



Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2004 – RIVA / TRIENT

IL MODELLO GEOTOP-SF PER LA DETERMINAZIONE DELL'INNESCO DI FENOMENI DI FRANAMENTO E DI COLATA.

THE MODEL GEOTOP-SF TO FORECAST THE TRIGGERING OF SLOPES AND DEBRIS FLOW INSTABILITY.

C.Tiso, G.Bertoldi, R.Rigon¹

RIASSUNTO

Si usa un modello distribuito del ciclo idrologico, GEOTOP, adatto alla modellazione dei bacini montani associato ad un modulo di calcolo che determina la stabilità dei pendii denominato SF. Tale modulo usa il modello di pendio infinito per seguire dinamicamente l'evoluzione della stabilità dei versanti e delle valli durante un evento piovoso. In presenza di ruscellamento GEOTOP-SF controlla la possibilità di innesco di colate detritiche secondo la teoria di Takahashi; se invece l'acqua rimane confinata nel suolo verifica la possibilità di scivolamenti superficiali. Si mostra una applicazione al bacino del torrente Centa (TN) usando i dati raccolti durante recenti eventi di precipitazione intensa.

Key words: Innesco di frane, Pendio, Modello idrologico.

ABSTRACT

It is used a model of the hydrological cycle, GEOTOP, apt to model the behavior of mountain catchments coupled to a module, called SF, which determines the terrain stability. SF uses an indefinite slope stability modelling to follow the dynamical evolution of a hillslope during a rainfall event. If surface runoff is present, the stability is inferred from the well known theory of Takahashi of debris flow triggering, otherwise, if only flow into the soil is present, it models soil slips. It is shown an application of the model to the Centa torrent catchment (Trento-Italy) using hydrological and landslides data collected during some recent events.

Key words: Landslide triggering, Slopes, Hydrological model.

INTRODUZIONE

La morfologia dei versanti e dei pendii di un bacino montano subisce frequenti modifiche (spesso impercettibili, in altri casi più macroscopiche) a causa dei continui movimenti che caratterizzano le porzioni di suolo più superficiali. La frequenza con cui questi movimenti si ripresentano è direttamente connessa con la dinamica dei processi di degradazione del manto

¹Università degli Studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Centro Universitario per la Difesa dell'Ambiente Montano (C.U.D.A.M.)

roccioso che devono aver reso disponibile uno strato di sedimento asportabile e con i processi idrologici. I fattori che governano la stabilità sono dunque: l'angolo di attrito della parte superficiale del terreno, la sua coesione e il suo contenuto d'acqua. L'angolo di attrito (ϕ) indica la pendenza naturale massima che il terreno può assumere quando esso si trova sottoposto alla sola forza di gravità. Il coefficiente di coesione interna (c') indica invece la resistenza a sforzo di taglio in assenza di qualsiasi sforzo normale. Il terzo parametro, che risulta a sua volta influenzato da numerosi fattori, costituisce l'oggetto principale della modellazione idrologica presentata nella presente memoria.

Il comportamento dell'acqua nel suolo

Lo studio in seguito presentato assume inoltre che il suolo sia un sistema trifase costituito da una fase solida, una fase liquida, una fase aeriforme. Le fasi solide sono essenzialmente quella minerale e quella organica, quella liquida è costituita dall'acqua che ricircola attraverso i pori sotto l'azione della forza gravitazionale e delle le forze di tensione superficiale.

