

Un approccio modellistico per il fenomeno delle occlusioni d'alveo per frane: una modifica al modello CAESAR

Pierluigi De Rosa

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale – Università di Perugia, pierluigi.derosa@unipg.it

A modelling approach for landslide dams phenomena: a CAESAR model modification

ABSTRACT: Trying to model landslide phenomena interfering with river processes is a complex task. It's difficult to model a process involving both landslide and river dynamics in an easy and proper way at the same time. Authors propose some model to simulate the dam break due to a landslide but the dam creation has a really poor modelling. A modification of CAESAR code is presented to simulate a big amount of sediment coming into the river. CAESAR is a bidimensional model to simulate river processes using a cellular automata approach. A new routine was inserted into the code to simulate landslide processes. A phase of testing, necessary to this model, is just started with some simulations. These simulations show good results. Particularly we had noticed that some parameters (volume and velocity of landslide) are the most important to define the evolution of the river blockage.

Key terms: Cellular model, CAESAR, River modelling

Termini chiave: Modelli cellulari, CAESAR, Modellistica fluviale

Riassunto

Il problema della modellistica dei fenomeni franosi che interferiscono con gli alvei fluviali è una questione complessa. In particolare risulta difficile modellare un processo che coinvolge dinamiche sia di versante sia d'alveo mediante un modello che sia allo stesso tempo semplificato e realistico. Mentre esistono modelli per simulare il fenomeno della rottura dello sbarramento naturale creato da un corpo di frana, il fenomeno dell'ingresso dei sedimenti in alveo e dell'occlusione (probabile, totale o parziale) risulta ancora oggi scarsamente modellato.

A tale scopo è stata realizzata una opportuna modifica eseguita su CAESAR per la simulazione di fenomeni dove cospicui apporti di sedimenti dai versanti (frane) interferiscono con la dinamica dell'alveo fluviale. CAESAR è un modello bidimensionale di flusso e di trasporto di sedimenti appartenenti alla famiglia dei *Cellular Automata*; al suo interno è stata inserita una nuova parte di codice per simulare i processi di versante con cui si permette l'immissione di grosse quantità di sedimenti in alveo, secondo tempistiche e granulometrie predefinite.

La fase di validazione del modello è in atto e le prime simulazioni hanno mostrato buoni risultati. In particolare si è visto come i parametri volume e velocità di frana sembrano essere i fattori di influenza più significativi per la successiva evoluzione dello sbarramento. c

Introduzione

Le occlusioni d'alveo si formano in diverse condizioni

fisiografiche e ricoprono l'intera casistica delle tipologie di frana (Costa & Schuster, 1991). Nel grafico di Figura 1 è riportata la distribuzione percentuale delle differenti tipologie di frana che hanno causato sbarramenti d'alveo.

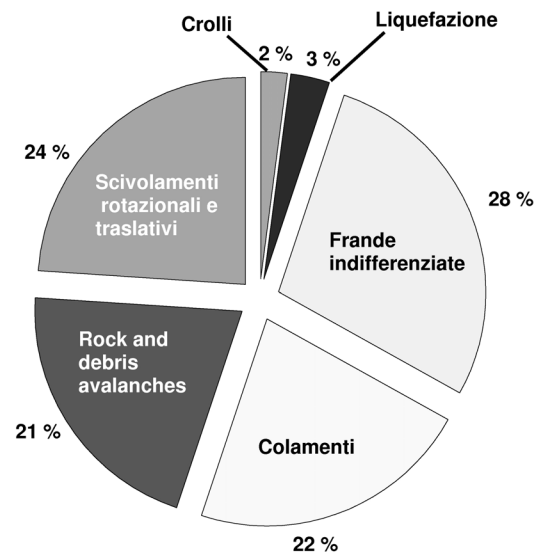


Figura 1: Distribuzione percentuale delle tipologie di frana che hanno generato sbarramento in alveo. Tratto da Costa e Schuster (1991).

Figure 1: Typology distribution of landslide causing river damming. From Costa and Schuster (1991).

Si osserva che, tra tutte le tipologie di frane, quelle che causano maggiori problemi sono quelle che coinvolgono i maggiori volumi e che sono più rapide.

Ovviamente tutte le cause che portano all'innescarsi o al riattivarsi di movimenti franosi, come ad esempio precipitazioni molto intense o terremoti, possono definirsi anch'esse cause in senso lato. Mediamente è stato osservato (Costa & Schuster, 1991) che circa l'84% delle cause in senso lato dei fenomeni di frane in alveo sono da addebitarsi a precipitazioni e terremoti.

Da queste prime indicazioni si evince come risulti estremamente importante comprendere quali sono le principali variabili che controllano l'evoluzione di un processo di sbarramento d'alveo. Su questo aspetto sono stati condotti diversi studi (Costa & Schuster, 1988; Casagli & Ermini, 1999). Tutti gli autori sono concordi nell'asserire che la comprensione dell'evoluzione di uno sbarramento d'alveo naturale può essere raggiunta solo comprendendo nel dettaglio le interazioni tra il sistema fluviale e quello di versante. Alcuni Autori (Casagli & Ermini, 1999; Pirocchi, 1992) hanno già provato a dimostrare come la possibilità di occlusione d'alveo può essere raggiunta attraverso alcuni parametri geomorfologici che sono tipici sia del corso d'acqua, sia della frana.

Sostanzialmente la problematica legata agli sbarramenti d'alveo da frana può essere scissa in due parti distinte: il fenomeno dell'occlusione dell'alveo vero e proprio che si verifica in concomitanza con l'innesco del movimento di versante e il fenomeno dell'eventuale collasso della diga naturale formatasi che può verificarsi in tempi più o meno lunghi dall'avvenimento dell'occlusione (in relazione alla portata fluviale ed alle caratteristiche geomeccaniche dei materiali e geometriche della struttura formatasi).

