

Erosione dei suoli: applicazioni tramite il software GRASS GIS

Corrado Cencetti¹, Pierluigi De Rosa², Andrea Fredduzzi³, Ivan Marchesini⁴

¹Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale – Università di Perugia – mail corcen@unipg.it

²Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale – Università di Perugia – mail pierluigi.dr@unipg.it

³Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale – Università di Perugia – mail fredduzzi@unipg.it

⁴Autore corrispondente. Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale – Università di Perugia – Via G. Duranti, 93 – 06125 Perugia, Tel. 075 5853760, Fax 075 5853756 - mail marchesini@unipg.it

Soil erosion: some applications by GRASS GIS

ABSTRACT: The evaluation of the sediment yield and the location of the areas under conditions of risk erosion are important applications of the G.I.S. Some soil erosion models are more used than others, but sometimes they model the soil erosion processes using empirical and too much simple ways. The new soil erosion models generation try to use a physical approach. These new models need to be tested and calibrated to carefully evaluate the parameters involved in the simulation of the soil erosion and sediment transportation processes. A small catchment near Collazzone (Piedicolle Creek, Umbria, central Italy) was used as a case study in order to test some different models, and evaluate the difference between them. RUSLE model uses an *erosion limited* approach; this model simulates only soil erosion, neglecting sediment deposition processes. USPED model uses a different approach defined *transport limited*. USPED may evaluate also depositional processes. The comparison shows how USPED model, sometime considered applicable only for a qualitative approach, can produce results not too different than those obtained by the RUSLE model, but improved by the definitions of the sedimentation areas. SIMWE (soil erosion and sediments transportations model) is a theoretical evolution of the USPED model. SIMWE doesn't use, as USPED, empirical parameters, but it's a physical based model. SIMWE needs of a long phase of testing and although it has high potentiality and perspective, it should be applied carefully and on small and steep basins.

Key terms: Soil erosion; USPED; SIMWE; G.I.S. (Geographic Information System)

Termini chiave: erosione del suolo, USPED, SIMWE, G.I.S. (Geographic Information System)

Riassunto

La valutazione della produzione di sedimenti dai versanti e l'individuazione delle aree a maggior rischio di erosione è una delle importanti applicazioni dei sistemi GIS

Il panorama dei modelli che si occupano di erosione del suolo è vasto. Ne esistono alcuni ben affermati, che modellano il processo in maniera talvolta troppo semplificata e/o empirica; di contro, la tendenza attuale è quella di sviluppare e testare modelli maggiormente basati sulla fisica dei processi studiati.

Il piccolo bacino idrografico del F.so di Piedicolle, vicino all'abitato di Collazzone (Umbria) è stato utilizzato come caso di studio al fine di applicare alcuni di questi modelli, confrontarli e valutarne vantaggi e svantaggi.

Il modello RUSLE, che utilizza un approccio definito "erosion limited", è in grado di valutare la sola erosione dei suoli, trascurando completamente il fenomeno della deposizione del materiale eroso. Il modello USPED, che utilizza invece un altro approccio, definito "transport limited", è invece in grado di trattare anche il processo deposizionale.

Il confronto tra i risultati ottenuti dai due modelli ha permesso di mettere in luce come il modello USPED, talvolta indicato in letteratura come applicabile solo per una valutazione qualitativa del processo, fornisca invece risultati compatibili con quelli del modello RUSLE con il vantaggio, però, di evidenziare anche le aree in sedimentazione.

Il modello di erosione e trasporto dei sedimenti SIMWE, un'evoluzione teorica di USPED, si differenzia da questo perchè non si basa su alcuni parametri empirici, ma è un modello misto fisicamente basato. SIMWE necessita di una fase di testing ed il suo utilizzo ha dimostrato come il modello abbia elevate potenzialità rispetto ai precedenti.

Introduzione

Dal momento in cui sempre maggiore attenzione è stata dedicata alla problematica dell'erosione del suolo, i GIS sono diventati lo strumento principale per i modelli che si occupano della individuazione e della valutazione delle zone a rischio di erosione. Il vantaggio è nella estrema versatilità e capacità che questo strumento ha nella gestione di dati territoriali, permettendo un immediato confronto e

una conseguente serie di deduzioni e analisi.

