

## DISTRIBUZIONE, CARATTERI IDROGEOLOGICI E SUSCETTIBILITÀ A FRANARE DELLE COLTRI PIROCLASTICHE SUI VERSANTI CARBONATICI PERI-VEVUVIANI (ITALIA)

### DISTRIBUTION, HYDROGEOLOGICAL FEATURES AND LANDSLIDE HAZARD OF PYROCLASTIC SOILS ON CARBONATE SLOPES IN THE AREA SURROUNDING MOUNT SOMMA-VEVUVIUS (ITALY)

PANTALEONE DE VITA(\*), PIETRO CELICO(\*), MICHELE SINISCALCHI(\*\*) & ROBERTO PANZA(\*\*\*)

(\*) University of Naples "Federico II" - Dipartimento di Scienze della Terra / Department of Earth Sciences

(\*\*) Collaboratore esterno / External collaborator

(\*\*\*) Dottorato di Scienze della Terra / Doctorate in Earth Sciences

#### RIASSUNTO

I fenomeni di debris slides - debris flows rappresentano notoriamente uno dei processi denudazionali maggiormente rilevanti nell'ambito dei massicci carbonatici che circondano la Piana Campana (Italia), mantellati da depositi piroclastici, ed una delle principali fonti di rischio per gli abitati localizzati al piede dei versanti. I depositi piroclastici, principalmente derivati dall'attività esplosiva del Somma-Vesuvio sono distribuiti nell'area peri-vesuviana in maniera disomogenea in accordo agli assi di dispersione di ciascuna eruzione, raggiungendo uno spessore teorico totale variabile da 4 a 7 m sui Monti di Sarno e attorno a 2 m sui Monti Lattari. Dopo la deposizione sui versanti carbonatici, i depositi piroclastici sono stati soggetti a fenomeni denudazionali, perlopiù rappresentati da movimenti di massa, generalmente controllati dall'angolo di pendio e dall'occorrenza di piogge prolungate e/o intense; ciò si riflette attualmente nella presenza lungo i versanti di serie vulcanoclastiche incomplete. In questo lavoro sono discussi i dati stratigrafici e di caratterizzazione geologico-tecnica derivati da una serie di trincee esplorative realizzate in due aree campione dei Monti di Sarno e Lattari, entrambe rappresentative delle condizioni morfologiche tipiche dell'innescò dei debris slides. Uno dei principali risultati emersi è una relazione tra l'angolo di pendio e l'assetto stratigrafico, che appare approssimativamente completo solo per condizioni morfologiche caratterizzate da valori generalmente inferiori a 30°, ed incompleto per valori superiori. L'assetto stratigrafico complesso delle coltri piroclastiche, caratterizzato dall'alternanza di depositi piroclastici poco alterati con prodotti piroclastici alterati per pedogenesi costituisce un sistema idrogeologico superficiale a più strati caratterizzati da forte contrasto di permeabilità, così come è stato possibile evincere dalle analisi granulometriche e dalla stima della conducibilità idraulica mediante formule empiriche. Questa caratteristica fisica, combinata alla variabile distribuzione delle successioni vulcanoclastiche lungo i versanti, ha consentito di identificare un modello geologico-tecnico nel quale gli orizzonti di lapilli pomiceo, ad alta trasmissività, subiscono una progressiva riduzione di spessore all'aumentare dell'angolo di pendio, comportando una terminazione laterale degli stessi per un valore dell'angolo di pendio generalmente superiore a 35°. Il modello concettuale proposto rappresenta un miglioramento dei modelli di stabilità del pendio ipo-

#### ABSTRACT

The debris slides - debris flows represent both one of the most significant denudational processes in the pyroclastic soil-mantled carbonate massifs that surround the Campanian Plain (Italy), and the main risk source for the towns located at the foot of their slopes, as is well known. The ash-fall deposits, mainly derived from the explosive activity of Mount Somma-Vesuvius, were varyingly distributed among the carbonate mountain ranges that surround the Plain, according to the dispersion axes of each eruption, reaching total thickness values ranging from 4 to 7 metres onto the Sarno Mountains and values ranging around 2 metres onto the Lattari Mountains. After deposition on slopes, the pyroclastic deposits underwent denudational processes, mostly by means of mass movements, generally regulated by slope angle and by prolonged and/or heavy rainfall occurrence, which accounts for the volcanoclastic series along the slopes often being incomplete. In this work, a field survey based on test pits and laboratory tests has been carried out on two sample areas in the Sarno and Lattari Mountains, both representatives of debris slides source areas. One of the principal results put in evidence is a relationship between slope angle ranges and the stratigraphic schemes of ash-fall, which only shows more complete stratigraphic records in slope angles range generally up to about 30°, and incomplete stratigraphic records for the higher slope angle range. The complex stratigraphy consisting of ash-fall deposits alternated with the pedogenetic products developed during the intervals between consecutive eruptions (TERRIBILE *et alii*, 2000), results in a multilayered and very contrasting permeability surficial hydrogeological system, as it resulted from grain size analyses and estimation of hydraulic conductivity by means of empirical formulas. This physical feature, along with the varying distribution of pyroclastic series along the slopes of the source areas, caused by the diverse morphologic conditions, leads to an engineering geological model in which high hydraulic transmissivity horizons consisting of pumiceous lapilli, confined by less permeable deposits, undergo a reduction in thickness as slope angle increases, until they assume a lenticular shape with closure approximately above 35° of the slope angle value. This conceptual model seems to be validated by the more frequent slope angle value of debris slide depletion areas and by the more frequent value of the friction angle, as known in literature

tizzati in precedenza, fornendo una diversa comprensione della suscettibilità a franare che appare essere imputabile ad un deflusso subsuperficiale occasionale nell'ambito della coltre piroclastica, i cui effetti destabilizzanti sono amplificati in quelle aree dove la convergenza morfologica, la riduzione dello spessore degli orizzonti di lapilli pomicei o l'interruzione della coltre piroclastica, naturale o artificiale, coesistono.

**TERMINI CHIAVE:** *massicci carbonatici, coperture piroclastiche, idrologia del pendio, debris slides - debris flows, suscettibilità a franare*

## PREMESSA

L'instabilità delle coltri di origine piroclastica che ammantano i versanti carbonatici dell'area peri-vesuviana (Napoli, Italia), ascrivibili ai Monti di Avella, Sarno e Lattari, rappresenta una delle problematiche di gestione del territorio maggiormente studiate negli ultimi anni dalla comunità scientifica, soprattutto dopo gli eventi tragici del 5 e 6 maggio 1998 che provocarono la perdita di 152 vite umane, sebbene tali fenomeni siano noti sin agli inizi del secolo scorso (DE RISO & NOTA D'ELIO, 1973) e per essi sia stimabile un periodo medio di ricorrenza pari a circa 3 anni. Gli studi sono stati principalmente rivolti al riconoscimento dei fattori predisponenti e scatenanti l'insacco di queste frane, il cui accadimento, sempre in diretta relazione di causa-effetto con le piogge, appare erratico, poiché generalmente non ripetibile nello stesso luogo, fortemente distruttivo e scatenato da instabilità di masse anche di dimensioni molto modeste, secondo una distribuzione in ampliamento ed avanzamento verso valle, uno stile complesso, una tipologia definibile debris slide - debris flow, ed una velocità estremamente rapida (CRUDEN & VARNES, 1996; WP/WLI, 1993b). La fase evolutiva intermedia, in cui il volume della massa coinvolta aumenta rapidamente, mediante l'ampliamento verso valle della superficie di rottura, può essere definita debris avalanche (FIORILLO *et alii*, 2001; HUNGR *et alii*, 2001), durante la quale è possibile supporre l'esistenza di fenomeni di liquefazione delle coperture piroclastiche, parzialmente sature, provocata dalla sollecitazione dinamica esercitata dal materiale franato proveniente dall'alto che, in rari casi, può essere costituito anche da blocchi calcarei. Numerosi sono stati i lavori scientifici rivolti all'approfondimento dei molteplici aspetti sotto i quali questi fenomeni franosi possono essere studiati: meccanismi di innesco e di propagazione del fenomeno franoso (CELICO *et alii*, 1986; CELICO & GUADAGNO, 1998; DEL PRETE *et alii*, 1998; DE RISO *et alii*, 1999), proprietà mineralogiche (DE GENNARO *et alii*, 2000) e geotecniche dei terreni piroclastici (CASCINI, 2004; ESPOSITO & GUADAGNO, 1998; GUADAGNO & MAGALDI, 2000), condizioni idrologiche scatenanti l'insacco (CHIRICO *et alii*, 2000; DE VITA, 2000; FIORILLO *et alii*, 2001; GUADAGNO, 1991), caratteri pedologici delle coltri piroclastiche (TERRIBILE *et alii*, 2000), fattori morfologici naturali ed antropici predisponenti all'insacco (BRANCACCIO *et alii*, 2000; CASCINI *et alii*, 2000; CELICO & GUADAGNO, 1998; DI CRESCENZO & SANTO, 1999), modelli idrogeologici del deflusso

from these landslides. The model represents an improvement on the previously hypothesized slope stability models, giving a different comprehension of landslide susceptibility assessment due to occasional saturated throughflow within the pyroclastic cover, whose instability effects seem to be amplified in those areas where flow convergence and thickness reduction of lapilli horizons, as well as natural or artificial interruption of the soil mantle, coexist.

**KEY WORDS:** *carbonate mountains, pyroclastic soil mantle, hillslope hydrology, debris slide - debris flow, landslide susceptibility*

## PREFACE

Landslides in the pyroclastic soils mantling the slopes of the carbonate mountains that surround Mount Somma-Vesuvius (Naples, Italy), namely Avella, Sarno and Lattari Mountains, represent one of the most studied problem by the scientific community in the last years, particularly after the tragic events of 5<sup>th</sup> and 6<sup>th</sup> May 1998 that caused the loss of 152 human lives, even if this kind of landslide was known since the beginning of the last century (DE RISO & NOTA D'ELIO, 1973) and it is possible to estimate a mean recurrence period of about 3 years. Studies have been chiefly oriented to the comprehension of the factors that control susceptibility and triggering mechanisms of this kind of landslides, whose occurrence, always linked by a cause-effect relationship with rainfalls, appears to be erratic because not repeatable in the same location, highly destructive and initiating with small volumes of soil mass, evolving with a widening and advancing distribution, a complex style, a type classifiable as debris slide - debris flow and an extremely rapid velocity (CRUDEN & VARNES, 1996; WP/WLI, 1993b). The intermediate phase, characterised by the rapid increase in volume, by means of widening of the rupture surface, can be defined debris avalanche (FIORILLO *et alii*, 2001; HUNGR *et alii*, 2001), during which it is possible to assume the existence of liquefaction phenomena of partially saturated pyroclastic soils, caused by the dynamic loading provoked by the landslide mass coming from the upper part. Such landslides in some cases have been caused by falling of carbonate rock blocks onto the pyroclastic soils. Several scientific researches oriented to the understanding of different aspects in which this kind of landslides can be studied have been carried out: triggering mechanisms and landslide evolution (CELICO *et alii*, 1986; CELICO & GUADAGNO, 1998; DEL PRETE *et alii*, 1998; DE RISO *et alii*, 1999), mineralogical (DE GENNARO *et alii*, 2000) and geotechnical (CASCINI, 2004; ESPOSITO & GUADAGNO, 1998; GUADAGNO & MAGALDI, 2000) properties, triggering hydrological conditions (CHIRICO *et alii*, 2000; DE VITA, 2000; FIORILLO *et alii*, 2001; GUADAGNO, 1991), pedological features of pyroclastic overburden (TERRIBILE *et alii*, 2000), natural and artificial morphological factors predisposing to instability (BRANCACCIO *et alii*, 2000; CASCINI *et alii*, 2000; CELICO & GUADAGNO, 1998; DI CRESCENZO & SANTO, 1999), surficial hydro-

subsuperficiale (CELICO *et alii*, 1986; DE VITA & PISCOPO, 2002), modelli di stabilità delle coltri piroclastiche (CASCINI, 2004; CROSTA & DAL NEGRO, 2003; GUADAGNO *et alii*, 2000), ruolo sulla stabilità delle condizioni di parziale saturazione (SCOTTO DI SANTOLO, 2000) e modelli di propagazione dei flussi piroclastici (BUDETTA & DE RISO, 2004; REVELLINO *et alii*, 2004).

Tra i principali risultati emersi, che costituiscono un avanzamento delle conoscenze rispetto a quelle note prima del 1998, sono da annoverare la caratterizzazione stratigrafica e pedologica della coltre piroclastica, il ruolo predisponente al dissesto dei tagli artificiali nella coltre piroclastica operati diffusamente lungo i versanti peri-vesuviani per la costruzione di strade di montagna, l'esistenza di soglie idrologiche empiriche alle quali può essere indicativamente correlato l'insacco delle frane ed il ruolo delle condizioni pluviometriche antecedenti. Nonostante questi risultati, la localizzazione puntuale delle frane lungo i tagli stradali e l'accadimento delle stesse anche in differenti condizioni morfologiche naturali lasciano ancora adito ad ulteriori approfondimenti ed affinamenti riguardanti le condizioni che controllano la suscettibilità a franare delle coltri piroclastiche.

Lo schema teorico dell'equilibrio limite della coltre piroclastica sul pendio, che, nella fase iniziale di debris slide può essere approssimativamente considerato indefinito per l'elevato rapporto tra la lunghezza della superficie di scorrimento e la profondità della stessa, consente di supporre che i fattori che controllano la stabilità siano essenzialmente riconducibili allo spessore della coltre ed all'angolo di pendio, oltre che alla resistenza al taglio dei terreni. Tuttavia, per l'eterogeneità della coltre piroclastica, anche l'assetto stratigrafico, contraddistinto dalla sovrapposizione di terreni con proprietà granulometriche e idrauliche contrastanti, rappresenta un ulteriore fattore che può condizionare, anche in maniera molto localizzata, la suscettibilità a franare. In accordo a questi presupposti, nel presente lavoro è stata approfondita la problematica della distribuzione dei prodotti piroclastici lungo i versanti, in aree rappresentative delle condizioni morfologiche tipiche dell'insacco dei debris slides, ritenendo, questo, un fattore chiave per interpretare il complesso problema della suscettibilità a franare. In particolare, questo lavoro è stato finalizzato alla verifica ed all'approfondimento dei risultati precedentemente ottenuti mediante l'applicazione di metodi geofisici per la stima della distribuzione delle coperture piroclastiche sui versanti carbonatici (DE VITA *et alii*, 2005). Le fasi di ricerca sono state basate sul reperimento ed analisi di dati derivati da una serie di trincee realizzate in due aree campione, rispettivamente localizzate nei Monti di Sarno e nei Monti Lattari, mediante le quali è stato ricostruito l'assetto stratigrafico ed è stata effettuata la caratterizzazione geologico-tecnica delle coltri piroclastiche. L'insieme dei dati raccolti ha consentito di ipotizzare un modello concettuale di distribuzione delle coltri piroclastiche lungo i versanti che, sebbene preliminare e di applicazione generale, potrà costituire un riferimento per ulteriori approfondimenti rivolti all'analisi della suscettibilità a franare.

geological models (CELICO *et alii*, 1986; DE VITA & PISCOPO, 2002), stability modelling of pyroclastic mantle (CASCINI, 2004; CROSTA & DAL NEGRO, 2003; GUADAGNO *et alii*, 2000), role on stability of unsaturated conditions (SCOTTO DI SANTOLO, 2000) and debris flow runout analysis and modelling (BUDETTA & DE RISO, 2004; REVELLINO *et alii*, 2004).

Among the most important results, which represent a great advance in the comprehension, respect to the ones known before 1998, can be mentioned the stratigraphic and pedologic characterisation of pyroclastic mantle, the predisposing role to instability of the artificial road-cuts broadly diffused along carbonate peri-vesuvian mountains, the existence of empirical hydrological thresholds to which the landslide occurrence can be indicatively correlated and the role of the antecedent hydrological conditions. Despite these important results, the specific location of landslides along the road-cuts and their occurrence in different natural morphologic conditions motivate further deepening of research on the factors which control landslide susceptibility.

The theoretical scheme of the slope limit equilibrium, which can be approximately assumed indefinite for the pyroclastic mantle in the initial phase of debris slide, owing to the high ratio value between length and depth of the shearing surface, allows to hypothesise that the basic factors leading to instability are the pyroclastic soil thickness and the slope angle, besides of soil shear strength. Nevertheless, the heterogeneity of the pyroclastic mantle, characterised by the overlapping of soils with very different grain sizes and hydraulic properties, represent an additional factors that can control, even very locally, landslide susceptibility. Consistently with the previous presuppositions, the distribution of pyroclastic soil along carbonate slope has been examined in this paper by means of the results obtained in sample areas, representative of the typical morphological conditions in which debris slides initiate. Specifically, the research has been finalised to validate and to deepen results previously obtained by mean of the application of geophysical surveys on the distribution of pyroclastic mantle along carbonate slopes (DE VITA *et alii*, 2005).

The research has been based on the surveying and the analysis of data derived from test pits carried out in two sample areas, respectively located in the Sarno Mountains and in the Lattari Mountains, whose stratigraphy and basic soil index properties have been detected. The collected data permitted to hypothesise a conceptual distribution model of pyroclastic soils along the slope which, even if preliminary and generally oriented, could constitute a reference for further researches on landslide susceptibility.

## GEOLOGIA DI SUPERFICIE DEI VERSANTI CARBONATICI PERI-VESUVIANI

I rilievi montuosi, ascrivibili ai gruppi montuosi dei Monti di Avella, Sarno e Lattari sono costituiti dai terreni della serie carbonatica mesozoica dell'Unità dei Monti Picentini-Taburno, litologicamente variabili dalle dolomie ai calcari, il cui attuale assetto morfologico, generalmente caratterizzato dall'evoluzione di versanti di faglia, è il risultato delle fasi tettoniche e climatiche quaternarie (Figura 1). Lo sviluppo del fenomeno carsico, in abbinamento ai fattori strutturali, ha favorito in alcuni casi, soprattutto nei Monti di Sarno, una morfologia sommitale subpianeggiante ed a carattere endoreico. Sui versanti carbonatici peri-vesuviani sono presenti, solo parzialmente ed in maniera fortemente discontinua, anche a piccola scala, i termini più recenti della successione vulcanoclastica prodotta dalle eruzioni del Somma-Vesuvio. Tale successione vulcanoclastica, si ritrova, invece, in maniera più completa e continua nell'ambito della Piana Campana, sebbene con variabilità laterali a grande scala indotte dalla differente distanza dal centro eruttivo, dal diverso orientamento degli assi di dispersione di ciascuna eruzione e dall'azione erosiva e deposizionale esercitata dalla rete idrografica.