L'approccio più semplice proposto in letteratura è stato appunto quello dell'individuazione di alcuni indici geomorfologici, dipendenti da alcune variabili che

descrivono morfometricamente sia il corso d'acqua sia la frana, e tali che potessero fornire indicazioni sia sulla possibilità di occlusione sia sulla conseguente possibilità di collasso della diga. Ermini (2003) e Ermini & Casagli (2003) hanno creato un *database* dei fenomeni di sbarramento d'alveo partendo da un censimento dei casi avvenuti sia in Italia che nel mondo, aggiornando il database di Costa e Schuster (Costa & Schuster, 1991). Partendo da questo database gli autori hanno proposto un indice per la stima della possibilità di occlusione, denominato *Dimensionless Flow Index (DFI)* (vedi eq 1), che tiene conto delle portate del corso d'acqua (con tempo di ritorno 5 anni), confrontata con un altro parametro esprimibile in m³/s, dato dal prodotto tra la velocità della frana, il suo spessore e la larghezza del fronte della frana.

$$DFI = \frac{V_i \cdot W_i \cdot D_i}{Q_p} \quad (\text{eq 1})$$

Calcolando il valore dell'indice DFI per tutti i casi facenti parte del database prodotto, sembra emergere che, per valori di DFI > 1, si registra sempre la formazione di uno sbarramento totale.

Gli autori hanno proposto quindi un indice per la determinazione del grado di stabilità della diga, frutto di un approfondimento delle conoscenze acquisite tramite il *Blockage Index* (Casagli & Ermini, 1999), proponendo il *Dimensionless Blockage Index (DBI)* (vedi eq 2).

$$DBI = \log\left(\frac{A}{V_d / H_d}\right) \quad (\text{eq 2})$$

dove *A* è l'area del bacino idrografico a monte del fiume sbarrato, *V_d* è il volume della frana e *H_d* è l'altezza della diga naturale. Le dighe parziali o non formate non sono state prese in considerazione in questo tipo di analisi,

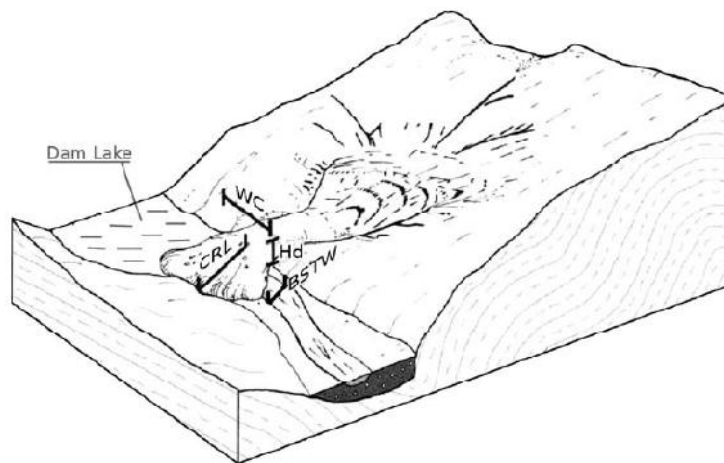


Figura 2: Schema del sistema alveo-pianura fluviale nel complesso fenomeno di interferenza con un movimento franoso di versante: Hd elevazione dello sbarramento, CRL = lunghezza della cresta dello sbarramento, WC = larghezza dello sbarramento, BSTW = larghezza sommitale della sezione trasversale del *tailwater* (da Cencetti *et alii*, 2001).

Figure 2: Outline of the interaction between slope processes and river processes creating a natural dam: Hd = elevation of the top of the dam, CRL = length of crest dam, WC = width of crest dam, BSTW = top width of tailwater cross section. (from Cencetti *et alii*, 2001).

essendo l'altezza della diga abbastanza soggettiva. Calcolando il valore del *DBI* per i casi censiti si è visto che, nei casi in cui $DBI < 2.87$, si è in presenza di una situazione di sbarramento stabile; per valori di $2.87 < DBI < 3.08$ si è in presenza di situazioni di incertezza (cioè si sono avuti sia dighe stabili che instabili), mentre per valori di $DBI > 3.08$ si è in presenza di situazioni di estrema instabilità della diga.

Oltre a questo approccio esistono poi modelli deterministici che permettono di stimare il risultante idrogramma di piena dovuto alla rottura della diga. Tra questi, il codice Breach (Fread, 1991) è il più utilizzato e conosciuto. Nonostante nessuno dei modelli deterministici fornisca indicazioni circa la stabilità della diga naturale, è possibile effettuare una valutazione quantitativa preliminare, ma abbastanza accurata, dell'idrogramma di piena conseguente all'eventuale rottura. Ciò prevede una quantificazione abbastanza dettagliata delle aree inondate poste a valle dello sbarramento (Cencetti *et alii*, 2006). Con questi modelli deterministici si è in grado di valutare in via preliminare i danni producibili da una rottura eventuale della diga; pur mancando informazioni dettagliate riguardo alla stabilità dello sbarramento, è possibile comunque effettuare tutti i provvedimenti di sicurezza e di protezione civile del caso.