Il processo di degradazione del suolo più evidente alle nostre latitudini è l'erosione da parte delle acque di ruscellamento; a questo processo di asportazione del suolo sono connessi quelli di trasporto e di deposito che provocano profonde alterazioni degli orizzonti più superficiali (e non solo) del suolo stesso.

Anche se il processo di erosione dovuto alle acque di origine meteorica si può dividere in diversi "sottoprocessi", in genere si è soliti distinguerne solo due: erosione per *interrill* e erosione per *rill*; la prima è dovuta all'impatto della pioggia con il suolo ed al deflusso laminare, mentre la seconda è connessa al deflusso idrico superficiale che si ha nei *rills* (Abrahams et alii, 1996).

I modelli di erosione del suolo

Molti modelli di erosione e trasporto di sedimenti si basano sulle interazioni che esistono tra la capacità di erodere i sedimenti e la capacità di trasportarli e vengono classificati proprio in funzione del loro metodo di simulazione.

Si definiscono modelli *erosion limited* quei modelli che assumono che il flusso idrico possa trasportare un'infinita quantità di sedimenti e che la quantità di suolo eroso sia limitata solo dalla capacità dell'acqua di erodere particelle di suolo. Questi modelli non sono quindi in grado di prevedere il processo di sedimentazione. La USLE (Universal Soil Loss Equation) è un'equazione empirica, utile a determinare la quantità di suolo perso da un terreno in un ciclo idrologico. L'equazione rappresentativa è: $[A = K \cdot C \cdot P \cdot R \cdot L \cdot S]$, dove A è il suolo perso per unità di tempo per unità di area; K è il fattore di erodibilità; L è il fattore di lunghezza del versante; S è il fattore di pendenza del versante; C è il fattore di copertura vegetale o uso del suolo; R è il fattore di erosività (Wischmeier & Smith, 1978), P è il fattore relativo alle tecniche sistematorie. Come si può notare, la quantità di suolo perduto dipende dal prodotto di diversi fattori, tutti empirici e rappresentativi di un particolare effetto. In particolare, R rappresenta l'aggressività della pioggia, K l'erodibilità del suolo (questi sono gli unici fattori ad avere dimensioni fisiche), L e S la lunghezza e la pendenza del versante e, infine, C e P sono fattori che si riferiscono alla copertura del suolo ed alle eventuali tecniche sistematorie. USLE ha subito diversi cambiamenti: è stata anche rinominata RUSLE -Revised Universal Soil Loss Equation (Foster et alii, 1993), fino alla sua ultima formulazione.

La versione RUSLE utilizzata in questo lavoro è quella proposta da Mitasova et alii (1996) che include, in un unico fattore LS, i parametri relativi a lunghezza del versante L e pendenza S e utilizza, quindi, una formulazione che meglio interpreta la complessità topografica della regione esaminata.

Si definiscono modelli *transport limited* quelli che ipotizzano che la quantità di sedimenti trasportati dal flusso idrico sia limitata esclusivamente dalla capacità di trasporto

del flusso stesso. Essi assumono che la quantità di sedimenti trasportati dall'acqua sia sempre pari alla sua massima capacità di trasporto, senza prevedere una funzione di controllo che verifichi la presenza o meno di sedimenti trasportabili. Quindi, in corrispondenza di un aumento della capacità di trasporto, viene prevista erosione e laddove la capacità di trasporto decresce, viene prevista deposizione. USPED (Moore & Burch, 1986) è, in sostanza, un modello semplice che predice la distribuzione spaziale di erosione e deposizione nelle ipotesi di flusso stazionario, con pioggia effettiva uniformemente distribuita ed in condizioni di capacità di trasporto limitato.

Esistono poi modelli più generali (come SIMWE e WEPP) che simulano i processi di erosione e deposizione unendo entrambi i tipi di approcci appena descritti. Il modello SIMWE, sviluppato da Mitasova & Mitas (1998), è la naturale evoluzione del modello USPED.

SIMWE è un modello bivariato di erosione e trasporto di sedimenti che presenta diversi vantaggi (Mitasova et alii, 1996; 1997): 1) minimizza l'uso dei fattori empirici e si basa maggiormente su formulazioni che riproducono la fisica del processo; 2) usa metodi numerici "robusti", capaci di supportare alte risoluzioni spaziali; 3) incorpora l'influenza della variabilità spaziale di pioggia, terreno, copertura e tipo di suolo.

