

## EROSIONE DEI SUOLI E GRASS GIS: ESEMPI DI APPLICAZIONE

CENCETTI C.\*, DE ROSA P.\*, FREDDUZZI A.\*, MARCHESINI I.\*

\*Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale - Univ. di Perugia

**ABSTRACT.** La valutazione della produzione dei sedimenti dai versanti e l'individuazione delle aree a maggior rischio di erosione è una delle importanti applicazioni dei sistemi GIS. Squilibrio nel bilancio sedimentario di un bacino idrografico, marcata riduzione della produttività agricola dei terreni, erosione delle coste ed altri fenomeni legati alla produzione e trasporto di sedimenti possono e devono essere affrontati, in prima battuta, mediante studi a piccola scala che richiedono l'integrazione di dati territoriali diversi e che permettono l'analisi di questi processi.

Il panorama dei modelli che si occupano di erosione del suolo è vasto. Ne esistono alcuni ben affermati, che modellizzano 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 di Collazzone (Umbria) è stato utilizzato come caso di studio al fine di applicare alcuni di questi modelli, confrontarli e valutarne vantaggi e svantaggi.

Grass 5.3-CVS è stato utilizzato al fine di applicare il modello oggi più utilizzato nell'ambito dello studio dell'erodibilità dei suoli, RUSLE, e per valutare il tasso di erosione e deposizione netto mediante il modello USPED. 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 mettere in luce anche le aree in sedimentazione).

Grass 5.3-CVS (ed attualmente Grass 5.4) presenta all'interno del *tarball* (*tar.gz*), il modello di erosione e trasporto dei sedimenti SIMWE (Mitasova et al., 2002) che è un'evoluzione teorica di USPED. Si differenzia da esso perché non si basa, come quest'ultimo, su alcuni parametri empirici, ma è un modello misto ("transport ed erosion limited"), fisicamente basato. Il modello tiene quindi conto sia della capacità erosiva del flusso idrico, quanto della sua capacità di trasporto e delle loro interazioni. SIMWE necessita di una fase di *testing* e il suo utilizzo ha mostrato come il modello abbia elevate potenzialità rispetto ai precedenti. Esistono tuttavia limiti e condizioni che sono emersi in fase di applicazione del modello, che dovranno essere ulteriormente approfonditi; limiti che potranno essere forse superati alla luce di alcune osservazioni, riportate in questa nota, sulle scale di applicazione e sui parametri di input.

### 1. INTRODUZIONE

Da quando 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 valutazione delle zone a rischio erosione. Il vantaggio dell'integrazione di tali modelli di erosione del suolo con i GIS sta nella estrema versatilità e capacità che questo strumento ha nella gestione di dati territoriali. Ciò permette un immediato confronto e una conseguente serie di deduzioni e analisi (necessarie in fase di post-elaborazione) che non possono essere svolte con modelli non integrati.

Il problema della disgregazione e perdita di suolo sta ricevendo sempre maggiore attenzione da parte dell'intera comunità scientifica mondiale. La tematica dell'erosione del suolo è correlata ad altrettante tematiche importanti come la progressiva espansione dei deserti, l'aumento della popolazione e il conseguente aumento dei fabbisogni mondiali alimentari. La letteratura scientifica degli ultimi vent'anni testimonia l'insorgere di fenomeni di degradazione del suolo legati all'intensificazione dell'attività antropica, sia agricola (con pratiche sempre più invasive), che extra agricola. Diventa impellente quindi determinare la soglia oltre la quale un determinato fenomeno provoca danni irreversibili.

Per quanto riguarda l'Italia, risulta che i 2/3 dei suoli presentano preoccupanti problemi di degradazione nelle aree maggiormente antropizzate (Fonte APAT) a causa della mancanza di misure conservative del suolo (sistemazioni idraulico-agrarie, drenaggi, inerbimento), dell'utilizzo di tecniche agrarie sempre più intensive e dell'aumento dell'erosività delle piogge che presentano eventi sempre più intensi e più ravvicinati.

Il processo di degradazione del suolo più evidente è l'erosione. L'erosione del suolo è il fenomeno per cui la superficie terrestre attaccata dai vari agenti chimici, fisici, biologici e antropici subisce una continua demolizione; a questo processo di asportazione del suolo sono connessi quelli di trasporto e di deposito. Per effetto dell'erosione si hanno profonde alterazioni del livello superficiale del suolo ed, in particolare, si verifica sia un assottigliamento dello "strato arabile", nel caso di suoli agrari, sia una riduzione degli orizzonti di superficie nel caso di terreni naturali. Conseguenze dirette si hanno nella riduzione di spessore utile per le radici delle piante, della riserva di nutrienti e nella capacità di ritenzione di acqua. L'elemento dannoso del fenomeno erosivo è la velocità del processo; essa genera sostanzialmente due tipi di erosione:

- si parla di erosione normale o geologica quando la velocità della degradazione è sufficientemente lenta, per cui la velocità di formazione del suolo per decomposizione delle rocce compensa la perdita subita e così, per effetto di questo equilibrio, il suolo si mantiene pressochè inalterato come spessore.
- si parla di erosione accelerata del suolo quando l'asporto dei detriti è più rapido della formazione del suolo e spesso il risultato finale è l'affioramento in superficie della roccia nuda (bedrock) sottostante.

I principali tipi di erosione sono: l'erosione idrica, l'erosione glaciale e l'erosione eolica. Si tratterà la sola erosione idrica a causa della sua maggiore importanza alle nostre latitudini. Questo tipo di erosione è di particolare rilievo non solo per le pratiche agricole, poichè porta a una diminuzione della produttività dei terreni, ma anche in altri settori quali la geomorfologia e l'idrologia.

L'erosione idrica del suolo si può dividere in più sottoprocessi quali ad esempio l'erosione da impatto della goccia di pioggia, l'erosione da deflusso laminare, l'erosione per la formazione di "rills" etc.. Ad ognuno di questi sottoprocessi si potrebbe associare una modellizzazione specifica in funzione dei parametri che lo coinvolgono, quali ad esempio l'entità della precipitazione, il tipo e l'uso del suolo, etc.. Nel campo

della modellazione si è soliti distinguere solo due sottoprocessi: erosione per “interrill” o diffusa e erosione per “rill” o per rigagnoli; la prima è dovuta all’impatto della pioggia ed al deflusso laminare (ad opera, cioè, di quei processi presenti diffusamente sul territorio) e la seconda è connessa al deflusso idrico superficiale nei rivoli.

L’erosione da impatto è funzione principalmente dell’energia cinetica della pioggia la quale dipende, a sua volta, dall’intensità e dalla dimensione delle gocce. Il contenuto d’acqua iniziale del suolo svolge un importante ruolo di controllo sul processo di impatto della goccia. Sui terreni secchi e sciolti molta energia è spesa per disgregare e deformare le particelle ma, quando il contenuto d’acqua aumenta, il suolo si fluidizza e lo stadio finale è quello in cui la goccia di pioggia interagisce col deflusso superficiale.

