

DICAT Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni, dell'Ambiente e del Territorio. Università di Genova

CONVENZIONE DI COLLABORAZIONE SCIENTIFICA PER LA VALUTAZIONE DELL'EFFICACIA DI INTERVENTI DI DRAGAGGIO DEL TRATTO TERMINALE DEL FIUME MAGRA AI FINI DELLA RIDUZIONE DELLE CONDIZIONI DI RISCHIO IDRAULICO

Relazione Finale

(Febbraio 2011)

Committente: Regione Liguria

Relatori:

Prof. Ing. Giovanni Seminara

Dott. Ing. Michele Bolla Pittaluga

Dott. Ing. Rossella Luchi

Relazione n. 4/2011

Indice

1	Premessa: Motivazioni e Articolazione dello studio	4
2	Il Bacino del Fiume Magra a Elementi fisiografici b Caratteristiche sedimentologiche c Evoluzione morfologica recente subita dal Magra	5 6 7 10
3	Analisi degli eventi di piena del 19-20 Gennaio 2009 e del23-25 Dicembre 2009aOsservazioni sugli eventibStime delle caratteristiche dei deflussi	13 13 15
4	Stime a fondo fisso dell'effetto di eventuali dragaggi sulle caratteristiche dei deflussi	21
5	Profilo del fondo nel tratto terminale del Magra: sovrallu- vionamento o equilibrio naturale?	24
6	Sulla stabilità dell'assetto del fondo determinato dai dragag- gi	27
7	Su un possibile intervento di sistemazione del tratto focivo finalizzato alla sua navigabilità.	32
8	Conclusioni	38
A	ppendice 1: Il modello idrodinamico monodimensionale di propagazione delle piene a Formulazione del problema b Lo schema numerico c Condizioni al contorno d Valori di conduttanza locale e base topografica	42 42 44 45 46
Appendice 2: Il modello morfodinamico monodimensionale d evoluzione del fondo		49
	 Formulazione del problema mortodinamico nel caso di domi- nante trasporto di fondo	49
Bi	to al fondo e in sospensione	51 54

1 Premessa: Motivazioni e Articolazione dello studio

In esecuzione del Decreto del Commissario Delegato per il superamento dell'emergenza derivante dagli eventi dell'ultima decade del mese di Dicembre 2009, la Regione Liguria ha stipulato con l'Università degli Studi di Genova, Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni, dell'Ambiente e del Territorio (DICAT) una convenzione il cui oggetto consiste nella valutazione dell'efficacia di interventi di dragaggio del tratto terminale del fiume Magra ai fini della diminuzione del rischio idraulico.

Le motivazioni dello Studio presente nascono dall'esigenza di chiarire:

- se la realizzazione di opportuni dragaggi nel tratto focivo della Magra possa migliorarne la capacità di smaltimento delle piene e la misura di tale eventuale miglioramento;
- se l'assetto morfologico dell'alveo conseguente ai dragaggi rivesta un carattere di stabilità, intesa come capacità di auto mantenersi a meno di fluttuazioni dell'assetto del fondo sperimentate dal corso d'acqua nel corso dei fenomeni di piena;
- se tale carattere di stabilità possa ottenersi attraverso eventuali interventi di sistemazione, non solo altimetrica ma anche planimetrica, dello stesso tratto terminale della Magra.

Dopo aver fornito alcuni elementi descrittivi del bacino $(\S2)$ e degli eventi di piena verificatisi nel 2009 ($\S3$), ci proponiamo di rispondere alle questioni precedenti riportando i risultati di simulazioni numeriche articolate come segue:

- 1. una sequenza di **simulazioni non stazionarie a fondo fisso** della propagazione delle piene nel tratto focivo ci consentiranno di riprodurre le osservazioni degli eventi di piena verificatisi nel corso del 2009 in corrispondenza dell'idrometro della Colombiera e stimare le relative portate di picco;
- 2. la ripetizione delle stesse simulazioni non stazionarie a fondo fisso delle condizioni di deflusso in occasione degli stessi eventi di piena, adottando una configurazione del fondo che ipotizza la completa effettuazione dei dragaggi previsti, ci consentirà di mostrare l'entità dei **benefici**, invero modesti, che si otterrebbero se le operazioni di dragaggio avessero caratteri di stabilità (§4);

4

- 3. simulazioni stazionarie a fondo mobile saranno quindi utilizzate per determinare l'assetto di equilibrio del fondo e della superficie libera per assegnate portate: le configurazioni di equilibrio del fondo, messe a confronto con i rilievi dei profili di fondo effettuati recentemente, mostrano che, nelle condizioni attuali, il fondo rilevato è di equilibrio per portate molto basse (intorno a 500 m³/s) (§5);
- 4. le stesse simulazioni suggeriscono, inoltre, che per portate superiori il fondo tende a scavarsi per essere poi ripristinato quando il corso d'acqua torna ad essere sollecitato da basse portate: ciò è confermato dai risultati di una sequenza di simulazioni a fondo mobile non stazionarie in cui emerge come il fondo del tratto focivo qui considerato, muovendo da un assetto iniziale di equilibrio, subisca un processo di approfondimento nella fase crescente della piena e di deposito nella fase di decadimento successiva; muovendo, invece, da una configurazione di non equilibrio, ottenuta ipotizzando la realizzazione di una campagna di dragaggi, si ottiene una configurazione finale che tende gradualmente a riportarsi nelle condizioni di equilibrio pre-dragaggi (§6);
- 5. nell'ultima serie di simulazioni a fondo mobile si dimostra, infine, che un assetto di equilibrio caratterizzato da fondali che assicurerebbero la navigabilità del tratto focivo del Magra può essere ottenuto intervenendo sull'assetto planimetrico del corso d'acqua: l'introduzione nel tratto terminale di opere longitudinali sommerse che concentrano la corrente entro un alveo attivo di larghezza costante e pari a 200 m circa darebbe infatti luogo ad un apprezzabile abbassamento del fondo di equilibrio nell'intero tronco terminale che avrebbe carattere permanente, non influenzando peraltro significativamente i livelli di piena. (§7).

2 Il Bacino del Fiume Magra

Il Bacino del Fiume Magra è stato oggetto di numerose indagini sistematiche. Non appare quindi opportuno nè necessario tentare una sintesi, ancorchè sommaria, di tali studi. Il lettore interessato potrà utilmente consultare il sito dell'Autorità di Bacino Interregionale del Fiume Magra, e, in particolare, il Piano Stralcio Assetto Idrogeologico (PAI), che offre un'ampia e documentata selezione della letteratura esistente. Nel seguito ci limiteremo a fornire alcune notizie essenziali per un inquadramento del problema, mentre faremo esplicito





Figura 2.1: Il bacino del Magra.

a Elementi fisiografici

Il bacino idrografico del fiume Magra (Figura 2.1) ha area di circa 1700 Km² e perimetro di 238 Km. Esso è costituito da due principali sottobacini, il medioalto Magra ed il medio-alto Vara, che confluiscono nel tratto terminale del Magra con recapito finale nel Mar Tirreno. Le due valli, del Magra e del Vara, sono pressochè parallele tra loro ed alla linea di costa delle Cinque Terre: i relativi alvei seguono l'andamento di due depressioni tettoniche. Il bacino imbrifero è per la maggior parte montuoso e collinare, con l'eccezione di alcuni tratti in cui antiche conche lacustri hanno indotto locali allargamenti. Le pianure alluvionali sono pressoché assenti in Val di Vara, modeste nel corso medio-alto del fiume Magra, mentre la pianura del basso Magra è più estesa raggiungendo la larghezza massima di circa quattro chilometri. Il sottobacino del medio-alto Magra, intensamente boschivo, riceve un gran numero di affluenti significativi, primo fra tutti l'Aulella (bacino di 317.6 km^2), essendo caratterizzato da afflusso meteorico medio di oltre 1700 mm/anno, deflusso naturale medio nell'anno stimato in 1392 Mm³ e temperatura media annua di 12.9°C (Baldacci & Raggi, 1969). Il sottobacino del medio-alto Vara, occupato per il 93 % da boschi, a Piana Battolla presenta afflusso meteorico medio di 1770 mm/anno, deflusso naturale medio nell'anno stimato in 563 Mm³ e temperatura media annua di 14.1°C. Infine, il basso corso del F.Magra, non ha affluenti di rilievo. Non sono peraltro presenti stazioni di misura con serie storiche tali da consentirne un'adeguata caratterizzazione idrologica.

b Caratteristiche sedimentologiche

Una sistematica campagna di misure granulometriche è stata effettuata nel Bacino del Magra nel periodo 2004-2006 dal gruppo diretto dal Prof Rinaldi dell'Università di Firenze, nell'ambito di uno Studio, sviluppato in due fasi, oggetto di apposita Convenzione tra Autorità di Bacino Interregionale del Fiume Magra e Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Firenze. Il progetto di ricerca dal titolo Approfondimenti dello studio geomorfologico dei principali alvei fluviali nel bacino del fiume Magra, finalizzato alla definizione di linee guida di gestione dei sedimenti e della fascia di mobilità funzionale, si concludeva con una Relazione dell'Aprile 2007. Da tale relazione sono tratti i risultati riportati nel seguito.

Campionamenti sono stati effettuati per caratterizzare sia lo strato superficiale che il sottostrato. L'ubicazione di tali campionamenti è riportata nella Figura 2.2.

La riduzione, procedendo verso valle, del diametro medio dei sedimenti dello strato superficiale e del sottostrato emersa dai campionamenti sedimentologici è rappresentata nella Figura 2.3. Essa mostra che lo strato superficiale è un po' più grossolano del sottostrato, si presenta cioè il classico fenomeno di corazzamento del fondo.

Sfortunatamente i rilievi non sono stati estesi al tratto focivo, di interesse per il presente studio. Tuttavia, in uno studio precedente condotto da MED Ingegneria (2001) con riferimento a tale tratto del corso d'acqua, sono stati condotti alcuni campionamenti da cui si evinceva che il materiale di fondo è caratterizzato dalla prevalenza di una matrice di sabbia e sabbia grossolana, rivelando peraltro la presenza di parecchio materiale fine (limo). Attraverso un'analisi dei campioni prelevati e inferenze estratte dalle tracce dell'ecoscandaglio è stata prodotta la mappa riportata nella Figura 2.4. Escludendo i limi che non hanno effetti morfodinamici, si osserva che a monte della Co-



Figura 2.2: Ubicazione dei campionamenti sedimentologici effettuati sulle aste del Vara e Magra nello studio effettuato da Rinaldi (2007).



