

IL RUOLO DEI FATTORI GEOMORFOLOGICI NELL'INNESCO E PROPAGAZIONE DELLE FRANE DEL 30 APRILE 2006 SUL MONTE DI VEZZI (ISCHIA, ITALIA)

THE GEOMORPHIC CONTROL ON THE INITIATION AND PROPAGATION OF THE MT. DI VEZZI LANDSLIDES (ISCHIA ISLAND, ITALY) OCCURRED ON 30TH APRIL 2006

ALESSANDRA ASCIONE^(*), ALDO CINQUE^(*), ANNAMARIA FRANZA^(*) & PAOLA ROMANO^(*)

^(*) Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Napoli "Federico II" Largo S. Marcellino 10, 80138, Napoli. E-mail: ascione@unina.it

RIASSUNTO

Vengono presentati i primi risultati dello studio geomorfologico condotto nell'area interessata dai fenomeni franosi occorsi il 30 aprile 2006 nell'isola di Ischia. Scopo dello studio sono state la documentazione degli effetti prodotti dalle frane e la ricerca di evidenze circa il ruolo svolto dalla morfologia preesistente nella ubicazione delle rotture iniziali, nella geometria dei successivi stadi di propagazione e transito dei flussi detritico-fangosi e nella distribuzione degli accumuli marginali e terminali.

Lo studio, condotto con rilievi di campagna e analisi di aerofoto, basi topografiche e DTM, ha permesso la ricostruzione delle principali tappe evolutive del settore orientale dell'Isola, nonché la caratterizzazione del territorio dell'area di studio in termini clivometrici e di unità di paesaggio, nell'ambito delle quali sono stati isolati gli elementi morfologici minori. A valle di questa analisi, sono stati ricercati ed individuati i rapporti intercorrenti tra gli elementi del paesaggio a diversa scala e le modalità di innesco, propagazione, transito ed accumulo delle frane.

Nonostante gli eventi di Ischia siano poco numerosi per permettere considerazioni di tipo statistico, possono essere considerati un caso di studio rappresentativo dei fenomeni di colata piroclastica che hanno interessato la regione negli ultimi decenni. L'integrazione delle evidenze raccolte nella più ampia casistica regionale permette di porre in risalto il controllo esercitato dalla presenza di elementi ripidi lungo i versanti non solo sugli inneschi, ma anche sulla propagazione delle frane. Tale ruolo evidenzia l'importanza del loro riconoscimento ai fini della stima della suscettibilità a franare, suggerendo, nei casi in cui la loro presenza può solo essere sospettata, l'opportunità di abbassare prudenzialmente la soglia di suscettibilità.

TERMINI CHIAVE: frane in depositi piroclastici, geomorfologia, Ischia, Italia meridionale

INTRODUZIONE

E' nota l'influenza dell'assetto geomorfologico quale fondamentale fattore predisponente di molte tipologie di frane tra cui quelle di scivolamento all'interno di formazioni superficiali di natura piro-

ABSTRACT

This paper summarises the first results of a geomorphological study we carried out in the area struck by the 30th April 2006 landslides, in Ischia island. This study aimed at the documentation of the landslide traces, and at providing new evidences on the role played by the pre-existing landforms in the location of the source areas, in landslide propagation and motion, and in the distribution of localized and distal accumulation.

This was done through field surveys (started soon after the events), and by analyses of aerial photographs, topographic maps and of DTM. Besides the reconstruction of the main stages of landscape evolution of the Ischia sector including the area struck by the landslides, a detailed landscape analysis of the latter area was carried out. This allowed classification of the study area in terms of dip values and land systems, and identification of minor geomorphic elements which compose each unit. Afterwards, the relationships among the features of the single units/elements and landslide initiation, propagation and accumulation were investigated.

Although the Ischia case provided a small population of phenomena, it may be considered as a representative study case for the pyroclastic earth slides which have been affecting the Campania region in the last decennia. The integration of the collected evidences with those deriving from the pre-existing record of cases highlights, above others, the important control exerted by steep elements breaking the hillslopes not only on initiation, but also on propagation of the landslides. The recognised role of subvertical elements suggests the crucial importance of their detection in landsliding susceptibility assessment. As a consequence, in cases where the presence of such elements is not proved but only inferred, the susceptibility threshold slope angle should be prudentially lowered.

KEY WORDS: shallow landslides, geomorphology, Ischia island, southern Italy

INTRODUCTION

The influence exerted by particular geomorphic features as predisposing factors in several landslide typologies is largely recognised. As regards earth slides affecting the pyroclastic cover, mor-

clastica. Nell'ambito di questa tipologia di dissesti, la morfologia dei luoghi è spesso uno dei fattori determinanti l'eventuale evoluzione a colate, nonché fattore di controllo sulla geometria di propagazione e sulla distribuzione degli accumuli. Tali influenze sono state indagate da numerosi studi, che hanno preso in esame gli aspetti morfometrici e morfografici delle aree recentemente colpite da frane complesse del tipo in questione. Molti fra i casi studiati in Campania (CALCATERRA *et alii*, 1997; BRANCACCIO *et alii*, 1999; MELE & DEL PRETE, 1999; DI CRESCENZO & SANTO, 1999; GUADAGNO & PERRIELLO ZAMPELLI, 2000; CINQUE *et alii*, 2000; GUIDA, 2003; RISO *et alii*, 2004; DI CRESCENZO & SANTO, 2005; ABBATISTA *et alii*, 2005) dimostrano che, in associazione a valori clivometrici elevati, gli elementi verticali del pendio (cornici litologiche a controllo strutturale) e gli elementi concavi, che a diverse scale sono cartografati o come zero order basins o come hollows (sensu HACK & GOODLETT, 1960), sono i più frequenti fattori geomorfologici predisponenti l'innescò di frane superficiali. La causa va ricercata nel concorso fra tipo di morfodinamiche in atto e caratteri litostrutturali delle coltri piroclastiche che differenziano quegli elementi morfologici da altri settori, meno ripidi e/o planari, di un versante. Fra le discontinuità morfologiche cui si è riconosciuto un ruolo decisivo nell'innescò di frane superficiali lungo pendii acclivi vanno inclusi anche i gradini di terrazzamento agricolo ed i tagli e riporti connessi a piste carrabili ad uso silvocolturale.

Stimare correttamente il ruolo che nella franosità giocano determinati attributi ed elementi morfologici di vario rango e dimensione è di cruciale importanza per la messa a punto di criteri di valutazione delle variazioni di suscettibilità a franare che si hanno tra un versante ed un altro, nonché all'interno di un medesimo versante, al fine di pervenire a più precise mappature dei gradi di pericolosità e all'individuazione degli areali che meritano più rigorose norme di gestione idrogeologica e più urgenti interventi di mitigazione del rischio.

Lo studio geomorfologico intrapreso subito dopo il verificarsi delle frane del 30 aprile 2006 ad Ischia ha inteso prima di tutto documentare le evidenze lasciate dai fenomeni sul terreno prima che fossero cancellate dalle operazioni di ripristino e sistemazione delle aree colpite, o dai processi di erosione accelerata che normalmente seguono quelli franosi. L'importanza, ai fini della ricerca, di questi rilevamenti "just post eventum" è stata giustamente sottolineata dagli operatori del Progetto ICSU-CDR/IAG "DOMODIS" (Documentation of Mountain Disasters) e -per lo specifico caso delle colate rapide in piroclastici- da CINQUE *et alii* (2001). Lo studio è stato poi finalizzato a chiarire l'assetto e la genesi del paesaggio in cui gli eventi franosi si sono sviluppati, nonché a portare nuovi contributi circa il ruolo svolto dalla morfologia preesistente nella ubicazione dei cedimenti iniziali, nella geometria dei successivi stadi di propagazione e transito dei flussi detritico-fangosi e nella distribuzione degli accumuli marginali e terminali. Anche se il caso studiato è rappresentato da un basso numero di fenomeni (non trattabile statisticamente), l'integrazione delle nuove evidenze da essi portate con quelle derivanti dall'ampia casistica regionale progressiva (frane degli ultimi decenni nell'area flegrea e sui rilievi circostanti la Piana

phology is often one of the factors which most closely control their evolution in debris flows, as well as the propagation geometry and the distribution of landslide deposits. This influence has been recognised by several studies which have examined the morphometric and morphographic aspects of areas affected by the complex landslides such as those here considered. A large part of the studies concerning events occurred in Campania region (CALCATERRA *et alii*, 1997; BRANCACCIO *et alii*, 1999; MELE & DEL PRETE, 1999; DI CRESCENZO & SANTO, 1999; GUADAGNO & PERRIELLO ZAMPELLI, 2000; CINQUE *et alii*, 2000; GUIDA, 2003; RISO *et alii*, 2004; DI CRESCENZO & SANTO, 2005; ABBATISTA *et alii*, 2005) show that, in association with high gradients, both vertical and concave elements (on different scales mapped as zero order basins or as hollows, sensu HACK & GOODLETT, 1960) in the hillslope profile are the most frequent preparing factors in landslide initiation. This is due to the concurrence between the litho-structural features of the pyroclastic cover and the morphodynamics active within those particular elements, which makes them different from other (less steep and/or planar) hillslope elements. However, along steep hillslopes a crucial role in landsliding initiation is also played by man-made slope breaks, such as the agricultural terraces and track cuts and/or backfillings.

A correct estimation of the role played in landsliding by some particular geomorphic elements (on various scales) is of crucial importance in the outline of criteria useful to the assessment of susceptibility differences according to different hillslope typologies, and/or to different elements within one hillslope. This estimation also allows more precise hazard assessment and mapping and, as a consequence, identification of areas deserving more rigorous hydrogeological management rules and/or interventions addressed to risk mitigation.

The geomorphological study we carried out soon after the 30th April 2006 landslides occurrence was, above others, devoted to documentation of the landslide traces before they were cancelled by either re-arrangement interventions in the damaged areas, or accelerated erosion eventually following the landsliding. The major importance of the "just post eventum" surveying has been stressed by the co-workers involved in the ICSU-CDR/IAG "DOMODIS" (Documentation of Mountain Disasters) Project, and by CINQUE *et alii* (2001) for the type of phenomenon here discussed, i.e. pyroclastic earth flows. Our study also aims at outlining the geomorphological setting and the main stages of formation of the landscape affected by the landslides. Furthermore, the study is addressed to provide new contributions on the role played by the pre-existing landforms in the location of initial failures, in the landslide development (propagation and motion), and in the spatial distribution of localized and distal accumulation. Although the Ischia study case consists of a small population of phenomena, not significant to allow statistical considerations, the integration of these evidences in the numerous study cases available in Campania region (landslides of the last decennia in the Phlegrean area, and in the elevations bordering the Campana Plain; see references listed

Campana, cfr. bibliografia su citata) ha comunque permesso di trarre diverse interessanti deduzioni circa le concause geomorfologiche dei distacchi e le dinamica delle conseguenti colate piroclastiche.

APPROCCIO, METODI E CRITERI DI ANALISI

Lo studio geomorfologico è stato condotto, oltre che con rilievi di terreno, mediante analisi di foto aeree e basi cartografiche risalenti a date diverse e con scale differenti, nonché del Modello Digitale del Terreno (e delle basi cartografiche da questo ottenute) elaborato da IOVINO & PERRIELLO ZAMPELLI (2007).

L'analisi è stata inizialmente indirizzata ad individuare e caratterizzare le forme a controllo strutturale (tettonico e vulcanico) e, quindi, a delineare l'assetto morfostrutturale dell'intero settore orientale dell'isola di Ischia, che include l'area del M. di Vezzi.

Il settore M. di Vezzi - M. Torrione è stato quindi oggetto di una dettagliata analisi del territorio mirante alla sua caratterizzazione in termini di pendenze, nonché ad individuare le unità di paesaggio (FAO, 1976) e i relativi elementi geomorfologici che lo compongono, con l'intento di evidenziare eventuali relazioni tra questi ultimi e le aree d'innesco, transito e deposizione delle frane dell'aprile 2006. Benché gli elementi geomorfologici siano stati distinti principalmente su base morfometrica e morfografica, essi sono stati considerati come oggetti olistici (ONGARO, 1998), ovvero tenendo presente le interrelazioni tra le diverse componenti (geologiche, geomorfologiche, dinamiche, di uso del suolo, etc.) che li caratterizzano.

A tal fine, si è fatto ricorso a carte topografiche a diverse scale, che hanno permesso di identificare, su base morfometrica, le unità di paesaggio principali (alle scale 1:25.000 e 1:5.000) e successivamente gli elementi morfologici minori (alle scale 1:5.000 e 1:2.000).

Riguardo a questi ultimi, particolare attenzione è stata posta al riconoscimento ed alla mappatura di quegli elementi che vengono generalmente considerati come più strettamente condizionanti gli inneschi e la propagazione delle frane, quali cornici litologiche e bacini idrografici. Nell'ambito dei bacini idrografici sono stati quindi distinti i diversi elementi che li compongono, ovvero le aste drenanti e gli elementi che le alimentano, quali fianchi vallivi e zero order basins. Questi ultimi non sono stati ulteriormente scomposti in ridge, nose, side slope e hollow (corrispondenti rispettivamente alla porzione sommitale e agli elementi dal profilo convesso, rettilineo e concavo nella terminologia di HACK & GOODLETT, 1960), in quanto si è preferito considerare l'intera estensione del sistema nel quale si verificano i processi che riforniscono gli hollows di spessi depositi colluviali considerati, da più Autori (DIETRICH & DUNNE, 1978; DIETRICH & DORN, 1984; DIETRICH *et alii*, 1986; RENEAU *et alii*, 1986, 1989; RENEAU & DIETRICH, 1987, 1990, 1991; CROZIER *et alii*, 1990; FERNANDES *et alii*, 1994; YAMADA, 1995, 1999; YOSHINAGA & KOIWA, 1996), la sorgente primaria di franamenti superficiali e risultanti debris flows. Il criterio di restituzione cartografica adottato per gli zero-order basin (zob) è stato quello di delimitarli lungo la linea di massima convessità di ridge e nose, e chiudendo verso il basso il limite (includendovi gli eventuali solchi di erosione effimeri), in corrispon-

above) provides interesting information on the contribution of the pre-existing landforms in the initiation and development of the pyroclastic earth flows.

APPROACH, METHODS AND ANALYSIS CRITERIA

The geomorphological study was carried out through field surveys, analyses of aerial photographs and topographic maps of different ages and scales, and by analysis of the Digital Terrain Model (and related topographic maps) provided by IOVINO & PERRIELLO ZAMPELLI (2007).

The study was addressed to recognition and characterization of tectonic and volcanic landforms, and to the outline of the morphostructural setting of the entire eastern sector of Ischia island, which includes Mt. di Vezzi area. This was paralleled by a detailed landscape analysis aimed at classifying the area struck by the landslides in terms of slope gradient and Land Systems (FAO, 1976), and at identifying the geomorphic elements which compose each System. This was done in the search for relationships among the features of the single Systems and elements and the April 2006 landslide initiation, propagation, motion and accumulation processes. The geomorphic elements were distinguished basing essentially on their morphometric and morphographic properties; nonetheless, as their identification was also based on the interrelationships linking the various (geological, geomorphological, dynamic, of land use, etc.) components, these elements were considered as "olistic" (ONGARO, 1998) objects.

Identification of the Land Systems was based on analyses of topographic maps with scales of 1:25000 - 1:5000, whereas 1:5000 - 1:2000 maps were used to identify minor geomorphic elements. Regarding the latter, particular attention was devoted to recognition and mapping of those elements which are generally considered as more closely controlling landslide initiation and propagation, such as steep elements (with particular attention to rocky cliffs) and drainage basins. Within the latter, further distinction was made between the stream reaches and the areas conveying water to them, i.e. valley flanks and zero order basins (zobs). The various sub-elements composing each zob (i.e. ridge, nose, side slope and hollow sensu HACK & GOODLETT, 1960) have not been mapped: being aware that, in the hollows, colluvium tends to be thickened and become the primary source of landsliding (DIETRICH & DUNNE, 1978; DIETRICH & DORN, 1984; DIETRICH *et alii*, 1986; RENEAU *et alii*, 1986, 1989; RENEAU & DIETRICH, 1987, 1990, 1991; CROZIER *et alii*, 1990; FERNANDES *et alii*, 1994; YAMADA, 1995, 1999; YOSHINAGA & KOIWA, 1996), we preferred paying our attention to the whole system within which surface processes delivering colluvial deposits to hollows take place. Mapping of the zobs was carried out by marking the maximum convexity lines of ridges and noses; downwards, the limit was drawn in correspondence of the channel head, that is where the zob cross profile changes from concave to convex. According to these mapping cri-

denza della testa del canale, cioè dove il profilo passa da concavo a convesso.

I risultati di questa analisi sono riportati nella "Carta degli elementi geomorfologici" (Tav. 1), restituita su una base topografica in scala 1:5.000. Al fine di utilizzare a pieno l'informazione ottenibile dal rilievo a grande dettaglio effettuato da IOVINO & PERRIELLO ZAMPELLI (2007), la base topografica utilizzata per la Tav. 1 è stata ottenuta con l'inserimento, nella carta prodotta dalla CASMEZ nel 1974, di un riquadro relativo al solo versante settentrionale del M.te di Vezzi, ottenuto dal DTM elaborato da IOVINO & PERRIELLO ZAMPELLI (2007). Come si può notare dalla Tav. 1, i limiti tra gli areali relativi ad elementi geomorfologici mappati sulle diverse basi risultano spesso non continui lungo il perimetro di questo riquadro, e ciò a causa della non perfetta coincidenza della topografia riportata nei due tipi di cartografia utilizzati.

