



AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME PO
PARMA

**PROGETTO STRATEGICO PER IL MIGLIORAMENTO DELLE
CONDIZIONI DI SICUREZZA IDRAULICA DEI TERRITORI DI PIANURA
LUNGO L'ASTA MEDIO - INFERIORE DEL FIUME PO**

Relazione Tecnica di sintesi delle attività di studio condotte dall'Autorità di bacino del fiume Po in seguito all'evento alluvionale dell'ottobre 2000 e di definizione delle linee progettuali strategiche da attivare per il miglioramento delle condizioni di sicurezza idraulica dei territori di pianura lungo l'asta medio-inferiore del fiume Po



Bozza - Luglio 2005

INDICE

<i>Introduzione</i>	4
1. Le caratteristiche generali dell'asta medio - inferiore del Po	6
2. La pianificazione di bacino	10
3. Gli eventi di piena storici e le grandi inondazioni	12
3.1. Le modalità di formazione delle piene lungo l'asta del Po sulla base della distribuzione spazio - temporale degli eventi meteorici	12
3.2. Le rotte storiche	16
4. Il fenomeno di incisione del fondo alveo e la necessità di una corretta attività di monitoraggio e manutenzione dell'alveo	23
4.1. La sistemazione dell'alveo di magra per la navigazione	25
4.2. Lo sbarramento di Isola Serafini	29
4.3. L'attività estrattiva in alveo	30
4.4. La necessità di una corretta gestione dei sedimenti alluvionali dell'alveo	30
5. Le fasi principali di sviluppo e attuale assetto delle arginature maestre	37
6. Analisi statistica delle piene storiche	43
7. La vulnerabilità delle arginature in relazione a fenomeni di tracimazione	49
7.1. Il profilo di piena osservato nell'evento dell'ottobre 2000	49
7.2. I profili di piena simulati	51
8. Le golene: i processi di laminazione delle piene e la sicurezza degli insediamenti golenali .	54
9. La vulnerabilità delle arginature in relazione ai fenomeni di filtrazione nel corpo arginale e nelle fondazioni dello stesso	57
9.1. I fontanazzi ed i fenomeni di sifonamento e sfiancamento dell'argine	57
9.2. La necessità di una caratterizzazione stratigrafica e meccanica dei terreni del corpo arginale e delle fondazioni: la campagna sperimentale di Caselle Landi	59
9.2.1 Le attività sul terreno.....	60
9.2.2. Gli obiettivi.....	60
9.2.3. I risultati di taglio generale	60
10. Il rischio residuale	65
10.1. Il concetto di rischio idraulico nel PAI	65
10.2. La metodologia per la valutazione del rischio residuale del Po	67
10.2.1. I processi di allagamento e la valutazione dell'intensità idraulica del fenomeno.....	68
10.2.2. La vulnerabilità del territorio: l'indicatore diffuso (Vtd).....	71
10.2.3. La vulnerabilità del territorio: l'indicatore puntuale (VTp)	73
11. Conclusioni: gli interventi per il miglioramento delle condizioni di sicurezza idraulica dei territori di pianura lungo il fiume Po	75
Linea A - Il monitoraggio e la manutenzione dell'alveo e il controllo della vulnerabilità delle arginature in relazione al fenomeno di erosione	76

Linea B - Il monitoraggio delle arginature e il controllo della vulnerabilità in relazione al fenomeno di sifonamento e sfiancamento	77
Linea C - La valutazione e la gestione del rischio residuale in fascia C	80
Linea D - Il miglioramento della capacità di laminazione delle golene e la laminazione controllata in fascia C della “piena al limite di prevedibilità”	82
<i>Note finali</i>	84
<i>Allegati</i>	85
<i>Studi condotti dall’Autorità di bacino</i>	86

“è d'altra parte un fatto accertato che le piene di Po sono andate progressivamente aumentando nel corso degli ultimi secoli, ed è pure certo che esse aumenteranno ancora in avvenire. I livelli della piena a Pontelagoscuro si sono elevati di un metro durante il secolo decimottavo, di un metro e mezzo nel secolo successivo e, se badiamo all'andamento che secondo il Servizio Idrografico avrebbe avuto la piena ultima qualora non fosse intervenuta la rotta di Occhiobello, si sarebbero elevati di un altro metro nell'ultimo cinquantennio”

(lettura di Giulio De Marchi alla II Giornata della Scienza, Milano 1952)

Introduzione

Già a partire dal XVI secolo il fiume Po risultava arginato con notevole continuità dal territorio mantovano al mare; successivamente e con particolare accelerazione immediatamente a valle degli eventi alluvionali più significativi lo sviluppo delle arginature è stato esteso verso monte sia sul Po che sui principali tributari, fino alla situazione attuale dove risultano arginati con continuità circa 860 km di asta fluviale di Po e circa 1420 km di asta degli affluenti.

La diminuzione della frequenza dei fenomeni di rotta in seguito agli interventi di consolidamento dei rilevati arginali nel tempo effettuati, la crescente estensione verso monte dello sviluppo delle arginature e l'aumento delle quote di sommità, hanno comportato un progressivo e significativo aumento dei livelli e delle portate defluenti lungo l'asta. Tale fenomeno è documentato confrontando, a partire dal 1800, il progressivo aumento dello sviluppo delle arginature dell'asta del Po e le altezze idrometriche osservate alla stazione di Pontelagoscuro (Figura 1).

Nel merito dell'aumento dei valori idrometrici al colmo, l'affermazione del prof. Giulio De Marchi riportata in premessa, trova conferma in quello che si è verificato sia nella piena del 1994 che in quella del 2000 in cui in particolare sono stati superati nel tratto medio dell'asta (Piacenza, Cremona, Casalmaggiore) i valori massimi storici dell'evento del 1951.

Di contro il progressivo aumento delle quote di sommità delle arginature effettuato nel corso degli anni per fronteggiare l'innalzamento costante dei livelli, ha comportato il raggiungimento su gran parte dell'asta inferiore del Po di condizioni limite strutturali non più significativamente aumentabili.

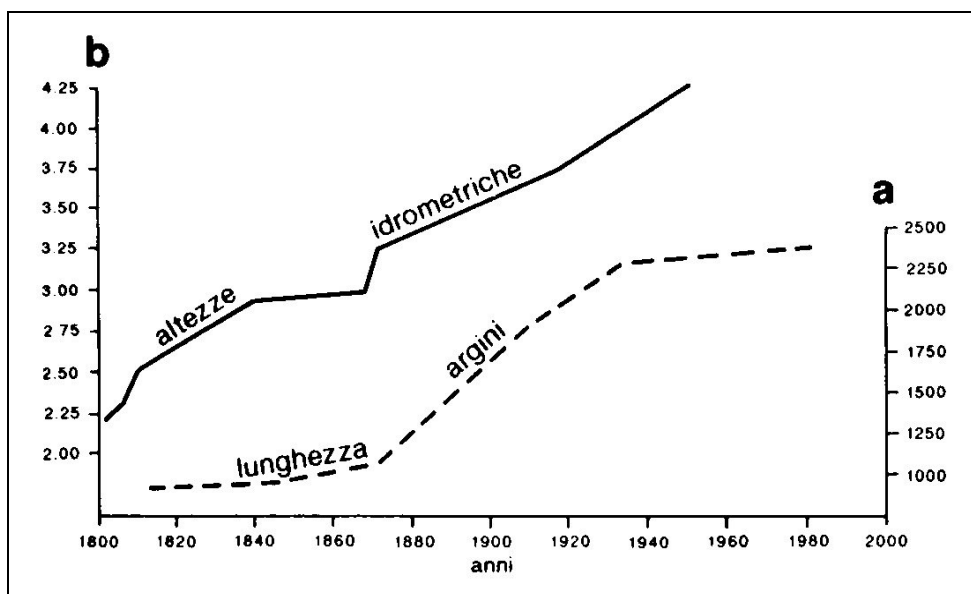
Tutto quanto premesso per evidenziare due considerazioni principali.

