

EFFETTI DELL'ETEROGENEITÀ DELLA PIANA ALLUVIONALE SULLA MIGRAZIONE DI MEANDRI FLUVIALI

Manuel Bogoni¹ & Stefano Lanzoni¹

*(1) Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale – Università degli Studi di Padova – Via Loredan 20, 35131 Padova
manuel.bogoni@dicea.unipd.it, stefano.lanzoni@dicea.unipd.it*

ASPETTI CHIAVE

- *L'evoluzione planimetrica di un fiume meandriforme è guidata sia dalle caratteristiche morfodinamiche del fiume stesso, sia dalla struttura superficiale della piana alluvionale.*
- *Gli oxbow lakes e le scroll bars consistono in singolarità geomorfologiche sulla superficie alluvionale, le quali archiviano la storia morfodinamica del fiume e influiscono sulla sua evoluzione futura.*
- *Analisi statistiche e spettrali multivariate mettono in evidenza il ruolo dell'eterogeneità della piana alluvionale nella geometria di meandri simulati numericamente, confrontati con geometrie naturali.*

1 INTRODUZIONE

Le piane alluvionali e i relativi fiumi costituiscono complessi sistemi dinamici che coinvolgono processi idrodinamici, morfodinamici, geologici, geomorfologici, chimici e biologici agenti su un vasto intervallo di scale temporali (dai giorni ai secoli), con reciproche interazioni. La morfologia superficiale e la stratigrafia di una piana alluvionale sono modellate dalla mutua interazione di portata liquida, portata solida, processi di erosione e di deposito (Howard, 1996). L'effetto a lungo termine è controllato dalla configurazione morfologica del fiume (meandriforme, intrecciato, anastomizzato), dal regime fluviale e dalle peculiarità del trasporto solido. Confinamenti della piana alluvionale, la meccanica delle faglie e la distribuzione di biomassa possono inoltre assumere un ruolo apprezzabile nel determinare l'evoluzione della piana alluvionale.

L'obiettivo del presente lavoro è analizzare un particolare aspetto della dinamica fiume-piana alluvionale: il ruolo dell'eterogeneità della superficie alluvionale nel determinare la configurazione spaziale di un fiume meandriforme la cui dinamica, a sua volta, contribuisce a formare la struttura sedimentologica della piana alluvionale stessa. Questa interazione mutua è strettamente correlata alla formazione di oxbow lakes e scroll bars (Figura 1), i quali introducono modificazioni nella superficie della piana alluvionale e, pertanto, influiscono sull'evoluzione morfologica dei meandri (Lazarus & Constantine, 2013). Gli oxbow lakes rappresentano recipienti naturali per l'immagazzinamento di sedimenti e producono singolarità morfologiche, ecosistemi locali, serbatoi di idrocarburi ed inquinanti (Lewin and Ashworth, 2014). D'altra parte, la continua formazione di cutoffs, con la conseguente rimozione dei lobi di meandri pienamente sviluppati e la creazione di nuovi oxbow lakes, introduce un limite nello sviluppo della complessità geometrica del fiume e, di conseguenza, assicura una condizione di evoluzione stabile dal punto di vista statistico (Camporeale et al, 2005; Frascati & Lanzoni, 2010).

Le unità geomorfologiche formate da scroll bars e oxbow lakes assumono quindi un ruolo di primaria importanza sia nel passato del fiume, rappresentando un archivio della sua storia morfodinamica (Schwenk et al., 2015), sia per prevenire la sua evoluzione futura, operando come filtro sullo sviluppo planimetrico a breve e lungo termine.

2 MATERIALI E METODI

2.1 Modellazione matematica

L'eterogeneità spaziale dell'erodibilità della piana alluvionale è prodotta dalla formazione di scroll bars e oxbow lakes con il loro conseguente riempimento da parte di sedimenti fini, che determina la progressiva formazione di singolarità sedimentologiche. In altre parole, l'evoluzione a lungo termine dei fiumi alluvionali è in molte circostanze guidata dalla progressiva trasformazione della composizione superficiale della piana alluvionale.