LINEAMENTI GEOMORFOLOGICO-STRUTTURALI

Il Monte di Vezzi è parte di un più esteso ed articolato alto morfologico di natura vulcanica che include anche il rilievo de Il Torrione, ubicato nel settore sud-orientale dell'isola d'Ischia (Fig. 1). I due rilievi vengono riferiti (RITTMANN, 1930; VEZZOLI, 1988; CHIESA *et alii*, 1985; CIVETTA *et alii*, 1991; ORSI *et alii*, 1991) ad un insieme di relitti di un complesso vulcanico risalente alla II delle cinque Fasi di attività del vulcanismo dell'isola. I prodotti di questa Fase hanno età comprese tra 150 e 75 ka B.P. e si rinvengono, oltre che nel settore sud est, in quello sud ovest, nord e sotto la successione vulcanica costituente l'ossatura del M. Epomeo (ORSI *et alii*, 1991), testimoniando che in quell'epoca la parte centrale dell'isola era occupata da una vasta depressione di probabile origine vulcano-tettonica. In tale depressione si depositano sedimenti di spiaggia (Marino di Rione Bocca; BARRA *et alii*, 1992), su cui poggia il Tufo Verde Epomeo, di età 55 ka B.P. (III Fase). Dopo un nuovo approfondimento della caldera, i depositi del Tufo Verde vengono coperti da sedimenti marini (Tufiti del M. Epomeo e Formazione di Colle Ietto) correlati alla risalita glacio-eustatica occorsa tra 40 e 25 ka B.P. (BARRA *et alii*, 1992). L'orografia dell'isola viene fortemente modificata da una più recente tettonica che vede la nascita dell'horst del M. Epomeo (interpretata come risorgenza vulcano-tettonica; CHIESA *et alii*, 1985; VEZZOLI, 1988; ORSI *et alii*, 1991), iniziata intorno alla fine della IV Fase (tra 28.5 e 18 ka B.P.) e la formazione, nel settore nord-orientale dell'isola, del graben di Ischia, in cui si concentra l'attività della V Fase tra 10 ka B.P. e il 1301-1302 d.C. (Fig. 1).

L'alto morfostrutturale includente il M. di Vezzi ed Il Torrione (rispettivamente, 395 e 375 m s.l.m.; Fig. 2) è caratterizzato da un paesaggio sommitale a bassa pendenza impostato sulle Piroclastiti di Piano Liguori (circa 6 ka B.P., VEZZOLI, 1988), che ricoprono i resti dell'edificio vulcanico del Monte di Vezzi (DI NOCERA *et alii*, 2007) addolcendo le asperità del suo crinale e mantellandone il domo lavico. Tale alto si eleva, con versanti di orientazione WNW-ESE, NE-SW e N-S, su di un'area depressa molto articolata che degrada, con

teria the ephemeral uppermost reaches were included in the zobs.

The results of this analysis are reported in the "Geomorphological elements Map" (Plate 1), drawn on a 1:5000 map. With the aim of taking into account information provided by the detailed DTM by IOVINO & PERRIELLO ZAMPELLI (2007), topography of Plate 1 was obtained by inserting, in the map produced by CASMEZ in 1974, a square covering the northern hillslope of Mt. di Vezzi obtained by the IOVINO & PERRIELLO ZAMPELLI (2007) DTM. Due to the non-perfect coincidence of the topography reported in the two map types, in some cases the limits between the various geomorphological elements break at the border of the inserted square (see Plate 1).

MORPHOTECTONIC FRAME

Mt. di Vezzi is part of a larger volcanic high, which includes also Il Torrione Mt., located in the south-eastern portion of Ischia island (Fig. 1). The two elevations are considered (RITTMANN, 1930; VEZZOLI, 1988; CHIESA *et alii*, 1985; CIVETTA *et alii*, 1991; ORSI *et alii*, 1991) as belonging to a group of relics of a major volcanic complex, related to the II of the five volcanic phases recorded in the island. Products of the II Phase range in age from 150 to 75 ka B.P. and are found, besides the south-eastern portion of the island, in the south-western and northern ones, and also underneath the volcanic succession forming the backbone of Mt. Epomeo (ORSI *et alii*, 1991), testifying the past existence, in the central portion of the island, of a large depression of probable volcano-tectonic nature. This depression hosted sedimentation of beach deposits (BARRA *et alii*, 1992) onto which rest the 55 ky old Tufo Verde Epomeo tuff (III Phase of volcanic activity). Following a further deepening of the caldera, the Tufo Verde Epomeo was buried by marine deposits (Tufiti del M. Epomeo and Formazione di Colle Ietto fms) related to the glacio-eustatic sea level rise occurred from 40 to 25 ka B.P. (BARRA *et alii*, 1992). Subsequently, the island topography was strongly modified by the rise of Mt. Epomeo horst (interpreted as a volcano-tectonic resurgence by CHIESA *et alii*, 1985; VEZZOLI, 1988; ORSI *et alii*, 1991) that started by the end of the IV Phase of volcanic activity (from 28.5 to 18 ka B.P.), concomitant with formation, in the north-eastern sector of the island, of the Ischia graben, a depression hosting the volcanic activity of the V Phase, from 10 ka B.P. to A.D. 1302 (Fig. 1).

Mt. di Vezzi and Il Torrione (respectively 395 and 375 m a.s.l.) belong to a morphostructural high (Fig. 2) characterised by a smooth summit landscape resting on top of the Piroclastiti di Piano Liguori (around 6 ky in age, VEZZOLI, 1988), a pyroclastic unit covering the remains of Monte di Vezzi volcanic edifice, whose top consists of a lava dome (DI NOCERA *et alii*, 2007). North of the morphostructural high develops, from 160 to 30 m a.s.l., a low area characterised by structural and depositional surfaces.

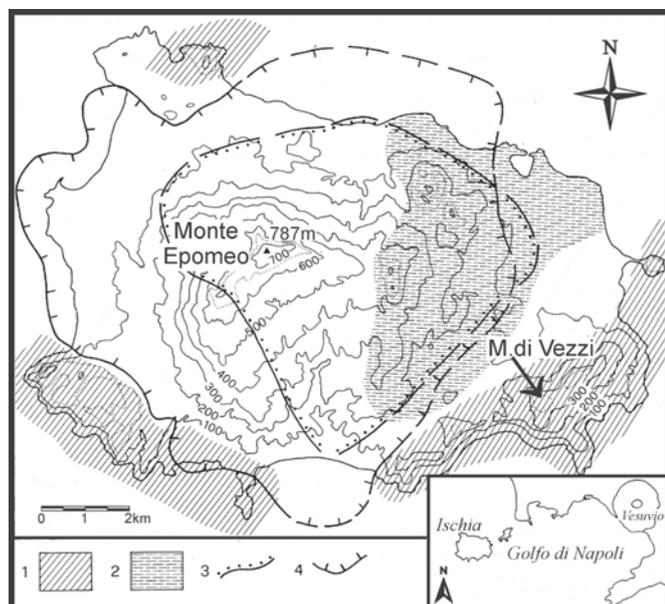


Fig. 1 - Principali elementi geologico-strutturali dell'isola d'Ischia. 1: aree occupate da rilievi vulcanici della I e II fase e rimasti sempre emersi (rilievi bordieri della paleocaldera ischitana); 2: area dominata da formazioni ed edifici della V fase che ricoprono i terreni trasgressivi ed i cumuli di frana (vedi 4); 3: limite dell'area interessata dalla trasgressione marina tardo-pleistocenica (incerto ove tratteggiato); 4: limite dell'area invasa dai cumuli delle frane staccatesi dal blocco risorgente dell'Epomeo (incerto ove tratteggiato) (da BARRA *et alii*, 1992)

- Main geologic elements of Ischia island. 1: areas occupied by volcanic highs of the I and II phases and bordering the Ischia paleocaldera; 2: area dominated by formations and edifices of the V volcanic phase, covering the transgressive and landslide (see 4) deposits; 3: limit of the area affected by the late Pleistocene marine transgression (dashed where uncertain); 4: limit of the area occupied by the deposits of the landslides detached from the resurgent Epomeo horst block (dashed where uncertain) (from BARRA *et alii*, 1992)

ripianti strutturali e deposizionali, da circa 160 a 30 m s.l.m.

I versanti settentrionali de Il Torrione e del M. di Vezzi e quello occidentale di quest'ultimo (Fig. 2) sono interpretabili come scarpate di faglia per il loro andamento planimetrico rettilineo, per la ripidità (intorno a 35°) e perché intagliano la stratificazione delle unità costituenti i due edifici. Tali unità affiorano lungo le scarpate con immersioni variabili (a reggipoggio nella parte alta e, a M. di Vezzi, a franapoggio nella parte bassa; DI NOCERA *et alii*, 2007), dando luogo a diverse cornici litologiche, tra le quali spicca quella di altezza intorno a 20 m che domina il versante del M. di Vezzi, impostata sulle lave del domo omonimo.

La formazione delle scarpate di faglia WNW-ESE e NE-SW che bordano l'alto Vezzi-Torrione può essere fatta risalire all'epoca del collasso vulcano-tettonico che creò la caldera che accolse il Tufo Verde Epomeo Auct., più che a quella successiva che vide il formarsi del graben di Ischia. Il versante del M. di Vezzi aveva, infatti, già acquisito un profilo simile all'attuale quando su di esso si deposero i prodotti piroclastici di più eruzioni ascritte a fasi di attività successive a

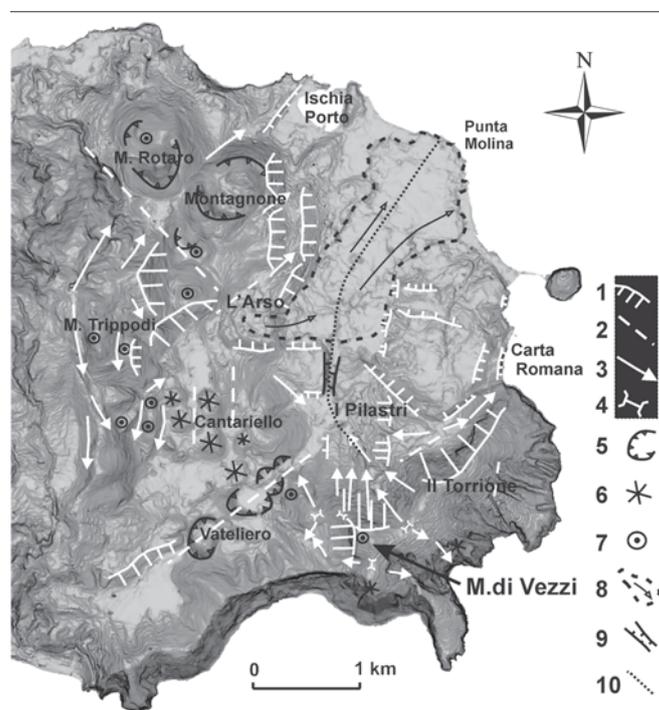


Fig. 2 - Morfologie strutturali del settore orientale dell'isola d'Ischia (mappate su DTM da IOVINO & PERRIELLO ZAMPELLI, 2007). Forme di origine tettonica: 1: scarpata di faglia; 2: lineamento con evidenze morfologiche poco conservate; 3: valle susseguente; 4: sella. Principali morfologie vulcaniche: 5: orlo di cratere; 6: centro eruttivo; 7: cupola/duomo lavico; 8: colata dell'Arso (1301-1302 d.C.). Principali forme di origine antropica: 9: trincea; 10: alveo strada

- Structural landforms in the Ischia eastern sector (mapped on DTM by IOVINO & PERRIELLO ZAMPELLI, 2007). Tectonic landforms: 1: fault scarp; 2: fault with poorly preserved morphological evidence; 3: subsequent valley; 4: saddle. Main volcanic landforms: 5: crater rim; 6: eruptive centre; 7: lava dome; 8: Arso volcano lava flow (A.D. 1301-1302). Main man-made elements: 9: trench; 10: channel track

The high is bordered by WNW-ESE, NE-SW and N-S trending hillslopes which we interpret as fault escarpments (Fig. 2) due to their rectilinear shape and high gradient (angles around 35°), and because they cut the variably dipping volcanic layers. These, on the whole S-SE dipping, and N-dipping in the lower part of Mt. di Vezzi (DI NOCERA *et alii*, 2007), create along the hillslopes several steep elements: the highest one (around 20 m high) coincides the rocky cliff related to the lavas of Monte di Vezzi dome.

Formation of the WNW-ESE and NE-SW fault scarps bordering Mt. di Vezzi - Torrione high may be related to the volcano-tectonic collapse responsible for formation of the caldera which was infilled by the Tufo Verde Epomeo tuff. Mt. Di Vezzi northern hillslope had already attained a shape similar to the present one when it was covered by several pyroclastic units, the youngest one being Piano Liguori fm. (DI NOCERA *et alii*, 2007). These units form a thin (up about 2 m) carpet upslope and thicken downhill, giving rise at the slope toe to a wide apron, hereinafter labelled glacis.

N-S oriented faults (morphologically expressed by the western

quella che originò l'edificio. Tali prodotti (cineriti e pomici) presentano spessore esiguo (non superiore a un paio di metri) nella parte alta del versante e si ispessiscono al suo piede, dove formano un glacis i cui lembi residui coincidono con la superficie deposizionale della formazione di Piano Liguori Auct. (cf. Di NOCERA *et alii*, 2007).

Altri lineamenti con direzione N-S (scarpata occidentale del M. di Vezzi e valli susseguenti lungo il suo versante settentrionale, Fig. 2) hanno dislocato l'edificio vulcanico e le formazioni piroclastiche costituenti il glacis contribuendo, con faglie NE-SW, all'individuazione di parte del graben di Ischia (V Fase Auct.). Faglie N-S ancora più recenti hanno determinato la definitiva configurazione della porzione settentrionale del graben, che ha accolto l'arrivo dell'effusione lavica dell'Arso del 1301-1302 d.C.: questo nuovo basso strutturale ha il bordo occidentale definito da faglie NE-SW e N-S che sospendono gli stessi apparati vulcanici della V Fase vulcanica Auct. (apparati del Montagnone, I d.C., e del Rotaro, III d.C.) (Fig. 2).

Il glacis di accumulo che segna il piede del versante settentrionale del M.te di Vezzi si presenta reinciso ed i risultanti terrazzi sono sospesi di 15-20 m sul livello di base attuale, rappresentato dal fondo piatto della valle (attraversata dalla Via Arenella), che degrada dolcemente verso la zona de I Pilastrì. Questa pianura costituisce il risultato di un sovralluvionamento che seguì la dissezione del glacis, probabilmente causato dall'individuarsi di un ostacolo trasversale. Tale alto è ravvisabile nell'alto a decorso circa E-O che si svolge a N dell'area de I Pilastrì, la cui origine strutturale è suggerita dalla rettilinearità delle scarpate che lo bordano verso N e S (Fig. 2). L'intaglio di questa soglia con una trincea artificiale ha permesso, in tempi storici, il ripristino di un drenaggio esoreico verso nord. La colata dell'Arso del 1301-1302 d.C. ha solo in parte rallentato i deflussi superficiali, convogliati lungo l'alveo strada che da I Pilastrì (collettore di Via Arenella) percorre longitudinalmente la colata lavica (collettore di Via Mazzella) fino a Punta Molina; l'efficacia di quest'opera drenante deve essere stata, tuttavia, sempre limitata come dimostrano i modesti alluvionamenti della piana che a tutt'oggi si registrano in occasione di eventi meteorici anche di portata ordinaria.

CARATTERI GEOMORFOLOGICI DELL'AREA DI STUDIO

Nell'area includente i rilievi del M. di Vezzi e de Il Torrione è possibile individuare quattro unità di paesaggio con differenti caratteristiche geomorfologiche (paesaggio sommitale, versante, glacis e piana basale; Fig. 3) e, all'interno di ciascuna di esse, vari elementi morfologici tipici dei quali la Tav. 1 fornisce un elenco ed una caratterizzazione sintetica.

Il paesaggio sommitale

Il paesaggio sommitale (Fig. 3) è caratterizzato da una morfologia ondulata (inclinazioni mediamente non superiori a 15°; Fig. 4a), coincidente con la superficie deposizionale, debolmente rimodellata, dell'unità di Piano Liguori. Esso è composto, in parte, dall'ampia superficie terrazzata (pt in Tav.1) di Piano Liguori, situata intorno a 340 m di quota

scarp of Mt. di Vezzi and by subsequent valleys dissecting the northern slope; Fig. 2) displace the volcanic edifice and, together with NE-SW trending ones, offset also the pyroclastic units forming the glacis. Activity of these faults may be related to the formation of some sectors of the Ischia graben (V Phase of volcanic activity). Even more recent is activity of some other faults outlining the northern portion of the Ischia graben, which is bordered to the west by NE-SW and N-S trending faults displacing some volcanic edifices related to the V Phase Auct. (Montagnone and Rotaro edifices, respectively I and III century; Fig. 2).

The glacis which develops at the toe of Mt. di Vezzi northern hillslope is dissected, and terraces it forms hang up to 15-20 m above the local base level, which is represented by a flat floored valley graded towards I Pilastrì settlement and followed by Via Arenella road. This plain resulted from overfilling subsequent to the dissection of the glacis, and most probably triggered by the growth of an E-W trending horst block transverse to the river path (Fig. 2). In historical times, a man-made trench cut across this threshold recovered the northerly outflow. The Arso lava flow, erupted in A.D. 1301-1302, probably dammed again the outflow, which was conveyed along the road cut which from I Pilastrì crosses the Arso lavas up to Punta Molina; the modest flooding nowadays affecting the plain in response to major rainfalls suggests the limited efficacy of the man-made intervention.