La prima riguarda il fatto che il raggiungimento di condizioni limite strutturali, non più significativamente aumentabili in relazione alla quota di sommità delle arginature, necessita la definizione di linee di intervento alternative rispetto al continuo e sistematico rialzo delle quote di sommità conseguente al susseguirsi di livelli di piena storici sempre maggiori, ai quali risulta impossibile fissare con certezza un limite superiore invalicabile. A tal riguardo già il prof. De Marchi, nell'articolo sopraccitato, esponeva una serie di illuminanti osservazioni in merito alla necessità di rivedere e ripensare il sistema arginato in modo da poter gestire in modo accurato anche eventi di piena non contenibili dalle arginature stesse.

La seconda considerazione riguarda il fatto che l'attuale sistema arginato del fiume Po, per quanto ben monitorato e mantenuto nel tempo non può garantire, come qualsiasi altra opera idraulica, un livello di sicurezza assoluto per il territorio circostante in relazione a scenari di rottura arginale. L'entità di tale rischio, che, in quanto connesso a scenari di mancata efficacia di un'opera idraulica, può essere definito *residuale*, e che interessa diverse migliaia di km² di pianura padana fortemente antropizzata, deve essere dunque presa in considerazione, valutata e gestita con opportuni interventi di mitigazione.

La presente relazione, raccogliendo ed organizzando tutte le attività condotte dall'Autorità di bacino nell'ambito della predisposizione del Piano di bacino e delle numerose iniziative avviate in seguito alla piena dell'ottobre 2000, ha la finalità di definire le linee progettuali strategiche di intervento da attivare per il controllo e la mitigazione del rischio residuale ed in generale per il miglioramento delle condizioni di sicurezza dei territori di pianura lungo l'asta medio inferiore del fiume Po (dalla confluenza Ticino al mare).

Figura 1: Andamento dei livelli idrici in relazione alla lunghezza degli argini maestri.



a sviluppo delle arginature lungo il Fiume Po ed i suoi tributari (in km)

b incremento delle altezze idrometriche registrate alla stazione di Pontelagoscuro (in m su zero idrometrico)

1. Le caratteristiche generali dell'asta medio - inferiore del Po

L'asta medio inferiore del fiume Po, a valle della confluenza Ticino, può essere in linea generale suddivisa in quattro tronchi omogenei per caratteristiche morfologiche dell'alveo inciso e dell'alveo di piena.

Nel tratto confluenza Ticino - confluenza Trebbia il primo tronco, fino a Monticelli Pavese, lungo circa 21 km, è sub-rettilineo, caratterizzato da depositi di barra laterale; la sinuosità diminuisce progressivamente e il carattere di canale rettificato è riscontrabile in particolare a valle di S. Cipriano Po; il tronco è stato interessato, fino alla fine del secolo scorso, da numerosi tagli artificiali di curve ed è ora sede di processi erosivi spondali di notevole intensità, che interessano una lunghezza di sponde di circa 8,9 km (il 15,4% della lunghezza dell'alveo di magra). Tale tendenza erosiva del canale di magra può essere interpretata come propensione a ristabilire la situazione pregressa.

A valle di Monticelli Pavese, si sviluppa invece un classico modello a meandri, che è rimasto pressoché immutato nel tempo e non è interessato da significativi fenomeni di erosione spondale.

L'intero tratto, con caratteristiche di moderata pluricursalità in passato, negli ultimi decenni tende ad assumere un carattere più marcatamente monocursale. Alla diminuzione dei rami secondari si accompagna un lieve aumento degli ambienti di lanca, che rappresentano morfologie ereditate recenti.

Le difese di sponda nel tratto a meandri hanno funzione prevalente di protezione dei rilevati arginali dai fenomeni erosivi. Le arginature non sono continue, in particolare non è arginato in destra il tronco in corrispondenza degli abitati di Port'Albera e Arena Po; le stesse arginature delimitano complessivamente una superficie golenale allagabile di dimensioni significative.

In relazione ai fenomeni di abbassamento di fondo alveo, dopo un lungo periodo di continua erosione (1954-1984), si rileva una leggera tendenza al deposito; il fondo medio attuale risulta tuttavia 1,0-1,5 m inferiore rispetto alle quote riferibili all'anno 1954.

Le principali caratteristiche geometriche del tronco sono di seguito indicate.

- lunghezza in asse 57,9 km,
- distanza media tra le arginature 1.700 m,
- altezza media arginature su piano golenale 5÷6 m,
- larghezza media alveo di magra 200÷250 m,
- profondità media alveo inciso 7÷8 m,
- superficie alveo inciso per km di asta fluviale 0,49 km²/km,
- superficie golena aperta per km di asta fluviale 1,28 km²/km,
- sviluppo complessivo difese spondali 55,48 km,
- sviluppo difese sponda sx rispetto a lunghezza tratto 46,6%,
- sviluppo difese sponda dx rispetto a lunghezza tratto 49,9%,
- indice di sinuosità 1,52.

Nel tratto confluenza Trebbia - confluenza Adda l'alveo presenta un andamento prevalentemente sinuoso, a ridosso delle arginature maestre in tutti i tratti in curva; la larghezza tra le sponde è continuamente variabile e si hanno isole stabili di dimensioni rilevanti in fase di ricollegamento con una delle due sponde.

Vi è la quasi generalizzata assenza di fenomeni erosivi significativi a carico delle sponde; si osserva invece una lieve ma generalizzata tendenza al deposito, a cui è corrisposto un

modesto innalzamento del fondo alveo nell'ultimo decennio. Tale tendenza si manifesta presumibilmente per effetto del rigurgito dello sbarramento idroelettrico di Isola Serafini.

A conferma dell'assetto indicato, nel periodo 1954-88 si è avuta l'assenza di variazioni significative dell'alveo di magra (se si esclude la zona di Isola Serafini), con sostanziale stabilità dell'asse dei meandri. Non vi è presenza di lanche e paleoalvei recenti, se non in forma di rami di divagazione dell'alveo per livelli idrici elevati. I pochissimi ambienti di lanca presenti nel 1954 (inferiori a 1/20 della lunghezza dell'alveo inciso), hanno subito un più o meno totale interrimento, in particolare nel periodo 1966-88.

Le arginature sono continue e racchiudono ampie zone golenali, alternativamente in sinistra e in destra; è presente una sola golena chiusa di grandi dimensioni, in prossimità di Piacenza.

Per due situazioni particolari, le curve di Mezzano Passone e di Roncarolo, si rilevano condizioni di deflusso fortemente irregolari e perturbate per regimi di piena significativi.

Le difese di sponda svolgono generalmente una funzione di contenimento dell'alveo inciso e di protezione dei rilevati arginali nei tratti in curva.

In ordine all'abbassamento di fondo alveo, dopo un periodo di continua erosione (1969-1979), si rileva una leggera e generalizzata tendenza al deposito; il fondo medio attuale risulta tuttavia inferiore alle quote riferibili all'anno 1954.

Le principali caratteristiche geometriche del tronco sono di seguito indicate:

- lunghezza in asse 28,45 km,
- distanza media tra le arginature 1.450 m,
- altezza media arginature su piano golenale 6÷6,5 m,
- larghezza media alveo di magra 200÷300 m,
- profondità media alveo inciso 7,5÷8 m,
- superficie alveo inciso per km di asta fluviale 0,41 km²/km,
- superficie golena aperta per km di asta fluviale 0,89 km²/km,
- superficie golena chiusa per km di asta fluviale 0,15 km²/km,
- sviluppo complessivo difese spondali 31,91 km,
- sviluppo difese sponda sx rispetto a lunghezza tratto 55,2%,
- sviluppo difese sponda dx rispetto a lunghezza tratto 56,9%,
- indice di sinuosità 2.10.

Nel tratto confluenza Adda - confluenza Mincio l'assetto dell'alveo è fortemente influenzato dalle opere longitudinali per la navigazione, che determinano una struttura monocursale, correlabile con i marcati abbassamenti di fondo che interessano l'intero tronco. La trasformazione in unicursale ha determinato la formazione di lanche e ambienti lentici e palustri in corrispondenza dei rami abbandonati; la successiva evoluzione si è avuta nel senso di una rapida occlusione e interrimento delle lanche stesse. Nel periodo 1954-1988 gli ambienti di lanca diminuiscono infatti sia in senso assoluto (da 58 a 53 km circa), sia come rapporto tra lunghezza totale delle lanche e lunghezza dell'alveo inciso.

