

# *La Dinamica fluviale.*

*La conoscenza del Fiume per la pianificazione e la salvaguardia  
del territorio*

*Atti della Giornata di Studio in memoria del Prof. Paolo Tacconi*

a cura di

Corrado Cencetti e Lucio Di Matteo



A.D. 1308  
**unipg**  
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI  
DI PERUGIA

*Culture Territori Linguaggi – 24*

2023



Culture Territori Linguaggi

CTL 24

Università degli Studi di Perugia  
2023

## Culture Territori Linguaggi

*La Collana non periodica dell'Università degli Studi di Perugia «Culture Territori Linguaggi» (CTL) è costituita da volumi monografici pubblicati sia nel tradizionale formato a stampa, sia in modalità digitale disponibile sul web: una scelta, quest'ultima, concordata dal Comitato Scientifico per garantire ai contenuti la più ampia diffusione possibile e per poterne assicurare, nel contempo, la massima fruibilità.*

*La stessa intitolazione esprime efficacemente la natura e gli intenti della Collana, nella quale trovano spazio i più significativi risultati di studi e ricerche riconducibili ai molteplici e diversificati ambiti disciplinari e competenze dell'Ateneo perugino, o di collaboratori a esso collegati, così da offrire l'opportunità a docenti e ricercatori, nonché ai più meritevoli dottori di ricerca e laureati, di una sede qualificata nella quale pubblicare i frutti originali del proprio lavoro.*

La Collana CTL si avvale di procedura di *peer review* per la presentazione e la pubblicazione di monografie e articoli scientifici (in conformità agli standard stabiliti da Thomson ISI).

La Collana pubblica in lingua italiana, inglese, francese, tedesca e spagnola. I prodotti sono di norma corredati da *abstract* in lingua inglese. Il Direttore della Collana riceve ed esamina la proposta di pubblicazione, richiede il manoscritto all'autore e trasmette la documentazione al referente dell'area di competenza tematica nel Comitato Scientifico. Il referente, dopo aver eliminato dal manoscritto ogni elemento di identificazione dell'autore, provvede a inoltrarlo a due revisori (*double-blind peer review*). I revisori inviano al referente un parere relativo al testo scientifico, così articolato:

- accettabile per la pubblicazione;
- accettabile dopo revisioni secondarie;
- accettabile con revisioni sostanziali e conseguente riattivazione della procedura (in tal caso, i revisori che hanno formulato il primo giudizio saranno chiamati a valutare la conformità degli adeguamenti);
- non accettabile.

Qualora i pareri dei valutatori risultassero contrastanti, il testo sarà inviato a un ulteriore revisore scientifico, non informato delle opinioni espresse in precedenza dai colleghi. Se il giudizio è negativo il lavoro è respinto, altrimenti è ammesso; in tal caso seguirà una delle procedure sopra esposte. La durata totale della procedura varia in funzione della natura delle osservazioni formulate dai revisori scientifici e dalla sollecitudine con cui gli autori apportano le modifiche richieste.

*Comitato scientifico*

Moreno Barboni, Marco Bastianelli, Andrea Bernardelli,  
Giuseppina Bonerba, Paolo Braconi, Alberto Calderini, Donata Castagnoli,  
Manuela Cecconi, Lucio Fiorini, Erminia Irace, Natascia Leonardi,  
Franco Lorenzi, Donato Loscalzo, Francesco Marcattili,  
Giancarlo Marchetti, Massimiliano Marianelli, Riccardo Massarelli,  
Marco Mazzoni, Lorenzo Medici, Laura Meelli, Alessandra Migliorati,  
Marco Milella, Massimiliano Minelli, Francesco Musotti†, Sergio Neri,  
Maria Alessandra Panzanelli Fratoni, Paola Paolucci, Giovanni Pizza,  
Mirko Santanicchia, Massimiliano Tortora

*Direttore*

Fabio Fatichenti

Sotto gli auspici di:



CONSIGLIO NAZIONALE  
DEI GEOLOGI



A.D. 1308  
**unipg**

DIPARTIMENTO  
DI FISICA E GEOLOGIA  
DIPARTIMENTO DI ECCELLENZA  
MUR 2023/2027

Con il patrocinio di:



A.D. 1308  
**unipg**

DIPARTIMENTO  
DI INGEGNERIA  
CIVILE E AMBIENTALE



copyright © 2023

Università degli Studi di Perugia

Collana Culture Territori Linguaggi - [www.ctl.unipg.it](http://www.ctl.unipg.it)



ISBN 9788894469783

Immagine di copertina: Corrado Cencetti.

# *La Dinamica fluviale.*

*La conoscenza del Fiume per la pianificazione e la salvaguardia  
del territorio*

*Atti della Giornata di Studio in memoria del Prof. Paolo Tacconi*

a cura di

Corrado Cencetti e Lucio Di Matteo



A.D. 1308  
**unipg**

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI  
DI PERUGIA



## Indice

<i>Corrado Cencetti</i> - PREFAZIONE	5
<i>Domenico Aringoli, Fabrizio Bendia, Margherita Bufalini, Piero Farabollini, Matteo Gentilucci, Francesco Lampa, Marco Materazzi, Gilberto Pambianchi</i> - IL RUOLO DELLE SERIE TEMPORALI PLUVIOMETRICHE "BREVI" PER LA VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI ALLUVIONE NEL CONTESTO DEI RECENTI CAMBIAMENTI CLIMATICI: ESEMPI DA ALCUNI BACINI CAMPIONE DELLE MARCHE CENTRO-SETTENTRIONALI	7
<i>Vito Azzilonna, Lucia Contillo, Giuseppe Corrado, Giusy Dimola, Dario Gioia, Marcello Schiattarella</i> - EVOLUZIONE FISIOGRAFICA DEL BACINO IMBRIFERO DEL F. BRADANO (BASILICATA E PUGLIA)	13
<i>Corrado Cencetti, Pierluigi De Rosa, Andrea Fredduzzi</i> - GEOMATICA E DINAMICA FLUVIALE	24
<i>Valentina Cerboni, Corrado Cencetti</i> - VALUTAZIONE DELL'INTERRIMENTO DI ALCUNI INVASI COLLINARI NEL TERRITORIO UMBRO	39
<i>Claudia Cherubini, Nicola Pastore, Milena Herus, Antonio Di Scipio, Stella Girolamo, Gioacchino Francesco Andriani, Concetta Immacolata Giasi</i> - BARI CITTÀ SPUGNA: STUDIO DI APPLICABILITÀ DI SOLUZIONI TECNICHE SUDS IN AMBITO URBANO	46
<i>Nadia Cipriani, Silvia Rapicetta</i> - VALUTAZIONE DEL RISCHIO E DELLA PERICOLOSITÀ IDRAULICA NELLA REDAZIONE DELLA CARTA NAZIONALE DELLE AREE POTENZIALMENTE IDONEE (CNAPI) PER LA LOCALIZZAZIONE DEL DEPOSITO NAZIONALE DEI RIFIUTI RADIOATTIVI	53
<i>Francesco Comiti</i> - QUANTO SEDIMENTO TRASPORTA AL FONDO UN TORRENTE, E QUANDO? L'INSOSTITUIBILE NECESSITÀ DEL MONITORAGGIO	56
<i>Massimo Conforti, Luigi Borrelli, Giuseppe Cianflone, Fabio Ietto</i> - ANALISI DELLE CARATTERISTICHE GEOMORFOLOGICHE E DELLE CONDIZIONI DI RISCHIO DELLA FRANA NEL T. STRAFACE NEL COMUNE DI AMENDOLARA (CALABRIA)	60
<i>Valentino Demurtas, Giacomo Deiana, Antonietta Meleddu, Marco Melis, Paolo Emanuele Orrù, Andrea Sulis, Gabriele Uras</i> - ANALISI IDRO-GEOMOR-	

FOLOGICA DI BACINO FINALIZZATA ALLA REDAZIONE DEL PIANO GESTIONE SEDIMENTI DELLA REGIONE SARDEGNA: IL CASO STUDIO DEL RIO GEREMEAS	65
<i>Fabio Guadagnano, Lucio Di Matteo</i> - EVOLUZIONE DELLA FOCE DEL T. BEVANO (RA) IN RELAZIONE ALLA SUBSIDENZA	83
<i>Erica Guidi, Stefano Morelli, Giulio Pappafico</i> - CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICO-GEOMORFOLOGICA DEL CORSO DEL F. METAURO (PU, MARCHE) FINALIZZATA ALLA VALUTAZIONE DEL TRASPORTO SOLIDO	92
<i>Isabella Serena Liso, Piernicola Lollino, Mario Parise</i> - MECCANISMI DI FORMAZIONE DI <i>SINKHOLES</i> NEL TERRITORIO PUGLIESE E MODELLO NUMERICA DEI PROCESSI	97
<i>Paolo Magliulo, Angelo Cusano, Filippo Russo</i> - VARIAZIONI DELLA LARGHEZZA D'ALVEO DEI PRINCIPALI FIUMI DELLA REGIONE CAMPANIA (ITALIA MERIDIONALE) NEGLI ULTIMI 150 ANNI	115
<i>Gian Marco Marmoni, Michele Del Chiaro, Mohammad Moumeni, Reza Nozaem, Francesca Bozzano, Francesco Troiani, Carlo Esposito, Salvatore Martino, Marta Della Seta</i> - RISPOSTA GRAVITATIVA DI VERSANTI IN DEFORMAZIONE GUIDATA DALL'INCISIONE FLUVIALE: CASI STUDIO DALL'ITALIA E DALL'IRAN	126
<i>Endro Martini</i> - STRUMENTI PER UNA GESTIONE INTEGRATA E PARTECIPATA DEGLI SPAZI FLUVIALI: CONTRATTI DI FIUME E DIBATTITO PUBBLICO	129
<i>Stefano Morelli, Roberta Boni, Erica Guidi, Mauro De Donatis, Giulio Pappafico, Mirko Francioni</i> - L'ALLUVIONE DELLE MARCHE DEL 15 SETTEMBRE 2022, CAUSE E CONSEGUENZE	136
<i>Rosalba Muzzillo, Francesco Sdao</i> - DIGHE DA FRANA E PERICOLOSITÀ GEOMORFOLOGICA: CASI DI STUDIO IN BASILICATA	148
<i>Sofia Orteni, Corrado Cencetti, Lucio Di Matteo</i> - UN <i>WORKFLOW</i> PER LA VALUTAZIONE DELLE SOGLIE EMPIRICHE DI GENERAZIONE DEL <i>RUNOFF</i>	157
<i>Simone Palumbo, Diego Di Martire, Luigi Guerriero, Domenico Calcaterra</i> - INDIVIDUAZIONE DI POTENZIALI SBARRAMENTI DA FRANA NEL BACINO DEL F. CALORE LUCANO (CAMPANIA)	173
<i>Massimo Rinaldi</i> - LE APPLICAZIONI DELLA DINAMICA FLUVIALE ALLA GESTIONE DEI CORSI D'ACQUA	192

<i>Nicola Sciarra</i> - STABILITÀ SPONDALE DI UN TRATTO IN FORTE EROSIONE DEL F. VOMANO (TE) CON APPROCCIO ALLE DIFFE- RENZE FINITE	206
<i>Nicola Sutian</i> - DINAMICA D'ALVEO IN RISPOSTA AD EVENTI DI ELE- VATA MAGNITUDO: COMPrensIONE DEI PROCESSI E IMPLI- CAZIONI PER LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO	211



## *Prefazione*

### **CORRADO CENCETTI**

Dipartimento di Fisica e Geologia, Università degli Studi di Perugia

I Fiumi hanno da sempre rappresentato, storicamente, un'importante risorsa per l'Uomo. Tutte le grandi civiltà sono sorte attorno ai Fiumi, considerati fonti di approvvigionamento idrico, a fini idropotabili e agronomici, vie di comunicazione, finanche sorgenti di energia, dai mulini ad acqua alle grandi centrali idroelettriche dei giorni nostri.

Uomo-Fiume: un binomio indissolubile che travalica la fisicità dell'aspetto naturale, fino a farlo diventare un simbolo, un elemento metafisico, religioso: il Fiume Sacro (il Giordano per i Cristiani, il Gange per gli Induisti, il Nilo per gli Egizi...).

Il Fiume ha però le sue esigenze: i processi legati alla morfogenesi fluviale contemplano anche aspetti sgraditi all'Uomo, come le esondazioni e gli alluvionamenti, spesso fonti di immani tragedie. Sembra proprio il comportamento di un Dio (il Fiume Sacro, per l'appunto): benevolo, se rispettato in osservanza alle sue Leggi, ma pronto a colpire se le sue Leggi sono disattese. In realtà, un Fiume che esonda non è un Fiume "cattivo": le inondazioni della sua pianura alluvionale - così chiamata, proprio perché viene creata in seguito ai processi naturali di alluvionamento - fanno parte della sua dinamica, dell'esigenza di smaltire acqua e sedimenti lungo il suo percorso, evitando di concentrarli nei tratti vallivi terminali. È una forma di dissipazione dell'energia, che porta il Fiume a crearsi i propri spazi, quelli che oggi sono definiti come *aree di pertinenza fluviale*, in quanto gestite dal Fiume e che si concretizzano nel moderno concetto di *stream corridor*, inteso come l'area in cui il Fiume, lungo tutto il suo percorso, fa risentire i suoi effetti, in termini sia fisici (geomorfologici, idrologici e idrogeologici) che biotici. Questi ultimi riguardano gli aspetti vegetazionali e quelli delle comunità animali che gravitano sul Fiume e che dipendono strettamente dalla sua presenza.

L'Uomo, storicamente, tanto più fin dalla seconda metà del secolo scorso, ha calpestato le aspettative e le esigenze del Fiume: l'intensa urbanizzazione, che ha interessato soprattutto proprio le pianure alluvionali, e l'attività estrattiva di inerti dall'alveo, perpetrata senza alcun vincolo fino a pochi decenni fa e tuttora spesso praticata, quando camuffata dalle così dette *sistemazioni fluviali*, hanno stravolto la dinamica naturale degli alvei. Tale comportamento da parte dell'Uomo ha prodotto, da una parte, un aumento delle portate idriche, a causa del consumo di suolo e dell'impermeabilizzazione di ampie aree dei loro bacini idrografici, che hanno favorito l'apporto ai fiumi di maggiori volumi di acqua, in maniera anche più rapida rispetto a un tempo; dall'altra ha causato un aumento dei processi di erosione, attraverso i quali il Fiume deve soddisfare la sua "fame" di sedimenti che ne costituiscono il trasporto solido. Se a ciò si

aggiungono gli effetti dei così detti *cambiamenti climatici*, con l'aumento della frequenza di eventi meteorici estremi e parossistici, quali osserviamo negli ultimi decenni di storia, il risultato non può che essere quello sotto gli occhi di tutti: il Fiume ha innescato processi di erosione mai visti prima, che hanno comportato un approfondimento dell'alveo e la concentrazione di enormi volumi di acqua nei tratti terminali, prossimi al mare o alla confluenza con i corsi d'acqua recipienti.

Di tutto ciò si è parlato durante il Convegno - Giornata di Studio sulla Dinamica fluviale, organizzato il 26 maggio 2023 dall'Associazione di Geologia Applicata e Ambientale (AIGA), in collaborazione con il Dipartimento di Fisica e Geologia dell'Università di Perugia e con il Consiglio Nazionale dei Geologi e mirato a ricordare e onorare la figura di Paolo Tacconi, già docente presso l'allora Facoltà di Ingegneria di UniPG e tra i primi, in Italia, a occuparsi di Dinamica fluviale, fin dagli anni '70 del secolo scorso.

Il Convegno è stato strutturato in relazioni a invito - tenute sia da coloro che hanno collaborato con Paolo Tacconi, come suoi allievi, durante oltre trenta anni di attività scientifica, sia da coloro che oggi rappresentano la massima espressione in Italia di ricercatori che si interessano di tali tematiche di ricerca - e in una Sessione poster, dove tutti i partecipanti hanno avuto modo di presentare i risultati più recenti delle proprie ricerche. Il presente volume raccoglie una selezione degli interventi orali e poster che si sono succeduti durante la Giornata di Studio, sotto forma di note brevi o di riassunti, redatti da coloro che hanno acconsentito alla loro pubblicazione.

Un sentito ringraziamento va all'AIGA, per aver promosso l'iniziativa; all'Università di Perugia che ha curato la logistica del Convegno; al Dipartimento di Fisica e Geologia di UniPG e al Consiglio Nazionale dei Geologi che hanno contribuito fattivamente alla buona riuscita dell'evento; a coloro che, insieme con il sottoscritto, ne hanno curato l'organizzazione e che desidero ricordare nominalmente, nelle persone del collega Lucio Di Matteo e dei nostri collaboratori Valentina Cerboni, Fabio Guadagnano e Sofia Ortenzi; a tutti coloro i quali, con la loro partecipazione, hanno reso questa giornata eccezionalmente interessante, per la grande attualità che (putroppo!) rivestono i temi trattati: ricordo che proprio nei giorni immediatamente precedenti il Convegno si era appena verificato in Emilia Romagna un evento alluvionale di portata storica, che rimarrà scolpito nella nostra memoria, ultimo di una serie interminabile di tragedie causate dalla scarsa attenzione dell'Uomo nella gestione e nella salvaguardia del territorio. Infine, un particolare e personale ringraziamento al Prof. Fabio Fatichenti, Direttore della Collana scientifica dell'Università di Perugia "Culture Territori Linguaggi", per aver permesso che di questo evento rimanesse traccia, a futura memoria.

Perugia, settembre 2023

*Corrado Cencetti*

*“La Dinamica fluviale. La conoscenza del Fiume per la pianificazione e la salvaguardia del territorio”*

a cura di C. Cencetti, L. Di Matteo

*Culture Territori Linguaggi*, 24, 2023, pp. 7-12

ISBN 9788894469783

Domenico ARINGOLI<sup>1</sup>, Fabrizio BENDIA<sup>1</sup>, Margherita BUFALINI<sup>1</sup>,  
Piero FARABOLLINI<sup>1</sup>, Matteo GENTILUCCI<sup>1</sup>, Francesco LAMPA<sup>1</sup>,  
Marco MATERAZZI<sup>1</sup>, Gilberto PAMBIANCHI<sup>1</sup>

IL RUOLO DELLE SERIE TEMPORALI PLUVIOMETRICHE “BREVI”  
PER LA VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI ALLUVIONE  
NEL CONTESTO DEI RECENTI CAMBIAMENTI CLIMATICI:  
ESEMPI DA ALCUNI BACINI CAMPIONE DELLE MARCHE  
CENTRO-SETTENTRIONALI

**Introduzione.** – I modelli numerici idrologici sono sempre più uno strumento fondamentale per l’analisi dei fenomeni di esondazione in un bacino fluviale. Se utilizzati a scopo predittivo, la scelta della “pioggia di progetto” da applicare, una volta fissate altre variabili (la geometria del bacino, l’uso del suolo, ecc.), diventa cruciale.

Tutti i metodi statistici attualmente adottati per il calcolo della pioggia di progetto suggeriscono l’utilizzo di serie pluviometriche lunghe (almeno 40-50 anni). D’altra parte, la frequenza sempre più elevata di eventi intensi (piogge e alluvioni) negli ultimi anni, anche a seguito dei cambiamenti climatici in atto, testimonia la necessità di un’analisi critica della significatività statistica di questi metodi.

Il presente lavoro, applicando la distribuzione di Gumbel (distribuzione generalizzata dei valori estremi - GEV) su due serie pluviometriche, una di 70 anni (1951-2021) e l’altra di 30 anni (1998-2021), registrate dagli stessi pluviometri e il “Metodo Chicago” per il calcolo della pioggia di progetto, mette in evidenza come la scelta della serie influisca sulla previsione dei potenziali eventi alluvionali.

---

<sup>1</sup> *Scuola di Scienze e Tecnologie, Sezione Geologia, Università di Camerino, Camerino (MC)*, margherita.bufalini@unicam.it

### **Metodologia.**

a) Modello Meteorologico. La modellazione idrologica richiede la definizione di tempeste di progetto o ietogrammi delle precipitazioni.

Il presente studio calcola la pioggia di progetto seguendo il “Metodo Razionale Standard” (Fig. 1a). Questo metodo stabilisce due diverse equazioni analitiche per l'intensità delle precipitazioni nel tempo, una valida prima e l'altra valida dopo il picco. Entrambi derivano da un'espressione analitica di altezza-durata-frequenza (ADF) che conserva gli stessi volumi di tutte le intensità di pioggia (Fig. 1b).

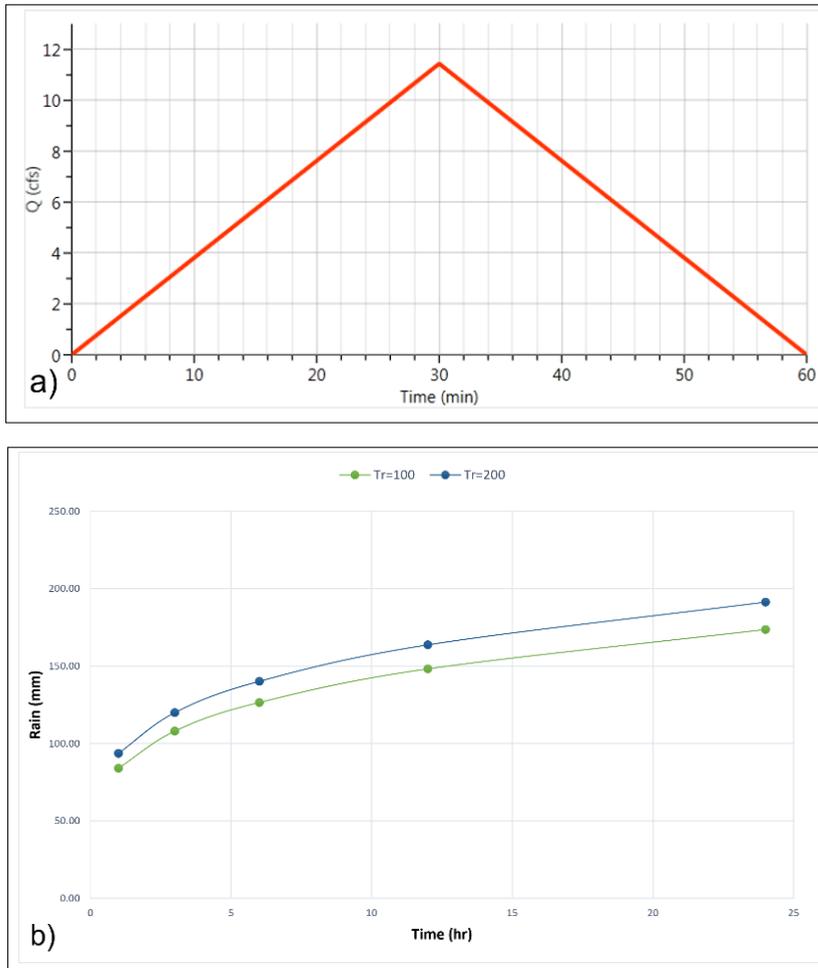


Fig. 1 - a) Pioggia di progetto seguendo il “Metodo Razionale Standard”; b) Curve di Altezza-Durata-Frequenza.

Successivamente, per ogni pluviometro (Tab. 1) sono stati raccolti i valori di massima piovosità registrati ogni anno per durate di 1, 3, 6, 12 e 24 ore per stimare le piogge di progetto. La valutazione di un andamento positivo o negativo dei dati pluviometrici e la loro significatività statistica è stata testata con il metodo non parametrico di Mann-Kendall-Sen.

Partendo dalla Curva ADF dei pluviometri, sono state simulate diverse piogge di progetto sia per tempi di ritorno di 100 e 200 anni che per ogni serie temporale (1950-2018/2021; 1998-2018/2021).

Rain Gauge	Old Gauge ID	New Gauge ID	Zone	latitude (m)*	longitude (m)*	Elevation (m a.s.l.)*
Macerata	RM-2023	suppressed	C	2394389	4795201	280
Tolentino	RM-2038	RT-2837	C	2380482	4785380	244
Macerata	RM-2039	RT-2742	C	2391814	4793706	232
Jesi	RM-2063	RT-1213	C	2378238	4820428	96
Maiolati Spontini	RM-2067	RT-3021	C	2368749	4817949	110
Ancona	RM-2099	RT-2944	C	2395140	4829598	6
Senigallia	RM-2105	RT-2736	C	2376352	4841364	5
Osimo	RM-2148	RT-2690	C	2397421	4815699	265
Recanati	RM-2165	RT-1321	C	2402028	4806729	235
Fabriano	RM-2068	RT-2739	M	2350190	4800177	357
Arcevia	RM-2143	RT-1295	M	2353319	4818252	535
Corinaldo	RM-2144	RT-2964	M	2362356	4834672	203
Cingoli	RM-2149	RT-2837	M	2375411	4803758	631
Camerino	RM-2167	RT-1332	M	2362874	4777647	664
Serravalle di Chienti	RM-2047	RT-2843	H	2353490	4771078	647
Sasoferrato	RM-2073	RT-2992	H	2346666	4811257	312
Cantiano	RM-2124	RT-2972	H	2328006	4815746	360
Pioraco	RM-2157	RT-2988	H	2356279	4782617	441

Tab. 1 - *Pluviometri presi in considerazione per lo studio.*

*b) Modello di Bacino.* Il modello di bacino è stato sviluppato secondo i seguenti steps:

- suddivisione del bacino in sottobacini con il software *Hec-GeoHMS* (sviluppato dall'*United States Army Corps of Engineers*);
- elaborazione della mappa della distribuzione del *Curve Number* (Fig. 3), basata sulla metodologia SCS e ottenuta combinando la mappa *CORINE Land Cover* con la mappa dei suoli (Fig. 2);
- esportazione del modello di bacino nel software *Hec-HMS*.

**Risultati preliminari.** – Le curve ADF di 18 pluviometri uniformemente distribuiti nell'area di studio (Fig. 4), calcolate utilizzando una serie di precipitazioni recenti (1998-2018 e 1998-2021), mostrano altezze di precipitazione in generale superiori rispetto alle curve derivate dalle serie di precipitazioni più lunghe (1950 -2018 e 1950-2021) per i tempi di ritorno considerati (100 anni e 200 anni).

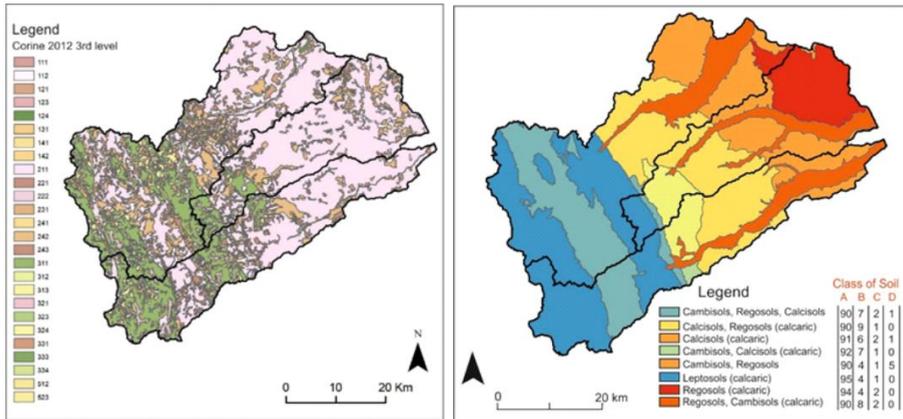


Fig. 2 - *Mapa del CORINE Land Cover e Mapa dei Suoli.*

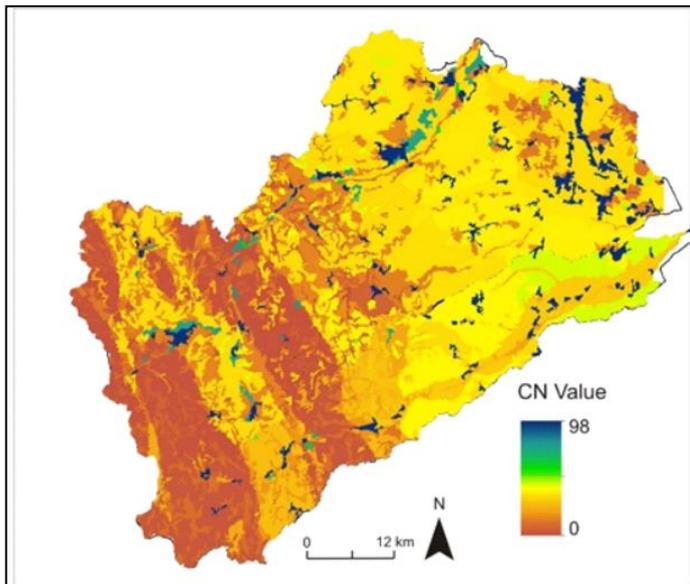


Fig. 3 - *Mapa del Curve Number (CN) per l'area di studio.*

Il modello idrologico sviluppato per l'area di studio dimostra come le portate ottenute utilizzando le serie pluviometriche brevi siano generalmente superiori rispetto ai valori di portata derivati dalle serie pluviometriche più lunghe; in molti casi il primo supera di oltre il 30% il secondo. Si può inoltre notare che i sottobacini caratterizzati da variazioni di portata positive (Fig. 5) sono localizzati prevalentemente nel settore meridionale e orientale dell'area di studio.

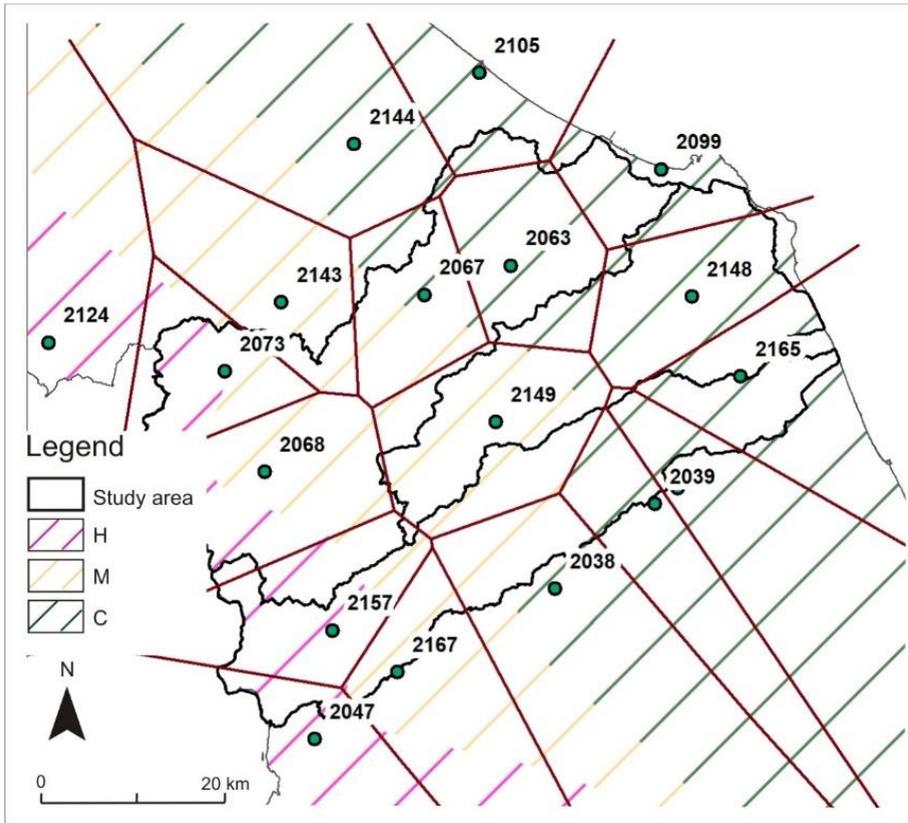


Fig. 4 - Distribuzione dei pluviometri nell'area di studio.

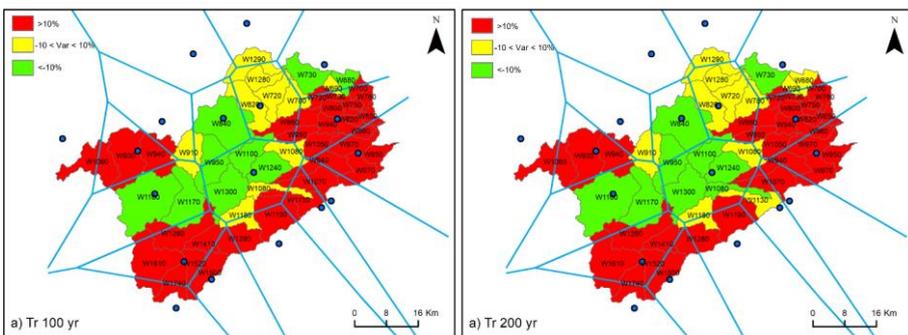


Fig. 5 - Variazioni percentuali della serie 1998-2018 rispetto alla serie 1950-2018 per due diversi tempi di ritorno.

I risultati ottenuti dal presente studio, seppur preliminari e limitati a un settore ristretto

dell'Italia centrale, mostrano chiaramente come il cambiamento climatico in corso sia associato a un cambiamento del regime delle precipitazioni, virando verso un aumento dell'intensità delle precipitazioni e della frequenza degli eventi estremi.

*The role of "short" rainfall time series for the assessment of flood hazard in the context of recent climate change: examples from some sample basins of central-northern Marche.*

Numerical hydrological models are increasingly a fundamental tool for the analysis of floods in river basin. If used for predictive purposes, the choice of the "project rainfall" to apply, when other variables have been fixed (such as the geometry of the basin, land use, etc.), becomes fundamental. All the statistical methods currently adopted for calculating the project rainfall suggest the use of long rainfall series (at least 40-50 years). On the other hand, the increasingly high frequency of intense events (rains and floods) in recent years, also as a result of the climate changes underway, testifies to the need for a critical analysis of the statistical significance of these methods. The present study, applying the Gumbel distribution (generalized distribution of extreme values - GEV) on two rainfall series, one of 70 years (1951-2021) and the other of 30 years (1998-2021), coming from the same rain gauges and the "Chicago Method" for calculating the project rainfall, highlights how the choice of the series can influence the formation of flood events. The results obtained from the present study, albeit preliminary and limited to a small sector of central Italy, clearly show how the ongoing climate change is associated with a change in the rainfall regime, veering towards an increase in the intensity of rainfall and the frequency of extreme events.

*Keywords* - rainfall time series, flood hazard, climate change, central-northern Marche.

*“La Dinamica fluviale. La conoscenza del Fiume per la pianificazione e la salvaguardia del territorio”*

a cura di C. Cencetti, L. Di Matteo

*Culture Territori Linguaggi*, 24, 2023, pp. 13-23

ISBN 9788894469783

Vito AZZILONNA<sup>1</sup>, Lucia CONTILLO<sup>1</sup>, Giuseppe CORRADO<sup>1</sup>, Giusy DIMOLA<sup>1</sup>,  
Dario GIOIA<sup>2</sup>, Marcello SCHIATTARELLA<sup>1</sup>

## EVOLUZIONE FISIOGRAFICA DEL BACINO IDROGRAFICO DEL F. BRADANO (BASILICATA E PUGLIA)

**Introduzione.** – La configurazione planimetrica del reticolo idrografico costituisce un importante indicatore morfostrutturale nelle regioni tettonicamente attive (Beneduce et al., 2004). Anche la forma e le modificazioni dello spartiacque di un bacino idrografico, tuttavia, rappresentano importanti elementi di conoscenza della storia di aree con strutture tettoniche meno evidenti rispetto a quelle di catene orogeniche giovani. Molti settori di avanfossa, ad esempio, risultano apparentemente poveri di informazioni circa il comportamento deformativo quaternario, rendendo più difficile la comparazione quantitativa delle velocità dei processi. In tali aree, i bacini idrografici rappresentano importanti fonti di dati sul sollevamento tettonico e sull'evoluzione geomorfologica a scala regionale, come nel caso della Fossa Bradanica, avanfossa del sistema orogenico dell'Appennino meridionale, attraversata da cinque principali corsi d'acqua a recapito ionico.

La Fossa Bradanica è stata ampiamente studiata dal punto di vista stratigrafico e del significato geodinamico (Balduzzi et al., 1982; Corrado et al., 2017, tra gli altri), meno da quello dell'evoluzione geomorfologica. L'evoluzione del paesaggio quaternario è stata in ogni caso guidata dal sollevamento tettonico più o meno continuo che ha portato, inoltre, alla formazione di un'estesa gradinata di terrazzi marini (Caputo et al., 2010; Corrado et al., 2022, tra gli altri).

---

<sup>1</sup> Dipartimento delle Culture Europee e del Mediterraneo (DiCEM), Università degli Studi della Basilicata, Matera, lucia.contillo@unibas.it

<sup>2</sup> Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale (ISPC-CNR), Tito Scalo (PZ)

Lo scopo di questo lavoro è quello di delineare l'evoluzione fisiografica del bacino più settentrionale dell'avanfossa - il bacino del F. Bradano (Fig. 1) - in termini di modificazioni del suo perimetro e della geometria della rete fluviale innescate dai cambiamenti del livello di base dell'erosione.

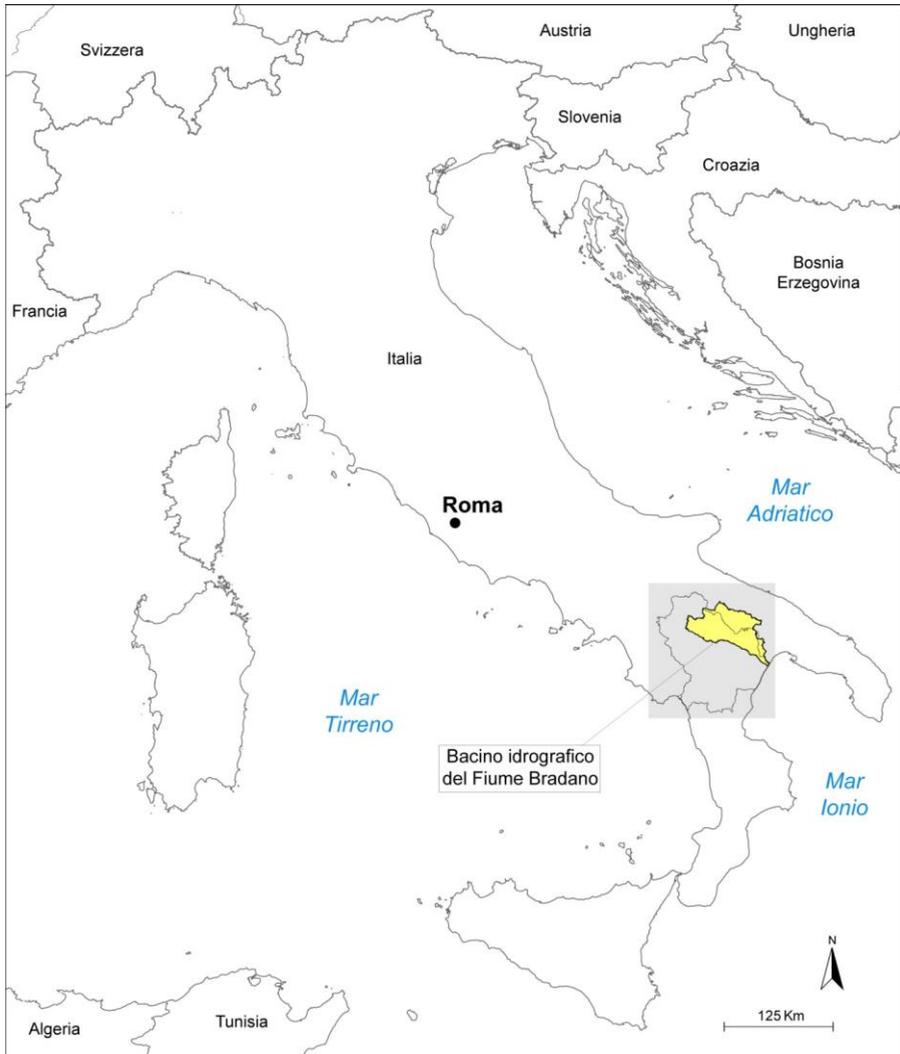


Fig. 1 - Ubicazione del bacino del F. Bradano.

Diffuse sono le paleosuperfici di natura erosiva che si rinvencono sulla sommità dei rilievi o a quote medio-basse nell'intera area di studio. Anche i terrazzi marini e fluviali sono ampia-

mente rappresentati. Per disposizione ed età, tutte queste superfici rappresentano una chiave per ricostruire le antiche configurazioni del bacino idrografico.

Il bacino idrografico del F. Bradano è incluso per la maggior parte nel dominio di avanfossa a cui, peraltro, dà il nome. Solo il suo settore SO ricade nella fascia orogenica appenninica, costituendo il fronte della catena. La relativa omogeneità del bacino idrografico, sia dal punto di vista litologico che morfologico, costituisce un elemento di semplificazione nel tentativo di delinearne le tappe evolutive in termini di modificazione del suo perimetro e della rete fluviale in un quadro cronologico sufficientemente preciso.

***Inquadramento regionale dell'area di studio.*** – Il bacino di avanfossa, con orientazione NO-SE, è situato tra la catena appenninica e la piattaforma carbonatica dell'avampaese apulo (Fig. 2).

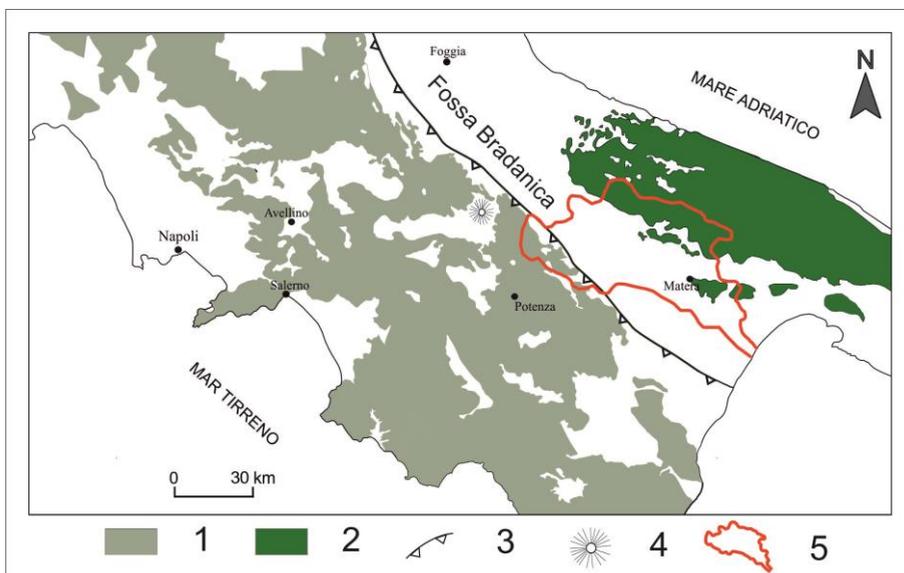


Fig. 2 - Schema tettonico dell'Appennino campano-lucano e del suo dominio di avampaese. Legenda: 1. Unità della catena appenninica; 2. Unità della piattaforma apula; 3. Fronte di sovrascorrimento della catena; 4. Vulcano del M. Vulture; 5. Perimetro del bacino idrografico del F. Bradano.

Il fronte orientale del segmento lucano della catena appenninica è costituito da successioni argillose, arenacee e marnoso-calcaree prevalentemente cenozoiche, organizzate in unità tettoniche con vergenza adriatica (Patacca e Scandone, 2007, e bibliografia contenuta). Questo segmento di catena caratterizza la porzione più occidentale del bacino idrografico del Brada-

no. La restante porzione del bacino studiato ricade nel dominio della Fossa Bradanica, mentre parte della sua sinistra orografica (il versante NE) è modellata nei calcari mesozoici della piattaforma carbonatica apula (Fig. 2).

Le variazioni stratigrafiche verticali e laterali delle unità di avanfossa sono dovute al comportamento dinamico del sistema catena-avampaese durante il Pliocene e il Pleistocene. La piattaforma apula risulta segmentata da faglie trasversali che hanno permesso un arretramento differenziale, responsabile della risalita del magma del vulcano del M. Vulture (Schiattarella et al., 2005). Sono stati riconosciuti affioramenti dei prodotti medio-pleistocenici del Vulture nel bacino lacustre-alluvionale di Venosa, adiacente all'edificio vulcanico e in parte compreso nell'area di studio, e nel settore più meridionale del bacino di avanfossa (Corrado et al., 2017). Il bacino di avanfossa è costituito da depositi plio-pleistocenici di diversi km di spessore (Balduzzi et al., 1982; Tropeano et al., 2002). La parte inferiore della sequenza è costituita da sedimenti torbiditici del Pliocene medio, mentre la parte superiore – che copre l'intervallo temporale che va dal Pliocene superiore al Pleistocene inferiore – è formata da depositi argillosi di diverse centinaia di metri di spessore (*Argille subappennine*) che passano verso l'alto a sabbie regressive (*Sabbie di Monte Marano*) e conglomerati (*Conglomerati di Irsina*), con facies delizive, di spiaggia e alluvionali (Ricchetti, 1967).

L'area di studio è in gran parte caratterizzata da forme di tipo *mesa*, modellate dai corsi d'acqua in una successione argilloso-sabbiosa sovrastata da conglomerati o localmente da calcareniti che ne costituiscono il *caprock* (Fig. 3). Beneduce et al. (2004), sulla base dell'analisi di un letto di 50 cm di spessore di piroclastiti rimaneggiate incluse nella parte superiore di un deposito di terrazzo fluviale, affiorante a circa 10 km a SO di Matera, ipotizzano che il processo di incisione della rete fluviale nei dintorni dell'abitato, non lontano dall'area di studio, sia iniziato in età medio-pleistocenica. I minerali vulcanici presenti nella componente clastica di questo strato includono sanidino, clinopirosseno e flogopite, suggerendo che l'insieme dei minerali vulcanici sia stato fornito dallo smantellamento erosivo della parte inferiore della successione vulcanica del M. Vulture (Giannandrea et al., 2006).

Verso SE, le argille marine dell'avanfossa sono sormontate da una successione regressiva di silt, sabbia e conglomerati del Pleistocene medio-superiore, che costituisce i cunei deposizionali costieri della gradinata di terrazzi marini che digradano verso il Mar Ionio.

A partire dal Pleistocene medio, infatti, l'interazione tra il sollevamento tettonico e le variazioni eustatiche del livello del mare ha favorito lo sviluppo di diversi ordini di terrazzi marini (Caputo et al., 2010; Corrado et al., 2022). La sommità del cuneo costiero più giovane e più basso rappresenta l'attuale piana costiera di Metaponto (Cilumbriello et al., 2010; Tropeano et al., 2013; Corrado et al., 2022). Qui, il substrato argilloso marino e i depositi terrazzati sono coperti dai depositi continentali e di transizione più recenti, del tardo Pleistocene -

Olocene, come si evince da dati di perforazione (Corrado et al., 2022).

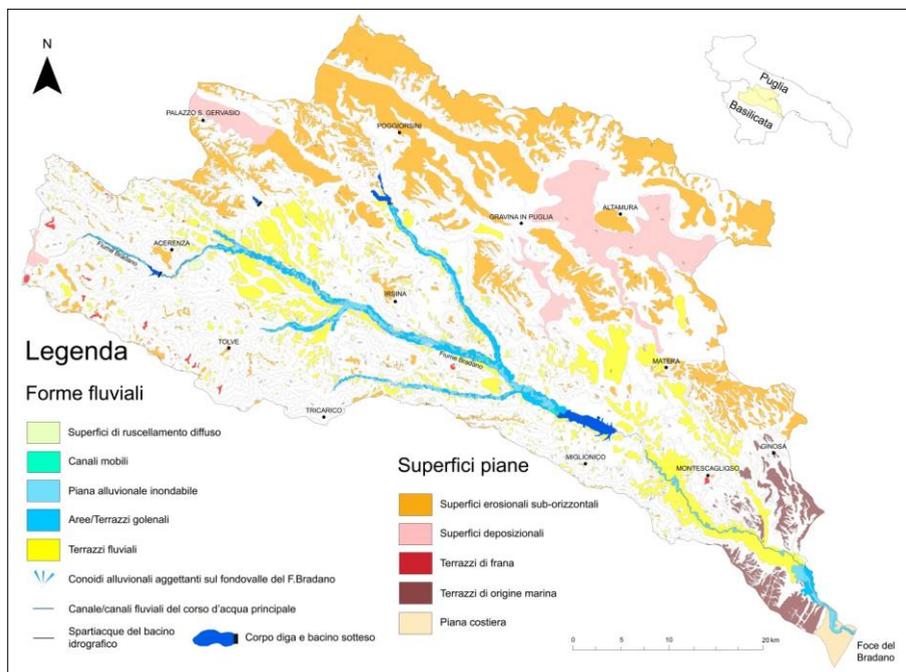


Fig. 3 - Carta della distribuzione delle superfici piane del bacino idrografico del F. Bradano e della suddivisione morfologica delle principali pianure alluvionali.

Il bacino del Bradano, oggetto di questo studio, è collocato per gran parte nel settore orientale della Basilicata e ricade per una porzione minore all'interno del territorio pugliese (Fig. 1). Confina con i bacini del F. Ofanto a NO, del F. Basento a S, mentre a NE è delimitato dalla porzione dell'altopiano della Murgia, non incorporata nell'area drenata (Fig. 2). Dal punto di vista geomorfologico, l'area di studio è caratterizzata dalle forme tipiche del fronte della catena (dorsali allungate in direzione NO-SE e modellate in rocce tenere), della Fossa Bradanica (*mesas* con versanti in gran parte interessati da calanchi) e dell'avampaese apulo (morfostrutture carbonatiche tabulari localmente caratterizzate da profonde forme forratiche).

**Presentazione e discussione dei dati.** – L'utilizzo di Modelli Digitali di Elevazione ad alta risoluzione (5 m, <https://rsdi.regione.basilicata.it/>), l'analisi di foto aeree e mirati rilievi sul campo hanno permesso di individuare numerosi lembi di superfici piane interpretate come relitti morfologici di antichi livelli di base dell'erosione e classificate mediante analisi altimetriche effettuate in ambiente GIS. Tali elementi del paesaggio fisico sono stati utilizzati per rico-

struire l'evoluzione fisiografica del bacino idrografico indagato. In particolare, le fasi morfoevolutive del bacino idrografico del F. Bradano sono state definite sulla base dei diversi ordini di superfici sub-orizzontali di genesi fluviale a quote medio-basse (terrazzi di tipo *fill* e *strath*) e di quelli individuati a quote più elevate (ovvero paleosuperfici generate in archi di tempo riferibili ad altri e più antichi livelli di base). Per la definizione dei punti di *outlet* relativi agli stadi morfoevolutivi ipotizzati si è fatto riferimento alle diverse età dei terrazzi marini. Sono state inoltre cartografate le superfici strutturali (coincidenti con i *top* deposizionali del ciclo regressivo della Fossa Bradanica) e i terrazzi di frana (ossia le superfici sub-orizzontali o in leggera contropendenza presenti all'interno di corpi di frana di dimensioni significative). I dati della letteratura scientifica (Beneduce et al., 2004; Corrado et al., 2017; Caputo et al., 2010; Tropeano et al., 2013; Petrosino et al., 2015) hanno contribuito nella definizione dei vincoli cronologici delle fasi evolutive.

Le forme strutturali dominano il paesaggio fisico dell'area del bacino del F. Bradano. È possibile osservare la presenza di strutture monoclinali nel settore occidentale (coincidenti con il fronte della catena), rilievi tabulari caratterizzati da stratificazione orizzontale e superfici sommitali piane, talvolta modellati da processi di morfoselezione che determinano forme di tipo *mesa* (nella maggior parte del bacino compreso nel settore di avanfossa), e incisioni fluviali profonde caratterizzate da versanti sub-verticali (forre) nei carbonati dell'avampaese (Murge), con superfici piane interessate da processi fluvio-carsici alla sommità degli alti morfostutturali (Fig. 3).

Processi erosivi rapidi e intensi hanno interessato le diverse formazioni geologiche affioranti nel bacino. Le superfici di ruscellamento non incanalato (su cui la copertura vegetale non è significativamente presente) sono sparse nel bacino in piccoli lembi. Forme di erosione accelerata e/o calanchi sono molto diffusi laddove la litologia argilloso-sabbiosa e le limitate precipitazioni annue favoriscono tali processi (e cioè in un ampio settore dell'area di studio caratterizzato dalla presenza della formazione delle Argille subappennine).

Il corso d'acqua principale presenta un pattern per lo più meandriforme: nel tratto centrale sono rinvenibili canali mobili, con barre longitudinali di sedimenti grossolani. I fondovalle principali sono occupati da piane alluvionali (come nel caso della Fiumara di Tolve e dei torrenti Bilioso e Basentello, oltre al F. Bradano) articolate in canali attivi, aree inondabili e aree o terrazzi golenali. Ai lati delle piane alluvionali, direttamente aggettanti sul fondovalle e soprattutto nella sezione centrale del bacino, sono presenti anche conoidi alluvionali.

Le superfici piane possono essere classificate come segue (Fig. 3): i) superfici sub-orizzontali a quote medio-basse dovute a processi fluviali (in prevalenza terrazzi di tipo *strath* o *fill-strath*, e *fill* nella parte bassa del bacino); ii) quelle identificate a quote più elevate come "paleosuperfici" (erosionali) o superfici strutturali (ad esempio, le sommità deposizionali del

ciclo regressivo del settore di avanfossa); iii) terrazzi marini presenti nella porzione SE dell'area di studio; iv) terrazzi di frana. Tale classificazione ha consentito di determinare gli antichi livelli di base dell'erosione dovuta all'interazione tra tettonica e variazioni glacio-eustatiche del livello del mare, utilizzati per stimare la percentuale di area dei paleo-bacini del Bradano nelle diverse fasi evolutive.

Lavori precedenti hanno permesso di fissare l'età della genesi e del successivo sviluppo delle paleo-reti fluviali nell'area di avanfossa al Pleistocene medio (Beneduce et al., 2004; Corrado et al., 2017). A partire da tale età, le principali tappe morfoevolutive sono state ricostruite sulla base delle correlazioni tra paleosuperfici, terrazzi fluviali e terrazzi marini. Sono stati in tal modo identificati tre stadi morfoevolutivi (Fig. 4).

Il primo livello di base coincide con la paleolinea di costa corrispondente al bordo interno del terrazzo marino di circa 300 ka. Pertanto, in questo lavoro non viene presa in considerazione la configurazione più antica del bacino idrografico, risalente ad una fase morfoevolutiva attestabile a circa 700-600 ka, quando la paleo-Fiumara di Venosa ancora drenava verso il F. Bradano, prima dei fenomeni di cattura fluviale esercitati dal sistema fluviale dell'Ofanto.

Nel primo stadio qui proposto (Fig. 4), l'area del bacino ammontava a circa 1050 km<sup>2</sup> (il 34,8% dell'area attuale). Poiché i corsi d'acqua minori, nel corso del tempo, hanno intagliato ed eroso i terrazzi fluviali, molte superfici terrazzate si presentano frammentate, seppur agevolmente raccordabili in molti casi. La disposizione a ventaglio delle superfici terrazzate della porzione medio-superiore del bacino (Fig. 3) ha permesso di individuare lo spartiacque nella parte a monte del paleobacino, mentre le paleosuperfici attestate intorno ai 400-500 m s.l.m. e la paleolinea di costa più antica hanno permesso di delimitarne l'intero perimetro e il punto di *outlet*.

La seconda fase culmina nel livello di base risalente a 125 ka (Pleistocene superiore, debutto del Tirreniano), determinato dalla paleolinea di costa corrispondente al bordo interno del terrazzo marino del MIS 5.5 (Gioia et al., 2020). Durante l'intero stadio (da 300 a 125 ka), l'area del bacino (circa 2320 km<sup>2</sup>, cioè il 76,8% dell'area attuale) conquistava la maggior parte della superficie di drenaggio rispetto all'intera area (più del 40% in questo arco di tempo), compreso il sistema forratico della Gravina di Matera (Fig. 4). Il bacino si espande a NE fino al bordo dell'avampaese apulo, mentre a SO il limite coincide con l'attuale spartiacque.

Il bacino del F. Bradano raggiunge l'estensione massima di 3018,78 km<sup>2</sup> nel terzo stadio, espandendosi verso NE a comprendere parte dell'avampaese murgiano e fino alla foce attuale durante il Pleistocene superiore – Olocene (Fig. 4).

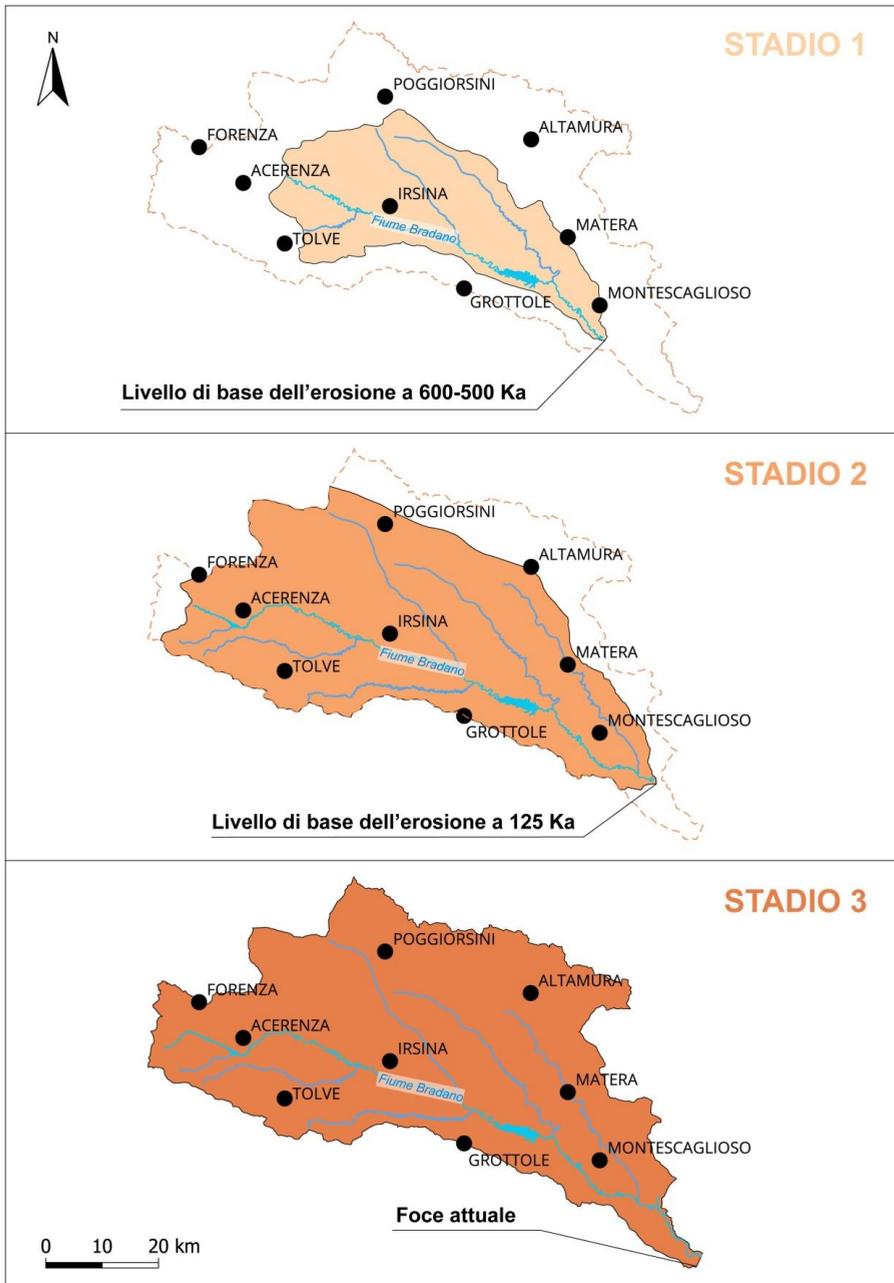


Fig. 4 - Stadi dell'evoluzione fisiografica del bacino idrografico del F. Bradano (approfondimento nel testo). Il pattern idrografico riportato nella sketch map rappresenta solo un elemento di riferimento geografico.

La storia fisiografica del bacino suggerisce che l'erosione fluviale regressiva ha rappresentato la modalità principale di smantellamento erosivo e di morfoevoluzione dell'area. Durante l'Olocene, a causa delle mutate condizioni climatiche (post-glaciali), all'erosione lineare fluviale si sono aggiunti processi di tipo gravitativo (frane e soliflusso) e di erosione accelerata (calanchi) che rappresentano l'elemento evolutivo più recente del quadro fisico. Fenomeni di ruscellamento diffuso sono stati individuati soprattutto nella zona centro-orientale dell'area di studio (sui versanti del settore di avanfossa), insieme a solchi effimeri e *gullies*. Valli minori incise e a fondo piatto sono ampiamente diffuse lungo tutto il bacino idrografico. Talvolta, le valli a fondo piatto sono reincise, con conoidi alluvionali o frane al piede dei relativi versanti.

**Conclusioni.** – L'età delle superfici terrazzate e la posizione delle antiche linee di costa hanno consentito un'adeguata ricostruzione della storia morfoevolutiva del bacino del F. Bradano dal punto di vista fisiografico/planimetrico. La storia del bacino è iniziata nel Pleistocene medio, con una importante fase di sviluppo tra il Pleistocene medio e il Pleistocene superiore. Il progressivo ampliamento del bacino idrografico è stato codificato in questo lavoro in tre fasi evolutive, dovute principalmente a processi fluviali innescati da variazioni del livello di base. È possibile affermare che l'evoluzione del perimetro del bacino e della rete fluviale si inquadrano in uno scenario di erosione regressiva, con un progressivo allargamento verso O e NE della porzione a monte e relativi fenomeni di cattura fluviale. Nel Post-glaciale, movimenti gravitativi e fenomeni di erosione accelerata hanno costituito i principali meccanismi di evoluzione morfologica dei versanti, talvolta interferendo con la dinamica dei reticoli fluviali minori.

#### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- BALDUZZI A., CASNEDI R., CRESCENTI U., MOSTARDINI F., TONNA M., "Il Plio-Pleistocene del sottosuolo del Bacino Lucano (Avanfossa Appenninica)", *Geologica Romana*, 1982, 21, pp. 89-111.
- BENEDUCE P., FESTA V., FRANCIOSO R., SCHIATTARELLA M., TROPEANO M., "Conflicting drainage patterns in the Matera Horst Area, southern Italy", *Physics and Chemistry of the Earth*, 2004, 29, pp. 717-724.
- CAPUTO R., BIANCA M., "Ionian marine terraces of Southern Italy: Insights into the Quaternary tectonic evolution of the area", *Tectonics*, 2010, 29, pp. 1-24.
- CILUMBRIELLO A., SABATO L., TROPEANO M., GALLICCHIO S., GRIPPA A., MAIORANO P., MATEU-VICENS G., ROSSI C.A., SPILOTRO G., CALCAGNILE L., QUARTA G., "Sedimentology, stratigraphic architecture and preliminary hydrostratigraphy of the Metaponto coastal-plain subsurface (Southern Italy)", In: *Proceedings of the National Workshop*

- “Multidisciplinary approach for porous aquifer characterization”, Bersezio R., Amanti M., (Eds). Mem. Descr. della Carta Geol. d'It., 2010, 90, pp. 67-84.
- CORRADO G., AIELLO G., BARRA D., DI LEO P., GIOIA D., MINERVINO AMODIO A., PARISI R., SCHIATTARELLA M., “Late Quaternary evolution of the Metaponto coastal plain, southern Italy, inferred from geomorphological and borehole data”, *Quat. Intern.*, 2022, 638-639, pp. 84-110.
- CORRADO G., DI LEO P., GIANNANDREA P., SCHIATTARELLA M., “Constraints on the dispersal of Mt. Vulture pyroclastic products: implications to mid-Pleistocene climate conditions in the foredeep domain of southern Italy”, *Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement*, 2017, 23 (2), pp. 171-182.
- GIANNANDREA P., LA VOLPE L., PRINCIPE C., SCHIATTARELLA M., “Unità stratigrafiche a limiti inconformi e storia evolutiva del vulcano medio-pleistocenico di Monte Vulture (Appennino meridionale, Italia)”, *Boll. Soc. Geol. It.*, 2006, 125, pp. 67-92.
- GIOIA D., BAVUSI M., DI LEO P., GIAMMATTEO T., SCHIATTARELLA M., “Geo-archaeology and geomorphology of the Metaponto area, Ionian coastal belt, Italy”, *Jour. of Maps*, 2020, 16 (2), pp. 117-125 (Map available online at: <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1701575>).
- PATACCA E., SCANDONE P., “Geology of the Southern Apennines”, *Boll. Soc. Geol. It., Special Issue*, 2007, 7, pp. 75-119.
- PETROSINO P., JICHA B.R., MAZZEO F.C., CIARANFI N., GIRONE A., MAIORANO P., MARINO M., “The Montalbano Jonico marine succession: an archive for distal tephra layers at the Early-Middle Pleistocene boundary in southern Italy”, *Quat. Intern.*, 2015, 383, pp. 89-103.
- RICCHETTI G., “Lineamenti geologici e morfologici della media valle del Fiume Bradano”, *Boll. Soc. Geol. It.*, 1967, 49, pp. 421-622.
- SCHIATTARELLA M., BENEDUCE P., DI LEO P., GIANO S.I., GIANNANDREA P., PRINCIPE C., “Assetto strutturale ed evoluzione morfotettonica quaternaria del vulcano del Monte Vulture (Appennino Lucano)”, *Boll. Soc. Geol. It.*, 2005, 124, pp. 543-562.
- TROPEANO M., CILUMBRIELLO A., SABATO L., GALLICCHIO S., GRIPPA A., LONGHITANO S.G., BIANCA M., GALLIPOLI M.R., MUCCIARELLI M., SPILOTRO G., “Surface and subsurface of the Metaponto Coastal Plain (Gulf of Taranto-southern Italy): Present-day – vs LGM-landscape”, *Geomorphology*, 2013, 203, pp. 115-131.
- TROPEANO M., SABATO L., PIERI P., “Filling and cannibalization of a foredeep: Bradanic Trough, southern Italy”, *Geological Society, London, Special Publication*, 2002, 191, pp. 55-79.

*Physiographic evolution of the Bradano River basin (Basilicata and Puglia).*

The age of the terraced surfaces and summit flat palaeosurfaces of the Bradano River catchment, an about 3020 km<sup>2</sup> large hydrographic basin of southern Italy, and the position of the ancient coastlines (i.e., the location of the basin palaeomouths) have been used to reconstruct

the main evolutionary steps of the study area, mainly from a physiographic/planimetric viewpoint. The history of the basin started in the middle Pleistocene, whereas a major stage of basin development occurred between the middle and the late Pleistocene, triggered by base-level changes. The modifications of the basin perimeter and changes in the fluvial network are framed in a scenario of retrogressive erosion, with a progressive enlargement toward west of the upstream portion and related fluvial piracy phenomena. During the Holocene, mass movements and accelerated linear erosion took place in the area, joining the fluvial erosion as main mechanisms of morphological evolution of slopes.

*Keywords* - geomorphological evolution, catchment basin, land surfaces, Bradano River, southern Apennines (Italy).

*“La Dinamica fluviale. La conoscenza del Fiume per la pianificazione e la salvaguardia del territorio”*

a cura di C. Cencetti, L. Di Matteo

*Culture Territori Linguaggi*, 24, 2023, pp. 24-38

ISBN 9788894469783

Corrado CENCETTI<sup>1</sup>, Pierluigi DE ROSA<sup>1</sup>, Andrea FREDDUZZI<sup>1</sup>

## GEOMATICA E DINAMICA FLUVIALE

**Introduzione.** – Negli ultimi anni, i GIS Open Source hanno raggiunto un pubblico molto vasto, garantendo un’efficiente gestione dei dati e notevoli potenzialità di analisi geografico-territoriale. In particolare *QGIS* (rilasciato con licenza *GNU - General Public License*) è attualmente il software GIS *open source* più diffuso al mondo e gli utenti possono usufruire gratuitamente e per tempo illimitato degli aggiornamenti del software senza alcun costo di licenza. Sono inoltre disponibili numerosi *plugin*, realizzati dalla comunità di sviluppatori, che permettono di ampliare notevolmente le funzionalità standard del software.

Anche *GRASS GIS* è un software libero *open source* molto potente, soprattutto per le analisi di dati *raster* e dati di grandi dimensioni (*big data*). In realtà, *GRASS GIS* è stato il primo GIS libero *open source*, sviluppato a partire dai primi anni ‘80 del secolo scorso. Attualmente l’aggiornamento è curato dalla Fondazione Edmund Mach, con sede in provincia di Trento, che coordina una notevole comunità di sviluppatori.

Nell’ambito dei software *open source* l’utente si può, inoltre, avvalere di una numerosa serie di altri programmi e librerie che si integrano facilmente tra loro, quali, per fare solo alcuni esempi: *PostgreSQL (Postgis)* e *MySQL (SQLite)* - database con estensione per la gestione dei dati geografici; *R - geostatistica*; *Geoserver*, *Leaflet* e *Openlayer* - per la pubblicazione di dati online; *Python* - come linguaggio di programmazione.

Il Gruppo di Geologia Applicata dell’Università di Perugia ha sempre utilizzato software *open source* e ha elaborato una serie di *plugin* (denominata *RiverMetrics*), utile nell’ambito degli studi di dinamica fluviale per analisi morfometriche e idrologiche, finalizzate alla valuta-

---

<sup>1</sup> *Dipartimento di Fisica e Geologia, Università degli Studi di Perugia, Perugia*, corrado.cencetti@unipg.it; pierluigi.derosa@gmail.com; andreafredd@gmail.com

zione della pericolosità e del rischio da dinamica d'alveo.

Nella presente nota sono riportate alcune applicazioni allo studio della dinamica fluviale, nonché la descrizione dei principali *plugin* elaborati dal gruppo di ricerca.

**La Map Algebra.** – La *map algebra* è una tecnica per manipolare dati geografici di tipo *raster* (matrici) elaborata alla fine degli anni '70 del secolo scorso da Charles Dana Tomlin. In pratica è possibile combinare uno più raster tra loro tramite un set di operazioni matematiche, per produrre un nuovo *layer* (Fig. 1). I raster devono avere estensione simile e stessa risoluzione; gli operatori matematici possono essere molto semplici (somma, sottrazione...) o più complessi (derivate prime o seconde, integrali, formule statistiche...). Uno strumento estremamente efficace per questo tipo di elaborazioni è il modulo *r.mapcalc*<sup>1</sup> di *GRASS GIS*.

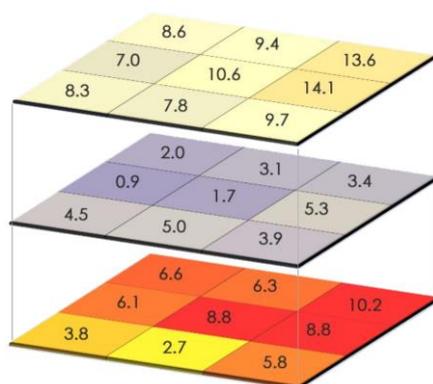


Fig. 1 - Operazione di sottrazione. Fonte: <https://gisgeography.com>.

**Processi di erosione - variazione della quota del fondo.** – La *map algebra* è molto utile per confrontare tra loro diversi Modelli Digitali del Terreno (DTM). Il confronto avviene tramite un'operazione di sottrazione, in modo che i valori positivi del *layer* ottenuto rappresentano gli aumenti di quota, che possono essere dovuti a processi di sedimentazione o a cause antropiche, mentre i valori negativi evidenziano gli abbassamenti, dovuti a processi di erosione o, anche in questo caso, a fenomeni antropici. In Figura 2 sono riportati due esempi di applicazione: a sinistra uno studio della variazione della quota dell'alveo del F. Paglia, in Umbria (bacino del F. Tevere); a destra uno studio dello spessore dei sedimenti nel lago della Diga di Corbara, sempre sul Tevere in Umbria.

<sup>1</sup> <https://grass.osgeo.org/grass82/manuals/r.mapcalc.html>

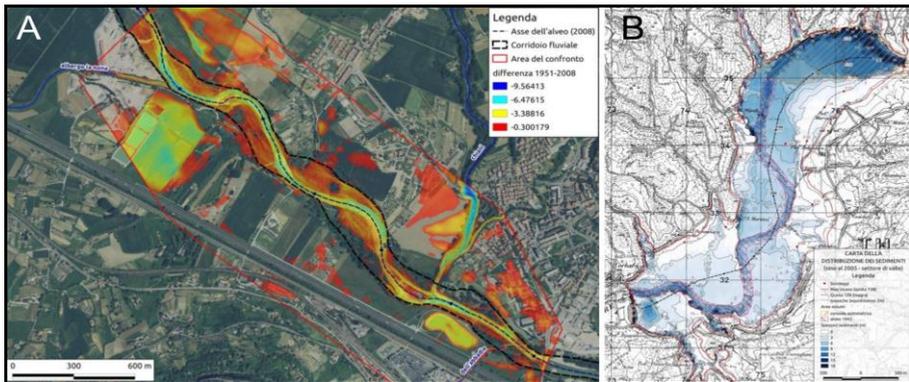


Fig. 2 - A) Un tratto del F. Paglia (Umbria) mostra il confronto tra il rilievo LiDaR del 2008 e il DTM ricavato da un progetto del Genio Civile (1951). In circa 60 anni (dal 1951 al 2008), all'interno del corridoio fluviale (linea tratteggiata) si sono persi per erosione circa 760.000 m<sup>3</sup> di sedimenti (da Cencetti et al., 2017). B) Lago di Corbara: il confronto tra una carta topografica (IGM, 1945) e la batimetria rilevata nel 2005 mostra la distribuzione dello spessore di sedimenti nel lago.

