

Nuovi indirizzi per la difesa dal rischio idraulico lungo l'asta fluviale del Fiume Po

Armando Brath¹, Attilio Castellarin¹, Giuliano Di Baldassarre², Alessio Domeneghetti^{1*}

1 DISTART - Università di Bologna, Viale Risorgimento 2 - 40136 Bologna, Italy

2 Department of Hydroinformatics and Knowledge Management, UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft, The Netherlands

** referente per la corrispondenza: alessio.domeneghetti@unibo.it*

Riassunto

La presente memoria illustra i più recenti orientamenti nell'ambito degli interventi per la mitigazione del rischio alluvionale lungo il corso medio inferiore del Fiume Po. Partendo dal presupposto che l'attuale sistema di arginature maestre del Po non possa garantire un livello di sicurezza idraulica assoluto dei territori di pianura prospicienti il corso d'acqua nei confronti di qualsiasi evento di piena, la nota presenta le linee strategiche di intervento formulate dall'Autorità di Bacino del Fiume Po e si concentra su due aspetti particolari. Il primo è il miglioramento della capacità di laminazione delle portate di piena attraverso una più oculata gestione del sistema di golene difese del Po. Il secondo, problema assai complesso e delicato, è il controllo ottimale di eventi di piena al limite della prevedibilità, associati a tempi di ritorno decisamente superiori a 200 anni, per i quali il sistema di arginature maestre del Po non può scongiurare possibili esondazioni. La discussione delle problematiche esposte viene articolata partendo dalle risultanze sperimentali di alcuni recenti studi basati sull'impiego di evoluti modelli matematici di tipo quasi-bidimensionale e bidimensionale.

PAROLE CHIAVE: modelli numerico-idraulici 1D e 2D / manufatti arginali / aree golenali aperte e difese / mappe di pericolosità idraulica / Fiume Po

New planning strategies for flood risk mitigation along the Po river

The present study illustrates the latest guidelines in the context of measures for flood risk mitigation along the middle-lower reach of the Po River, the largest river in Italy. Under the assumption that the main levee system of the Po River cannot protect the entire lowland area around the river against inundations for any given magnitude of the flood event, the paper presents the new planning strategies formulated by the Po River Basin Authority focusing on two main issues. First, the study aims at investigating the effects of the adoption of different floodplain management strategies on flood hazard along the middle and lower river reach. The lateral banks are densely cultivated, and cultivations are protected against frequent flooding by a system of minor artificial levees. This secondary levee system (SLS) impacts significantly the hydraulic behaviour of the middle-lower Po during major flood events. Different hypotheses of SLS management are considered (e.g., raising, lowering or removal of SLS). Second, the study addresses the critical problem of how to best manage extreme flood events (i.e., events associated with recurrence intervals larger than 200 years), which may produce overtopping and hence may breach the main levees. The two hydraulic problems are addressed on the basis of the outcomes of a series of recent analyses that utilize advanced quasi-2D and 2D numerical hydraulic models.

KEY WORDS: one- and two-dimensional numerical hydraulic models / levees / open and levee-protected riverbanks / flood hazard maps / Po River

INTRODUZIONE

La definizione delle strategie di intervento per la difesa idraulica dei territori potenzialmente allagabili dal Fiume Po, specie lungo il suo tratto medio inferiore, costituisce un problema complesso di grande interesse tecnico e scientifico. Nel corso degli ultimi due secoli, si è assistito ad un progressivo sviluppo dei sistemi

arginali, sia in senso verticale (altezza dei rilevati) che in senso longitudinale (lunghezza dei rilevati), con successivi interventi a seguito delle principali piene, fra cui particolarmente significativi sono quelli eseguiti a seguito delle grandi piene del 1951, 1994 e 2000. Il progressivo innalzamento della quota sommitale ha

portato al raggiungimento, in alcuni tratti dell'asta inferiore del Po, di condizioni limite strutturali, talché le quote attuali appaiono non più significativamente aumentabili. Il prolungamento ed il consolidamento della cintura arginale lungo l'asta del Po hanno progressivamente ridotto le possibilità di espansione laterale dei corsi d'acqua, riducendo le aree di potenziale esondazione. Alla presenza di queste zone è riconducibile la capacità del corso d'acqua di laminare (ovvero di ridurre) i colmi di portata in occasione dei fenomeni di piena.

L'accumulo di volumi di piena nelle zone di espansione laterale, infatti, ritarda e diluisce nel tempo il fenomeno di propagazione dell'onda di piena che, spostandosi da monte verso valle, si allunga e riduce il valore di portata al colmo di piena. Pertanto, alla minor frequenza degli allagamenti nelle zone di pianura, ottenuta attraverso il potenziamento del sistema di arginature maestre (Fig. 1a e 1b), fa da contraltare una diminuzione della naturale capacità di laminazione delle piene, con conseguente innalzamento dei livelli idrici di piena nei tratti vallivi del corso d'acqua (Fig. 1b).

Tali circostanze hanno evidenziato la necessità di definire linee strategiche di intervento per la difesa idraulica del territorio alternative al continuo e sistematico rialzo delle quote di sommità degli argini. Detta esigenza è stata recentemente riconosciuta quale linea strategica d'intervento per i corsi d'acqua europei anche dalla Direttiva 2007/60/CE del Parlamento europeo del 23 ottobre 2007, relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni. Il primo tentativo di affrontare tale problema in maniera organica può essere fatto risalire allo studio (di seguito denominato SIMPO) commissionato il 14 luglio 1980 dal Magistrato per il Po alla SIMPO S.p.A. per la progettazione di massima delle sistemazioni idrauliche dell'asta principale del Po a difesa dal rischio alluvionale e per la gestione della risorsa idrica (MAGISTRATO PER IL PO, 1982; 1984). Più recentemente, soprattutto a partire dall'anno 2005, l'Autorità di Bacino del Fiume Po (ADB-Po) ha intrapreso una sistematica attività di studio volta alla definizione di specifiche linee progettuali strategiche per il miglioramento delle condizioni di sicurezza dei territori di pianura lungo l'asta medio inferiore del Po. Gli studi svolti dall'ADB-Po evidenziano la necessità di definire strategie per la mitigazione del rischio residuale, intendendosi come tale quella porzione di rischio che permane anche in presenza dell'opera di difesa. L'esistenza di un rischio residuale è relazionata in primo luogo alla possibilità di verificarsi di eventi di piena più intensi di quello assunto a riferimento per la progettazione del sistema di difesa arginale (solitamente l'onda sintetica 200-ennale) e che quin-

di non sono contenibili all'interno dello stesso. In secondo luogo, alla possibilità che, anche in un sistema arginale ben monitorato e mantenuto nel tempo quale è quello del Po, non possono essere esclusi eventi di rottura arginale.

Tale rischio, definito residuale in quanto connesso a scenari di mancata efficacia di un'opera idraulica, interessa un territorio potenzialmente assai ampio (diverse migliaia di km²) e fortemente antropizzato. Esso deve essere dunque preso attentamente in considerazione, valutato e gestito con opportuni interventi di mitigazione.

Nello specifico le linee strategiche di intervento previste dall'ADB-Po riguardano:

- il miglioramento della capacità di laminazione all'interno delle arginature maestre, nella cosiddetta fascia B (Fig. 2), degli eventi di piena di progetto con tempo di ritorno TR = 200 anni;
- la valutazione e la gestione del rischio residuale nella fascia di inondazione catastrofica, o fascia C (Fig. 2),

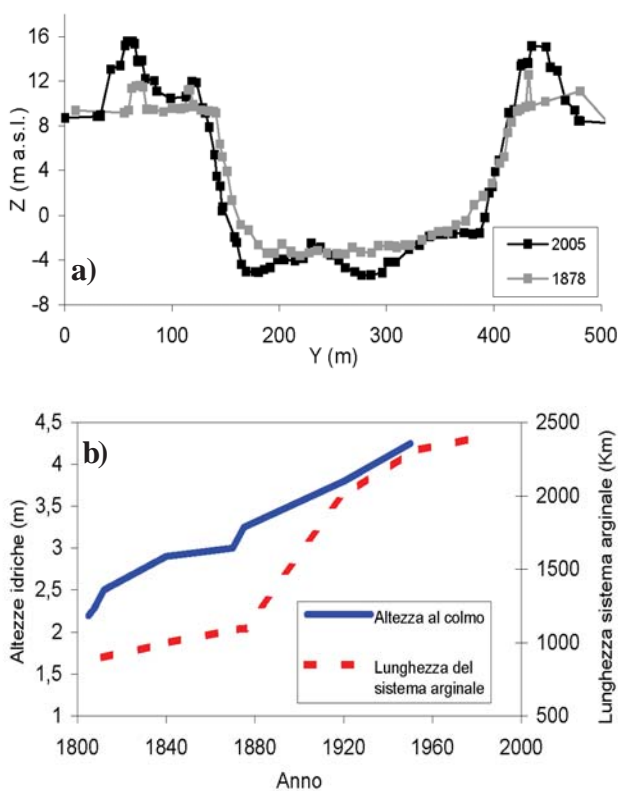


Fig. 1. Fiume Po a Pontelagoscuro (FE): a) sezione trasversale rilevata nel 1878 e nel 2005; b) sviluppo longitudinale complessivo in km delle arginature maestre lungo il Fiume Po ed i suoi affluenti principali e relativo incremento delle altezze idrometriche massime annuali registrate (m su zero idrometrico). Fonte: Autorità di Bacino del Fiume Po, Parma (DI BALDASSARRE *et al.*, 2009).

costituita dalla porzione di territorio, al di fuori delle arginature maestre, che può essere interessata da inondazione al verificarsi di eventi di piena sensibilmente più gravosi di quello con TR = 200 anni (evento assunto come riferimento per la progettazione del sistema difensivo arginale). Tali valutazioni considerano pertanto gli scenari associati alle cosiddette piene al limite della prevedibilità secondo la definizione data da MAJONE e TOMIOTTI (2006);

- lo studio delle possibilità di laminazione controllata all'esterno delle arginature maestre in fascia C delle piene al limite della prevedibilità, che si sostanzia nell'individuazione di apposite porzioni della fascia C (comparti) in cui provocare la tracimazione controllata di una parte del deflusso di piena, in modo da sgravare l'asta fluviale a valle.

La presente memoria riassume alcune delle attività di studio condotte in merito a tali tipologie d'intervento; nello specifico si riferisce da un lato di un'indagine tesa a chiarire le capacità di laminazione ritraibili dal sistema delle golene chiuse presenti lungo il tratto medio-inferiore del Fiume Po e dall'altro di due diverse esperienze condotte applicando tecniche di modellistica numerica 2D finalizzate alla valutazione dei potenziali benefici connessi alla laminazione controllata di volumi di piena al di fuori delle arginature maestre.

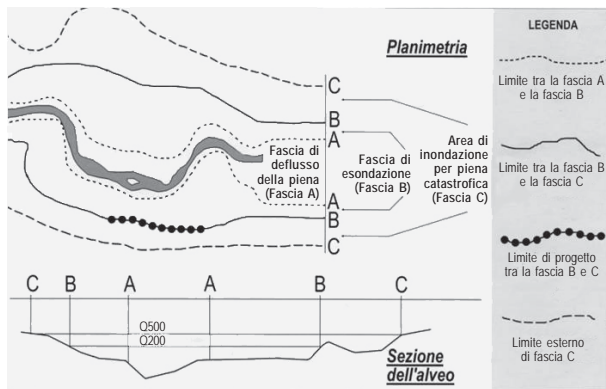


Fig. 2. Schema esemplificativo per la definizione delle fasce fluviali. Fonte: Autorità di Bacino del Fiume Po, Parma (ADB-Po, 1999).