In alveo si ha una diffusa presenza di isole stabili, che stanno progressivamente collegandosi all'area golenale, in conseguenza dell'interrimento di uno dei due rami, dovuto sia all'abbassamento di fondo, sia alla presenza di opere di sponda. In prossimità delle curve di navigazione si hanno zone di attiva sedimentazione, in conseguenza della creazione artificiale di settori d'alveo a bassa energia (a tergo di pennelli in alveo).

L'alveo di magra è oggi pressoché interamente sistemato per la navigazione e caratterizzato da un assetto sufficientemente stabile o comunque tendente a stabilizzarsi

(sezione unica di larghezza regolare); solo nel tratto sotteso dalla centrale e dal canale di scarico di Isola Serafini si ha un alveo ancora notevolmente irregolare e instabile.

All'interno dell'alveo di piena, compreso fra le arginature maestre continue, sono presenti su tutto il tratto ampie golene, sia aperte che chiuse da argini secondari: il tronco dispone complessivamente di rilevanti volumi di golena invasabili in piena, con rilevanti effetti di laminazione.

I maggiori problemi di stabilità delle opere si localizzano nei tratti con difese spondali parallele (presenti su entrambe le sponde); diventa rilevante la presenza delle arginature in frodo, localizzate nei tratti già critici per velocità e livelli idrometrici.

Su tutto il tratto, nel periodo 1954-1991, l'alveo inciso ha subito un rilevante abbassamento di fondo che ha direttamente interessato la stabilità e la funzionalità delle opere di difesa: attualmente tale fenomeno è in fase di attenuazione.

Le principali caratteristiche geometriche del tronco sono di seguito indicate:

- lunghezza in asse 130,33 km,
- distanza media tra le arginature 2.600 m,
- altezza media arginature su piano golenale 6÷8 m,
- larghezza media alveo di magra 250 m,
- profondità media alveo inciso 8÷8,5 m,
- superficie alveo inciso per km di asta fluviale 0,44 km²/km,
- superficie golena aperta per km di asta fluviale 1,36 km²/km,
- superficie golena chiusa per km di asta fluviale 0,83 km²/km,
- sviluppo complessivo difese spondali 202,19 km,
- sviluppo difese sponda sx rispetto a lunghezza tratto 77,2%,
- sviluppo difese sponda dx rispetto a lunghezza tratto 77,9%,
- indice di sinuosità 1.32.

Nel tratto confluenza Mincio - incile del Delta l'alveo di magra ha tendenza all'unicursalità, in particolare nella parte media e terminale, caratterizzato da arginature parallele che limitano l'estensione della golena. Si nota la presenza di pochi e grandi paleoalvei, di origine molto antica, totalmente sopra falda e sganciati dal sistema fluviale attuale (il più delle volte al di fuori delle arginature). L'evoluzione morfologica dell'alveo inciso risulta estremamente lenta e di modesta entità; non si osservano modificazioni significative nel periodo recente, a partire dal 1954; i fenomeni erosivi di sponda sono localizzati e di entità molto modesta.

L'alveo di piena tende a essere canalizzato, soprattutto nel tratto terminale, per la presenza di arginature prossime e parallele alle sponde, in alcuni punti con distanza molto ridotta (soprattutto in corrispondenza di Revere, Ficarolo, Pontelagoscuro, Polesella). Sono presenti alcune golene chiuse di dimensioni relativamente modeste, che si estendono fino in prossimità dell'alveo inciso.

L'alveo inciso non ha raggiunto ovunque un assetto stabile e in alcuni tratti ha problemi di ordine idraulico, soprattutto in corrispondenza delle curve di Revere-Ostiglia, Bergantino e Pontelagoscuro dove fenomeni di instabilità di sponda tendono a interessare le arginature maestre. La stabilità delle sponde incise assume in tutto il tratto particolare importanza per le conseguenze indotte sugli argini.

Il tracciato arginale presenta bruschi cambiamenti di direzione e restringimenti locali accentuati, con corrispondenti velocità di deflusso in piena molto elevate, che rappresentano punti critici per la stabilità degli argini stessi.

Su tutto il tratto, nel periodo 1954-1991, l'alveo inciso ha subito un rilevante abbassamento di fondo che ha direttamente interessato la stabilità delle opere di difesa esistenti; tale fenomeno appare in fase di attenuazione sulla base degli ultimi rilievi disponibili.

Le principali caratteristiche geometriche del tronco sono di seguito indicate:

- lunghezza in asse 109,15 km,
- distanza media tra le arginature 900 m,
- altezza media arginature su piano golenale $9\div 9,5$ m,
- larghezza media alveo di magra $350\div 400$ m,
- profondità media alveo inciso $8\div 8,5$ m,
- superficie alveo inciso per km di asta fluviale 0,48 km²/km,
- superficie golena aperta per km di asta fluviale 0,28 km²/km,
- superficie golena chiusa per km di asta fluviale 0,15 km²/km,
- sviluppo complessivo difese spondali 103,9 km,
- sviluppo difese sponda sx rispetto a lunghezza tratto 48,3%,
- sviluppo difese sponda dx rispetto a lunghezza tratto 46,9%,
- indice di sinuosità 1.23.

2. La pianificazione di bacino

La redazione del Piano di bacino è proceduta attraverso stralci funzionali, sia in attuazione della legge 183/89, sia in attuazione di leggi straordinarie intervenute in seguito ai principali eventi alluvionali dell'ultimo decennio.

Ad oggi, lo stato di avanzamento della pianificazione di bacino per l'assetto idrogeologico, secondo l'ordine cronologico che comprende sia la pianificazione ordinaria sia quella straordinaria, è costituito dai seguenti atti.

- *“Piano stralcio per la realizzazione degli interventi necessari al ripristino dell'assetto idraulico, alla eliminazione delle situazioni di dissesto idrogeologico e alla prevenzione dei rischi idrogeologici nonché per il ripristino delle aree di esondazione”* (PS 45) (deliberazione del Comitato Istituzionale n. 9 in data 10 maggio 1995). Si tratta di uno strumento straordinario approvato, in deroga alle procedure previste dalla legge 183/89, ai sensi dell'art. 4, comma 5, del D. lgs. 24 novembre 1994 n. 646, convertito, con modificazioni, in legge 21 gennaio 1995, n. 22. Il Piano contiene la programmazione degli interventi più urgenti per i territori colpiti dall'alluvione del 1994 nonché i criteri guida e le norme per la redazione dei progetti relativi agli interventi strutturali. Fra tali interventi particolare rilevanza assumono quelli relativi all'asta del fiume Tanaro e a quella del tratto medio inferiore del fiume Po.
- *“Piano Stralcio delle Fasce Fluviali (PSFF)”* (DPCM 24 luglio 1998), relativo alla delimitazione delle fasce fluviali e alla disciplina d'uso dei relativi territori per la rete idrografica principale del sottobacino del Po sotteso alla confluenza del Tanaro (territorio delle regioni Piemonte e Valle d'Aosta) e, per la restante parte del bacino, per l'asta del Po e per gli affluenti emiliani e lombardi, limitatamente ai tratti arginati. Si tratta di un piano ordinario approvato ai sensi dell'art. 17, comma 6-ter della legge 18 maggio 1989, n. 183.
- *“Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI)”* (DPCM 24 maggio 2001), relativo all'intero bacino idrografico, con esclusione del territorio del Delta. Il Piano contiene la delimitazione delle fasce fluviali degli affluenti emiliani e lombardi non interessati dal precedente PSFF; riguarda inoltre la porzione montana del bacino, per la quale è stato elaborato l'Atlante dei rischi idraulici e idrogeologici – Inventario dei centri abitati collinari/montani esposti a pericolo, comprensivo della delimitazione delle aree in dissesto. Contiene inoltre, a livello di singolo sottobacino, le linee generali di assetto idraulico e idrogeologico nonché il quadro degli interventi e il programma finanziario.
- *“Piano straordinario per le aree a rischio idrogeologico molto elevato”* (PS 267) (deliberazione di Comitato Istituzionale n. 14 in data 26 ottobre 1999). Il Piano, relativo all'intero territorio del bacino idrografico, contiene la perimetrazione delle aree a rischio idrogeologico molto elevato per l'incolumità delle persone e la sicurezza delle infrastrutture e del patrimonio ambientale e culturale, a cui sono associate misure di salvaguardia; comprende inoltre le aree a rischio idrogeologico per le quali è stato dichiarato lo stato di emergenza, ai sensi dell'art. 5 della legge 24 febbraio 1992, n. 225, nonché il programma degli interventi urgenti. Il PS 267 è stato approvato, in deroga alla legge n. 183/89, ai sensi del comma 1-bis dell'art. 1 del D.lgs. 11 giugno 1998, n. 180, convertito con modificazioni dalla legge 3 agosto 1998, n. 267, come modificata dal D.lgs 13 maggio 1999, n. 132, coordinato con la legge di conversione 13 luglio 1999, n. 226.

