

Caratterizzazione geotecnica e valutazione delle condizioni di stabilità delle coperture detritiche nell'area archeologica di Machu Picchu (Perù)

Riccardo Fanti, Stefano Morelli, Massimiliano Nocentini, Pietro Vannocci

Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze – Via La Pira, 4 – 50121 Firenze

Fax: 055.275.6296 ; riccardo.fanti@unifi.it; stefano.morelli@unifi.it; massimiliano.nocentini@unifi.it; pietro.vannocci@unifi.it

Debris sheets geotechnical study for the analysis of slope instability conditions in the Machu Picchu area (Peru)

ABSTRACT: Since 1997 the Machu Picchu area has been in the spotlight for its slope instability, when Carreno & Bonnard described the general geological and geomorphological condition, and the further studies of Sassa et alii contributed to define the interpretation of the structures, as the result of the existence of a main deep slow slide involving the archaeological area. However, the attention of these studies focused on the condition of the entire slope, with a lesser consideration for the shallow landslides, even if debris flows often occur and cause damages (like in 1995-1996, along the access road to the site) and real catastrophes (such as the one in 2004, when the day after Easter a channelized debris flow produced eleven casualties in Aguas Calientes, the close tourist town). A more general approach to the instability conditions of the site was undertaken in 2002, with the start of an international project, coordinated by K. Sassa and carried out in the framework of the activity of the International Consortium on Landslides. As constituent of this project, an integrate study of the instability condition of the debris was established: in this work the results of the field survey and the geotechnical analysis are shown. In particular, starting from the field data of the *Carretera Hiram Bingham* slope, two aspects has been handled: the interpretation of the distribution of debris thickness and the assessment of the working order of the runoff drainage system. Both the topics and the potentiality of their integration were approached in this work and the results constitute the first step for an exhaustive debris flow hazard assessment in this area, where the interactions between slope instability and land use can produce some very critical conditions.

Key terms: Machu Picchu, Slope instability, Debris flows, Debris sheet map

Termini chiave: Machu Picchu, Instabilità di versante, Colate detritiche, Mappa delle coperture detritiche

Riassunto

L'area di Machu Picchu, dichiarata patrimonio mondiale dell'umanità dall'UNESCO nel 1983, è uno dei siti archeologici più famosi e visitati al mondo. Ogni giorno diverse centinaia di turisti raggiungono l'area archeologica della Cittadella percorrendo la *Carretera Hiram Bingham*, unica strada di accesso al sito. Il versante su cui si snoda la strada è stato caratterizzato nel tempo da numerosi fenomeni di instabilità, riconducibili per lo più a fenomeni di rapida mobilitazione del materiale di copertura dei versanti: appare quindi evidente l'importanza di una approfondita caratterizzazione della coltri detritiche, volta alla valutazione della loro distribuzione e delle relative condizioni di stabilità.

Durante sopralluoghi effettuati nell'ambito di alcuni progetti di ricerca svolti sotto l'egida dell'*International Consortium on Landslides* sono stati realizzati oltre 80 punti di controllo lungo il versante raccogliendo dati sulla distribuzione e sullo spessore delle coperture detritiche e realizzando, ove possibile, misurazioni dei caratteri geotecnici del materiale e delle condizioni idrologiche superficiali.

Nel presente lavoro viene presentata una sintesi interpretativa di detti dati di campagna, con particolare riguardo alla mappatura dello spessore delle coltri detritiche e dell'efficienza delle opere di drenaggio superficiale. I risultati, che comprendono l'evidenza di aree con coperture spesse oltre 7 metri e la ricognizione della modesta efficienza del sistema di smaltimento delle acque di scorrimento, rappresentano un fondamentale dato di ingresso per le future verifiche di stabilità complessive, i cui risultati consentiranno di individuare le zone potenzialmente più propense all'innesco di fenomeni di scorrimento e colata.

Introduzione

Machu Picchu costituisce uno dei simboli della storia dell'uomo e delle sue civiltà, benché parte rilevante della sua fama derivi dallo scenario che la comprende: l'area archeologica appare infatti incastonata tra le vette della Cordigliera andina e ciò contribuisce a farne una delle mete turistiche più famose del mondo fin dagli anni della sua scoperta, avvenuta nel 1911 ad opera dell'esploratore Hiram Bingham.