**Classificazione automatica di immagini telerilevate per l'individuazione di elementi morfologici.** – La classificazione automatica di immagini telerilevate si basa sull'analisi di dati raster multibanda che comprendono anche le frequenze dell'infrarosso. Si tratta di tecniche di processamento delle immagini che sono tipicamente utilizzate per la caratterizzazione dell'uso del suolo, ma possono essere applicate anche in geomorfologia fluviale per delineare le caratteristiche morfo-sedimentarie di sistemi fluviali (barre, canali, sponde e pianura alluvionale). Le tecniche di analisi supervisionata sono state applicate al F. Paglia dopo un importante evento di inondazione (2012), quando grandi porzioni di alveo e pianura alluvionale risultavano ricoperte di fango. Le tecniche fotogrammetriche classiche, basate sulla classificazione multispettrale, sono state realizzate tramite il *plugin Semi-Automatic Classification* di QGIS (Congedo, 2021). Successivamente sono state eseguite operazioni di post-elaborazione (finestra mobile) tramite il *tool r.neighborhood*<sup>2</sup> di GRASS GIS (Fig. 3).

**L'analisi storica.** – I caratteri morfologico-sedimentari attuali del corso d'acqua, definiti tramite fotointerpretazione, possono essere confrontati con i rispettivi ricavabili da documenti storici (foto aeree e cartografie storiche), al fine di determinare: le variazioni morfologiche (rispetto agli anni '50 del secolo scorso o precedenti) che sono indicative del grado di scostamento rispetto alle "condizioni di naturalità" del corso d'acqua; la rapidità dei processi in atto; le tendenze evolutive del corso d'acqua.

<sup>2</sup> <https://grass.osgeo.org/grass82/manuals/r.neighbors.html>

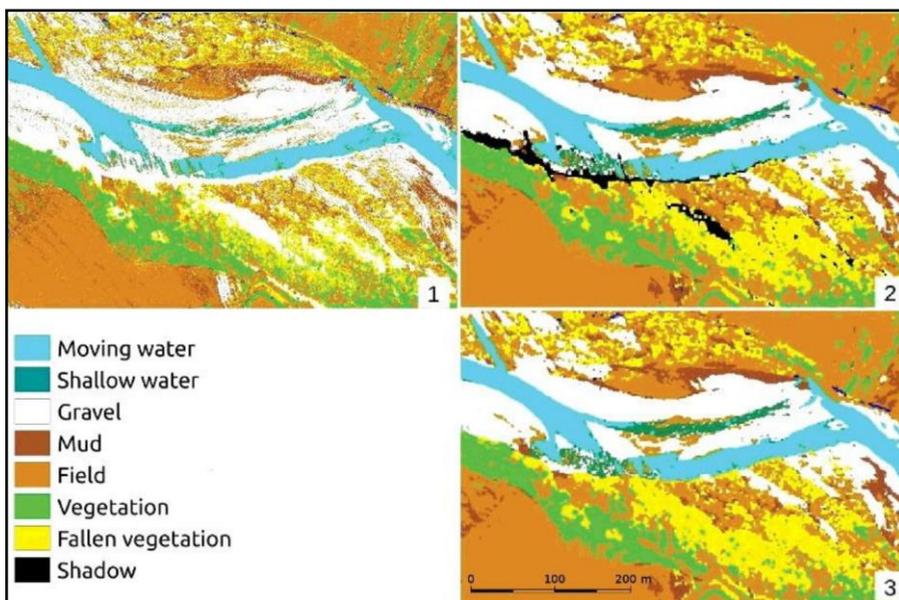


Fig. 3 - Post-classificazione con metodi di aggregazione pixel based (finestra mobile). 1) riduzione della frammentazione; 2) rimozione delle ombre (nero); 3) risultato finale. Da Brigante et al. (2017).

La procedura prevede la vettorializzazione dei corpi sedimentari e dell'asse della valle, mentre altri elementi morfologici sono ricavati da elaborazioni in ambiente GIS (alveo pieno, alveo attivo, asse dell'alveo, canale/i di magra).

Si riporta, come esempio, lo studio del F. Sinni nel tratto a valle della diga di M. Cotugno, realizzata tra il 1970 e il 1982 presso Senise (Basilicata). Dal 1954 al 2003 (Fig. 4) la larghezza media si è ridotta del 75%, passando da 425 a 110 m; l'indice di intrecciamento è passato da 3,1 a 1,7 e la morfologia del tratto terminale è passata da *wandering* a *monocanale a barre alternate*.

**Il rilevamento dei dati di terreno.** – È possibile ottimizzare le operazioni di rilevamento dei dati di terreno e le successive operazioni di restituzione in laboratorio, utilizzando alcuni applicativi per dispositivi mobili che consentono di:

- portare con sé sul terreno tutte le informazioni necessarie (es. cartografia tematica raster e vettoriale; dati tabellari consultabili e aggiornabili);
- predisporre schede di rilevamento (*forms*), anche complesse (es. quelle utilizzate per il calcolo dell'Indice di Qualità Morfologica - IQM - Rinaldi et al., 2014);

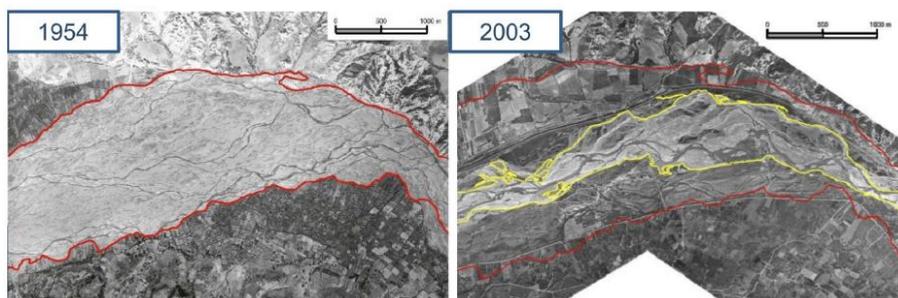


Fig. 4 - *Variazioni morfologiche dell'alveo del F. Sinni, in Basilicata. Da Cencetti e Fredduzzi (2008), modificato.*

- sincronizzare velocemente i dati una volta rientrati in ufficio o direttamente sul campo tramite *cloud*.

In ambito Open Source gli applicativi più efficaci sono *Qfield* (Android OS), che si interfaccia con *QGIS* tramite un *plugin*, *Geopaparazzi* (Android OS) e *Smash* (Android OS e IOS).

In Figura 5 è riportato un esempio di schede di rilevamento realizzate con *Geopaparazzi* (Cencetti et al., 2017).

***Automazione in GIS per il calcolo degli Indici fluviali.*** – Lo studio e la caratterizzazione dei corsi d'acqua sono fondamentali per comprendere il comportamento idrologico e geomorfologico dei corsi d'acqua, così come il loro impatto ambientale. Gli indici morfometrici giocano un ruolo cruciale in questo contesto, consentendo di misurare e analizzare in modo quantitativo le caratteristiche geometriche dei corsi d'acqua.

L'utilizzo di tecnologie avanzate, come i Sistemi Informativi Geografici (GIS) e i codici di calcolo automatici, ha portato a notevoli vantaggi nell'elaborazione e nell'applicazione di tali indici. Di seguito, sono illustrati alcuni dei principali benefici di questi approcci.

- **Precisione e consistenza dei dati.** I GIS permettono di acquisire, integrare e gestire dati geografici provenienti da diverse fonti, come immagini satellitari, mappe topografiche e dati terrestri. Questo permette di ottenere informazioni più accurate e coerenti riguardanti la morfologia del corso d'acqua e dei suoi dintorni. Inoltre, i codici di calcolo automatici assicurano l'elaborazione sistematica e coerente degli indici morfometrici, riducendo al minimo gli errori umani e garantendo risultati affidabili.

- **Efficienza nell'analisi.** La determinazione manuale degli indici morfometrici può richiedere molto tempo e sforzo, specialmente in aree estese o complesse. Utilizzando i GIS e i codici di calcolo automatici, è possibile analizzare rapidamente un'ampia quantità di dati e generare

indici morfometrici su larga scala. Ciò consente agli studiosi e agli esperti di focalizzarsi maggiormente sull'interpretazione dei risultati e sull'elaborazione di strategie di gestione idrologica e ambientale.

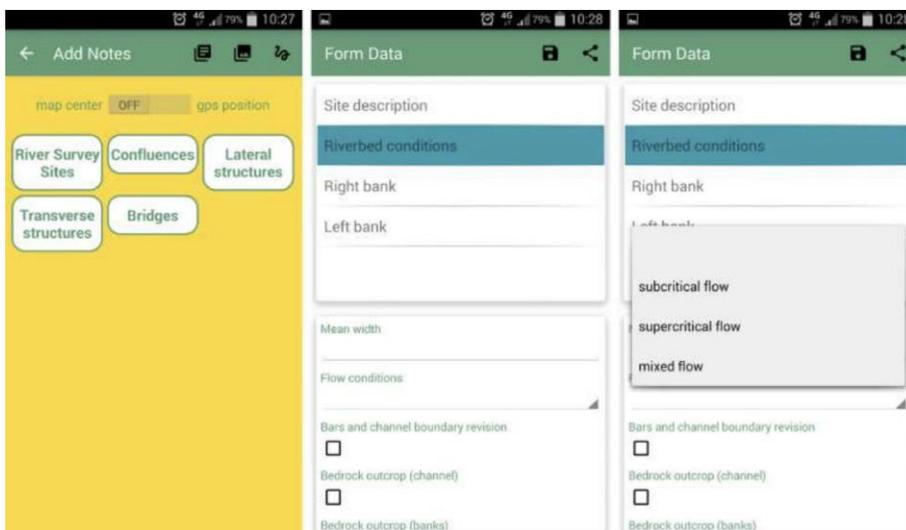


Fig. 5 - Screenshot da Geopaparazzi. A sinistra (in giallo): schermata per la selezione della scheda di rilevamento. Al centro e a destra: form per l'inserimento dei dati di una stazione di rilevamento. Da Cencetti et al. (2017).

- Scalabilità e flessibilità. I GIS e i codici di calcolo automatici offrono la possibilità di adattarsi a diverse dimensioni di bacini idrografici e di studiare sistemi fluviali di complessità differenti. Possono essere impiegati sia per analisi a grande scala, come fiumi locali o torrenti, sia per ricerche a piccola scala, come la modellazione di interi sistemi di drenaggio.
- Visualizzazione dei dati. L'integrazione dei dati in ambiente GIS consente di rappresentare visivamente gli indici morfometrici su mappe e grafici, facilitando la comprensione dei risultati, sia per utenti esperti sia per il grande pubblico. La visualizzazione spaziale dei dati permette, inoltre, di individuare *pattern* e relazioni "nascoste" tra le caratteristiche del corso d'acqua e l'ambiente circostante.

In sintesi, l'utilizzo dei GIS e dei codici di calcolo automatici per determinare gli indici morfometrici in ambito fluviale offre un approccio avanzato, preciso ed efficiente per analizzare e comprendere i sistemi fluviali. Questi strumenti tecnologici consentono di ottimizzare le risorse, favorire la ricerca scientifica e facilitare la pianificazione e la gestione sostenibile delle risorse idriche e ambientali.

In questo contesto si inseriscono le attività svolte che hanno portato alla realizzazione di diversi *script* in *python* per la determinazione della sinuosità del corso d'acqua (Indice di sinuosità), la valutazione della larghezza totale ed effettiva, l'Indice di intrecciamento e anastomizzazione, l'estrazione del profilo longitudinale (Fig. 6).

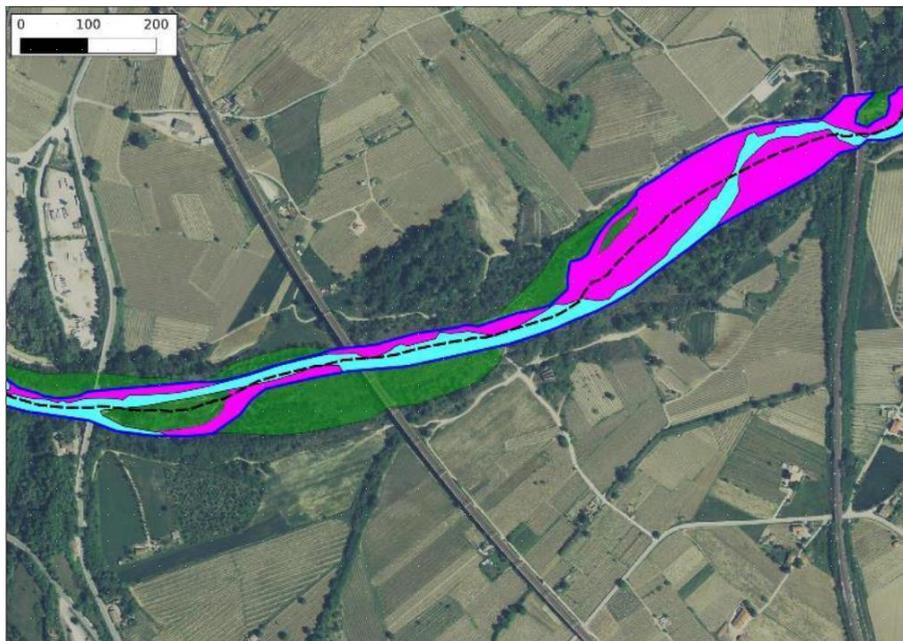


Fig. 6 - Esempio di applicazione dello script *Ortagonale.py*.

Per lo *script* di Figura 6 i dati di input richiesti sono: Vettore lineare dell'asse dell'alveo, Vettore areale delle sponde, Vettore areale dell'alveo pieno, Vettore areale del canale, Passo di misura.

Nelle Figure 7-9 sono riportati gli schemi grafici con cui sono determinati la sinuosità e il grado di confinamento. In particolare, per la sinuosità, essa è calcolata utilizzando sia l'asse dell'alveo sia l'asse della valle.

Questi *script* hanno come loro ambiente di funzionamento GRASS GIS ma è stato avviato un processo di *porting* in QGIS, per il quale è stato realizzato un *plugin* denominato *RiverMetrics*, in cui confluiranno gli indici morfometrici che sono stati implementati. Per ora il *plugin* si limita alla determinazione dell'Indice di sinuosità.

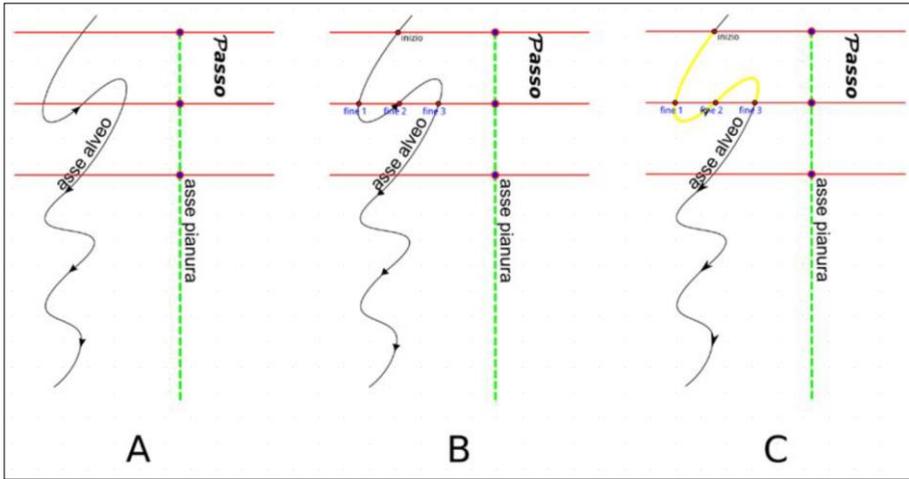


Fig. 7 - Calcolo automatizzato della sinuosità.

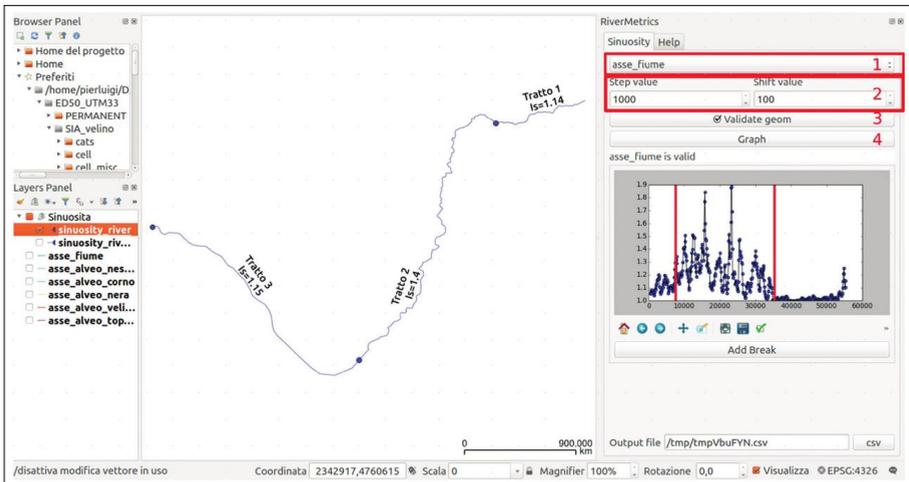


Fig. 8 - Output grafico del calcolo dell'Indice di sinuosità. Da De Rosa et al. (2017).

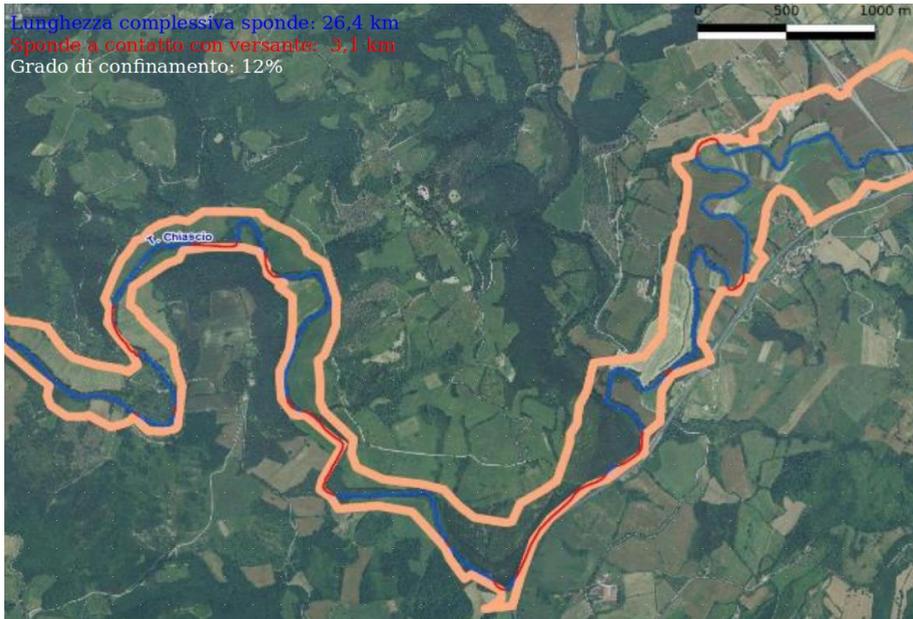


Fig. 9 - Calcolo del grado di confinamento tramite l'operazione di buffering + intersezione tra limite della pianura e sponde dell'alveo pieno.

**Altezza e larghezza di Bankfull (sezione di Bankfull).** – L'identificazione dello stadio di Bankfull in un corso d'acqua è particolarmente significativo, in quanto la portata a questo stadio coincide spesso con quella "formativa" del corso d'acqua (*sensu* Wolman e Miller, 1960).

La determinazione dell'alveo di *Bankfull* (o sezione di *Bankfull* - Fig. 10) è una procedura complessa che richiede una combinazione di dati di terreno, rilevamenti sul campo e analisi idrologiche. Tipicamente, questo processo comporta l'identificazione e la misurazione delle caratteristiche fisiche dell'alveo, in modo da definire il livello di piena associato alla capacità massima del corso d'acqua. L'altezza di *Bankfull* (*Bankfull elevation*) può essere agevolmente identificata in campo mediante alcuni indicatori: cambi di pendenza repentini delle sponde in prossimità della *floodplain*, *markers* di portate di piena, limiti di *bank scour*, dimora dei massi, depositi di sabbia/limo, limiti della vegetazione, altezza delle barre (De Rosa et al., 2019).

Il *tool* sviluppato può:

- graficare l'andamento dell'altezza idraulica *vs* la quota assoluta (Fig. 11);
- investigare tale funzione per trovare il primo "Massimo locale" corrispondente alla prima rottura di pendenza della sponda.

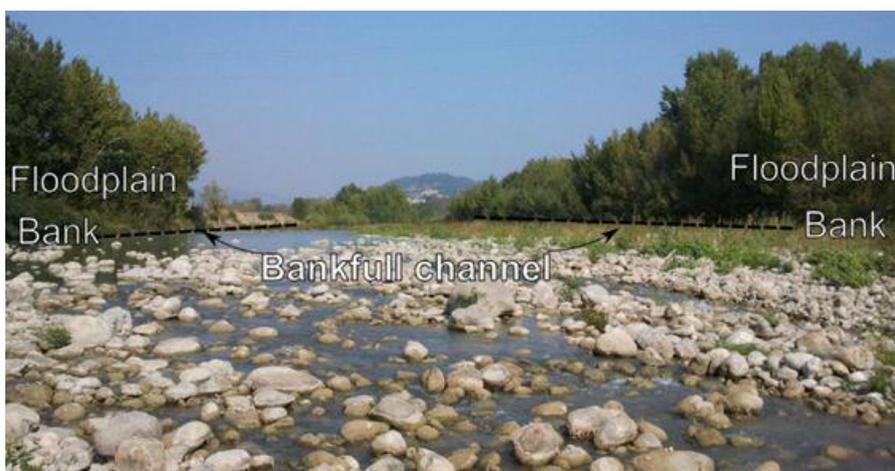


Fig. 10 - Elementi per la determinazione della larghezza e della sezione di Bankfull.

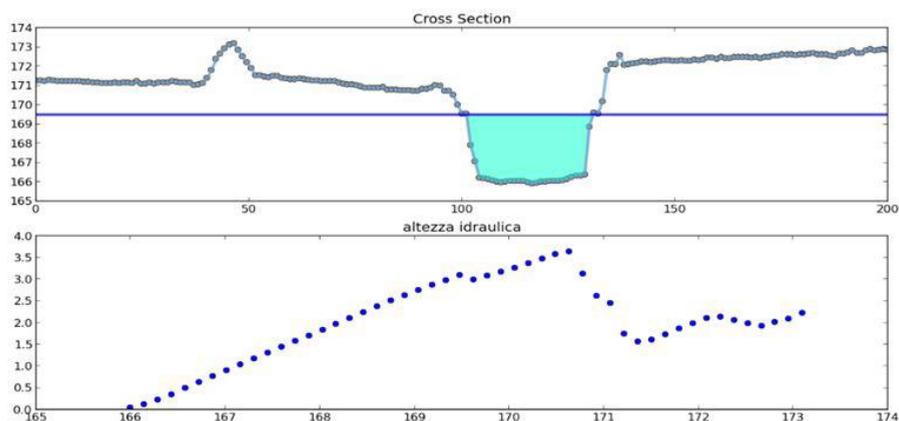


Fig. 11 - Output grafico della determinazione della altezza di Bankfull.

La Figura 12 mostra la corrispondenza tra Profilo della sezione trasversale del corso d'acqua (I.A) e l'andamento del raggio idraulico in funzione della quota assoluta in metri (I.B). Si evince chiaramente la corrispondenza tra i due grafici che è determinata in automatico dal *tool*. Tuttavia, tale approccio presenta alcune limitazioni, in quanto da diversi *test* effettuati, funziona meglio in fiumi aventi una pianura alluvionale, mentre è limitato (ovvero fornisce risultati meno accurati) per fiumi confinati che mancano di pianura. Inoltre, il *tool* ha qualche difficoltà per i fiumi dove il canale ha terrazzamenti multipli, dove è complesso decidere quale di questi può corrispondere all'altezza di *Bankfull*.

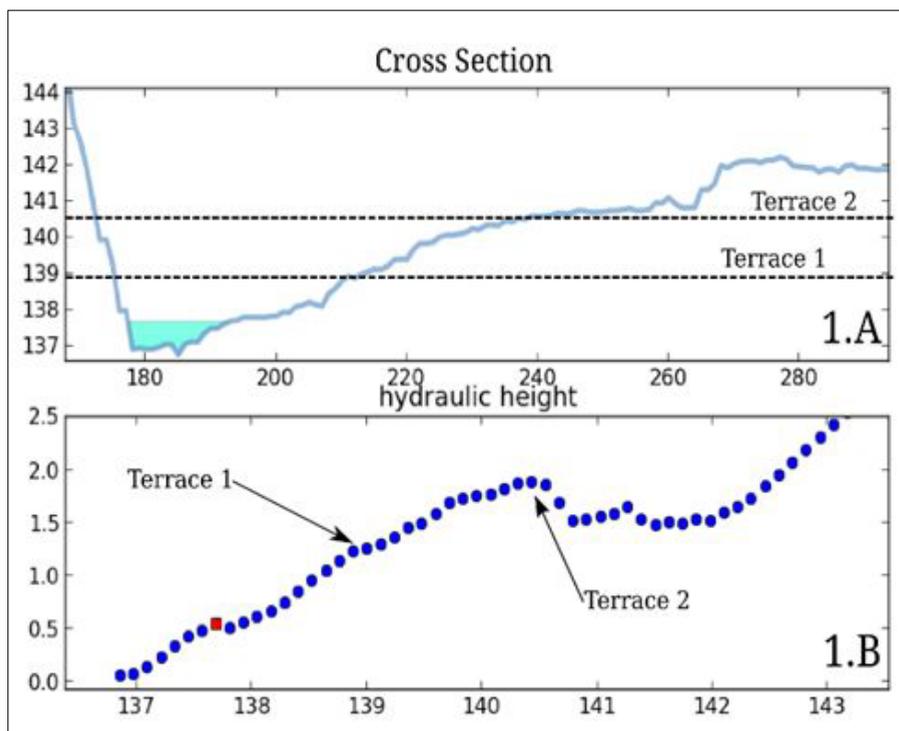


Fig. 12 - Corrispondenza tra il profilo della sezione trasversale del corso d'acqua (1.A) e l'andamento del raggio idraulico in funzione della quota assoluta in metri (1.B).

Al fine poi di individuare i terrazzi morfologici più significativi, una procedura di *smoothing* è stata implementata per rimuovere i massimi locali più esigui nel grafico. Tale procedura utilizza l'individuazione di una soglia di *smoothing* basata sulla varianza statistica dei valori attraverso una procedura di *cross validation* di tipo *k-fold*.

La Figura 13 mostra i risultati dell'applicazione del *tool* al F. Paglia, nel tratto umbrosco a monte della città di Orvieto (TR). Il fiume presenta un forte disequilibrio, manifestando processi di incisione e restringimento che hanno comportato, nel tempo, il passaggio da un alveo di tipo *braided* a uno di tipo *wandering*. La vecchia pianura alluvionale si presenta oggi come un terrazzo, mentre la pianura alluvionale attiva si trova all'interno del vecchio letto fluviale. Nonostante le difficoltà sito-specifiche, si nota come il *tool* fornisca una buona stima della posizione dei limiti delle sponde ad alveo pieno.

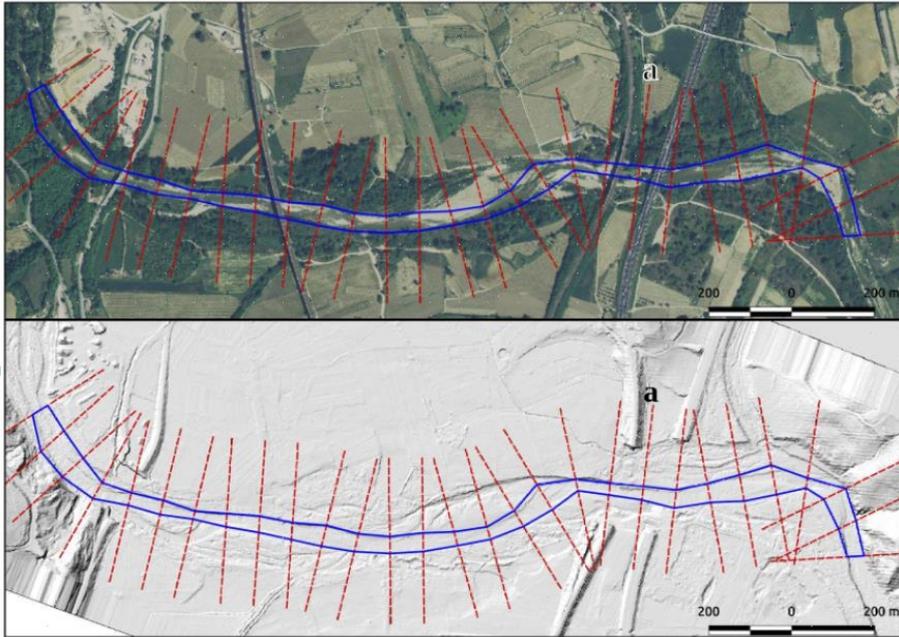


Fig. 13 - Il tratto del F. Paglia (Umbria) preso in esame. La fascia delimitata in blu si riferisce alla larghezza di Bankfull.

**Stream power.** – In questa specifica sezione viene descritto il *tool* implementato per esplorare la variazione del valore della *TSP* (*Total Stream Power* - Fig. 14) lungo l'asse fluviale e di esplorare le sue variazioni, in modo da correlarla con la morfologia fluviale.

L'area di studio a cui è stato applicato il *tool* è il bacino del Fiume Topino (Umbria centrale, bacino del F. Tevere). Il bacino del F. Topino ha le seguenti caratteristiche: estensione circa 250 km<sup>2</sup>; lunghezza 35 km; *drop* di quota 430 m (Fig. 15).

La TSP può essere determinata attraverso la formula:

$$\Omega = \gamma Q S$$

con  $\Omega$  = stream power;  $\gamma$  = peso specifico dell'acqua;  $Q$  = portata;  $S$  = pendenza del pelo libero.

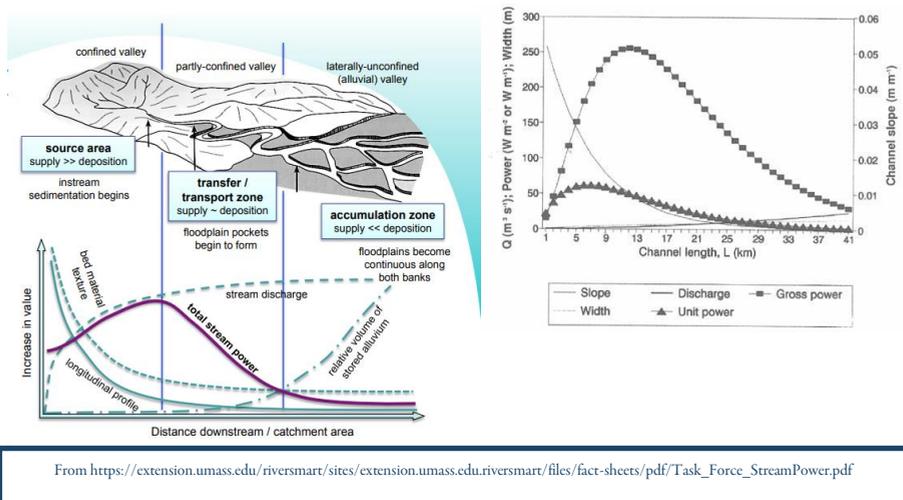


Fig. 14 - *Rappresentazione grafica della Stream Power di un corso d'acqua.*

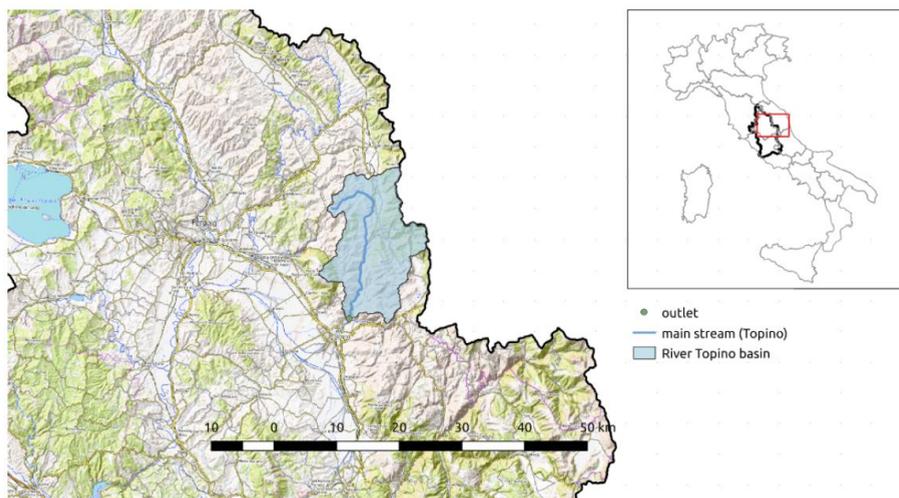


Fig. 15 - *Ubicazione del bacino del F. Topino.*

Il processo GIS parte dapprima dalla determinazione della portata in ogni punto dell'asse fluviale, utilizzando la metodologia messa a punto dall'Autorità di Bacino del F. Tevere (oggi confluita nell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Centrale) denominata *regionalizzazione delle portate* che permette di determinare la portata di piena in ogni punto della rete idrografica, una volta assegnato uno specifico valore del Tempo di Ritorno (TR), che nel caso

in esame è pari a 2 anni (essendo appunto questo il TR che solitamente si assegna alla portata ad alveo pieno). Una volta nota la portata, si stima la pendenza locale e si determina il valore della TSP lungo il corso d'acqua (De Rosa et al., 2019).

Analizzando l'andamento del valore della TSP lungo il corso d'acqua esaminato, si individuano zone aventi valori di TSP alti che corrispondono a punti morfologicamente significativi (Fig. 16). Ad esempio, la zona 1 corrisponde a una stretta valle interessata da erosione regressiva. L'alto valore di TSP dipende, in questo caso, dal gradiente e non dalla portata. Nella zona 2, invece, esso dipende dall'aumento della portata causato dalla confluenza di un immissario con un bacino imbrifero relativamente ampio.

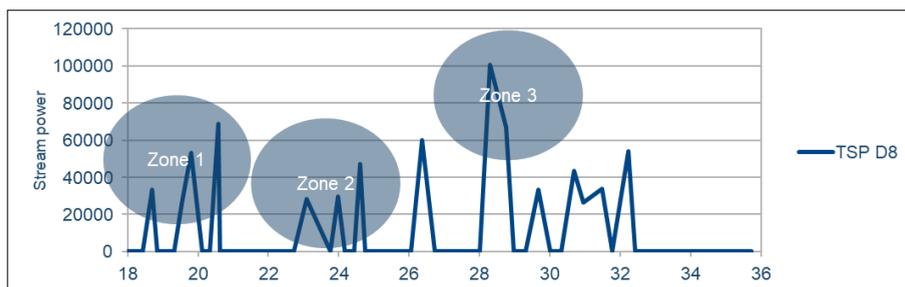


Fig. 16 - Variazione della TSP lungo il corso del F. Topino (bacino del F. Tevere).

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- BRIGANTE R., CENCETTI C., DE ROSA P., FREDDUZZI A., RADICIONI F., STOPPINI A., "Use of aerial multispectral images for spatial analysis of flooded riverbed-alluvial plain systems: the case study of the Paglia River (central Italy)", *Geomatics, Nat. Haz. and Risk*, 2017, 8: 2, pp. 1126-1143, doi.org/10.1080/19475705.2017.1300607.
- CONGEDO L., "Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS", *Journ. of Open Source Software*, 2021, 6 (64), 3172, doi.org/10.21105/joss.03172.
- CENCETTI C., DE ROSA P., FREDDUZZI A., "Geoinformatics in morphological study of River Paglia, Tiber River basin, Central Italy", *Environ. Earth Sci.*, 2017, 76, 128, doi.org/10.1007/s12665-017-6448-5.
- CENCETTI C., FREDDUZZI A., "Analisi attraverso metodologia GIS delle variazioni dei caratteri morfologico-sedimentari nella bassa valle del F. Sinni (Basilicata)", *Il Quaternario, It. Journ. Quat. Sc.*, 2008, 21 (B), pp. 147-160.
- DE ROSA P., CENCETTI C., FREDDUZZI A., "An automated method for river sinuosity calculation using QGIS", *Geoing. Amb. Min.*, 2017, 2, pp. 81-84.

- DE ROSA P., FREDDUZZI A., CENCETTI C., "Stream Power Determination in GIS: An Index to Evaluate the Most 'Sensitive' Points of a River", *Water*, 2019, 11, 1145, doi.org/10.3390/w11061145.
- DE ROSA P., FREDDUZZI A., CENCETTI C., "A GIS-based tool for automatic bankfull detection from airborne high resolution dem", *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 8 (11), 480, doi.org/10.3390/ijgi8110480.
- RINALDI M., SURIAN N., COMITI F., BUSSETTINI M., "IDRAIM - Sistema di valutazione idromorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d'acqua", ISPRA, Manuali e Linee Guida, 113, 2014, Roma.
- WOLMAN M.G., MILLER J.P., "Magnitude and Frequency of Forces in Geomorphic Process", *Journ. of Geol.*, 1960, 68, pp. 54-74, doi.org/10.1086/626637.

### *Geomatics and Fluvial Dynamics.*

In recent years, GIS software, especially the open source ones, released under the GNU license - General Public License, are very popular and users can enjoy free and unlimited time software updates without any license fees. These software have numerous plugins available, created by the developer community, which allow you to expand their standard functions. The Applied Geology Group of the University of Perugia has developed a series of plugins (called "RiverMetrics"), useful in the field of fluvial dynamics studies for morphometric and hydrological analysis aimed at assessing the hazard and risk from riverbed dynamics. The note describes the plugins that allow to evaluate some morphometric indexes, such as the width of the active riverbed, the sinuosity index, the braiding or anastomosing index, the longitudinal profile, the height and width of the bankfull (whose flow often coincides with the "formative flow" of the river), as well as the stream power at each point of the stream. Another important aspect, for which the use of GIS has proved to be very effective, concerns the historical analysis and therefore the monitoring of the significant morphological variations undergone over time by the river, useful for evaluating the rate of the morphogenetic processes.

*Keywords* - fluvial geomorphology, open source GIS, plugins.

*“La Dinamica fluviale. La conoscenza del Fiume per la pianificazione e la salvaguardia del territorio”*

a cura di C. Cencetti, L. Di Matteo

*Culture Territori Linguaggi*, 24, 2023, pp. 39-45

ISBN 9788894469783

Valentina CERBONI<sup>1</sup>, Corrado CENCETTI<sup>1</sup>

## VALUTAZIONE DELL'INTERRIMENTO DI ALCUNI INVASI COLLINARI NEL TERRITORIO UMBRO

**Introduzione.** – L'obiettivo principale dello studio è la stima della perdita di suolo annua, tramite il modello *RUSLE* (*Revised Universal Soil Loss Equation*), dei bacini idrografici di alcuni laghetti collinari nell'Alta Valle del F. Tevere, in Umbria (Fig. 1). Tale lavoro costituisce la fase preliminare di un progetto più ampio, che prevede la realizzazione in futuro di misure dirette della batimetria degli invasi presi in considerazione.



Fig. 1 - Ubicazione degli invasi collinari studiati.

---

<sup>1</sup> Dipartimento di Fisica e Geologia, Università degli Studi di Perugia, Perugia, [cerboni.valentina@gmail.com](mailto:cerboni.valentina@gmail.com); [corrado.cencetti@unipg.it](mailto:corrado.cencetti@unipg.it)

***Il problema dell'interrimento degli invasi.*** – La realizzazione di uno sbarramento lungo il corso d'acqua altera sensibilmente la distribuzione dei sedimenti lungo il tracciato, bloccando il trasporto solido a monte e creando un deficit di apporto sedimentario a valle.

Il fenomeno di interrimento, che costituisce il riflesso stesso dei normali fenomeni di erosione, ha come effetto principale una diminuzione del volume utile per lo stoccaggio di acqua, oltre che conseguenze negative anche sul corso d'acqua sbarrato, tra cui un innalzamento del letto fluviale a monte del serbatoio, fenomeni di erosione a valle dello sbarramento e una riduzione di apporto solido nella rete idrografica.

***I laghetti collinari studiati.*** – I requisiti per la scelta dei laghetti sono stati così definiti:

- Caratteristiche geologiche omogenee dei bacini idrografici sottesi dallo sbarramento;
- Possibilità di reperire il progetto originario di realizzazione dell'invaso;
- Nessuna opera di dragaggio del fondo effettuata dall'epoca della costruzione.

Gli invasi presi in considerazione sono stati in totale 5 e sono localizzati nelle zone collinari a NE del Lago Trasimeno, tra i comuni di Città di Castello a N, Umbertide a E, Perugia a S e al confine con la regione Toscana a O.

***Inquadramento geologico.*** – In questa zona affiorano i litotipi delle formazioni flyschoidi tipiche della parte superiore delle due successioni stratigrafiche toscana e umbromarchigiana, quali il "Macigno" e la "Scaglia" della Serie toscana e la "Formazione marnoso-arenacea" umbra. (Fig. 2).

***La stima dell'interrimento tramite il modello RUSLE.*** – Per la valutazione del grado di interrimento dei laghetti considerati è stato utilizzato il modello *RUSLE* (*Revised Universal Soil Loss Equation*, 1991-1994):

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad [t \cdot ha^{-1} \cdot anno^{-1}]$$

dove:

- A = perdita di suolo annua per unità di superficie
- R = fattore di erosività della pioggia
- K = fattore di erodibilità del suolo
- L = fattore di lunghezza della pendice
- S = fattore di pendenza della pendice
- C = fattore di copertura vegetale e di uso del suolo
- P = fattore di pratica colturale o di controllo dell'erosione

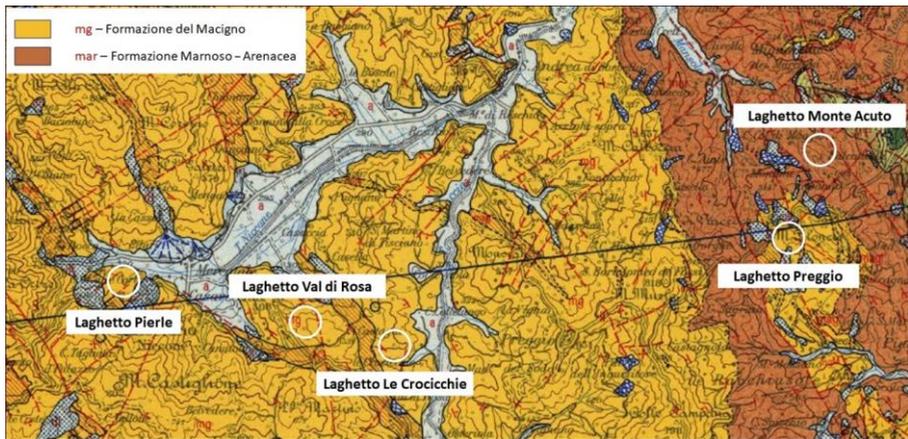


Fig. 2 - Formazioni geologiche dell'area di ubicazione degli invasi collinari studiati (fonte: Carta Geologica d'Italia in scala 1:100.000 - Foglio n. 122 "PERUGIA", modificato).

Dal confronto tra i valori medi dei vari fattori del modello RUSLE, è possibile interpretare la perdita di suolo ottenuta per i bacini idrografici (riportata graficamente in Fig. 3 e in Tab. 1).

Dalla comparazione tra i valori assunti da ogni fattore per i bacini di interesse, si evince che i valori maggiori di perdita di suolo ottenuti per gli invasi "Monte Acuto" e "Val di Rosa" sono imputabili al loro più alto fattore C (fattore di coltivazione), rispetto agli altri (Tab. 2). Si può quindi ricavare che la perdita di suolo nei casi considerati sia fortemente influenzata dal tipo di copertura vegetale, oltre che dalle caratteristiche pluviometriche dell'area.

La vegetazione ricopre un ruolo essenziale nella prevenzione di questo fenomeno; infatti, della quantità di materiale eroso all'anno per ettaro stimato attraverso il modello, una parte del materiale viene trattenuto dalle essenze vegetali e quindi non riesce a raggiungere l'invaso. Questa porzione può essere calcolata attraverso il coefficiente *Sediment Delivery Ratio*, utilizzando una formula di tipo empirico, proposta da Vanoni (1975):

$$SDR = 0.42 A - 0.125$$

dove A è l'area di drenaggio del bacino, espressa in migliaia quadrate (il coefficiente è comunque adimensionale).

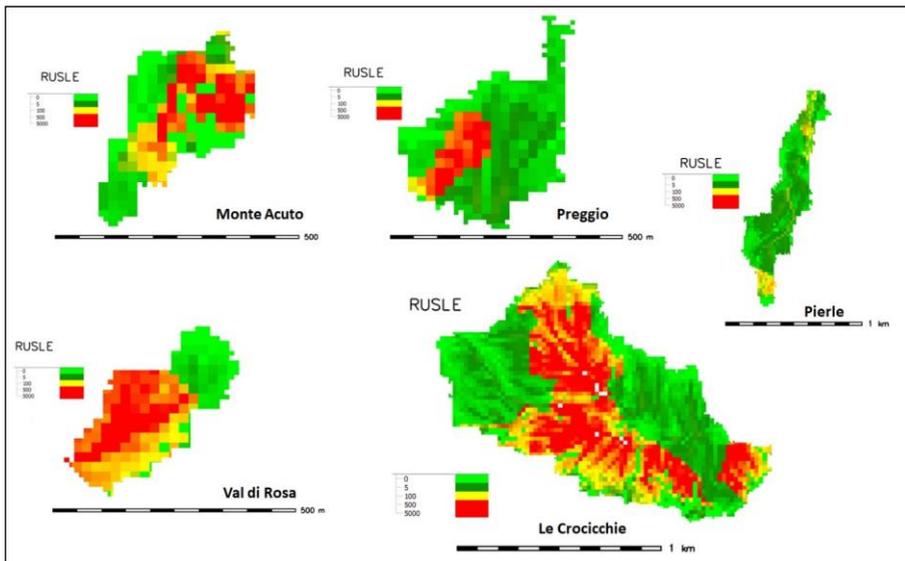


Fig. 3 - *Mappa della perdita di suolo calcolata con il modello RUSLE per i bacini idrografici sottesi dai 5 laghetti.*

Invaso	Perdita di suolo per ettaro all'anno t/(ha*y)
Monte Acuto	18,01
Val di Rosa	13,7
Le Crocicchie	10
Preggio	8,36
Pierle	0,97

Tab. 1 - *Risultati della perdita di suolo secondo l'analisi effettuata tramite il modello RUSLE.*

Il SDR, se moltiplicato per il valore di perdita di suolo media all'anno per ogni ettaro di terreno ottenuta con il modello RUSLE e per l'area del bacino idrografico espressa in ettari, restituisce la perdita di suolo totale, ovvero la quantità di materiale che ogni anno viene eroso dai versanti del bacino idrografico e che arriva effettivamente all'invaso. Pertanto, in questo modo si può stimare il tasso d'interrimento dei laghetti (Tab. 3).

Valori medi dei fattori RUSLE					
Invaso	Fattore R	Fattore K	Fattore LS	Fattore C	Fattore P
Monte Acuto	227,468	0,370	11,520	0,221	1,00
Val di Rosa	214,327	0,380	13,332	0,243	1,00
Le Crocicchie	214,981	0,380	17,812	0,187	1,00
Preggio	225,343	0,380	16,906	0,064	1,00
Pierle	212,502	0,380	26,242	0,002	1,00

Tab. 2 - Valori medi dei fattori utilizzati nel modello RUSLE.

Invaso	Area bacino idrografico (ha)	SDR (-)	Perdita di suolo totale ( $t^*/y$ )
Le Crocicchie	93	0,477	418,00
Val di Rosa	5,41	0,681	50,49
Pierle	32,59	0,544	17,20
Preggio	5,87	0,674	33,09
Monte Acuto	7,53	0,654	88,64

Tab. 3 - Risultati del modello RUSLE in termini di perdita di suolo totale.

I valori dell'ultima colonna di Tabella 3 rappresentano la quantità totale di sedimenti che ogni anno viene erosa dai versanti del bacino idrografico e trasportata negli invasi e quindi rappresenta il grado di interrimento annuo dei bacini. Per poter effettuare un confronto tra i valori di interrimento di ogni singolo invaso rispetto agli altri, si è provveduto a ridividere ulteriormente la perdita di suolo totale per l'area complessiva in ettari del bacino idrografico di ogni laghetto; in questo modo è stato possibile eliminare l'effetto della diversa estensione dei bacini idrografici, poiché gli invasi con i bacini imbriferi più grandi sono affetti da maggiore interrimento a causa di una maggiore area sottesa. Quest'ultima grandezza calcolata rappresenta il contributo che ogni ettaro di terreno apporta all'invaso in termini di sedimenti erosi e quindi è una stima del contributo medio di ogni ettaro di terreno all'interrimento. I risultati sono schematizzati in Tabella 4.

Invaso	Contributo di ogni ettaro all'interrimento dell'invaso [t/(y*ha)]
Monte Acuto	11.77
Val di Rosa	9.33
Preggio	5.63
Le Crocicchie	4.49
Pierle	0.53

Tab. 4 - Contributo medio di ogni ettaro di terreno all'interrimento dell'invaso.

È evidente come, dal punto di vista del contributo all'interrimento, gli invasi "Monte Acuto" e "Val di Rosa" sono quelli caratterizzati dai valori più alti.

**Considerazioni finali e studi futuri.** – Dal confronto tra il DEM (Digital Elevation Model, Fig. 4) ricostruito tramite il progetto originario dell'invaso e le misure batimetriche mediante ecoscandaglio che saranno effettuate successivamente, si potrà valutare il grado di innalzamento del fondo rispetto alle quote originarie di progetto e quindi potranno essere calcolati il volume e il tasso di interrimento. Ciò costituirà la fase di validazione del modello qui proposto di stima dell'erosione a livello di bacino.

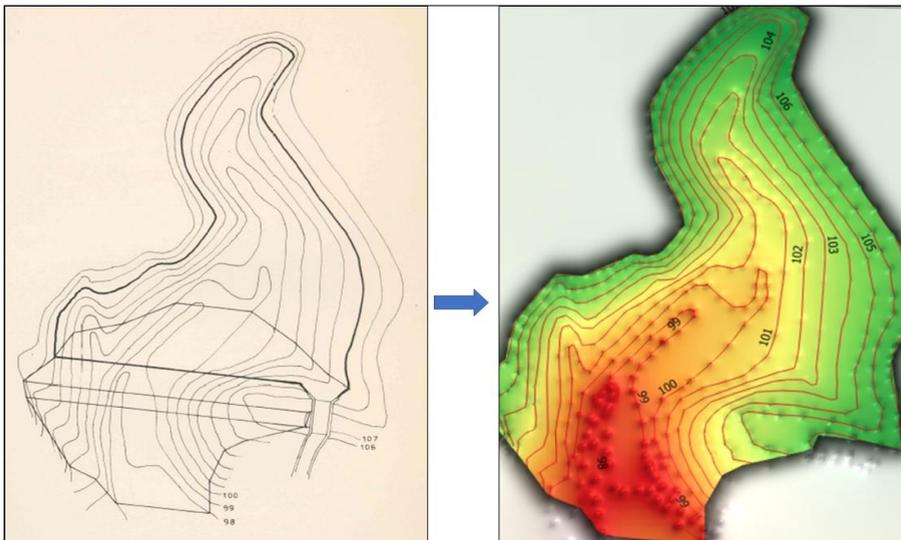


Fig. 4 - Progetto iniziale di uno degli invasi realizzati ed elaborazione del DEM relativo.

*Evaluation of infilling of some hilly reservoirs in the Umbrian territory.*

Thousands of small reservoirs have been built in Italy since the 1960s, which are defined as “hilly dams” because they are generally located at moderate high elevation and created by artificially damming of creeks, to accumulate water upstream, to be used mainly for irrigation purposes and, more generally, as a water reserve. Despite the fact that the realization of new reservoirs has slowed down markedly in recent decades, the number of lakes in the area remains very high. The current situation of these reservoirs is very often of poor conservation; in fact, in their natural evolution, the hill lakes undergo a more or less rapid silting. In fact, the construction of a dam along the creek significantly alters the distribution of sediments along the course, blocking solid transport upstream and creating a sedimentary deficit downstream. The silting phenomenon, which constitutes the very reflection of normal erosion phenomena, has as its main effect a decrease in the useful volume for water storage, as well as negative consequences also on the blocked creek, including an elevation of the riverbed upstream of the reservoir, erosion phenomena downstream of the dam, and a reduction of solids input towards the hydrographic network. The main goal of the note is the estimate of the annual soil loss, using the RUSLE model (Universal Soil Loss Equation), of the hydrographic basins relating to some hilly lakes of the Umbrian territory in the Upper Valley of the River Tiber, in Umbria. This study constitutes the preliminary phase of a larger project, which also includes direct bathymetric measurements of the reservoirs taken into consideration. From the comparison between the data coming from the analysis of the initial projects of the dams and the bathymetric measurements carried out with an echo sounder, it will in fact be possible to evaluate the degree of elevation of the bottom with respect to the original project and therefore the volume and the silting rate can be estimated. A further comparison between the soil loss calculated on the basis of the modeling using RUSLE and the real quantity of sediment present on the bottom will also allow to test the model itself for the purpose of evaluating the soil loss and the actual silting of the reservoirs. By quantifying the silting of the reservoir, the impact of the dam on the solid transport of the riverbed downstream of the reservoir itself can also be estimated, with the consequent verification of the possible triggering of erosion phenomena and deepening of the riverbed.

*Keywords* – hilly dams, soil loss, RUSLE, Umbria.

*“La Dinamica fluviale. La conoscenza del Fiume per la pianificazione e la salvaguardia del territorio”*

a cura di C. Cencetti, L. Di Matteo

*Culture Territori Linguaggi*, 24, 2023, pp. 46-52

ISBN 9788894469783

Claudia CHERUBINI<sup>1</sup>, Nicola PASTORE<sup>2</sup>, Milena HERUS<sup>2</sup>, Antonio DI SCIPIO<sup>2</sup>,  
Stella GIROLAMO<sup>2</sup>, Gioacchino Francesco ANDRIANI<sup>3</sup>,  
Concetta Immacolata GIASI<sup>2</sup>

## BARI CITTÀ SPUGNA: STUDIO DI APPLICABILITÀ DI SOLUZIONI TECNICHE SUDS IN AMBITO URBANO

**Introduzione.** – I *SuDS* (*Sustainable Drainage Systems*) rappresentano, di fatto, l’approccio più moderno e sostenibile alla gestione delle acque superficiali, perché hanno come scopo la riduzione dell’impatto degli allagamenti sul territorio, nel rispetto dell’ambiente, della qualità dell’acqua e della biodiversità, in un’ottica ispirata dalle strategie internazionali di gestione integrata delle acque urbane (IUWM - Furlong et al., 2017).

All’inizio degli anni 2000, l’architetto cinese Kongjian Yu, nell’ambito di un progetto finalizzato alla riduzione del rischio di inondazioni della città di Pechino, introdusse il concetto di *Sponge City* (“Città Spugna”), basato su modelli di sicurezza ecologica che utilizzano sistemi di drenaggio sostenibile (SuDS) e tecniche *LID* (*Low Impact Development*). Si tratta di sistemi e tecnologie a vocazione ambientale, finalizzati al controllo delle inondazioni in aree urbane, dell’inquinamento idrico e al riciclaggio dell’acqua piovana, temi oggi molto attuali a causa dei sempre più frequenti fenomeni meteorologici estremi come siccità e inondazioni, strettamente connessi ai cambiamenti climatici (Zevenbergen et al., 2018). Il risultato

---

<sup>1</sup> Dipartimento di Scienze dell’Ambiente e della Prevenzione, Università degli Studi di Ferrara, Ferrara, claudia.cherubini@unife.it

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica, Politecnico di Bari, Bari, nicola.pastore@poliba.it; concettaimmacolata.giasi@poliba.it; m.herus@studenti.poliba.it; a.discipio1@studenti.poliba.it; s.girolamo@studenti.poliba.it

<sup>3</sup> Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali, Università degli Studi di Bari “Aldo Moro”, Bari, gioacchinofrancesco.andriani@uniba.it

è finalizzato alla creazione di città a maggiore resilienza e capacità di adattamento ai rischi legati ai cambiamenti climatici e ai disastri naturali, ma anche ad eventi piovosi di minore entità, garantendo una maggiore sicurezza e vivibilità dell'ambiente urbano, attraverso una riduzione del volume di acque di ruscellamento superficiale. Allo stesso tempo, la *Sponge City* è una città capace di integrare la gestione idrica nelle politiche di pianificazione urbana, per mezzo della realizzazione di sistemi infrastrutturali verdi, in grado di raccogliere e immagazzinare acqua da utilizzare per scopi specifici, o di facilitare l'infiltrazione della stessa nel sottosuolo. Nelle aree costiere, quest'ultimo aspetto assume importanza fondamentale nei processi di ricarica degli acquiferi e di riequilibrio dello stato quantitativo delle falde per mitigazione degli effetti della contaminazione salina.

***Il progetto "Bari città spugna"***. – Episodi ricorrenti di allagamento dovuti all'aumento del ristagno idrico e le conseguenti problematiche ambientali ad esso connesse, a causa di piogge estreme, unitamente a un dissennato consumo di suolo, rappresentano un ostacolo oggettivo allo sviluppo sostenibile di molte città pugliesi e, in particolare, della città di Bari.

Partendo dall'analisi dell'attuale situazione urbana della città di Bari, in termini di rapporto tra superfici permeabili e impermeabili, sono state previste diverse soluzioni infrastrutturali verdi che permettono, in primo luogo, di ridurre il ruscellamento superficiale e allo stesso tempo di aumentare l'infiltrazione nel sottosuolo. Contestualmente, sono state esaminate le condizioni meteorologiche, insieme all'ambiente idrico e alle principali cause del ristagno urbano. A tal riguardo, dal Report n. 32 del Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA - Munafò, 2022) è stato possibile ricavare per la città di Bari una percentuale di suolo consumato al 2021 pari al 43,10% rispetto all'intera superficie comunale, con un rapporto tra superficie vegetata e superficie urbanizzata pari al 47,14% e un consumo di suolo pro capite, nel periodo 2020-2021, di 0,95 m<sup>2</sup>/ab/anno.

Quindi, come caso di studio è stata proposta un'area densamente urbanizzata comprendente i quartieri Libertà, Murat, San Nicola, Picone, Poggiofranco, Carrassi e San Pasquale. L'area è caratterizzata da un quadro geologico relativamente semplice, che nelle sue linee essenziali può essere sintetizzato come segue (Sabato et al., 2010): sui calcari cretacei di piattaforma carbonatica (localmente rappresentati dal "Calcere di Bari"), che costituiscono il substrato dell'intera regione murgiana, poggiano in discordanza le unità plio-pleistoceniche del ciclo della Fossa Bradanica, rappresentate localmente dalla "Calcarene di Gravina" e, in discordanza su tutte le unità più antiche, dalle unità marine e continentali terrazzate del Pleistocene medio-superiore (Fig. 1).

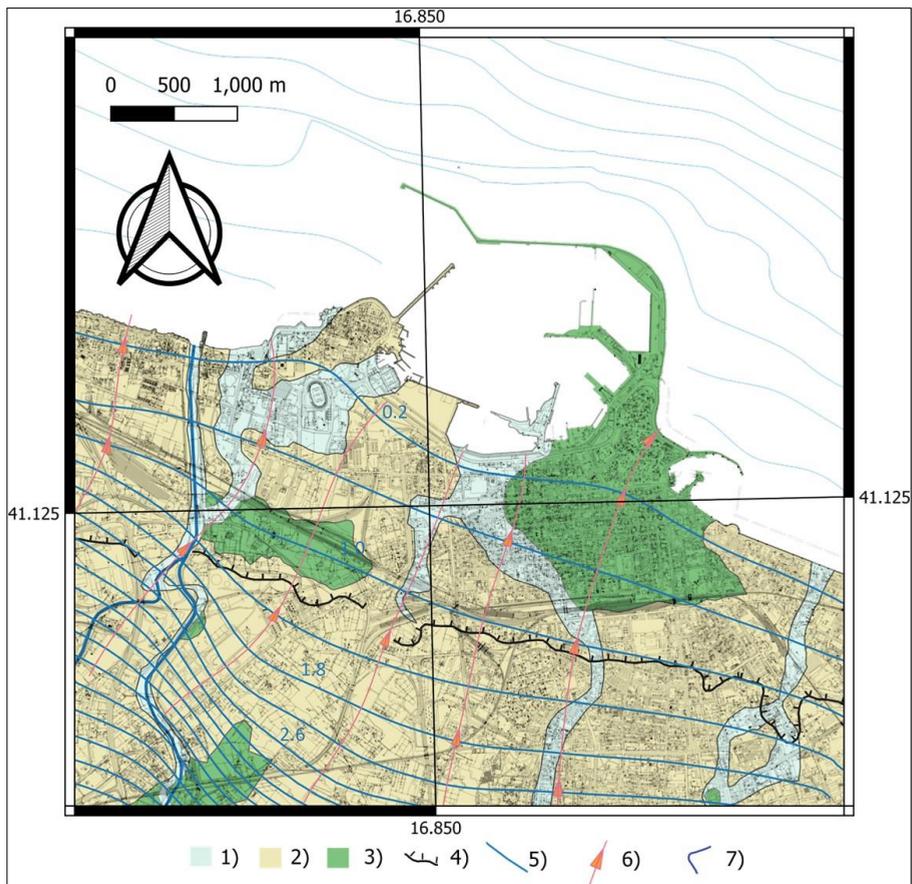


Fig. 1 - Carta geologica schematica dell'area di studio: 1) Depositi alluvionali recenti (Olocene); 2) Formazione della Calcarene di Gravina (Pleistocene Inf.); 3) Formazione del Calcarea di Bari (Cretaceo); 4) Scarpate di terrazzo; 5) Isopiezometriche (m s.l.m.); 6) Linee di flusso della falda idrica superficiale; 7) Reticolo idrografico.

Alla suddivisione dell'area di studio in superficie impermeabilizzata artificialmente relativa al tessuto residenziale, e superficie permeabile, è seguita l'analisi dei caratteri di permeabilità delle formazioni geologiche affioranti ( $k = 10^{-4}$ - $10^{-5}$  m/s). In secondo luogo, sono state proposte soluzioni progettuali per una riqualificazione dei quartieri attraverso una pianificazione sostenibile basata sul concetto dell'equilibrio tra consumo della risorsa - suolo e acqua - la sua tutela e il suo rinnovo. In particolare, questo concetto è ben noto per la risorsa acqua, attraverso il principio dell'invarianza idraulica e idrologica, secondo il quale il deflusso meteorico nelle condizioni post-intervento deve essere identico, in termini sia di portata sia di volumi defluiti, a quello di pre-intervento.

Tra le soluzioni tecniche *SuDS* adottate, ricadono le pavimentazioni drenanti, applicate principalmente a zone di parcheggio, piazzali, parchi e piste ciclabili, in grado di garantire l'infiltrazione efficace delle acque meteoriche, riducendone il carico inquinante, costituito principalmente da sostanze solide sospese (*TSS, total suspended solids*), metalli pesanti e idrocarburi (Li et al., 2017). In totale è stata individuata un'area complessiva di 807.295 m<sup>2</sup>, suddivisibile in parcheggi per 726.391 m<sup>2</sup>, piazze per 74.220 m<sup>2</sup> e piste ciclabili per 6.684 m<sup>2</sup>. Oltre alle pavimentazioni, è stata prevista la realizzazione di tetti marroni con specie autoctone spontanee sugli edifici pubblici esistenti, per una superficie complessiva di 116.000 m<sup>2</sup> (Fig. 2).

Sulla base dei dati termo-pluviometrici relativi all'intervallo temporale 2012-2022, ricavati dal database della Stazione termo-pluviometrica "Bari-Presidenza della Regione", situata a 8,0 m s.l.m. (Ente gestore: Regione Puglia), è stata calcolata l'infiltrazione efficace, utilizzando la procedura suggerita da Rushton et al. (2006), dopo aver determinato il deflusso superficiale con il Metodo del *Curve Number (CN) - Soil Conservation Service (SCS)* (Mishra e Singh, 2003) e l'evapotraspirazione con il *Metodo analitico di Penman-Monteith* (Zotarelli et al., 2010), ipotizzando per l'area di studio 5 classi di uso del suolo. La verifica è stata eseguita nelle condizioni pre-intervento e post-intervento, considerando le opere verdi pianificate da progetto. A valle degli interventi previsti, pertanto, è stata rilevata una riduzione del 4,5% della superficie impermeabile, affiancata da un netto decremento di circa 30% di volume specifico di deflusso superficiale. Di conseguenza, l'incremento dell'infiltrazione efficace nel periodo di riferimento è risultata di circa 28.000 m<sup>3</sup>, così come evidenziato in dettaglio in Figura 3.

Infine, con il modello di calcolo di Bear et al. (1999) è stato valutato l'effetto dell'incremento dell'infiltrazione efficace sullo spostamento del piede del cuneo di intrusione salino del sistema idrico costiero locale. I dati ottenuti dimostrano che l'immissione d'acqua dolce in falda in prossimità della linea di costa tende a ripristinare il naturale equilibrio dell'interfaccia tra acqua dolce e acqua di mare, contenendo gli effetti dell'intrusione salina.

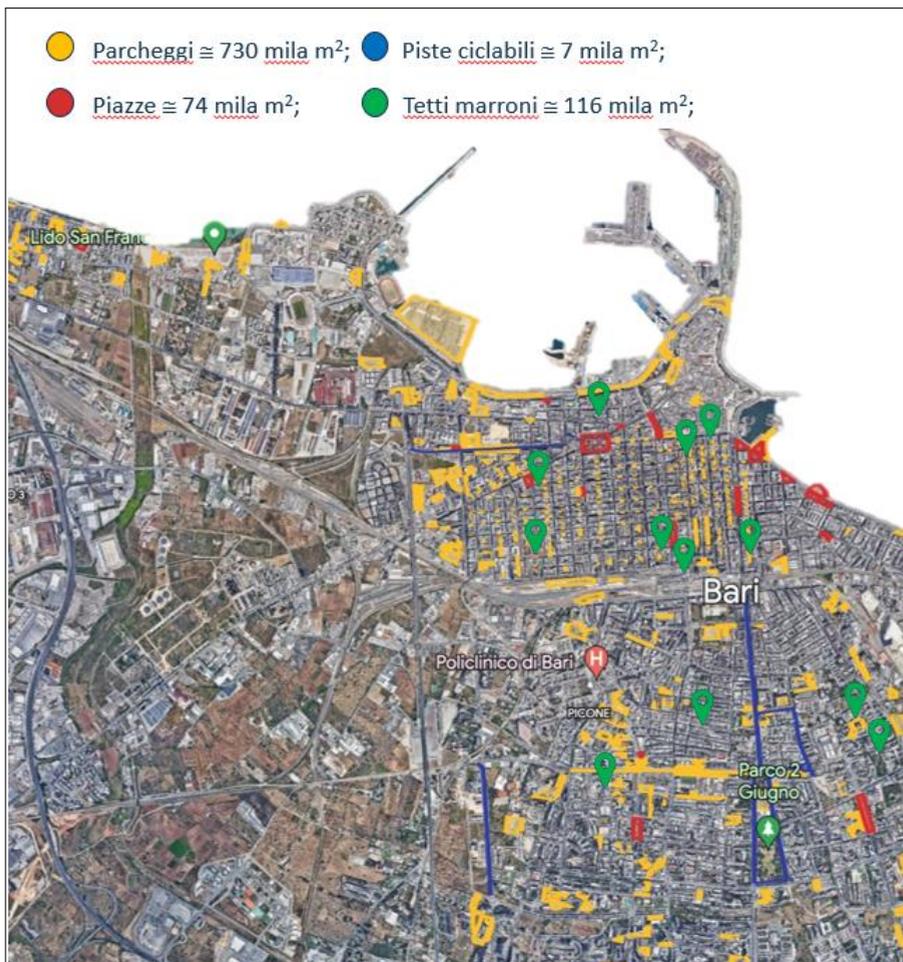
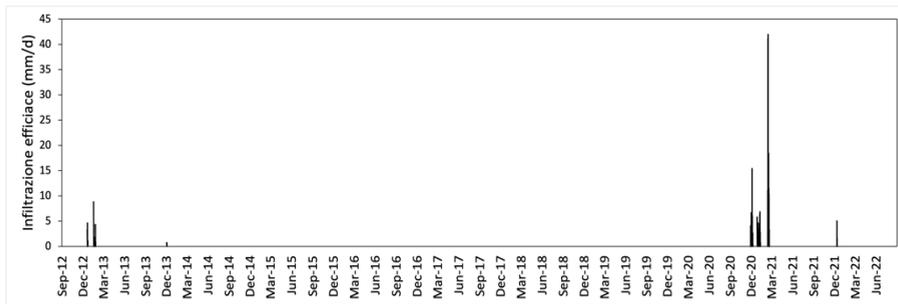
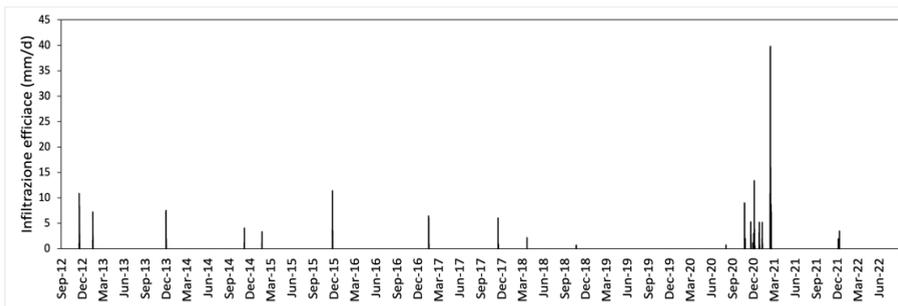


Fig. 2 - Localizzazione delle aree di intervento di pianificazione urbana sostenibile, attraverso soluzioni tecniche SuDS nel territorio di Bari.



(a)



(b)

Fig. 3 - Valori dell'infiltrazione efficace relativi all'area di studio nel periodo settembre 2012- giugno 2022: pre-intervento (a), post-intervento (b).

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- BEAR J., CHENG A., SOREK S., OUAZAR D., HERRERA I., "Seawater Intrusion in Coastal Aquifers - Concepts, Methods and Practices", In "Theory and Applications of Transport in Porous Media series", 1999, 14, Springer Netherlands, doi.org/10.1007/978-94-017-2969-7.
- FURLONG C., BROTHIE R., CONSIDINE R., FINLAYSON G., GUTHRIE L., "Key concepts for Integrated Urban Water Management infrastructure planning: Lessons from Melbourne", Utilities Policy, 45, pp. 84-96, doi.org/10.1016/j.jup.2017.02.004.
- LI H., LI Z., ZHANG X., LI Z., LIU D., LI T., ZHANG Z., "The effect of different surface materials on runoff quality in permeable pavement systems", Environ. Sc. Pollut. Res. Int., 2017, 24, 26, pp. 21103-21110, doi.org/10.1007/s11356-017-9750-6.
- MISHRA S.K., SINGH V.P., "SCS-CN Method", In "Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology", Water Sc. Techn. Libr., 2003, 42, pp. 84-146. Springer, Dordrecht, doi.org/10.1007/978-94-017-0147-1\_2.

- MUNAFÒ M., "Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici", Report Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA) 2022, 32, [https://www.snambiente.it/wp-content/uploads/2022/07/Rapporto\\_consumo\\_di\\_suolo\\_2022.pdf](https://www.snambiente.it/wp-content/uploads/2022/07/Rapporto_consumo_di_suolo_2022.pdf).
- RUSHTON K.R., EILERS V.H.M., CARTER R.C., "Improved soil moisture balance methodology for recharge estimation", *Journ. Hydrol.*, 318, pp. 379-399, [doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.022](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.022).
- SABATO L., TROPEANO M., SPALLUTO L., PIERI P., "Il nuovo Foglio Geologico 438 'Bari' in scala 1:50.000 - Un importante contributo per la conoscenza geologica dell'area metropolitana di Bari", *Geol. Amb.*, 2010, 4, pp. 4-14.
- ZEVENBERGEN C., FU D., PATHIRANA A., "Transitioning to Sponge Cities: Challenges and Opportunities to Address Urban Water Problems in China", *Water*, 2018, 10, 1230, [doi.org/10.3390/w10091230](https://doi.org/10.3390/w10091230).
- ZOTARELLI L., DUKES M.D., ROMERO C.C., MIGLIACCIO K.W., MORGAN K.T., "Step by Step Calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration (FAO-56 Method)", *Inst. Food Agric. Sciences. Univ. Fla.*, 2010, AE459, 1-10, [api.semanticscholar.org/CorpusID:130168866](https://api.semanticscholar.org/CorpusID:130168866).