Come si è visto da questa prima analisi, la valutazione della possibilità di occlusione d'alveo da frana risulta più carente rispetto alla valutazione dell'eventuale collasso delle dighe. Non esistono, infatti, modelli deterministici che trattano tale problematica, che siano in grado, cioè, di contemplare sia un fenomeno di versante che la dinamica d'alveo vera e propria considerando soprattutto le interazioni presenti tra i due processi. A parte l'indice *DFI*, che fornisce una indicazione sommaria sulla possibilità di occlusione d'alveo, non esistono trattazioni teoriche o semi-empiriche che riescono a dare risultati più accurati; in sostanza, l'indice *DFI* è probabilmente allo stato attuale il miglior metodo per la stima della possibilità di occlusione d'alveo.

Da quanto appena detto nasce quindi la necessità di sviluppare un modello deterministico *ad hoc* per tale problematica, che possa quindi spingersi oltre quanto fornito dal *DFI*.

Il modello CAESAR

La realizzazione di un modello deterministico *ad hoc* per la risoluzione delle problematiche relative alla definizione della probabilità di occlusione d'alveo, parte innanzi tutto dalla ricerca bibliografica e dall'individuazione di quei modelli che, con opportune modifiche, possono essere utili allo scopo.

La possibilità di occlusione dell'alveo a seguito di una frana che interferisce con esso dipende sia dalle caratteristiche del movimento franoso (volume coinvolto, velocità della frana, granulometria), sia dalle

caratteristiche del corso d'acqua (larghezza della valle, capacità di trasporto della corrente). Un approccio modellistico quindi non deve limitarsi a considerare singolarmente tutti gli aspetti appena elencati, ma soprattutto deve valutare l'interazione tra essi.

La ricerca bibliografica ha preso in rassegna diversi modelli di evoluzione del territorio che sono nati, a partire dalla fine degli anni '70, in concomitanza con l'aumento della potenza di calcolo disponibile (Coulthard, 2001).

Tra i modelli analizzati la scelta è ricaduta sul CAESAR (Coulthard & Kirkby, 2000; Coulthard *et alii*, 2002); uno dei motivi è stato la licenza libera GPL con cui esso viene rilasciato, licenza che permette quindi a chiunque di accedere, e modificare qualora lo ritenesse opportuno, il codice sorgente.

CAESAR è un modello bidimensionale, di tipo automi cellulari, che simula l'evoluzione morfologica del territorio dovuto agli effetti delle dinamiche d'alveo. CAESAR implementa al suo interno un modello di trasporto dei sedimenti ed è in grado di simulare i cambiamenti morfologici di un fiume sia a scala di bacino idrografico che a scala di tratto fluviale vero e proprio. Inizialmente era stato progettato per studiare l'evoluzione morfologica di un bacino idrografico a seguito di cambiamenti climatici o di uso del suolo, ma in realtà è possibile utilizzarlo anche per simulare periodi temporali più brevi.

CAESAR fa parte della nuova famiglia di modelli fluviali di tipo "a celle", che sono anche stati definiti "modelli a ridotta complessità". Il modello è stato sviluppato per colmare parzialmente il gap esistente tra i modelli CDF (*Computer Fluid Dynamics*) 2D e 3D.

I modelli cellulari in geomorfologia possono essere definiti come modelli che rappresentano il territorio con una griglia di celle e l'evoluzione del territorio è determinata dall'interazione tra le celle (per esempio il flusso di acqua e di sedimenti) in accordo con determinate regole, basate su una semplificazione della fisica del processo (Nicholas, 2005). Il primo modello ad utilizzare questo approccio fu il modello proposto per i fiumi intrecciati da Murray e Paola (1994) che sviluppava i *routing* delle portate su una griglia di celle, che rappresentavano il canale e la pianura alluvionale, in accordo con le locali pendenze del fondo. L'erosione era calcolata con semplici regole di erosione portate-dipendenti.

Breve descrizione di CAESAR

CAESAR è un modello di automa cellulare che usa una griglia regolare di celle rappresentanti il bacino o il tratto fluviale di studio. Ogni cella possiede delle proprietà (per ogni cella vengono conservati in memoria diversi valori) quali l'elevazione, la portata idrica e il battente, la copertura vegetale, la profondità del *bedrock* ed infine la granulometria. Utilizzando il concetto di automa cellulare, per cui ripetute iterazioni di una serie di regole su ognuna delle celle, conducono ad un'evoluzione del

territorio indicando il comportamento dell'intero sistema, CAESAR ha una serie di regole che possiamo raggruppare in:

1. regole idrologiche
2. regole di *routing* di portata
3. regole di erosione e sedimentazione fluviale
4. regole per i processi di versante.

Per ogni iterazione CAESAR modifica i valori delle proprietà della cella analizzata in accordo con i *set* di regole appena elencati e con i valori delle proprietà delle celle adiacenti al passo temporale precedente. Ad esempio, la quantità di erosione fluviale di una cella può dipendere dal battente idrico della cella stessa e dalla pendenza tra le celle adiacenti e la stessa.

CAESAR può funzionare sia a scala di bacino idrografico che a scala d'alveo; a scala di bacino utilizza come *input* una pioggia oraria, costante su tutto il bacino, che si trasforma poi in portate defluenti attraverso l'utilizzo, come modello afflussi-deflussi, di una modificazione di TOPMODEL (Beven & Kirkby, 1979). L'*output* del modello idrologico è quindi fatto defluire attraverso il bacino per mezzo di un algoritmo di *scanning* multiplo che "spazza" l'intero bacino nelle quattro direzioni (N-S,S-N, E-W,W-E). Qualora si volesse utilizzare CAESAR a scala di tratto d'alveo, l'*input* richiesto dal modello è rappresentato dalle portate (solide e liquide) in ingresso. Per ogni *scan* il flusso idrico (sia che ci si trovi ad operare a scala di tratto d'alveo che a scala di bacino) è indirizzato verso le tre celle idraulicamente più a valle ma, se il flusso idrico totale è maggiore del flusso subsuperficiale, l'eccesso è trattato come deflusso e di conseguenza viene calcolato anche il battente attraverso un adattamento dell'equazione di Manning:

$$Q = U \cdot A = \frac{1}{n} \cdot h^{2/3} \sqrt{S \cdot A} \quad (\text{eq 3})$$

dove Q , U e h denotano rispettivamente la portata, la velocità di flusso e il battente idrico, A è l'area della sezione trasversale del flusso, S è la pendenza e n il coefficiente di scabrezza di Manning.