GEOMORPHOLOGICAL SETTING

The area including Mt. di Vezzi and Il Torrione elevations is characterised by four Land Systems (namely: the summit landscape, the hillslopes, the glacis, the floodplain, Fig. 3). Each System is composed of groups of geomorphologic elements, listed and described in Plate 1.

The summit landscape

The summit landscape is characterised by a smooth topography (mean slope angle 15°; Fig.4a) tracing the weakly reworked top surface of Piano Liguori Unit.

It is made up of the remnants of smooth surfaces (ps in Plate 1; with angles lower than 18°: Fig. 4a) located on top of both Mt. di Vezzi (391-395 m a.s.l.) and Il Torrione (376 m high) and by a lower

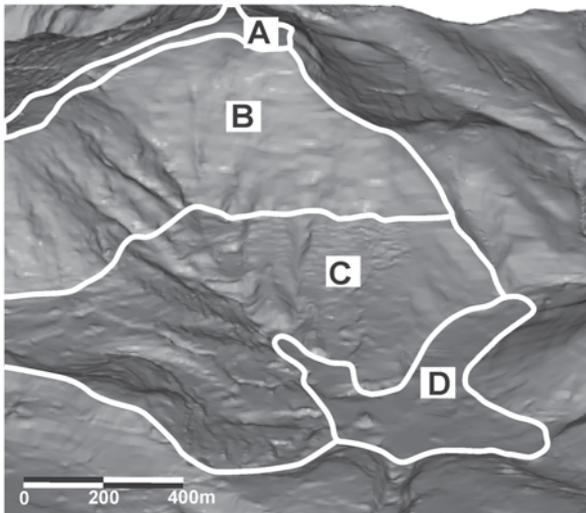


Fig. 3 - Le "Unità di Paesaggio" del M.te di Vezzi-M.te Torrione. A: paesaggio sommitale; B: versante; C: glacis; D: piana basale.
- *The Mt. di Vezzi-Mt. Il Torrione Land Systems. A: summit landscape; B: hillslopes; C: glacis; D: floodplain*

(Fig. 4a). Questa si raccorda con dolci pendii (versanti di raccordo di paleosuperficie: pr in Tav. 1, con acclività tra 10° e 25°; Fig. 4a), alla paleosuperficie sommitale (ps in Tav. 1, con inclinazioni inferiori a 18°; Fig. 4a). Lembi di questa sono conservati su Il Torrione (che culmina a quota 376 m) e sul M. di Vezzi: qui la paleosuperficie si svolge intorno a 380-390 m, culminando in due dossi alle quote di 391 m e 395 m.

Il paesaggio sommitale, con l'eccezione della superficie terrazzata (coltivata a vigneto), è ricoperto da un fitto castagneto coltivato a ceduo impostato, dove le pendenze raggiungono valori più alti, su terrazzamenti antropici a ciglioni (con altezza intorno al metro), intagliati nella coltre piroclastica.

Il paesaggio dei versanti

I versanti dei due rilievi che si affacciano verso i quadranti settentrionali presentano caratteri morfologici diversi. In particolare, il versante de Il Torrione presenta un profilo molto articolato grazie alla presenza, oltre che di terrazzamenti antropici, di numerose rotture di pendenza di tipo concavo e convesso, ma anche di marcati gradini sub-verticali di natura strutturale (legati alla presenza di livelli coerenti intercalati alla successione dell'edificio) che si sviluppano lungo tutto il pendio con una debole inclinazione verso est (Fig. 4a e b). Questi caratteri si ripetono fino alle quote più basse: il più alto gradino si incontra ai piedi del versante Il Torrione, a quote intorno a 200-275 m (cs in Tav. 1; Fig. 4a).

Nel caso del M. di Vezzi, il versante (denominato Costa Ruscello) è scomponibile in una serie di elementi: a valle della convessità sommitale, si incontra, nella porzione centrale del versante, un'alta cornice (cornice sommitale, con altezza intorno a 20-25 m; Fig. 4b) impostata sulle lave del domo. Verso est, la cornice sommitale tende a rastremarsi ed entra a far parte di un ampio elemento concavo (zob; z in Tav. 1); verso ovest, essa si interrompe per lasciare posto a due zob di dimensioni molto ridotte (Tav. 1), a monte dei quali si individua una ulteriore cornice litologica (anche in questo caso, impostata sulle lave).

La porzione di versante fin qui descritta presenta inclinazioni eleva-

flat surface, the Piano Liguori terrace (pt in Plate 1), resting at 340 m of elevation (Fig. 4a). A smooth slope (pr in Plate 1; 10° to 25°, Fig. 4a) joins the remnants of the two surfaces.

The summit landscape is characterised by different land use. Vineyards occur around and on the flat Piano Liguori terrace and on the surrounding slopes, whereas a wood coppice of chestnuts characterises the leftover landscape displaying a higher gradient (namely the ps and pr geomorphologic elements, Plate 1). At places, i.e. where the gradient is higher (angles up to 25°, Fig. 4a), the chestnut wood coppice is tilled by terracing with high scarps (called "ciglioni") cut into the thick pyroclastic cover.

The hillslopes

The hillslopes included into the study area display different shapes. The Il Torrione northwestern slope shows a stair like cross profile (steep to vertical steps alternated with concave and convex elements) related to the presence of both rocky layers (weakly dipping to the east) interbedded into the volcanic succession, and agricultural terracing. The highest step (cs in Plate 1; Fig.4a), which is found at the slope toe (between 200 and 275 m a.s.l.), is associated to a rocky cliff resting onto thick welded lavas.

The north/north-east facing slope of Mt. di Vezzi, labelled "Costa Ruscello", is characterised by a compound profile. From the top, it exhibits a convex shape passing into the up to 25 m high summit free face (Fig. 4b) associated to the lavas of Mt. di Vezzi dome (Di NOCERA *et alii*, this volume). The summit free face is replaced to the east by a wide zob (z in Plate 1), and to the west by two other small scale zobs which are bounded to the top by another lava cliff. All these elements show steep slope angles, exceeding 40° in the case of the resistant free faces (Fig. 4b).

The lower part of the hillslope, still very steep (angles between 35° and 45°; Fig. 4b), is composed of planar divides (is in Plate 1) alternated with concave elements (zobs; z in Plate 1). This part of the hillslope is characterised by several few metre high steep elements (Plate 1), laterally continuous and weakly dipping eastward: these

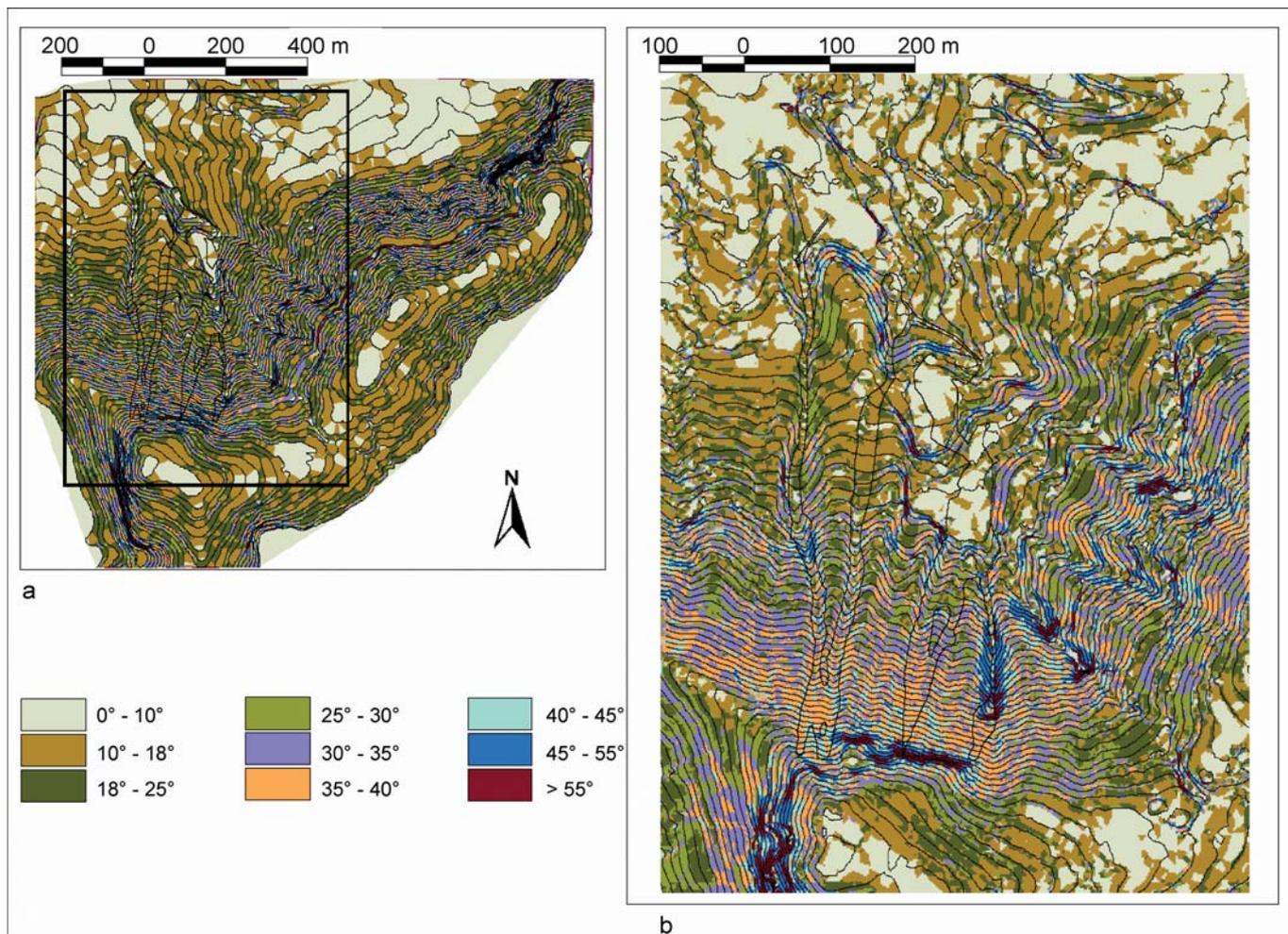


Fig. 4 - a: Carta clivometrica del settore M.te di Vezzi-M.te Torrione, elaborata mediante vettorializzazione della carta CASMEZ in scala 1:5000. b: Carta clivometrica del versante settentrionale del M.te di Vezzi, elaborata su DTM di IOVINO & PERRIELLO ZAMPELLI (2007)
 - a: Mt. di Vezzi-Mt. Torrione Slope Map processed by the CASMEZ 1:5000 map, vectorialized. b: Slope Map of Mt. di Vezzi northern slope processed from the DTM after IOVINO & PERRIELLO ZAMPELLI (2007)

te (con una particolare frequenza di quelle superiori a 40°; Fig. 4b) ed esposizioni comprese tra nord e NE. Questa passa, verso il basso, ad una fascia connotata dalla quasi totale assenza di incisioni (vi si individuano elementi planari e concavi, rispettivamente: interfluvii sommitali, is e zob, z; Tav. 1) e, ancora, da inclinazioni elevate (prevalentemente tra 35° e 45°; Fig. 4b). Il profilo di questa fascia è interrotto da più cornici litologiche ed elementi ripidi di altezza metrica (da 1-2 a 5-6 m), che presentano una marcata continuità laterale (anche se con altezza variabile) e, anche qui, una debole inclinazione verso est (Tav. 1). Questi coincidono con livelli di scorie saldate (DI NOCERA *et alii*, 2007) intercalate alla successione dell'edificio vulcanico, che in questo tratto sono mantellate da ridotti spessori (1-2 m) di depositi piroclastici incoerenti.

Verso valle le incisioni, che tendono gradualmente ad approfondirsi (restando comunque limitati a pochi metri), sono separate da ampie aree interfluviali (is in Tav.1); valli più profonde, si individuano solo presso il limite orientale del versante stesso, in prossimi-

follow the welded scoria beds (DI NOCERA *et alii*, 2007) occurring underneath the thin, 1 to 2 m thick, pyroclastic cover that carpets the relic of the volcanic edifice.

Moving downhill, shallow valleys cut by ephemeral water paths (namely the av in Plate 1) alternate with wide planar divides (is). Here several zobs (z), which are slightly dissected by gullies, adjoin the first order streams. At the boundary with the II Torrione hillslope, some deeper streams form a small and poorly hierarchized drainage basin.

Due to the gradual downslope thickening of the pyroclastic cover, starting from 250 m of elevation the hillslope profile becomes slightly concave and less steep (30°-35°; Fig. 4b), the stream paths become more stable (streams: ad in Plate 1) and their valley sides (fv in Plate 1) wider and deeper, whilst the divide areas (iv in Plate 1) become narrower and display a convex transversal profile.

tà del passaggio con il tratto di versante de Il Torrione. Gli elementi z spesso si congiungono verso valle agli impluvi e includono, in alcuni casi, forme di erosione in copertura tenera che cambiano di dimensione e localizzazione nel tempo (es: gullies), qui definite aste drenanti di versante sommitale effimere (av; Tav. 1).

A partire da quote intorno a 250 m s.l.m., il profilo del versante tende a divenire debolmente concavo e si attesta su inclinazioni intorno a 30°-35° (Fig. 4b). In questa fascia, probabilmente grazie al graduale ispessirsi della copertura piroclastica, le aree interfluviali (interfluvi iv; Tav. 1) tendono a ridursi in ampiezza, assumendo generalmente forma convessa in senso trasversale al versante, e lasciano il posto a valli più ampie e profonde (fianchi vallivi fv e aste drenanti ad; Tav. 1).

Il glaxis

Le sezioni naturali ed i tagli (fronti di cava e pareti di terrazzamenti) mostrano che il glaxis che si svolge al piede del versante di Costa Ruscello è di natura deposizionale, impostato su diverse unità piroclastiche sovrapposte aventi uno spessore minimo affiorante di circa 20 m.

Ai piedi del M. di Vezzi tale superficie è dissecata da valli (forme fluviudenudazionali, fd ed aste drenanti impostate sul glaxis deposizionale ag; Tav. 1) con direzione circa meridiana. Nella zona distale le valli si approfondiscono fino ad un massimo di circa 15 m e tendono ad acquisire una sezione a U dettata dalla presenza, alla base della successione (ovvero, al di sotto delle cineriti), di spessori di pomici sciolti che favoriscono l'arretramento parallelo dei fianchi e il mantenimento di alti valori di pendenza. Qui, la superficie del glaxis, è ridotta in lembi isolati (lembo di glaxis di accumulo piroclastico g; Tav. 1) dalle valli principali, che risultano al loro interno debolmente disseccati da solchi di erosione idrica in copertura tenera (se; Tav. 1) con profondità intorno al metro; essa risulta molto mal conservata (se ne rico-

The glaxis

The emplacement of several pyroclastic flows and falls (the latter being the Piano Liguori Unit, DI NOCERA *et alii*, 2007) lead the growth of the Mt. di Vezzi footslope, namely the glaxis. At least 20 m of this pyroclastic succession is exposed both in the stream (ag in Plate 1) valleys cutting the glaxis and along the walls of open quarries of pumice.

Downstream, the valleys dissecting the piedmont zone increase in depth up to around 15 m and generally show a U-shaped cross-profile. This shape results from the parallel retreat of the valley sides (fd in Plate 1) related to the occurrence of coarse loose pumices at the base of the pyroclastic, prevailing cinderly, succession. In this distal area, the footslope surface consists of isolated glaxis remnants (g in Plate 1), slightly dissected by shallow (around 1 m deep) stream valleys (se in Plate 1). At the join of Mt. di Vezzi hillslope with Il Torrione one only the apical portion of the glaxis is preserved, due to increased degree of dissection and valley depth along with the occurrence of large open quarries, which strongly reshaped the landscape



Fig. 5 - Il cambiamento di uso del suolo nella fascia pedemontana del M. di Vezzi può essere desunto dal confronto della cartografia IGM degli anni '50 (a) con quella prodotta dalla CASMEZ nel 1974 (b), e dal CISI nel 2002 (c). Il quadrato in puntinato in A corrisponde all'area rappresentata in B; il quadrato a tratteggio in B corrisponde all'area rappresentata in C. Si noti il progressivo ampliamento delle aree di cava e le conseguenti modificazioni nella morfologia del piedimonte

- The land use changes in the Mt. Di Vezzi piedmont area may be visualised by comparison of topographic maps produced in the '50 (A), in 1974 (B) and in 2002 (C). Dotted frame in A correspond to the area in B; dashed frame in B corresponds to the area in C. Note the progressive widening of the quarries and the related changes in the piedmont morphology

noscono solo gli apici) presso la giunzione tra i versanti del M. di Vezzi e de Il Torrione, e ciò sia perché è qui dissecata da più valli con ordine gerarchico e profondità maggiore, sia a causa dell'attività estrattiva che ha fortemente modificato il paesaggio di quest'area (Fig. 5).

La superficie che invece caratterizza il piedimonte de Il Torrione si identifica come un glacis di accumulo detritico alluvionale (ga; Tav. 1) indissecato. In generale, dove meglio conservati, i lembi del glacis presentano profilo concavo, con inclinazioni che vanno da un massimo di 25°-30° in corrispondenza dell'attacco con il versante a valori inferiori ai 10° nelle porzioni distali (Fig. 4), dove si attestano su quote intorno a 100 m. Tali lembi, occupati prevalentemente da vigneto, presentano terrazzamenti antropici a ciglioni con altezza intorno al metro.

La piana basale

La piana basale, connotata da acclività inferiore a 10° (Fig. 4a), si svolge a quote comprese tra 85 e 75 m. A causa dell'intensa urbanizzazione, il reticolo che la attraversa coincide quasi sempre con alvei-strada. Uno dei principali è rappresentato dalla Via Arenella, che raccoglie tutto il drenaggio derivante dall'area interessata dalle frane del 30 aprile. Tale valle presenta un fondo piatto cui si raccordano i fondovalle delle aste confluenti, alcune delle quali similmente a fondo quasi piatto o concavo (Tav. 1).