Il ruolo dell'acqua sub-superficiale nella stabilità

Da un punto di vista geotecnico si può schematizzare il terreno come uno scheletro solido con i vuoti intergranulari completamente riempiti di acqua. Nonostante il terreno risulti allora essere non continuo anche a livello macroscopico, è tuttavia ancora possibile applicare ai terreni i concetti noti di tensione e deformazione. Nel terreno le sollecitazioni di taglio sono interamente sopportate dallo scheletro solido, mentre quelle normali sono in parte assorbite dallo scheletro solido ed in parte dalla fase fluida intergranulare. In ogni punto del terreno la tensione applicata è nota una volta noti gli sforzi principali $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$. Se si considera la fase liquida (spazio intergranulare) allora si può evidenziare una pressione u che agisce in ogni direzione sull'acqua e sui grani con uguale intensità. La quota di tensione necessaria per arrivare allo stato di sforzo *principale* (o stato di sforzo totale) $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ è lo stato tensionale assorbito dallo scheletro solido. Questa quota di tensione detta stato tensionale *efficace*, può essere calcolata come segue:

$$\sigma'_i = \sigma_i - u \quad i=1,3 \quad (1)$$

Il comportamento meccanico del terreno sottoposto ad una azione destabilizzante, dipende dall'aliquota di sollecitazione che viene trasmessa allo scheletro solido e non dalla quota trasmessa al fluido. Il contributo di pressione u relativo alla fase fluida è detto *pressione neutra*. Le tensioni totali nel terreno dipendono unicamente dalle azioni che sul terreno stesso agiscono, nella maggior parte dei casi dal suo peso proprio, e si possono di conseguenza considerare costanti. Risulta quindi chiaro dalle equazioni 1, come le tensioni efficaci (stato tensionale assorbito dallo scheletro solido) dipendano strettamente dalla pressione neutra, cioè dal comportamento dell'acqua nel suolo.

Al fine di comprendere meglio questo concetto, si consideri un evento meteorico di particolare intensità. Durante la precipitazione, il deflusso dell'acqua nel suolo avviene secondo diverse modalità. Si parla di infiltrazione quando il moto avviene dalla superficie all'interno del suolo, di percolazione quando il moto avviene in condizioni di non saturazione ed il moto è prevalentemente verticale; si parla invece di filtrazione quando il moto avviene in condizioni di saturazione ed il moto è prevalentemente laterale. L'acqua che cade sul terreno pertanto in parte ruscella e in parte si infiltra, andando in questo modo a sommarsi ai volumi già presenti al di sotto della quota della falda. Questo contributo determina localmente un'aumento delle

pressioni interstiziali che tende a propagarsi. In corrispondenza di questo fenomeno si riscontra una improvvisa variazione della quota di falda rappresentabile come un intenso e improvviso moto di filtrazione che può risultare critico per le condizioni di resistenza meccanica del terreno.

L'azione dell'acqua nel pendio

Si supponga di estendere il caso analizzando un pendio infinitamente esteso, delimitato da una superficie con inclinazione θ rispetto all'orizzontale (si veda fig. 1).

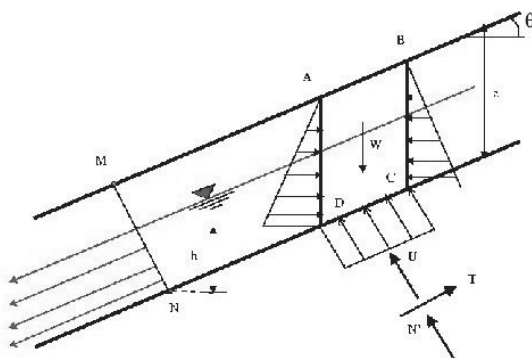


Figura 1: Nel modello di pendio infinito si considera una superficie di scorrimento del suolo rettilinea, parallela al piano campagna ed al piano della falda. Considerando un concio di terreno ABCD si indicano con W il peso proprio del concio, con U la risultante della sottospinta dell'acqua e con T ed N rispettivamente le componenti tangenziale e normale della resistenza allo scorrimento. Il segmento MN indica lo spessore di suolo in movimento, all'interno del quale varia la quota della falda.

Picture 1: In the infinite slope model we consider a flat sliding surface, parallel to the ground and to the water table. Considering the volume of soil ABCD we indicate with W its weight, with U the resultant of the water pressure and with T and N the respective tangential and normal component of the sliding resistance. Segment MN indicates the sliding thickness of ground, in which the water table grows.