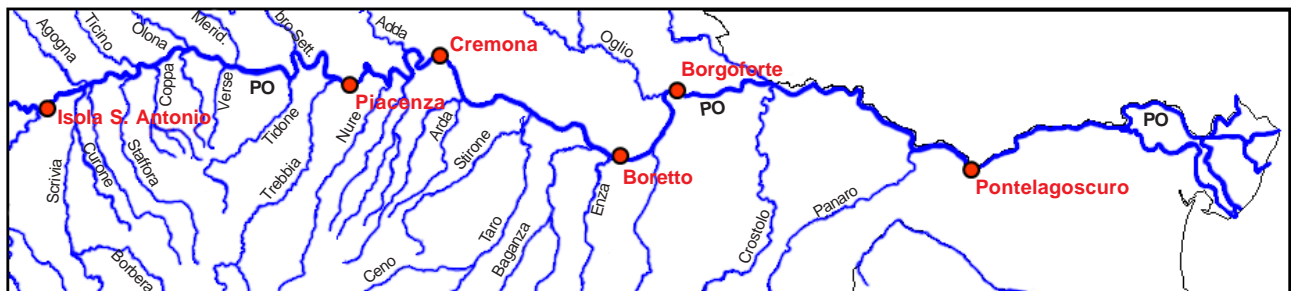


Fig. 3. Tratto del Fiume Po considerato nello studio.

ANALISI DELLE CAPACITÀ DI LAMINAZIONE, ATTUALE E POTENZIALE, DEL SISTEMA GOLENALE DEL FIUME PO

Nel seguito si riferisce di un' articolata serie di indagini condotte al fine di fornire un primo inquadramento delle potenzialità offerte dal sistema di golene chiuse comprese lungo il tratto che va dalla confluenza con il Fiume Ticino e Pontelagoscuro, ai fini della laminazione di onde di piena associate ad elevati tempi di ritorno.

L'attività svolta ha fatto estensivo uso del modello digitale delle quote del terreno (Digital Terrain Model, DTM) a passo 2 m e dell'ortofoto, a scala nominale 1:2.000, dell'asta di Po tra la confluenza Ticino e l'incile del Po di Goro, di cui l'ADB-Po si è dotata a partire dall'anno 2005. Il DTM integra tre diverse tipologie di informazione: (1) rilievo laser-scanning della parte emersa; (2) rilievo batimetrico da natante con sonar a scansione; (3) sezioni trasversali rilevate con tecniche topografiche tradizionali dall'AIPO (Agenzia Interregionale per il Fiume Po) nel 2005. Il modello digitale è stato verificato e validato utilizzando il GPS cinematico, mostrando scostamenti molto ridotti ($\approx 0,1\text{m}$) e assenza di differenze locali sistematiche (CAMORANI *et al.*, 2006). La disponibilità di detto DTM ha fornito uno dei principali stimoli a promuovere un aggiornamento del parco studi relativi alla modellistica idraulica di piena disponibile presso l'ADB-Po per il tratto d'asta di Po tra la confluenza Tanaro e Pontelagoscuro (CONSORZIO ITALCOPO, 2002), attività di cui si riferisce in questa sede.

Nel seguito si propone una sintetica descrizione del modello numerico messo a punto e delle modalità di taratura dello stesso e si illustrano i primi risultati delle indagini finalizzate alla quantificazione della capacità di laminazione attuale e potenziale del sistema di golene chiuse del corso medio inferiore del Fiume Po.

Rappresentazione della geometria dell'alveo nel modello matematico

Utilizzando come supporto il DTM fornito dall'ADB-Po relativo al tratto di Po compreso tra la confluenza con il Fiume Ticino (Sez. Brioschi 6) e Pontelagoscuro (Sez. Brioschi 65), si è analizzato nel suo complesso il

sistema golenale del corso medio inferiore del Po al fine di costruire un modello numerico idraulico. Si è fatto ricorso al codice di calcolo di moto vario UNET (BARKAU, 1997), che permette di riprodurre il comportamento idraulico di complessi sistemi di corsi d'acqua naturali e canali artificiali mediante schematizzazioni tipo monodimensionale (1D) o quasi-bidimensionale (quasi-2D) (Fig. 3).

Il DTM è stato analizzato in ambiente GIS (Geographic Information System) con lo scopo di caratterizzare la geometria delle golene chiuse, aggiornando le conoscenze rese disponibili dagli studi precedenti, in particolare SIMPO e CORATZA (2005). Per ciascuna delle maggiori golene chiuse presenti nel tratto di Po considerato sono stati individuati dapprima gli argini golenali e successivamente sono stati calcolati i volumi idrici invasabili e le corrispondenti superfici libere per diversi valori del livello idrico (Fig. 4). Come per gli esempi mostrati in Figura 4, si è osservata una generale congruenza tra i dati puntuali riportati dal SIMPO per il massimo invaso e quelli calcolati utilizzando le informazioni contenute nel DTM. Tuttavia l'attività svolta ha consentito di caratterizzare più accuratamente le modalità di invaso delle golene chiuse, che sono state descritte attraverso una curva di riempimento (volumi di invaso al variare della quota), anziché utilizzare un unico punto come nel caso del SIMPO (Fig. 4). Per meglio comprendere l'entità dei volumi in gioco, pare utile sottolineare come tra Becca e Pontelagoscuro il volume di invaso, distribuito su circa 50 golene chiuse, sia prossimo a 500 Mm^3 , cui corrisponde un invaso equivalente sulla lunghezza dell'asta di circa $1,6 \text{ Mm}^3\text{-km}^1$; la maggior concentrazione di volumi invasabili si ha a partire da Cremona fino a Sermide.

Oltre all'analisi del DTM si sono considerate numerose informazioni aggiuntive, quali i rilievi topografici tradizionali effettuati da AIPO nelle sezioni topografiche trasversali da foce Tanaro a confluenza Ticino nel 2004 e da confluenza Ticino a Pontelagoscuro nel 2005; le CTR 1:25.000 e 1:10.000 per la fascia B di Po da foce Tanaro a Pontelagoscuro.

Il modello sviluppato per il tratto di Fiume Po di interesse rientra nella classe dei modelli quasi-bidimensionali (BRATH e DI BALDASSARRE, 2006). Infatti, sebbene le equazioni caratteristiche del modello descrivano il moto utilizzando una sola variabile spaziale, la schematizzazione di golene chiuse idraulicamente connesse all'alveo attivo e, talvolta, interconnesse tra loro, permette di descrivere la dinamica del fenomeno di propagazione dell'onda di piena in maniera non necessariamente monodimensionale.

Nella messa a punto del modello e nella fase di calibrazione dello stesso si è seguito il criterio di limita-

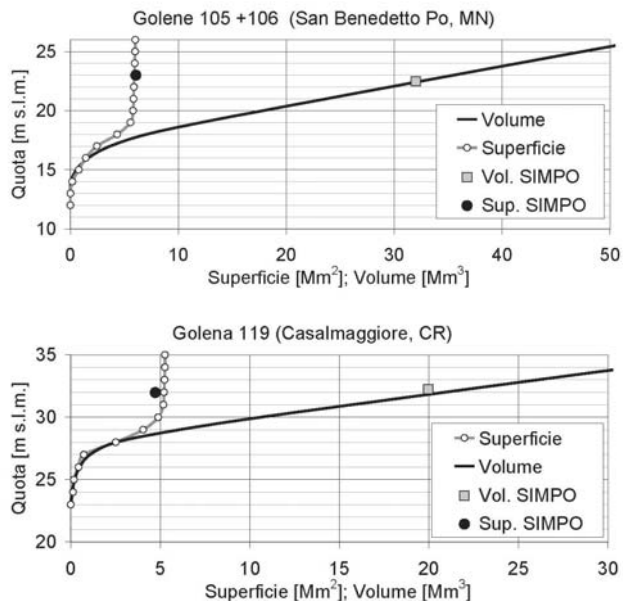


Fig. 4. Risultati delle analisi quantitative condotte su DTM e confronto con i dati desunti nel progetto SIMPO per le golene chiuse nelle località San Benedetto Po e Casalmaggiore.

re il più possibile l'inserimento di elementi di soggettività nella schematizzazione della morfologia del corso d'acqua. L'obiettivo è stato infatti quello di pervenire ad un modello che, pur adottando le approssimazioni caratteristiche della classe di modelli quasi-bidimensionali, fornisca una rappresentazione fedele della geometria del sistema fluvio-golenale, contenendo nel contempo il numero di parametri che necessitano di taratura. Inoltre, viste le finalità del presente studio e l'ampiezza della scala spaziale di riferimento, si è scelto di non rappresentare nel modello le strutture interferenti con il corso d'acqua, quali ad esempio attraversamenti viari e ferroviari, opere di regolazione, opere trasversali, ecc.

Ove possibile, la morfologia del corso d'acqua è stata descritta estraendo l'informazione planaltimetrica direttamente dal DTM. Nel modello sono state rappresentate esclusivamente sezioni trasversali di Po aventi traccia planimetrica coincidente con quella delle sezioni trasversali di normale riferimento, vale a dire le cosiddette sezioni Brioschi (CORATZA, 2005), in maniera da agevolare l'eventuale confronto dei risultati ottenuti nel presente studio con quelli relativi a studi precedenti che, non disponendo del DTM, facevano necessariamente riferimento a tali sezioni. La geometria delle sezioni utilizzate è stata comunque desunta dal DTM. In alcuni casi particolari però, le tracce planimetriche di alcune delle sezioni estratte dal DTM e schematizzate nel modello differiscono in parte dalle tracce delle corrispondenti sezioni Brioschi. I motivi

principali di tale discrepanza sono così sintetizzabili: 1) la traccia planimetrica della sezione Brioschi non era ortogonale alla direzione media della corrente, come invece richiesto per una corretta schematizzazione 1D (Di BALDASSARRE *et al.*, 2006); 2) la traccia planimetrica interessava una o più golene chiuse; 3) due tracce planimetriche presentavano un punto di intersezione; 4) la traccia della sezione interessava solo l'alveo inciso senza estendersi fino agli argini maestri. In questi casi si sono operate rotazioni o roto-traslazioni delle tracce planimetriche della sezione, troncamenti o anche rimozioni delle sezioni veicolanti informazioni ridondanti. La figura 5, attraverso un esempio relativo alla golena di San Benedetto Po (MN), illustra alcuni dei punti elencati precedentemente. La figura mostra le golene chiuse e la parte di alveo che partecipa attivamente al deflusso fluviale (alveo principale e golene aperte, identificate dalle sponde: tratto grigio spesso), descritta attraverso le sezioni trasversali estratte dal DTM.

Il comportamento idraulico di ciascuna golena chiusa è stato schematizzato nel modello come una successione di stati idrostatici regolati dagli scambi di volumi idrici con l'alveo attivo (o con golene chiuse adiacenti) e dalla curva che descrive il volume idrico invasato in funzione della quota del pelo libero (Fig. 4).

Le golene chiuse sono collegate al corso d'acqua tramite l'inserimento nel modello di sfioratori laterali rappresentanti gli argini golenali, il cui sviluppo altimetrico è stato ricavato dal DTM. Anche i collegamenti idraulici tra golene chiuse adiacenti sono stati schematizzati rappresentando come sfioratori i tratti di argine golenale in comune tra le coppie di golene.

Taratura del modello matematico

Il modello numerico idraulico è stato calibrato con riferimento al recente evento di piena dell'ottobre 2000, in ragione della significatività di tale evento e della completezza delle osservazioni di piena disponibili. Si riportano di seguito solo alcuni elementi salienti dell'evento di taratura, rimandando per eventuali approfondimenti agli studi disponibili (CONSORZIO ITALCOPO, 2002; CORATZA, 2005).