L’erosione per deflusso laminare è caratterizzata dal trasporto delle particelle terrose lungo la linea di massima pendenza a opera del velo d’acqua che ricopre diffusamente il suolo; questo subisce un logoramento pressochè uniforme su tutta la sua superficie, ma limitato nello spessore interessato. Il fenomeno è caratterizzato dalla formazione di un finissimo reticolato di minuti rivoletti i quali si distribuiscono sul pendio in maniera diversa da una precipitazione all’altra. Solitamente questa forma di erosione è presente in zone a superficie uniforme con pendenza per lo più lieve o costante, oppure su pendici ricoperte da un efficace manto vegetale.

Il passaggio da erosione per “interrill” a erosione per “rill” è importante sia per il tasso erosivo, che viene notevolmente aumentato, sia per l’evoluzione geomorfologica del territorio. L’erosione per “rill” si verifica come evoluzione dell’erosione diffusa, in quanto si formano progressivamente sottili correnti idriche che finiscono per concentrarsi e canalizzarsi in incisioni già esistenti o aperte dalla stessa corrente. In tal caso il suolo subisce un logoramento concentrato lungo particolari linee che interessano uno spessore sempre più elevato.

Per i motivi appena esposti l’erosione del suolo rappresenta un problema rilevante in geomorfologia perché causa un mutamento delle forme (formazione di rills e loro possibile evoluzione in gullies e calanchi) e in idrologia poiché, ad esempio, la velocità di deflusso aumenta nel passaggio da deflusso laminare a deflusso per “rill” e determina una variazione nella trasformazione nel fenomeno di trasformazione afflussi deflussi. L’aumento di particelle solide trasportate dai versanti nei collettori principali determina anche numerosi problemi di carattere ambientale (intorbidimento delle acque e “siltazione” dei pori esistenti tra i ciottoli in alveo, che sono importanti ai fini della riproduzione dei pesci).

Pertanto si avverte sempre di più la necessità di disporre di modelli in grado di simulare il processo erosivo al fine di prevedere e gestire le dinamiche sedimentarie. Per poter creare tali modelli è necessario comprendere nel dettaglio i processi geomorfologici e idrologici responsabili dell’erosione e del trasporto di sedimenti, i quali sono fortemente influenzati dalle proprietà del suolo.

## 2. INTRODUZIONE AI MODELLI TEORICI DI EROSIONE DEL SUOLO

Prima di entrare nel dettaglio dei vari modelli è opportuno analizzare l’approccio teorico che gli stessi utilizzano per simulare un processo così complesso come l’erosione e il distacco delle particelle costituenti il suolo. La produzione di sedimenti in un bacino è, in massima parte, il risultato dell’erosione operata dalla pioggia e dal flusso dell’acqua. Esistono altri meccanismi, meno importanti, di produzione dei sedimenti che non verranno analizzati in questa sede. Il processo di erosione e trasporto del suolo è funzione di diversi fattori, ma principalmente dipende dalle relazioni che esistono tra la capacità di erodere i sedimenti e la capacità di trasportarli. Molti modelli di erosione e trasporto di sedimenti si basano sulle interazioni tra questi due processi e vengono classificati proprio in funzione della loro simulazione.

Si definiscono *modelli erosione limited* (modelli a distacco limitato) quei modelli che assumono, come ipotesi di lavoro, che il flusso idrico può trasportare un'infinita quantità di sedimenti e che la quantità di suolo eroso, di conseguenza, è limitata solo dalla capacità dell'acqua (di impatto e di ruscellamento) di distaccare il suolo. Poiché questa ipotesi non considera la possibilità che i sedimenti si arrestino lungo il loro tragitto, questi modelli non sono in grado di predire la deposizione. Gli output di questi modelli (ad esempio RUSLE ed USLE) sono spesso usati per stimare il suolo eroso che diventa input per i modelli che simulano il routing dei sedimenti all'interno del bacino (CASC2d, ANSWERS).

Si definiscono *modelli transport limited* (modelli a capacità di trasporto limitato) quei modelli che ipotizzano che la quantità di sedimenti trasportati dal flusso idrico è limitata esclusivamente dalla capacità di trasporto del flusso idrico stesso. Questo metodo assume anche che la quantità di sedimenti trasportati dall'acqua è sempre pari alla sua massima capacità di trasporto senza prevedere una fusione di controllo che verifichi la presenza o meno di sedimenti trasportabili (che verifichi cioè che tali sedimenti siano stati preventivamente distaccati dal suolo). Quindi, nei luoghi dove la capacità di trasporto aumenta, viene prevista erosione; dove la capacità di trasporto decresce, viene prevista deposizione (ad esempio USPED).

Esistono poi modelli più generali (come SIMWE e WEPP) che simulano il processi di erosione e deposizione unendo entrambi i tipi di approcci appena mostrati (sia il distacco limitato che la capacità di trasporto limitato).

### 3. PANORAMICA DEI MODELLI DI EROSIONE

**3.1. Il modello RUSLE.** I primi studi sulle relazioni intercorrenti tra le proprietà del suolo e la sua erosione sono iniziate nel '26 con Bennet [Bryan R.B., 1999]. Da allora molti passi avanti sono stati fatti e si è capito come la distribuzione dei processi erosivi e la resistenza del suolo sono fortemente influenzati da ognuno dei sottoprocessi di erosione attivi. Poiché è stato difficile comprendere appieno tali dipendenze, la prima strada intrapresa è stata quella di creare un unico fattore rappresentativo dell'erodibilità dei suoli, basato su valutazioni esclusivamente empiriche. Nasce così la USLE (Universal Soil Loss Equation) [Wischmeier W.H. and Smith D.D., 1978] che è un'equazione empirica utile a determinare la quantità di suolo perso da un terreno in un ciclo idrologico. L'equazione è:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

dove A è il suolo perso per unità di tempo per unità di area. Come si vede la quantità di suolo perso 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 delle 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. Dalla sua prima formulazione la USLE ha subito diversi cambiamenti, venendo anche rinominata RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), fino alla sua ultima formulazione. La versione RUSLE utilizzata in questo lavoro è quella proposta da Mitasova et alii [Mitasova H., Hofierka J., Zlocha M., Iverson L.R., 1996] che include in un unico fattore "LS" i parametri relativi a lunghezza del versante "L" e pendenza "S", utilizzando una formulazione che meglio interpreta la complessità topografica della regione esaminata:

$$(3.1) \quad LS = (m + 1) \cdot \left( \frac{A}{a_0} \right)^m \cdot \left( \frac{\sin \beta}{\sin \beta_0} \right)^n$$

$$(3.2) \quad \begin{aligned} a_0 &= 22.13m \\ \beta_0 &= 5.14^\circ \end{aligned}$$

dove  $A$  è l' area contribuente a monte,  $b$  è la pendenza del pendio e  $m$  e  $n$  sono parametri.

