizzate da ISRM, la misura dei parametri giacitureali dei giunti di stratificazione (direzione, immersione, inclinazione) in corrispondenza degli affioramenti rocciosi individuati. Nell'area di studio, a causa della struttura massiva delle unità, nonché delle vaste coperture detritiche, gli affioramenti

validi per le misure di strato suddette si sono rivelati di numero scarso e di modesta estensione.

Tuttavia, malgrado la distanza relativamente elevata tra le giaciture misurate, queste hanno mostrato una certa omogeneità di valori e, considerando anche lo stile tettonico di tipo rigido presente, privo di mesostrutture plicative in grado di modificare la giacitura anche su distanze brevi, si presume che le giaciture misurate descrivano in modo sufficiente l'assetto delle formazioni nell'area di studio.

Durante il rilievo geologico di campagna sono state eseguite inoltre 23 stazioni di rilevamento geostrutturale su affioramenti rocciosi di una certa continuità e ubicati nelle zone più significative. Nella Carta geologica e geomorfologica sono state riportate le posizioni delle stazioni di rilevamento geomeccanico (fig. 65).



Fig. 65 – Localizzazione sulla carta geo-litologica (scala 1:50.000) delle stazioni di rilevamento geomeccanico.
- The geomechanical survey stations on the Geolithological map (scale 1:50,000).

Lo studio geomeccanico è stato sviluppato tramite la misura di una serie di parametri strutturali, giaciture e litotecnici dell'ammasso roccioso secondo quanto suggerito dall'ISRM, poi elaborati tramite il programma specifico di calcolo "Dips Ver. 6.0" della *Rockscience*.

In particolare sono stati presi in considerazione i seguenti parametri:

- numero di discontinuità;
- tipo di discontinuità;
- lunghezza;
- giacitura (immersione e inclinazione);
- natura del riempimento;
- presenza e quantità d'acqua;
- forma,
- scabrezza;
- litologia,
- durezza.

I risultati del lavoro di misura e calcolo eseguito sono stati riportati nelle tavole sottostanti con la rappresentazione sintetica delle principali famiglie di discontinuità calcolate per le singole stazioni geostutturali su reticolo equiareale di Schmidt

Il lavoro effettuato non ha la pretesa di essere esaustivo in quanto il numero di stazioni rilevato è decisamente esiguo ma come per altri aspetti ha una valenza esemplificativa.

L'insieme dei poli delle discontinuità è stato aggregato mediante una *cluster analysis* che ha permesso di evidenziare i sistemi di discontinuità presenti.

È stata realizzata la rappresentazione dei sistemi di discontinuità e la valutazione dei blocchi potenzialmente instabili dal punto di vista cinematico.

La rappresentazione delle giaciture dei piani di discontinuità viene effettuata attraverso le proiezioni sferiche, equatoriali o polari. Sono state utilizzate proiezioni a conservazione di aree (proiezioni equiareali) e angoli (proiezioni equiangolari).

Come precedentemente esplicitato, è stata effettuata una analisi statistica della distribuzione dei poli, per l'individuazione dei valori di giacitura più rappresentativi delle singole famiglie, corrispondenti alle zone di massimo addensamento dei poli.

La determinazione delle famiglie di discontinuità principali si ottiene elaborando i dati di orientazione in un diagramma di frequenza.

Una volta individuate le famiglie principali di discontinuità attraverso l'analisi statistica delle giaciture misurate in campagna, viene effettuata l'analisi delle possibilità cinematiche di rottura.

Per effettuare questa valutazione è stato uti-

lizzato del *Test* di Markland (*Test* di Harrison & Hudson) per individuare quantitativamente le discontinuità che rappresentano piani di scivolamento in un pendio in roccia.

Il procedimento fornisce un'indicazione qualitativa della stabilità del sistema di discontinuità in funzione del suo orientamento nello spazio e della stima della resistenza al taglio mobilitabile lungo i piani di possibile scorrimento. Quest'ultima grandezza viene quantificata attraverso il parametro angolo d'attrito medio delle discontinuità meccaniche.

Il *test* contempla:

- l'instabilità per scivolamento planare;
- l'instabilità per scivolamento di un cuneo;
- l'instabilità per ribaltamento flessionale;
- l'instabilità per ribaltamento diretto su blocchi;

Dall'analisi dei risultati delle elaborazioni e a seguito dei sopralluoghi effettuati si evince che la cinematica prevalente è quella dell'instabilità del blocco isolato, sono anche possibili localmente intersezioni di piani che generano cunei prevalentemente di piccole dimensioni che possono dar luogo a situazioni di instabilità (fig. 66).

Le considerazioni qui effettuate hanno una valenza di tipo locale piuttosto che areale, non-dimeno era necessario che venisse trattato anche questo aspetto.

8.6.- FRANE DI CROLLO – ANALISI TRAIETTOGRAFICA

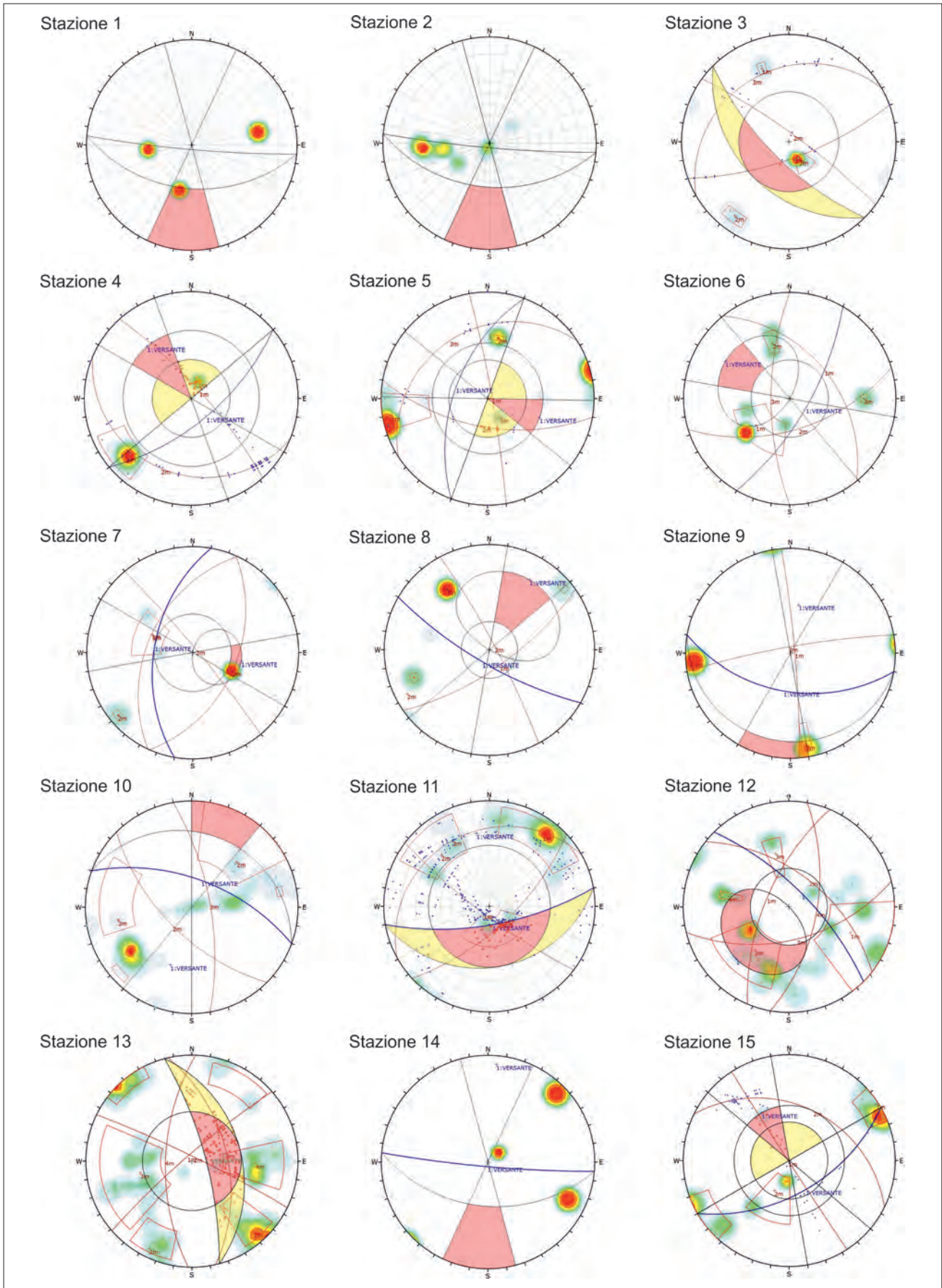
Trattando di carte di suscettibilità non poteva mancare l'analisi sulla tipologia di frana più frequente in zone montuose caratterizzate da versanti in roccia con pendenze subverticali.

L'innesco di una frana di crollo è generalmente determinato da una rottura per taglio o per trazione lungo piani di discontinuità preesistenti, che separano un blocco potenzialmente instabile dal pendio roccioso.