*Bari sponge city: study of the applicability of SuDS technical solutions in urban areas.*

The SuDS (Sustainable Drainage Systems) represent the most modern and sustainable approach to the management of surface water. Their aim is to reduce the impact of flooding, respecting the environment, water quality and biodiversity. The recurring flooding due to the increase in water stagnation, extreme weather conditions, and land consumption represent an obstacle to the sustainable development of the city of Bari. In the present study the concept of "Sponge city" was applied to Bari, based on the state of the art of green infrastructures. Starting from the analysis of the current urban situation, in terms of the relationship between permeable and impermeable surfaces, infrastructural solutions have been implemented which allow both to reduce runoff and to channel flows underground. At the same time, the weather and climate conditions, the hydrological environment and the main causes of urban stagnation were examined. The result is aimed at creating a more resilient city, able to adapt to climate change and to respond effectively to potentially destructive catastrophic events, but also to minor rainfall events, ensuring safety and livability of the environment through a 53% reduction of runoff. Besides the mitigation of urban stagnation problems, the infiltration systems in the subsoil facilitate the recharge of the aquifers and the rebalancing of the quantitative state of the groundwater by mitigating the effects of saline contamination, particularly present in the Apulian coastal areas.

*Keywords* - resilience, Sustainable Drainage Systems, urban planning, Apulia (Italy).

*“La Dinamica fluviale. La conoscenza del Fiume per la pianificazione e la salvaguardia del territorio”*

a cura di C. Cencetti, L. Di Matteo

*Culture Territori Linguaggi*, 24, 2023, pp. 53-55

ISBN 9788894469783

Nadia CIPRIANI<sup>1</sup>, Silvia RAPICETTA<sup>1</sup>

VALUTAZIONE DEL RISCHIO E DELLA PERICOLOSITÀ  
IDRAULICA NELLA REDAZIONE DELLA CARTA NAZIONALE  
DELLE AREE POTENZIALMENTE IDONEE (CNAPI) PER LA  
LOCALIZZAZIONE DEL DEPOSITO NAZIONALE DEI RIFIUTI  
RADIOATTIVI

**Riassunto.** – La normativa italiana vigente prevede la realizzazione di un deposito nazionale destinato allo smaltimento a titolo definitivo dei rifiuti radioattivi a bassa e media attività, derivanti da attività industriali, di ricerca e medico-sanitarie e dalla pregressa gestione di impianti nucleari, e all’immagazzinamento, a titolo provvisorio di lunga durata, dei rifiuti ad alta attività e del combustibile irraggiato provenienti dalla pregressa gestione di impianti nucleari.

I criteri per la localizzazione del suddetto deposito sono stati fissati dalla Guida Tecnica n. 29 dell’ISPRA (ora ISIN) e sono finalizzati a garantire il confinamento e l’isolamento dei radionuclidi dalla biosfera, così da assicurare nel tempo la protezione della popolazione e la tutela dell’ambiente. Nella suddetta Guida Tecnica particolare importanza viene data alle caratteristiche geologico-ambientali del sito.

Nel caso di studio in esame, relativo alla prima fase della localizzazione del deposito nazionale dei rifiuti radioattivi italiano, vengono analizzati i criteri di valutazione di rischio e di pericolosità idraulica per la localizzazione del deposito nazionale secondo la Guida Tecnica n. 29 dell’ISPRA (Fig. 1) e viene fatta una comparazione con gli studi realizzati in altri Paesi per la localizzazione di analoghi impianti di smaltimento.

---

<sup>1</sup> ISIN – Ispettorato Nazionale per la sicurezza nucleare e la radioprotezione, Roma, [silvia.rapicetta@isinucleare.it](mailto:silvia.rapicetta@isinucleare.it)

**CE4. caratterizzate da rischio e/o pericolosità geomorfologica e/o idraulica di qualsiasi grado e le fasce fluviali**

*Per valutare il rischio di frane e di inondazioni sono da prendere in considerazione le aree a rischio e/o pericolosità geomorfologica e/o idraulica di qualsiasi grado (da moderato a molto elevato) e le fasce fluviali A, B e C indicate nei Piani di Assetto Idrogeologico (PAI), nonché le aree catalogate nell'Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia (IFFI).*

**CE5. contraddistinte dalla presenza di depositi alluvionali di età olocenica**

*Queste zone sono caratterizzate dalla presenza di depositi alluvionali messi in posto dalla dinamica fluviale durante l'Olocene. L'esclusione di tali aree è un ulteriore elemento precauzionale per la minimizzazione del rischio idraulico.*

**CE10. caratterizzate da livelli piezometrici affioranti o che, comunque, possano interferire con le strutture di fondazione del deposito**

*La prossimità di acque del sottosuolo, nelle loro variazioni di livello stagionali e non stagionali conosciute, può ridurre il grado di isolamento del deposito e favorire fenomeni di trasferimento di radionuclidi verso la biosfera. Per lo stesso motivo sono da escludere le aree con presenza di sorgenti e di opere di presa di acquedotti.*

**CA4. presenza di bacini imbriferi di tipo endoreico**

*Questi bacini chiusi non presentano emissari e costituiscono un punto di convergenza per il drenaggio del reticolo idrografico superficiale. A seguito di intense e prolungate precipitazioni i punti più depressi del bacino endoreico possono essere soggetti a fenomeni di stagnazione delle acque. Ci si riferisce a fenomeni non già evidenziati nell'applicazione del criterio CE4.*

**CA8. parametri idrogeologici**

- (a) distanza dei livelli piezometrici dal piano di campagna e dalle strutture di fondazione del deposito e loro fluttuazioni periodiche, stagionali e non stagionali;*
- (b) distanza da sorgenti e da altri punti di captazione idrica;*
- (c) caratteristiche di conducibilità idraulica degli acquiferi, comprendenti la quota dei tetti e dei letti degli acquiferi e degli acquicludi, la loro estensione laterale e i loro coefficienti di permeabilità e di immagazzinamento;*
- (d) gradiente idraulico medio dell'area e velocità del flusso sotterraneo;*
- (e) valore dell'infiltrazione efficace;*
- (f) estensione delle superfici di ricarica degli acquiferi e loro distanza dall'area in valutazione;*
- (g) utilizzo delle acque per usi legati all'alimentazione umana diretta o indiretta;*
- (h) grado di complessità e possibilità di modellizzazione del sistema acquifero.*

*Ci si riferisce anche a fenomeni e parametri non già valutati nell'applicazione del criterio CE10.*

**CA9. parametri chimici del terreno e delle acque di falda**

*Alcune caratteristiche, ad esempio capacità di scambio cationico, presenza di sostanza organica, presenza di ossidi/idrossidi di Fe, Mn e Al, ecc. offrono indicazioni sull'efficacia del terreno nel limitare il trasferimento dei radionuclidi nelle acque di falda. Altre caratteristiche potrebbero, al contrario, determinare fenomeni di degrado delle strutture del deposito.*

Fig. 1 - Criteri di Esclusione (CE) e Criteri di Approfondimento (CA) relativi al rischio e alla pericolosità idraulica presenti nella Guida Tecnica 29 dell'ISPRA.

*Evaluation of hydraulic hazard and risk in the National Chart of Potentially Eligible Areas (CNAPI) for the radioactive waste National Repository siting.*

Italian legislation in force provides for the construction of a National Repository for the disposal of low - and medium - activity radioactive waste, deriving from industrial, research and medical-health activities and from the previous operation of nuclear installations, and for the long-term storage of high activity radioactive waste and spent fuel from the previous operation of nuclear power plants. The siting criteria for the National Repository have been established by the Technical Guide n. 29 of ISPRA (now ISIN) and they are aimed at guaranteeing the confinement and isolation of radionuclides from the biosphere, so as to ensure the protection of the population and the environment. In the aforementioned Technical Guide, particular importance is given to the geological and environmental characteristics of the site. In the case study, relating to the first phase of the Italian National Repository siting, the hydraulic hazard and risk assessment criteria for the siting are analysed, according to Technical Guide no. 29 of ISPRA, and a comparison is made with the studies carried out in other Countries for the siting of similar disposal facilities.

*Keywords* - National Repository siting, radioactive waste, hydraulic hazard and risk.

*“La Dinamica fluviale. La conoscenza del Fiume per la pianificazione e la salvaguardia del territorio”*

a cura di C. Cencetti, L. Di Matteo

*Culture Territori Linguaggi*, 24, 2023, pp. 56-59

ISBN 9788894469783

Francesco COMITI<sup>1</sup>

## QUANTO SEDIMENTO TRASPORTA AL FONDO UN TORRENTE, E QUANDO? L'INSOSTITUIBILE NECESSITÀ DEL MONITORAGGIO

**Riassunto.** – I processi di trasporto solido (al fondo e in sospensione) nei corsi d'acqua sono caratterizzati da un'elevata variabilità spaziale e temporale su diverse scale spaziali e temporali. In particolare, il trasporto solido al fondo nei corsi d'acqua montani presenta una complessità e una variabilità estrema dovuta a diversi fattori, tra i quali: l'interazione tra clasti di dimensioni molto diverse; la notevole dissipazione energetica dovuta alle macroscabrezze in alveo, alle forme di fondo, alla vegetazione spondale e al materiale legnoso di grandi dimensioni; infine, e soprattutto, la forte dipendenza del trasporto solido dai processi di alimentazione solida a monte e nel tratto stesso, ovvero dalla variazione nella disponibilità dei sedimenti trasportabili ad opera di fenomeni esogeni, quali apporti di tributari e dai versanti (tramite frane e colate detritiche) e all'apporto solido derivante dal deflusso glaciale.

Allo stato attuale non esiste - almeno a conoscenza dell'autore - un modello numerico capace di descrivere adeguatamente i processi sopra descritti e di prevedere in modo accurato e fisicamente basato i tassi di trasporto solido al fondo in un corso d'acqua montano. In realtà, è lecita la domanda se mai si potrà raggiungere un grado di accuratezza soddisfacente, magari paragonabile a quello dei modelli idrologici. Questo a causa dell'enorme incertezza, di natura epistemica, riguardante le condizioni al contorno e iniziali sedimentarie di un bacino idrografico, che risulta composto da un numero elevatissimo di elementi interagenti, dei quali in pratica non si potrà mai avere una conoscenza completa. In aggiunta a ciò, anche qualora un tale

---

<sup>1</sup> *Facoltà di Scienze agrarie, ambientali e alimentari, Libera Università di Bolzano, Bolzano, Francesco. Comiti@unibz.it*

modello venisse realizzato e avessimo, per via del tutto ipotetica, una conoscenza perfetta di tutti i suoi componenti, non sarebbero disponibili che pochissimi dati di trasporto solido al fondo, raccolti in corsi d'acqua reali sui quali validare il modello. È chiaro, infatti, come la validazione di un modello numerico tramite dati raccolti in laboratorio è senz'altro utile, ma non sufficiente a ritenerlo affidabile al fine di prevedere i processi che avvengono nel mondo reale, che sono quelli che vogliamo conoscere e gestire in ultima istanza.

Infatti, nonostante la fondamentale rilevanza del trasporto solido al fondo nella dinamica fluviale, per quanto riguarda sia i processi idromorfologici/ecologici che di pericolosità idraulica, le attività di monitoraggio per comprenderne i tassi e i volumi complessivi a diverse scale temporali sono ancora oggi estremamente scarsi, sia a livello mondiale che italiano. Risulta pertanto ancora più rilevante ricordare l'apporto pionieristico su questo fronte fornito dal Prof. Tacconi e dai suoi colleghi negli anni '80 del secolo scorso, un periodo "d'oro", che ha visto la creazione di diverse stazioni sperimentali per la misura del trasporto solido al fondo, delle quali sfortunatamente solo pochissime risultano ancora in funzione. A livello internazionale, dopo un lungo periodo di stasi nelle attività di monitoraggio, si è assistito a partire dagli anni '10 del presente secolo a un incrementato impegno, da parte di enti di ricerca e agenzie pubbliche, nella misura del trasporto solido, soprattutto nei corsi d'acqua alpini. Tuttavia, i dati finora disponibili non sono sicuramente in grado di descrivere la varietà dei regimi di trasporto solido presenti in Italia, anche solo a una scala regionale, ed è pertanto auspicabile che nuove iniziative di monitoraggio, seppur condotte in modo "semplificato", vengano intraprese utilizzando gli avanzamenti tecnologici degli ultimi anni.

Se, da un lato, non è possibile monitorare il trasporto solido in tutti i corsi d'acqua potenzialmente di interesse a scala nazionale, è altrettanto erraneo volerlo stimare tramite l'utilizzo di modelli, di qualsiasi natura, non adeguatamente calibrati e validati su dati acquisiti in contesti idromorfologicamente simili e per durate significative.

In conclusione, il monitoraggio del trasporto solido al fondo è e rimarrà anche nel futuro fondamentale, sia per la conoscenza dettagliata dei processi in atto in un bacino idrografico specifico, sia per sviluppare e applicare modelli previsionali; questi ultimi, tuttavia, sono e rimarranno necessari per quantificare e prevedere tassi e volumi solidi trasportati su scale spaziali e temporali estese, includendo anche gli effetti che il cambiamento climatico in atto potrà avere sulla dinamica fluviale futura.

*How much bedload sediment does a stream transport, and when? The irreplaceable need for monitoring.*

Sediment transport processes (bedload and suspended) in rivers are characterized by a high spatial and temporal variability on different spatial and temporal scales. In particular, bedload

transport in mountain streams presents an extreme complexity and variability due to various factors, including: the interaction between clasts of very different sizes; the considerable energy dissipation due to the macro-roughnesses in the riverbed, the bottom forms, the bank vegetation and the large-sized woody material; finally, and above all, the strong dependence of sediment transport on solid feed processes upstream and in the stretch itself, or on the variation in the availability of transportable sediments due to exogenous phenomena, such as inputs from tributaries and from slopes (through landslides and debris flows ) and solids input from glacial flow. At present, there is no numerical model - at least to the knowledge of the author - capable of adequately describing the processes described above and of accurately and physically based prediction of bedload transport rates in a mountain stream. In reality, the question whether it will ever be possible to reach a satisfactory degree of accuracy, perhaps comparable to that of hydrological models, is legitimate. This is due to the enormous uncertainty, of an epistemic nature, concerning the boundary and initial sedimentary conditions of a hydrographic basin, which is composed of a very high number of interacting elements, of which in practice it will never be possible to have complete knowledge. In addition, even if such a model were created and we had, hypothetically, a perfect knowledge of all its components, only very few bedload transport data would be available, collected in real streams on the which to validate the model. Indeed, it is clear that the validation of a numerical model using data collected in the laboratory is certainly useful, but not sufficient to consider it reliable in order to predict the processes that take place in the real world, which are the ones we want to know and manage at the end. In fact, despite the fundamental importance of sediment transport to the bottom in fluvial dynamics, as regards both hydromorphological/ecological processes and hydraulic hazards, monitoring activities to understand their rates and overall volumes at different time scales are still extremely scarce today, both worldwide and in Italy. It is therefore even more relevant to recall the pioneering contribution on this front provided by Prof. Tacconi and his colleagues in the 80s of the last century, a "golden" period, which saw the creation of various experimental stations for measuring of bedload transport, of which unfortunately only very few are still in operation. At an international level, after a long period of stagnation in monitoring activities, starting from the 10s of the present century there has been an increased commitment by research institutions and public agencies, in the measurement of solid transport, especially in alpine streams. However, the data available so far are certainly not able to describe the variety of solid transport regimes present in Italy, even only on a regional scale, and it is therefore desirable that new monitoring initiatives, albeit conducted in a "simplified" way, are undertaken using the technological advances of recent years. If, on the one hand, it is not possible to monitor sediment transport in all rivers potentially of interest on a national scale, it is equally erroneous to want to estimate it through the use of models, of any

nature, that are not adequately calibrated and validated on data acquired in hydromorphologically similar contexts and for significant durations. In conclusion, monitoring bedload transport is and will remain fundamental also in the future, both for the detailed knowledge of the current processes in a specific hydrographic basin, and for developing and applying forecasting models; however, the latter are and will remain necessary to quantify and predict rates and solid volumes transported on extended spatial and temporal scales, also including the effects that ongoing climate change may have on future fluvial dynamics.

*Keywords* - solid transport, bedload monitoring, hydrological models' limitations.

*“La Dinamica fluviale. La conoscenza del Fiume per la pianificazione e la salvaguardia del territorio”*

a cura di C. Cencetti, L. Di Matteo

*Culture Territori Linguaggi*, 24, 2023, pp. 60-64

ISBN 9788894469783

Massimo CONFORTI<sup>1</sup>, Luigi BORRELLI<sup>1</sup>, Michele MERCURI<sup>1</sup>,  
Giuseppe CIANFLONE<sup>2</sup>, Fabio IETTO<sup>2</sup>

## ANALISI DELLE CARATTERISTICHE GEOMORFOLOGICHE E DELLE CONDIZIONI DI RISCHIO DELLA FRANA NEL T. STRA- FACE NEL COMUNE DI AMENDOLARA (CALABRIA)

**Introduzione.** – La Calabria, sin da tempi storici, è considerata un’area ad alto rischio idrogeologico a causa delle sue peculiari caratteristiche geologiche, geomorfologiche, sismiche e climatiche. L’identificazione delle aree a rischio per cause geomorfologiche rappresenta uno dei principali temi di ricerca per gli scienziati di tutto il mondo, soprattutto in considerazione degli attuali cambiamenti climatici che sono spesso causa di una intensificazione di fenomeni calamitosi. Tra questi, il problema di eventi franosi che interferiscono con gli alvei fluviali rappresenta una questione complessa e di grande interesse, principalmente per quel che riguarda la possibilità di occlusione dell’alveo ed eventuali conseguenti danni agli insediamenti urbani e alle infrastrutture limitrofe. In tale prospettiva, l’identificazione e la caratterizzazione dei possibili fenomeni franosi in alveo rappresenta un importante punto di partenza nella corretta gestione del rischio da frana.

Partendo da questo presupposto, il presente lavoro di ricerca si prefigge di analizzare le caratteristiche geomorfologiche e l’evoluzione spazio-temporale della frana del Vomice, localizzata sulla sponda destra del T. Straface nel comune di Amendolara in provincia di Cosenza (Italia meridionale).

---

<sup>1</sup> *Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica (IRPI), Rende (CS)*

<sup>2</sup> *Dipartimento di Biologia, Ecologia e Scienze della Terra (DiBEST), Università degli Studi della Calabria, Arcavacata di Rende (CS), fabio.ietto@unical.it*

**Caratteristiche geologiche e franosità dell'area.** – L'area di studio si colloca nel settore ionico della Calabria settentrionale, particolarmente coinvolta in diffusi fenomeni d'instabilità di versante. Dal punto di vista geologico l'area si pone tra le Unità esterne della Catena Appenninica e i domini cristallino-metamorfici più interni dell'Arco Calabro. In particolare, l'area interessata dal dissesto è dominata da argille varicolori fortemente tettonizzate con sottili intercalazioni di calcari con selce e radiolariti di colore dal verde scuro al rossastro. Le caratteristiche litotecniche di questo affioramento si presentano particolarmente scadenti, con basso grado di permeabilità e alta erodibilità. Al di sopra dell'area di alimentazione della frana studiata affiorano, in contatto tettonico, rocce torbiditiche (costituite da calcari con selce, calcareniti, livelli di selce nere) e sottili intercalazioni pelitiche attribuite alla formazione del Saraceno. La linea di contatto tra questi litotipi a diverso grado di permeabilità è marcata da un allineamento di numerose emergenze sorgentizie che testimoniano l'elevato accumulo idrico sotterraneo proveniente dalla successione torbiditica a monte. Pertanto, scadente qualità meccanica dei litotipi ed elevata presenza di accumuli idrici rappresentano le principali cause d'innesco dei diffusi fenomeni gravitativi presenti nell'area.

**La frana del Vomice.** – Il fenomeno franoso oggetto di studio è classificabile come colata e si sviluppa a un'altitudine compresa tra 490 e 160 m. s.l.m., con pendenze variabili da 0° a 52.5° e con valori medi di 16.5°. Attualmente la frana interessa un'area pari a 4.36 x 10<sup>5</sup> m<sup>2</sup> ed ha una lunghezza massima di 1.87 x 10<sup>3</sup> m. All'interno dell'area coinvolta dal dissesto è possibile riconoscere una zona di alimentazione, composta da due distinte aree sorgenti, una zona di trasporto stretta e allungata e una zona di accumulo con forma lobata. Le aree sorgenti, verso valle, confluiscono lungo un'unica direttrice all'interno del canale del Vomice, generando una colata detritica che termina nel T. Straface (Fig. 1). Tale torrente presenta le tipiche caratteristiche idrologiche delle fiumare calabresi, caratterizzate da ampi greti costituiti da depositi alluvionali mal classati. Tali sistemi di drenaggio presentano, inoltre, una grande capacità erosiva e di trasporto solido durante le improvvise piene che si alternano a periodi di lunga siccità in alvei completamente asciutti. L'intera area di alimentazione della colata si sviluppa lungo una direttrice orientata NE-SO e presenta una larghezza massima di oltre 350 m e una lunghezza di circa 700 m. L'area risulta dominata dalla caotica presenza di scorrimenti rototraslativi multipli (Fig. 2) e diffusi crolli di terra, in grado di mobilitare ingenti volumi di detrito che alimentano la colata nella porzione valliva. Presenza di terrazzi e scarpate in contropendenza, zone rigonfiate, depressioni e diversi sistemi di fratture caratterizzano altresì entrambe le aree di alimentazione.

L'analisi di dettaglio dell'evoluzione geomorfologica, eseguita tramite la comparazione di carte topografiche e ortofoto dal 1954 al 2022, ha evidenziato importanti variazioni spaziali e

temporali delle aree sorgenti. In particolare, l'arretramento della corona ha raggiunto valori massimi dell'ordine dei 250 m, con tassi medi annui di circa 3 m/anno.



Fig. 1 - Vista frontale della colata principale alla confluenza con il T. Straface.



Fig. 2 - Il fianco destro dell'area di alimentazione della frana del Vomice.

Anche l'espansione laterale ha mostrato valori importanti, dell'ordine dei 100 m, mentre il fronte della colata ha subito un avanzamento di circa 200 m. A livello areale, le analisi effettuate hanno mostrato un aumento della superficie di frana da  $2,51 \times 10^5 \text{ m}^2$  nel 1954 a  $4,36 \times 10^5 \text{ m}^2$  nel 2022, evidenziando che l'area di frana ha subito un'espansione areale superiore al 42%.

Le indagini sul campo hanno inoltre consentito il riconoscimento di numerose fratture beanti e trincee aventi profondità fino a 2 m, testimoniando che il fenomeno di dissesto è attivo e in continua evoluzione. L'estensione, da monte verso valle, dell'intero fenomeno di dissesto è di circa 1950 m e lo spessore del deposito di colata, osservato lungo i fianchi del canale, raggiunge circa 12 m. L'accumulo terminale della colata si estende fino alla sponda destra del greto del T. Straface le cui acque, nei periodi di piena, ne modellano ed erodono la geometria lobata. Tale processo genera quindi un ingente apporto sedimentario in alveo che potrebbe causare possibili occlusioni del deflusso naturale delle acque, con conseguenti fenomeni di esondazione in prossimità dei restringimenti d'alveo presenti in corrispondenza dei sottopassi stradali e ferroviari.

Il caso di studio si prefigge, quindi, di evidenziare ulteriormente la forte necessità di implementare gli studi sull'interazione tra fenomeni di dissesto e alvei fluviali al fine di una migliore gestione delle condizioni di rischio e garantire una fruibilità sicura dei territori.

*Analysis of the geomorphological characteristics and risk conditions of the landslide in the Straface stream in the municipality of Amendolara (Calabria).*

The note aims to analyze the geomorphological characteristics and the spatio-temporal evolution of the Vomice landslide, located on the right bank of the Straface stream in the municipality of Amendolara in the province of Cosenza (Southern Italy). The landslide area is dominated by highly tectonized multi-coloured clays with thin intercalations of limestones with flint and radiolarites of a dark green to reddish colour. The lithotechnical characteristics of this outcrop are particularly poor, with a low degree of permeability and high erodibility. Above the feeding area of the landslide, turbiditic rocks emerge, in tectonic contact (limestones with flint, calcarenites, levels of black flint) and thin pelitic intercalations attributed to the Saraceno formation. The line of contact between these lithotypes with different degrees of permeability is marked by an alignment of numerous spring emergencies which testify to the high underground water accumulation coming from the upstream turbidite succession. Therefore, the poor mechanical quality of the lithotypes and the high presence of water accumulations are the main triggering causes of the widespread gravitational phenomena present in the area. The landslide can be classified as debris flow over an area of  $4.36 \times 10^5 \text{ m}^2$  and has a maximum length of  $1.87 \times 10^3 \text{ m}$ . Within the area affected by the instability, it is possible to recognize a feeding area, composed of two distinct source areas, a narrow and elongated transport area and a lobed accumulation area. The source areas, towards the valley, converge along a single direction within the Vomice canal, generating a debris flow that ends in the Straface stream. The analysis of the geomorphological evolution, performed through

the comparison of topographic maps and orthophotos from 1954 to 2022, highlighted important spatial and temporal variations of the source areas: the retreat of the crown has reached maximum values of the order of 250 m, with average annual rates of about 3 m/year. Lateral expansion also showed important values, in the order of 100 m, while the front of the flow underwent an advance of about 200 m, with an increase in the landslide area from  $2.51 \times 10^5 \text{ m}^2$  in 1954 to  $4.36 \times 10^5 \text{ m}^2$  in 2022, highlighting that the landslide area underwent an areal expansion of more than 42%. The accumulation of the flow extends up to the right bank of the riverbed of the Straface stream whose waters, during the flood periods, shape and erode its lobed geometry. This process therefore generates a huge sedimentary contribution to the riverbed which could cause possible blockages in the natural outflow of the water, with consequent flooding phenomena near the narrowing of the riverbed present in correspondence with the road and railway underpasses.

*Keywords* - landslides geomorphological evolution, Straface River, southern Apennines.

*“La Dinamica fluviale. La conoscenza del Fiume per la pianificazione e la salvaguardia del territorio”*

a cura di C. Cencetti, L. Di Matteo

*Culture Territori Linguaggi*, 24, 2023, pp. 65-82

ISBN 9788894469783

Valentino DEMURTAS<sup>1</sup>, Giacomo DEIANA<sup>1,2</sup>, Antonietta MELEDDU<sup>2</sup>,  
Marco MELIS<sup>3</sup>, Paolo Emanuele ORRÙ<sup>1,2</sup>, Andrea SULIS<sup>1,4</sup>, Gabriele URAS<sup>1,5</sup>

## ANALISI IDRO-GEOMORFOLOGICA DI BACINO FINALIZZATA ALLA REDAZIONE DEL PIANO GESTIONE SEDIMENTI DELLA REGIONE SARDEGNA: IL CASO STUDIO DEL RIO GEREMEAS

**Introduzione.** – Il lavoro presenta il progetto interdisciplinare di analisi idro-morfologica predisposta dall'ADIS (Agenzia Regionale del Distretto Idrografico della Sardegna) e dal CINSA (Centro Interdipartimentale di Ingegneria e Scienze Ambientali dell'Università di Cagliari) nell'ambito del Programma di gestione dei sedimenti (PGS) della Regione Autonoma della Sardegna, al fine di integrare un quadro conoscitivo utile per una migliore gestione e pianificazione degli ambiti fluviali e per la mitigazione del Rischio idro-geologico.

In particolare verranno sviluppate: elaborazioni geomorfologiche sul bacino idrografico; elaborazioni morfometriche in applicazione della metodologia IDRAIM (IQM, Indice di Qualità Morfologica e IDM, Indici di Dinamica Morfologica); caratterizzazione dei sedimenti fluviali (granulometria, petrografia/mineralogia); valutazione dello stato fito e zoo-ecologico del corso d'acqua; elaborazione del modello integrato ID e stime di portata solida potenziale; valutazione preliminare dei livelli di artificializzazione dell'alveo; applicazione finale su un ba-

---

<sup>1</sup> *Centro Interdipartimentale di Ingegneria e Scienze Ambientali (CINSA), Università di Cagliari, Cagliari, valentino.demurtas@unica.it*

<sup>2</sup> *Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche (DSCG), Università di Cagliari, Monserrato (CA)*

<sup>3</sup> *Direzione Generale Agenzia Regionale del Distretto Idrografico della Sardegna, Cagliari*

<sup>4</sup> *Dipartimento di Architettura, Design e Urbanistica, Università di Sassari, Sassari*

<sup>5</sup> *Dipartimento di Ingegneria civile, ambientale e architettura (DICAAR), Università di Cagliari, Cagliari*

cino pilota del modello integrato 2D; mappatura della portata solida; valutazione dei livelli di artificializzazione; formulazione di ipotesi gestionali di rinaturazione morfologica degli alvei in relazione alla mitigazione della pericolosità idraulica.

L'area di prima applicazione della metodologia interessa il bacino idrografico pilota del Rio Geremeas nella Sardegna sud-orientale. In quest'area l'assetto geologico è caratterizzato da un substrato a granitoidi differenziati articolato da un fitto corteo filoniano, con modeste coperture rappresentate da depositi gravitativi di versante e da depositi alluvionali.

Una fase attualmente in corso è basata sulla raccolta e sull'analisi critica degli studi e delle pianificazioni regionali esistenti (PGRA, PAI, IFFI, PSFF, etc.) che contribuiscono al popolamento di un GIS (geodatabase; DTM cell. 1 m; *land cover*; infrastrutture; etc.).

Successivamente è stata eseguita la caratterizzazione geologica, geomorfologica e sedimentologia di dettaglio del bacino idrografico del Rio Geremeas, partendo dall'analisi di instabilità potenziale dei versanti, dalla mappatura delle aree sorgente e la ricostruzione degli eventi estremi con particolare riferimento alle colate rapide di detrito.

L'analisi è stata eseguita attraverso metodi di telerilevamento (analisi storica di foto aeree, immagini satellitari, LiDAR), rilievi topografici ad alta risoluzione con drone e GNSS, e da un'intensa attività di rilevamento geologico e geomorfologico sul terreno. Dai rilievi morfotopografici multitemporali di gran dettaglio sono attese le indicazioni evolutive del corso d'acqua e l'interferenza delle opere presenti con la dinamica fluviale.

**L'area di studio.** – Il bacino del Rio Geremeas (Tab. 1) è impostato su un basamento granitico e drena le acque della parte meridionale del massiccio del Sarrabus, nel settore orientale della Sardegna meridionale; si sviluppa in direzione N-S perpendicolarmente alla linea di costa e sfocia in prossimità dell'area urbana di Geremeas.

Parametri morfometrici	Valori
Superficie del bacino (km <sup>2</sup> )	63,8
Hmax: quota massima (m s.l.m.)	1014
Hm: quota media (m s.l.m.)	434
Hmin: quota minima (m s.l.m.)	0
L: lunghezza dell'asta principale (km)	22

Tab. 1 - *Principali parametri dimensionali del bacino idrografico del Rio Geremeas.*

La morfologia dei corsi d'acqua presenti nella parte alta del bacino è condizionata dalla forte interconnessione tra processi fluviali e di versante. Le dinamiche geomorfologiche che

interessano il settore costiero sono strettamente connesse con quelle che interessano le zone più interne. Durante i periodi di piena i processi di dilavamento dei versanti e di deflusso dei torrenti agevolano il trasporto di un'ingente quantità di frazione solida a valle, con uno sversamento della stessa a mare. I versanti hanno un andamento per lo più acclive, con pareti rocciose scoscese e talvolta subverticali. Le parti sommitali dei versanti del settore più settentrionale del bacino sono dominate da morfologie residuali a *inselberge* Tor.

Il substrato geologico-strutturale dell'area è costituito dal basamento granitoide di età ercinica, caratterizzato da granodioriti e monzograniti (Fig 1), iniettate da corpi filoniani acidi e basici, estesi prevalentemente in direzione NO-SE. I versanti che degradano verso il settore costiero sono caratterizzati dalle tipiche morfologie granitiche, in cui affioramenti litoidi ad elevato gradiente di pendenza si alternano a valli incise sui principali lineamenti tettonici.

***Materiali e metodi.*** – Il lavoro prevede un'analisi del bacino idrografico del Rio Geremeas, con particolare riferimento ai processi fluviali e di versante.

Una prima fase prevede la raccolta dei dati e degli studi di settore esistenti, finalizzati a una conoscenza geologica e geomorfologica multiscala. I dati esistenti sono raccolti e gestiti tramite un geodatabase in ambiente GIS.

La seconda fase prevede un'attività di rilievi geologici e geomorfologici sul campo affiancati da telerilevamento. Lo studio geologico ha lo scopo di ricostruire l'assetto stratigrafico e strutturale del bacino, con particolare riguardo alle unità quaternarie, quali depositi di versante, depositi di frana, depositi alluvionali ecc., mentre lo studio geomorfologico è stato eseguito con lo scopo di analizzare e definire i processi dominanti nell'evoluzione dei versanti e del sistema fluviale.

I dati sono riassunti e rappresentati attraverso una cartografia geomorfologica digitale di elevato dettaglio e accuratezza.

***Il Geodatabase.*** – In Tabella 2 è presentata la tipologia dei dati preliminari utilizzati. Tale database sarà incrementato da dati digitali di nuova realizzazione sulla base delle acquisizioni del presente progetto.

***Rilievi geomorfologici di terreno.*** – I rilievi in campo sono eseguiti mediante il metodo dell'analisi degli affioramenti e delle forme, analisi stratigrafiche e campionamenti di rocce e sedimenti. Lo scopo è quello di cartografare i limiti stratigrafici delle varie unità, di descrivere gli affioramenti principali e di acquisire dati fotografici, giaciture e campionamento sia dei substrati rocciosi che dei depositi incoerenti.

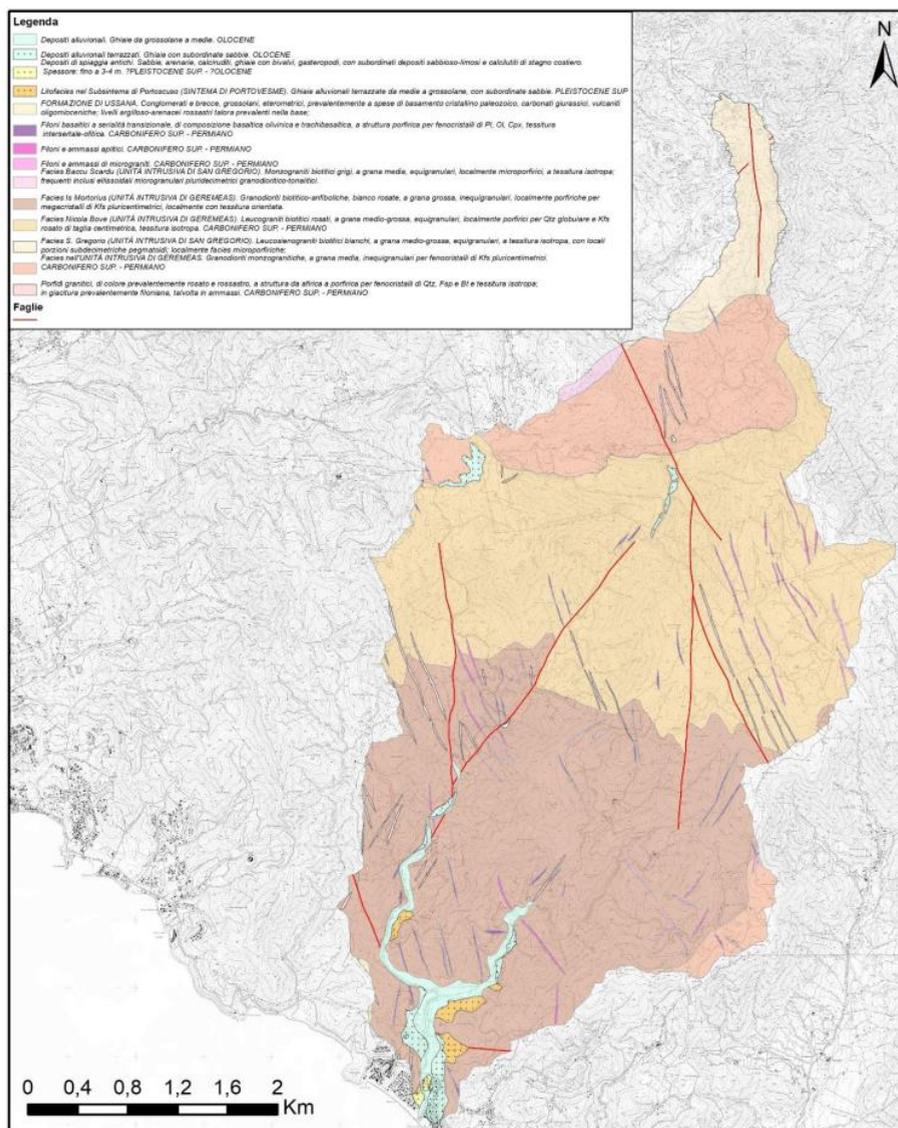


Fig. 1 - Carta geologica del bacino idrografico del Rio Geremeas. Da dati geologici della Carta Geologica della Regione Autonoma della Sardegna, in scala 1:25.000.

Dati	Anno	Risoluzione	Informazioni
Ortofoto	storiche	1÷2 m-px	Variazioni morfologiche, vegetazione, infrastrutture
	2006	1 x 1 m-px	
	2008	0,2 x 0,2 m-px	
	2016	0,2 x 0,2 m-px	
	2019	0,2 x 0,2 m-px	
DTM	1998 (base volo CTR)	10 m	Morfologia
	2008	1 m	
Cartografia IGM storica	Tali dati provengono da diverse fonti e sono riferibili a diversi anni di acquisizione dei dati e con scale di restituzione differenti		
Cartografia CTR			
Cartografia geologica			
Carta uso del suolo			
Idrografia			
Carta della permeabilità			
Pubblicazioni scientifiche			
Distribuzione infrastrutture			
Pianificazioni regionali (PGRA, PAI, IFFI, PSFF, etc.)			

Tab. 2 - *Principali caratteristiche dei dati utilizzati.*

L'attività prevede di rilevare e documentare tutti quei processi che contribuiscono alla produzione di sedimenti dai versanti e al loro trasporto sino all'alveo. La connettività del sedimento, definita come il grado di connessione dei flussi di sedimento all'interno di un territorio, e in particolare tra le sorgenti e le aree a valle, è un parametro chiave nello studio dei processi di trasferimento nei bacini idrografici, a partire dalle aree sorgenti di sedimento. La caratterizzazione spaziale dei *pattern* di connettività in un bacino consente di stimare il contributo di una determinata parte dello stesso come sorgente di sedimento e di definirne i potenziali percorsi di trasferimento verso valle. In particolare, la determinazione della connettività risulta importante nei bacini in cui la variabilità dei processi di trasporto è determinata dalla morfologia e dall'eterogeneità di tipologia, estensione e posizione delle aree sorgenti di sedimento. L'indice consente di determinare la connettività del sedimento utilizzando principalmente l'informazione topografica fornita dal DEM e non considera l'eventuale disponibilità di sedimento a essere mobilizzato all'interno del bacino.

## ***Risultati.***

### ***Inquadramento e definizione delle unità fisiografiche.***

Sulla base dei DTM e delle cartografie topografiche è stato definito il limite del bacino idrografico del Rio Geremeas. Il bacino idrografico, o il sottobacino sotteso dalla porzione di corso d'acqua presa in esame, rappresenta l'unità spaziale fondamentale di partenza. Sono stati delimitati i principali bacini idrografici e i sottobacini delle aste fluviali fino al 5° (Strahler) su base DTM RAS 1 m per le aree costiere e DTM RAS 10 m per le aree collinari e montuose.

È stata effettuata una prima suddivisione in macro-aree (unità fisiografiche - Fig. 2) e macro-tratti (segmenti), basata su aspetti geologici, sulle caratteristiche fisiografiche, sui profili longitudinali dei corsi d'acqua e sui processi geomorfologici.

### ***Unità fisiografiche Bacino Rio Geremeas***

- Lembi di paleosuperfici di spianamento
- Lembi di paleosuperfici di spianamento su granitoidi con alterazione profonda
- Versanti fortemente incisi
- Versanti regolarizzati
- Piana alluvionale pedemontana
- Piana costiera

### ***Analisi processi e forme erosive e deposizionali di versante. Inquadramento delle aree sorgenti di sedimenti.***

È stato elaborato un primo quadro generale sulle zone del bacino con maggiore produzione dei sedimenti, in relazione alle litologie presenti, sui tipi di processi dominanti che la determinano e sul loro grado di attività.

L'attività di mappatura geomorfologica è svolta attraverso rilevamento diretto sul terreno e telerilevamento. Le aree chiave sono inoltre rilevate con drone per ottenere elaborati ad alta risoluzione. Sono stati rilevati i versanti delle aree montuose e collinari con particolare attenzione a forme e processi di versante (Fig. 3). Sul fondovalle delle aste fluviali, della piana alluvionale e della piana costiera sono state analizzati i processi fluviali.

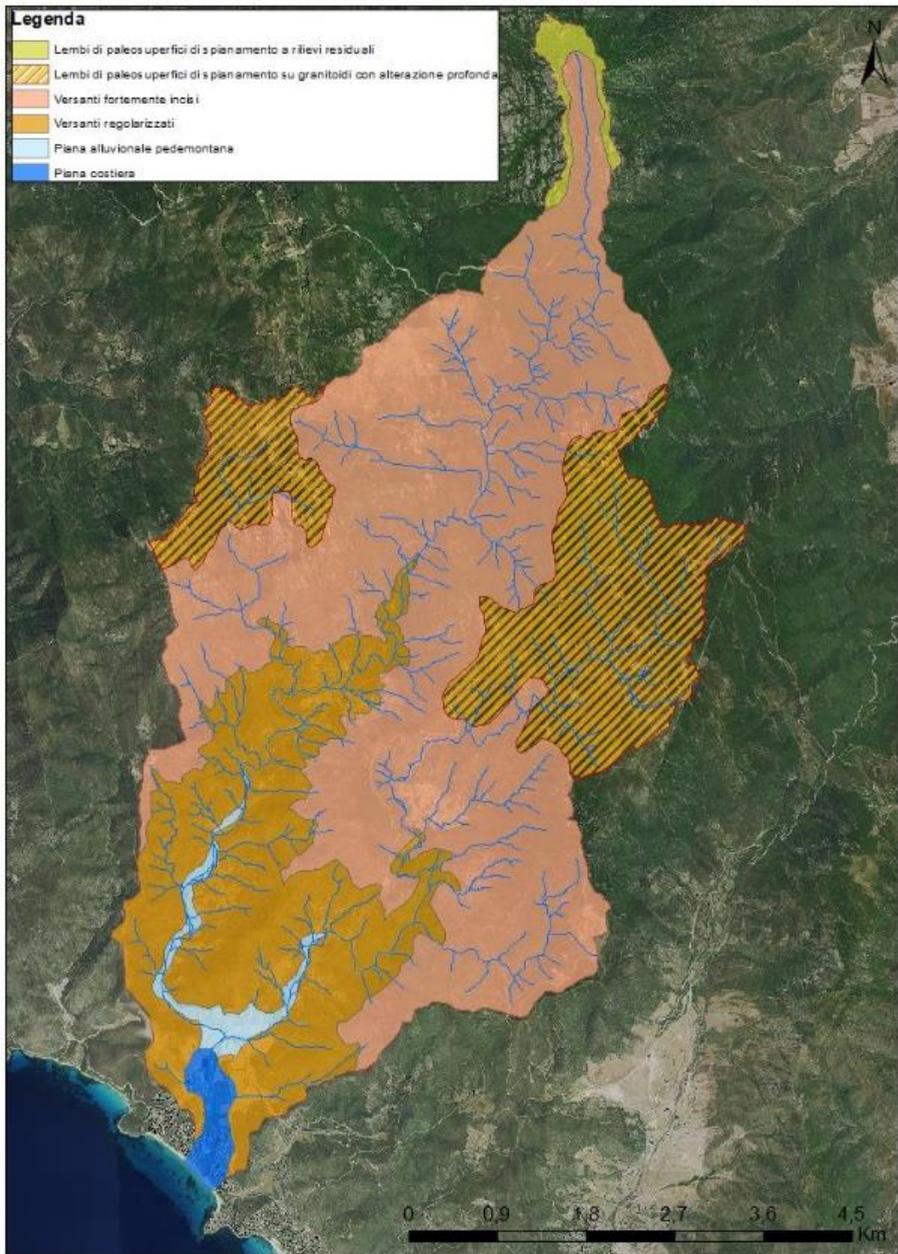


Fig. 2 - Carta preliminare delle unità fisiografiche.

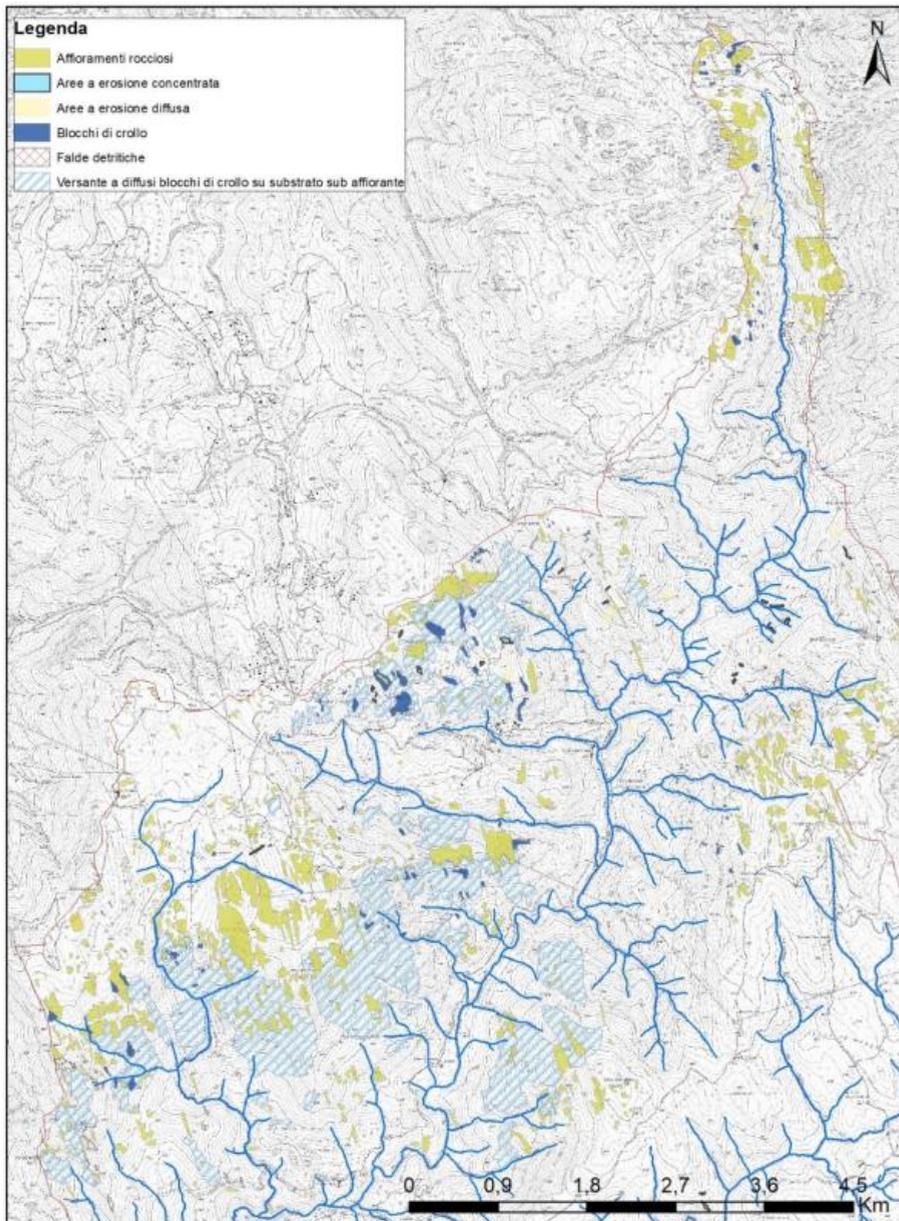


Fig. 3 - Carta preliminare delle aree sorgente di sedimenti (Settore Nord).

Allo stato attuale della ricerca sono stati elaborati i seguenti prodotti/risultati preliminari:  
 - *Mappatura e analisi geomorfologica*. Realizzazione di cartografia geomorfologica tematica,

inventari di frana e interpretazione di immagini telerilevate recenti per la mappatura delle sorgenti di sedimento, forme deposizionali ed erosive (Fig 4).

- *Analisi multitemporali.* Sono state eseguite analisi multitemporali delle aree sorgenti di sedimento tramite l'interpretazione di set storici di foto aeree e/o con l'ausilio di DTM ad alta risoluzione.
- *Valutazione dei potenziali di ricarica di sedimenti.* Si tratta di valutazioni basate sull'individuazione delle principali aree sorgenti di sedimenti, sulla valutazione del loro grado di attività e di connessione con il reticolo idrografico (Fig. 5).
- *Modellazione dell'instabilità dei versanti.* Attraverso l'applicazione di modelli idrologici e di stabilità dei versanti si valutano le aree dove si hanno le maggiori probabilità di avere processi gravitativi e la quantità di materiale trasferita dai versanti alla rete idrografica.
- *Analisi geomorfometriche di connettività.* La combinazione di diversi parametri morfometrici derivabili direttamente dal DEM in indicatori di tipo complesso è in grado di fornire utili informazioni riguardo ai processi connessi alla dinamica del sedimento. Di particolare rilevanza per i processi di erosione e trasporto sono gli indicatori che combinano pendenza e area drenata.

#### *Il rilievo geomorfologico degli alvei. Analisi processi e forme erosive e deposizionali di fondovalle.*

È stato eseguito il rilevamento geomorfologico degli alvei e delle sponde. L'attività di campo è stata svolta partendo dai segmenti di ordine maggiore sino alla foce (Fig. 6). Questa fase ha avuto lo scopo di rilevare i fondovalle nei diversi rami gerarchici del reticolo idrografico con particolare riferimento alla distinzione e alla definizione dei tratti fluviali dominati da processi erosivi e/o deposizionali.

Gli alvei interni alle unità fisiografiche a montagne e colline granitiche sono caratterizzati da lunghezze e larghezze ridotte, pendenze elevate e sedimenti grossolani ed eterogenei. Questi corsi d'acqua sono confinati e con un carattere prevalentemente erosivo.

Nei settori più a monte l'attività di trasporto solido è spesso legata a eventi di precipitazione intensi e intermittenti come i fenomeni di trasporto di massa o colate di detrito.

Queste unità sono caratteristiche principalmente della zona medio-alta del bacino idrografico, ma in alcuni settori interessano anche aree molto vicine alla costa.

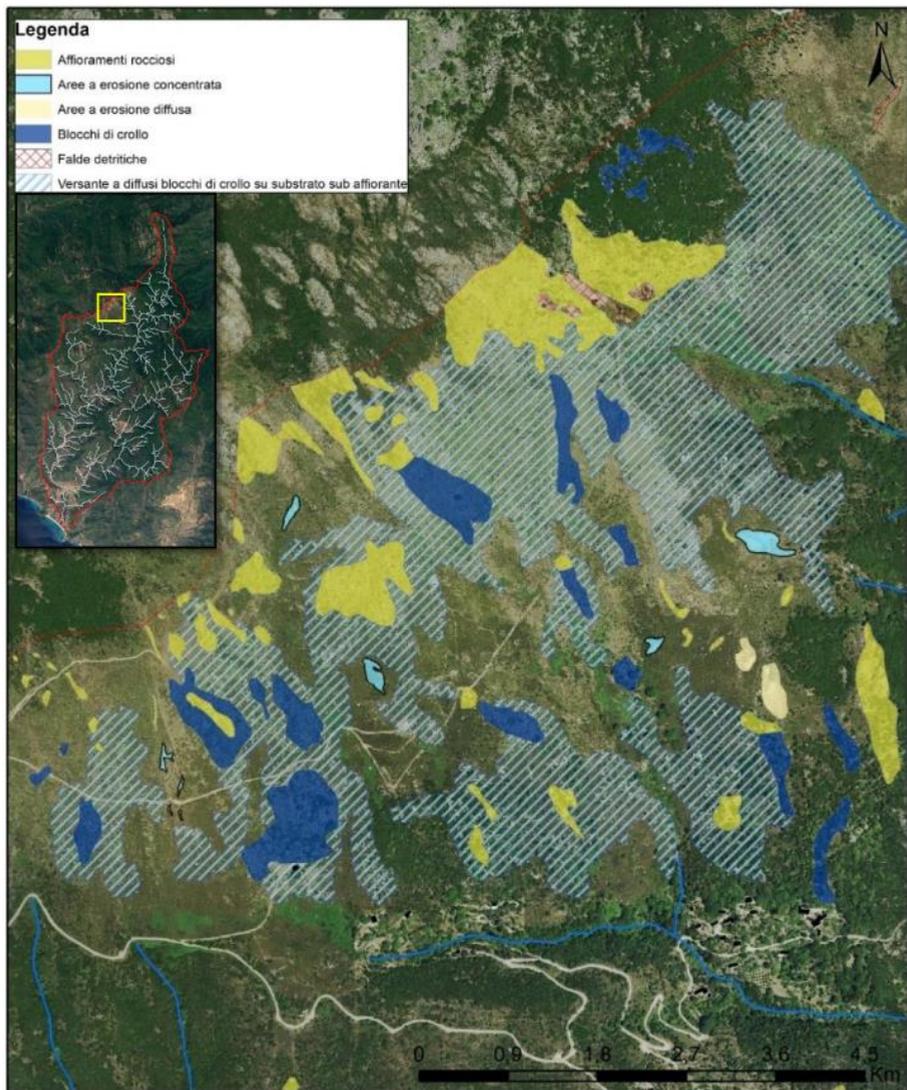


Fig. 4 - Dettaglio dell'interpretazione delle aree sorgente. Versante in unità fisiografica a versanti fortemente incisi. Scala cartografica 1:300.



Fig. 5 - *Principali processi e morfologie di versante individuate nel bacino del Rio Geremeas. a) versante ad alta acclività in erosione; b) canale di erosione concentrata su granito arenizzato; c) erosione diffusa su versanti con scarsa vegetazione erbacea e arbustiva; d) versante a diffusi blocchi di crollo; e) settore sommitale (versante granitico ad alta pendenza; 1) morfologie residuali a "inselberg" e "Tor" (aree sorgente di crolli; 2) canale con falda detritica.*



Fig. 6 - *Principali processi e morfologie di alveo individuate nel bacino del Rio Geremeas. a) forme a step and pool (morfologie che indicano elevate pendenza con elevato trasporto al fondo e in sospensione); b) alveo confinato con depositi eterogenei ed eterometrici, rappresentativi di alvei di montagna nelle zone a minore pendenza; c) alveo semiconfinato con depositi ciottolosi e a blocchi; d) alveo non confinato in piana alluvionale con depositi estremamente eterometrici, da sabbie a blocchi; e) foce del Rio Geremeas.*

L'analisi della dinamica geomorfologica delle aree che ospitano gli alvei semiconfinati e non confinati è attualmente in fase preliminare. Gli alvei che interessano le unità fisiografiche a

quote inferiori e con pendenza inferiore hanno dimensioni estese e si presentano confinati o semi-confinati nella pianura di fondovalle e non confinati in quella costiera, nella quale per meno del 10% del tratto le sponde sono a contatto con i versanti. L'alveo, non essendo confinato tra due versanti, ha la capacità, in base alle portate liquide del corso d'acqua e alla disponibilità di sedimenti, di modificare la propria morfologia sia in senso planimetrico che altimetrico.

#### *L'analisi multitemporale.*

L'analisi multitemporale è stata effettuata con la finalità di ricostruire e ipotizzare le tendenze evolutive del sistema fluviale. È stata eseguita attraverso l'uso integrato di cartografie e immagini aeree storiche (Fig. 7). Sono state analizzate le variazioni plano-altimetriche dei corsi d'acqua, messe in relazione agli eventi alluvionali estremi e alle modificazioni antropiche del territorio.

Nelle aree confinate si osservano uno spostamento dei volumi di sedimenti verso valle e apporti sedimentari dai versanti. Nelle aree semi-confinato e non confinate si osservano principalmente variazioni planimetriche, modifiche nelle canalizzazioni, migrazione delle barre fluviali e variazioni nella sinuosità dei canali.

Il progetto prevede, inoltre, l'analisi delle interazioni tra i corsi d'acqua e le opere antropiche, quali strade, viadotti, opere di difesa etc.

#### *L'analisi sedimentologica dei depositi fluviali.*

Questa fase prevede il campionamento e la caratterizzazione sedimentologica, mineralogica e petrografica delle diverse tipologie di sedimenti presenti negli alvei (Fig. 8). Sarà eseguita attraverso analisi di laboratorio per le classi granulometriche più fini e attraverso tecniche di *processing* di immagini per i depositi a ciottoli e blocchi, testate sulla base di analisi petrografiche di taratura. Attualmente si sta valutando il piano di campionamento e si sta definendo il numero e la distribuzione dei campioni.

Riguardo alla dimensione dei sedimenti all'interno dell'alveo, materiale grossolano è stato rilevato sia nei settori più a monte, nelle aree sorgenti, sia a valle, dove è stata rilevata la presenza di blocchi di elevate dimensioni insieme a sedimenti più fini, tipici della piana alluvionale.

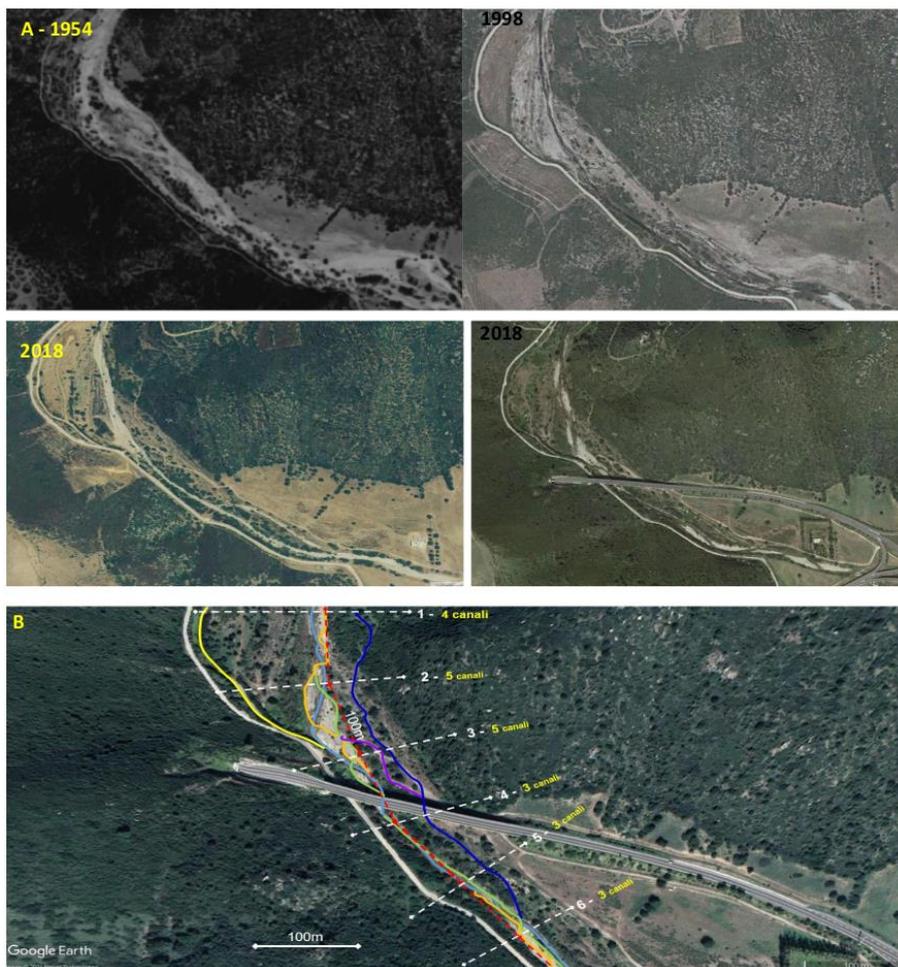


Fig. 7 - Esempi di analisi evolutiva di un tratto del Rio Geremeas. A) foto aeree storiche; B) analisi dei canali.

**Discussione e conclusioni.** – Il lavoro presenta i primi risultati e la metodologia relativa al progetto interdisciplinare di analisi idromorfologica predisposta dall'ADIS (Agenzia Regionale del Distretto Idrografico della Sardegna) e dal CINSIA (Centro Interdipartimentale di Ingegneria e Scienze Ambientali dell'Università di Cagliari) nell'ambito del Programma di Gestione dei Sedimenti (PGS) della Regione Autonoma della Sardegna.

L'approccio metodologico si basa sull'applicazione del sistema IDRAIM, adattato a un sistema idrografico della Sardegna.

Questa prima fase è stata dedicata all'acquisizione di dati geologici e geomorfologici sul

campo e da telerilevamento e alla produzione di cartografia tematica.

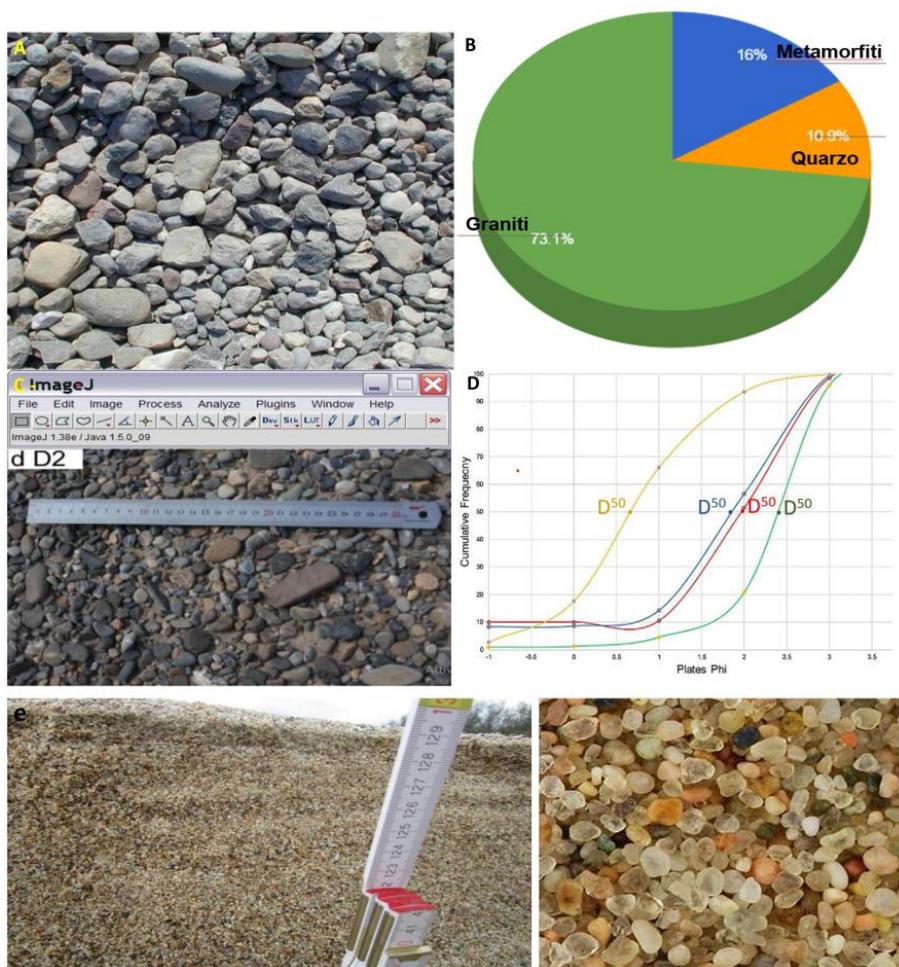


Fig. 8 - Analisi granulometrica e mineralogica dei sedimenti del Rio Geremeas.

Si possono riassumere i seguenti risultati:

- *Analisi geomorfologica unità di versante.* È stato caratterizzato il bacino idrografico del Rio Geremeas secondo unità fisiografiche definite su dati geologici, geomorfologici e morfometrici. I processi principali sono di tipo gravitativo, con frane di crollo e scivolamenti nelle aree ad alta pendenza con substrato roccioso affiorante. Tali processi generano accumuli a blocchi con struttura a falde, con alto potenziale di rimobilitazione. Scivolamenti rotazionali, processi di erosione lineare e concentrata sono stati rilevati dove il substrato roccioso è co-

perto da depositi di versante o dove il granito risulta intensamente arenizzato. I dati acquisiti saranno utilizzati per l'analisi di instabilità potenziale dei versanti e per valutare in che modo i processi geomorfologici influiscono nella generazione e una mobilitazione del sedimento lungo i versanti.

- *Rilievi geomorfologici unità di fondovalle*. Sono stati eseguiti rilievi geomorfologici negli alvei nei rami a diverso ordine gerarchico del reticolo, dalle quote più alte sino ad arrivare alla foce. Nei tratti fluviali confinati l'interazione che si crea tra il corso d'acqua e le pareti dei versanti è fondamentale per l'apporto di materiale grossolano proveniente principalmente da crolli e flussi detritici, aumentando la portata solida dell'alveo. I tratti semi-confinati e non confinati possiedono importanti volumi di sedimenti eterometrici. Si è osservato un apporto inferiore dai versanti. I processi principali sono di tipo fluviale di erosione laterale e legati all'evoluzione dell'alveo. La morfologia prevalente è a barre e canali, indicando una corrente ad alta energia e una portata solida elevata, con grande disponibilità e alimentazione di sedimenti.

#### BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

- ARPA PIEMONTE, "Soglie pluviometriche", In "Sistema informativo meteo-idrologico che integra le risorse osservative e modellistiche a supporto della gestione del rischio per la protezione Civile Nazionale", 2004.
- AUTORITÀ DI BACINO REGIONE SARDEGNA, "Studi, indagini, elaborazioni attinenti all'Ingegneria integrata, necessari alla redazione dello studio denominato Progetto di Piano Stralcio delle Fasce Fluviali (PSFF): metodologie di analisi", 2007 (Rev. I).
- BARCA S., CARMIGNANI L., OGGIANO G., PERTUSATI P.C., SALVADORI I., "Carta geologica della Sardegna in scala 1:200.000", Servizio Geologico Nazionale, Regione Autonoma della Sardegna, 1991, Roma.
- BARCA S., MELIS E., ANNINO E., CINCOTTI F., ULZEGA A., ORRU P., PINTUS C., "Note illustrative della Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000, Foglio 557 CAGLIARI", Servizio Geologico Nazionale, Regione Autonoma della Sardegna, 2005, Roma.
- CALCATERRA D., PARISE M., DATTOLA L., "Caratteristiche dell'alterazione e franosità di rocce granitoidi nel bacino del Torrente Alaco (Massiccio delle Serre, Calabria)", Boll. Soc. Geol. It., 1996, 115, 3-28.
- CARACCILO D., DEIDDA R., VIOLA F., "Analytical estimation of annual runoff distribution in ungauged seasonally dry basin based on a first order Taylor expansion of the Fu's equation", Adv. in Wat. Res., 2017, 109, pp. 320-332.
- CASUSCELLI F.A., DI BELLO A., DOMINICI R., VACCA C., "Calcolo della stima di produzione di sedimenti nei bacini idrografici compresi tra i Torrenti Saraceno, Pagliara e Avena, mediante il metodo di GavriloviĆ in ambiente GIS (Calabria nord-orientale)", 5° Conve-

- gno Nazionale dei Giovani Geologi "Uomo - Ambiente fisico", Pescara, 25-27 giugno 2015 (poster).
- CINUS S., DEMURU S., DERIU M., FARRIS M., PATTIERI G., TILOCCA G., MARTELLI R., "Analisi del dissesto da frana in Sardegna", In "Rapporto sulle frane in Italia", cap. 25, pp. 651-678, 2005.
- COLI M., CASTORINA T., LIVI E., "Geostructural prospecting for the geomechanics characterization of a granitic rock-mass: the case history of the Terra Mala area (Sardinia, Italia)", Rend. Online Soc. Geol. It, 2011, 15, pp. 43-47.
- DEIDDA R., PIGA E., SECHI G.M., "Analisi regionale di frequenza delle precipitazioni intense in Sardegna", L'Acqua, 2000, 5, pp. 29-38, ISSN: 1125-1255.
- GHEZZO C. E ORSINI J.B., "Lineamenti strutturali e composizionali del batolite ercinico sardo-corso in Sardegna", In Carmignani L., Cocozza T., Ghezzi C., Pertusati P.C., Ricci C.A., Eds., "Guida alla geologia del Paleozoico sardo", Guide Geologiche Regionali, Soc. Geol. It., 1982, pp. 165-181, Roma.
- PROVINCIA DI CAGLIARI, ASSESSORATO PROGRAMMAZIONE E COORDINAMENTO POLITICHE DEL TERRITORIO, "Difesa del Suolo e Prevenzione dei Rischi di Dissesto Idrogeologico", 2011, Cagliari.
- REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA, "Piano Stralcio delle fasce fluviali. Sub-bacino 07 Flumendosa-Campidano-Cixerì", 2007.
- RINALDI M., SURIAN N., COMITI F., BUSSETTINI M., "IDRAIM - Sistema di valutazione idromorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d'acqua", ISPRA, Manuali e Linee Guida, 113, 2014, Roma.
- USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE, "Chapter 9 - Hydrologic Soil-Cover Complexes", In "Part 630", National Engineering Handbook, 210-VI-NEH, 2004.

*Hydro-geomorphological basin analysis aimed at drafting the Sediment Management Plan of the Sardinia Region: the case study of the Rio Geremeas.*

The note presents the interdisciplinary project of hydro-morphological analysis prepared by ADIS (Regional Agency of the Hydrographic District of Sardinia) and by CINSIA (Interdepartmental Center of Engineering and Environmental Sciences of the University of Cagliari) within the Sediment Management Program of the Autonomous Region of Sardinia, in order to integrate a cognitive framework useful for better management and planning of fluvial areas and for the mitigation of hydro-geological risk. In particular, the following will be developed: geomorphological elaborations on the hydrographic basin; morphometric elaborations in application of the IDRAIM methodology (IQM, Index of Morphological Quality and IDM, Indexes of Morphological Dynamics); characterization of river sediments (granulometry, petrography/mineralogy); assessment of the phyto- and zoo-ecological status of the rivers; elaboration of the integrated ID model and estimates of potential solid transport; preliminary as-

assessment of the artificialization levels of the riverbed; final application of the integrated 2D model on a pilot basin; solid discharge mapping; evaluation of the levels of artificialization and formulation of management hypotheses for the morphological renaturation of the riverbeds in relation to the mitigation of hydraulic hazards. The area of first application of the methodology concerns the pilot hydrographic basin of Rio Geremeas, in south-eastern Sardinia. In this area the geological structure is characterized by a substratum of differentiated graniteids articulated by a dense filonian procession with modest covers, represented by gravitational slope deposits and alluvial deposits. A phase currently in progress is based on the collection and critical analysis of existing regional studies and planning (PGRA, PAI, IFFI, PSFF, etc.) which contribute to populating a GIS (geodatabase; DTM res. 1m; land cover; infrastructure; etc.). Subsequently, the detailed geological, geomorphological and sedimentological characterization of the Rio Geremeas hydrographic basin was carried out, starting from the analysis of the potential slope instability, from the mapping of the source areas and from the reconstruction of the extreme events, with particular reference to the rapid debris flows. The analysis was performed through remote sensing methods (historical analysis of aerial photos, satellite images, LiDAR), high resolution topographic surveys with drone and GNSS and by an intense geological and geomorphological survey activity. The evolutionary indications of the rivers and the interference of the works with the fluvial dynamics are expected from the highly detailed multi-temporal morpho-photographic surveys.

*Keywords* - basin hydro-morphological analysis, geomorphological evolution, management and planning of fluvial areas, Sardinia (Italy).

*“La Dinamica fluviale. La conoscenza del Fiume per la pianificazione e la salvaguardia del territorio”*

a cura di C. Cencetti, L. Di Matteo

*Culture Territori Linguaggi*, 24, 2023, pp. 83-91

ISBN 9788894469783

Fabio GUADAGNANO<sup>1</sup>, Lucio DI MATTEO<sup>1</sup>

## EVOLUZIONE DELLA FOCE DEL T. BEVANO (RAVENNA) IN RELAZIONE ALLA SUBSIDENZA

**Introduzione.** – Il presente lavoro analizza la foce del T. Bevano (Ravenna) che presenta una morfologia meandriforme in continua evoluzione, con vari meandri abbandonati a ridosso della spiaggia. L'area in oggetto si colloca in una zona affetta da fenomeni di subsidenza naturale e antropica, quest'ultima legata all'estrazione in passato di fluidi dal sottosuolo (acque sotterranee e gas metano) che determina conseguenze non trascurabili nelle aree in cui si manifesta (Carbognin & Tosi, 2003). La subsidenza influisce sulla dinamica costiera in un contesto di azione della forza del mare e dell'accumulo di sedimenti nella foce (AA.VV., 2009). Negli ultimi decenni, l'avvento di tecniche di monitoraggio sempre più accurate, sia dirette (osservazioni topografiche mediante livellazioni) sia indirette (remote sensing), ha permesso e garantisce tuttora di studiare l'evoluzione spazio-temporale dei fenomeni di subsidenza, mettendo a punto modelli previsionali utili a capire le tecniche di intervento più idonee (arginature, ripascimento del litorale, barriere di protezione, ecc.). In particolare, lo studio presenta i risultati del monitoraggio satellitare (dati interferometrici PSInSAR) riferito ai periodi 1992-2000 e 2003-2010, contribuendo così a meglio comprendere l'evoluzione costiera in corrispondenza della foce del T. Bevano.