Per quanto riguarda l'asta medio inferiore del fiume Po le fasce fluviali sono state delimitate nell'ambito del PSFF e del PAI. In particolare la fascia B è stata individuata in modo pressoché continuo seguendo il tracciato delle arginature maestre, mentre la fascia C è stata delimitata in modo da rappresentare, tenendo conto dell'altezza delle arginature e della topografia dei territori esterni alla arginature medesime, il possibile l'inviluppo delle aree potenzialmente allagabili in caso di rotte arginali. Nel PAI sono contenuti inoltre alcuni specifici elaborati che riguardano l'asta principale del Po: elaborato 3.1 (Linee generali di assetto idraulico e idrogeologico – Asta Po) e direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica.

Nell'ambito del "*Piano straordinario per le aree a rischio idrogeologico molto elevato*" in particolare per l'asta del fiume Po in questione sono state rappresentate le principali criticità strutturali del sistema arginale. Le condizioni critiche che si possono manifestare in corrispondenza degli eventi di piena sono state riferite ai seguenti fenomeni:

- a) inadeguatezza in quota delle arginature rispetto al profilo di piena a tempo di ritorno 200 anni (profilo definito nel PAI), con conseguente rischio di rotta per sormonto del rilevato arginale;
- b) inadeguatezza strutturale del rilevato arginale rispetto ai fenomeni di filtrazione nel corpo arginale e nelle fondazioni, con conseguente rischio di rotta per sifonamento, sfiancamento e/o permeazione;
- c) possibilità di cedimento del rilevato arginale per effetto di fenomeni di dinamica fluviale connessi a modificazione della morfologia dell'alveo da parte della corrente in piena (erosione della sponda al piede del rilevato arginale, erosione diretta del rilevato arginale, sollecitazione diretta della corrente sul rilevato).

Per il primo fenomeno le valutazioni sono state effettuate sulla base del confronto tra le quote arginali e le quote del profilo della piena di progetto; per gli altri due fenomeni le valutazioni derivano da informazioni composite raccolte presso i singoli Uffici Operativi del Magistrato per il Po in seguito alla piena del 2000 e connesse sia alle caratteristiche strutturali delle arginature maestre che agli elementi di natura idraulica e morfologica che contraddistinguono l'alveo del corso d'acqua.

Negli allegati alla relazione generale del PS267 (consultabili sul sito www.adbpo.it) sono contenute cartografie tematiche alla scala 1:50.000 che rappresentano lungo lo sviluppo di entrambe le arginature maestre tali situazioni di criticità.

3. Gli eventi di piena storici e le grandi inondazioni

3.1. Le modalità di formazione delle piene lungo l'asta del Po sulla base della distribuzione spazio - temporale degli eventi meteorici

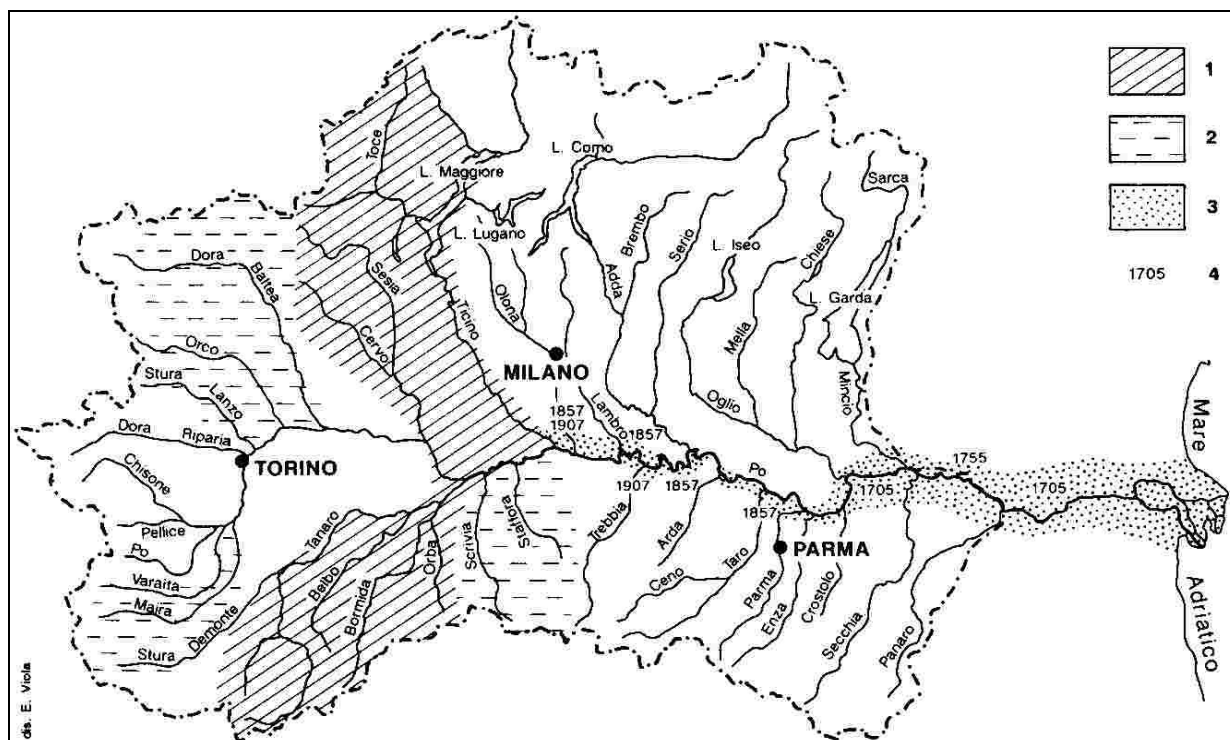
La complessa configurazione idrografica e orografica del bacino padano, composto da corsi d'acqua alpini e collinari (Piemonte), alpini regimati da laghi (Lombardia) e appenninici (Emilia), con regimi idrologici abbastanza differenziati, comporta durante gli eventi di pioggia una certa varietà di situazioni nel decorso delle piene lungo il Po, connessa alla diversa distribuzione spazio-temporale dei deflussi provenienti dai tributari.

Le informazioni sulle piene storiche consentono di delineare quattro scenari principali, che definiscono i tipi di associazione più frequente di bacini contribuenti alla piena lungo il Po, ricadenti in uno o più territori regionali.

- *Primo tipo (piemontese)*

La piena ha il contributo quasi sempre rilevante soprattutto di Sesia, Tanaro e Ticino, cui si associano di volta in volta, con apporti più o meno sensibili, tributari dell'arco alpino occidentale e talora, con deflussi più modesti, anche alcuni corsi d'acqua dell'Appennino Pavese (Staffora e Scuropasso). Il settore di bacino coinvolto è quello occidentale o centro-occidentale (Figura 3.1.1); rientrano in questo tipo gli eventi del 1705, 1755, 1857 e 1907, tutti avvenuti nella stagione autunnale.

Figura 3.1.1: Area del bacino contribuyente ad una piena di tipo piemontese (Legenda: 1) bacino o gruppo di bacini che hanno ripetutamente contribuito alle piene del Po con apporti elevati; 2) bacino o gruppo di bacini che hanno occasionalmente contribuito con apporti da moderati ad elevati; 3) principali aree inondate; 4) anno dell'evento che ha prodotto l'inondazione).

