

CAESAR: UN MODELLO PER LA SIMULAZIONE DELLE DINAMICHE D'ALVEO

Thomas Coulthard¹, Pierluigi De Rosa² & Ivan Marchesini²

¹Department of Geography, University of Hull (UK)

²Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Università di Perugia
e-mail: pierluigi.dr@alice.it

Riassunto: Coulthard T., De Rosa P., Marchesini I.: *CAESAR: un modello per la simulazione delle dinamiche d'alveo*. (IT ISSN 03943356, 2008).

CEASAR è un modello bidimensionale di tipo cellular automata, sviluppato per simulare le modificazioni morfologiche di un corso d'acqua. Il modello agisce per iterazioni successive, durante le quali il DEM del bacino viene modificato in accordo con il flusso idrico e di sedimenti e/o con l'intensità di pioggia immessa. CAESAR è stato inizialmente progettato per simulare le risposte geomorfologiche di un bacino ai cambiamenti climatici o di uso del suolo per passi temporali molto grandi. Sviluppi più recenti hanno permesso al modello di simulare situazioni anche più complesse (es. fiumi meandrici) e per piccole scale temporali. CAESAR divide il bacino in celle, ognuna avente un proprio valore di quota, portata idrica, battente idrico, vegetazione, profondità del bedrock e granulometria. Per ogni iterazione il modello aggiorna questi valori in accordo con regole proprie e tenendo conto delle interazioni con le celle vicine. CAESAR ha 4 tipologie di set di regole:

- regole idrologiche
- regole di erosione e sedimentazione fluviale
- processi di versante
- processi vegetativi

Nel presente lavoro si mostrano le capacità di questo modello con alcune applicazioni per prevedere gli effetti che possono avere le opere idrauliche sul fiume e sulla pianura alluvionale.

Abstract: Coulthard T., De Rosa P., Marchesini I.: CAESAR: a model to simulate river dynamics. (IT ISSN 03943356, 2008).

CAESAR is a two dimensional CA (Cellular Automata) model used to simulate the morphological changes of watersheds and rivers. For every model iteration, a DEM of a river basin is modified according to the water and sediment fluxes and/or to the rainfall data entered by the user. CAESAR was initially designed to simulate the geomorphologic response of river catchment to changes in climate or land cover for relevant time scales. More recent developments of the model allows users to model over smaller time and space scales and in more complex morphological situation (river meandering, for example).

This paper aims to describe CAESAR and its capabilities to the Italian scientific community, where it is still almost unknown. Some applications are shown to simulate the presence of hydraulics works interfering with the stream.

A flow and sediment transport model indeed allows to better evaluate the functionality of hydraulic features of the river and to forecast its effects on the river bed-alluvial plain system.

Parole chiave: Modellistica fluviale, Cellular automata, dinamica fluviale.

Keywords: River modelling, cellular automata, fluvial dynamics.

1. BREVE CENNO AI MODELLI FLUVIALI "A CELLE"

I modelli "a celle" vengono utilizzati in geomorfologia per rappresentare il territorio attraverso una griglia di celle. Le modificazioni morfologiche del rilievo sono determinate proprio dalle interazioni tra le varie celle, che seguono regole basate su equazioni semplificate dei processi fisici che intervengono. In particolare nello studio geomorfologico dei fiumi, i modelli a celle utilizzano adattamenti semplificati o relazionati delle complesse equazioni utilizzate nei modelli CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Ciò permette di incrementare le potenzialità dei modelli a celle, in quanto velocizza le operazioni computazionali ed inoltre permette di includere nel modello i processi di trasporto solido tra celle. Il primo di tali modelli è stato quello implementato da Murray e Paola (MURRAY & PAOLA, 1994) che simulava l'evoluzione di un fiume braided sotto l'effetto della portata liquida che attraversava una griglia di celle che rappresentava il canale. L'erosione di tali celle avveniva secondo semplici regole di portata-erosione ed il materiale eroso veniva trasportato nelle celle adiacenti a seconda della pendenza stabilita.

Questo semplice modello non solo permise di ottenere un flusso divergente o convergente ma, ben più importante, la larghezza del canale veniva rappresentata attraverso una o più celle. Non erano presenti invece calcoli della profondità o della velocità del flusso; tuttavia i risultati che vennero ottenuti per i fiumi braided furono qualitativamente realistici. Con tale modello è stato possibile riprodurre il comportamento di un canale braided con migrazione di barre e canali verso valle e lateralmente. Murray e Paola hanno ricreato le condizioni che portano un fiume ad intrecciarsi: flussi non confinati lateralmente, materiale mobile sul fondo e sponde in erosione, semplificando così le leggi fisiche che sono all'origine di tale fenomeno. Benché molto semplice, tale modello ha rappresentato storicamente un importante approccio per i ricercatori, in quanto è stato precursore di ulteriori implementazioni migliorative dello stesso.

1.1 CAESAR

CAESAR si è ispirato proprio al modello di Murray e Paola. CAESAR, per le sue peculiarità, appartiene alla

categoria di modelli bidimensionali a celle che riescono a colmare meglio il gap esistente tra i modelli CDF 2D e 3D (NICHOLAS, 2005) che sono spesso difficilmente applicabili a scala di bacino o per *time scale* maggiori di un singolo evento.