Il movimento di caduta di un blocco si può poi esplicitare secondo i moti gravitativi di caduta libera, rimbalzo, rotolamento e scivolamento (fig. 67).

Le caratteristiche del moto dipendono dalla forma e dimensione del blocco, dalla sua litologia e dalla geometria del pendio.

Alcuni autori (BOZZOLO & PAMINI, 1986; HOEK, 1987; PITEAU & CLAYTON, 1987; HOEK & BRAY, 1988) hanno proposto l'utilizzo di parametri, definiti come coefficienti di restituzione normale e tangenziale, per esprimere le caratteristiche di impatto e rimbalzo dei massi sul versante.



segue

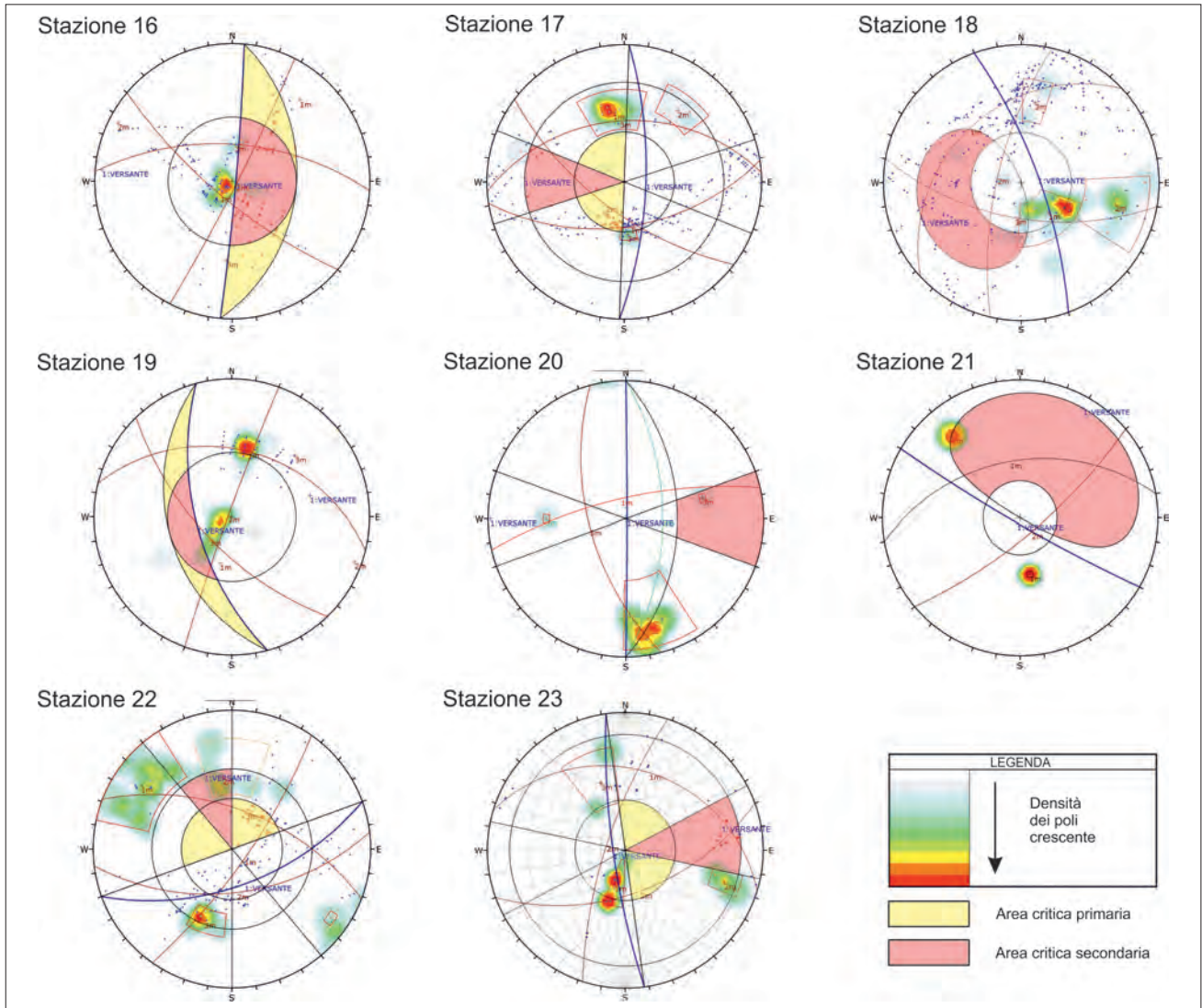


Fig. 66 – Risultato analisi cinematica effettuata sulle stazioni di rilevamento.
 - Outcome kinematic analysis performed on survey stations.

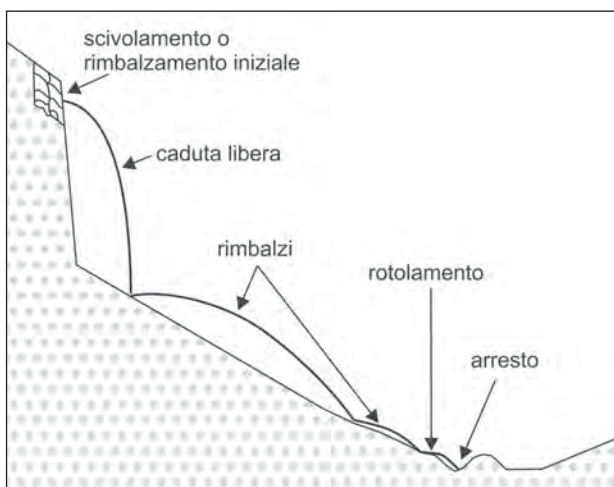


Fig. 67 – Schema del processo di frana di crollo.
 - Outline of rock fall process of.

Tali parametri descrivono la dissipazione di energia cinetica durante l'urto e sono esprimibili secondo le formule:

$$K_n = \frac{Vb_n}{Va_n} \quad K_t = \frac{Vb_t}{Va_t}$$

- K_n = Coefficiente di restituzione normale;
- K_t = Coefficiente di restituzione tangenziale;
- V_{an} = Componente normale della velocità prima dell'urto (V_a);
- V_{bn} = Componente normale della velocità dopo l'urto (V_b);
- V_{at} = Componente tangenziale della velocità prima dell'urto (V_a);
- V_{bt} = Componente tangenziale della velocità dopo l'urto (V_b).

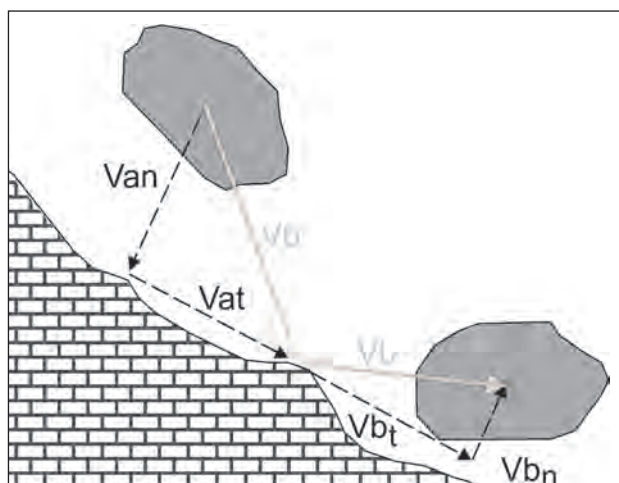


Fig. 68 – Definizione dei coefficienti di restituzione.
- Definition of the coefficients of restitution.

A tali coefficienti ne viene spesso associato un terzo, definito come coefficiente di roto-scivolamento, che esprime la perdita di energia causata dall'attrito tra il versante e il masso, nelle fasi di rotolamento/scivolamento (fig. 68).

In questo lavoro è stato utilizzato un modello cinematico che analizza il problema della delimitazione del massimo avanzamento dei blocchi, considerando la fisica del moto e le relative equazioni.

Tali equazioni descrivono le relazioni esistenti tra tipo di movimento (caduta, rimbalzo, rotolamento e scivolamento), energia del blocco in caduta e coefficienti di restituzione del versante. Il modello utilizzato è di tipo “*lumped mass*”, che assimila il blocco in caduta ad un punto materiale dotato di velocità e con massa concentrata nel punto stesso.

Si tratta del *software* commerciale Roto-map®GEO&SOFT srl il quale è stato interfacciato ad un GIS mediante una *toolbar* specifica sviluppata in ambiente *Python* che permette una semplice importazione ed esportazione dei dati di base e dei risultati.

A titolo di esempio si presentano due lavori effettuati nell'area del foglio che presentano una spiccata propensione a questa tipologia di fenomeni:

a) Iaccio crudele

Questa area è caratterizzata dall'essere in un ambiente prevalentemente alpino, la quota media si aggira intorno ai 1600 metri.

