

# LA CITTADELLA INCA DI MACHU PICCHU: MONITORAGGIO DI POTENZIALI INSTABILITÀ DI VERSANTE

Giorgio LOLLINO, Marco BALDO, Daniele GIORDAN, Franco GODONE

CNR IRPI, Sede di Torino; Strada delle Cacce 73, 10135 Torino. Tel 011/3977810, fax 011/343574  
e-mail: giorgio.lollino@irpi.cnr.it

## ABSTRACT

La Cittadella Inca di Machu Picchu, uno dei siti archeologici più famosi al mondo è da qualche tempo sottoposta ad una serie di studi per verificare eventuali problemi di instabilità riguardanti l'intero sito o porzioni di esso. Esistono infatti una serie di teorie supportate da evidenze morfologiche che fanno temere la possibilità che tutta l'area della cittadella possa essere coinvolta in un esteso fenomeno franoso. L'area in esame è infatti caratterizzata dalla presenza di una serie di fenomeni franosi più o meno attivi che già in passato hanno causato problemi soprattutto di accesso all'area. All'interno della cittadella esistono poi anche delle evidenze localizzate di fenomeni di instabilità che riguardano soprattutto i settori laterali prospicienti alle pareti subverticali.

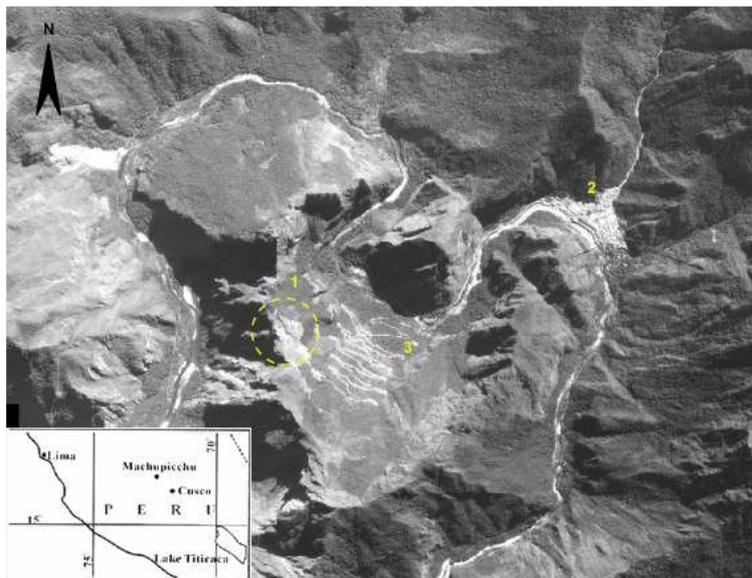
Il Gruppo di Geomonitoraggio del CNR IRPI di Torino, insieme ad altri partner, ha partecipato al Progetto INTERFRASI (INTerferometria statica e dinamica integrate da laser imaging 3D e da altre tecnologie innovative per la diagnostica di manufatti architettonici in aree in FRAna o soggette ad eventi Sismici), patrocinato dal MIUR e sotto l'egida dell'UNESCO. L'IRPI di Torino ha realizzato una rete geodetica GPS di alta precisione per il monitoraggio periodico di eventuali movimenti del sito archeologico. Sono state quindi eseguite due campagne di misura che hanno fornito indicazioni confortanti circa la stabilità della cittadella. Durante la seconda campagna di misure, si è provveduto anche alla realizzazione di un rilevamento con tecniche a scansione laser terrestri di gran parte della Cittadella; il relativo modello digitale potrà essere utilizzato in futuro per rilevare eventuali cedimenti differenziali localizzati.

The Inca Citadel of Machu Picchu, one of the more famous archaeological sites of the world is submitted by a series of studies to verifying possible geological instability problems. Lots of theories supported by morphological evidences, in fact, makes to fear the possibility that the whole area of the citadel can be involved in a wide landslide area. The examined area is characterized by the presence of active landslide phenomena that have caused in the near past problems related to the access of the area. Inside the citadel they also exist some instability evidences localised on the side sectors close to the subvertical faces. The CNR IRPI geomonitoring team (*National Research Council –Research Institute for Hydrogeological Prevention and Protection*), together with other partners, has participated to the INTERFRASI project patronized by MIUR (Ministry of University and Research) and bottom the aegis of the UNESCO. The IRPI of Turin was committed to realize an high-precision GPS geodetic network to monitoring possible displacements inside the archeologically site. Until now two measurement campaign was executed and have furnished comforting indications concerning the citadel stability. During the second campaign also a survey of the citadel using a terrestrial laser scanner was concluded; the resulting DSM (Digital Surface Model) will be used in the near future to detect possible differential localized yeldings.