Per le celle per cui è stato calcolato il battente viene quindi calcolato il tasso di erosione e sedimentazione fluviale attraverso l'equazione di Wilcock e Crowe (Wilcock & Crowe, 2003). Il principale "motore" del modello, che causa i cambiamenti morfologici, è legato ai processi di presa in carico, trasporto e deposito dei materiali. CAESAR utilizza 11 granulometrie differenti integrate in una serie di 10 *layers* attivi, secondo l'approccio proposto da Hoey e Ferguson (Hoey & Ferguson, 1994), che sono trasportate sia come carico di fondo che come sedimenti sospesi (in funzione della granulometria), permettendo lo sviluppo di una superficie corazzata e di una stratigrafia del letto dell'alveo. Il processo di trasporto è guidato da una formula "*mixed-size*", che calcola il tasso di trasporto per ogni frazione di

sedimenti i (Wilcock & Crowe, 2003):

$$q_i = \frac{F_i U^3 W_i}{(s-1) \cdot g} \quad (\text{eq 4})$$

dove F_i denota la frazione di volume dell' i -esimo sedimento nel *layer* attivo, U è la *shear velocity*, s il rapporto tra la densità dei sedimenti e dell'acqua, g è la costante gravitazionale e W_i è una funzione complessa che mette in relazione il tasso di trasporto della frazione granulometrica con il tasso di trasporto totale.

Allo stato attuale, nel codice, sono presenti anche regole per i processi di versante. Questi tipi di processi sono limitati a semplici movimenti di massa che si verificano nel momento in cui viene superato un valore di inclinazione limite, fornito in *input* dall'utente, in modo da ripristinare una pendenza pari a tale valore limite. Il materiale viene quindi immesso nel sistema fluviale come *input* proveniente dal versante (al fine di simulare fenomeni come i collassi di sponda).

Una volta che il tasso di erosione/sedimentazione è calcolato, vengono aggiornati i valori di elevazione e granulometria per ogni cella del territorio modellato.

Uno degli aspetti più innovativi presenti in CAESAR è sicuramente l'utilizzo di un "*time step*" variabile. Come visto, i modelli di automi cellulari applicano per ogni iterazione temporale una serie di regole o equazioni ai valori delle proprietà delle celle; CAESAR utilizza per ogni iterazione un passo temporale variabile controllato dalla quantità di erosione e sedimentazione che si ha nel bacino, limitandola al 10% della pendenza locale, prevenendo eventuali instabilità computazionali. Viene definito un parametro (*erodelimit*), imposto dall'utente, che rappresenta la massima quantità di erosione o sedimentazione che può avvenire in ogni *time step*. Se la quantità è superata, il modello dimezza il *time step* e ripete il calcolo fino a che tale valore è sotto il limite. In questo modo si controllano le instabilità computazionali, poichè non si verificano mai eccessive quantità di materiale eroso o depositato, permettendo al modello di avere lunghi *time step* (fino a 1 ora) nei periodi di quiescenza (ad esempio basse portate) ma anche piccoli *time step* (fino al decimo di secondo) nei periodi di alte portate o forte attività erosiva.

Un aspetto importante è rappresentato anche dalla risoluzione e dalla dimensione delle celle del DEM. Il parametro *erodelimit* dipende dalla dimensione delle celle; infatti la variazione dell'elevazione di queste comporta cambiamenti nelle pendenze locali.

Ad esempio: fissando il valore di *erodelimit* a 0.1 m, qualora la risoluzione delle celle fosse di 1 m, sono ammissibili variazioni di quota pari al 10% della dimensione delle celle stesse; mentre, nel caso la risoluzione fosse di 10 m, le massime variazioni di quota ammissibili sono inferiori all'1%. Quindi, incrementando le dimensioni delle celle, le variazioni di pendenza risultano essere più contenute.

Il problema della risoluzione è connesso al tempo che si vuole modellare: la simulazione di un singolo evento di piena effettuata attraverso un'alta risoluzione temporale (perchè come visto il parametro *erodelimit* limita il passo temporale), magari connessa ad una elevata risoluzione spaziale (numero di celle superiore a 500.000), può impiegare anche un intero giorno di elaborazione.

La modifica del modello CAESAR

La modifica del modello CAESAR è stata resa possibile grazie al fatto che il codice sorgente è liberamente scaricabile dal sito internet (www.coulthard.org.uk) e rilasciato sotto licenza GPL. Come già detto in precedenza, le modifiche apportate hanno interessato principalmente il *set* di regole riguardanti i processi di versante. Nasceva la necessità di inserire all'interno del sistema alveo-versante che si sta modellando una data quantità di materiale, secondo i tempi, i volumi e le granulometrie voluti, derivanti dalla frana che interferisce con l'alveo che si sta modellando.

Attraverso la modifica di CAESAR, ed in particolare la modifica dei *set* di regole che definiscono i processi di versante, non si vuole simulare il processo di versante vero e proprio, ma esclusivamente permettere l'immissione di materiale in una specifica zona dell'area modellata dovuta a processi gravitativi. La simulazione di un processo di versante nella sua interezza e complessità, infatti, esula dallo scopo del lavoro che vuole costruire un modello numerico che simuli la risposta del sistema fluviale ad un forte apporto di materiale proveniente appunto da processi di versante. Con la modifica apportata è stato possibile definire alcune celle in cui si vuole far immettere materiale, secondo tempi e quantità desiderate.