CAESAR è un modello bidimensionale, di tipo *cellular* automata, che simula l'evoluzione morfologica del territorio dovuta agli effetti delle dinamiche d'alveo, utilizzando come input il DEM di un alveo a scala di bacino o tratto, portate solide e liquide e dati di pioggia. CAESAR, implementando al suo interno un modello di trasporto dei sedimenti, è in grado di simulare i cambiamenti morfologici sia di un alveo che del reticolo idrografico. Grazie all'utilizzo della "funzione tracciante" è possibile seguire i percorsi dei diversi tipi di sedimenti, la loro diffusione e concentrazione a valle.

Inizialmente, il software era stato progettato per studiare le variazioni morfologiche di un bacino idrografico su lunghe scale temporali a seguito di cambiamenti climatici e/o dell'uso del suolo (COULTHARD et al., 2002).

Per ogni cella rappresentante il bacino o il tratto fluviale CAESAR gestisce proprietà quali la quota, la portata idrica e il battente, la copertura vegetale, la profondità del bedrock e la granulometria. Il modello utilizza il concetto di "automazione 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 per l'erosione e la sedimentazione fluviale
4. regole per i processi di versante

Per ogni iterazione CAESAR modifica i valori delle proprietà della cella analizzata, al passo temporale precedente, in accordo con i set di regole appena elencati e con i valori delle proprietà delle celle adiacenti. Questo significa che, ad esempio, la quantità totale di erosione di una cella viene a dipendere dal battente idrico della cella e dalla pendenza tra la stessa cella e quelle adiacenti.

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 diventa poi portata defluente attraverso l'utilizzo, come modello afflussi-deflussi, di un TOPMODEL modificato.

Qualora si volesse utilizzare CAESAR a scala di tratto, l'input richiesto dal modello è rappresentato dalle portate (solide e liquide) in ingresso.

Per ogni scan (dove per *scan* si indica la scansione e l'aggiornamento dei valori di tutte le celle del territorio per un dato passo temporale) il flusso

idrico (sia che si operi a scala di tratto che a scala di bacino) è indirizzato verso le tre celle idraulicamente più a valle (fig. 1) 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:

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

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

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) applicata ad undici diverse frazioni granulometriche (da 1 a 256 mm) che definiscono la granulometria del letto dell'alveo a sua volta suddiviso in una serie di 10 *layers* attivi (secondo l'approccio di HOEY & FERGUSON, 1994). A seconda delle dimensioni i diversi clasti sono trasportati sia come carico di fondo che come sedimenti sospesi, determinando la creazione di una superficie "corazzata" (armoured) e di una stratificazione del fondo. Quando si effettuano simulazioni molto lunghe è necessario assicurarsi che si siano depositati sedimenti più fini che fungeranno da "risorse" per i processi di erosione futuri. Il principale "motore" del modello, responsabile delle modificazioni morfologiche che avvengono nell'alveo, è legato ai processi di presa in carico, trasporto e sedimentazione dei materiali. Il processo di trasporto è guidato da una formula "mixed-size", che calcola il tasso di trasporto per ogni *i*-esima classe granulometrica di sedimenti (WILCOCK & CROWE, 2003):

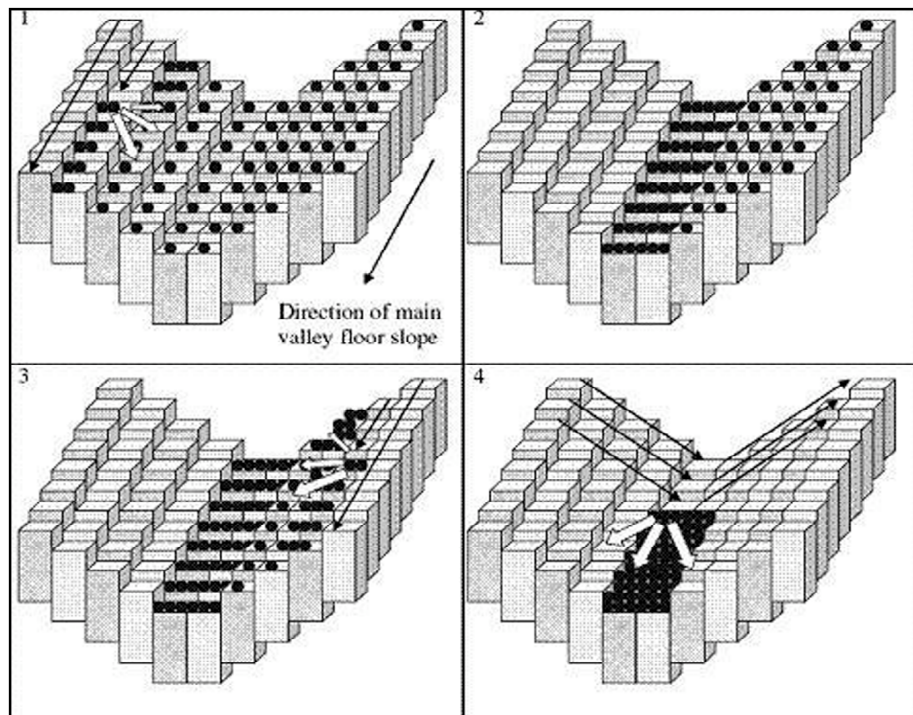


Fig. 1 - Schema dell'algoritmo di scan del modello digitale del terreno utilizzato da CAESAR (tratto da COULTHARD et al., 2002).