In SIMWE si analizzano i processi di deflusso superficiale dell'acqua e di flusso dei sedimenti in due momenti separati, cioè utilizzando prima un modulo per la valutazione della mappa del tirante idraulico del flusso superficiale e poi utilizzando l'output di quest'ultimo per il calcolo della mappa del deflusso dei sedimenti.

Il modulo che simula il flusso idrico superficiale si basa su un sistema di equazioni differenziali, ottenuto combinando l'equazione di conservazione della massa

$$i - \nabla q = \frac{dh}{dt}$$

con la relazione di Manning

$$v = \frac{C}{n} h^{\frac{2}{3}} \sqrt{s}$$

nelle due incognite q (flusso idrico superficiale) e h (lama d'acqua), dove i è l'intensità di pioggia, v è la velocità del flusso idrico, C è il coefficiente di scabrezza secondo Manning e s è la pendenza del pelo libero (che in moto uniforme corrisponde a quella del letto del flusso).

Analogamente, l'altro modulo combina in un sistema di equazioni differenziali la conservazione della massa e la relazione di Foster (Foster & Mayer, 1972)

$$D = \frac{D_c}{T} [T - |q_s|]$$

nelle incognite q_s (flusso di sedimenti) e D (tasso di erosione/deposizione), dove con D_c si esprime la quantità di suolo erodibile e con T la quantità di suolo trasportabile.

La condizione di base, presente per entrambi i moduli, è l'ipotesi di stazionarietà, che permette di semplificare molto le equazioni presenti, ma risulta essere poco realistica. Ciò porta alla necessità di testare a fondo i risultati ottenuti dai modelli.

L'elemento di distinzione fondamentale di SIMWE rispetto agli altri precedenti modelli, è rappresentato dal fatto che questo modello si pone a cavallo tra i due, in quanto non può essere definito né *transport limited* e nemmeno *erosion limited*. SIMWE valuta se la disponibilità di sedimenti in una determinata cella è sufficiente a saturare la capacità di trasporto, calcolata in base alla portata idrica. Se l'ipotesi fatta risulta verificata, il modello simula deposizione, viceversa erosione.

I modelli di erosione e deposizione appena descritti sono stati applicati sul bacino del F.so di Piedicolle (Umbria), in quanto su quest'area erano disponibili numerosi dati di tipo cartografico e pedologico (Signorelli, 2004).

Il bacino del fosso di Piedicolle, situato ad ovest dell'abitato di Collazzone (PG), presenta una superficie di 9,25 Km², un'altitudine massima di 450 m s.l.m. e minima, alla sezione di confluenza con il fiume Tevere, di 150 m s.l.m.

Confronto tra i modelli Rusle e Usped

Il confronto tra i risultati dei due modelli nasce dall'esigenza di valutarne la capacità di eseguire una stima quantitativa della perdita di suolo. Il modello USPED, ad oggi, viene utilizzato per eseguire analisi di tipo qualitativo e per individuare i patterns di erosione e deposizione, al fine di segnalare le zone a rischio di erosione (Pistocchi et alii, 2002).

Al fine di applicare il modello RUSLE, sono state create, inizialmente, una serie di mappe raster dell'area in esame, corrispondenti a ciascuno dei parametri necessari al modello stesso.

I dati pluviometrici utilizzati per la valutazione del parametro R fanno riferimento alla stazione pluviometrica di Todi (PG) che risulta essere la più vicina al bacino in esame.

Nella formulazione utilizzata, i parametri L e S vengono determinati non più separatamente, ma sono integrati in un'unica formula. Questo tipo di approccio, sebbene più complesso dei precedenti, è reso possibile dall'utilizzo dei GIS. I parametri relativi alla pendenza ed alla lunghezza del versante sono infatti calcolati partendo dai modelli digitali del terreno (nello specifico il DEM utilizzato è stato ottenuto per interpolazione delle curve di livello della CTR della Regione Umbria, imponendo una risoluzione al suolo di 3 metri).

Una volta calcolata la mappa di perdita di suolo con il metodo RUSLE, è stata analizzata la stessa area utilizzando il modello USPED.