La fase di taratura è stata finalizzata all'identificazione dei coefficienti distribuiti di resistenza al moto caratteristici delle diverse sezioni trasversali impiegate dal modello idraulico e differenziati tra alveo principale ed espansioni golenali aperte (Di BALDASSARRE *et al.*, 2006). I due valori di scabrezza caratteristici della generica sezione trasversale (alveo principale e golene aperte) sono stati mantenuti costanti all'interno di 9 tratti fluviali omogenei, identificati in accordo con lo studio SIMPO.

Come condizione al contorno di monte (idrometro di Isola Sant'Antonio, Alessandria, sez. Brioschi 00B1) si è adottato l'idrogramma di piena in termini di portata fornito da ARPA SIM - Piemonte. Come condizione di valle (idrometro di Pontelagoscuro), si è utilizzato l'idrogramma di piena in termini di livello desunto da ARPA SIM - Emilia Romagna. Informazioni sugli apporti idrici dei principali affluenti sono state infine reperite negli studi precedentemente citati. Detti apporti sono stati rappresentati come ingressi laterali concentrati.

L'identificazione del coefficiente di scabrezza lungo i 340 km circa di asta fluviale è stata finalizzata alla corretta riproduzione del comportamento idraulico dell'asta medio inferiore del Fiume Po per la piena del

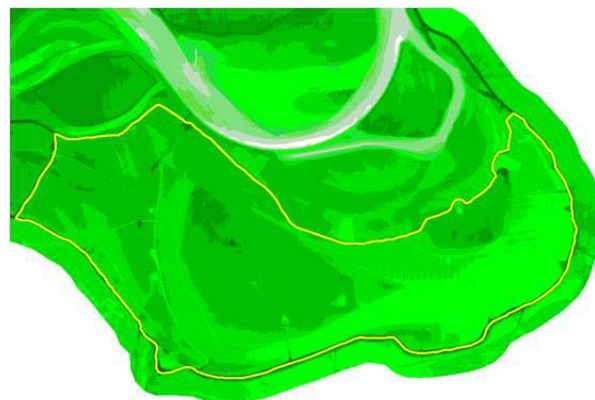
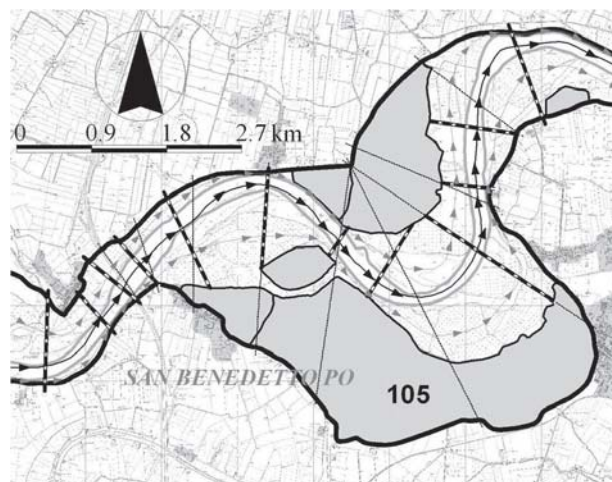


Fig. 5. Messa a punto del modello idraulico. A sinistra: golene chiuse (aree in grigio), tracce delle sezioni Brioschi (linee sottili) e di quelle estratte da DTM (linea tratteggiata spessa), argini maestri (linea nera spessa), alveo principale ed espansioni laterali con direzioni indicative di flusso. A destra: elemento del DTM per la stessa zona (golena di San Benedetto Po, MN).

2000, descritto in base a: *i*) idrogrammi di piena osservati in corrispondenza delle stazioni idrometriche disponibili e tracce di piena identificate a valle dell'evento; *ii*) dinamica di invaso delle golene chiuse (istanti di inizio invaso e tiranti idrici massimi); *iii*) valori di portata al colmo dell'evento, stimati per le sezioni idrometriche di riferimento (CONSORZIO ITALCOPO, 2002; CORATZA, 2005). Si sottolinea come i coefficienti di scabrezza del modello calibrato presentino differenze contenute sui 9 tratti omogenei, sia per l'alveo principale che per le golene aperte, risultando ovunque prossimi ai valori medi spaziali. Questi ultimi, ottenuti come media pesata in funzione della lunghezza del tratto, risultano pari a $0,04 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1/3}$ per l'alveo principale ed a $0,10 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1/3}$ per le golene aperte.

A titolo d'esempio, la figura 6 illustra, nel riquadro di sinistra, il confronto tra le onde idrometriche simulate e quelle osservate in corrispondenza dei sensori disponibili e, nel riquadro di destra, il confronto tra i valori di portata al colmo transitati durante l'evento e quelli simulati in base al modello. Dai risultati riportati si evince come la taratura abbia condotto a risultati che possono ritenersi più che soddisfacenti.

Simulazioni numeriche

Il modello numerico idraulico predisposto ha costituito lo strumento di analisi per la valutazione della capacità di laminazione del sistema fluvio-golenale del corso medio inferiore del Fiume Po. L'analisi si è concentrata sul tratto di asta fluviale compreso tra Cremona e Pontelagoscuro, di lunghezza pari a circa 190 km (Fig. 3). Tale tratto è composto da una porzione di monte (da Cremona a foce Mincio, ≈ 120 km) caratterizzata dalla presenza di ampie espansioni laterali. In tale tratto ricade la maggior parte delle golene chiuse presenti lungo l'asta fluviale del Po.

Nella restante porzione di valle del tratto fluviale considerato (da foce Mincio a Pontelagoscuro, ≈ 70 km) la morfologia dell'asta fluviale cambia sensibilmente, la larghezza delle espansioni laterali si riduce e, a valle delle località Revere-Ostiglia (MN), le golene difese sono praticamente assenti. Gli effetti di laminazione indotti in condizioni di piena dal sistema di golene chiuse sgravano, da un punto di vista della sollecitazione idraulica, proprio questo ultimo tronco (da Revere-Ostiglia a Pontelagoscuro, ≈ 55 km), che pertanto è stato assunto come riferimento nel valutare i possibili vantaggi offerti da diverse strategie di gestione del sistema di golene chiuse.

Le simulazioni condotte hanno preso a riferimento numerose configurazioni geometriche del sistema delle golene difese. Si elencano qui di seguito e si considerano nella parte restante della presente memoria solo tre di esse: lo stato attuale, così come desumibile dal DTM fornito da AdB-Po, e due configurazioni limite, in cui si ipotizzano interventi sulle arginature golenali, che ben si prestano ad affrontare e discutere il problema del miglioramento della capacità di laminazione del Fiume Po all'interno delle arginature maestre. Le tre configurazioni delle arginature golenali (AG) sono infatti le seguenti:

- AG2005: sistema di arginature golenali attuali, come da DTM 2005 dell'AdB-Po;
- AGMod: quota della sommità degli argini golenali invariata rispetto alla AG2005 in tutti i casi in cui la differenza di quota tra l'argine golenale ed il corrispondente argine maestro è inferiore a 1m. Nei casi restanti, sommità degli argini golenali innalzata rispetto alla AG2005 fino ad avere una differenza in quota tra argini golenali e argini maestri indicativamente pari ad 1m; come è noto, in base ad una regolamentazione adottata dall'AIPO, è questa la

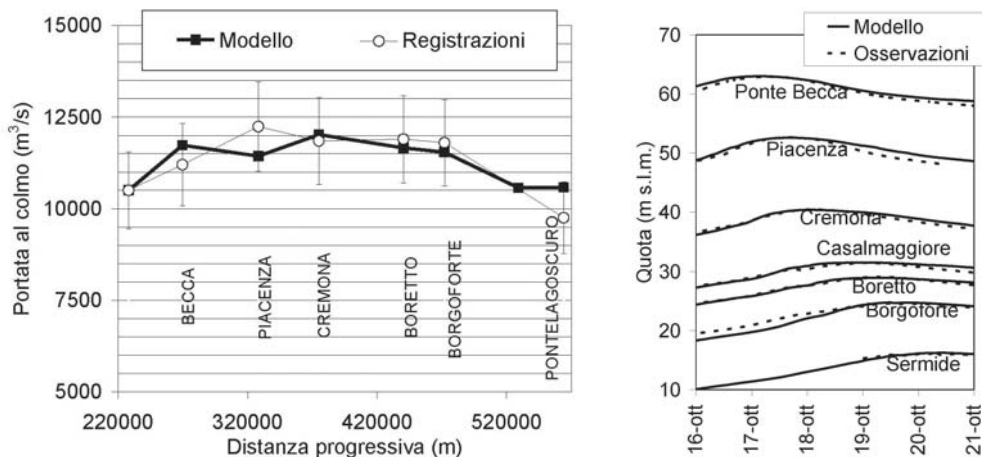


Fig. 6. Risultati della taratura del modello: confronto tra gli idrogrammi osservati e simulati (sinistra) e tra i valori di portata al colmo simulati e registrati con indicazione della fascia di incertezza ($\pm 10\%$), a destra.

minima differenza in quota possibile tra argini maestri ed argini golenali;

- *NoAG*: sommità delle arginature golenali portata alla quota del piano golenale (trasformazione delle golene chiuse in golene aperte).

Riguardo alle sollecitazioni idrologiche da utilizzare nell'indagine in corrispondenza della sezione di monte (idrometro di Cremona), è evidente che i risultati di un'analisi numerica quale quella sviluppata dal presente studio sono necessariamente legati al particolare evento di piena scelto. Dato l'obiettivo generale dello studio, l'attenzione si è concentrata su due eventi di piena sintetici particolarmente gravosi, identificati nell'ambito di alcuni dei principali studi del comportamento idraulico, in condizioni di piena, del corso medio inferiore del Po. Il primo dei due idrogrammi considerati, ONDA2, definito nell'ambito dello studio SIMPO, deriva dalla maggiorazione del 5% dell'idrogramma, espresso in termini di portata, ricostruito per l'evento di piena del 1951. Invece, il secondo idrogramma, TR = 200, definito nell'ambito dello studio DIAR (2001) prendendo a riferimento un tempo di ritorno duecentennale, ha un chiaro significato statistico ed è stato desunto applicando alle serie storiche disponibili per l'idrometro di Cremona la metodologia per la costruzione di idrogrammi sintetici associati ad un prefissato tempo di ritorno descritta ad es. in MAJONE *et al.* (2000). La figura 7 confronta gli idrogrammi di riferimento sintetici considerati nello studio con l'idrogramma relativo all'evento di piena dell'ottobre 2000; nel riquadro di destra vengono anche riportati i volumi ideali di laminazione, ovvero i volumi che sarebbe necessario invasare nel caso ideale di decapitazione con taglio orizzontale delle onde di piena per ottenere una lami-

nazione degli idrogrammi fino a valori prefissati di portata al colmo. Si nota dalla figura 7 che per laminare l'onda di piena dell'ottobre 2000, il cui valore di colmo è risultato pari a $11850 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, fino ad un valore di colmo di $10000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, sarebbe necessario invasare, nel caso di laminazione ideale, un volume di 81 Mm^3 . Invece, per laminare l'onda TR = 200, il cui colmo è pari a $13456 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, fino ad un valore di colmo dell'onda dell'ottobre 2000 ($11850 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), che il sistema fluvio-golenale attuale è risultato in grado di veicolare, sarebbe necessario un volume di invaso di 143 Mm^3 che salgono a 219 per L'ONDA2, il cui colmo è pari a $14207 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Il confronto tra questi valori e l'effettiva disponibilità di invaso del sistema delle golene difese di Po nella configurazione attuale evidenzia come quest'ultimo possa costituire una risorsa di grande valore nella mitigazione del rischio alluvionale; è evidente peraltro che tale confronto ha solo un valore indicativo, in quanto da un lato l'effetto di laminazione nella realtà ha caratteristiche ben diverse dal caso ideale, dall'altro il sistema reale è costituito da un insieme di invasi distribuiti lungo l'alveo, con caratteristiche di funzionamento quindi ben diverse da quelle di un unico invaso.