La presenza dei visitatori, fonte primaria dell'economia peruviana, rappresenta tuttavia anche un elemento incidente nell'equilibrio ambientale dell'area, ove si registrano frequenti eventi franosi, principalmente di natura superficiale.

Una serie di tali eventi è occorsa tra dicembre 1995 e gennaio 1996, causando l'interruzione dell'unica strada di accesso all'area archeologica, la *Carretera Hiram Bingham*, percorsa ogni giorno da decine di autobus provenienti dall'insediamento di *Machu Picchu Pueblo* (o *Aguas Calientes*), villaggio di circa 1.500 abitanti in grado di ospitare altrettanti turisti, posto nel fondovalle e collegato al capoluogo regionale Cusco unicamente per mezzo della linea ferroviaria.

Gli eventi suddetti hanno posto all'attenzione della comunità scientifica internazionale le condizioni di dissesto idrogeologico dell'area, evidenziate primariamente da Carreño & Bonnard (1997) e successivamente inserite in un'interpretazione geologico-strutturale a scala di versante da Sassa et al. (2001; 2002).

Sulla scorta delle considerazioni di questi ultimi, a partire dal 2002, si è sviluppato sul tema del rischio di frana e del monitoraggio dell'area un progetto internazionale nell'ambito delle attività dell'*International Consortium on Landslides*, comprendente ricercatori di diversi paesi.

Fra questi è attivo un gruppo italiano, coordinato da P. Canuti (Università di Firenze) e C. Margottini (ENEA), la cui attività è finalizzata alla sperimentazione integrata di tecniche di monitoraggio (Progetto MIUR-Interfrasi).

Nel quadro di tale progetto sono state realizzate negli ultimi anni quattro campagne di rilevamento geologico, geomorfologico e geostrutturale finalizzate ad una migliore comprensione dei meccanismi di frana in atto e potenziali, nonché a fungere da supporto alle attività di misura e controllo effettuate con metodi tradizionali (GPS) e innovativi (interferometria radar da satellite e da terra).

Durante le campagne di rilevamento sono stati acquisiti numerosi dati utili all'interpretazione dei processi e delle strutture presenti, sia relativamente alla eventuale esistenza e caratterizzazione di fenomeni gravitativi lenti ad elevata profondità quali quelli richiamati da Sassa et al. (2002), sia in merito alle condizioni di innesco di movimenti superficiali a carico delle coltri detritiche, in particolare lungo il versante della *Carretera* ove maggiore risulta il rischio associato.

Il presente lavoro è dedicato all'illustrazione dei risultati relativi a quest'ultimo aspetto, affrontato attraverso la determinazione di dettaglio delle aree di distribuzione delle coperture detritiche e dei relativi caratteri geometrici e geotecnici e la considerazione del regime idrico a carico di dette coperture, con particolare riguardo all'individuazione dei sistemi di drenaggio presenti e alla loro efficienza.

Inquadramento geologico dell'area

L'assetto strutturale generale e i principali elementi, quali

diaciasi e piani di faglia, hanno fortemente condizionato l'evoluzione geomorfologica dell'area di Machu Picchu, situata sulla Cordigliera Orientale andina (Figura 1). Ne è testimonianza il reticolo idrografico locale che si caratterizza per il *pattern* rettangolare con angoli circa retti fra il fiume Urubamba, asta principale del reticolo, e i maggiori affluenti. La sua morfologia è pertanto rispondente al sistema di fratture, quali le faglie Machu Picchu e Huayna Picchu, così indicate dal nome dei rilievi che delimitano, che formano con andamento NO-SE il graben su cui sorge la cittadella.