Se il pendio, ipotizzato privo di coesione, è interessato da un moto di filtrazione parallelo al pendio stesso si ha che il fattore di sicurezza è dato da:

$$F = \frac{(N - U) \tan \phi}{T} \quad (2)$$

dove F è il fattore di sicurezza (con valore >1 in caso di stabilità e <1 in condizioni instabili); N è la componente normale della reazione vincolare della superficie di scorrimento sul pendio; T è la componente tangenziale della reazione vincolare della superficie di scorrimento sul pendio. Ovvero, dalla teoria di Mohr-Coulomb si può dire che si ha rottura ad una profondità z se a questa profondità

$$F = F_c + F_f - F_w \leq 1 \quad (3)$$

(e.g. [6]), dove il coefficiente di sicurezza ha componenti:

coesiva:
$$F_c = \frac{c'}{\gamma z \sin \theta \cos \theta} \quad (4)$$

(dove c' =coesione interna γz =peso specifico di suolo per il suo spessore; θ =inclinazione del pendio)

geotecnica:
$$F_f = \frac{\tan \phi'}{\tan \theta} \quad (5)$$

(dove ϕ' =angolo di attrito interno del suolo)

idrologica:
$$F_w = \left(\frac{\gamma_w h_w}{\gamma z} \right) \frac{\tan \phi'}{\tan \theta} \quad (6)$$

(dove γ_w e h_w =rispettivamente peso specifico dell'acqua e quota della falda rispetto al piano di scorrimento.)

Questa trattazione, per quanto semplificata nelle componenti geotecniche, è efficace rappresentazione della stabilità dei pendii se la componente idrologica è ben descritta. Essa può essere generalizzata considerando componenti di flusso non parallele al pendio e non stazionarie [6]. Tra i modelli sviluppati su questa base ricordiamo il modello SHALSTAB [4] e SINMAP [8] e anche gli studi di Sidle and Wu [12]: tutti rivolti per altro alla identificazione delle zone soggette a dissesto piuttosto che alla determinazione degli eventi critici e dello studio della loro dinamica. La validità di questi modelli, supportata da un crescente numero di indagini sperimentali anche in Italia [2] [3], sembra indicare che sia la convergenza dei flussi subsuperficiali in condizioni quasi stazionarie a determinare le zone instabili.

L'azione dell'acqua di ruscellamento

Al quadro precedentemente delineato sfugge il controllo di quegli eventi che siano innescati in presenza di deflusso superficiale. Qualora si generi ruscellamento superficiale, e si inneschi l'incisione dei canali, si tende a formare un letto torrentizio o fluviale, caratterizzato dalla presenza di ghiaia o ciotoli di diversa dimensione e granulometria, più o meno incoerenti. In questo caso l'analisi di stabilità condotta nei paragrafi precedenti rimane valida, tuttavia, anziché parlare di porosità e di peso specifico del suolo contenente acqua, si preferisce parlare di concentrazione di concentrazione di materiale sciolto in acqua. Posto allora $C^* = V_s/V$ (con V_s il volume della fase solida, V_v il volume dei vuoti e $V = V_s + V_v$ il volume totale) si ha che l'ammasso è stabile fintantoché:

$$\tan \theta \leq \tan \phi' \frac{C^* \Delta}{1 + C^* \Delta + \frac{1}{n} \frac{h_0}{d}} \quad (7)$$

Dove $\Delta = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w}$ e la valutazione dei parametri segue ovviamente delle procedure diverse da quelle seguite nel caso di franamenti superficiali precedentemente descritto.

Il contributo della vegetazione alle condizioni di stabilità

La vegetazione influisce sulla stabilità del suolo per due fattori [9]: (a) il peso proprio della pianta; (b) l'azione di coesione apparente esercitata dagli apparati radicali.