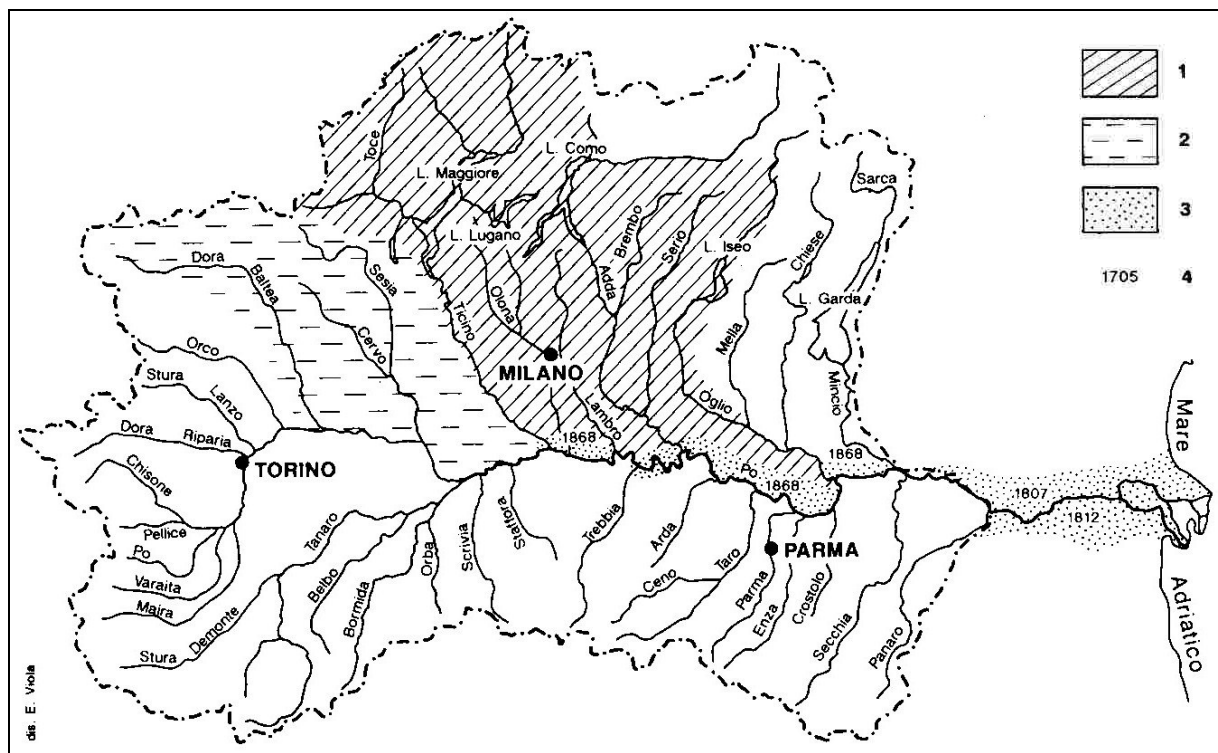


- *Secondo tipo (lombardo)*

La piena è formata in misura determinante dalla partecipazione simultanea di Ticino, Lambro, Adda e Oglio; il bacino è coinvolto fondamentalmente nel settore centrale, percorso dagli emissari lacustri lombardi (Figura 3.1.2). Sono assegnabili a questa

tipologia le piene del 1807, 1812 e 1868, tutte avvenute, come nel tipo precedente, durante i mesi autunnali e con gravi inondazioni, nel 1807 in sinistra Po, tra il Mantovano e il Polesine di Rovigo; nel 1812 in destra Po, nel territorio ferrarese; durante l'evento del 1868 ancora in sinistra Po, nel Pavese e soprattutto nel territorio a valle di Cremona. Le rotte principali aperte dalle piene del 1807 e del 1812 furono prodotte da sormonto degli argini o da processi erosivi al piede dei rilevati in frodo; questo dimostra che i manufatti del tratto inferiore del fiume, erano ancora diffusamente soggiacenti ai livelli di massima piena e localmente, ove prossimi all'alveo, non erano sufficientemente difesi. Nel 1868 in provincia di Pavia e di Cremona molte rotte si formarono per sifonamento.

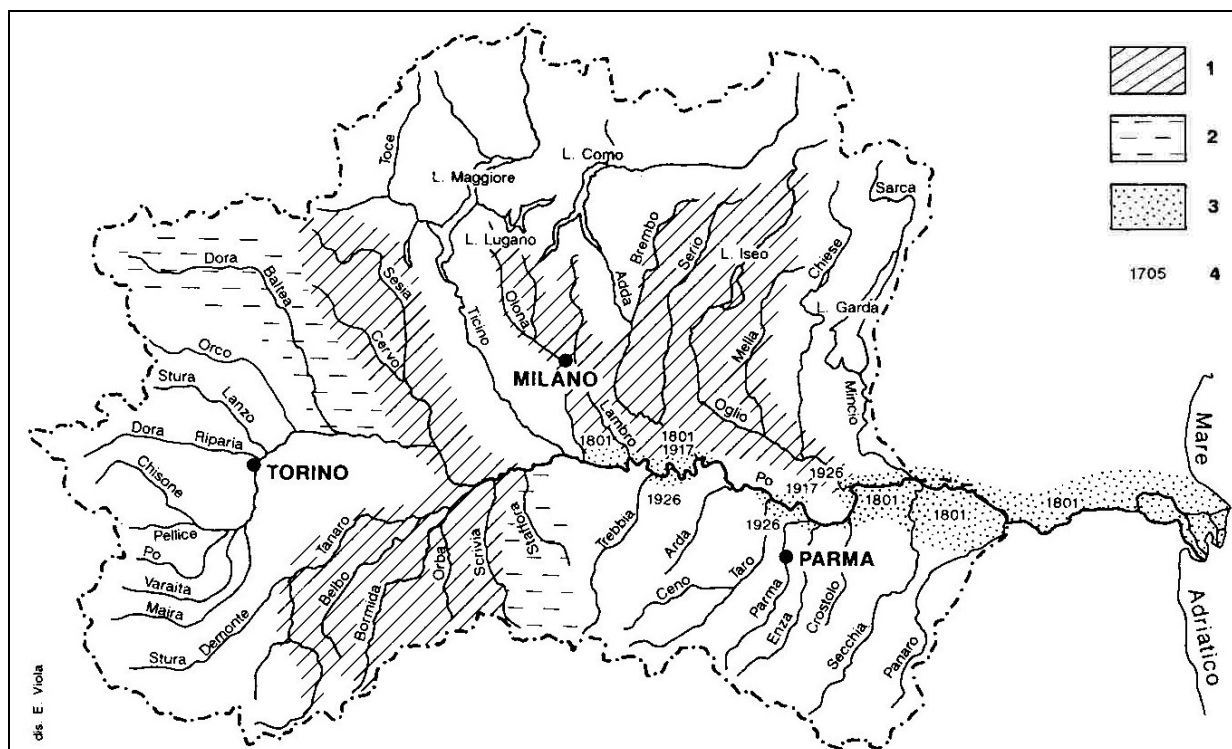
Figura 3.1.2: Area del bacino contribuyente ad una piena di tipo lombardo (Legenda: 1) bacino o gruppo di bacini che hanno ripetutamente contribuito alle piene del Po con apporti elevati; 2) bacino o gruppo di bacini che hanno occasionalmente contribuito con apporti da moderati ad elevati; 3) principali aree inondate; 4) anno dell'evento che ha prodotto l'inondazione).



- *Terzo tipo (piemontese-lombardo)*

La piena si forma per i contributi determinanti di Sesia e Tanaro, contraddistinto quest'ultimo da portate elevate per gli apporti straordinari di Belbo, Bormida e Orba, e dagli apporti notevoli di Adda e Oglio, poco inferiori ai livelli massimi (Figura 3.1.3). A questi fiumi si associano di volta in volta alcuni tributari piemontesi (Scrivia o Dora Baltea) e altri corsi d'acqua lombardi (Olona e Lambro), tutti con piene non molto elevate, ma importanti perché coincidenti con il passaggio del colmo lungo l'asta del Po. Saltuariamente sono presenti moderati contributi da singoli corsi d'acqua appenninici emiliani. In questo tipo di evento vengono per lo più coinvolti i bacini del versante alpino centrale e occidentale; ricadono in questo scenario le piene del 1801, del 1917 e del 1926, manifestatesi nella stagione autunnale la prima e nei mesi primaverili le altre due.