Tutti gli altri parametri della RUSLE vengono determinati secondo le metodologie classiche (reperibili in letteratura) utilizzate per USLE.

La continua evoluzione nello studio delle problematiche dell'erosione del suolo ha spinto la ricerca verso modelli sempre meno empirici e sempre più basati sui reali processi fisici. All'interno di questa evoluzione si pone il modello USPED.

**3.2. Il modello USPED.** USPED è un modello semplice che predice la distribuzione spaziale di erosione e deposizione nelle ipotesi di flusso stazionario con pioggia effettiva uniformemente distribuita e in condizioni di capacità di trasporto limitato. Il modello è basato su una teoria inizialmente elaborata nel 1986 [Moore L.D. and Burch G.J. 1986] integrata da numerosi e successivi miglioramenti. Moore e Burch avevano proposto di valutare erosione e deposizione del suolo come conseguenza delle variazioni locali della capacità di trasporto di sedimenti. La novità della proposta è, sostanzialmente, che il tasso di erosione o di deposizione non dipende dal valore in sé della capacità di trasporto quanto, piuttosto, dall'entità della variazione della stessa da un punto all'altro del territorio. L'erosione, cioè, si verifica laddove c'è un incremento della capacità di trasporto dell'acqua mentre, dove la capacità di trasporto diminuisce, l'acqua rilascia i sedimenti determinando la deposizione.

Detto  $q_s$  il flusso di sedimenti [ $Kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ ]:

$$(3.3) \quad q_s = K_t \cdot q^m \cdot \sin(\beta)^n$$

dove  $q$  è il flusso idrico superficiale per unità di area [ $\frac{m^3/s}{m^2}$ ],  $\beta$  è la pendenza,  $K_t$  è il coefficiente di trasportabilità del flusso idrico (che dipende dal tipo e dall'uso del suolo), mentre i coefficienti  $m$  e  $n$  sono delle costanti, il cui valore è legato al tipo di suolo ed al tipo di flusso. Queste costanti vengono grossolanamente impostate, nel caso di deflusso superficiale, rispettivamente a 1.6 e 1.3.

In condizioni di "capacità di trasporto limitato" si assume che la capacità di trasporto  $T$  sia uguale al flusso di sedimenti  $q_s$ , cioè:

$$(3.4) \quad T = q_s$$

Moore e Burch hanno proposto di misurare la potenziale erosione e deposizione di sedimenti valutando il cambiamento della capacità di trasporto (lungo la direzione del flusso) tramite una derivata direzionale nella direzione di massima pendenza.

$$(3.5) \quad D = \frac{dT}{ds} = K_t \cdot \{[grad(h) \cdot s] \sin(b) - h \cdot k_p\}$$

dove  $s$  è il vettore unitario nella direzione di massima pendenza,  $h$  è la profondità della lama d'acqua stimata,  $k_p$  è la curvatura del profilo (la curvatura del terreno nella direzione di massima pendenza),  $K_t$  è il coefficiente di trasportabilità del flusso idrico e  $D$  è il tasso di erosione/deposizione netta.

Successivamente è stata proposta una formulazione 2-D, in cui si considera il flusso di sedimenti e il flusso idrico  $q_s = q_s(x; y)$  e  $q = q(x; y)$  come vettori a due dimensioni (forma bivariata) e ottenendo

l'erosione-deposizione espressa come:

$$(3.6) \quad D = \text{div}(q_s) = K_t \{ [\text{grad}(h) \cdot s] \sin(b) - h \cdot [k_t + k_p] \}$$

dove  $s$  è il vettore unitario nella direzione di massima pendenza,  $h$  è la profondità della lama acqua, stimata in funzione dell'area a monte  $A$ ,  $k_p$  è la curvatura del terreno (nella direzione della massima pendenza),  $k_t$  è la curvatura tangenziale e cioè la curvatura nella direzione tangenziale alla linea di contorno proiettata nel piano normale [Mitasova, H., Mitas, L., Brown, W. M., Johnston, D., 1998].

Il confronto tra le due teorie mostra come il metodo 1-D proposto da Moore e Burch (1986) fallisce rispetto a quello 2-D di Mitasova nel predire zone di deposizione in aree dove la curvatura del terreno è vicina a zero, ma presenta elevata concavità tangenziale. In pratica nelle zone a bassa curvatura del terreno  $k_p$  il modello 1-D predice indistintamente deposizione, mentre il modello 2-D può prendere in considerazione una eventuale curvatura tangenziale  $k_p$  che, quando è concava, fa diminuire la deposizione; quindi si ha una migliore rispondenza alla realtà [Mitasova, H., Mitas, L., Brown, W. M., Johnston, D., 1998].

**3.3. Il modello SIMWE.** Il modello SIMWE [Mitasova H., Mitas L., 1998] e implementato da Hofierka (1999), è la naturale evoluzione del modello USPED ed è inserito come modulo all'interno di GRASS GIS. Come già il modello USPED (innovativo nel considerare il processo di erosione e deposizione collegato direttamente alla capacità di trasporto dell'acqua) SIMWE è un modello bivariato di erosione e trasporto di sedimenti che presenta diversi vantaggi:

- (1) minimizza l'uso dei fattori empirici e si basa maggiormente su modelli che seguono 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.

SIMWE analizza i processi di deflusso superficiale dell'acqua e di flusso dei sedimenti in due momenti separati. E' dotato, infatti, di due moduli distinti: R.SIM.WATER che viene utilizzato per la modellizzazione del flusso idrico superficiale e R.SIM.SEDIMENT che viene utilizzato, in seconda battuta, per la modellizzazione del flusso di sedimenti in quanto necessita, tra i vari dati di input, degli output di R.SIM.WATER. Tutta la teoria all'origine del modello è stata implementata in questi due moduli da Mitasova e Hofierka. Il modulo è stato scritto in linguaggio C e usa metodi numerici Montecarlo per la risoluzione delle equazioni differenziali (anche per cercare di ottenere la più alta stabilità numerica). Il modello, ancora in fase di testing, è stato ulteriormente migliorato e corretto in alcuni difetti anche grazie alla revisione critica portata avanti nel corso di questo lavoro. Il codice sorgente, infatti, è stato modificato dagli sviluppatori, ed in particolare dalla professoressa Mitasova, in seguito ad alcuni problemi incontrati nell'applicazione del modello eseguita in questo lavoro. Va sottolineato che questa procedura di testing e debugging, con la disponibilità del codice sorgente on-line, è in pieno accordo con la filosofia di sviluppo del software libero ([www.gnu.org](http://www.gnu.org)).

Il primo modulo R.SIM.WATER, che come detto modella il flusso idrico superficiale, si basa su un sistema di equazioni differenziali ottenuto combinando le equazione di conservazione della massa e la relazione di manning, nelle due incognite  $q$  (flussi idrico superficiale) e  $h$  (lama d'acqua).

$$(3.7) \quad \begin{cases} i - \nabla(q) = \frac{\partial h}{\partial t} & \text{eq. di continuità} \\ v = \frac{C}{n} \cdot h^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{s} & \text{eq di manning} \end{cases}$$

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.