KEY WORDS: Machu Picchu, monitoring systems, GPS, LIDAR, landslide

## INTRODUZIONE

La Cittadella Inca di Machu Picchu (figura 1), uno dei più famosi siti archeologici del mondo, è da qualche anno sottoposta ad una serie di studi (Canuti et al. 2005, Vilimek et al., 2005; Vilimek et al., 2007) per verificare la tesi avanzata da un gruppo di ricercatori giapponesi (Sassa *et al.*, 2000, 2001; Vilimek & Zvelebil, 2002) secondo la quale parte del sito sorgerebbe su di un settore potenzialmente instabile.



*Figura 1: vista aerea dell'area in esame: 1 – Cittadella Inca; 2 – Aguas Calientes, capolinea ferroviario (unico mezzo di accesso alla zona) ed unica zona urbanizzata dell'area; 3 – strada di accesso alla Cittadella. Già da questa immagine sono evidenti il forte controllo strutturale della zona e l'azione di modellamento del fiume Urubamba.*

soprattutto tramite le misure GPS, una serie di dati importanti per contribuire a far luce sulla possibile presenza di movimenti gravitativi nella zona archeologica.

## INQUADRAMENTO GEOLOGICO

La cittadella Inca di Machu Picchu sorge su un colle a 2400 metri circa sul livello del mare.

Il fiume Urubamba, con il suo fare impetuoso, ha progressivamente scavato una gola decisamente profonda che condiziona la stabilità delle pendici su cui sorge il sito archeologico.

Il substrato roccioso è costituito essenzialmente da graniti con inclusioni di tonaliti e granodioriti appartenenti al batolite Permiano di Machu Picchu, il quale, a sua volta, fa parte del complesso intrusivo di Vilcabamba (Carreno & Bonnard, 1997). Da un punto di vista geologico strutturale l'area è caratterizzata dalla presenza di due grossi lineamenti tettonici (la faglia di Macchupicchu e Huaynapicchu) circa paralleli, con andamento N45°E (Carreno & Bonnard, 1997); la presenza di queste faglie genera una struttura a graben caratterizzata da un substrato molto fratturato a causa della presenza di un elevato numero di faglie minori appartenenti alla stessa famiglia. Un aspetto molto importante dell'assetto strutturale della zona consiste nella presenza di un sistema di *joints* a basso angolo con direzione E-W che, secondo alcuni studiosi (Carreno & Bonnard, 1997; Sassa *et al.*, 2001), costituirebbe una situazione favorevole all'attivazione di crolli in roccia sul lato meridionale e di scivolamenti planari che coinvolgono ampie porzioni di substrato lungo il versante opposto. Gli studi sono proseguiti nel corso degli anni ed hanno portato alla conclusione (Sassa *et al.*, 2001; Sassa *et al.*, 2003) che il lato orientale dell'area in esame (*front slope*), sia interessato da

L'Italia ha partecipato a tali attività tramite un progetto di ricerca denominato INTERFRASI (INterferometria statica e dinamica integrate da laser imaging 3D e da altre tecnologie innovative per la diagnostica di manufatti architettonici in aree in FRAna o soggette ad eventi Sismici), patrocinato dal MIUR e sotto l'egida dell'UNESCO. Al progetto hanno partecipato l'ENEA, il Consorzio CIVITA e il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze per lo studio geomorfologico e geologico strutturale, la TRE (TeleRilevamento Europa – Milano) per l'analisi con tecnica SAR PS, il JRC (Joint Research Centre – Ispra, Lago Maggiore) per il SAR terrestre ed il CNR-IRPI di Torino per il monitoraggio GPS e laser scanner. Il presente lavoro si concentra dunque sulle attività svolte in tale ambito dal CNR IRPI di Torino che ha fornito,