I FENOMENI FRANOSI DEL 30 APRILE 2006: RAPPORTI CON LA MORFOLOGIA

Le frane del 30 aprile hanno coinvolto la coltre piroclastica del versante di Costa Ruscello, i cui spessori più superficiali sono stati rimossi. Le osservazioni compiute a partire dai giorni immediatamente successivi al verificarsi dei fenomeni franosi, hanno permesso di rilevare gli effetti determinati dai distacchi, dal passaggio e dalla deposizione dei corpi franosi nelle aree di diversa pertinenza (di versante, glacis e pianura) che ne sono state investite. Tali informazioni sono sintetizzate nella Fig. 6. L'analisi geomorfologica di dettaglio, che ha accompagnato i rilievi, ha quindi permesso di pervenire ad una ricostruzione dettagliata della cinematica dei flussi e di formulare ipotesi sulle modalità con le quali l'assetto morfologico pregresso al verificarsi dei fenomeni ha condizionato il loro sviluppo. Nel seguito, ci si riferirà alle diverse frane facendo ricorso ad una numerazione (da 1 a 5 a partire da est).

Zone di innesco

Le zone di innesco delle frane del 30 aprile si situano tutte nel versante di Costa Ruscello (Fig. 6), in una ristretta fascia altimetrica (tra 315 e 345 m; Tav. 1) posta a breve distanza dalla sommità, omogeneamente esposta verso nord e caratterizzata da acclività relativamente alta (tra 35° e 45°; Fig. 4b). La limitata estensione dell'area colpita da frane ben si accorda con il carattere fortemente localizzato degli eventi piovosi scatenanti (MAZZARELLA & DE LUISE, 2007).

Meno facile appare -al momento- fornire una spiegazione certa circa il fatto che i cinque distacchi si sono concentrati nella parte alta

in the last decennia (Fig. 5).

The piedmont of Mt. Torrione consists of an undissected accumulation slope (glacis de accumulation, ga in Plate 1).

On the whole, where better preserved the glacis remnants are characterised by concave profile, with slope angle values ranging from 25°-30° at the junction with the overlooking hillslope to 10° in the distal area (Fig. 4), where they stand around 100 m a.s.l. Terracing of vineyards are the most common tillage in this geomorphological unit.

The floodplain

The lowest slope angle values (less than 10°; Fig. 4) of the study area characterise the floodplain which develops between 85 and 75 m a.s.l. As a result of the intense urbanization of this land system, the drainage is conveyed along the road cuts, which act as man-made channels (hereinafter, these man-made structures are labelled "channel tracks"). The main channel track coincides with Via Arenella, which delivers the runoff provided by Mt. di Vezzi northern hillslope towards I Pilastrì settlement and then in the channel network cut through the Arso lava flow (Fig. 2).

THE 30th APRIL 2006 LANDSLIDES: RELATIONSHIPS WITH THE GEOMORPHIC ELEMENTS

The 30th April landslides affected the upper portion of the pyroclastic cover resting onto Costa Ruscello hillslope.

The field surveys we started just post eventum allowed the recognition of effects produced by the landslides during their flowing downhill within the different geomorphological units (hillslope, glacis and floodplain). This information is summarised in Fig. 6. The surveys were paralleled by the geomorphological analysis, with the aim of reconstructing the flows kinematics and of developing hypotheses on the role played by the various geomorphological elements in the landslides initiation, propagation and deposition.

In the followings, we will refer to the various landslides using a numeric code (1 to 5 starting from the east).

Source areas

The source areas of the 30th April landslides are located in the uppermost Costa Ruscello hillslope (Fig. 6), in a narrow belt (between 315 and 345 m a.s.l.; Plate 1) close to Mt. di Vezzi summit, homogeneously facing the north and characterised by high slope gradient (angles between 35° and 45°; Fig. 4). The small width of the area including the sources is coherent with the strongly localised character of the triggering rainfall event (MAZZARELLA & DE LUISE, 2007).

More difficult is to find an explanation about the fact that all

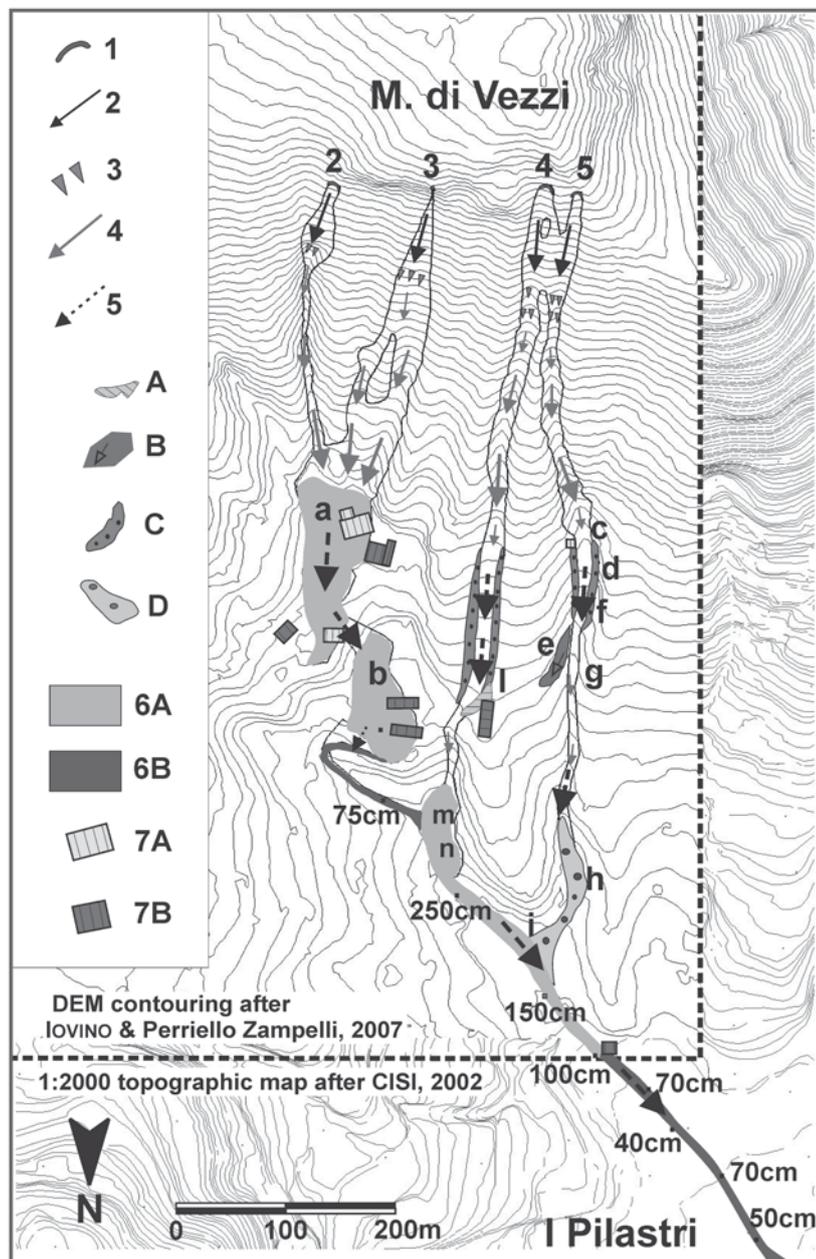


Fig. 6 - Ricostruzione della cinematica delle frane. 1: zona di distacco; 2: zona di propagazione; 3: salto su cornice litologica; 4: zona di erosione (intensità crescente con lo spessore e lunghezza della freccia); 5: zona di transito deposizione con accumuli condizionati dalla morfologia naturale: A: in curva; B: su contropendenza; C: argini detritici naturali; D: lobo frontale; 6: zona di transito-deposizione con accumuli condizionati da opere antropiche: 6A: aree di accumulo prossimali e con spessori del flusso in transito maggiore di un metro; 6B: aree di accumulo distali e con spessori del flusso in transito inferiori al metro; 7: principali manufatti danneggiati, 7A: totalmente; 7B: parzialmente

- Reconstruction of the landslides kinematics. 1: source area; 2: propagation area; 3: flow along steep element; 4: scoured area (amount of scouring increasing with length and width of the arrow); 5: area of motion-accumulation, with deposition controlled by natural morphology: A: in bend; B: in upvalley dipping areas; C: levee; D: frontal lobe; 6: area of motion-accumulation with deposition controlled by man-made structures: 6A: area affected by proximal deposition and flow thickness larger than 1 m; 6B: area affected by distal deposition and flow thickness less than 1 m; 7: main damaged man-made structure, 7A: totally; 7B: partially

del versante, nonostante questo presentasse anche più a valle acclività e conformazioni simili a quelle della sua porzione superiore. E' probabile che solo su quest'ultima esistevano zone nelle quali il fattore di sicurezza risultava (per cause predisponenti extra-geomorfologiche) abbastanza basso da portarsi sotto l'unità con l'incremento di peso e/o col calo di resistenza agli sforzi di taglio che l'imbibizione ha indotto nei materiali superficiali. In particolare, potrebbe aver giocato un ruolo decisivo la presenza -nella parte alta del versante- di materiali superficiali a tessitura media più grossolana (per maggior ricchezza in pomici) e quindi più favorevoli alla penetrazione rapida

failures took place close to the hill top. In fact, the hillslope shows also in its lower part features (gradient and form) quite similar to those of the area including the sources. This suggests that only in the latter area were present localised zones in which the safety factor was (due to preparatory factors different from the geomorphological ones) low enough to become less than 1 as a result of weight increase and/or reduction of shear strength due to imbibition of the cover. In particular, an important role was probably played by the occurrence, in the upper portion of the hillslope, of coarse textured, pumice rich, materials favouring a faster lowering

del wetting front durante l'evento piovoso. A tale proposito, si ricorda che depositi superficiali ricchi in pomice sono stati osservati in questa zona (vedi anche DE VITA *et alii*, 2007; DI NOCERA *et alii*, 2007). Ma una spiegazione alternativa o complementare potrebbe chiamare in causa delle diversità idrogeologiche tra parte alta e parte bassa del versante, come discusso in DE VITA *et alii* (2007).

Passando alla morfologia di dettaglio delle zone di innesco va osservato che essa presenta, nei vari casi, diverse caratteristiche. In particolare, il distacco della frana 1 ha avuto luogo in corrispondenza di una lieve rottura di pendio di origine antropica (ciglio di un sentiero che attraversa il versante); la frana ha quindi interessato il fianco di una valle lungo cui si è incanalata, per esaurirsi a breve distanza dalla zona di innesco.

Tutte le altre frane si sono invece originate in prossimità della cornice sommitale del versante di Costa Ruscello. In particolare, la frana 3 è iniziata con il distacco della copertura piroclastica dall'orlo superiore di questa cornice (vedi anche DE VITA *et alii*, 2007). In questo caso, come in altri eventi franosi che hanno interessato le coperture piroclastiche verificatisi nella regione, l'instabilità dei terreni di copertura potrebbe essere stata favorita dal fatto che essi presentavano, all'affaccio sulla cornice, un profilo relativamente ripido. Questa condizione è stata interpretata da BRANCACCIO *et alii* (1999) per situazioni simili, come il risultato del "mancato" assottigliamento (se non del locale ispessimento) della copertura lungo l'orlo della cornice, a causa del minore, o meno frequente, disturbo al manto boschivo da parte dell'uomo su questi tratti meno praticabili (Fig. 7). Infatti, un fitto manto boschivo, oltre a fissare la copertura, potrebbe aver funzionato da ostacolo dietro il quale si accumulavano i detriti trasportati dai processi di versante attivi più a monte. Nel caso in questione, il rilevamento e le indagini indirette (cf. DI MAIO *et alii*, 2007) evidenziano che sul dolce paesaggio sommitale, a monte della cornice, ha potuto conservarsi uno spessore del manto piroclastico di un ordine di grandezza superiore a quello presente lungo il più ripido versante.

Il distacco iniziale della frana 3 è stato seguito dalla mobilitazione di materiale a partire dal piede della cornice. Ciò suggerisce che l'impatto dei terreni distaccatisi dall'orlo dell'alta (circa 20 m) cornice ha innescato, nella coltre che ricopriva il ripido versante sot-

of the wetting front and, as a result, more prone to fail in response to intense rainfall. It is worthy noting that widespread pumice rich deposits have been observed in this area (see DE VITA *et alii*, 2007; DI NOCERA *et alii*, 2007). Alternatively, or concurrently, the causative factor may be envisaged in hydrogeological differences between the upper and lower portion of the hillslope (see DE VITA *et alii*, 2007).

On a detail scale, the morphology of the various source areas is different. In particular, landslide 1 initiated at the outer rim of an access track and developed within the neighbouring valley flank, without reaching the outlet.

The remaining four landslides initiated very close to the Costa Ruscello summit free face. In particular, landslide 3 initiated with the detachment of the pyroclastic cover formerly resting onto the rim of the summit free face (see also DE VITA *et alii*, 2007). In this case, as well as in other pyroclastic landslide events occurred in the region, failure was probably favoured by the fact that the failed deposits rested at the rim of the rocky cliff at a relatively steep angle. For similar cases, this condition has been interpreted by BRANCACCIO *et alii* (1999) as resulting from thickening (and related steepening) of the surficial cover resting on top of the cliff due to a minor, or less frequent, human disturbance to the forestry in these poorly accessible sites: a dense and old age forest cover, besides hampering, by the root networks, the downslope movement and related thinning of the loose pyroclastics, may favour thickening of the latter by damming the debris coming from upslope (Fig. 7). In the Mt. di Vezzi case, field surveys and subsurface data (DI MAIO *et alii*, 2007) show that in the upland above summit free face (i.e. in the summit landscape) is preserved a volcanoclastic cover about ten times thicker than it is on the steep Costa Ruscello hillslope.

The initial detachment of landslide 3 was followed by the further mobilization and entrainment of material starting from the toe of the summit free face. This suggests that the impact of the failed deposits fallen along the around 20 m high summit free face, generated shear stress high enough to trigger sliding of the volcanoclastics resting onto the high gradient (around 40°; Fig. 4b) lower hillslope portion.

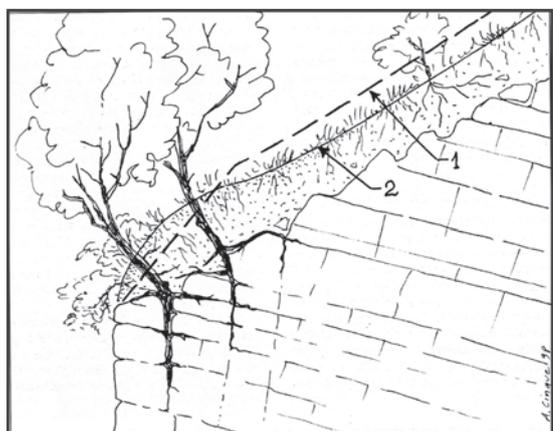


Fig. 7 - Schema dell'ipotesi di ispessimento del manto piroclastico lungo i cigli ben vegetati. 1) andamento del profilo subito dopo l'accumulo per caduta delle piroclastiti; 2) profilo topografico dopo una lunga fase di rimozione a monte ed accumulo presso il ciglio. Da BRANCACCIO *et alii* (1999)
 - Sketch illustrating the hypothesis of steepening of the pyroclastic cover at densely forested rims. 1) topographic profile attained soon after the arrival of the pyroclastic fall; 2) topographic profile attained after a long phase of detrital removal from upslope and accumulation at the rim of the sub-vertical element. From BRANCACCIO *et alii* (1999)

tostante (qui con inclinazioni intorno a 40°; Fig. 4b), sforzi di taglio sufficienti a provocarne la mobilitazione; in alternativa, o in combinazione, con questo meccanismo, potrebbero essere state le vibrazioni indotte dal materiale in caduta a causare la liquefazione della copertura del versante ed il suo distacco.

L'innesco della frana 2 si colloca in corrispondenza di un elemento del versante debolmente convesso in profilo e in pianta (nose), ed impostato nelle unità piroclastiche di copertura (Fig. 8a). Questa geometria deve aver esercitato un importante condizionamento nell'innesco della frana. Un elemento convesso lungo un versante con pendenza prossima a quella di soglia per l'innesco di earth slides, può, infatti, rappresentare un fattore aggiuntivo di instabilità: i piani di taglio che potenzialmente possono individuarsi in elementi di versante con tale geometria risultano più brevi di quelli che possono crearsi in elementi planari (Fig. 8b), permettendo il collasso con minore sforzo di taglio. Inoltre, la configurazione convessa (soprattutto se in senso sia longitudinale che trasversale al pendio) diminuisce il contrasto al piede da parte dei terreni potenzialmente stabili situati immediatamente a valle della zolla in incipiente slittamento.

Gli inneschi delle frane 4 e 5 si situano in una zona del versante (ubicata immediatamente ad ovest della cornice sommitale e a valle di un'ulteriore cornice; Fig. 6) connotata da articolazioni morfologiche di ordine metrico interpretabili come zob (Tav. 1). In particolare, la frana 4 si è staccata dal fianco (side slope) di uno zob, mentre la frana 5 dall'asse dell'elemento concavo (hollow) di un secondo zob. Questi elementi morfologici sono considerati da più Autori (cf. Introduzione) come favorevoli all'innesco di frane sia in quanto in essi tende a convergere il drenaggio superficiale e sottocutaneo, sia perché luoghi preferenziali di accumulo di materiali superficiali. Tuttavia il fatto che, sia longitudinalmente che trasversalmente al pendio, si incontrano altri zob (cf. Tav. 1), come pure pendenze simi-

Alternativamente, or in combination with this mechanism, mobilization and sliding of the pyroclastic cover at the toe of the rocky cliff was triggered by the shaking, and related liquefaction, caused by the impact of the fallen material.