Tutte le simulazioni effettuate presuppongono assenza di apporti idrici laterali lungo il tratto di asta fluviale considerato ed adottano come condizione al contorno di valle (sezione idrometrica di Pontelagoscuro) la scala di deflusso di moto permanente ottenuta considerando una cadente idraulica valutata come valor medio tra la pendenza media di fondo sui 10 km d'asta a monte di Pontelagoscuro ed il rapporto tra l'altezza sul livello del medio mare del coronamento arginale a Pontelagoscuro e la distanza tra Pontelagoscuro e la foce.

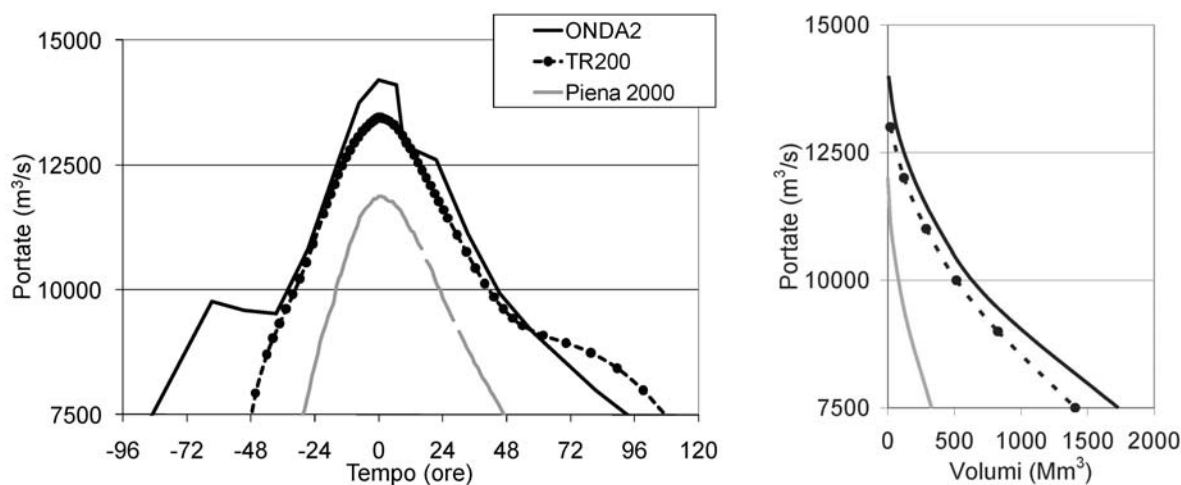


Fig. 7. Idrometro di Cremona: sollecitazioni idrologiche di riferimento a confronto con l'onda di piena dell'ottobre 2000 (idrogramma in termini di portata e volumi di laminazione ideali).

DISCUSSIONE DEI RISULTATI

La figura 8 propone un confronto tra alcuni dei risultati ottenuti attraverso le simulazioni numeriche, condotte con riferimento all'ONDA2, per le tre configurazioni geometriche degli argini golenali prese in esame. La figura confronta gli idrogrammi simulati alla sezione di Pontelagoscuro in termini di portata e di livello idrometrico. Nel caso delle portate, si riporta anche l'onda di piena sintetica utilizzata come condizione al contorno di monte in corrispondenza della sezione di Cremona.

La figura 8 mostra come, durante la parte iniziale dell'evento corrispondente a portate a Cremona inferiori a 10000 m³.s⁻¹, l'onda sia sensibilmente attenuata nella sezione di valle, eccetto che nel caso NoAG (assenza di arginature golenali), a causa dell'invaso parziale del sistema di golene chiuse. Questa considerazione, unitamente al confronto tra i risultati ottenuti per gli scenari AG2005 (geometria degli argini golenali da DTM 2005) e AGMod (arginature golenali modificate) mostra come per queste due configurazioni geometriche parte dei volumi disponibili all'interno del sistema di golene venga utilizzato per trattenere volumi di piena associati a portate ancora relativamente basse. Evidentemente, detti volumi sono maggiori per lo scenario AG2005, caratterizzato da argini golenali di altezza pari o inferiore a AGMod. La conseguenza macroscopica alla sezione di Pontelagoscuro è un andamento delle portate nel tempo per lo scenario AG2005 inferiore a quello di AGMod fino a portate prossime a 10000 m³.s⁻¹, mentre per portate superiori si osserva invece un'inversione del comportamento fino all'istante del colmo di piena ed oltre. Conseguentemente, alla sezione di Pontelagoscuro il valore del tirante idrico massimo ottenuto per AGMod è inferiore a quello relativo alle altre due geometrie. Considerazioni analoghe valgono per le simulazioni relative all'onda di piena con TR = 200.

La tabella I sintetizza i risultati ottenuti in base all'insieme di simulazioni condotte. Allo scopo si riporta la differenza media nel tratto compreso tra la Reve-

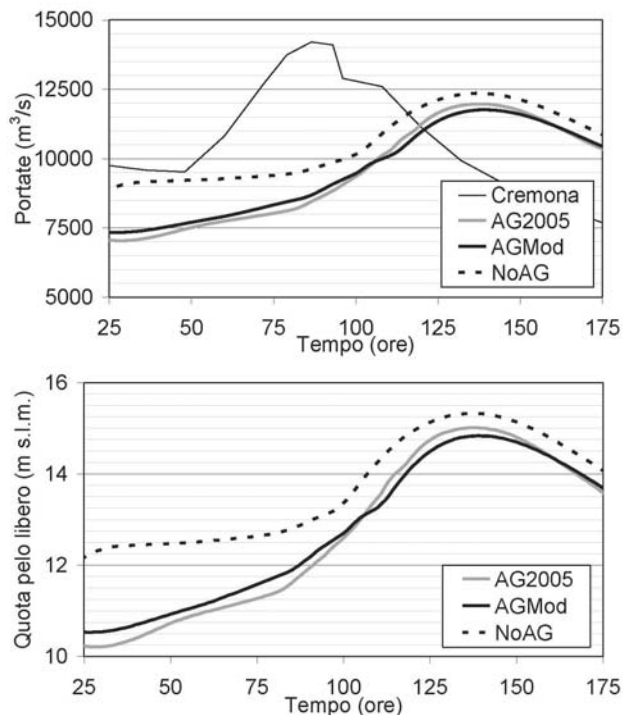


Fig. 8. Simulazioni numeriche: risultati ottenuti in termini di idrogrammi e livelli idrometrici di piena alla sezione di Pontelagoscuro con riferimento alla sollecitazione idrologica ONDA2.

re-Ostiglia (MN) e Pontelagoscuro (ed il valor massimo con valenza locale) delle quote del profilo di piena, definito come involucro delle quote idriche massime ottenute per le diverse sezioni trasversali utilizzate nel modello. Il confronto tra i risultati delle simulazioni associate a AG2005 e NoAG permette di quantificare la variazione della capacità di laminazione del sistema golenale del Fiume Po nell'ipotesi, ovviamente puramente teorica, di rimozione delle arginature golenali esistenti, o, in maniera del tutto equivalente, di quantificare l'incremento della capacità di laminazione all'interno delle arginature maestre associata alla presenza del sistema di golene difese. Dai valori riportati in

Tab. I. Sintesi dei risultati delle simulazioni numeriche: differenze altimetriche dei profili di piena simulati tra la configurazione delle arginature golenali attuale (AG2005), lo scenario con golene indifese (abbattimento delle arginature golenali-NoAG) e l'innalzamento delle arginature fino ad 1 m al di sotto delle arginature maestre (AGMod).

Variazioni del livello idrometrico nel tratto Revere-Ostiglia, MN – Pontelagoscuro, FE (≈ 55km)		
Onda di piena	Configurazione argini golenali	
	NoAG rispetto a AG2005	AGMod rispetto a AG2005
ONDA2	medio: + 27 cm (max: + 33 cm)	medio: - 15 cm (max: - 18 cm)
TR200	medio: + 36 cm (max: + 44 cm)	medio: - 10 cm (max: - 14 cm)

tabella si può osservare quanto negativa risulterebbe, in termini di massimi livelli idrici simulati, l'ipotesi di apertura delle golene chiuse per entrambe le onde di piena considerate.

Il confronto tra i risultati ottenuti per AG2005 e AGMod permette, invece, la quantificazione dell'incremento della capacità di laminazione del sistema fluvio-golenale del Po in condizioni di piena qualora venga adottata una diversa politica di gestione delle arginature golenali. Va rilevato che la geometria AGMod fa volutamente riferimento ad una politica di intervento semplice, che adotta un criterio uniforme sull'intero tratto d'asta considerato (ovvero il rialzo di tutte le arginature golenali che abbiano sommità inferiore ad una quota identificata con riferimento alle arginature maestre). È evidente che una differenziazione più articolata del criterio di intervento sul tratto di interesse (differenziazione del criterio di individuazione della quota arginale per le diverse golene chiuse, inserimento di elementi fusibili, ecc.) potrebbe portare a risultati migliori in termini di laminazione dell'evento di piena di riferimento.

Tale considerazione trova sostegno negli esiti dell'analisi dei possibili benefici in termini di riduzione dei massimi tiranti idrici ottenibili nel caso di funzionamento ideale del sistema di golene chiuse. Ipotizzando una laminazione a carattere ideale, che corrisponde alla situazione ovviamente teorica di massima del volume golenale disponibile (stimato in circa 500 Mm³), i livelli simulati nel tratto Ostiglia-Pontelagoscuro evidenziano infatti una netta riduzione dei massimi livelli idrometrici. I risultati di tali analisi sono compendati nella figura 9.

In tale figura, con riferimento all'onda di piena TR200, sono riassunti i risultati ottenuti lungo il tratto di Po Revere-Ostiglia-Pontelagoscuro in base alle simulazioni svolte. La figura mostra la differenza tra i massimi valori della quota del pelo libero relativo alla situazione attuale (AG2005 – linea grigia continua) e quelli relativi al caso di rimozione degli argini golenali (No-AG, linea nera tratteggiata; beneficio negativo) o al caso di adeguamento in quota degli stessi (AGMod, linea grigio scuro). La figura 9 riporta inoltre i risultati di un'ulteriore simulazione che schematizza la laminazione che, in uno scenario del tutto ipotetico, si potrebbe ottenere a valle di Revere-Ostiglia disponendo, proprio in località Revere-Ostiglia, di un unico vaso di laminazione avente volume utile pari al volume del complesso di golene chiuse del corso medio-inferiore del Po (linea con circoletti).

Si ricorda che tale simulazione fa riferimento ad uno scenario puramente teorico; tuttavia essa consente di ottenere una prima indicazione, anche se di larga massima, sulla consistenza dei possibili margini di miglio-

ramento che potrebbero essere conseguiti nel caso di una ottimizzazione della gestione del sistema esistente di golene difese, ai fini della laminazione delle piene del Fiume Po.

Come mostrato in figura 9, lo scenario AGMod (linea nera) conduce a benefici limitati, che risultano essere ben lontani da quelli ipotetici di laminazione teorica (linea con circoletti). Per avvicinarsi maggiormente al risultato teorico (linea con circoletti) sarebbe necessario effettuare una differenziazione del criterio di intervento, golena per golena, rispetto al caso di un unico criterio di intervento, quale quello considerato in AGMod. È altresì evidente che tale analisi travalica gli scopi e le finalità del presente studio, nel quale si è dovuto invece fare riferimento ad un criterio necessariamente semplificato, vista l'ampiezza della scala spaziale di interesse (intero corso medio inferiore del Fiume Po).