più fenomeni franosi (figura 2), in parte attivi, come l'area su cui sorge la strada (blocco 1) e in parte potenzialmente attivabili (blocco 2). L'instabilità del settore ove sorge l'unica strada di accesso al sito (*front slope*) è testimoniata anche da un elevato susseguirsi di attivazioni di frane recenti, tra le quali sono da segnalare quelle occorse tra il 1995 e il 1996 che distrussero parte della strada stessa (Careno et al., 1996). Per quanto riguarda il versante opposto (*back slope*), Sassa ha analogamente individuato una serie di fenomeni attivi (blocchi 4, 6, 7) e potenzialmente attivabili (5). Oltre alle deformazioni, tra l'altro spesso particolarmente evidenti, che interessano settori limitrofi ma esterni alle rovine, l'oggetto principale di tutte le ricerche compiute nella zona riguarda la stabilità della cittadella. Malgrado alcuni studi si siano subito espressi contro la possibilità che la cittadella possa essere interessata da fenomeni franosi in grado di comprometterne la stabilità (McEvans & Wright, 2001). Il lavoro di ricerca è continuato anche mediante l'installazione da parte dell'equipe Giapponese di una prima rete di monitoraggio (Sassa 2001); tale sistema ha evidenziato comunque la presenza di settori instabili con trend di movimento comunque molto limitato. L'ipotesi più preoccupante rimase comunque quella che il pericolo fosse legato alla possibilità che tutto il blocco n° 2 (figura 2), con un movimento traslativo, scivoli verso il basso. Gli elementi portati a suffragio di tale ipotesi sono la presenza di una serie di "gradonature" sul versante opposto che dovrebbero rappresentare l'emergenza di questi piani di scorrimento e la presenza, all'interno dei resti della cittadella, di una zona depressa (*Plaza*) compresa tra due creste rocciose (Intiwatana e Una Picchu sul lato W e la zona residenziale della cittadella sul lato E) interpretata come uno sdoppiamento di cresta.

## RETE DI MONITORAGGIO GPS

Per quanto riguarda la rete GPS realizzata dal CNR IRPI (figura 3), è stata eseguita un'attenta opera di studio preliminare su basi geologiche e geomorfologiche finalizzata alla definizione di una disposizione dei punti che potesse rilevare dei dati utili alla validazione o alla modifica delle tesi sin ora avanzate dai vari gruppi di studio. Va sottolineato come, data l'eccezionalità del sito archeologico e l'inaccessibilità di alcuni luoghi, la disposizione dei punti GPS sia poi stata ridefinita in fase di installazione in modo da ottenere un miglior compromesso tra rappresentatività delle misure e limiti logistici. Particolare attenzione è stata dunque rivolta alla localizzazione dei tre punti di controllo dislocati in settori esterni all'area ritenuta potenzialmente instabile. Per tale motivo sono stati scelti tre punti che potessero allo stesso tempo essere raggiunti con facilità e che fossero in aree senza evidenti indizi geomorfologici che indicassero una qualche deformazione in corso. Purtroppo, la particolare conformazione morfologica del territorio non ha consentito di individuare una posizione a sviluppo equilatero (isoangolare) dei capisaldi di riferimento, il cui triangolo risultante risulta avere uno sviluppo predominante con orientamento azimutale di 59°.

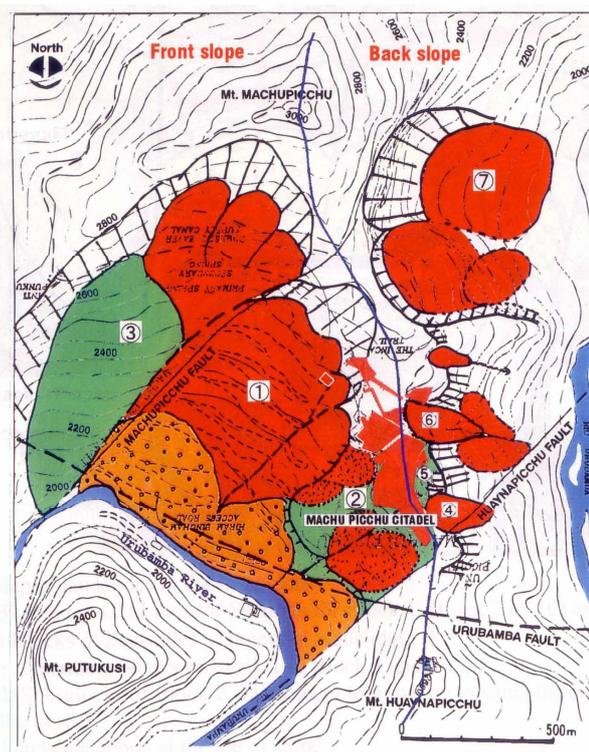


Figura 2: rappresentazione schematica dei principali lineamenti geologici e di alcune frane (attive e potenziali) presenti nell'area (Sassa et al., 2001). Il blocco n° 3 rappresenterebbe, secondo gli autori, un fenomeno stabilizzato.