The source area of landslide 2 coincides with an element convex in both profile and plan form (nose; Fig. 8a). This geometry is supposed to have strongly influenced the landslide initiation, as a convex element along a hillslope with gradient close to the threshold angle for sliding may add further potential for failure. In fact, a potential failure plane created through a convex element results shorter than the one which may potentially affect a planar slope (Fig. 8b) and, as a consequence, in the first case sliding requires shear stresses lower than in the second one. Convex slope elements may result more prone to failure than planar slopes also due to the lack of lateral support which, in the second case, is offered to the potentially instable block by the material resting downslope.

The source areas of landslides 4 and 5 occur in a portion of the hillslope (located west of the summit free face and below another rocky cliff; Fig. 6) characterised by small size (few metres in length and height) concave elements that can be interpreted as zob (Plate 1). In particular, landslide 4 detached from a zob side slope, whereas landslide 5 from a hollow. Zobs are considered by several Authors (see Introduction) as areas favourable to landslide initiation as they are generally infilled with thick colluvium, and may funnel and collect runoff and ground water flow. Nonetheless, the occurrence both laterally and downhill in Costa Ruscello hillslope, of other zob (Plate 1) and of elements with similar gradient (Fig. 4b), suggests that preparatory factors different from the geomorphological ones strong-



Fig. 8 - A: la nicchia di distacco della frana 2: la linea bianca tratteggiata rimarca la forma convessa dell'elemento da cui si è originata la frana. b: Confronto schematico tra la lunghezza di piani di potenziale slittamento di pari geometria generati in corrispondenza di elementi dal profilo rettilineo e convesso
 - A: source area of landslide 2: the dashed white line marks the convex form. b: Comparison between lengths of potential slide surfaces affecting planar and convex elements

li a quelle di quest'area (Fig. 4b) suggerisce che all'innesco di queste due frane abbiano contribuito fattori diversi da quelli morfologici. In particolare, potrebbe aver giocato un ruolo determinante la localizzata presenza di terreni meglio predisposti (per motivi tessiturali) ad imbibirsi d'acqua durante le poche ore di pioggia che, tra la sera del 29 e la mattina del 30, chiusero un mese di aprile marcatamente secco (MAZZARELLA & DE LUISE, 2007).

Zone di propagazione

Le frane si sono, almeno inizialmente, propagate sul versante come flussi non incanalati. Le frane 2, 3, 4 e 5 hanno asportato sottili spessori (nell'ordine del metro; vedi anche DE VITA *et alii*, 2007) della coltre piroclastica che mantella il versante, lungo aree con ampiezza crescente verso il basso, come indica la configurazione "a triangolo isoscele" delle superfici decorticate (Fig. 9), peraltro già descritta da LAZZARI (1954) dopo l'alluvione di Salerno del 1954, e da DI CRESCENZO & SANTO (1998), BRANCACCIO *et alii* (1999) e DI CRESCENZO & SANTO (2005) per gli eventi franosi occorsi nel 1997 nei Monti Lattari e nel 1998 nei Monti di Sarno.

Verso valle e a distanza variabile dalle rispettive aree di innesco,

ly contributed to the initiation of these slides. An important contribution was probably provided by the localised occurrence of coarse grained deposits (pumices), allowing a fast transmission of water and thus favourable to become saturated with the few hour long rainfall which took place from the evening of 29th to the early morning of 30th, following a markedly dry April month (MAZZARELLA & DE LUISE, 2007).

Propagation areas

The earthslides initially propagated downhill as open-slope debris flows. Landslides 2, 3, 4 and 5 entrained the thin (thickness on the order of 1 m; see also DE VITA *et alii*, 2007) upper portion of the pyroclastics resting onto the hillslope, along sections widening downhill, as indicated by the isosceles triangle shape of the stripped hillslope portions (Fig. 9), a kind of shape frequently encountered in the landslide events occurred in the elevations around Salerno in 1954 (Salerno flood; LAZZARI, 1954), in the Lattari Mts. in 1997 (DI CRESCENZO & SANTO, 1999) and in the Sarno Mts. in 1998 (BRANCACCIO *et alii*, 1999; DI CRESCENZO & SANTO, 2005).

Downslope, at a variable distance from the source areas, the



Fig. 9 - Panoramica del versante di Costa Ruscello (con f1...f5 sono indicate le cinque frane). Le tracce in azzurro ricalcano le tracce a "triangolo isoscele" lasciate dalle frane prima del loro incanalamento (rimarcato dalle linee rosse). Le linee in bianco rimarcano le cornici litologiche subverticali (c; la sigla cs si riferisce alla cornice sommitale) e gli elementi ripidi (er) corrispondenti, la linea blu rimarca il passaggio versante-glacis (tratteggiate dove coperti da alberi)

- Panoramic view of Costa Ruscello hillslope (f1...f5 indicate the landslides). The light blue lines mark the isosceles triangle shape upslope of the channelisation (marked by the red lines). Thin white lines mark the subvertical elements (er; c where coinciding with rocky cliffs; cs refers to the summit free face) and the blue line marks the transition hillslope-glacis (dashed where covered by trees)

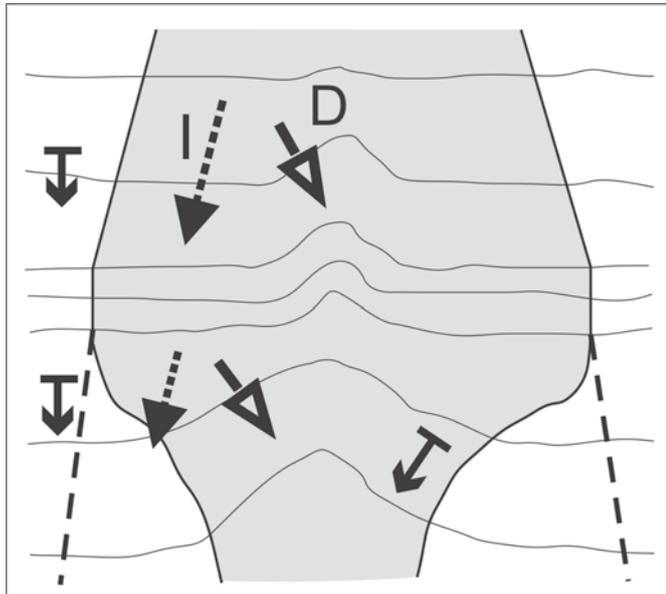


Fig. 10 - Schema idealizzato della geometria di una frana al passaggio su di un elemento ripido. Le linee sottili corrispondono a curve di livello; le linee puntinate rappresentano l'ideale prosecuzione della frana, mentre in grigio chiaro è rappresentata l'effettiva area di frana; le frecce indicano le direzioni locali di massima pendenza; D: la direzione della spinta "deviante" (la cui entità dipende solo dalla massima pendenza locale); I: rappresenta la spinta inerziale, la cui entità, rappresentata dalla freccia tratteggiata, diminuisce a valle dell'elemento ripido, dove diviene confrontabile a D
 - Idealised sketch of the geometry of a landslide flowing along a steep/subvertical element. Thin lines symbolise contours; arrows indicate the local maximum slope; dotted lines represent the ideal prosecution of the landslide trace, whereas the light grey represents the "real" landslide trace; D (and dashed arrows): orientation of the diverting force (whose amount depends only on amount of the local slope); I: orientation of the inertial force, whose amount, represented by the dotted arrows, decreases abruptly (becoming similar to D) downhill of the steep elements

la forma di queste frane cambia da triangolare a fascia (Fig. 9) a seguito del loro incanalarsi non lungo solchi scavati dalle stesse frane, ma entro incisioni vallive preesistenti, come dimostra anche la vegetazione boschiva conservatasi nella parte alta dei fianchi dell'incisione attraversata dalla frana 2.

L'incanalamento delle frane è avvenuto a valle di elementi ripidi le cui altezze variano tra 1-2 m e 5-6 m (Fig. 9). Ciò suggerisce che il salto sulle scarpatine ha favorito la dissipazione dell'energia inerziale così che, a valle di tali elementi, i flussi sono stati deviati verso la massima pendenza locale, ovvero verso i diversi assi vallivi (Fig. 10). Diversamente, nel tratto di versante a monte delle cornici, la spinta inerziale aveva fatto sì che le frane potessero propagarsi verso valle senza risentire delle variazioni di pendenza locali, ovvero potessero fluire indisturbate sia nelle valli che sugli interfluvi.

Un ulteriore contributo all'incanalamento può essere derivato dalla fluidizzazione (a seguito del transito -o salto- sugli elementi ripidi) delle colate, che avrebbe reso le direzioni di movimento sensibili anche a minime variazioni topografiche. Questa possibilità è suggerita, in particolare, dalla frana 3. Negli altri casi, l'incanalamento è stato abbastanza precoce (avvenuto a distanza di solo poche decine di metri dalle aree di innesco) da far pensare a portate abbastanza ridotte da richiedere sezioni comparabili a quelle delle modeste incisioni che dissecano il tratto planare del versante, che hanno ampiezza e profondità di 1 o pochissimi metri (ovvero, aree di 1 o pochissimi m²). La frana 3, invece, prima di raggiungere la cornice si era ampliata su un fronte di circa 20 m (notevolmente più ampio rispetto alle altre frane), evidenziando che il "salto" di una scarpatina (di pochi metri di altezza) tende ad incrementare la fluidità di una colata.

I debris flow, una volta incanalati, si sono propagati verso valle prendendo in carico di alberi, suoli e colluvioni che occupavano le incisioni, ma anche con l'erosione dei fianchi e l'escavazione delle valli stesse.

shape of the stripped areas changes from triangular to that of a belt (Fig. 9), due to the fact that the landslides became channelised. In the channelisation, they followed preexisting stream valleys, as it is shown by the trees still preserved in the upper flanks of the incision followed by landslide 2.

The channelisation began at the toe of steep elements with heights ranging from 1-2 m to 5-6 m (Fig. 9). This suggests that the jump along the steep elements favoured dissipation of the inertial energy so that, below the step, the flows could be diverted according to the orientation of local maximum gradient, i.e. towards the valley axes (Fig. 10). Unlikely, in the hillslope portion standing above each steep element, the inertial energy had allowed the landslides to propagate downhill regardless to the local slope variations (i.e. flowing undisturbed onto gullies and interfluges).

Channelisation was probably also favoured by the fluidization (due to the jump along the steep elements) of the earthslides, which would make the motion direction sensitive also to slight dip changes. This possibility is suggested, in particular, by landslide 3. In the other cases, the channelisation took place at only few tens of m from the source area: at such a short distance the expected discharges were most probably small enough to be contained by valley cross sections as small as those of the shallow valleys which dissect the planar portion of the hillslope, whose widths and depths are around 1 or very few metres (and related cross sections around 1 or very few m² wide). Unlikely, landslide 3 had widened before channelisation over a much larger length (around 20 m in plan view), and this suggests that the jump along the steep element (even though only few metre high) increased fluidity of the flow, which was contained by small scale incisions as well.

Once channelized, the debris flows propagated downhill by the entrainment of trees, soil and colluvium which filled the inci-

se, al cui fondo sono a luoghi venute a giorno le unità costituenti l'edificio vulcanico. L'ampliamento ed approfondimento delle incisioni hanno avuto entità crescente (ma sempre di ordine metrico) verso le quote più basse, dove sono stati anche favoriti dall'aumento di spessore delle tenere unità di copertura. L'erosione lineare operata dai flussi è testimoniata, oltre che dalla troncatura dei suoli e delle radici, dalle tracce di frane di richiamo di dimensioni metriche (Fig. 11), imputabili a scalzamento al piede dei fianchi vallivi provocato dal transito del flusso. La forma sostanzialmente a V assunta dalle valli incise dai flussi (Fig. 11) suggerisce, inoltre, che le colate erano caratterizzate da estrema fluidità.

Zone di transito-accumulo

L'area che va dalla transizione versante-glacis fino alla zona de I Pilastrì (nella piana basale) è stata interessata non solo dal transito dei debris flow, ma anche dall'accumulo di cospicui volumi di materiale (Fig. 6). Potenti accumuli localizzati si rinvengono fino dall'area del glacis, dove, tra l'altro, si è registrato anche il massimo danneggiamento, con parziale o totale distruzione di edifici. Considerando, in particolare, il comportamento dei flussi delle frane 2 e 3, si deve premettere che, nel raggiungere il glacis, essi hanno incontrato un'area la cui morfologia era stata fortemente condizionata da attività estrattive (sostanzialmente, quella rappresentata in Fig. 5c). Queste avevano

sions, but also by bank and bed erosion of the same valleys, with scouring of the bedrock units. Widening and deepening of valleys increased (although being always on the order of few metres) valleywards, also due to the downhill thickening of the soft pyroclastic carpet. Scouring is testified by truncation of soils and tree roots, and by several secondary landslides (with lengths and width on the order of few metres; Fig. 11) triggered by undermining of valley flanks due to the landslide flow. The substantially V-shape of the newborn valleys (Fig. 11) suggest that the debris flows were very fluid.

Motion-accumulation areas

The area that goes from the hillslope-glacis transition to I Pilastrì (in the floodplain) was affected not only by the landslide motion but also by deposition of large volumes of material (Fig. 6). Localised deposition took place starting from the glacis, where also the largest damaging occurred, with partial or total destruction of buildings.

Regarding the behaviour of landslides 2 and 3, we must first consider that these flows moved through the glacis to reach an area whose morphology had been strongly reshaped by quarrying (substantially the area represented in Fig. 5c), leading to retreat and steepening of the slope toe (a 15 m high front) besides formation of wide

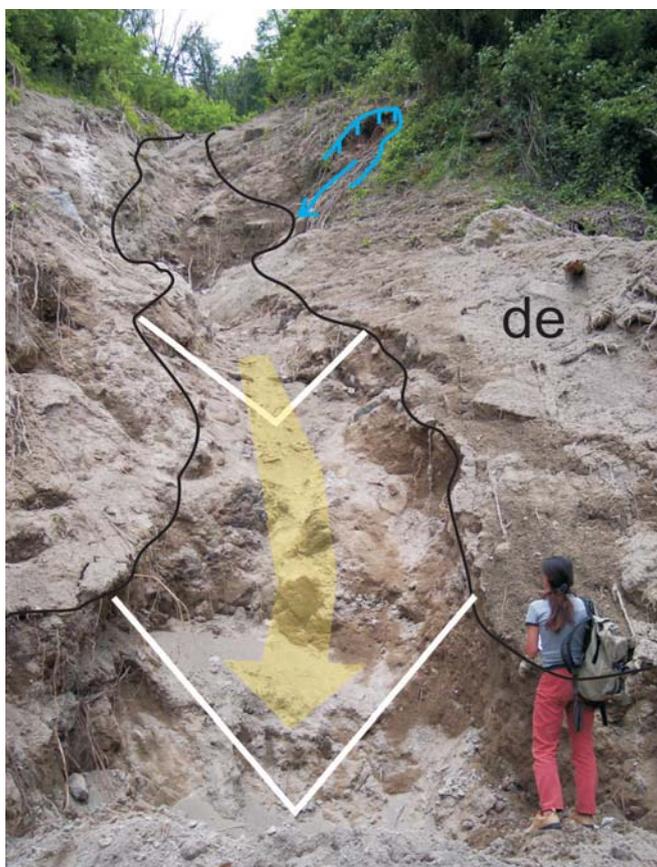


Fig. 11 - La frana 5 al passaggio versante-glacis. de: l'accumulo rilasciato sulle spalle della valle in corrispondenza dello svasamento dell'incisione; la linea nera e le V in bianco rimarkano i bordi ed il profilo della valle incisa dalla colata in transito; in celeste, è evidenziata la frana innescata nel fianco vallivo dal passaggio della colata
 - *Landslide 5 on its arrival in the glacis area. de: deposit released on the shoulders of the valley where it becomes smoother; the black line and the V mark the limit and the profile of the newborn valley bottom scoured by the flow; the light blue line outlines the small scale landslide triggered by undercut due to scouring*

determinato l'arretramento ed irripidimento del piede del versante (una parete alta fino a 15 m) e la creazione di un ampio piazzale, a valle del quale si individua una seconda area di cava. Superato il primo fronte, i flussi hanno investito il sottostante piazzale (provocando la parziale distruzione dei tre edifici che lo occupavano) e rilasciato qui un potente accumulo caotico di tronchi, pomici e fango (a in Fig. 6; Fig. 12). Le parti residue si sono riversate sul sottostante taglio stradale (solo parte -probabilmente solo la più fluida coda- si è incanalata nel relativo tracciato stradale; Fig. 6) e, da qui, sulla seconda parete di cava, andando a colmare anche il piazzale più basso, che ospitava l'impianto di compattazione dei rifiuti (b in Fig. 6).

Passando al caso della frana 5, questa ha incontrato una rottura di pendenza concava nel profilo longitudinale dell'incisione in cui si era incanalata già lungo il versante. Questa valle incide il glacis per una profondità di 5-10 m esponendo una successione di cineriti e pomici fortemente disarticolata da faglie: a causa delle dislocazioni, per un lungo tratto della valle affiorano cineriti in sinistra orografica e pomici in destra e tale assetto si riflette nel profilo asimmetrico della valle, che presenta il fianco destro spiccatamente più ripido del sinistro.