A causa della carenza di studi sperimentali specifici, per calcolare alcuni parametri necessari al modello USPED si è

fatto riferimento a quelli della RUSLE-USLE, in particolare per quanto concerne copertura, tipo e uso del suolo. Si è assunto che fosse possibile stimare la capacità di trasporto di sedimenti del flusso idrico come prodotto di alcuni fattori: $T = R \cdot K \cdot C \cdot P \cdot L \cdot S$. In particolare i fattori R, K, C, e P sono stati calcolati come nel caso della RUSLE, mentre i fattori L ed S sono stati calcolati diversamente, ma sono stati ugualmente considerati funzione dell'area drenante sulla cella analizzata e della pendenza del versante nel medesimo punto. Nella formulazione teorica di USPED, la portata liquida transitante per ciascuna cella, in condizioni stazionarie, viene calcolata come il prodotto tra pioggia efficace (fattore R) e area drenante. Il trasporto di sedimenti (che viene considerato pari alla capacità di trasporto del flusso) è infine funzione della portata idrica calcolata.

L'erosione/deposizione $D(r)$ stimata per ogni cella, viene calcolata in base alla divergenza della capacità di trasporto T:

$$D(r) = \frac{d(T \cos \alpha)}{dx} + \frac{d(T \sin \alpha)}{dy}$$

dove α [deg] rappresenta l'orientazione del versante (mappa dell'*aspect*). In sostanza $D(r)$ è funzione della variazione di capacità di trasporto che si verifica tra una cella e quelle ad essa contigue, nella direzione x ed y .

Nell'effettuare il calcolo dell'erosione/deposizione con USPED, al fine di effettuare un confronto con la mappa RUSLE già costruita, si è fatta particolare attenzione alle unità di misura che devono essere utilizzate in notazione anglosassone.

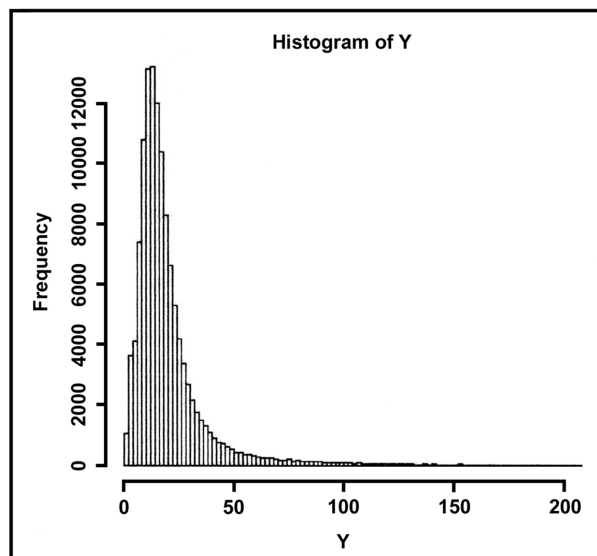


Figura 1 - Distribuzione del valore assoluto delle differenze tra RUSLE ed USPED. In ordinata il numero di celle e in ascisse il valore delle stesse espresso in Kg/m² · anno.

Distribution of the absolute value of the difference between RUSLE and USPED. Y-axis: number of the cells; X-axis: value of the cells in Kg/m² · year.

Poiché il modello USPED valuta sia le zone in erosione, sia quelle in deposizione (a differenza di RUSLE che, come già ricordato, considera in erosione l'intero territorio analizzato) si è deciso di confrontare le carte derivanti dai due metodi nelle sole zone dove il modello USPED predice erosione, creando una mappa delle differenze in valore assoluto tra i dati di RUSLE ed i dati di USPED, che è stata successivamente analizzata al fine di visualizzare la distribuzione statistica delle differenze (figura 1). Si nota come la distribuzione delle differenze presenti una forte asimmetria positiva, che indica la presenza di poche celle in cui si esistono differenze aventi valori superiori, di numerosi ordini di grandezza, a quelli della moda della distribuzione.