L'area in studio è attraversata da una strada interessata da frequenti crolli, il modello digitale che influenza la modellazione è il 20×20 m che è stato infittito tramite la digitalizzazione delle curve di livello che tuttavia non sono sufficienti a

descrivere in maniera attendibile la topografia.

Non si entra nello specifico del dettaglio dei parametri utilizzati per la modellazione. In figura 69 è riportata l'area interessata dalla modellazione e sono riportati i risultati della traiettografia con la tavola dei blocchi arrestati e l'energia cinetica corrispondente.

In essa si può osservare l'andamento del valore di energia cinetica e il numero di arrivi, parametri fondamentali per dimensionare le opere di protezione;

b) Salaria a nord di Antrodoco

In questo esempio si mostra una zona di fondovalle della Via Salaria caratterizzata dalla presenza di rilievi subverticali calcarei soggetti al distacco di blocchi di roccia. In questo caso il modello digitale è stato ottenuto da un rilievo di dettaglio, il passo del DTM è 5×5 m; in figura 70 è riportato, come nel caso precedente, il risultato in termini di numero di arrivi per cella e di energia cinetica.

Questo tipo di elaborazioni può essere utilizzato al fine di costruire una carta di suscettibilità su scala locale e per dimensionare le opere di protezione (valli o reti paramassi). È fondamentale in queste valutazioni indicare con la massima affidabilità la sorgente da cui provengono i crolli e le caratteristiche dei coefficienti di restituzione che vanno calibrati in funzione di una *back-analysis* sugli eventi di cui si trova traccia.

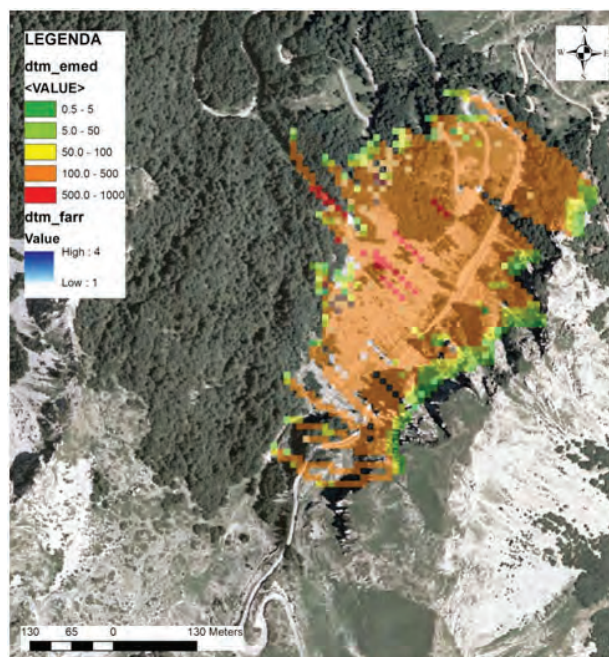


Fig. 69 – Risultato della analisi traiettografica effettuata in Località “Iaccio Crudele”.

- Outcome rockfall analysis using The lumped mass method performed in “Iaccio Crudele” Location.

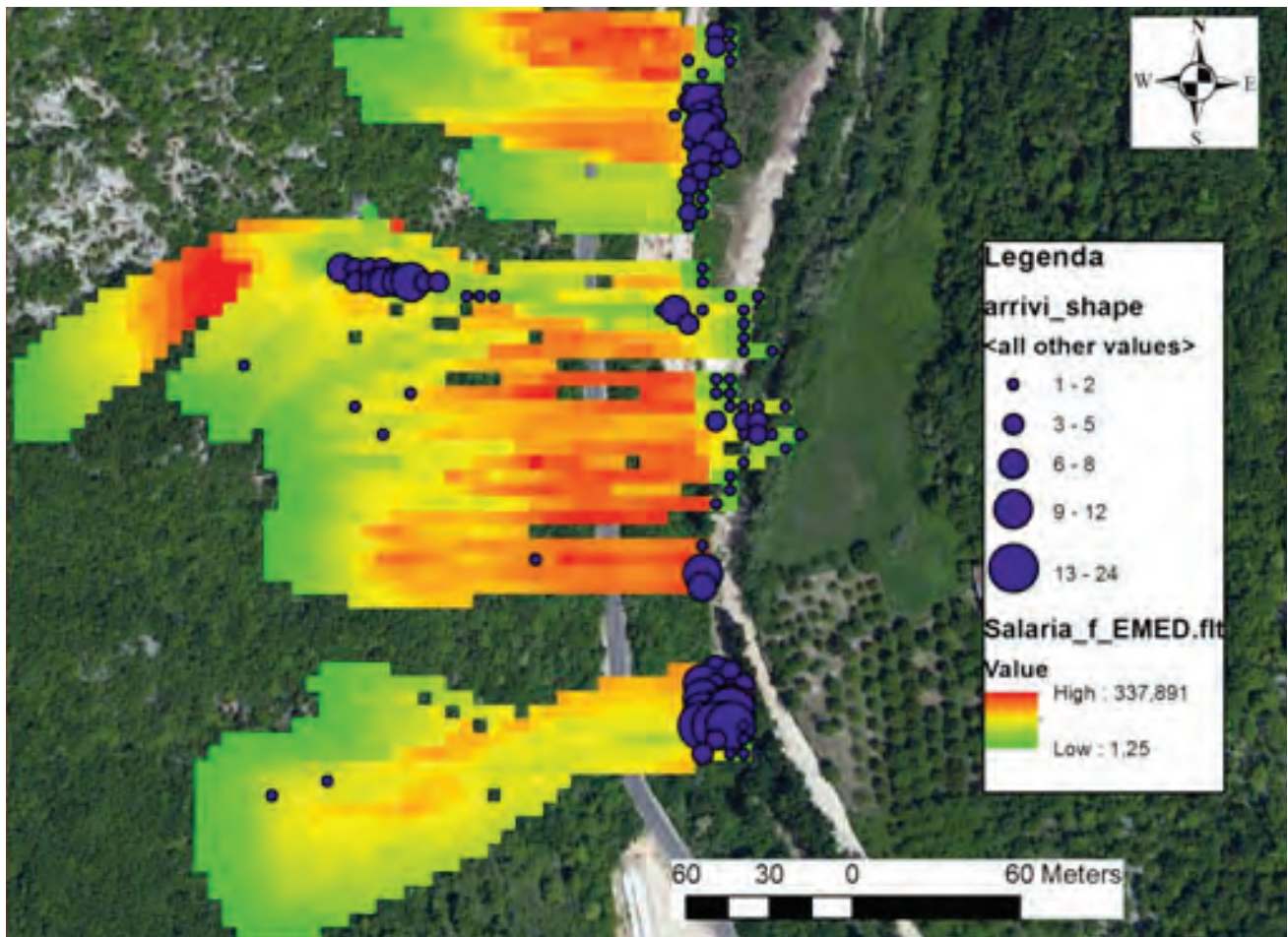


Fig. 70 – Risultato della analisi traiettografica effettuata in località “via Salaria”.
 - Outcome rockfall analysis using The lumped mass method performed in “Via Salaria” location.

9. - CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

9.1. - STRUTTURA DELLA CARTA E PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

Il risultato finale atteso dall'applicazione di un modello di valutazione della suscettibilità per instabilità di versanti consiste nell'allestimento di una cartografia tematica riportante la classificazione del territorio indagato in aree connotate da propensione spaziale e temporale al dissesto. Come spiegato in precedenza, per raggiungere l'obiettivo sopra enunciato, sono stati adottati due approcci metodologici differenti: deterministico e statistico.

Data la diversità degli approcci si è ritenuto che i risultati dell'applicazione dei due modelli non fossero paragonabili e, in ultima analisi, rappresentabili in un'unica cartografia.

È stato quindi deciso di produrre due cartografie distinte.

Nel seguito verrà illustrata la struttura.

9.1.1. - La struttura degli allestimenti cartografici

L'allestimento cartografico prodotto (fig. 71) per la componente “frane per mobilizzazione della coltre superficiale” si compone schematicamente di:

1 - un “campo della carta”, ovvero la porzione di superficie topografica rappresentata alla scala 1:50000, in cui è riportata la distribuzione spaziale delle classi di suscettibilità del territorio esaminato effettuata utilizzando la metodologia statistica logistica;

2 - legenda;

3 - Carta della suscettibilità realizzata mediante la metodologia statistica basata sul metodo deterministico dell'afflusso critico;

4 - Carta della suscettibilità realizzata mediante la metodologia statistica basata sul metodo deterministico in condizioni transitorie;

5 - Carta della suscettibilità realizzata mediante la metodologia statistica basata sul modello gerarchico-CART (*Classification and Regression Tree*);

6 - Carta della suscettibilità realizzata mediante la metodologia statistica basata sull'analisi condizionale, utilizzando unità a condizioni uniche (UCU);

7 - condizioni di uso della Carta della Suscettibilità geologica per instabilità di versante;

8 - inventario delle frane;

9 - modello digitale del terreno;

10 - Carta della accelerazione sismica elaborata utilizzando il parametro a_g (accelerazione massima del terreno) ottenuto dalle NTC 2008;

11 - Carta dell'Area contribuyente;

12 - distribuzione dell'evento critico pluviometrico con tempo di ritorno $t = 30$ anni, nelle 24 ore;

13 - Carta delle acclività;

14 - Carta della curvatura dei versanti;

15 - Carta dell'uso del suolo;

16 - Carta dell'esposizione dei versanti;

17 - Carta litologica;

18 - tipologia di fenomeni d'instabilità di versante.