Il problema non è di facile risoluzione in quanto il *time step* che il modello usa per evolvere nel tempo la simulazione non è fisso, ma variabile (come visto in funzione del parametro *erodelimit* per simulare con maggiore dettaglio temporale i casi di forti deflussi e con passi più ampi le normali condizioni di deflusso); il materiale, invece, deve essere immesso nel sistema secondo tempistiche che non si correlano al *time step* che in quel momento il modello utilizza. A tal proposito, è stata costruita una nuova variabile con la funzione di contatore globale temporale. Tale variabile, partendo da un valore zero, viene aggiornata ad ogni iterazione, incrementandosi di un valore pari al *time step*.

In aggiunta, c'è poi la necessità che il materiale immesso dai versanti possieda specifiche granulometrie e che sia inserito in specifiche celle (ovvero in una specifica area del territorio che si vuole modellare). A proposito delle granulometrie è opportuno ricordare che CAESAR utilizza un approccio a *layer* attivi (Hoey & Ferguson, 1994) gestendo 11 *layer* differenti, ognuno dei quali contiene 9 diverse classi granulometriche. Questo

approccio, mentre da una parte permette una modellazione molto dettagliata (portando anche alla formazione di superfici corazzate), dall'altro richiede una grande potenza di calcolo, in quanto per ogni cella sono presenti 9x11 diversi valori di granulometria. La granulometria è espressa in valori percentuali, per la specifica classe granulometrica come definita nella maschera di *input* del CAESAR, per quello specifico *layer*.

CAESAR non permette di definire per ogni cella che si vuole modellare una granulometria (o meglio una sua definizione diventa estremamente complessa), ma esclusivamente un'unica granulometria che viene assunta uguale per tutte le celle e per tutti gli 11 *layers*. Per questo motivo, è sempre necessario far eseguire a CAESAR, sul territorio che si vuole modellare, una fase di *spinoff* simulando un periodo di almeno 1-2 anni, in modo da sviluppare una granulometria verosimile per il territorio considerato.

Opportune modifiche al codice hanno permesso di definire la percentuale voluta, per ogni frazione granulometrica definita in *input*, del materiale in ingresso proveniente dal versante.

Le modifiche apportate permettono attualmente all'utente di creare un file di testo che definisce le caratteristiche del movimento franoso; in particolare il file è costituito da più righe contenenti ognuna 5 records. Il primo ed il secondo definiscono la coordinata *x* ed *y* della cella dove si vuole immettere il materiale, la terza e la quarta l'inizio e la fine del periodo (espresso in minuti) durante il quale si vuole immettere il materiale e la quinta indica il volume totale in m³ che viene immesso.

Il CAESAR opportunamente modificato è anch'esso rilasciato con licenza GPL ed è ottenibile al seguente indirizzo web: <http://www.unipg.it/~pierluigi.derosa/>.

L'immissione dei materiali e loro evoluzione nel sistema alveo - pianura fluviale (Aspetti di dettaglio)

Una volta risolti i problemi della definizione della granulometria del materiale in ingresso e del passo temporale, si è proceduto con la realizzazione di apposite *routine* che permettono materialmente l'immissione di questi sedimenti nel sistema. Le *routine* agiscono inserendo questo materiale in specifiche celle e, successivamente, consentendo il conseguente movimento di questi sedimenti verso valle (vedi Figura 4). Le celle dove si immette il materiale corrispondono all'incirca con le zone di accumulo della frana, cioè con le aree dove realmente si ha un apporto del materiale immesso.

Tale materiale poi si muove da queste celle (nelle iterazioni temporali successive), indipendentemente dalla tipologia di movimento franoso che lo ha originato, ma esclusivamente seguendo le caratteristiche locali di pendenza, angolo di attrito del materiale e grado di saturazione.