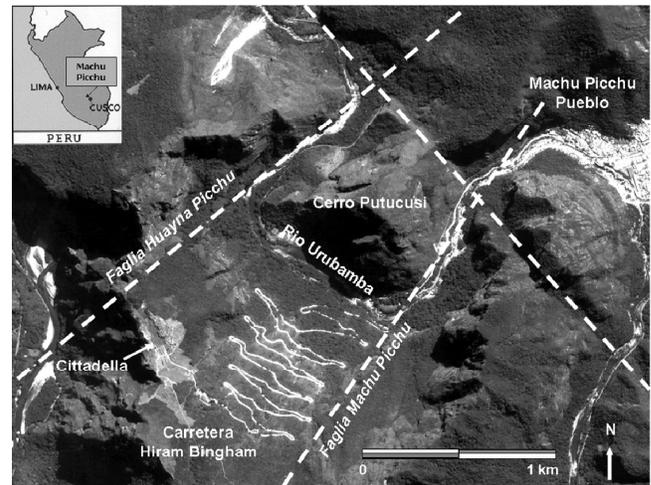


Figura 1 – L'area di studio con evidenziati gli elementi tettonici principali (immagine Quickbird, maggio 2004).

The study area, with the main tectonic lineaments.

Da un punto di vista geologico l'area è caratterizzata dall'ubiquitario affioramento di rocce ignee intrusive appartenenti al batolite di Machu Picchu, un corpo plutonico di forma triangolare, riferibile al Permiano-inizio Triassico (circa 246 ± 10 Ma B.P.) e caratterizzato dalla presenza di graniti e, secondariamente, di granodioriti (Carlotto et al., 1999). Il batolite di Machu Picchu si inserisce nel contesto di quelle associazioni a dominante granitica che, nelle parti più interne del continente sudamericano, accompagnano solo subordinatamente le prevalenti associazioni calcocalcine del plutonismo della regione andina, laddove la crosta oceanica è stata o è in subduzione al di sotto della crosta continentale ispessita.

Il corpo granitico è interessato da sistemi di fratturazione complementari a quello principale parallelo alle faglie bordiere del graben ($45^\circ/90^\circ$), riconosciute in campagna in giaciture $130^\circ/90^\circ$, $30^\circ/30^\circ$, $30^\circ/60^\circ$, $225^\circ/65^\circ$ e $315^\circ/30^\circ$ (Canuti et al., 2005) e tale quadro strutturale determina un forte controllo sull'intero assetto geomorfologico dell'area, fino a far ipotizzare la presenza di un lento movimento gravitativo profondo che interesserebbe l'intero versante della Cittadella (Sassa et al., 2001; 2002).

Valori di pericolosità ben più elevati sono peraltro

associati ad altre tipologie di fenomeni franosi, quali crolli e ribaltamenti e, soprattutto, fenomeni di mobilitazione delle coltri detritiche superficiali, sotto forma di scivolamenti e colate rapide. In merito a questi ultimi, di particolare

interesse risulta l'intera area della *Carretera Hiram Bingham*, dove si osserva la presenza discontinua di coperture con spessori variabili, risultato di precedenti fenomeni franosi e di alterazione *in situ*.