STUDIO DI SCENARI DI LAMINAZIONE CONTROLLATA DELLE PIENE AL DI FUORI DELLE ARGINATURE MAESTRE ATTRAVERSO LA MODELLISTICA MATEMATICA BIDIMENSIONALE

Come già indicato, le linee progettuali strategiche per il miglioramento delle condizioni di sicurezza idraulica dei territori di pianura lungo l'asta medio-inferiore del Fiume Po, individuate da parte dell'Autorità di Bacino del Fiume Po, evidenziano, oltre alla necessità di potenziare la laminazione all'interno delle aree golenali, anche l'opportunità di studiare attentamente le possibilità di laminazione all'esterno delle arginature maestre delle piene di tempo di ritorno sensibilmente superiore a quello di progetto del sistema arginale. Tale studio si dovrebbe concretizzare nell'individuazione di apposite porzioni della fascia C (comparti), opportunamente scelte

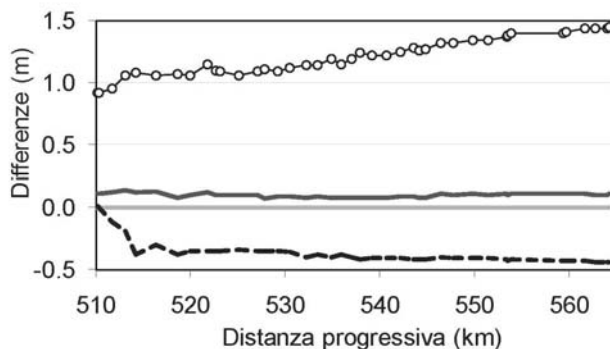


Fig. 9. Simulazioni numeriche: risultati ottenuti in termini di differenze nei massimi livelli idrometrici di piena riprodotti lungo il tratto Ostiglia-Pontelagoscuro con riferimento alla sollecitazione idrologica TR200. Linea grigia continua: AG2005-argini attuali; linea nera tratteggiata: No-AG – assenza di argini golenali; linea grigio scuro: AGMod; linea con circoletti: laminazione teorica.

e convenientemente attrezzate all'uso, in cui provocare la tracimazione controllata di una parte del deflusso di piena, in modo da sgravare l'asta a valle.

L'implementazione di tecniche per la laminazione controllata delle piene con tempo di ritorno molto elevato all'esterno delle arginature maestre può realizzarsi combinando interventi strutturali con interventi non strutturali. Fra tali interventi vanno citati in primo luogo quelli di consolidamento locale dei tratti del rilevato arginale maestro che dovranno essere interessati dalla tracimazione controllata, prevedendo interventi di consolidamento e rivestimento, al fine di escludere la possibilità di una rottura dell'arginatura nel corso dell'inondazione controllata. In secondo luogo possono essere previsti altri interventi strutturali e misure non strutturali specifiche, come l'adattamento dell'uso del suolo per ridurre la vulnerabilità delle aree potenzialmente interessate da inondazione controllata, ed il potenziamento del reticolo idrografico minore e/o artificiale per la gestione ottimale del post evento ed il rapido recupero delle aree di campagna eventualmente interessate dall'inondazione.

In questo contesto, assume notevole importanza lo studio della dinamica di allagamento delle aree destinate allo spagliamento delle piene e la costruzione di mappe della pericolosità idraulica delle aree medesime. Nella memoria, si presentano sia una metodologia innovativa per la mappatura della pericolosità idraulica, attraverso la quale vengono analizzati gli effetti indotti dalla presenza di una struttura idraulica che consente l'inondazione controllata al di fuori delle arginature (DI BALDASSARRE *et al.*, 2009), sia un confronto preliminare delle modalità di allagamento di un'area di pianura nel caso di collasso arginale o nell'ipotesi di tracimazione controllata dell'arginatura maestra. Obiettivo principale di quest'ultimo confronto è quello di mettere in evidenza quanto radicalmente differiscano fra loro, in termini di dinamiche di allagamento, la tracimazione controllata di volumi di piena preventivamente prestabiliti al fine di massimizzare la laminazione dell'onda di piena di riferimento e l'esondazione incontrollata conseguente alla formazione di una breccia arginale. Nel primo caso, infatti, la tracimazione avviene attraverso un tratto di argine consolidato la cui geometria è stata dimensionata per permettere di decapitare in maniera ottimale l'onda di piena di riferimento, disponendo di un certo volume di invaso utile all'interno dell'area interessata dall'esondazione. Nel secondo caso, invece, l'allagamento della stessa area avviene in seguito alla formazione di una breccia incontrollata, le cui caratteristiche geometriche sono state ipotizzate assumendo come riferimento quelle medie dell'insieme di brecce arginali storicamente documentate per il Fiume Po (GOVI e TURITTO, 2000).

Codice di calcolo

Nel presente studio la simulazione della dinamica di allagamento su terreno inizialmente asciutto è stata condotta attraverso l'utilizzo di un modello agli elementi finiti puramente bidimensionale di tipo completo (GALLAND *et al.*, 1991). Il codice di calcolo utilizzato risolve le equazioni del moto vario bidimensionale con una tecnica agli elementi finiti (HERVOUET e VAN HAREN, 1996). La risoluzione nel tempo è ottenuta con una tecnica alle differenze finite sviluppata secondo la teoria dei passi frazionari (MARCHUK, 1975).

L'utilizzo della tecnica agli elementi finiti è stata ampiamente validata in numerosi studi riportati in letteratura scientifica (BATES e ANDERSON, 1993; BRATH *et al.*, 2001; HORRITT *et al.*, 2007). Tale tecnica presenta il vantaggio di fondarsi su una *mesh* di calcolo di tipo non strutturato; ne consegue che la *mesh* può essere opportunamente raffittita al fine di rappresentare accuratamente l'andamento curvilineo dell'alveo inciso e di descrivere gli elementi che determinano importanti variazioni di quota localizzate (ad es. argini, rilevati stradali e ferroviari, escavazioni). Inoltre, dato che i modelli puramente 2D si fondano su griglie di calcolo che coprono l'intero sistema fluvio-golenale, assume notevole importanza l'abilità del modellista per la scelta delle dimensioni ottimali della griglia di calcolo in funzione della qualità del risultato desiderato, della stabilità del modello e dell'ottimizzazione dei tempi di calcolo. Per contro non è richiesto uno sforzo pre-interpretativo sul comportamento idrodinamico del sistema fluvio-golenale, come avviene invece nel caso dei cosiddetti modelli quasi-2D (BRATH e DI BALDASSARRE, 2006).

Caso di studio 1

Mappatura della pericolosità idraulica

L'area di interesse nel primo caso di studio ha un'estensione pari a 270 km² ed è prospiciente un tratto di 28 km del Fiume Reno. Essa è delimitata dai rilevati della strada SS 255 e della linea ferroviaria Bologna-Venezia, dagli argini in sinistra del Fiume Reno ed in destra del Fiume Po Morto di Primaro. Nel tratto di Fiume Reno in esame è presente uno sfioratore laterale, lo sfioratore del Gallo. Detta struttura idraulica, localizzata a Gallo di Poggio Renatico (FE), in corrispondenza di un tratto di argine maestro sinistro interessato da tre distinte rotte nel 1949, 1950 e 1951, ha la finalità di decapitare gli eventi di piena più intensi (AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME RENO, 1998 e 2002). Lo sfioratore è realizzato con un abbassamento locale del rilevato arginale, di lunghezza pari a 100 m, opportunamente rivestito. Esso consente quindi prelievi di volumi di piena mediante una tracimazione controllata dell'arginatura maestra.

L'analisi sugli effetti dell'inondazione controllata fuori

dalle arginature maestre è stata condotta costruendo e mettendo a confronto fra loro due mappe della pericolosità idraulica: una prima mappa che trascura la presenza dello sfioratore del Gallo e ipotizza un sistema arginale regolare e continuo; una seconda mappa, che considera invece la presenza dello sfioratore e la conseguente inondazione controllata (DI BALDASSARRE *et al.*, 2008; 2009). Nella prima delle due ipotesi, la simulazione monodimensionale condotta lungo il tratto del Fiume Reno dell'evento di piena sintetico di riferimento con TR = 100 anni (AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME RENO, 1998) ha evidenziato che l'intero sistema arginale attuale è in condizione di forte sofferenza idraulica, essendo diffusamente soggetto a tracimazione. Tale criticità determina una condizione in cui gli argini potrebbero essere sormontati in qualsiasi punto lungo l'asta modellata e rende di fatto non identificabile a priori la localizzazione della zona di tracimazione. In assenza di tale informazione si sono considerati 30 diversi punti, uniformemente distribuiti lungo il tratto di studio, come potenziali punti di tracimazione.

Analoghe condizioni di indeterminazione ed aleatorietà si riscontrano nella definizione delle caratteristiche geometriche caratterizzanti la breccia che si origina a seguito della tracimazione arginale ipotizzata. A tal proposito, una breccia nel rilevato arginale può essere definita sulla base di quattro parametri: l'ubicazione lungo l'asta fluviale, X (m); la larghezza complessiva, B (m); l'entità del suo approfondimento rispetto alla sommità arginale, Z (m); il tempo di formazione a partire dall'istante di sormonto, T (ore). Onde evitare elementi di soggettività inevitabilmente associati alla scelta di una particolare conformazione geometrica della rotta, l'approccio adottato nella definizione di tali parametri (DI BALDASSARRE *et al.*, 2008), è stato basato su un'elaborazione di tipo statistico (metodo Monte Carlo) mediante la realizzazione di 200 casuali combinazioni dei parametri B , Z ed T , fatti variare entro specifici limiti riportati in letteratura relativamente alle rotte storiche negli argini del Fiume Po (GOVI e TURITTO, 2000).

Sono stati in tal modo studiati un numero complessivo di 6000 scenari fra loro differenti per le caratteristiche della breccia (30 differenti posizioni previste per la breccia per 200 terne di B , Z e T). Gli idrogrammi scolmati (andamento nel tempo delle portate esondate) sono stati quindi elaborati statisticamente al fine di estrarre 3 curve rappresentative, associate ad una probabilità di non superamento pari al 25, 50 e 75 % dei casi. Gli idrogrammi percentile così ottenuti, sintetizzanti i fenomeni di tracimazione e rotta ed i corrispondenti sfiori al manufatto del Gallo, sono stati adottati come sollecitazioni in input nel modello 2D, che simula i fenomeni di allagamento nel comparto

idraulico oggetto del presente studio.

Nella seconda delle due configurazioni descritte in precedenza, la presenza di uno sfioratore libero in località Gallo (FE) consente l'inondazione controllata dell'area analizzata nel presente studio. Tale soglia di sfioro, permettendo il prelievo controllato di un volume di piena durante l'evento di riferimento consente di sgravare il tratto vallivo del Fiume Reno di parte dei volumi idrici, consentendo, a valle dello sfioratore, di veicolare in condizioni di sicurezza l'evento di riferimento con l'attuale assetto del sistema arginale. Appare ovvio come in questa configurazione un eventuale sormonto del coronamento arginale possa avvenire solo nel tratto posto a monte del Gallo, limitando l'estensione del tratto arginale in sofferenza. Le modellazioni delle dinamiche di allagamento nel comparto di studio mediante simulazione bidimensionale si sono pertanto limitate, in questo caso, all'esame di 10 diversi possibili scenari. Sono stati allo scopo identificati 10 possibili differenti punti di sormonto e conseguente formazione di rotta arginale, valutando nel contempo il corrispondente efflusso (in alcuni casi nullo) dallo sfioratore del Gallo.

L'elaborazione mediante modellistica 2D degli eventi di allagamento all'interno dell'area di riferimento ha reso possibile riprodurre l'estensione dell'area inondata nei vari casi, nonché valutare l'altezza di acqua attesa (WD_i) e la velocità scalare attesa (SV_i), per ciascun punto i -esimo dell'area oggetto del presente studio:

$$WD_i = \sum_{j=1}^{NS} X_j WD_{i,j} \quad (1)$$

$$SV_i = \sum_{j=1}^{NS} X_j SV_{i,j} \quad (2)$$

dove NS è il numero complessivo di simulazioni 2D, $WD_{i,j}$ e $SV_{i,j}$ sono i valori massimi dell'altezza di acqua e velocità nel punto i ottenuti nella simulazione j , mentre X_j sono i pesi della simulazione j , funzione della probabilità di accadimento della simulazione stessa, valutata in base alla localizzazione ed alle caratteristiche della relativa breccia (dimensioni e tempi di formazione). La mappatura della pericolosità idraulica è stata condotta classificando la pericolosità in 5 classi (da R1 a R5, Fig. 10) con relazioni altezza-velocità-pericolosità analoghe a quelle riportate nell'ACER Technical Memorandum No. 11 (1988).