Schematic diagram of the CAESAR scanning flow routing algorithm (from COULTHARD et al., 2002).

$$q_i = \frac{F_i \cdot U^3 \cdot W_i}{(s-1) \cdot g} \quad (\text{eq 2})$$

dove F_i rappresenta la frazione di volume dell' i -esima classe granulometrica 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 movimenti di massa nel momento in cui viene superato un valore di inclinazione limite, insieme a fenomeni di *soil creep*. 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 quota 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 automazione cellulare 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 che varia in funzione della massima quantità di erosione o sedimentazione assicurando che tale valore non superi mai il 10% della pendenza locale. In questo modo si prevengono eventuali instabilità computazionali che possono portare ad una non realistica evoluzione del territorio. Viene definito un parametro (*erodelimit*), imposto dall'utente, che rappresenta la massima quantità di materiale eroso o sedimentato che può essere coinvolto in ogni *time step*. Se la massima quantità di materiale eroso o depositato è superiore al valore di *erodelimit* allora il modello dimezza il *time step* e ripete il calcolo fino a che tale valore è sotto il limite. In questo modo si controllano di nuovo le eventuali instabilità computazionali, poiché non vengono mai coinvolte eccessive quantità di materiale eroso o depositato, permettendo al modello di avere lunghi *time steps* (fino a 1 ora) nei periodi di quiescenza (ad esempio basse portate) ma anche piccoli *time steps* (fino al decimo di secondo) nei periodi di alte portate o di 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 di quota delle celle comporta cambiamenti nelle pendenze locali. Un aumento di quota di 0.1 m per una cella appartenente ad una griglia di dimensione 1 m determina, rispetto alle celle limitrofe inalterate, un aumento di pendenza del 10%. Invece, se la dimensione della cella è di 10 m, il cambiamento è del 1%. Quindi, incrementando le dimensioni delle celle, i cambiamenti tra le celle sono meno severi nell'alterazione delle pendenze. Questo indica che la scelta del valore di *erodelimit* deve essere fatta dall'utente consapevolmente ed in funzione anche della dimensione delle celle.

Il problema della risoluzione è connesso alla dura-

ta della simulazione: un singolo evento di piena simulato attraverso un'alta risoluzione temporale connessa ad una elevata risoluzione spaziale (numero di celle superiore a 500.000), può richiedere anche un intero giorno di elaborazione.

CAESAR viene rilasciato con licenza GPL (il sorgente del codice è liberamente scaricabile al sito www.coulthard.org.uk) e viene sviluppato principalmente presso l'Università di Hull (UK) (COULTHARD & VAN DE WIEL, 2007).

2. ALCUNI ESEMPI DI APPLICAZIONI DI CAESAR

CAESAR, grazie alla licenza GPL di rilascio, è stato adattato anche ad altri scopi di studio. Il modello possiede infatti anche una routine per permettere l'evoluzione laterale e quindi simulare l'evoluzione di un fiume meandriforme, oltre che braided (COULTHARD, 2006). I risultati raggiunti nelle simulazioni sono stati soddisfacenti, in quanto si è dimostrato come l'erosione laterale possa essere simulata in un modello CA (*cellular automata*). Le sponde esterne dei meandri sono state erose in quantità maggiori in corrispondenza delle curve più strette (fig 2). Per simulare la sedimentazione e la ridistribuzione dei sedimenti nel canale è stato utilizzato un algoritmo che calcola il raggio di curvatura locale del meandro. La maggiore erosione nelle sponde esterne è stata valutata proprio attraverso il valore del raggio di curvatura del meandro. Benché siano sicuramente possibili miglioramenti del modello per lo studio di fiumi meandriformi, CAESAR sta dimostrando le sue potenzialità anche per quanto riguarda questi tipi di alvei.

Un ulteriore esempio di applicazione di CAESAR è quello in cui lo stesso modello è stato opportunamente modificato per simulare l'immissione in alveo di grandi quantità di sedimenti provenienti dal versante, allo scopo di simulare (DE ROSA, 2007 - vedi fig. 3) gli effetti di un processo gravitativo che interferisce con l'alveo, ostruendolo parzialmente o totalmente.

Al fine di verificare le funzionalità del modello CAESAR così modificato, sono state effettuate diverse simulazioni su 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. La simulazione eseguita per il tratto di fiume studiato, ha immesso nell'alveo circa 300.000 m³ di materiale in 3 ore, mentre nel fiume transitava una portata liquida di circa 20 m³/s. La Figura 3 mostra alcuni *screenshots* di CAESAR, relativi alla simulazione effettuata, in cui si nota come il modello simula l'immissione di sedimenti in alveo dal versante.

La simulazione ha mostrato come si sia sviluppata una parziale occlusione d'alveo, cosa molto verosimile, considerate le dimensioni del corso d'acqua (in termini di larghezza d'alveo e di portata liquida) e dei volumi immessi.

La modifica apportata ha 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 modello utile per la stima degli effetti dovuti a immissione di materiale in alveo per frana, in sostituzione dei vari indici fino ad oggi utilizzati (CASAGLI & ERMINI, 1999).