Figura 2.3: Distribuzione spaziale del diametro medio dei sedimenti dello strato superficiale e del sottostrato nei campionamenti sedimentologici effettuati sulle aste del Vara e Magra nello studio effettuato da Rinaldi (2007).

lombiera, almeno nello strato superficiale, prevalgono sabbie fini (diametro medio 0.15-0.2 mm), mentre alla foce prevalgono depositi sabbioso-ghiaiosi (diametro medio di 5 mm). Nel corso del presente studio, le osservazioni pre-



Figura 2.4: Distribuzione spaziale del diametro medio dei sedimenti dello strato superficiale del tratto focivo della Magra. Le aree colorate e la relative legenda individuano le granulometrie riportate nello studio effettuato da MED Ingegneria (2001); (ii) i riquadri contengono le distribuzioni granulometriche relative ai campionamenti effettuati a cura degli scriventi nel 2010, le cui ubicazioni sono indicate dalle frecce.

cedenti sono state sottoposte a verifica attraverso ulteriori campionamenti effettuati a cura degli scriventi. Le analisi granulometriche dei campioni prelevati, effettuate presso il laboratorio prove geotecniche del DICAT, insieme alle relative ubicazioni sono riportate nella stessa Figura 2.4 (riquadri con frecce che indicano l'ubicazione dei campionamenti). Essi suggeriscono che il materiale del fondo risulta un po' più grossolano di quanto appariva dai campionamenti del 2001.

c Evoluzione morfologica recente subita dal Magra

Il tratto terminale del Magra ha subito una serie di trasformazioni morfologiche dipendenti dalle oscillazioni del livello del mare oltreché dalle variazioni subite dagli apporti solidi. Al termine dell'ultima glaciazione (11.000 anni fa circa) l'innalzamento del livello marino portò all'ingresso del mare nella piana del Magra con la formazione di un ampio golfo. Intorno al 2000 A.C. il mare si estendeva fino alle porte di Sarzana mentre la foce del Magra era occupata da ampie paludi. Non rientra negli scopi dello studio presente fornire i dettagli delle ricostruzioni proposte dagli studi geologici disponibili in letteratura. E' qui sufficiente notare che, fino al medioevo, il fiume scorreva più a levante rispetto al tracciato attuale, in direzione dell'antico insediamento romano di Luni, colonia fondata nel 177 A.C. in prossimità della costa. Intorno alla metà del secolo XVI il fiume subì un taglio di meandro che spostò il corso del fiume verso occidente con un tracciato non lontano da quello odierno. Tracce di questo taglio appaiono evidenti nelle immagini riportate nella Figura 2.5.

Un'ulteriore interessante osservazione emerge inoltre da tale immagine: la presenza di un'evidente barra di deposito centrale nel tratto terminale dove il corso d'acqua va gradualmente divergendo. Ancorché affatto sorprendente, la presenza di tale barra rende ragione dell'ovvia naturale tendenza al deposito osservata in tale tratto del corso d'acqua, che rende inevitabilmente instabili, cioè non permanenti, gli effetti di eventuali dragaggi. Un rapido sguardo agli eventi morfologici degli ultimi due secoli, quali si evincono dallo studio di Rinaldi (2007), appare utile a illustrare meglio questa fondamentale questione.

Nella prima metà dell'800, quando la copertura boschiva del bacino era stata assai ridotta dall'intenso diboscamento praticato nei secoli precedenti, i corsi vallivi di Magra e Vara erano presumibilmente caratterizzati da una forte alimentazione di materiale solido e si presentavano come molto larghi, con andamento pluricursale (cioè intrecciato). Una tendenza al restringimento della sezione, di cui non sono chiare le cause, ma con la persistenza di un andamento pluricursale, emerge dalla carte del 1877-78. In quegli anni veniva emanata la prima legge forestale del Regno d'Italia che prevedeva, fra l'altro, una riduzione delle attività di diboscamento. Per quanto concerne la costa, essa proseguì fino alla metà del XIX secolo la tendenza all'avanzamento manifestata nei secoli precedenti, con i primi segnali di regressione manifestatisi verso la metà del 1800 in corrispondenza del tratto di costa a SE della foce.

Importanti variazioni della morfologia furono indotte nella prima metà del XX secolo per effetto di una serie di interventi. Anzitutto, favoriti da provvedimenti legislativi, furono eseguiti interventi di sistemazione idraulicoforestale (rimboschimenti, briglie, sistemazioni di versanti). In particolare, a



Figura 2.5: Fotogrammi che raffigurano il tratto focivo del Fiume Magra nel 1937 (a), in un volo di ricognizione della RAF del 1943 (b) e nel 1954 (c). Si osservi la presenza di un'isola nel tratto terminale, cioè di una barra centrale generata per effetto del forte allargamento subito dall'alveo.

partire dagli anni '20 fu realizzato il progetto Biondi-Canini, che prevedeva la costruzione di un sistema di pennelli trasversali nei tratti vallivi del Magra e del Vara. Inoltre, vennero realizzate alcune dighe, di qualche rilevanza quella di S.Margherita sul F.Vara, realizzata negli anni '30, e la Diga di Rocchetta, realizzata intorno alla metà del secolo, sul T.Teglia, affluente di destra del Magra. Infine, l'escavazione di inerti. Le conseguenze di questi interventi sono state la riduzione consistente della larghezza dell'alveo, la tendenza ad abbandonare la morfologia intrecciata a favore di un assetto di transizione, un notevole abbassamento del fondo (fino a 4-5 m tra 1914 e 1958). Tali conseguenze si sono fortemente accentuate nel periodo successivo in cui l'escavazione di inerti diventava massiccia, in particolare negli anni '60-'70 per effetto della costruzione delle autostrade A12 e A15. Le escavazioni cesseranno solo agli inizi degli anni '90 e l'abbassamento del fondo rispetto al 1914 raggiungerà nel 1999 picchi di 10 m circa nel tratto vallivo del F.Magra e

di qualche metro nel basso Vara! La progressiva incisione degli alvei induceva restringimento ulteriore dell'alveo attivo e tendenza ad un più marcato assetto monocursale. Fenomeni simili, ma meno accentuati, si osservavano nelle porzioni medio-alte del bacino. In conclusione, il Bacino del Magra è stato soggetto nel corso del secolo scorso ad un processo erosivo generalizzato sull'intero corso d'acqua: un processo, evidenziato nella Figura 2.6. Tale processo, si noti, è, del tutto opposto a quello che viene talvolta erroneamente lamentato da chi ipotizza una tendenza dell'alveo al sovralluvionamento, sulla base presumibilmente di osservazioni locali o di considerazioni riassumibili con la locuzione 'ingegneria popolare'.



Figura 2.6: Evoluzione del fondo del Magra nel periodo 1914-1971. Immagine cortesemente fornita da M. Rinaldi.

Per quanto riguarda la linea di costa, essa subì un forte arretramento tra 1878 e 1938. Il processo di arretramento si arrestò intorno al 1950 avendo la costa raggiunto una configurazione prossima a quella attuale. Nell'ultimo decennio l'aumento di disponibilità di sedimenti in alveo, conseguente alla riduzione delle attività estrattive, ha favorito l'accrescimento di barre e l'allargamento dell'alveo attivo (Surian e Rinaldi, 2003) alimentando inoltre più intensamente i tratti di valle e, in particolare, il tratto focivo.

3 Analisi degli eventi di piena del 19-20 Gennaio 2009 e del 23-25 Dicembre 2009

a Osservazioni sugli eventi

L'evento del 23-25 Dicembre 2009

Tra il 21 ed il 25 Dicembre 2009 il continente europeo è stato interessato dal transito di una sequenza di strutture frontali provenienti dall'Atlantico settentrionale: una prima perturbazione determinava fra il 22 ed il 23 Dicembre una prima serie di precipitazioni diffuse e intense al Nord e in particolare su Liguria e Toscana; una seconda perturbazione raggiungeva la Francia il 25 dicembre, generando un minimo secondario in corrispondenza della Liguria dove si verificavano precipitazioni intense estese anche alle regioni centrali. L'evento era accompagnato da forti venti di Libeccio o Scirocco e da moto ondoso intenso nel Golfo Ligure.

L'andamento delle precipitazioni è stato registrato nel corso dell'evento da numerosi pluviometri dislocati nelle diverse porzioni del bacino.

La Figura 3.1 mostra i rilievi effettuati da due stazioni pluviometriche localizzate nell'alto bacino. L'andamento delle precipitazioni si presenta molto simile nelle due stazioni. I valori della pioggia cumulata dalle ore 0 del 22 Dicembre alle ore 12 del 25 Dicembre sono di 260 mm a Varese Ligure e di 310 mm a Bagnone.

La Figura 3.2 mostra gli analoghi rilievi effettuati da due stazioni pluviometriche localizzate nel medio bacino. I valori della pioggia cumulata dalle ore 0 del 22 Dicembre alle ore 12 del 25 Dicembre sono di 285 mm a Santa Margherita Vara nel sottobacino del Vara e di oltre 400 mm a Minucciano nel sottobacino del Magra.

Infine, la Figura 3.3 mostra la registrazione effettuata presso la stazione pluviometrica di Sarzana, localizzata a valle della confluenza Vara-Magra. L'andamento delle precipitazioni si presenta anche qui molto simile. Il valore della pioggia cumulata ha raggiunto i 240 mm.

I livelli misurati all'idrometro del ponte della Colombiera, registrazioni ufficiali rese disponibili da ARPAL, sono riportati nella Figura 3.4. Da essa si evince che il livello misurato ha raggiunto un picco pari a 3,73 m intorno alle ore 2,30 del 25 Dicembre. Nella Figura 3.9 è riportata la registrazione dell'evento effettuata presso l'idrometro di Calamazza, localizzato sull'asta del Magra a monte della confluenza del Vara, in una sezione che sottende una porzione di bacino pari a 919,6 Km². Essa mostra che al picco di piena osservato a Calamazza poco prima della mezzanotte del 24 Dicembre era as-



Figura 3.1: Registrazione delle precipitazioni rilevate nel bacino del Magra nel corso dell'evento del Dicembre 2009. Alto bacino: pluviometri di Varese ligure nel sottobacino del Vara e di Bagnone nel sottobacino del Magra (registrazioni gentilmente fornite da ARPAL).

sociato un livello idrometrico di 7,24 m.

L'evento del 20 Gennaio 2009

Un evento lievemente meno intenso aveva interessato il bacino del Magra il 19-20 Gennaio 2009 per effetto di abbondanti precipitazioni, che hanno interessato tutta la Liguria ma in particolare il centro levante, dove si sono registrate piogge cumulate medie areali nelle 12 ore di oltre 70 mm e massimi puntuali molto elevati sulle 24 ore, pur con intensità massime orarie mai superiori a 20 mm/h. Alle insistenti precipitazioni si sono accompagnati venti forti da SW e un'agitazione ondosa con mare classificato molto mosso-agitato.

I livelli idrometrici rilevati al Ponte della Colombiera sono riportati in Figura 3.6 e mostrano un picco pari a 3,38 m osservato intorno alle ore 17 del 20 Gennaio. Nella Figura 3.8 è riportata la registrazione dell'evento effettuata presso l'idrometro di Calamazza, da cui si evince un livello massimo al picco della piena di 6,37 m, dunque di quasi un metro inferiore rispetto al corrispondente valore osservato nel corso dell'evento del 23-25 Dicembre.



Figura 3.2: Registrazione delle precipitazioni rilevate nel bacino del Magra nel corso dell'evento del Dicembre 2009. Medio bacino: pluviometri di Santa Margherita Vara nel sottobacino del Vara e di Minucciano nel sottobacino del Magra (registrazioni gentilmente fornite da ARPAL).

b Stime delle caratteristiche dei deflussi

La stima delle portate defluite nel corso dell'evento di piena, malgrado siano disponibili numerosi idrogrammi rilevati in diverse sezioni del corso d'acqua, non può ottenersi direttamente poiché **non sono disponibili affidabili** scale di deflusso per tali sezioni.