Il modello adottato si basa su quello sviluppato da *Frascati & Lanzoni* (2009), opportunamente trasformato per trattare l'eterogeneità della piana alluvionale causata dalla formazione di neck cutoffs, lo sviluppo di scroll bars e il progressivo riempimento degli oxbow lakes. In tal modo, in prima approssimazione è possibile considerare due diverse erodibilità, una per la piana alluvionale originaria (E_f) e una per le singolarità geomorfologiche formate da scroll bars e oxbow lakes (E_o). Basandosi sui risultati preliminari ottenuti da *Bogoni et al.* (2015), sono stati considerati tre diversi scenari: caso hardening, caso omogeneo, caso softening. Il primo scenario (hardening) assume complessi geomorfologici scroll bars – oxbow lakes meno erodibili rispetto alla piana alluvionale circostante, pertanto il fiume incontra un ostacolo più resistente quando raggiunge una singolarità. Questa situazione si realizza in seguito al progressivo riempimento dei lobi abbandonati da parte di materiale fine, fornito dalle esondazioni del fiume o attraverso piccoli canali (tie channels) i quali, anche dopo un cutoff, continuano a collegare il fiume con l'oxbow lake, permettendo lo scambio di portata e sedimenti in sospensione. Il materiale più fine ricopre il materiale più grossolano, portando alla formazione di un corpo sedimentologico resistente all'erosione (*Rowland et al.*, 2005). Il secondo scenario (omogeneo) considera gli oxbow lakes resistenti tanto quanto la piana alluvionale che, quindi, non subisce alcuna variazione da parte dell'azione fluviale. Infine, il terzo scenario (softening) considera unità geomorfologiche bars-oxbows più erodibili rispetto alla piana alluvionale, pertanto la velocità di migrazione del fiume aumenta quando il suo tracciato raggiunge un oxbow lake precedentemente formatosi. Si tratta, tuttavia, di una situazione non comune in natura, poiché assume che la migrazione laterale sia talmente rapida da consentire che un oxbow lakes sia intercettato dal percorso del fiume prima che il tratto abbandonato venga completamente riempito dai sedimenti fini e si realizzi il consolidamento della relativa scroll bar.



Figura 1. Dettaglio della piana alluvionale del Fiume Juruá, Brasile (fonte: Landsat, <http://earthexplorer.usgs.gov>, dimensioni effettive 85 x 31 km circa). Il fiume scorre da sinistra verso destra. Sono ben visibili molte caratteristiche tipiche di un sistema fiume-piana alluvionale: meandri asimmetrici, scroll bars nella sponda interna dei meandri, alvei abbandonati, cutoffs incipienti, oxbow lakes recenti ancora inondatai, oxbow lakes progressi riempiti dai sedimenti depositati e coperti dalla vegetazione della Foresta Amazonica.

Il campo di moto è simulato con due differenti approcci matematici, entrambi basati sull'assunzione che esso sia funzione della distribuzione spaziale della curvatura planimetrica dell'asse fluviale. Il primo approccio (denominato IPS, *Ikeda et al.*, 1981) è relativamente semplificato in quanto assume a priori la configurazione topografica del fondo e, quindi, consente di simulare solo meandri che si propagano verso valle. Al contrario, il secondo approccio (denominato ZS, *Zolezzi & Seminara*, 2001) determina anche la topografia del fondo e consente di descrivere sia la propagazione verso valle sia quella verso monte dei meandri. I parametri di input sono il rapporto semilarghezza-profondità β della sezione trasversale del fiume, il parametro di Shield τ^* , il diametro adimensionale dei sedimenti d_s . La configurazione del letto fluviale (piano o a dune) viene assegnata in relazione ai valori assunti da questi parametri e dal parametro di trasporto proposto da *Van Rijn* (1984).