**Inquadramento geografico e territoriale.** – Per approfondire il problema della subsidenza costiera, è stato preso in esame un sito campione in prossimità della foce del Torrente Bevano (Alto Adriatico), nell'area antistante la Pineta di Classe, fra le località di Lido di Dante e Lido

---

<sup>1</sup> Dipartimento di Fisica e Geologia, Università degli Studi di Perugia, Perugia, fabio.guadagnano@gmail.com; lucio.dimatteo@unipg.it

di Classe, a circa 10 km a S dal Comune di Ravenna (Fig. 1).



Fig. 1 - *Inquadramento geografico dell'area di studio e dettaglio della foce del T. Bevano.*

Il T. Bevano è un piccolo corso d'acqua che si origina dalle colline di Bertinoro, in Provincia di Forlì-Cesena, a una quota di 160 m s.l.m., caratterizzato da un bacino idrografico esteso 93 km<sup>2</sup> e da una lunghezza totale di 34 km. La peculiarità del corso d'acqua è la scarsa portata naturale che, grazie pure alle acque di vari tributari, scoli agricoli e canali di bonifica, raggiunge una portata media alla foce di 2.1 m<sup>3</sup>/sec (ARPA Emilia-Romagna, 2003). La piana costiera ravennate ha avuto origine dai rami deltizi meridionali dell'antico delta del Po ed è caratterizzata dalla presenza di aree poco elevate ( $\sigma \div 4$  m s.l.m.) e da aree depresse che corrispondono ai terreni bonificati nel corso degli ultimi secoli, di estensione limitata.

***L'evoluzione storica della foce.*** – Il litorale che unisce il Lido di Dante al Lido di Classe conserva una singolare naturalità e comprende 5 km di costa non urbanizzata, nella quale le dinamiche geomorfologiche sono libere di evolversi, secondo ritmi e modalità proprie. Fino al 2005, la foce del T. Bevano rappresentava uno dei pochi sbocchi nell'ambiente costiero emiliano-romagnolo non regimentato da argini artificiali (Gardelli et al., 2007). In prossimità della foce, il torrente assume una morfologia meandriforme che ha portato, nel corso del tempo, alla formazione e al successivo abbandono di vari meandri a ridosso della spiaggia, l'ultimo dei quali tendeva fortemente a migrare verso N, parallelamente alla linea di costa. Si tratta dell'ultima foce estuariale meandriforme dell'alto Adriatico libera di evolvere naturalmente

(Fig. 2).



Fig. 2 - Evoluzione della foce del Bevano attraverso l'analisi di foto satellitari (fonte: Google Earth).

La causa della migrazione avvenuta negli ultimi decenni è attribuibile principalmente alla subsidenza, che ha abbassato la foce di circa 21 cm, dal 1984 al 2005, diminuendo così la pendenza verso mare, ovvero la forza motrice del deflusso del torrente. Tutto ciò ha determinato il prevalere dell'energia del mare e dell'accumulo di sedimenti nella foce (AA. VV., 2009). In particolare, i vari processi meteomarini, combinati con un regime fluviale di bassa energia, hanno prodotto un trasporto lungo costa diretto verso N e lo spostamento della freccia litorale e di tutta la zona di foce in tale direzione, con conseguente restringimento dello sbocco fluviale, aumentando la difficoltà nello smaltimento delle acque di piena verso mare, l'erosione delle dune e l'ingressione di acque marine nei terreni e nella pineta retrostante, indebolendo così il sistema di protezione naturale del territorio dalle mareggiate (Gardelli et al., 2007). Quindi, si era in presenza di due criticità fortemente legate fra loro: una di tipo idraulico, che riguardava il bacino idrografico e il sistema di bonifica; l'altra di tipo ambientale, relativa alla migrazione della foce e alla distruzione della duna costiera e della pineta. Considerate tali problematiche, agli inizi del 2006 il Servizio Tecnico Bacino Fiumi Romagnoli, incaricato dalla Regione Emilia-Romagna, ha eseguito i lavori di sistemazione della foce e ricostruzione della duna (Fig. 3), chiudendo il vecchio sbocco e spostando la nuova foce circa 500 m più a S. Con il "Progetto di riqualificazione funzionale nel tratto costiero in corrispondenza di Foce Bevano", l'erosione delle dune e della spiaggia è stata arrestata e i pericoli di allagamento sono stati ridotti sensibilmente (AA. VV., 2009).



Fig. 3 - Sistemazione di Foce Bevano: schematizzazione dei principali interventi eseguiti e foce attuale.

**Caratteristiche geologiche.** – Le fluttuazioni climatiche ed eustatiche, susseguitesi nel corso del Quaternario, hanno condizionato la dinamica sedimentaria nell’Alto Adriatico. I depositi quaternari sono costituiti per la maggior parte da sedimenti continentali intercalati a marini, che riflettono il susseguirsi di fasi regressive e trasgressive. Nel territorio ravennate, lo spessore dei sedimenti continentali depositati durante la regressione Wurmiana è circa 50 m e questi sono costituiti prevalentemente da limi argillosi e sabbiosi con intercalazioni di sabbie, argille e piccoli banchi di torba (Veggiani, 1974).

L’area di studio è caratterizzata dal Supersistema Emiliano-Romagnolo, che comprende l’insieme dei sedimenti tardo-quaternari di origine continentale della pianura emiliano-romagnola (Ricci Lucchi et al., 1982). In tale Supersistema sono individuati il Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI) e il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES), come riportato in Figura 4. Il primo costituisce la parte più antica del Supersistema ed è costituito da alternanze cicliche di depositi fini e depositi grossolani. Il secondo, l’AES, rappresenta la porzione superiore del Supersistema e comprende depositi fini (argilloso-limoso-sabbiosi di tracimazione fluviale), depositi grossolani (ghiaie e sabbie di canale fluviale), argille palustri e sabbie litorali (APAT, 2005). In prossimità della foce del Bevano, affiora l’unità di Modena (AES8a).

**Risultati.** – L’utilizzo dei dati forniti dal Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM) contenuti nel Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale, hanno dimostrato che tramite la tecnica interferometrica PSInSAR è possibile ottenere risultati molto precisi e in accordo con le altre tecniche di misurazione, come GPS e livellazioni topografiche.

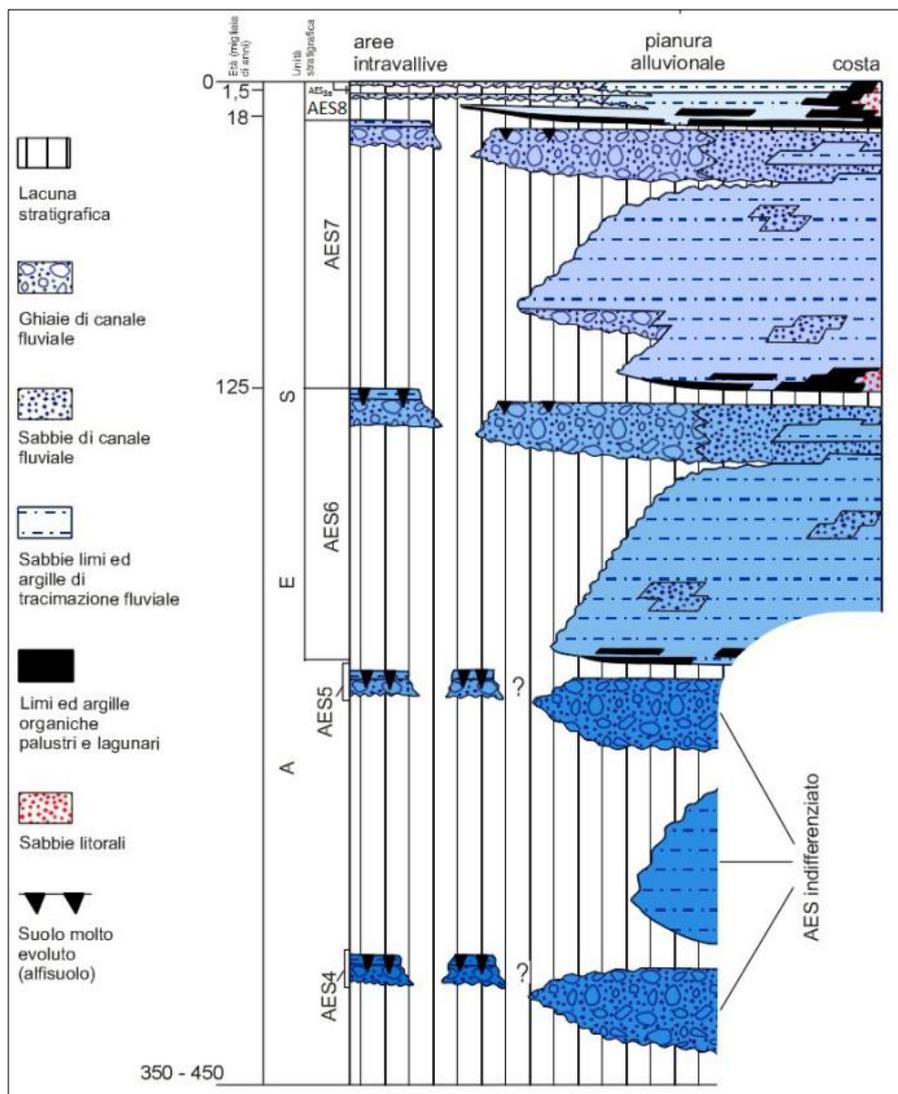


Fig. 4 - Schema cronostratigrafico del Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (da: APAT, 2005).

L'analisi dei PS indica una subsidenza lungo l'area costiera. Nel 2003-2010 (ENVISAT), si osservano lungo la foce del T. Bevano (Fig. 5) molti PS "instabili", con valori compresi tra -19.5 e -6.6 mm/anno. Nel 1992-2000 (ERS) i valori erano compresi tra -3.2 e -1.1 mm/anno. La stessa Figura 5 illustra gli abbassamenti totali su due PS adiacenti. A parte l'assenza di informazioni nel 1994 e nel 2001-2003, si osserva un abbassamento totale di circa 80 mm (dal 1992 al 2010). Sebbene questo tasso di abbassamento sia inferiore rispetto a quanto accaduto

nell'ultimo secolo, le deformazioni registrate, oltre ad essere in aumento, si sommano a una situazione precedente molto pesante (deformazione totale del periodo 1897-1992 pari a circa 90 cm).

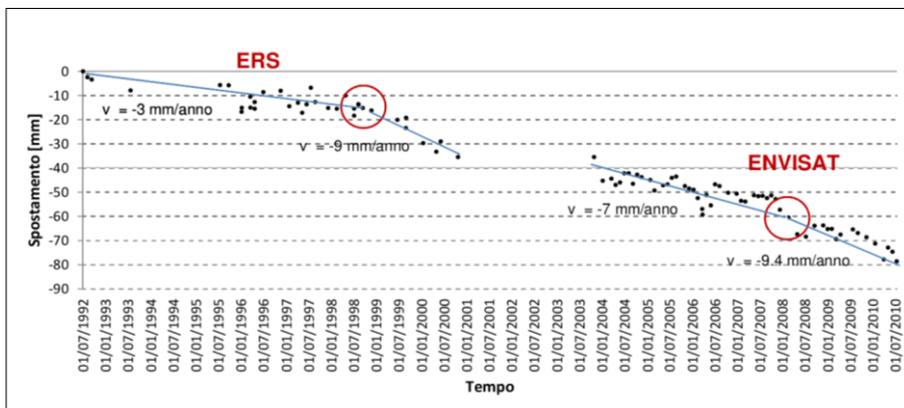


Fig. 5 - Serie temporale "totale" dal 1992 al 2010 su due PS dei datasets ERS e ENVISAT (A2BWO e 1R2z1000xU).

La Figura 6 illustra la piezometria di un pozzo posto a circa 1 km dalla foce (dati ARPA ER) insieme agli spostamenti delle serie storiche 1992-2010.

La Figura 7 illustra l'andamento annuo della produzione di gas naturale nella Concessione "A.C27.EA" ripresi dal sito del Ministero dello Sviluppo Economico - Direzione Generale per le Risorse Minerarie ed Energetiche.

Mentre i prelievi idrici sono stati limitati a partire dal 1983, quelli di gas metano dalla piattaforma Angela-Angelina (Concessione Mineraria A.C27.EA) sono passati da 380 MSm<sup>3</sup> a 1750 MSm<sup>3</sup>. Questo ha certamente contribuito all'incremento della velocità di subsidenza.

**Considerazioni finali.** – I risultati ottenuti dal presente studio indicano che nel periodo 2003-2010 si è verificato un ritorno a velocità di abbassamento simili a quelli del periodo 1949-1972, quando era praticato, fino alla fine degli anni '70 del secolo scorso, l'emungimento della falda costiera (Teatini et al., 2005).

Le considerazioni qui ottenute con l'analisi dei PS concordano con quanto rilevato dalla rete di monitoraggio geodetica dell'ARPA Emilia-Romagna. La presenza di attività estrattive lungo la linea di costa, insieme alle modifiche idrauliche della foce, influiscono sulla dinamica costiera, aumentandone l'impatto sul territorio.

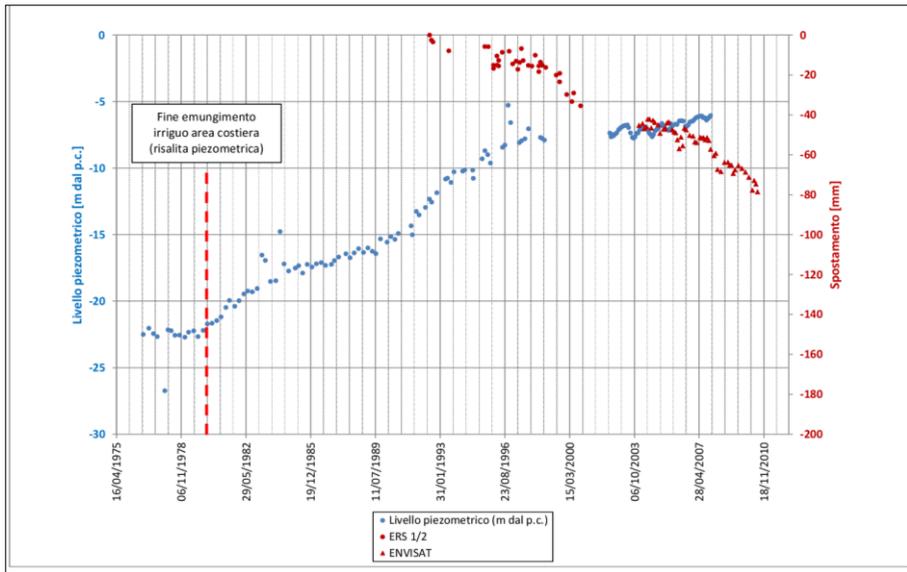


Fig. 6 - Piezometria e spostamenti verticali presso la foce del T. Bevano (da Taramelli et al., 2015).

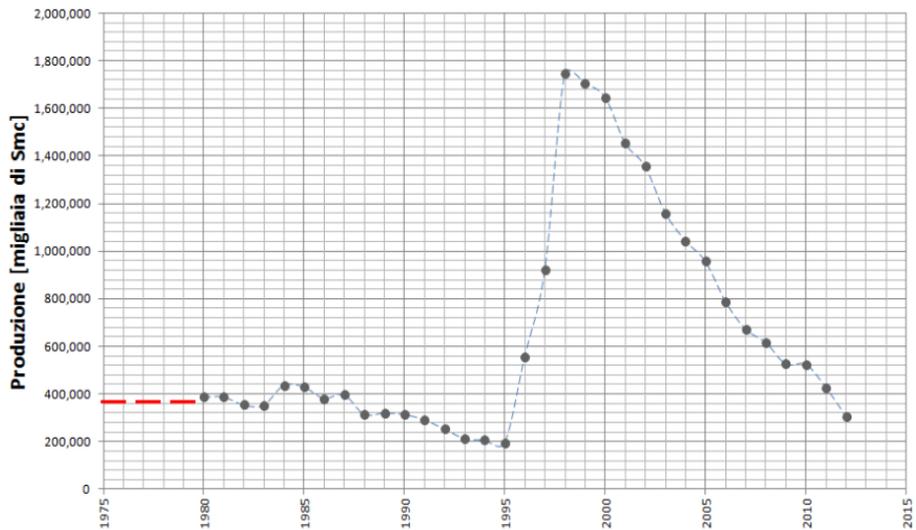


Fig. 7 - Variazione dei volumi di metano estratti dai giacimenti della Concessione A.C 27.EA: il tratteggio rosso indica la media dei volumi estratti fino al 1979, circa 380 milioni di Smc all'anno (Fonte: <http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it>).

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- AA. VV., "Foce Bevano: l'area naturale protetta e l'intervento di salvaguardia", Servizio Difesa del Suolo della Costa e Bonifica, Regione Emilia-Romagna, 2009.
- APAT – AGENZIA PER LA PROTEZIONE DELL'AMBIENTE E PER I SERVIZI TECNICI, "Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1 : 50.000. Foglio n. 240-241 "Forlì-Cervia", 2005.
- ARPA EMILIA-ROMAGNA, "La qualità dei corsi d'acqua della regione Emilia-Romagna", Report 2000-2002, 2003, pp. 163-167.
- CARBOGNIN L., TOSI L., "Il progetto ISES per l'analisi dei processi di intrusione salina e subsidenza nei territori meridionali delle province di Padova e Venezia", Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse e Consiglio Nazionale delle Ricerche, Venezia, 2003, pp. 63-83.
- GARDELLI M., CALEFFI S., CIAVOLA P., "Evoluzione morfodinamica della foce del Torrente Bevano", Studi Costieri, 2007, 13, pp. 53-74.
- RICCI LUCCHI F., COLALONGO M.L., CREMONINI G., GASPERI G.F., IACCARINO S., PAPANI G., RAFFI S., RIO D., "Evoluzione sedimentaria paleogeografica nel margine appenninico. Guida alla geologia del margine appenninico padano", Guide Geologiche Regionali, Soc. Geol. It., 1982, pp. 17-46.
- TARAMELLI A., DI MATTEO L., CIAVOLA P., GUADAGNANO F., TOLOMEI C., "Temporal evolution of patterns and processes related to subsidence of the coastal area surrounding the Bevano River mouth (Northern Adriatic) - Italy", Ocean & Coastal Management, 2015, 108, pp. 74-88.
- TEATINI P., FERRONATO M., GAMBOLATI G., BERTONI W., GONELLA M., "A century of land subsidence in Ravenna, Italy", Environ. Geol., 2005, 47, pp. 831-846.
- VEGGIANI A., "Le ultime vicende geologiche del Ravennate", In: Influenza di insediamenti industriali sul circostante ambiente naturale, Studio sulla pineta di S. Vitale di Ravenna, Ed. Compositori, Bologna, 1974, pp. 48-58.

### *Evolution of the mouth of Bevano River (Ravenna) in relations to subsidency.*

The note analyzes the mouth of the Bevano River (Ravenna) which has a continuously evolving meandering morphology, with various abandoned meanders close to the beach. The study area is located in an area affected by subsidence closely linked to the extraction of fluids: groundwater for agricultural purposes until the mid-80s of the last century and methane gas. In recent decades, the advent of increasingly accurate monitoring techniques, both direct (topographic observations by leveling) and indirect (remote sensing), has allowed and still guarantees to study the space-time evolution of subsidence, making point forecasting models useful for understanding the most suitable intervention techniques (embankments, coast nourishment, protective barriers, etc.). In particular, the interferometric data referring to the

periods 1992-2000 and 2003-2010 were used for the analysis of the mouth of the Bevano stream, thus contributing to updating the maps of topographic variation. The use of the data provided by the Ministry of the Environment and the Protection of the Territory and the Sea of Italy (MATTM), contained in the Extraordinary Plan for Environmental Remote Sensing, have shown that, using the PSInSAR interferometric technique, it is possible to obtain very precise results, according to other measurement techniques, such as GPS and topographic leveling. From 2003 to 2010, a subsidence rate of about 5 mm/year was found in the study area: this value agrees with what was obtained from the Emilia-Romagna ARPA monitoring network. Although this rate is approximately half of what happened in the last century, the recorded deformations, as well as being constantly increasing, add up to a very critical previous situation (total deformation of the period 1897-1992 equal to about 90 cm) . Although the causes are multiple, the increase in methane extraction along the coast from 1998 to 2000 sharply increased subsidence rates before returning to the values of the years 1970-1995. In 2003 the estuary tended strongly to migrate N, parallel to the coast line. The cause of the migration is mainly attributable to subsidence which, acting on the slope of the coastal area, determined the prevalence of the force of the sea and the accumulation of sediments in the mouth. In particular, the various marine weathering processes, combined with a low energy fluvial regime, have produced a transport along the coast directed towards the N and the displacement of the coastal arrow and of the entire estuary area in this direction, with consequent narrowing of the fluvial outlet, increasing the difficulty in disposing of flood water towards the sea, the erosion of the dunes and the ingression of sea water into the land and the pine forest behind it, thus weakening the natural protection system of the territory from storm surges. The results obtained highlight the importance of supporting interferometric data in understanding the phenomena and their management in coastal areas.

*Keywords* - geomorphological evolution, PSInSAR, coastal areas, subsidence, Bevano River.

*“La Dinamica fluviale. La conoscenza del Fiume per la pianificazione e la salvaguardia del territorio”*

a cura di C. Cencetti, L. Di Matteo

*Culture Territori Linguaggi*, 24, 2023, pp. 92-96

ISBN 9788894469783

Erica GUIDI<sup>1</sup>, Stefano MORELLI<sup>1</sup>, Giulio PAPPAFICO<sup>1</sup>

## CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICO-GEOMORFOLOGICA DEL CORSO DEL F. METAURO (PU, MARCHE) FINALIZZATA ALLA VALUTAZIONE DEL TRASPORTO SOLIDO

**Introduzione.** – Gli impatti sul territorio causati dall’aumento di eventi climatici estremi non sono spazialmente e temporalmente omogenei e possono indurre, nei corsi d’acqua, occasionali ondate di piena anomale che sono in grado di prendere in carico detriti anche di grandi dimensioni. Il carico di sedimenti è anch’esso variabile nel tempo e nello spazio in funzione della variazione di portata liquida, della quantità di sedimenti mobilizzabili lungo l’alveo, della morfologia del canale e del cambiamento delle aree di instabilità. Il sistema fluviale viene anche condizionato dalla pressione antropica che forza il sistema influenzandone le dinamiche evolutive.

Nei corsi d’acqua a regime torrentizio della Regione Marche l’incremento, la severità e la frequenza sempre più accentuata degli eventi climatici estremi degli ultimi anni hanno causato squilibri al sistema idrico fluviale locale nel suo complesso (dal trasporto idrico a quello solido), predisponendo il territorio antropizzato a dissesti idrogeologici e idraulici di diversa entità. Per questo motivo il Dipartimento di Scienze Pure e Applicate dell’Università di Urbino, attraverso un accordo con l’Autorità di Bacino Distrettuale dell’Appennino Centrale, l’Università Politecnica delle Marche e l’Università di Camerino, ha intrapreso un’attività di studio che prevede la valutazione dello stato idraulico-morfologico dell’alveo di alcuni corsi d’acqua del N delle Marche, in relazione allo sviluppo plano-altimetrico dei tracciati e alla loro tendenza evolutiva (sovralluvionamenti, incisioni e divagazioni laterali) nel più generale conte-

---

<sup>1</sup> Dipartimento di Scienze Pure e Applicate, Università di Urbino “Carlo Bo”, Urbino, e.guidi16@campus.uniurb.it

sto di ricostruzione della dinamica fluviale. I corsi d'acqua interessati dallo studio sono il F. Metauro, il F. Candigliano e il F. Burano dai loro punti terminali per un tratto significativo a monte.

**Il progetto di studio.** – Nella prima fase del progetto le ricerche sono state rivolte all'individuazione e alla caratterizzazione fisica delle aree sorgenti dei sedimenti del F. Metauro per la stima della produttività del trasporto solido, a cui seguiranno un'analisi chimica e mineralogica, allo scopo di definire complessivamente metodologie operative a supporto della pianificazione territoriale sostenibile.

Il F. Metauro, oggetto di studio, presenta portate minime intorno a 2 m<sup>3</sup>/s, portate massime di 1100 m<sup>3</sup>/s e tempi di corrivazione di 14,3 h (Lombardi et al., 2012), oltre a numerose opere di sbarramento fluviale (quali dighe, traverse e briglie) che influenzano la connettività del trasporto liquido e solido complessivo. Ha un bacino imbrifero di 1043,6 km<sup>2</sup>, caratterizzato da forme del rilievo che riflettono generalmente la struttura geologica del substrato, pur essendo molti tratti minori spesso controllati dalla presenza di formazioni facilmente degradabili (es. "Marne a Fucoidi", "Scaglia Cinerea", "Marnoso-Arenacea", ecc.), intercalate a terreni prevalentemente calcarei (Nesci e Savelli, 1990).

Per una prima elaborazione dei dati sono stati utilizzati software GIS (ArcGIS 10.8.2, QGIS 3.32.0), con i quali sono stati digitalizzati e archiviati i principali dati relativi alla Valle del Metauro. Per quanto riguarda nello specifico la formazione di materiale solido, sono state eseguite due analisi, una relativa al bacino idrografico e l'altra al corso d'acqua. Nel primo caso sono state identificate le aree di suscettibilità all'instabilità di versante, mentre nel secondo è stato estrapolato l'indice *SL* (*Stream-length-gradient-index*).

Per l'analisi di suscettibilità all'instabilità di versante, cioè la probabilità di occorrenza di movimento di materiale in una data area, sono stati presi in considerazione i seguenti fattori predisponenti morfometrici: dtm, pendenza e curvatura, e i seguenti fattori predisponenti non morfometrici: litologia, uso del suolo e precipitazioni. Classificando tutti i parametri secondo 5 principali classi (1 = probabilità maggiore di instabilità; 5 = probabilità minore) e utilizzando il tool *Weighted overlay* per unire i prodotti ottenuti in funzione della loro importanza, è stato possibile evidenziare alcune zone di sponda, spesso di morfologia asimmetrica, responsabili dell'apporto di detriti in alveo (Fig. 1). La seconda analisi prevedeva il calcolo dell'indice *SL* (Fig. 2), un indice geomorfico volto alla valutazione dei processi di superficie e di sottosuolo; nel particolare, *SL* è un fattore che, nei corsi d'acqua, è in grado di evidenziare le deviazioni della forma dei profili longitudinali dal profilo teorico in stato di equilibrio (Piacentini et al., 2020). Attraverso tale analisi sono stati evidenziati *knick point* e *knick zone*, punti o aree con la presenza di un gradiente con valori anomali, che potrebbero essere stati causati da moltepli-

ci fattori, come la presenza di erosione differenziale a causa di cambiamenti litostrutturali, l'interazione del corso fluviale con corpi di frana, la presenza di strutture geologiche attive e non, i tagli di meandro e/o le interazioni con opere antropiche. I *knickpoint/knick zone* si formano dove il potere erosivo del fiume non permette di raggiungere il profilo di equilibrio; ciò è dovuto alla maggiore resistenza del materiale presente e/o al locale sollevamento del terreno a causa di movimenti tettonici.

Da questa prima analisi si evince che il trasporto solido nel sistema del F. Metauro proviene principalmente dai suoi maggiori affluenti, il F. Candigliano e il F. Burano, a causa soprattutto del loro carattere maggiormente torrentizio. È attualmente in corso una discretizzazione delle aree più critiche suddette. Si prevedono inoltre una validazione del modello, una caratterizzazione composizionale dei materiali del bacino, una modellazione del trasporto solido in differenti tratti e su scenari evolutivi diversi, finalizzati alla caratterizzazione del rischio idraulico e alla gestione del materiale trasportato.

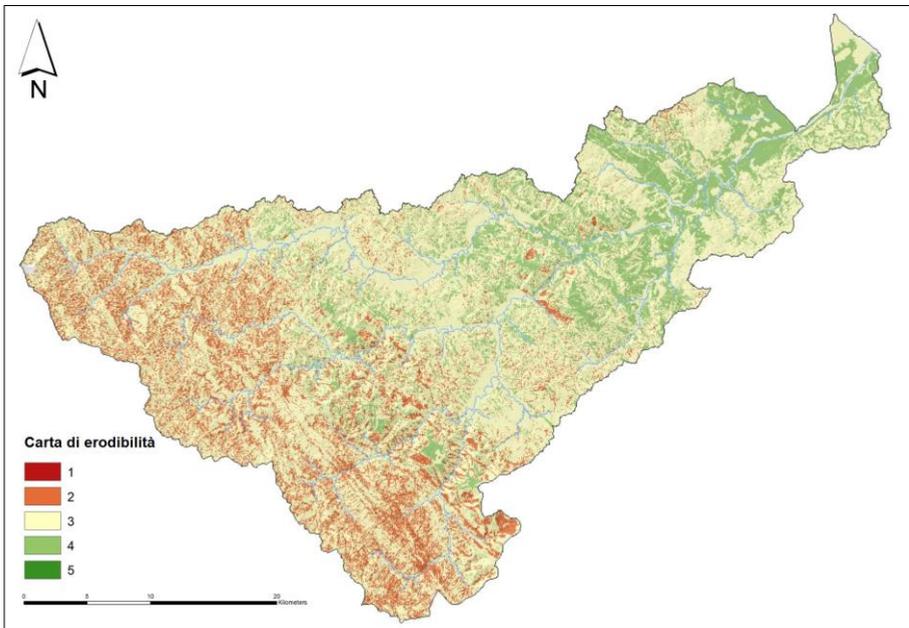


Fig. 1 - Carta di erodibilità del suolo, tendenza dei terreni ad essere maggiormente erosi dalle forze esogene in relazione soprattutto a parametri fondamentali quali litologia e curvatura del profilo.

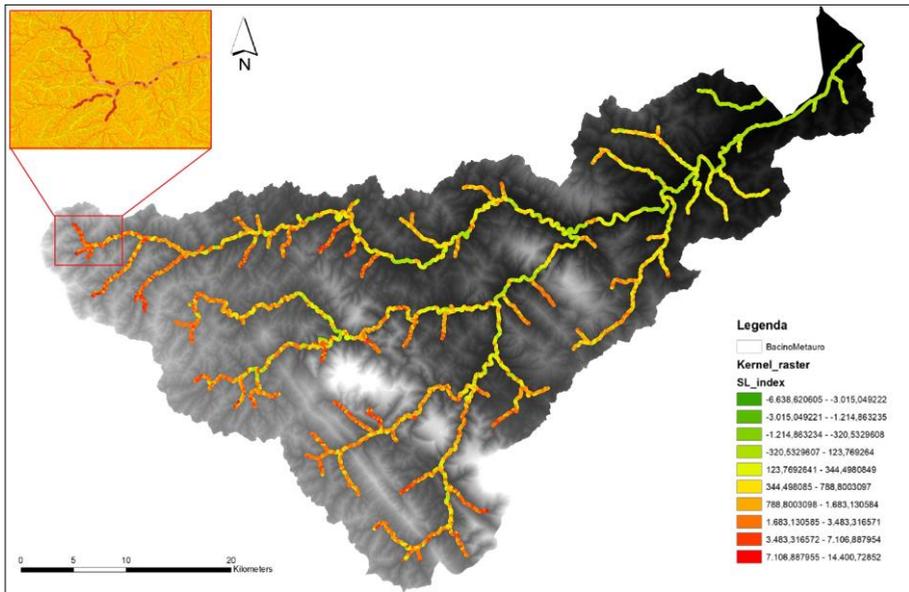


Fig. 2 - Stream Length-Gradient index definito dall'equazione  $(dH/dL)^*L$  (Hack's equation). Visualizzazione con tool Kernel raster. Nel riquadro rosso un ingrandimento della parte alta del bacino del F. Metauro che mostra la curvatura del profilo del corso fluviale.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- LOMBARDI L., TOTH E., CASTELLARIN A., MONTANARI A., BRATH A., "Calibration of a rainfall-runoff model at regional scale by optimizing river discharge statistics: Performance analysis for the average/low flow regime", *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2012, 42, pp. 77-84.
- NESCI, O., SAVELLI, D., MENGARELLI, D., "I terrazzi vallivi del 1° ordine nei bacini dei fiumi Metauro e Foglia (appennino marchigiano)", *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 1990, 13, pp. 63-73.
- PIACENTINI D., TROIANI F., SERVIZI T., NESCI O., VENERI F., "SLiX: A GIS Toolbox to Support Along-Stream Knickzones Detection through the Computation and Mapping of the Stream Length-Gradient (SL) Index", *Int. Journ. of Geo-Information*, 2020, 9 (2), 69, <https://doi.org/10.3390/ijgi9020069>.

*Geological-geomorphological characterization of the Metauro River (PU, Marche) aimed at evaluating solid transport.*

The increase in intense weather and climatic events together with the anthropogenic pressure induce in the streams an imbalance in the overall river system. From a physical point of view this results in an increase in solid transport with a consequent intensification in potential hydraulic risks. The study discusses the fluvial dynamic evolution of the Metauro River (Central Apennine Hydrographic District, Marche, Italy) and the importance of monitoring solid transport in the riverbed with particular attention to the identification of source areas and material mobility. The River Metauro has a drainage area of 1043.6 km<sup>2</sup>, has minimum discharges of 2 m<sup>3</sup>/s and maximum discharges of 1100 m<sup>3</sup>/s. The runoff time is 14.3 h; the main tributaries are Candigliano, Bosso and Burano. With the support of GIS software (QGIS and ArcGIS), an initial assessment was done with the creation of a map of the Stream Length-Gradient Index to interpret the changes of riverbed longitudinal profiles at steady-state conditions in relation to local geomorphology and sediment variation. A second map defining the susceptibility of the basin to erodibility was obtained. The study is still under development, and the methodology will involve the use of direct and indirect methods for material quantification and distribution and sampling for chemical and physical analysis.

*Keywords* - basin geological-geomorphological characterization, solid transport, Metauro River.

*“La Dinamica fluviale. La conoscenza del Fiume per la pianificazione e la salvaguardia del territorio”*

a cura di C. Cencetti, L. Di Matteo

*Culture Territori Linguaggi*, 24, 2023, pp. 97-114

ISBN 9788894469783

Isabella Serena LISO<sup>1</sup>, Piernicola LOLLINO<sup>1</sup>, Mario PARISE<sup>1</sup>

## MECCANISMI DI FORMAZIONE DI *SINKHOLES* NEL TERRITORIO PUGLIESE E MODELLAZIONE NUMERICA DEI PROCESSI

**Introduzione.** – I *sinkholes* sono processi di sprofondamento del terreno che generano forme tipiche in superficie. I termini *sinkhole* e *dolina*, benché sinonimi, possono differenziarsi per la loro origine e accezione: *sinkhole* ha origine statunitense e si riferisce maggiormente ad aspetti ingegneristici, di stabilità; il termine *dolina*, invece, ha origine slava e ha una accezione più propriamente geomorfologica (Sauro, 2003). I fenomeni di sprofondamento sono largamente diffusi in molti paesi, distribuiti in tutto il Pianeta, in contesti carsici e geologici alquanto variabili (Wilson e Beck, 1992; Jiang et al., 2005; Lei et al., 2005; Brinkmann et al., 2008; Karimi e Taheri, 2010; Heidari et al., 2011; Gao et al., 2013; Ozdemir, 2015; 2016; Taheri et al., 2015; Kim et al., 2017; Subedi et al., 2019; Cando Jácome et al., 2020).

Per quanto riguarda gli ambienti carsici e i *sinkholes* in essi generati, la classificazione maggiormente utilizzata in ambito internazionale è quella di Gutierrez et al. (2014) poi riproposta da Parise (2019; 2022); essa si basa sulla tipologia di substrato litologico e sul processo di formazione. Tra le varie tipologie di *sinkholes*, la categoria che presenta maggiore pericolosità, e conseguenti rischi per l'ambiente antropico, è quella dei *sinkholes* da collasso, la cui fase parossistica si manifesta in modo improvviso (Newton, 1984; Sinclair e Stewart, 1985; Beck e Jenkins, 1986; Snyder et al., 1989; Parise e Gunn, 2007; Parise, 2015a) con segni premonitori scarsi o del tutto assenti. La presenza di un vuoto sotterraneo costituisce l'elemento essenziale per l'occorrenza di sprofondamenti da collasso. Tra i fattori preparatori, invece, grande impor-

---

<sup>1</sup> Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali, Università degli Studi di Bari “Aldo Moro”, Bari, serenaliso.uniba@gmail.com; piernicola.lollino@uniba.it; mario.parise@uniba.it

tanza è rivestita dalle variazioni di *stress* tensionale dell'ammasso roccioso, dalla circolazione idrica sotterranea con improvvisi cambiamenti del livello idrico (Tharp, 1999; 2002; Del Prete et al., 2011; Shalev e Lyakhovsky, 2012) e dal conseguente degrado dell'ammasso roccioso, generalmente connesso a imbibizione dello stesso e allo sviluppo di fenomeni di weathering (Parise, 2015b). La formazione di questa tipologia di *sinkholes* parte da una condizione di instabilità geometrica del vuoto sotterraneo, generalmente derivante da crolli iniziali dalle pareti della cavità e/o dalla volta. Tale processo può evolversi nel tempo in funzione della geometria del vuoto e delle proprietà fisiche, meccaniche e idrauliche dei materiali (Lollino e Parise, 2014; 2023; Luisi et al., 2015; Fiore et al., 2018; Scotto di Santolo et al., 2018) fino a determinare il collasso dell'ultimo diaframma di roccia che separa la cavità dalla superficie, producendo così il *sinkhole*.

Tale processo viene generalmente associato a territori carsici ove si ritrovano rocce solubili in affioramento come calcari, gessi, anidriti (Ford e Williams, 2007; Palmer, 2007); esso è, però, anche tipico di territori con affioramenti di rocce tenere come tufi e arenarie, litotipi particolarmente adatti alla realizzazione di cavità artificiali (Del Prete e Parise, 2007; 2013). Il susseguirsi delle vicende storiche del nostro Paese ha fatto sì che le cavità artificiali siano un elemento molto diffuso in quasi tutte le aree urbane del territorio nazionale, seppur realizzate per finalità diverse quali opere idrauliche, estrattive, di culto, militari, di transito (Galeazzi, 2013; Parise et al., 2013). Nel corso degli ultimi decenni, l'espansione urbanistica ha determinato l'obliterazione di molte cavità sotterranee (Del Prete et al., 2010; Parise e Lollino, 2011; Parise, 2012), moltiplicando il numero di *sinkholes* censiti nelle aree urbane. La perdita di memoria sulla presenza di cavità sotterranee aumenta l'esposizione della popolazione al rischio di occorrenza *sinkholes* ed è pertanto necessario utilizzare strumenti come la realizzazione di scenari di suscettibilità e pericolosità, basati su inventari aggiornati, utili alla mitigazione del rischio (Pepe et al., 2013; Parise et al., 2019; Tufano et al., 2022).

La consapevolezza della grande diffusione degli ipogei artificiali in tutto il territorio italiano ha spinto la comunità di studiosi alla creazione di una classificazione tipologica "ad albero" che definisce e codifica la cavità in base alla funzione per la quale era stata realizzata (Fig. 1). Tale classificazione è stata proposta dalla Commissione Nazionale Cavità Artificiali della Società Speleologica Italiana (SSI - Galeazzi, 2013), e successivamente è stata adottata a livello internazionale dalla *International Union of Speleology* (UIS - Parise et al., 2013). Di recente, è stata proposta una metodologia di valutazione delle condizioni di stabilità di tipo speditivo di cavità artificiali in calcarenite a partire da un ampio *dataset* di risultati di modelli agli elementi finiti al variare delle caratteristiche geometriche delle stesse cavità (Perrotti et al. 2018; 2019).

Le cavità sotterranee possono anche essere di tipo misto tra naturale e artificiale, nel momento in cui l'uomo ha utilizzato una grotta naturale come riparo/abitazione, modificando

nel tempo la struttura interna per renderla maggiormente confortevole (Parise et al., 2013; Bixio et al., 2023).

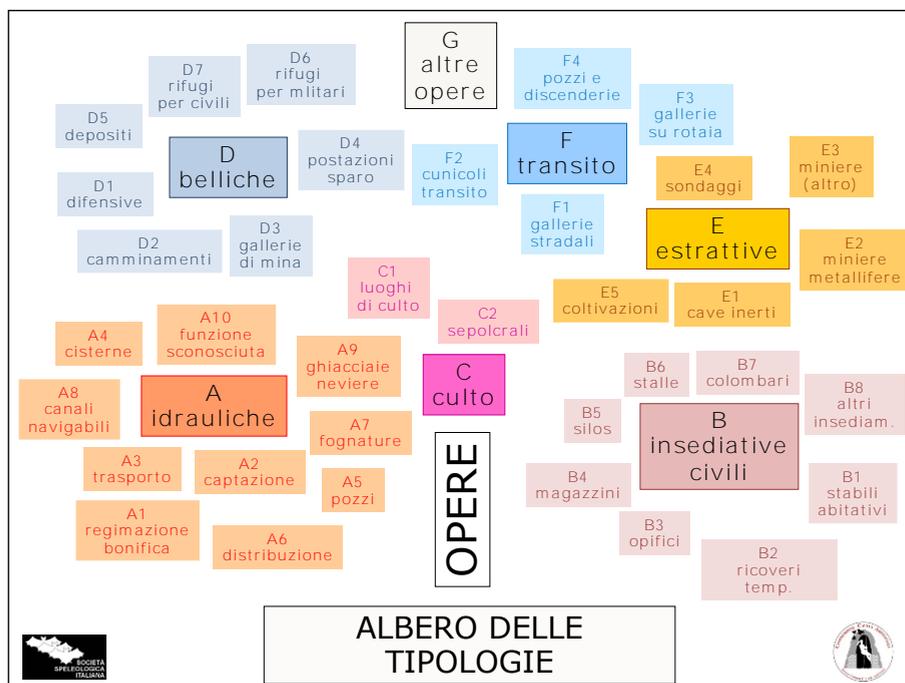


Fig. 1 - Albero tipologico per la classificazione delle cavità artificiali (da Parise et al., 2013).

In Italia, circa il 50% dei sinkholes si distribuisce nelle regioni centro-meridionali (Parise e Vennari, 2013; Tufano et al., 2022; Vennari e Parise, 2022) e in Puglia la categoria maggiormente diffusa nelle zone interne si riferisce al cedimento della volta di cavità artificiali (Parise e Lollino, 2011; Lollino et al., 2013; Fazio et al., 2017; Vennari et al., 2022), di frequente derivanti da attività estrattiva nel sottosuolo (Parise, 2010; 2012); nelle zone costiere, invece, la categoria maggiormente diffusa è quella di *sinkholes* da collasso di vuoti carsici naturali, ma sono anche presenti fenomeni da soffusione (Margiotta e Parise, 2019; Margiotta et al., 2021). Lungo costa, infatti, il fenomeno carsico è esacerbato dalla coesistenza di processi terrestri e marini, che rendono l'ambiente molto fragile e in rapida evoluzione (Carter e Woodroffe, 1995; Li et al., 2009). L'azione di erosione meccanica del moto ondoso che impatta sulle scogliere si associa al ruolo delle maree e all'azione di dissoluzione chimica accelerata, determinata dal fenomeno di intrusione marina; il mescolamento tra acqua di mare e acqua dolce genera una miscela sottosatura di carbonato, accelerando il processo di dissoluzione chimica (Cotecchia, 2014; Masciopinto e Liso, 2016; Liso e Parise, 2023).

**Inquadramento geologico e idrogeologico.** – Per la maggior parte della sua estensione, la Puglia è caratterizzata da affioramenti di rocce carbonatiche, per lo più di età cretacea (colori verdi in Fig. 2), largamente interessate dal processo carsico (Palmentola, 2002; Parise, 2008a; 2011; Pisano et al., 2022). Il substrato roccioso calcareo (Giurassico-Cretaceo) è ricoperto da più recenti calcareniti carbonatiche di età cenozoica (Eocene-Miocene) e depositi marini terrazzati del Quaternario (Pleistocene - colori giallo-arancio in Fig. 2). Questi ultimi depositi e calcareniti sono presenti soprattutto nel Salento e nella zona costiera delle Murge. Seguendo gli affioramenti di calcare all'interno della carta geologica, si distinguono tre zone: il distretto carsico del Gargano a N, quello delle Murge nella porzione centrale e quello del Salento a S (Pieri et al., 1997; Parise, 2011).

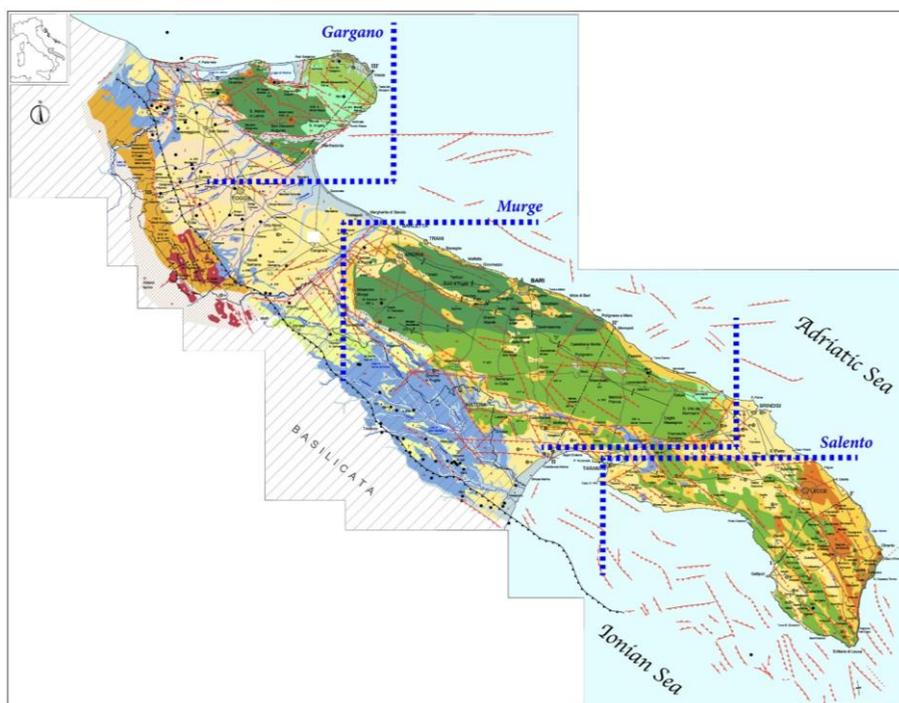


Fig. 2 - Carta geologica della Puglia (da Cotecchia, 2014, modificato).

I caratteri geomorfologici della Puglia sono il risultato della complessa storia geodinamica regionale e di due agenti principali, ovvero l'attività tettonica e l'azione dell'acqua, sia marina che continentale. Le faglie determinano l'assetto a *horst* e *graben*, principalmente disposti in direzione NO-SE (Ciaranfi et al., 1988; Funicello et al., 1991; Tropeano et al., 2023), con subordinato orientamento delle forme superficiali lungo la direzione NE-SO (Pepe e Parise,

2014). L'azione del mare, che insiste su quasi tutto il perimetro regionale, è principalmente responsabile della peculiare successione lito-stratigrafica (cicli di sommersione e ritiro) e anche dell'attuale morfologia costiera, costantemente modificata dai processi di smantellamento delle falesie (Delle Rose e Parise, 2005) e di formazione delle baie, con quest'ultima spesso condizionata dalla presenza di *sinkholes* (Bruno et al., 2008). L'acqua meteorica, inoltre, determina la formazione in aree interne e costiere di classiche forme carsiche superficiali (es. lame e gravine) e sotterranee (es. grotte e condotti).

L'idrogeologia regionale si sviluppa quasi esclusivamente all'interno degli ammassi rocciosi carbonatici che ospitano una cospicua quantità di acqua dolce che scorre in una falda fratturata e carsificata. I flussi si originano nelle aree interne, caratterizzate da precipitazioni più abbondanti e tassi di infiltrazione maggiori. Da qui le acque, dopo essersi infiltrate, scorrono verso il mare, emergendo in prossimità della linea di costa, in condizioni diffuse o concentrate, subaeree o sottomarine (Cotecchia, 2014; Liso e Parise, 2020). Particolare attenzione deve essere rivolta al distretto della penisola salentina; essendo completamente circondata dal mare, le riserve di acqua sotterranea sono maggiormente vulnerabili al fenomeno di intrusione marina, alla diminuzione dell'infiltrazione efficace e al sovrasfruttamento della risorsa (Tulipano e Fidelibus, 2002; Margiotta e Negri, 2004; 2005; Cotecchia, 2014; Masciopinto e Liso, 2016). Lungo le fasce costiere della penisola, grazie all'azione combinata di caratteristiche geolitologiche e idrogeologiche, si assiste alla formazione di *sinkholes* su coste basse e falesie, o vaste aree sprofondate come ad esempio il Parco Naturale Le Cesine, un'area palustre formata a partire da numerosi *sinkholes* singoli; successivamente, attraverso fenomeni di coalescenza, gli sprofondamenti si sono ampliati, formando un'estesa area allagata con acqua salmastra (Delle Rose e Parise, 2002; Margiotta et al., 2012).

*I sinkholes in Puglia.* – In questa sezione sono presentati e descritti esempi di *sinkholes* di tipo naturale ed artificiale, localizzati in settori interni e lungo le aree costiere della Puglia, per illustrare i processi di formazione e la loro evoluzione, al fine di evidenziare gli effetti prodotti dagli sprofondamenti del terreno sia in settori antropizzati, ovvero dell'impatto sulle comunità turistica e residente, sia naturali, ad esempio nel controllo dell'evoluzione morfologica delle coste (Bruno et al., 2008), attraverso fenomeni di coalescenza che determinano lo sviluppo di baie e insenature.

La regione Puglia risulta largamente suscettibile all'occorrenza di sprofondamenti da collasso derivanti dalla presenza di vuoti sotterranei di origine carsica/naturale e artificiale (Parise, 2008b; 2015c; Fiore e Parise, 2013). La localizzazione dei *sinkholes* in Puglia inseriti nel database cronologico (Parise e Vennari, 2017; Vennari e Parise, 2022) è riportata in Figura 3.

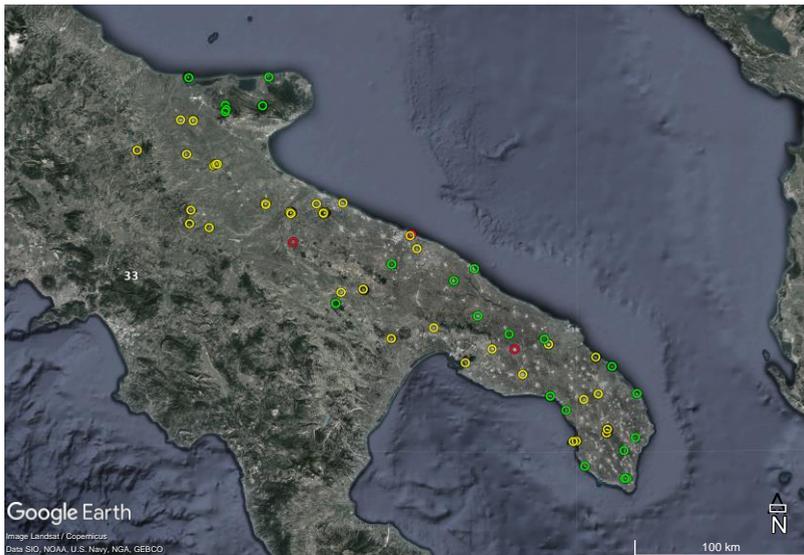


Fig. 3 - Sinkholes con riferimento cronologico estratti dal catalogo cronologico nazionale di Vennari e Parise (2022). In giallo i sinkholes di origine artificiale; in verde quelli di origine naturale; in rosso i sinkholes di origine sconosciuta.

I sinkholes pugliesi risultano essere 126 in totale (Fig. 4), di cui 3 di origine sconosciuta, 42 naturale e 81 artificiale; tali valori sottolineano la maggiore documentazione disponibile sui sinkholes artificiali rispetto a quelli naturali.

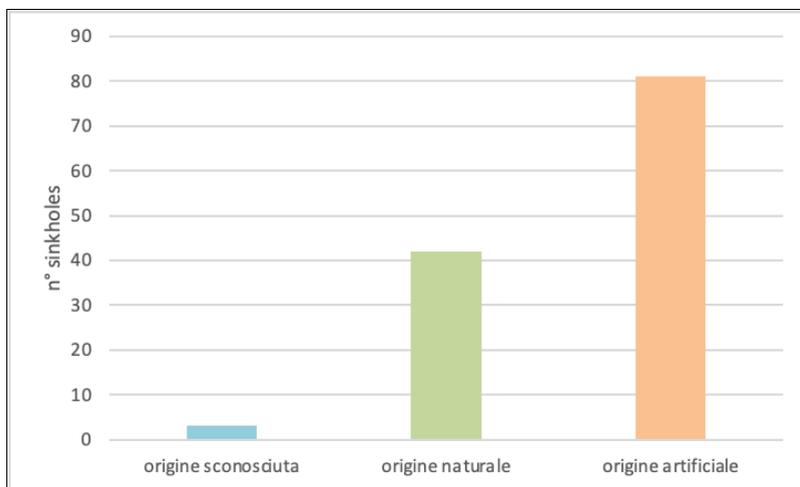


Fig. 4 - Istogramma mostrante la numerosità dei sinkholes classificati per tipologia di origine.

I *sinkholes* in Puglia ricadono sia in aree interne di tipo rurale e con scarsa presenza antropica, sia nei principali centri urbani e nelle fasce costiere; queste ultime, come noto, vedono un enorme aumento della popolazione durante la stagione estiva, a causa dell'elevata attrattività turistica del territorio (Fig. 5).

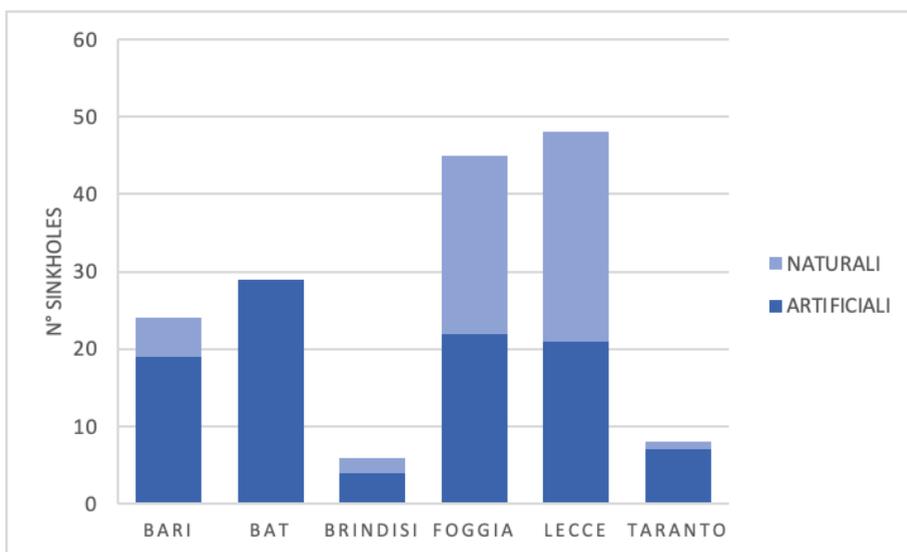


Fig. 5 - Frequenza dei *sinkholes* di origine naturale e artificiale nelle province della regione Puglia.

Settori interni come l'area delle Chiancate, nel promontorio del Gargano (Baboci et al., 1991), o porzioni dell'Alta Murgia (Sauro, 1991; Parise, 2011; Gueguen et al., 2012) mostrano un'elevata diffusione di fenomeni, essenzialmente del tipo attribuibile ai *sinkholes* da dissoluzione (Gutierrez et al., 2014; Parise, 2022). La frequenza è tale che tali forme del paesaggio risultano caratterizzanti l'ambiente carsico pugliese (Parise, 2008a), sia quando sono di dimensioni limitate ad alcuni metri, sia quando diventano grossi *sinkholes*, come i classici *puli* o *gravi* di Altamura, Gravina, Molfetta e Andria (Colamonico, 1917a; 1917b; 1919a; 1919b; Laragione et al., 2008; Simone e Fiore, 2014).

Alle forme naturali del paesaggio carsico si accompagnano poi, all'interno delle aree urbane o nelle immediate vicinanze, *sinkholes* connessi a cavità artificiali, che talora segnano fortemente lo sviluppo dei territori, condizionando ad esempio la recente espansione urbana, che non teneva in alcun conto, sino a non molti anni fa, l'esistenza di ipogei sotterranei. Da questo punto di vista, il caso di Altamura è certamente emblematico (Pepe et al., 2013), ma di certo non l'unico.

Anche nel Salento tali morfologie sono molto diffuse, in relazione alle attività umane: al-

cune caratteristiche impressionanti si sono sviluppate grazie all'attività estrattiva nel sottosuolo (Parise, 2010; 2012), soprattutto nell'area di Cutrofiano (Delle Rose et al., 2004; De Pascalis et al., 2010; Lollino et al., 2013; Negri et al., 2015). Inoltre, opifici quali frantoi ipogei, che hanno sempre rappresentato un importante elemento per la economia locale, costituiscono ulteriori elementi di potenziale pericolo, una volta in disuso e abbandonati (Margiotta et al., 2019).

Nelle aree costiere salentine, come già in precedenza richiamato, vi sono numerose situazioni con presenza di vaste aree allagate, o di *sinkholes* individuali, che creano anche particolari situazioni di interesse turistico, data la vicinanza al mare (Parise et al., 2017).

L'aumento del numero censito di sprofondamenti che si registra a partire dagli anni '70 del secolo scorso in avanti (Fig. 6) è sicuramente dovuto alla maggiore disponibilità di fonti di informazione, ma anche alla sempre crescente espansione urbanistica che ha obliterato le cavità esistenti e aumentato l'esposizione al rischio da sprofondamento delle infrastrutture e dei centri abitati.

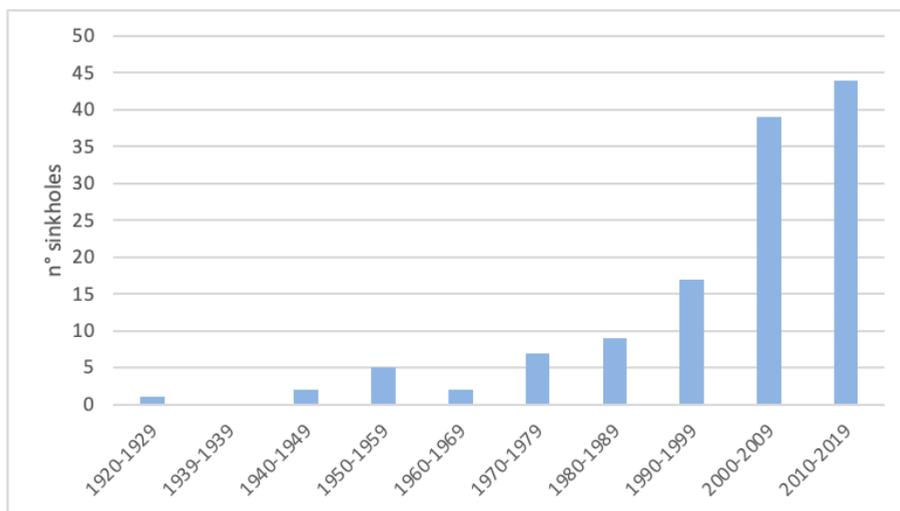


Fig. 6 - Distribuzione temporale dei sinkholes in Puglia.

**Modellazione numerica.** – Le tecniche di modellazione numerica risultano particolarmente utili nella comprensione dei meccanismi di collasso delle cavità sotterranee e, di conseguenza, nella valutazione delle condizioni di stabilità e nei margini di sicurezza esistenti per le cavità stabili.

In questa prospettiva, i metodi numerici vanno scelti adeguatamente alla tipologia di condizioni degli ammassi rocciosi e alle caratteristiche strutturali eventualmente presenti. In gene-

rale, per le cavità artificiali negli ammassi calcarenitici teneri, come quelli affioranti nel territorio regionale pugliese, il metodo degli elementi finiti (*FEM, Finite Element Method*) che assume condizioni di mezzo continuo per il materiale, è risultato particolarmente adeguato alla simulazione dei principali fattori di controllo delle condizioni di stabilità degli ipogei (Fazio et al., 2017; Castellanza et al., 2018). Simili applicazioni numeriche richiedono soprattutto una identificazione della geometria del problema da simulare e una caratterizzazione affidabile della risposta meccanica dei materiali. A titolo esemplificativo, in Figura 7 è mostrato il meccanismo di collasso individuato nel caso dell'analisi a ritroso tridimensionale, condotta con il metodo degli elementi finiti del *sinkhole* di Marsala, occorso nel 2011 (Fazio et al., 2017).

Per un caso di studio di questo tipo, caratterizzato da una spiccata tridimensionalità geometrica del problema, l'uso di un modello 3D è risultato particolarmente efficace. I modelli agli elementi discreti (*DEM, Discrete Element Method*) risultano, invece, maggiormente adatti allo studio di ammassi rocciosi discontinui, caratterizzati dalla presenza di un numero limitato di discontinuità, di una sola famiglia oppure di più famiglie di discontinuità, così che il comportamento complessivo dell'ammasso risulti anisotropo.

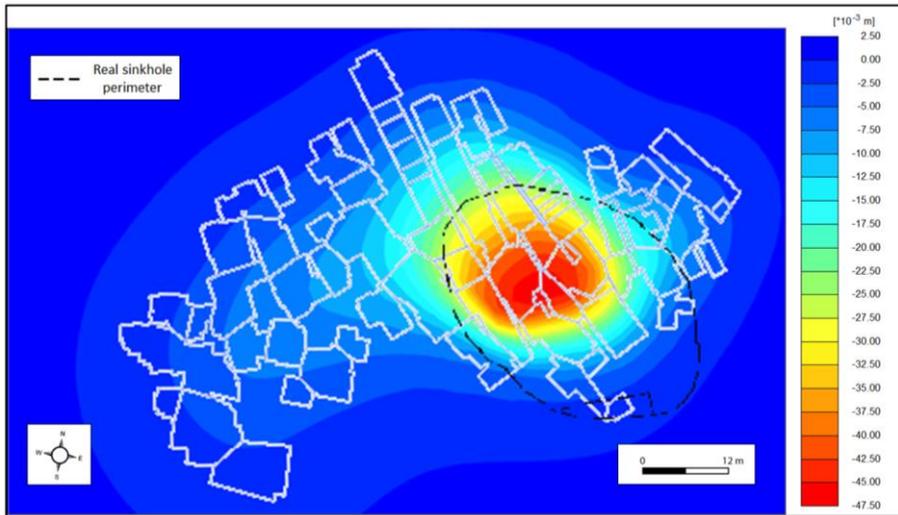


Fig. 7 - Vista dall'alto degli spostamenti verticali calcolati da analisi agli elementi finiti tridimensionale per il caso del *sinkhole* di Marsala (2011) e confronto con l'area dello sprofondamento effettivo occorso in sito (da Fazio et al. 2017).

In questo caso, sono richieste una schematizzazione di dettaglio delle principali famiglie di discontinuità e, contestualmente, una caratterizzazione adeguata del comportamento delle stesse discontinuità in termini di parametri di resistenza e di rigidità. Come esempio di applicazione di questa tecnica numerica allo studio di una cavità naturale di origine carsica, si

mostra in Figura 8 il meccanismo di plasticizzazione ottenuto da analisi DEM per effetto della degradazione progressiva della resistenza dell'ammasso calcareo fratturato che circonda una cavità del sistema delle Grotte di Castellana (Lollino et al., 2004).

Il principale limite di un simile approccio risiede proprio nella difficoltà di individuare le principali strutture presenti all'interno dell'ammasso, le rispettive giaciture e le caratteristiche geometriche.

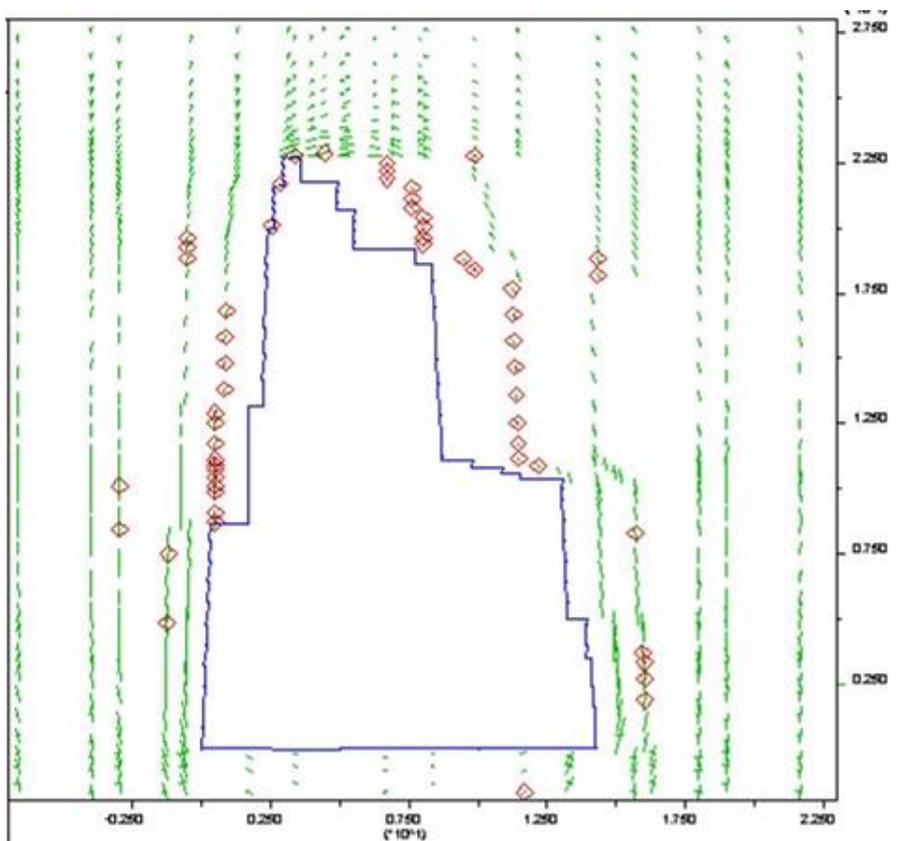


Fig. 8 - Vista dall'alto degli spostamenti verticali calcolati da analisi agli elementi finiti tridimensionale per il caso del sinkhole di Marsala (2011) e confronto con l'area dello sprofondamento effettivo occorso in sito (da Fazio et al. 2017).

**Conclusioni.** – Il territorio della regione Puglia, in gran parte caratterizzato da presenza di rocce solubili, si presta fortemente allo sviluppo di fenomeni carsici e conseguentemente alla formazione di eventi di sprofondamento. Questi non solo costituiscono la principale morfologia del paesaggio in vaste zone, ma sono anche notevolmente diffusi nelle aree urbane, a cau-

sa dello sviluppo di numerose cavità artificiali, scavate dall'uomo in epoche storiche e di cui talvolta si è persa memoria.

Tutto ciò determina una crescente vulnerabilità, e richiede studi approfonditi sui meccanismi di formazione dei *sinkholes*, al fine di comprenderne l'evoluzione, specialmente in relazione alle fasi immediatamente precedenti il collasso. Inoltre, la diffusione dei fenomeni lungo le zone costiere, in corrispondenza dell'interfaccia acqua dolce – acqua salata, evidenzia la necessità di sviluppare ulteriori ricerche sull'effetto della circolazione idrica sotterranea e sulle sue variazioni, nelle fasi preparatorie e di innesco dei *sinkholes*, anche in relazioni ai cambiamenti climatici in corso.

**Ringraziamenti.** - Gli argomenti qui presentati fanno parte delle attività del progetto *RETURN (multi-Risk sciEnce for resilienT commUnities undeR a changiNg climate)*, codice progetto MUR: PE00000005, nell'ambito dello *Spoke 2 VS2-Ground instabilities*.

#### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- BABOCI K., PALMENTOLA G., SANSÒ P., "Primi risultati dello studio quantitativo delle forme carsiche epigee dei dintorni di S. Marco in Lamis", *Itinerari Speleologici*, 1991, 5, 87-95.
- BECK B.F., JENKINS D.T., "Geotechnical considerations of sinkhole development in Florida", In: *International Symposium of Environmental Geotechnology*, 1986, p. 8.
- BIXIO R., DE PASCALE A., GALEAZZI C., PARISE M., "Rupestrian works and artificial cavities: categories of construction techniques", *Journ. Arch. Eng. Res.*, 2023, 4, pp. 59-68.
- BRINKMANN R., PARISE M., DYE D., "Sinkhole distribution in a rapidly developing urban environment: Hillsborough County, Tampa Bay area, Florida", *Eng. Geol.*, 2008, 99, pp. 169-184.
- BRUNO E., CALCATERRA D., PARISE M., "Development and morphometry of sinkholes in coastal plains of Apulia, southern Italy. Preliminary sinkhole susceptibility assessment", *Eng. Geol.*, 2008, 99, pp. 198-209.
- CANDO JÁCOME M., MARTINEZ-GRAÑA A.M., VALDÉS V., "Detection of Terrain deformations using InSAR techniques in relation to results on Terrain subsidence (Ciudad de Zaruma, Ecuador)", *Rem. Sens.*, 2020, 12, 10, 1598.
- CARTER R.W.G., WOODROFFE C.D. (EDS.), "Coastal evolution", 1995, Cambridge University Press.
- CASTELLANZA R., LOLLINO P., CIANTIA M.O., "A methodological approach to assess the hazard of underground cavities subjected to environmental weathering", *Tunn. Undergr. Sp. Techn.*, 2018, 82, pp. 278-292.
- CIARANFI N., PIERI P., RICCHETTI G., "Note alla carta geologica delle Murge e del Salento (Puglia centromeridionale)", *Mem. Soc. Geol. It.*, 1988, 41, pp. 449-460.
- COLAMONICO C., "Il Pulo di Altamura", *Mondo Sotterraneo*, 1917a, 12, 4, pp. 65-76.

- COLAMONICO C., "Il Pulicchio di Gravina", Riv. Geogr. It., 1917b, 24, pp. 358-365.
- COLAMONICO C., "Di alcune voragini pugliesi dette 'Grave'", Riv. Geogr. It., 1919a, 26, pp. 3-8.
- COLAMONICO C., "Il 'Gurgo' di Andria". Boll. Reale Soc. Geogr. It., 1919b, 3-4, pp. 225-229.
- COTECCHIA V., "Le acque sotterranee e l'intrusione marina in Puglia: dalla ricerca all'emergenza nella salvaguardia della risorsa", Mem. Descr. Carta Geol. d'It., 2014, 92, 416 pp.
- DE PASCALIS A., DE PASCALIS F., PARISE M., "Genesi ed evoluzione di un sinkhole connesso a cavità antropiche sotterranee nel distretto estrattivo di Cutrofiano (prov. Lecce, Puglia)", Atti 2° Workshop Internazionale "I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato", Roma, 3-4 dicembre 2009, pp. 703-718.
- DEL PRETE S., IOVINE G., PARISE M., SANTO A., "Origin and distribution of different types of sinkholes in the plain areas of Southern Italy", Geodinamica Acta, 2010, 23, 1/3, pp. 113-127.
- DEL PRETE S., PARISE M., "L'influenza dei fattori geologici e geomorfologici sulla realizzazione di cavità artificiali", Opera Ipogea, 2007, 9, 2, pp. 3-16.
- DEL PRETE S., PARISE M., "An overview of the geological and morphological constraints in the excavation of artificial cavities", In: Filippi M., Bosak P. (Eds), Proc. 16th International Congress of Speleology, Brno, 21-28 July 2013, 2, pp. 236-241.
- DEL PRETE S., PARISE M., SANTO A., "Sinkhole in contesti carbonatici di aree di catena e di avampaese: confronto fra l'Appennino Campano e l'Avampaese Apulo", Il Convegno Regionale di Speleologia "Campania Speleologica 2010", Caselle in Pittari (SA), 3-6 giugno 2010, 2011, pp. 171-185.
- DELLE ROSE M., FEDERICO A., PARISE M., "Sinkhole genesis and evolution in Apulia, and their interrelations with the anthropogenic environment", Nat. Haz. Earth Syst. Sc., 2004, 4, pp. 747-755.
- DELLE ROSE M., PARISE M., "Karst subsidence in south-central Apulia Italy", Int. Journ. Speleol., 2002, 31, 1/4, pp. 181-199.
- DELLE ROSE M., PARISE M., "Speleogenesi e geomorfologia del sistema carsico delle Grotte della Poesia nell'ambito dell'evoluzione quaternaria della costa Adriatica Salentina", Atti e Memorie Commissione Grotte "E. Boegan", 2005, 40, pp. 153-173.
- FAZIO N.L., PERROTTI M., LOLLINO P., PARISE M., VATTANO M., MADONIA G., DI MAGGIO C., "A three-dimensional back analysis of the collapse of an underground cavity in soft rocks", Eng. Geol., 2017, 238, pp. 301-311.
- FIORE A., FAZIO N.L., LOLLINO P., LUISI M., MICCOLI N.M., PAGLIARULO R., PERROTTI M., PISANO L., SPALLUTO L., VENNARI C., VESSIA G., PARISE M., "Evaluating the susceptibility to anthropogenic sinkholes in Apulian calcarenites, southern Italy", In: Parise M., Gabrovsek F., Kaufmann G., Ravbar N. (Eds.), "Advances in Karst Research: Theory, Fieldwork and Applications", Geol. Soc., London, 2018, Spec. Publ., 466, pp. 381-396, doi.org/10.1144/SP466.20.