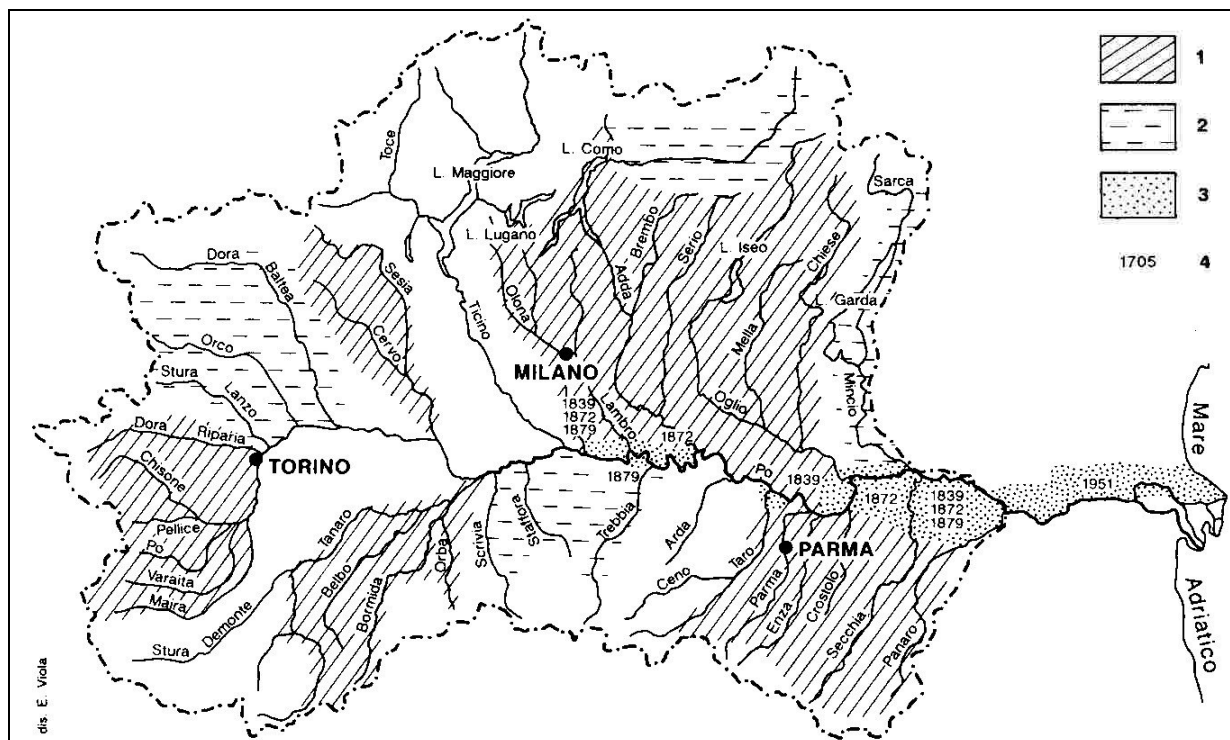
Figura 3.1.3: Area del bacino contribuyente ad una piena di tipo piemontese-lombardo (Legenda: 1) bacino o gruppo di bacini che hanno ripetutamente contribuito alle piene del Po con apporti elevati; 2) bacino o gruppo di bacini che hanno occasionalmente contribuito con apporti da moderati ad elevati; 3) principali aree inondate; 4) anno dell'evento che ha prodotto l'inondazione).



- *Quarto tipo (intero bacino padano)*

La formazione della piena origina dal contributo di un numero elevato di corsi d'acqua del sistema idrografico padano (Figura 3.1.4). Sistematically il contributo iniziale perviene da vari gruppi di affluenti del settore occidentale, tra i quali è costante quello del Sesia e frequente quello del Tanaro. Più a valle, in sinistra di Po, si hanno con analoga ripetitività le piene dell'Olon e del Lambro, cui si associano con elevata frequenza quelle dell'Adda e dell'Oglio; tra i corsi d'acqua del versante appenninico ricorre costantemente l'apporto dei tributari dal Parma al Panaro e, più saltuariamente, dei torrenti dell'Oltrepò Pavese e del Piacentino. Sono rappresentativi di questo tipo gli eventi del 1839, del 1872, del 1879 e del 1951 che, con esclusione di quello del 1879 avvenuto nella tarda primavera, si sono manifestati nei mesi autunnali.

Figura 3.1.4: Area del bacino contribuyente ad una piena di intero bacino padano (Legenda: 1) bacino o gruppo di bacini che hanno ripetutamente contribuito alle piene del Po con apporti elevati; 2) bacino o gruppo di bacini che hanno occasionalmente contribuito con apporti da moderati ad elevati; 3) principali aree inondate; 4) anno dell'evento che ha prodotto l'inondazione).



Nel corso di questi quattro eventi le altezze d'acqua del Po superarono quasi sempre, in diverse sezioni e talora abbondantemente, i livelli precedentemente raggiunti; in particolare nel 1951 tale superamento venne registrato a tutte le stazioni idrometriche tra la confluenza del Ticino e Pontelagoscuro. All'eccezionalità delle altezze idrometriche lungo l'asta del Po abbastanza raramente tuttavia corrisponde un'assoluta straordinarietà delle piene nei diversi tributari coinvolti nel medesimo evento. Considerando gli affluenti più importanti, si nota che raggiunsero misure pari o molto prossime ai valori massimi solo l'Oglio nel 1839, il Panaro nel 1872, il Tanaro e il Secchia nel 1879, il Sesia e nuovamente il Tanaro nel 1951. Un ruolo determinante ebbe piuttosto la successione di coincidenze dei colmi di piena che, se pur moderati, pervennero al Po da parte di numerosi tributari.

Gli effetti prodotti nel corso di ciascuno di questi eventi furono sempre molto gravi, ma particolarmente disastrosi risultarono quelli connessi alla piena del 1951 che, in 11 giorni circa, sommerse quasi 100.000 ha di pianura nel Polesine di Rovigo. Anche le altre tre piene provocarono rotte e vaste esondazioni nei medesimi territori dell'Oltrepò Mantovano, soprattutto tra Secchia e Panaro. Si ha riscontro di analoga ripetitività delle inondazioni nei medesimi luoghi su aree relativamente più modeste rispetto alle precedenti, nella provincia di Pavia, tra Olona e Lambro e talora fino all'Adda, e in provincia di Piacenza, a monte e valle della città.

Nell'ambito degli eventi di piena storici è possibile individuare un certo numero di corsi d'acqua tributari che con maggiore ripetitività hanno determinato o concorso a determinare le piene del Po:

- i fiumi del settore piemontese, la cui partecipazione risulta in gran parte degli eventi; tra i corsi d'acqua coinvolti emergono il Sesia e il Tanaro, per il contributo spesso determinante fornito per lo più da entrambi (piene del 1705, 1755, 1801, 1857, 1872, 1879, 1917, 1926 e 1951);

- tra gli emissari dei grandi laghi lombardi si pone in maggior evidenza il Ticino, per l'essenziale apporto alle piene del 1705, del 1755 e 1868 e per i contributi forniti in altre 3 occasioni; l'Adda e l'Oglio hanno partecipato con massime piene agli eventi del 1812 e del 1868, pur fornendo un apporto sensibile in almeno altre 4 occasioni;
- i corsi d'acqua del versante appenninico raramente determinano un rilevante contributo; volumi d'acqua di una certa importanza sono pervenuti da Secchia e Panaro solo in occasione degli eventi del 1839 e del 1872.

Nel quadro di dati sopra esposti si possono collocare i recenti eventi del novembre 1994 e ottobre 2000, generati pressoché esclusivamente dalle piene dei corsi d'acqua piemontesi (primo tipo) fra cui in particolare il Tanaro nel 1994 e gli affluenti di sinistra Po nel 2000.