L'analisi dei deflussi relativi ai due eventi di piena menzionati nel tratto focivo del corso d'acqua è stata allora effettuata ricostruendo, sulla base di un modello non stazionario a fondo fisso, l'andamento dei livelli idrometrici rilevati nel corso della piena nella sezione del Magra localizzata subito a valle del Ponte della Colombiera.

Il modello numerico utilizzato è stato sviluppato dal DICAT ed è descrit-



Figura 3.3: Registrazione delle precipitazioni rilevate dal pluviometro di Sarzana, localizzato a valle della confluenza Vara-Magra, nel corso dell'evento del Dicembre 2009, registrazione gentilmente fornita da ARPAL.

to nell'Appendice 1.

L'evento del 23-25 Dicembre 2009

La soluzione numerica delle equazioni del moto ha fornito anzitutto l'idrogramma relativo all'evento di piena del Magra del 23-25 Dicembre 2009 in corrispondenza della sezione a valle del Ponte della Colombiera. Tale idrogramma è riportato (curva blu) nella Figura 3.4 dove è messo a confronto con l'idrogramma osservato (simboli rossi) e con gli analoghi idrogrammi calcolati utilizzando i profili del fondo medio rilevati nel 2003 (curva verde) e nel 2010 (curva nera).

Insieme ai livelli idrometrici, la soluzione fornisce naturalmente l'andamento delle portate defluite nel corso dell'evento di piena in corrispondenza del Ponte della Colombiera. Tale andamento è riportato nella Figura 3.5. Esso suggerisce una stima per il **picco di portata rilevato nel corso dell'evento pari a 4050 m³/s** circa.

Sarebbe di qualche interesse verificare, sulla base dei risultati delle in-



Figura 3.4: L'idrogramma calcolato per l'evento di piena del Magra del 23-25 Dicembre 2009 in corrispondenza della sezione a valle del Ponte della Colombiera è messo a confronto con l'idrogramma osservato (simboli rossi). L'idrogramma in blu è stato costruito utilizzando i profili del fondo medio rilevati nel 2009, l'idrogramma verde è stato costruito utilizzando i profili del fondo medio rilevati nel 2003 e l'idrogramma nero è stato costruito utilizzando i profili del fondo medio rilevati nel 2010. Il valore del coefficiente di Strickler per l'alveo inciso adottato nelle simulazioni era pari a 30 m^{1/3}s⁻¹.

dagini idrologiche riportate nel Piano di Bacino Stralcio, quale periodo di ritorno sia associabile all'evento del 25 Dicembre 2009. Sfortunatamente tale stima non è immediata non essendo disponibili correlazioni fra portata al colmo e tempo di ritorno a valle della confluenza Vara-Magra. Tuttavia, gli idrogrammi di piena trentennali a valle della confluenza riportati nel Piano suggeriscono valori al colmo compresi fra 3600 m³s⁻¹ e 4100 m³s⁻¹ circa. Qualitativamente, appare, dunque ragionevole affermare che l'evento sia caratterizzabile con un periodo di ritorno superiore ai 30 anni.

L'evento del 19-20 Gennaio 2009.

Un approccio analogo a quello prima discusso è stato seguito per l'interpretazione dell'evento del 19-20 Gennaio 2009. I risultati dell'analisi sono riportati nelle Figure 3.6 e 3.7.



Figura 3.5: Andamento delle portate defluite nel corso dell'evento di piena del Magra del 23-25 Dicembre 2009 in corrispondenza del Ponte della Colombiera. L'idrogramma è stato costruito utilizzando i profili del fondo medio rilevati nel 2009. Il valore del coefficiente di Strickler per l'alveo inciso adottato nelle simulazioni era pari a $30 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$. Nel diagramma è riportato anche l'andamento del numero di Froude densimetrico della corrente calcolato nella sezione di foce ad ogni istante (curva tratteggiata).

La Figura 3.7 suggerisce una stima per il picco di portata verificatosi nel corso dell'evento pari a 3550 m^3/s circa.

Le stime di ARPAL.

L'agenzia ARPAL ha pubblicato Rapporti di Evento successivi sia all'esondazione del 19-20 Gennaio 2009 sia a quella del 23-25 Dicembre 2009.

Nel primo di questi rapporti sono riportati i rilievi effettuati dagli idrometri localizzati in diverse stazioni di misura distribuite nel bacino insieme agli idrogrammi calcolati da ARPAL, presumibilmente sulla base di scale di deflusso. In particolare, la Figura 3.8 riproduce i rilievi idrometrici e l'idrogramma calcolato da ARPAL per la stazione di Calamazza, localizzata poco a monte della confluenza del Vara.

Essa mostra che al picco di piena osservato a Calamazza nelle prime ore del pomeriggio del 20 Gennaio era associato un livello idrometrico di 6,37



Figura 3.6: I livelli idrometrici calcolati (linea azzurra) per l'evento di piena del Magra del 19-20 Gennaio 2009 in corrispondenza della sezione a valle del Ponte della Colombiera è messo a confronto con l'idrogramma osservato (simboli rossi). L'idrogramma è stato costruito utilizzando i profili del fondo medio rilevati nel 2009. Il valore del coefficiente di Strickler per l'alveo inciso adottato nelle simulazioni era pari a 30 m^{1/3}s⁻¹.

m, al quale ARPAL associa una portata di circa 2650 m³/s. Tale stima è compatibile con la stima di 3550 m³/s della portata massima nel tratto focivo del Magra ottenuta nella presente relazione. Appare infatti del tutto ragionevole che il contributo del Vara possa essere risultato pari a 850 m³/s circa, osservando fra l'altro che ARPAL stima un picco di portata pari a 410 m³/s circa per il Vara a Nasceto.

Nel secondo rapporto sono riportati i rilievi effettuati e gli idrogrammi calcolati da ARPAL per il secondo evento. In particolare, la Figura 3.9 riproduce i rilievi idrometrici per la stazione di Calamazza e l'idrogramma calcolato da ARPAL per la stazione di Ponte della Colombiera, localizzata a valle della confluenza con il Vara.

Essa mostra che al picco di piena osservato a Calamazza poco prima della mezzanotte del 24 Dicembre era associato un livello idrometrico (circa 7,3 m) di quasi 1 m superiore rispetto al livello osservato il 19-20 Gennaio. ARPAL non fornisce il relativo idrogramma, ma è da ritenere che, adottando la stes-



Figura 3.7: Andamento delle portate defluite nel corso dell'evento di piena del Magra del 19-20 Gennaio 2009 in corrispondenza del Ponte della Colombiera. L'idrogramma è stato costruito utilizzando i profili del fondo medio rilevati nel 2009. Il valore del coefficiente di Strickler per l'alveo inciso adottato nelle simulazioni era pari a 30 m^{1/3}s⁻¹.

sa scala di deflusso adottata per l'evento del 19-20 Gennaio, la portata al picco di piena a Calamazza non poteva che essere largamente superiore al valore di 2700 m³/s stimato per il precedente evento. Non appare dunque comprensibile la stima di 3000 m³/s circa che si evince dall'idrogramma ARPAL per la portata massima al Ponte della Colombiera: essa implicherebbe, infatti, un contributo nullo del Vara, in contraddizione con i dati relativi alla portata di picco scaricata a valle dello sbarramento di S. Margherita sul Vara, pari a circa 800 m³/s. La stima dell'idrogramma di piena del Magra al Ponte della Colombiera proposta da ARPAL appare, dunque, evidentemente affetta da errore.



Figura 3.8: Rilievi idrometrici (a) e idrogramma calcolato da ARPAL (b) per la stazione del Magra a Calamazza relativi all'evento di piena del Magra del 19-20 Gennaio 2009 (RAPPORTO DI EVENTO METEOIDROLOGICO DEL 19-20/01/2009, ARPAL).

Stime a fondo fisso dell'effetto di eventuali 4 dragaggi sulle caratteristiche dei deflussi

I dragaggi realizzati nel tratto focivo del corso d'acqua fra il 2004 ed il 2009 sono stati pari a 132700 m³ fra 2004 e 2007, 155400 m³ nel 2008, 104000 m³ nel 2009, dati gentilmente forniti dalla Provincia di La Spezia.

Al fine di analizzare l'effetto che l'effettuazione completa del programma dei dragaggi avrebbe esercitato sul deflusso della piena del Dicembre 2009, nell'ipotesi (che dimostreremo peraltro non vera) che l'assetto del fondo postdragaggi fosse in grado di mantenersi inalterato, sono state anzitutto eseguite simulazioni numeriche analoghe a quelle discusse al punto 3 utilizzando, tut-

21



Figura 3.9: Rilievi idrometrici nella stazione del Magra a Calamazza (a) e idrogramma calcolato da ARPAL al Ponte della Colombiera (b) relativi all'evento di piena del Magra del 23-25 Dicembre 2009 (RAPPORTO DI EVENTO METEOIDROLOGICO DEL 22-25/12/2009, ARPAL).

tavia, la geometria delle sezioni ottenuta da quella del 2003, ipotizzando che i dragaggi fossero stati interamente effettuati. Il valore del coefficiente di conduttanza di Strickler k_s adottato nelle simulazioni era pari a 30 m^{1/3}s⁻¹. Il confronto fra i profili calcolati nei due casi è riportato nella Figura 4.1 che mostra l'inviluppo dei profili di piena relativi a due delle simulazioni effettua-te. Appare evidente che le differenze fra i livelli della superficie libera con i rilievi 2009 e quelli ottenuti con i rilievi 2003 sottoposti a

dragaggio risultano ovunque inferiori a 45 cm circa nel tratto analizzato. Si noti, peraltro, che ripetendo la simulazione con il fondo rilevato nel 2010 (successivo quindi agli eventi di piena del 2009) si trovano livelli della superficie libera che ritornano prossimi (in parte addirittura più sfavorevoli) rispetto a quelli che si sarebbero realizzati con il fondo 2003 senza dragaggi, come si evince dalla Figura 3.4 in cui si osserva che il livello al picco della piena in corrispondenza del Ponte della Colombiera sarebbe stato superiore rispetto al 2003.



Figura 4.1: Inviluppo dei profili di piena relativi a due simulazioni a fondo fisso effettuate per l'evento di piena del Magra del 23-25 Dicembre 2009 utilizzando: i rilievi batimetrici del 2003 con dragaggio (linea nera) e i rilievi batimetrici del 2009 (linea blu). Il valore del coefficiente di Strickler per l'alveo inciso adottato nelle simulazioni era pari a 30 m^{1/3}s⁻¹.

Il carattere non permanente dei, peraltro modesti, vantaggi ottenuti attraverso eventuali attività di dragaggio saranno meglio dimostrati al punto 6 attraverso una serie di simulazioni a fondo mobile.

5 Profilo del fondo nel tratto terminale del Magra: sovralluvionamento o equilibrio naturale?

Ci proponiamo ora di mostrare come il profilo del fondo del tratto focivo del Magra non sia affatto il risultato di un processo di sovralluvionamento del corso d'acqua. Al contrario esso si mantiene abbastanza stabile, è cioè un profilo di equilibrio. Analizziamo, a tale scopo, la seguente questione:

Qual'è, posto che esista, l'assetto di equilibrio del profilo del fondo medio del Magra nel tratto focivo?