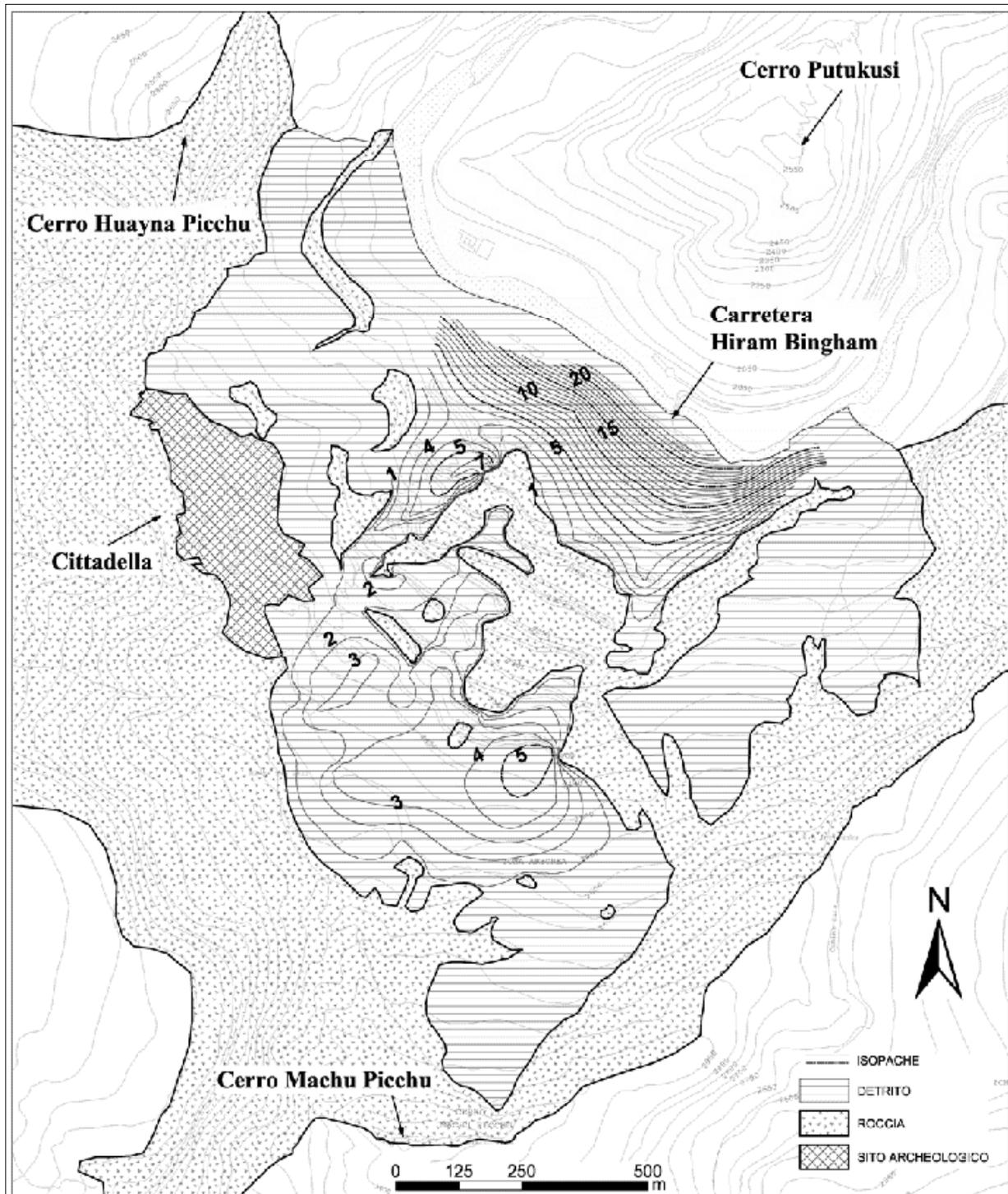


Figura 2 – Carta della distribuzione delle coperture detritiche, con ricostruzione dell'andamento degli spessori nell'area attraversata dalla *Carretera Hiram Bingham*.

Debris sheet map, with debris isopach reconstruction in the area of the Carretera Hiram Bingham.

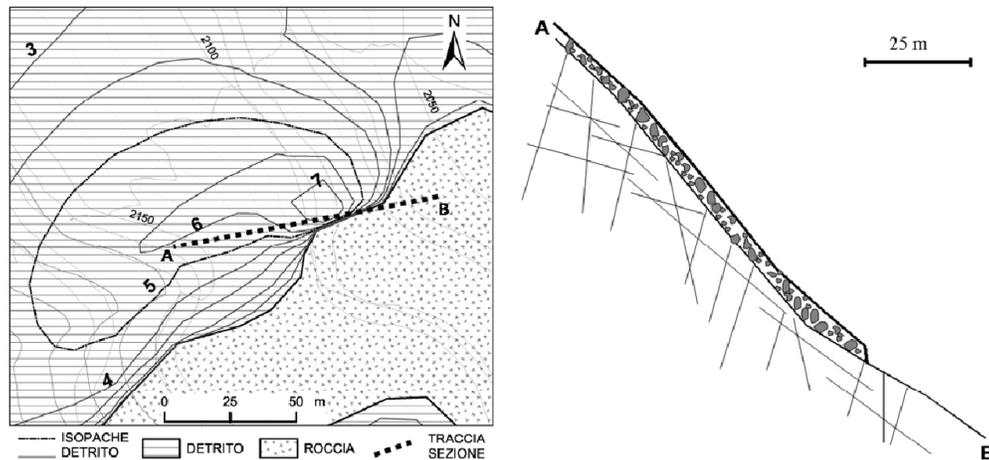


Figura 3 – Sezione di dettaglio di parte del versante che evidenzia gli spessori e l'assetto delle coperture detritiche rispetto al substrato (gli andamenti della fratturazione sono rappresentativi dei dati strutturali).