Lo sviluppo massimo risulta inoltre essere quello tra il caposaldo di controllo RefA (Aguas Calientes) e il Ref.C (2600m). Tutti i capisaldi (3 di riferimento e 11 consolidali al corpo oggetto del monitoraggio) sono stati monumentati in roccia direttamente su emergenze del substrato roccioso (o comunque su blocchi ciclopici), in modo da essere relativamente certi che i movimenti eventualmente registrati fossero da imputarsi ad un movimento in massa del versante o di una sua porzione e non a cause esterne di difficile definizione. Tali capisaldi consentono l'avvitamento diretto, con innesto filettato di 5/8" dell'antenna GPS

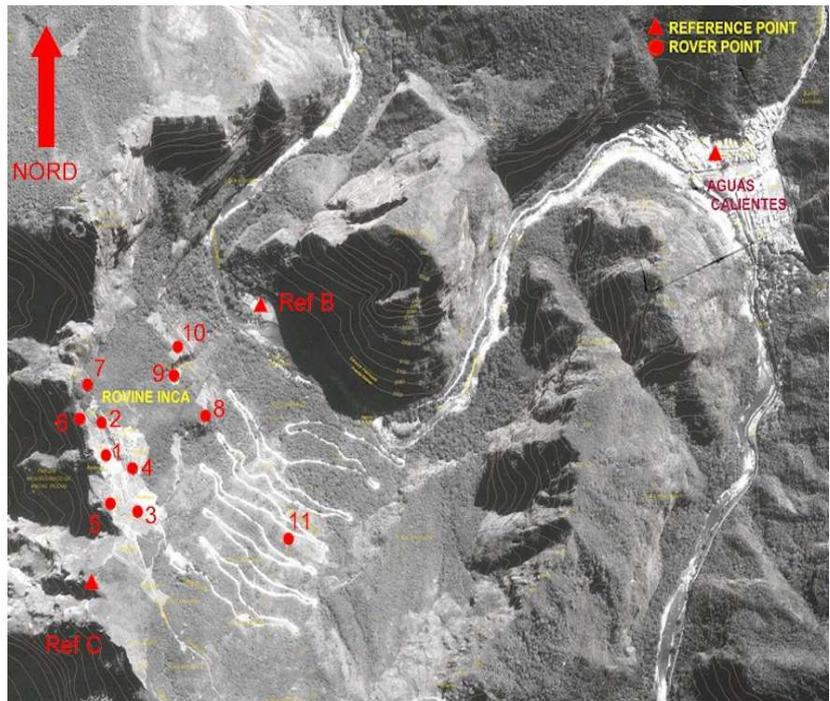


Figura 3: dislocamento dei capisaldi GPS

### Determinazioni geometriche

Il primo set di misure, riguardante la campagna del 2003 (coincidente con l'anno di istituzione) ha riguardato la determinazione delle componenti geometriche di tutti i capisaldi GPS, nonché la computazione dei parametri al contorno. Il set di misure sui capisaldi di riferimento, inoltre, risulta scorrelato dalle osservazioni per la generazione delle *baselines* relative, e ha riguardato l'occupazione per 24h di ciascun vertice di controllo.

La rete è stata interamente rilevata con 5 ricevitori geodetici, 3 sui punti esterni di controllo e 2 indipendenti sui capisaldi consolidali al corpo potenzialmente instabile con tempi di acquisizione non inferiori alle 4 ore (con epoche a 5s.) su ciascun caposaldo di nuova istituzione. La seconda campagna di misura, effettuata nel settembre del 2004, è stata rilevata con identiche modalità di acquisizione.