3.2. Le rotte storiche

La Tabella 3.2.1 (tratta dall'elaborato "Linee generali di assetto idraulico e idrogeologico" del PAI) riporta il quadro sintetico delle inondazioni che hanno interessato il territorio adiacente all'asta del Po nel corso degli ultimi tre secoli.

Tabella 3.2.1: Inondazioni nella pianura dal Ticino al Delta per rotte nell'arginatura maestra del Po.

Anno	Alt. idrom. a Becca	Alt. idrom. a Piacenza	Tratto sup. meandriforme nelle Province di PV LO PC	Tratto inter. pluricursale nelle Province di CR PR RE	Tratto inf. sinuoso nelle Province di MN RO FE	alt. idrom. a Ostiglia	alt. idrom. a Pontelag.
	(m)	(m)	km 110,300	km 100,700	km 98,050	(m)	(m)
1705	7,54	—	?	?	+++++	6,59	1,32/11 nov.
1755	-	-	?		?	6,76	1,82/22 ott.
1801	6,31	6,35	=====	—————	+++++	6,99/14 nov.	2,19/15 nov.
1807	-	-			+++++	7,24/3 dic.	2,32/3 dic.
1810	-	6,50			—————	7,35	2,32/18 set.
1812	-	6,57			●●●●●●●●	7,50/12 ott.	2,55/15 ott.
1839	6,60/18 ott.	6,82/19 ott.	=====			7,34/21 ott.	2,69/21 ott.
1839	5,60/6 nov.	5,81/6 nov.			●●●●●●●●	7,85/8 nov.	2,95/8 nov.
1840	6,30/5 nov.	6,20/5 nov.				7,13	2,64/7 nov.
1846	-	6,76/19 mag.				7,43/20 mag.	2,49/21 mag.
1846	7,00/19 ott.	7,09/20 ott.	=====			7,57	2,60/23 ott.
1857	7,48/22 ott.	7,31/23 ott.	=====			8,14/25 ott.	2,96/26 ott.
1868	7,02/5 ott.	7,60/5 ott.	=====	●●●●●●●●		8,28/8 ott.	3,05/8 ott.
1872	5,91/23 mag.				●●●●●●●●		2,55/27 mag.
1872	7,01/22 ott.	7,95/23 ott.	=====		+++++	8,56/23 ott.	3,32/23 ott.
1879	6,81/30 mag.	7,70/30 mag.	—————		●●●●●●●●	8,67/1 giu.	3,21/1 giu.
1907	7,56/27 ott.	8,67/28 ott.	=====			8,91/31 ott.	3,30/1 nov.
1917	7,56/31 mag.	9,00/1 giu.	—————			9,38/4 giu.	3,72/4 giu.
1926	7,88/18 mag.	9,63/18 mag.	—————			8,91/20 mag.	3,70/20 mag.
1951	7,85/12	10,25/13		=====	+++++	10,15/14	4,28/14 nov.

Anno	Alt. idrom. a Becca	Alt. idrom. a Piacenza	Tratto sup. meandriforme nelle Province di PV LO PC	Tratto inter. pluricursale nelle Province di CR PR RE	Tratto inf. sinuoso nelle Province di MN RO FE	alt. idrom. a Ostiglia	alt. idrom. a Pontelag.
	(m)	(m)	km 110,300	km 100,700	km 98,050	(m)	(m)
1957	nov. 5,90/16 giu.	nov. 6,97/17 giu.			=====	nov. 7,79/19 giu.	3,04/19 giu.
1966	3,64/7 nov.	5,12/6 nov.			=====	8,22/7 nov.	2,58/7 nov.

superfici inondate: — fino a 70 km² ===== da 71 a 160 km² ●●●●●● da 300 a 700 km² ++++++ da 1000 a 2500 km²

A partire dai primi decenni del secolo attuale, il numero delle rotte causate da ciascuna piena risulta in chiara diminuzione; a tale decremento corrisponde un incremento delle superfici allagate, soprattutto nel caso di rotte nei tratti inferiori (nel mantovano e nel Polesine).

Considerando i soli eventi, a partire dal 1700, per i quali si hanno notizie, le piene che hanno provocato le più vaste e gravi inondazioni nel tratto inferiore del fiume sono sette (nov. 1705, nov. 1801, ott.-nov. 1839, mag. 1872, ott. 1872, mag.-giu. 1879, nov. 1951); nel tratto superiore (fino circa a Piacenza) almeno 17; i fenomeni hanno spesso interessato con ripetitività i medesimi settori di territorio.

Nel quadro complessivo dei 18 eventi che si sono verificati tra il 1705 e il 1951, risulta dunque che in 17 casi (escluso solo il 1951) le piene hanno avuto come area di espansione maggiormente ripetitiva il settore pavese e/o lodigiano e piacentino. Tralasciando gli eventi del 1705, del 1755 e del 1801, per i quali le notizie sono scarse e le modalità di rottura degli argini non sono ben note, si può constatare che tra i restanti 14 casi solo 4 volte (ott.-nov. 1839, mag. 1872, ott. 1872 e mag.-giu. 1879) all'espansione della piena nel tratto superiore sono seguite altre esondazioni per rotta nel tratto fluviale inferiore, soprattutto nel mantovano. Ciò conferma l'osservazione che all'espansione delle piene nel settore pavese, lodigiano e piacentino corrisponda una notevole riduzione del rischio di inondazione nel tratto inferiore. Ancorché statisticamente possa apparire non significativo, va segnalato che nell'unica occasione in cui non si sono verificate esondazioni nel settore pavese e piacentino (nov. 1951), la piena ha avuto nel tratto inferiore altezze idrometriche mai prima raggiunte, inondando attraverso due rotte per sormonto pressoché l'intero Polesine di Rovigo.

Nel 2004 l'Autorità di bacino ha condotto in collaborazione con il CNR-IRPI di Torino una dettagliata ed approfondita attività di raccolta ed organizzazione di tutte le informazioni disponibili in relazione alle rotte storiche verificatesi nel tratto medio inferiore dell'asta del Po (ST1.1 e ST1.9). In particolare sono state censite, a partire dalla gravissima piena del 1801, 225 rotte avvenute nell'arginatura meastra del fiume Po (204 casi) o nel tratto finale delle arginature degli affluenti principali (21 casi). Per ognuna di tali rotte è stato raccolto ed organizzato materiale d'archivio disponibile, riguardante in particolare luogo e data della rotta, meccanismo di rottura, dimensione del varco, dati idrometrici alla stazione di misura più vicina, informazioni in relazione alle dinamiche e alle superfici di inondazione. Tali informazioni sono sintetizzate in un atlante cartografico a cui sono associate schede monografiche per ciascuna rotta. Per il comparto compreso fra Parma ed Enza sono state inoltre recuperate a livello locale una serie di informazioni storiche riguardanti le dinamiche di allagamento utilizzate per le valutazioni di rischio residuale descritte al successivo capitolo 10. Di seguito si riportano alcuni esempi degli elaborati dello studio (Figure 3.2.1, 3.2.2).

Figura 3.2.1a: Particolare della Tavola 06 dell'elaborato cartografico con l'ubicazione delle rotte documentate che mostra la sponda sinistra di Po, poco a monte di Caselle Landi nel Lodigiano; la legenda della cartografia è riportata in Figura 3.2.1b.