Analogamente R.SIM.SEDIMENT combina in un sistema di equazioni differenziali la conservazione della massa e la relazione di Foster [Foster G.R. and Mayer L.D., 1972] nelle incognite  $q_s$  (flusso di sedimenti) e  $D$  (tasso di erosione/deposizione).

$$(3.8) \quad \begin{cases} D = \nabla (q_s) & \text{eq. di continuità} \\ D = \sigma \cdot [T - |q_s|] & \text{relazione di Foster} \end{cases}$$

dove  $\sigma = \frac{D_c}{T}$ , con  $D_c$  che esprime la quantità di suolo erodibile e  $T$  la quantità di suolo trasportabile:

$$(3.9) \quad \begin{aligned} D_c &= K_d \cdot (\tau - \tau_c)^p && \text{quantità di suolo erodibile} \\ T &= K_t \cdot (\tau - \tau_c)^q && \text{quantità di suolo trasportabile} \end{aligned}$$

Con  $K_d$  si indica il coefficiente della capacità di distacco e con  $K_t$  il coefficiente della capacità di trasporto; si tratta di due termini correttivi della eq 3.9 che consentono di calibrare il modello.

Con i simboli  $\tau$  e  $\tau_c$  si indicano rispettivamente lo sforzo di taglio idraulico e lo sforzo di taglio critico.

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. Per la valutazione dei parametri presenti nelle equazioni definite in SIMWE si utilizzano in gran parte le specifiche che valgono per WEPP [Flanagan D.C. and Nearing M.A., 1995], mentre per il solo coefficiente  $K_t$  si utilizza una equazione della capacità di trasporto [Yalin M.S., 1963].

#### 4. AREA DI STUDIO

I modelli di erosione e deposizione precedentemente descritti sono stati applicati sul bacino di fosso Piedicolle (Perugia, Italia) in quanto per questa area erano disponibili numerosi dati di tipo cartografico e pedologico [Signorelli E., 2004]. Il bacino del fosso di Piedicolle, situato ad ovest dell'abitato di Collazzone (PG), presenta una superficie di  $9,25 \text{ Km}^2$ , con 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. Dal punto di vista morfologico il bacino, situato in un'area sostanzialmente collinare, può essere suddiviso in tre parti: una zona orientale, caratterizzata dalle pendenze più elevate, che comprende l'area di testata; una porzione centrale meno acclive, ma dove si rileva la presenza di profonde incisioni torrentizie con pareti talvolta subverticali; una zona occidentale pianeggiante e sub-orizzontale (Valle del Tevere).

Di seguito si riportano le formazioni che affiorano all'interno del bacino (dalla più antica), così come desunte dalla cartografia esistente e dal rilevamento geologico.

- (1) Schlier
- (2) Formazione marnoso-arenacea
- (3) Sedimenti lacustri e/o fluvio-lacustri
- (4) Alluvioni attuali-recenti ed antiche

Gran parte delle aree in cui sono presenti le formazioni dello Schlier e della Marnoso-Arenacea è coperta da bosco, mentre quelle contraddistinte dalla presenza dei depositi fluvio-lacustri sono prevalentemente adibite ad uso agricolo.

Dall'esame della carta dell'uso del suolo e dalle osservazioni di campagna si evidenzia che il 60% della zona è interessata da boschi cedui in cui prevalgono le caducifoglie; la frazione sempreverde è rappresentata da lecci (nettamente subordinati) e da arbusti del sottobosco. Le colture sono costituite da cereali autunno-vernini (grano orzo), rinnovati (girasole, mais) nonché da esigui esempi di arboreti specializzati, poiché le piante di olivo sparse e dei larici di vite "maritata all'acero", tipici del paesaggio mezzadrile, sono completamente scomparsi.

### 5. CONFRONTO TRA I MODELLI RUSLE E USPED

Il problema del confronto tra i due modelli nasce dall'esigenza di poter meglio valutare la capacità dei modelli stessi 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 erosione su cui poi effettuare un'analisi dettagliata con altri tipi di approcci [Pistocchi A., Cassani G., Zani O., 2002]. Si è scelto, quindi, di confrontare il modello USPED con RUSLE, che invece viene comunemente utilizzata anche in termini quantitativi.

Il primo passo consiste nella creazione di una mappa raster, dell'area in esame, per ciascuno dei parametri necessari al modello RUSLE.

**R factor.** In ragione della limitata estensione del bacino è stato definito un fattore unico per tutto il bacino, in quanto si è ritenuto che la variabilità del fattore R (aggressività delle piogge) potesse essere trascurata. Esso viene matematicamente definito come il prodotto dell'energia cinetica totale di un singolo evento meteorico E (funzione della quantità di pioggia e della distribuzione delle intensità I) per l'intensità massima di durata 30 minuti  $I_{30}$ . Per la sua valutazione è stata utilizzata la relazione empirica di Wischmeier e Smith (1978) che determina R a partire dall'altezza di pioggia di durata 6 ore e tempo di ritorno 2 anni:  $R = 27.38 \cdot P^{2.17}$ , dove P è l'altezza di pioggia in pollici. 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.

**K factor.** Il fattore di erodibilità del suolo K esprime l'attitudine intrinseca del suolo ad essere eroso; è definito come il tasso di erosione per unità dell'indice R, relativo ad una parcella standard (lunghezza 22.13m e pendenza 9%) lavorata a maggese, ed in cui i fattori L S C e P assumono valore unitario. Per la definizione della mappa raster del K factor è stato utilizzato il normogramma prodotto dall'SCS statunitense che dà il valore di K in funzione delle caratteristiche granulometriche del materiale costituente lo strato erodibile superficiale (fig. 5.1).

**C factor.** Il fattore di copertura vegetale e di uso del suolo C prende in considerazione il tipo di vegetazione (o coltura) esistente e il tipo di interventi eseguiti su di essa. Esso esprime principalmente l'effetto di protezione del suolo derivante dalla intercettazione delle piogge e dalla propensione del terreno al ruscellamento; è quindi strettamente collegato al tipo ed allo stato di sviluppo della vegetazione, alla biomassa del terreno, alle modalità di lavorazioni attuali ed agli effetti residui di precedenti lavorazioni. Per la creazione di questa mappa (fig. 5.2) si è fatto riferimento alla cartografia tematica dell'uso del suolo della regione Umbria [De Rosa P., 2004, Signorelli E., 2004].

**P factor.** Il fattore di conservazione del suolo considera le eventuali azioni messe in atto per contrastare l'erosione. Essendo assenti particolari interventi, tale fattore è stato posto pari ad 1.