Uno schema stratigrafico di riferimento della sequenza piroclastica è stato individuato nell'area pedemontana occidentale dei Monti di Sarno (ROLANDI *et alii*, 2000). I prodotti piroclastici più antichi sono stati ascritti al Complesso Piroclastico Antico (CPA), costituito principalmente dai depositi da flusso dell'Ignimbrite campana, datata a circa 39.000 anni dal presente e dagli altri prodotti delle eruzioni dei Campi Flegrei e dell'Isola di Ischia. I prodotti piroclastici più recenti sono stati invece ascritti al Complesso Piroclastico Recente (CPR) che comprende i depositi delle eruzioni del Monte Somma, tra cui, quelle maggiormente rilevanti sono l'eruzione di Codola, datata 25.000 anni dal presente (ROLANDI *et alii*, 2000), Sarno, datata 17.000 anni dal presente (ROLANDI *et alii*, 2000), di Ottaviano datata 8.000 anni dal presente (ROLANDI *et alii*, 1993a) e di Avellino datata 3.760 anni dal presente (ROLANDI *et alii*, 1993b). Fanno parte del Complesso Piroclastico Recente anche i prodotti delle eruzioni storiche del Vesuvio: del 79 d.C. (LIRER *et alii*, 1973), del 472 d.C. (ROLANDI *et alii*, 1998) e del 1631 d.C. (ROSI *et alii*, 1993), nonché le successive, di minore rilevanza per il volume eruttato, di cui l'ultima avvenuta nel 1944. Le eruzioni del Somma-Vesuvio che costituiscono il Complesso Piroclastico Recente hanno avuto assi di dispersione generalmente orientati verso est, coinvolgendo nella ricaduta dei prodotti emessi principalmente i Monti di Sarno; solo l'eruzione del 79 d.C. ha avuto asse di dispersione orientato verso sud, coinvolgendo quindi maggiormente i Monti Lattari.

Al fine di stimare la distribuzione del Complesso Piroclastico Recente nell'area peri-vesuviana è stata realizzata una carta delle isopache totali relativa alle principali eruzioni del Somma-Vesuvio, in precedenza elencate, ottenuta mediante somma algebrica di mappe numeriche di spessore, elaborate, per ciascuna eruzione, mediante l'algoritmo del Kriging, a partire dai dati noti in letteratura (Figura 1).

## SURFICIAL GEOLOGY OF CARBONATE SLOPES SURROUNDING MOUNT SOMMA-VESUVIUS

The relieves belonging to the Avella, Sarno and Lattari mountain ranges are constituted by the Mesozoic carbonate series of Mounts Picentini-Taburno Unit, whose lithology mainly varies from limestones to dolostones. The morphologic characteristic of these mountains can be generally related to the evolution of fault-line scarps resulting from tectonic and climatic phases that occurred during the Quaternary (Figure 1). The development of the karstic phenomenon combined with structural factors favoured in some cases, especially in Sarno Mountains, a flat and endorheic top morphology. The younger terms of the pyroclastic succession produced by Mount Somma-Vesuvius are present on carbonate slopes, even if partially and very discontinuously and on a small scale. Instead the same volcanic succession can be found more complete and laterally continuous in the Campanian Plain, even if with large scale lateral variations due to different distance from the eruptive centre and to the different orientation of the dispersion axes of each eruption as well as by the erosional and depositional action of hydrographic network.

A stratigraphic scheme of pyroclastic series, which can be considered as a reference, has been identified at the western foot of the Sarno Mountains (ROLANDI *et alii*, 2000). The older pyroclastic deposits have been grouped in the Ancient Pyroclastic Complex (APC), mainly constituted of ash-flow deposits of Campanian ignimbrite, dated about 39 ka B.P., and of the products of other important eruptions of Phlegrean Fields and Ischia Island. Instead, the younger volcanic deposits have been grouped in the Recent Pyroclastic Complex (RPC) that includes the deposits of the Monte Somma eruptions: Codola eruption 25 ka B.P. (ROLANDI *et alii*, 2000), Sarno eruption 17 ka B.P. (ROLANDI *et alii*, 2000), Ottaviano eruption 8 ka B.P. (ROLANDI *et alii*, 1993a) and Avellino eruption 3.760 y B.P. (ROLANDI *et alii*, 1993b). The deposits of historical and modern eruptions of the Vesuvius also belong to the RPC, the most important being: A.D. 79 (LIRER *et alii*, 1973), A.D. 472 (ROLANDI *et alii*, 1998) and A.D. 1631 (ROSI *et alii*, 1993) as well as successive eruptions, less relevant according to the minor erupted volume, the latter of which occurred in 1944.

The Somma-Vesuvius eruptions that constitute the Recent Pyroclastic Complex (RPC) had dispersion axes generally oriented eastward, mainly involving the Sarno Mountains with their ash-fall deposits; only the A.D. 79 eruption had southward oriented dispersion axes, involving mainly the Lattari Mountains.

In order to evaluate the distribution of the RPC in the area surrounding the Mount Somma-Vesuvius, a total isopach map has been calculated from the isopach map known in literature for the previously listed eruptions. The calculation has been carried out by means of the algebraic sum of the numeric maps obtained by Kriging interpolation of each eruption isopach map (Figure 1).

DISTRIBUTION, HYDROGEOLOGICAL FEATURES AND LANDSLIDE HAZARD OF PYROCLASTIC SOILS ON CARBONATE SLOPES IN THE AREA SURROUNDING MOUNT SOMMA-VESUVIUS

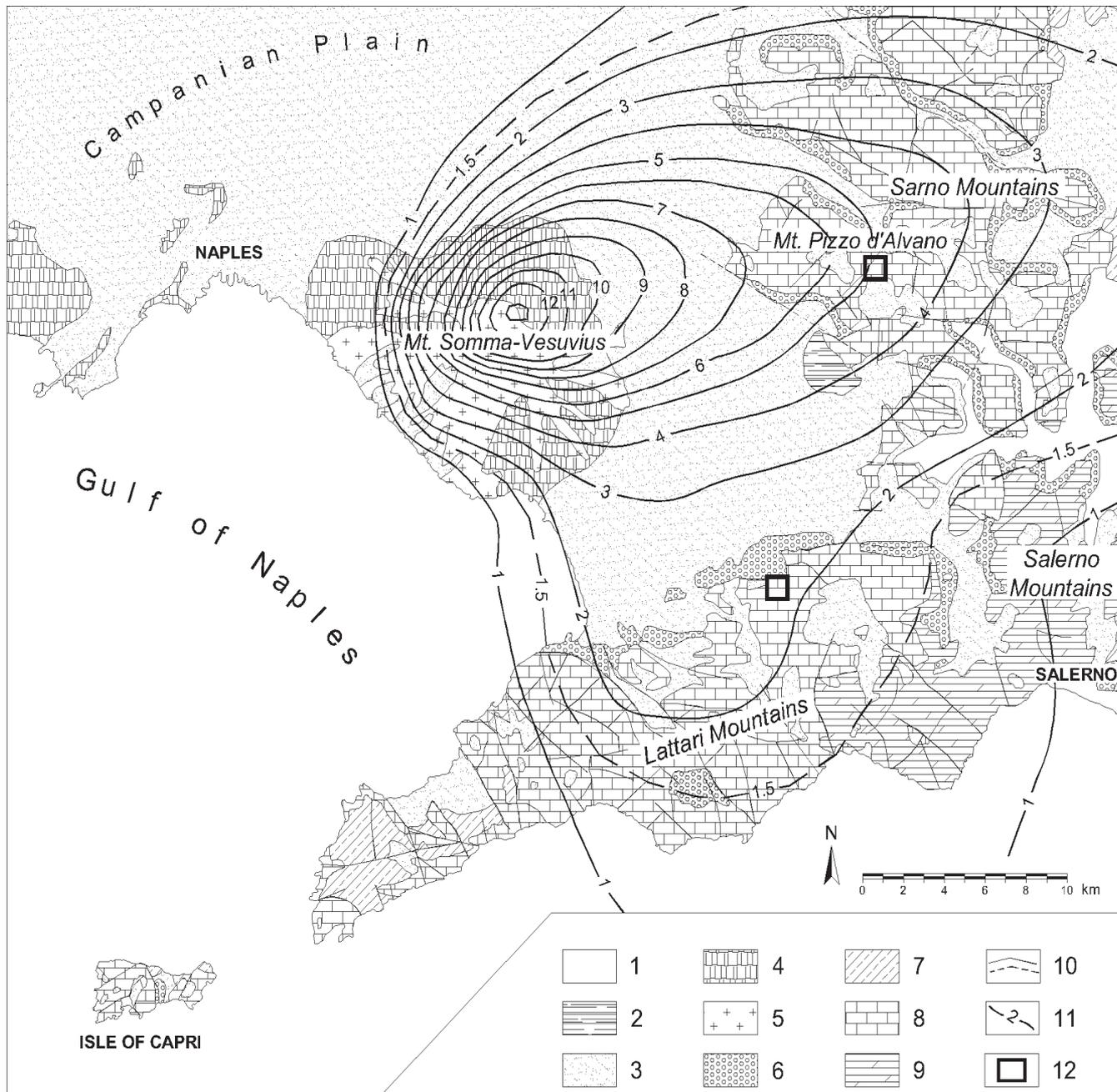


Fig. 1 - Schema geologico dell'area circostante il Somma-Vesuvio: 1) depositi alluvionali; 2) travertini; 3) depositi piroclastici da caduta incoerenti; 4) depositi piroclastici da flusso; 5) lave; 6) depositi detritici di versante; 7) flysch miocenici; 8) calcari del Giurassico medio - Cretaceo superiore; 9) dolomie e calcari del Triassico inferiore - Giurassico medio; 10) faglie e faglie sepolte o presunte; 11) isopache totali riferite alla sommatoria degli spessori delle principali eruzioni del Somma-Vesuvio (CPR: "Codola" ==> 25.000 anni dal presente; "Sarno" ==> 17.000 anni dal presente; "Ottaviano" ==> 8.000 anni dal presente; "Avellino" ==> 3.760 anni dal presente; 79 d.C.; 472 d.C.; 1631 d.C.); 12) aree campione

- Geologic map of the area surrounding the Mount Somma-Vesuvius: 1) alluvial deposits; 2) travertine; 3) incoherent ash-fall deposits; 4) mainly coherent ash-flow deposits; 5) lavas; 6) detritus and slope talus deposits; 7) Miocene flysch; 8) Middle Jurassic-Upper Cretaceous limestone; 9) Lower Triassic-Middle Jurassic dolomites and calcareous limestone; 10) outcropping and buried faults; 11) total isopachous lines (metres) of the most important of Mount Somma-Vesuvius eruptions (RPC: "Codola" ==> 25 ka B.P.; "Sarno" ==> 17 ka B.P.; "Ottaviano" ==> 8 ka B.P.; "Avellino" ==> 3.8 ka B.P.; A.D. 79; A.D. 472; A.D. 1631); 12) sample areas

Da tale carta è possibile evidenziare che il Complesso Piroclastico Recente ha raggiunto sui Monti di Sarno uno spessore massimo teorico compreso tra 4 e 7 m, mentre sui Monti Lattari esso ha raggiunto uno spessore variabile attorno a 2 m, sebbene sul settore settentrionale del gruppo montuoso si sia depositato uno spessore compreso tra 2 e 3 m. Per il meccanismo di deposizione da caduta (fall), lo spessore indicato dalle isopache totali può essere assimilato ad un flusso verticale che, se distribuito su un pendio inclinato, genera uno spessore reale (misurato ortogonalmente al piano del pendio) che è funzione della stessa inclinazione fino ad arrivare al caso limite del versante verticale sul quale un deposito da caduta non genera alcuna deposizione:

$$S = St \cos \alpha$$

dove S = spessore reale; St = spessore massimo teorico;  $\alpha$  = angolo di pendio.

Per la stessa modalità deposizionale, i depositi piroclastici tendono a mantellare i versanti generando una stratificazione parallela al pendio (FISHER, 1985).

Gli spessori indicati dalle isopache totali possono essere considerati come approssimativamente indicativi di quelli massimi teorici, poiché riscontrabili solo negli ambiti morfologici dei rilievi carbonatici a carattere conservativo, ovvero in quelle aree dove, per le particolari condizioni morfologiche, i processi denudazionali o di accumulo possono essere considerati trascurabili e quindi lo spessore della sequenza vulcanoclastica non ha approssimativamente subito variazioni per erosione o per accumulo gravitativo di materiale proveniente dalle parti più alte del rilievo. Zone di questo tipo sono generalmente rappresentate da settori di versante a debole pendenza, a profilo trasversale blandamente convesso o rettilineo, distanti da possibili zone di provenienza di movimenti di massa o da fonti di materiale colluviale, in assenza di reticolo idrografico drenante e con copertura boschiva.

Nei restanti ambiti morfologici dei rilievi carbonatici, dove i processi denudazionali hanno agito con maggiore intensità, lo spessore della coltre è inferiore a quello massimo teorico, pertanto le ricostruzioni stratigrafiche delle sequenze vulcanoclastiche e le correlazioni con le successioni riconosciute alla base dei versanti sono generalmente difficili, soprattutto per la forte lacunosità con cui esse sono rappresentate, in relazione all'elevata dinamica denudazionale, relazionabile all'elevato angolo di pendio che caratterizza i versanti carbonatici peri-vesuviani.

Verosimilmente le coltri piroclastiche, a partire da una condizione iniziale di forte instabilità, immediatamente successiva alla deposizione per caduta, che è ben testimoniata dalla presenza alla base del pendio di depositi di debris flow, spesso sincroni a quelli vulcanici stessi, hanno verosimilmente acquisito nel tempo una configurazione sempre più stabile, tanto che essi raggiungono attualmente condizioni critiche per la stabilità solo per fenomeni idrologici rari e/o per alterazioni del sistema naturale ad opera dell'uomo.

## METODI DI INDAGINE NELLE AREE CAMPIONE E RISULTATI

Le aree campione oggetto di questo studio sono state individuate

From the total isopach map it is possible to appreciate that the RPC reaches a maximum theoretical thickness ranging from 4 to 7 m on the Sarno Mountains, while on the Lattari Mountains it reaches a value of about 2 m, even if the value ranges between 2 to 3 m in the northern sector. In accordance with the fall deposition mechanism, the total isopach thickness can be considered as a vertical flux that, if distributed on a slope, generates a real thickness (measured perpendicularly to the slope plane) that depends the slope angle up to the limit case of the vertical plane with no horizontal projection, namely with no ash-fall deposition:

$$S = St \cos \alpha$$

with S = real thickness; St = maximum theoretical thickness;  $\alpha$  = slope angle.

According to fall deposition, pyroclastic deposits tend to mantle the slopes generating bedding parallel to the slope (FISHER, 1985).

Along the slopes, the total thickness values can be approximately considered as the theoretically maximum values, because detectable only in the morphologic preserving conditions, specifically in those areas where, owing to morphology, denudational and deposition processes can be considered negligible and therefore the pyroclastic series thickness has not undergone variations by erosion or by accumulation due to soil mass wasting coming from the upper parts. These areas can be generally identified in slope sectors with lower slope angle, with transversal convex or rectilinear profiles, far from landslide or colluvial source areas, with no drainage network and with wood cover.

In the areas with different morphologic conditions, the thickness of pyroclastic mantle is less than the theoretical maximum value, whereas the denudational phenomena proceeded with greater intensity. Consequently the stratigraphic reconstructions and correlations with series identified at the slope foot are generally difficult to achieve, above all for the relevant stratigraphic gaps caused by erosion processes generally attributable to the high slope angle that is characteristics of the peri-vesuvian carbonate slopes.

In all probability, the pyroclastic overburdens, since the initial highly unstable condition immediately after the deposition that is testified by the debris flow deposits at the slope foot synchronous and intercalated to the volcanic ones, have plausibly reached a more stable configuration with time, so much that they currently reach critical stability conditions only for rare hydrologic phenomena and/or for man-made alteration of the natural system.

## SURVEY METHODS IN THE SAMPLE AREAS AND RESULTS

The sample areas analysed in this study have been individuated

tra quelle rappresentative delle condizioni morfologiche e geologiche, tipiche delle aree in cui si sono innescati i fenomeni iniziali di debris slides. In particolare, è stata studiata mediante rilievi di campo un'area campione nei Monti Sarno, coincidente con la zona dalla quale si sono innescati i debris slides che colpirono l'abitato di Quindici (AV) tra il 5 ed il 6 maggio 1998. L'altra area campione oggetto di studio è stata individuata nei Monti Lattari, poiché morfologicamente simile e prossima a quella nella quale si sono innescati una serie di fenomeni franosi, nei Comuni di Corbara (SA) e di Sant'Egidio del Monte Albino (SA), il 10 gennaio 1997 (Figura 1).