La brusca diminuzione di pendenza nel profilo longitudinale dell'incisione ha provocato il rilascio di materiale che è andato a coprire le spalle della valle (in questo tratto non più profonda di 3-4 m), depositandosi sui terrazzi del glacis (c in Fig. 6; Fig. 11), per essere

and flat planed areas.

Once flown down the first quarry front, the landslides reached the neighbouring planed off area (causing the partial destruction of three buildings) where a large chaotic debris (wood, pumice and mud) deposit was released (a in Fig. 6; Fig. 12). The remaining landslide portions flew down to reach the underlying road cut (only part of it - probably the more watery tail- flew along the road; Fig. 6) and then a second quarry front, reaching and partly filling the underlying planed area where other man-made structures were strongly damaged (b in Fig. 6).

Landslide 5 encountered a concave slope-break in the long-profile of the valley it was channeled in. This valley dissects the glacis with depths of 5-10 m, exposing a succession of cinders and pumices strongly offset by faults: due to the displacements, a long valley segment exposes cinders in the left flank and pumices in the right one. This litho-structural setting is mirrored by the valley shape, here showing a markedly asymmetrical cross profile, with the right flank much steeper than the left one.

Due to the sharp slope break in the long profile of this incision, some material was released on the terraced glacis rims (c in Fig. 6; Fig. 11), resting 3-4 m above the valley floor, to be subsequently dissected by the following more fluid body.

Downvalley, the flow remained confined within the incision, here

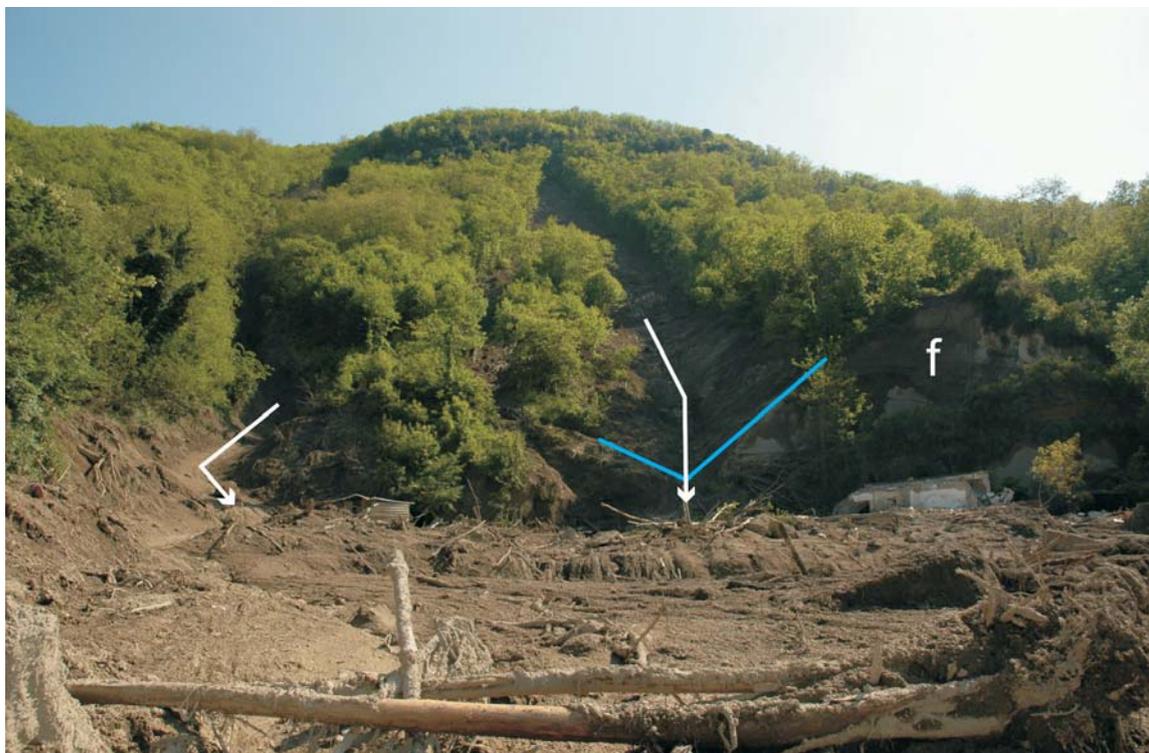


Fig. 12 - In primo piano, l'accumulo rilasciato dalle frane 2 (a sinistra) e 3 (al centro) nel primo piazzale di cava (a in Fig. 6); sulla destra, la lettera f indica il fronte di cava retrostante; la linea verde rimarca il profilo della valle seguita ed approfondita dalla frana 3 (foto di S. Perriello Zampelli)
- In the foreground, the deposit released by landslides 2 (to the left) and 3 (centre) in the first quarried area (a in Fig. 6); to the right, f indicates the quarry front; the green line marks the cross-profile of the valley followed and scoured by landslide 3 (photograph by S. Perriello Zampelli)



Fig. 13 - Particolare dei depositi rilasciati dalla frana 5 lungo un tratto svasato della valle che disseca il glacis (f in Fig. 6); si noti l'embriciatura dei tronchi.
 - Close-up view of the deposits released by landslide 5 along a smooth segment of the valley dissecting the glacis (f in Fig. 6); note the imbricate structure of the wood

poi dissecato al sopraggiungere del seguito della colata.

Più a valle, invece, il flusso ha potuto essere contenuto dall'incisione, che qui diventa più ampia e profonda, dove ha dato luogo ad accumuli localizzati in corrispondenza di ostacoli (alberi ed edifici), contropendenze (viottoli intagliati nei fianchi vallivi; d ed e in Fig. 6) e tratti a bassa pendenza, ovvero terrazzamenti e raccordi concavi dei fianchi vallivi. In questi ultimi casi, gli accumuli sono dati da cordature costituite dalla porzione più grossolana del materiale trasportato, ovvero soprattutto tronchi che intrappolano pomici. In alcuni tratti, i rami ed i tronchi risultavano embriciati (f in Fig. 6; Fig. 13), e ciò lascia supporre che il debris flow presentava alta fluidità e velocità.

Che la colata fosse dotata di una notevole velocità si evince anche dal fatto che il suo transito ha provocato, in un tratto, l'arretramento della parete destra per erosione di sponda (g in Fig. 6; Fig. 14). Qui l'erosione è stata determinata dal fatto che, in quel tratto, la sezione della valle presenta un restringimento; essa è stata tuttavia anche favorita dalla natura dei terreni affioranti, interessando solo il fianco valle impostato nelle pomici (quello opposto è impostato nelle cineriti), nonostante il tracciato presentasse una lieve curva a destra. Un ulteriore indizio dell'alta velocità con cui la frana è transitata è dato dalla presenza, in quella stessa parete, di un grosso ramo conficcato nelle pomici (Fig. 15).

L'energia posseduta dal flusso ha permesso a questo, ancora nel tratto più basso della valle, la distruzione di una costruzione adibita a garage (h in Fig. 6), il cui tetto in cemento, staccato e preso in carico, è stato rilasciato solo qualche decina di metri più avanti. Infine, l'ultimo, potente, accumulo di materiale grossolano (soprattutto tronchi e pomici) è stato rilasciato a partire dall'ultima curva e fino allo sbocco dell'alveo-strada in Via Arenella (i in Fig. 6).

La frana 4 si era incanalata, percorrendo il versante, lungo un'incisione che proseguiva anche attraverso il glacis, che tuttavia ne risultava solo blandamente dissecato. La brusca rottura di pendenza

deeper and wider and coinciding with a channel track. In this segment of the valley, localised accumulation took place at obstacles (trees and buildings), upvalley dipping access tracks cut in the valley flanks (d and e in Fig. 6) and smooth areas, i.e. agricultural terraces and basal concavities of the valley sides. In these latter cases, the deposits consist of levees made up of the coarser portion of the solid discharge, i.e. mainly wood and pumices. At some places, imbricate tree trunks were found (f in Fig. 6; Fig. 13), suggesting a high velocity of the debris flow.

Downvalley, the flow motion caused undermining and retreat of the right valley side. This is observed at a narrower valley segment, suggesting that the reduction in the cross section was responsible for local velocity increase (g in Fig. 6; Fig. 14): a high flow velocity is also documented by a large tree branch dug into the retreated bank (Fig. 15). Here, however, erosion was also favoured by the nature of the outcropping deposits: in fact, notwithstanding the right bend in the path (Fig. 14), undercut and retreat affected only the inner bank (i.e. the right valley side), made up of loose pumices, whereas on the opposite side cinder deposits crop out.

In the lower valley segment, the momentum was high enough to allow the flow to destroy a concrete garage (h in Fig. 6) and entrain its roof, which was released some tens of m downvalley. The largest volume of coarse material (mainly wood and pumices) was then deposited in the area going from the last valley bend to the outlet in the Via Arenella channel track (i in Fig. 6).

Landslide 4 had followed a valley which dissected also the glacis, although with a very shallow depth. The sharp slope break (in few metres the slope angle changes from 30°-35° to around 10°) and the entrance in a shallow incision, with depth not larger than 1 m, caused a sudden decrease in the flow velocity: this is testified by the scoured and stripped area, which in few metres changes from a deep and nar-



Fig. 14 - Effetti provocati dal passaggio della frana 5 lungo l'incisione che disseca il glacis. La linea gialla segue l'attuale profilo della valle (visto da monte) di uno dei tratti a sezione stretta; il segmento tratteggiato indica il fianco arretrato, per erosione di sponda, a seguito del transito della colata; si noti la forma a V del fondo, denotante l'escavazione operata dalla colata; de: deposito rilasciato su un viottolo che risaliva il fianco della valle

- Effects of landslide 5 flow along the incision dissecting the glacis. The yellow line marks the present cross profile of one of the narrower valley sections (view towards downvalley); the dashed segment marks the valley flank retreated due to undermining as a result of the flow motion; note the V-shaped floor testifying scouring in the pre-existing access track; de: debris deposited on an upvalley dipping track cut in the valley flank

(in pochi metri si passa dai 30°-35° di inclinazione lungo il versante a circa 10° sul glacis) ed il passaggio ad un alveo con profondità non superiore al metro deve aver determinato una improvvisa diminuzione nell'energia del flusso, testimoniata dalla morfologia dell'area decorticata che, da una sezione a V profonda e stretta, passa in pochi metri a quella di una V larga (Fig. 16).

Sul glacis, il flusso ha operato una decorticazione estremamente superficiale, asportando prevalentemente la copertura vegetale ed il suolo, senza raggiungere la profondità degli apparati radicali della vegetazione a canne (che si aggira intorno al metro) che, ad un mese dall'evento, era infatti già ricomparsa (Fig. 16c). Il transito della colata, inoltre, ha solo debolmente ritoccato i terrazzamenti, che hanno altezza intorno al metro (Fig. 16b). Il limitato potere erosivo del flusso nel suo transito su questo terrazzo è imputabile, oltre che alla bassa pendenza media del glacis (Fig. 4b), anche al fatto che i terreni su cui questo è impostato (prevalentemente cineriti) non erano totalmente, imbibiti: diversamente, infatti, i terrazzamenti a ciglioni sarebbero stati distrutti. Il basso grado di imbibizione di terreni con questa tessitura trova una spiegazione nel fatto che, come evidenziato da MAZZARELLA & DE LUISE (2007), le intense precipitazioni che hanno determinato i fenomeni franosi sono seguite a circa un mese di assenza di piogge.

L'evidenza più vistosa della diminuita energia del flusso in transito lungo il glacis è rappresentata dai cospicui volumi di detriti rila-

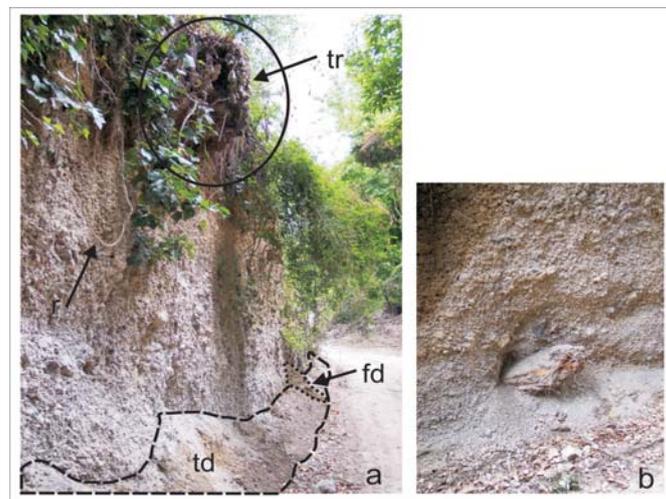


Fig. 15 - a: Particolare della parete in pomice (indicata dalla linea tratteggiata in Fig. 14; g in Fig. 6) arretrata a seguito del transito della frana 5 lungo l'incisione che disseca il glacis, come appariva ad un mese dall'evento: si noti il neonato accumulo al piede (td), che include depositi da crollo di dimensioni decimetriche (fd). Si notino gli apparati radicali di piante (r) e alberi (tr) sospesi lungo la parete. b: grosso ramo conficcato nelle pomice lungo la prosecuzione della parete rappresentata in a.

- Close-up view of the pumice scarp (marked by the dashed yellow line in Fig. 14; g in Fig. 6) retreated in response to undercutting by landslide 5, seen one month after the event: note the newborn talus slope (td), which also includes small (on the order of few dm) fall deposits (fd). Note also the tree (tr) and plant (r) roots hanging along the scarp. b: tree branch dug into the pumices along the downvalley prosecution of the scarp in a.

row to a large and smooth V-shaped valley (Fig. 16).

Depth of scouring, in the glacis, was very shallow: the flow mainly entrained the vegetation cover and the soil, without reaching the around 1 m deep radical apparatus of the canes, which earlier than one month after the event had already re-appeared (Fig. 16c). The around 1 m high agricultural terraces cut on the glacis were only slightly eroded by the flowing landslide (Fig. 16b). These evidences highlight not only the poor erosive power of the flow, which may be related to the low average slope angle of the glacis (Fig. 4), but also the poor erodibility of the fine grained deposits (mainly cinders) forming the top surface of the pyroclastic apron, which probably relies on the fact that these deposits were not saturated with water. The poor water content of these fine grained deposits may found a reliable explanation in the fact, evidenced by MAZZARELLA & DE LUISE (2007), that the intense rainfall which triggered the landslides followed about one month of absence of rainfall.

The most striking evidence of the decreased power of the landslide during its flow across the glacis is given by the large volumes of debris released along the path (Fig. 6). These form large (up to 4-5 m) and continuous levees, made up of wood jammed up and trapping mainly pumices. The deposit becomes particularly large at the outer side of bends (Fig. 17) in the flow path, which follows the pre-existing incision (l in Fig. 6).

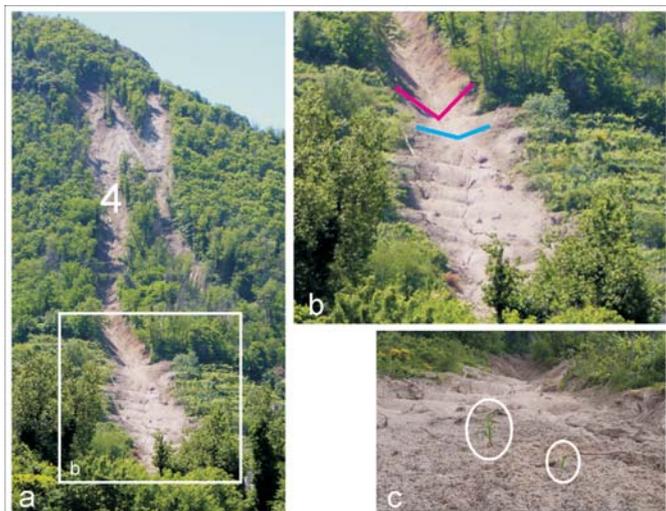


Fig. 16 - Gli effetti prodotti dal transito della frana 4 sul glacis; in a: il riquadro bianco indica l'area ingrandita in b. b: la diversa forma delle valli scavate dalla colata lungo il versante e sul glacis sono rispettivamente evidenziate dalle linee viola e turchese; si notino i relitti dei terrazzamenti antropici solo in parte erosi dalla colata. c: immagine dello stesso tratto di glacis ad un mese dall'evento franoso, con la ricomparsa della vegetazione grazie alla mancata asportazione degli apparati radicali da parte della colata

- *Effects produced by landslide 4 on the glacis surface; a: panoramic view; the white frame indicates the area in b. b: the different profiles of the flow-scoured valley along the hillslope and on the glacis are respectively marked by the purple and by the light blue lines; note the only partly scoured remains of the agricultural terraces. c: the same portion of the glacis one month after the event: note the reappearance of the vegetation which denotes that essentially the shallow radical apparatus had not been disturbed by the shallow scouring*

sciati sui terrazzi lungo i margini del tracciato (Fig. 6). Questi formano larghe (fino a 4-5 m) cordonature continue, costituite da cumuli di tronchi che intrappolano soprattutto pomici. L'accumulo diviene particolarmente voluminoso in corrispondenza del lato esterno (Fig. 17) delle curve imposte al flusso dal solco preesistente (l in Fig. 6).

L'accumulo sul fianco esterno di curve trova spiegazione nel fatto che i tronchi tendono a infiggersi nella sponda esterna contro cui il flusso li dirige; l'accumulo dei tronchi individua, quindi, una zona in cui il flusso viene rallentato, permettendovi la deposizione anche della frazione più sottile del carico. È noto, del resto, che diversamente da quanto avviene per debris flow privi della componente tronchi, che si muovono attraverso le curve dei tracciati sostanzialmente senza rallentare, quelli che trasportano tronchi di grandi dimensioni (come nei casi del M. di Vezzi, dove i tronchi avevano dimensioni plurimetriche) possono essere sensibilmente rallentati all'attraversamento delle curve, dando luogo ad accumuli localizzati (LANCASTER *et alii*, 2003).