2.2 Analisi statistiche dei risultati

Le configurazioni dei meandri fornite dal modello matematico, generate dall'interazione di processi fortemente non lineari, variano sia nel tempo che nello spazio. Tre diverse metodologie statistiche e spettrali multivariate sono state utilizzate per caratterizzare e confrontare i meandri generati numericamente con

geometrie di fiumi reali. Tali metodologie sono l'analisi di Fourier (FA), l'analisi delle componenti principali (Principal Component Analysis, PCA), e l'analisi spettrale singolare (Singular Spectrum Analysis, SSA) con la sua estensione multivariata (Multi-Channel Singular Spectrum Analysis, MSSA). Tali metodologie sono state applicate a una serie adeguata di parametri morfometrici al fine di cogliere le diversità e le complessità delle geometrie meandriformi, siano esse naturali oppure generate numericamente (Frascati & Lanzoni, 2009).

3 RISULTATI E CONCLUSIONI

La Figura 2 riporta il confronto tra sei planimetrie di evoluzioni a lungo termine generate numericamente combinando i due differenti approcci per il campo di moto (ZS e IPS) con i tre possibili scenari di erodibilità della piana alluvionale progressivamente modificata dalla formazione di scroll bars e oxbow lakes (casi softening, omogeneo, hardening).

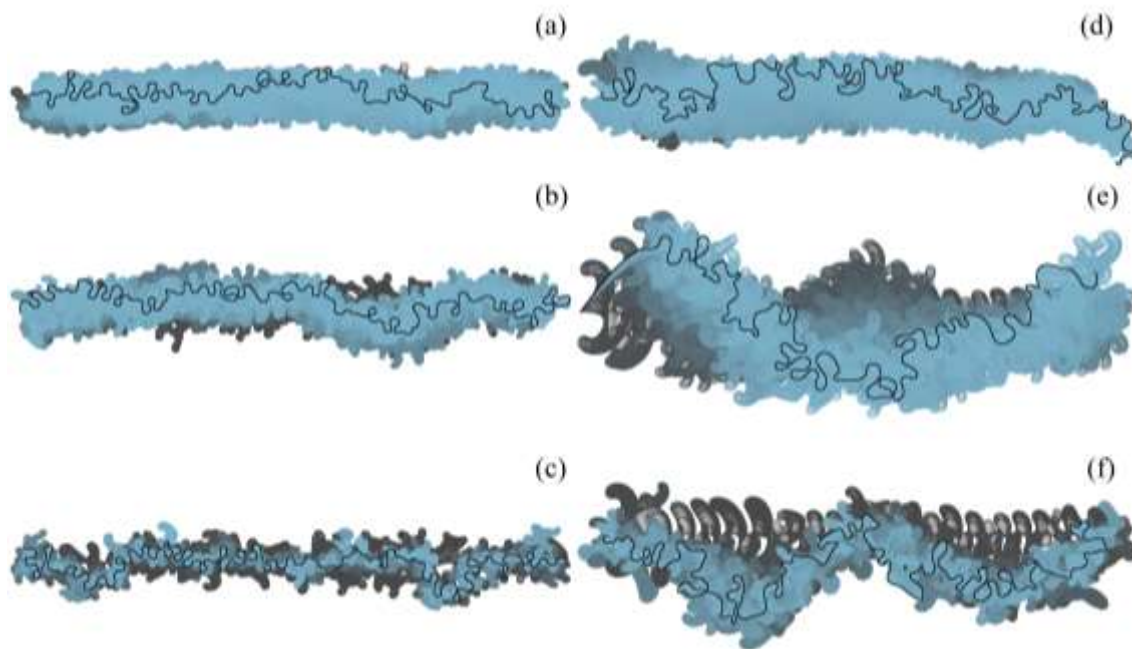


Figura 2. Evoluzioni planimetriche di meandri fluviali risultanti da simulazioni numeriche caratterizzate dal seguente set di seguenti parametri iniziali: $\beta = 20$, $\tau^* = 0.7$, $d_s = 0.01$, fondo piano. La scala cromatica passa dal nero all'azzurro con la progressione temporale delle simulazioni (configurazioni passate scure, configurazioni più recenti chiare). Le combinazioni tra modelli matematici per il campo di moto e configurazioni della piana alluvionale sono: (a) approccio ZS, complessi scroll bars - oxbow lakes più erodibili della piana alluvionale; (b) approccio ZS, piana alluvionale omogenea; (c) approccio ZS, complessi scroll bars - oxbow lakes meno erodibili della piana alluvionale; (d) approccio IPS, complessi scroll bars - oxbow lakes più erodibili della piana alluvionale; (e) approccio IPS, piana alluvionale omogenea; (f) approccio IPS, complessi scroll bars - oxbow lakes meno erodibili della piana alluvionale.