- FIGURE A., PARISE M., "Cronologia degli eventi di sprofondamento in Puglia, con particolare riferimento alle interazioni con l'ambiente antropizzato", *Mem. Descr. Carta Geol. d'It.*, 2013, 93, pp. 239-252.
- FORD D.C., WILLIAMS P., "Karst Hydrogeology and Geomorphology", 2007, Wiley, Chichester, 562 pp.
- FUNICIELLO R., MONTONE P., PAROTTO M., SALVINI F., TOZZI M., "Geodynamic evolution of an intra-orogenic foreland: the Apulia case history (Italy)", *Boll. Soc. Geol. It.*, 1991, 110, 419-425.
- GALEAZZI C., "The Typological Tree of Artificial Cavities: A Contribution by the Commission of the Italian Speleological Society", *Opera Ipogea*, 2013, 1, pp. 9-18.
- GAO Y., LUO W., JIANG X., LEI M., DAI J., "Investigations of large-scale sinkhole collapses, Laibin, Guangxi, China", In: *Proceedings of the 13th multidisciplinary conference on "Sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst"*, NCKRI Symposium 2, 2013, pp. 327-331.
- GUEGUEN E., FORMICOLA W., MARTIMUCCI M., PARISE M., RAGONE G., "Geological controls in the development of palaeo-karst systems of High Murge (Apulia)", *Rend. Online Soc. Geol. It.*, 2012, 21, 1, pp. 617-619.
- GUTIERREZ F., PARISE M., DE WAELE J., JOURDE H., "A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst", *Earth Sc. Rev.*, 2014, 138, pp. 61-88, doi: 10.1016/j.earscirev.2014.08.002.
- HEIDARI M., KHANLARI G.R., BEYDOKHTI A.T., MOMENI A.A., "The formation of cover collapse sinkholes in North of Hamedan. Iran *Geomorph.*, 2011, 132, 3-4), 76-86, doi.org/10.1093/acrefore/9780199389407.013.40.
- JIANG X., LEI M., LI Y., DAI J., "National-scale risk assessment of sinkhole hazard in China", In: "Sinkholes and the engineering and environmental impacts of Karst", 2005, pp. 649-658.
- KARIMI H. & TAHERI K., "Hazards and mechanism of sinkholes on Kabudar Ahang and Famenin plains of Hamadan, Iran", *Nat. Haz.*, 2010, 55, 2, pp. 481-499, doi.org/10.1007/s11069-010-9541-6.
- KIM Y.J., XIAO H., WANG D., CHOI Y.W., NAM B.H., "Development of sinkhole hazard mapping for Central Florida, *Geotech. Front.*, 2017, pp. 459-468.
- LARAGIONE R., MAGNI S., PARISE M., "Il Pulo di Altamura", In: Parise M., Inguscio S., Marangella A. (Eds.), *Atti del 45° Corso CNSS-SSI di III livello di "Geomorfologia Carsica"*, Grottaglie, 2-3 febbraio 2008, pp. 129-142.
- LEI M., GAO Y., JIANG X., HU Y., "Experimental study of physical models for sinkhole collapses in Wuhan, China", In: "Sinkholes and the engineering and environmental impacts of Karst", 2005, pp. 91-102.
- LI X., ROWLEY R.J., KOSTELNICK J.C., BRAATEN D., MEISEL J., HULBUTTA K., "GIS analysis of global inundation impacts from sea level rise", *Photogr. Eng. Rem. Sens.*, 2009, 75, 7, pp. 807-818.
- LISO I.S., PARISE M., "Apulian karst springs: a review", *Journ. of Environ. Sc. Eng. Techn.*, 2020, 8, pp. 63-83.

- LISO I.S., PARISE M., "Sinkhole development at the freshwater-saltwater interface in Apulia (southern Italy)", In: Land L., Kromhout C., Suter S. (Eds.), Proc. of the 17th Multidisciplinary Conference on "Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst", Tampa, Florida, USA, 27-31 March 2023, NCKRI Symposium no. 9, pp. 229-238.
- LOLLINO P., MARTIMUCCI V., PARISE M., "Geological survey and numerical modeling of the potential failure mechanisms of underground caves", *Geosyst. Eng.*, 2013, 16, 1, pp. 100-112, doi.org/ 10.1080/12269328.2013.780721.
- LOLLINO P., PARISE M., "La valutazione delle condizioni di stabilità di cavità sotterranee: approcci semplificati e metodi avanzati di calcolo", *Geologia dell'Ambiente*, 2014, suppl. 2, pp. 74-81.
- LOLLINO P., PARISE M., "Sinkhole hazard quantitative assessment: Insights from the application of numerical modelling techniques", In: Land L., Kromhout C., Suter S. (Eds.), Proceedings of the 17th Multidisciplinary Conference on "Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst", Tampa, Florida, USA, 27-31 March 2023, NCKRI Symposium no. 9, pp. 141-150.
- LOLLINO P., PARISE M., REINA A., "Numerical analysis of the behavior of a karst cavern at Castellana-Grotte, Italy" Proc. 1st International UDEC/3DEC Symposium, Bochum (Germany), 29 September – 1 October 2004, pp. 49-55.
- LUISI M., DI SANTO A., FIORE A., LEPORE D., LOLLINO P., MICCOLI M.N., PARISE M., SPALUTO L., "Modellazione numerica 3D agli elementi finiti (FEM) per la valutazione delle condizioni di stabilità di cavità antropiche del territorio pugliese: il caso studio della cava ipogea di San Procopio (Barletta, Murge settentrionali)", *Mem. Descr. Carta Geol. d'It.*, 2015, 99, pp. 327-336.
- MARGIOTTA S., MARINI G., FAY S., D'ONGHIA F.M., LISO I.S. PARISE M., PINNA M., "Hydro-stratigraphic conditions and human activity leading to development of a sinkhole cluster in a Mediterranean water ecosystem", *Hydrology*, 2021, 8, 111, doi.org/10.3390/hydrology8030111.
- MARGIOTTA S., MARTELOTTA M., PARISE M., "Inventory and analysis of underground oil mills in the territory of Lecce (Apulia, southern Italy)", In: Zhalov A., Gyorev V., Delchev P. (Eds.), *Hypogea 2019*, Proc. of Int. Congress of "Speleology in Artificial Caves", Dobrich, Bulgaria, 20-25 May 2019, pp. 33-38.
- MARGIOTTA S., NEGRI S., "Alla ricerca dell'acqua perduta", 2004, Congedo Ed., Galatina.
- MARGIOTTA S., NEGRI S., "Geophysical and stratigraphical research into deep groundwater and intruding seawater in the Mediterranean area (the Salento peninsula, Italy)", *Nat. Haz. Earth Syst. Sc.*, 2005, 5, pp. 127-136.
- MARGIOTTA S., NEGRI S., PARISE M., VALLONI R., "Mapping the susceptibility to sinkholes in coastal areas, based on stratigraphy, geomorphology and geophysics", *Nat. Haz.*, 2012, 62, 2, pp. 657-676.
- MARGIOTTA S., PARISE M., "Hydraulic and Geomorphological Hazards at Wetland Geosites Along the Eastern Coast of Salento (SE Italy)", *Geoheritage*, 2019, 11, pp. 1655-1666.

- MASCIOPINTO C., LISO I.S., "Assessment of the impact of sea-level rise due to climate change on coastal groundwater discharge", *Sc. Tot. Environ.*, 2016, 569-570, pp. 672-680.
- NEGRI S., MARGIOTTA S., QUARTA T.A.M., CASTIELLO G., FEDI M., FLORIO G., "Integrated analysis of geological and geo-physical data for the detection of man-made underground caves in an area in Southern Italy", *Journ. Cave and Karst St.*, 2015, 77, 1, pp. 52-62.
- NEWTON J.G., "Natural and induced sinkhole development in the eastern United States", In: *Proc. of the 3rd International Symposium on Land Subsidence, International Association of Hydrological Sciences*, 1984, Wallingford, UK, pp. 549-564.
- OZDEMIR A., "Investigation of sinkholes spatial distribution using the weights of evidence method and GIS in the vicinity of Karapınar (Konya, Turkey)", *Geomorphology*, 2015, 245, pp. 40-50, doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.04.034.
- OZDEMIR A., "Sinkhole susceptibility mapping using logistic regression in Karapınar (Konya, Turkey)", *Bull. Eng. Geol. Env.*, 2016, 75, 2, pp. 681-707, doi.org/10.1007/s10064-015-0778-x.
- PALMENTOLA G., "Il paesaggio carsico della Puglia", *Atti 3° Convegno di Speleologia Pugliese, Castellana-Grotte, 6-8 dicembre 2002, Grotte e Dintorni*, 2002, 4, pp. 203-220.
- PALMER A.N., "Cave Geology", *Cave Books*, 2007, Dayton, OH, USA, ISBN 978-0-939748-66-2.
- PARISE M., "Elementi di geomorfologia carsica della Puglia", In: Parise M., Inguscio S., Marangella A. (a cura di), *Atti del 45° Corso CNSS-SSI di III livello di "Geomorfologia Carsica"*, Grottaglie, 2-3 febbraio 2008, 2008a, pp. 93-118.
- PARISE M., "I sinkholes in Puglia", In: Nisio S. (a cura di), "I fenomeni naturali di sinkhole nelle aree di pianura italiane", *Mem. Descr. Carta Geol. d'It.*, 2008b, 85, pp. 309-334.
- PARISE M., "The impacts of quarrying in the Apulian karst", In: Carrasco F., La Moreaux J.W., Duran Valsero J.J., Andreo B. (Eds.), "Advances in research in karst media", 2010, Springer, pp. 441-447.
- PARISE M., "Surface and subsurface karst geomorphology in the Murge (Apulia, southern Italy)", *Acta Cars.*, 2011, 40, 1, pp. 79-93.
- PARISE M., "A present risk from past activities: sinkhole occurrence above underground quarries", *Carbonates and Evaporites*, 2012, 27, 2, pp. 109-118.
- PARISE M., "Karst geo-hazards: causal factors and management issues", *Acta Cars.*, 2015a, 44, 3, pp. 401-414.
- PARISE M., "A procedure for evaluating the susceptibility to natural and anthropogenic sinkholes", *Georisk*, 2015b, 9, 4, pp. 272-285.
- PARISE M., "Problematiche di dissesto idrogeologico connesse a cavità di origine naturale e antropica in Puglia", *Mem. Descr. Carta Geol. d'It.*, 2015c, 99, pp. 411-418.
- PARISE M., "Sinkholes", In: White W.B., Culver D.C., Pipan T. (Eds.), *Encyclopedia of Caves*, 2019, Academic Press, Elsevier, 3rd edition, ISBN 978-0-12-814124-3, pp. 934-942.
- PARISE M., "Sinkholes, Subsidence and Related Mass Movements", In: Shroder J.J.F. (Ed.), "Treatise on Geomorphology", 2022, 5, Elsevier, Academic Press, pp. 200-220.

- PARISE M., DERAZZA A., GARZIANO G., GENTILE M., LAGNA F., SANNICOLA G., SANTANCARGELO S., VIVA M., "Knowing the underground, as the first step for hazard management: an experience in southern Italy, in the aftermath of a catastrophic collapse", In: Zhalov A., Gyorev V., Delchev P. (Eds.), *Hypogea 2019*, Proc. of International Congress of "Speleology in Artificial Caves", Dobrich, Bulgaria, 20-25 May 2019, pp. 59-64.
- PARISE M., GALEAZZI C., BIXIO R., DIXON M., "Classification of artificial cavities: a first contribution by the UIS Commission", In: Filippi M., Bosak P. (Eds.), Proc. 16th International Congress of Speleology, Brno, 21-28 July 2013, 2, pp. 230-235.
- PARISE M., GUNN J. (EDS.), "Natural and anthropogenic hazards in karst areas: Recognition, Analysis and Mitigation", Geological Society, London, 2007, Special Publications, 279.
- PARISE M., LOLLINO P., "A preliminary analysis of failure mechanisms in karst and man-made underground caves in Southern Italy", *Geomorphology*, 2011, 134, 1-2, pp. 132-143.
- PARISE M., PALMISANO P., ONORATO R., "Contributo alla conoscenza dei fenomeni carsici di collasso in zone costiere del Salento Jonico (Puglia): la Spunnulata della Pajara", *Thalassia Salentina*, 2017, 39, pp. 99-121.
- PARISE M., VENNARI C., "A chronological catalogue of sinkholes in Italy: the first step toward a real evaluation of the sinkhole hazard", In: Land L., Doctor D.H., Stephenson B. (Eds.), Proc. of the 13th Multidisciplinary Conference on "Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst", Carlsbad, New Mexico, USA, 6-10 May 2013, National Cave and Karst Research Institute, 2013, pp. 383-392.
- PARISE M., VENNARI C., "Distribution and features of natural and anthropogenic sinkholes in Apulia", In: Renard P., Bertrand C. (Eds.), *EuroKarst 2016*, "Advances in the Hydrogeology of Karst and Carbonate Reservoirs", Neuchatel, 2017, Springer, Cham, Switzerland, pp. 27-34, ISBN 978-3-319-45464-1.
- PEPE M., PARISE M., "Structural control on development of karst landscape in the Salento Peninsula (Apulia, SE Italy)", *Acta Cars.*, 2014, 43, 1, pp. 101-114.
- PEPE P., PENTIMONE N., GARZIANO G., MARTIMUCCI V., PARISE M., "Lessons learned from occurrence of sinkholes related to man-made cavities in a town of southern Italy", In: Land L., Doctor D.H., Stephenson B. (Eds.), Proc. of the 13th Multidisciplinary Conference on "Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst", Carlsbad, New Mexico, USA, 6-10 May 2013, National Cave and Karst Research Institute, 2013, pp. 393-401.
- PERROTTI M., LOLLINO P., FAZIO N.L., PARISE M., "Stability charts based on the finite element method for underground cavities in soft carbonate rocks: validation through case-study applications", *Nat. Haz. Earth Syst. Sc.*, 2019, 19, pp. 2079-2095.
- PERROTTI M., LOLLINO P., FAZIO N.L., PISANO L., VESSIA G., PARISE M., FIORE A., LUISI M., "Finite Element-based stability charts for underground cavities in soft calcarenites", *ASCE Int. Journ. Geomech.*, 2018, 18, 7, 04018071.
- PIERI P., FESTA V., MORETTI M., TROPEANO M., "Quaternary tectonic of the Murge area (Apulian foreland - Southern Italy)", *Ann. Geofis.*, 1997, 40, 5, pp. 1395-1404.
- PISANO L., ZUMPANO V., PEPE M., LISO I.S., PARISE M., "Assessing Karst Landscape Degradation: a case study in Southern Italy", *Land*, 2022, 11, 1842.

- SAURO U., "A polygonal karst in Alte Murge (Puglia, southern Italy)", *Zeitschrift für Geomorphologie*, 1991, 35, 2, pp. 207-223.
- SAURO U., "Dolines and Sinkholes: Aspects of Evolution and Problems of Classification", *Acta Carsol.*, 2003, 32, pp. 41-52.
- SCOTTO DI SANTOLO A., FORTE G., SANTO A., "Analysis of sinkhole triggering mechanisms in the hinterland of Naples (southern Italy)", *Eng. Geol.*, 2018, 237, pp. 42-52.
- SHALEV E., LYAKHOVSKY V., "Viscoelastic damage modeling of sinkhole formation", *Journ. Struct. Geol.*, 2012, 42, pp. 163-170.
- SIMONE O., FIORE A., "Five Large Collapse Dolines in Apulia (Southern Italy) - the Dolina Pozzatina and the Murgian Puli", *Geoheritage*, 2014, 6, pp. 291-303.
- SINCLAIR W.C., STEWART J.W., "Sinkhole type, development, and distribution in Florida", *FGS, Map Series 110, Bureau of Geology*, 1985, 110, Tallahassee, ISSN: 0085-0624.
- SNYDER S.W., EVANS M.W., HINE A.C., COMPTON J.S., "Seismic expression of solution collapse features from the Florida Platform", In: *Multidisciplinary conference on "Sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst"*, 1989, 3, pp. 281-298.
- SUBEDI P., SUBEDI K., THAPA B., SUBEDI P., "Sinkhole susceptibility mapping in Marion County, Florida: evaluation and comparison between analytical hierarchy process and logistic regression-based approaches", *Sc. Rep.*, 9 1, pp. 1-18, doi.org/10.1038/s41598-019-43705-6.
- TAHERI K., GUTIÉRREZ F., MOHSENI H., RAEISI E., TAHERI M., "Sinkhole susceptibility mapping using the analytical hierarchy process (AHP) and magnitude-frequency relationships: A case study in Hamadan province, Iran", *Geomorphology*, 2015, 234, pp. 64-79.
- THARP T.M., "Mechanics of upward propagation of cover-collapse sinkholes", *Eng. Geol.*, 1999, 52, pp. 23-33.
- THARP T.M., "Poroelastic analysis of cover-collapse sinkhole formation by piezometric surface drawdown", *Environ. Geol.*, 2002, 42, 5, pp. 447-456.
- TROPEANO M., CALDARA M.A., DE SANTIS V., FESTA V., PARISE M., SABATO L., SPALLUTO L., FRANCESCANGELI R., IURILLI V., MASTRONUZZI G.A., PETRUZZELLI M., BELLINI F., CICALA M., LIPPOLIS E., PETTI F.M., ANTONELLI M., CARDIA S., CONTI J., LA PERNA R., MARINO M., MARSICO A., SACCO E., FIORE A., SIMONE O., VALLETTA S., D'ETTORRE U.S., DE GIORGIO V., LISO I.S., STIGLIANO E., "Geological uniqueness and potential geotouristic Appeal of Murge and Premurge, the first territory in Puglia (Southern Italy) aspiring to become a UNESCO Global Geopark", *Geosciences*, 2023, 13, 131, 27 pp., doi.org/10.3390/geosciences13050131.
- TUFANO R., GUERRIERO L., CORONA M.A., BAUSILIO G., DI MARTIRE D., NISIO S., CALCATERRA D., "Anthropogenic sinkholes of the city of Naples, Italy: An update", *Nat. Haz.*, 2022, pp. 1-32.
- TULIPANO L., FIDELIBUS M.D., "Mechanisms of groundwaters salinisation in a coastal karstic aquifer subject to overexploitation", *Proc. of 17th SWIM, Delft, The Netherlands*, 2002, pp. 39-49.

- VENNARI C., PARISE M., "A chronological database about natural and anthropogenic sinkholes in Italy", *Geosciences*, 2022, 12, 200, doi.org/10.3390/geosciences12050200.
- VENNARI C., SALVATI P., BIANCHI C., CASARANO D., PARISE M., BASSO A., MARCHESINI I., "AReGeoDatHa: Apulian regional GeoDatabase for geo-hydrological hazards", *Journ. Environ. Manag.*, 2022, 322, 116051.
- WILSON W.L., BECK B.F., "Hydrogeologic factors affecting new sinkhole development in the Orlando area", *Florida Groundwater*, 1992, 30, 6, pp. 918-930, doi.org/10.1111/j.1745-6584.1992.tb01575.x.

*Sinkholes formation mechanism in the Apulian territory and numerical modeling of processes.*

The almost exclusive carbonate nature of the outcropping rocks and the presence of numerous cavities of anthropic origin in the subsoil, deriving from the historical-cultural phases occurred over time, make Puglia a region extremely susceptible to the occurrence of sinkhole phenomena of natural (karst) and anthropogenic origin. The studies on this topic, conducted by our Research Group for several years, are summarized in this contribution, which illustrates the main types of sinkhole phenomena that occur in the Apulian territory. Further, it underlines the need to follow a specific classification, which is consistent with that used internationally, also describing the spatial and chronological distribution of sinkholes, as well as some examples of numerical modeling using finite element, distinct element, and hybrid type computational software. Particular attention is focused on the lithological and structural aspects, which strongly condition the choice of the constitutive models and numerical calculation approaches used, and on the hydrogeological characteristics of the sites involved. This last aspect is of particular relevance if we consider the distribution of sinkholes in coastal areas since the contact between fresh and seawater generates a dispersion zone characterized by brackish water generally undersaturated with calcium carbonate. Such mixing is more aggressive on the dissolution of carbonates, favoring and accelerating the formation of underground cavities, the primary cause of sinking in coastal areas.

*Keywords* - sinkholes, numerical modeling, geological risk, Apulia (Italy).

*“La Dinamica fluviale. La conoscenza del Fiume per la pianificazione e la salvaguardia del territorio”*

a cura di C. Cencetti, L. Di Matteo

*Culture Territori Linguaggi*, 24, 2023, pp. 115-125

ISBN 9788894469783

Paolo MAGLIULO<sup>1</sup>, Angelo CUSANO<sup>1</sup>, Filippo RUSSO<sup>1</sup>

VARIAZIONI DELLA LARGHEZZA D'ALVEO DEI PRINCIPALI  
FIUMI DELLA REGIONE CAMPANIA (ITALIA MERIDIONALE)  
NEGLI ULTIMI 150 ANNI

**Introduzione.** – Dalla fine del XIX secolo, i corsi d'acqua dell'Italia meridionale hanno sperimentato importanti modificazioni geomorfologiche che, solo molto recentemente, sono state investigate in dettaglio (Aucelli et al., 2011; Magliulo et al., 2013, 2016, 2021; Scorpio et al., 2015; Magliulo e Cusano, 2016; Scorpio e Roskopf, 2016; de Musso et al., 2020; Magliulo e Valente, 2020). Gli studi condotti convergono, in generale, sull'individuazione di almeno tre distinte fasi morfoevolutive per i fiumi dell'Italia meridionale. La prima fase, approssimativamente compresa tra la fine del XIX secolo e gli anni '40-'50 del XX secolo, è stata prevalentemente caratterizzata da lieve *widening* o stabilità della larghezza d'alveo; la seconda fase, tra gli anni '40-'50 e gli anni '90 del XX secolo, è stata univocamente caratterizzata da forte restringimento degli alvei (*narrowing*), con associata incisione del fondo; infine, la terza fase è stata caratterizzata da variazioni trascurabili nella larghezza dei corsi d'acqua.

Nonostante questa apparente convergenza, è possibile affermare, almeno per quanto riguarda la Fase-1 e la Fase-3, che la definizione di un *trend* morfoevolutivo comune a tutti i fiumi dell'Italia meridionale è, ancora oggi, lungi dall'essere definito. Ad esempio, durante la Fase-1, caratterizzata come detto da lieve *widening* o stabilità, alcuni fiumi (come ad esempio il F. Crati, in Calabria - Scorpio et al., 2015) sperimentavano processi di restringimento, mentre altri (come il F. Fortore - Scorpio e Roskopf, 2016) subivano allargamento in alcuni tratti e restringimento in altri. Allo stesso modo, durante la Fase-3, mentre il F. Sinni subiva processi

---

<sup>1</sup> Dipartimento di Scienze e Tecnologie, Università degli Studi del Sannio, Benevento, magliulo@unisannio.it

di lieve restringimento (Scorpio et al., 2015), il F. Volturno e il F. Calore risultavano stabili (Magliulo et al., 2013; Scorpio et al., 2015); il F. Crati risultava dapprima in restringimento e successivamente in allargamento (Scorpio et al., 2015); il F. Fortore sperimentava *widening* in alcuni tratti e stabilità in altri (Scorpio e Roskopf, 2016).

Un ulteriore oggetto di discussione, ad oggi, è rappresentato dal tipo e dal ruolo dei fattori di controllo delle variazioni morfologiche osservate. Dal momento che la maggior parte dei fiumi dell'Italia meridionale mostra una elevata antropizzazione, molti Autori attribuiscono a disturbi antropici, quali estrazione di inerti in alveo, costruzione di dighe, canalizzazioni, realizzazioni di difese spondali ecc., un ruolo dominante nel condizionamento delle variazioni di larghezza d'alveo (Aucelli et al., 2011; Magliulo et al., 2013; Scorpio et al., 2015; Scorpio e Roskopf, 2016; de Musso et al., 2020). Tuttavia, un recente lavoro (Magliulo et al., 2021a) ha evidenziato per un corso d'acqua dell'Italia meridionale ad alveo scarsamente antropizzato (il F. Tammaro) variazioni morfologiche perfettamente confrontabili per tempistica ed entità con quelli di fiumi decisamente più antropizzati, attribuendo un ruolo dominante, nel controllo delle variazioni morfologiche, alle interazioni tra variazioni di uso del suolo e regime pluviometrico, nonché alle piene eccezionali, peraltro in accordo con un'ampia letteratura internazionale (Arnaud-Fassetta, 2003; Hooke, 2016; Scorpio e Piégay, 2021).

In questo quadro così complesso e contrastante, appare allora evidente la necessità di nuovi casi-studio che forniscano un contributo alla definizione di traiettorie morfoevolutive comuni a scala regionale e che aiutino, altresì, a far luce sul ruolo giocato dai diversi fattori di controllo.

A tal fine, la presente nota espone i risultati preliminari relativi alle variazioni di larghezza d'alveo dei principali fiumi della Regione Campania (Italia meridionale) negli ultimi 150 anni circa. In particolare, sono stati analizzati i fiumi Calore, Tammaro, Sabato e Sele (Fig. 1).

***I fattori di controllo nell'area di studio.*** – I fiumi investigati scorrono all'interno di depressioni morfostutturali intra-appenniniche, con substrato costituito da depositi quaternari terrazzati di origine prevalentemente alluvionale e vulcanica (Brancaccio et al., 1987; Magliulo et al., 2007; Cartoian et al., 2014). Tali depositi, a loro volta, poggiano in discordanza su depositi terrigeni di età mio-pliocenica, che formano rilievi prevalentemente collinari soggetti a intense fenomenologie erosive, e su depositi carbonatici, spesso carsificati, di età mesozoica che costituiscono il substrato dei principali massicci montuosi (Mostardini e Merlini, 1986).

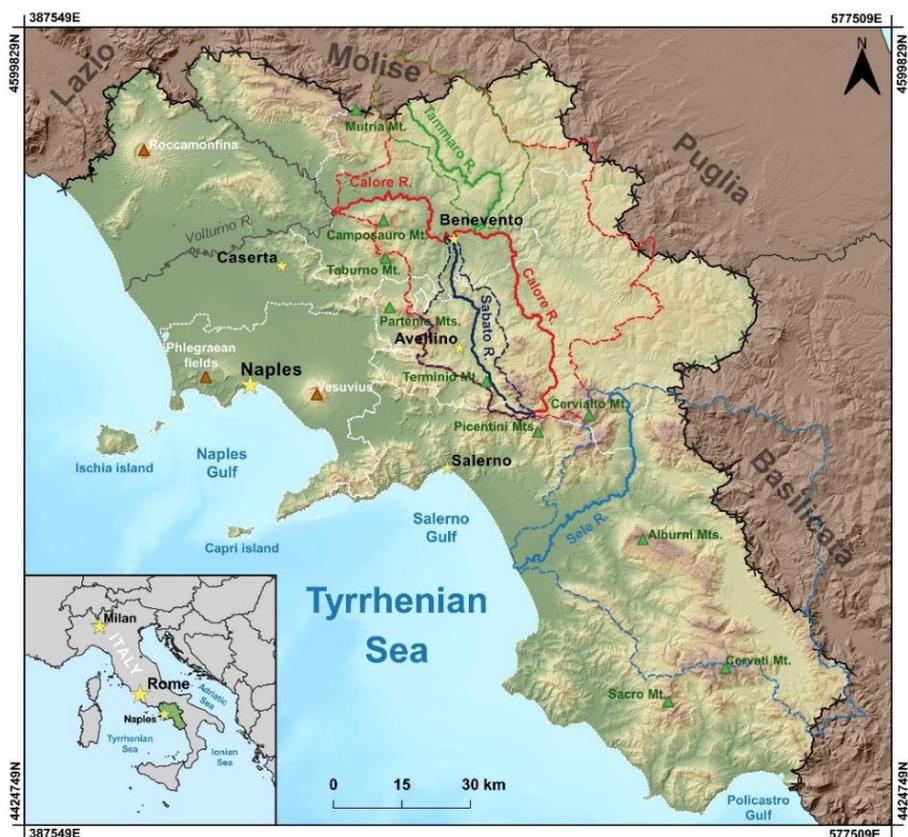


Fig. 1 - Ubicazione dei corsi d'acqua investigati nell'ambito della Regione Campania. Le linee tratteggiate delimitano i bacini idrografici.

Il clima della regione Campania è di tipo mediterraneo, con temperature medie annue comprese tra 10-12°C nelle aree interne e 13-15°C lungo la costa (Diodato, 2005). Il regime pluviometrico presenta un massimo principale in autunno-inverno e un minimo in estate. La pioggia media annua è compresa tra 700-900 mm lungo la costa e 1700-2000 mm nelle aree appenniniche interne (Bandini, 1931). I principali periodi umidi si sono verificati tra la metà degli anni '30 e la metà degli anni '40 e tra i primi anni '60 e la fine degli anni '70, mentre i principali periodi asciutti tra la metà degli anni '40 e i primi anni '60 e tra la fine degli anni '70 e la prima decade del XXI secolo (Longobardi e Villani, 2010; De Vita et al., 2012). Eventi di piena eccezionale hanno interessato i fiumi Calore e Tammaro nel 1949 e nel 2015 (Valente et al., 2016) e il F. Sele nel 2010.

L'uso del suolo è stato caratterizzato da una intensa fase di deforestazione tra la metà del

XIX secolo e gli anni '30 (Ellis et al., 2010), seguita da una espansione forestale a partire dagli anni '50, tuttora in corso, ma principalmente concentrata tra gli anni '60 e gli anni '90 (Magliulo et al., 2021b; 2022; 2023). In particolare, nel bacino del F. Sele la copertura forestale è aumentata del 18% dal 1960 al 1990 e del 14% dal 1990 al 2012 (Magliulo et al., 2021b), mentre nel bacino del F. Calore (che comprende i bacini del F. Sabato e del F. Tammaro) tale copertura è aumentata del 12% tra il 1960 e il 1990, mantenendosi poi invariata nel successivo trentennio (Magliulo et al., 2022)

Gli interventi antropici in alveo sono avvenuti principalmente tra gli anni '60 e gli anni '90, periodo nel quale, in particolare, l'estrazione di inerti, oggi vietata per legge, è stata particolarmente intensa (Scorpio et al., 2015; Magliulo et al., 2021a). I fiumi Sele e Tammaro, infine, sono sbarrati da dighe, la cui chiusura è avvenuta, rispettivamente, nel 1934 (diga di Persano) e nel 2006 (diga di Campolattaro).

**Materiali e metodi.** – Lo studio è stato condotto in ambiente GIS, utilizzando, in particolare, i software QGIS e ArcGIS<sup>®</sup>10.3. In tale ambiente sono state importate le carte storiche, le carte topografiche e le ortofoto elencate in Tabella 1.

Anno	Tipo	Produttore	Scala	Risoluzione di scansione (dpi)	Errore (m)	F. Calore	F. Sele	F. Sabato	F. Tammaro
1870	CS	IGMI	1:50.000	300	33	X	X	X	X
1909	CS	IGMI	1:50.000	600	29		X	X	X
1936	CS	IGMI	1:50.000	600	28	X			X
1941	CS	IGMI	1:50.000	600	26			X	
1955	CT	IGMI	1:25.000	1200	15	X	X	X	X
1998	O	RC	1:10.000	-	2	X	X	X	X
2011	O	RC	1:5000	-	-				X
2014	O	RC	1:5000	-	-	X	X	X	

Tab. 1 - *Materiali cartografici e ortofotografici utilizzati nel presente studio. Legenda – CS: Carta topografica Storica; CT: Carta Topografica; O: Ortofoto; IGMI: Istituto Geografico Militare Italiano; RC: Autorità Regionale della Campania. Gli errori sono stati calcolati secondo il metodo di Slama et al (1980) e Taylor (1982).*

Tali materiali hanno costituito la base su cui sono stati manualmente digitalizzati gli alvei dei diversi fiumi negli anni considerati, a valle di una loro georeferenziazione nel sistema UTM-WGS84, Zona 33N con il metodo dei *Ground Control Points (GCPs)*. L'area degli alvei è stata calcolata automaticamente mediante la funzione "*Calculate Geometry*" del software ArcGIS. La linea di centro-canale (*centerline*), necessaria per il calcolo della larghezza media degli alvei, è stata ricavata e misurata in automatico, a partire dal perimetro degli alvei, utilizzando il tool "*Fluvial Corridor*" di ArcGIS. La larghezza media di ciascun alveo è stata

calcolata secondo il metodo proposto da Surian et al. (2009a), ovvero dividendo l'area di ciascun alveo per la lunghezza della relativa *centerline*. Al fine di ridurre le incertezze derivanti dalla diversa scala dei materiali utilizzati, è stato calcolato l'indice *WR* (*Width Ratio*), definito come il rapporto tra la larghezza d'alveo su una determinata cartografia o ortofoto e la larghezza d'alveo sulla carta (o ortofoto) immediatamente precedente (Surian et al., 2009b).

Sono stati, quindi, condotti rilievi geomorfologici diretti in campo, atti a validare i risultati dell'analisi in ambiente GIS. Infine, lo studio della letteratura preesistente ha consentito di ottenere utili informazioni sui principali fattori di controllo (uso del suolo, precipitazioni, disturbi antropici) nell'intervallo di tempo considerato (si veda il paragrafo precedente).

**Risultati.** – La Figura 2 evidenzia che, dal 1870 ai tardi anni '30/primi anni '40, tutti i fiumi investigati hanno sperimentato una fase di lieve allargamento o relativa stabilità, con l'eccezione del F. Sele, in restringimento (Tab. 2). I tassi di variazione media annua della larghezza d'alveo (Fig. 3) evidenziano i massimi valori di *widening* per il F. Tammaro (0,29 m/anno). A tale fase si farà di seguito riferimento come Fase-1.

La stessa Figura 2 evidenzia, inoltre, come tutti i corsi d'acqua considerati abbiano sperimentato un intenso restringimento tra la fine degli anni '30/inizio degli anni '40 e la fine degli anni '90. A tale fase si farà riferimento come Fase-2. Tale restringimento è stato relativamente rapido, in particolare, per il F. Calore, con un tasso di -2,20 m/anno (Fig. 3). L'apparente e parziale eccezione rappresentata dal F. Tammaro, in allargamento tra il 1936 e il 1955, è stata spiegata da Magliulo et al. (2021a) con gli effetti della catastrofica piena del 2 ottobre 1949, in grado di provocare, come ampiamente evidenziato in letteratura (ad es. Surian et al., 2016), intensi e persistenti allargamenti degli alvei di corsi d'acqua con le caratteristiche del F. Tammaro. Tuttavia, nonostante tale evento, questo corso d'acqua, al termine della Fase-2, ha comunque sperimentato un *narrowing* netto del 64,5% (Tab. 2), in linea con gli altri fiumi investigati, ad un tasso di -0,78 m/anno (Fig. 3).

Infine, a partire dagli anni '90 in poi, la larghezza d'alveo dei corsi d'acqua considerati mostra variazioni minime e non univoche (Fig. 2 e Tab. 2). In particolare, i fiumi di maggiori dimensioni (Calore e Sele) hanno sperimentato lievi allargamenti, con tassi rispettivamente di 0,30 e 0,10 m/anno, mentre i corsi d'acqua di minore importanza (Tammaro e Sabato) sono stati caratterizzati da un *narrowing* pari al 10% circa (Tab. 2), con tassi inferiori a 0,3 m/anno (Fig. 3).

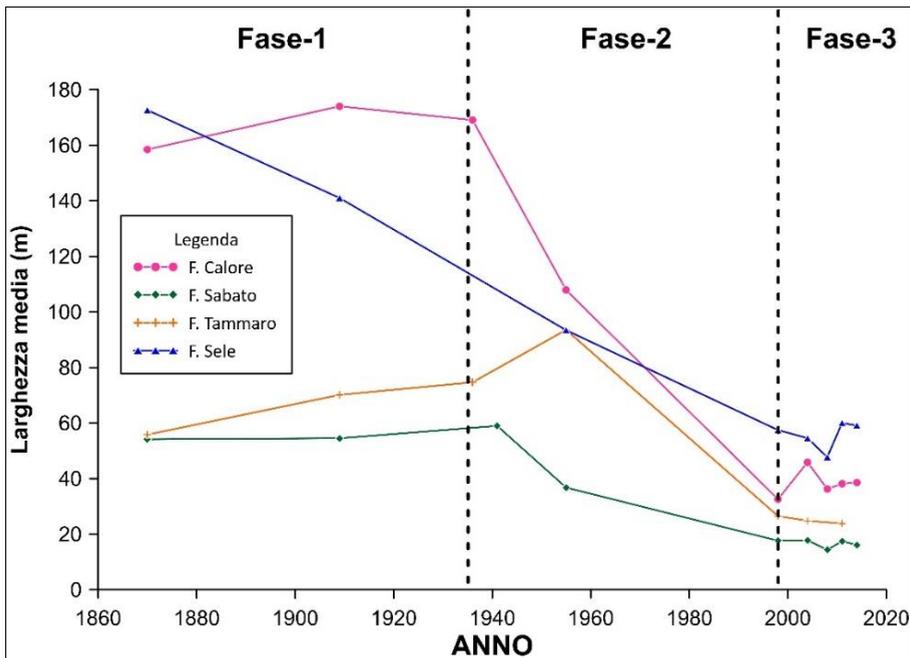


Fig. 2 - Variazioni della larghezza d'alveo dei corsi d'acqua investigati.

Fiume	Fase-1			Fase-2			Fase-3		
	$\Delta W$		WR	$\Delta W$		WR	$\Delta W$		WR
	(m)	(%)		(m)	(%)		(m)	(%)	
Calore	11	6.7	1.1	-136	-80.7	0.2	6	18.5	1.2
Sabato	5	9.0	1.1	-41	-70.1	0.3	-2	-8.9	0.9
Tammaro	19	33.8	1.3	-48	-64.5	0.4	-2	-10.2	0.9
Sele	-79	-45.9	0.5	-36	-38.5	0.5	2	2.9	1.0

Tab. 2 - Variazioni della larghezza d'alveo dei fiumi investigati ( $W$ ) e rapporti di larghezza (Width Ratio, WR).

**Discussione e conclusioni.** – La Figura 4 mette in relazione le variazioni di larghezza d'alveo riscontrate con quelle dei principali fattori di controllo (variazioni della copertura boschiva, precipitazioni, escavazione di inerti in alveo; si veda anche il paragrafo "Fattori di controllo"), al fine di avanzare ipotesi preliminari sulle traiettorie morfoevolutive dei corsi d'acqua investigati.

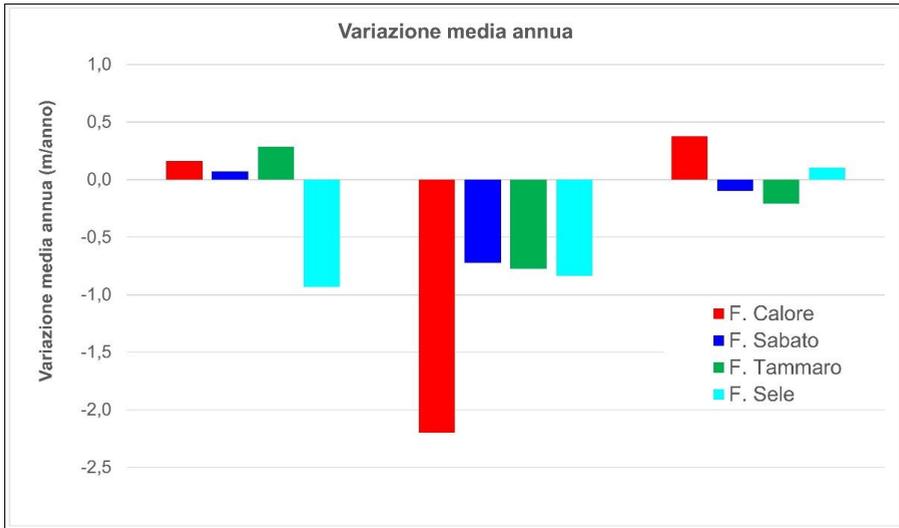


Fig. 3 - Tassi di variazione media annua della larghezza d'alveo dei corsi d'acqua investigati.

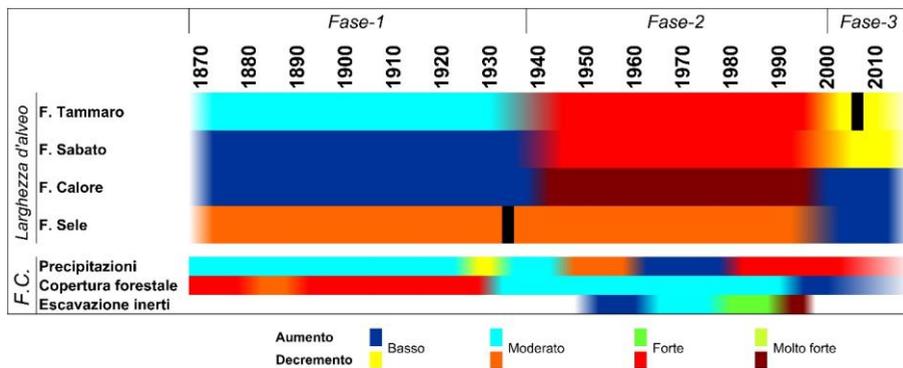


Fig. 4 - Traiettorie morfologiche dei corsi d'acqua investigati e rapporti con i trend dei fattori di controllo (F.C.). Le caselle annerite marciano l'anno di chiusura delle dighe sui fiumi Tammaro e Sele.

I processi di moderato o lieve *widening*, predominanti durante la Fase-I (Fig. 4), appaiono in buon accordo con il decremento della copertura forestale verificatosi in Italia meridionale tra la metà del XIX secolo e gli anni '30 del XX secolo (Ellis et al., 2010) e il contemporaneo aumento delle precipitazioni piovose (Longobardi & Villani, 2010; De Vita et al., 2012). Tale scenario è coerente, infatti, con un possibile aumento dell'apporto solido dai versanti verso i corsi d'acqua, con conseguenti allargamenti degli alvei. In tale scenario, il F. Sele appare tuttavia discordante. Va tuttavia precisato che non esistono studi sulle variazioni della copertura forestale alla sola scala di bacino precedenti agli anni '60 (quindi, durante la Fase-I), ma uni-

camente studi a scala regionale. Non può essere escluso, pertanto, che il bacino del F. Sele possa aver subito un processo di rimboschimento già durante questa fase morfoevolutiva, controllata altrove da un diffuso disboscamento. Del resto, differenze nei *trend* di variazione di uso del suolo a scala bacinale nella stessa area geografica sono state documentate, in anni più recenti, ad esempio tra il bacino del F. Sele (significativo aumento della copertura forestale tra il 1990 e la prima decade degli anni 2000) e il bacino del F. Calore (invarianza della superficie boscata nello stesso periodo - Magliulo et al., 2021b; 2022; 2023).

La fase di intenso *narrowing*, qui denominata Fase-2, appare in buon accordo sia con l'aumento della superficie boscata alla scala di bacino (Magliulo et al., 2021b; 2022), verosimilmente in grado di ridurre l'erosione sui versanti e, quindi, l'apporto solido verso i corsi d'acqua, sia con l'intensa escavazione di inerti dagli alvei in questo periodo (Rinaldi et al., 2005). Appare plausibile, inoltre, che i maggiori impulsi in questa fase di restringimento si siano verificati durante i periodi di moderato o forte decremento delle precipitazioni che hanno caratterizzato la Fase-2 (Fig. 4), probabilmente in grado di ridurre ulteriormente l'erosione idrica sui versanti e, quindi, l'apporto di sedimenti verso gli alvei fluviali.

Infine, i *trend* contrastanti nelle variazioni della larghezza d'alveo osservati nella Fase-3 potrebbero essere, almeno in parte, spiegati con la relativa brevità del periodo di osservazione. Sicuramente meritevole di ulteriori approfondimenti appare la possibile relazione tra dimensioni del corso d'acqua (e del relativo bacino) e tipologia di variazione di larghezza d'alveo osservata (allargamento nei fiumi di maggiori dimensioni; restringimento in quelli minori). Certamente da escludere, quale fattore di controllo nella Fase-3, appare l'estrazione di inerti in alveo, in quanto cessata, poiché proibita per legge sin dalla fine degli anni '90. Diversi studi sembrano indicare, quale fattore di controllo di una certa rilevanza in questa fase, la frequenza e la magnitudo degli eventi di piena (Surian et al., 2016; de Musso et al., 2020; Magliulo e Valente, 2020).

In conclusione, il presente studio, seppur a carattere preliminare, è stato comunque in grado di evidenziare analogie e discrepanze nelle variazioni di larghezza d'alveo dei principali fiumi campani, confermando l'esistenza di almeno tre distinte fasi morfoevolutive, già evidenziata in precedenti studi. Inoltre, da questo studio preliminare, l'interazione tra variazioni della copertura forestale e variazioni del regime pluviometrico appare essere un fattore di controllo di notevole rilevanza e in grado di ben spiegare la maggior parte delle variazioni osservate.

Appare comunque necessario un approfondimento degli studi, attraverso, ad esempio, un'analisi alla scala di tratto (Rinaldi et al., 2015) che evidenzi l'omogeneità lungo il corso d'acqua considerato delle variazioni osservate anche di altri parametri quali, ad esempio, *pattern* morfologico e sinuosità, nonché il ruolo di fattori di controllo maggiormente localizzati (ad es. confinamento) e/o antropici. Le variazioni spazio-temporali dei principali fattori di

controllo appaiono anch'esse meritevoli di approfondimenti, allo stato già in corso.

#### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- ARNAUD-FASSETTA G., "River channel changes in the Rhone Delta (France) since the end of the Little Ice Age: geomorphological adjustment to hydroclimatic change and natural resource management", *Catena*, 2003, 51, pp. 141-172.
- AUCELLI P.P.C., FORTINI P., ROSSKOPF C.M., SCORPIO V., VISCOSI V., "Effects of recent channel adjustments on riparian vegetation: some examples from Molise region (Central Italy)", *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 2011, 34, 161-173.
- BANDINI A., "Tipi pluviometriche dominanti sulle regioni italiane, Il Servizio Idrografico Italiano", Ministero dei Lavori Pubblici, Roma, 1931, pp. 111-118.
- BRANCACCIO L., CINQUE A., D'ANGELO G., RUSSO F., SANTANGELO N., SGROSSO I., "Evoluzione tettonica e geomorfologica della Piana del Sele (Campania, Appennino meridionale)", *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 1987, 10, pp. 47-55.
- CARTOJAN E., MAGLIULO P., MASSA B., VALENTE A., "Morphotectonic features of the Tammaro River basin, Southern Apennines, Italy", *Rend. Lincei*, 2014, 25 (Suppl. 2), pp. 217-229, doi: 10.1007/s12210-014-0349-2.
- DE MUSSO N.M., CAPOLONGO D., CALDARA M., SURIAN N., PENNETTA L., "Channel changes and controlling factors over the past 150 years in the Basento River (Southern Italy)", *Water*, 2020, 12, 307, 22 pp., doi: 10.3390/w12010307.
- DE VITA P., ALLOCCA V., MANNA F., FABBROCINO S., "Coupled decadal variability of the North Atlantic Oscillation, regional rain-fall and karst spring discharges in the Campania region (Southern Italy)", *Hydr. Earth Syst. Sc.*, 2012, 16, pp. 1389-1399, doi: 10.5194/hess-16-1389-2012.
- DIODATO N., "The influence of topographic co-variables on the spatial variability of precipitation over small regions of complex terrain", *Int J Climatol*, 2005, 25, pp. 351-363.
- ELLIS E.C., GOLDEWIJK K.K., SIEBERT S., LIGHTMAN D., RAMANKUTTY N., "Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000", *Glob. Ecol. and Biogeogr.*, 2010, 19 (5), pp. 589-606.
- HOOKE J.M., "Geomorphological impacts of an extreme flood in SE Spain", *Geomorphology*, 2016, 263, pp. 19-38, doi: 10.1016/j.geomorph.2016.03.021.
- LONGOBARDI A., VILLANI P., "Trend analysis of annual and seasonal rainfall time series in the Mediterranean area", *Int J Climatol*, 2010, 30, pp. 1538-1546, doi: 10.1002/joc.2001.
- MAGLIULO P., BOZZI F., LEONE G., FIORILLO F., LEONE N., RUSSO F., VALENTE, A., "Channel adjustments over 140 years in response to extreme floods and land-use change, Tammaro River, Southern Italy". *Geomorphology*, 2021a, 383, 18 pp., doi: 10.1016/j.geomorph.2021.107715.

- MAGLIULO P., BOZZI F., PIGNONE M., "Assessing the planform changes of the Tammaro River (Southern Italy) from 1870 to 1955 using a GIS-aided historical map analysis", *Environ. Earth Sc.*, 2016, 75 (4), pp. 1-19, doi: 10.1007/s12665-016-5266-5.
- MAGLIULO P., CUSANO A., "Geomorphology of the lower Calore River alluvial plain (Southern Italy)", *J Maps*, 2016, 12 (5), pp. 1119-1127, doi: 10.1080/17445647.2015.1132277.
- MAGLIULO P., CUSANO A., IACOMINO CAPUTO G., RUSSO F., "Changes in Land-Cover/Land-Use pattern in the Fortore River Basin (Southern Italy) and morphodynamic implications", *Land*, 2023, 12, 1393, doi: 10.3390/land12071393.
- MAGLIULO P., CUSANO A., RUSSO F., "Land-use changes in the Sele River Basin landscape (Southern Italy) between 1960 and 2012: comparisons and implications for soil erosion assessment". *Geographies*, 2021b, 1, 315-332, doi: 10.3390/geographies1030017.
- MAGLIULO P., CUSANO A., SESSA S., BEATRICE M., RUSSO F., "Multidecadal land-use changes and implications on soil protection in the Calore River Basin landscape (Southern Italy)". *Geosciences*, 2022, 12, 156, doi: 10.3390/geosciences12040156.
- MAGLIULO P., RUSSO F., VALENTE A., "Tectonic significance of geomorphological features in the Telesina Valley (Campanian Apennines)", *Boll. Soc. Geol. It.*, 2007, 126 (2), pp. 397-409.
- MAGLIULO P., VALENTE A., "GIS-based geomorphological map of the Calore River floodplain near Benevento (Southern Italy) overflowed by the 15<sup>th</sup> October 2015 event", *Water*, 12 (1), 2020, 148, 17 pp., doi: 10.3390/w12010148.
- MAGLIULO P., VALENTE A., CARTOJAN E., "Recent morphological changes of the middle and lower Calore River (Campania, Southern Italy)", *Environ. Earth Sc.*, 2013, 70, pp. 2785-2805, doi: 10.1007/s12665-013-2337-8.
- MOSTARDINI F., MERLINI S., "Appennino centro meridionale. Sezioni geologiche e proposta di modello strutturale", *Mem. Soc. Geol. It.*, 1986, 35, pp. 177-202.
- RINALDI M., SURIAN N., COMITI F., BUSSETTINI M., "A methodological framework for hydromorphological assessment, analysis and monitoring (IDRAIM) aimed at promoting integrated river management", *Geomorphology*, 2015, 251, pp. 122-136, doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.010.
- RINALDI M., WYZGA B., SURIAN N., "Sediment mining in alluvial channels: physical effects and management perspectives", *River Res. Appl.*, 2005, 21 (7), pp. 805-828, doi: 10.1002/rra.884.
- SCORPIO V., AUCELLI P.P.C., GIANO I., PISANO L., ROBUSTELLI G., ROSSKOPF C.M., SCHIATTARELLA M., "River channel adjustment in Southern Italy over the past 150 years and implications for channel recovery", *Geomorphology*, 251, 2015, pp. 77-90, doi: 10.1016/j.geomorph.2015.07.008.
- SCORPIO V., PIÉGAY H., "Is afforestation a driver of change in Italian rivers within the Anthropocene era?", *Catena*, 198, 2021, 105031. doi: 10.1016/j.catena.2020.105031.
- SCORPIO V., ROSSKOPF C.M., "Channel adjustments in a Mediterranean river over the last 150 years in the context of anthropic and natural controls", *Geomorphology*, 2016, 275, pp. 90-104, doi: 10.1016/j.geomorph.2016.09.017.

- SLAMA C.C., HENRIKSEN S.W., THEURER C., "Manual of Photogrammetry". 4th Edition, Am. Soc. of Photogr., Falls Church Virginia, EEUU, 1980, 1056 pp.
- SURIAN N., RIGHINI M., LUCÍA A., NARDI L., AMPONSAH W., BENVENUTI M., BORGA M., CAVALLI M., COMITI F., MARCHI L., RINALDI M., VIERO, A., "Channel response to extreme floods: Insights on controlling factors from six mountain rivers in northern Apennines, Italy". *Geomorphology*, 2016, 272, pp. 78-91, doi: 10.1016/j.geomorph.2016.02.002.
- SURIAN N., RINALDI M., PELLEGRINI L., "Linee guida per l'analisi geomorfologica degli alvei fluviali e delle loro tendenze evolutive", Cleup, Padova (Italy), 2009a, 79 pp.
- SURIAN N., RINALDI M., PELLEGRINI L., AUDISIO C., MARAGA F., TERUGGI L., TURITTO O., ZILIANI L., "Channel adjustments in northern and central Italy over the last 200 years", In: *Management and Restoration of Fluvial Systems with Broad Historical Changes and Human Impacts* (James L.A., Rathburn S.L., Whittecar G.R., Eds.), Geol. Soc. of Am., 2009b, Special Paper, Vol. 3, 451, pp. 83-95, doi: 10.1130/2009.2451(05).
- TAYLOR J.R., "An Introduction to Error Analysis". University Science Books, Sausalito, CA, 1982, 327 pp.
- VALENTE A., ISCARO C., MAGLIULO P., RUSSO F., "The 14-15 October 2015 flooding in Benevento: a short report". *Rend. Online Soc. Geol. It.*, 2016, 38, pp. 105-108, doi: 10.3301/ROL.2016.30.

*Variations in the channel width of the main rivers of the Campania region (southern Italy) over the last 150 years.*

The preliminary results of a geomorphological analysis in a GIS environment are presented, aimed at recognizing and quantifying the variations in the channel width of the main rivers of the Campania Region (southern Italy) over the last 150 years or so. In particular, the rivers analyzed were Sele, Calore, Sabato and Tammaro. The variations experienced took place in the context of three main and distinct morpho-evolutionary phases. In the first phase (from the end of the 19th century to the end of the 1930s), slight widening of the channel was observed, with the exception of the Sele River, which was narrowing. In the second phase (late 1930s-late 1990s), all rivers experienced narrowing at high or very high rates. Finally, the third phase (from the end of the 1990s onwards) was characterized by the absence of dominant trends and, in any case, by overall negligible changes in the width of the channel. Among the possible causes of these variations, recent studies have highlighted variations in the forest cover in the basins considered in good agreement with what has been observed. Therefore, although more detailed analyzes are necessary, the variations in land use, together with those in the rainfall regime, exceptional floods and human disturbances, would seem to be the environmental factors mainly responsible for the modifications of the channel width observed.

*Keywords* - geomorphological evolution, fluvial dynamics, Campania.

*“La Dinamica fluviale. La conoscenza del Fiume per la pianificazione e la salvaguardia del territorio”*

a cura di C. Cencetti, L. Di Matteo

*Culture Territori Linguaggi*, 24, 2023, pp. 126-128

ISBN 9788894469783

Gian Marco MARMONI<sup>1</sup>, Michele DEL CHIARO<sup>1</sup>, Mohammad MOUMENI<sup>1</sup>,  
Reza NOZAEM<sup>2</sup>, Francesca BOZZANO<sup>1</sup>, Francesco TROIANI<sup>1</sup>,  
Carlo ESPOSITO<sup>1</sup>, Salvatore MARTINO<sup>1</sup>, Marta DELLA SETA<sup>1</sup>

RISPOSTA GRAVITATIVA DI VERSANTI IN DEFORMAZIONE  
GUIDATA DALL'INCISIONE FLUVIALE: CASI STUDIO  
DALL'ITALIA E DALL'IRAN

**Riassunto.** – Le grandi deformazioni gravitative di versante si verificano in risposta alle variazioni del livello di base locale come effetto della tettonica e dell'erosione. Per mettere a fuoco l'insorgenza e la progressione di deformazioni gravitative di versante in atto, è necessario inquadrare il ruolo combinato dei fattori predisponenti geologici statici e dei cambiamenti dinamici avvenuti nel lungo termine e causati dal sollevamento tettonico e dai processi fluviali.

Lo studio presentato riassume le recenti esperienze dall'Iran e dall'Italia, dove deformazioni gravitative profonde di versante sono evolute raggiungendo diversi stadi di processo, che vanno dalla deformazione secondaria e stazionaria per *creep* in roccia fino al collasso parossistico terziario.

La deformazione profonda iraniana studiata interessa il versante SE dell'anticlinale di Siah Kuh nel Lorestan (Monti Zagros, Iran), a monte dell'intersezione tra la Mountain Front Fault (MFF) e la zona di faglia di Balarud, su un'area di circa 8 km<sup>2</sup>. Nella porzione settentrionale, grazie all'interferometria satellitare con tecniche PSI in un lasso di tempo che va dall'ottobre 2014 al marzo 2019, è stato osservato un tasso di spostamento al suolo di 6 mm/anno, che si associa alla presenza di fratture da trazione e di taglio che coinvolgono il rigido carapace calca-

---

<sup>1</sup> Dipartimento di Scienze della Terra, Università Sapienza di Roma, Roma, gianmarco.marmoni@uniroma1.it

<sup>2</sup> Dipartimento di Scienze, Università di Tehran, Iran

reo sotto la deformazione delle sottostanti marne.

Le condizioni di rottura sono state, invece, raggiunte circa 10ka fa nella porzione occidentale del M. Rava, pendice del M. Genzana (Appennino centrale, Italia), dove parte della deformazione del versante si è evoluta in un'enorme *rock avalanche* che ha sbarrato il corso fluviale, originando il Lago di Scanno. Le due deformazioni sono strettamente correlate all'evoluzione dei sistemi di drenaggio del F. Dowairij (Iran) e del F. Tasso-Sagittario (Italia), le quali sono risultate direttamente correlate all'attività tettonica del MFF e della faglia diretta del M. Genzana.

A questo proposito, sfruttando l'integrazione di analisi geomorfiche quantitative e datazioni con Luminescenza Stimolata Otticamente (OSL), sono stati estratti in modo semi-automatico terrazzi fluviali a varia elevazione sopra il fondovalle, permettendone la definizione dell'ordine. Successivamente, la loro distribuzione plano-altimetrica è stata correlata lungo il profilo longitudinale del fiume, datando due terrazzi situati lungo la MFF, consentendo la stima di un tasso di sollevamento di  $2,8 \pm 0,2$  mm/anno, *uplift* che avrebbe controllato le fasi di accelerazione della deformazione di versante.

Analogamente, per la deformazione che ha preceduto l'occorrenza della *rock avalanche* di Scanno, sulla base di analisi geomorfologiche e morfometriche di superfici erosive relitte sospese a diverse quote sopra l'attuale livello di base locale, nonché di metriche topografiche tempo-dipendenti, è stato possibile descrivere le principali fasi morfoevolutive in risposta a cambiamenti significativi del livello di base. Sulla base di questo modello morfoevolutivo è stata eseguita la modellazione numerica sforzo-deformazione per ricostruire a ritroso i processi che hanno portato allo sviluppo della deformazione, consentendo di evidenziare una rottura sequenziale multistadio. Sono state infine vincolate le possibili relazioni tra l'assetto geologico e strutturale ereditato e le dinamiche morfoevolutive del sistema valle-versante.

#### *Gravity response of river incision-driven slope deformation: case studies from Italy and Iran.*

Large gravitational slope deformations occur in response to changes in local base level as a result of tectonics and erosion. To focus on the onset and progression of gravitational slope deformations in progress, it is necessary to frame the combined role of static geological predisposing factors and dynamic changes that have occurred in the long term and caused by tectonic uplift and fluvial processes. The study summarizes the recent experiences from Iran and Italy, where deep gravitational slope deformations have evolved reaching different process stages, ranging from secondary and stationary deformation by rock creep up to paroxysmal tertiary collapse. The Iranian deep deformation studied affects the SE slope of the Siah Kuh anticline in Lorestan (Zagros Mountains, Iran), upstream of the intersection between the Mountain Front Fault (MFF) and the Balarud Fault Zone, over an area of about 8 km<sup>2</sup>. In the

northern portion, thanks to satellite interferometry with PSI techniques in a period of time ranging from October 2014 to March 2019, a ground displacement rate of 6 mm/year was observed, which is associated with the presence of traction and shear involving the rigid calcareous bedrock under the deformation of the underlying marls. The failure conditions were, however, reached about 10ka ago in the western portion of Mt. Rava, foot of Mt. Genzana (Central Apennines, Italy), where part of the slope deformation evolved into an enormous rock avalanche which has blocked the river flow, giving rise to Lake of Scanno. The two deformations are closely related to the evolution of the drainage systems of the Dowairij River (Iran) and of the Tasso-Sagittario River (Italy), which resulted directly related to the tectonic activity of the MFF and of the direct fault of the M. Genzana. In this regard, exploiting the integration of quantitative geomorphic analyzes and dating with Optically Stimulated Luminescence (OSL), river terraces were extracted in a semi-automatic way at various elevations above the valley floor, allowing the definition of the orders. Subsequently, their planaltimetric distribution was correlated along the longitudinal profile of the river, dating two terraces located along the MFF, allowing the estimation of an uplift rate of  $2.8 \pm 0.2$  mm/year, an uplift that would have controlled the acceleration phases of the slope deformation. Similarly, for the deformation that preceded the occurrence of the Scanno rock avalanche, on the basis of geomorphological and morphometric analyzes of relict erosive surfaces suspended at different altitudes above the current local base level, as well as time-dependent topographical metrics, it was possible to describe the main morpho-evolutionary phases in response to significant changes in the base level. On the basis of this morpho-evolutionary model, stress-strain numerical modeling was performed to reconstruct backwards the processes that led to the development of the deformation, allowing to highlight a multistage sequential failure. Finally, the possible relationships between the inherited geological and structural structure and the morpho-evolutionary dynamics of the valley-slope system were constrained.

*Keywords* - geomorphological evolution, gravity response, tectonics, Zagros Mountains (Iran), central Apennines (Italy).

*“La Dinamica fluviale. La conoscenza del Fiume per la pianificazione e la salvaguardia del territorio”*

a cura di C. Cencetti, L. Di Matteo

*Culture Territori Linguaggi*, 24, 2023, pp. 129-135

ISBN 9788894469783

Endro MARTINI<sup>1</sup>

## STRUMENTI PER UNA GESTIONE INTEGRATA E PARTECIPATA DEGLI SPAZI FLUVIALI: CONTRATTI DI FIUME E DIBATTITO PUBBLICO

***I Contratti di Fiume.*** – La lettura di un fiume e delle sue tendenze morfoevolutive, con riferimento alla dinamica fluviale di medio e lungo periodo, attraverso analisi storico-cartografiche e delle caratteristiche geomorfologiche, rappresenta l'unica via di studio corretta di partenza (ancora poco seguita) da porre in atto nella fase dell'analisi conoscitiva dei Contratti di Fiume, in relazione anche agli aspetti idrogeologici e di scambio falda-fiume.

Il “Tavolo Nazionale Contratti di Fiume”, fondato nel 2007 con l'obiettivo di raccogliere buone pratiche e contributi per definire linee guida che consentissero una gestione integrata dei fiumi e dei territori contermini su tutti i bacini idrografici del territorio italiano, ha portato in Italia le esperienze francesi e della Vallonia quali strumenti per una nuova *governance* integrata e partecipata. La prima riunione del Tavolo Nazionale sui Contratti di Fiume si svolse a Umbertide, in Umbria, sul Tevere, il 4 aprile 2008. La svolta per i Contratti di Fiume in Italia si è avuta nel 2015, in occasione di “Milano Expo”, con la pubblicazione dell'approccio Italiano ai Contratti di Fiume nel “*UN World Water Development Report 2015, Water for a Sustainable World*”, con il titolo “*The Italian Experience of River Contracts and Case Study of the Serchio Valley*”, UNESCO's contribution to the United Nations World Water Development Report 2015 “*Facing the Challenges. Case Studies and Indicators*” (Massimo Bastiani, Endro Martini, Giorgio Pineschi) e infine nel 2016, quando nel Codice dell'Ambiente i Contratti di Fiume vengono inseriti all'Art 68 bis (Fig. 1).

---

<sup>1</sup> Già Regione Umbria, Società Italiana di Geologia Ambientale (SIGEA APS), Roma, endromartini@gmail.com

## Dispositivo dell'art. 68 bis Codice dell'ambiente

Fonti → Codice dell'ambiente → PARTE TERZA - Norme in materia di difesa del suolo e lotta alla desertificazione, di tutela delle acque dall'inquinamento e di gestione delle risorse idriche → Sezione I - Norme in materia di difesa del suolo e lotta alla desertificazione → Titolo II - I distretti idrografici, gli strumenti, gli interventi → Capo II - Gli strumenti

1. I contratti di fiume concorrono alla definizione e all'attuazione degli strumenti di pianificazione di distretto a livello di bacino e sottobacino idrografico, quali strumenti volontari di programmazione strategica e negoziata che perseguono la tutela, la corretta gestione delle risorse idriche e la valorizzazione dei territori fluviali, unitamente alla salvaguardia dal rischio idraulico, contribuendo allo sviluppo locale di tali aree.

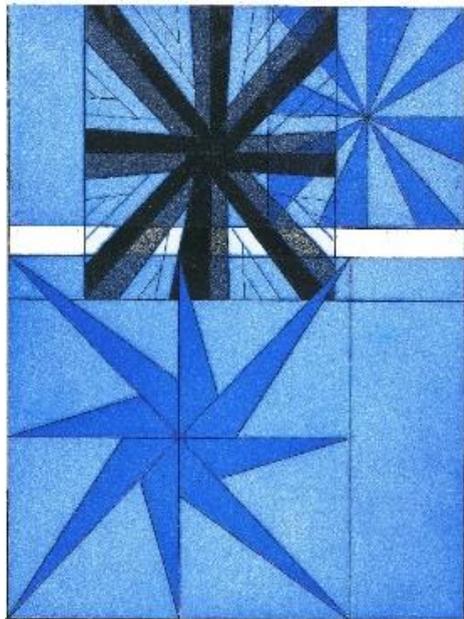


Fig. 1 - Estratto dal Codice dell'Ambiente (D.lgs. 03/04/2006 n. 152 e s.m.ci. e calcografia, numerata e firmata, del Premio 2015 di Oscar Piattella).

Un contratto di Fiume si sviluppa attraverso un *modus operandi* che prevede un manifesto di intenti iniziale, sottoscritto volontariamente da *stakeholders* pubblici e privati che diventano attori del Contratto, un quadro conoscitivo socio-economico e ambientale comprensivo di una *swot* partecipata, un documento strategico frutto di un esercizio di *visioning* e si conclude con un Programma d'Azione che descrive gli interventi strutturali e non strutturali rivenienti dal basso a seguito di tavoli tematici di lavoro partecipati (Vedi documento "ISPRA-MATT - TAVOLO NAZIONALE 2015").

A seguito della diffusione dei Contratti di Fiume in Italia, per favorire la loro corretta applicazione e scambi di esperienze, il Ministro dell'Ambiente nel marzo 2018 istituì presso il suo Ministero l'Osservatorio Nazionale dei Contratti di Fiume e i relativi organi. L'Osservatorio Nazionale dei Contratti di Fiume debuttò a Roma nel 2018, unitamente all'XI Tavolo Nazionale dei Contratti di Fiume. La validità dello strumento è stata ribadita recentemente nel Piano di Bacino del Distretto dell'Appennino Centrale, dalla Commissione Europea nell'accordo negoziato del 2022 e, recentemente, in occasione della Giornata Mondiale dell'Acqua 2023, tenutasi il 22 marzo a New York nella Sessione ONU a ciò dedicata, dove il Governo Italiano ha portato l'esperienza dei Contratti di Fiume (Fig. 2).

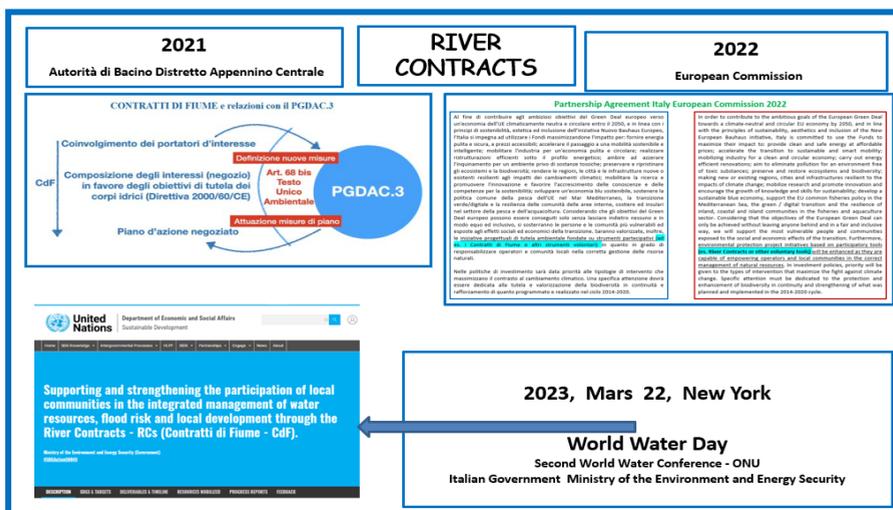


Fig. 2 - Lo sviluppo dei Contratti di Fiume.

Nella trattazione orale sono stati descritti gli esempi del Contratto di Fiume della Misa Nevola nelle Marche, recentemente ripreso all'interno del progetto SMARTRIVER Interreg ADRIION, anche a seguito dell'evento alluvionale del 15 settembre del 2022, del Contratto di Fiume per il Paglia Laziale nel territorio dell'Alta Tuscia e del Paglia Umbro nel territorio dell'Area interna del SO Orvietano.

**Dibattito Pubblico.** – Il Paglia è un fiume italiano con un bacino di 1200 km<sup>2</sup>. Nasce dal M. Amiata, in Toscana, attraversa il territorio della regione Lazio, parte del territorio orvietano in Umbria e si immette nel F. Tevere a valle della Diga di Corbara (Fig. 3). Il fiume attraversa numerose zone abitate nelle tre regioni. Il regime idrologico di questo fiume, di tipo torrentizio, è definito dagli studiosi “complesso e bizzarro”. Nel mese di luglio dell'anno 2012 il fiume era quasi asciutto: alla stazione di Ponte Adunata, a Orvieto Scalo, portava circa 200 l/s: una magra che fece riconoscere lo stato di emergenza per siccità. Il 12 novembre 2012, alla stessa stazione, sono stati misurati circa 2100 m<sup>3</sup>/s: un'alluvione disastrosa, che ha procurato moltissimi danni nella zona di Orvieto, poi nel F. Tevere fino a Roma, fortunatamente senza vittime, in cui il costo della sola gestione dell'emergenza è stato stimato in circa 110 milioni di € (Fig. 4).

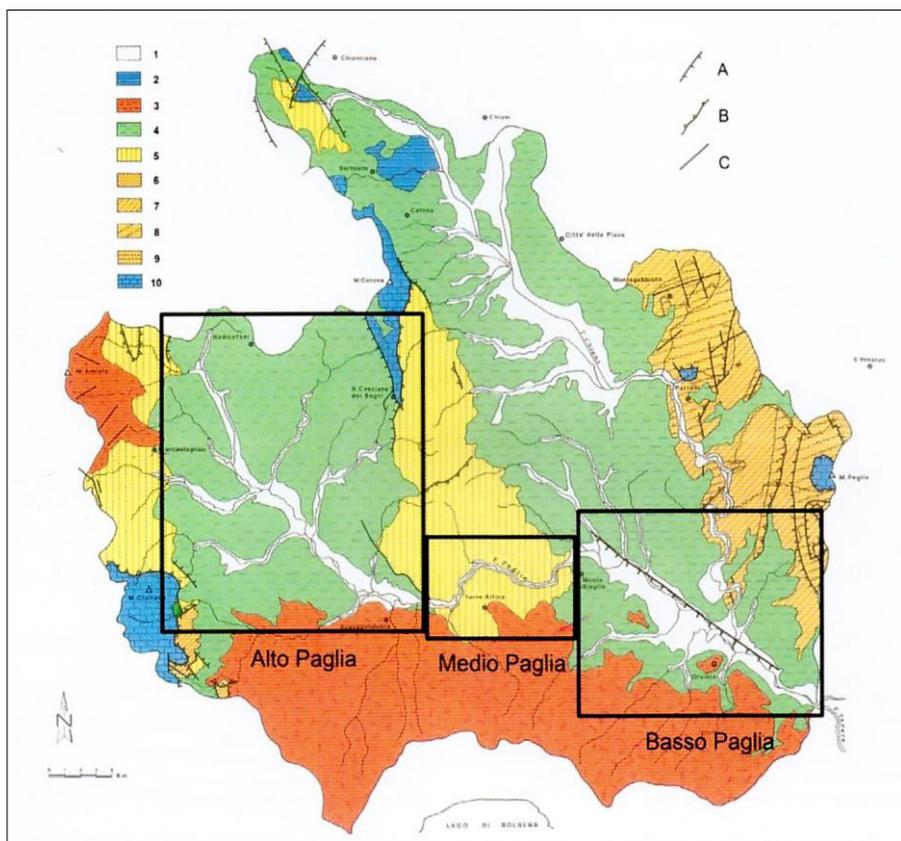


Fig. 3 - Schema geolitologico del bacino del F. Paglia. Da Martini (Ed.), 2022.