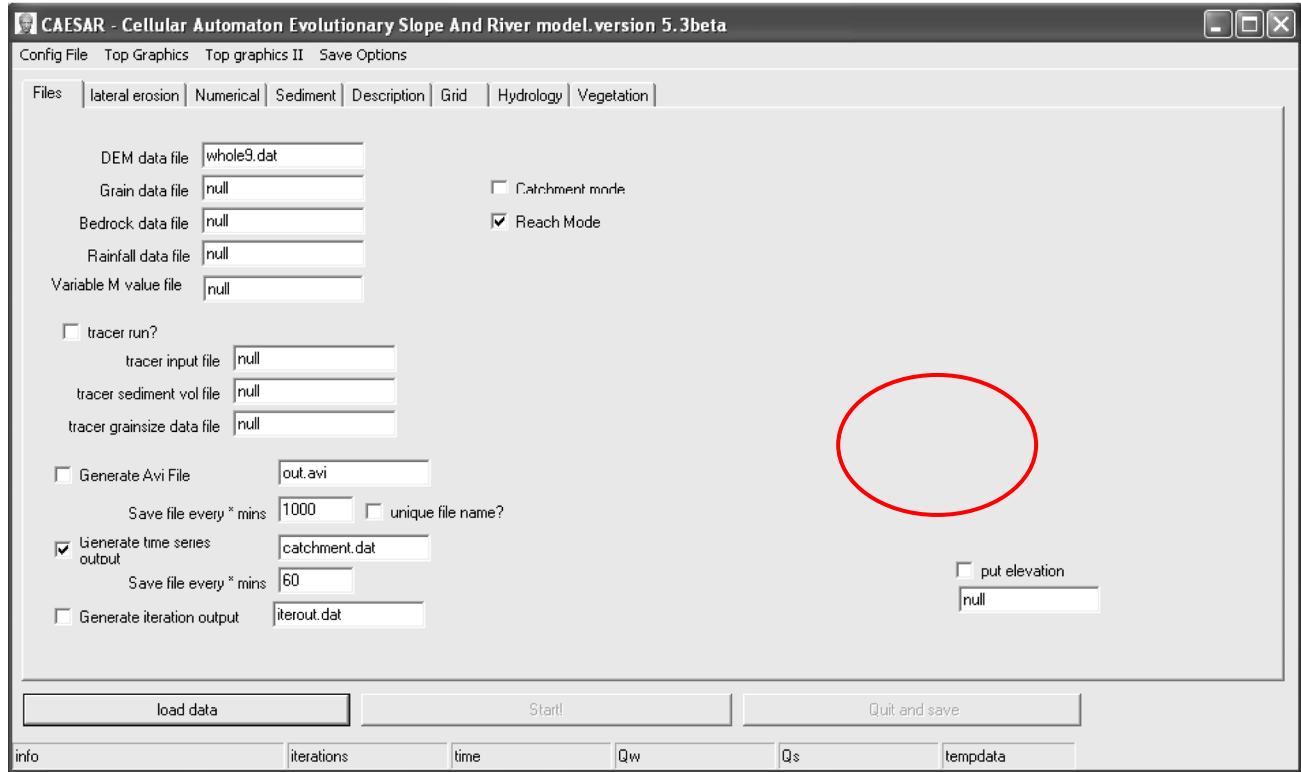


Figura 3: Schermata principale di CAESAR (modificato). All'interno dell'area cerchiata in rosso viene indicata la casella dove inserire il file che rappresenta il materiale proveniente dal versante.
 Figure 3: Main page of CAESAR (modified). Inside the red line is shown the textbox where the user has to insert the file name representing the slide movement.

Per ogni iterazione temporale, quindi, viene immesso materiale nella cella specifica (comportando di conseguenza un incremento di quota per la cella stessa) e, successivamente, si confronta il valore della pendenza locale con un valore limite dato dall'angolo di attrito, opportunamente diminuito in funzione del grado di saturazione del suolo calcolato da TOPMODEL (Beven & Kirkby, 1979).

L'approccio utilizzato è quello proposto da Montgomery e Dietrich (Montgomery & Dietrich, 1994); dal modello idrologico si definisce il fattore di riduzione W che è definito come il rapporto tra il flusso locale in uno stato stazionario di pioggia e la saturazione del suolo, così calcolato:

$$W = \frac{q \cdot a}{b \cdot T \cdot \sin \theta} \quad (\text{eq 5})$$

dove q è il tasso di pioggia netta, a è l'area contribuente di monte e b la larghezza della cella di chiusura del bacino, T è la trasmissività del suolo saturo e θ è la pendenza locale. Se si assume che la conducibilità idraulica non varia con la profondità, dall'eq. 5 è possibile riscrivere l'equazione di stabilità del pendio indefinito (senza coesione) come:

$$\begin{aligned} \tan \vartheta &= [1 - W(\rho_w - \rho_s)] \tan \phi = \\ &= \left[1 - \frac{q \cdot a}{b \cdot T \cdot \sin \vartheta} (\rho_w - \rho_s) \right] \tan \phi \end{aligned} \quad (\text{eq 6})$$

Una volta calcolato questo valore limite, viene effettuato il confronto tra questo valore e la pendenza reale locale, a seguito dell'immissione del materiale. Qualora la pendenza fosse maggiore di questo valore limite, ci si troverebbe in condizioni di non stabilità; in questo caso una parte del materiale immesso viene mosso nella cella immediatamente più a valle. La quantità di materiale che viene rimossa dalla cella di monte verso la cella di valle è sempre limitata; si impone che la variazione di pendenza dovuta a questo movimento di materiale sia, per quel fissato *time step*, inferiore ad un valore limite fissato. Questo comporta che il movimento di massa avvenga più lentamente (cioè impiegando più iterazioni per completare tutto il movimento) e, di conseguenza, anche in modo più naturale.

Una volta che tutto il materiale è stato movimentato, ed in contemporanea a questo movimento, CAESAR prosegue facendo evolvere il territorio in accordo con tutte le altre regole viste, modificando tutti i valori di portata, profondità, granulometria e, di conseguenza, i valori dei tassi di erosione e sedimentazione.

Applicazione ad un tratto del fiume Tagliamento

Al fine di verificare le funzionalità del modello CAESAR così modificato, sono state effettuate diverse simulazioni per un tratto del fiume Tagliamento (Friuli Venezia-Giulia), di cui si aveva a disposizione un opportuno modello digitale del terreno comprendente anche l'alveo sommerso. Spesso, infatti, i dati batimetrici non sono disponibili e comunque difficilmente integrati con i dati dei rilievi dei territori circostanti in un unico dato di modello digitale del terreno. Nel caso in esame l'Autorità di Bacino dei Fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione, nella persona del Segretario Generale Ing. Alfredo Caielli ha fornito al Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale dell'Università di Perugia i rilievi laser scanning eseguiti sul Tagliamento in un periodo di magra per il fiume, per cui è stato possibile avere anche le informazioni necessarie sulla conformazione batimetrica del fondo.

La simulazione qui riportata, eseguita per il tratto di fiume studiato, ha immesso nell'alveo circa 300.000 m³ di materiale in 3 ore, mentre nel fiume si faceva transitare una portata liquida di circa 20 m³/s. La Figura 5 mostra alcuni screenshots di CAESAR, relativi appunto a questa simulazione, in cui si nota come il modello stia immettendo sedimenti in alveo dal versante.