I rilievi di campo sono stati fondamentalmente basati sull'esecuzione di scavi eseguiti a mano ed in condizioni morfologiche favorevoli alla messa in evidenza della stratigrafia, rappresentate da tagli artificiali già esistenti o da salti di pendenza naturali. L'esecuzione degli scavi lungo la verticale ha consentito la stima dello spessore apparente degli orizzonti piroclastici che è stato trasformato in spessore reale mediante correzione geometrica basata sull'angolo di pendio. Gli scavi hanno raggiunto il substrato solo nei casi in cui lo spessore apparente delle coperture è stato inferiore ai  $3 \div 4$  m, mentre per spessori superiori è stato utilizzato, a partire dal fondo dello scavo un campionatore a percussione del tipo window sampler, che ha consentito di ricostruire la restante parte della stratigrafia. Lo strumento, appositamente progettato, consiste in un tubo di acciaio a pareti sottili dotato di una punta cava di forma tronco-conica, a scarpa tagliente, i cui diametri, esterno ed interno, sono rispettivamente superiore, al diametro esterno, ed inferiore, al diametro interno, del tubo stesso (Figura 2); tale geometria consente l'infissione del tubo per percussione con attrito ridotto e favorisce l'ingresso del campione di terra nel tubo; inoltre, la presenza sul tubo di finestrate a sviluppo longitudinale consente una ulteriore riduzione dell'attrito durante la fase di infissione ed un più facile ingresso del campione all'interno del tubo nonché una facile ispezione visuale dello stesso. I campioni sono stati prelevati dallo scavo in condizioni di disturbo, inevitabile data l'assenza di coesione, soprattutto nell'orizzonte costituito da lapilli pomicei.

Ai fini del rilevamento stratigrafico delle coperture piroclastiche è stato adottato il criterio classificativo basato sul riconoscimento degli orizzonti pedologici (USDA, 1998; TERRIBILE *et alii*, 2000); questo criterio, abbinato a quello propriamente litostratigrafico, ha consentito di riconoscere la successione di differenti episodi deposizionali, alternati a fasi di stasi, durante i quali si sono sviluppati fenomeni pedogenetici. Inoltre, i vari orizzonti, dopo campionatura ed analisi di laboratorio delle principali proprietà indice, sono stati classificati mediante il sistema internazionale USCS. Le analisi di laboratorio sono state condotte secondo gli standards ASTM e BS: ASTM D421, ASTM D2217 e ASTM D422 per le analisi granulometriche; ASTM D4318 e BS 1377 per i limiti di consistenza. I risultati delle analisi granulometriche sono stati utilizzati per stimare la conducibilità idraulica a saturazione ( $K_{sat}$ ), mediante l'applicazione delle formule empiriche di Hazen, Kozeny e Beyer (VUKOVIC & SORO, 1992).

among those representative of the morphologic and geological conditions typical of the debris slide initiation. In particular a sample area in the Sarno Mountains, corresponding to the source area of the debris slides that on 5<sup>th</sup> and 6<sup>th</sup> May 1998 struck the Quindici (AV) municipality has been studied. The other sample area has been individuated in the Lattari Mountains, because morphologically similar and close to the initiation areas of some debris slide - debris flows occurred on 10<sup>th</sup> January 1997 in the municipalities of Corbara (SA) and Sant'Egidio del Monte Albino (SA) (Figure 1).

The field surveys have been basically based on test pits carried out by handled tools and in morphological conditions favourable to easier detect the stratigraphy that have been identified in existing road-cuts and in areas with natural downstream increase of the slope angle. The excavation of test pits along the vertical direction permitted the estimation of the pyroclastic apparent thickness, which was later transformed in real thickness by means of geometric correction based on the slope angle. Test pits have reached the carbonate bedrock only for apparent thickness less than  $3 \div 4$  m, instead for greater thickness a percussion windows sampler has been applied from the bottom of the excavation, permitting the reconstruction of the remaining part of the stratigraphy. The sampler, expressly designed, consists of a thin-wall steel tube with a cutting edge, whose outer and inner diameters are respectively greater and less than the outer and inner tube diameters (Figure 2). Such geometry allows the percussion drilling to proceed with lower attrition and favours the entry of the sample into the tube. Moreover, the presence of elliptical longitudinal openings along the tube permits a further reduction of attrition during the sample entry as well as its easier visual inspection. Soil samples have been extracted in disturbed condition, inevitable owing to the lack of cohesion, especially for the horizon constituted by pumiceous lapilli.

For the purposes of stratigraphic survey of pyroclastic soils, a classification criterion based on the characterisation of pedologic horizons (USDA, 1998; TERRIBILE *et alii*, 2000) has been applied. Such criterion, in addition to the lithostratigraphic one, allowed to recognise the succession of different depositional events, alternating to stasis phases during which pedogenetic processes developed. Moreover, different horizons have been classified with the international system USCS after sampling and laboratory analysis of index properties. Laboratory analyses have been carried out according to the ASTM and BS standards: ASTM D421, ASTM D2217 and ASTM D422 for grain size analyses; ASTM D4318 and BS 1377 for consistency limits. Results of grain size analyses have been utilised for the saturated hydraulic conductivity ( $K_{sat}$ ) estimation, by means of the application of Hazen, Kozeny and Beyer empirical formulas (VUKOVIC & SORO, 1992).

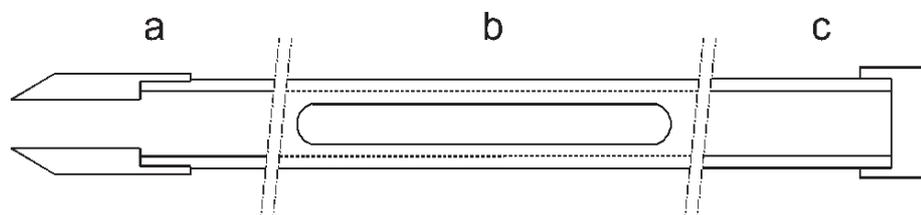


Fig. 2 - Schema del window sampler. a) scarpa tagliente (sezione); b) tubo finestrato; c) testa di battuta (sezione)  
- Scheme of the window sampler: a) cutting edge (section); b) opened tube; c) percussion head (section)

#### AREA CAMPIONE DEI MONTI DI SARNO

L'area campione ricade sulla dorsale carbonatica dei Monti di Sarno, localizzata sul bordo sudorientale della Piana Campana, immediatamente a nordest del rilievo di Pizzo d'Alvano (1.133 m s.l.m.). In quest'area si sono innescate le frane che colpirono l'abitato di Quindici (AV) tra il 5 ed il 6 maggio 1998, provocando la perdita di 11 vite umane. Dal punto di vista morfologico, l'area è identificabile come una testata di bacino idrografico, prossima allo spartiacque principale, contraddistinta da una marcata convergenza morfologica verso l'asta drenante principale (Figura 3). In questo settore, i versanti hanno profilo longitudinale globalmente convesso, poiché caratterizzati da un progressivo incremento delle pendenze verso valle, che variano da circa 20°, nella parte sommitale, a circa 35°, nella parte intermedia, fino ad oltre 45°, nella parte terminale. Il reticolo idrografico è scarso ed in molti casi le aree di interfluvio sono generalmente caratterizzabili dal punto di vista idrografico come bacini di ordine gerarchico zero (DIETRICH *et alii*, 1986), nella parte alta, o di primo ordine gerarchico, generalmente più a valle; in questi ultimi bacini i canali drenanti appaiono effimeri e spesso non sono in continuità con il reticolo idrografico principale.

L'assetto stratigrafico riscontrato in quest'area campione, facendo riferimento alla sequenza vulcanoclastica maggiormente completa, riconosciuta in una delle zone a maggiore carattere conservativo (trincea S11) e localizzata in un settore di versante prossimo ad un crinale secondario con angolo di pendio pari a circa 29°, può essere schematizzato nella maniera seguente (Figure 3 e 4): 1) orizzonte A, caratterizzato da abbondante presenza di humus, che conferisce una struttura generalmente fibrosa e spugnosa al deposito, nel quale possono essere riconosciuti radi piroclasti pomicei, classificabile come terra organica (Pt); 2) orizzonte B, caratterizzato prevalentemente da piroclasti pomicei, variabili granulometricamente da ceneri grossolane a fini, pedogenizzati e soggetti ad un processo di illuviazione che ne ha determinato l'incremento della frazione granulometrica più fine, classificabili come sabbia con limo (SM); 3) orizzonte C, costituito da piroclasti pomicei scarsamente alterati ed a spigoli vivi, con dimensione massima fino a 30 mm, variabili dai lapilli alle ceneri grossolane, classificabili come ghiaie e sabbie pulite da poco a ben gradate (GW o GP); 4) orizzonte Bb, corrispondente ad un orizzonte B sepolto dal successivo evento deposizionale e pertanto considerabile come un paleosuolo, classificabile come sabbia con limo (SM); 5) orizzonte Cb, rappresentativo di un orizzonte C sepolto, costituito da piroclasti pomicei di dimensioni variabili dai lapilli alle ceneri grossolane e pertanto classificabile come l'orizzonte C (GW o

#### SAMPLE AREA IN THE SARNO MOUNTAINS

The sample area is located on the carbonate ridge of the Sarno Mountains, which is situated on the south-eastern edge of the Campanian Plain, directly northeast of Pizzo d'Alvano Mount (1133 m a.s.l.). From this area the landslide which struck the Quindici (AV) municipality on 5<sup>th</sup> and 6<sup>th</sup> May 1998 initiated, causing the loss of 11 human lives. The area can be characterised by morphology as the upper part of a watershed close to the principal morphological divide with a relevant hydrographical convergence toward the principal drainage channel (Figure 3). In this sector, slopes have a globally convex longitudinal profile because they are characterised by the downstream progressive increase of the slope angle that vary from about 20° in the upper part, to about 35° in the intermediate zone and up to 45° in the lower part. The hydrographic network is scarce and in many cases the catchments can be classified in the upper part as zero order basins (DIETRICH *et alii*, 1986), and generally at lower altitudes as first order basins. In the latter, drainage channels are ephemeral and often not connected with the main hydrographic network.

The local stratigraphic scheme of the pyroclastic cover area has been identified in this sample area in the more complete series, which has been recognised in a location with higher morphologic preservative characteristics (test pits S11), positioned in a slope sector close to a secondary morphological divide and with slope angle of about 29° (Figures 3 and 4): 1) A horizon, consisting of abundant humus that gives a spongy and fibrous texture to the deposit in which sparse pumiceous clasts can be recognised, classifiable as organic soil (Pt); 2) B horizon, mainly characterised by pumiceous clasts ranging from coarse to fine ash and weathered by illuviation processes that determined the increase in the finer grain size fraction, classifiable as sand with silt (SM); 3) C horizon, constituted of pumiceous clasts, weakly weathered and with angular shape, with maximum dimension of 30 mm, ranging from coarse ash to lapilli, classifiable as clean gravels and sands from poor to well graded (GW or GP); 4) Bb horizon, corresponding to a B horizon buried by a successive depositional event and thus considerable as a paleosol, classifiable as sand with silt (SM); 5) Cb horizon, representative of a buried C horizon, constituted by pumiceous lapilli and coarse ash, classifiable as the C horizon (GW or GP) even if in some cases the lower is characterised by the relative abundance of the sandy fraction (SW or SP); 6) basal Bb horizon, corresponding to a residual pyroclastic deposit, highly weathered by pedogenesis, representative of the previous eruption products classifiable also as sand with silt (SM); 7) R horizon, corre-

DISTRIBUTION, HYDROGEOLOGICAL FEATURES AND LANDSLIDE HAZARD OF PYROCLASTIC SOILS ON CARBONATE SLOPES IN THE AREA SURROUNDING MOUNT SOMMA-VESUVIUS

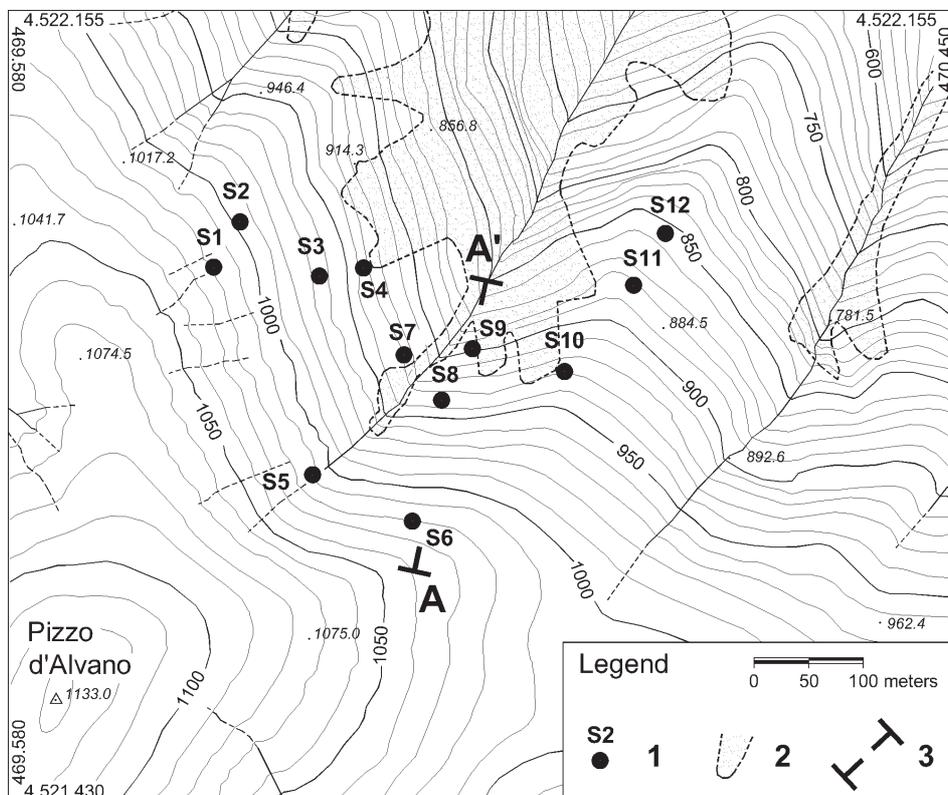


Fig. 3 - Area campione nei Monti di Sarno. Simbologia: 1) trincee esplorative; 2) debris slides - debris flows del 5-6 maggio 1998; 3) traccia di sezione. Le coordinate sono riferite al sistema internazionale UTM (fuso 33)

- Sample area in the Sarno Mountains. Symbols: 1) test pits; 2) debris slide - debris flows occurred on 5<sup>th</sup> - 6<sup>th</sup> May 1998; 3) section line. Coordinates are referred to the international system UTM (33 fuse)

GP), sebbene in alcuni casi esso abbia presentato, verso il basso, la prevalenza della frazione sabbiosa (SW o SP); 6) orizzonte Bb basale, corrispondente ad un deposito piroclastico residuale, fortemente pedogenizzato, rappresentativo dei prodotti delle eruzioni precedenti, classificabile anch'esso come sabbia con limo (SM); 7) orizzonte R, corrispondente al substrato carbonatico, le cui discontinuità sono occluse dalla parte più sottile del deposito piroclastico soprastante. In accordo ai criteri classificativi pedologici, gli orizzonti B e Bb possono essere classificati come andosuoli (THORP & SMITH, 1949; USDA, 1998), ovvero il prodotto dei processi di pedogenesi su depositi vulcanoclastici.

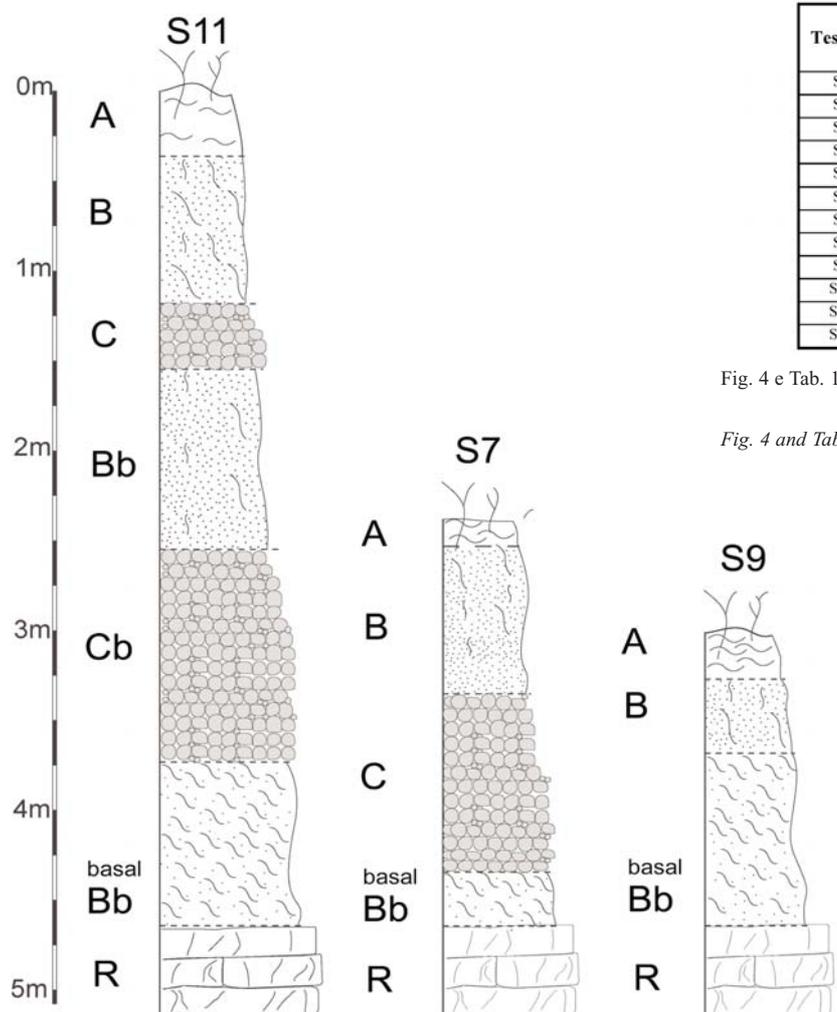
La frazione granulometrica fine, passante al setaccio N. 40 ASTM (0.425 mm), ricade nel campo dei limi di alta plasticità della carta di plasticità di Casagrande (Figura 5), in accordo al comportamento tipico degli andosuoli (GUADAGNO & MAGALDI, 2000; MAEDA *et alii*, 1977), presentando quindi un elevato limite di liquidità ( $w_L > 50\%$ ), ma un basso valore dell'indice di plasticità ( $IP < 15\%$ ), sebbene quest'ultimo non appaia essere un carattere specificamente distintivo degli andosuoli (MAEDA *et alii*, 1983; WADA, 1985).