Cross section of Carretera Hiram Bingham slope showing the thickness and the layout of the debris.

Distribuzione delle coperture detritiche

In diverse aree del versante settentrionale dell'area si registra la presenza di una copertura detritica superficiale composta da blocchi granitici di dimensioni variabili (da centimetrici a metrici), scarsamente arrotondati, immersi in una matrice sabbiosa talora ben cementata: i rapporti volumetrici tra blocchi e matrice sono approssimativamente variabili tra 2:1 e 4:1. Nel settore della *Carretera*, proprio grazie alla presenza del tracciato stradale realizzato alla fine degli anni '40 mediante tagli e riporti, è stato possibile identificare in numerosi punti (oltre 50) lo spessore di detta copertura, in molti casi potendo osservare il brusco contatto con la sottostante roccia granitica del substrato.

A partire da tali dati si è giunti alla realizzazione di una carta delle coperture detritiche (Figura 2) comprendente informazioni di sintesi in merito ai relativi spessori: come si può osservare, a parte il piede del versante nel quale sono stimabili potenze di oltre 15-20 metri, gli spessori nella porzione medio-superiore raggiungono valori di circa 7-8 metri, con un andamento del contatto tra roccia e detrito parallelo al pendio e derivante dall'assetto strutturale (Figura 3).

In merito a questi dati è da notare che essi appaiono non concordanti con quelli presentati da Sassa et al. (2001; 2002), che riportano in tutta l'area (denominata Blocco 1) spessori della copertura detritica fino a circa 100 metri: è possibile, tuttavia, che tali autori facciano riferimento a livelli di roccia alterata sottostanti al detrito oggetto del presente lavoro, distinguendoli dal substrato profondo.

Caratterizzazione geotecnica delle coperture detritiche

Nel corso delle campagne di indagine sono stati effettuati alcuni campionamenti del materiale sabbioso costituente la matrice del detrito, al fine di realizzare prove di laboratorio

di caratterizzazione geotecnica. Il campionamento ha portato alla raccolta di campioni disturbati, successivamente sottoposti a prove granulometriche e di resistenza al taglio: inoltre sono state effettuate prove semplificate a carico variabile *in situ* (tipo Lefranc) per la determinazione della permeabilità.

La localizzazione dei punti di raccolta dei campioni e delle prove di permeabilità è stata effettuata in modo da essere rappresentativa dei diversi settori del versante.

Da un punto di vista granulometrico, il materiale sottoposto a prove (selezionato in sito quale passante al setaccio n. 10 ASTM) è risultato essere composto da sabbie con limo, talora debolmente argillose (> 5%), a cui si confanno le determinazioni relative alla permeabilità, stimata tra $1 \cdot 10^{-4}$ e $1 \cdot 10^{-6}$ m/s.

Per quanto concerne le prove di resistenza al taglio (effettuate su campioni a diverso grado di saturazione), esse hanno condotto a valori di coesione nulla e angolo di attrito efficace compreso tra 27° e 33° . Le prove di taglio torsionale hanno infine permesso di ricavare i parametri di resistenza al taglio residui, pari a $c' = 0$ e $\phi' = 12^\circ$.

I parametri geotecnici determinati non giustificano del tutto il comportamento macroscopico del deposito osservabile in campagna, soprattutto in riferimento alla coesione apparente della matrice sabbiosa: ciò può derivare sia dal disturbo nella fase di campionamento, sia dal fatto che in tale comportamento complessivo svolge un ruolo significativo la presenza dei blocchi di varia dimensione e la loro distribuzione (Casagli et al., 2005).