**LS factor.** Il fattore LS esprime l'effetto della lunghezza e della pendenza del versante sulla quantità di materiale eroso. Nella formulazione utilizzata [Mitasova H., Hofierka J., Zlocha M., Iverson L.R., 1996] i parametri L e S vengono determinati non più separatamente ma sono integrati in un'unica formula (eq.



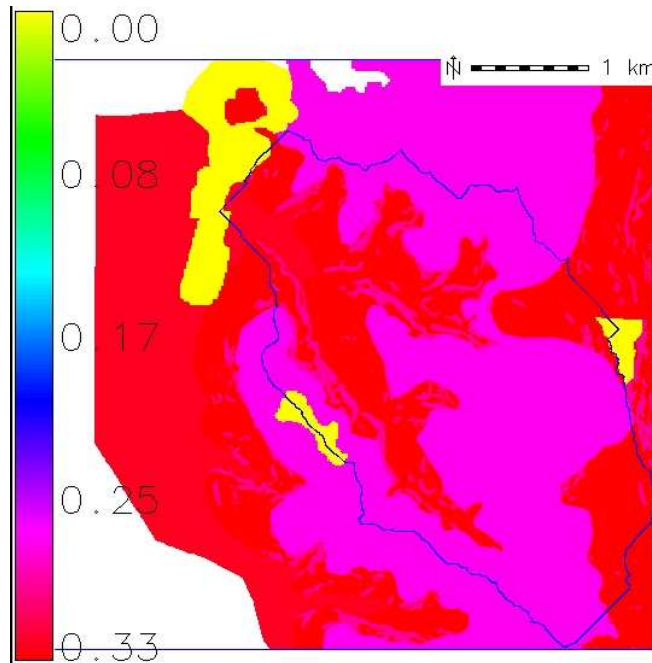


FIGURE 5.1. Mappa del K factor

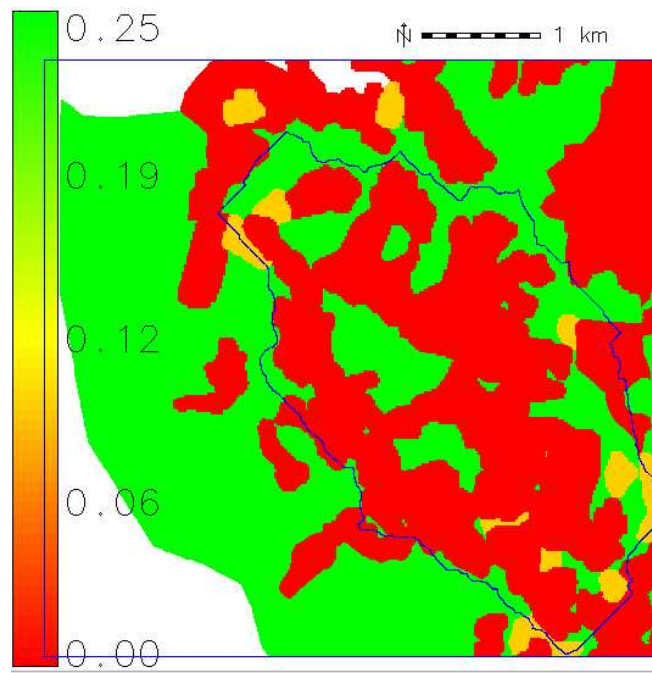


FIGURE 5.2. Mappa del C factor

3.1). 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 Carta Tecnica Regionale ed imponendo risoluzione al suolo pari a 3 metri.

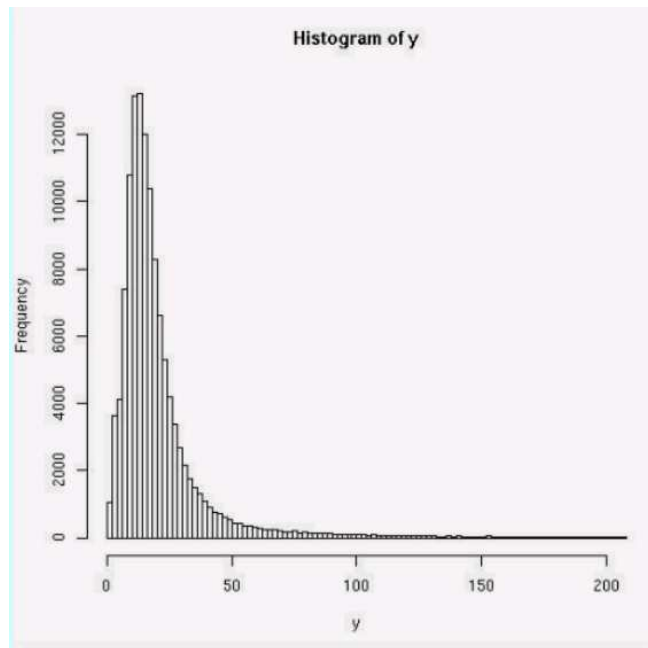


FIGURE 5.3. Distribuzione statistica del valore assoluto delle differenze tra RUSLE e USPED. In ordinata il numero di celle e in ascisse il valore delle stesse espresso in  $\text{kg/mq} \cdot \text{anno}$ .

La carta finale RUSLE dell'erosione dei suoli è stata determinata tramite semplici operazioni di map-algebra. La mappa, che mostra l'intero bacino in erosione, può essere approssimativamente utilizzata per individuare le zone in deposizione laddove l'erosione calcolata non supera  $0.2 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{anno}}$ .

Si è quindi analizzata la stessa area utilizzando il modello USPED. In generale, a causa della carenza di studi sperimentali specifici, per calcolare i parametri necessari al modello USPED si fa riferimento ad alcuni parametri della RUSLE-USLE che tengono conto del tipo e dell'uso del suolo e della sua copertura.

Si assume che sia possibile stimare la capacità di trasporto come:

$$(5.1) \quad T = R \cdot K \cdot C \cdot P \cdot A^m \cdot (\sin b)^n$$

dove, facendo riferimento alla 3.3,  $R \approx i^m$ ,  $KCP \approx K_t$ ,  $LS = A^m \cdot (\sin b)^n$ , e  $m = 1.6$ ,  $n = 1.3$  nel caso di erosione per rivoli, mentre per erosione laminare si pone  $m = n = 1$ . Per il calcolo dell'erosione/deposizione si utilizza quindi la relazione 3.6, tenendo conto di 3.4 e di 5.1.

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, utilizzate in notazione anglosassone, possono portare a compiere rilevanti errori.

Poichè il modello RUSLE è in grado di valutare le sola erosione distribuita su tutto il bacino mentre il modello USPED valuta sia le zone di erosione che di deposizione, si è deciso di confrontare le carte derivanti dai due metodi nelle sole zone dove il modello USPED prediceva erosione.

Per confrontare i due metodi è stata creata una mappa delle differenze in valore assoluto tra i dati di RUSLE e i dati di USPED. Tale mappa è stata successivamente analizzata al fine di visualizzare la distribuzione statistica delle differenze tramite il software libero R-statistics.