La figura (a) mostra lo stato del corso idrico prima dell'immissione dei sedimenti; la figura (b) la situazione intermedia (durante l'immissione di sedimenti nel punto indicato dalla freccia), mentre la figura (c) mostra lo stato finale quando tutto il materiale è stato immesso in alveo.

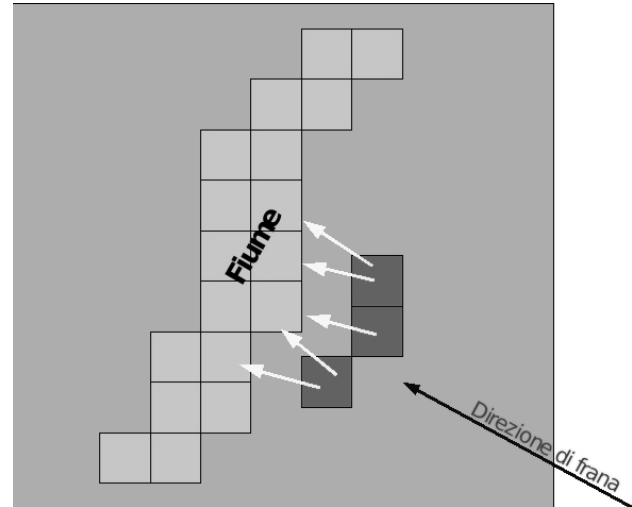


Figura 4: Verso di movimento dei materiali "aggiunti" secondo le regole dei "processi di versante".
 Figure 4: Direction of movement of added sediment using the rules of "slope processes".

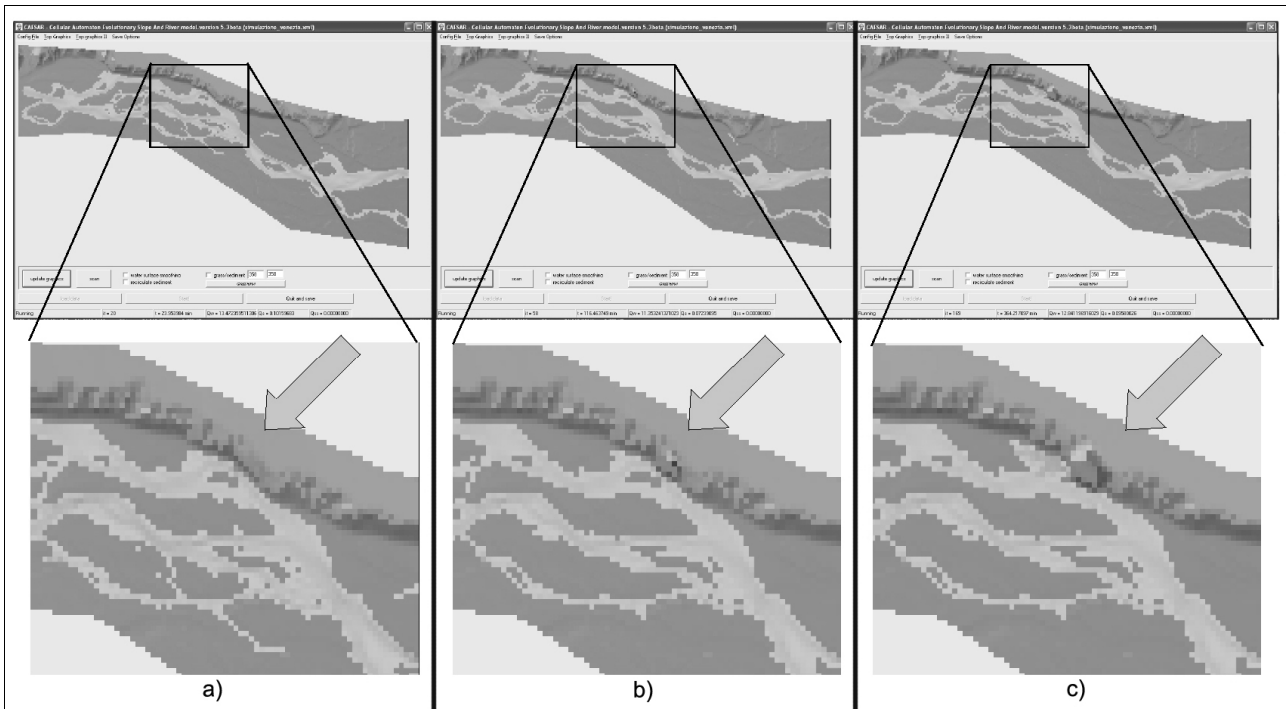


Figura 5: Screenshots rappresentanti l'evoluzione di un tratto dell'alveo del fiume Tagliamento a seguito dell'interferenza con un movimento di versante che immette in alveo circa 300.000 m³ (nel punto indicato dalla freccia). In (a) è rappresentata la situazione iniziale; in (b) si ha la situazione durante l'immissione del materiale ed infine in (c) la situazione finale.

Figure 5, Screenshot representing the evolution of a Tagliamento river's reach due to a slide of 300.000 m³ in volume of material (added in the area indicated by the red arrow). In (a) is shown the initial situation; in (b) the situation when the material is coming into the river and in (c) is shown the final situation.

Come è facile osservare, l'immissione di sedimenti in alveo ha causato l'occlusione parziale del flusso idrico portando ad una sommersione della barra ancora presente in "a" ed in "b".