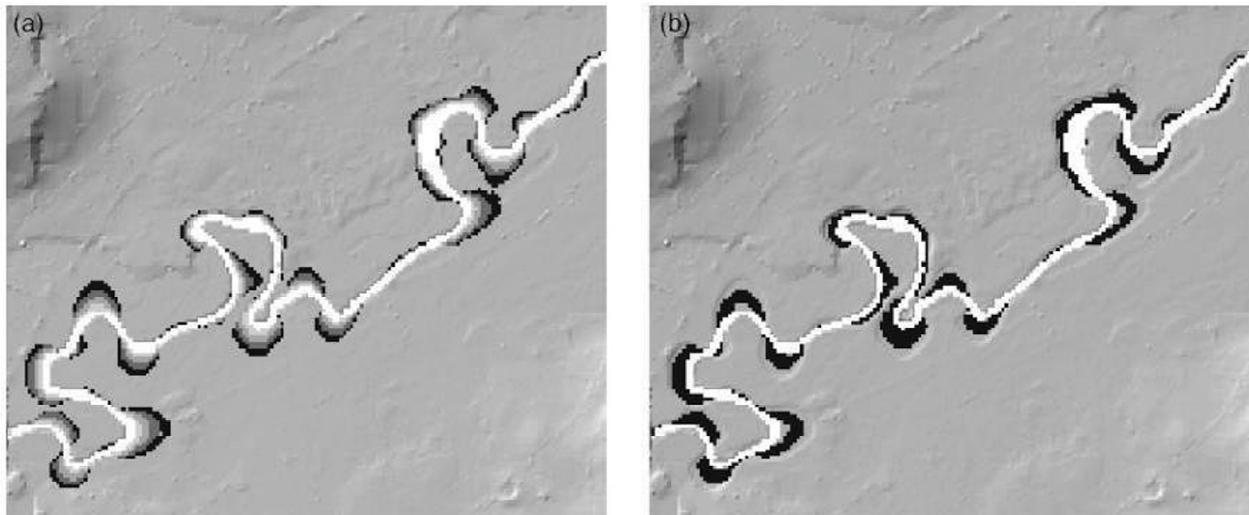


Fig. 2 - Evoluzione di un tratto fluviale meandriforme (tratto da COULTHARD & VAN DE WIEL, 2006). In figura (a) si osserva l'evoluzione del meandro. Le diverse ombreggiature corrispondono a 5 diversi stadi evolutivi. In figura (b) è riportato invece il confronto tra lo stadio iniziale (in bianco) e quello finale (in nero).

Meander development (from COULTHARD & VAN DE WIEL, 2006). (a) Meander growth; the different shades correspond to five different time slices from the model. (b) Initial and final channel positions.

3. SIMULAZIONE DEGLI EFFETTI DI OPERE IN ALVEO

Nel presente lavoro CAESAR è stato utilizzato per studiare gli effetti prodotti, a scala di tratto fluviale, a seguito della realizzazione di opere trasversali deflettori di flusso (pennelli). Per motivi di opportunità, essendo già disponibili i dati relativi al DEM e alle portate, la simulazione è stata effettuata sullo stesso tratto del fiume Tagliamento utilizzato per lo studio delle frane in alveo mostrato in Figura 3, gentilmente fornito dall'Autorità di Bacino dei Fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione.

Il DTM del Tagliamento che è stato utilizzato è frutto di un rilievo laseraltimetrico, la cui "nuvola" di punti è stata interpolata con risoluzione pari a 2 metri al suolo. Al fine di rendere più performante la simulazione (riducendo i tempi di calcolo necessari per la simulazione di un periodo di oltre 750 giorni) la risoluzione del DTM è stata portata a 10 metri al suolo.

Come già descritto nei capitoli precedenti, CAESAR necessita, tra i vari dati di input, della distribuzione granulometrica dei sedimenti presenti in ogni cella del territorio di cui si sta simulando l'evoluzione. CAESAR infatti può gestire fino a 9 granulometrie differenti per 10 layers in profondità. Questo è, da un lato, un vantaggio poiché si possono avere simulazioni dove si riproducono i fenomeni delle dinamiche d'alveo in modo più realistico; dall'altro rappresenta invece una difficoltà operativa, a causa del reperimento di dati così dettagliati che risultano essere raramente disponibili. In questi casi la procedura classica adottata consiste nell'assegnare una distribuzione granulometrica uguale per tutte le celle e costante in profondità e simulare successivamente un periodo di "spin-off". Durante il periodo di spin-off si fanno transitare nel tratto fluviale in questione portate idriche compatibili con i valori reali.

Questa simulazione permette lo sviluppo di un dato granulometrico che, anche se fittizio, è il più possibile simile a quello presente all'interno dell'alveo. Si sviluppano, infatti, i processi sedimentari tipici di un alveo, come il corazzamento del canale oppure la differenza tra la distribuzione granulometrica presente in una barra (con granulometrie che decrescono passando dalla testa alla coda dei corpi sedimentari), ecc...

Nel caso in esame la distribuzione granulometrica di partenza è stata desunta dai dati riportati in Surian (SURIAN, 2002) riguardanti il fiume Piave, che presenta caratteristiche geomorfologiche e sedimentarie molto simili a quelle del Tagliamento.

Ai nostri fini tale assunzione è più che sufficiente, in quanto la simulazione non è finalizzata allo studio delle variazioni granulometriche dell'alveo del Tagliamento, quanto piuttosto a valutare l'affidabilità del modello nel prevedere gli effetti dovuti alla realizzazione di opere idrauliche. Il risultato della fase di spin-off (di durata pari a 10 mesi) è mostrato in Figura 6a, dove l'intensità della scala di grigio è funzione del D50 del layer superficiale; si apprezza come, al termine della fase di spin-off, i valori più alti del D50 si posizionano in corrispondenza dei canali, come è logico aspettarsi.

La simulazione vera e propria è stata effettuata inserendo 5 pennelli longitudinali posti a protezione della sponda posta in sinistra idrografica e l'effetto di tali opere è stato simulato utilizzando un periodo di 750 giorni (circa 2 anni).