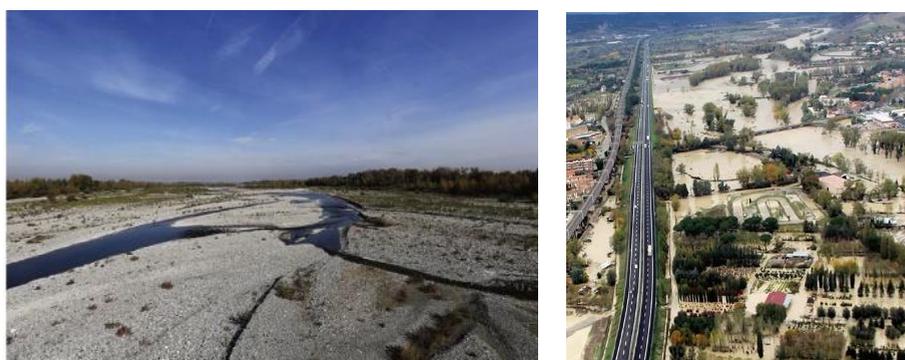


Fig. 4 - A sinistra: il F. Paglia in periodo di siccità (foto: Endro Martini). A destra: l'alluvione del 2012 vista dall'elicottero (foto: Nicola Berni).

Storicamente il fiume è noto per le sue piene, per le sue alluvioni e per i suoi periodi siccitosi. Per mitigare i rischi connessi alle alluvioni e alle siccità dovuti alle crisi climatiche, con alluvioni lampo e lunghi periodi siccitosi, il Parlamento italiano varò un “Piano Invasi” per la costruzione di bacini di accumulo dove immagazzinare le acque di piena per restituirle a usi plurimi nei periodi siccitosi, compreso il minimo vitale del fiume. L’Autorità di Distretto dell’Appennino Centrale ha avviato un *“Progetto di fattibilità tecnico economica di un sistema di Invasi”*, da realizzare nel bacino idrografico del F. Paglia, da attivare a seguito dei risultati di un *“Dibattito Pubblico”* che coinvolgerà 23 comuni, 3 province e 3 regioni. La procedura intrapresa, le analisi costi-benefici e le proposte effettuate saranno quindi oggetto di Dibattito Pubblico nel territorio interessato. Quando, nell’arco di appena quattro mesi dello stesso anno, il 2012, in un bacino idrografico come quello del Paglia si passa da una condizione di emergenza per siccità nel mese di luglio a una condizione di emergenza per alluvione nel mese di novembre, più di un interrogativo si pone e molteplici sono le domande a cui è necessario fornire risposte concrete, con opere e interventi strutturali e non strutturali. Lo chiedono i nostri fiumi, che possono avere troppa acqua o troppo poca acqua anche in pochissimo tempo. E lo chiede la storia documentata delle piene e delle siccità del Paglia, che si ripetono con frequenza sempre maggiore e per questo le soluzioni non sono più rinviabili. Tanto più che entrano ormai in gioco gli effetti dei cambiamenti climatici in atto, che si presentano sempre più frequentemente con nuove crisi, anche drammatiche. Per questo, la necessità di un ripristino fluviale del Paglia non è mai stata più urgente di adesso. Lo scopo dell’intervento sul Paglia è molto chiaro: ridurre i rischi di piena tipo “2012” che hanno generato notevoli danni economici (come detto una ricerca del Politecnico di Milano indica come costo per la gestione della sola emergenza una somma pari a circa 110 milioni di €) e infrastrutturali “attesi”, ricercando nel bacino del Paglia soluzioni di accumulo della troppa acqua per restituirla e utilizzarla ad uso plurimo quando nel bacino avremo troppo poca acqua (costi benefici economici ed ecosistemici). Il Progetto Paglia di *“Fattibilità Tecnico Economica di Sistemi di Invasi”* va in questa direzione e, come detto, le soluzioni ipotizzate saranno nel loro insieme sottoposte alla procedura del *“Dibattito Pubblico”* oggi confermata dal nuovo Codice degli Appalti. Trasparenza nella partecipazione dei portatori di interessi e Dibattito Pubblico, una procedura di partecipazione che permette ai cittadini di informarsi e di esprimere il loro punto di vista sull’*iter* e sulla realizzabilità delle grandi opere. La finalità è quella di prevenire i conflitti e le contestazioni che la realizzazione di un’opera infrastrutturale può generare nei territori interessati e di migliorare la qualità della progettazione e l’efficacia delle decisioni pubbliche “ascoltando” anche la domanda che viene dal basso. Si parte con la presentazione e la pubblicazione sul sito dell’amministrazione aggiudicatrice e dell’Ente aggiudicatore del progetto dell’opera, si prosegue con incontri di informazione, approfondimento, discussione e gestione dei conflitti, in

particolare nei territori direttamente interessati e nella raccolta di proposte e posizioni da parte di cittadini, associazioni e istituzioni. Il Dibattito Pubblico ha una durata massima di quattro mesi a decorrere dalla pubblicazione del dossier di progetto dell'opera sul sito dell'amministrazione aggiudicatrice. Tale durata massima può essere prorogata, in caso di comprovata necessità, su proposta del Coordinatore del Dibattito Pubblico.

È la prima volta in Italia che si applica il Dibattito Pubblico al tema della mitigazione delle piene, integrato con la gestione della siccità in un bacino idrografico e nella trattazione orale è stata presentata la situazione del bacino idrografico del Paglia e la procedura in atto. Recentemente Alta Scuola, che supporta l'Autorità di Distretto dell'Appennino Centrale in questo procedimento, ha curato e stampato un libro dal titolo *“Il Fiume Paglia sicuro, pulito da vivere”* - Edizioni Polistampa (Firenze 2022), in distribuzione gratuita, curato da Endro Martini con testi di Leonardo Arcaleni, Nicola Berni, Corrado Cencetti, Maurizio Conticelli, Fabrizio Curcio, Erasmo D'Angelis, Raffaele Davanzo, Carlo Ferranti, Massimo Gargano, Mauro Grassi, Endro Martini, Rutilio Morandi, Letizia Oddi, Roberta Panella, Valentina Pucci, Ornella Segnalini, Giovanni Selli.

#### SITOGRAFIA E RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

CONTRATTO DI FIUME MISA NEVOLA

<https://www.comune.senigallia.an.it/aree-tematiche/ambiente-e-cura-della-citta/tutela-dellambiente/contratto-di-fiume-misa-nevola/>

CONTRATTO DI FIUME PAGLIA LAZIO

<http://www.altascuola.org/cdf-paglia-lazio/>

DEFINIZIONI E REQUISITI QUALITATIVI DI BASE DEI CONTRATTI DI FIUME

[http://www.a21italy.it/wp-content/uploads/2014/06/CDF\\_Definizione-e-Requisiti-di-Base.pdf](http://www.a21italy.it/wp-content/uploads/2014/06/CDF_Definizione-e-Requisiti-di-Base.pdf)

MARTINI E. (ED.), *“Il Fiume Paglia sicuro, pulito da vivere”*, Polistampa Firenze s.r.l., 2022, 115 pp.

*Tools for an integrated and participatory management of river spaces: River Contracts and Public Debate.*

The ever-increasing repetition of extreme events, connected to the climate crises that afflict not only Italy, but the entire Mediterranean basin, have presented us in the last two-year period 2021-2022 images of rivers and river spaces that were unimaginable until recently. Droughts and floods today represent the two sides of the same coin - CLIMATE CHANGE - which we have given ourselves and which require a unified vision and integrated and partici-

patory management through innovative tools not only at the hydrographic basin scale. The note summarizes two innovative participatory tools: the River Contracts and the Public Debate. The River Contract, referred to the Article 68 bis of the Environmental Code (Legislative Decree April 3, 2006, n. 152 and subsequent amendments) and the Public Debate, in implementation of the Article 40 of Legislative Decree March 31, 2023 n. 36, containing the “Public Contract Code”, have introduced participation procedures that also allow the “users” who live and use these spaces to get information, to make proposals and to express their point of view, thus participating in the drafting of the Action Programs of the River Contracts, or in the design phase of the structural works in the Public Debate.

*Keywords* - River Contracts, Public Debate, rivers management.

*“La Dinamica fluviale. La conoscenza del Fiume per la pianificazione e la salvaguardia del territorio”*

a cura di C. Cencetti, L. Di Matteo

*Culture Territori Linguaggi*, 24, 2023, pp. 136-147

ISBN 9788894469783

Stefano MORELLI<sup>1</sup>, Roberta BONI<sup>1</sup>, Erica GUIDI<sup>1</sup>, Mauro DE DONATIS<sup>1</sup>,  
Giulio PAPPAFICO<sup>1</sup>, Mirko FRANCONI<sup>1</sup>

## L'ALLUVIONE DELLE MARCHE DEL 15 SETTEMBRE 2022, CAUSE E CONSEGUENZE

**Introduzione.** – Secondo i dati ISPRA del 2021, 6,8 milioni di abitanti sono a rischio alluvioni e 1,3 milioni di abitanti sono a rischio frane (Trigila et al., 2021). I beni architettonici, monumentali e archeologici potenzialmente soggetti a fenomeni franosi sono oltre 12.500 nelle aree a pericolosità elevata e molto elevata e raggiungono complessivamente le 38.000 unità se si considerano anche quelli ubicati in aree a minore pericolosità. I beni culturali a rischio di alluvione sono quasi 34.000 nello scenario a pericolosità media e raggiungono quasi i 50.000 in quello a scarsa probabilità di accadimento o relativo a eventi estremi. Complessivamente il 18,4% del territorio nazionale è classificato a pericolosità di frana elevata, molto elevata e/o a pericolosità idraulica media, con tempo di ritorno tra 100 e 200 anni (Trigila et al., 2021). Questo dato dimostra l'ormai nota vulnerabilità del territorio italiano e, se sommato agli effetti dei cambiamenti climatici in atto, evidenzia l'importanza dello studio degli ambienti fluviali e del relativo rischio idraulico, nonché dei dissesti di versante che in certi casi interagiscono con l'evoluzione del fondovalle amplificandone gli effetti al suolo. Sono numerosi, infatti, i fenomeni di questo tipo che colpiscono ogni anno il nostro paese. In particolare, nel 2022 si sono verificati due eventi calamitosi di particolare rilievo: l'alluvione delle Marche del 15 settembre e l'alluvione di Ischia del 26 novembre. L'obiettivo del presente lavoro è quello di descrivere le cause e gli impatti che hanno colpito la Regione Marche nel 2022, interessando principalmente le province di Anco-

---

<sup>1</sup> Dipartimento di Scienze Pure e Applicate, Università di Urbino “Carlo Bo”, Urbino, stefano.morelli@uniurb.it

na e Pesaro e Urbino, provocando 12 vittime, 150 sfollati e danni per 2 miliardi di euro.

**L'evento.** – L'alluvione delle Marche si è verificata tra il 15 e il 16 settembre 2022, a seguito di un evento pluviometrico eccezionale avvenuto con un temporale autorigenerante di tipo *V-shaped* e stazionario. Esso si è formato nel tardo pomeriggio del 15 settembre da celle temporalesche originatesi sul versante tirrenico della penisola, grazie alla provenienza di aria più calda e umida dall'Africa settentrionale e allo sviluppo di alcuni sistemi convettivi favoriti dalla presenza di umidità fornita dal Mar Tirreno e dall'orografia della penisola e delle due isole maggiori, Corsica e Sardegna (Centro Funzionale Regionale della Regione Marche, 2022). Tale evento ha interessato non solo le zone interne (le prime ad essere colpite), ma anche la parte collinare e costiera della provincia di Ancona per un totale di circa 5000 km<sup>2</sup> (Santangelo et al., 2023), apportando quantitativi di precipitazione elevati in brevissimo tempo e determinando criticità diffuse nei bacini del F. Candigliano (in particolare nel sottobacino del F. Burano), del F. Cesano, del F. Misa e del T. Sentino. Nel transito verso le zone collinari e costiere, questi sistemi si sono poi smorzati progressivamente perdendo di intensità ed esaurendosi gradualmente (Tab. 1 e Fig. 1). Nelle zone interne sono stati registrati diffusamente valori superiori ai 100 mm di pioggia, con punte oltre i 200 mm (Guglielmo e Verdicchio 2022) che sono caduti su terreno prevalentemente secco, dopo un'annata molto siccitosa (Ballatori, 2022). Infatti, i dati della rete pluviometrica non mostrano precipitazioni significative nei 30 giorni precedenti l'evento: circa 100 mm massimi tra il 15 agosto e il 1° settembre, e solo pochi mm nei primi 15 giorni di settembre (Santangelo et al., 2023).

Precipitazioni di proporzioni straordinarie hanno colpito invece la dorsale tra il M. Catria e il M. Cucco: le precipitazioni più intense si sono registrate nell'area del comune di Cantiano (PU; bacino del F. Burano), con un ammontare di 419 mm di pioggia e picchi di circa 90 mm/h (Tab. 1). In base alle letture pluviometriche disponibili, è stato calcolato che l'ammontare delle precipitazioni in questa zona corrisponde a oltre il 30% della media annua. Questo ha portato al rapido innalzamento dei livelli idrometrici delle aste fluviali delle zone colpite, con conseguenti improvvise e distruttive esondazioni e all'innescio di numerosi fenomeni franosi che hanno contribuito significativamente al trasporto solido verso valle.

STAZIONE	BACINO	max 3h	max 6h	max 12h	max 24h
Cantiano	Biscubio	256.6	384.0	419.0	419.0
Monte Acuto	Cesano	248.4	343.0	384.2	384.4
Arcevia	Misa	94.8	117.8	128.8	129.2
Barbara	Misa	111.4	121.2	127.0	127.2
Colle	Misa	162.4	186.4	204.0	204.0
Sassoferrato	Sentino	62.8	99.8	99.8	100.4
Colleponi	Sentino	68.0	122.0	122.2	122.6
Monte San Vicino	Musone-Esino	108.2	120.0	192.8	193.6
Cingoli	Musone	160.4	184.6	247.2	247.6

Tab. 1 - Precipitazioni cumulate dell'evento del 15 settembre 2022, misurate dai pluviometri di 9 stazioni ubicate nell'area di studio: misurazioni massime a 3, 6, 12 e 24 ore (Centro Funzionale Regionale della regione Marche, 2022). Il pluviometro di Cantiano (PU) possiede una serie storica di 71 anni di registrazioni.

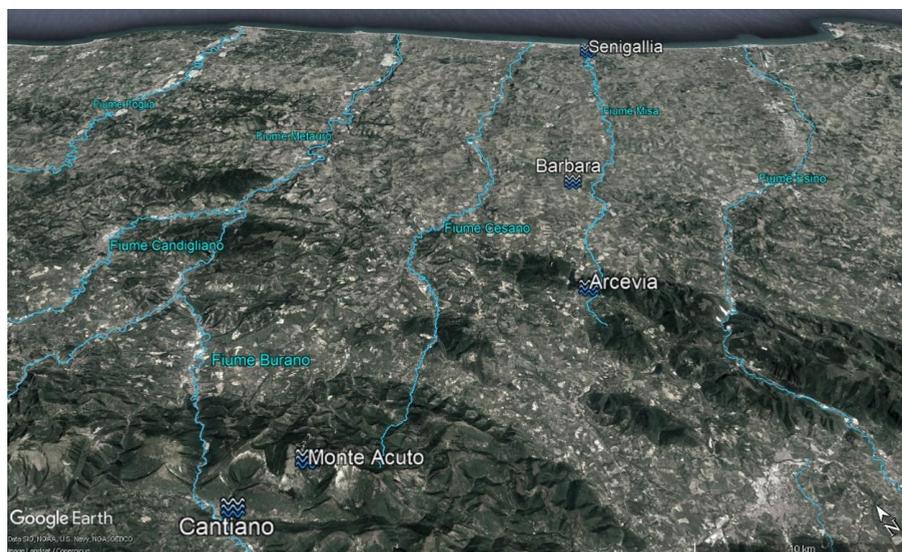


Fig. 1 - Principali corsi d'acqua coinvolti dall'evento e localizzazione di alcune stazioni di misura pluviometrica analizzate nel presente lavoro.

È bene ricordare che la zona interessata dall'evento coinvolge sia il bacino del F. Burano, sia quello del F. Misa, che rappresentano aree completamente diverse dal punto di vista geologico. Nello specifico, nel bacino del F. Burano la dorsale del M. Catria è prevalentemente calcarea e questo ha fatto sì che una parte delle piogge si sia potuta infiltrare nel sottosuolo. Nel bacino del F. Misa, invece, prevalgono alternanze di arenarie e argille, complessivamente meno permeabili. Pertanto, anche se le precipitazioni sono state meno intense in quest'area, l'acqua

non ha avuto modo né tempo di infiltrarsi nel sottosuolo ed è defluita superficialmente mantenendo quasi tutta la sua massa originaria fino alla costa presso Senigallia, in provincia di Ancona (Fig. 1).

Un'altra differenza fondamentale consiste nel fatto che a valle della confluenza del F. Burano con il F. Candigliano insiste la Diga del Furlo la quale, data la prolungata siccità, non conteneva molta acqua al momento dell'evento limitando così l'ondata di piena, impedendone l'afflusso diretto al F. Metauro. Il corso del F. Misa invece, mancando ancora di casse di espansione lungo il suo tragitto, non ha potuto sperimentare la riduzione della piena per i mancati effetti di laminazione.

***Il caso di Cantiano (PU).*** – Una delle aree urbane più colpite dal dissesto idrogeologico dell'entroterra è senza dubbio la cittadina di Cantiano che già dalla sera del 15 settembre è stata invasa dalle acque di esondazione (Fig. 2), con particolare insistenza nelle zone del centro storico, rimanendo contestualmente isolata per la presenza di frane che hanno coinvolto le principali vie di comunicazione e per l'inutilizzabilità dei ponti che sono stati quasi tutti sormontati e in alcuni casi distrutti.



Fig. 2 - Livello raggiunto dall'acqua in alcuni edifici del centro di Cantiano. A sinistra l'ingresso del Municipio.

Come si evince dai valori registrati dal pluviometro localizzato presso la stazione di Cantiano (Tab. 2), in poco tempo i corsi d'acqua che cingono e attraversano la cittadina si sono riempiti d'acqua, fango e detriti, raggiungendo ben presto il loro limite di contenimento, trascinando ed espandendosi in maniera incontrollata per le vie del centro abitato, trasformando

in “fiumi” le aree topograficamente più depresse e allagando quasi totalmente il piano terra delle abitazioni.

Durata	1 ora	3 ore	6 ore	12 ore	24 ore
Altezza massima registrata (mm)	101.4	256.6	384	419	419
Intensità media nell'intervallo di ore (mm/h)	101.4	85.5	64	34.9	17.5
Medie di lungo periodo (Cantiano)	26.5	37.7	48.8	66.6	88.7

Tab. 2 - Valori pluviometrici massimi di evento del 15 settembre e medie degli estremi annui alla stazione di Cantiano (PU). Da <http://www.idrologia.polito.it/>.

Da rilievi in situ, ricerche storiche e studi morfologici/cartografici è possibile desumere che le conseguenze registrate nel centro abitato di Cantiano non siano imputabili soltanto all'eccezionalità dell'evento pluviometrico, ma anche alla risposta del reticolo idraulico presente, specialmente nella zona di pianura in cui la pressione antropica annulla quasi definitivamente ogni carattere di naturalità e specificità funzionale.

Tre sono i corsi d'acqua presenti in questa area: il F. Burano, il T. Bevano e il F.so Tenetra (detto anche Fonte Peschiera - Fig. 3).

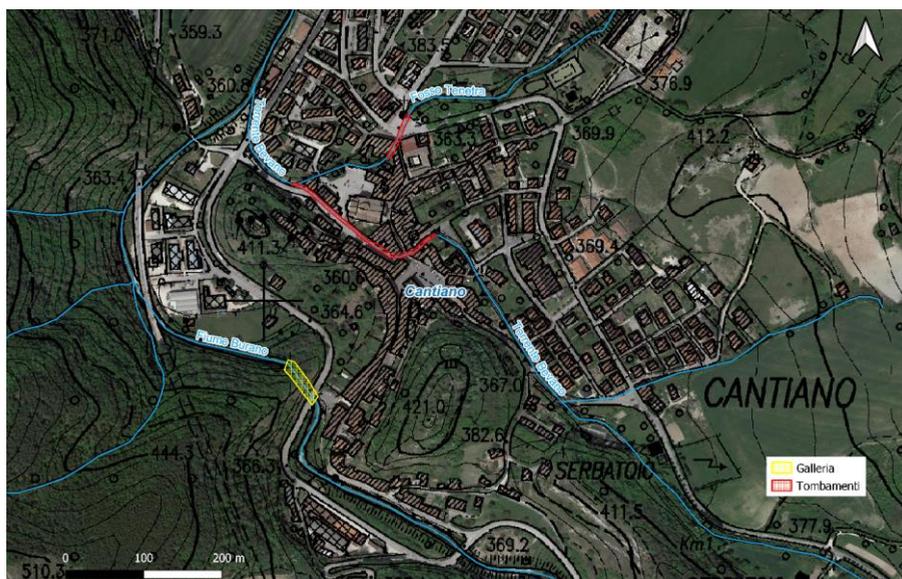


Fig. 3 - Il reticolo idraulico urbano della città di Cantiano (Cartografia di base: Carta Tecnica della Regione Marche; Google satellite: Images CINES/Airbus, European Space Imaging, Maxar Technologies ©2023).

Nel corso del tempo tutti hanno subito importanti modifiche, per differenti motivazioni

legate al contesto storico in cui sono state eseguite. Il F. Burano, che lambiva il lato O di Cantiano, con un'ansa compresa tra il Colle di Sant'Ubaldo e il Colle di Colmatrano, fu deviato nel tratto più a monte della cittadina alla fine degli anni '20 del XX sec., per scongiurare il rischio di esondazione (Fig. 4).

In particolare, il 28 ottobre 1928 venne inaugurata ufficialmente l'opera idraulica di deviazione che fu realizzata con uno sbarramento del vecchio tracciato (un muraglione riempito alle spalle con terreno di riporto) e una galleria lunga 80 m (8 m di larghezza e 9 m di altezza), avente un alto angolo rispetto al percorso originario. Contestualmente fu realizzato un ponte, a un solo arco, lungo l'attuale Via Flaminia Sud. Il tratto a monte risulta attualmente confinato tra sponde artificiali in muratura. Il T. Bevano, che originariamente passava in mezzo a Piazza Luceoli, allora Parco Boario, fu deviato alla fine del 1700 di circa 50 m verso N, in uno stretto percorso incassato e confinato.



Fig. 4 - *Sullo sfondo l'imbocco della galleria di derivazione del F. Burano e in primo piano le case del quartiere che sono state coinvolte fin dalla prima fase dall'esondazione in questa zona.*

La sua copertura (una tombatura di 200 m con lastre di cemento) fu realizzata alla fine del 1950, poiché era sempre più pressante il concetto di sicurezza igienica. Allora, infatti, non era presente una completa rete fognaria e tanto meno la depurazione. Successivamente, su alcune parti del tombamento, furono costruite anche alcune abitazioni. A metà del 1700 il Palazzo

del Conte fu costruito sopra il F.so Tenetra, creando il primo vero e proprio tombamento di quest'area. Tale tombamento, con volta ad arco, fu poi modificato nel tempo fino a raggiungere le dimensioni attuali (circa 57 m di lunghezza) e il tratto urbano di valle fu canalizzato fino alla confluenza con il F.so Tenetra, oltre il quale in tempi più recenti è stato confinato fino all'immissione nel F. Burano.

Anche la risposta dei relativi tre bacini (F.so Tenetra, T. Bevano e la porzione di bacino del F. Burano sottesa al punto di confluenza con il T. Bevano stesso) ha giocato senz'altro un ruolo importante sulla dinamica idraulica complessiva. Si tratta di tre tipologie di bacino con caratteristiche morfologiche e morfometriche differenti (Fig. 5 e Tab. 3). Innanzi tutto il piccolo bacino del F.so Tenetra è per lo più composto da una morfologia concava ben sviluppata e perfettamente circolare, da imputare all'erosione regressiva del reticolo idraulico minore impostato prevalentemente su litotipi calcareo-marnosi e marnosi più erodibili rispetto ai sovrastranti calcari micritici (D'Orefice e Graciotti, 2015). Gli altri bacini hanno forme più irregolari, maggiore rugosità complessiva, pendenze medie minori, dislivelli minori tra il punto di sorgente e il punto di chiusura del bacino in percorsi complessivamente molto più lunghi. Tuttavia, la maggior parte di sedimento in alveo è stata riscontrata dopo l'evento sia nel T. Bevano sia nel F.so Tenetra (Fig. 6).

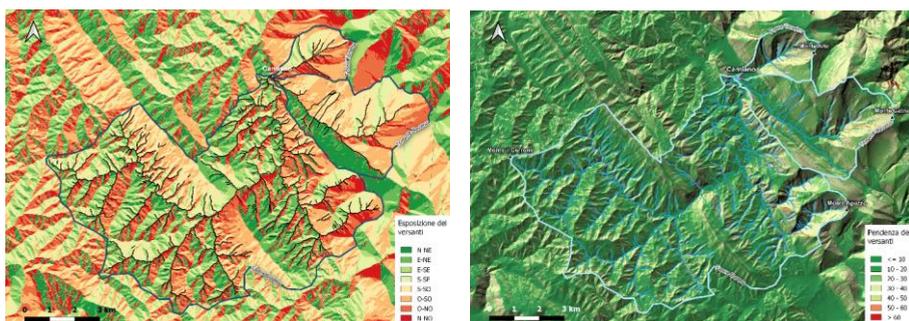


Fig. 5 - Caratteristiche morfologiche principali delle aree dei bacini in diretta connessione con la zona urbana di Cantiano. Per il bacino del F. Burano si considera l'area sottesa al punto di confluenza con il T. Bevano.

Le evidenze sono state per lo più localizzate lungo i tratti urbani e vallivi (ad esempio nelle ore successive all'ondata di piena il tombamento del F.so Tenetra risultava in gran parte ostruito da materiale granulometricamente grossolano presso l'apertura di valle).

Inoltre, nonostante nel F.so Tenetra si sia verificato un trasporto solido caratterizzato da un cospicuo apporto di materiale, nella parte di monte una certa quantità di materiale sciolto risulta ancora oggi presente ai piedi del versante (lungo la valle principale e negli impluvi laterali), con accumuli pronti a rimobilizzarsi in occasione di nuove intense precipitazioni (Fig. 6).

<i>Bacino</i>	<b>F. Burano</b>	<b>T. Bevano</b>	<b>F.so Tenetra</b>
Quota massima asta fluviale (m s.l.m.)	874.0	1225.0	1225.0
Quota minima asta fluviale (m s.l.m.)	350.0	360.0	350.0
L. asta fluviale (m)	30964.7	7679.1	3521.5
H/L	0.017	0.113	0.248
Densità di drenaggio	0.0042	0.0015	0.0021
Quota massima spartiacque (m s.l.m.)	1110.0	1701.0	1312.0
Punto di misura della quota massima dello spartiacque	M. Aguzzo	M. Catria	M. Alto

Tab. 3 - *Caratteristiche morfometriche principali dei corsi d'acqua dei bacini di cui a Figura 5. H rappresenta il dislivello tra la quota massima e minima dell'asta fluviale. Le quote altimetriche e i toponimi sono ricavati dalla Carta topografica IGM serie 25.*



Fig. 6 - *Accumuli di detrito ai piedi del versante concavo in cui si struttura morfologicamente il corso d'acqua di fondovalle del T. Bevano (a). Forma erosiva in un impluvio localizzato in destra idrografica (b) e franamento della sponda destra del T. Bevano (c). Le forme di accumulo e quelle erosive osservate derivano dall'evento del 15 settembre 2022.*

Durante l'evento pluviometrico, tutti tre i corsi d'acqua non sono riusciti a contenere le portate derivanti dai rispettivi bacini e parte del proprio trasporto liquido e solido si è diffuso per la città per tracimazione oltre le sponde e i muri arginali di contenimento associata, in alcuni casi, a sfondamento degli stessi. Per quanto riguarda il F. Burano, le principali aree sono localizzate a monte della galleria che è risultata insufficiente per dimensione e posizione a far transitare tutti i fluidi fin lì giunti. Il fiume ha ripreso il vecchio tracciato, oltrepassando il muro di contenimento realizzato 94 anni prima e tracimando anche nel settore canalizzato immediatamente a monte, facendo sì che tutte le acque si dirigessero direttamente verso la piazza centrale di Cantiano. Qui un ponte pedonale è andato distrutto (Fig. 4). Le acque del T. Bevano, forzate a inalvearsi nello stretto tracciato definito nel Settecento, dopo una curva ad alto angolo si sono incanalate con estrema forza nel tombamento, rompendo già dopo pochi metri il tratto iniziale della sua copertura e provocando una prima diffusione delle sue acque per le vie del centro (Fig. 7a). La forza dei flussi che però hanno proceduto in sotterraneo, dopo circa 85 m, ha letteralmente divelto una buona porzione della copertura in cemento, facendo dilagare un'ulteriore quantità di acqua e materiale in sospensione (Fig. 7b). Infine, i flussi che si sono indirizzati all'interno del tombamento del piccolo F.so Tenetra hanno acquisito un'energia molto elevata nel punto di uscita, tanto da rompere il muro di contenimento in sinistra idrografica, dilagando così per la piazza e le vie adiacenti (Fig. 7d-e). Contestualmente, le acque si sono diffuse anche nelle aree in destra idrografica non dotata di opere contenimento. Oltre a ciò va ricordato, da una parte, il problema del rigurgito nelle zone di confluenza e dall'altra il problema della saturazione del reticolo fognario della città che, non potendo sopportare queste dinamiche estreme, è addirittura esploso per un breve tratto presso la piazza centrale (Fig. 7c).

**Conclusioni.** – Nei rilievi effettuati nei giorni successivi all'evento è stato possibile evidenziare ancora una volta la vulnerabilità di un territorio non in grado di contenere eventi intensi e severi, che troppo spesso generano catastrofi come quelle delle Marche. Una prima considerazione da fare è che un evento meteorico come quello registrato nelle aree indagate non era preventivabile, in quanto eccezionale rispetto ai dati storici. Inoltre, la mancanza di strumenti di previsione adeguati (come, ad esempio, i radar meteorici) nella regione Marche rende la gestione di tali eventi ancora più complessa. Nonostante ciò, va ricordato che il territorio marchigiano, e in particolare l'area del bacino del F. Misa, è stato spesso colpito in passato da eventi alluvionali, l'ultimo dei quali nel 2014 causò tre vittime, con circa 180 milioni di euro di danni e diverse centinaia di sfollati. Sia nell'alluvione del 2014, sia in quella del 2022, è stato evidenziato come il trasporto di materiale solido da parte dei fiumi e la presenza di infrastrutture (in particolare ponti) non idonee, abbiano giocato un ruolo fondamentale nell'esonazione dei fiumi.



Fig. 7 - Gli effetti delle portate all'interno del centro abitato e loro distribuzione (mappa in basso a sinistra). Nel centro urbano in rosso i tratti tombati e in blu i tratti tombati e sormontati da edifici.

Dai vari sopralluoghi effettuati a seguito dell'alluvione di settembre 2022 è stato infatti riscontrato come la maggior parte delle esondazioni siano state causate dall'intasamento dei ponti da parte di materiale solido flottante (soprattutto tronchi ed alberi) che ha portato alla repentina inondazione delle aree a valle degli stessi (con il caso più evidente riscontrato a Pianello d'Ostra). In altri casi, come ad esempio a Cantiano, si sono evidenziate situazioni in cui l'urbanizzazione di aree di competenza fluviale ha modificato il percorso o la morfologia dell'intero reticolo idrografico, includendo il fiume principale e gli affluenti minori, le cui acque, durante gli eccezionali eventi pluviometrici di settembre, hanno ripreso i propri spazi originari inondando le aree ormai urbanizzate. Da quanto descritto, e alla luce dei cambiamenti climatici che generano sempre più spesso fenomeni atmosferici estremi come quello che ha colpito le Marche, diventa fondamentale una gestione più oculata del territorio, basata sul monitoraggio dei corsi d'acqua, su una migliore pianificazione territoriale e su modelli di indagine basati su innovative simulazioni numeriche, che permettano di prevedere scenari catastrofici come quelli delle Marche del 2022.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- BALLATORI E., "Recupero e caratterizzazione di antichi vitigni delle Marche (Torella, Zivi e Famoso Marchigiano)", Tesi di laurea in Scienze e Tecnologie Agrarie, Università Politecnica delle Marche, 2022.
- CENTRO FUNZIONALE REGIONALE DELLA REGIONE MARCHE, "Rapporto di evento preliminare - Maltempo 15, 16 e 17 settembre 2022", Direzione Protezione Civile e Sicurezza del Territorio, [https://www.regione.marche.it/portals/o/Protezione\\_Civile/Manuali%20e%20Studi/Rapporto\\_Evento\\_preliminare\\_20220915.pdf](https://www.regione.marche.it/portals/o/Protezione_Civile/Manuali%20e%20Studi/Rapporto_Evento_preliminare_20220915.pdf), 2022, 59 pp.
- D'OREFICE M., GRACIOTTI R., "Rilevamento geomorfologico e cartografia: Realizzazione-Lettura-Interpretazione", 2015, Dario Flaccovio Editore, Palermo.
- GUGLIELMO G., VERDICCHIO D., "Analisi statistica dell'evento pluviometrico del 15 settembre 2022 nella regione Marche", Report on line, <https://www.meteoregionelazio.it/wp-content/uploads/2022/10/Analisi-statistica-Marche.pdf>.
- SANTANGELO M., ALTHUWAYNEE O., ALVIOLI M., ARDIZZONE F., BIANCHI C., BORNAETXEA T., BRUNETTI M.T., BUCCI F., CARDINALI M., DONNINI M., ESPOSITO G., GARIANO S.L., GRITA S., MARCHESINI I., MELILLO M., PERUCCACCI S., SALVATI P., YAZDANI M., FIORUCCI F., "Inventory of landslides triggered by an extreme rainfall event in Marche-Umbria, Italy, on 15 September 2022", *Scientific Data*, 2022, 10 (1), 427.
- TRIGILA A., IADANZA C., LASTORIA B., BUSSETTINI M., BARBARO A., "Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio", Edizione 2021, ISPRA, Rapporti 356/202.

### *The Marche flooding of 15 September 2022, causes and consequences.*

Between 15 and 16 September 2022, after very droughty seasons, an exceptional rainfall event occurred in the northern Marche (central Italy) with a self-healing V-shaped and stationary thunderstorm. This event affected firstly the inland areas and then, losing intensity, moved toward the coastal sectors for a total area of approximately 5000 km<sup>2</sup>, causing widespread critical situations (landslides and floods). In the inland areas, values exceeding 100 mm of rainfall were widely recorded, with localised measurements of over 200 mm. The most severe precipitations were however recorded on the mountain ridge in front of the city of Cantiano, with 419 mm of rainfall in 12 hours and peaks of about 90 mm in one hour. During the event the city was invaded by flash flood waters, with ground floors of buildings in the historic centre completely submerged and some structural damages to hydraulic works. Although the intense rainfall, the Cantiano flood was also related to an erroneous urban planning which, over the centuries, has changed the natural balance of the valley floor (tunnels, burials, restrictions, deviations, undersizing of riverbeds and incorrect regulation of surface waters). From what observed during this episode, and in the light of climate changing that increasingly generates

extreme weather phenomena, more responsible urban planning and land management, based on the streams monitoring and survey and innovative numerical simulations that make possible to forecast catastrophic scenarios such as those in the Marche region, become increasingly fundamental and urgent.

*Keywords* - floods, climate changes, Marche region.

*“La Dinamica fluviale. La conoscenza del Fiume per la pianificazione e la salvaguardia del territorio”*

a cura di C. Cencetti, L. Di Matteo

*Culture Territori Linguaggi*, 24, 2023, pp. 148-156

ISBN 9788894469783

Rosalba MUZZILLO<sup>1</sup>, Francesco SDAO<sup>1</sup>

## DIGHE DA FRANA E PERICOLOSITÀ GEOMORFOLOGICA: CASI DI STUDIO IN BASILICATA

**Introduzione.** – Le dighe da frana sono sbarramenti naturali di alvei fluviali provocati da frane, che, invadendo il canale di flusso, non di rado formano laghi i quali, svuotandosi, generano condizioni di pericolosità geomorfologica e possono causare danni ai manufatti e perdita di vite umane.

Nel presente lavoro si riportano due casi di studio di sbarramenti fluviali da frana presenti in Basilicata. In particolare, il primo caso riguarda la grande frana Zillona (Trecchina) che, riattivatasi nel 2007 all'interno di una zona già in precedenza soggetta a frane, ha sbarrato temporaneamente il corso del F. Noce, generando un lago di frana oggi svuotato. Il secondo caso di studio riguarda il bacino del T. Gallitello, affluente di destra del F. Basento, nel quale frequenti sono gli sbarramenti di frana lungo il corso d'acqua e i suoi principali affluenti, con conseguente formazione di diffusi laghetti da frana. Nel caso del bacino del Gallitello, applicando un modello previsionale basato sull'applicazione di una Rete Neurale Artificiale, è stata definita la suscettibilità spaziale alla formazione di dighe da frana lungo gli instabili alvei del bacino in esame.

**Dighe da frana e pericolosità geomorfologica.** – Una *diga da frana*, o sbarramento fluviale da frana, è un frequente e pericoloso fenomeno geomorfologico, frutto di una stretta sinergia fra la dinamica fluviale e l'instabilità dei versanti vallivi. Tale diga naturale si genera ogni qualvolta un corpo detritico (corpo di frana, alluvial fan, ecc.) interessa, fino a sbarrarlo o a deviar-

---

<sup>1</sup> *Scuola di Ingegneria, Università degli Studi della Basilicata, Potenza*, rosalba.muzzillo@unibas.it, francesco.sdao@unibas.it

lo, l'alveo di un corso d'acqua (Casagli e Ermini, 1999; Dal Sasso et al., 2014; Casagli e Tacconi Stefanelli, 2022). Gli sbarramenti da frana, oltre a generare fenomeni di instabilità fluviale (fenomeni di aversione, instabilità delle sponde, frequenti modificazioni dei tracciati fluviali), formano dighe naturali con conseguente riempimento di un lago. La rottura di tali dighe e il successivo svuotamento rapido del lago possono avvenire in un lasso di tempo variabile da qualche ora a qualche settimana, fino a svariati anni, rendendosi talora responsabili di gravi e diffusi danni (De Bari et al., 2009).

Gli sbarramenti fluviali da frana, sebbene possano formarsi nei più diversi ambienti geologici e geomorfologici del mondo, sono particolarmente presenti in aree montuose e collinari a geologia complessa, tettonicamente attive, caratterizzate da sollevamenti tettonici recenti ed attuali e da valli fluviali strette e incise che ospitano fiumi e torrenti con portate significative (Casagli e Ermini, 1999; De Bari et al., 2009). Tali peculiari fenomeni geomorfologici e idraulici innescano perniciose condizioni di pericolosità e di rischio geologico, non limitate alla sola zona di sbarramento dell'alveo fluviale, ma anche e soprattutto nelle zone a monte e a valle della diga. In particolare, a monte dello sbarramento i conseguenti eventi di inondazione di vaste aree fluviali generano: l'innescò, la mobilitazione e/o la rimobilitazione di corpi di frana attivi o quiescenti, con conseguente interrimento del lago; l'innalzamento del livello del lago e l'erosione della soglia di tracimazione del lago; modificazioni, spesso disordinate, del reticolo fluviale; processi erosivi di sponda con conseguenti fenomeni di frana. Il probabile collasso della diga che avviene, non di rado, dopo poco tempo dalla sua formazione, rilascia in un tempo estremamente breve più o meno significative quantità d'acqua che, riversandosi a valle, formano importanti onde di piena che distruggono tutto ciò che incontrano e purtroppo provocano anche vittime. Inoltre, lo svuotamento rapido del lago ha come conseguenza anche l'innescò di frane e/o la recrudescenza di movimenti di massa presenti lungo i versanti vallivi (Dal Sasso et al., 2014).

Dalla letteratura sull'argomento in questione (Casagli e Ermini, 1999; De Bari et al., 2009; Casagli e Tacconi Stefanelli, 2022) si evince come, nei secoli scorsi, eventi catastrofici dovuti a collasso di dighe da frana siano stati frequenti e diffusi, nel mondo e in Italia. Per esempio, nel 1515, in località Biasca (Svizzera), una grande diga da frana, collassando e svasando repentinamente un volume d'acqua di oltre 100 milioni di m<sup>3</sup>, ha provocato gravi e diffusi danni al territorio e al tessuto sociale e circa 600 vittime. In Italia, nei secoli e nei decenni scorsi, si sono verificati numerosi eventi calamitosi a causa del collasso di grandi dighe da frana e della conseguente formazione di onde di piena anomale. In particolare, il grande terremoto della Calabria meridionale, avvenuto nel febbraio-marzo 1783, ha prodotto ben 250 grandi laghi per sbarramento da frana, moltissimi dei quali oggi scomparsi; nel 1812, a Quarto di Savio (Appennino romagnolo), un'enorme frana ha sbarrato completamente il F. Savio, for-

mando una diga la cui rottura e la conseguente inondazione, oltre a danneggiare gravemente una vasta porzione di territorio, ha provocato la morte di 18 persone; nel febbraio del 1885, a Pieve Santo Stefano, una grande frana ha sbarrato il F. Tevere e la successiva rottura dello sbarramento ha prodotto una significativa inondazione responsabile di danni cospicui al patrimonio artistico e della morte di 7 persone.

In Basilicata, gli sbarramenti fluviali da frana sono frequenti e numerosi, non di rado di cospicue dimensioni e si ritrovano lungo gli alvei delle porzioni montuose e collinari dei bacini idrografici dei principali fiumi lucani con foce nel Mar Ionio (fiumi Agri, Sinni, Basento, Bradano) o nel Mar Tirreno (F. Noce). Tali sbarramenti fluviali sono stati generati da grandi frane complesse, riconducibili essenzialmente a scorrimenti roto-traslazionali - colate di terra. Recenti sbarramenti di frana, collassati dopo solo alcuni giorni dalla loro formazione, sono stati prodotti dalla grande frana di Pomarico del 2019, dalla frana di Stigliano nel 2014 e sovente dalla colata di Brindisi di Montagna, sul F. Basento (Sdao et al., 2022).

Nel presente lavoro, sulla scorta di accurati rilievi geologici e geomorfologici si descrivono: i caratteri geomorfologici della grande frana Zillona che, durante le sue fasi di mobilitazione del 2007, ha temporaneamente sbarrato il corso del F. Noce, nei pressi dell'abitato di Trecchina, generando un lago di frana oggi svuotato (Dal Sasso et al., 2014 - Fig. 1); i diffusi, seppur modesti, sbarramenti di frana, ma in ugual modo pericolosi, che caratterizzano il franoso bacino del T. Gallitello, affluente di destra del F. Basento (Fig. 1) . Al fine di prevedere la formazione di dighe da frana nel bacino del T. Gallitello, è stato implementato un modello previsionale spaziale, già applicato in bacini idrografici lucani (De Bari et al., 2009) e recentemente revisionato sulla scorta di ulteriori studi. Tale modello è basato sull'applicazione di una Rete Neurale Artificiale (ANN), appositamente architettata e implementata con parametri e variabili relativi alla dinamica dei versanti, alla geomorfologia fluviale e alla litologia dei depositi affioranti nel bacino.

***La grande frana Zillona (F. Noce, Basilicata).*** – Di seguito si descrive un caso di studio inerente alle interferenze geomorfologiche e idrauliche fra un grande corpo di frana periodicamente attivo, la Frana Zillona, e lo stretto alveo ghiaioso del F. Noce, in Basilicata (Fig. 1).

La grande frana Zillona ricade in corrispondenza del versante destro del F. Noce, nei pressi dell'abitato di Trecchina. Tale versante è caratterizzato da un complesso e articolato assetto geologico e strutturale, condizionato dal sovrascorrimento delle Unità carbonatiche Bulgheria-Verbicaro (Giurassico) sulle destrutturate argille marnose della Formazione delle Crete Nere (Cretaceo), afferenti alle Unità Argillose Liguridi (Fig. 2). In particolare, le Crete Nere, nelle quali si è prodotta ed evoluta la Frana Zillona, sono costituite da argille marnose e marne argillose varicolori e scagliose, marcatamente destrutturate, particolarmente vocate

all'instabilità dei pendii.



Fig. 1 - Ubicazione dei casi di studio.

La grande frana Zillona, che si è riattivata nel 2007 all'interno di una zona già in passato soggetta a frane, si è prodotta al margine inferiore di un'ampia area collocata nella parte alta del versante, impegnata da complessi e profondi movimenti di massa e da deformazioni gravitativamente profonde di versante riconducibili ad espandimenti laterali di grandi blocchi carbonatici fessurati e in contropendenza, afferenti all'Unità Bulgheria-Verbicario e giacenti sulle deformabili argille cretache delle Crete Nere.

La frana Zillona è riconducibile a un complesso, antico e tuttora attivo scorrimento roto-traslazionale evolvente a una grande colata di terra, il cui piede è collocato nel sottostante alveo del F. Noce. La frana è approssimativamente lunga 650 m, larga 13-160 m e mostra un'inclinazione di circa  $13^\circ$  (Figg. 2 e 3a).

L'area di alimentazione della colata di terra è costituita da uno scorrimento roto-traslazionale, circoscritto da un'evidente scarpata principale collocata a circa 300 m s.l.m. e interessata da crolli e piccoli scorrimenti di blocchi calcareo-marnosi. Attualmente l'area di alimentazione è punteggiata da grossi blocchi carbonatici e marnosi disarticolati, provenienti dagli espandimenti laterali sommitali e da accumuli detritici dovuti a piccoli *debris flows* innescati nei terreni argilloso-marnosi delle Crete Nere.

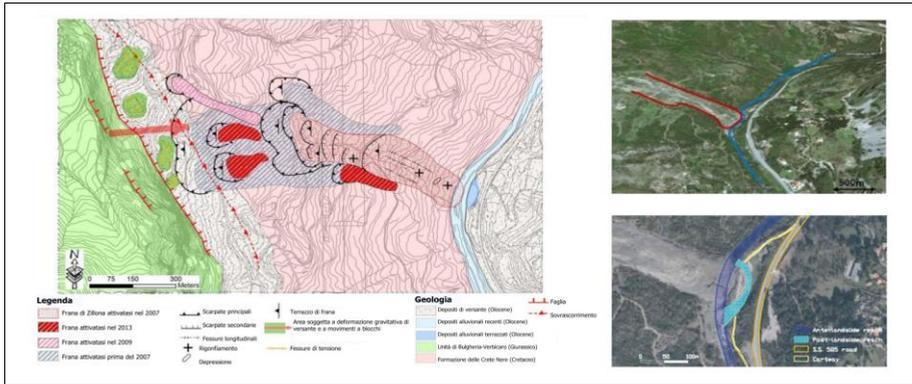


Fig. 2 - Carta geomorfologica della frana di Zillona (a sinistra). Particolari dello sbarramento di frana (a destra). Da Dal Sasso et al, 2014, modificato.



Fig. 3 - Alcuni particolari della Frana di Zillona: a) il corpo di frana in corrispondenza del canale della colata; b) lago di frana a monte dello sbarramento nel 2007; c) fasi di svuotamento del lago di frana.

Il canale di frana della colata di terra (Fig. 3a), probabilmente impostato lungo un preesistente alveo torrentizio, si estende per circa 550 m di lunghezza e, in media, è largo 120 m. L'accumulo di frana, che interferisce significativamente con la dinamica fluviale del F. Noce, mostra una tipica forma a ventaglio, con un'inclinazione media di 6°; esso è lungo almeno 100 m e largo 120 m e occupa per quasi tutta la sua larghezza l'alveo del F. Noce (Fig. 2).

La frana Zillona, durante la sua lunga storia geomorfologica, ha più volte subito parziali o totali rimobilitazioni che non di rado hanno sbarrato il F. Noce, generando laghi di frana, spesso di dimensioni contenute, ma ugualmente pericolosi. Una delle rimobilitazioni più si-

gnificative è avvenuta, mediante più fasi di movimento, nel 2007. In particolare, la rimobilitazione avvenuta nel giugno del 2007 ha solo parzialmente sbarrato l'alveo del F. Noce, generando un'avulsione del corso d'acqua e innescando fenomeni di erosione al piede della frana. La successiva ripresa dei movimenti avvenuti nel novembre del 2007, innescati dall'erosione al piede della frana e da significativi eventi di pioggia, ha completamente sbarrato, per circa 120 m di lunghezza e qualche metro di spessore, l'alveo del F. Noce, producendo un lago di frana (Fig. 3b). La conseguente avulsione del corso d'acqua e la successiva incisione della golena in sinistra idrografica hanno consentito lo svuotamento del lago di frana (Fig. 3c). Lo sbarramento fluviale e il conseguente svuotamento del lago hanno generato una nuova configurazione fluviale, caratterizzata da un abbassamento della piana golenale (Dal Sasso et al., 2014).

***Il bacino del T. Gallitello: movimenti di massa e suscettibilità alla formazione di dighe da frana.*** – Il bacino del T. Gallitello, un importante affluente del F. Basento, ubicato nei pressi di Potenza (Basilicata), è esteso all'incirca 26 km<sup>2</sup> e si sviluppa tra 1333 m e 667 m s.l.m. Il bacino appenninico è modellato in terreni strutturalmente complessi flyschoidi argilloso-marnosi e calcareo-marnosi, afferenti rispettivamente alle Unità delle Argille Varicolori cretache e alle Unità Lagonegresi; su queste Unità strutturali poggiano terreni conglomeratici e argillosi di età pliocenica (Fig. 4).

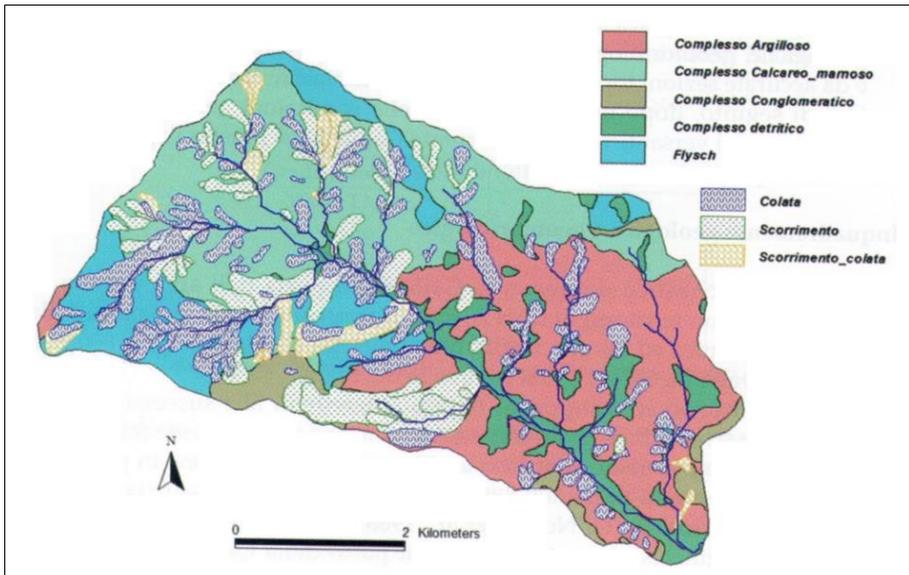


Fig. 4 - Carta geologica e dell'inventario delle frane del bacino idrografico del T. Gallitello (F. Basento, Basilicata).

Come si evince dalla Figura 4, il bacino in esame, specie in corrispondenza delle aree medie e alte dove affiorano prevalentemente i terreni argilloso-marnosi flyschoidi, è in gran parte interessato da frane attuali e recenti, attive o quiescenti, non di rado di grandi dimensioni. In particolare, sono state censite e caratterizzate all'incirca 220 frane che interessano un'area totale di oltre 10 km<sup>2</sup>, con un indice di franosità dell'ordine del 50%. Le tipologie di frana prevalenti sono gli scorrimenti roto-traslazionali, i *debris flows* e le frane complesse riconducibili a scorrimenti roto-traslazionali evolventi a grandi colate di terra. Molte frane si accumulano, invadendoli completamente, negli alvei dei principali affluenti del T. Gallitello, generando diffuse deviazioni di alveo e sbarramenti di frana con conseguente formazione di laghetti. Lungo il canale principale del T. Gallitello, in molti punti, accumuli detritici, larghi anche un centinaio di metri, invadono e talora sbarrano l'alveo, con conseguente formazione di laghi di frana che, sebbene non siano di grandi dimensioni, risultano essere ugualmente pericolosi.

Al fine di definire la suscettibilità spaziale alla formazione di dighe da frana lungo gli alvei del bacino in esame, è stata ideata, implementata e applicata una Rete Neurale Artificiale costituita da 4 diversi parametri di *input*, da 5 strati nascosti e da un *output* rappresentato da una carta di suscettibilità spaziale (De Bari et al., 2009).

I parametri di *input* individuati e implementati, che influenzano significativamente la formazione di sbarramenti di frana lungo gli alvei fluviali, sono: la pericolosità spaziale di frana che esprime, con diversi gradi, la propensione dei versanti a franare; le caratteristiche geologico-tecniche dei terreni e delle rocce affioranti; l'*entrenchment*, che rappresenta il grado di contenimento e l'incisione dell'alveo stimato attraverso il rapporto tra l'ampiezza dell'area inondabile e l'ampiezza dell'alveo fluviale; l'*Annual Constriction Ratio* (ACR), dato dal rapporto tra la velocità della frana e l'ampiezza del canale fluviale; questo rapporto influenza il grado di invasione dello stesso canale.

L'applicazione della Rete Neurale Artificiale ha consentito la realizzazione della carta di suscettibilità alla formazione di dighe da frana riportata in Figura 5 (De Bari et., 2009).

Come si evince dall'analisi della Figura 5, il bacino del T. Gallitello è per buona parte della sua estensione soggetto ad alta ed elevata suscettibilità alla formazione di dighe da frana, specie nelle porzioni alte e medio-alte, dove sono presenti molte frane per scorrimento-colate di terra (De Bari et., 2009).

La restante parte del bacino è caratterizzata da suscettibilità media o bassa. Nella stessa Figura 5 sono riportate anche le principali frane censite: esse ricadono in gran parte nelle aree ad elevata e ad alta suscettibilità alla formazione di dighe da frana. Risultato, questo, che prova la bontà dell'applicazione della Rete Neurale Artificiale.

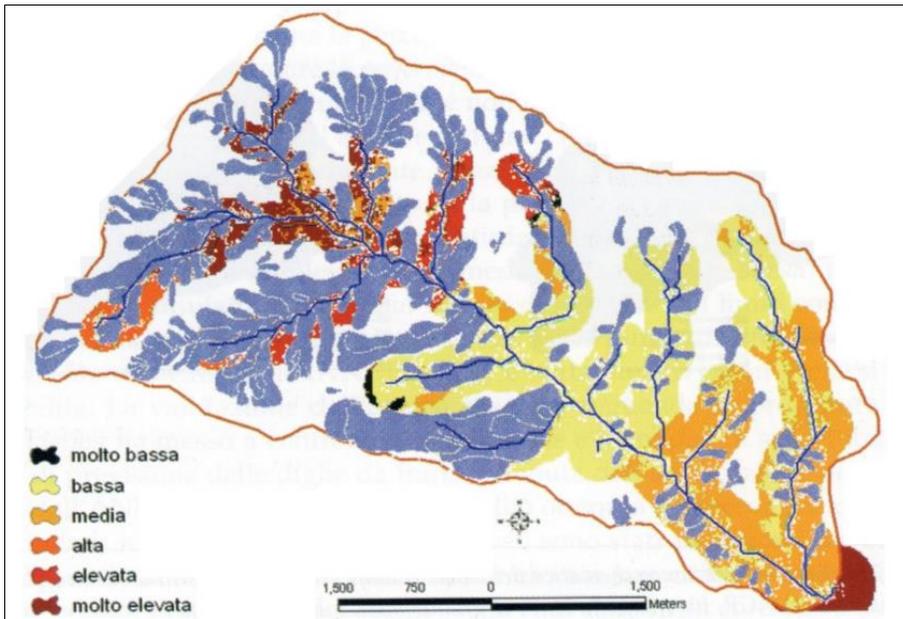


Fig. 5 - Carta di suscettibilità alla formazione di dighe da frana nel bacino del T. Gallitello; in azzurro sono riportati i fenomeni franosi presenti nel bacino.

#### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- CASAGLI N., ERMINI L., “Geomorphic Analysis of Landslide Dams in the Northern Apennine”, Transactions, Japanese Geomorphological Union, 1999, 20 (3), pp. 219–249.
- CASAGLI N., TACCONI STEFANELLI C., “Sbarramenti da frana”. In: Frane d’Italia, a cura di Calcaterra D., Cencetti C., Meisina C., Revellino P., 2022, pp. 428-444, Luciano Ed., Formia, ISBN: 978 88 6026 327 8.
- DAL SASSO S.F., SOLE A., PASCALE S., SDAO F., BATEMAN PINZÒN A., MEDINA V., “Assessment methodology for the prediction of landslide dam hazard”, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2014, 14, pp. 557–567.
- DE BARI C., PASCALE S., SDAO F., “Le dighe da frana. Caratteri geomorfologici ed evolutivi. Una proposta di modello di pericolosità geomorfologica”, In: Catalogo di morfologie ed instabilità idrodinamiche nei corsi d’acqua, a cura di Copertino V., Scavone G., Telesca V., 2009, pp. 335-386, Nuova Bios Ed., Cosenza, ISBN: 9788860930613.
- SDAO F., CANORA F., BENTIVENGA M., COLANGELO G., DOGLIONI A., SIMEONE V., “Basilicata”, In: Frane d’Italia, a cura di Calcaterra D., Cencetti C., Meisina C., Revellino P., 2022, pp. 308-322, Luciano Ed., Formia, ISBN: 978 88 6026 327 8.

*Landslide dams and geomorphological hazard: case studies in Basilicata.*

In Basilicata, landslide dams are frequent and numerous, not infrequently of considerable size, and are found along the riverbeds of the mountainous and hilly portions of the hydrographic basins of the main Lucanian rivers with their mouths in the Ionian Sea (Agri, Sinni, Basento, Bradano rivers) or in the Tyrrhenian Sea (Noce River). These natural dams were generated by large complex landslides, essentially attributable to roto-translational flows - earth flows. The present note describes the geomorphological, morpho-evolutionary and stability characteristics of the large Zillona landslide which, during its mobilization phases in 2007, temporarily blocked the course of the Noce River, near the town of Trecchina, generating a landslide lake that has now been emptied; the widespread, albeit modest, landslide barriers, but equally dangerous, which characterize the basin of the Gallitello Creek, tributary on the right of the Basento River. In order to predict the formation of landslide dams in the Gallitello basin, a spatial forecasting model was implemented, already applied in Lucanian river basins and recently revised on the basis of further studies. This model is based on the application of an Artificial Neural Network (ANN), specially designed and implemented with parameters and variables relating to slope dynamics, fluvial geomorphology and the lithology of deposits outcropping in the basin.

*Keywords* - landslide dams, southern Apennines, Basilicata.

*“La Dinamica fluviale. La conoscenza del Fiume per la pianificazione e la salvaguardia del territorio”*

a cura di C. Cencetti, L. Di Matteo

*Culture Territori Linguaggi*, 24, 2023, pp. 157-172

ISBN 9788894469783

Sofia ORTENZI<sup>1</sup>, Corrado CENCETTI<sup>1</sup>, Lucio DI MATTEO<sup>1</sup>

## UN *WORKFLOW* PER LA VALUTAZIONE DELLE SOGLIE EMPIRICHE DI GENERAZIONE DEL *RUNOFF*

**Introduzione.** – Gli eventi pluviometrici, soprattutto quelli di breve durata ed elevata intensità, possono influenzare la dinamica di un bacino idrografico.

La relazione tra pioggia e *runoff* è regolata da diversi fattori (litologia, pendenza del versante, copertura del suolo, ecc.) e, sebbene la sua modellazione sia una delle applicazioni più classiche dell'idrologia, diversi studi hanno proposto metodi empirici per la definizione di soglie di generazione del *runoff*, su *plot* o bacini strumentati, basandosi sulla quantità di pioggia di un evento e sull'umidità del suolo antecedente a questo (Haga et al., 2005; Penna et al., 2015; Minea et al., 2015; Todisco et al., 2022).

L'applicazione di tali metodi richiede un gran numero di dati, non sempre disponibili in bacini non strumentati. L'acquisizione di dati meteorologici può risultare difficoltosa e, a volte, i dati acquisiti possono non essere rappresentativi dell'area di studio a causa, ad esempio, dell'influenza della topografia nell'area in esame (Basist et al., 1994; Millàn et al., 2005); la qualità dei dati pluviometrici dipende dal numero, dalla distribuzione spaziale e dal periodo di esercizio delle stazioni pluviometriche (Molini et al., 2009; Cambi et al., 2010; Viviroli et al., 2011; Di Matteo et al., 2013; 2017; Camera et al., 2017; Gentilucci et al., 2022).

Negli ultimi decenni i prodotti satellitari, come il SM2RAIN (*EUMESAT, European Space Agency, ESA e European Commission Projects*), l'IMERG GPM (*Integrated Multi-satellite Retrievals for Global Precipitation Measurement*) per le precipitazioni, e l'SSM1km (Copernicus, ESA) e lo SMAP (NASA) per l'umidità del suolo, sono ampiamente utilizzati.

---

<sup>1</sup> Dipartimento di Fisica e Geologia, Università degli Studi di Perugia, Perugia, sofia.ortenzi@studenti.unipg.it

Valutare le performance dei *dataset* satellitari su piccoli bacini idrografici è ad oggi un argomento di studio, in particolare in aree eterogenee dal punto di vista topografico e della copertura del suolo (Walker et al., 2004; Evett et al., 2006; Vereecken et al., 2014; Rudnick et al., 2015; Ortenzi et al., 2022).

Il presente lavoro vuole investigare l'affidabilità dei prodotti satellitari su un piccolo bacino ben strumentato del centro Italia (bacino del T. Tatarena) e, conseguentemente, presentare un *workflow* per la valutazione empirica delle soglie di generazione del *runoff*, a scala di bacino, utilizzando anche dati satellitari.

***Inquadramento geologico e geomorfologico.*** – Il T. Tatarena si trova in Umbria e il suo bacino idrografico copre un'area di circa 32 km<sup>2</sup> con un'altitudine media di 407 m s.l.m. È caratterizzato principalmente da rocce torbiditiche appartenenti alla sequenza miocenica umbro-romagnola, con alcuni affioramenti di rocce calcareo-marnose della serie stratigrafica umbro-marchigiana. Dal punto di vista geomorfologico, il bacino può essere suddiviso in due aree (*Tinitaly*, Tarquini et al., 2007): una zona a O corrispondente al fianco orientale della catena dei M.ti Martani (elevazione media 800 m s.l.m.) e una zona collinare che si estende nella porzione centrale del bacino (elevazione media 400 m s.l.m.). Tale bacino (Fig. 1) è scarsamente antropizzato (1,5%), occupato per circa il 72% da attività agricole e per il 26,5% da boschi e prati (dati da *Corine Land Cover* - EEA, 2018).

Le caratteristiche geomorfologiche e di uso del suolo rendono il bacino soggetto a rapide inondazioni (ISPRA, 2015; Marchesini et al., 2021) innescate da eventi piovosi di alta intensità; pertanto, nel corso dei secoli il T. Tatarena è stato oggetto di numerosi lavori di sistemazione idraulica (D'Agata, 2015).

### ***Materiali e metodi.***

***Stazioni di misura a terra.*** – L'area di studio presenta tre stazioni pluviometriche (Tab. 1) gestite dal Servizio Idrografico Regionale umbro che forniscono dati ad alta risoluzione temporale (1 minuto); in questo lavoro, le precipitazioni sono state aggregate a scala sub-oraria, oraria, giornaliera e mensile. La pioggia media sul bacino è stata ottenuta con il noto metodo dei poligoni di Thiessen (la localizzazione dei pluviometri è rappresentata in Figura 1). Va evidenziato che nella stazione di misura "La Bruna" è presente un idrometro, ad alta risoluzione temporale, corredato di scala dei deflussi validata; tale strumento può essere utilizzato per definire le portate e, di conseguenza, il deflusso di base del bacino.

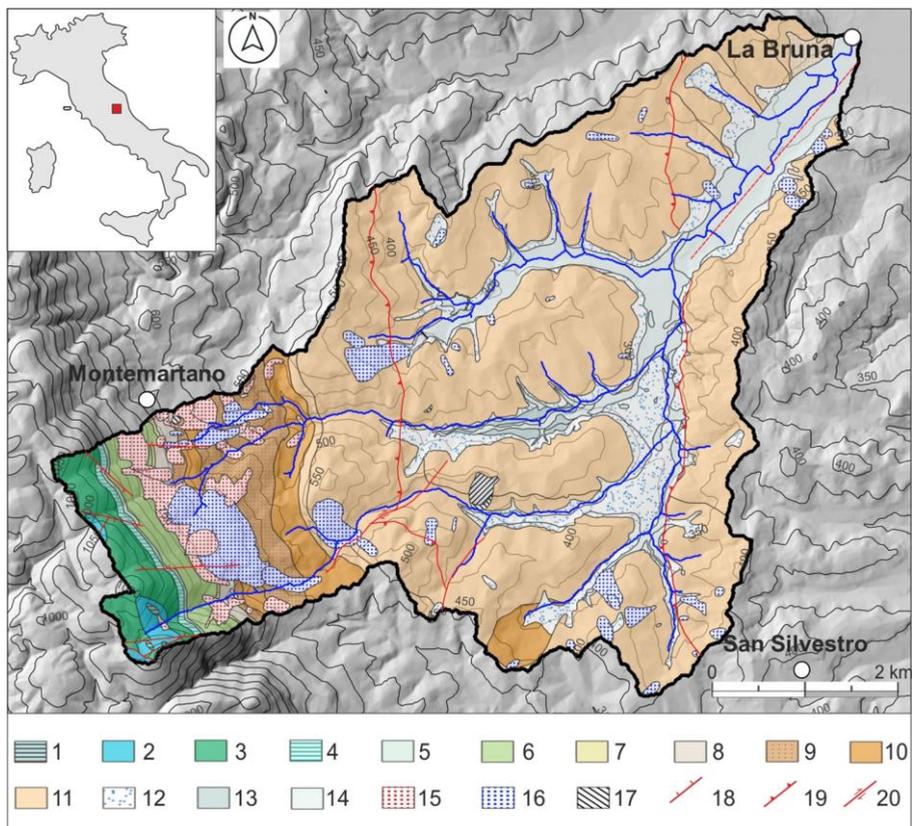


Fig. 1 - a) *Mappa geologica del bacino del T. Tatarena e localizzazione delle stazioni pluviometriche (rappresentate dai cerchi bianchi accanto ai nomi). Legenda: 1) Rosso Ammonitico; 2) Corniola; 3) Maiolica; 4) Marne a Fucoidi; 5) Scaglia Bianca; 6) Scaglia Rossa; 7) Scaglia Variegata; 8) Scaglia Cenera; 9) Bisciaro; 10) Schlier; 11) Sequenza torbiditica umbro-romagnola; 12) Depositi eluvio-colluviali; 13) Depositi alluvionali terrazzati; 14) Depositi fluvio-lacustri; 15) Talus; 16) Depositi di frana; 17) Depositi antropici; 18) Faglia diretta; 19) Faglia inversa; 20) Faglia trascorrente.*

Al fine di valutare la performance dei dati satellitari è stato preso in considerazione il periodo 2015-2021.

Stazione di misura	Codice del pluviometro	Quota (m s.l.m.)	Serie temporale
La Bruna	43648	246	dal 2011 ad oggi
San Silvestro	12945	383	dal 1993 ad oggi
Montemartano	37469	618	dal 2008 ad oggi

Tab. 1 - *Caratteristiche principali delle stazioni pluviometriche. Il codice dei sensori è quello ufficialmente utilizzato dal Servizio Idrografico della Regione Umbria.*

Dati satellitari di pioggia. – L’algoritmo IMERG GPM opera sulle misurazioni della rete di satelliti GPM producendo, dal 2014, un *dataset* di pioggia con frequenza di campionamento di 30 minuti e risoluzione spaziale di  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ . Tale algoritmo include anche osservazioni, a scala mensile, raccolte da un *network* di stazioni pluviometriche (*GPCC, Global Precipitation Climatology Center*) che sono implementate nel prodotto denominato “*Final Product*” al fine di migliorare le stime; questo *dataset* è disponibile a scala annuale, mensile, giornaliera e di 30 minuti (Huffman et al., 2019).

Il *dataset* SM2RAIN fornisce, dal 2007, una stima della pioggia cumulata a scala mensile e giornaliera con una risoluzione spaziale di circa  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  ed ha una copertura globale. Queste stime di precipitazioni sono derivate a partire dalle osservazioni di umidità del suolo ASCAT (EUMESTAT H SAF), , tramite l’algoritmo *TU Wien* (Wagner et al., 2013), prendendo in considerazione anche le informazioni climatiche del dataset ERA5 (es. temperatura del suolo, evapotraspirazione etc.). Anche in questo caso le stime satellitari sono integrate e comparate con dati a terra (Brocca et al., 2019).

Dati satellitari di umidità del suolo. – La missione Sentinel-1, del progetto europeo Copernicus (Bauer-Marschallinger et al., 2018), comprende due satelliti, il Sentinel-1A e il Sentinel-1B, equipaggiati con identici strumenti C-SAR (*C-Band Synthetic Aperture Radar*), lanciati rispettivamente nell’aprile 2014 e nell’aprile 2016. Le osservazioni effettuate del *backscatter*, normalizzate a un angolo di incidenza comune ( $\theta_r = 40$ ), tramite il modello *TU Wien-Change Detection* (Wagner, 1998), sono utilizzate per derivare l’umidità superficiale del suolo relativa [SSM(t)]. Le osservazioni del *backscatter* di lungo termine sono prese in considerazione al fine di derivare le condizioni limite [ $\theta_{wet}(40)$  e  $\theta_{dry}(40)$ ]. L’umidità del suolo relativa è data dall’equazione:

$$SSM(t) = \frac{\theta_{40}(t) - \theta_{dry(40)}^0}{\theta_{wet(40)}^0 - \theta_{dry(40)}^0}$$

Il prodotto satellitare SSM1km descrive l’umidità del suolo nei primi 50 mm di profondità, dal gennaio 2015, con una risoluzione spaziale di 1 km e una risoluzione temporale iniziale di 3-8 giorni, scesa a 1.5-4 giorni dopo il lancio del Sentinel-1B. Il valore di SSM non può essere valutato correttamente in condizioni estremamente secche, in presenza di suolo ghiacciato o coperto da neve, in aree alluvionate e in zone con una pendenza maggiore di  $17^\circ$ . Per mitigare l’influenza della vegetazione sulle misure del *backscatter* effettuate dai C-SAR, l’algoritmo applica una correzione statica alla vegetazione.

Nel gennaio 2015 la NASA ha lanciato la missione *Soil Moisture Active Passive (SMAP)*, con lo scopo di acquisire informazioni sull’umidità del suolo superficiale (circa 5 cm di pro-

fondità) ad alta risoluzione spatio-temporale; la missione includeva un radar (attivo) e un radiometro (passivo), operanti in *L-band* con un angolo di acquisizione fissato a  $40^\circ$ . Sfortunatamente, nel luglio 2015 la strumentazione radar ha smesso di funzionare; con lo scopo di continuare l'acquisizione del dato di umidità al suolo, i prodotti C-SAR di Copernicus Sentinel-1A e Sentinel-1B sono stati implementati nell'algoritmo per sopperire alla mancanza del *L-band* radar. Il prodotto SMAP denominato L2\_SM\_SP, basato sulle osservazioni radiometriche in *L-band* ( $\approx 33$  km) e sulle osservazioni di Sentinel-1A/B ( $\approx 1$  km), restituisce due dataset di umidità del suolo, con una risoluzione di 3 km (validata) o 1 km (sperimentale), a seconda del tipo di sovrapposizione considerato tra i diversi strumenti. Il prodotto "*soil\_moisture\_am*" è ottenuto considerando l'orbita discendente di SMAP per individuare una sovrapposizione con Sentinel-1A/B (differenza di tempo di  $\pm 24$  ore), mentre il prodotto "*soil\_moisture\_apm*" è ottenuto tenendo in considerazione sia l'orbita ascendente che quella discendente di SMAP ( $\approx 12$  ore).

*Performance dei dati satellitari.* – Per valutare le *performance* dei dati satellitari di pioggia, sono stati presi in considerazione gli indici statistici più comunemente utilizzati in letteratura (Tab. 2): *Coefficiente di correlazione di Pearson* (*CC*, Eq. 2), *Nash-Sutcliffe efficiency* (*NSE*, Eq. 3), *Errore quadratico medio* (*RMSE*, Eq. 4), *Relative Bias* (*rBias*, Eq. 5). Inoltre tre indici, atti a valutare la capacità o meno dei satelliti di rilevare un evento piovoso (*Categorical Scores*, i.e. *POD - Probability Of Detection* - Eq. 6, *FAR - False Alarm Ratio* - Eq. 7, *CSI - Critical Success Index* - Eq. 8), sono stati presi in considerazione (Moazami e Najafi, 2021; Yu et al., 2021; Yusnaini et al., 2022).