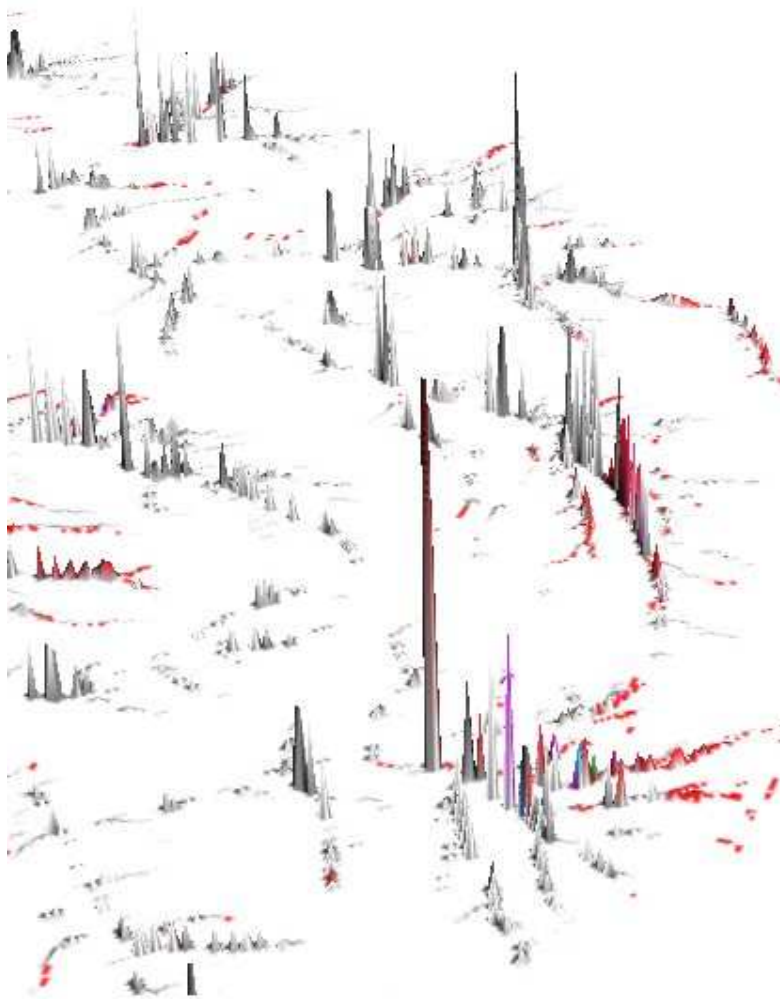


FIGURE 5.4. NVIZ dei valori estremi degli scarti sulla carta dell'area contribuyente di monte

Dall'osservazione della figura 5.3 si nota come la distribuzione delle differenze presenti una forte asimmetria positiva. La moda della distribuzione è circa  $10 \text{ Kg/m}^2\text{anno}$ , ma la coda positiva indica la presenza di poche celle in cui si verificano delle differenze di diversi ordini di grandezza superiori.

Al fine di verificare se la collocazione delle celle in cui questi valori risultavano elevati fosse in qualche modo sistematica, si è proceduto a drappeggiare, utilizzando NVIZ, la mappa delle differenze elevate (superiori a  $100 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{anno}$ ) sul modello di elevazione costituito dalle aree contribuenti di monte; cioè sulla mappa in cui ogni cella assume un valore che è proporzionale alla quantità di celle che drenano entro la cella stessa. Si è notato che tutti i valori estremi dello scarto si dispongono sui punti in cui la carta dell'area contribuyente a monte presenta dei picchi (vedi fig. 5.4). Va fatto notare che elevati valori dell'area contribuyente di monte si possono verificare solo in corrispondenza degli impluvi.

Si è poi notato che la differenza era sempre dovuta ad una sovrastima del modello USPED rispetto a RUSLE.

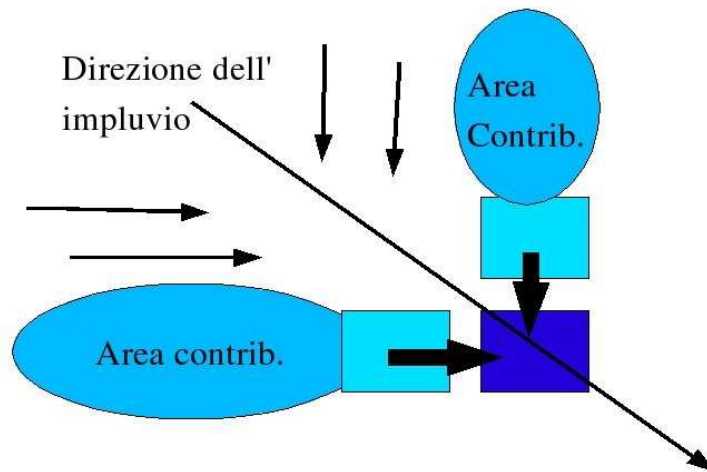


FIGURE 5.5. Schema mostrante l'incremento dell'area contributiva di monte per le celle di impluvio.

Gli alti valori di USPED sono legati al metodo matematico utilizzato che, in corrispondenza di zone caratterizzate da bruschi passaggi tra celle che presentano valori di area contributiva di monte estremamente differenti (zone degli impluvi), determina valori eccessivi di erosione.

Osservando la figura 5.5, si può notare come la crescita dell'area contributiva di monte è diversa per le celle che si trovano lungo il pendio rispetto a quelle poste nelle zone di impluvio. In particolare per le celle che si trovano lungo il pendio, l'area contributiva cresce solo di una quantità che compete all'area della singola cella, ma quando si va su una cella di impluvio l'area contributiva è la somma delle aree contributive delle celle che vi drenano causando un incremento anche di diversi ordini di grandezza.

Poiché il modello USPED, per la sua data formulazione matematica, valuta il tasso di erosione e deposizione come variazione di  $T$  (capacità di trasporto) tra celle contigue, che è direttamente proporzionale all'area contributiva, è semplice capire che forti variazioni di  $T$  determinano grandi variazioni di erosione.

Si è quindi rieseguito la differenza tra le mappe di erosione USPED e RUSLE escludendo dall'analisi le zone di impluvio (individuate sul DEM con il modulo `R.FLOW`). In questo caso, valutando tutti i parametri statistici, si vede che scompare quella forte asimmetria positiva della distribuzione precedente ed in questo caso il valor medio della distribuzione (che è anche il valor medio della differenza in valore assoluto tra i risultati RUSLE e USPED) è passata da  $70Kg/m^2anno$  a  $13Kg/m^2anno$ .

In conclusione, quindi, si può affermare che modello USPED, contrariamente a quanto talvolta sostenuto, funziona bene anche da un punto di vista quantitativo, sebbene si debbano escludere le celle degli impluvi dall'analisi.