A questa domanda si può dare risposta rigorosa, utilizzando principi e metodi discussi nel Manuale di Morfodinamica della Regione predisposto a cura del DICAT (Seminara et al., 2008), se si considera **assegnata la portata liquida e la portata solida ad essa associata** nella sezione iniziale del tronco di corso d'acqua considerato: in tal caso, esiste un profilo medio longitudinale del fondo in equilibrio con essi. Naturalmente, i corsi d'acqua sono in realtà sollecitati in modo intermittente da piene, non sono cioè alimentati da valori costanti delle portate liquida e solida: gli assetti del fondo, longitudinale e trasversale, fluttuano, dunque, intorno a configurazioni di equilibrio definite solo statisticamente.

Consideriamo, allora, il tratto focivo del Magra, di interesse per questo studio, un tronco fluviale sufficientemente breve da poter considerare che in esso sia la portata liquida sia la portata solida non subiscano variazioni spaziali apprezzabili. Gli assetti di equilibrio della superficie libera e del fondo, nell'ipotesi di stazionarietà, cioé per valori assegnati della portata liquida e della portata solida in ingresso, debbono soddisfare alle equazioni di bilancio (conservazione della massa e principio della quantità di moto delle fasi fluida e solida). Tali equazioni, nel caso generale di moto ed assetto del fondo non stazionari, sono riportate nell'Appendice 2. Nel caso particolare di moto ed assetto del fondo stazionari qui esaminato, esse si riducono alla forma:

$$Q = \text{costante}$$
 (5.1)

$$Q_s = \text{costante} \tag{5.2}$$

24

$$\frac{d}{dx}\left(\beta\frac{Q^2}{\Omega}\right) + g\Omega\frac{dh}{dx} + \frac{Q^2}{\Omega C^2 R} = 0$$
(5.3)

$$Q_s = Q_s(\bar{\tau}_*) \tag{5.4}$$

dove Q è la portata volumetrica, Q_s è la portata solida, h è il carico piezometrico, R è il raggio idraulico, Ω è l'area della sezione e $\bar{\tau}_*$ è la tensione di Shields media nella sezione. Si ha:

$$\bar{\tau}_* = \frac{Q^2}{\Omega^2 C^2 g(s-1) d_{50}} \tag{5.5}$$

con s densità relativa e d_{50} diametro medio dei sedimenti.

La soluzione dell'equazione differenziale ordinaria (5.3) richiede l'assegnazione di una condizione al contorno. Nel nostro caso, è nota la quota della superficie libera in corrispondenza dello sbocco a mare. E, inoltre, devono essere assegnati il valore della portata liquida Q e della portata solida Q_s in ingresso. Note Q e la pendenza media del corso d'acqua nel tronco immediatamente prossimo alla sezione iniziale si calcola agevolmente $\bar{\tau}_*$ con l'aiuto della (5.5) e, quindi, Q_s adottando la formula di Engelund & Hansen (1967) quale predittore.

I risultati del calcolo così effettuato sono riportati nella Figura 5.1.



Figura 5.1: I profili di equilibrio corrispondenti alle diverse portate calcolati per il tratto terminale del Fiume Magra sono messi a confronto con il profilo rilevato nel 2003.

25

Essa mostra che l'assetto del fondo rilevato nel 2003 è molto prossimo all'assetto di equilibrio calcolato per la portata di 500 m³/s. Al crescere della portata, il profilo di equilibrio tende ad approfondirsi. Lo scenario suggerito da questi risultati è il seguente: il fondo fluttua intorno ad un assetto di equilibrio determinato dalle basse portate, approfondendosi nella fase crescente delle piene e ripristinando un assetto prossimo a quello iniziale nella fase di decadimento delle piene e negli intervalli fra piene successive. Non meraviglia, dunque, l'osservazione della **sostanziale stabilità dell'assetto del fondo nel corso degli ultimi 10 anni circa** (Figura 5.2) in cui l'alveo è stato sollecitato da diversi eventi intensi.



Figura 5.2: Profili del fondo del tratto focivo del Magra quali emergono dai rilievi effettuati nel 2003, 2008 e 2010.

Se tale scenario è corretto, ne consegue l'inopportunità di far ricorso a dragaggi che modifichino l'assetto di equilibrio naturale del corso d'acqua: tali modifiche non sarebbero comunque stabili e richiederebbero di essere artificialmente mantenute, depauperando la costa dell'apporto solido che sedimenterebbe continuamente nel tronco soggetto ai dragaggi.

Al fine di verificare la correttezza dello scenario precedente, esamineremo nel paragrafo che segue la risposta del fondo dragato alla sollecitazione indotta dal regime di portate cui il tratto terminale del Magra è stato assoggettato nel corso degli ultimi anni.

6 Sulla stabilità dell'assetto del fondo determinato dai dragaggi

L'analisi della risposta del fondo, oltreché della superficie libera, alla sequenza di eventi idrometrici che hanno sollecitato il tratto terminale del Magra nel periodo 2003-2010 è stata effettuata applicando il modello unidimensionale a fondo mobile descritto nell'Appendice 2 (vedi, anche, il Manuale di Morfodinamica della Regione (Seminara et al., 2008), Cap. 4). E' stata assunta una granulometria uniforme con diametro pari a 3 mm. Sono state eseguite due simulazioni.

Nella prima la *condizione iniziale ipotizzata consisteva nell'assetto del fondo rilevato nel 2003.* Sono state imposte, inoltre, quali condizioni al contorno:

• nella sezione iniziale:

- i valori di portata in corrispondenza del Ponte della Colombiera calcolati sulla base dei livelli idrometrici registrati (gentilmente forniti da ARPAL) e della scala di deflusso ricostruita attraverso le simulazioni a fondo fisso di cui al punto 3;

- i valori di portata solida in equilibrio con la portata liquida;

• *nella sezione terminale*: il livello della superficie libera supposto coincidente con il livello del mare, salvo in occasione degli eventi di piena del 2009, per i quali si è ipotizzato un innalzamento del livello efficace pari a 0,5 m per tenere conto dell'intensa agitazione ondosa registrata nel corso di tali eventi.

Il modello così sollecitato, restituisce l'evoluzione del profilo medio del fondo e del profilo della superficie libera.

I risultati di tale simulazione sono riportati nelle Figure 6.1, 6.2, 6.3. Queste mostrano alcuni fatti di un certo rilievo.

Il modello, sollecitato dagli eventi reali, nel periodo 2003-2008 riproduce un'evoluzione che, a partire dal rilievo 2003 e ignorando i dragaggi eseguiti, perviene ad una configurazione 2008 in ottimo accordo con la configurazione di equilibrio relativa ad un valore di portata stazionaria pari a 500 m³/s: dunque, il profilo di equilibrio per questa portata può considerarsi l'assetto che il corso d'acqua mantiene anche in presenza delle fluttuazioni di portata caratteristiche del bacino, anche se va osservato che nel periodo 2003-2008 il Magra non è stato sollecitato da eventi molto intensi. Si noti, inoltre, che il profilo ottenuto attraverso le simulazioni risulta anche in buon accordo con quello osservato nel 2008. Differenze di qualche rilievo si osservano nel



Figura 6.1: Evoluzione subita dal profilo del fondo del tratto focivo del Magra secondo i risultati della simulazione a fondo mobile. Il fondo iniziale, rilevato nel 2003, è rappresentato dalla linea rossa tratteggiata; il fondo rilevato nel 2008 è rappresentato dalla linea rossa continua; il fondo ottenuto attraverso la simulazione sollecitando l'alveo con la sequenza di eventi osservati nel periodo 2003-2008 è rappresentato dalla linea nera spessa. Le linee nere sottili rappresentano gli assetti di equilibrio del fondo per diversi valori della portata assegnati.

tratto immediatamente prossimo alla foce, presumibilmente modellato anche dall'azione dell'agitazione ondosa, e nel tratto di alveo molto stretto compreso fra le sezioni 22 e 27, in cui l'erosione calcolata risulta superiore al reale presumibilmente a causa del carattere localmente coesivo del fondo, un effetto che non può essere messo in conto nel contesto di un modello in cui si assume omogenea la granulometria.

Se la simulazione si estende alla prima parte del 2009 (fino al rilievo successivo all'evento di Gennaio) si ottengono i risultati riportati in Figura 6.2. Si osserva che l'effetto dell'intenso evento di Gennaio è stato quello di dar luogo ad un forte processo erosivo nel tratto terminale, un risultato abbastanza ben riprodotto dalle simulazioni numeriche.

La Figura 6.3 mostra infine i risultati ottenuti estendendo la simulazione



Figura 6.2: Evoluzione subita dal profilo del fondo del tratto focivo del Magra secondo i risultati della simulazione a fondo mobile. Il fondo iniziale, rilevato nel 2003, è rappresentato dalla linea rossa tratteggiata; il fondo rilevato nel 2009 è rappresentato dalla linea rossa continua; il fondo ottenuto attraverso la simulazione sollecitando l'alveo con la sequenza di eventi cui l'alveo è stato sollecitato nel periodo 2003-2009 è rappresentato dalla linea nera.

fino ai rilievi del 2010, successivi all'evento intenso del Dicembre 2009. La simulazione riproduce solo in parte il fenomeno osservato che, nel tratto terminale ha prodotto un diffuso deposito in grado di ripristinare quasi del tutto l'assetto del fondo 2003.

Nella seconda simulazione la *condizione iniziale ipotizzata consisteva nell'assetto del fondo rilevato nel 2003 modificata assumendo che i dragaggi progettati fossero già stati realizzati secondo il progetto originario.* L'obiettivo di questa seconda simulazione consisteva nel verificare se la risposta del fondo a tale assetto iniziale suggerisca o meno la permanenza degli effetti dei dragaggi. Le condizioni al contorno utilizzate risultavano analoghe a quelle relative alla prima simulazione. I risultati ottenuti sono riportati nella Figura 6.4. Essi mostrano che l'effettuazione completa del programma di dragaggi nel 2003 sarebbe stata in gran parte vanificata dai processi di deposito conseguenti agli eventi che hanno sollecitato l'alveo nel periodo 2003-2008, sicché



Figura 6.3: Evoluzione subita dal profilo del fondo del tratto focivo del Magra secondo i risultati della simulazione a fondo mobile. Il fondo iniziale, rilevato nel 2003, è rappresentato dalla linea rossa tratteggiata; il fondo rilevato nel 2010 è rappresentato dalla linea rossa continua; il fondo ottenuto attraverso la simulazione sollecitando l'alveo con la sequenza di eventi cui l'alveo è stato sollecitato nel periodo 2003-2010 è rappresentato dalla linea nera.

le condizioni dell'alveo all'arrivo della piena del Gennaio 2009 sarebbero state prossime a quelle del 2003 precedenti i dragaggi!