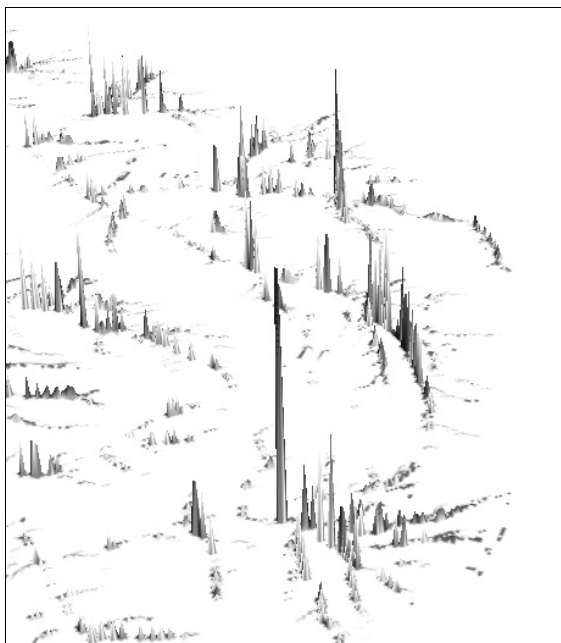


Figura 2 - Visualizzazione dei valori estremi degli scarti sulla mappa dell'area contributiva di monte (modello 3d). Il modello 3d rappresenta il numero delle celle che drenano nella cella considerata. La mappa sovrainposta rappresenta le sole celle che presentano valori di differenza USPED-RUSLE estremamente più elevati della moda della distribuzione statistica rappresentata in figura 1.

Visualization of the maximum values of the differences superimposed to the map of the draining area (3d model). The 3d model represents the number of cells draining into the analysed cell. The superimposed map represents only the cells which have USPED-RUSLE difference values really higher than the statistical mode of the distribution in figure 1.

Analizzando i risultati nel dettaglio, si è notato che tutti i valori estremi dello scarto si disponevano solo sui punti in cui la mappa dell'area contributiva di monte presentava dei picchi, cioè in corrispondenza delle celle rappresentanti gli impluvi (figura 2). Si è poi notato che la differenza era sempre dovuta ad una sovrastima del modello USPED rispetto a RUSLE.

La ragione di questo comportamento è da ricercarsi nel metodo matematico utilizzato da USPED (figura 3) che, come già descritto in precedenza, calcola l'erosione-deposizione in funzione della variazione della capacità di trasporto (che è a sua volta funzione dell'area contributiva di monte).

In figura 3 viene mostrata un esempio di carta dell'accumulazione, dove il valore assunto dalla cella è pari al numero di celle che la "alimentano". Come è logico attendersi, le celle dell'impluvio aumentano il proprio valore procedendo verso valle. Ciò fa sì che, come ad esempio nella zona evidenziata con un circoletto nella stessa figura 3, celle aventi valore molto elevato possano trovarsi a confinare con celle aventi valore pari ad 1.

Poiché, come già ricordato, l'area contributiva è uno dei termini con cui si calcola la capacità di trasporto, è evidente che, la differenza di capacità di trasporto tra le due celle in queste zone risulta elevata. Risultano quindi enormi i valori di erosione calcolati dalla divergenza della capacità di trasporto (descritta dall'equazione precedente).

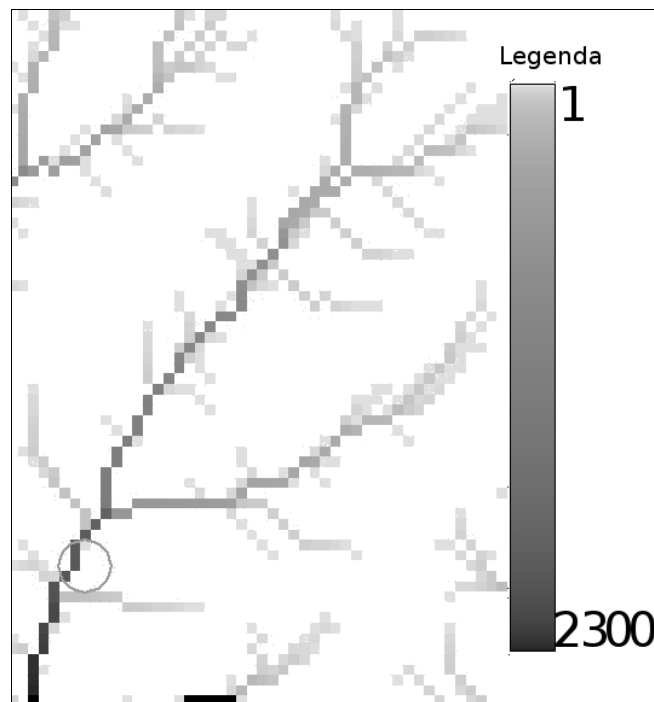


Figura 3 - Esempio di mappa di accumulazione. Il valore assunto dalla cella è pari al numero di celle drenate dalla stessa.
Example of accumulation map. The value of each cell is determined by the number of cells drained by the cell itself.