Queste simulazioni sono una prima applicazione del modello CAESAR modificato, ma è facilmente intuibile come i risultati ottenuti risultano essere qualitativamente buoni. La simulazione del modello, infatti, è rispondente a quella che sarebbe stata la dinamica che ci si sarebbe aspettati in una situazione come quella modellata.

Queste prime simulazioni hanno cominciato a fornire alcune indicazioni sui parametri principali che influenzano la dinamica del processo. In particolare è apparso che parametri quali la velocità di immissione, e soprattutto i volumi dei materiali immessi, sono quelli che rivestono importanza nella successiva evoluzione dello sbarramento parziale simulato in questo caso.

Conclusioni

I processi di occlusione di alveo per frana sono fenomeni estremamente complessi ai fini di una loro possibile modellazione. Il fenomeno investe diversi aspetti e processi tra loro correlati (idraulici, di versante, erosione e sedimentazione fluviale) che rendono estremamente complessa una modellazione con modelli "semplicistici". Di conseguenza, anche i modelli numerici che trattano l'argomento risultano essere abbastanza complessi.

Una volta scisso il processo di occlusione d'alveo in processo di occlusione vero e proprio e nell'eventuale sua evoluzione attraverso un collasso dello sbarramento, lo

scopo del presente lavoro è stato fornire un primo modello numerico in grado di simulare gli effetti di immissione in alveo di fronte a grandi quantità di sedimenti provenienti da processi gravitativi di versante.

A tale riguardo, in questo lavoro sono state svolte diverse simulazioni ed in particolare è stata riportata, a titolo esemplificativo, una simulazione in cui sono stati valutati gli effetti dell'immissione di 300.000 m³ di materiale proveniente dal versante. La simulazione ha mostrato come si sia sviluppata una parziale occlusione d'alveo, fenomeno presumibile viste le dimensioni del corso d'acqua (larghezza d'alveo e portata liquida) e i volumi immessi.

Questa prima simulazione mostra come il modello CAESAR modificato abbia permesso di creare un modello numerico per simulare la dinamica dell'alveo a seguito dell'immissione di materiale dai versanti. Il CAESAR modificato, quindi, si pone come un valido modello per la stima degli effetti dovuti a immissione di materiale in alveo in sostituzione dei vari indici fino ad oggi utilizzati.

CAESAR necessita ancora di opportuni aggiustamenti, soprattutto per la parte di stima del grado di saturazione del suolo (desunta da TOPMODEL) che dovrebbe essere meglio calibrata attraverso l'uso di dati reali.

Inoltre, risulta necessaria una ampia fase di *testing* che dovrà subire il modello, soprattutto attraverso l'uso di dati reali, simulando eventi noti già accaduti in passato, per valutare se e quanto le simulazioni si discostano dalla situazione reale.

Bibliografia

- Beven K. & Kirkby M., 1979. A physically based variable contributing area model of catchment hydrology. *Hydrological Science Bulletin* 24 (1), 43–69.
- Casagli N., & Ermini L., 1999. Geomorphic analysis of landslide dam of Northern Apennine. *Transaction of the Japanese Geomorphological Union* 20 (3), 219–249.
- Cencetti C., Fredduzzi A., Marchesini I., Naccini M., 2006. Some considerations about the simulation of the breach channel erosion on landslide dams. *Computational Geosciences* 10 (2), 201–219.
- Cencetti C., Conversini P., Ribaldi C., 2001. Studio dei sistemi alveo-pianura fluviale in relazione alle interazioni con fenomeni franosi di versante. *Memorie Società Geologica Italiana* 56, 249–263.
- Costa J.E., & Schuster R., 1988. The formation and failure of natural dam. *Geological Society of American Bulletin* 10, 1054–1068.
- Costa J.E., & Schuster R., 1991. Documented historical landslide dams from around the world. Open file report, US Geological Survey.
- Coulthard T. & Kirkby M., 2000. Modelling geomorphic response to environmental change in an upland catchment. *Hydrological Processes* 14, 2031–2045.
- Coulthard T., 2001. Landscape Evolution Models: A software review. *Hydrological Processes (HP Today)* 15, 165–173.
- Coulthard T., Macklin M., Kirkby M., 2002. Simulating upland river catchment and alluvial fan evolution. *Earth Surface Processes and Landforms* 27, 269–288.
- Ermini L., 2003. Gli sbarramenti d'alveo da frane: criteri speditivi per la stesura di scenari evolutivi derivanti dalla loro formazione. *AIGA - I° Convegno Nazionale*, 355–367.
- Ermini L., & Casagli N., 2003. Prediction of the behaviour of landslide dams using a geomorphological dimensionless index. *Earth Surface Processes and Landforms* 28, 31–47.
- Fread D., 1991. The NWS Dambreak Model: Theoretical Background/User Documentation. Technical report, National Weather Service, NOAA, Silver Spring, Maryland.
- Hoey T. & Ferguson R., 1994. Numerical simulation of downstream fining by selective transport in gravel bed rivers: Model development and illustration. *Water resources research* 30 (7), 2251–2260.
- Montgomery D. R. & Dietrich W. E., 1994. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, 30 (4), 1153–1171.
- Murray A.B. & Paola C., 1994. A cellular model of braided rivers. *Nature* 371, 54–57.
- Nicholas A.P., 2005. Cellular modelling in fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms* 30, 645 – 649.
- Pirocchi A., 1992. Laghi di sbarramento per frana nelle Alpi: tipologia ed evoluzione. *Atti I convegno Nazionale Giovani Ricercatori in Geologia Applicata* 93, 128 – 136.
- Wilcock P.R., Crowe, J., 2003. Surface-Based transporto model for mixed-size sediment. *Jpurnal of Hydraulic Engineering* 129 (2), 120–128.