Questi due fattori agiscono in maniera opposta in quanto mentre il primo apporta un contributo a favore della stabilità, il secondo agisce a sfavore di essa. Esistono molti studi riguardanti improvvisi eventi franosi collegati ad una poco oculata gestione del patrimonio forestale [10]. Non sempre infatti la presenza di una copertura vegetale è garanzia di sicurezza (come comunemente si è soliti immaginare). Spesso dopo improvvisi smottamenti che interessano zone intensamente ricoperte da vegetazione, uno degli interventi più frequenti eseguiti al fine di stabilizzare le zone circostanti al dissesto, è il taglio drastico di intere porzioni di bosco. Altre volte invece è proprio in una indiscriminata deforestazione che si individua la causa scatenate il dissesto. Nel caso di presenza di copertura vegetale, il modello usa la formulazione di stabilità del pendio infinito come modificata da [9], pagg 19-22:

$$F = \frac{[2(c'+\Delta c) / \gamma_w Z \sin 2\alpha] + [(L - M)(\tan \phi' / \tan \alpha)]}{L} \quad (8)$$

L'altezza del piano della falda è MZ, dove M è l'altezza verticale del piano della falda sopra il piano di slittamento espressa come frazione di spessore di suolo. L è un parametro espresso in funzione del peso del suolo e degli alberi:

$$L = \frac{q_0}{\gamma_w Z} + \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w} (M) + \frac{\gamma_m}{\gamma_w} (1 - M) \quad (9)$$

dove q_0 è il sovraccarico indotto dalla copertura vegetale, calcolato come W_t diviso per la superficie del suolo; γ_m =peso specifico del suolo nella zona insatura; γ_{sat} =peso specifico del suolo saturo; γ_w =peso specifico dell'acqua; α =pendenza della superficie di scorrimento.

IL MODULO SF (SAFETY FACTOR)

Il modello SF è essenzialmente un postprocessore dei dati forniti dal modello idrologico GEOTOP. GEOTOP modella il bilancio energetico ed il ciclo idrologico di bacino idrografico in continuo e combina le caratteristiche principali della moderna modellizzazione delle interazioni suolo-atmosfera con un modello distribuito di afflussi-deflussi. GEOTOP permette di conoscere la portata uscente dal bacino alla sezione di chiusura, di valutare i valori locali di umidità, di temperatura del terreno, dei flussi di calore sensibile e latente, del flusso di calore nel suolo, della radiazione netta, insieme ad altre variabili idrometeorologiche distribuite; è un modello basato sull'uso dei modelli digitali di elevazione (DEMs); utilizza dati meteorologici ottenuti attraverso i tradizionali strumenti di monitoraggio, tuttavia, può anche assimilare dati distribuiti come quelli provenienti da misure di radar, satellitari o da modelli meteorologici ad area limitata. Una descrizione dettagliata degli algoritmi che implementa si trova in [1].

Le caratteristiche del modello SF

Il modulo SF si propone di sfruttare alcuni output del programma GEOTOP per calcolare puntualmente, in maniera distribuita nel tempo e per ogni cella costituente la superficie del bacino, la stabilità del suolo secondo le equazioni 3 e 7. I parametri geotecnici (angolo di attrito e coesione) vengono inseriti come input sulla base di analisi condotte sul campo o, in mancanza di queste, da tarature del modello realizzate in *back analysis*, avendo a disposizione dati di pioggia e di frane di eventi passati simultanei. Per quanto riguarda invece i dati concernenti l'umidità del suolo, essi sono parte degli output temporali del modello GEOTOP e verranno di seguito esaminati.