Ricalcolando la differenza tra le mappe di erosione USPED e RUSLE ed escludendo dall'analisi le zone di impluvio individuate tramite analisi delle direzioni del flusso effettuata sul DEM (modulo r.flow di Grass GIS), si è osservata la totale rimozione della forte asimmetria positiva della distribuzione precedentemente mostrata. Il valore medio dello scarto ottenuto è prossimo al valore medio dei

valori di erosione calcolati con RUSLE. In definitiva, USPED ha fornito stime di erosione pari a circa il doppio di quelle fornite da RUSLE.

In conclusione, quindi, si può affermare che il modello USPED, contrariamente a quanto talvolta sostenuto, è applicabile anche quantitativamente, sebbene si debbano escludere le celle degli impluvi dall'analisi (De Rosa, 2004).

Il modello SIMWE: potenzialità e limiti

I parametri fisici di cui SIMWE necessita per la modellazione del deflusso superficiale e del deflusso dei sedimenti sono: 1) il coefficiente di scabrezza di Manning; 2) la mappa del coefficiente della capacità di distacco; 3) la mappa del coefficiente della capacità di trasporto; 4) la mappa dello sforzo di taglio critico.

Per la valutazione del coefficiente di Manning si è fatto riferimento all'uso del suolo della zona di studio (Li & Zhang J., 2001).

Per la determinazione del coefficiente della capacità di distacco e dello sforzo di taglio critico, sono state utilizzate le relazioni empiriche utilizzate per il modello WEPP (Flanagan & Nearing, 1995), come suggerito dagli autori di SIMWE. Tali relazioni sono state combinate con le informazioni sulle caratteristiche del suolo dell'area di studio. Sono state quindi create le due mappe del coefficiente della capacità di trasporto K_t e dello sforzo di taglio critico τ_s .

Per la determinazione del coefficiente della capacità di trasporto K_t è stata valutata la mappa della capacità di trasporto del flusso T attraverso l'equazione di Yalin (1963), valida per flussi superficiali e poco profondi. Successivamente, è stata realizzata la mappa del coefficiente utilizzando la seguente relazione

$$K_t = \frac{T}{\tau_s^{1.5}}$$

dove $\tau_s = \gamma RS$ rappresenta lo sforzo di taglio; R il raggio idraulico (che, per flussi superficiali, può essere assunto uguale al battente); γ il peso specifico dell'acqua; S la pendenza. La mappa del valore di τ_s può essere calcolata tramite i risultati del primo modulo di SIMWE, quello per il calcolo del tirante idrico.

Le prime osservazioni sui risultati ottenuti da SIMWE sono state effettuate sulla mappa del flusso di sedimenti, nella quale si osserva come i valori di trasporto, alle sezioni di chiusura dei sottobacini, tendano ad annullarsi (figura 4). Ciò ha fatto supporre che i sedimenti erosi venissero risedimentati completamente all'interno dei singoli sottobacini, e che quindi il modello non fosse in grado di calcolare una perdita netta di sedimenti (sediment yield) in uscita dal bacino principale.

Per verificare quanto detto sono stati presi in considerazione due singoli sottobacini su cui si è proceduto al calcolo della somma dei valori delle celle della mappa di output dell'erosione/deposizione. Poiché SIMWE identifica

le celle in erosione e quelle in deposizione con valori di segno opposto, il valore risultante dalla sommatoria algebrica dei valori assunti da tutte le celle di ogni singolo sottobacino è risultato pressoché nullo. Ciò ha confermato come il modello non sia in grado di simulare trasporto solido in uscita dai singoli sottobacini.