Mediante elaborazione in ambito GIS dei risultati emersi dall'applicazione delle eq. (1) e (2) nelle varie simulazioni è stata ottenuta una prima mappa della pericolosità idraulica relativamente all'ipotesi di un sistema arginale che, assumendo assente lo sfioratore in realtà presente in località Gallo, risulta caratterizzato da omogenee condizioni di criticità al sormonto (Fig.

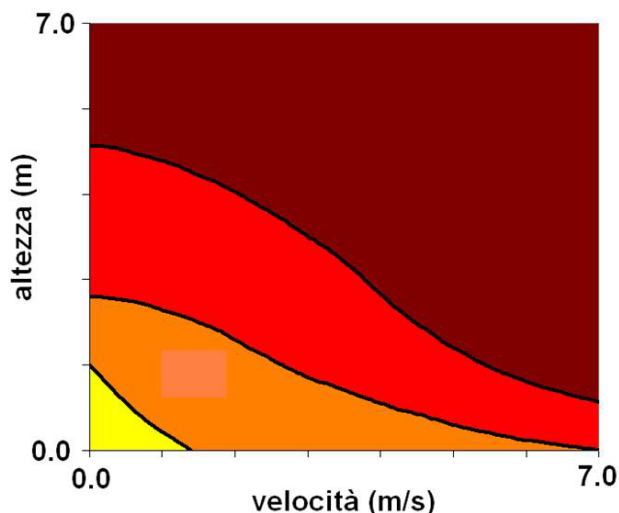


Fig. 10. Esempio di possibile relazione altezza d'acqua (m) – velocità (m s^{-1}) – pericolosità idraulica (hazard) utilizzabile per definire le varie classi di pericolosità.

11a). In Figura 11b è riportata invece la medesima elaborazione delle grandezze sopra descritte ma nell'ipotesi di presenza dell'opera di sfioro arginale.

L'analisi dei risultati mostra in primo luogo che, nell'ipotesi di un sistema arginale regolare, cioè prescindendo dalla presenza dello sfioratore del Gallo, la pericolosità idraulica sarebbe all'incirca omogeneamente distribuita sull'intera area di studio (Fig. 11a). Tale risultato è in linea con quanto atteso, ove si consideri che, in un territorio difeso da un sistema arginale regolare e continuo e progettato con riferimento al medesimo tempo di ritorno, in occasione di un evento di piena avente tempo di ritorno superiore a quello di progetto, tutta l'area difesa dalle arginature ha, almeno in teoria, la medesima probabilità di allagamento. Vis *et al.* (2003) definiscono questa condizione come quella di una indesiderabile “roulette russa”.

Nel caso in cui si consideri la presenza dello sfioratore del Gallo, la pericolosità idraulica risulta invece più concentrata (Fig. 11b). In particolare, la pericolosità idraulica è maggiore nella zona depressa prossima al centro dell'area di studio, dove tuttavia essa sarebbe elevata anche con un sistema arginale regolare e continuo (Fig. 11a). L'analisi svolta consente quindi di fare alcune prime considerazioni sugli effetti dell'inondazione controllata: la pericolosità idraulica diminuisce nella maggior parte dell'area difesa dalle arginature e si concentra su una porzione più ridotta di territorio.

L'effetto benefico dell'inondazione controllata sulla distribuzione della pericolosità idraulica è evidenziato anche osservando la localizzazione degli impianti industriali (Fig. 11): con un sistema arginale regolare molti di essi ricadrebbero in aree aventi livello di pericolosità R2, mentre, grazie all'inondazione controllata, tutti gli

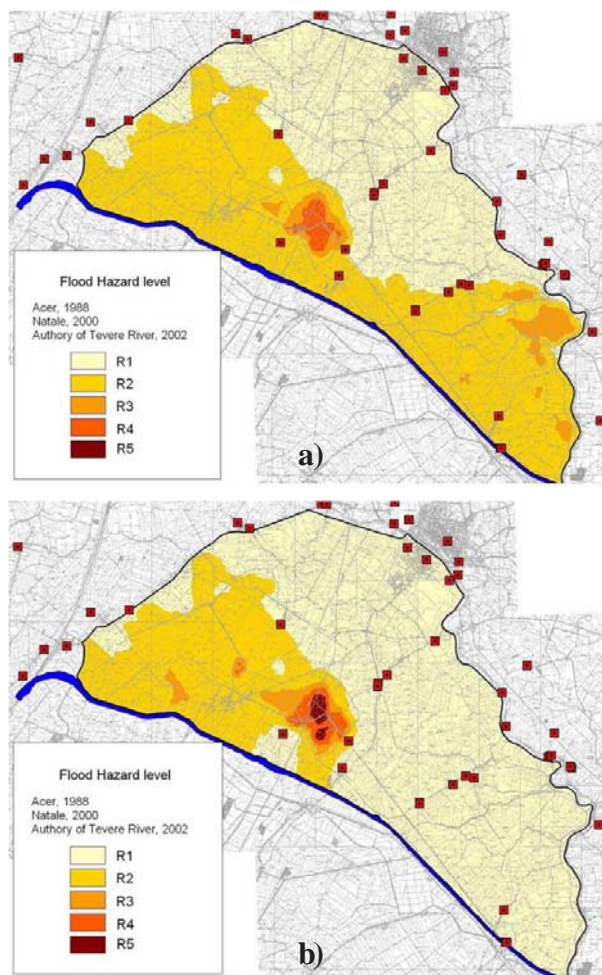


Fig. 11. Mappatura della pericolosità idraulica (hazard level) del Fiume Reno in località Gallo (FE): a) ipotesi di sistema arginale regolare; b) presenza dello sfioratore del Gallo. Localizzazione dei principali impianti industriali (indicatori quadrati).

impianti sono localizzati in zone non interessate da inondazione nel corso delle simulazioni effettuate (R1). I risultati ottenuti, pur inevitabilmente legati al caso di studio analizzato, evidenziano come un opportuno utilizzo dell'inondazione controllata al di fuori delle arginature maestre possa essere un efficace intervento di difesa idraulica dei territori vallivi per gli eventi di piena caratterizzati da un tempo di ritorno superiore a quello di progetto del sistema difensivo nel suo complesso.

Caso di studio 2

Dinamiche di allagamento in area golenale

Il secondo caso di studio che si presenta è relativo al comportamento idraulico in situazioni di piena del tratto meandriforme del Fiume Po localizzato in prossimità dell'abitato di Calendasco (PC), poco a monte della città di Piacenza. In corrispondenza di tale me-

andro, sulla base delle indicazioni del PAI dell'Autorità di Bacino del Fiume Po, è in corso di valutazione da parte di AIPO la possibilità di realizzazione di un argine maestro in destra idraulica arretrato verso campagna rispetto alla posizione attuale, con conseguente trasformazione dell'attuale argine maestro destro in argine golenale e dell'area in destra idraulica attualmente interclusa dal meandro in una golena chiusa (Fig. 12a).

Anche in questo caso, attraverso un sofisticato modello matematico-idraulico bidimensionale agli elementi finiti per la modellazione dei fenomeni di allagamento, si sono condotte numerose simulazioni in condizioni di moto vario, per meglio comprendere (a) le dinamiche di allagamento dei territori di pianura in occasione di eventi di piena particolarmente significativi che possono produrre la tracimazione del rilevato arginale, (b) il comportamento idraulico del tratto fluviale meandriforme e (c) le modalità di allagamento dei territori posti in destra idraulica, in corrispondenza del meandro del Fiume Po (Fig. 12a).

Le informazioni territoriali relative all'area di studio sono estratte dal modello digitale delle quote del terreno (DTM) delle aree appartenenti alle Fasce A e B del Fiume Po, con risoluzione 2 m, costruito a partire da un rilievo topografico aereo con tecniche laser-scanning (LiDAR) per la porzione emersa dell'alveo fluviale, integrato da un rilievo batimetrico per la parte sommersa e da una serie di sezioni topografiche rilevate in maniera tradizionale (CAMORANI *et al.*, 2006). L'adozione di tecniche di modellazione completamente 2D permette di considerare l'insieme alveo principale-golene chiuse come un'unica area di modellazione all'interno della quale non si adotta alcuna schematizzazione concettuale, lasciando che il deflusso della corrente idrica, in condizioni di piena, si indirizzi in funzione della conformazione altimetrica del terreno e dei gradienti idraulici. La *mesh* di calcolo in questo caso riproduce completamente la struttura arginale che attualmente protegge i territori del meandro, permettendo l'esonazione lato campagna solo nel caso in cui i livelli superino le quote della sommità arginale. In figura 12b è riportata la *mesh* di calcolo complessiva adottata nelle simulazioni e relativa ad un tratto di Fiume Po, in prossimità di Calendasco, e ad una porzione di territorio esterno alle arginature, posto in destra idraulica. La *mesh*, costituita da 7.474 nodi e 14.494 elementi, risulta dalla combinazione di una *mesh* "non strutturata", costituita da elementi di dimensione variabile (HORRIT *et al.*, 2002; DI BALDASSARRE *et al.*, 2006) con una *mesh* "strutturata" adottata per la modellazione del rilevato arginale (Fig. 12c).

Con riferimento alle tematiche analizzate nella pre-

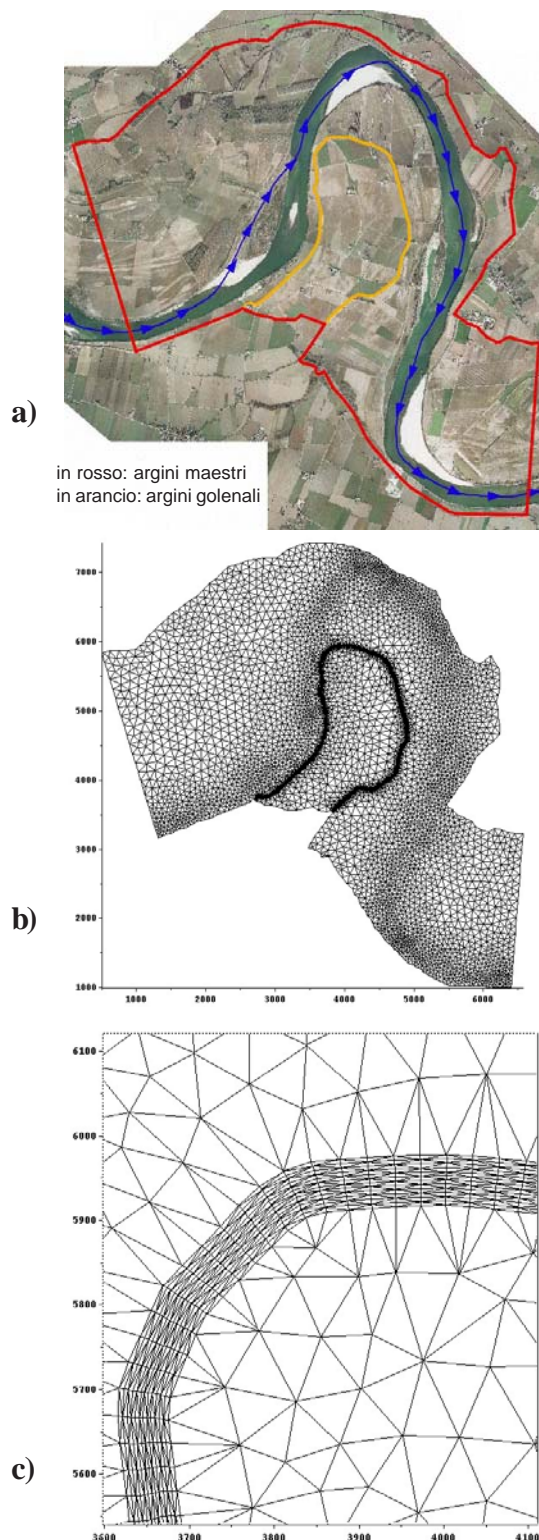


Fig. 12. Fiume Po a Calendasco (PC): a) Ortofoto della zona di studio ; b) Mesh di calcolo agli elementi finiti triangolari adottata negli scenari di allagamento; c) Particolare della *mesh* strutturata per la riproduzione della struttura arginale.

sente memoria, in merito alla laminazione al di fuori delle arginature maestre degli eventi di piena al limite della prevedibilità, si sono volute indagare le dinamiche di allagamento riscontrabili nell'area d'indagine, mettendo a confronto due possibili scenari: il primo facente riferimento all'ipotesi di formazione di breccia arginale in seguito al superamento della quota di sommità del rilevato, il secondo facente riferimento ad una condizione di tracimazione controllata dell'arginatura maestra.