Le metodologie statistiche e spettrali introdotte nella sezione 2 sono state applicate per confrontare i tracciati numerici, simulati considerando opportuni gruppi di parametri iniziali fisicamente ammissibili, con un insieme di tracciati naturali scelti in maniera tale da coprire diverse realtà geografiche e morfologiche.

La Figura 3 riporta alcuni risultati notevoli forniti dalle diverse analisi realizzate. Gli spettri di potenza ottenuti tramite l'analisi di Fourier (FA) e gli spettri dell'analisi spettrale singolare (SSA) applicate alla curvatura locale nei singoli meandri mostrano che i trend più simili ai casi reali sono quelli relativi alla piana alluvionale eterogenea, in particolare il caso hardening. Il caso omogeneo presenta le maggiori differenze. Inoltre, tra i due differenti approcci matematici per il campo di moto, l'approccio ZS fornisce una migliore somiglianza con i fiumi naturali rispetto all'approccio IPS, in particolare per quanto riguarda gli spettri di Fourier. L'analisi delle componenti principali (PCA) del segnale multidimensionale composto da 10 differenti variabili morfometriche (lunghezza dei meandri, asimmetria, sinuosità, etc., cfr. Frascati &

Lanzoni, 2009) permettere di ottenere un segnale trasformato nel dominio degli autovettori della matrice di covarianza, le cui componenti sono linearmente indipendenti. Tale analisi mostra una maggiore vicinanza degli insiemi di punti corrispondenti al caso hardening e ai punti naturali, rispetto agli insiemi relativi agli altri due scenari simulati (omogeneo e softening). In particolare, nell'approccio ZS si ha una parziale sovrapposizione tra i punti del caso hardening e quelli dei fiumi naturali, mentre nell'approccio IPS gli insiemi dei punti corrispondenti alle planimetrie simulate e quelli relativi ai fiumi osservati tendono a distinguersi maggiormente tra loro.