L'idrogramma in input, ribadendo che lo scopo del lavoro consiste nel testare il comportamento del modello in tali condizioni da un punto di vista qualitativo, non è reale ed è stato ricostruito sulla base dei valori medi (200m³/s) e di picco (1000 m³/s) riportati su SURIAN E RINALDI (2003).

In Figura 4 è raffigurato il battente idrico ottenuto durante la simulazione, prima e dopo l'immissione dei

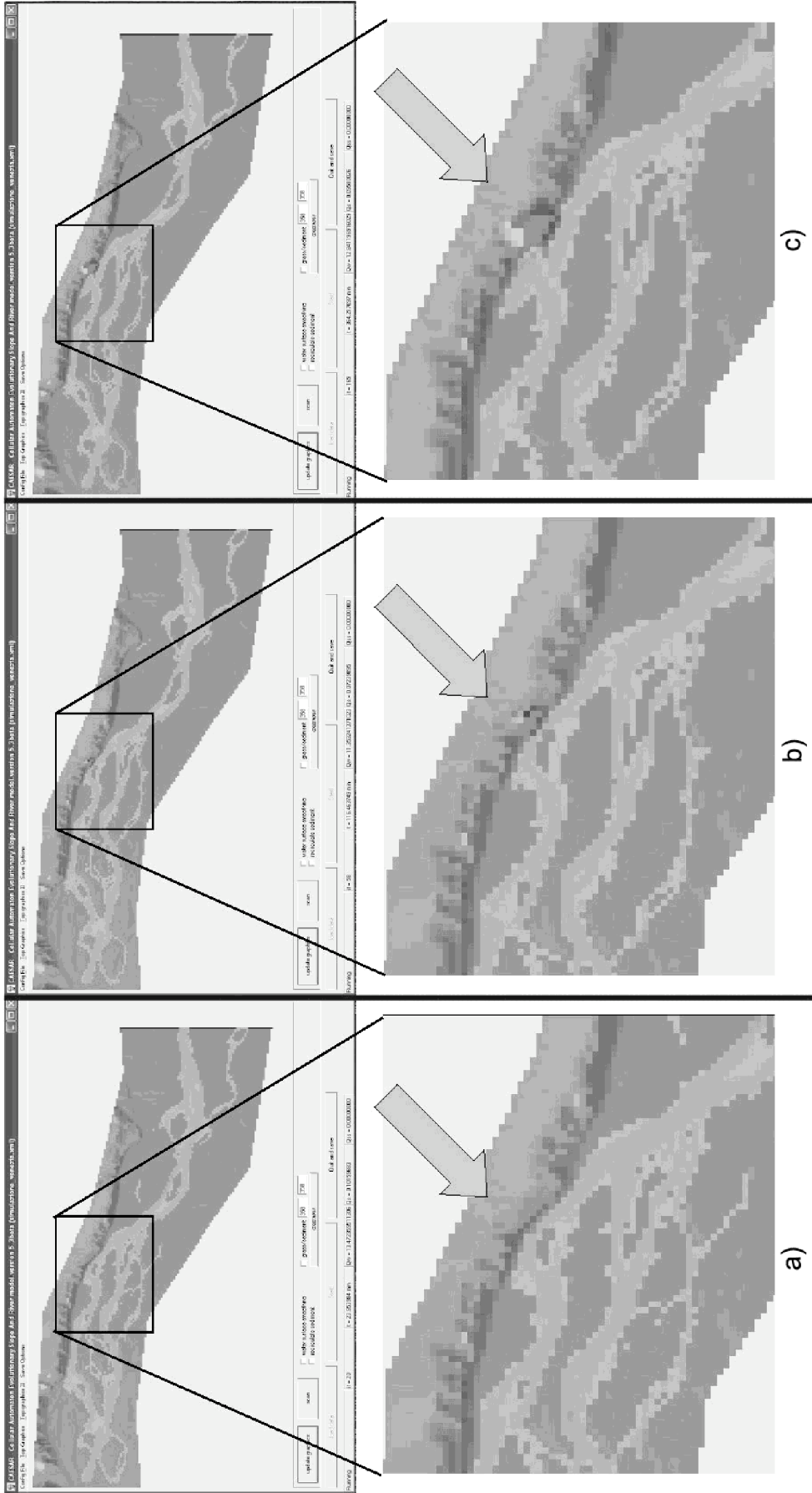


Fig. 3 - Screenshots rappresentanti l'evoluzione di un tratto dell'alveo del fiume Tagliamento (tratto da De Rosa, 2007) a seguito dell'interferenza tra la dinamica d'alveo ed una frana che immette in alveo circa 300.000 m³ (nel punto indicato dalla freccia). In (a) è rappresentata la situazione iniziale; in (b) si ha la situazione durante l'immissione del materiale ed infine, in (c), è rappresentata la situazione finale.
Screenshots representing the fluvial evolution of a reach of Tagliamento river (from De Rosa, 2007) after a slide introduction into the bed river of 300.000 m³. In (a) is represented the initial situation, in (b) the situation during the introduction of material and in (c) the final situation.