Con riferimento alla prima delle due ipotesi va sottolineato come il tratto arginale oggetto delle modellazioni presenti condizioni di criticità sia per sormonto che

per sifonamento, come messo in evidenza anche da studi precedenti (CORATZA, 2005; ADB-Po - DISTART, 2008). Alla luce di tali considerazioni si è condotta una simulazione con riferimento ad un evento di piena bisecolare, modellando la formazione di una breccia arginale in un tratto caratterizzato da franco idraulico ridotto, posta nella porzione di monte del meandro di interesse (v. Fig. 13a). Le caratteristiche dimensionali della breccia sono state definite anche in questo caso facendo riferimento alle rotte storicamente documentate lungo il Fiume Po (GOVI e TURITTO, 2000), considerando l'istante di attivazione del crollo coincidente con l'istante in cui il pelo libero raggiunge in alveo la

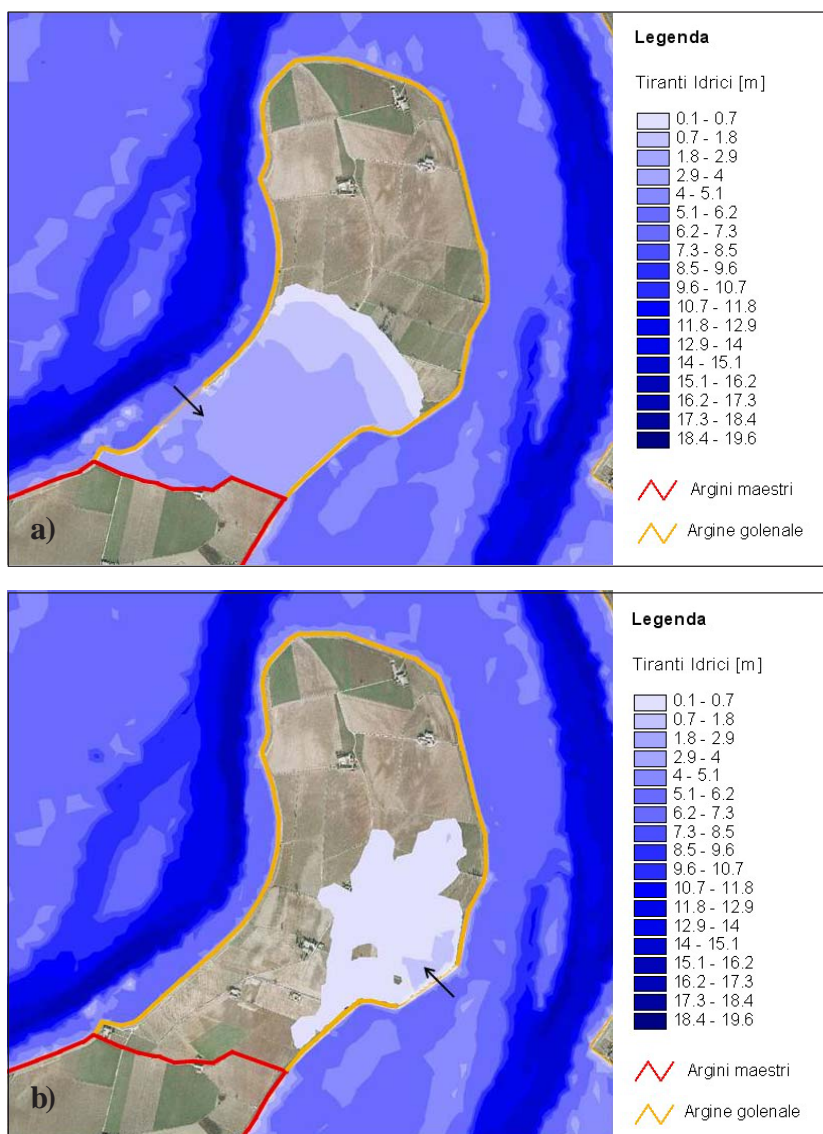


Fig. 13. Fiume Po a Calendasco (PC): a) Fronte di allagamento dopo 12 min dalla formazione della breccia arginale (freccia), nel caso di delimitazione verso il lato campagna mediante argine maestro arretrato. b) Fronte di allagamento in caso di tracimazione controllata dopo 3 ore dall'istante di inizio sfioro (posizione di sfioro indicata dalla freccia).

massima quota.

L'implementazione del modello 2D consente la definizione delle dinamiche di allagamento dell'area di interesse. In figura 13a viene riportato a titolo d'esempio l'estensione del fronte di allagamento in seguito a rottura arginale trascorsi 12 minuti dalla formazione della stessa.

Dalla riproduzione dei fronti di allagamento per i diversi istanti temporali successivi al crollo del rilevato risulta possibile definire, in ciascun punto d'interesse, oltre al tempo impiegato dal fronte per il suo raggiungimento, anche i tiranti idrici e la velocità della corrente.

Pare interessante a questo proposito mettere in risalto, con riferimento al medesimo caso di studio, quanto differenti siano le dinamiche di allagamento nel caso di breccia arginale ed in quello in cui il sistema arginale maestro sia dotato di un manufatto di sfioro da cui effettuare prelievi mirati di volumi di piena mediante tracimazione controllata dell'arginatura maestra, in caso di piene uguali o superiori a quella di riferimento. Nel caso in esame la valutazione è stata condotta ipotizzando una possibile tracimazione controllata lungo un tratto arginale di 300 m di lunghezza, realizzato attraverso un abbassamento in quota di un metro rispetto alla sommità dell'argine attuale e posto nella porzione di valle del meandro considerato (Fig. 13b). Tale configurazione è apparsa quella maggiormente in grado di ottimizzare l'utilizzo della capacità d'invaso della golena, circa 13 Mm³, per la laminazione delle portate di piena del Fiume Po durante lo scenario di riferimento con TR = 200 anni (AIPO - DISTART, 2009).

La valutazione delle dinamiche di avanzamento del fronte di allagamento, in entrambi gli scenari studiati, ha portato alla realizzazione di due diverse mappature del fronte liquido attraverso il tracciamento di linee isocrone, individuando nei due casi presentati le aree destinate ad iniziare ad essere allagate nello stesso istante di tempo. La radicale differenza tra le dinamiche di allagamento dell'area di pianura esterna all'arginatura maestra nei due scenari considerati (formazione di breccia e tracimazione controllata) è evidenziata anche dalla figura 14, in cui si pongono a confronto le mappe di allagamento nel caso di formazione improvvisa di breccia arginale (a) e nel caso di laminazione controllata delle acque di piena al di fuori delle arginature maestre (b). Nel caso (a) i tempi di allagamento appaiono molto ridotti, tant'è che l'intera area di campagna interclusa dal meandro viene completamente allagata dopo meno di 30 minuti dal crollo dell'argine, intervallo di tempo che preclude la possibilità di qualsiasi efficace intervento di protezione civile in corso d'evento; nel secondo caso, invece, la velocità del

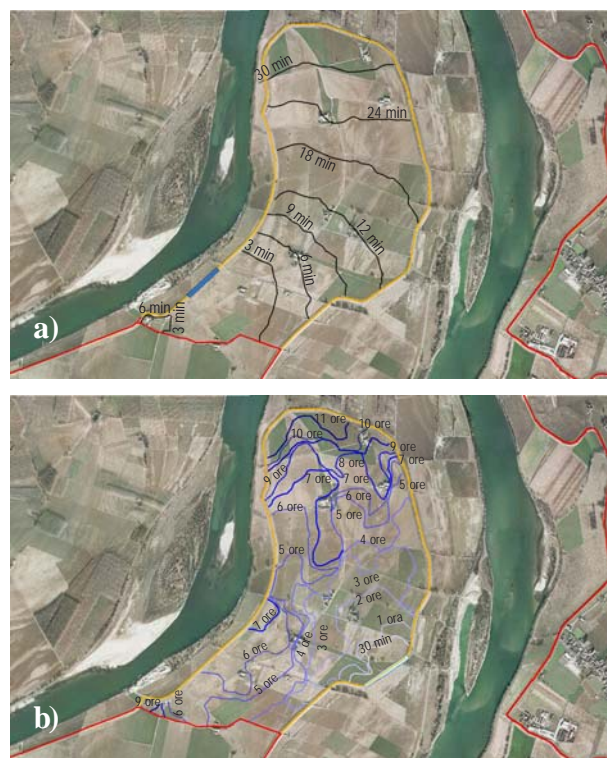


Fig. 14. Fiume Po a Calendasco (PC): a) Isocrone di avanzamento del fronte di allagamento nel caso di formazione di breccia arginale e presenza di argine maestro destro arretrato. b) Isocrone di allagamento nel caso di prelievo controllato di volumi di piena.

fronte di allagamento appare drasticamente ridotta, con allagamento completo del territorio solo dopo 11 ore dall'inizio dell'invaso controllato.

CONCLUSIONI

Nella presente memoria sono stati illustrati alcuni risultati di attività di studio condotte nell'ottica di individuare i provvedimenti necessari al miglioramento delle condizioni di sicurezza idraulica nei territori di pianura lungo l'asta medio-inferiore del Fiume Po. Le attività hanno preso a riferimento le due principali linee strategiche di intervento individuate dall'Autorità di Bacino del Fiume Po: a) il miglioramento della capacità di laminazione delle portate di piena all'interno delle arginature maestre attraverso una gestione ottimizzata del sistema fluvio-golenale del Fiume Po e b) il controllo ottimale di eventi di piena di tempo di ritorno molto superiore a quello di progetto delle arginature maestre. In particolare, con riferimento alla linea strategica b), si sono valutate le potenzialità offerte da interventi finalizzati all'esondazione controllata di una parte del deflusso di piena, in modo da determinare lo spagliamento su specifiche porzioni di territorio esterne alle arginature maestre (fascia C di esondazione) e da

salvaguardare così le zone poste più a valle.

Riguardo al primo aspetto, i risultati dell'indagine qui esposta sembrerebbero evidenziare come, in riferimento agli eventi sintetici di piena considerati (cui può attribuirsi un tempo di ritorno prossimo a 200 anni), i margini di miglioramento potenziali della capacità di laminazione delle piene all'interno delle arginature maestre del Po, conseguibili attraverso soli interventi di rimodellamento delle arginature golenali, siano piuttosto contenuti. Peraltro è opportuno sottolineare come questi miglioramenti siano conseguibili a fronte di difusi interventi sul territorio, decisamente onerosi da un punto di vista economico. Al riguardo vanno però fatte alcune osservazioni.