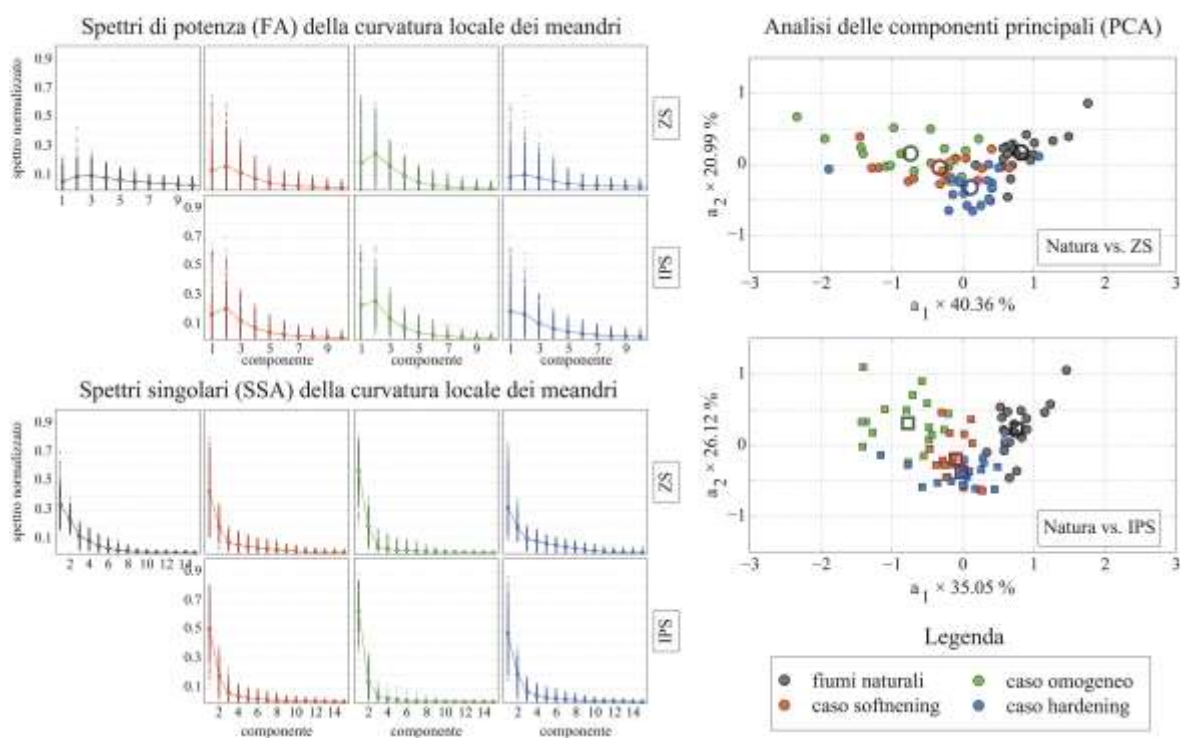


Figura 3. Risultati delle analisi spettrali e delle statistiche multivariate utilizzate per il confronto tra tracciati meandriiformi generati numericamente e le geometrie dei fiumi reali. A sinistra: spettri di potenza normalizzati forniti dalla FA (in alto) e spettri singolari normalizzati forniti dalla SSA (in basso) applicate alla distribuzione spaziale delle curvature locali dei singoli meandri. A destra: scatter plots delle prime due componenti fornite dalla PCA, applicata per il confronto tra le configurazioni planimetriche di fiumi reali e quelle generate numericamente mediante gli approcci ZS (in alto) e IPS (in basso).

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Bogoni, M., Lanzoni, S. & Putti, M., Numerical simulations of floodplain heterogeneity effects on meander migration, American Geophysical Union, Fall Meeting 2014, San Francisco, US, abstract #EP51C-3533
- Camporeale, C., Perona, P., Porporato, A. & Ridolfi, L. On the long-term behavior of meandering rivers, *Water Resources Research*, 2005, 41, 1-13
- Frascati, A. & Lanzoni, S. Morphodynamic regime and long-term evolution of meandering rivers, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2009, 114, 1-12
- Frascati, A. & Lanzoni, S. Long-term river meandering as a part of chaotic dynamics? A contribution from mathematical modelling, *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35, 791-802
- Howard, A.D. Modelling channel evolution and floodplain morphology. *Floodplain Processes*, 1996.
- Ikeda, S., Parker, G. & Sawai, K. Bend theory of river meanders. Part 1. Linear development, *Journal of Fluid Mechanics*, 1981, 112, 363-377.
- Lazarus, E.D. & Constantine, J.A. Generic theory for channel sinuosity, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110, 8447-8452
- Lewin, J. & Ashworth, P.J. The negative relief of large river floodplains, *Earth Science Reviews*, 2014, 129, 1-23
- Rowland, J.C., Lepper, K., Dietrich, W.E., Wilson, C.J. & Sheldon, R., Tie channel sedimentation rates, oxbow formation age and channel migration rate from optically stimulated luminescence (OSL) analysis of floodplain deposits, *Earth Surface Processes and Landforms* (2005), 30, 1161-1179

- Schwenk, J., Lanzoni, S. & Foufoula-Georgiou, E. The life of a meander bend: connecting shape and dynamics via analysis of a numerical model, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2015, 120, 690-710
- Van Rijn, L.C. Sediment transport, parts I, II and III, *Journal of Hydraulic Engineering*, 1984, 110, issues 10-11-12
- Zolezzi, G. & Seminara, G. Downstream and upstream influence in river meandering. Part 1. General theory and application to overdeepening, *Journal of Fluid Mechanics*, 2001, 438, 183-201.