9.2. - CONSIDERAZIONI SUI RISULTATI

Il lavoro effettuato ha consentito di comparare diverse metodologie sia statistiche che deterministiche al fine di ottenere delle carte di suscettibilità per frana di cui si è consapevoli delle limitazioni e

delle potenziali fonti di errore.

Queste includono:

- limiti nella carta inventario dei fenomeni franosi su cui si basano la carta della suscettibilità e la carta della suscettibilità;

- limiti nella stazionarietà delle serie temporali. Per esempio, la relazione tra i fattori innescanti (per es., le piogge) e la frequenza di accadimento dei fenomeni franosi può mutare se l'area viene deforestata;

- limiti nel livello di dettaglio disponibile della carta topografica, geologica e geomorfologica, dei dati di pioggia e di altri dati di *input*;

- incertezze del modello, volendo così significare i limiti dei metodi usati per mettere in relazione l'inventario, la topografia, la geologia, le geomorfologia e le cause d'innescamento – come le piogge – nell'analisi della suscettibilità.

Occorre ricordare che la zonazione non è una scienza esatta e che i risultati ottenuti rappresentano solo la previsione del comportamento di pendii sulla base dei dati disponibili.

In generale, i livelli di zonazione intermedio e avanzato sono meno soggetti ad errore rispetto al livello di zonazione preliminare, ciascuno condotto ad una appropriata scala di analisi (COROMINAS *et alii*, 2008).

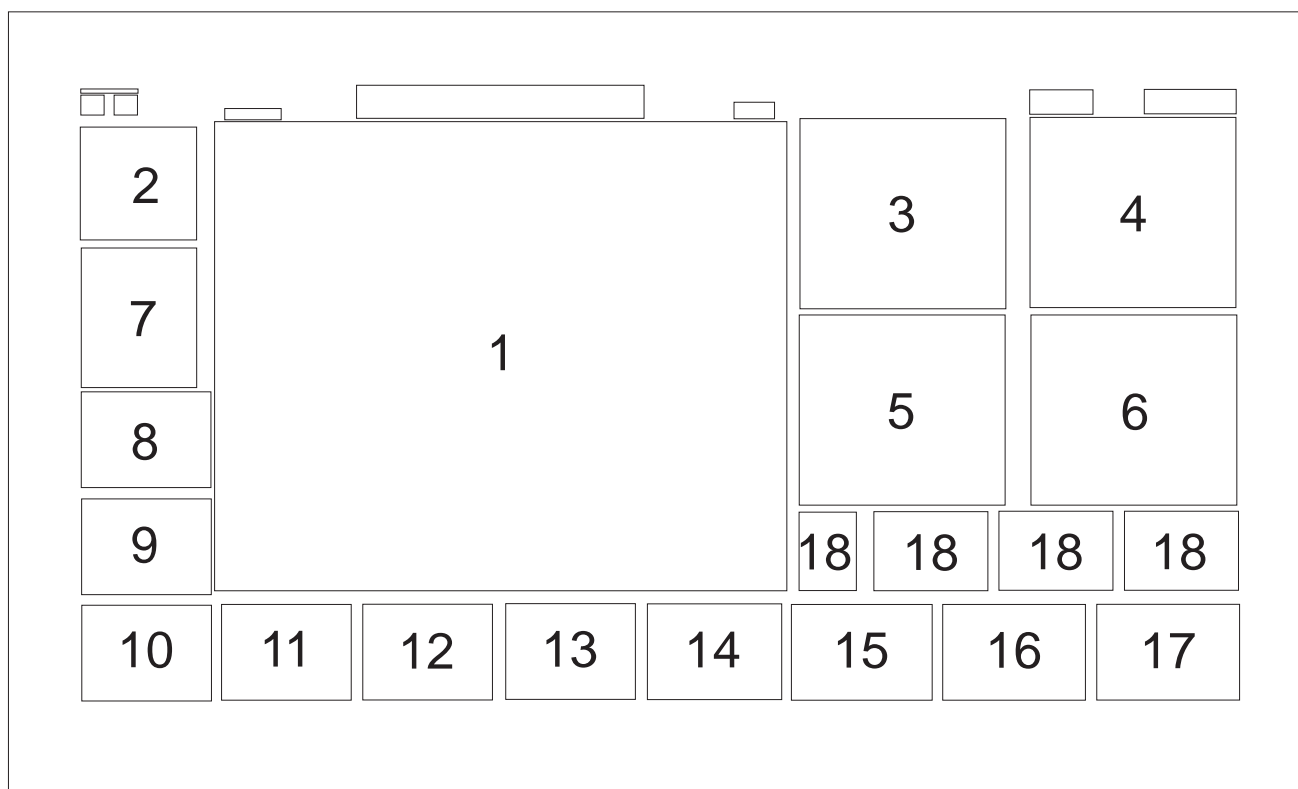


Fig. 71 - Struttura dell'allestimento cartografico. Per maggiori dettagli si rimanda al testo.
- Graphic structure chart. For more details, please refer to the text.

9.2.1. - *Metodi statistici*

I dati disponibili a livello di *pixel* sono stati sintetizzati in 9 variabili: litologia, accelerazione sismica, DTM, pendenza, esposizione, curvatura, pluviometria, uso del suolo e *flow accumulation*.

I valori assunti dalle variabili sono stati opportunamente raggruppati, anche discretizzando le variabili continue.

Sulla base del valore della statistica V di Cramer sono state identificate le 5 variabili maggiormente associate al fenomeno franoso (litologia, DTM, pendenza, esposizione, uso del suolo), ottenendo un numero trattabile di UCU, cioè di aree omogenee rispetto alla combinazione delle modalità di tali variabili.

Per ogni UCU è stata stimata la probabilità di frana utilizzando l'indice di franosità, che rapporta il numero di *pixel* in frana al numero di *pixel* dell'area. Questo metodo di stima, che non necessita di alcun assunto sul fenomeno in studio, non permette di associare alle stime un livello di errore né permette di valutare il ruolo dei regressori nel determinare il valore di probabilità dell'area.

Si è poi stimata la probabilità di frana per un *pixel* data la sua combinazione di valori dei 5 regressori, tramite un modello logistico adattato al caso di eventi rari. In questo caso, il modello ha fornito la stima ed il livello di significatività dei coefficienti dei 5 regressori, rendendo possibile valutare l'importanza di ognuno nel determinare il livello complessivo di rischio di frana.

Dallo studio effettuato risulta che tra i fattori che maggiormente influenzano il fenomeno, 3 su 5 sono legati alla pendenza, alla quota e all'esposizione, mentre gli altri sono relativi alle caratteristiche dei terreni quali litologia e uso del suolo. In particolare, si osserva che le modalità della variabile pendenza sono associate positivamente al fenomeno con maggior forza relativamente alle ultime classi (acclività comprese tra 30° e 75°) e che per la variabile litologia la classe maggiormente associata in maniera positiva è costituita dalle marne e marne argillose.

La capacità predittiva delle probabilità di frana ottenute dai due approcci, è stata valutata tramite la curva *Success-Prediction* per l'analisi condizionata, e tramite la curva ROC, per il modello logistico. Per entrambi gli approcci, le analisi hanno evidenziato una buona capacità predittiva delle stime ottenute.

Le esigenze operative di rappresentazione cartografica usualmente prevedono che le probabilità di frana vengano riportate divise in quattro classi di rischio: alto, medio-alto, medio-bas-

so e basso. Sono stati dunque applicati a questo scopo, due metodi di classificazione: l'algoritmo *Natural Breaks*, automaticamente implementato su sistemi GIS, e quindi facilmente utilizzabile, basato sull'analisi dei gruppi, ed il metodo sviluppato da Chung & Fabbri basato sulla costruzione della curva ordinatrice. Si sono così ottenute quattro mappe di suscettibilità, due per ogni approccio di stima della probabilità.

Dal confronto tra la percentuale di *pixel* presenti e quella dei *pixel* in frana nelle UCU classificate come ad alto rischio, emerge la buona capacità descrittiva del modello condizionale, se in congiunzione con il metodo di classificazione di Chung & Fabbri. Nel caso delle classi di suscettibilità costruite col metodo di Jenks, la capacità del metodo di individuare le UCU con più alto numero di frane, peggiora vistosamente.