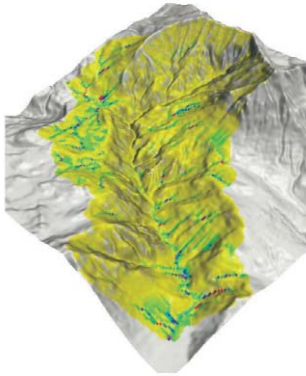
I dati richiesti in entrata al modulo SF

I files di input al programma contengono rispettivamente i seguenti dati: (1) i parametri geotecnici; (2) i dati riguardanti la durata della simulazione idrologica e l'intervallo temporale degli output; (3) i parametri di caratterizzazione geologica del suolo; (4) il volume dei vuoti nel suolo per ogni cella del bacino; (5) le pendenze del bacino ricavate a partire dal DEM; (6) il contenuto di umidità finale del bacino; (7) la coesione indotta dalla copertura vegetale; (8) il peso della copertura vegetale; (9) il contenuto d'acqua nel suolo nella zona satura; (10) il contenuto d'acqua nel suolo nella zona insatura; (11) il contenuto d'acqua nel suolo nella zona superficiale.

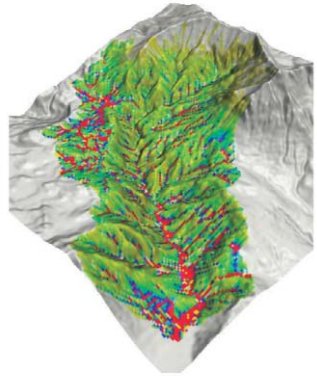
Dal punto di vista operativo il programma *SF* legge dai files di input nell'ordine: i parametri geotecnici del suolo, la durata della precedente simulazione di *GEOTOP* e il *time step* di stampa degli output intermedi, i parametri geologici, il volume dei vuoti, le pendenze espresse in radianti calcolate a partire dal DEM del bacino, la coesione generata dalla presenza di un'eventuale copertura vegetale, il carico aggiunto sul terreno dovuto all'eventuale presenza di boschi. In seguito calcola la porosità e lo spessore di suolo idrologicamente attivo, che si suppone essere quello interessato maggiormente dalle dinamiche di variazione delle pressioni interstiziali e di conseguenza anche dall'eventuale instabilità. Il programma utilizza i dati di output temporale di *GEOTOP* e legge il contenuto d'acqua nelle tre zone di ogni cella (satura, insatura e superficiale), e calcola il peso specifico del suolo. In seguito controlla la stabilità rispettivamente con il metodo del pendio infinito (anche in presenza di vegetazione) e con l'innescio delle colate detritiche alla Takahashi. Un parametro importante nella valutazione della possibilità di scivolamento è lo spessore di suolo, ricavato nel presente studio secondo un modello lineare di formazione del suolo (Heimsath et al. [5]).

Il funzionamento del modulo SF

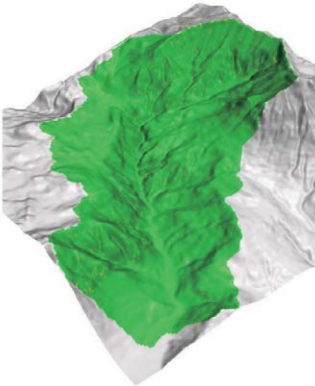
I dati di pioggia elaborati dal modello *GEOTOP*, vengono scelti in un periodo caratterizzato da eventi piovosi particolarmente intensi tali da generare l'innescio di fenomeni franosi in zone già considerate a rischio. Tramite il modello *GEOTOP* si simula il bilancio idrologico nel bacino interessato dall'analisi e si generano una serie di output riguardanti il contenuto d'acqua in superficie; il contenuto d'acqua nel suolo (identificando sia un volume saturo che uno insaturo); i flussi relativi tra i vari compartimenti. Modellando *GEOTOP* anche l'evaporazione, la traspirazione da ogni cella e la temperatura superficiale di ogni cella permette, meglio di altri modelli, di determinare le condizioni idrologiche che preludono ad un evento e di simulare, per esempio, le condizioni di congelamento del suolo che, pur non essendo al momento esplicitamente inserite nel calcolo della stabilità, la condizionano indirettamente attraverso una diversa ripartizione dei flussi. Il modello *SF* utilizza questi dati in input insieme con la caratterizzazione geologica e geotecnica del suolo ed esegue una verifica della stabilità ad ogni passo temporale e per ogni cella costituente il bacino.