Dal punto di vista litostratigrafico, la sequenza può essere riferita, in base alle caratteristiche degli orizzonti C alla successione delle eruzioni di Ottaviano (orizzonte Cb) e di Avellino (orizzonte C). In tale successione, gli orizzonti B possono essere considerati il frutto di un processo pedogenetico che ha agito sui prodotti piroclastici in giacitu-

spendendo to the carbonate bedrock which discontinuities are filled by the finer grain size fraction of the overlying horizon. According to the pedologic classification criterions, B and Bb horizons can be classified as andosols (THORP & SMITH, 1949; USDA, 1998), namely the product of pedogenesis on pyroclastic deposit.

The finer grain size fraction, passing at No. 40 ASTM sieve (0.425 mm), lies in the Casagrande's plasticity chart in the zone typical of the high plasticity silts (MH) (Figure 5), in accordance with the typical andosol characteristics (GUADAGNO & MAGALDI, 2000; MAEDA *et alii*, 1977), thus presenting a high liquid limit ( $w_L < 50\%$ ) but a low plasticity index ( $PI < 15\%$ ), although this seems not to be a property specifically distinctive of the andosols (MAEDA *et alii*, 1983; WADA, 1985).

From the lithostratigraphic point of view, the volcanoclastic series can be referred, on the basis of C horizons characteristics to the succession of the Ottaviano eruption (Cb horizon) and the Avellino eruption (C horizon). In such succession, B horizons can be considered the product of pedogenetic processes which acted on pyroclastic deposits, in the original depositional condition, represented also by the finer grain size fraction of each eruptive event. The existence of pumiceous lapilli in the B horizon, weathered and often rounded, does not allow to exclude the action of soil erosion and deposition at the slope scale occurred between the two successive eruptions. In areas external to the examined one, and in more preservative mor-



Test pit	$\alpha$	A + B	C	Bb	Cb	basal Bb
	( $^{\circ}$ )	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
S1	38	0.88	1.19	-	-	1.19
S2	37	1.13	0.31	-	-	1.13
S3	35	1.00	0.75	-	-	2.38
S4	40	1.44	-	-	-	0.38
S5	34	1.50	0.44	-	-	1.50
S6	29	1.38	2.44	-	-	1.50
S7	38	1.00	1.25	-	-	0.38
S8	34	0.81	0.31	-	-	0.94
S9	40	0.69	-	-	-	1.25
S10	34	0.81	0.44	1.13	0.44	1.44
S11	28	1.44	0.44	1.13	1.38	0.81
S12	23	3.06	0.63	-	-	2.00

Fig. 4 e Tab. 1 - Stratigrafie rappresentative e spessori reali degli orizzonti rilevati nelle trincee esplorative dell'area campione dei Monti di Sarno

Fig. 4 and Tab. 1 - Representative stratigraphic records and real thickness of horizons surveyed by means of test pits of sample area of Sarno Mountains

ra primaria, rappresentati anche dalla frazione più sottile delle stesse sequenze vulcanoclastiche. La presenza di lapilli pomicei nell'ambito dell'orizzonte B, alterati e spesso arrotondati, non lascia escludere l'esistenza di processi di rimaneggiamento a scala di versante, occorsi nel periodo compreso tra le fasi eruttive. In aree esterne a quella in esame, ed in condizioni morfologiche maggiormente conservative è stata riscontrata anche la presenza dei depositi dell'eruzione del 472 d.C., rappresentati tuttavia da uno spessore esiguo di lapilli pomicei. Lo spessore totale della successione vulcanoclastica rilevata nella trincea S11, espresso in termini reali, è pari a circa 4.6 m. Esso è quindi comparabile con quello massimo teorico precipitato nell'area (Figura 1), pari a circa 5 m, che su pendio inclinato 29°, corrisponde in termini reali un valore di circa 4.4 m.

L'analisi dei dati stratigrafici rilevati in diversi punti dell'area campione evidenzia (Figura 3; Tabella 1) che la sequenza descritta è

phologic conditions, the deposits of the A.D. 472 eruption have been also detected, represented by a thin horizon of pumiceous lapilli. Total thickness of pyroclastic overburden in the S11 test pit reaches about 4.6 m, if expressed in real value, and is therefore comparable with the theoretical maximum value that fell in the area (Figure 1), about 5 m, particularly if we consider its distribution on a slope inclined 29°, which corresponds a real thickness of about 4.4 m.

The analysis of stratigraphic data collected within the sample area (Figure 3; Table 1) puts in evidence that the described volcaniclastic sequence exists only incompletely in areas with less preservative morphologic characteristics, namely in those areas characterised by higher slope angle. This observation confirms that slopes underwent denudational processes after ash-fall deposition, predominantly in areas with higher slope angle. Therefore the suc-

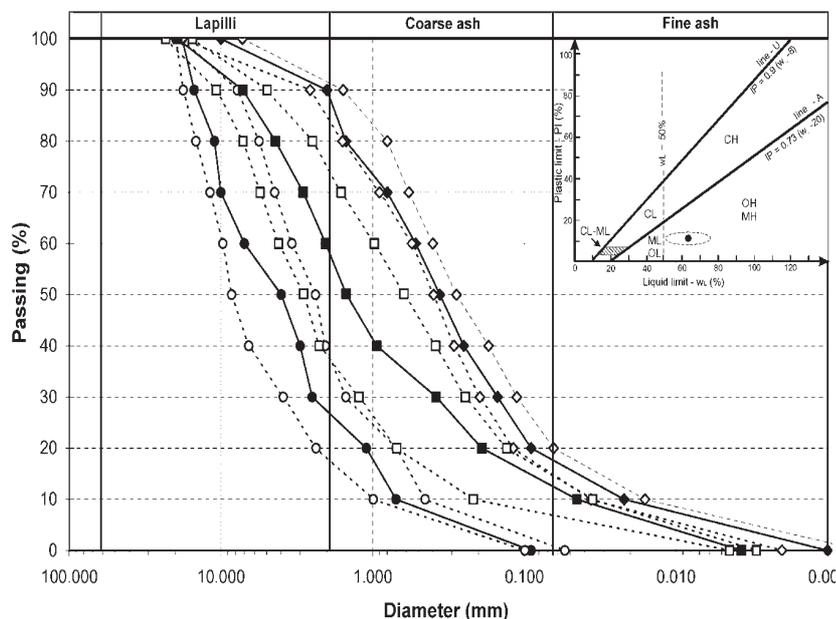


Fig. 5 - Fusi granulometrici ottenuti per gli orizzonti campionati nell'area campione dei Monti di Sarno. Simbologia: quadrato ==> orizzonte B; cerchio ==> orizzonti C e Cb; rombo ==> orizzonte Bb basale. Le linee continue, con il simbolo pieno, rappresentano il valore medio, mentre le linee tratteggiate, con il simbolo vuoto, rappresentano rispettivamente il percentile del 5% e 95%. Sono stati analizzati 12 campioni dell'orizzonte B, 14 campioni degli orizzonti C e Cb e 12 campioni dell'orizzonte Bb basale. Le classi granulometriche si riferiscono a quelle dei depositi piroclastici (SCHIMDT, 1981). Nella carta di plasticità di Casagrande è evidenziato il valore medio di wL ed IP, cerchio pieno, e l'ellisse rappresentativa della variazione  $\pm$  scarto quadratico medio; il numero delle determinazioni è 10

- Grain size envelopes obtained for the soil horizons in the surveyed area of Sarno Mountains. Symbols: square ==> B horizon; circle ==> C and Cb horizons; rhombus ==> basal Bb horizon. Continuous lines with filled symbol represent the median value instead dashed lines with empty symbol respectively represent the 5% and 95% percentiles. For the B horizon, 12 samples have been analysed, for the C and Cb horizons 14 samples have been analysed and for the basal Bb horizon 12 samples have been analysed. Grain size classes are referred to those used for pyroclastic deposits (SCHIMDT, 1981). In the Casagrande's plasticity chart wL and PI average value, filled circle, and the variation  $\pm$  root mean square error have been shown; the number of determinations is 10

presente solo parzialmente nelle aree a carattere meno conservativo, ovvero in quelle aree caratterizzate da angolo di pendio più elevato; ciò testimonia che i versanti hanno subito, dopo la deposizione dei prodotti piroclastici, un processo di denudazione, in particolare nelle aree a maggiore pendenza. Pertanto, la semplice sequenza di orizzonti A, B, C e Bb, in mancanza di caratteri litostratigrafici distintivi, può essere dubitativamente attribuita ad una delle eruzioni più recenti, mentre la sequenza vulcanoclastica nella quale è rinvenibile l'orizzonte Cb, rappresenta la conservazione dei prodotti di una precedente eruzione del Complesso Piroclastico Recente. Nella maggior parte dei casi è risultato essere presente, a diretto contatto con il substrato carbonatico un orizzonte Bb, pertanto definito basale. Mentre, nei casi in cui l'orizzonte C non è presente, gli orizzonti B e Bb sono risultati saldati ed, in alcuni di questi, l'orizzonte Bb appare essere asportato da fenomeni denudazionali, soprattutto nelle aree a maggiore acclività.

È ragionevole ritenere che i depositi del Complesso Piroclastico Antico (CPA) siano trascurabili lungo i versanti analizzati, soprattutto per il lungo periodo durante il quale essi sono stati esposti ai processi denudazionali e pedogenetici, ed eventualmente presenti, anche se solo in tracce, nell'orizzonte Bb basale.

Le analisi granulometriche degli orizzonti hanno evidenziato risultati comparabili con quelli ottenuti in altri studi condotti nella stessa area (CASCINI, 2004; CROSTA & DAL NEGRO, 2003), evidenziando una marcata differenza tra gli orizzonti C-Cb e l'orizzonte Bb basale, mentre caratteristiche sostanzialmente intermedie per gli orizzonti B (Figura 5). Ciò sembra indicare che l'orizzonte B sia contraddistinto da un processo pedogenetico meno sviluppato che nell'orizzonte Bb basa-

cession of A, B, C and Bb horizons can be doubtfully attributed to one of the latest eruptions, if any distinctive lithostratigraphic characters can not be detected. Instead, successions with Cb horizons reveal the preservation from denudational processes of an antecedent RPC deposits. In the most part of cases a Bb horizon overlying the carbonate bedrock has been found, since it has been distinct as basal. Otherwise in the other cases, in which C horizon is not present, B and Bb basal horizons are directly overlapping and Bb basal horizon appears to be reduced or absent by denudational processes, especially in the zones with higher slope angle.

The deposits of the Ancient Pyroclastic Complex (APC) can be considered negligible along the slopes above all for the longer period of exposition to weathering and denudation processes and eventually present only in traces in the basal Bb horizon.

Grain size analyses put in evidence results comparable with those obtained in other studies carried out in the same area (CASCINI, 2004; CROSTA & DAL NEGRO, 2003), showing a strong difference between C-Cb horizons and basal Bb horizon, while intermediate characteristics for other B horizons (Figure 5). This seems to demonstrate that the B horizons are characterised by less developed pedogenetic phenomena than the basal Bb horizon and likewise characterised by the existence of soils reworked by ero-

le, o, comunque, caratterizzato anche dalla presenza di materiale rimaneggiato da processi di erosione, trasporto e deposizione a scala di versante, testimoniati dalla maggiore gradazione dei campioni.

La caratterizzazione granulometrica dei depositi ha consentito la stima della conducibilità idraulica a saturazione ( $K_{sat}$ ) mediante le formule empiriche di Hazen, Kozeny e Beyer, ciascuna, com'è noto, idonea alla stima della conducibilità idraulica in determinati intervalli di diametro efficace ( $d_{10}$ ) e di coefficiente di uniformità (U) (VUKOVIC & SORO, 1992). Tale approccio metodologico ha rappresentato ovviamente una semplificazione al problema di eseguire prove di campo e di laboratorio altrimenti onerose, soprattutto per le condizioni logistiche, sebbene le stime ottenute sono da considerare approssimative e valide nell'ordine di grandezza. Ciononostante, i risultati ottenuti possono essere ritenuti utili ai fini di una preliminare caratterizzazione idraulica degli orizzonti piroclastici.

La stima della conducibilità idraulica a partire dai dati granulometrici è stata effettuata per gli orizzonti C e Cb mediante la formula empiriche di Hazen, valida per sabbie grossolane e ghiaie uniformi ( $U < 5$  e  $0.1 \text{ mm} < d_{10} < 3 \text{ mm}$ ):

$$K_{sat} = K_i (g/v) = C_h f(n) d_{10}^2 (g/v)$$

dove:  
 $C_h = \text{costante empirica [ad.]}$ ,  
 $n = \text{porosità efficace [ad.]}$ ,  
 $d_{10} = \text{diametro efficace [m]}$ ,  
 $g = \text{accelerazione di gravità [m/s}^2\text{]}$ ,  
 $v = \text{viscosità cinematica [m}^2\text{/s]}$ ,  
 considerata a 12°C

$$C_h = 6 \times 10^{-4} \implies [ad.]$$

$$f(n) = [1+10(n-0.26)] \implies [ad.]$$

Mentre, per i campioni con coefficiente di uniformità superiore a 5 è stata utilizzata la formula di Kozeny, valida genericamente per sabbie grossolane.

$$K_{sat} = K_i (g/v) = C_k f(n) d_{10}^2 (g/v)$$

dove:  
 $C_k = \text{costante empirica [ad.]}$ ,  
 $n = \text{porosità efficace [ad.]}$ ,  
 $d_{10} = \text{diametro efficace [m]}$ ,  
 $g = \text{accelerazione di gravità [m/s}^2\text{]}$ ,  
 $v = \text{viscosità cinematica [m}^2\text{/s]}$ ,  
 considerata a 12°C

$$C_k = 8.3 \times 10^{-3} \implies [ad.]$$

$$f(n) = n^3 (1-n)^2 \implies [ad.]$$

La porosità è stata considerata solo in termini efficaci, poiché i depositi pomicei, com'è noto, sono dotati di porosità intragranulare ed un'elevata superficie specifica (ESPOSITO & GUADAGNO, 1998); a tale proposito è stato adottato un valore della porosità efficace pari al 25%, derivato da prove di laboratorio di drenaggio a gravità.

Per gli orizzonti Bb è stata utilizzata la formula di Beyer, applicabile nei casi in cui  $1 < U < 20$  e  $0.06 \text{ mm} < d_{10} < 0.6 \text{ mm}$ :

$$K_{sat} = K_i (g/v) = C_b f(n) d_{10}^2 (g/v)$$

dove:  
 $C_b = \text{costante empirica [ad.]}$ ,  
 $U = \text{coefficiente di uniformità [ad.]}$ ,  
 $d_{10} = \text{diametro efficace [m]}$ ,  
 $g = \text{accelerazione di gravità [m/s}^2\text{]}$ ,  
 $v = \text{viscosità cinematica [m}^2\text{/s]}$ ,  
 considerata a 12°C

$$C_b = 6 \times 10^{-4} \log(500/U) \implies [ad.]$$

Le citate formule empiriche sono quelle che si adattano meglio, tra le numerose note in letteratura, alle caratteristiche granulometriche

tion, transport and deposition processes identifiable in the greater grading of the samples.

The grain size analysis of deposits allowed the estimation of the saturated hydraulic conductivity ( $K_{sat}$ ) by mean of the Hazen, Kozeny and Beyer empirical formulas, each of them, as known, suitable for soils with specific intervals of effective diameter ( $d_{10}$ ) and of coefficient of uniformity (U) (VUKOVIC & SORO, 1992). Such methodological approach obviously represent an approximate substitute to field and laboratory permeability tests, otherwise difficult to perform because of the not easy logistic conditions and the impossibility to take undisturbed samples, therefore the estimations can be considered generally valid in the magnitude order. Despite this approximation the results obtained by means of empirical formulas can be considered useful for a preliminary hydraulic characterisation of the pyroclastic horizons.

The estimation of the hydraulic conductivity from grain size data has been carried out for C and Cb horizons by means of the Hazen empirical formula, generally valid for uniform coarse sands and gravels ( $U < 5$  and  $0.1 \text{ mm} < d_{10} < 3 \text{ mm}$ ):

$$K_{sat} = K_i (g/v) = C_h f(n) d_{10}^2 (g/v)$$

with:  $C_h = \text{empirical constant [ad.]}$ ,  
 $n = \text{effective porosity [ad.]}$ ,  
 $d_{10} = \text{effective diameter [m]}$ ,  
 $g = \text{acceleration due to gravity [m/s}^2\text{]}$ ,  
 $v = \text{kinematic viscosity [m}^2\text{/s]}$ ,  
 considered at 12°C

$$C_h = 6 \times 10^{-4} \implies [ad.]$$

$$f(n) = [1+10(n-0.26)] \implies [ad.]$$

Instead, for sample with coefficient of uniformity greater than 5 the Kozeny empirical formula, generally valid for coarse sands, has been applied.

$$K_{sat} = K_i (g/v) = C_k f(n) d_{10}^2 (g/v)$$

with:  $C_k = \text{empirical constant [ad.]}$ ,  
 $n = \text{effective porosity [ad.]}$ ,  
 $d_{10} = \text{effective diameter [m]}$ ,  
 $g = \text{acceleration due to gravity [m/s}^2\text{]}$ ,  
 $v = \text{kinematic viscosity [m}^2\text{/s]}$ ,  
 considered at 12°C

$$C_k = 8.3 \times 10^{-3} \implies [ad.]$$

$$f(n) = n^3 (1-n)^2 \implies [ad.]$$

The porosity has been considered only as effective because pumiceous deposits, as known, have additional intraparticle porosity and a relevant specific surface (ESPOSITO & GUADAGNO, 1998); for such purpose an effective porosity value of 25%, derived from laboratory gravity drainage tests, has been adopted.