Sempre circa la frana 4, osserviamo che a valle delle citate curve, la colata si è riversata, in successione, in due cave (la prima inattiva e la seconda ancora attiva), nei cui piazzali ha rilasciato la quasi totalità del carico grossolano restante (m ed n in Fig. 6), per poi confluire, come le altre colate, nella Via Arenella.

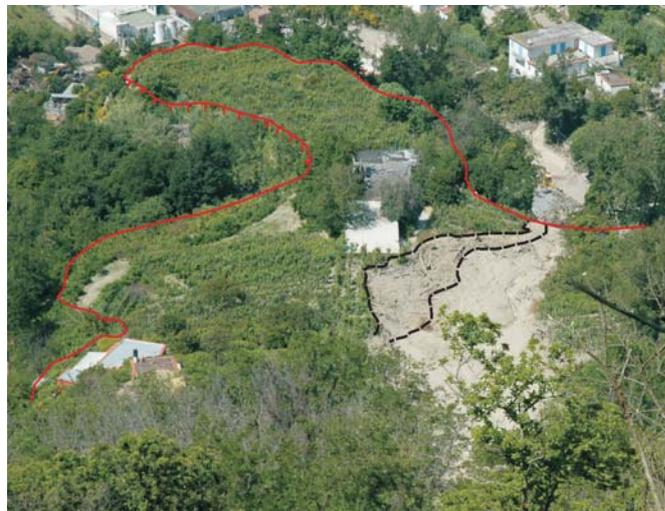


Fig. 17 - La frana 4 sul terrazzo del glacis (la linea rossa ne segue l'orlo esterno); la linea tratteggiata nera rimarca i limiti del deposito rilasciato dalla colata lungo il fianco esterno della curva, costituito in larga parte da tronchi (foto di S. Perriello Zampelli)

- *Effects produced by landslide 4 on the terraced glacis (the red line marks the terrace rim); the dashed black line marks the border limit of the debris deposit released at the outer bank of the right bend, largely composed of wood (photograph by S. Perriello Zampelli)*

The accumulation at the outer bank of a bend may be explained as an effect of the wood entrained and transported by the flows. Tree trunks, in fact, tend inertially to follow the downvalley oriented flow and to dig into the outer channel banks, becoming tangled with one another. As a result, the outer rim of the bend becomes an area with reduced flow velocity, which favours trapping of sediments between the tree trunks. It is widely observed, in fact, that unlike debris flows without wood, which move fluidly through bends with little loss of velocity, debris flows with large wood (as those which affected the Mt. di Vezzi area, which have lengths of several metres) may lose velocity at turns, giving rise to localised debris accumulation (LANCASTER *et alii*, 2003).

Downvalley (after it passed through the mentioned bends), landslide 4 flew in two different quarries (the first one inactive, the second still active), where almost all the coarse debris was released (m ed n in Fig. 6), and then reached, as the remaining landslides, Via Arenella channel track.

Debris flows 2 to 4 arrived in the flood plain after they had released on the glacis surface and in the valleys which dissect it, most of their coarse solid discharge. In the area which collected the inflow of the landslide bodies (i in Fig. 6), the debris flow reached a bulk thickness around 2,5 m, and was still characterised by a large amount

In tutti i casi, i debris flow hanno raggiunto la piana basale dopo che avevano rilasciato, sul glacis e nelle valli che lo dissecano, la massima parte del carico grossolano. Nella zona di confluenza dei corpi delle frane (i in Fig. 6), il flusso detritico aveva, complessivamente, uno spessore di circa 2,5 m e abbondante carico solido, come ben documentano le tracce del passaggio del flusso ed i depositi rilasciati, ancora molto grossolani (frammenti di edilizia con volume dell'ordine del m³, tronchi lunghi alcuni metri e con diametri decimetrici) accumulati ai lati della strada durante le operazioni di primo soccorso (Fig. 18).

Poco più a valle, le tracce riscontrate con i rilievi eseguiti a soli due giorni dagli eventi indicano che percorrendo l'alveo-strada Via Arenella il flusso ha progressivamente acquisito il carattere di colata di fango. Qui la zona interessata dal passaggio è strettamente confinabile alla strada, limitata quasi senza discontinuità da mura ed edifici, ed è stata attraversata con danni infrastrutturali limitati (Fig. 19) in virtù della maggiore fluidità acquisita dal flusso. Sono stati rilevati spessori del fluido generalmente inferiori al metro (Fig. 6 e Fig. 19), con ondulazioni sommitali generate da ostacoli e articolazioni di varia natura (Fig. 20) ed alcuni decimetri di depositi eterometrici a tessitura sabbioso-ghiaiosa con inglobati rari blocchi decimetrici.



Fig. 18 - A: patine fangose lasciate dai debris flows in transito con spessore pari a 2,5 metri circa; B: cumuli di frana artificialmente rimossi, costituiti da abbondanti frammenti di edilizia (B1), grossi tronchi (B2) e matrice ghiaioso-sabbiosa
 - A: mud left by moving debris flows with thickness around 2.5 m;
 B: removed landslide deposits with abundant concrete blocks (B1), large wood (B2) and pebbly-sandy matrix

Localmente sono state rilevate strutture da trasporto selettivo (clinostratificazioni, ST in Fig. 20) che denotano fasi del flusso estremamente fluide. Quando, infine, la colata raggiunge località I Pilastrì i depositi più distali che rilascia, costituiti da ghiaie minute e sabbie, hanno spessori centimetrici e presentano una sostanziale classazione e un buon grado di arrotondamento (Fig. 21).

of solid load. This is documented by the traces left by the flow and by deposits it released, very coarse (concrete fragments with volumes on the order of some m³ and wood with length of some metres and some dm large) which were accumulated along the road margins during the early phases of post-eventum rescue work (Fig. 18).

Evidences observed during the earliest field survey (carried out two days after the events) indicate that flowing through the Via Arenella channel track the landslides progressively became earth flows. Here the flows could be contained by Via Arenella, which is almost continuously bounded by walls and buildings that, due to the high fluidity of the flows, recorded only slight damages (Fig. 19). The traces left downvalley indicate that thickness was generally less than 1 m (Fig. 6 e Fig. 19) and that in response to the occurrence of obstacles and path irregularities (Fig. 20), its surface was characterised by waves.

Here few tenths of metre thick mainly sandy-pebbly deposits (with cobbles up to few dm) were released. At some places, selective transport structures (cross bedding, ST in Fig. 20) indicate that the flow was extremely watery. At I Pilastrì settlement the last deposits were found: they consisted of well sorted and rounded fine textured pebbles and sands with thickness not larger than few cm (Fig. 21).

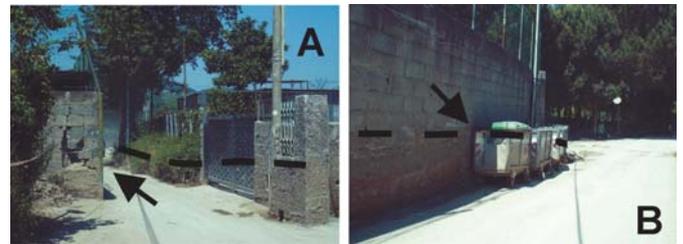


Fig. 19 - Modesti danni da impatto (freccie) e tracce lasciate dal passaggio della colata di fango (spessore intorno ad 1 m) da monte (A) verso valle (B).
 - Modest damages caused by impact (arrows) and traces left by the earth flow (thickness around 1 m) along Via Arenella, from upvalley (A) towards downvalley (B)

CONCLUDING REMARKS

The first results of the geomorphological study we carried out in the area struck by the 30th April 2006 landslide events allowed the collection of new evidence on the role of the geomorphological elements at various scales in the landslide initiation, propagation and deposition. Furthermore, hypotheses concerning the role played in the landsliding by preparating factors different from the geomorphological ones could be formulated.

The study has shown that the source areas are sited within a small size area (around 9 km²) located close to the top of Costa Ruscello hillslope (in proximity to the summit free face) and with slope angle values (between 35° and 45°) not different from those found elsewhere along the same hillslope. This evidence supports the hypothesis, based on meteorological data (MAZZARELLA & DE LUISE, 2007), that the rainfall event occurred on 29th and 30th April displayed

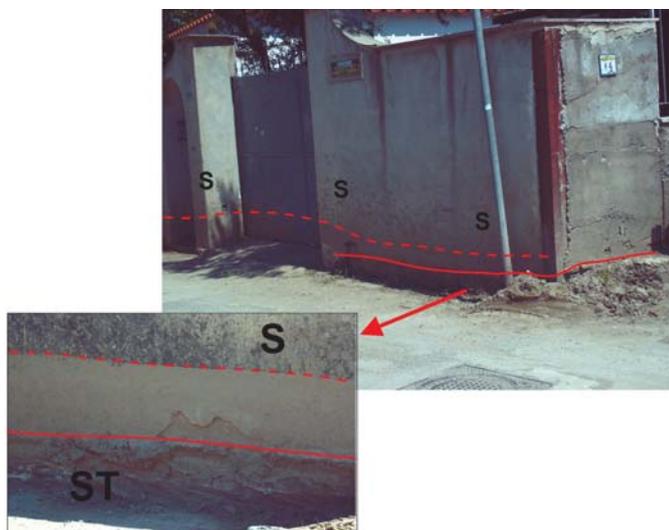


Fig. 20 - Tracce del transito delle frane lungo Via Arenella. La sommità ondulata della colata (linea tratteggiata) ricalca i dossi del fondo stradale, ed è sormontata da una zona di spruzzi (S), che denota il carattere fluido della colata. Con la linea continua è indicata la sommità del materiale depositato; il dettaglio della foto mostra un intervallo basale con stratificazioni incrociate (ST)

- *Traces left by the earth flow along Via Arenella. The waverly summit trace of the flow (dashed red line) follows the uneven road surface, and is overlain by a mud spray belt (S), suggesting the high fluidity of the flow. The continuous red line marks the top of the deposit. The detail to the low-left shows the cross-bedded (ST) basal interval*

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

I primi risultati dello studio geomorfologico condotto nell'area interessata dagli eventi franosi del 30 aprile 2006 ha permesso nuove osservazioni circa il ruolo degli elementi geomorfologici di varia scala negli inneschi e nella propagazione delle frane, ma anche di formulare ipotesi circa il peso assunto da fattori di altro tipo nella franosità dell'area.

In particolare, si è evidenziato che le zone di innesco si situano in un'area prossima alla sommità del rilievo (in prossimità della cornice sommitale) e sono inscritte in un areale alquanto ridotto (circa 9 km²), che ha inclinazioni (tra 35° e 45°) mediamente non dissimili rispetto a quelle di settori contigui sia lateralmente sia più a valle. Ciò rafforza l'ipotesi, basata sui dati meteorologici (MAZZARELLA & DE LUISE, 2007), che l'evento piovoso dei giorni 29 e 30 aprile ha avuto carattere strettamente locale (spot rain). Ovviamente, nell'ambito dell'area colpita dall'evento piovoso, si sono avute frane solo laddove le condizioni litologiche, idrogeologiche e morfologiche predisponenti davano luogo a fattori di sicurezza abbastanza bassi da poter essere portati sotto la critica soglia dell'unità dagli incrementi di peso e dai decrementi di resistenza al taglio che l'evento piovoso indusse nei terreni superficiali.

Riguardo al contributo degli elementi morfologici -alla scala di dettaglio- nell'innesco delle frane, un ruolo importante è stato svolto dalle brusche rotture di pendenza naturali (cornice sommitale) e antropiche (ciglio stradale); al contempo, gli elementi convessi in profilo ed in pianta (nose sensu HACK & GOODLETT, 1960) risultano rappre-

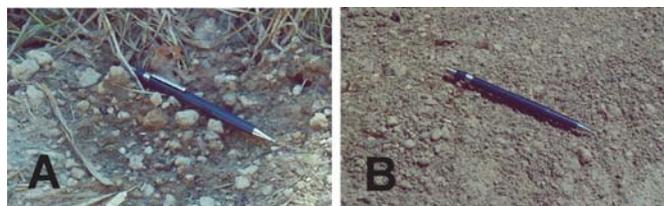


Fig. 21 - Strutture sedimentarie nei depositi della piana basale. A: in posizione più proximale i depositi sono eterometrici e non selezionati, e di forma spigolosa; la tessitura è a supporto di una matrice sabbiosa, con clasti di dimensioni centimetriche, testimoniando una colata fangosa. B: le zone più distali sono attraversate da un flusso oramai impoverito di frazione solida, che possiede caratteri di corrente selettiva e deposita livelli a tessitura più fine, e con un certo grado di sorting ed arrotondamento dei clasti pomicee

- *Sedimentary structures in the deposits recovered in the flood plain. A: proximal deposits are poorly sorted and with sharp angles; regarding texture, the deposits is supported by a sandy matrix with clasts on the order of few cm that can be related to a mud flow. B: in the distal areas, the flow was much poorer in solid fraction, showing characters of a selective transport: the deposit shows a much finer texture, better sorting and rounding of the coarser pumice clasts*

through localised spot rain. Of course, within the area affected by this rainfall event, the landslides took place only where the lithological, hydrogeological and morphological preparing factors gave rise to values of the safety factors low enough to become lower than the critical threshold due to rainfall triggered weight increase and/or shear strength decrease in the surficial deposits.

As regards the contribution provided by the geomorphological elements -on detail scale- in favour of landslide initiation, the Ischia case highlight the role played by the natural and man-made sharp slope breaks (e.g., summit free face and track rim), as well as by convex elements (i.e. noses sensu HACK & GOODLETT, 1960). These latter geomorphic elements appear capable to add further potential for failure and sliding to hillslopes with gradient close to the threshold for landslide initiation. Although the source areas of landslides 4 and 5 are located within zobs, our study suggests that these elements did not play a major role in the localization of the initial failures: comparable landforms and slope angle values (35°-40°) are in fact quite common on the same hillslope. In these cases, potential for failure was most probably provided by the pumiceous component of the pyroclastic cover (here thicker than elsewhere; DE VITA *et alii*, 2007; DI NOCERA *et alii*, 2007), easier to become saturated even with short lasted rainfall events, such as the one that, basing on meteorological data (MAZZARELLA & DE LUISE, 2007), affected the area. Further information on the contribution provided by the lithological-stratigraphical variability on landsliding is indirectly provided by effects caused by landslide 4 on the glacis surface: here the agricultural terraces were damaged but not destroyed upon flow impact, most probably because they are cut in fine textured cinder deposits whose suction was not yet null (but in the uppermost decimetres) due to the slower transmission of water rained in the former hours.

Among the features of the high order morphological elements, the one which exerted a major control on landsliding was the high

sentare un fattore aggiuntivo di instabilità, atto a favorire il distacco della coltre. Nonostante i distacchi delle frane 4 e 5 si situano all'interno di zob, lo studio suggerisce che tali elementi morfologici non hanno giocato un ruolo determinante nella localizzazione degli inneschi: questo tipo di elementi e valori di inclinazione comparabili (35°-40°) si individuano, infatti, anche in altre porzioni del versante. In questi casi, un ruolo importante nel superamento della soglia di stabilità è stato probabilmente svolto dalla componente pomicea della coltre (più abbondante che altrove; DE VITA *et alii*, 2007; DI NOCERA *et alii*, 2007), atta a saturarsi anche con isolati eventi di intensa precipitazione come quello che risulta aver interessato l'area. Al riguardo va osservato che un'ulteriore indicazione sul ruolo della variabilità litologico-stratigrafica è, indirettamente, offerta dalla frana 4: se sul glacis i terrazzamenti agricoli hanno retto all'impatto della colata è stato molto probabilmente grazie al fatto che i terreni nei quali essi sono tagliati si trovavano in condizione di suction non azzerata (se non nei primissimi decimetri di sottosuolo) per via della loro natura cineritica e della scarsa penetrazione delle precipitazioni delle ore precedenti.

Tra le caratteristiche degli elementi morfologici di ordine maggiore, quella che ha giocato un ruolo determinante dello sviluppo delle colate è stata la notevole ripidità (valori frequentemente intorno a 40°) del versante di Costa Ruscello. Con la discesa, infatti, le colate hanno acquisito velocità e potere erosivo tali da approfondire ed ampliare le valli attraversate lungo il versante, e da poter dare luogo, anche sulle basse pendenze del glacis (inclinazioni di circa 5°), a erosione di sponda e embriciature nei depositi dove i flussi erano confinati da sponde vallive. Dove, invece, la rottura di pendenza coincideva con la presenza di sezioni più ampie e svasate (all'arrivo sul glacis e, come caso limite, nei piazzali di cava), si sono avuti i più potenti ed estesi accumuli.

In conclusione, questo studio evidenzia che, nonostante il numero degli eventi occorsi il 30 aprile 2006 sia troppo ridotto per permettere significative considerazioni di tipo statistico, la popolazione di frane esaminata presenta caratteri abbastanza diversificati da consentire di considerarla un caso di studio rappresentativo dei fenomeni franosi che interessano le coltri piroclastiche nella regione.

Riguardo al ruolo degli elementi morfologici, si osserva, per ciò che concerne gli inneschi, che i casi di Ischia ricadono in tipologie ricorrenti anche nella più vasta casistica incontrata in occasione degli eventi franosi occorsi nel 1997 nei Monti Lattari e nel 1998 nei Monti di Sarno (DI CRESCENZO & SANTO, 1998; BRANCACCIO *et alii*, 1999; CINQUE *et alii*, 2000; DI CRESCENZO & SANTO, 2005).