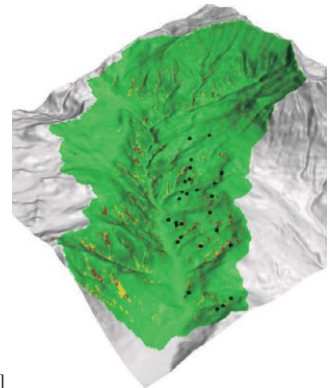
a)[5/11/02]



b)[26/11/02]



c)[5/11/02]



d)[26/11/02]

Figura 2: Le mappe della saturazione ((a), (b)) e del fattore di sicurezza ((c), (d)) sul bacino del Centa relative al giorno 5/11/02 (precedente all'evento di pioggi a) e al giorno 26/11/02 (saturazione massima del suolo). Nel caso delle mappe (a) e (b) i colori rosso e blu indicano elevata saturazione, mentre verde e giallo rispettivamente bassa e assente. Nel caso delle mappe (c) e (d) generate dal modulo SF, il verde indica stabilità, il giallo zone moderatamente instabili, il rosso instabilità incondizionata. Sulla mappa (d) sono inoltre evidenziati con pallini neri i fenomeni franosi che in quella giornata hanno causato danni alle infrastrutture civili.

Picture 2: Maps of saturation ((a), (b)) and maps of safety factor ((c), (d)) on the Centa river basin relative to the 5/11/02 (before the storm event) and to the al 26/11/02 (maximal soil saturation). As yuo can see in the (a) and (b) maps red and blue colors indicate high saturation, while green and yellow respectively low and absent saturation. In (c) and (d) maps generated from the SF module, green means stability, yellow means low instability, red means unconditional instability. On the (d) map, with black balls you can see the real sliding events which produced damage on civil infrastructures in the day of high soil saturation.

Gli output prodotti dal modulo SF

Il numero degli output temporali prodotti è lo stesso degli input derivati dal modello idrologico *GEOTOP*, ma moltiplicato per due in quanto si verifica la stabilità con i due metodi differenti:

I files del tipo *sfactor***.txt*: questi files sono gli output temporali, e mappano nel tempo le variazioni del fattore di sicurezza dovuto al deflusso subsuperficiale. Il loro valore varia da 1 a 3. Le celle con valore 1 indicano fattore di sicurezza inferiore a 1 e quindi zona incondizionatamente instabile; i pixel con valore 2 indicano porzioni di suolo con fattore di sicurezza compreso tra 1 e 1.3, quindi zone di equilibrio instabile; infine il valore 3 è assegnato alle celle in cui il valore di sicurezza risulta superiore a 1.3.

I files del tipo *dfactor***.txt* dove si verifica l'innescio di colate detritiche utilizzando la trattazione teorica elaborata da Takahashi. Anche questi files sono matrici con valori che variano da 1 a 3 a seconda del grado di stabilità.

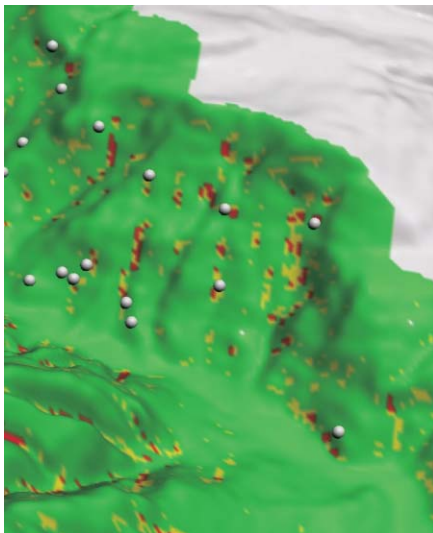


Figura 3: Una porzione del bacino del Centa in cui vengono evidenziate con i colori giallo e rosso le zone rispettivamente di probabile instabilità e di instabilità incondizionata, così come indicate dal modello GEOTOP-SF. Con i pallini grigi si mappano invece i fenomeni che realmente sono stati rilevati nell'evento considerato. Si sottolinea anche come tra la realtà ed il modello vi sia una buona corrispondenza temporale.