For Bb horizons the Beyer formula has been applied, suitable for soils with  $1 < U < 20$  and  $0.06 \text{ mm} < d_{10} < 0.6 \text{ mm}$ .

$$K_{sat} = K_i (g/v) = C_b f(n) d_{10}^2 (g/v)$$

with:  $C_b = \text{empirical constant [ad.]}$ ,  
 $U = \text{coefficient of uniformity [ad.]}$ ,  
 $d_{10} = \text{effective diameter [m]}$ ,  
 $g = \text{acceleration due to gravity [m/s}^2\text{]}$ ,  
 $v = \text{kinematic viscosity [m}^2\text{/s]}$ ,  
 considered at 12°C

$$C_b = 6 \times 10^{-4} \log(500/U) \implies [ad.]$$

Among the numerous known in literature, the previous empirical formulas are the most suitable for the grain size characteristics of C-Cb and basal Bb horizons. However, for some samples of the

degli orizzonti C-Cb e Bb basale. Tuttavia, per alcuni campioni dell'orizzonte basale la formula di Beyer non è stata applicata per l'elevato coefficiente di uniformità e per il basso valore del diametro efficace ( $<0.06$  mm). Analogamente, l'elevato valore del coefficiente di uniformità dei campioni dell'orizzonte B non ha consentito l'utilizzazione di nessuna formula empirica. In ogni caso, la stima indiretta della conducibilità idraulica di questo orizzonte avrebbe fornito risultati diversi da quelli ottenibili dalle prove in sito, soprattutto per la diffusa presenza di macropori connessi agli apparati radicali e ad altre forme di bioturbazione. Infatti, in questo orizzonte superficiale si sviluppano maggiormente gli apparati radicali, che generalmente non attraversano i sottostanti livelli di lapilli pomicei, quando questi sono di spessore non trascurabile. Ciononostante, in base alle caratteristiche granulometriche del deposito, sostanzialmente intermedie tra quelle degli orizzonti C-Cb e Bb basale, anche la conducibilità idraulica di questo orizzonte può essere considerata in prima approssimazione intermedia tra gli intervalli stimati per gli orizzonti precedenti. Sebbene le suddette formule empiriche forniscano risultati certamente approssimati, è possibile evidenziare facilmente la grande variazione della conducibilità idraulica, estesa in un intervallo ampio fino a 4 ordini di grandezza (Figura 9). I risultati ottenuti dalle formule empiriche si accordano bene con quelli noti in letteratura per gli stessi terreni nell'area di Pizzo d'Alvano (CASCINI, 2004; CROSTA & DAL NEGRO, 2003).

L'insieme dei dati stratigrafici raccolti ha consentito di analizzare la distribuzione dei depositi piroclastici lungo i versanti e di ricostruire un modello geologico basato su sezioni (Figura 10). Dall'analisi dei dati stratigrafici è possibile evidenziare una progressiva riduzione dello spessore dei terreni di copertura all'aumentare dell'angolo di pendio, fino a valori trascurabili per angoli di pendio superiori a  $50^\circ$ , attribuibile a fenomeni denudazionali, quindi per movimenti di massa e/o per fenomeni di erosione areale ed incanalata, correlabili con i processi iniziali dell'erosione (sheet wash e rill erosion). Il risultato di tali processi denudazionali è interpretabile, al crescere dell'angolo di pendio, e partendo dalla sequenza di riferimento (trincea S11), con la riduzione dello spessore dell'orizzonte superiore di lapilli pomicei, fino alla sua scomparsa e, all'ulteriore aumento dell'angolo di pendio, con la riduzione e la scomparsa anche dell'orizzonte inferiore di lapilli pomicei. Tale condizione geologica comporta l'esistenza dei livelli di lapilli pomicei con geometria lenticolare che terminano mediante la saldatura dell'orizzonte B con quello Bb basale, oppure più raramente mediante il contatto diretto dell'orizzonte B con il substrato carbonatico. I processi denudazionali appaiono essere accentuati verso le aree di convergenza morfologica ed in prossimità delle aste drenanti di primo ordine gerarchico.

#### *AREA CAMPIONE DEI MONTI LATTARI*

La seconda area campione oggetto di studio ricade nel settore settentrionale dei Monti Lattari, nell'ambito del versante settentrionale del Monte Caprile (571 m s.l.m.) che costituisce uno dei contrafforti set-

basal horizon the Beyer formula has not been applied owing to the higher coefficient of uniformity and the lower value of the effective diameter ( $<0.06$  mm). Likewise the higher coefficients of uniformity of samples derived from B horizons do not permit the application of any empirical formulas. Nevertheless, the indirect estimation of the hydraulic conductivity for this horizon would have given much different results from those determinable by means of the field permeability tests, above all for the diffused presence of macropores related to root apparatuses and to the others form of bioturbation. In fact, the root apparatuses preferentially develop in this surficial horizon, because they generally do not cross the underlying pumiceous lapilli horizon when its thickness is not negligible. However, from grain size characteristics of the deposit, substantially intermediate between those of C-Cb and basal Bb horizons, the hydraulic conductivity can be also approximately considered intermediate between the ranges estimated for the aforesaid horizons. Although the previous formulas give results certainly approximated, it is clearly evident the great difference in hydraulic conductivity spread up to 4 magnitude orders (Figure 9). The results obtained from empirical formulas have a good match with those known for the same soils in the Pizzo d'Alvano area (CASCINI, 2004; CROSTA & DAL NEGRO, 2003).

The gathered stratigraphic data allowed the analysis of the distribution of pyroclastic soils along the slopes and the reconstruction of a geological model based on sections (Figure 10). From this analysis a progressive thickness reduction as the slope angle increases can be demonstrated, up to negligible values for slope angle values greater than  $50^\circ$ . This phenomenon can be obviously related to denudational processes, therefore to mass wasting of soil and/or superficial and linear erosion processes occurred in the initial forms (sheet wash and rill erosion). Starting from the reference stratigraphic series (test pit S11), the result of the denudational processes in relation to the slope angle appears to demonstrate the progressive thinning of the C horizon, up to its disappearance and, as a result of the further increase in slope angle, the progressive diminishing up to disappearance of the Cb horizon. Such geological condition implies the existence of lens-shape pumiceous lapilli horizons that terminate downstream with the direct contact between B and basal Bb horizons, or rarely by means of the direct contact on the carbonate bedrock. Denudational processes seem to be increased in proximity of first hierarchical order drainage channels.

#### *SAMPLE AREA IN THE LATTARI MOUNTAINS*

The second sample area object of the investigations is located in the northern sector of the Lattari Mountains, specifically along the northern side of Caprile Mount (571 m a.s.l.) that represents one of the

tentrionali della dorsale carbonatica Monte Cerreto (1.316 m s.l.m.) - Monte Candelitto (1.201 m s.l.m.) - Monte Cervigliano (1.203 m s.l.m.), il cui allineamento rappresenta una parte dello spartiacque principale della Penisola Sorrentina. I versanti nei quali l'area campione è compresa sono caratterizzabili dal punto di vista geomorfologico come versanti di faglia, evoluti in faccette triangolari ed, in alcuni casi, dissecati longitudinalmente da corsi d'acqua susseguenti. Le aree oggetto delle indagini stratigrafiche si collocano nella parte alta dei versanti che, dal punto di vista idrografico, passano da un bacino di ordine gerarchico zero ad uno di primo ordine gerarchico (Figura 6). Il profilo trasversale dell'area varia da blandamente concavo nella parte alta a marcatamente inciso nella parte media e bassa; mentre, il profilo longitudinale è globalmente convesso, variando da un'inclinazione di 28° nella parte alta a 35° nella parte intermedia ad oltre 40° nella parte bassa. I caratteri geologici e morfologici dell'area campione sono tipici per l'innescò dei debris slides, pertanto similari ad aree limitrofe, ricadenti nei Comuni di Corbara (SA) e di Sant'Egidio del Monte Albino (SA), nelle quali si sono verificate alcune frane nel gennaio 1997 (CALCATERRA *et alii*, 1999).

Nell'ambito della zona maggiormente conservativa, localizzata su un settore di versante posizionato marginalmente ad un bacino di ordine zero (Figura 6), è stata identificata la successione vulcanoclastica

northern buttresses of the carbonate ridge Cerreto Mount (1316 m a.s.l.) - Candelitto Mount (1201 m a.s.l.) - Cervigliano Mount (1203 m a.s.l.), whose alignment constitute a sector of the principal morphological divide of the Sorrentina Peninsula. The slopes in which the sample area is enclosed can be interpreted by their geomorphologic aspect as the evolution in triangular facets of fault-line scarps that in some cases appear furrowed by subsequent drainage channels. The areas investigated with stratigraphic surveys are positioned in the upper part of the slopes that vary from zero to one order basins for what concerning the hydrographic aspect. The transversal profile of the area changes from slightly concave in the upper part to markedly furrowed in the lower part. Moreover, the longitudinal profile is globally convex varying from a slope angle value of 28° in the upper part to 35° in the intermediate part to over 40° in the lower part. By the geological and morphological characters, the areas can be considered similar to those where debris slides initiate and evolve in debris flows and therefore similar to the neighbouring areas, located in the Corbara (SA) and Sant'Egidio del Monte Albino (SA) municipalities, where some landslides occurred in January 1997 (CALCATERRA *et alii*, 1999).

In the area with the most morphologic preservative characters, located in a lateral sector of a zero order basin (Figure 6), a volcanoclastic succession has been detected (test pit L1) that has been used

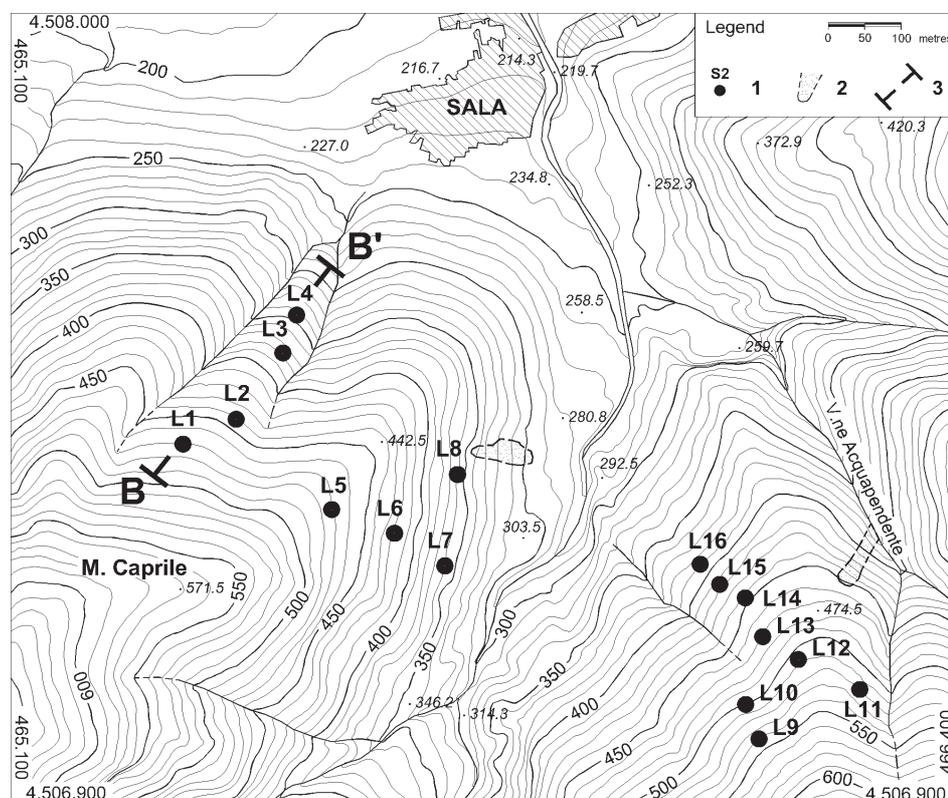
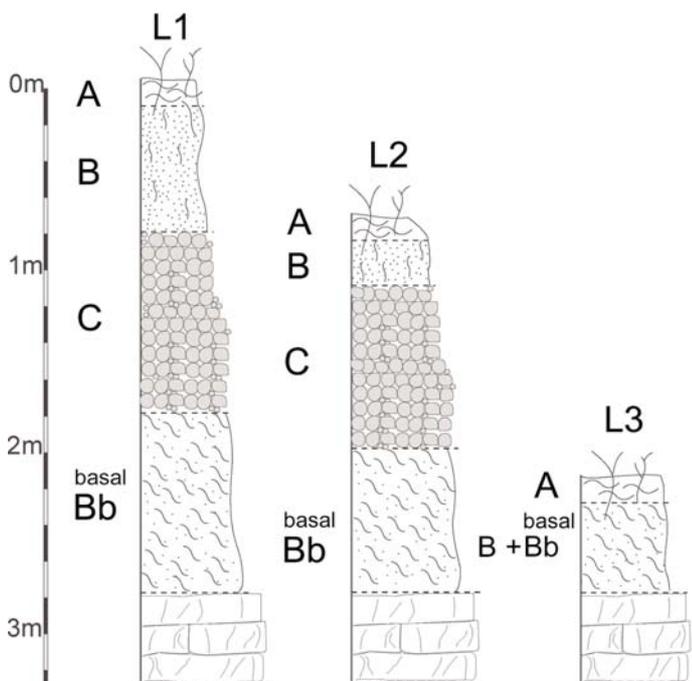


Fig. 6 - Area campione nei Monti Lattari. Simbologia: 1) trincee esplorative; 2) debris slides - debris flows del gennaio 1997; 3) traccia di sezione. Le coordinate sono riferite al sistema internazionale UTM (fuso 33)

- Sample area of Lattari Mountains. Symbols: 1) test pits; 2) debris slide - debris flows occurred on January 1997; 3) section line. Coordinates are referred to the international system UTM (33 fuse)

DISTRIBUTION, HYDROGEOLOGICAL FEATURES AND LANDSLIDE HAZARD OF PYROCLASTIC SOILS ON CARBONATE SLOPES IN THE AREA SURROUNDING MOUNT SOMMA-VESUVIUS



Test pit	$\alpha$ ( $^{\circ}$ )	A + B (m)	C (m)	basal Bb (m)
L1	30	0.85	1.00	1.00
L2	33	0.40	0.90	0.80
L3	39	0.15	-	0.50
L4	43	0.05	-	0.30
L5	26	0.57	1.27	0.64
L6	33	0.42	0.25	0.34
L7	33	0.50	0.42	0.08
L8	36	0.70	-	0.10
L9	28	0.44	0.53	0.88
L10	30	0.43	0.69	0.87
L11	32	0.68	0.51	0.34
L12	27	0.53	1.16	0.80
L13	28	0.23	0.97	1.00
L14	39	0.10	-	0.55
L15	41	0.05	-	0.55
L16	45	0.05	-	0.25

Fig. 7 e Tab. 2 - Stratigrafie rappresentative e spessori reali degli orizzonti rilevati nelle trincee esplorative dell'area campione dei Monti Lattari - Representative stratigraphic records and real thickness of horizons surveyed by means of test pits in the sample area of Lattari Mountains

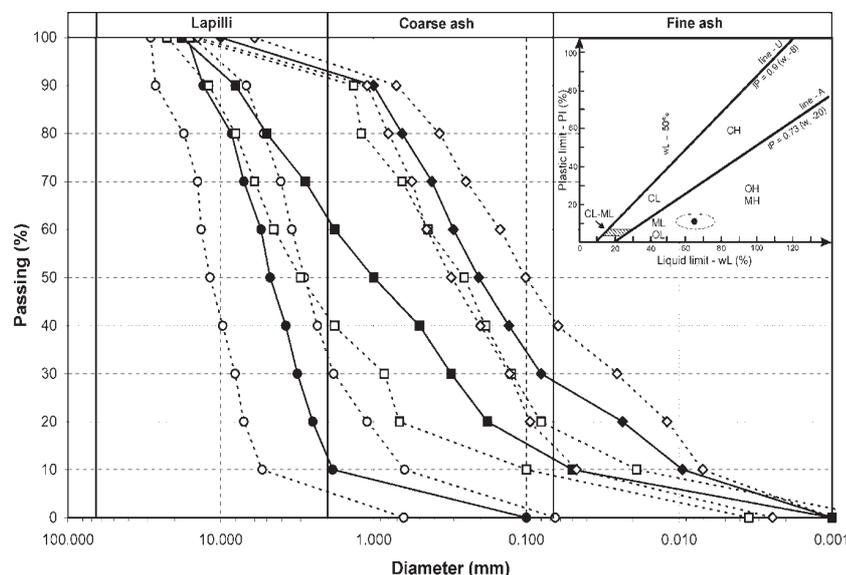


Fig. 8 - Fusi granulometrici ottenuti per gli orizzonti campionati nelle aree campione dei Monti Lattari. Simbologia: quadrato ==> orizzonte B; cerchio ==> orizzonti C e Cb; rombo ==> orizzonti Bb. Le linee continue, con il simbolo pieno, rappresentano il valore mediano, mentre le linee tratteggiate, con il simbolo vuoto, rappresentano rispettivamente il percentile del 5% e del 95%. Sono stati analizzati 13 campioni dell'orizzonte B, 12 campioni degli orizzonti C e 12 campioni degli orizzonti Bb. Le classi granulometriche si riferiscono a quelle dei depositi piroclastici (SCHMIDT, 1981). Nella carta di plasticità di Casagrande è evidenziato il valore medio di wL ed IP, cerchio pieno, e l'ellisse rappresentativa della variazione  $\pm$  scarto quadratico medio; il numero delle determinazioni è 8

- Grain size envelopes obtained for the soil horizons in the sample area of Sarno Mountains. Symbols: square ==> horizon B; circle ==> horizons C and Cb; rhombus ==> horizons Bb. Continuous lines, with filled symbol, represent the median value, instead dashed lines, with empty symbol, respectively represent the 5% and 95% percentiles. For the B horizon 13 samples have been analysed, for the C horizon 12 samples have been analysed and for the basal Bb horizon 12 samples have been analysed. Grain size classes are referred to those used for pyroclastic deposits (SCHMIDT, 1981). In the Casagrande's plasticity chart the wL and PI average value, filled circle, and the variation  $\pm$  root mean square error have been shown; the number of determinations is 8

(trincea L1) che ha rappresentato il riferimento locale per i dati ricavati dalle altre trincee, schematizzabile come segue (Figura 7): 1) orizzonte A, caratterizzato da piroclasti pomicei alterati ed arrotondati, immersi in matrice fibrosa organica, classificabile come terra organica (Pt); 2) orizzonte B caratterizzato da piroclasti pomicei, variabili granulometricamente da lapilli a ceneri grossolane, pedogenizzati e sog-

as local reference for the other stratigraphic data. It can be described as follows (Figure 7): 1) A horizon, characterised by weathered and rounded pumiceous pyroclasts dispersed in organic fibrous matrix, classifiable as organic soil (Pt); 2) B horizon consisting of pumiceous pyroclasts ranging from weathered lapilli to coarse ash and subjected to illuviation process that determined the increase in the finer grain