Si noti che la scala temporale dei processi di deposito ed erosione dipende dall'intensità del trasporto solido, che risulta a sua volta dipendente dalla scelta del diametro medio dei sedimenti. Abbiamo verificato la sensibilità della soluzione alla scelta di d_{50} ripetendo la simulazione precedente con un valore di d_{50} pari ad 1 mm. La Figura 6.5 mostra che, con tale scelta di d_{50} , la risposta del fondo agli eventi del periodo 2003-2008 conduce alla completa vanificazione degli effetti dei dragaggi. Una stima più precisa dell'effettiva scala temporale del processo richiederebbe la formulazione di un modello che tenesse conto del carattere eterogeneo dei sedimenti. Le presenti simulazioni, fondate su un modello di sedimento omogeneo, consentono tuttavia di concludere che, qualitativamente almeno, risulta accertato il carattere non permanente dei modesti benefici (per la difesa dal rischio di esondazione) con-



Figura 6.4: Evoluzione temporale dei volumi depositati o erosi nel tratto focivo del Magra a partire dalla configurazione 2003, sulla base dei rilievi sperimentali (asterischi blu) e delle simulazioni numeriche a fondo mobile. La linea nera si riferisce alla simulazione effettuata utilizzando quale configurazione iniziale quella rilevata nel 2003, la linea rossa si riferisce alla simulazione effettuata utilizzando quale configurazione iniziale quella rilevata nel 2003 cui è stato sottratto il volume di 600000 m³ ipotizzato nel progetto di dragaggio originario. Il diametro dei sedimenti è stato assunto pari a 3 mm.

seguibili attraverso la pratica di dragaggi che allontanino la configurazione del fondo dal suo assetto di equilibrio.

Da ultimo, il lettore potrà legittimamente chiedersi: si avrebbero benefici mantenendo costantemente dragato il fondo del tratto di corso d'acqua in esame? Per rispondere a questa domanda sono state effettuate due simulazioni a fondo mobile: la prima eseguita sollecitando l'alveo con l'evento del Dicembre 2009 e ipotizzando che il fondo iniziale fosse quello rilevato nel 2003, la seconda sollecitando l'alveo con lo stesso evento idrometrico ma ipotizzando che il fondo iniziale fosse quello ottenuto attraverso i dragaggi eseguiti sulla configurazione del 2003. I risultati delle due simulazioni sono riportati nella Figura 6.6.

Il confronto fra i due profili mostra che, mantenendo il fondo permanentemente dragato (che equivarrebbe, si badi, a **usare il tratto terminale del Magra come una cava**), si avrebbe un beneficio quantificabile in un



Figura 6.5: Evoluzione temporale dei volumi depositati o erosi nel tratto focivo del Magra a partire dalla configurazione 2003, sulla base dei rilievi sperimentali (asterischi blu) e delle simulazioni numeriche a fondo mobile. La linea nera si riferisce alla simulazione effettuata utilizzando quale configurazione iniziale quella rilevata nel 2003, la linea rossa si riferisce alla simulazione effettuata utilizzando quale configurazione iniziale quella rilevata nel 2003 cui è stato sottratto il volume di 600000 m³ ipotizzato nel progetto di dragaggio originario. Il diametro dei sedimenti è stato assunto pari a 1 mm.

abbassamento dei livelli massimi di piena che non eccede 40 cm nel tratto esaminato. Si osservi, inoltre come, nel corso della piena, il fondo subisca un processo erosivo generalizzato assai più intenso nel caso in cui il fondo iniziale sia quello 2003 non dragato, in altre parole la corrente stessa svolge in qualche misura il ruolo dei dragaggi mantenendo tuttavia la continuità del trasporto solido.

7 Su un possibile intervento di sistemazione del tratto focivo finalizzato alla sua navigabilità.

Può essere di qualche utilità esaminare la possibilità che il mantenimento di condizioni di navigabilità del tratto focivo del Magra, esigenza essenziale



Figura 6.6: Inviluppo dei profili di piena (linee continue spesse rossa e nera) relativi a due simulazioni a fondo mobile effettuate per l'evento di piena del Magra del 23-25 Dicembre 2009 utilizzando quali configurazioni iniziali del fondo: i rilievi batimetrici del 2003 (linea rossa tratteggiata) e i rilievi batimetrici del 2003 con fondo dragato (linea nera tratteggiata). Le linee continue sottili (rossa e nera) rappresentano l'assetto del fondo ottenuto attraverso le simulazioni all'istante in cui defluiva la portata massima al Ponte della Colombiera. Il valore del coefficiente di Strickler per l'alveo inciso adottato nelle simulazioni era pari a 30 m^{1/3}s⁻¹.

al fine di sostenere le numerose attività connesse alla nautica insediate sulle sponde del corso d'acqua, possa essere perseguito attraverso interventi di sistemazione del corso d'acqua anziché attraverso le operazioni di dragaggio. Anche in questo caso faremo ricorso ai principi e metodi discussi nel Manuale di Morfodinamica della Regione predisposto a cura del DICAT (Seminara et al., 2008).

Gli interventi di sistemazione dovrebbero perseguire l'obiettivo di mantenere la continuità del trasporto solido che, convogliato naturalmente a mare, manterrebbe l'attuale equilibrio dei litorali. Un provvedimento utile in tal senso sarebbe la realizzazione nel tratto terminale del Magra di due pennelli interamente sommersi, dunque di nessun impatto visivo, che, alle basse portate, quelle rilevanti per l'equilibrio morfodinamico, concentrano la corrente entro un alveo attivo di larghezza costante e pari a 200 m circa, larghezza media del Magra nel tratto subito a monte dell'asta fociva (Figura 7.1). I pennelli dovrebbero essere opportunamente interrotti attraverso varchi realizzati a distanze adeguate a consentire l'accesso dei natanti che stazionano lungo le sponde. La concentrazione dei deflussi delle basse portate nella porzione centrale dell'alveo condurrebbe ad un abbassamento del fondo in tale porzione di alveo, che avrebbe caratteristiche permanenti. Verifichiamone l'entità.



Figura 7.1: Schema che descrive l'andamento planimetrico ed una sezione caratteristica del tratto focivo del Magra ristretto attraverso l'introduzione di pennelli longitudinali sommersi.

A tale scopo è opportuno analizzare l'assetto di equilibrio del fondo nella nuova configurazione planimetrica. L'analisi ripercorre le linee già descritte in precedenza. Assumiamo come portata formativa stazionaria la portata di 500 m³/s che abbiamo mostrato essere quella che si confronta in modo soddisfacente con l'assetto del fondo osservato. Con tale valore della portata formativa abbiamo calcolato il profilo della superficie libera con l'attuale configurazione del fondo e l'andamento planimetrico modificato come descritto in precedenza. La quota della sommità dei pennelli è stata assunta coinciden-

te con il livello della superficie libera con l'alveo sollecitato da una portata pari a 500 m³/s, in modo tale che il deflusso delle basse portate, quelle che svolgono la funzione di modellazione del fondo, siano interamente contenute nella porzione centrale dell'alveo. Le caratteristiche della corrente note nella sezione iniziale del tronco esaminato ci hanno consentito di calcolare la portata solida in equilibrio con la portata liquida. Con tali valori della portata solida e della portata liquida, abbiamo quindi calcolato il profilo di equilibrio associato alla configurazione planimetrica modificata. I risultati di tale calcolo sono riportati nella Figura 7.2. Si osserva un significativo abbassamento del fondo nel tratto focivo, con un picco di 1,37 m ed una media di 1 m circa.



Figura 7.2: Profili di equilibrio del fondo associati alla configurazione planimetrica attuale (nera continua) e a quella modificata (rossa continua) in cui si osserva un significativo abbassamento nel tratto focivo. Sono inoltre riportati i profili della superficie libera ottenuti a fondo fisso per un valore di portata pari a 3000 m³/s nelle due configurazioni, quella attuale con il fondo all'equilibrio (nera tratteggiata) e quella modificata con il fondo ancora all'equilibrio (rossa tratteggiata).

Si noti che tale risultato è condizionato dall'ipotesi che i deflussi formativi siano convogliati interamente nell'alveo inciso, dipende cioè dalla quota prescelta per la sommità dei pennelli. I benefici della sistemazione si riducono naturalmente se si riduce la quota del coronamento dei pennelli consentendo anche alle basse portate di defluire in parte nelle fasce laterali, al di sopra del coronamento stesso.

Avendo accertato che la sistemazione appare, almeno qualitativamente efficace, abbiamo quindi verificato che l'abbassamento del fondo di equilibrio abbia caratteri di permanenza. A tale scopo abbiamo eseguito un'ulteriore simulazione a fondo mobile in cui la configurazione planimetrica modificata è stata sollecitata con la sequenza di eventi osservati a partire dal 2003 assumendo quale configurazione altimetrica iniziale quella di equilibrio associata alla planimetria modificata (linea tratteggiata in Figura 7.3). La linea continua sottile rappresenta il profilo del fondo ottenuto a istanti diversi della simulazione: si osservi come il fondo permanga sostanzialmente inalterato nel periodo 2003-2008 e subisca un ulteriore approfondimento in occasione degli eventi di piena successivi, a valle di ciascuno dei quali si verifica un recupero di quota associato a processi di deposito che non sono in grado tuttavia di ripristinare il fondo iniziale. Il processo di approfondimento indotto dalla proposta sistemazione del tratto focivo del corso d'acqua appare, dunque, avere caratteri di permanenza.

Quest'ultima simulazione ci consente anche di verificare gli effetti che la sistemazione avrebbe sull'idrodinamica degli eventi di piena. La Figura 7.4 mostra un confronto fra l'inviluppo dei profili della superficie libera ottenuti con riferimento alla configurazione planimetrica attuale (linea continua nera) e quelli relativi alla configurazione modificata (linea continua rossa). Si evince che la sistemazione non produce effetti negativi sui deflussi.

Abbiamo, infine, ripetuto la simulazione relativa al solo evento di Dicembre 2009, tenendo conto del fatto che, nel corso della piena, parte non irrilevante del deflusso si realizza nella porzione delle fasce laterali al di sopra del coronamento dei pennelli: abbiamo quindi, esteso la sezione disponibile per il deflusso a tali porzioni della sezione, mantenendo il trasporto della fase solida nella sola porzione centrale. I risultati di tale simulazione sono riportati nella Figura 7.5. Da essa si evince che la risposta del fondo alla propagazione della piena che si ottiene in tali condizioni risulta molto simile a quella ottenuta attraverso la simulazione in cui il deflusso nelle fasce laterali era stato trascurato. La risposta idrodinamica risulta invece, non inaspettatamente più favorevole, dando luogo ad inviluppi della piena più bassi ancorché in misura modesta.

Tali risultati appaiono molto incoraggianti, suggerendo che la sistemazione qui discussa merita ulteriori approfondimenti, essendo in grado, senza dar luogo ad un peggioramento del rischio di esondazione, di conseguire i benefici auspicati: miglioramento della navigabilità, permanenza dell'assetto del fondo e mantenimento della continuità del trasporto solido atta a non alterare l'attuale equilibrio dei litorali.

Va infine osservato che la realizzazione di barriere sommerse del tipo qui suggerito produrrebbe un ulteriore beneficio, quello di proteggere le sponde del tratto focivo dall'agitazione ondosa che penetra attraverso la foce e interessa gli insediamenti spondali.



7 Su un possibile intervento di sistemazione del tratto focivo finalizzato alla sua navigabilità. 37

Figura 7.3: La linea continua sottile rappresenta il profilo del fondo ottenuto attraverso la simulazione a fondo mobile in cui la configurazione planimetrica modificata è stata sollecitata con la sequenza di eventi osservati a partire dal 2003 assumendo quale configurazione altimetrica iniziale quella di equilibrio associata alla planimetria modificata (linea tratteggiata). Gli eventi simulati sono quelli compresi nell'intervallo di tempo compreso fra: il 2003 ed il Dicembre 2008 (a); il 2003 ed il Gennaio 2009, post evento (b); il 2003 ed il Dicembre 2009 pre evento (c); il 2003 ed il Dicembre 2009 post evento (d); il 2003 e Agosto 2010 (e); il 2003 ed il Gennaio 2011 (f). La linea continua spessa rappresenta la configurazione del fondo rilevata nel 2010.