Le condizioni di drenaggio delle acque superficiali

Le aree identificate come sede di coperture detritiche appaiono quali candidate per l'innesco di movimenti superficiali che possono aver luogo lungo la superficie di contatto tra roccia e detrito, come accaduto nel caso dei fenomeni del 1995-1996: laddove gli spessori sono

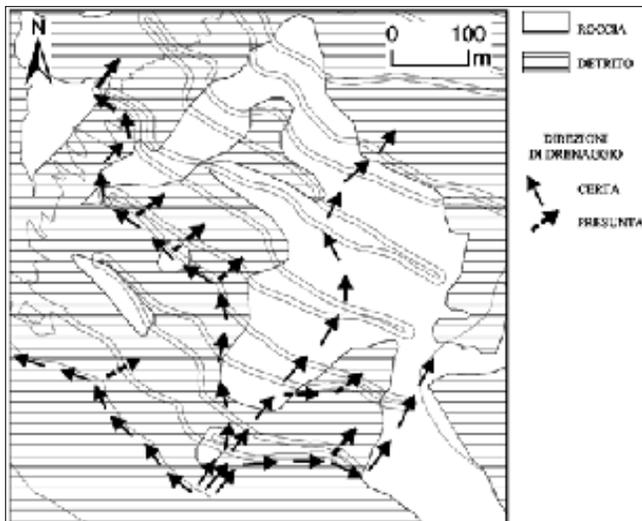


Figura 5 – Principali direzioni di flusso delle acque superficiali derivanti dalle sorgenti Inca e dal parziale funzionamento del sistema di drenaggio in rapporto alla presenza di livelli detritici di copertura.

The relationships between the debris cover and the main flow directions of the superficial waters from the Inca springs.

Appare tuttavia evidente che il sistema di drenaggio a corredo del tracciato stradale risulti assai scarsamente efficiente, consentendo la dispersione delle acque in vari punti, con riemersioni nei tratti a valle: i rapporti tra i volumi in entrata e uscita dal sistema denunciano inoltre condizioni di diffusa dispersione fra i vari tratti canalizzati. In Figura 5 è riportata una interpretazione di sintesi del

fenomeno nel settore mediano del versante, ove le acque superficiali appaiono disperdersi in diversi settori in cui sono presenti coperture detritiche di vario spessore, per le quali la presenza di acqua in superficie può costituire un elemento decisivo ai fini della stabilità.

Il dato deve essere preso in considerazione, soprattutto in termini qualitativi, in riferimento al comportamento delle acque di ruscellamento in occasione di eventi piovosi, durante i quali i difetti di efficienza del sistema di drenaggio risulteranno amplificati rispetto a quanto verificato nel corso del rilevamento.

Fratturazione della roccia e infiltrazione

Per la valutazione degli effetti della presenza di acqua all'interno del corpo detritico, oltre al fenomeno di infiltrazione a partire dalla superficie, è da considerare la possibilità che vi siano processi di infiltrazione dal basso a seguito dello scorrimento delle acque all'interno del reticolo di fratture della roccia granitica.

Questo fenomeno potrebbe rivestire un rilievo anche superiore a quello di pertinenza dell'infiltrazione delle acque superficiali, considerando che le fuoriuscite d'acqua dal reticolo risulterebbero caratterizzate da pressioni non trascurabili.

A questo proposito è da segnalare l'osservazione nel 2005 di una limitata area di denudamento del substrato roccioso, caratterizzata proprio dalla presenza di una frattura con modesta venuta d'acqua (Figura 6): il fenomeno potrebbe rappresentare in scala ridotta il modello di innesco di fenomeni di scivolamento e colata di dimensioni rilevanti.

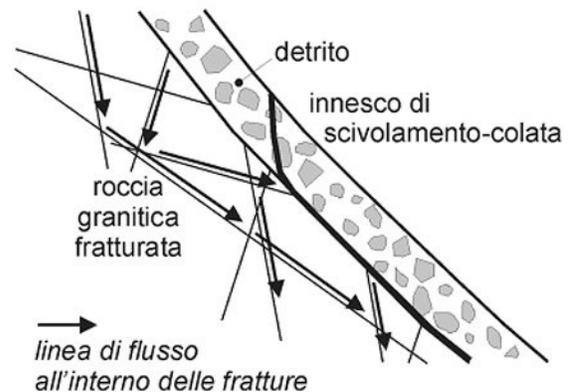


Figura 6 – Area di denudamento del substrato attraverso un meccanismo tipo debris-flow occorso nel 2005 ed ipotesi interpretativa dei meccanismi di comparsa di venute d'acqua quali concausa dell'evento.