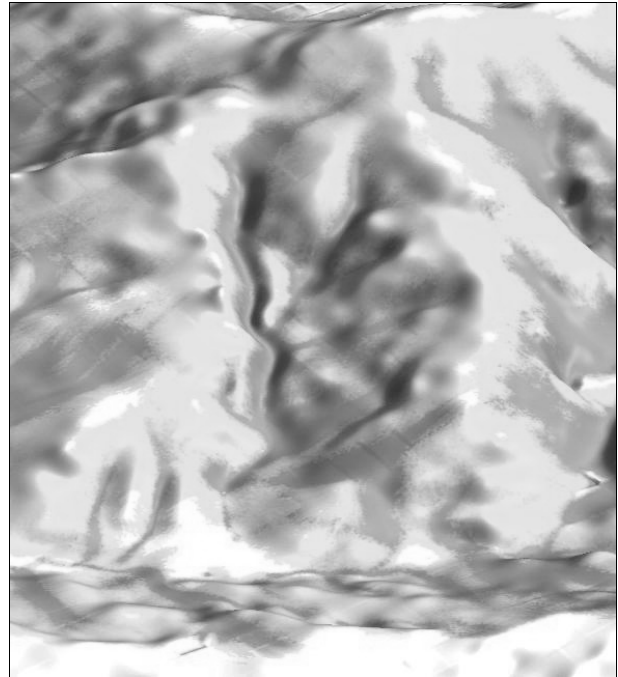


Figura 4 - Mappa del flusso di sedimenti, sovrainposta al Modello Digitale del Terreno riferita ad un sottobacino del F.so di Piedicolle.

Map of the sediment flux, superimposed to the DEM, referred to a little catchment of the Piedicolle Creek basin.

Un'ulteriore, interessante applicazione di SIMWE consiste nella previsione delle zone in cui si osserva maggiore possibilità di formazione di *rills*.

Nell'individuazione di tali zone si è fatto riferimento a quanto proposto in letteratura (Bryan, 1999).

Sebbene la possibilità di formazione di *rills* non dipenda esclusivamente dalle caratteristiche idrauliche del flusso superficiale, ma anche dalle caratteristiche del suolo (che tuttavia sono spesso fortemente variabili e raramente note con la necessaria approssimazione), le zone soggette a "rischio *rills*" sono individuate laddove alcuni parametri idraulici raggiungono precisi valori di soglia.

Il parametro più utilizzato per quest'analisi è la *shear velocity*

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_w}}$$

dove τ è lo sforzo di taglio idraulico, ρ_w è la densità dell'acqua ed il valore di soglia proposto in letteratura è pari a 0.0035 m/s.

Nel presente lavoro, per valutare in ogni punto il valore di u^* si è ricorso alla mappa del battente idraulico in condizioni stazionarie per tutta l'area per una determinata precipitazione (utilizzando, come già ricordato, solo il primo modulo di SIMWE).

Una volta determinata u^* , sono state individuate le aree dove essa superava il valore di soglia; tali aree sono state poi intersecate con l'uso del suolo, poiché è stato assunto che solamente dove si ha terreno coltivato nudo si ha rischio di formazione di *rills* (figura 5).

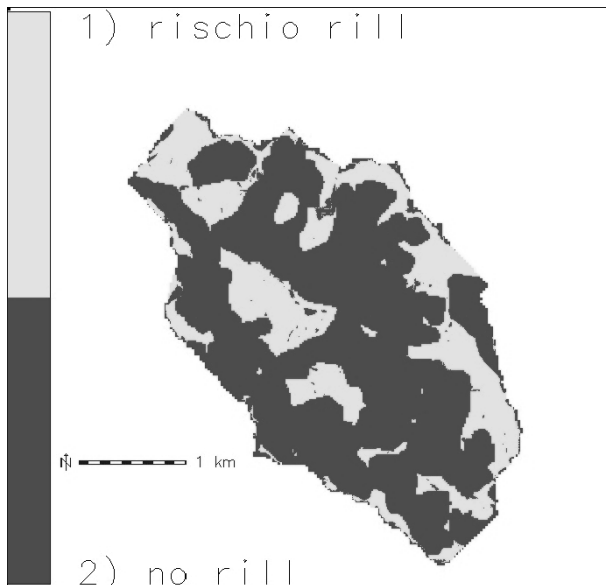


Figura 5 - Zone a rischio di formazione di rills.
Areas affected by risk of rills formation.

Conclusioni

Il presente lavoro ha evidenziato come un GIS non solo possa integrarsi al meglio con modelli che simulano i processi erosivi di versante, ma ne diventa un supporto

Bibliografia

Abrahams A.D., Li G. & Parson A.J. (1996) - Rill hydraulics on a semiarid hillslope, southern Arizona. *Earth Surface Processes Landforms*, 21, 35-47.

Bryan R.B. (1999) - Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology*, 32, 385-415.

De Rosa P. (2004) - Analisi e confronti di modelli di erosione del suolo e trasporto di sedimenti tramite l'uso di sistemi G.I.S. Tesi di laurea inedita, Università degli Studi di Perugia.