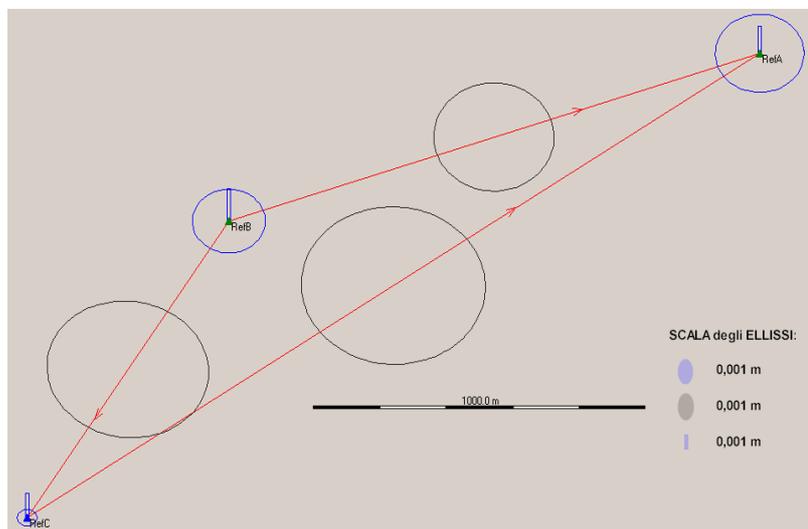


Figura 4: Rete tra capisaldi di riferimento GPS e loro ellissi d'errore

### Risultati ottenuti

La compensazione, effettuata con metodo dei minimi quadrati, in modalità multi-base con grado di libertà sui capisaldi di riferimento WCN (Weighted Constrained Adjustment), utilizzando orbite precise fornite dalla stazione LASER di Arequipa, ha riguardato prioritariamente la verifica della

stabilità dei capisaldi di riferimento, al fine di determinare la loro invariabilità spaziale nel corso del periodo intercorso tra l'istituzione e le due campagne di misura (2003 – 2004).

In considerazione del non trascurabile dislivello esistente tra i capisaldi (oltre 500m su uno sviluppo lineare di circa 2000; per una pendenza risultante del 25% [ 14° deg]) sono state verificate diverse soluzioni adottando modelli troposferici/ionosferici (modellazione stocastica) standard e computati sulla base delle osservazioni: è stato infatti riscontrato una lieve variazione nelle soluzioni passando da modelli rappresentativi standard (Klobuchar) a modelli computati.

Dopo aver quindi verificato la sussistenza delle condizioni minime di ripetibilità, sono stati utilizzati gli stessi criteri per la risoluzione delle basi della successiva campagna di misura.

	$\Delta N$	$\Delta E$	$\Delta h$
<b>9</b>	<b>0,012</b>	-0,002	0,002
<b>10</b>	<b>0,010</b>	-0,003	0,009

*Tabella 5: evidenze delle variazioni geometriche (misure 2003-2004) per i capisaldi 9,10*

Il successivo confronto, basato sulla trasposizione metrica delle coordinate geodetiche risultanti ha evidenziato un movimento con componente preponderante Nord dei capisaldi 9,10, secondo quanto evidenziato in tabella 5.

Per tutti gli altri capisaldi non sono stati rilevati apprezzabili movimenti imputabili a reali variazioni morfologiche.

## RILEVAMENTO LIDAR

Contestualmente alla seconda campagna di misura GPS, il CNR IRPI ha eseguito un rilevamento

mediante LIDAR terrestre dei principali settori della cittadella; il rilevamento ha come obiettivo quello di ottenere un modello digitale di riferimento soprattutto di alcuni settori interessati da deformazioni connesse a cedimenti differenziali. Tra di essi, particolare importanza rivestono le rovine del tempio principale, caratterizzate da una vistosa deformazione della struttura legata al cedimento del fianco sinistro dell'edificio (figura 6). Difficile allo stato attuale dello studio definire se tale deformazione sia connessa all'attività di questo potenziale fenomeno gravitativo che interesserebbe tutta la cittadella o se sia legato ad un semplice cedimento differenziale



*Figura 6: fasi di ripresa delle rovine del Tempio Principale; sulla sinistra dell'immagine sono chiaramente visibili gli effetti del cedimento differenziale della struttura*

legato al fatto che mentre un lato della struttura poggia sul substrato roccioso, l'altro è verosimilmente stato eretto su materiale di riporto. Quello che è certo è che le foto di inizio secolo raffigurano tale manufatto circa nelle medesime condizioni ed è quindi probabile che almeno una parte della deformazione sia da imputare a problemi costruttivi.