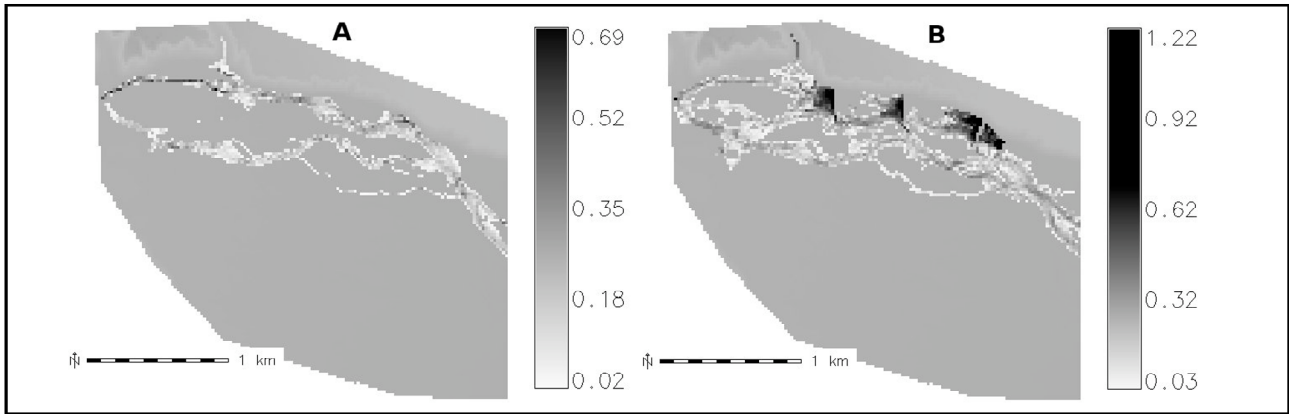


Fig. 4 - Mappa del battente idrico simulato con CAESAR, prima (a) e dopo (b) l'immissione nel modello delle opere di difesa spondale. I valori in legenda rappresentano il battente idrico, espresso in metri.

Map of waterdepth simulated by CAESAR before (a) and after (b) the introduction of hydraulic works. The value legend are in meters.

pennelli. In (a) è raffigurata la situazione originaria senza la presenza dei pennelli mentre la figura (b) mostra il battente idrico che si ottiene dopo un periodo simulato di due anni dall'immissione dei pennelli.

Si nota come la presenza delle opere trasversali abbia sviluppato maggiormente il canale secondario (posto grossomodo al centro dell'alveo attivo) rispetto alla situazione riportata in (a).

Oltre ad analizzare la nuova configurazione del battente idrico, è stato analizzato il processo erosivo - deposizionale, effettuando il confronto tra il modello digitale del terreno prima e dopo la simulazione (fig. 5), tramite una semplice operazione di *map algebra*.

L'analisi mette in evidenza una prevalenza di zone in sedimentazione (colore scure) a monte dei pennelli, mentre si manifesta una zona prevalentemente in erosione (zone chiare) al centro dell'alveo, appena oltre la fine dei pennelli.

In Figura 6 è riportata la distribuzione del D50 del layer superiore al termine del periodo di spin-off (a) e dopo i 750 giorni di simulazione (b). Il confronto mostra come le classi granulometriche di diametro più elevato

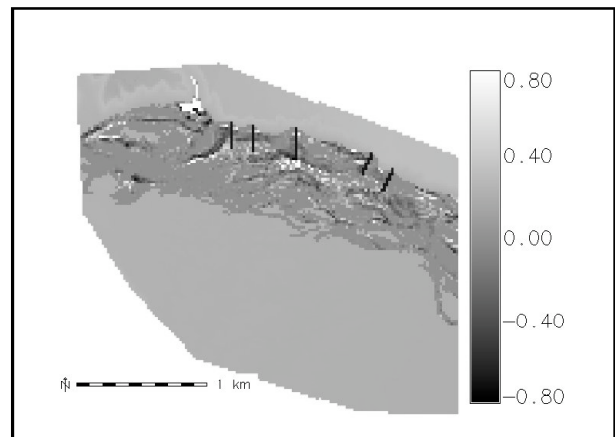


Fig. 5 - Mappa del pattern erosivo - deposizionale ottenuto tramite un confronto tra il modello digitale del terreno prima e dopo la simulazione. In legenda i valori sono espressi in metri; i valori negativi indicano sedimentazione, i positivi erosione.

Map of erosion-deposition pattern comparing a digital elevation model before and after simulation. The value legend are in meters; negative values indicate deposition, positive erosion.

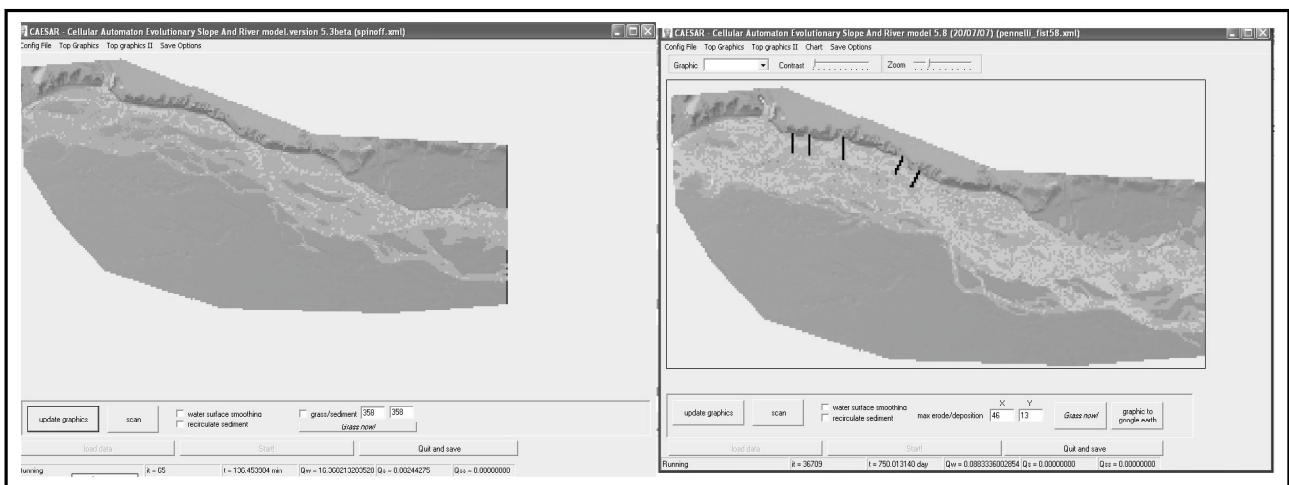


Fig. 6 - D50 del tratto studiato prima (a) e dopo l'immissione dei pennelli (b). Il colore grigio più chiaro rappresenta classi granulometriche più grossolane.