Figura 7.4: Confronto fra l'inviluppo dei profili della superficie libera ottenuti attraverso la simulazione 2003-2011 eseguita utilizzando la configurazione planimetrica attuale e quelli relativi alla configurazione modificata.

8 Conclusioni

Le richieste contenute nel testo della Convenzione, cui risponde la presente Relazione, possono così riassumersi:

- 1. determinare e quantificare il grado di riduzione delle condizioni di rischio conseguibile attraverso il dragaggio del tratto terminale del Fiume Magra;
- 2. accertare la stabilità nel tempo della configurazione dell'alveo realizzata attraverso interventi di dragaggio;
- 3. identificare le eventuali adeguate azioni successive che risulterebbero necessarie al fine di garantirne il mantenimento.

Le analisi discusse in precedenza consentono di pervenire alle seguenti conclusioni:

1. L'evento del 23-25 Dicembre 2009 che ha interessato il bacino del Magra è stato caratterizzato nel tratto di foce da una portata al colmo che



Figura 7.5: Confronto fra l'inviluppo dei profili della superficie libera ottenuti attraverso la simulazione 2003-2011 eseguita utilizzando la configurazione planimetrica attuale e quelli relativi alla configurazione modificata.

si è verosimilmente aggirata intorno a 4050 m^3/s , cui corrisponde un periodo di ritorno all'incirca trentennale. Ipotizzando che: (i) l'alveo di cui ai rilievi del 2003 fosse stato sottoposto al piano di dragaggi che prevedeva la rimozione di un volume di circa 600.000 m^3 di sedimenti dal tratto focivo; (ii) l'assetto dell'alveo post-dragaggi si fosse mantenuto sostanzialmente inalterato fino al Gennaio 2009; la propagazione degli eventi del 2009 sarebbe avvenuta con una lieve riduzione dei livelli di piena. Precisamente, per la portata al colmo di $4050 \text{ m}^3/\text{s}$, stimata per l'evento del 23-25 Dicembre 2009, i livelli avrebbero subito riduzioni variabili con un massimo di 45 cm circa nell'intero tratto analizzato. Si vede, quindi, che anche se i dragaggi avessero carattere di stabilità (e non è questo il caso in esame) o fossero eseguiti permanentemente, i loro effetti sulla riduzione del rischio di esondazione del tratto terminale del Magra sarebbero modesti, contribuirebbero cioè assai poco alla messa in sicurezza di un territorio rivierasco per il quale si paventano eventi che possono eccedere di oltre $3000 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ la portata contenuta nell'alveo del tratto focivo.

2. La configurazione dell'alveo realizzata attraverso interventi di dragaggio, in assenza di adeguati interventi di sistemazione del corso d'acqua, non ha caratteri di stabilità. La simulazione non stazionaria a fondo mobile effettuata assumendo come condizione iniziale l'assetto del fondo rilevato nel 2003 modificato assumendo che i dragaggi progettati fossero già stati realizzati secondo il progetto originario, ha mostrato infatti che l'effettuazione completa del programma di dragaggi nel 2003 sarebbe stata in gran parte vanificata dai processi di deposito conseguenti agli eventi che hanno sollecitato l'alveo nel periodo 2003-2008, sicché le condizioni dell'alveo all'arrivo della piena del Gennaio 2009 sarebbero state prossime a quelle del 2003!

Tale risultato trova giustificazione nel fatto che lo strumento dragaggi è uno strumento innaturale: esso ignora che il profilo attuale del fondo del tratto focivo del Magra non è affatto il risultato di un processo di sovralluvionamento del corso d'acqua: è un assetto di quasi-equilibrio, soggetto a fluttuazioni nel corso degli eventi di piena, ma ripristinato dai deflussi ordinari successivi agli eventi di piena. Ne consegue che la risposta morfodinamica dell'alveo all'effettuazione dei dragaggi è invariabilmente quella di tendere a ripristinare l'assetto del fondo precedente gli interventi.

3. Mantenere un alveo con fondali maggiori di quelli attuali richiederebbe una sistematica ripetizione di operazioni di dragaggio che avrebbero, oltre ai rilevanti costi, il negativo effetto di interrompere la continuità del trasporto solido: quest'ultimo infatti darebbe luogo a sistematici depositi nel tratto focivo rimossi appunto dai sistematici dragaggi, con la conseguenza di interrompere l'apporto di sedimenti ai litorali circostanti la foce del Magra. Alternativamente, un approfondimento stabile dell'alveo nel suo tratto terminale si può ottenere attraverso interventi di sistemazione con impatto ambientale modesto e costo paragonabile con quello dei dragaggi. Tali interventi, correttamente progettati, senza aggravare il rischio di esondazione, potrebbero assicurare molti dei benefici auspicati: miglioramento della navigabilità del tratto focivo, permanenza dell'assetto del fondo, mantenimento della continuità del trasporto solido atta a non alterare l'attuale equilibrio dei litorali e, infine, protezione delle sponde del corso d'acqua dalla penetrazione dell'agitazione ondosa.

Desideriamo sottolineare, infine, esplicitamente che avallare la tesi secondo la quale, attraverso un intervento, quello di periodici dragaggi, costoso e sostanzialmente inutile allo scopo conclamato, si ottenga un significativo beneficio per la difesa dalle esondazioni del tratto terminale del Magra, significherebbe illudere la popolazione rivierasca.

Onestà intellettuale esige che si distingua fra **due scopi, entrambi** importanti, ma del tutto indipendenti:

- 1. Il primo scopo è quello di **difendere i territori rivieraschi dalle esondazioni**: questo obiettivo, ottenibile attraverso gli strumenti predisposti dal Piano per le aree esterne ai costruendi rilevati arginali, trarrebbe, a opinione di chi scrive, notevole vantaggio da una riconsiderazione attenta dei benefici che si ricaverebbero attraverso la realizzazione di un'adeguata opera di scolmo, che estenderebbe i suoi favorevoli effetti anche agli insediamenti interni ai costruendi rilevati.
- 2. Il secondo è quello di **mantenere la navigabilità** del tratto di Magra in esame: come dimostrato in precedenza, tale obiettivo si può ottenere, mantenendo la continuità del trasporto solido atta a non alterare l'attuale equilibrio dei litorali, attraverso interventi di sistemazione del tratto focivo del corso d'acqua, con impatto ambientale modesto e costo paragonabile con quello dei dragaggi.

Ci pare, infine, che distinguere gli scopi non sia solo un dovere ma possa anche contribuire a mobilitare contributi da parte di tutti i soggetti coinvolti, condizione indispensabile per rendere la realizzazione delle opere praticabile in tempi ragionevoli.

Appendice 1: Il modello idrodinamico monodimensionale di propagazione delle piene

a Formulazione del problema

Il problema matematico che si pone è quello di determinare l'andamento (nello spazio e nel tempo) del profilo della superficie libera e delle portate fluenti nel tronco terminale del Magra per assegnate condizioni al contorno. La modellazione è qui ristretta all'alveo inciso, mentre l'effetto di invaso delle aree inondate così come la relativa capacità di deflusso sono stati trascurati.



Figura 8.1: Schema della generica sezione dell'alveo e notazioni.

Indicheremo con x una coordinata spaziale definita lungo l'asse del corso d'acqua e con t il tempo. Siano, inoltre, (figura 8.1):

- h(x,t) il carico piezometrico, ovvero la quota della superficie libera nella sezione x al tempo t;
- Q(x,t) la portata volumetrica della fase liquida che attraversa la sezione x al tempo t.

Il modello di propagazione delle piene si formula attraverso il sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali che governano la dinamica della corrente fluida, dunque il principio di conservazione della massa ed il principio della quantità, che si scrivono nella forma: Conservazione della massa per la fase liquida

$$\frac{\partial\Omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_l \tag{8.1}$$

avendo indicato con Ω l'area della sezione della corrente e con q_l la portata laterale affluente nel corso d'acqua per unità di lunghezza.

Principio della quantità di moto per la fase liquida

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{\Omega} + gI_1 \right) = gI_2 + g\Omega(i_f - j) + \frac{Q}{\Omega}q_l \tag{8.2}$$

dove β rappresenta il coefficiente correttivo della quantità di moto, i_f è la pendenza locale del fondo, I_1 rappresenta il termine di pressione idrostatica, I_2 è il temine di non cilindricità e j rappresenta la perdita di carico totale per unità di lunghezza, che si scrive

$$j = \frac{Q^2}{g(\Omega^2 C^2 R)} \tag{8.3}$$

con g accelerazione di gravità e C conduttanza media della sezione.

Il calcolo delle quantità Ω , β , $(\Omega^2 C^2 R)$ si effettua, in sezioni di forma irregolare, attraverso opportuni integrali nella sezione, seguendo un procedimento proposto originariamente da Engelund (1964) che conduce alle seguenti relazioni:

$$\Omega = \int_{-b_1}^{b_2} \left[h - z_f(y) \right] dy \tag{8.4}$$

$$\beta = \frac{\Omega \int_{-b_1}^{b_2} c^2(y) [h - z_f(y)]^2 dy}{\left[\int_{-b_1}^{b_2} c(y) [h - z_f(y)]^{3/2} dy\right]^{3/2}}$$
(8.5)

$$\Omega^2 C^2 R = \left[\int_{-b_1}^{b_2} c(y) \left[h - z_f(y) \right]^{3/2} dy \right]^2$$
(8.6)

avendo indicato con $z_f(y)$ la quota del punto generico del fondo della sezione e con c(y) la conduttanza locale, espresse in funzione della coordinata trasversale y (Figura 8.1). I valori di z_f si ottengono dai rilievi delle sezioni, mentre i valori della conduttanza locale sono stimati sulla base delle osservazioni di campo.

b Lo schema numerico

Semplici elaborazioni (si veda ad esempio Abbott, 1992) consentono di riscrivere le equazioni di governo (8.1)-(8.2) nella forma *conservativa* seguente:

$$\partial_t \mathbf{U} + \partial_x \mathbf{F} = \mathbf{S} , \qquad (8.7)$$

o, alternativamente, nella forma non conservativa:

$$\partial_t \mathbf{U} + \mathbf{J} \partial_x \mathbf{U} = \mathbf{S} \,. \tag{8.8}$$

Nelle precedenti equazioni \mathbf{U} rappresenta il vettore delle funzioni incognite e \mathbf{S} rappresenta il vettore dei termini sorgente:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \Omega \\ Q \end{bmatrix} \quad , \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} q_l \\ gI_2 + g\Omega(i_f - j) + \frac{Q}{\Omega}q_l \end{bmatrix} , \quad (8.9)$$

mentre \mathbf{F} rappresenta il vettore dei flussi e \mathbf{J} la matrice Jacobiana

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{\Omega} + gI_1 \end{bmatrix} \quad , \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ g\frac{\Omega}{b} - \left(\frac{Q}{\Omega}\right)^2 & 2\frac{Q}{\Omega} \end{bmatrix} \quad . \tag{8.10}$$

Inoltre

$$\Omega = \int_0^{Y(x,t)} \sigma(x,\xi) d\xi \quad , \tag{8.11}$$

$$I_1 = \int_0^{Y(x,t)} (h-\xi)\sigma(x,\xi) \, d\xi \quad , \quad I_2 = \int_0^{Y(x,t)} (h-\xi)\frac{\partial\sigma(x,\xi)}{\partial x} \, d\xi \, . \quad (8.12a,b)$$

e $\sigma(x,\xi)$ rappresenta la lunghezza del segmento intersezione della sezione con la retta $z = \xi$.