In primo luogo, va segnalato che tale risultato si basa su ipotesi di intervento che agiscono solo sull'assetto delle arginature, senza intaccare i piani golenali, e che inoltre si sviluppano nel rispetto del criterio, generalmente adottato a livello prescrittivo, in base al quale gli argini golenali debbano avere quote sommitali sempre inferiori di almeno un metro a quelle degli argini maestri. Alla luce dei risultati della presente indagine, tale criterio sembrerebbe meritevole di essere rivisto; ciò potrà avvenire, ovviamente, solo a valle di una ben più estensiva attività di studio, il cui espletamento, a giudizio di chi scrive, appare di grande interesse ai fini del miglioramento del grado di sicurezza dell'assetto difensivo attuale.

Riguardo al secondo aspetto, per eventi di piena che superino sensibilmente quelli presi a riferimento per il progetto del sistema di difesa dalle inondazioni, sembra emergere in maniera piuttosto netta la necessità di cominciare a valutare interventi di laminazione controllata che, in aggiunta alle espansioni golenali allagabili comprese all'interno delle arginature maestre, nella fascia B, sfruttino porzioni del territorio poste in prossimità dell'asta fluviale stessa ma esternamente alle arginature maestre, ovvero situate nella fascia C. Questa esigenza non è certo nuova, essendo già stata prospettata da Giulio De Marchi all'indomani della grande piena del 1951.

In quest'ottica si inseriscono le analisi presentate, che scaturiscono da un percorso di studio ancora in pieno svolgimento. Il primo caso di studio illustrato è finalizzato a valutare gli effetti di uno sfioratore esistente sul Fiume Reno, in località Gallo, sulla pericolosità idraulica di un vasto territorio posto in sinistra idraulica rispetto al fiume. Il secondo caso di studio, invece, è rivolto ad un confronto fra le modalità di allagamento di un'area situata in destra idraulica del Fiume Po, nel caso di una breccia arginale spontanea che si sviluppi in assenza di controllo (scenario catastrofico), con quelle conseguenti ad una tracimazione controllata che interessi la medesima area. Questo

secondo caso di studio prende origine dal progetto di arretramento dell'argine maestro destro con la finalità di rendere disponibili, alla laminazione di volumi di piena dell'evento di riferimento, la zona di campagna attualmente interclusa dal meandro e dall'argine maestro esistente. Con riferimento al primo caso di studio, la metodologia qui esposta per la produzione di mappe della pericolosità idraulica, basata sulla combinazione di risultati numerici ottenuti con la simulazione di numerosi scenari di inondazione, si è mostrata un utile strumento per il confronto di diverse strategie di intervento finalizzate alla mitigazione e gestione del rischio alluvionale. Il risultato emerso evidenzia infatti l'indubbio vantaggio connesso alla presenza dello sfioratore arginale del Gallo come opera finalizzata alla gestione degli eventi di piena che superino l'efficienza idraulica dell'alveo fluviale. Per ciò che invece riguarda il secondo caso di studio, relativo alla modellazione delle dinamiche di allagamento del meandro di Calendasco (PC) situato in destra idraulica del Fiume Po, appare evidente una sostanziale differenza nelle modalità di allagamento nei due scenari analizzati, in particolare per quanto attiene la tempistica.

I risultati ottenuti, per quanto legati alla specificità dei casi di studio affrontati e quindi non immediatamente generalizzabili, portano ad una positiva valutazione in merito alla possibilità di utilizzare aree esterne alle arginature maestre per la laminazione delle piene di tempo di ritorno molto elevato, in maniera da sgravare i territori vallivi. Ciò può essere ottenuto con l'inserimento di manufatti idraulici che consentano l'esondazione controllata di volumi di piena in aree allagabili di minor pregio e vulnerabilità, in modo da avere dinamiche di allagamento che siano compatibili con l'assetto del territorio e permettano nel contempo, ove necessario, l'implementazione di adeguati piani di allerta e di evacuazione. A tale scopo, appare sicuramente da raccomandare lo svolgimento di un'estensiva attività di studio che possa supportare su basi scientifiche certe la fattibilità di questi interventi, anche in considerazione dei forti impatti, di natura economica, sociale ed ambientale, che essi determinano sul territorio.

Ringraziamenti. Quanto illustrato si colloca nel quadro delle attività di studio, ricerca e supporto tecnico-scientifico svolte dal DISTART dell'Università di Bologna in collaborazione con l'Autorità di Bacino del Fiume Po e l'Agenzia Interregionale per il Fiume Po. Il lavoro svolto ha beneficiato del confronto con i Funzionari ed i Tecnici delle due Istituzioni. Si ringraziano in tal senso e in particolar modo l'Ing. A. Colombo, l'Ing. D. Danese, il Dott. F. Giuffredi, l'Ing. C. Merli, Dott. F. Puma, l'Ing. P. Tabellini e l'Ing. M. Valente.

BIBLIOGRAFIA

- ADB-PO, AUORITÀ DI BACINO DEL FIUME PO – PARMA, 1999. *Interventi sulla rete idrografica e sui versanti*. Progetto di Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI).
- ADB-PO, SEGRETERIA TECNICA DELL'AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME PO, 2005. *Progetto strategico per il miglioramento delle condizioni di sicurezza idraulica dei territori di pianura lungo l'asta medio - inferiore del Fiume Po – Relazione Tecnica*.
- ADB-PO – DISTART, 2008. *Attività di studio, ricerca e supporto tecnico-scientifico nell'ambito del Progetto strategico per il miglioramento delle condizioni di sicurezza idraulica dei territori di pianura lungo l'asta principale del Fiume Po*. Contratto di Ricerca tra Autorità di Bacino Fiume Po e Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque, Rilevamento, Territorio dell'Università di Bologna (Resp. scient. Prof. A. Brath), Autorità di Bacino Fiume Po, Parma.
- ADB-PO – DIIAR, 2001. *Caratterizzazione idrologica dell'asta principale del Fiume Po nel tratto che va dalla confluenza della Dora Baltea all'incile del Po di Goro*. Contratto di Ricerca tra Autorità di Bacino Fiume Po e Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale e del Rilevamento del Politecnico di Milano (Resp. scient. Prof. M. G. Tanda), Autorità di Bacino Fiume Po, Parma.
- ADB-PO – CONSORZIO ITALCOPO, 2002. *Aggiornamento dell'assetto idraulico di progetto del Fiume Po dalla confluenza del Tanaro all'incile del Po di Goro mediante analisi modellistica numerica in moto vario (ST 1.19)*, Autorità di Bacino Fiume Po, Parma.
- ADB-RENO, 1998. *Generazione di idrogrammi di piena nel bacino del Fiume Reno chiuso a Casalecchio*. Bologna. Disponibile su www.regione.emilia-romagna.it/bacinoreno.
- AIPO – DISTART, 2009. *Convenzione di collaborazione scientifica per lo svolgimento di attività di studio inerenti la modellazione matematica di tipo bidimensionale finalizzata all'analisi degli effetti di alcune ipotesi progettuali sul Fiume Po in località Calendasco (PC)*. (Resp. scient. Prof. A. Brath), Relazione Finale, Agenzia Interregionale per il Fiume Po, Parma.
- AUTORITÀ DI BACINO DEL RENO, 2002. *Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico*, www.regione.emilia-romagna.it/bacinoreno, Bologna.
- BATES P.D., ANDERSON M.G., 1993. A two-dimensional finite-element model for river flow inundation. *Proceedings of the Royal Society of London*, 440, pp. 481-491.
- BARKAU R.L., 1997. *UNET One dimensional unsteady flow through a full network of open channels*, US Army Corps of Engineerings, Hydrologic Engineering Center, Davis.
- BRATH A., CASTELLARIN A., ERCOLI, P., 2001. Modelli per la simulazione di inondazioni fluviali, aspetti generali e tecniche di calibrazione. In: *La difesa idraulica delle aree urbane*, U. Maione, A. Brath, P. Mignosa, BIOS.
- BRATH A., DI BALDASSARRE G., 2006. Modelli matematici per l'analisi della sicurezza idraulica del territorio. *L'Acqua* 6: 39-48.
- CAMORANI G., FILIPPI F., CAVAZZINI A., LOMBARDO G., PAPPANI G., FORLANI G., 2006. Il rilievo altimetrico e batimetrico del Fiume Po nel tratto tra confluenza Ticino e l'incile. In *Atti della X Conferenza Nazionale Asita*, Bolzano 14-17 novembre 2006.
- CORATZA L., 2005. *Aggiornamento del catasto delle arginature maestre di Po*, Autorità di Bacino del Fiume Po, Parma.
- DI BALDASSARRE G., CASTELLARIN A., BRATH A., HORRITT M., BATES P., 2006. Modellistica idraulica monodimensionale: alcune considerazioni applicative sul grado di dettaglio ottimale della descrizione topografica. In *Atti del 30° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Roma 10-15 settembre 2006, 320 pp. 1-12.
- DI BALDASSARRE G., CASTELLARIN A., MONTANARI A., BRATH A., 2008. Modellistica idraulica di allagamento: studio di scenari di inondazione controllata al di fuori delle arginature maestre. In *Atti del 31° Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Perugia 9-12 settembre 2008, 343 pp. 1-9.
- DI BALDASSARRE G., CASTELLARIN A., MONTANARI A., BRATH A., 2009. Probability weighted hazard maps for comparing different flood risk management strategies. A case study. *Natural Hazards*, DOI: 10.1007/s11069-009-9355-6 (in press).
- GALLAND J.C., GOUTAL N., HERVOUET J.M., 1991. TELEMAC: A new numerical model for solving shallow water equations. *Adv. Water Resour.*, 14 (3): 138-148.
- GOVI M., TURITTO O., 2000. Casistica storica sui processi d'interazione delle correnti di piena del Po con arginature e con elementi morfotopografici del territorio adiacente. In *Scienza e vita nel momento attuale – V*, Istituto Lombardo Accademia di Scienza e Lettere, Milano: 105-160.
- HERVOUET J.M., VAN HAREN L., 1996. Recent advances in numerical methods for fluid flows. In: *Floodplain Processes* (M.G. Anderson D.E. Walling & P. D. Bates eds.), J. Wiley & Sons Ltd., Chichester, UK.
- HORRITT M.S., BATES P.D., 2002. Evaluation of 1-D and 2-D models for predicting Fiume flood inundation. *Journal of Hydrology*, 268: 87-99.
- HORRITT M.S., DI BALDASSARRE G., BATES P.D., BRATH A., 2007. Comparing the performance of 2-D finite element and finite volume models of floodplain inundation using airborne SAR imagery. *Hydrological Processes* 21: 2745–2759.
- MAGISTRATO PER IL PO – SIMPO, 1982. *Studio e progettazione di massima delle sistemazioni idrauliche dell'asta principale del Po dalle sorgenti alla foce finalizzate alla difesa e alla conservazione del suolo e alla utilizzazione delle risorse idriche*, Convenzione del 14 luglio 1980.
- MAGISTRATO PER IL PO – SIMPO, 1984. *Interventi per le golene chiuse del Fiume Po*, Convenzione del 29 aprile 1983.
- MAJONE U., MIGNOSA P., TOMIROTTI M., 2000. Idrogrammi sintetici per il progetto di opere di difesa idraulica del territorio. In *Atti del 27° Convegno di Idraulica e Costru-*

- zioni Idrauliche* 3: 397-405.
- MAJONE U., TOMIROTTI M., 2006. Eventi di piena imprevedibili. In *Atti del 30° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Roma 10-15 settembre 2006, 360 pp. 1- 8.
- MARCHUK G.I., 1975. *Methods of Numerical Mathematics*, Springer-Verlag, New York.
- VIS M., KLIJN F., DE BRUIJN K. M., VAN BUUREN M., 2003. Resilience strategies for flood risk management in the Netherlands. *International Journal of River Basin Management*, **1**: 33-39.