L'osservazione resta valida nel caso delle classi di rischio costruite a partire dalle probabilità della logistica, anche se qui la capacità descrittiva del modello si attesta su valori comunque meno alti della precedente. Sulle elaborazioni realizzate pesa in generale il fatto citato in premessa relativo alla qualità dei dati non eccellente, in quanto ottenuti da data base nazionali pubblici e con un dettaglio di cella 20×20 m. È probabilmente imputabile a tale aspetto il valore controintuitivo dell'associazione negativa al fenomeno della variabile DTM.

La scelta di una scala di lavoro 1:50.000 che non è una scala di dettaglio su cui effettuare una pianificazione territoriale, consente però un miglior controllo del processo, riducendo i costi della zonazione e limitando le operazioni di dettaglio soltanto nelle aree per le quali quest'ultime risultano effettivamente necessarie.

Resta comunque verificato che, date le condizioni dello studio, la qualità delle mappe di suscettibilità risulta fortemente dipendente dal metodo con cui vengono identificate le classi, sia che esso venga applicato ai valori dell'indice di franosità di UCU, dunque con approccio completamente non parametrico, sia che venga applicato a probabilità stimate tramite il metodo parametrico logistico, con differenze decisamente rilevanti sui risultati finali.

L'approccio che utilizza la segmentazione gerarchica delle unità statistiche (*i pixel*) del collettivo in studio si è dimostrato un valido strumento di analisi, non parametrico, che permette l'individuazioni delle variabili esplicative che meglio spiegano la variabile dipendente, producendo regole di classificazione di facile interpretabilità.

La *performance* del modello in termini AUC risulta accettabile e le regole di classificazione

ottenute risultano in accordo con le cause determinanti dei fenomeni franosi note in letteratura (GUZZANTI *et alii*, 2005; CARRARA *et alii*, 1995).

Il modello tuttavia presenta dei punti critici connessi essenzialmente al tipo di algoritmo ricorsivo utilizzato nella partizione delle unità ed al fatto che crescere delle partizioni, i nodi diventano instabili perchè basati su un numero limitato di osservazioni.

9.2.2. - Metodi deterministici

Per quanto riguarda la metodologia deterministica come già precedentemente esposto la *performance* ottenuta anche con approcci non stazionari è decisamente molto più bassa di quella statistica.

Ovviamente i risultati del presente studio non escludono l'utilità della modellazione deterministica soprattutto per eventi che interessano la coltre superficiale, dove la pioggia, e il conseguente incremento delle pressioni neutre, rappresenta il fattore scatenante.

Esistono inoltre terreni con caratteristiche diverse dall'area esaminata nel presente lavoro, dove il flusso da monte non può essere trascurato e dove quindi la modellistica idrologica è necessaria per l'analisi di suscettività.

Come citato, i risultati della modellazione sono fortemente condizionati dalla qualità e dal livello di dettaglio dei parametri di *input*; per tale motivo la loro applicazione risulta molto più appropriata in situazioni locali ove siano disponibili dati affidabili di tipo geotecnico, idrologico e si disponga di un DTM di dettaglio.

Fondamentale è, in questo caso, considerare l'approssimazione nella caratterizzazione geotecnica dei litotipi, la non perfetta rispondenza del modello utilizzato ai fenomeni che si sono manifestati oltre che naturalmente il dettaglio del DTM. Infine un migliore risultato potrà scaturire dalla suddivisione dei domini di calcolo in base ad una carta litologica di maggiore dettaglio di quella attualmente disponibile.

BIBLIOGRAFIA

- AGATE M. *et alii* (2010) - *I 20 anni del Progetto di cartografia geologica nazionale*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **88**, 139.
- AKBARI A., YAHAYA F., AZAMIRAD M. & FANODI M. (2014) - *Landslide susceptibility mapping using logistic regression analysis and gis tools*. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 19, 1687-1696. <http://www.ejge.com/2014/Ppr2014.161mar.pdf>.
- ALMAGIÀ R. (1910a) - *Studi geografici sulle frane in Italia. L'Appennino centrale e meridionale. Conclusioni generali. App. 2: Prospetto cronologico delle principali frane*. Mem. Soc. Geogr. It., **14** (2), Roma.
- ALMAGIÀ R. (1910b) - *Studi geografici sulle frane in Italia. Distribuzione delle principali aree franose nell'Appennino Centrale e Meridionale, scala 1:500.000*. Mem. Soc. Geogr. It., **14** (2), Roma.
- ALMAGIÀ R. (1959) - *L'Italia*. UTET, pp. 1320.
- AMANTI M. (2010) - *Integrazioni geomatiche al rilevamento geologico: il caso del foglio "Antrodoco"*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **88** (2009), 39-46.
- AMANTI M., CASAGLI N., CATANI F., D'OREFICE M. & MOTTERAN G. (1996) - *Guida al censimento dei fenomeni franosi ed alla loro archiviazione*. Miscellanea Serv. Geol. It., **7**, pp. 109, Roma.
- AMANTI M., CHIESSI V., GUARINO P.M. & SERAFINI R. (2009). *Pericolosità per instabilità dei versanti del foglio 348 Antrodoco: distribuzione e tipologia dei fenomeni franosi*. Rend. Online, Soc. Geol. It., **6**, 7-8.
- AMANTI M., CHIESSI V., GUARINO P.M. & SERAFINI R. (2010) - *La cartografia dei fenomeni franosi nell'ambito del progetto "Foglio Antrodoco": stato di avanzamento e risultati conseguiti*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **88** (2009), 139.
- ANGELINI S., FARABOLLINI P., MENOTTI R.M., MILLESIMI F. & PETITTA M. (2004) - *Carta geomorfologico-turistica del comprensorio dei Monti Reatini (Appennino centrale), scala 1:12.500*. Regione Lazio, L.A.C., Firenze.
- ANNALI IDROLOGICI (1900-2012) - *Parte prima e parte seconda (sezioni di Roma, Pescara e Bologna)*. Servizio Idrografico Ministero dei Lavori Pubblici/Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale/Regioni Lazio, Abruzzo e Marche.
- ARINGOLI D. (1997) - *Geomorphology and Quaternary evolution of Central Apennines*. Suppl. di Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, **3**, 79-103.
- AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME TEVERE - *Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico*. Inventario dei fenomeni franosi. <http://www.abtevere.it/>
- BABENDERERDE S., HOEK E., MARINOS P. & CARDOSO A.S. (2005) - *EPB-TBM 2005. Face support control in the Metro do Porto project, Portugal*. RETC, Seattle.
- BAI S.B., WANG J., LÜ G.N., ZHOU P.G., HOU S.S., XU S.N. (2010) - *GIS-based logistic regression for landslide-susceptibility mapping of the Zhongxian segment in the Three Gorges Area, China*. Geomorphology, **115**, 23-31.
- BAUM R.L., SAVAGE W.Z., GODT J.W. (2008) - *TRIGRS - A FORTRAN program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope stability analysis, vers. 2.0*. U.S. Geol. Survey Open-File Rep. 2008-1159, pp. 75.
- BEGUERIA S. (2006) - *Validation and Evaluation of Predictive Models in Hazard Assessment and Risk Management*. Nat. Hazard, **37**, 315-329, doi:10.1007/s11069-005-5182-6.
- BERNOULLI D. (1967) - *Probleme der sedimentation in Jura Westgriechenlands und des Zentralen Apennin*. Verh. Natf. Ges. Basel, **78**, 35-54.