## CONCLUSIONI

Le misure eseguite dal CNR IRPI e presentate in quest'articolo rappresentano uno degli elementi su cui il Progetto INTERFRASI ha basato le sue conclusioni. Anche se il periodo di misura è stato breve, i dati sono decisamente rassicuranti sulla stabilità del sito archeologico. Sebbene dunque sia possibile, per il momento, accantonare le ipotesi più drammatiche di crollo in massa di tutta la zona, lo spostamento di un centimetro di due punti prospicienti all'area archeologica vera e propria non è

un dato che può essere trascurato. Al momento, il modello interpretativo maggiormente caldeggiato dai vari gruppi di ricerca considera l'intera area della Cittadella (Canuti et al., 2005; Vilimek et al., 2007) costruita su una Deformazione Gravitativa Profonda di Versante, ovvero su di una particolare tipologia di dissesto di origine gravitativa molto conosciuto studiato nelle Alpi (Zischinsky, 1969; Crosta, 1996; Mortara, Sorzana, 1987) che vede tra le sue caratteristiche bassi tassi di movimento e dimensioni decisamente ampie. Tali tipologie di fenomeno sono solitamente caratterizzate da un'evoluzione molto lunga e possono essere a loro volta suddivise in settori a diverso stato di attività; l'elevata fatturazione del substrato roccioso che caratterizza questi fenomeni avrebbe permesso da un lato di trovare agevolmente materiale da costruzione per la realizzazione della Cittadella, ma sarebbe anche una delle cause predisponenti di altre tipologie di fenomeni franosi più limitate realmente ma potenzialmente più pericolose. Per quanto riguarda le tecniche di monitoraggio utilizzate va sottolineato come la rete geodetica GPS abbia permesso di ottenere dei dati di alta qualità, sebbene in condizioni ambientali difficili. Le misure eseguite pongono inoltre le basi per ulteriori studi: la realizzazione di una nuova campagna di misura GPS potrebbe infatti permettere di comprendere ulteriormente quale sia l'evoluzione attuale del fenomeno, mentre i dati LIDAR sui manufatti rappresentano sicuramente un punto di partenza per indagini future volte anche a comprendere l'interazione tra l'eventuale attività di versante rilevata e la stabilità dei singoli elementi che compongono la cittadella.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Cina A. (2002), *Trattamento delle misure topografiche*, CELID, 45-63.
- Cina A. (2000), *GPS: Principi, modalità e tecniche di rilevamento*, CELID, 22-26.
- Carreño, R., Bonnard, C. (1997), Rockslide at Machupicchu, Peru. *Landslide News* 10, 15–17.
- 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. In *Landslides Risk analysis and sustainable disaster management* (editors: Sassa K., Fukuoka H., Wang F., Wnag G.), Springer, 39-47.
- McEvan, G., Wright, K.R. (2001), Machu Picchu will endure. *New Science*. April 3 issue.
- Mortara G, Sorzana P.F. (1987), Fenomeni di deformazione gravitativa profonda nell'arco alpino occidentale italiano. Considerazioni litostrutturali e morfologiche. *Boll. Soc. Geol. It.*, 106: 303-314
- Sassa, K. (2001), The second investigation report on the slope instability in Inca's World Heritage in Machupicchu, Cusco, Peru. MS DPRI Kyoto University—Report for INRENA, Kyoto, Japan.
- Sassa, K., Fukuoka, H., Shuzui, H. (2000), Field Investigation of the slope instability at Inca's World Heritage, in Machupicchu, Peru. *Landslide News* 13, 37–41.
- Sassa, K., Fukuoka, H., Kamai, T., Shuzui, H. (2001), Landslide risk at Inca's World Heritage in Machu Picchu, Peru. Proceedings of UNESCO/IGCP Symposium — *Landslide Risk Mitigation and Protection of Cultural and Natural Heritage*. UNESCO/IGCP, Tokyo, Japan, pp. 1–14.
- Vilimek, V., Zvelebil, J. (2002), Slope instability at Machu Picchu: ideas and questions. *Acta Montana* 19, 75–89.
- Vilimek V., Zvelebil J., Klimes J., Patzelt Z., Astete F., Kachlik V., Hartvich F. (2007), Geomorphological reserach of large-scale slope instability at Machu Picchu, Peru. *Geomorphology* 89, pp. 241-257.
- Vilimek V., Zvelebil J., Vlcko J., Astete F. (2005), Geomorphological investigations at Machu Picchu, Peru. In *Landslides Risk analysis and sustainable disaster management* (editors: Sassa K., Fukuoka H., Wang F., Wnag G.), Springer, 39-47.
- Zichinsky U (1969), Uber Sackungen. *Rock Mech.* 1: 30-52.