Picture 3: A portion of the Centa river basin where you can see with red and yellow colors probably unstable and unconditionally unstable zones, mapped by the GEOTOP-SF module. With the grey balls are mapped the real events occurred in that storm event. We want to underline that between model and reality there is a good temporal correspondence.

L'applicazione di GEOTOP-SF sul bacino del Centa

Il modello, descritto nelle sue parte essenziali è stato applicato al caso degli eventi dell'autunno del 2000 e del 2002 sul torrente Centa (TN). Si potevano infatti disporre per quegli eventi sia dei dati di precipitazione che dell'inventario delle frane, curato dal Servizio Geologico Provinciale. La costituzione geologica del bacino si presenta non molto varia. Dallo sbocco nel Brenta risalendo alla confluenza della valle Rossa il torrente Centa scorre su depositi alluvionali sia recenti sia antichi. Il corrispondente versante è costituito da roccia molto friabile e soggetta a decomposizione, quale gli scisti argillosi e le filladi quarzifere. Dalla sponda destra della valle Rossa fino al rivo principale, si riscontrano le tipiche

formazioni del Triassico. Le pendici della sponda destra del Centa sono formate da dolomite primitiva [11].

Per questo studio, di carattere preliminare ed esplorativo, si è scelto di non calibrare i parametri coinvolti nella stabilità ma solo quelli relativi ai flussi idrologici. Per parametri dei flussi verticali (evapotraspirazione e flussi turbolenti in generale) sono stati quelli calibrati in alcuni bacini posti nelle vicinanze. Per la valutazione dello spessore ottico dell'atmosfera, necessario al calcolo della radiazione netta incidente, sono stati usati i dati della stazione di Centa S.Nicolò, situata all'interno del bacino. I parametri geotecnici sono stati derivati dalla letteratura [7]: la densità del suolo si è posta pari a 1900kg/m^3 ; la coesione interna: 0.5 kN/m^2 ; l'angolo di attrito interno: 42° . Con i suddetti parametri, nel giorno in cui il suolo del bacino, nell'evento considerato per la simulazione, ha raggiunto i livelli massimi di saturazione, le aree instabili costituivano l'1,1% dell'intera superficie. Durante i fenomeni di precipitazione, il modello descrive la crescita del contenuto d'acqua nei vari compartimenti e in particolare nel suolo. Molte parti inizialmente non sature divengono sature e si osserva il crearsi di fenomeni di ruscellamento superficiale. Si verifica di conseguenza una corrispondente variazione della superficie delle zone a rischio di eventi franosi. In corrispondenza della saturazione massima del bacino e nei giorni in cui gli eventi si sono effettivamente realizzati (si veda la figura 2) il modello prevede l'instaurarsi di zone di instabilità diffuse di cui alcune coincidono con eventi effettivamente censiti. Va osservato che il modello coglie anche quelle frane che avvengono in prossimità della strada statale della Fricca (non visibile nella mappa) la quale evidentemente sovrappone alla naturale propensione all'instabilità di quelle aree un ulteriore carico idrico. Il modello prevede zone di dissesto assai più numerose di quante non siano state effettivamente misurate. La maggior parte di queste si trova sulla destra idrografica del torrente e, non essendovi in quella zona insediamenti, è per altro possibile che siano avvenute senza registrazione. D'altra parte va osservato anche che la natura geo-litologica della destra idrografica è completamente diversa da quella della sinistra idrografica, elemento assolutamente trascurato in questa fase preliminare della ricerca. Le frane del 2002 sono state segnalate tutte il 26 novembre 2002 e il modello coglie bene questo aspetto almeno negli aspetti qualitativi. Infatti l'instabilità massima comincia nella simulazione proprio il 26 novembre (fig. 3) e dura fino al 28, quando l'estensione delle zone a rischio comincia a diminuire.