- BERSANI P., FERRANTI C., RUISI M. & VITALE V. (2008) - *Due grandi frane avvenute nell' 800 nel bacino del Tevere che hanno modificato importanti corsi d'acqua*, Riv. Ass.ne Idrotecnica Italiana, n. 3, Maggio-Giugno 2008, Roma.
- BERTI D., BLUMETTI A., CAPOTORTI F., CHIARINI E., D'AMBROGI C., DI STEFANO† R., FIORENTINO A., GUERRIERI L., LA POSTA E., MARINO M., MURARO C., PANTALONI M., PAPASODARO F., PERINI P., PICHEZZI R.M. & ROSSI M. (2010) - *La geologia del Foglio n. 348 "Anrodoco"*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **88** (2009), 134.
- BERTI D., CAPOTORTI F., CESTARI R., CHIOCCHINI M., D'AMBROGI C., DI STEFANO† R., FABBI S., MARINO M., MURARO C. & PICHEZZI R.M. (2013) - *Guida all'escursione del Foglio 367 "Tagliacozzo" e del Foglio 348 "Anrodoco"*, ottobre 2013, ISPRA, Roma.
- BEVEN K.J. & KIRBY M.J. (1979) - *A physically based variable contributing area model of basin hydrology*, Hydrol. Sci. Bull., **24**, 43-69.
- BIANCHI FASANI G. (2005) - *Consulenza geologica per l'individuazione delle cause dei movimenti franosi nel comune di Anrodoco (RI)*. Comune di Anrodoco (RI), Relazione Tecnica.
- BIENIAWSKI Z.T. (1974) - *Estimating the strength of rock materials*. S. Afr. Inst. Min.Met., **74**, 312-320.
- BIENIAWSKI Z.T. (1989) - *Engineering rock mass classifications*. New York, Wiley.
- BIENIAWSKI Z.T. (1993) - *Engineering Classification of Rock Masses: The RMR System and Future Trends*. Comprehensive Rock Engineering, Pergamon Press, New York, **3**, 553-573.
- BIGI S., CALAMITA F., CENTAMORE E., DEIANA G., RIDOLFI M. & SALVUCCI R. (1991) - *Assetto strutturale e cronologia della deformazione della "Zona d'incontro" tra le aree umbro-marchigiana e laziale-abruzzese (Marche meridionali e Lazio-Abruzzo settentrionale)*. Studi Geol. Camerti, vol. speciale 1991/2, CROP 11, 21-26.
- BLUMETTI A. (1995) - *Neotectonic investigations and evidence of palaeoseismicity in the epicentral area of January-February 1703, Central Italy, earthquakes*. In SERVA L. & SLEMMONS B. (Eds.): *Perspectives in Palaeosismology*, Ass. Eng. Geol. Spec. Pub., **6**, 83-100.
- BONI C.F., BONO P. & CAPELLI G. (1986) - *Schema idrogeologico dell'Italia centrale*. Mem. Soc. Geol. It., **35**, 991-1012.
- BOCCALETTI M., CALAMITA F., CENTAMORE E., CHIOCCHINI U., DEIANA G., MORATTI G., MICARELLI A. & POTETTI M. (1986) - *Evoluzione dell'Appennino toско-umbro-marchigiano durante il Neogene*. Giornale di Geologia, **48**, 227-233.
- BOCCALETTI M., CIARANFI N., COSENTINO D., DEIANA G., GELATI R., LENTINI F., MASSARI F., MORATTI G., PESCATORE T., RICCI LUCCHI F. & TORTORICI L. (1990) - *Palinspastic restoration and paleogeographic reconstruction of the peri-Tyrrhenian area during the Neogene*. Pal. Pal. Pal., **77**, 41-50.
- BOSCHI E., FERRARI G., GASPERINI P., GUIDOBONI E., SMERIGLIO G. & VALENSISE G. (eds.) (1995) - *Catalogo dei forti terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1980*. ING-SGA, Bologna, pp. 973.
- BREIMAN L., FRIEDMAN J.H., OLSHEN R.A. & STONE C.J. (1984) - *Classification and Regression Trees*. Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software.
- BRENNING A. (2005) - *Spatial prediction models for landslide hazards: review, comparison and evaluation*. Natural Hazards and Earth System Sciences, **5**.
- CALAMITA F., CENTAMORE E., DEIANA G. & RIDOLFI M. (1995) - *Caratterizzazione geologico-strutturale dell'area Marchigiano-Abruzzese esterna (Appennino centrale)*. Studi Geol. Camerti, vol. speciale 1995/1, 171-182.
- CALAMITA F. & DEIANA G. (1986) - *Geodinamica dell'Appennino Umbro-Marchigiano*. Mem. Soc. Geol.It., **35**, 311-316.
- CANTELLI C., CASTELLARIN A., PRATURLON A. (1978) - *Tettonismo giurassico lungo l' "Ancona- Anzio" nel settore Monte Terminillo-Anrodoco*. Geologica Rom., **17**, 87-97.
- CAPOTORTI F., CENTAMORE E., CHIOCCHINI M., CIVITELLI G., CORDA L., MANCINELLI A., MARIOTTI G., ROMANO A. & SALVUCCI R. (1991) - *Dati preliminari geologico-stratigrafici sull'Unità di Monte Giano e Monte Gabbia*. Studi Geologici Camerti, vol. spec. 1991/2 "Studi preliminari all'acquisizione dati del profilo CROP 11 Civitavecchia-Vasto", 119-123.
- CAPOTORTI F., FUMANTI F. & MARIOTTI G. (1995a) - *Evoluzione tettonico-sedimentaria e strutturazione del settore di piattaforma carbonatica laziale-abruzzese nell'alta Valle del F. Velino*. Studi Geologici Camerti, vol. spec. 1995/2: "Atti del Convegno Geodinamica e tettonica attiva del sistema Tirreno-Appennino", 101-111,
- CAPOTORTI F., FUMANTI F. & MARIOTTI G. (1995b) - *Carta geologica del settore compreso tra il M. Nuria, il M. Gabbia e l'alta valle del Fiume Velino (Appennino centrale) - scala 1:50.000*. Studio Faro, Roma,
- CAPPELLO A. (1826) - *Il Giornale Arcadico*, **28**.
- CARRARA A., CARDINALI M., GUZZETTI F. & REICHENBACH P. (1995) - *GIS technology in mapping landslide hazard*. In: Geographical Information Systems, *Assessing Natural Hazards*, CARRARA A. & GUZZETTI F. (Ed.), Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 135-176.
- CASTELLARIN A., COLACICCHI R. & PRATURLON A. (1978) - *Fasi distensive, trascorrente e sovrascorimenti lungo la "linea Ancona-Anzio" dal Lias al Pliocene*. Geol. Romana, **17**, 161-189.
- CASTELLARIN A., COLACICCHI R., PRATURLON A. & CANTELLI C. (1982) - *The Jurassic-Lower Pliocene history of the ancona-Anzio line (central Italy)*. Mem. Soc. Geol. It., **24**, 325-336.
- CASTRACANI A.M., CELICO P., DI GIULIO S., GHIARA M.R., STANZIONE D. & VALLETA M. (1995) - *Idrogeologia e geochemica del settore meridionale dei Monti del Sannio*. Boll. Serv. Geol. d'It., **112**, 3-26.
- CATASTO DELLE CAVITÀ NATURALI. Federazione Speleologica del Lazio (<http://www.speleo.lazio.it/GROTTA/catasto.php>).
- CATENACCI V. (1992) - *Il dissesto geologico e geoambientale in Italia dal dopoguerra al 1990*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **47**, pp. 301, Roma.
- CENTAMORE E., CHIOCCHINI U., CIPRIANI N., DEIANA G. & MICARELLI A. (1978) - *Analisi dell'evoluzione tettonico-sedimentaria dei "bacini minori" torbiditici del Miocene medio-superiore nell'Appennino umbro-marchigiano e laziale-abruzzese: Risultati degli studi in corso*. Mem. Soc. Geol. It., **18**, 135-170.