Da un semplice confronto tra le formulazioni (8.7) e (8.8) appare evidente, infine, che

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{U}} \quad . \tag{8.13}$$

Data l'iperbolicità del sistema di equazioni di governo, la loro forma conservativa generale (8.7) consente di ottenere soluzioni in cui le discontinuità eventualmente presenti all'interno della soluzione si propagano correttamente.

Numerosi sono gli approcci proposti in letteratura per la soluzione del sistema differenziale (8.7). Nel presente modello è stato adottato lo schema esplicito del secondo ordine, sia nello spazio sia nel tempo, originariamente proposto da MacCormack (1969). Tale schema prevede l'utilizzo di due passi, uno detto di *predizione*

$$\mathbf{U}_{i}^{p} = \mathbf{U}_{i}^{n} - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\mathbf{F}_{i+1}^{n} - \mathbf{F}_{i}^{n} \right] + \Delta t \mathbf{S} \left(\mathbf{U}^{n}, x \right)$$
(8.14)

in cui i termini sorgente vengono valutati puntualmente utilizzando le variabili al tempo n, ed uno detto di *correzione*:

$$\mathbf{U}_{i}^{c} = \mathbf{U}_{i}^{n} - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\mathbf{F}_{i}^{p} - \mathbf{F}_{i-1}^{p} \right] + \Delta t \mathbf{S} \left(\mathbf{U}^{p}, x \right)$$
(8.15)

in cui i termini sorgente vengono valutati puntualmente ma utilizzando le variabili di predizione. La soluzione al tempo n+1 si valuta come media tra il passo di predizione e il passo di correzione:

$$\mathbf{U}_{i}^{n+1} = 0.5 \left(\mathbf{U}_{i}^{p} + \mathbf{U}_{i}^{c} \right) \quad . \tag{8.16}$$

Per eliminare le oscillazioni spurie che si generano, in presenza di discontinuità della soluzione, utilizzando schemi lineari di ordine superiore al primo (Godunov, 1959), si utilizza un algoritmo di tipo Total Variation Diminishing (TVD) che riformula lo schema di MacCormack in forma non lineare (Garcia-Navarro & Alcrudo, 1992).

Per assicurare infine la stabilità del metodo, dev'essere soddisfatta la condizione di Courant-Friederichs Lewy che impone la seguente restrizione sul passo temporale:

$$\Delta t \le CFL \frac{\Delta x_i}{\max\left(\lambda_i\right)} \tag{8.17}$$

dove λ_i è il generico autovalore associato alla matrice Jacobiana **J**.

c Condizioni al contorno

Lo schema di MacCormack, come molti altri schemi espliciti, può essere usato per far avanzare la soluzione numerica nel tempo in tutti i punti della griglia computazionale esclusi il primo e l'ultimo.

Nei nodi estremi devono essere imposte le condizioni al contorno. Il numero di tali condizioni non è tuttavia sufficiente a determinare completamente la soluzione. Una delle tecniche più frequentemente usate per risolvere tale problema, cioè per ricavare le variabili non assegnate dalle condizioni al contorno nelle sezioni di estremità, consiste nell'utilizzo del metodo delle caratteristiche. Nella prima sezione, cioè quella localizzata all'estremità di monte, deve essere assegnata almeno una condizione al contorno, in quanto una delle celerità delle caratteristiche è invariabilmente positiva. Se il moto è localmente subcritico la seconda condizione viene ricavata risolvendo l'equazione di compatibilità associata all'autovalore negativo dalla sezione 2 verso la sezione 1 lungo la relativa curva caratteristica. Se il moto è localmente supercritico, una seconda condizione al contorno deve essere nota nella prima sezione.

Analoghe considerazioni valgono per la sezione di estremità a valle (n), dove viene assegnata una sola condizione al contorno se la corrente è localmente lenta. L'altra incognita deve essere determinata risolvendo l'equazione di compatibilità, questa volta associata alla caratteristica positiva, che si propaga cioè dalla sezione di monte (n-1) verso quella di valle (n). Se la corrente è localmente veloce devono essere risolte le due equazioni di compatibilità vigenti lungo le due caratteristiche positive.

In particolare, per l'imposizione delle condizioni al contorno, sono state utilizzate le seguenti ipotesi:

- 1. la sezione iniziale del tratto focivo del Fiume Magra in esame è stata sollecitata con gli idrogrammi degli eventi esaminati rilevati dall'idrometro localizzato a monte del Ponte della Colombiera.
- 2. nella sezione terminale del tronco esaminato (sbocco a mare) è stato imposto il livello del mare; tale livello, nel corso di eventi di piena intensi, è stato sopraelevato rispetto al livello di quiete di una quota pari a 0,5 m per tenere conto dell'effetto dinamico dell'agitazione ondosa e delle modeste oscillazioni di marea presenti nel Mar Tirreno.

d Valori di conduttanza locale e base topografica

Il calcolo è stato effettuato adottando nell'alveo inciso un valore del coefficiente di conduttanza di Strickler k_s pari a 30 m^{1/3}s⁻¹ sulla base delle valutazioni riportate nel seguito.

Semplici stime ci consentono anzitutto di escludere che, almeno per valori di portata prossimi a quelli al colmo, si formino forme di fondo fluviali di piccola scala. La formazione di forme di fondo di piccola scala può essere infatti predetta sulla base di numerosi abachi disponibili in letteratura. In particolare, la Figura 8.2 mostra che sono due i parametri adimensionali che governano la formazione di tali forme: un numero di Reynolds di attrito $u_{\tau}d/\nu$ con u_{τ} velocità di attrito e ν viscosità cinematica dell'acqua e una sorta di numero di Rouse u_{τ}/W_s con W_s velocità di sedimentazione.

La distribuzione granulometrica dei sedimenti del fondo del Magra nel tratto focivo è caratterizzata da valori di d_{50} variabili da una frazione di mm a



Figura 8.2: Abaco di Simons e Richardson (1961) per la formazione delle forme di fondo di piccola scala negli alvei fluviali.

diversi mm. Essendo la velocità di attrito u_{τ} dell'ordine di 20 cm/s, il numero di Reynolds d'attrito risulta variabile fra poche decine e poche centinaia. La Figura 8.2 mostra quindi chiaramente che il regime del deflusso non prevede siano presenti forme di fondo di piccola scala, se non alle basse portate.

La stima delle resistenze d'attrito può dunque effettuarsi adottando, per esempio, per il coefficiente di conduttanza adimensionale C la relazione logaritmica nella forma di Van Rijn (1984):

$$C = 2.5 \ln \left(\frac{12R}{\epsilon}\right) \tag{8.18}$$

con R raggio idraulico ed ϵ scabrezza assoluta che, in assenza di forme di fondo, si può stimare nella forma (Van Rijn, 1984):

$$\epsilon = 3d_{90} \tag{8.19}$$

Cautelativamente si può stimare che il valore di $3d_{90}$ si aggiri intorno a 10 cm (si veda la Figura 2.4 tenendo conto del fatto che nel corso di un evento di piena la corrente è in grado di trasportare materiali (mobilitati più a monte) di dimensione anche maggiore di quella dei sedimenti che si trovano sul fondo

del corso d'acqua a valle dell'evento). Ciò conduce a stime per la conduttanza intorno a 15. Con un raggio idraulico medio intorno a 4 m nel tratto di corso d'acqua considerato segue per la componente d'attrito di k_s un valore intorno a 37 m^{1/3}s⁻¹. Tests effettuati su profili di rigurgito stazionari relativi al tratto focivo del Magra, mostrano poi che un valore del coefficiente di Strickler per la sola componente d'attrito delle resistenze pari a 37 m^{1/3}s⁻¹ equivale ad un valore efficace del coefficiente di Strickler totale (che tiene conto cioè anche degli effetti legati alle graduali variazioni di forma) intorno a 33-34 m^{1/3}s⁻¹. A scopo cautelativo abbiamo ritenuto di adottare un valore per k_s di poco più basso, al fine di tenere conto degli ulteriori effetti dissipativi legati al trasporto di materiali flottanti che accompagna tipicamente il deflusso di piene di grande intensità.

Le simulazioni idrauliche sono state realizzate risolvendo numericamente le equazioni di continuità e di de Saint Venant su una griglia di calcolo che copre il tratto focivo del Magra per una lunghezza di 4,5 km circa. Tale griglia (Figura 8.3) è stata ottenuta sulla base delle sezioni rilevate nel 2009 (dati gentilmente resi disponibili da AdB Magra).



Figura 8.3: Mappa delle aree adiacenti al tratto focivo del Magra soggette ad inondazione nel corso dell'evento di piena del 25 Dicembre 2009 (gentile concessione di AdB Magra). In figura è anche indicata l'ubicazione delle sezioni rilevate nel 2009 e utilizzate come griglia di calcolo per la modellazione numerica.

Appendice 2: Il modello morfodinamico monodimensionale di evoluzione del fondo

Lo studio dell'evoluzione temporale del fondo e della corrente liquida di un corso d'acqua, in risposta a variazioni della geometria dell'alveo o dell'alimentazione idrica o solida, può essere effettuato nell'ambito dello schema 1-D quando la scala delle variazioni spaziali esaminate risulta molto grande rispetto alla profondità e alla larghezza del corso d'acqua. Sono dunque esclusi dall'oggetto dell'indagine i processi di formazione ed evoluzione di forme di fondo di piccola scala (ripples, dune e antidune) o di grande scala (barre). Sono altresì esclusi i fenomeni localizzati.

e Formulazione del problema morfodinamico nel caso di dominante trasporto di fondo

Alle variabili introdotte nell'Appendice 1 (vedi anche la Figura 8.1), dato il carattere mobile del fondo, occorre aggiungere due ulteriori **funzioni inco-gnite**, la quota media del fondo nella sezione $\overline{\eta}(x,t)$ e la $Q_s(x,t)$ portata solida. Il problema formulato nell'Appendice 1 richiede, quindi, di essere integrato attraverso opportune formulazioni dei principi di conservazione della massa e della quantità di moto per la fase solida. Inoltre, anche le equazioni di bilancio della fase liquida risentono del fatto che il fondo è mobile. Ciò ha una prima importante conseguenza: nella valutazione delle derivate spaziale e temporale di Ω occorre tenere conto del fatto che *l'area della sezione può cambiare non solo perché può spostarsi la superficie libera, ma anche perché può spostarsi il fondo*. Matematicamente si tiene conto di ciò osservando che si ha:

$$\Omega = \Omega[h(x,t),\overline{\eta}(x,t),x]$$
(8.20)

cioè l'area della sezione risulta funzione sia esplicita che implicita della variabile longitudinale. Segue:

$$\frac{d\Omega}{dt} = \left. \frac{\partial\Omega}{\partial h} \right|_{\overline{\eta};x} h_{,t} + \left. \frac{\partial\Omega}{\partial\overline{\eta}} \right|_{h;x} \overline{\eta}_{,t}, \tag{8.21}$$

$$\frac{d\Omega}{dx} = \Omega_{,x} \mid_{h;\overline{\eta}} + \frac{\partial\Omega}{\partial h} \mid_{\overline{\eta},x} h_{,x} + \frac{\partial\Omega}{\partial\overline{\eta}} \mid_{h,x} \overline{\eta}_{,x}.$$
(8.22)

Osservando che, indicata con b la larghezza della superficie libera e con b_f la larghezza del fondo medio in ogni sezione, risulta:

$$b = \frac{\partial \Omega}{\partial h} \Big|_{\overline{\eta};x}, b_f = -\frac{\partial \Omega}{\partial \overline{\eta}} \Big|_{h;x}, \qquad (8.23)$$

le (8.21) e (8.22) assumono la più semplice forma:

$$\frac{d\Omega}{dt} = bh_{,t} - b_f \overline{\eta}_{,t} \tag{8.24}$$

$$\frac{d\Omega}{dx} = bh_{,x} - b_f \overline{\eta}_{,x} + \Omega_{,x} \mid_{h,\overline{\eta}}$$
(8.25)

Le (8.24) e (8.25) vanno associate alle equazioni di bilancio (8.1) e (8.2).