CONCLUSIONE

Si è descritto il funzionamento di un modello distribuito del ciclo idrologico (GEOTOP) usato congiuntamente ad un modello di stabilità di pendio (SF) pensato per descrivere l'evoluzione dinamica dei fenomeni di innesco sia degli scivolamenti superficiali del suolo che delle colate detritiche. Di tale modello, si è mostrata un'applicazione alla determinazione delle zone di instabilità nel bacino del torrente Centa (TN) durante due eventi di precipitazione intensa del 2000 e del 2002 che generarono alcuni franamenti superficiali, in seguito rilevati dal Servizio Geologico della Provincia di Trento. Il modello idrologico è molto complesso e richiede la definizione di molti parametri, ma nella presente applicazione è stato usato con calibrazioni effettuate precedentemente in zone limitrofe o con parametri assegnati in base a dati di letteratura. I soli parametri del sottomodulo afflussi deflussi sono stati calibrati nel bacino in esame su un evento di cui erano note precipitazione e conseguente risposta in termini di portate. Tenuto conto dello stadio preliminare della ricerca e delle condizioni appena elencate, e che non è stato effettuato nessuno studio accurato dei parametri geotecnici, i risultati ottenuti possono considerarsi soddisfacenti.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato finanziato dal progetto ASI 54/00.

Bibliografia

- [1] G. Bertoldi (1999-2000): “Uno studio delle interazioni suolo-atmosfera a scala di bacino attraverso un modello distribuito”. *Corso di laurea in ingegneria per l'ambiente e il territorio, Università degli Studi di Trento*. Relatore R. Rigon.
- [2] Borga M., Dalla Fontana G., Da Ros D., Marchi L (1998): “Shallow landslide hazard assessment using physically-based model and digital elevation data”. *Env. Geol.*, 35: 81–88.
- [3] Casadei ,M., and Farabegoli,E (1998): “Testing the shalstab shallow slope stability model over a sample catchment in the northern apennines (Italy)”. *EOS, Transactions, Am. Geophys. Union*, 79 (45 supplement): F357.
- [4] W. Dietrich and D. Montgomery (1994): “A physically based model for the topographic control on shallow landsliding”. *Water Resources Research*, 30(4): 1153–1171.
- [5] A. Heimsath and W. Dietrich (1997): “The soil production function and landscape equilibrium”. *Nature*, 388(6): 358–361.
- [6] R.M. Iverson (July 2000): “Landslide triggering by rain infiltration”.*Water Resources Research*, 36(7): 1897–1910.
- [7] R. Lancellotta (1993). *Geotecnica*. Zanichelli.
- [8] R.T. Pack and D.G. Tarboton (1999): “Gis based landslide susceptibility mapping with sinmap”. In Bay J.A., editor, *Proceedings of the 34th Symposium on Engineering Geology and Geotechnical Engineering*, number 34, pages 219–231.
- [9] C.L. O'Loughlin R.C. Sidle, A.J. Pearce (1985): *Hillslope Stability and Land Use*, volume 11 of *Water Resources Monograph*. American Geophysical Union.
- [10] R.M. Rice (1977). *Forest Management to minimize landslide Risk*, chapter “Guidelines for Watershed Management”, pages 271–287. S.H. Kunkle & J.L. Thames, Rome,Italy. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [11] C. Tiso (2001-2002): “Un modello numerico per la determinazione dell'innescio di fenomeni di dissesto idrogeologico”. *Corso di laurea in ingegneria per l'ambiente e il territorio, Università degli Studi di Trento*. Relatore R. Rigon.
- [12] Wu W., Sidle R.C (1995): “A distributed slope stability model for steep forested basins”. *Water Resource Research*, 31(8): 2097–2110.