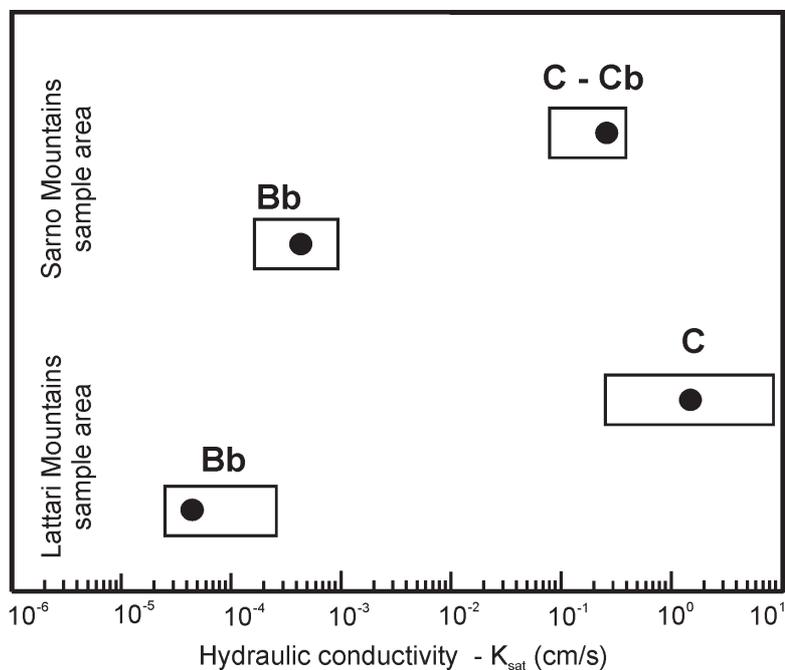


Fig. 9 - Intervalli di variazione della conducibilità idraulica stimata dai parametri granulometrici. I rettangoli individuano i valori corrispondenti ai percentili del 5% e del 95%, mentre il cerchio il valore mediano  
- Ranges of hydraulic conductivity calculated from grain size parameters. Rectangles indicate 5% and 95% percentiles values, while filled circle represent the median value

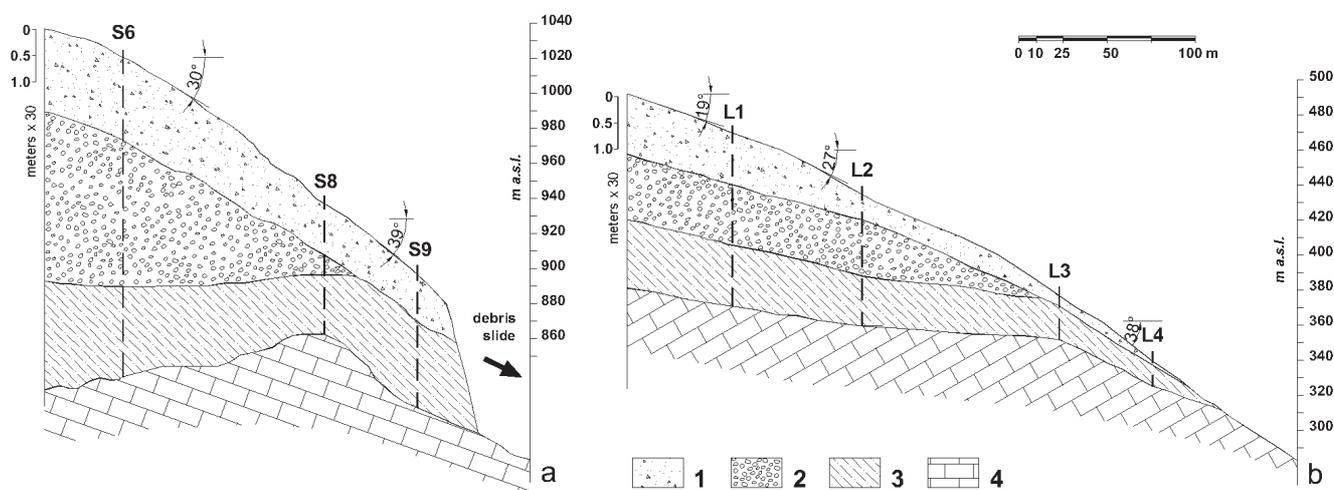


Fig. 10 - Sezioni stratigrafiche nelle aree campione: a) sezione A-A' nell'area campione dei Monti di Sarno; b) sezione B-B' nell'area campione dei Monti Lattari. Simbologia: 1) orizzonti A e B; 2) orizzonte C; 3) orizzonte Bb basale; 4) substrato carbonatico. Lo spessore della coltre piroclastica è stato amplificato di 30 volte, mentre il profilo topografico è in scala naturale, ciò comporta l'apparente risalita del substrato  
- Stratigraphic sections in the sample areas: a) section A-A' in the sample area of Sarno Mountains; b) section B-B' in the sample area of Lattari Mountains. Symbols: 1) a and B horizons; 2) C horizon; 3) basal Bb horizon; 4) carbonate bedrock. The thickness of the pyroclastic mantle has been amplified 30 times, while the topographic profile is in natural scale that results in the apparent rising of the bedrock

getti ad un fenomeno di illuviazione che ne ha determinato l'incremento della frazione granulometrica più fine, classificabile come sabbia con limo (SM); 3) orizzonte C, costituito da piroclasti pomicei scarsamente alterati ed a spigoli vivi, con dimensioni massime fino a 60 mm, granulometricamente compresi nella classe dei lapilli, classificabili come ghiaie e sabbie pulite da poco gradate a ben gradate (GW o GP); 4) oriz-

size fraction, classificabile as sand with silt (SM); 3) C horizon, constituted by scarcely weathered and with angular shape pumiceous pyroclasts, with maximum dimensions up to 60 mm, comprised in terms of grain sizes in the lapilli grain size class, classificabile as clean gravels and sands from poor to well graded (GW or GP); 4) basal Bb horizon, with included very weathered pumiceous lapilli

zonte Bb basale, con inclusi lapilli pomicei molto alterati classificabile come sabbia con limo (SM), e livelli decimetrici di cineriti grigie sabbioso-limose e rari residui scoriacei e vetrosi di piccole dimensioni; 5) orizzonte R, corrispondente al substrato carbonatico, le cui discontinuità sono occluse dalla parte più sottile del deposito piroclastico soprastante.

Dal punto di vista litostratigrafico, l'orizzonte C è attribuibile all'eruzione del 79 d.C.; tra gli elementi distintivi, è stata riconosciuta la presenza di una diversa colorazione del deposito passante dal giallo paglierino a grigio chiaro. Lo spessore totale della sequenza vulcanoclastica, se considerato in termini reali, è di circa 2.85 m, valore non direttamente comparabile con quello indicato dalle isopache totali (Figura 1); tuttavia, considerando solo lo spessore dell'orizzonte C, esso coincide con quello dell'eruzione del 79 d.C. stimato per l'area esaminata. Pertanto la difformità nello spessore totale potrebbe essere attribuita al maggiore spessore dell'orizzonte Bb basale, causato dalla presenza di una parte del Complesso Piroclastico Antico (CPA) e/o ad un'irregolare morfologia del substrato carbonatico.

Anche in questo caso, l'analisi dei dati stratigrafici ha evidenziato una distribuzione dei prodotti piroclastici sul versante caratterizzata dalla complessiva riduzione dello spessore della coltre piroclastica all'aumentare dell'angolo di pendio. Inoltre ha evidenziato la terminazione lentiforme dell'orizzonte C, provocata dalla saldatura degli orizzonti B e Bb basale (Figura 10).

Le analisi granulometriche hanno evidenziato risultati comparabili con quelli ottenuti nell'area campione dei Monti di Sarno (Figura 8), risultando molto simili per gli orizzonti B e Bb basale e leggermente diverse per l'orizzonte C, caratterizzato da granulometrie sensibilmente superiori nel valore medio del  $d_{10}$  e del  $d_{50}$ . Per ciò che riguarda le proprietà indice della frazione fine, anche in questo caso gli orizzonti B e Bb sono classificabili nella carta di plasticità di Casagrande come limi di alta plasticità (Figura 8).

Pertanto l'applicazione delle formule empiriche di Hazen, Kozeny e Beyer ha evidenziato caratteristiche simili anche per la conducibilità idraulica, soprattutto per l'orizzonte Bb basale, mentre valori più elevati per l'orizzonte C. Il valore mediano della conducibilità idraulica è pari a circa 1.5 cm/s, in accordo alle caratteristiche granulometriche più grossolane, quindi con differenza nella conducibilità idraulica estesa fino a 5 ordini di grandezza, se riferita ai valori mediani (Figura 9). Comunque, prescindendo dalle differenze tra i risultati ottenuti per i campioni dei Monti di Sarno e quelli Lattari è rilevante sottolineare la grande differenza in conducibilità idraulica tra gli orizzonti C e quello Bb basale.

### MODELLI DI DISTRIBUZIONE LUNGO IL VERSANTE E SUSCETTIBILITÀ A FRANARE DEI DEPOSITI PIROCLASTICI DA CADUTA

Le indagini condotte nelle due aree campione hanno consentito di identificare, sebbene in maniera preliminare, un modello concettuale di distribuzione delle coltri piroclastiche sui versanti carbonatici caratterizzato dalla progressiva riduzione dello spessore all'aumentare del-

and with decimetric beds of dark-grey scoriaceous fine to coarse ashes; 5) R horizon, corresponding to the carbonate bedrock, which discontinuities are filled by the finer grain size fraction of the overlying pyroclastic layer.

From the lithostratigraphic point of view, the C horizon can be attributed to the A.D. 79 eruption. Among the various distinctive elements that have been detected is the different colour of the deposits which varies from yellowish white to greyish white. The total thickness of the pyroclastic overburden, if considered in real value is about 2.85 m, is not directly comparable with that indicated by the total isopach (Figure 1). Nevertheless if we consider the thickness of the C horizon only it is quite correspondent with the one of the A.D. 79 eruption known in a location of the plain close to the examined area. Therefore the difference could be attributed to the greater thickness of the basal Bb horizon, caused by the presence of traces of the Ancient Pyroclastic Complex (APC) and/or by irregular bedrock morphology.

In this case also, the analysis of stratigraphic data has shown a distribution of pyroclastic deposits along the slopes characterised by a general thickness decrease of the pyroclastic cover in accordance with the increase in slope angle. Moreover, it has showed the lens-shape termination of the C horizon, provoked by the direct contact of B and basal Bb horizon (Figure 10).

The grain size analyses gave results comparable with those obtained in the Sarno Mountain sample area (Figure 8), resulting very similar for the B and basal Bb horizons but appreciable different for the C horizon that is characterised by generally greater  $d_{10}$  and  $d_{50}$ . Regarding the index properties of the finer grain size fraction, also in this case B and basal Bb horizon are classifiable in the Casagrande's plasticity chart as high plasticity silt (Figure 8). Consequently the application of Hazen, Kozeny and Beyer empirical formulas permitted the estimation of similar characteristics for the hydraulic conductivity also, particularly for the basal Bb horizon, while higher values for the C horizon, with a median value of about 1.5 cm/s, due to the larger grain sizes, therefore with values extended up to 5 magnitude orders, if observed respect the median values (Figure 9). Finally, except for the difference among results obtained for the sample areas in the Sarno and Lattari Mountains it is important to highlight the wide difference of hydraulic conductivity between C and basal Bb horizons.

### ASH FALL PYROCLASTIC SOIL DISTRIBUTION MODEL AND LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY

The surveys carried out in the two sample areas allowed to identify, even if in a preliminary way, a conceptual model of the pyroclastic soil distribution along the carbonate slopes that is characterised by a progressive thickness reduction correlated to the slope angle, starting from values comparable with the maximum

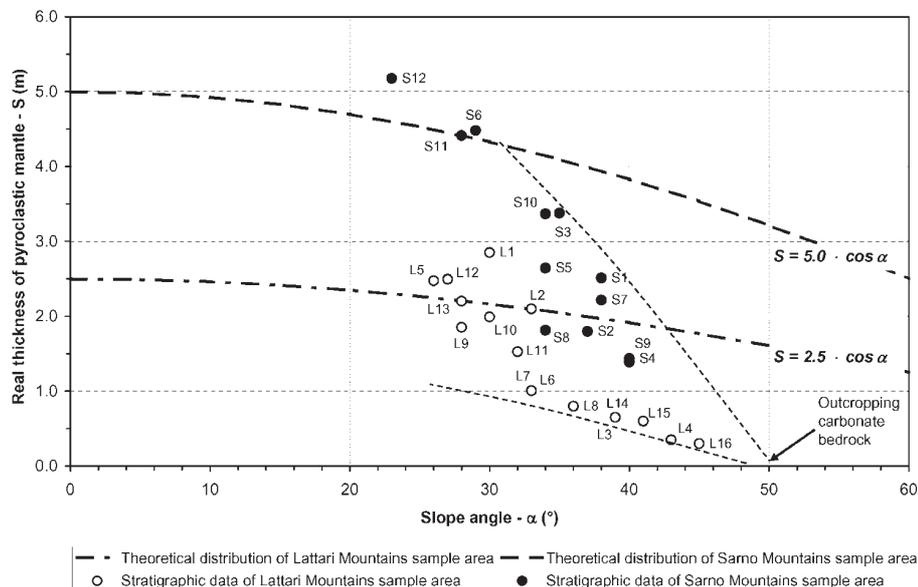


Fig. 11 - Correlazione tra lo spessore reale della coltre piroclastica rilevato nelle due aree campione e l'angolo di pendio. Sono anche visualizzate le distribuzioni teoriche del Complesso Piroclastico Recente (CPR) sui versanti dei Monti di Sarno e Lattari e gli involucri dei dati sperimentali.

- Correlation between real thickness of pyroclastic mantle surveyed in the sample areas and slope angle. Theoretical distribution of the Recent Pyroclastic Complex (RPC), calculated for the slopes of Sarno and Lattari Mountains sample areas and envelopes of experimental data have been also shown

l'angolo di pendio, a partire da valori comparabili con quello massimo teorico precipitato nell'area (Figura 1). In particolare, i valori massimi dello spessore reale della coltre piroclastica sono apparsi comparabili con quello massimo teorico, fino ad un valore dell'angolo di pendio circa pari a 30°, al disopra del quale la coltre diminuisce progressivamente di spessore fino approssimativamente all'annullamento per valori dell'angolo di pendio superiori a 50° (Figura 11). Tuttavia, anche per valori dell'angolo di pendio inferiori a 30°, la coltre può essere occasionalmente ridotta di spessore, in relazione a fenomeni denudazionali localizzati, connessi con erosione lineare. La riduzione dello spessore della coltre piroclastica comporta un progressivo assottigliamento degli orizzonti C, costituiti da lapilli pomicei scarsamente alterati ed in giacitura primaria, fino alla terminazione laterale degli stessi che avviene per saldatura dell'orizzonte B con l'orizzonte Bb basale o con il substrato carbonatico, generalmente per angoli di pendio superiori a 35°. Nell'ambito dell'area campione nei Monti di Sarno, dove la sequenza vulcanoclastica è costituita da due orizzonti di lapilli pomicei, la riduzione dello spessore degli orizzonti C e la sparizione degli stessi appare coinvolgere prima l'orizzonte più superficiale (C) e, successivamente, quello più profondo (Cb). Questa analisi, basata sulla correlazione con l'angolo di pendio, può essere considerata di generale applicazione poiché il fenomeno di riduzione dello spessore della coltre piroclastica è riscontrabile nei diversi ambiti morfologici di versante (HACK, 1965), sebbene analisi specifiche potrebbero essere effettuate in base all'unità morfologica di appartenenza ed agli specifici processi in essa dominanti. Pertanto, la correlazione grafica tra lo spessore della coltre e l'angolo di pendio può essere idealmente riferita ad una generica sezione monte-valle e la variabilità degli spessori, a parità di angolo di pendio, compresa in un involucro minimo e massimo dei punti, essere attribuita ai differenti processi denudazionali agenti local-

theoretical ones fell in the areas (Figure 1). In particular, maximum values of pyroclastic mantle real thickness resulted comparable with the theoretical maximum values up to a slope angle of about 30°, above which the mantle progressively decreases in thickness up to the approximate annulment for slope angle values greater than 50° (Figure 11). Nevertheless, the mantle has occasionally been thinned by localised denudational phenomena, attributable to the linear erosion. The thickness reduction implies a progressive thinning of the C horizons, constituted by pumiceous lapilli scarcely weathered and in original position of deposition, up to the lateral termination that occurs downstream for the direct contact between the B with basal Bb horizon or with the carbonate bedrock, generally for slope angle values greater than 35°. In the sample area of the Sarno Mountains, since the volcanoclastic series is constituted by two pumiceous lapilli horizons, the reduction of the C horizon thickness and their termination seems to involve firstly the upper horizon (C) and subsequently the lower horizon (Cb). Such analysis, based on the correlation with the slope angle values, can be considered generally applicable because the thickness reduction of the pyroclastic mantle can be identified in the different slope morphologic units, even if specific analyses could be carried out for each morphological unit (HACK, 1965) in which specific denudational processes are dominant. Therefore, the graphical correlation between pyroclastic soil thickness and slope angle can be ideally considered as a generic section along the slope dip and the thickness variability, at the same slope angle value, enclosable in upper and lower envelopes, can be attributed to different denudational processes locally acting with different intensities (Figure 11).