Accanto a ciò, i primi risultati qui riportati circa le frane del 30 aprile a Ischia segnalano come un interessante argomento da approfondire la dinamica delle zone di transito-deposizione, in particolare per ciò che riguarda la distribuzione di accumuli anche lungo zone di transito, che ha importanti ripercussioni sull'impatto finale delle frane nelle aree più distali e, generalmente, più urbanizzate. Essi, infatti, pongono all'attenzione il ruolo giocato sia dalla componente "tronchi" del carico e, con questo, dalla presenza di curve lungo il percorso, sia dalle variazioni di sezione del canale attraversato dal

gradient (angles frequently around 40°) of Costa Ruscello hillslope. Flowing downslope, the landslides gained velocity and erosive power high enough to allow them scouring the valley floors and, even on the low dips encountered downvalley (angles around 5°), to undercut the valley flanks and produce imbricate structures where the flows were contained by steep and high valley sides. Where, instead, the slope break coincided with smoother sections (upon the arrival on the glacis and, as an extreme case, the planed off quarry areas), the widest and thickest deposits were released.

In conclusion, this study shows that, although the events occurred on 30th April are too few to allow significant statistical considerations, the analysed landslide population shows quite variable characters and, for this reason, it can be considered as a representative study case for the pyroclastic earth slides which affect the region.

As regards the role played by the geomorphological elements in the localization of the initial failures we observe that the source areas of the Ischia landslides belong to typologies frequently recognised in the vast record of cases encountered in the events occurred in 1997 in the Lattari Mts and in 1998 in the Sarno Mts (DI CRESCENZO & SANTO, 1999; BRANCACCIO *et alii*, 1999; CINQUE *et alii*, 2000; DI CRESCENZO & SANTO, 2005).

Moreover, the first results from the Ischia case study point out the need for further studies on the landslide behaviour in the motion-accumulation zones, and in particular on the distribution of localised deposition, which has important consequences on the final impact of landslides in the distal, and generally more densely urbanised, areas. These cases, in fact, highlight the role played in the localised release of material by the wood component of the solid discharge and, with this one, by the occurrence of bends along paths, but also on the role of the changing valley cross sections of the channelled flows.

Furthermore, the Ischia cases point out the control exerted by complex hillslopes on flow dynamics, highlighting the role played by steep/subvertical elements not only on initiation of large sliding and flowing, but also on flow propagation. Taking into account also the pre-existing record (see references cited above) we may conclude that jumps along high subvertical elements may provide small slides with enough kinetic energy to trigger mobilization of the potentially stable material resting downslope.

Regarding the influence of steep elements on debris flow propagation, we observe that evidence from the Ischia cases contrasts the more numerous ones offered by the Sarno Mts. events. In the first case the steep elements favoured the channelisation of the debris flows (and consequent narrowing of the stripped surface below the subvertical elements), whilst in the second case widening of the isosceles triangles traces is observed below the steep elements. This difference may be related to the sharp height difference of the steep elements, not higher than 5-6 m in the Ischia case and up to tens of metres in the Sarno one. Evidence from Sarno

flusso, nel rilascio di materiale lungo il tragitto.

I casi di Ischia, inoltre, evidenziano l'importanza del condizionamento esercitato da pendii complessi sulla dinamica delle colate, mettendo in luce il ruolo svolto dalle cornici litologiche non solo nell'innescare dei franamenti, ma anche nella loro propagazione. Considerando anche il record pregresso, risulta evidente che il salto lungo alte pareti può conferire anche a piccoli scorrimenti iniziali l'energia sufficiente ad innescare l'ulteriore franamento a valle delle scarpate stesse, e ciò suggerisce l'incremento di sforzo di taglio dovuto all'impatto possa determinare la mobilitazione anche di una porzione di colate potenzialmente stabile.

Riguardo all'influenza delle pareti sulla propagazione dei debris flows, tuttavia, le evidenze riscontrate ad Ischia differenziano in modo sostanziale questi casi da quelli riscontrati negli eventi dei Monti di Sarno. Se, infatti, nel primo caso il passaggio sulle pareti ha favorito l'incanalamento dei flussi (e la conseguente riduzione in ampiezza della superficie decorticata), nei casi dei Monti di Sarno il passaggio sulle cornici è sostanzialmente coinciso con l'ulteriore ampliarsi dei "triangoli" decorticati. La differenza, nei due casi, sembra imputabile alla diversa altezza delle pareti, non superiore a 5-6 m nel primo, e nell'ordine delle decine di metri nel secondo. Ciò suggerisce che mentre il salto di alte pareti, per gli spruzzi dovuti alla frangenza e per le vibrazioni che induce, è in grado di amplificare la propagazione (che giunge ad investire aree lateralmente più distanti), il salto su piccole pareti rende i flussi più sensibili alle variazioni locali di pendenza sia perché ne incrementa la fluidità (che rende le direzioni di movimento più sensibili alla massima pendenza locale) sia perché causa la dissipazione dell'energia inerziale, che tendeva a dirigere il flusso verso valle.

L'importante ruolo svolto dagli elementi subverticali presenti lungo un versante evidenzia quanto sia cruciale la loro individuazione anche ai fini della suscettibilità. La loro presenza, infatti, è in grado di incrementare in modo sostanziale la suscettibilità di versanti con pendenza media anche non particolarmente elevata. D'altra parte, il riconoscimento di questi elementi può risultare particolarmente arduo se condotto con analisi di foto aeree o di carte topografiche di dettaglio non sufficiente e, soprattutto, se essi ricorrono su versanti con fitta copertura boschiva. Pertanto, nei casi in cui la loro presenza può essere sospettata (ad esempio, dall'assetto litostrutturale complessivo), appare opportuno che la soglia di suscettibilità venga prudenzialmente abbassata.

OPERE CITATE/REFERENCES

- ABBATISTA F., D'AGOSTINO G., DEL MONACO G., DI FILIPPO L., FALCONI L., LEONI G., MARGOTTINI C., PUGLISI C., ROMANO P. & SPIZZICHINO D. (2005) - *Assessment of landslide susceptibility: application to rapid flows at Cervinara (southern Italy)*. *Geologia Tecnica e Ambientale*, **1**: 25-40.
- BARRA D., CINQUE A., ITALIANO A. & SCORZIELLO R. (1992) - *Il Pleistocene superiore marino di Ischia: paleoecologia e rapporti con l'evoluzione tettonica recente*. *Studi Geol. Camerti*, Vol. Spec. 1992/1: 231-243.
- BRANCACCIO L., CINQUE A., RUSSO F. & SGAMBATI D. (1999) - *Osservazioni geomorfologiche sulle frane del 5-6 maggio 1998 del Pizzo d'Alvano (Monti di Sarno, Campania)*. Estratto da "Studi geografici e geologici in onore di Severino Belloni". Genova: 81-123.
- CALCATERRA D., SANTO A., DE RISO R., BUDETTA P., DI CRESCENZO G., FRANCO I., GALIETTA G., IOVINELLI R., NAPOLITANO P. & PALMA B. (1997) - *Fenomeni franosi connessi all'evento pluviometrico del Gennaio 1997 in Penisola Sorrentina, Monti Lattari: primo contributo*. Atti IX Congresso Nazionale dei geologi, Roma, 17-20 aprile: 223-231.

Mts. may be explained by considering that the higher fall creates mud sprays (due to flow break) and vibrations which may affect (triggering its failure) a section larger than the original flow width. Conversely, the Ischia cases suggest that a short jump makes the flows more sensitive to the local maximum slope as a consequence of both increased fluidity (which causes the motion directions to be more sensitive to the local slope variations), and inertial energy dissipation.

The recognised role of steep/subvertical elements suggests the crucial importance of their detection in the assessment of susceptibility to landsliding. Their occurrence, in fact, may render more susceptible hillslopes with average slope angles lower than a fixed (or hypothesised) threshold. On the other hand, the detection of these elements by aerial photographs or poorly detailed topographic maps may result very difficult, particularly where hillslopes are covered by dense wood. As a consequence, in cases where the presence of such elements may be suspected or inferred (for instance, by the lithostructural setting), we suggest the susceptibility threshold slope angle should be prudentially lowered.

THE GEOMORPHIC CONTROL ON THE INITIATION AND PROPAGATION OF THE MT. DI VEZZI LANDSLIDES (ISCHIA ISLAND, ITALY) OCCURRED ON 30TH APRIL 2006

- CASCINI L., GUIDA D., NOCERA N., ROMANZI G. & SORBINO G. (1998) - *A preliminary model for the landslides of May 1998 in Campania Region*. Proc. II Int. Symp. on "The Geotechnics of Hard Soils-Soft Rocks", Vol. 3: 1623-1649.
- CHIESA S., GILLOT P.Y., PASQUARÈ G. & VEZZOLI L. (1985) - *Collapse and resurgent calderic movements in a volcano-tectonic area: a new interpretation of the geologic history of Ischia island*. IAVCEI Scientific Assembly, Abstract.
- CINQUE A., ROBUSTELLI G. & SCARCIGLIA F. (2000) - *The dramatic cluster of pyroclastic debris flows which occurred on 5th and 6th May 1998 on the Sarno Mountains (Vesuvius region, southern Italy): a geomorphological perspective*. In: E.M. Bromhead, J. Dixon, M.L. Jbsen (2000, Eds.), Proc 8th Int. Symp. on Landslides "Landslides in Research, theory and practice", Cardiff, 26-30 June 2000, Thomas Telford, London, 1: 273-278.
- CINQUE A., AUCELLI P.P.C., ROBUSTELLI G. & SCARCIGLIA F. (2001) - *May, 1998. Just post eventum survey of pyroclastic debris flows in the Sarno Mts. (Southern Italy): results and suggestions for future documentation of similar landslides*. Proc. of the Third International DOMODIS Workshop, Bucharest, 29 September-3 October 1999: 7-18.
- CIVETTA L., GALLO G. & ORSI G. (1991) - *Sr- and Nd- isotope and trace-element constraints on the chemical evolution of the magmatic system of Ischia (Italy) in the last 55 Ka*. J. Volcanol. Geotherm. Res., **46**: 213-244.
- CROZIER M.J., VAUGHAN E.E. & TIPPETT J.M. (1990) - *Relative instability of colluvium-filled bedrock depressions*. Earth Surf. Proc. and Landforms, **15**: 329-339.
- DE RISO R., BUDETTA P., CALCATERRA D., SANTO A., DEL PRETE S., DE LUCA C., DI CRESCENZO G., GUARINO P.M., MELE R., PALMA B. & SGAMBATI D. (2004) - *Fenomeni di instabilità dei Monti Lattari e dell'area Flegrea (Campania): scenari di suscettibilità da frana in aree campione*. Quaderni di Geologia Applicata, **11** (1): 5-30.
- DE VITA P., DI CLEMENTE E., ROLANDI M. & CELICO P. (2007) - *Modelli geologico-tecnici nelle aree di innesco delle frane del 30 aprile 2006 del Monte di Vezzi (Ischia)*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, questo volume.
- DI CRESCENZO G. & SANTO A. (1999) - *Analisi geomorfologica delle frane da scorrimento-colata rapida in depositi piroclastici della Penisola Sorrentina (Campania)*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., **22**: 57-72.
- DI CRESCENZO G. & SANTO A. (2005) - *Debris-slide-rapid earth flows in the carbonate massifs of the Campania region (southern Italy): Morphological and morphometric data for evaluating triggering susceptibility*. Geomorphology, **66**: 255-276.
- DIETRICH W.E. & DORN R. (1984) - *Significance of thick deposits of colluvium on hillslopes: a case study involving the use of pollen analysis in the coastal mountains of Northern California*. J. Geol., **92**: 147-158.
- DIETRICH W.E. & DUNNE T. (1978) - *Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain*. Zeit. Geomorph., Suppl. Bd. **29**: 191-206.
- DIETRICH W.E., WILSON C.J.M. & RENEAU S.L. (1986) - *Hollows, colluvium, and landslides in soil-mantled landscapes*. In: Abrhams, A.D. (1986, Ed.), Hillslope Processes. Allen and Unwin, London: 361-388.
- DI MAIO R., PIEGARI E., SCOTELLARO C. & SOLDOVIERI M.G. (2007) - *Resistivity tomographies to define thickness and water content of pyroclastic covers at Mt. di Vezzi (Ischia island, Italy)*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, questo volume.
- DI NOCERA S., MATANO F., ROLANDI G. & ROLANDI M. (2007) - *Contributo sugli aspetti geologici e vulcanologici di M.te Vezzi (Ischia)*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, questo volume.
- DUNNE T. (1980) - *Formation and controls of channel networks: Progress in Physical Geography*, **4**: 211-239.
- FERNANDES N.F., COELHO NETTO A.L. & LACERDA W.A. (1994) - *Subsurface hydrology of layered colluvium mantles in unchannelled valleys-southeastern Brazil*. Earth Surf. Proc. and Landforms, **19**: 609-626.
- FAO (1976) - *A Framework for land Evaluation. Soil Bulletin n°32* - F.A.O. Food and Agricultural Organization of the United Nations - Rome 1976.
- GUADAGNO F.M. & PERRIELLO ZAMPELLI S. (2000) - *Triggering mechanism of the landslides that invested Sarno, Quidnici, Siano and Bracigliano (southern Italy) on May 5-6, 1998*. In: E.M. Bromhead, J. Dixon, M.L. Jbsen (2000, Eds.), Proc. 8th Int. Symp. On Landslides, "Landslides in Research, theory and practice", Cardiff, 26-30 June 2000, Thomas Telford, London, Vol. 2: 671-676.
- GUIDA D. (2003) - *The role of the zero-order basins in flowslide-debris flow occurrence and recurrence in Campania (Italy)*. Int. Conference on Fast Slope Movements Prediction and Prevention for Risk Mitigation, Napoli, 11-13 May 2003, **I**: 255-262.
- HACK J.T. & GOODLETT J.C. (1969) - *Geomorphology and forest ecology of a mountain region in the central Appalachians*. U.S.G.S. Professional Paper, 347.
- IOVINO M. & PERRIELLO ZAMPELLI S. (2007) - *Le frane del 30 aprile 2006 del M. Vezzi (Ischia, NA) nel contesto delle frane di scivolamento-colata nei suoli vulcanici in Campania*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, questo volume.
- KIRKBY M.J. & CHORLEY R.J. (1967) - *Throughflow, overland flow, and erosion*. Int. Association of Sci. Hydrology Bull., **12**: 5-21.
- LANCASTER S.T., HAYES S.K. & GRANT G.E. (2003) - *Effects of wood on debris flow runoff in small mountain watersheds*. Water Resources Research, **39**(6): 1168-1181, doi: 10.1029/2001WR001227, 2003.
- MAZZARELLA A. & DE LUISE E. (2007) - *L'evento meteorico del 30 Aprile 2006 a Ischia*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, questo volume.
- MELE R. & DEL PRETE S. (1999) - *Lo studio della franosità storica come utile strumento per la valutazione della pericolosità da frana. Un esempio nell'area di Gragnano (Campania)*. Boll. Soc. Geol. It., **118**: 91-111.
- LAZZARI A. (1954) - *Aspetti geologici dei fenomeni verificatisi nel salernitano in conseguenza del nubifragio del 25-26 ottobre 1954*. Boll. Soc. Natur. Napoli, **63**,

131-142.

- ORSI G., GALLO G. & ZANCHI A. (1991) - *Simple-shearing block resurgence in caldera depressions. A model from Pantelleria and Ischia*. J. Volcanol. Geotherm. Res., **47**: 1-11.
- PIERSON T. C. (1986) - *Flow behavior of channelized debris flows, Mount St. Helens, Washington*, in A. D. Abrahams (Ed.) Hillslope Processes, 269-296, Allen and Unwin, Winchester, Mass.
- RENEAU S.L. & DIETRICH W.E. (1987) - *The importance of hollows in debris flow studies: examples from Marin County, California*. In: J.E.COSTA & G.F.WIECOREK (Ed) - Debris flows/Avalanches: Process, Recognition, and Mitigation. Geol. Soc. of Am. Reviews in Engineering Geol., 165-180.
- RENEAU S.L. & DIETRICH W.E. (1990) - *Depositional history of hollows on steep hillslopes, coastal Oregon and Washington*. Natl. Geogr. Res., **6**: 220-230.
- RENEAU S.L. & DIETRICH W.E. (1991) - *Erosion rates in the southern Oregon Coast Range: evidence for an equilibrium between hillslope erosion and sediment yield*. Earth Surf. Proc. and Landforms, **16**: 307-322.
- RENEAU S.L., DIETRICH W.E., DORN R.I. & RUBIN M. (1986) - *Geomorphic and paleoclimatic implications of latest Pleistocene radiocarbon dates from colluvium-mantled hollows, California*. Geology, **14**: 655-658.
- RENEAU S.L., DIETRICH W.E., RUBIN M., DONAHUE D.J. & JULL A.J. (1989) - *Analysis of hillslope erosion rates using dated colluvial deposits*. J. Geol., **97**: 45-63.
- VEZZOLI L. (Ed) (1988) - *Island of Ischia*. C.N.R. Quaderni de la "Ricerca Scientifica", P.F.G., 10, 51-72.
- YAMADA S. (1995) - *Relations between topographic conditions and debris movement deduced from distribution of regolith in a zero order basin near Sapporo, Hokkaido, Japan*. Trans. Jpn. Geomorph. Union, **16**: 349-360.
- YAMADA S. (1999) - *The role of soil creep and slope failure in the landscape evolution of a head water basin: field measurements in a zero order basin of northern Japan*. Geomorphology, **28**: 329-344.
- YOSHINAGA S. & KOIWA N. (1996) - *Slope development in forested mountains in Japan since the Latest Pleistocene to Early Holocene*. Trans. Jpn. Geomorph. Union, **17**: 285-307.

Received October 2006 - Accepted February 2007