Si è potuto verificare, successivamente, che un fenomeno simile avviene anche per le zone in estrema sedimentazione, che si collocano anch'esse negli impluvi. Il modello USPED è quindi totalmente inaffidabile nelle aree di impluvio, che vanno rimosse dall'analisi di erosione e sedimentazione.

Altro aspetto molto interessante da notare è che le zone di estrema erosione e sedimentazione non solo sono disposte in corrispondenza dei corsi d'acqua minori, ma sono spesso molto vicine tra loro; si passa da

una cella dove il modello predice estrema erosione a una contigua dove si verifica estrema sedimentazione. Questo problema deriva da un limite intrinseco del modello, legato alla sua formulazione matematica. Il fatto che erosione e sedimentazione siano calcolate in base alla derivata del trasporto dei sedimenti, fa sì che, qualora cambi repentinamente la capacità di trasporto da una cella all'altra, il modello da luogo ad un picco (o estrema erosione o estrema deposizione), fornendo risultati numerici inadeguati.

Se adeguatamente corretto però il modello USPED si conferma un ottimo strumento per la valutazione, anche quantitativa, del rischio di perdita di suolo e per la mappatura delle zone soggette a rischio erosione e sedimentazione.

### 6. IL MODELLO SIMWE: POTENZIALITÀ E LIMITI

Come già visto alla sottosezione 3.3, il modello SIMWE presenta diversi vantaggi tra cui principalmente quello di essere un modello fisicamente basato, in particolare basato sugli stessi principi teorici dei più affidabili e moderni modelli di erosione del suolo (WEPP ed EUROSEM tra tutti). Tuttavia SIMWE è un modello nuovo e deve essere testato e calibrato. Il modello è stato implementato nei due moduli di GRASS chiamati R.SIM.SEDIMENT e R.SIM.WATER. Come già visto, i due moduli trattano rispettivamente il processo di deflusso dei sedimenti e di deflusso dell'acqua. Nel corso di questo lavoro si è proceduto innanzitutto a una fase di "debugging", condotta in stretta collaborazione con gli sviluppatori e in particolare con Helena Mitasova che, gentilmente, ha direttamente provveduto modificare il codice o a suggerire le modifiche da effettuare.

6.1. **SIMWE.** I parametri fisici che SIMWE richiede come input sono (vedi par. 3.3):

per la modellizzazione del deflusso superficiale

- il coefficiente di scabrezza di Manning  $n$

Per la modellizzazione del flusso dei sedimenti e dell'erosione deposizione

- il coefficiente di scabrezza di Manning  $n$
- il coefficiente della capacità di distacco  $K_d$
- il coefficiente della capacità di trasporto  $K_t$
- lo sforzo di taglio critico  $\tau_c$

Per la valutazione del coefficiente di Manning  $n$  si è fatto riferimento all'uso del suolo della zona, deducendo i valori di  $n$  secondo quanto indicato in letteratura [Li Z., Zhan J., 2001]. Per la determinazione del coefficiente della capacità di distacco e dello sforzo di taglio critico sono state utilizzate le relazioni empiriche fornite per WEPP che 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  $K_d$  e dello sforzo di taglio critico  $\tau_c$ . Per la determinazione del coefficiente  $K_t$  è stata valutata la capacità di trasporto del flusso [Yalin M.S., 1963] e, successivamente, è stata realizzata la mappa del  $K_t$  utilizzando la relazione:

$$(6.1) \quad K_t = \frac{T}{(\tau)^p}$$

l'eq. 6.1 è una forma semplificata della relazione di Yalin, avendo definito il valore dell'esponente  $p$  pari a 1.5.

6.2. **Analisi critica dei risultati ottenuti da SIMWE.** Le prime osservazioni sui risultati ottenuti da SIMWE sono state effettuate sulla carta del flusso di sedimenti  $q_s$ , nel quale si osserva come i valori di  $q_s$ , alle sezioni di chiusura dei sottobacini, tendono ad annullarsi. Ciò fa supporre che il modello non sia in

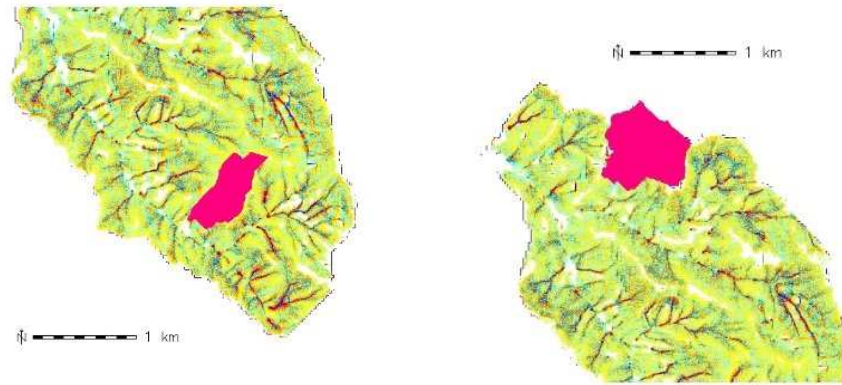


FIGURE 6.1. Posizionamento dei sottobacini all'interno del bacino principale

grado di simulare il trasporto dei sedimenti dalla zona di testata fino alla chiusura e fa sì che i sedimenti erosi vengano risedimentati completamente all'interno del bacino principale.

Per questo motivo sono stati presi in considerazione due singoli sottobacini (vedi fig 6.1) in cui si osserva (procedendo ad una visualizzazione di dettaglio della mappa raster del  $q_s$ ) come il flusso di sedimenti in uscita diminuisca bruscamente fino ad annullarsi del tutto. Su questi sottobacini si è proceduto al calcolo della somma dei valori di erosione e deposizione, il valore finale è risultato pressochè nullo. Ciò conferma come il modello non riesca a simulare trasporto solido in uscita dai singoli sottobacini.

**6.3. Individuazione delle zone a rischio rill.** Una ulteriore interessante applicazione di SIMWE consiste nella previsione delle zone in cui c'è maggiore possibilità di formazione di rills. Nell'individuazione di tali zone si è fatto riferimento a quanto proposto dalla letteratura [Bryan R.B., 1999]. Il rischio di formazione di rill non dipende solo dalle caratteristiche idrauliche del flusso superficiale ma anche dalle caratteristiche del suolo, tuttavia tali relazioni non sono del tutto note. La letteratura infatti individua le zone soggette a rischio rill in aree dove alcuni parametri idraulici raggiungono dei valori di soglia. Il parametro più utilizzato per quest'analisi è la shear velocity  $u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_w}}$ , dove  $\tau$  lo sforzo di taglio idraulico,  $\rho_w$  è la densità dell'acqua ed il valore di soglia proposto dalla letteratura è pari a  $0.0035 m/s$ . Per valutare in ogni punto il valore di  $u_*$  si è ricorso all'output di R.SIM.WATER che fornisce il battente idraulico in condizioni stazionarie per tutta l'area per una determinata precipitazione. Potendo affermare che il battente idraulico è confrontabile con il raggio idraulico, si è determinato lo sforzo di taglio idraulico  $\tau = \rho_w \cdot g \cdot h \cdot S$ ; dove  $h$  è il battente idrico e  $S$  è la pendenza. Una volta determinata  $u_*$ , si sono individuate le aree dove essa supera il valore di soglia; tali aree sono state poi intersecate con l'uso del suolo poiché solo laddove si ha terreno coltivato si ha rischio di formazione di rills. Il risultato è in figura 6.2. All'interno di queste zone il valore della quantità di suolo eroso  $D_c$  cresce in media di un valore del 15%. In tali aree, per correggere il valore della quantità di suolo eroso  $D_c$ , sarebbe opportuno, anziché incrementare semplicemente il valore di  $K_d$  del 15%, effettuare un'analisi di sensitività sull'esponente  $p$ . Questo permetterebbe di lasciare inalterato il valore di  $K_d$  (parametro che per come è definito dipende solo dal tipo di suolo) e di incrementare il valore di  $D_c$  agendo sull'esponente  $p$  [Bryan R.B., 1999, Abraham A.D., Li G. and Parson A.J., 1996].