The proposed geological model, coupled with hydraulic con-

DISTRIBUTION, HYDROGEOLOGICAL FEATURES AND LANDSLIDE HAZARD OF PYROCLASTIC SOILS ON CARBONATE SLOPES IN THE AREA SURROUNDING MOUNT SOMMA-VESUVIUS

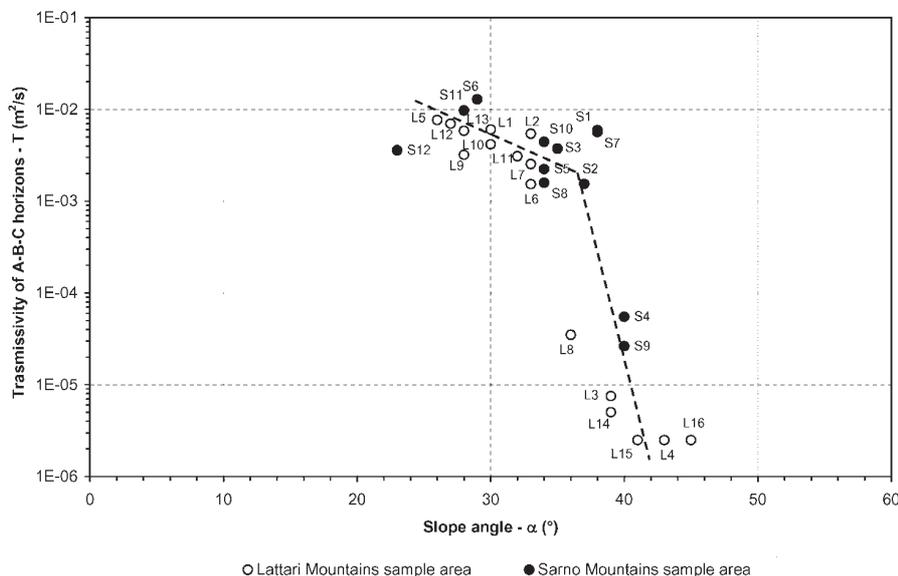


Fig. 12 - Correlazione tra la trasmissività degli orizzonti A-B-C e l'angolo di pendio nelle due aree campione. Sono stati utilizzati nel calcolo i valori della conducibilità idraulica di  $5.0 \times 10^{-3}$  cm/s per gli orizzonti A e B ed il valore di  $6.0 \times 10^{-1}$  cm/s per l'orizzonte C. La linea tratteggiata indica la tendenza alla diminuzione della trasmissività, repentina approssimativamente al disopra dei  $35^\circ$ .

- Correlation between hydraulic transmissivity of A-B-C horizons and the slope angle. Hydraulic conductivity values of  $5.0 \times 10^{-3}$  cm/s, for A and B horizons, and of  $6.0 \times 10^{-1}$  cm/s, for C horizon, have been applied in the calculation. The dashed line indicates the decreasing trend of transmissivity that become abrupt approximately above of  $35^\circ$ .

mente con differente intensità (Figura 11).

Il modello geologico proposto, abbinato alle caratteristiche di conducibilità idraulica dei vari orizzonti, evidenzia l'esistenza di un sistema idrogeologico superficiale a più strati, nell'ambito della coltre piroclastica, caratterizzato da orizzonti a forte contrasto di permeabilità, in cui gli orizzonti C, più permeabili, terminano verso valle e sono chiusi dagli orizzonti B e Bb, molto meno permeabili (Figura 10). Ciò comporta, ipotizzando l'esistenza di una falda sospesa con superficie piezometrica coincidente con il piano campagna, un decremento della trasmissività della coltre piroclastica al crescere dell'angolo di pendio, che diventa repentino con la terminazione laterale dei livelli pomiceo. La stima del suddetto parametro idrodinamico nei profili stratigrafici rilevati nelle due aree campione, ad esclusione dell'orizzonte Bb basale, ha evidenziato valori comparabili della trasmissività tra le due aree campione, per angoli di pendio generalmente inferiori a  $35^\circ$ , attribuibile alla sostanziale coincidenza negli spessori degli orizzonti C. In questo intervallo di pendenza i profili stratigrafici analizzati evidenziano variazioni comprese tra gli ordini di grandezza  $10^{-2} \div 10^{-3}$  m²/s. Mentre, per la chiusura degli orizzonti C, verso valle, approssimativamente per valori dell'angolo di pendio superiore a  $35^\circ$ , la trasmissività diminuisce repentinamente fino all'ordine di grandezza  $10^{-6}$  m²/s (Figura 12).

Il suddetto comportamento idraulico della coltre piroclastica, in connessione con le caratteristiche di resistenza al taglio dei materiali, appare essere fortemente predisponente all'insorgere dei fenomeni di instabilità. Peraltro, la scomparsa degli orizzonti di lapilli pomiceo per angoli di pendio approssimativamente superiori a  $35^\circ$  è compatibile con i dati relativi ai valori più frequenti dell'angolo di pendio nella zona di distacco dei debris slides (DE RISO *et alii*, 1999), con l'intervallo di valori dell'angolo di attrito noti in letteratura per i ter-

ductivity of the different horizons, allows to hypothesise the existence of a multilayered surficial hydrogeological system, within the pyroclastic cover, characterised by horizons with strong contrast in permeability, in which more permeable C horizons are terminated downstream and are enclosed by less permeable B and basal Bb horizons (Figure 10). Such a model implies, if we consider the limit case of a perched water table up to ground surface, a decrease of hydraulic transmissivity of the pyroclastic mantle as the slope angle increases that become abrupt with the termination of the pumiceous lapilli. The estimation of such hydrodynamic parameter by the stratigraphic data derived from the test pits, except for the basal Bb horizon, showed comparable values between the two sample areas for slope angle generally less than  $35^\circ$ , attributable to the approximate similarity of the C horizon thickness. In such slope angle range the analysed stratigraphic records show transmissivity variations comprised in the magnitude orders of  $10^{-2} \div 10^{-3}$  m²/s. While, for the downstream termination of the C horizons, approximately for slope angle values greater than  $35^\circ$ , transmissivity abruptly decreases up to the magnitude order of  $10^{-6}$  m²/s (Figure 12).

The aforementioned hydraulic behaviour of the pyroclastic mantle, in relation with the shear strength characteristics, seems to be definitely predisposing to the landslide initiation. Moreover, the downstream termination of pumiceous lapilli horizons for slope angle values greater than  $35^\circ$  appears to be compatible with the more frequent values of slope angle in the initiation zone of debris slides (DE RISO *et alii*, 1999), with the friction angle values known for this type of pyroclastic soil (CASCINI, 2004; CROSTA & DAL NEGRO, 2003) and with the recurrent involvement of the C horizons in the instability, with thickness reduced respect to the maxi-

reni piroclastici (CASCINI, 2004; CROSTA & DAL NEGRO, 2003) e con il ricorrente coinvolgimento degli stessi nell'instabilità, con spessori assottigliati rispetto a quelli massimi teorici.

Per la conducibilità idraulica degli orizzonti superficiali A e B, considerabile intermedia tra quella degli orizzonti C e Bb basale, il ristagno di acqua in superficie e l'inizio del ruscellamento superficiale, secondo un meccanismo di superamento della capacità di infiltrazione (HORTON, 1933), può essere considerato un fenomeno raro in quanto superiore all'intensità massima di pioggia. Ciò trova conferma nella stima del valore della pioggia di breve durata e forte intensità di durata pari ad 1 ora, con tempo di ritorno pari a 100 anni ed alle quote corrispondenti alle aree campione, rispettivamente pari a circa  $1.9 \times 10^{-3}$  cm/s per l'area nei Monti di Sarno ed a circa  $2.5 \times 10^{-3}$  cm/s per i Monti Lattari, compatibilmente con le differenti caratteristiche delle zone pluviometriche (ROSSI & VILLANI, 1994). Tale evidenza consente di supporre che le precipitazioni di ordinaria intensità diano luogo prevalentemente ad infiltrazione e pertanto sussistano le condizioni favorevoli all'esistenza di un deflusso subsuperficiale (HEWLETT, 1961; HEWLETT & HIBBERT, 1963; WHIPKEY, 1965; KIRKBY, 1978), favorito dalla presenza di strati a diversa conducibilità idraulica ed in particolare dall'orizzonte Bb basale. Quindi il deflusso subsuperficiale avrebbe andamento concorde con la morfologia, in relazione alla distribuzione ed alla stratificazione mantellante della coltre piroclastica, pertanto può essere convergente o divergente in relazione all'assetto morfologico locale. Questo modello idrogeologico superficiale consente pertanto di ipotizzare l'esistenza di fenomeni di return flow (KIRKBY, 1978) nei punti dove il deflusso subsuperficiale, parallelo al pendio, viene a giorno per interruzione degli orizzonti di lapilli pomicei e/o per incremento delle pressioni neutre dovuta alla convergenza del deflusso stesso. Tali punti fungerebbero, quindi, da sorgenti effimere e pertanto da essi inizierebbe il vero e proprio deflusso superficiale con la possibilità di avere fenomeni di erosione incanalata. Il suddetto modello idrogeologico appare compatibile anche con la localizzazione delle aste drenanti di primo ordine gerarchico. Questa ipotesi appare suffragata anche dai dati stratigrafici, che, nell'ambito dei bacini idrografici di ordine zero, quando con pendenze inferiori a  $30^\circ$ , hanno generalmente evidenziato l'esistenza della sequenza vulcanoclastica completa e scarsamente rimaneggiata; mentre, alla base degli stessi bacini di ordine gerarchico zero, in corrispondenza dell'incremento di pendenza, è possibile evidenziare l'inizio dell'asta idrografica di primo ordine gerarchico, la presenza di sequenze piroclastiche incomplete e di terreni rimaneggiati.

A tale condizione idrogeomorfologica può essere ricondotto anche l'insacco dei debris slides, laddove, però, le condizioni già prossime al limite della stabilità, per condizioni naturali o antropiche, possono essere rese critiche da un incremento localizzato delle pressioni neutre, dovuto alla insufficiente trasmissività della sezione drenante dello strato piroclastico rispetto all'apporto del deflusso subsuperficiale. A tale proposito è importante considerare un fenomeno riscontrato spesso immediatamente dopo l'insacco di una frana, e citato da diverse fonti (CELICO *et alii*, 1986), consistente nella presenza di abbondante acqua

num theoretical values.

According to the hydraulic conductivity of the A and B surficial horizons, that can be considered intermediate between C and basal Bb horizons, the water ponding on the ground surface and the initiation of runoff by the excess of the infiltration capacity (HORTON, 1933), can be considered a rare phenomenon because of the greater value of hydraulic conductivity than the ordinary maximum rainfall intensity. This hypothesis is confirmed by the rainfall value of higher intensity for the duration of one hour, with a return period value of 100 years, referred to the altitudes correspondent to the sample areas, respectively  $1.9 \times 10^{-3}$  cm/s for the area in the Sarno Mountains and of about  $2.5 \times 10^{-3}$  cm/s for the area in the Lattari Mountains, compatibly with the different characteristics of the pluviometrical zones (ROSSI & VILLANI, 1994). Such evidence allows to hypothesise that the ordinary intensity rainfalls predominantly generate infiltration and therefore that there are favourable conditions to the existence of throughflow phenomenon (HEWLETT, 1961; HEWLETT & HIBBERT, 1963; WHIPKEY, 1965; KIRKBY, 1978), favoured by the existence of horizons with different hydraulic conductivity and particularly by the basal Bb horizon. Throughflow has flow paths concordant with the morphology because of the mantling distribution of the pyroclastic overburden. Therefore it can be convergent or divergent in accordance with the local morphology. Such surficial hydrogeological model allows to suppose the existence of return flow phenomena (KIRKBY, 1978) in points where throughflow parallel to the slope emerges because of the interruption of the pumiceous lapilli and/or because of an increase of positive pore pressure due to flow convergence. Therefore, the aforesaid points would behave as ephemeral springs and the runoff and the linear erosion would be initiated by them. This hydrogeological model appears to be compatible with the localisation of the first hierarchical order channels. Such hypothesis is sustained by stratigraphic data, and generally have showed the existence of a complete and scarcely reworked volcaniclastic sequence in the zero order basins and with slope angle values less than  $30^\circ$ ; while a greater presence of reworked pyroclastic soils at the base of the same zero order basins, in correspondence of the slope angle increase.

The debris slides initiation can be also related to the previously described hydrogeomorphological model, whereas the stability conditions in relationship with natural or artificial factors are already close to the limit equilibrium and they can become critical because of a localised increase in pore water pressure due to the insufficient transmissivity of the pyroclastic horizons respect to the throughflow discharge. For such purpose it is important to consider a phenomenon often observed after the landslide initiation, cited by different authors (CELICO *et alii*, 1986), consisting in the abundant presence of groundwater outflow in the landslide depletion zone, prolonged for up to some hours after the occurrence of landslide. The phenomenon has been interpreted up to now as clear

sorgiva nell'ambito della zona di distacco, fino a diverse ore dopo l'evento franoso. Tale fenomeno, che è stato finora interpretato a favore delle ipotesi di contribuzione ai fenomeni di instabilità da parte di apporti idrici provenienti dal substrato carbonatico, potrebbe invece corrispondere allo svuotamento di una falda sospesa nell'ambito di un livello di lapilli pomicei soprastante il coronamento della frana stessa.

## CONCLUSIONI

I risultati illustrati in questo lavoro consentono di delineare nuove linee di ricerca, riguardanti la suscettibilità a franare delle coltri piroclastiche che ammantano i versanti carbonatici peri-vesuviani, avendo ipotizzato i fattori che controllano i processi morfoevolutivi delle stesse. In base ai dati discussi è possibile ipotizzare un modello di formazione di una falda sospesa occasionale nell'ambito della coltre piroclastica. Inoltre l'assetto stratigrafico della coltre lascerebbe escludere l'ipotesi della formazione di una falda sospesa nell'ambito della porzione più superficiale dell'ammasso roccioso carbonatico, soprattutto per la costante presenza di un orizzonte piroclastico basale, fortemente pedogenizzato, a bassa permeabilità, che costituisce il riempimento delle discontinuità dell'ammasso roccioso. Tuttavia la formazione della falda sospesa occasionale, nell'ambito della parte più esterna dell'ammasso roccioso e con deflusso parallelo al pendio, non può essere esclusa per la possibilità che il substrato carbonatico possa ricevere alimentazione diretta dalle parti sommitali dei rilievi, dove esso spesso è privo di coperture piroclastiche; tale falda potrebbe pertanto contribuire all'innescio dei debris slides, quando per fattori carsici o strutturali dell'ammasso essa può interagire con la coltre piroclastica oppure laddove essa può alimentare lateralmente il manto di terreni piroclastici.

I risultati discussi hanno inoltre evidenziato un valore molto alto della trasmissività della coltre piroclastica, quando in presenza di orizzonti di lapilli pomicei, che, in relazione a fenomeni di ricarica zenitale consentirebbe la formazione di una zona di saturazione di altezza modesta e di breve durata a causa dell'elevata capacità di drenaggio dell'orizzonte C, essendo quest'ultima proporzionale alla trasmissività e all'elevata inclinazione dell'interfaccia con l'orizzonte basale. Tuttavia, la terminazione laterale degli orizzonti C, per angoli di pendio attorno al valore di 35°, e la complessiva riduzione di spessore della coltre piroclastica, possono determinare localmente una diminuzione della portata di deflusso con l'incremento localizzato delle pressioni neutre, e quindi condizioni maggiormente critiche per la stabilità. A tale proposito la convergenza del deflusso subsuperficiale appare essere un fattore certamente favorevole all'incremento localizzato delle pressioni neutre, anche se questa condizione può non essere necessariamente associabile a quella della convergenza morfologica ma anche all'andamento planaltimetrico della terminazione dell'orizzonte di lapilli pomicei, che potrebbe condizionare il recapito verso il punto dove esso raggiunge la quota più bassa. Secondo questo schema, quindi, un debris slide occorrente in una zona, eventualmente posizionata anche su un versante a profilo trasversale rettilineo o convesso, comporterebbe una migrazione verso monte della terminazione dell'orizzonte pomiceo cui conseguirebbe

evidence that instabilities are provoked by a perched water table flowing in the surficial part of the carbonate bedrock, instead in accordance with the proposed model we can suppose that the flow could be attributed to the emptying of a saturated zone in the upper part of landslide crown within pumiceous horizons.

## CONCLUSIONS

The results discussed in this paper allow to outline new objectives of research concerning the landslide hazard of pyroclastic ash fall deposits mantling peri-vesuvian carbonate slopes, after identifying the factors that control their denudational processes. The analyzed data allow to hypothesize a surficial hydrogeological model in which an occasional perched water table can exist within pyroclastic soil mantle, because stratigraphic characteristics generally lead to exclude the formation of a temporary perched water table within the surficial part of the carbonate bedrock, above all for the existence of a low permeability basal Bb horizon that fills bedrock discontinuities. Nevertheless the temporary existence of a groundwater flow in the external part of the carbonate bedrock can not be absolutely excluded according to the possibility that carbonate bedrock can receive direct recharge in the top areas, whereas pyroclastic mantle often does not exist. Such parallel to the slope surficial groundwater flow could provoke debris slides initiation where it involves overlying pyroclastic mantle by means of local karstic or structural factors as well as where it can laterally feed the pyroclastic mantle.

The results discussed put in evidence high transmissivity values of the pyroclastic mantle when horizons of pumiceous lapilli exist which, according to recharge velocity due to direct infiltration, would allow the formation of a temporary, thin saturation zone owing to the high drainage capacity of the C horizons. In fact, as known, the latter is proportional to the transmissivity and to the high gradient value of the interface between C and basal Bb horizons. However, the downstream termination of C horizons, for slope angle values of about 35°, and the general thickness reduction of the pyroclastic mantle, could determine a local decrease of the filtration discharge and a corresponding increase in pore water pressure which can lead to instability conditions. In such model the throughflow convergence seems to be a factor certainly favorable to the local increase of pore water pressures even if this condition can not be necessarily connected with the morphologic convergence but also with the three-dimensional geometry of the pumiceous lapilli horizons terminations. In fact, the latter could influence drainage toward points with the lowest altitude. In accordance with this scheme, a debris slide occurring in a zone, even if it is located on a slope with rectilinear or convex transversal profile, would cause an upstream migration of the lapilli horizon termination with the consequent resettlement of the throughflow outflow in a lateral zone, whereas the lapilli horizon termination reaches lowest altitude. This

rebbe la successiva migrazione del recapito del deflusso subsuperficiale in una zona laterale, laddove la terminazione dell'orizzonte di lapilli pomicei raggiunge una quota inferiore. Ciò sarebbe peraltro favorito dalla pedogenesi della scarpata di frana e/o dal deposito di materiale rimaneggiato, che costituirebbe localmente un limite di permeabilità. Con questo modello di migrazione laterale della zona di distacco potrebbe anche essere giustificata la non ripetibilità del fenomeno nello stesso punto ed il coinvolgimento degli orizzonti di lapilli pomicei.