- CENTAMORE E., DEIANA G., MICARELLI A. & POTETTI M. (1986) - *Il Trias-Paleogene nelle Marche*. In “*La Geologia delle Marche*”, Studi Geologici Camerti, Vol. Spec., 9-27.
- CENTAMORE E., CIVITELLI G., CORDA L., MARIOTTI G., ROMANO A., CAPOTORTI F. & SALVUCCI R. (1991) - *Carta geologica dell'area di M. Giano-M. Gabbia - Gole del Velino (Alta valle del F. Velino, Lazio nord-orientale) - Scala 1:25.000*. ESSE GI ESSE, Roma.
- CHAU K.T. & CHAN J.E. (2005) - *Regional bias of landslide data in generating susceptibility maps using logistic regression: Case of Hong Kong Island*. *Landslides*, **2**, 280–290, doi:10.1007/s10346-005-0024-x.
- CHIARINI E., LA POSTA E., CIFELLI F., D'AMBROGI C., EULILLI V., FERRI F., MARINO M., MATTEI M. & PUZZILLI L.M. (2014) - *A multidisciplinary approach to the study of the Montereale Basin (Central Apennines, Italy)*. *Rend. Fis. Acc. Lincei* - DOI 10.1007/s12210-014-0311-3.
- CHIOCCHINI M., DEIANA G., MANCINELLI A. & PIERUCCINI U. (1982) - *Schema dell'evoluzione paleogeografica dell'area del Gran sasso d'Italia durante il Trias superiore-Cretaceo inferiore*. *Rend. Soc. Geol. It.*, **5**, 35-38.
- CHUNG C.F., FABBRI A.G. & VANWESTEN C.J. (1995) - *Multivariate Regression Analysis for Landslide Hazard Zonation*. In: *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, (Ed.): CARRARA A. & GUZZETTI F., Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 107-134.
- CHUNG C.J.F. & FABBRI A.G. (2003) - *Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Hazard Mapping*. *Nat. Hazards*, **30**(3), 451-472, doi:10.1023/B:NHAZ.0000007172.62651.2b.
- CHUNG C.J. & FABBRI A.G. (2008) - *Predicting landslides for risk analysis-spatial models tested by a cross-validation technique*. *Geomorphology*, **94**, 438-452.
- COMUNE DI POSTA (RI) (1999) - *Studio Geomorfologico-idrologico dell'area di Vallescura-Sigillo per la realizzazione di interventi urgenti a seguito degli eventi alluvionali del dicembre 1999*. Rapporto Tecnico.
- CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE (2014) - *Progetto AVI*. AVI Project <http://avi.gndci.cnr.it/>.
- COROMINAS J., LEROI E. & SAVAGE W. Z. (Eds. 2008) - *Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning*. *Engineering Geology*, **102**, 85-98.
- CRUDEN D.M. & VARNES D.J. (1996) - *Landslide types and processes*. In: A.K. TURNER & R.L. SCHUSTER (Eds), *Landslides, Investigation and Mitigation*. Special Report 247. TRB, National Research Council, Washington D.C., 36-75.
- DALLAN NARDI L., ELTER P. & NARDI R. (1971) - *Considerazioni sull'arco dell'Appennino settentrionale e sulla “linea” Ancona-Anzio*. *Boll. Soc. Geol. It.*, **90**, 203-211.
- DEFFENU L., LOMBARDI L., FEDERICI C. (1975) - *An introductory note on statistical analysis of physiochemical characteristics of natural waters. Application to some central Apennines spring waters*. *Accademia Nazionale dei Lincei, Rend. Sci. Fis. Mat. e Nat.*, **59**, Roma.
- DEIANA G., PASQUALINI L., SALVUCCI R., STROPPA P. & TONDI E. (1995) - *Il sistema dei sovraccorrimenti dei Monti Reatini: analisi geometrica e cinematica*. Studi Geologici Camerti, Volume speciale 1995/2, 199-206.
- FALASCHI F., GIACOMELLI F., FEDERICI P. R., PUCCINELLI A., D'AMATO AVANZI G., POCHINI A. & RIBOLINI A. (2009) - *Logistic regression versus artificial neural networks: landslide susceptibility evaluation in a sample area of the Serchio River valley, Italy*. *Nat Hazards*, **50**, 551–569, doi:10.1007/s11069-009-9356-5.
- FAWCETT T. (2006) - *An introduction to ROC analysis*. *Pattern Recognition Letters*, **27**, 861–874.
- FAZZINI M. (2005) - *Definizione quantitativa dei regimi pluviometrici nelle Alpi orientali italiane*. *Geogr. Fis. Dinam. Quat., Suppl.* **7**, Vol. spec., 155-162.
- FEDERICI P.R., PUCCINELLI A., CANTARELLI E., CASAROSA N., D'AMATO AVANZI G., FALASCHI F., GIANNICCHINI R., POCHINI A., RIBOLINI A., BOTTAI M., SALVATI N. & TESTI C. (2008) - *Multidisciplinary investigations in evaluating landslide susceptibility. An example in the Serchio River valley (Italy)*. *Quaternary International*, 171-172, 52–63.
- FIGO G. (2011) - *Segnalazione di eventi franosi del passato nell'area del F. Antrodoco e ipotesi di correlazione con eventi sismici*. ISPRA, Stage di formazione anno 2011, Relazione Conclusiva.
- Frattoni P., Crosta G. & Carrara A. (2010) - *Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models*. *Engineering Geology*, **111**, 62–72.
- GHISETTI F. & VEZZANI L. (1988) - *Rapporti strutturali tra il fronte del Gran Sasso ed il Fhsch della Laga (Appennino centrale)*. *Mem. Soc. Geol. It.*, **41**, 1171-1178.
- GHISETTI F. & VEZZANI L. (1990) - *Stili strutturali nei sistemi di sovraccorrimento della catena del Gran Sasso (Appennino Centrale)*. *Atti del Conv.: “Neogene thrust tectonics - Esempi da Alpi meridionali, Appennino e Sicilia”*, Parma, Studi Geol. Camerti, vol. speciale, 37-50.
- GODT J.W., BAUM R.B., SAVAGE W.Z., SALCIARINI D., SCHULZ W. H. & HARP E.L. (2008) - *Transient deterministic shallow landslide modeling: Requirements for susceptibility and hazard assessments in a GIS framework*. *Eng. Geol.*, **102**, 214–226.
- GUARINO P.M., MENOTTI R.M., MOTTERAN G. & SERAFINI R. (2012) - *Flood and slope processes in the Scura Valley (Reatini Mts., Central Apennines, Italy)*. *Meteoclimatic analysis and geomorphological evolution*. *Proceedings of the Second World Landslide Forum*, vol. 4, 243-248.
- GUERRICCHIO F. (1982) - *Carsogenesi e movimenti gravitativi nelle formazioni carbonatiche dell'Appennino meridionale*. *Geologia Applicata e Idrogeologia*, **17**, 2, 1982.
- GUMBEL E. J. (1958) - *Statistics of Extremes*. Columbia Univ. Press, N.Y.
- GUZZETTI F., REICHENBACH P., CARDINALI M., GALLI M. & ARDIZZONE F. (2005) - *Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale*. *Geomorphology*, **72**, 272-299.
- GUZZETTI F., GALLI M., REICHENBACH P., ARDIZZONE F. & CARDINALI M. (2006) - *Landslide hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, Central Italy*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **6**, 115-131.
- HAMMOND C., HALL D., MILLER S. & SWETIK P. (1992) - *Level*

- I Stability Analysis (LISA) Documentation for Version 2*. General Technical Report INT-285, USDA Forest Service Intermountain Research Station, 121.
- HANSEN A. (1984) - *Landslide hazard analysis*. In: BRUNSEN D. & PRIOR D.B. (Eds.), *Slope Stability*, John Wiley & Sons, New York, 523-602.
- HEIDKE P. (1926) - *Berechnung der erfolge und der gute der windstarkevorhersagen im sturmwarnungsdienst*. Geogr. Ann., **8**, 301-349.
- HOEK E. (1986) - *Rockfall: a computer program for predicting rockfall trajectories*. Unpublished internal notes, Golder Associates, Vancouver.
- HOEK E. & BRAY J.W. (1981) - *Rock Slope Engineering*. Institution of Mining and Metallurgy, 360, London.
- HOEK E, KAISER PK. & BAWDEN WF. 1995. *Support of Underground Excavations*. In: *Hard Rock*. A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 215.
- HOEK E. & BROWN E.T. (1997) - *Practical estimates of rock mass strength*. Int'l. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts, **34** (8), 1165-1186.
- HOEK E., MARINOS P. & BENISSI M. (1998) - *Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation*. Bull. Engg. Geol. Env. **57**(2), 151-160.
- HOEK E. & MARINOS P. (2007) - *A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion*. Soils & Rocks, No. 2, November 2007.
- ISPRA (2008) - *Landslides in Italy*. Special Report 83/2008, 40 pp.
- ISPRA (2010) - *Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia (IFFI)*. WWW.ISPRAMBIENTE.GOV.IT
- ISRM (1978) - *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. International Journal of rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, **15**(6), 319-368.
- IVERSON R.M. (2000) - *Landslide triggering by rain infiltration*. Water Resources Research, v. 36, no. 7, 1897-1910.
- JENKS G.F. & CASPALL F.C. (1971) - *Error on Choroplethic Maps: Definition, Measurement, Reduction*. Ann. Assoc. Am. Geogr., **61**(2), 217-244.
- JORDI COROMINAS *et alii* (2011) - *Recommended procedure for validating landslide model*. 7th Framework Programme Safeland D2-8.
- KENDALL M. & STUART A. (1979) - *The Advanced Theory of Statistics: Inference and Relationship*. Griffin, London. pp. 748.
- KING G. & ZENG L. (2001) - *Logistic Regression in Rare Events Data*. Political Analysis **9**, 137-163.
- IMAI K., KING G. & LAU O. (2013) - *Relogit: Rare Events Logistic Regression for Dichotomous Dependent Variables*. In: Kosuke Imai, Gary King and Olivia Lau, "Zelig: Everyone's Statistical Software" <http://gking.harvard.edu/zelig>.
- LASKO T.A., BHAGWAT J.G., ZOU K.H. & OHNO-MACHADO L. (2005) - *The use of receiver operating characteristic curves in biomedical informatics*. J. Biomed. Inform., **38**, 404-415, doi:10.1016/j.jbi.2005.02.008.
- LEE S., RYU J.H. & KIM I.S. (2007) - *Landslide susceptibility analysis and its verification using likelihood ratio, logistic regression, and artificial neural network models: case study of Youngin, Korea*. Landslides, **4**, No. 4, 327-338.
- LONGLEY P.A. & BATTY M. (Eds.) (2003) - *Advanced Spatial Analysis*. The CASA book of GIS. ESRI, Redlands, CA.
- MANFREDINI M. (1966) - *Sui rapporti tra facies abruzzese ed umbra nell'appennino centro meridionale*. Boll. Serv. Geol. d'It., **86**, 3-27.
- MARINOS P. & HOEK E. (2000) - *GSI A geologically friendly tool for rock mass strength estimation*. Proc. GeoEng2000 Conference, Melbourne, 1422-1442.
- MARINOS P., HOEK E. & MARINOS V. (2006) - *Variability of the engineering properties of rock masses quantified by the geological strength index: the case of ophiolites with special emphasis on tunnelling*. Bull. Eng. Geol. Em., **65**/2, 129-142.
- MARTINIS B. & PIERI M. (1964) - *Alcune notizie sulla formazione evaporitica del Trias superiore nell'Italia centrale e meridionale*. Mem. Soc. Geol., **4**, 648-672.
- MARTINO S., MOSCATELLI M. & SCARASCIA MUGNOZZA G. (2004) - *Quaternary mass movement controlled by a structurally complex setting in the central Apennines (Italy)*. Engineering Geology, **72**, 33-55.
- MCCOY J. (2004) - *ArcGIS 9. Geoprocessing in ArcGIS*. Esri Press, Redlands, CA.
- MCCOY J., JOHNSTON K., KOPP S., BORUP B. & WILLISON J. (2004) - *ArcGIS 9: Using ArcGIS Spatial Analyst*. ESRI, Redlands, CA, pp. 232.
- MELCHIORRE C., MATTEUCCI M., AZZONI A. & ZANCHI A. (2008) - *Artificial neural networks and cluster analysis in landslide susceptibility zonation*. Geomorphology, **94**, 379-400.
- MENOTTI R.M., MILLESIMI F. & PETITTA M. (1999) - *Carta dei fenomeni franosi interessanti i centri abitati e la viabilità nella Provincia di Rieti*. Pubbl. GNDICI-CNR n. 1634, Roma.
- MOSCA G. (1999) - *Posta nell'alta valle del Velino - Raccolta di dati per una storia civile e religiosa*. Amm. Prov.le di Rieti, pp. 235.
- OGNIBEN L. (1969) - *Schema introduttivo alla geologia del confine calabro-lucano*. Mem. Soc. Geol. It., **8**, 453-763.
- PANG P.K., TIEN L.T. & LATEH H. (2012) - *Landslide hazard mapping of Penang island using decision tree model*. In: Proceedings of the International Conference on Systems and Electronic Engineering (ICSEE '12), Phuket, Thailand, December 2012.
- PANTALONI M., CAPOTORTI F., D'AMBROGI C. & DI STEFANO† R. (2004) - *Guida alla geologia del Foglio 348 Anrodoco*. ISPRA, Documento interno.
- PAROTTO M. & PRATURLON A. (1975) - *Geological summary of the Central Apennines*. In: L. OGNIBEN, M. PAROTTO & A. PRATURLON (Eds.) "Structural Model of Italy", Quad. Ric. Scient. C.N.R., **90**, 257-311.
- PATACCA E. & SCANDONE P. (1987) - *Tectonic evolution of the outer margin of the Apennines and related foredeep system*. Acc. Naz. Lincei, 139-142. Roma.
- PETITTA M. (2009) - *Idrogeologia della media valle del Fiume Velino e della Piana di S. Vittorino (Rieti, Italia Centrale)*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, **1**, 157-181.
- PIANA F. (1995) - *Caratteri geologico-strutturali della zona di M. Gabbia tra le Valli Velino ed Aterno (Appennino centrale,*