A causa della mancanza di misure a terra dell'umidità del suolo, e comunque della loro scarsa rappresentatività a scala di bacino, per valutare le *performance* dei dataset SSM1km e L2\_SM\_SP è stato utilizzato l'indice, fisicamente basato, *HCI (Hydrological Consistency Index)*, Paciolla et al., 2020). Tale indice verifica la consistenza tra la variazione di umidità del suolo registrata da satellite tra due osservazioni successive e i dati di precipitazione, registrati a terra, nello stesso intervallo temporale, assegnando una valutazione positiva (A+), negativa (A-) o nulla (n/a) quando la variazione di umidità del suolo ricade nel range di errore di misura del satellite.

***Risultati.*** – I dati acquisiti per il bacino idrografico del T. Tatarena sono stati analizzati al fine di verificare e quantificare le performance e di confrontare i diversi prodotti satellitari.

n.	Equazione	Valore ideale
(2)	$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i - G) * (S_i - S)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (G_i - G)^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - S)^2}}$	1
(3)	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - G_i)^2}{\sum_{i=1}^n (G_i - G)^2}$	1
(4)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - G_i)^2}{n}}$	0
(5)	$rBias = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - G_i)}{\sum_{i=1}^n G_i} * 100$	0
(6)	$POD = \frac{Tp}{(Tp + Fn)}$	1
(7)	$FAR = \frac{Fp}{(Tp + Fp)}$	0
(8)	$CSI = \frac{Tp}{(Tp + Fp + Fn)}$	1

Tab. 2 - *Tests statistici e Categorical scores utilizzati per valutare e quantificare le performance dei dataset satellitari.  $G_i$  = osservazione della stazione pluviometrica;  $G$  = media delle osservazioni della stazione pluviometrica;  $S_i$  = osservazione satellitare;  $S$  = media delle osservazioni satellitari;  $n$  = numero di osservazioni;  $Tp$  = numero delle osservazioni "True positive" (è stata registrata pioggia sia a terra che da satellite);  $Fn$  = numero delle osservazioni "False negative" (è stata registrata pioggia dalla stazione pluviometrica ma non dal satellite);  $Fp$  = numero delle osservazioni "False positive" (è stata registrata pioggia dal satellite ma non dalle stazioni pluviometriche).*

Dati di pioggia. – I dati pluviometrici registrati da satellite sono stati confrontati con quelli registrati a terra mediante il metodo della doppia massa (Searcy et al., 1960) a diverse scale temporali (Vernimmen et al., 2012). Le Figure 2a e 2b mostrano le curve ottenute dal con-

fronto tra le precipitazioni cumulate registrate a terra, a scala di bacino, e le stime satellitari IMERG GPM e SM2RAIN. L'analisi dei dati raccolti per il bacino del T. Tatarena mostra come le stime IMERG GPM presentino un allineamento migliore rispetto ai dati SM2RAIN, sia a scala mensile (Fig. 2a) che giornaliera (Fig. 2b). A scala giornaliera le osservazioni SM2RAIN tendono a sottostimare i dati pluviometrici in modo maggiore rispetto al dataset IMERG GPM.

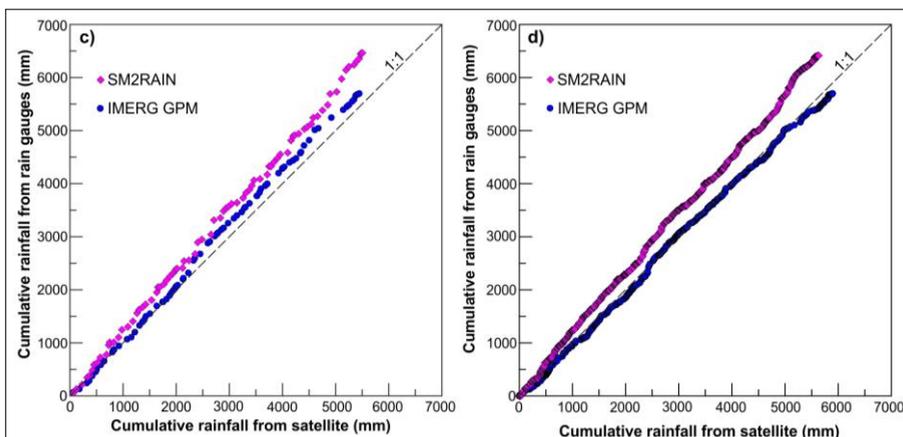


Fig. 2 - Curve dell'analisi a doppia massa per la valutazione della consistenza dei dati pluviometrici da satellite a scala mensile (a) e giornaliera (b). Da Orteni et al. (2023), modificato.

La quantificazione delle performance dei *dataset* di pioggia satellitari, rispetto ai dati raccolti a terra, è stata effettuata tramite indici statistici e categorici applicati a diverse scale temporali (Di Matteo et al., 2021; Duarte et al., 2022; Hosseini-Moghari e Tang, 2022). La valutazione del rendimento a scala oraria e di 6 ore è stata effettuata solamente per il *dataset* IMERG GPM (non sono disponibili dati a scala oraria per il *dataset* SM2RAIN) e, a causa della gran quantità di dati, questa analisi è stata effettuata solo per l'anno 2015. La Tabella 3 presenta i risultati ottenuti.

In accordo con l'analisi a doppia massa, il *dataset* IMERG GPM, sia a scala mensile che giornaliera, restituisce performance migliori del SM2RAIN. In dettaglio, a scala giornaliera, si ha un valore di  $CC = 0.90$  per il *dataset* IMERG GPM, comparato con un  $CC = 0.68$  per il *dataset* SM2RAIN. Sebbene i valori di POD per i due *dataset* non mostrino grandi differenze, i restanti indici ( $RMSE$ ,  $rBias$ ,  $FAR$  e  $CSI$ ) dimostrano un miglior rendimento di IMERG GPM. A scala giornaliera, le stime IMERG GPM possono essere utilizzate come alternativa alle precipitazioni osservate a terra, risultando utili nella descrizione o modellazione dei processi che, a scala di bacino, sono causati da piogge prolungate e intense.

Test di Performance	IMERG (mensile)	SM2RAIN (mensile)	IMERG (giornaliera)	SM2RAIN (giornaliera)	IMERG (oraria)	IMERG (6 ore)
CC	0.83	0.82	0.90	0.68	0.29	0.57
NSE	0.66	0.58	0.34	0.43	-1.07	-1.11
RMSE (mm)	29.51	36.54	4.76	5.18	1.22	1.74
rBias (%)	-4.44	-13.32	1.55	-11.42	-0.00	-0.00
POD	-	-	0.84	0.86	0.60	0.67
FAR	-	-	0.40	0.48	0.65	0.56
CSI	-	-	0.54	0.47	0.28	0.36

Tab. 3 - Risultati delle performance dei prodotti satellitari di pioggia a diverse scale; per il significato dei test di performance, vedi Tabella 2. Da Ortenzi et al. (2023), modificato.

Dati di umidità del suolo. – Nel bacino del T. Tatarena, il rendimento dei prodotti satellitari di umidità del suolo SMAP L2\_SM\_SP e Copernicus Sentinel-1 SSM1km è stato investigato, attraverso l'utilizzo dell'indice *HCI*, per il periodo 2015-2021; ne risultano 706 acquisizioni per SSM1km e 518/516 per L2\_SM\_SP. Come mostrato in Figura 3, entrambi i dataset reagiscono efficacemente alle precipitazioni, sia nel periodo autunno-inverno sia in quello primavera-estate. La Tabella 4 espone i risultati ottenuti dall'applicazione dell'indice *HCI*; il prodotto SSM1km sembra avere performance migliori di L2\_SM\_SP. In dettaglio, il 54% dei dati di SSM1km sono risultati avere una valutazione positiva (A+), contro il 26-35% di quelli di L2\_SM\_SP; va sottolineato, tuttavia, che il numero di valutazioni nulle (i.e. variazioni di umidità del suolo ricadenti nel *range* di errore della misura di  $\pm 0.04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) è più alto per le osservazioni SMAP rispetto a quelle Copernicus.

Workflow per la definizione delle soglie empiriche del runoff. – Il *workflow* messo a punto per la definizione delle soglie empiriche di generazione del *runoff*, a scala di bacino, prevede l'utilizzo di dati di pioggia, cumulata per evento, registrati da pluviometri (*P*) o da satellite (*P<sub>s</sub>*), del dato di umidità del suolo (*SSM*) e del valore del *runoff* di evento (*R*). Per definire la soglia è dunque necessario selezionare diversi eventi piovosi che, a scala di bacino, hanno generato *R*, e per i quali è disponibile una misura di *SSM* concomitante o immediatamente precedente ( $\approx 1$  giorno). In dettaglio, tale procedimento è riportato in Figura 4.

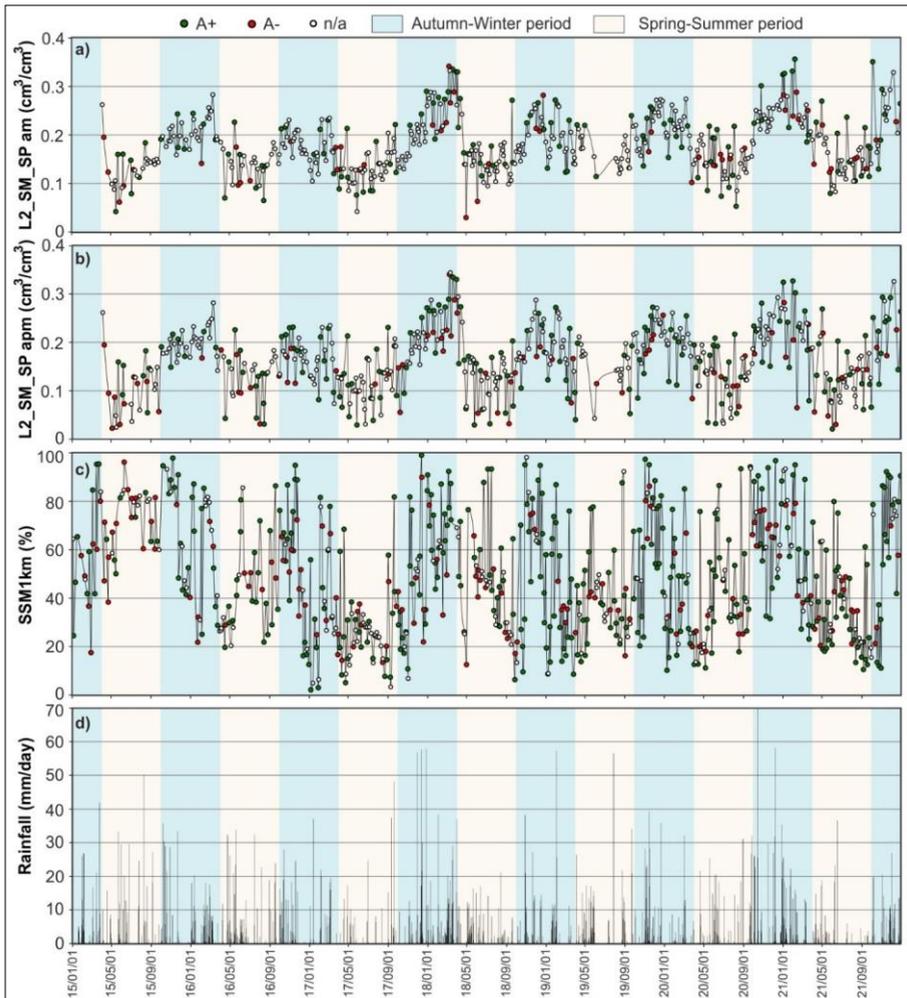


Fig. 3 - Analisi dei dataset di umidità del suolo effettuata con l'indice HCI per il periodo 2015-2021. a) SMAP L2\_SM\_SP (orbita ascendente, am); b) SMAP L2\_SM\_SP (orbita ascendente e discendente, apm); c) Copernicus Sentinel-1 SSM1km; d) Pioggia giornaliera registrata a terra a scala di bacino (da Ortenzi et al., 2023).

	SSM1km	L2_SM_SP am	L2_SM_SP apm
A+	380	136	181
A-	166	53	83
n/a	160	329	252
% di A+	53.8	26.3	35.1

Tab. 4 - Risultati dell'analisi effettuata tramite l'indice HCI per i dataset Copernicus Sentinel-1 SSM1km, SMAP L2\_SM\_SP "soil\_moisture\_am" e SMAP L2\_SM\_SP "soil\_moisture\_apm" (da Ortenzi et al., 2023).

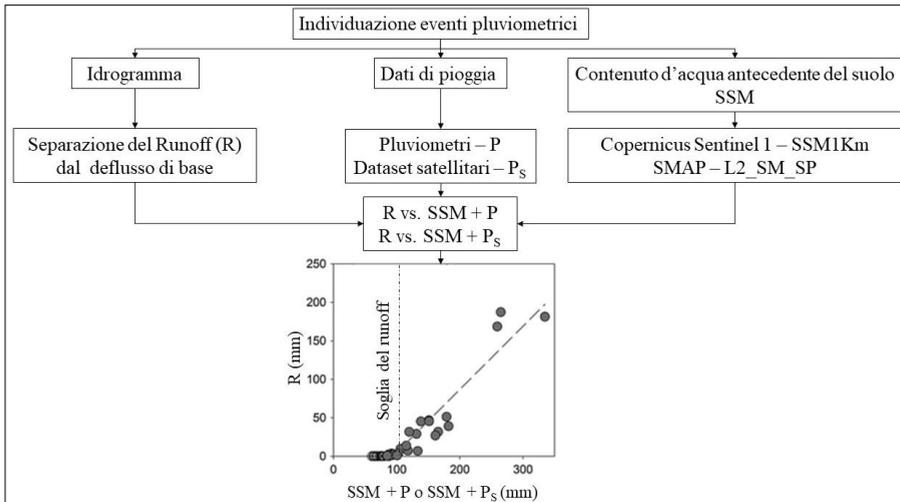


Fig. 4 - Workflow per la definizione empirica della soglia di innesco del runoff (R) a partire dalla somma del contenuto d'acqua antecedente (SSM) e la pioggia cumulata durante l'evento pluviometrico (P o P<sub>s</sub>).

**Conclusioni.** – Le indagini eseguite nel bacino del T. Tatarena hanno permesso di valutare l'affidabilità di diversi dataset satellitari, in una regione tipica dell'Italia centrale interna, concludendo che:

- il prodotto IMERG GPM ha una performance migliore del SM2RAIN e restituisce risultati promettenti anche a scala giornaliera;
- la performance del dataset IMERG GPM va peggiorando all'aumentare della risoluzione temporale, come riportato anche da Hosseini-Moghari e Tang (2022);
- alcuni eventi di pioggia di elevata intensità non sono registrati dai dataset presi in considerazione sebbene, per quanto riguarda il dataset IMERG GPM, l'entità del problema sia minore rispetto a quello del dataset SM2RAIN, come già evidenziato da Brocca et al. (2019);
- sebbene non siano disponibili misure *in situ* dell'umidità del suolo per il bacino del T. Ta-

tarena, l'analisi preliminare effettuata con un indice fisicamente basato (*HCI*) mostra una maggiore consistenza, rispetto alle precipitazioni, del prodotto Copernicus Sentinel-1 SSM1km, se confrontato con il prodotto SMAP L2\_SM\_SP.

A causa della mancanza di punti di controllo a terra, la valutazione dei dati satellitari di umidità del suolo rimane argomento di discussione; sebbene le misurazioni con sonde siano spesso utilizzate per descrivere questo parametro in bacini o *plot* di dimensioni ridotte (Penna et al., 2011; Morbidelli et al., 2014; Korres et al., 2015; Di Matteo et al., 2018; Zhou et al., 2019; Di Matteo et al., 2021), l'elevata variabilità spazio-temporale dell'umidità del suolo ne rende difficoltosa la valutazione a scala di bacino (Wang e Qu, 2009). Le tecniche di telerilevamento, attive e passive, possono essere un'alternativa alle misure in situ, per ottenere valori di umidità del suolo a scala di bacino. Tuttavia, viene evidenziato da molti autori (Wang e Qu, 2009; Entekhabi et al., 2010; Srivastava, 2017; Ma et al., 2019; Kim et al., 2020; Mohseni et al., 2022) come questa tecnica soffra di limitazioni, dovute alla rugosità del suolo e alla vegetazione.

I risultati qui ottenuti sono in accordo con la valutazione della *performance* del *dataset* Copernicus Sentinel-1 SSK1km effettuata recentemente, per la regione Umbria, da Bauer-Marschallinger et al. (2018) che mostra una qualità soddisfacente di SMM1km, specialmente in aree non densamente boscate e nelle pianure agricole.

Dal momento che i dati satellitari meteo-climatici sono sempre più utilizzati nella modellazione dei processi idrologici a varie scale, la verifica della loro affidabilità è fondamentale (Ortenzi et al., 2023); la qualità dei dati idrologici disponibili e la loro distribuzione spaziale sono di grande importanza nello studio dei fenomeni ad essi legati, come la valutazione delle soglie di pioggia, che inducono all'innescio di frane poco profonde (Brunetti et al., 2018; De Vita et al., 2018), la definizione di soglie di deflusso (Mirus e Loague, 2013) e la stima dell'erosione del suolo (Longoni et al., 2016). Finora la definizione di soglie di deflusso è stata affrontata su *plot* o piccoli bacini strumentati (Penna et al., 2015; Saffarpour et al., 2016; Scaife et al., 2017; Todisco et al., 2022; Wang et al., 2022); il metodo indicato in Figura 4 può risultare particolarmente utile in bacini idrografici che, al contrario, sono scarsamente strumentati e dove l'applicazione di modelli idrologici risulterebbe complessa (es: difficoltà nella calibrazione).

I risultati di questo lavoro sono comunque da considerarsi propedeutici all'utilizzo dei dati satellitari per la modellazione dei processi di deflusso che avvengono in bacini idrografici di piccole-medie dimensioni, scarsamente strumentati.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- BASIST A., BELL G.D., MEENTEMEYER V., "Statistical relationships between topography and precipitation patterns", *J. Clim.*, 1994, 7, 9, pp. 1305-1315.
- BAUER-MARSCHALLINGER B., FRREMAN V., CAO S., PAULIK C., SCHAUFLENER S., STACHL T., MODANESI S., MASSARI C., CIABATTA L., BROCCA L., WAGNER W., "Toward global soil moisture monitoring with Sentinel-1: Harnessing assets and overcoming obstacles", *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.*, 2018, 57, 1, pp. 520-539.
- BROCCA L., FILIPPUCCI P., HAHN S., CIABATTA L., MASSARI C., CAMICI S., SCHÜLLER L., BOJKOV B., WAGNER W., "SM2RAIN-ASCAT (2007-2018): Global daily satellite rainfall data from ASCAT soil moisture observations", *Earth Syst. Sc. Data*, 2019, 11, 4, pp. 1583-1601.
- BRUNETTI M.T., MELILLO M., PERUCCACCI S., CIABATTA L., BROCCA L., "How far are we from the use of satellite rainfall products in landslide forecasting?", *Rem. Sens. Environ.*, 2018, 210, pp. 65-75.
- CAMBI C., VALIGI D., DI MATTEO L., "Hydrogeological study of data-scarce limestone massifs: the case of Gualdo Tadino and Monte Cucco structures (Central Apennines, Italy)", *Boll. Geofis. Teor. Appl.*, 2010, 51, 4, pp. 345-360.
- CAMERA C., BRUGGEMAN A., HADJINICOLAOU P., MICHAELIDES S., LANGE M.A., "Evaluation of a spatial rainfall generator for generating high resolution precipitation projections over orographically complex terrain", *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, 2017, 31, 3, pp. 757-773.
- D'AGATA A., "Tatarena. L'alveo originario nel territorio di Castel San Giovanni". Consorzio della Bonificazione Umbra, Comune di Castel Ritaldi, ATI Umbria 3, Consorzio Bacino Imbrifero Montano Nera e Velino, 2015.
- DE VITA P., FUSCO F., TUFANO R., CUSANO D., "Seasonal and Event-Based Hydrological and Slope Stability Modeling of Pyroclastic Fall Deposits Covering Slopes in Campania (Southern Italy)", *Water*, 2018, 10, 1140.
- DI MATTEO L., VALIGI D., CAMBI C., "Climatic characterization and response of water resources to climate change in limestone areas: Considerations on the importance of geological setting", *Journ. Hydr. Eng.*, 2013, 118, 7, pp. 773-779.
- DI MATTEO L., DRAGONI W., MACCARI D., PIACENTINI S.M., "Climate change, water supply and environmental problems of headwaters: The paradigmatic case of the Tiber, Savio and Marecchia rivers (Central Italy)", *Sc. Tot. Environ.*, 2017, 598, pp. 733-748.
- DI MATTEO L., PAUSELLI C., VALIGI D., ERCOLI M., ROSSI M., GUERRA G., CAMBI C., RICCO R., VINTI G., "Reliability of water content estimation by profile probe and its effect on slope stability", *Landslides*, 2018, 15, 1, pp. 173-180.
- DI MATTEO L., SPIGARELLI A., ORTENZI S., "Processes in the Unsaturated Zone by Reliable Soil Water Content Estimation: Indications for Soil Water Management from a Sandy Soil Experimental Field in Central Italy", *Sustainability*, 2021, 13, 1, p. 227.

- DI MATTEO L., CAPOCCIONI A., PORRECA M., PAUSELLI C., “Groundwater-Surface Water Interaction in the Nera River Basin (Central Italy): New Insights after the 2016 Seismic Sequence”, *Hydrology*, 2021, 8, 3, 97.
- DUARTE L.V., FORMIGA K.T.M., COSTA V.A., “Analysis of the IMERG-GPM Precipitation Product Analysis in Brazilian Midwestern Basins Considering Different Time and Spatial Scales”, *Water*, 2022, 14, 16, 2472.
- EEA (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY) - “Corine Land Cover”, European Union, Copernicus Land Monitoring Service, 2018, <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>.
- ENTEKHABI D., NJOKU E.G., O’NEILL P.E., KELLOGG K.H., CROW W.T., EDELSTEIN W.N., ENTIN J.K., GOODMAN S.D., JACKSON T.J., JOHNSON J., KIMBALL J., PIEPMEIER J.R., KOSTER R.D., MARTIN N., MCDONALD K.C., MOGHADDAM M., MORAN S., REICHLER R., SHI J.C., SPENCER M.W., THURMAN S.W., TSANG L., VAN ZYL J., “The soil moisture active passive (SMAP) mission”, *Proceedings of the IEEE*, 98, 5, pp. 704-716.
- EVETT S.R., TOLK J.A., HOWELL T.A., “Soil profile water content determination: Sensor accuracy, axial response, calibration, temperature dependence, and precision”, *Vad. Zone Journ.*, 2006, 5, 3, pp. 894-907.
- GENTILUCCI M., BARBIERI M., PAMBIANCHI G., “Reliability of the IMERG product through reference rain gauges in Central Italy”, *Atm. Res.*, 2022, 278, 106340.
- HAGA H., MATSUMOTO Y., MATSUTANI J., FUJITA M., NISHIDA K., SAKAMOTO Y., “Flow paths, rainfall properties, and antecedent soil moisture controlling lags to peak discharge in a granitic unchanneled catchment”, *Water Resour. Res.*, 2005, 41, 12, [doi.org/10.1029/2005WR004236](https://doi.org/10.1029/2005WR004236).
- HOSSEINI-MOGHARI S.M., TANG Q., “Can IMERG Data Capture the Scaling of Precipitation Extremes With Temperature at Different Time Scales?”, *Geophys. Research Letters*, 2022, 49, 3, e2021GL096392.
- HUFFMAN G.J., BOLVIN D.T., BRAITHWAITE D., HSU K., JOYCE R., KIDD C., NELKIN E.J., SOROOSHIAN S., TAN J., XIE P., “Imergatb Version 06, NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi satellite Retrievals for GPM (IMERG)”, 2019, [https://gpm.nasa.gov/sites/default/files/document\\_files/IMERG\\_ATBD\\_Vo6.pdf](https://gpm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/IMERG_ATBD_Vo6.pdf).
- ISPRA, “Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio - rapporto 2015”. <https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/dissesto-idrogeologico-in-italia-pericolosita-e-indicatori-di-rischio-rapporto-2015>.
- KIM H., WIGNERON J.P., KUMAR S., DONG J., WAGNER W., COSH M.H., BOSCH D.D., COLLINS C.H., STARK P.J., SEYFRIED M., LAKSHMI V., “Global scale error assessments of soil moisture estimates from microwave-based active and passive satellites and land surface models over forest and mixed irrigated/dryland agriculture regions”, *Rem. Sens. Environ.*, 2020, 251, 112052.
- KORRES W., REICHENAU T.G., FIENER P., KOYAMA C.N., BOGENA H.R., CORNELISSEN T., BAATZ R., HERBST M., DIEKKRÜGER B., VERECKEN H., SCHNEIDER K., “Spatio-temporal soil moisture patterns—A meta-analysis using plot to catchment scale data”, *Journ. Hydrol.*, 2015, 520, pp. 326-341.

- LONGONI L., IVANOV V.I., BRAMBILLA D., RADICE A., PAPINI M., "Analysis of the temporal and spatial scales of soil erosion and transport in a Mountain Basin", *It. Journ. Eng. Geol. Environ.*, 2016, 16, 2, pp. 17-30.
- MA H., ZENG J., CHEN N., ZHANG X., COSH M.H., WANG W., "Satellite surface soil moisture from SMAP, SMOS, AMSR2 and ESA CCI: A comprehensive assessment using global ground-based observations", *Rem. Sens. Environ.*, 2019, 231, 111215.
- MARCHESINI I., SALVATI P., ROSSI M., DONNINI M., STERLACCHINI S., GUZZETTI F., "Data-driven flood hazard zonation of Italy", *Journ. Environ. Manag.*, 2021, 294, 112986.
- MILLÁN M.M., ESTRELA M.J., MIRÓ J., "Rainfall Components: Variability and Spatial Distribution in a Mediterranean Area (Valencia Region)", *Journ. Clim.*, 2005, 18, 14, pp. 2682-2705.
- MINEA G., ADLER M.J., MOROȘANU G., NECULAU G., "The relationship between flow rates and land use at plot scale in the Voinești experimental basin (Romania)", *Scientific Papers, Series E, "Land Reclamation, Earth Observation & Surveying, Environmental Engineering"*, 2015, 4, pp. 88-94.
- MIRUS B.B., LOAGUE K., "How runoff begins (and ends): Characterizing hydrologic response at the catchment scale", *Water Resour. Res.*, 2013, 49, 5, pp. 2987-3006.
- MOAZAMI S., NAJAFI M.R., "A comprehensive evaluation of GPM-IMERG V06 and MRMS with hourly ground-based precipitation observations across Canada", *Journ. Hydrol.*, 2021, 594, 125929.
- MOHSENI F., MIRMAZLOUMI S.M., MOKHTARZADE M., JAMALI S., HOMAYOUNI S., "Global Evaluation of SMAP/Sentinel-1 Soil Moisture Products", *Rem. Sens.*, 2022, 14, 18, 4624.
- MOLINI L., PARODI A., SICCARDI F., "Dealing with uncertainty: an analysis of the severe weather events over Italy in 2006", *Nat. Haz. Earth Syst. Sc.*, 2009, 9, 6, pp. 1775-1786.
- MORBIDELLI R., SALTALIPPI C., FLAMMINI A., ROSSI E., CORRADINI C., "Soil water content vertical profiles under natural conditions: Matching of Experiments And Simulations By A Conceptual Model", *Hydrol. Proc.*, 2014, 28, 17, pp. 4732-4742.
- ORTENZI S., MANGONI M., DI MATTEO L., "Estimating moisture content and hydraulic properties of unsaturated sandy soils of Tiber River (Central Italy): integrating data from calibrated PR2/6 probe and hydraulic property estimator", *It. Journ. Groundwater*, 2022, 11, 1, pp. 17-25.
- ORTENZI S., CENCETTI C., MARCHESINI I., STELLUTI M., DI MATTEO L., "Performance of rainfall and soil moisture satellite products on a small catchment in Central Italy", *It. Journ. Eng. Geol. Environ.*, 2023, 99-111, doi.org/10.4408/IJEGE.2023-01. S-13.
- PACIOLLA N., CORBARI C., AL BITAR A., KERR Y., MANCINI M., "Irrigation and precipitation hydrological consistency with SMOS, SMAP, ESA-CCI, Copernicus SSM1km, and AMSR-2 remotely sensed soil moisture products", *Rem. Sens.*, 2020, 12, 22, 3737.
- PENNA D., TROMP-VAN MEERVELD H.J., GOBBI A., BORGA M., DALLA FONTANA G., "The influence of soil moisture on threshold runoff generation processes in an alpine headwater catchment", *Hydrol. Earth Syst. Sc.*, 2011, 15, 3, pp. 689-702.

- PENNA D., VAN MEERVELD H.J., OLIVIERO O., ZUECCO G., ASSENDELFT R.S., DALLA FONTANA G., BORGA M., “Seasonal changes in runoff generation in a small forested mountain catchment”, *Hydrol. Proc.*, 2015, 29, 8, pp. 2027-2042.
- RUDNICK D.R., DJAMAN K., IRMAK S., “Performance analysis of capacitance and electrical resistance-type soil moisture sensors in a silt loam soil”, *Trans. ASABE*, 2015, 58, 3, pp. 649-665.
- SAFFARPOUR S., WESTERN A.W., ADAMS R., MCDONNELL J.J., “Multiple runoff processes and multiple thresholds control agricultural runoff generation”, *Hydrol. Earth Syst. Sc.*, 2016, 20, 11, pp. 4525-4545.
- SCAIFE C.I., BAND L.E., “Nonstationarity in threshold response of stormflow in southern Appalachian headwater catchments”, *Water Resour. Res.*, 2017, 53, 8, pp. 6579-6596.
- SEARCY J.K., HARDISON C.H., “Double-Mass Curves”, US Government Printing Office, Washington, DC, USA, 1960, 1541, 66.
- SRIVASTAVA P.K., “Satellite soil moisture: Review of theory and applications in water resources”, *Water Resour. Manag.*, 2017, 31, 10, pp. 3161-3176.
- TARQUINI S., ISOLA I., FAVALLI M., BATTISTINI A., “TINITALY, a digital elevation model of Italy with a 10 meters cell size (Version 1.0)”, *Ist. Naz. Geofis. Vulc. (INGV)*, 2007, <https://data.ingv.it/dataset/185#additional-metadata>.
- TODISCO F., VERGNI L., ORTENZI S., DI MATTEO L. “Soil Loss Estimation Coupling a Modified USLE Model with a Runoff Correction Factor Based on Rainfall and Satellite Soil Moisture Data”, *Water*, 2022, 14, 13, 2081.
- VERECKEN H., HUISMAN J.A., PACHEPSKY Y., MONTZKA C., VAN DER KRUK J., BOGENA H., WEIHERMÜLLER L., HRBST M., MARTINEZ G., VANDERBORGH T., “On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale”, *Journ. Hydrol.*, 2014, 516, pp. 76-96.
- VERNIMMEN R.R.E., HOOIJER A., ALDRIAN E., VAN DIJK A.I.J.M., “Evaluation and bias correction of satellite rainfall data for drought monitoring in Indonesia”, *Hydrol. Earth Syst. Sc.*, 2012, 16, 1, pp. 133-146.
- VIVIROLI D., ARCHER D.R., BUYTAERT W., FOWLER H.J., GREENWOOD G.B., HAMLET A.F., HUANG Y., KOBOLTSCHNIG G., LITAOR M.I., LÓPEZ-MORENO J.I., LORENTZ S., SCHÄDLER B., SCHREIER H., SCHWAIGER K., VUILLE M., WOODS R., “Climate change and mountain water resources: overview and recommendations for research, management and policy”, *Hydrol. Earth Syst. Sc.*, 2011, 15, 2, pp. 471-504.
- VLČEK O., HUTH R., “Is daily precipitation Gamma-distributed? Adverse effects of an incorrect use of the Kolmogorov–Smirnov test”. *Atm. Res.*, 2009, 93, 4, pp. 759-766.
- WAGNER W., “Soil moisture retrieval from ERS scatterometer data”, European Commission, Joint Research Centre, Space Applications Institute, 1998.
- WAGNER W., HAHN S., KIDD R., MELZER T., BARTALIS Z., HASENAUER S., FIGA J., DE ROSNAY P., JANN A., SCHNEIDER S., KOMMA J., KUBU G., BRUGGER K., AUBRECHT C., ZÜGER J., GANGKOFNER U., KIENBERGER S., BROCCA L., WANG Y., BLÖSCHL G., EITZINGER J., STEINNOCHER K., ZEIL P., RUBEL F., “The ASCAT Soil Moisture Product: A Review of its”, *Meteor. Zeitsch.*, 2013, 22, 1, pp. 1-29.

- WALKER J.P., WILLGOOSE G.R., KALMA J.D., "In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques", *Journ. Hydrol.*, 2004, 293, 1-4, pp. 85-99.
- WANG L., QU J.J., "Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: A review", *Front. Earth Sc. China*, 2009, 3, 2, pp. 237-247.
- WANG S., YAN Y., FU Z., CHEN H., "Rainfall-runoff characteristics and their threshold behaviors on a karst hillslope in a peak-cluster depression region", *Journ. Hydrol.*, 2022, 605, 127370.
- YU L., LENG G., PYTHON A., PENG J., "A comprehensive evaluation of latest GPM IMERG V06 early, late and final precipitation products across China", *Rem. Sens.*, 2021, 13, 6, 1208.
- YUSNAINI H., RAMADHAN R., MARZUKI M., NINGSIH A.P., HASHIGUCHI H., SHIMOMAI T., VONNISA M., HARMADI H., SURYANTO W., SHOLIHUN S., "Statistical Comparison of IMERG Precipitation Products with Optical Rain Gauge Observations over Kototabang, Indonesia", *Jurnal Ilmu Fisika*, 2022, 14, 1, pp. 10-20.
- ZHOU Q., SUN Z., LIU X., WEI X., PENG Z., YUE C., LUO Y., "Temporal soil moisture variations in different vegetation cover types in Karst Areas of Southwest China: A plot scale case study", *Water*, 2019, 11, 7, 1423.

*Evaluation of the performance of satellite products of rainfall and soil moisture in a small catchment in Central Italy.*

Reliable rainfall and soil moisture data is crucial to investigate hydrogeological processes at the catchment scale (runoff, soil erosion, infiltration, etc.). The present study aims to evaluate the performance of several high-resolution satellite products (IMERG GPM, SM2RAIN, Copernicus Sentinel-1 SSM1km, and SMAP L2\_SM\_SP) and define a workflow for the definition of empirical runoff generation threshold at catchment scale. The analysis was carried out in a small low permeability catchment in Central Italy (Tatarena Creek basin), equipped with three-gauge stations. The basin is scarcely anthropized and can be considered representative of many catchments with different soil cover, from forest to farming. The satellite rainfall products were analysed using the double mass method, statistical tests and three categorical scores. Satellite soil moisture data were tested with the Hydrological Consistency Index, aiming to verify the consistency between soil moisture satellite data and rainfall. The results show that the IMERG GPM rainfall dataset performs better than SM2RAIN at different time scales. Despite some uncertainties, the Copernicus Sentinel-1 SSM1km proved to be the best-performing soil moisture satellite dataset. Results may be useful for the utilisation of satellite data to understand processes in poorly instrumented basins and apply the workflow presented for the definition of empirical runoff generation threshold at catchment scale.

*Keywords* - satellite products, soil moisture, rainfall, small catchment, performance tests, runoff.

*“La Dinamica fluviale. La conoscenza del Fiume per la pianificazione e la salvaguardia del territorio”*

a cura di C. Cencetti, L. Di Matteo

*Culture Territori Linguaggi*, 24, 2023, pp. 173-191

ISBN 9788894469783

Simone PALUMBO<sup>1</sup>, Diego DI MARTIRE<sup>1</sup>, Luigi GUERRIERO<sup>1</sup>,  
Domenico CALCATERRA<sup>1</sup>

## INDIVIDUAZIONE DI POTENZIALI SBARRAMENTI DA FRANA NEL BACINO DEL F. CALORE LUCANO (CAMPANIA)

**Introduzione.** – I fenomeni di instabilità di versante sono molto frequenti nel contesto della Catena appenninica meridionale, dove minacciano le infrastrutture, la sicurezza della vita umana e limitano lo sviluppo economico locale (Guerriero et al., 2019; Khalili et al., 2023). In questo settore della penisola italiana, infatti, l’affioramento diffuso di formazioni strutturalmente complesse predispone i versanti allo sviluppo di frane a cinematica intermittente, spesso di grandi dimensioni, che coinvolgono interi versanti, danneggiando il costruito e influenzando la dinamica dei corsi d’acqua. Considerando che questi fenomeni possono rimanere in uno stato di quiescenza anche per lunghi periodi, la pianificazione territoriale e gli interventi di mitigazione dei rischi non possono quindi prescindere da una conoscenza accurata delle forme del territorio, dei meccanismi di frane potenziali e dei processi che controllano l’innesco e l’evoluzione di tali fenomeni. Per questo motivo numerosi sono gli studi, a livello regionale e nazionale, finalizzati alla realizzazione di carte-inventario dei fenomeni franosi e di valutazione della pericolosità relativa (Alvioli et al., 2021; Loche et al., 2022). Purtroppo, però, ancora poca attenzione è rivolta a quelle situazioni derivanti dall’interferenza della dinamica di versante con quella fluviale, che portano alla creazione di sbarramenti da frana. Una frana che nella sua evoluzione raggiunge un’asta fluviale può infatti occluderla parzialmente o totalmente, provocando la formazione di una diga naturale (Fan et al., 2020). Tale processo può portare alla formazione di un lago temporaneo che, in caso di collasso, può indurre fenomeni da colata di

---

<sup>1</sup> *Dipartimento di Scienze della Terra, dell’Ambiente e delle Risorse, Università degli Studi di Napoli Federico II, Napoli, simo.palumbo@libero.it*

detrimento o alluvionamento in senso stretto. Costa e Schuster (1991) ed Ermini e Casagli (2003) hanno descritto l'impatto sociale profondo causato dagli effetti di questi fenomeni nelle aree abitate.

In uno studio predittivo inerente agli sbarramenti da frana, emergono almeno due aspetti di particolare rilevanza: i) capire se ci sono i presupposti morfologici affinché una frana possa ostruire un corso d'acqua; ii) definire il grado di stabilità dello sbarramento. Nella letteratura scientifica questi aspetti sono stati compresi e affrontati principalmente con modelli basati sulle relazioni tra diversi fattori che descrivono, dal punto di vista geomorfologico, sia la frana che il corso d'acqua ostruito (Costa e Schuster, 1988; Casagli e Ermini, 1999; Korup et al., 2002; Cencetti et al., 2011; Tacconi Stefanelli et al., 2016; Fan et al., 2021).

In questo lavoro, riprendendo la problematica della individuazione delle aree suscettibili allo sviluppo di sbarramenti da frana, sono descritti i metodi e i risultati di un'analisi del bacino del F. Calore Lucano, nell'Appennino meridionale, attraverso una tecnica di analisi statistica multivariata, nota come *Principal Component Analysis* (PCA - Analisi delle Componenti Principali).

**L'area di studio.** – L'area di studio ricade all'interno del bacino del F. Calore Lucano, nella zona settentrionale dei M.ti del Cilento, nell'Appennino Meridionale. Il F. Calore è uno dei principali affluenti del F. Sele, con una lunghezza totale di circa 70 km (Fig. 1). Dal punto di vista geomorfologico, il F. Calore si è sviluppato lungo le pieghe tettoniche risultate dai processi orogenetici che hanno portato all'assetto attuale dell'intera regione cilentana (Vitale e Ciarcia, 2013). Più del 50% del percorso del F. Calore è inciso nei litotipi carbonatici dell'Unità dei M.ti Alburno-Cervati-Pollino, per cui risulta quasi privo di forme relitte e ricco di depositi ciottolosi nel letto in evoluzione (Fig. 1). Per la restante parte, attraversa le unità argilloso-marnose e argilloso-arenacee dei terreni ad "affinità sicilide" della Formazione del Bifurto; in questo caso, lo sviluppo del corso d'acqua è meandriforme, con formazione di superfici terrazzate, talora con depositi antichi e recenti. L'alta valle del F. Calore costituisce una tipica morfostruttura collinare, con crinali sommitali che non superano gli 800 m s.l.m., modellata in tempi successivi a quelli dei massicci maggiori; i versanti conservano ancora tracce del controllo strutturale, anche se il reticolo drenante è sensibilmente influenzato dagli eventi denudazionali, di tipo erosivo e gravitativo (frane - Fig. 2).

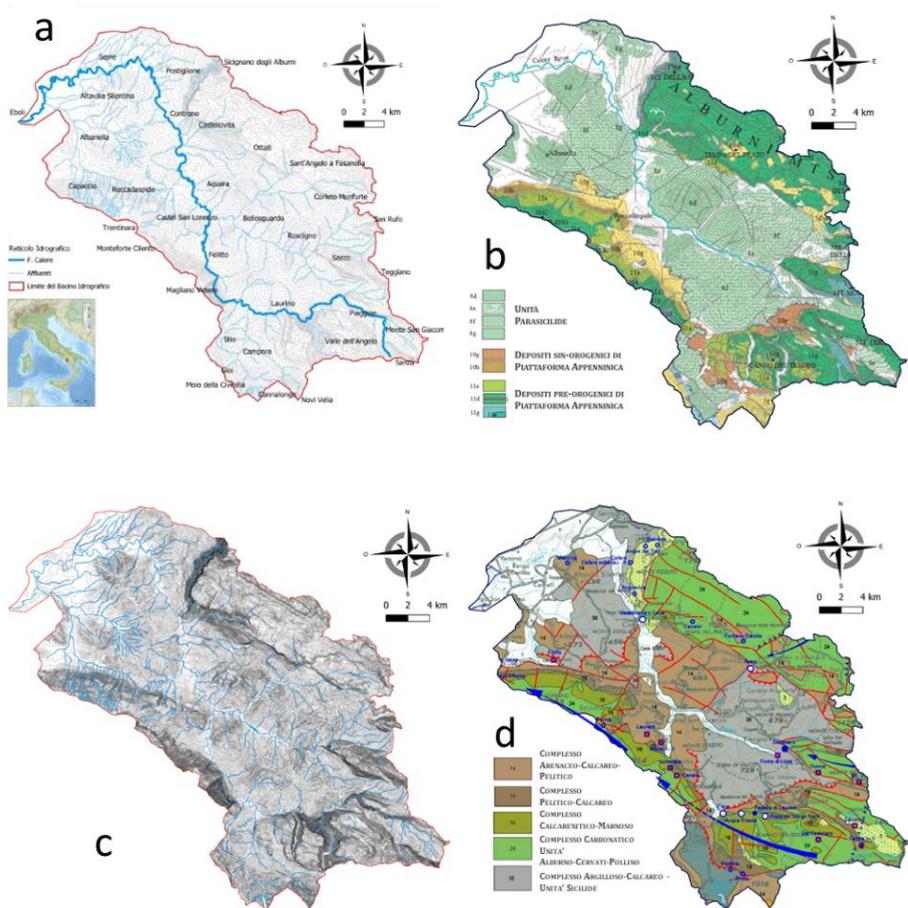


Fig. 1 - a) Bacino del F. Calore Lucano; b) Estratto dalla Carta Geologica della Campania in scala 1:250.000 (Vitale e Ciarcia, 2013); c) Carta topografica del bacino; d) Stralcio della Carta Idrogeologica (De Vita et al., 2018).

**Gli sbarramenti da frana.** – Il termine “sbarramento da frana” (*landslide dam*) identifica una frana che durante la sua propagazione interessa una valle fluviale occludendola, parzialmente o totalmente, e provocando la formazione di una diga naturale (Costa e Schuster, 1988; Casagli e Ermini, 1999; Cencetti et al., 2011; Ermini e Casagli, 2003; Korup, 2004; Dong et al., 2009; Coico et al., 2013; Dal Sasso et al., 2014; Chen et al., 2015 - Fig. 3).



Fig. 2 - Fenomeni di instabilità rilevati nel bacino del Calore Lucano.

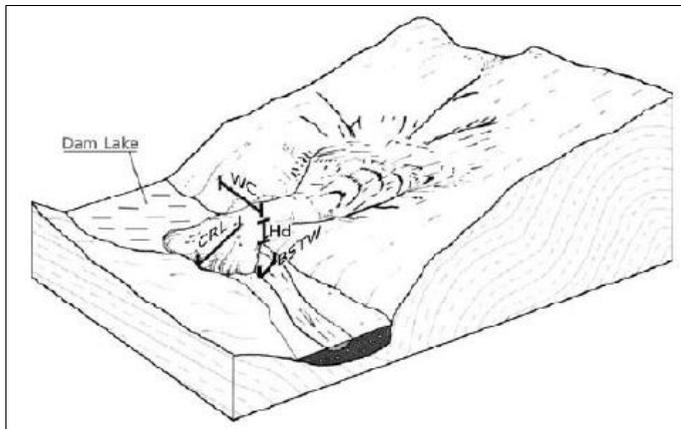


Fig. 3 - Schema del sistema alveo-pianura fluviale nel complesso fenomeno di interferenza con un movimento franoso di versante (da De Rosa, 2008).

Nel caso in cui l'ostruzione del corso d'acqua sia parziale si ha il solo restringimento della sezione di deflusso del corso d'acqua; per un'ostruzione totale, invece, il materiale in frana raggiunge il versante opposto alla valle, determinando la formazione di un'invaso a monte.

Gli scenari che possono generarsi in conseguenza di uno sbarramento fluviale da frana sono mostrati in Figura 4, tratta da Ermini (2000).

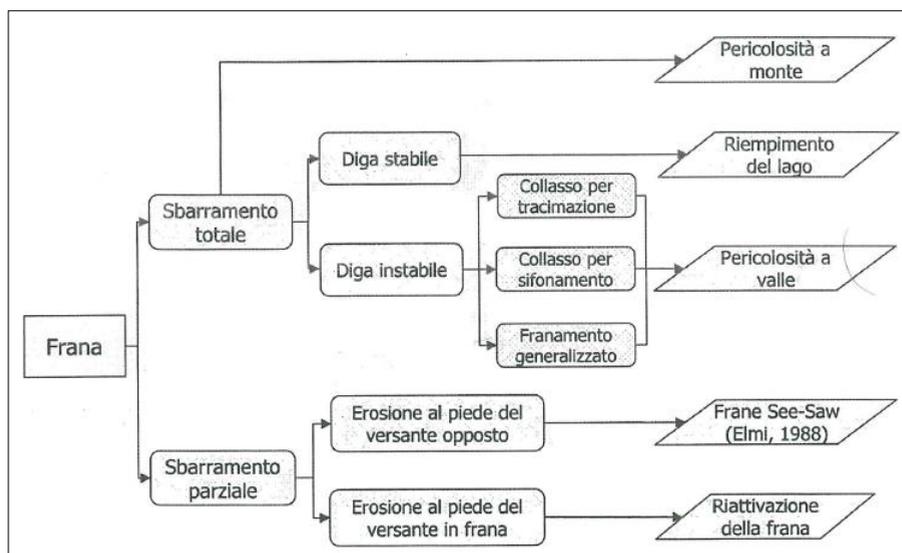


Fig. 4 - Diagramma illustrante i possibili scenari derivanti da una situazione di sbarramento da frana (da Ermini, 2000).

Relativamente alle tipologie di frana responsabili di sbarramenti fluviali, uno studio condotto da Costa e Schuster (1991) su 184 sbarramenti da frana ha mostrato che le occlusioni d'alveo ricoprono l'intera casistica delle diverse tipologie di frana, come riportato in Figura 5, anche se la maggior parte degli sbarramenti si formano in valli strette ed acclivi, in quanto la massa in frana riesce ad acquisire velocità tali da ostruire immediatamente e completamente il corso d'acqua prima che quest'ultimo eroda la zona di accumulo (Costa e Schuster, 1988). Nella maggioranza dei casi censiti il fenomeno franoso inizia come uno scorrimento, una valanga oppure un colamento.

Le cause che portano all'innesco o alla riattivazione di movimenti franosi possono essere definite, in senso lato, come le stesse cause che provocano la formazione di uno sbarramento da frana. Costa & Schuster (1988; 1991) hanno osservato che le principali cause determinanti l'innesco e la mobilitazione di frane che creano sbarramenti possono ricondursi, per il 90%, a precipitazioni molto intense e a terremoti (Fig. 6).

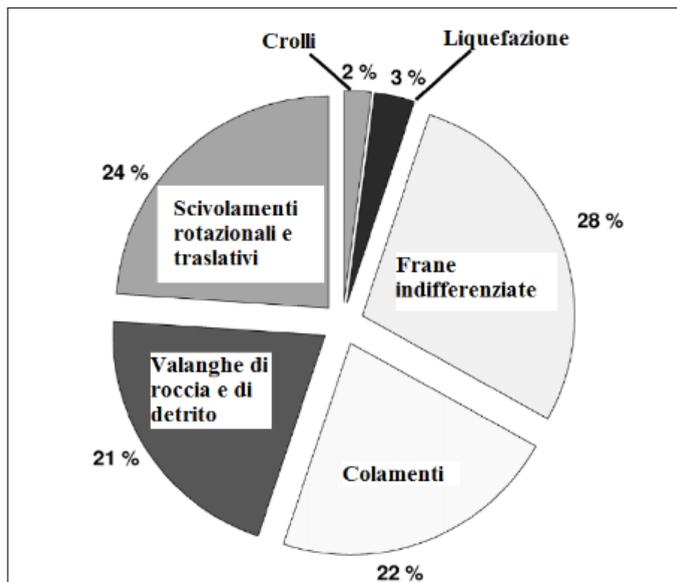


Fig. 5 - Distribuzione percentuale delle tipologie di frana che hanno generato uno sbarramento fluviale (da Costa e Schuster, 1991, modificato da De Rosa, 2008).

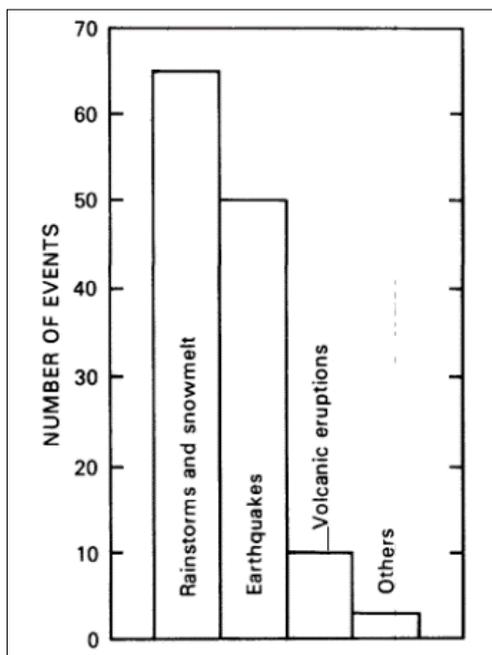


Fig. 6 - Cause degli sbarramenti di frana (da Costa e Schuster, 1988).

Studiare i fenomeni franosi vuol dire comprendere e prevedere il loro comportamento anche in relazione alla dinamica fluviale. Da un punto di vista temporale, le problematiche create dagli sbarramenti da frana sono da distinguere in due diversi casi, l'uno precedente e l'altro successivo alla formazione dello sbarramento. Essi sono:

1. la possibilità che una frana raggiunga un corso d'acqua;
2. la definizione del grado di stabilità dello sbarramento.

L'approccio proposto in letteratura per la risoluzione dei due tipi di problemi è molto speditivo, in quanto si propone di individuare ed elaborare quelle variabili che descrivono dal punto di vista morfometrico sia il fenomeno franoso sia il corso d'acqua. Essendo un tipo di approccio semplice e veloce, è adatto soprattutto per valutazioni di carattere previsionale, da eseguire quando una frana è in condizioni di interagire con il corso d'acqua.

**Metodi.** – Sulla base delle conoscenze maturate dagli studi di letteratura, lo scopo del presente lavoro è quello di proporre un nuovo modello, utilizzabile a livello previsionale e basato su un approccio geomorfologico quantitativo, che permetta di identificare quelle frane suscettibili a sbarrare un corso d'acqua e, in aggiunta, riconoscere quei settori idrografici più propensi ad essere soggetti a sbarramenti fluviali.

I parametri morfometrici delle frane e dei sottobacini idrografici sono stati esaminati con il metodo statistico dell'Analisi delle Componenti Principali (PCA). In generale, un metodo statistico si propone di prevedere un dato fenomeno non propriamente dal punto di vista fisico, ma cercando di individuare le relazioni esistenti tra le caratteristiche del territorio e il fenomeno stesso (ad es. un fenomeno franoso). Per questo motivo, l'applicazione del metodo statistico su porzioni di territorio statisticamente rappresentative ha il vantaggio di poter estendere i risultati, in maniera predittiva, anche ad altri contesti simili.

La PCA è una tecnica utilizzata nell'ambito della statistica multivariata per la semplificazione dei dati d'origine (riduzione fattoriale).

Lo scopo primario di questa tecnica è la riduzione di un numero più o meno elevato di variabili (rappresentanti altrettante caratteristiche del fenomeno analizzato) in alcune variabili latenti. Ciò avviene tramite una trasformazione lineare delle variabili che proietta quelle originarie in un nuovo sistema cartesiano, nel quale le variabili sono riportate in ordine decrescente di varianza: pertanto, la variabile con maggiore varianza è proiettata sul primo asse, la seconda sul secondo asse e così via. La riduzione della complessità avviene limitandosi ad analizzare le principali (per varianza) tra le nuove variabili.

Diversamente da altre trasformazioni lineari di variabili praticate nell'ambito della statistica, in questa tecnica sono gli stessi dati che determinano i vettori di trasformazione.

I dati di partenza sono organizzati in una matrice, indicata con:

$$\vec{X} = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1p} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{p1} & X_{p2} & \cdots & X_{pp} \end{pmatrix}$$

dove:

- le colonne rappresentano le  $p$  osservazioni effettuate;
- le righe sono le  $p$  variabili considerate per il fenomeno di analisi.

L'analisi delle componenti principali è stata una delle prime tecniche statistiche proposte per ridurre la dimensionalità dei dati. Le idee basilari che la caratterizzano sono state proposte da Pearson (1901) e riproposte indipendentemente da Hotelling (1933). Se sono disponibili diverse variabili che si riferiscono a un'area comune, è possibile ricercare una sintesi dell'informazione analizzando la matrice delle correlazioni fra le variabili stesse. Questo procedimento può essere utilizzato in molteplici situazioni di ricerca. Se esiste un gruppo di variabili più strettamente correlate tra loro e se tra le stesse non è ipotizzabile una relazione di tipo causale, si può pensare che esse rivelino la presenza di una proprietà di tipo più generale (Tullio-Altan e Marradi, 1976).

Questo tipo di operazione può essere realizzato ricorrendo alla PCA. Le variabili su cui si effettua l'analisi sono trasformate in nuove variabili (le componenti principali), risultanti dalla combinazione lineare delle variabili originarie, e costruite in modo da non essere tra loro correlate. La tecnica permette una condensazione della maggior parte possibile dell'informazione originaria nelle prime componenti principali costruite. Per identificare la prima componente principale, si determinano i pesi della combinazione lineare, in modo da rendere massima la varianza della componente stessa, sotto la condizione che la somma dei prodotti dei quadrati dei coefficienti della combinazione sia uguale a 1 (Sadocchi, 1981). La seconda componente principale si determina con gli stessi obiettivi e condizioni, con la condizione aggiuntiva che la componente principale risultante sia non-correlata con la prima. Si determinano poi, in modo analogo, le successive componenti principali. I pesi che identificano le componenti principali corrispondono agli autovettori associati alle radici di specifiche equazioni, che prendono il nome di *radici caratteristiche* o *autovalori* (Morrison, 1967). Per valutare la riuscita e l'affidabilità dell'operazione di riduzione delle complessità dell'informazione realizzata con l'estrazione delle componenti principali, si può fare riferimento sia alla comunalità sia alla matrice di correlazione. La matrice di correlazione serve a valutare quantitativamente la forza dell'associazione tra due variabili quantitative continue, mediante il coefficiente di correlazio-

ne  $r$  di Pearson (Pearson, 1895). Le proprietà fondamentali di questo coefficiente sono:

- valore non dimensionale compreso fra  $-1$  e  $1$ ;
- simmetria (il legame che collega  $x$  e  $y$  è lo stesso che collega  $y$  e  $x$ );
- più i punti sono dispersi (più alto è il valore dello scostamento quadratico medio dei residui), più  $r$  è prossimo a  $0$  e più le due variabili sono non-correlate tra loro (variabili indipendenti);
- se  $r > 0$  la correlazione è positiva (o diretta) e le due variabili variano in modo concorde, mentre se  $r < 0$  la correlazione è negativa e le due variabili variano in modo discorde (correlazione inversa);
- quando  $r = 1$  oppure  $r = -1$  abbiamo correlazioni perfette (dette rispettivamente *correlazione perfetta diretta* e *correlazione perfetta inversa*) e i punti giacciono tutti sulla retta di regressione.

La comunalità di una variabile rappresenta la quota di varianza di ciascuna variabile originaria riprodotta dalle componenti principali estratte. La comunalità si può calcolare dai coefficienti impiegati per determinare le componenti.

La PCA è una tecnica statistica adoperata in molti ambiti; questo perché, quando ci si trova a semplificare un problema, riducendo la dimensione dello spazio di rappresentazione, si ha allo stesso tempo una perdita dell'informazione contenuta nei dati originali. La PCA consente di controllare egregiamente il *trade-off* tra la perdita di informazioni e la semplificazione del problema scegliendo il numero appropriato di autovettori.

A fronte dell'iniziale *dataset* di 4.439 fenomeni franosi, sono stati presi in considerazione 2.763 fenomeni, ovvero quelli la cui distanza massima dai corsi d'acqua risultava  $\leq 150$  m, quindi con maggior predisposizione a interagire con la dinamica fluviale.

Seguendo le Linee-guida al censimento dei fenomeni franosi (Amanti et al., 1996), in accordo con precedenti studi (Coico, 2010), le caratteristiche considerate nell'analisi multivariata delle 2.763 frane censite sono:

1. Area della frana ( $m^2$ );
2. Perimetro della frana (m);
3. Quota media della frana (m s.l.m.);
4. Quota minima della frana (m s.l.m.);
5. Quota massima della frana (m s.l.m.);
6. Acclività media della frana ( $^\circ$ );
7. Acclività minima della frana ( $^\circ$ );
8. Acclività massima della frana ( $^\circ$ );
9. Dislivello (m);
10. Esposizione ( $^\circ$ ).

Il metodo dell'estrazione delle componenti principali sulle suddette variabili standardizzate, effettuato tramite il software *RStudio*, ha fornito i seguenti risultati (Figg. 7 e 8):

	Area	Perimetro	Altezza Media	Altezza Minima	Altezza Massima	Acclività Media	Acclività Minima	Acclività Massima	Esposizione	Dislivello
Area	<b>1,000</b>	0,801	0,134	0,040	0,218	0,081	-0,146	0,241	0,028	0,691
Perimetro	0,801	<b>1,000</b>	0,168	0,061	0,264	0,040	-0,266	0,302	0,031	0,793
Altezza Media	0,134	0,168	<b>1,000</b>	0,991	0,992	0,269	0,176	0,300	0,098	0,301
Altezza Minima	0,040	0,061	0,991	<b>1,000</b>	0,966	0,229	0,195	0,230	0,094	0,169
Altezza Massima	0,218	0,264	0,992	0,966	<b>1,000</b>	0,302	0,155	0,360	0,100	0,417
Acclività Media	0,081	0,040	0,269	0,229	0,302	<b>1,000</b>	0,613	0,818	0,029	0,344
Acclività Minima	-0,146	-0,266	0,176	0,195	0,155	0,613	<b>1,000</b>	0,257	0,030	-0,098
Acclività Massima	0,241	0,302	0,300	0,230	0,360	0,818	0,257	<b>1,000</b>	0,038	0,563
Esposizione	0,028	0,031	0,098	0,094	0,100	0,029	0,030	0,038	<b>1,000</b>	0,049
Dislivello	0,691	0,793	0,301	0,169	0,417	0,344	-0,098	0,563	0,049	<b>1,000</b>

Fig. 7 - Matrice di correlazione tra le variabili.

La scelta delle componenti principali può essere eseguita mediante tre criteri:

- Criterio 1: si considerano tutti gli autovalori maggiori di 1 (regola di Guttman, 1954);
- Criterio 2: si considerano le componenti che spiegano il 70-80% della variabilità;
- Criterio 3: si individua, sul grafico decrescente degli autovalori, il punto di variazione della curva.

Applicando i tre criteri alla tabella di varianza totale e al grafico decrescente degli autovalori, si evince che il numero delle componenti principali significative che spiegano circa l'80% della varianza totale sono le prime tre (Fig. 9).

Una volta scelte, le tre componenti principali relative ai sistemi franosi sono proiettate sugli assi fattoriali al fine di analizzarne la distribuzione.

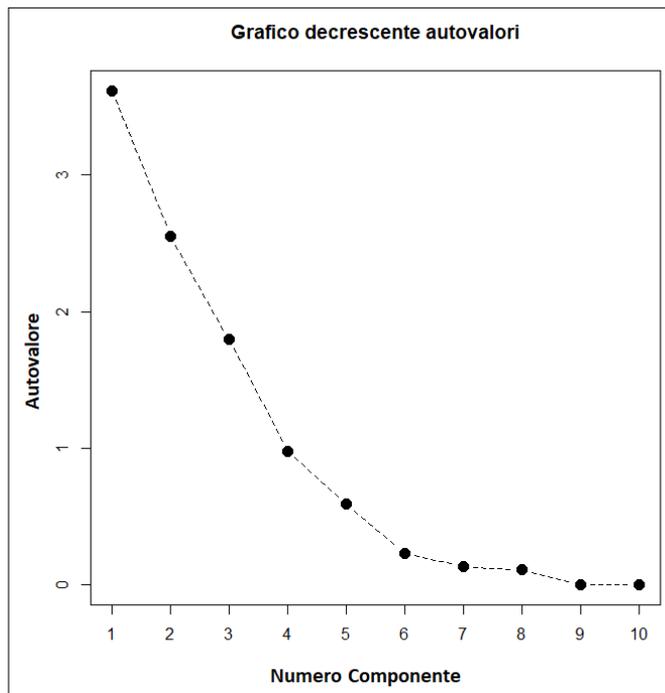


Fig. 8 - Grafico degli autovalori.

Variabile	Componente		
	1	2	3
Area (m <sup>2</sup> )	<b>-0.24532533</b>	-0.50152858	0.01724596
Perimetro (m)	-0.25181333	-0.50303678	0.03400250
Quota Media (m s.l.m.)	-0.45079931	<b>0.21230753</b>	-0.28404075
Quota Minima (m s.l.m.)	-0.42307859	<b>0.25777196</b>	-0.31148269
Quota Massima (m s.l.m.)	-0.47213796	0.16864638	-0.25414738
Acclività Media (°)	<b>-0.21174315</b>	<b>0.25828980</b>	<b>0.57966593</b>
Acclività Minima (°)	<b>-0.09036498</b>	<b>0.40205940</b>	<b>0.32275536</b>
Acclività Massima (°)	-0.28995334	-0.00441526	<b>0.52745560</b>
Esposizione (°)	<b>-0.08804391</b>	0.02344246	-0.05154354
Dislivello (m)	-0.35559825	-0.35570520	<b>0.18763032</b>

Fig. 9 - Matrice di componenti-sistemi franosi. In grassetto i valori maggiori per ogni variabile.

**Risultati.** – Il bacino del F. Calore Lucano è caratterizzato dalla presenza di un elevato numero di frane, più di 4.000: 8 di queste, interagenti con il fondovalle, hanno causato sbarramenti da frana e sono state, pertanto, utilizzate come campione. In accordo con le Linee guida per l'individuazione dei fenomeni franosi (Amanti et al., 1996) le caratteristiche morfometriche degli sbarramenti da frana, identificati dall'analisi aerofotogrammetrica storica, e dei sottobacini ad essi sottesi, sono state utilizzate come variabili nell'analisi multivariata PCA, al fine di individuare scenari di rischio simili che potrebbero modificare notevolmente la morfologia del F. Calore e del suo reticolo idrografico. Tra le 4.435 frane censite, la PCA ha selezionato, tramite il software R, 554 casi di "sbarramenti potenziali", che rappresentano sistemi franosi con caratteristiche morfometriche simili agli sbarramenti da frana-campione. Essi indicano quei sistemi franosi maggiormente suscettibili a indurre sbarramenti e, per questo motivo, alcuni di essi sono stati oggetto di analisi successive a scala di dettaglio, mediante rilevamento sul terreno. Contestualmente, tra i 715 sottobacini idrografici, sono stati selezionati 58 casi di "sottobacini idrografici caratteristici", ossia porzioni di versante con proprietà morfometriche simili a quelle contenenti sbarramenti da frana (Fig. 10).

Sia gli "sbarramenti potenziali" che i "sottobacini idrografici caratteristici" sono stati individuati su carta (Fig. 11) e sovrapposti alla Carta geolitologica con l'intento di stimare i litotipi più idonei al verificarsi di tali eventi (Fig. 12).

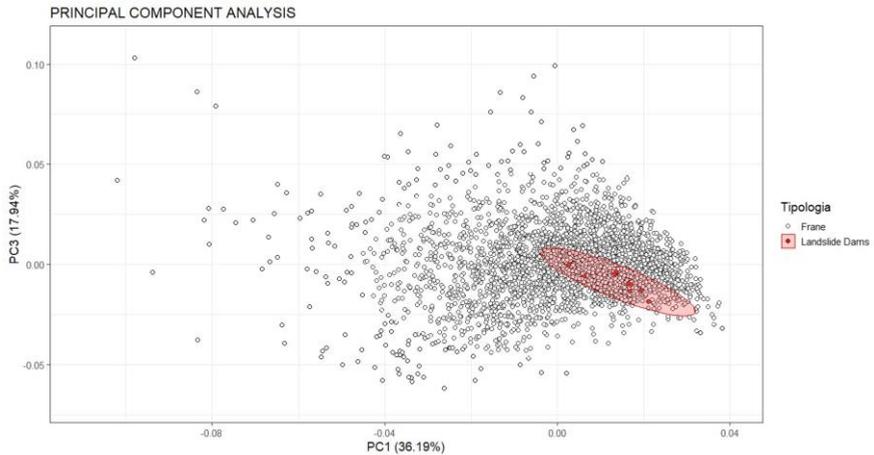
La comparazione, tra gli sbarramenti da frana già riconosciuti (8) e quelli potenziali ottenuti tramite la PCA, ha permesso di individuare un intervallo di confidenza in cui sono state incluse 554 frane in grado di interagire con il reticolo idrografico. Il 66% di queste frane sono state classificate come "frane complesse" (caratterizzate da un movimento combinato di tipo rotazionale e da flusso). I risultati mostrano la tendenza peculiare dei versanti caratterizzati da formazioni strutturalmente complesse a evolvere in eventi gravitativi e a creare, in caso di vicinanza al reticolo idrografico, uno sbarramento da frana (Fig. 13).

Incrociando le frane ottenute con i sottobacini idrografici caratteristici, si ottiene una corrispondenza di 311 frane in 39 sottobacini.

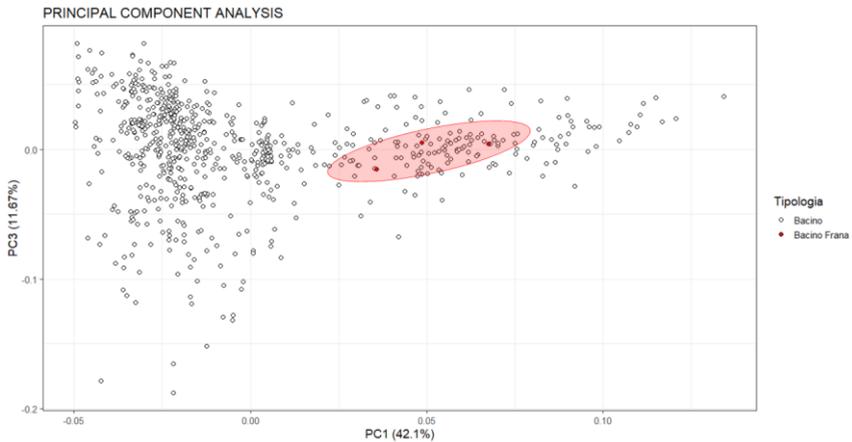
Grazie alla campagna di rilevamento sul campo (Fig. 14), è stato possibile ottenere informazioni più dettagliate circa le caratteristiche di questi potenziali sbarramenti da frana, in termini di attività ed evoluzione, e confermare che alcuni di questi casi presentavano già un'interazione tra l'area di accumulo e il corso d'acqua adiacente.

**Conclusioni.** – I risultati ottenuti hanno consentito di stabilire un modello previsionale per l'identificazione dei "potenziali sbarramenti da frana". In questo caso, sono state rilevate 311 frane in grado di evolvere in sbarramenti, all'interno di 39 sottobacini idrografici caratteristici per l'intero bacino del F. Calore Lucano.

Pertanto, l'Analisi delle Componenti Principali (PCA) applicata alle frane, al fine di rilevare potenziali sbarramenti, dimostra la sua validità anche quando applicata a una scala di maggior dettaglio come quella di un singolo bacino idrografico. Infatti, in altri lavori scientifici, questa metodologia è già stata applicata, ma a una scala regionale (Coico et al., 2013). Inoltre, i risultati sono confrontabili con altri lavori che, su scala simile, hanno applicato un diverso metodo statistico multivariato, noto come Analisi Discriminante Lineare (LDA).



(A)



(B)

Fig. 10 - Dataset delle frane ottenuto dai dati aerofotogrammetrici e dall'analisi statistica multivariata (A) e relativi plots delle frane da sbarramento e dei sottobacini ottenuti (B).

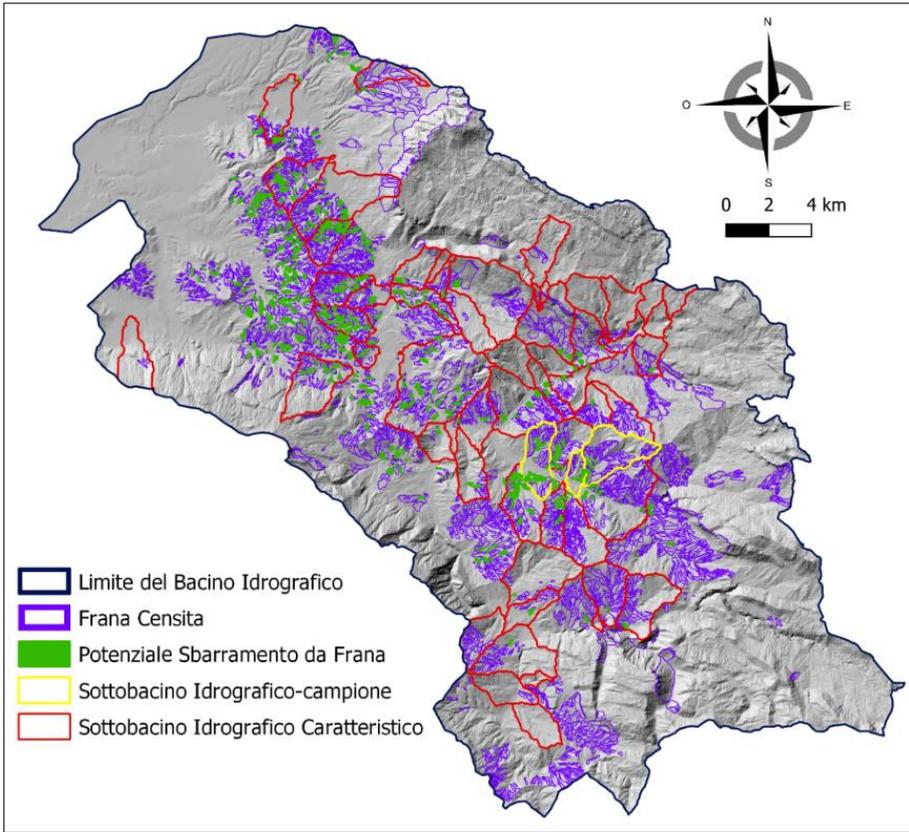


Fig. 11 - *Mappa dei potenziali sbarramenti da frana (554) e sottobacini caratteristici (58) ottenuti.*

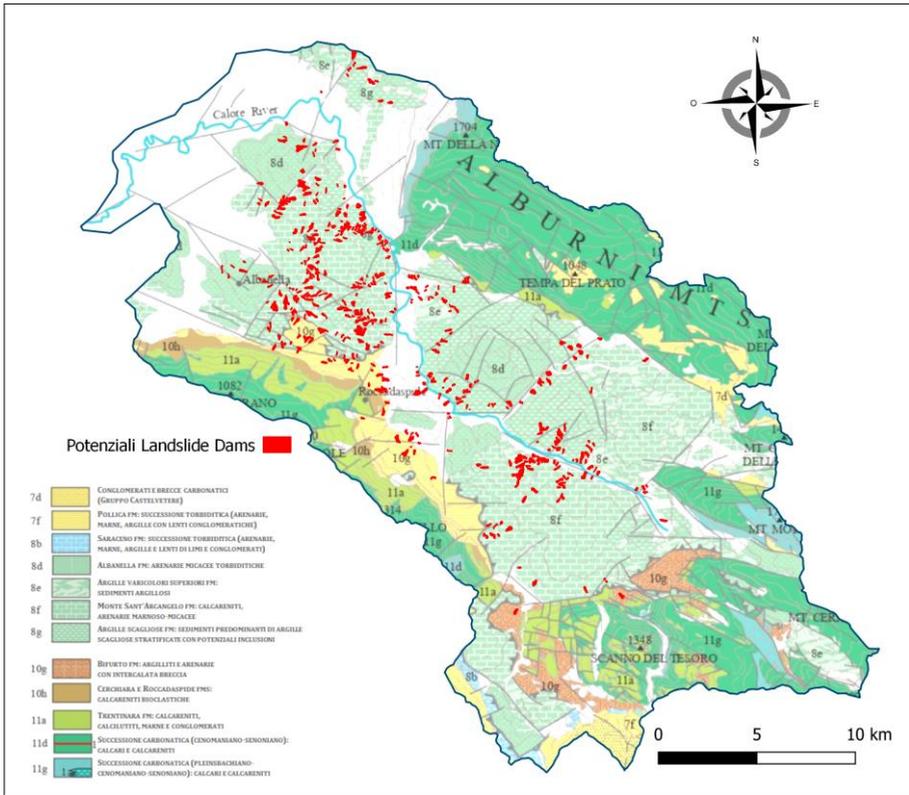


Fig. 12 - Distribuzione geolitologica dei potenziali sbarramenti da frana.