Map of D50 of reach before (a) and after (b) the presence of hydraulic works. The dark gray color represent a finer granulometric class.

si siano spostate congruente-mente con quanto evidenziato dal battente idrico e dal processo erosivo/deposizio-nale.

Al fine di studiare con maggiore chiarezza gli effetti erosivi - deposizionali causati dalla presenza dei pennelli, è stato costruito un profilo di una sezione fluviale subito a monte di uno dei pennelli, come mostrato in Figura 7.

L'esame della sezione riportata in Figura 8 consen-te di apprezzare con mag-gior dettaglio i cambiamenti morfologici prodotti dalla simulazione.

Sono stati individuati alcuni punti, numerati da 1 a 4 lungo la sezione , utilizzati per spiegare e compren-dere bene gli effetti avuti lungo questa sezione.

Si nota come il canale a ridosso del versante in sinistra idrografica (punto 1 in fig. 8), cioè il canale principale precedente, sia stato colmato quasi completa-mente a causa dell'influenza del pennello. L'opera stes-

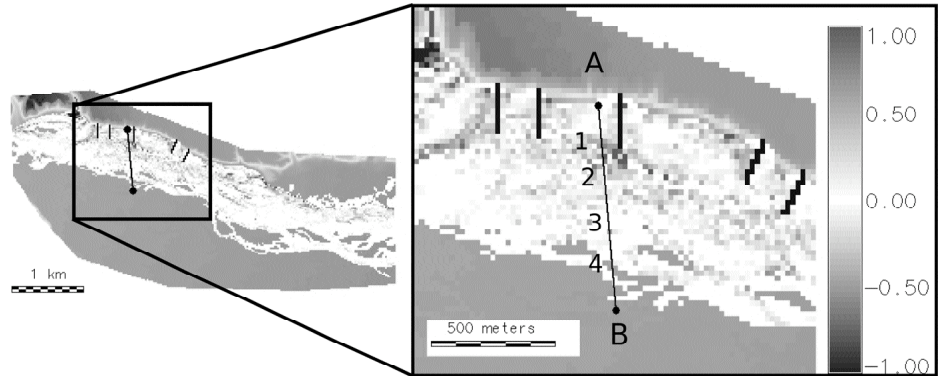


Fig. 7 - Traccia del profilo trasversale raffigurato nel grafico successivo .

Trasverse profile shown in next figure.

sa, deviando il flusso idrico in destra idrografica, ha comportato una parziale erosione della barra nel punto 2. Si nota infatti, in sezione, che la barra si assottiglia molto dopo solo due anni di attività delle opere di dife-sa spondale.

Il canale al punto 4, al contrario, non risente delle opere, essendo situato ad una distanza consistente da esse (circa 400 metri).