Secondo tale schema, le discontinuità naturali della coltre piroclastica, rappresentate da incrementi di pendenza verso valle, per condizioni strutturali del substrato carbonatico, comportano una riduzione dello spessore della coltre, una chiusura laterale degli orizzonti pomicei e pertanto condizioni di maggiore suscettibilità a franare. Anche i tagli artificiali della coltre, certamente di per sé predisponenti all'instabilità, per l'annullamento del supporto laterale, possono essere considerati maggiormente critici in quelle condizioni in cui esiste una combinazione sfavorevole di angolo di pendio e di riduzione dello spessore degli orizzonti di lapilli pomicei.

È certamente interessante segnalare il ruolo degli apparati radicali del bosco, generalmente di castagno nei rilievi peri-vesuviani, così come è stato possibile osservare nelle trincee eseguite e nei tagli artificiali o naturali. Gli apparati radicali risultano non attraversare gli orizzonti pomicei quando questi sono spessi, quindi generalmente per angoli di pendio inferiori a 30°, ma solo quando questi strati hanno uno spessore fortemente ridotto, o quando pressoché assenti. In quest'ultimo caso, per pendenze superiori a 35°, gli apparati radicali potrebbero avere un decisivo effetto stabilizzante sulla coltre, ancorando le coperture alle discontinuità del substrato carbonatico, e quindi conferendo alla coltre piroclastica un effetto di coesione apparente. Ciò consentirebbe la presenza di terreni piroclastici per angoli di pendio superiori a quelli caratteristici dell'angolo di attrito.

L'uso del suolo ha in ogni caso un ruolo fondamentale sulla tipologia e sull'intensità dei processi denudazionali che interessano la coltre piroclastica; infatti, la presenza del bosco consente la protezione dall'erosione della coltre piroclastica, così com'è possibile evincere dalla generale scarsa presenza di coperture piroclastiche sui crinali principali, dove la vegetazione boschiva è rada o assente, o dove è stato effettuato un cambio di destinazione da bosco a pascolo. In queste condizioni, le coperture piroclastiche appaiono poco spesse, o addirittura assenti, anche per angoli di pendio sostanzialmente bassi.

Le ipotesi ed i modelli concettuali formulati in questo lavoro consentiranno di indirizzare le ricerche future e le sperimentazioni di campo verso la verifica sperimentale dei processi di infiltrazione e deflusso subsuperficiale, sebbene i dati sembrano evidenziare che negli orizzonti di lapilli pomicei, per l'elevata trasmissività degli stessi, la falda sospesa occasionale possa costituire un fenomeno transitorio molto rapido e difficilmente rilevabile, oltre che condizionato dalla morfologia dell'interfaccia con l'orizzonte Bb basale. Ne consegue che le ricerche di campo dovrebbero essere rivolte al monitoraggio idrologico nell'ambito della fascia di pendenza critica, dove potrebbe generarsi

could be possible by the development of pedogenetic processes on the landslide scar and/or the deposition of reworked material that would constitute a permeability boundary. This conceptual model of lateral migration of the depletion zone could justify the non-repeatability of the initial landslides in the same location and the involvement of the pumiceous lapilli horizons.

In the previous schematic model, natural discontinuities of the pyroclastic mantle, represented by downstream slope angle increase, owing to structural condition of the carbonate bedrock, induce a thickness reduction, a downstream termination of the pumiceous lapilli horizons and therefore higher landslide susceptibility conditions. The artificial cuts of the pyroclastic mantle, certainly themselves predisposing to the instability by the annullment of the lateral support, can be considered mostly critical in those conditions in which an unfavorable combination of slope angle and thickness reduction of lapilli horizons exists.

It is certainly significant to discuss the role of the root apparatuses of the wood, generally consisting of chestnut tree along the peri-vesuvian slope, as they have been surveyed in test pits or in the other artificial and natural cuts. In fact, they do not cross the pumiceous lapilli horizons with greater thickness, therefore for slope angle values less than 30°, but only when these horizons are thinned or have a negligible thickness. In the latter case, for slope angle values greater than 35°, root apparatuses could have a stabilizing effect on the pyroclastic mantle anchoring the overburdens to the bedrock discontinuities and therefore giving to the pyroclastic cover an apparent cohesion effect. This would permit the presence of pyroclastic soils with slope angle values greater than the friction angle value.

Land use has a fundamental role on the typology and intensity of the denudational processes of the pyroclastic mantle because wood existence allows the preservation of the overburdens from the erosion, as can be recognized by the scarce presence of pyroclastic soils on the principal morphological divides where the wood cover is poor or absent, or whereas landuse has been changed from wood to pasture. In such conditions the pyroclastic mantle is thin or absent, even with lower slope angle values.

The hypotheses and the conceptual models proposed in this paper will permit to plan future research and field experimentations finalized to the instrumental demonstration of the infiltration and throughflow processes. Even if the discussed data seem to indicate that the perched water table would be a rapid temporary and difficult to detect phenomenon, according to the high transmissivity and its specific localization due to the morphology of the interface between C and basal Bb horizon. It follows that field researches should be oriented to the hydrological monitoring in the critical slope angle range, where the increase in pore water pressure in the lapilli horizons could occur.

In conclusion, the results proposed in this paper can be considered functional for the implementation of a distributed stability

## DISTRIBUTION, HYDROGEOLOGICAL FEATURES AND LANDSLIDE HAZARD OF PYROCLASTIC SOILS ON CARBONATE SLOPES IN THE AREA SURROUNDING MOUNT SOMMA-VESUVIUS

un incremento delle pressioni neutre negli orizzonti di lapilli pomici.

In definitiva, i risultati presentati in questo studio possono essere considerati a carattere di indirizzo per l'applicazione di un modello di stabilità distribuito delle coperture piroclastiche, rendendo possibile l'utilizzazione del modello del tipo SHALLSTAB (MONTGOMERY *et alii*, 1994), nei quali lo spessore dei terreni di copertura e le caratteristiche idrodinamiche degli stessi sono considerate costanti, analizzando soltanto l'effetto della topografia sulla stabilità delle coperture.

model of pyroclastic overburdens, allowing the use of a model like Shallstab (MONTGOMERY *et alii*, 1994), in which the soil thickness and the soil hydrodynamic characteristics are considered constant, analysing only the effect of topography on the soil stability.

### OPERE CITATE / REFERENCES

- BRANCACCIO L., CINQUE A., RUSSO F. & SGAMBATI D. (2000) - *Le frane del 5-6 maggio 1998 sul gruppo montuoso Pizzo d'Alvano (Campania): osservazioni geomorfologiche sulla loro distribuzione e sulla dinamica delle connesse colate*. Quaderni di Geologia Applicata, **7**(1): 5-36.
- BUDETTA P. & DE RISO R. (2004) - *The mobility of some debris flows in pyroclastic deposits of the northwestern Campanian region (southern Italy)*. Bulletin of Engineering Geology and Environment, **63**: 293-302.
- CALCATERRA D., SANTO A., DE RISO R., BUDETTA P., DI CRESCENZO G., FRANCO I., GALIETTA G., IOVINELLI R., NAPOLITANO P. & PALMA B. (1999) - *Fenomeni franosi connessi all'evento pluviometrico del Gennaio 1997 in Penisola Sorrentina-M.ti Lattari, primo contributo*. Atti IX Congr. Naz. Geologi, Roma 17-20 aprile 1997, **1**: 23-231.
- CASCINI L. (2004) - *The Flowslides of May 1998 in the Campania Region: The Scientific Emergency Management*. Rivista italiana di Geotecnica, **2**: 11-44.
- CASCINI L., GUIDA D., NOCERA N., ROMANZI G. & SORBINO G. (2000) - *A preliminary model for the landslides of May 1998 in Campanian Region*. Proceedings 2nd International Symposium on Geotechnics on Hard Soil-Soft Rock, Napoli. Balkema: 1623-1649.
- CELICO P., GUADAGNO F.M. & VALLARIO A. (1986) - *Proposta di un modello interpretativo per lo studio delle frane nei terreni piroclastici*. Geologia Applicata e Idrogeologia, **21**: 173-193.
- CHIRICO G.B., CLAPS P., ROSSI F. & VILLANI P. (2000) - *Hydrologic conditions leading to debris-flow initiation in the Campanian volcanoclastic soil. Mediterranean Storms*. Proceedings of the EGS Plinius Conference, pp. 473-484.
- CROSTA G. & DAL NEGRO P. (2003) - *Observations and modelling of soil slip-debris flow initiation processes in pyroclastic deposits: the Sarno 1998 event*. Natural Hazards and Earth System Sciences, **3**: 53-69.
- CRUDEN D.M. & VARNES D.J., 1996. Landslides Types and Processes. In: "Landslides: Investigation and Mitigation". Transportation Research Board. National Academy of Sciences: 36-75.
- DE GENNARO M., LANGELLA A., COLELLA A. & BUONODONNO A. (2000) - *Caratterizzazione mineralogica delle vulcanoclastiti del Pizzo d'Alvano*. Quaderni di Geologia Applicata, **7**(1): 49-58.
- DE RISO R. & NOTA D'ELOGIO E. (1973) - *Sulla franosità della zona sud-occidentale della Penisola Sorrentina*. Memorie e Note dell'Istituto di Geologia Applicata, **12**, Napoli.
- DE RISO R., BUDETTA P., CALCATERRA D. & SANTO A. (1999) - *Le colate rapide in terreni piroclastici del territorio campano*. Atti della conferenza su "Previsione e prevenzione di movimenti franosi rapidi, Trento: 133-150.
- DE VITA P. & PISCOPO P. (2002) - *Influences of hydrological and hydrogeological conditions on debris flows in peri-vesuvian hillslopes*. Natural Hazards and Earth System Sciences, **2**: 1-9.
- DE VITA P. (2000) - *Fenomeni di instabilità delle coperture piroclastiche dei Monti Lattari, di Sarno e di Salerno (Campania) ed analisi degli eventi pluviometrici determinanti*. Quaderni di Geologia Applicata, **7**: 213-239.
- DE VITA P., AGRELLO D. & AMBROSINO F. (2005) - *Landslide susceptibility assessment in ash-fall pyroclastic deposits surrounding Somma-Vesuvio: application of geophysical surveys for soil thickness mapping*. Journal of Applied Geophysics, **59**(2): 126-139.
- DEL PRETE M., GUADAGNO F.M. & HAWKINS A.B. (1998) - *Preliminary report on the landslide of 5 May 1998*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, **57**: 113-129.
- DI CRESCENZO G. & SANTO A. (1999) - *Analisi geomorfologica delle frane da scorrimento-colata rapida in depositi piroclastici della Penisola sorrentina*. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, **22**: 57-72.
- DIETRICH W.E., RENEAU S.L. & WILSON C.J. (1986) - *Hollows, colluvium and landslides in soil-mantled landscapes*. In: Hillslope processes, Abrahams A.D. ed., Allen and Unwin, pp. 361-388.
- ESPOSITO L. & GUADAGNO F.M. (1998) - *Some special geotechnical properties of pumice deposits*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, **57**: 41-50.
- FIORILLO F., GUADAGNO F.M., AQUINO S. & DE BLASIO A. (2001) - *The December 1999 Cervinara landslides: further debris flows in the pyroclastic deposits of Campania (southern Italy)*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, **60**: 171-184.
- FISHER R.V. (1985) - *Pyroclastic rocks*. Springer, 472 pp.

**DISTRIBUZIONE, CARATTERI IDROGEOLOGICI E SUSCETTIBILITÀ A FRANARE DELLE COLTRI PIROCLASTICHE  
SUI VERSANTI CARBONATICI PERI-VESUVIANI-VESUVIANI**

- GUADAGNO F.M. & MAGALDI S. (2000) - *Considerazioni sulle proprietà geotecniche dei suoli allofanici di copertura delle dorsali carbonatiche campane*. Quaderni di Geologia Applicata, **2**: 143-155.
- GUADAGNO F.M. (1991) - *Debris flows in the Campanian volcanoclastic soils (Southern Italy)*. In: Proc. Int. Conf. on Slope stability engineering: developments and applications, (Ed) Chandler, R. J., Isle of Wight, UK, 109-114.
- GUADAGNO F.M., MARTINO S. & SCARASCIA MUGNOZZA G. (2000) - *L'influenza dei tagli sulla stabilità delle coltri piroclastiche dell'Appennino campano*. Atti Conferenza Internazionale "La città fragile" Ordine dei Geologi, Dicembre 2000, Roma.
- HACK J.T. (1965) - *Geomorphology of the Shenandoah Valley, Virginia and West Virginia, an origin of the residual ore deposits*. U.S. Geological Survey Professional Paper 484, 84 pp.
- HEWLETT J.D. & HIBBERT A.R. (1963) - *Moisture and energy conditions within a sloping soil mass during drainage*. Journal of Geophysical Research, **68**: 1081-1087.
- HEWLETT J.D. (1961) - *Soil moisture as a source of base flow from steep mountain watersheds*. Southeastern Forest Experiment Station, Asheville, N. Carolina, U.S. Dept. Agric. - Forest Ser., Station Paper n. 132.
- HORTON R.E. (1933) - *The role of infiltration in the hydrological cycle*. American Geophysical Union, Transaction, **14**: 446-460.
- HUNGR O., EVANS S.G., BOVIS M.J. & HUTCHINSON J.N. (2001) - *A review of the classification of landslides of flow type*. Environmental and Engineering Geoscience, **7**(3): 221-238.
- KIRKBY M.J. (1978) - *Hillslope hydrology*. John Wiley & Sons, p. 389.
- LIRER L., PESCATORE T., BOOTH B. & WALKER J.P.L. (1973) - *Two plinian pumice-fall deposits from Somma-Vesuvius*. Geological Society American Bull., **84**: 759-772.
- MAEDA T., SOMA K. & WARKENTIN B.P. (1983) - *Physical and engineering characteristics of volcanic ash soils in Japan compared with those in other countries*. Irrigation Engineering Rural Planning, **3**: 16-31.
- MAEDA T., TAKENAKA H. & WARKENTIN B.P. (1977) - *Physical properties of allophone soils*. Advances in Agronomy, **29**: 229-264.
- MONTGOMERY D.R. & DIETRICH W.E. (1994) - *A Physically-Based Model for the Topographic Control on Shallow Landsliding*. Water Resources Research, **30**: 1153-1171.
- REVELLINO P., HUNGR O., GUADAGNO F.M. & EVANS G.S. (2004) - *Velocity and runout simulation of destructive debris flows and debris avalanches in pyroclastic deposits, Campania region, Italy*. Environmental Geology, **45**: 295-311.
- ROLANDI G., BARTOLINI F., COZZOLINO G., ESPOSITO N. & SANNINO D. (2000) - *Sull'origine delle coltri piroclastiche presenti sul versante occidentale del Pizzo d'Alvano*. Quaderni di Geologia Applicata, **7-1**: 213-235.
- ROLANDI G., MARAFFI S., PETROSINO P. & LIRER L. (1993a) - *The Ottaviano eruption of Somma-Vesuvio (8000 y B.P.): a magmatic alternating fall and flow forming eruption*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, **58**: 43-65.
- ROLANDI G., MASTROLORENZO G., BARRELLA A.M. & BORRELLI A. (1993b) - *The Avellino plinian eruption of Somma-Vesuvius (3760 y.B.P.): the progressive evolution from magmatic to hydromagmatic style*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, **58**: 67-88.
- ROLANDI G., PETROSINO P., MCGEEHIN J. (1998) - *The interplinian activity at Somma-Vesuvius in the last 3500 years*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, **82**: 19-52.
- ROSI M., PRINCIPE C. & VECCI R. (1993) - *The 1631 Vesuvius eruption. A reconstruction based on historical and stratigraphical data*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, **58**: 151-182.
- ROSSI F. & VILLANI P. (1994) - *Valutazione delle piene in Campania* - Pubblicazione Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche, Unità Operativa 1.9.
- SCHMIDT R. (1981) - *Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments: Recommendations of the I.U.G.S. Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks*. Geology, **9**: 41-43.
- SCOTTO DI SANTOLO A., NICOTERA M.V. & RAMONDINI M. (2000) - *Analysis of instability phenomena affecting a cut slope in unsaturated pyroclastic soils*. In: Landslides in research, theory and practice (Eds) Bromhead, E., Dixon, N., Ibsen, M.-L., Proc. 8th Int. Symp. on Landslides, Cardiff, UK, 1353-1360.
- TERRIBILE F., DI GENNARO A., ARONNE G., BASILE A., BUONANNO M., MELE G. & VINGIANI S. (2000) - *I suoli delle aree di crisi di Quindici e Sarno: aspetti pedogeografici in relazione ai fenomeni franosi del 1998*. Quaderni di Geologia Applicata, **7-1**: 81-95.
- THORP J. & SMITH G.D. (1949) - *Higher categories of soil classification: order, suborder, and great soil groups*. Soil Science, **67**: 117-126.
- USDA (1998) - *Keys to soil taxonomy*. USDA-Nat. Res. Cons. Service, 8th ed., 328 pp.
- VUKOVIC M. & SORO A. (1992) - *Determination of hydraulic conductivity of porous media from grain-size distribution*. Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch, Colorado.
- WADA K. (1985) - *The Distinctive Properties of Andosols*. In: Advances in Soil Sciences, Springer-Verlag, **2**: 174-229.
- WHIPKEY R.Z. (1965) - *Subsurface stormflow from forested slopes*. Bulletin of International Association Science of Hydrology, **10**: 74-85.
- WP/WLI (1993b) - *Multilingual landslide Glossary*. Bi-Tech Publisher, Richmond, British Columbia, Canada, 59 pp.

*Received June 2005 - Accepted January 2006*