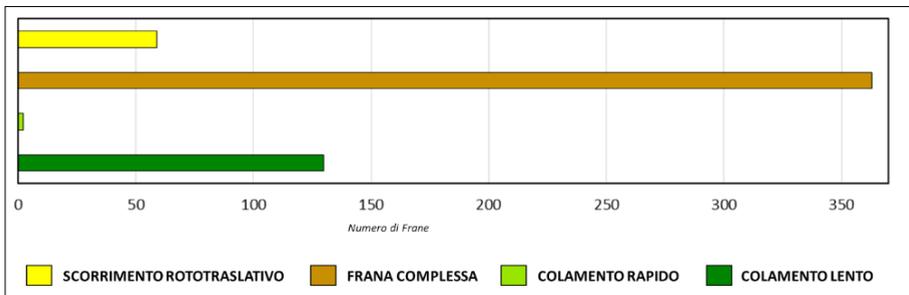


Fig. 13 - Istogramma di distribuzione dei "Potenziali Sbarramenti da Frana".

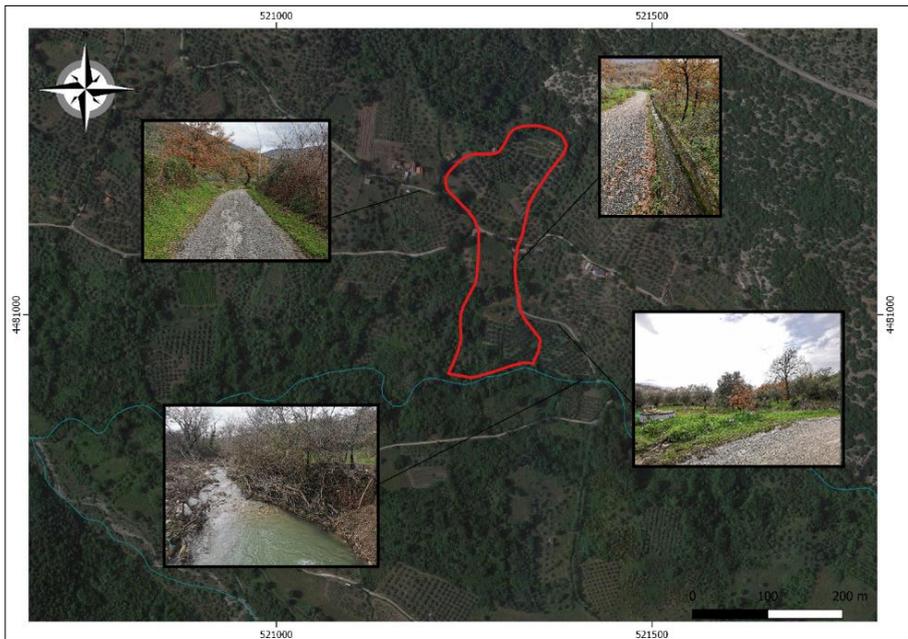


Fig. 14 - Evidenze dal rilevamento sul terreno (es.: strade dissestate, uncinatura degli alberi, inclinazione dei pali elettrici, deflusso idrico diffuso, erosione al piede, ecc.) che hanno confermato lo stato di attività di alcuni sbarramenti da frana identificati.

Il rilevamento sul campo ha permesso di confermare l'analisi predittiva per il bacino del F. Calore Lucano, mostrando un'ottima risposta alla realtà del modello previsionale basato su PCA.

Un possibile sviluppo futuro, con l'intento di migliorare il modello, potrebbe riguardare l'arricchimento del *dataset* di frane con ulteriori informazioni riguardanti, ad esempio, i dati sulle precipitazioni. Tecniche di telerilevamento, come l'interferometria SAR, potrebbero anche essere utilizzate al fine di creare una rete innovativa di monitoraggio da remoto.

#### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- ALVIOLI M., SANTANGELO M., FIORUCCI F., CARDINALI M., MARCHESINI I., REICHENBACH P., ROSSI M., GUZZETTI F., PERUCCACCI S., "Rockfall susceptibility and network-ranked susceptibility along the Italian railway", *Eng. Geol.*, 2021, 293, pp. 106-301.
- AMANTI M., CASAGLI N., CATANI F., D'OREFICE M., MOTTERAN G., "Guida al censimento dei fenomeni franosi ed alla loro archiviazione.", *Miscell. Serv. Geol. d'It.*, 1996, 7, 109 pp., Roma.
- CASAGLI N., ERMINI L., "Geomorphic analysis of landslide dam of Northern Apennine", *Transaction of the Japanese Geomorphological Union*, 1999, 20, 3, pp. 219-249.
- CENCETTI C., DE ROSA P., MINELLI A., "A sensitivity analysis on main factors involved in the landslide dam phenomena", *It. Journ. Eng. Geol. Environ.*, 2011, pp. 61-71.
- CHEN Y.C., CHANG K.T., LEE H.Y., CHIANG S.H., "Average landslide erosion rate at the watershed scale in southern Taiwan estimated from magnitude and frequency of rainfall", *Geomorphology*, 2015, 228, pp. 756-764.
- COICO P., "Analisi a scala regionale dei sistemi ambientali interessati da scenari di multirischio idrogeologico", *Tesi di dottorato*, 2010, Università di Napoli Federico II, 210 pp.
- COICO P., CALCATERRA D., DE PIPPO T., GUIDA D., "A preliminary perspective on landslide dams of Campania Region, Italy", In: Margottini C., Canuti P., Sassa K. (Eds.), "Landslide Science and Practice", 2013, 6, pp. 83-90.
- COSTA J.E., SCHUSTER R.L., "The formation and failure of natural dams", *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1988, 100, 7, pp. 1054-1068.
- COSTA J.E., SCHUSTER R.L., "Documented historical landslide dams from around the world", *U.S. Geol. Surv. Open-File Report*, 1991, 91, pp. 239-486.
- DAL SASSO S.F., SOLE A., PASCALE S., SDAO F., BATEMAN PINZÒN A., MEDINA V., "Assessment methodology for the prediction of landslide dam hazard", *Nat. Haz. Earth Syst. Sc.*, 2014, 14, pp. 557-567.
- DE ROSA P., "Un approccio modellistico per il fenomeno delle occlusioni d'alveo per frane: una modifica al modello CAESAR", *Giorn. Geol. Appl.*, 2008, 8, 2, pp. 277-284.

- DE VITA P., ALLOCCA V., CELICO F., FABBROCINO S., MATTIA C., MONACELLI G., MUSILLI I., PISCOPO V., SCALISE A.R., SUMMA G., TRANFAGLIA G., CELICO P., "Hydrogeology of continental southern Italy", *Journ. of Maps*, 2018, 14, 2, pp. 230-241.
- DONG W., LEE R.H., XU H., YANG S., PRATT K.G., CAO V., SONG Y.K., NURMIKKO A., AIZENMAN C.D., "Visual avoidance in xenopus tadpoles is correlated with the maturation of visual responses in the optic tectum", *Journ. of Neurophysiology*, 2009, 101, 2, pp. 803-15.
- ERMINI L., "Elaborazione di un modello per la precisione dell'evoluzione di sbarramenti fluviali causati da frane", Unpublished PhD thesis, University of Florence, 2000, 159 pp.
- ERMINI L., CASAGLI N., "Prediction of the behaviour of landslide dams using a geomorphological dimensionless index", *Earth Surf. Proc. Landf.*, 2003, 28, 1, pp. 31-47.
- FAN X., DUFRESNE A., SUBRAMANIAN S. S., STROM A., HERMANN S., TACCONI STEFANELLI C., HEWITT K., YUNUS A.P., DUNNING S., CAPRA L., GEERTSEMA M., MILLER B., CASAGLI N., JANSEN J.D., XU Q., "The formation and impact of landslide dams - State of the art", *Earth-Sc. Rev.*, 2020, 203, pp. 103-116.
- FAN X., DUFRESNE A., WHITELEY J., YUNUS A.P., SUBRAMANIAN S.S., OKEKE C.A., PANEK T., HERMANN S., MING P., STROM A., HAVENITH H-B., DUNNING S., WANG G., TACCONI STEFANELLI C., "Recent technological and methodological advances for the investigation of landslide dams", *Earth-Sc. Rev.*, 2021, 218, pp. 103-646.
- GUERRIERO L., CONFUORTO P., CALCATERRA D., GUADAGNO F.M., REVELLINO P., DI MARTIRE D., "PS-driven inventory of town-damaging landslides in the Benevento, Avellino and Salerno Provinces, southern Italy", *Journ. of Maps*, 2019, 15, 2, pp. 619-625.
- GUTTMAN L., "Some necessary conditions for common factor analysis", *Psychometrika*, 1954, 19, pp. 149-162.
- HOTELLING, H., "Analysis of a complex of statistical variables into principal components", *Journ. Ed. Psych.*, 1933, 24, pp. 417-441.
- KHALILI M.A., BAUSILIO G., DI MURO C., PERRIELLO ZAMPELLI S., DI MARTIRE D., "Investigating Gravitational Slope Deformations with COSMO-SkyMed-Based Differential Interferometry: A Case Study of San Marco dei Cavoti", *Appl. Sc.*, 2023, 13, 10, pp. 62-91.
- KORUP O., "Recent research on landslide dams - a literature review with special attention to New Zealand", *Progr. Phys. Geogr.*, 2002, 26, 2, pp. 206-235.
- KORUP, O., "Geomorphometric characteristics of New Zealand landslide dams", *Eng. Geol.*, 2004, 73, pp. 13-35.
- LOCHE M., ALVIOLI M., MARCHESINI I., BAKKA H., LOMBARDO L., "Landslide susceptibility maps of Italy: Lesson learnt from dealing with multiple landslide types and the uneven spatial distribution of the national inventory", *Earth-Sc. Rev.*, 2022, pp. 104-125.
- MORRISON D.F., "Multivariate statistical methods", 1967, McGraw-Hill Book Company, New York, 495 pp.
- PEARSON K., "Notes on Regression and Inheritance in the Case of Two Parents", *Proc. of the Royal Society of London*, 1895, 58, pp. 240-242.
- PEARSON K., "On lines and planes of closest fit to systems of points in space", *Philos. Magaz.*, 1901, 2, 6, pp. 559-572.

- SADOCCHI S., "Manuale di analisi statistica multivariata per le scienze sociali", 1981, Franco Angeli Ed., Milano, 274 pp.
- TACCONI STEFANELLI C., SEGONI S., CASAGLI N., CATANI F., "Geomorphic indexing of landslide dams evolution", *Eng. Geol.*, 2016, 208, pp. 1-10.
- TULLIO-ALTAN C., MARRADI A., "Misurazione e scale: qualche riflessione e una proposta", *Quad. Sociol.*, 1976, 29, pp. 595-639.
- VITALE S., CIARCIA S., "Tectono-stratigraphic and kinematic evolution of the southern Apennines/Calabria–Peloritani Terrane system (Italy)", *Tectonophysics*, 2013, 583, pp. 164-182.

*Identification of potential landslide dams in the Calore Lucano River basin (Campania, Italy).*

Slope instabilities occur in many areas of the Apennine Mountains of Southern Italy, where they threaten infrastructures, the safety of human life and limiting the local economic development. To contribute to landslide risk mitigation, a number of studies have been completed to better understand type and distribution of mass movements. However, less attention has been posed to the identification and analysis of landslide dams. Indeed, the blocking of riverbeds by mass movements is very common in presence of deep and narrow valleys. Landslide dams may pose serious threats to people and their livelihoods downstream in the case of abrupt dam failure, so they would require a specific assessment oriented to the prediction of their potential to occlude the entire channel section and, in this case, to the estimation of their stability. In this work, the Calore Lucano River basin has been analyzed with the aim of identifying landslide dam and estimate potential stability to an integrated GIS-based mapping and statistical approach. Starting from the landslide inventory, morphometric features characterizing identified landslide dams were detected and used as a basis for a Principal Component Analysis-driven identification of landslide dams. As a result, 311 landslide able to evolve in landslide dams have been identified contributing to a better understanding of this potential landslide cascading process in the Calore Lucano River basin.

*Keywords* - landslide dams, Principal Component Analysis, risk mitigation, Calore Lucano River (southern Italy).

*“La Dinamica fluviale. La conoscenza del Fiume per la pianificazione e la salvaguardia del territorio”*

a cura di C. Cencetti, L. Di Matteo

*Culture Territori Linguaggi*, 24, 2023, pp. 192-205

ISBN 9788894469783

Massimo RINALDI<sup>1</sup>

## LE APPLICAZIONI DELLA DINAMICA FLUVIALE ALLA GESTIONE DEI CORSI D'ACQUA

**Introduzione.** – La dinamica fluviale è un settore di comune interesse per diverse discipline scientifiche, sia nel campo delle Scienze della Terra che di altri settori ingegneristici (Idrologia e Idraulica Fluviale) e naturalistici (Scienze Biologiche, Naturali e Forestali). Ciò spiega la molteplicità di aspetti di interesse, approcci e metodologie e la varietà di applicazioni nel campo della gestione dei corsi d'acqua. Di conseguenza, anche gli obiettivi nel campo della gestione sono molteplici, con l'obiettivo della sicurezza idraulica che occupa un posto preponderante, seguito da altri obiettivi di carattere più naturalistico-ambientale o di fruizione degli spazi fluviali.

Sulla base delle esperienze di ricerca dello scrivente, la presente nota ha come obiettivo quello di ripercorrere alcuni sviluppi nel campo della dinamica fluviale avvenuti negli ultimi decenni, con riferimento alle discipline delle Scienze della Terra, e metterne in evidenza alcune delle principali applicazioni alla gestione dei corsi d'acqua.

**Studio dei caratteri morfologico-sedimentari e antropici di un alveo fluviale.** – Agli inizi degli anni '90, lo sviluppo di una metodologia complessiva di studio dei caratteri morfologico-sedimentari e antropici di un alveo ha rappresentato un argomento di notevole originalità e interesse nel campo della dinamica fluviale. L'applicazione principale di tale metodologia è stata quella che ha interessato il F. Arno. La metodologia complessiva comprende vari aspetti: 1) studio dell'evoluzione attraverso mappe storiche; 2) campionamento e analisi dei sedimenti d'alveo; 3) sviluppo di una cartografia tematica specifica dei caratteri morfologici dell'alveo e

---

<sup>1</sup> Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze, Firenze, massimo.rinaldi@unifi.it

della sua pianura.

L'analisi dell'evoluzione passata del F. Arno è stata realizzata attraverso l'archiviazione sistematica e l'osservazione di 320 mappe storiche reperite presso Archivi di Stato e biblioteche (Canuti et al., 1994). Lo studio dei caratteri sedimentari condotto lungo il F. Arno, comprendente 75 punti di misura, rimane ad oggi l'unico campionamento sistematico che riguarda tale fiume (Tacconi et al., 1994). Infine, la cartografia tematica - in scala 1: 10.000 - è stata sviluppata e testata lungo un tratto di fiume nel Valdarno Superiore (Cencetti et al., 1994), attraverso la messa a punto di una specifica legenda comprendente vari aspetti morfologici, idrogeologici e antropici (Canuti e Tacconi, 1992).

***Processi di erosione di sponde fluviali.*** – Dalla fine degli anni '90, numerose ricerche hanno fornito importanti e accurate conoscenze dei processi di arretramento di sponde fluviali attraverso una combinazione di attività di monitoraggio, modellazione numerica e sperimentazione fisica. Una delle principali novità di tali studi è stata quella di applicare concetti e metodologie della geotecnica, con particolare riferimento alle analisi di stabilità di pendii, nel campo della dinamica fluviale, essendo le sponde fluviali trattabili a tutti gli effetti come pendii, soprattutto nel caso di alvei incisi dove si creano scarpate anche di alcuni metri formate da sedimenti alluvionali relativamente fini (prevalentemente sabbie limose) che separano l'alveo da superfici terrazzate recenti. Il primo lavoro che ha integrato un approccio geomorfologico e geotecnico è quello di Rinaldi e Casagli (1999), dove si ricostruisce un diagramma altezza - pendenza delle sponde, con curve all'equilibrio limite per diversi valori dei parametri di resistenza al taglio che separano sponde classificate come stabili o instabili in base ad evidenze di campo. La novità assoluta è quella di mettere in evidenza e quantificare il ruolo rilevante, e in genere determinante nell'innescare di movimenti di massa durante le piene, della coesione apparente. Tale aspetto è stato dimostrato e quantificato attraverso un monitoraggio sistematico delle pressioni interstiziali all'interno di una sponda fluviale (Casagli et al., 1999), a cui è successivamente seguita una modellazione dei flussi saturi e insaturi e dei meccanismi di instabilità alla scala dei singoli eventi di piena e del profilo di sponda (Rinaldi et al., 2004).

Lo sviluppo di tali ricerche è consistito nell'accoppiare un modello idrodinamico e di erosione di sponda alla modellazione del flusso sotterraneo e dei movimenti di massa, in modo tale che tutti i principali processi coinvolti fossero quantificati (Rinaldi et al., 2008a; Luppi et al., 2009). In Figura 1 è rappresentato schematicamente il diagramma di flusso della modellazione dei vari processi responsabili dell'arretramento di una sponda fluviale.

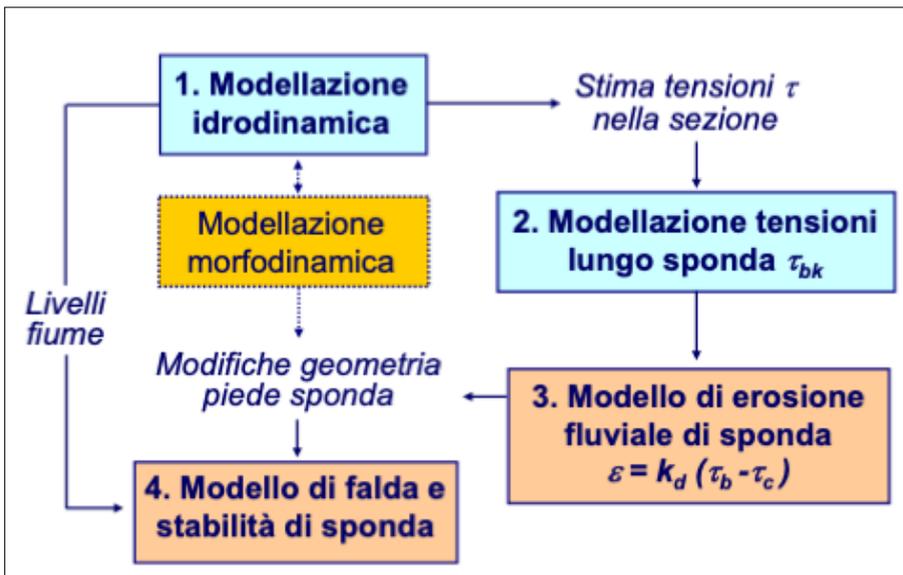


Fig. 1 - Diagramma di flusso della modellazione dei vari processi responsabili dell'arretramento di una sponda fluviale.

Negli anni successivi, l'attenzione è stata rivolta anche alla sperimentazione fisica, ossia alla riproduzione in laboratorio di una sponda in scala e al monitoraggio e quantificazione dei processi di instabilità sotto determinate condizioni fisiche controllate (proprietà del materiale, livelli del fiume e pressioni interstiziali). Tra gli studi che hanno utilizzato l'approccio della sperimentazione fisica, si segnalano quello di Nardi et al. (2012), avente come obiettivo l'analisi dei processi che avvengono in sponde costituite da sedimenti prevalentemente ghiaiosi, e quello di Francalanci et al. (2013), finalizzato allo studio del ruolo della vegetazione su sponde lagunari coesive.

**Fasce di mobilità fluviale.** – Un aspetto di forte interesse per la gestione dei corsi d'acqua è quello di delimitare le aree adiacenti a un fiume che potrebbero essere soggette a erosione laterale. Gli approcci modellistici descritti nel precedente paragrafo trovano, tuttavia, una scarsa applicazione pratica per tale finalità, in quanto si tratta di modelli generalmente utilizzabili per quantificare i processi che avvengono alla scala spaziale del singolo profilo di sponda e alla scala temporale del singolo evento di piena. Ai fini gestionali, invece, cambiano notevolmente le scale spazio-temporali di analisi. Proprio agli inizi degli anni '90 si va affermando il concetto di *fascia di pertinenza fluviale*, indicato successivamente da altri termini e approcci (Tab. 1) utilizzati, in alcuni casi, con una finalità prevalente di prevenzione del rischio da erosione, in altri

casi aventi un significato più generale e implicazioni anche dal punto di vista della salvaguardia ambientale. Tra questi si segnala il concetto di *fascia di mobilità funzionale* (Rinaldi e Simoncini, 2006) o *functional mobility corridor* (Rinaldi et al., 2009), intesa come quello spazio minimo che dovrebbe essere garantito al corso d'acqua affinché espliciti correttamente la sua funzionalità morfologica e ricostruita sulla base di analisi multi-temporale di foto aeree riguardante gli ultimi 50-100 anni circa.

Nome	Finalità	Riferimenti
Fascia di pertinenza fluviale	Pianificazione: pericolosità e tutela ambientale	Govi & Turitto (1994), Dutto (1994), Surian (1998), Baruffi et al. (2004)
<i>Espace de liberté</i>	Favorire dinamica morfologica naturale	Malavoi et al. (1998)
<i>Channel migration zone</i>	Pericolosità geomorfologica	Rapp & Abbe (2003), Lagasse et al. (2004)
<i>Erodible corridor</i>	Gestione erosioni di sponda	Piégay et al. (2005)
Fascia di mobilità funzionale o <i>Functional mobility corridor</i>	Gestione sedimenti a scala di bacino	Rinaldi & Simoncini (2006), Rinaldi et al. (2009)
Fasce fluviali di dinamica morfologica	Pericolosità da dinamica morfologica	ISPRA (2016)

Tab. 1 - Concetto di fasce fluviali utilizzato con termini differenti in Italia e in altri paesi.

**Le variazioni morfologiche degli alvei fluviali.** – Dalla fine degli anni '90, un argomento che si è andato progressivamente affermando come quello di maggiore attenzione nel campo della dinamica fluviale è stato senza dubbio rappresentato dalle variazioni morfologiche dei corsi d'acqua nell'arco degli ultimi 100-200 anni. Le implicazioni nel campo della gestione dei corsi d'acqua sono molteplici, riguardando non solo gli aspetti legati ai rischi da dinamica fluviale (danni prodotti da incisione, alluvionamento, erosione laterale, nonché rischi di esondazione indotti dalle modifiche della geometria dell'alveo), ma anche quelli legati alla qualità morfologico-ambientale (si pensi ad esempio alla degradazione fisica di fiumi incisi con la perdita di continuità laterale, oppure alle drastiche variazioni di habitat indotte da fenomeni di restringimento o di variazione della morfologia del fondo).

Rinaldi (2003) e Surian e Rinaldi (2003) hanno delineato le principali variazioni morfologiche che hanno caratterizzato gran parte dei fiumi di pianura a scala regionale e nazionale

rispettivamente. Tali studi hanno senza dubbio stimolato nuove ricerche che hanno permesso di incrementare il numero di casi di studio e dettagliare le variazioni morfologiche avvenute nel recente passato, soprattutto in risposta a disturbi di tipo antropico. A tale rapido progresso hanno fortemente contribuito anche due progetti PRIN (PRIN 2005 *“Dinamica recente ed attuale di alvei fluviali in Italia centro-settentrionale: tendenze evolutive, cause ed implicazioni applicative”* e PRIN 2007 *“Tendenza evolutiva attuale e possibile dinamica futura degli alvei fluviali in Italia centro-settentrionale”*). Sulla base di numerosi studi (si veda ad es. Rinaldi et al., 2008b; Pellegrini et al., 2008; Surian et al., 2009a), è stato possibile delineare le principali fasi di evoluzione plano-altimetrica di corsi d’acqua dell’Italia centro-settentrionale, sviluppare modelli geomorfologici evolutivi concettuali (si veda ad es. Ziliani e Surian, 2012; Bollati et al., 2014) e definire linee guida per l’analisi geomorfologica dei corsi d’acqua e delle loro tendenze evolutive (Surian et al., 2009b).

Le analisi delle variazioni di larghezza dell’alveo condotte attraverso serie multi-temporali di foto aeree su numerosi casi di studio hanno ad esempio evidenziato l’esistenza di due fasi di restringimento (analogamente alle due fasi di abbassamento del fondo già precedentemente individuate da Surian e Rinaldi, 2003), seguite in alcuni casi da una fase di parziale allargamento, manifestatasi a partire tra fine anni ‘90 e inizi anni 2000 (Fig. 2).

Successivamente ai prima citati progetti PRIN, gli studi delle variazioni morfologiche sono stati estesi a numerosi altri fiumi dell’Italia centro-meridionale, dettagliando con ulteriori casi di studio ed estendendo i risultati precedentemente raggiunti (si veda ad es. Cencetti e Fredduzzi, 2008; Scorpio et al., 2015; Scorpio e Roskopf, 2016; Cencetti et al., 2017).

Uno studio recente (Rinaldi, 2021) ha ricavato uno schema evolutivo riassuntivo che rappresenta un’applicazione del modello originario di Surian e Rinaldi (2003) ai corsi d’acqua alluvionali del bacino del F. Po (Fig. 3).

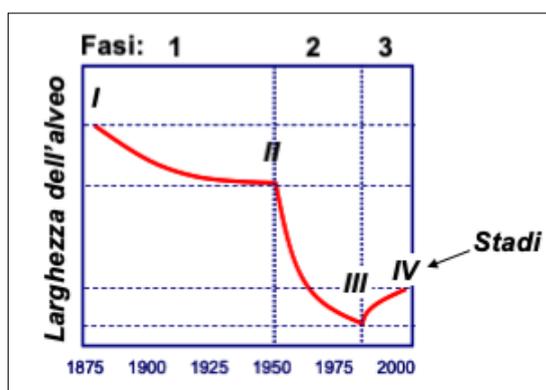


Fig. 2 - Schema delle fasi evolutive della larghezza dell'alveo così come risultante dai numerosi studi riguardanti fiumi dell'Italia centro-settentrionale.

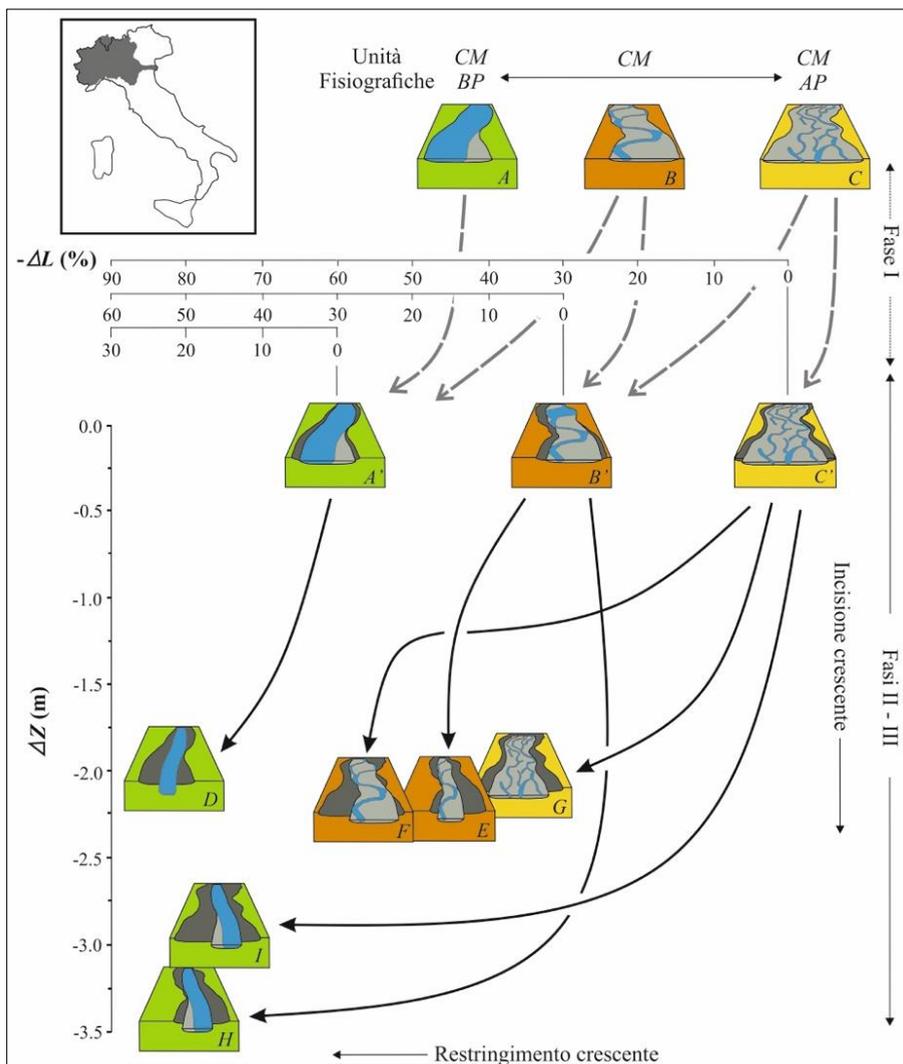


Fig. 3 - Modello evolutivo dei principali corsi d'acqua nel bacino del F. Po (modificato da Rinaldi, 2021). Unità Fisiografiche: CM = Collinare-Montuosa; BP = Bassa Pianura; AP = Alta Pianura. DL = Variazioni di larghezza dell'alveo; DZ = Variazioni di quota del fondo. A = Alvei inizialmente a canale singolo (sinuosi o meandriformi); B = Alvei inizialmente transizionali (wandering o sinuosi a barre alternate); C = alvei inizialmente a canali intrecciati.

**Impatti geomorfologici di eventi di piena di forte intensità.** – L'aumento progressivo di eventi idrologici localizzati denominati *flash floods*, di breve durata e forte intensità, ha portato all'attenzione di geomorfologi e geologi applicati lo studio degli effetti morfologici sui corsi d'acqua di tali eventi. L'argomento, ovviamente, ha forti implicazioni nel campo della preven-

zione e mitigazione del rischio, in quanto tali eventi, oltre a provocare esondazioni, comportano intensi fenomeni erosivi o di alluvionamento con conseguenti ingenti danni.

Il rilevamento degli aspetti idrologici relativi alle *flash floods* era già da tempo studiato con la messa a punto di specifiche metodologie (si veda ad es. Borgia et al., 2008; Gaume e Borgia, 2008), mentre l'integrazione di tali metodi con aspetti e approcci più prettamente geomorfologici e sedimentologici è stata per la prima volta implementata in occasione del post-evento del 2011 nel bacino del F. Magra (Rinaldi et al., 2016). Durante tali piene di forte intensità, si osservano variazioni della larghezza dell'alveo, alluvionamento, possibili avulsioni, trasporto e deposito di ingenti quantità di materiale legnoso, trasporto solido sotto forma di piene di detrito con messa in posto di depositi di sedimento grossolano (del tipo *boulder berms* o *boulder bars*). L'allargamento dell'alveo è particolarmente intenso lungo alvei di piccole dimensioni e pendenze relativamente elevate lungo i tratti torrentizi confinati o semi-confinati (Surian et al., 2016). Le variazioni morfologiche che si verificano lungo i tratti non confinati di pianura sono generalmente inferiori. Lungo i tratti di pianura del F. Magra è stato osservato (Nardi e Rinaldi, 2015) un allargamento dell'alveo compreso tra il 3% e il 90% della larghezza pre-evento; tuttavia, è stato osservato che tali variazioni rientrano ampiamente nel range di variabilità degli ultimi 150 anni e la larghezza post-evento è risultata generalmente inferiore alla larghezza che aveva il corso d'acqua negli anni '50. Questo risultato conferma l'importanza dell'analisi storica e soprattutto della situazione degli anni '50 come riferimento per la definizione della fascia di mobilità funzionale.

In alcuni casi, la dinamica d'alveo è andata a interferire con aree urbanizzate, innescando erosioni-alluvionamenti e fenomeni di esondazione indotta. È il caso del F. Magra nel tratto di attraversamento del centro abitato di Aulla, dove la sequenza multi-temporale di foto aeree dimostra chiaramente che, a partire dagli anni '70, la realizzazione di argini ha dato il via alla realizzazione di un nuovo quartiere, il quale è andato a occupare parzialmente l'alveo che negli anni '50 aveva una morfologia a canali intrecciati. La Figura 4 illustra schematicamente questo tipo di processo, molto comune nelle aree di pianura italiane: la realizzazione di argini e l'intensa escavazione di sedimenti a partire dagli anni '60-'70, con conseguente approfondimento dell'alveo (stadi evolutivi II e III), hanno generato una falsa percezione di sicurezza e la conseguente occupazione di aree immediatamente adiacenti o che addirittura erano parte dell'alveo. Le piene di forte intensità che si stanno verificando con frequenza crescente negli ultimi decenni causano locali alluvionamenti del fondo ed eventuale allargamento dell'alveo (stadio evolutivo IV), favorendo fenomeni locali di esondazione e andando a causare una quantità enorme di danni in aree precedentemente di pertinenza fluviale.

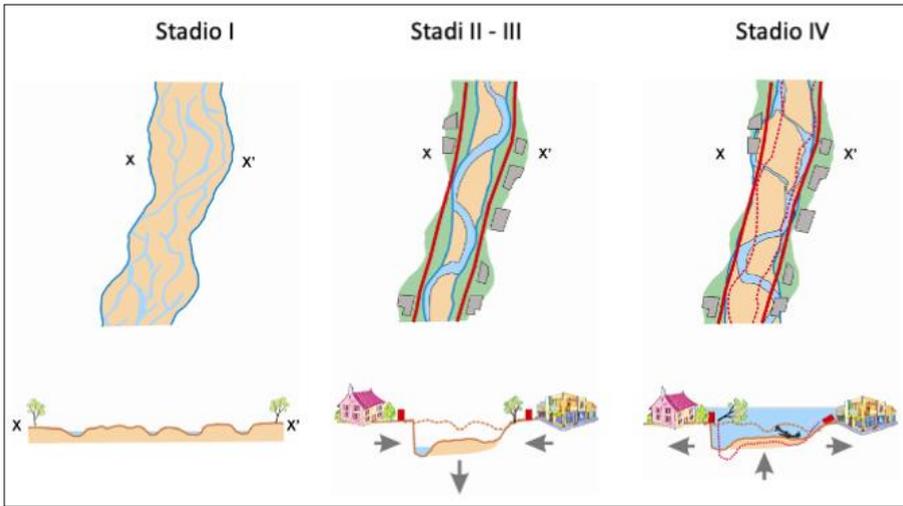


Fig. 4 - Modello schematico concettuale che evidenzia l'aumento del rischio in relazione all'occupazione di spazi fluviali e all'evoluzione morfologica del corso d'acqua.

**Idromorfologia, Direttiva Quadro Acque e Direttiva Alluvioni.** – La Direttiva Quadro Acque 2000/60 ha rappresentato una tappa importante nella gestione integrata dei corsi d'acqua, introducendo la cosiddetta *Idromorfologia fluviale*, intesa come studio dei processi idrologici e geomorfologici, delle loro interazioni con le pressioni antropiche e delle implicazioni sui processi ecologici. Lo sviluppo di metodologie per la “diagnosi” geomorfologica delle condizioni di un corso d'acqua ha quindi spostato l'interesse da problematiche legate ai rischi da dinamica fluviale verso aspetti di qualità ambientale. Un esempio è l'introduzione del concetto di *qualità morfologica*, derivante dalla funzionalità dei processi e dalla limitata artificialità come condizioni necessarie per promuovere il corretto funzionamento del corso d'acqua da un punto di vista morfologico ed ecologico. In tale contesto, viene sviluppato e ampiamente applicato a scala nazionale l'*Indice di Qualità Morfologica* (Rinaldi et al., 2013; ISPRA, 2016), strumento diagnostico per valutare lo stato idromorfologico di un corso d'acqua.

La Direttiva Alluvioni 2007/60 ha peraltro riaffermato la problematica del rischio idraulico come aspetto preponderante nella gestione dei corsi d'acqua, riconoscendo altresì i processi di trasporto solido e modificazioni d'alveo come aspetti di cui tenere conto. In questo contesto viene sviluppata la metodologia *IDRAIM*, un sistema complessivo di diagnosi delle condizioni morfologiche di un corso d'acqua e di supporto a una gestione integrata degli obiettivi di sicurezza e di qualità ambientale (Rinaldi et al., 2015; ISPRA, 2016).

**Conclusioni.** – La nota ha ripercorso alcuni degli argomenti chiave, sui quali lo scrivente ha avuto esperienza diretta, per i quali si sono registrati i maggiori sviluppi conoscitivi e metodologici negli ultimi decenni nel campo della dinamica fluviale in ambito nazionale.

In Tab. 2 si riporta una sintesi degli aspetti trattati e dei relativi campi di applicazione. Per concludere, si mette in evidenza come, in questi ultimi tre decenni, l'efficacia degli studi di dinamica fluviale sia aumentata significativamente, con sviluppo di metodologie specifiche e applicazioni concrete nel campo della gestione dei corsi d'acqua e con la progressiva inclusione di tematiche riguardanti gli aspetti di qualità ambientale.

Argomento	Ricerca	Gestione: Rischio	Gestione: Ambiente
<b>Cartografia Dinamica Fluviale</b>			
<b>Instabilità sponde fluviali</b>			
Modellazione processi			
Sperimentazione fisica			
<b>Fascia di Mobilità Funzionale</b>			
<b>Variazioni morfologiche</b>			
Lungo termine			
Evento di piena			
<b>Metodologia IDRAIM</b>			
Indice di Qualità Morfologica			
Indice di Dinamica Morfologica			
Gestione			

Tab. 3 - Sintesi degli argomenti trattati e delle relative finalità (in verde è indicata la finalità principale, in giallo la finalità secondaria).

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- BARUFFI F., RUSCONI A., SURIAN N., “Le fasce di pertinenza fluviale nella pianificazione dei bacini idrografici: aspetti metodologici ed applicazioni. Atti del Convegno “Interpraevent 2004”, Riva del Garda, maggio 2004.
- BOLLATI I.M., PELLEGRINI L., RINALDI M., DUCI G., PELFINI M., “Reach-scale morphological adjustments and stages of channel evolution: the case of the Trebbia River (Northern Italy)”, *Geomorphology*, 2014, 221, pp. 176-186.
- BORGA M., GAUME E., CREUTIN J.D., MARCHI L., “Surveying flash floods: gauging the ungauged extremes”, *Hydrol. Proc.*, 2008, 22, 18, pp. 3883-3885.

- CANUTI P., TACCONI P., “Carta dei caratteri morfologico-sedimentari ed antropici dell’alveo e della pianura del Fiume Arno (scala 1:10.000). Legenda”, 1992, Tip. S.EL.CA, Firenze.
- CANUTI P., CENCETTI C., RINALDI M., TACCONI P., “The fluvial dynamics of the Arno River. 2. Historical evolution of the Arno River bed”, *Mem. Soc. Geol. It.*, 1994, 48, pp. 851-864.
- CASAGLI N., RINALDI M., GARGINI A., CURINI A., “Pore water pressure and streambank stability: results from a monitoring site on the Sieve River, Italy”, *Earth Surf. Proc. Landf.*, 1999, 24, 12, pp. 1095-1114.
- CENCETTI C., FREDDUZZI A., “Analisi attraverso metodologia GIS delle variazioni dei caratteri morfologico-sedimentari nella bassa valle del F. Sinni (Basilicata)”, *Il Quaternario*, 2008, 21, 1B, pp. 147-160.
- CENCETTI C., CANUTI P., RINALDI M., TACCONI P., “The fluvial dynamics of the Arno River. 4. Map of the morphological-sedimentary and human characteristics of the Arno River bed and alluvial plain (TAB. 7 - Montevarchi)”, *Mem. Soc. Geol. It.*, 1994, 48, pp. 891-908.
- CENCETTI C., DE ROSA P., FREDDUZZI A., “Geoinformatics in morphological study of River Paglia, Tiber River basin, Central Italy”, *Environ. Earth Sc.*, 2017, 76, 3, 128.
- DUTTO F., “Proposta metodologica per la definizione della fascia di pertinenza fluviale (FPF) lungo il tratto piemontese del Po. Approccio geomorfologico”, In: *Atti del IV Convegno Internazionale di Geoingegneria “Difesa e valorizzazione del suolo e degli acquiferi”*, Torino, 10-11 marzo 1994, pp. 243-248.
- FRANCALANCI S., BENDONI M., RINALDI M., SOLARI L., “Ecomorphodynamic evolution of salt marshes: Experimental observations of bank retreat processes”, *Geomorphology*, 2013, 195, pp. 53-65.
- GAUME E., BORGA M., “Post-flood field investigations in upland catchments after major flash floods: proposal of a methodology and illustrations. *Journ. Flood Risk Manag.*, 2008, 1, 4, pp. 175-189.
- GOVI M., TURITTO O., “Problemi di riconoscimento delle fasce di pertinenza fluviale”, In: *Atti del IV Convegno Internazionale di Geoingegneria “Difesa e valorizzazione del suolo e degli acquiferi”*, Torino, 10-11 marzo 1994, pp. 161-172.
- ISPRA - ISTITUTO SUPERIORE PER LA PROTEZIONE E LA RICERCA AMBIENTALE, “IDRAIM: Sistema di valutazione idromorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d’acqua”, ISPRA, Manuali e Linee Guida, 131/2016, Roma, 258 pp.
- LAGASSE P.F., ZEVENBERGEN L.V., SPITZ W.J., THORNE C.R., “Methodology for Predicting Channel Migration”, National Cooperative Highway Research Program, Web-Only Document, 2004, 67 (Project 24-16).
- LUPPI L., RINALDI M., TERUGGI L.B., DARBY S.E., NARDI L. “Monitoring and numerical modelling of riverbank erosion processes: a case study along the Cecina River (Central Italy)”, *Earth Surf. Proc. Landf.*, 2009, 34, 4, pp. 530-546.
- MALAVOI J.R., BRAVARD J.P., PIEGAY H., HEROUIN E., RAMEZ P., “Détermination de l’espace de liberté des cours d’eau”, *Guide technique no. 2*, 1998, SDAGE RMC, 39 pp.

- NARDI L., RINALDI M., "Spatio-temporal patterns of channel changes in response to a major flood event: the case of the Magra River (central-northern Italy). *Earth Surf. Proc. Landf.*, 2015, 40, pp. 326-339.
- NARDI L., RINALDI M., SOLARI L., "An experimental investigation on mass failures occurring in a riverbank composed of sandy gravel", *Geomorphology*, 2012, 163-164, pp. 56-69.
- PELLEGRINI L., MARAGA F., TURITTO O., AUDISIO C., DUCI G., "Evoluzione morfologica di alvei fluviali mobili nel settore occidentale del Bacino Padano", *Il Quaternario*, 2008, 21, 1B, pp. 251-266.
- PIÉGAY H., DARBY S.E., MOSSELMAN E., SURIAN N., "A review of techniques available for delimiting the erodible river corridor: a sustainable approach to managing bank erosion", *River Res. Appl.*, 2005, 21, pp. 773-789.
- RAPP C.F., ABBE T.A., "A framework for delineating channel migration zones", *Ecology Publication #03-06-027 (Final Draft)*, Washington State Department of Ecology, Washington State Department of Transportation, 2003, 135 pp.
- RINALDI M., "Recent channel adjustments in alluvial rivers of Tuscany, Central Italy", *Earth Surf. Proc. Landf.*, 2003, 28, 6, pp. 587-608.
- RINALDI M., "Bed-level adjustments in the Po River catchment (Northern Italy)", *It. Journ. Eng. Geol. Environ.*, 2021, 2, pp. 41-50.
- RINALDI M., CASAGLI N., "Stability of streambanks formed in partially saturated soils and effects of negative pore water pressures: the Sieve River (Italy)", *Geomorphology*, 1999, 26, 4, pp. 253-277.
- RINALDI M., SIMONCINI C., "Studio geomorfologico del Fiume Magra e del Fiume Vara finalizzato alla gestione dei sedimenti e della fascia di mobilità", *Atti Giornate di Studio "Nuovi approcci per la comprensione dei processi fluviali e la gestione dei sedimenti. Applicazioni nel bacino del Magra"*, Sarzana, 24-25 ottobre 2006, Autorità di Bacino del Fiume Magra, 2006, pp. 93-109.
- RINALDI M., CASAGLI N., DAPPORTO S., GARGINI A., "Monitoring and modelling of pore water pressure changes and riverbank stability during flow events", *Earth Surf. Proc. Landf.*, 2004, 29, 2, pp. 237-254.
- RINALDI M., MENGONI B., LUPPI L., DARBY S.E., MOSSELMAN E., "Numerical simulation of hydrodynamics and bank erosion in a river bend", *Water Resour. Res.*, 2008, 44, W09429.
- RINALDI M., TERUGGI L.B., SIMONCINI C., NARDI L., "Dinamica recente ed attuale di alvei fluviali: alcuni casi di studio dell'Appennino Settentrionale", *Il Quaternario*, 2008b, 21, 1B, pp. 291-302.
- RINALDI M., SIMONCINI C., PIÉGAY H., "Scientific strategy design for promoting a sustainable sediment management: the case of the Magra River (Central-Northern Italy)", *River Res. Appl.*, 2009, 25, pp. 607-625.
- RINALDI M., SURIAN N., COMITI F., BUSSETTINI M., "A method for the assessment and analysis of the hydromorphological condition of Italian streams: the Morphological Quality Index (MQI)", *Geomorphology*, 2013, 180-181, pp. 96-108.

- RINALDI M., SURIAN N., COMITI F., BUSSETTINI M., "A methodological framework for hydromorphological assessment, analysis and monitoring (IDRAIM) aimed at promoting integrated river management", *Geomorphology*, 2015, 251, pp. 122-136.
- RINALDI M., AMPONSAH W., BENVENUTI M., BORGA M., COMITI F., LUCIA A., MARCHI L., NARDI L., RIGHINI M., SURIAN N., "An integrated approach for investigating geomorphic response to extreme events: methodological framework and application to the October 2011 flood in the Magra River catchment, Italy", *Earth Surf. Proc. Landf.*, 2016, 41, pp. 835-846.
- SCORPIO V., ROSSKOPF C.M., "Channel adjustments in a Mediterranean river over the last 150 years in the context of anthropic and natural controls", *Geomorphology*, 2016, 275, pp. 94-104.
- SCORPIO V., AUCELLI P., GIANO S.I., PISANO L., ROBUSTELLI G., ROSSKOPF C.M., SCHIATTARELLA M., "River channel adjustments in Southern Italy over the past 150 years and implications for channel recovery", *Geomorphology*, 2015, 251, pp. 77-90.
- SURIAN N., "Studio finalizzato alla definizione geomorfologica della fascia di pertinenza fluviale del Fiume Piave tra Perarolo e Falzè e del Torrente Cordevole tra Mas e Santa Giustina", Autorità di Bacino dei Fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione, Studi finalizzati alla redazione del Piano di Bacino, 1998, 38 pp.
- SURIAN N., RINALDI M., "Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy", *Geomorphology*, 2003, 50, 4, pp. 307-326.
- SURIAN N., RINALDI M., PELLEGRINI L., AUDISIO C., MARAGA F., TERUGGI L.B., TURITTO O., ZILIANI L., "Channel adjustments in northern and central Italy over the last 200 years", In: James L.A., Rathburn S.L., Whittecar G.R. (Eds.), "Management and Restoration of Fluvial Systems with Broad Historical Changes and Human Impacts", Geological Society of America, 2009a, Special Paper 451, pp. 83-95.
- SURIAN N., RINALDI M., PELLEGRINI L. con il contributo di AUDISIO C., BARBERO G., CIBIEN L., CISOTTO A., DUCI G., MARAGA F., NARDI L., SIMONCINI C., TERUGGI L.B., TURITTO O., ZILIANI L., "Linee guida per l'analisi geomorfologica degli alvei fluviali e delle loro tendenze evolutive", 2009b, Casa Editrice CLEUP, Padova, 78 pp.
- SURIAN N., RIGHINI M., LUCIA A., NARDI L., AMPONSAH W., BENVENUTI M., BORGA M., CAVALLI M., COMITI F., MARCHI L., RINALDI M., VIERO A., "Channel response to extreme floods: insights on controlling factors from six mountain rivers in northern Apennines, Italy", *Geomorphology*, 2016, 272, pp. 78-91.
- TACCONI P., CANUTI P., CENCETTI C., RINALDI M., "The fluvial dynamics of the Arno River. 3. Sedimentary characteristics of the Arno River bed", *Mem. Soc. Geol. It.*, 1994, 48, pp. 943-956.
- ZILIANI L., SURIAN N., "Evolutionary trajectory of channel morphology and controlling factors in a large gravel-bed river", *Geomorphology*, 2012, 173-174, pp. 104-117.

### *Applications of fluvial dynamics to rivers management.*

Fluvial dynamics is a topic of common interest for various scientific disciplines, both in the field of Earth Sciences and other engineering and naturalistic sectors, also considering its numerous implications for the management of the rivers. Based on personal research experiences, the note aims to retrace some developments in the field of fluvial dynamics that have occurred in recent decades and their applications to rivers management. Starting from the beginning of the 90s, the development of a thematic cartography of morphological-sedimentary and anthropic characters, as well as the systematization of the sampling and analysis procedures of riverbed sediments, have overall provided an interesting contribution to the knowledge of the river and its plain. Since the end of the 1990s, numerous researches have provided important and accurate knowledge of the local processes of river bank retreat (at the bank profile scale and at the time scale of the single flood event), through monitoring, numerical modeling and physical experimentation activities. At the same time, in the field of rivers management, the concept of functional mobility zone is gaining ground, aimed at identifying the necessary space adjacent to the stream and reconstructed on the basis of multi-temporal analysis of aerial photos. In the same period, a topic of considerable development was undoubtedly represented by the morphological variations of rivers over the last 100-200 years, above all in relation to the various anthropic activities and disturbances. On the basis of numerous studies, it has been possible to outline the main phases of plano-altimetric evolution of rivers on a national scale and to develop conceptual evolutionary geomorphological models, with obvious applications in the field of management of erosion-deposit processes and induced risks. The Framework Directive “Water” 2000/60 represented an important step in the integrated management of rivers, introducing the so-called *Fluvial Hydromorphology*, understood as the study of hydrological and geomorphological processes, their interactions with human pressures and the implications on ecological processes. The development of methodologies for the geomorphological “diagnosis” of the conditions of a river has therefore shifted the interest from problems related to risks from fluvial dynamics towards aspects of environmental quality. An example is the introduction of the concept of *morphological quality*, deriving from the functionality of the processes and the limited artificiality as necessary conditions to promote the correct functioning of the river from a morphological and ecological point of view. The Framework Directive “Floods” 2007/60 has also reaffirmed the problem of hydraulic risk as a preponderant aspect in the management of the rivers, also recognizing solid transport processes and riverbed modifications as aspects to be taken into account. In this context, the IDRAIM methodology was developed, an overall system for diagnosing the morphological conditions of a stream and supporting integrated management of safety and environmental quality objectives. In conclusion, it is highlighted how, in the last three

decades, the effectiveness of fluvial dynamics studies has significantly increased, with the development of specific methodologies and tangible applications in the field of river management and with the progressive inclusion of issues concerning environmental quality aspects.

*Keywords* - river management, fluvial hydromorphology, guidelines, risk.

*“La Dinamica fluviale. La conoscenza del Fiume per la pianificazione e la salvaguardia del territorio”*

a cura di C. Cencetti, L. Di Matteo

*Culture Territori Linguaggi*, 24, 2023, pp. 206-210

ISBN 9788894469783

Nicola SCIARRA<sup>1</sup>

## STABILITÀ SPONDALE DI UN TRATTO IN FORTE EROSIONE DEL F. VOMANO (TE) CON APPROCCIO ALLE DIFFERENZE FINITE

**Introduzione.** – Questa sintetica nota illustra le risultanze di un’analisi numerica eseguita per lo studio della stabilità di alcune sponde del F. Vomano, in provincia di Teramo (Abruzzo), soggetto a una forte erosione (Fig. 1) che ha determinato notevoli problematiche alla sicurezza di opere infrastrutturali.



Fig. 1 - Particolari degli effetti dell'erosione in alveo nel F. Vomano.

<sup>1</sup> Dipartimento di Scienze Psicologiche, della Salute e del Territorio (DiSPuTer), Università di Chieti-Pescara, Chieti, nicola.sciarra@unich.it

***Caratteristiche geologiche e geomorfologiche dell'area di studio.*** – L'area di studio si presenta geologicamente costituita da un substrato argilloso fortemente inciso, affiorante lungo buona parte dell'asta fluviale, e da una copertura alluvionale, rimasta pensile rispetto all'attuale corso d'acqua, costituita da terrazzi ghiaioso-limosi fortemente eterogenei. Il sito presenta una morfologia in continua evoluzione. Le caratteristiche fisico-meccaniche dei litotipi coinvolti, ottenute da prove di laboratorio, sono state utilizzate per la parametrizzazione del modello fisico.

L'attenzione per il F. Vomano nasce dalla natura complessa del sistema e dall'intreccio di cause ed effetti che hanno innescato intensi fenomeni erosivi lungo un tratto d'alveo esteso oltre 14 km. Risalendo il corso del fiume, l'entità dell'escavazione dell'alveo diviene sempre più accentuata; il dissesto raggiunge verso la costa il ponte autostradale della A14 (Fig. 1), mettendo a giorno gli spiccati di fondazione delle pile. A causa dell'incisione dell'alveo, si è avuto un costante e problematico incremento dell'altezza e dell'acclività delle sponde; queste sono più facilmente soggette a fenomeni d'instabilità in caso di eventi particolarmente intensi di piena, con l'incremento dell'erosione laterale e l'aggravamento e il danneggiamento delle opere di attraversamento e di difesa idraulica presenti nel tratto d'alveo. Una situazione morfologica così compromessa ha danneggiato l'intero sistema idrico: i fossi secondari risentono, a partire dalla confluenza, dell'effetto della variazione del livello di base locale, innescando anch'essi fenomeni erosivi affini.

***Le simulazioni numeriche.*** – L'area su cui sono state eseguite le simulazioni numeriche è stata rilevata topograficamente con l'ausilio di una stazione totale e di un sistema GPS a lettura differenziale che hanno permesso di ricostruire un modello DTM di alta precisione (Fig. 2). Al modello DTM è stato associato un sottosuolo costituito dai due litotipi caratteristici presenti (argille di base e alluvioni ghiaiose superficiali). Il modello geometrico ottenuto è stato quindi discretizzato (Fig. 3) ai fini della successiva analisi numerica. Per le simulazioni è stato utilizzato il codice di calcolo FLAC\_3D che ha consentito di ottenere una serie di informazioni che hanno facilitato la comprensione dei cinatismi accaduti e in atto, in funzione delle peculiarità geometriche, fisiche e meccaniche dei terreni presenti.

***Risultati.*** – I risultati della modellazione numerica sono in parte visibili in Figura 4, nella quale, per motivi di sintesi, si evidenziano unicamente le zone di plasticizzazione relative alla sponda sinistra. Comunque, gli spostamenti calcolati lungo gli assi Y e Z hanno mostrato una buona correlazione con quelli effettivamente verificatisi, evidenziando una prevalente componente di spostamento verticale nelle zone di testata delle sponde.

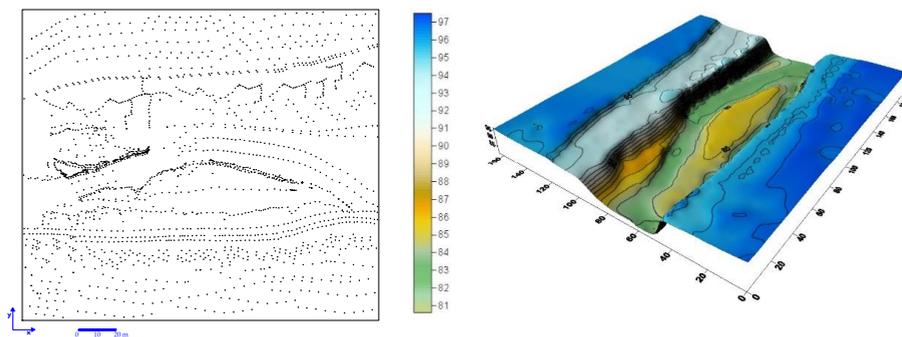


Fig. 2 - Ricostruzione del modello DTM della zona indagata; a sinistra la nuvola di punti estratta tramite rilievo GPS.

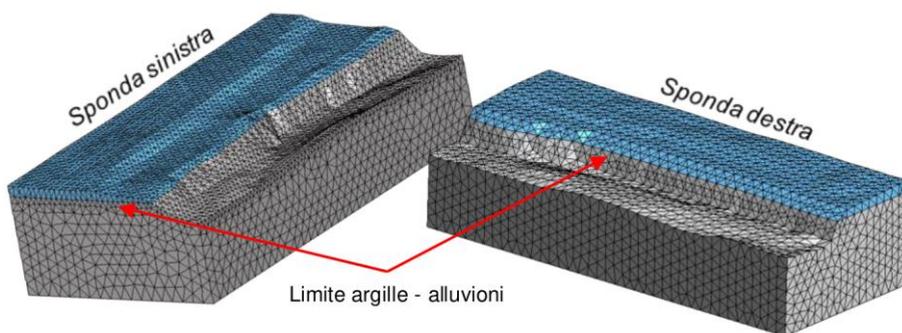


Fig. 3 - Ricostruzione della griglia di discretizzazione del modello fisico indagato.

La distribuzione areale delle maglie in condizioni prossime alla rottura per tagli e per trazione è del tutto analoga a quella facilmente riscontrabile direttamente sul sito. Il sistema spondale subisce meccanismi di rottura procedendo a continui arretramenti.

Questa è una condizione critica permanente, dovuta principalmente alle caratteristiche di resistenza e di fragilità dei materiali coinvolti. In particolare, il substrato argilloso è soggetto a un forte peggioramento delle caratteristiche fisico-meccaniche, a seguito dei cicli di imbibizione ed essiccazione e dello scalzamento al piede dovuto al transito giornaliero di piene antropicamente indotte; i continui giornalieri momenti di imbibizione ed essiccazione in concomitanza di escursioni termiche importanti (soprattutto nel periodo estivo), comportano un ulteriore decadimento delle proprietà fisico-meccaniche dei terreni, contribuendo all'evoluzione dello stato di instabilità spondale e dell'arretramento dei cigli di sponda.

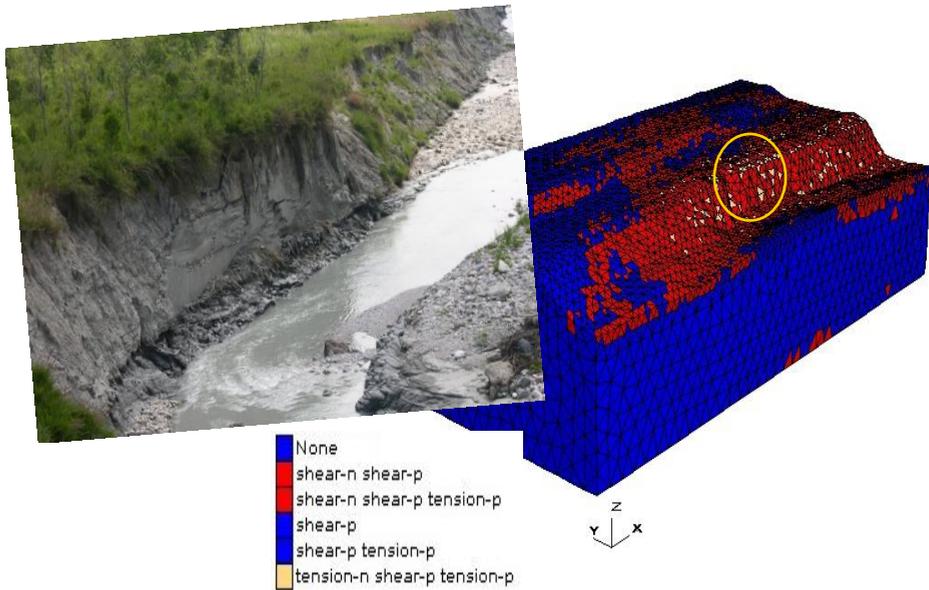


Fig. 4 - Diagramma delle zone di plasticizzazione relative alla sola sponda sinistra dell'alveo del F. Vomano. Cerchiate in giallo le zone in trazione.

*Bank stability of a heavily eroded section of the Vomano River (TE) with a finite-difference approach.*

The note illustrates the results of a numerical analysis carried out to study the stability of some banks of the Vomano River, in the province of Teramo (Abruzzo), subject to strong erosion which has caused significant problems for the safety of infrastructural works. The area on which the numerical simulations were performed was topographically surveyed with the aid of a total station and a differential reading GPS system which made it possible to reconstruct a high precision DTM model. The DTM model was associated with a subsoil consisting of the two characteristic lithotypes present (clays and superficial gravels). The geometric model obtained was then discretized for the purposes of the subsequent numerical analysis. For the simulations, the calculation code FLAC\_3D was used, which made it possible to obtain a series of information that facilitated the understanding of the kinematics that occurred and were in progress, according to the geometric, physical and mechanical peculiarities of the terrains present. The results highlight a prevalent component of vertical displacement in the bank head areas. The areal distribution of the meshes in conditions close to breaking due to cuts and traction is completely analogous to that which can be easily found directly on site. The

bank system undergoes breakage mechanisms proceeding to continuous retreats. This is a permanent critical condition, mainly due to the characteristics of resistance and fragility of the materials involved (especially clays), subject to a strong deterioration of the physical-mechanical characteristics, following the cycles of imbibition and drying and the undermining of the foot due to the daily transit of anthropically induced floods.

*Keywords* - geomorphological evolution, finite-difference method, Vomano River.

*“La Dinamica fluviale. La conoscenza del Fiume per la pianificazione e la salvaguardia del territorio”*

a cura di C. Cencetti, L. Di Matteo

*Culture Territori Linguaggi*, 24, 2023, pp. 211-214

ISBN 9788894469783

Nicola SURIAN<sup>1</sup>

## DINAMICA D’ALVEO IN RISPOSTA AD EVENTI DI ELEVATA MAGNITUDO: COMPrensIONE DEI PROCESSI E IMPLICAZIONI PER LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO

**Riassunto.** – Durante eventi di piena di elevata magnitudo, un corso d’acqua può essere soggetto a processi geomorfologici e a una dinamica complessiva che si possono discostare in modo rilevante rispetto a quelli osservabili in condizioni idrologiche “ordinarie”, ossia in relazione a eventi con elevata probabilità di accadimento. Intensi processi di erosione spondale e di trasporto, sia di sedimenti che di materiale legnoso, possono modificare in modo sostanziale l’assetto morfologico dell’alveo, sia in termini planimetrici che altimetrici.

Se, da una parte, gli eventi di elevata magnitudo hanno attratto l’attenzione di molti ricercatori per comprendere il loro ruolo nella dinamica complessiva di un corso d’acqua (e.g. in che modo e per quanto tempo tali eventi condizionano la traiettoria evolutiva di un corso d’acqua), è evidente che tali processi e modificazioni morfologiche hanno delle implicazioni molto rilevanti in termini di pericolosità e rischio. Soprattutto in ambito montano, la dinamica morfologica degli alvei può rivelarsi l’aspetto cruciale per la mappatura della pericolosità e la mitigazione del rischio da eventi alluvionali. Sono infatti gli intensi processi di allargamento, che talvolta possono interessare l’intero fondovalle, e il trasporto solido, che si può verificare anche in forma di *debris flood* o *debris flow*, che determinano i danni maggiori.

La presente nota si prefigge di approfondire due aspetti: (i) gli sviluppi più recenti, in ambito di ricerca scientifica, nella comprensione della dinamica d’alveo in relazione a eventi alluvionali di elevata magnitudo; (ii) quanto la dinamica d’alveo viene considerata nell’analisi e nella mappatura della pericolosità da eventi alluvionali.

---

<sup>1</sup> Dipartimento di Geoscienze, Università di Padova, Padova, nicola.surian@unipd.it

A partire dal lavoro di Costa e O'Connor (1995), fondamentale nel concettualizzare il ruolo della magnitudo e della durata di un evento di piena, molte ricerche si sono concentrate sui diversi fattori che possono controllare la risposta geomorfologica di un corso d'acqua a eventi alluvionali di elevata magnitudo (Langhammer, 2010; Dean e Schmidt, 2013; Thompson e Croke, 2013; Buraas et al., 2014). Quello che emerge da queste ricerche, infatti, è che la componente idraulica, ad esempio la potenza della corrente, non è sufficiente per spiegare, e quindi prevedere, la risposta di un corso d'acqua. Solo considerando altri aspetti, come il confinamento, la disponibilità di sedimenti, la presenza di opere di difesa, si può ottenere una migliore comprensione di tale risposta. Ad esempio, recenti studi condotti nel contesto italiano (Surian et al., 2016; Scorpio et al., 2018) evidenziano come l'allargamento dell'alveo sia controllato principalmente da due fattori: la potenza unitaria della corrente e il confinamento. Se da una parte si è consolidato il fatto che sia necessario un approccio integrato (e.g. idrologia, idraulica, geomorfologia e impiego di diverse tecniche e dati) per analizzare la risposta geomorfologica di un corso d'acqua (Rinaldi et al., 2016), l'aspetto che generalmente è più difficile da approfondire e ricostruire riguarda la tipologia di flusso. Come evidenziato da Brenna et al. (2023), la tipologia di flusso può risultare un fattore chiave nella comprensione della risposta geomorfologica. Nello specifico, l'individuazione dei tratti del reticolo idrografico dove si verificano *debris floods*, ossia flussi idrici caratterizzati da elevato trasporto al fondo, è cruciale nell'interpretazione di allargamenti particolarmente intensi dell'alveo.

Quanto queste conoscenze in ambito scientifico trovano applicazione in ambito di pianificazione e gestione dei corsi d'acqua? La risposta è piuttosto semplice, considerando sia il contesto europeo (Direttiva "Alluvioni") sia un contesto più ampio: le applicazioni sono molto limitate e la mappatura della pericolosità alluvionale rimane basata solo su approcci idraulici, ossia di valutazione delle aree allagabili. Da ciò deriva una forte lacuna nella valutazione della pericolosità e del rischio, soprattutto in quelle porzioni del reticolo idrografico (ad esempio nei corsi d'acqua montani e in alvei a canali intrecciati) dove la dinamica d'alveo riveste un ruolo dominante, o almeno paritario, rispetto ai processi strettamente idraulici, ossia ai processi di esondazione. Questa criticità nella valutazione del rischio, in particolare per contesti fortemente antropizzati come quello italiano, potrebbe ulteriormente accentuarsi nel breve termine, in relazione a una maggiore frequenza di eventi estremi.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

BRENNA A., MARCHI L., BORGA M., ZARAMELLA M., SURIAN N., "What drives major channel widening in mountain rivers during floods? The role of debris floods during a high-magnitude event", *Geomorphology*, 2023, 430, 108650.

- BURAAS E.M., RENSHAW C.E., MAGILLIGAN F.J., DADE W.B., "Impact of reach geometry on stream channel sensitivity to extreme floods", *Earth Surf. Proc. Landf.*, 2014, 39, 13, pp. 1778-1789.
- COSTA J.E., O'CONNOR J.E., "Geomorphically effective floods", *Geophys. Monogr.*, 1995, 89, pp. 45-45.
- DEAN D.J., SCHMIDT J.C., "The geomorphic effectiveness of a large flood on the Rio Grande in the big Bend region: insights on geomorphic controls and post-flood geomorphic response", *Geomorphology*, 2013, 201, pp. 183-198..
- LANGHAMMER J., "Analysis of the relationship between the stream regulations and the geomorphologic effects of floods", *Nat. Hazards*, 2010, 54, 1, pp. 121-139.
- RINALDI M., AMPONSAH W., BENVENUTI M., BORGA M., COMITI F., LUCIA A., MARCHI L., NARDI L., RIGHINI M., SURIAN N., "An integrated approach for investigating geomorphic response to extreme events: methodological framework and application to the October 2011 flood in the Magra River catchment, Italy", *Earth Surf. Proc. Landf.*, 2016, 41, pp. 835-846.
- SCORPIO V., CREMA S., MARRA F., RIGHINI M., CICCARESE G., BORGA M., CAVALLI M., CORSINI A., MARCHI L., SURIAN N., COMITI F., "Basin-scale analysis of the geomorphic effectiveness of flash floods: A study in the northern Apennines (Italy)", *Sc. Tot. Environ.*, 2018, 640-641, pp. 337-351.
- SURIAN N., RIGHINI M., LUCIA A., NARDI L., AMPONSAH W., BENVENUTI M., BORGA M., CAVALLI M., COMITI F., MARCHI L., RINALDI M., VIERO A., "Channel response to extreme floods: Insights on controlling factors from six mountain rivers in northern Apennines, Italy", *Geomorphology*, 2016, 272, pp. 78-91.
- THOMPSON C., CROKE J., "Geomorphic effects, flood power, and channel competence of a catastrophic flood in confined and unconfined reaches of the upper Lockyer valley, Southeast Queensland, Australia", *Geomorphology*, 2013, 197, pp. 156-169.

*Riverbed dynamics in response to high magnitude events: understanding processes and implications for risk mitigation.*

During high-magnitude flood events, a river can be subject to geomorphological processes and to an overall dynamics that can differ significantly from those observable in "ordinary" hydrological conditions, i.e. in relation to events with a high probability of occurrence. Intense processes of bank erosion and transport, both of sediments and of woody material, can substantially modify the morphological structure of the riverbed, both in planimetric and altimetric terms. While high magnitude events have attracted the attention of many researchers to understand their role in the overall dynamics of a river (i.e. how and for how long these events condition the evolutionary trajectory of a river), it is evident that these processes and morphological modifications have very significant implications in terms of hazard and risk. Especially in the mountain environments, the morphological dynamics of the riverbeds can prove to be the crucial aspect for mapping the hazard and mitigating the risk from flooding events. In fact,

the intense widening processes, which can sometimes affect the entire valley floor, and solid transport, which can also occur in the form of debris flood or debris flow, are responsible of the greatest damages. This note aims to investigate two aspects: (i) the most recent developments, in the field of scientific research, in the understanding of riverbed dynamics in relation to high-magnitude flood events; (ii) how much the riverbed dynamics is considered in the analysis and mapping of the hazard from flood events. Starting from the work of Costa and O'Connor (1995), fundamental in conceptualizing the role of the magnitude and duration of a flood event, much research has focused on the various factors that can control the geomorphological response of a river to high magnitude flood events (Langhammer, 2010; Dean & Schmidt, 2013; Thompson & Croke, 2013; Buraas et al., 2014). What emerges from these researches, in fact, is that the hydraulic component, for example the stream power, is not sufficient to explain, and therefore predict, the response of a river. Only by considering other aspects, such as confinement, the availability of sediments, the presence of defense works, can we obtain a better understanding of this response. For example, recent studies conducted in the Italian context (Surian et al., 2016; Scorpio et al., 2018) show that the widening of the riverbed is mainly controlled by two factors: the unit stream power and the confinement. While on the one hand it has been established that an integrated approach is needed (e.g. hydrology, hydraulics, geomorphology and the use of different techniques and data) to analyze the geomorphological response of a stream (Rinaldi et al., 2016), the aspect that is generally more difficult to investigate and reconstruct concerns the type of flow. As highlighted by Brenna et al. (2023), the flow typology can be a key factor in understanding the geomorphological response. Specifically, the identification of the sections of the hydrographic net where debris floods occur, i.e. water flows characterized by high bedload transport, is crucial in the interpretation of particularly intense widening of the riverbed. To what extent does this knowledge in the scientific field find application in the planning and management of rivers? The answer is quite simple, considering both the European context ("Floods" Directive) and a broader context: the applications are very limited and the mapping of the flood hazard remains based only on hydraulic approaches, i.e. the evaluation of floodable areas. From this derives a strong gap in the assessment of hazard and risk, above all in those portions of the hydrographic net (for example in mountain streams and in braided rivers) where the dynamics of the riverbed plays a dominant role, or at least equal, compared to strictly hydraulic processes, i.e. flooding processes. This criticality in risk assessment, especially for highly anthropized environments such as the Italian one, could further accentuate in the short term in relation to a greater frequency of extreme events.

*Keywords* - riverbed dynamics, high magnitude events, risk mitigation.



ISBN 9788894469783