- zona di raccordo tra i sovrascorrimenti del Gran Sasso e dei M. Sibillini*). Studi Geologici Camerti, vol. spec. 1995/2, “Atti del Convegno Geodinamica e tettonica attiva del sistema Tirreno-Appennino”, 375-385.
- PIERANTONI P.P., DEIANA G., ROMANO A., PALTRINIERI W., BORRACCINI F. & MAZZOLI S. (2005) - *Geometrie strutturali lungo la thrust zone del fronte montuoso umbro-marchigiano-sabino*. Boll. Soc. Geol. It., **124**, 395-411.
- PITEAU D.R. & CLAYTON R. (1987) - *Computer rockfall model*. Proceeding Meeting on Rockfall Dynamics and Protective Works Effectiveness, Bergamo, Italy. ISMES, **90**, 123-125.
- PORTALE DEL CATASTO NAZIONALE DELLE GROTTIE D'ITALIA <http://catastogrotte.speleo.it/search1/>
- PRADHAN B. (2013) - *A comparative study on the predictive ability of the decision tree, support vector machine and neuro-fuzzy models in landslide susceptibility mapping using GIS*. Computers & Geosciences, **51**, 350-365.
- PRADHAN B. & LEE S. (2010) - *Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: back propagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modeling*. Environmental Modelling & Software, **25**, 747-759.
- QUINN P.F., BEVEN K.J., CHEVALLIER P. & PLANCHON O. (1991) - *The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models*. Hydrological Processes, **5**, 59-79.
- R CORE TEAM (2012) - *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>
- REGIONE LAZIO - *Annali idrologici*. Agenzia Mareografica ed Idrografica. www.idrografico.roma.it/default.aspx
- REICHENBACH P., GUZZETTI F. & CARRARA A. (Eds.) (2002) - *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Abstracts Volume, CNR-IRPI, Perugia, pp. 140
- REGMI N.R., GIARDINO J.R., McDONALD E.V. & VITE J.D. (2014) - *A comparison of logistic regression-based models of susceptibility to landslides in western Colorado, USA*. Landslides, **11**, Issue 2, 247-262. <http://dx.doi.org/10.1007/s10346-012-0380-2>
- RICHARDS L.A. (1931) - *Capillary conduction of liquids through porous media*. Physics, **1**, 318-333.
- SAITO H., NAKAYAMA D. & MATSUYAMA H. (2009) - *Comparison of landslide susceptibility based on a decision-tree model and actual landslide occurrence: The Akaishi Mountains, Japan*. Geomorphology, **109**, no. 3-4, 108-121.
- SALVINI F. & VITTORI E. (1982) - *Analisi strutturale della linea Olevano-Antrodoco-Posta (Ancona-Anzio Auctt.): metodologia di studio delle deformazioni fragili e presentazione del tratto meridionale*. Mem. Soc. Geol. It., **24**, 337-335.
- SALVUCCI R. (1995) - *Caratterizzazione geologico strutturale della “zona d’incontro” tra il dominio sabino e quello abruzzese a nord di Antrodoco*. Studi Geol. Camerti, vol. speciale 1995/2, 397-406.
- SCARSELLA F. (1951) - *Sulla zona di incontro dell’Umbria e dell’Abruzzo*. Boll. Serv. Geol. d’It., **71**, 155-165.
- SCARSELLA F. (1953) - *Relazioni preliminari sui rilevamenti geologici fatti durante il 1953 nei fogli 139 L’Aquila e 140 Teramo*. Boll. Serv. Geol. d’It., **73**, 309-320.
- SEGRE A. (1948) - *I fenomeni carsici e la speleologia del Lazio*. Pubbl. Ist. Geografia, Univ. La Sapienza, serie A, **7**, Roma.
- SERVIZIO GEOLOGICO D’ITALIA - *Carta Geologica d’Italia in scala 1:100.000 - F.139 L’Aquila* (1955a). IPZS, Roma.
- SERVIZIO GEOLOGICO D’ITALIA - *Carta Geologica d’Italia in scala 1:100.000 - F.140 Teramo* (1955b). IPZS, Roma.
- SERVIZIO GEOLOGICO D’ITALIA - *Carta Geologica d’Italia in scala 1:50.000 - Foglio 358 Pescorocchiano* (2010). Regione Lazio. A.T.I.-SystemCart-L.A.C.-S.EL.CA., Firenze.
- SERVIZIO GEOLOGICO D’ITALIA (1995) - *Carta Idrogeologica d’Italia - 1:50.000. Guida al rilevamento e alla rappresentazione*. Quaderni SGN, serie III, **5**, IPZS, Roma.
- SGROSSO I. (1986) - *Alcune considerazioni sulla linea Ancona-Anzio*. Mem. Soc. Geol. It., **35**, 317-322.
- TARBOTON D.G. (1997) - *A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models*. Water Resources, Res **33**, 309-319.
- VAN DEN EECKHAUT M., VAN DEN EECKHAUT P., REICHENBACH P., GUZZETTI F., ROSSI M. & POESEN J. (2009) - *Combined landslide inventory and susceptibility assessment based on different mapping units: an example from the Flemish Ardennes, Belgium*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., **9**, 507-521.
- VAN DEN EECKHAUT M., VANWALLEGHEM T., POESEN J., GOVERS G., VERSTRAETEN G. & VANDEKERCKHOVE L. (2006) - *Prediction of landslide susceptibility using rare events logistic regression: a case-study in the Flemish Ardennes, Belgium*. Geomorphology, **76**, 392-410, doi:10.1016/j.geomorph.2005.12.003.
- VAN WESTEN C.J., RENGERS N. & SOETERS R. (2003) - *Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment*. Nat. Hazards, **30**, 399-419.
- VENABLES W.N. & RIPLEY B.D. (1999) - *Modern Applied Statistics with S-PLUS*. Third Edition, Springer.
- WILLIAMS G.J. (2009) - *Rattle - A Data Mining GUI for R*. In: The R Journal, **1**/2, 45-55, December 2009; http://journal.r-project.org/archive/2009/2/RJournal_2009/2_Williams.pdf.
- YULE G.U. (1900) - *On the association of attributes in statistics*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, **194A**, 257-319.