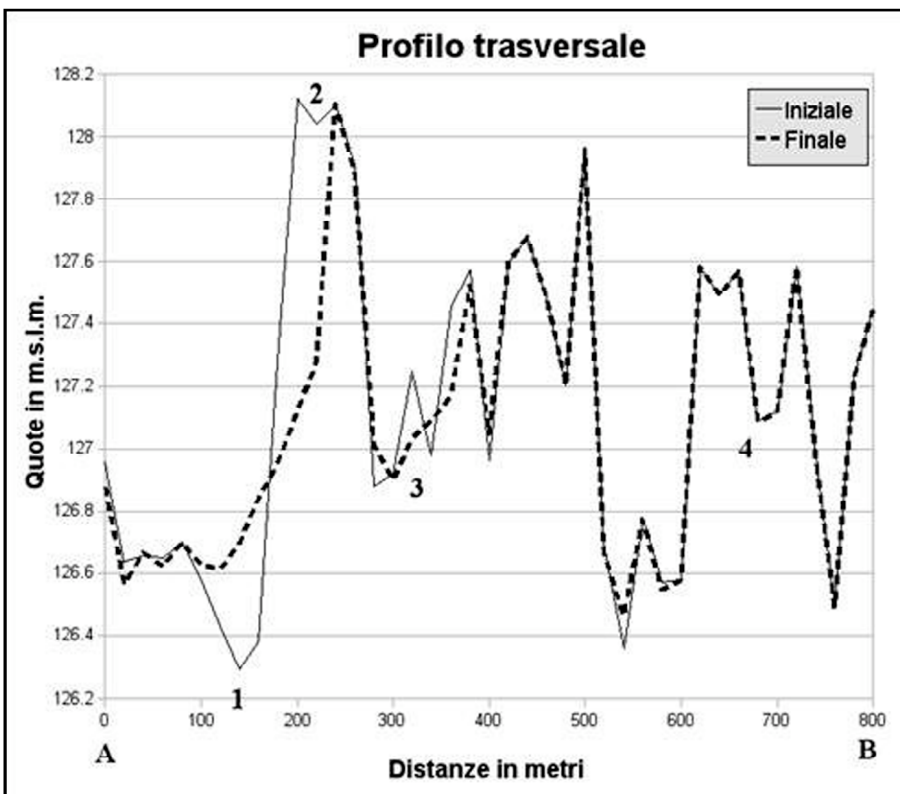


Fig. 8 - La linea tratteggiata rappresenta il profilo finale della sezione trasversale AB riportata in figura mentre la linea continua quello iniziale. I principali cambiamenti all'interno dell'alveo, dovuti alla simulazione possono essere così sintetizzati: il pennello ha causato sedi-mentazione di materiale all'interno del vecchio canale principale (punto 1); nel punto 2 si vede come la barra è stata erosa a seguito dello spostamento del flusso dovuto alla presenza del pennello; nel punto 3 uno dei canali secondari è stato parzialmente eroso, mentre il canale presente nel punto 4 risente solo marginalmente della presenza delle opere trasversali.

The dotted line represent the AB final profile, while the continuous line is the initial profile. The main change are in 1 where is shown a deposition. In 2 the bar has been eroded; in 3 ones of secondary channel has been partially eroded. In 4 we do not see any change.

4. CONCLUSIONI

Lo scopo del lavoro è quello di testare CAESAR anche al di fuori del campo di applicazione per cui il modello nasce. CAE-SAR, infatti, è stato sviluppato principalmente per studiare le variazioni geomorfologiche a scala di bacino o di alveo per lunghi periodi temporali (centinaia di anni). Le altre applicazio-ni mostrate in questa sede hanno richiesto alcune modifi-che del codice sorgente.

In questa sede CAESAR è stato utilizzato per simulare gli effetti di opere idrauliche tras-versali a scala di tratto fluviale per un intervallo temporale breve (2 anni circa), mostrando sostanzialmente risultati realisti-ci. CAESAR è un modello quan-titativo che attualmente viene utilizzato prevalentemente a fini di ricerca. La correttezza delle simulazioni, invece, è stata testata essenzialmente da un punto di vista qualitativo.

I risultati ottenuti, riguardanti i processi erosivi/deposizionali, il battente idrico (connesso alla configurazione dei canali di magra) e la distribuzione del D50 all'interno dell'alveo sono congruenti con la presenza dei pennelli.

Nel dettaglio, la simulazione ha prodotto il colamento quasi completo del canale a ridosso del versante in sinistra idrografica, la conseguente erosione della barra longitudinale limitrofa e una nuova configurazione dei canali di magra perfettamente coerente con la presenza dei pennelli all'interno dell'alveo.

L'intervallo di tempo simulato nel presente lavoro è pari a circa due anni. È opportuno sottolineare che i tempi di calcolo necessari al modello, che dipendono dalla risoluzione del DTM e dall'intervallo di tempo che si vuole simulare, sono abbastanza lunghi. Nel caso specifico sono state necessarie circa 20 ore per simulare il periodo di 750 giorni.

In conclusione, è possibile affermare che CAESAR riproduce risultati realistici, almeno qualitativamente, anche per studiare gli effetti sulle dinamiche d'alveo dovute alla presenza di opere idrauliche.

È interessante, approfondire l'aspetto quantitativo; per far questo, è necessario reperire una consistente mole di dati riguardanti batimetrie, profili, distribuzioni granulometriche, portate liquide e solide, distribuite su un intervallo temporale sufficientemente ampio ed in alvei con caratteristiche morfologico-sedimentarie differenti.

BIBLIOGRAFIA

- CASAGLI N., ERMINI L. (1999) - *Geomorphic analysis of landslide dam of Northern Appenine*. - Transaction of the Japanese Geomorphological Union, **20** (3), pp. 219-249.
- COULTHARD T.J., HICKS D.M., VAN DE WIEL M.J. (2007) - *Cellular modelling of river catchment and reaches: Advantages, limitation and prospect*. - *Geomorphology*, **90**, pp. 192-207.
- COULTHARD T.J. & VAN DE WIEL M.J. (2006) - *A cellular model of river meandering*. - *Earth Surface Processes and Landforms*, **31** (1), pp. 123-132.
- COULTHARD T.J., MACKLIN M.G. & KIRKBY M.J. (2002) - *A cellular model of Holocene upland river basin and alluvial fan evolution*. - *Earth Surface Processes and Landforms*, **27**, pp. 269-288.
- DE ROSA P. (2007) - *Un approccio modellistico per il fenomeno delle frane in alveo: una modifica al modello CAESAR*. - *Giornale di Geologia Applicata*, in stampa.
- 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), pp. 2251-2260.
- MURRAY AB & PAOLA C. (1994) - *A cellular model of braided rivers*. - *Nature*, **371**, pp. 54-57.
- NICHOLAS A.P. (2005) - *Cellular modelling in fluvial geomorphology*. - *Earth Surface Processes and Landforms*, **30**, pp. 645-649.
- SURIAN N. (2002) - *Downstream variation in grain size along an Alpine river: analysis of controls and processes*. - *Geomorphology*, **43** (1-2), pp. 137-149.
- SURIAN N. & RINALDI M. (2003) - *Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy*. - *Geomorphology*, **50** (4), pp. 307-326.
- WILCOCK P.R. & CROWE J.C. (2003) - *Surface-based transport model for mixed-size sediment*. - *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **129** (2), pp. 120 - 128.

Ms. ricevuto il 28 marzo 2008
Testo definitivo ricevuto il 29 maggio 2008

Ms. received: March 28, 2008
Final text received: May 29, 2008