Exposed bedrock following a small debris flow occurred in 2005 and hypothesis of the triggering mechanism.

Conclusioni

I dati raccolti e la loro interpretazione potranno risultare di elevata utilità nelle fasi successive dell'attività di ricerca,

dedicate ad una completa verifica di stabilità dell'intero versante e ad una caratterizzazione delle aree a maggior pericolosità e rischio.

In particolare si prevede di giungere ad una modellazione del comportamento dell'intero versante attraverso l'applicazione integrata di diversi metodi di verifica di stabilità, in grado di tenere in considerazione tutte le variabili osservate e misurate, tra cui la variabilità degli spessori delle coperture, l'effetto dei fenomeni di scorrimento idrico superficiale e della dispersione dei flussi, la possibile presenza e modellazione dell'infiltrazione all'interno del reticolo di fratturazione della roccia.

Quest'ultimo aspetto, in particolare, appare meritorio di ulteriori approfondimenti, tesi a verificare l'ammissibilità dell'ipotesi di un regime di circolazione idrica all'interno del sistema di fratturazione del granito, l'effettiva esistenza e rilevanza di punti di risorgenza al contatto roccia-detrito e l'eventuale effetto in termini di stabilità complessiva del versante.

Le conclusioni della ricerca potranno condurre ad una migliore conoscenza dei fenomeni occorsi in passato ed essere di ausilio ai fini della valutazione e progettazione delle adeguate contromisure per la riduzione della pericolosità dei possibili fenomeni futuri.

Ringraziamenti

La ricerca è stata realizzata nell'ambito dell'attività del Progetto Interfrasi, finanziato dal Ministero per l'Istruzione, l'Università e la Ricerca Scientifica (Fondo speciale per lo sviluppo della ricerca di interesse strategico). Gli Autori desiderano ringraziare P. Canuti e N. Casagli per l'opera di indirizzo e coordinamento e D. Tapete per la collaborazione nell'esecuzione delle prove di laboratorio.

Bibliografia

- Canuti, P., Margottini, C., Mucho, R., Casagli, N., Delmonaco, G., Ferretti, A., Lollino, G., Puglisi, C., Tarchi, D., 2005. Preliminary remarks on monitoring, geomorphological evolution and slope stability of Inca Citadel of Machu Picchu (C101-1). Proceedings International Consortium on Landslides General Assembly, Washington DC, 39-47.
- Carlotto, V., Cárdenas, J., Romero, D., Valdivia, W., Tintaya, D., 1999. Geología de los cuadrángulos de Quillabamba y Machu Picchu. Boletín No. 127, serie A: Carta Geológica Nacional, Lima, 321 pp.
- Carreño, R., Bonnard, C., 1997. Rock slide at Machu Picchu, Peru. *Landslide News* 10, 15-17.
- Casagli, N., Fanti, R., Nocentini, M., Righini, G., 2005. Assessing the capabilities of VHR satellite data for debris flow mapping in the Machu Picchu area (C101-1). Proceedings International Consortium on Landslides General Assembly, Washington DC, 61-70.
- Sassa, K., Fukuoka, H., Kamai, T., Shuzui, H., 2001. Landslide risk at Inca's World Heritage in Machu Picchu, Peru. Proceedings 1st UNESCO/IGCP Symposium on Landslide Risk Mitigation and Protection of Cultural and Natural Heritage, Tokyo, 1-14.
- Sassa, K., Fukuoka, H., Shuzui, H., Hoshino, M., 2002. Landslide risk evaluation in Machu Picchu World Heritage, Cusco, Peru. Proceedings 2nd UNESCO/IGCP Symposium on Landslide Risk Mitigation and Protection of Cultural and Natural Heritage, Kyoto, 1-20.