Le equazioni di bilancio delle correnti a fondo mobile

Ciò premesso, il problema della morfodinamica delle correnti a fondo mobile si completa introducendo anzitutto l'equazione di conservazione della massa per la fase solida che, posto che le sponde siano non erodibili (non vi sia cioè un apporto solido alla corrente per effetto del collasso delle sponde) e non vi siano ulteriori apporti laterali di sedimenti dovuti per esempio ad un affluente, assume la forma classica:

$$(1-p)b_f \frac{\partial \overline{\eta}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}Q_s = 0$$
(8.26)

La (8.26) può poi essere generalizzata al caso in cui siano presenti apporti laterali di sedimenti. Detta q_{sl} la portata laterale di sedimenti per unità di lunghezza, la (8.26) diventa:

$$(1-p)b_f\frac{\partial\overline{\eta}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}Q_s = q_{sl}$$
(8.27)

avendo assunto q_{sl} positiva (negativa) se si tratta di un apporto (sottrazione) di sedimenti. L'utilizzazione delle (8.26, 8.27) richiede la valutazione della portata solida trasportata al fondo nell'intera sezione Q_s , cioè, a rigori, la soluzione dell'equazione del moto della fase solida. Nella pratica, nel caso di dominante trasporto al fondo, l'equazione del moto della fase solida viene sostituita da una relazione empirica che lega la portata solida alla tensione di Shields media nella sezione $\overline{\tau}_*$, che si scrive:

$$\overline{\tau}_* = \frac{Q^2}{C^2 \Omega^2 (s-1) dg} \tag{8.28}$$

con C conduttanza media della sezione. Si noti che la valutazione di $\overline{\tau}_*$ accoppia il problema morfodinamico con quello idrodinamico. Si ha, quindi, in generale:

$$Q_s = \sqrt{(s-1)gd^3}Q_s(\overline{\tau}_*) \tag{8.29}$$

La (8.26) (o la (8.27)) e la (8.29), vanno risolte congiuntamente alle equazioni delle correnti liquide formulate in precedenza. La soluzione del problema richiede inoltre l'introduzione di opportune *condizioni iniziali* e *condizioni al contorno* aggiuntive.

Condizioni iniziali e condizioni al contorno

Quali condizioni iniziali occorre assegnare i valori delle funzioni incognite in ciascuna delle sezioni considerate nel calcolo. Dunque, assumendo di scegliere quali funzioni incognite le grandezze h(x,t), $\overline{\eta}(x,t)$ e Q(x,t), le condizioni iniziali possono porsi nella forma:

$$h(x,t)|_{t=0} = h_0(x) , \ \overline{\eta}(x,t)|_{t=0} = \overline{\eta}_0(x) , \ Q(x,t)|_{t=0} = Q_0(x) \ (0 < x < L)$$
(8.30)

Le condizioni al contorno assegnano i valori delle funzioni incognite al variare del tempo nella sezione iniziale (x = 0) o nella sezione finale (x = L). Nel caso delle correnti a fondo mobile con dominante trasporto al fondo, due delle condizioni iniziali si assegnano invariabilmente nella sezione iniziale e la terza nella sezione finale. Ciò dipende dai modi in cui le informazioni si propagano nelle correnti a fondo mobile. Si tratta di una questione delicata dal punto di vista matematico che non sarà quindi discussa qui.

Le condizioni al contorno, adeguate al caso della propagazione di una piena in una corrente a fondo mobile, sono:

$$h(x,t)|_{x=0} = f(t) , \ \overline{\eta}(x,t)|_{x=L} = \overline{\eta}_L(t) , \ Q(x,t)|_{x=0} = q(t) \ (t>0)$$
(8.31)

Si assegnano cioè portata volumetrica e quota della superficie libera nella sezione iniziale e quota della superficie libera (o quota media del fondo) nella sezione finale.

f Formulazione del problema morfodinamico nel caso di trasporto al fondo e in sospensione

Le equazioni di bilancio delle correnti a fondo mobile nel caso di trasporto di fondo e in sospensione La presenza del trasporto in sospensione non modifica significativamente la formulazione dei principi di conservazione della fase liquida. Al contrario, essa modifica l'equazione di evoluzione (8.26) che assume la forma:

$$(1-p)b_f \frac{\partial \overline{\eta}}{\partial t} + \frac{\partial (C\Omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}Q_s = 0$$
(8.32)

dove C è la concentrazione di sedimenti media nella sezione e Q_s è la somma delle portate solide trasportate al fondo (Q_{sb}) e in sospensione (Q_{ss}) .

La (8.32) si generalizza immediatamente al caso in cui siano presenti apporti laterali di sedimenti. Detta ancora q_{sl} la portata laterale di sedimenti per unità di lunghezza, la (8.32) diventa:

$$(1-p)b_f\frac{\partial\overline{\eta}}{\partial t} + \frac{\partial(C\Omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}Q_s = q_{sl}$$
(8.33)

con q_{sl} positiva (negativa) per un apporto (sottrazione) di sedimenti.

L'utilizzazione delle (8.32, 8.33) richiede la valutazione della portata solida trasportata in sospensione nell'intera sezione e della concentrazione media di sedimenti C: tali valutazioni accoppiano il problema morfodinamico con quello idrodinamico. A tale scopo, è necessario risolvere l'equazione di conservazione della massa della fase solida, detta anche equazione di avvezione-diffusione che, nella sua forma monodimensionale, si scrive:

$$\frac{\partial(\Omega C)}{\partial t} + \frac{(\partial\xi QC)}{\partial x} = b_f W_s (C_a - C_e) \tag{8.34}$$

con C_a concentrazione istantanea e locale alla distanza a di riferimento dal fondo, C_e concentrazione di equilibrio alla stessa distanza dal fondo e ξ coefficiente correttivo che tiene conto della non uniforme distribuzione della velocità e della concentrazione nella sezione.

La relazione fra C_a e C può porsi nella forma:

$$C_a = (0, 216C) / (I_1 \zeta_a) \tag{8.35}$$

con I_1 primo integrale di Rouse e ζ_a rapporto fra distanza a e profondità media nella sezione Y, mentre il coefficiente ξ si scrive:

$$\xi = 1 - \left[I_2 / (I_1 ln(30Y/k_s)) \right] \tag{8.36}$$

con I_2 secondo integrale di Rouse e k_s scabrezza assoluta del fondo.

Condizioni iniziali e condizioni al contorno

In presenza di trasporto in sospensione, alle funzioni incognite h(x,t), $\overline{\eta}(x,t) \in Q(x,t)$, si aggiunge la concentrazione media nella sezione C(x,t). Alle condizioni iniziali (8.30) è quindi necessario aggiungere la condizione seguente:

$$C(x,t)|_{t=0} = C_0(x) \ (0 < x < L) \tag{8.37}$$

Analogamente, alle condizioni al contorno discusse al punto precedente occorre aggiungere una condizione che assegna la funzione incognita C(x,t)al variare del tempo nella sezione iniziale (x = 0). Dunque, in particolare, le (8.31) si completano con la condizione:

$$C(x,t)|_{x=0} = c(t) \ (t>0) \tag{8.38}$$

Bibliografia

- 1. ABBOTT M.B. (1992). Computational hydraulics. Worcester: Ashgate.
- BALDACCI F. e RAGGI G. (1969). Bacino del F. Magra a) Carta della permeabilità delle rocce; b) Carta della franosità. Istituto di geologia dell'Università di Pisa. Tip. E.I.R.A, Firenze.
- BONATI, V., GOLLO, F., GIANNONI, F., NAPOLITANO, L. (2009). Rapporto di evento meteoidrologico del 19-20/01/2009. Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente Ligure, ARPAL.
- 4. ENGELUND, F., (1964). A practical approach to self-preserving turbulent flows. Acta Polytechnica Scandinavica.
- 5. ENGELUND, F., HANSEN, E., (1967). A monograph on sediment transport in alluvial streams. Teknisk Vorlag. Copenaghen.
- GARCIA-NAVARRO P., ALCRUDO F., (1992). 1-D Open Channel Flow Simulations using TVD MacCormack scheme, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 118(3) pp 1359-1372.
- GODUNOV S.K. (1959). A Finite Difference Method for the Computation of Discontinuous Solutions of the Equations of Fluid Dynamics. *Mat. Sb.*, 47:357-393.
- 8. Mac CORMACK R.W., (1969). The Effect of Viscosity in Hypervelocity Impact Cratering, AIAA Paper, 69-354, Cincinnati, Ohio.
- 9. MEDINGEGNERIA (2001). 'Messa in sicurezza idraulica delle aree prospicienti il tratto focivo del Fiume Magra', Progetto preliminare.
- 10. RINALDI M. (2007). Approfondimenti dello studio geomorfologico dei principali alvei fluviali nel bacino del Fiume Magra finalizzato alla definizione di linee guida di gestione dei sedimenti e della fascia di mobilità funzionale. Relazione Finale Convenzione di Ricerca tra Autorità di Bacino del Fiume Magra e Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Firenze, 154 pp.
- 11. SEMINARA, G., BOLLA PITTALUGA, M. e G., NOBILE, (2008). Manuale di Morfodinamica della Regione Liguria.
- 12. SEMINARA, G. e TUBINO, M., (2003). Trasporto solido fluviale. Manuale di Ingegneria Civile Cremonese, ESAC, Roma, cap. XIV.

- SIMONS, D.B. e RICHARDSON, E.V., (1961). Forms of bed roughness in alluvial channels. Ann. Soc. Civil Engineers Jour., 87 (3).
- 14. SURIAN N. e RINALDI M. (2003). Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy. Geomorphology, 50 (4), 307-326.
- TURATO, B, GIANNONI, F., GOLLO, P., QUEIROLO, V., NA-POLITANO, L., (2010). Rapporto di evento meteoidrologico del 22-25/12/2009. Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente Ligure, ARPAL.
- van RIJN, L.C., (1984). Sediment transport: bed load transport. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 110(10), p. 1431.