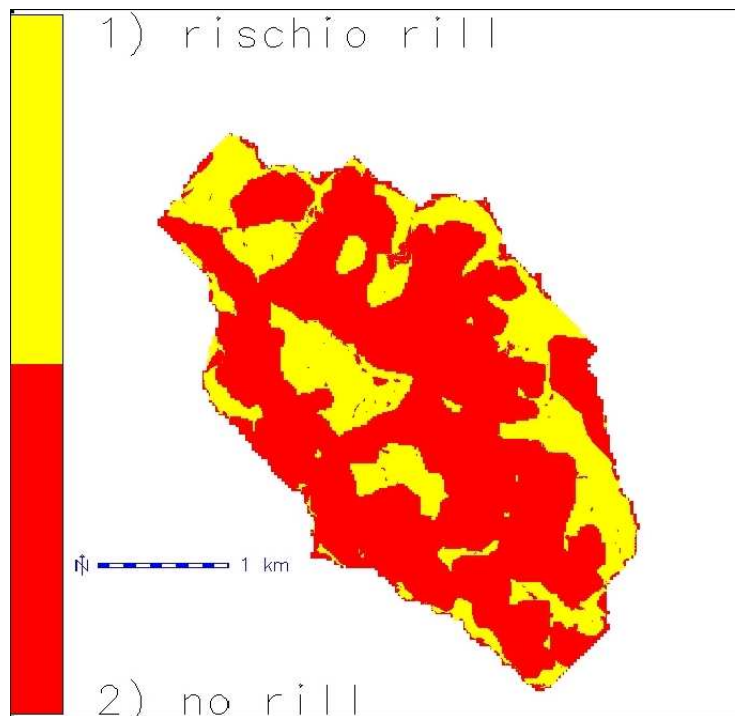


FIGURE 6.2. Zone a rischio di formazione di rills

## 7. CONCLUSIONI

Il presente lavoro mette in evidenza come un sistema informativo territoriale, non solo si può integrare al meglio con modelli che simulano i processi erosivi di versante, ma ne diventa un supporto quasi indispensabile. In particolare l'utilizzo di un GIS open-source (come GRASS GIS) premette di analizzare, testare e migliorare i modelli che si vogliono studiare evitando che gli stessi possano risultare come una sorta di scatola nera inaccessibile al suo interno.

Il lavoro ha consentito di evidenziare come il modello USPED (fatte le opportune considerazioni) possa 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 praticamente gli stessi risultati ma con il grande vantaggio che esso è in grado di individuare anche le zone in deposizione, 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 dell'erosione e deposizione 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. E' difficile, quindi, valutare la sensibilità del modello a tutte le variabili. Alcune immediate migliorie da proporre vanno proprio in questa direzione: sarebbe opportuno infatti eliminare alcune variabili di input che hanno mostrato una scarsa influenza sui risultati ed inserirne altre, tra i quali l'esponente  $p$  della 3.9, che è stato necessario calibrare, ma che, non essendo inserito in input, va modificato di volta in volta nel codice sorgente.



## Erosione dei suoli e GRASS GIS: esempi di applicazioni

Sulla base dello studio del comportamento di SIMWE si può dire 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 grandi il modello può essere utilizzato per un'analisi qualitativa del processo, ma ancora non quantitativa.

### REFERENCES

- [Abrham A.D., Li G. and 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. *Geomorfology Vol. 32 (2000) pp. 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 a.a. 2004/2005 Università degli studi di Perugia.*
- [Flanagan D.C. and Nearing M.A., 1995] WEPP: USDA-Water Erosion Prediction Project. *NE-SRL rep 10, pp 1.1-1.11, Natl. Soil Erosion Lab., U.S. Dep. of Agric. Laffayette, Indiana, 1995.*
- [Foster G.R. and Mayer L.D., 1972] A closed form erosion equation for upland areas in sedimentation: Symposium to Honor Professor H. A. Einstein. *Edited by H. W. Shen, pp. 12.1-12.19, Colo. State Univ. Ft Collins, CO., 1972*
- [Foster G.R., Renard K.G., Yolder D.C., 1993] RUSLE Users' Guide - Revised. *Universa Soil Loss Equation. Soil and Water Conservation Society, Ankey, IA.*
- [Li Z., Zhan J., 2001] Calculation of Field Manning's Roughness Coefficient. *Agricultural Water Management. Vol: 49, Issue: 2, July 17, 2001 pp. 153-161*
- [Mitasova H., Hofierka J., Zlocha M., Iverson L.R., 1996] Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *Journal of geographics information scienze. Vol. 10 pp.629-641.*
- [Mitasova, H., Mitas, L., Brown, W. M., Johnston, D., 1998] Multidimensional Soil Erosion/deposition Modeling and visualization using GIS. *Final report for U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory, pp. 4-14, University of Illinois, Urbana-Champaign, IL.*
- [Mitasova H., Mitas L., 1998] Distributed Soil erosion simulation for effective erosion prevention. *Water Resources Research, Vol 34, No. 3, Pages 505-516.*
- [Moore L.D. and Burch G.J. 1986] Modeling erosion and deposition. Topographic effects. *Transaction ASAE, 29, 1624-1640.*
- [Pistocchi A., Cassani G., Zani O., 2002] Use of the USPED model for mapping soil erosion and managing best land conservation practices. *In Rizzoli, A. E. and Jakeman, A. J., (eds.), Integrated Assessment and Decision Support, Proceedings of the First Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society, Volume 3, pp. 163- 168. iEMSs.*
- [Signorelli E., 2004] Applicazioni G.I.S. allo studio delle perdita di suolo in piccoli bacini. *Tesi di laurea a.a. 2003/2004 Università degli studi di Perugia.*
- [Wischmeier W.H. and 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. *J. Hydraulics Division ASCE89 (HYE)pp. 221-250.*