Flanagan, D.C. & Nearing, M.A. (1995) - USDA-WEPP (Water Erosion Prediction Project): Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. NSERL Report No. 10, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana, USA.

Foster G.R. & Mayer L.D. (1972) - A closed

form erosion equation for upland areas in sedimentation. Symposium in Honor of Professor H. A. Einstein. Edited by H. W. Shen, pp. 12.1-12.19, Colo. State Univ. Ft Collins, Colorado..

Foster G.R., Renard K.J & Yolder D.C. (1993) - RUSLE Users' Guide - Revised Universal Soil Loss Equation. Soil and Water Conservation Society, Ankey, IA.

Li Z. & Zhang J. (2001) - Calculation of Field Manning's Roughness Coefficient. *Agricultural Water Management*, 49, 2, 153-161.

Mitasova H., Hofierka J. & Iverson R. (1996) - Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *Journal of Geographics Information Science*, 10, 629-641.

Moore E.E. & Burch J.M. (1986) - Modelling erosion and deposition. *Topographics effects.*

Transaction ASAE, 29, 1624-1640.

Mitasova H. & Mitas L. (1998) - Distributed Soil erosion simulation for effective erosion prevention. *Water Resources Research*, 34, 3, 505-516.

Mitasova H., Mitas L. & Brown W.M. (1996) - GIS tool for erosion/deposition modeling and modification and multidimensional visualization. PART II: Unit Stream Power-based Erosion/Deposition Modeling and Enhanced Dynamic Visualization. Report for USA CERL University of Illinois. Urbana - Champaign, 1998.

Mitasova H., Mitas L. & Brown W.M. (1997) - GIS tool for erosion/deposition modeling and multidimensional visualization, in interpolation, rainfall - runoff. Report for U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory,

quasi indispensabile.

Il modello USPED, effettuate le necessarie correzioni, può infatti essere considerato affidabile, sia dal punto di vista qualitativo sia quantitativo. Nel confronto con RUSLE, che è il metodo più utilizzato e testato per la valutazione dell'erosione dei suoli da tutta la comunità scientifica, USPED riesce a fornire risultati simili, ma con il grande vantaggio che è in grado di individuare anche le zone in sedimentazione, che sono invece totalmente trascurate in RUSLE.

Per quel che riguarda il modello SIMWE, si può affermare che esso predice in modo egregio, da un punto di vista qualitativo, la distribuzione dei processi di erosione e di sedimentazione in un bacino (meglio del modello USPED) e, dato che SIMWE è un modello fisicamente basato, questo può essere considerato un ottimo risultato. Nonostante la semplicità teorica del metodo utilizzato per la risoluzione delle equazioni differenziali (metodo Montecarlo), al modello è comunque necessario un numero elevato di variabili di input. Questo fatto, associato anche alla scarsità di letteratura scientifica al riguardo, comporta problemi nel controllo del comportamento del modello durante la fase di taratura.

Sulla base dello studio del comportamento di SIMWE, si può affermare che il modello non è in grado di prendere completamente in considerazione il fenomeno del *routing* dei sedimenti dall'interno del bacino fino alla sezione di chiusura. SIMWE, cioè, non consente al flusso sedimentario di "defluire" completamente, ma ne deposita una larga quantità all'interno del bacino. Questo problema si presenta, ovviamente, in bacini medio - grandi, dove il trasporto in alveo diventa nettamente più importante di quello lungo il versante. Per questo motivo si ritiene che il modello possa essere applicato in piccoli bacini, in cui la rete degli impluvi è ben definita e non troppo complessa; per bacini più estesi il modello può essere utilizzato per un'analisi qualitativa del processo, ma ancora non quantitativa.

4-14, Univ. of Urbino, Urbana.

Pistocchi A., Cassani G. & Zani O. (2002) - Use of the USPED model for mapping soil erosion and managing best land conservation practice. Proc. of "iEMSs2002", Lugano (CH).

Signorelli E. (2004) - Applicazioni G.I.S. allo

studio delle perdite di suolo in piccoli bacini. Tesi di laurea inedita, Università degli Studi di Perugia.

Wischmeier W.H. & Smith D.D. (1978) - Predicting rainfall-erosion losses: A guide to conservation planning. U.S. Department of

Agriculture, Agricultural Handbook No. 537.

Yalin M.S. (1963) - An expression for bed-load transportation. *Journal of Hydraulics*, Division ASCE89, 221-250.