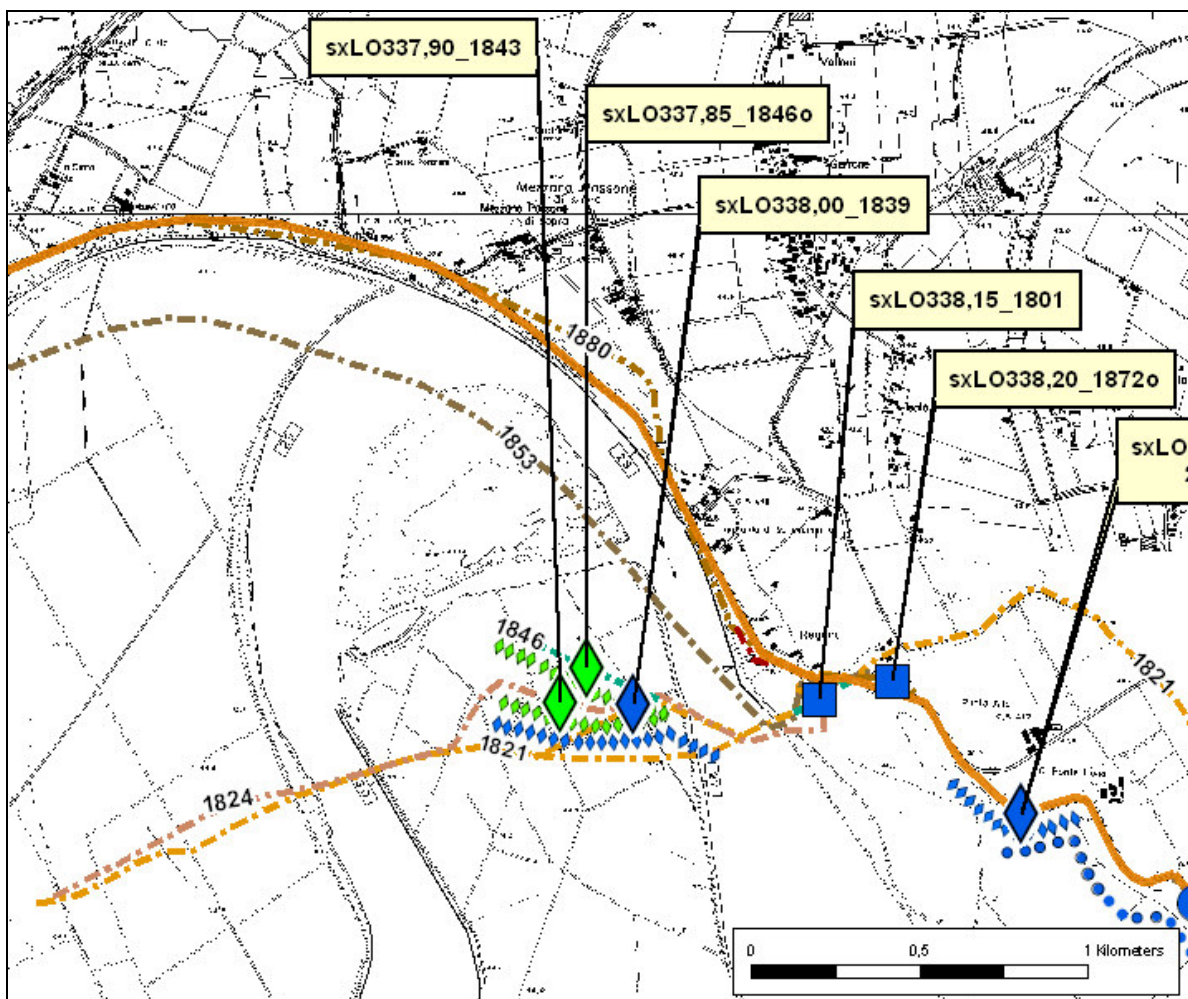


Figura 3.2.1b: Gli elementi inseriti in legenda mostrano il sistema adottato per indicare: il codice di ciascuna rotta; i diversi meccanismi di rottura, unitamente al grado di certezza/incertezza ottenuto nell'ubicazione dei varchi lungo la difesa; l'arginatura maestra attuale e quella primitiva.

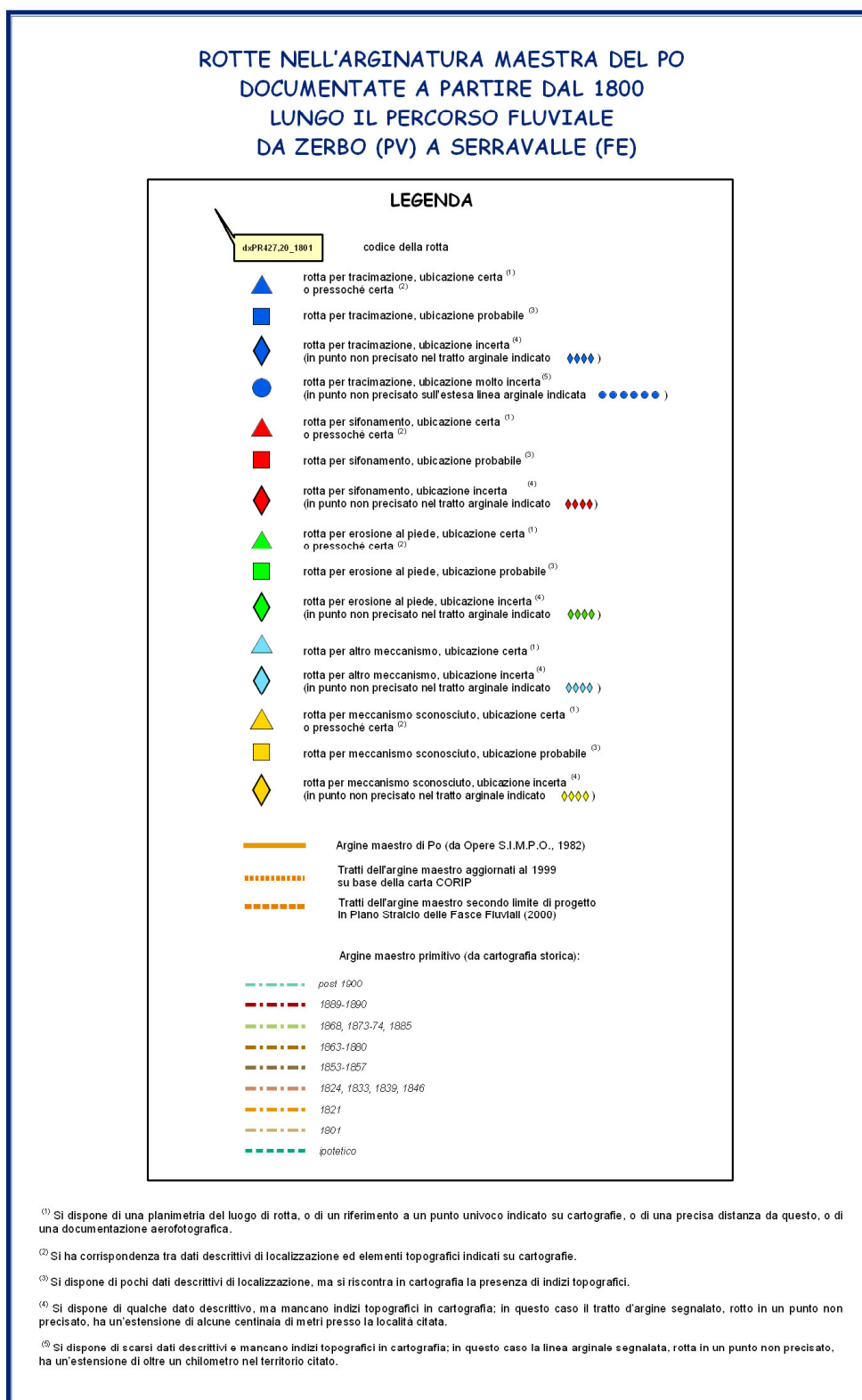


Figura 3.2.2a: Esempio di monografia di rotta (rotta SxLO338,15_1801); l'ubicazione della rotta è visibile nelle Figure 3.2.1a e 3.2.2b.

SxLO338,15_1801
<u>Data della rotta:</u> inizio novembre 1801 (Gallizia, 1878)
<u>Località:</u> Regona
<u>Comune:</u> Santo Stefano Lodigiano (oggi Regona)
<u>Provincia:</u> Lodi
<u>Ubicazione della rotta:</u> è da ritenersi probabile per la presenza sulla Carta del 1821 di un budrio (Fig. 1), con relativa coronella arginale verso campagna, presso l'abitato di Regona; tale situazione è riportata chiaramente anche su una cartografia del 1824 e non si hanno notizie di altre rotte fino a questa data.
<u>Meccanismo di rottura:</u> tracimazione
<u>Dimensione del varco:</u> non indicata
<u>Dati idrometrici:</u> all'idrometro di Carossa (di fronte a Piacenza) la piena ha raggiunto un colmo di m 6.35 sullo zero, posto a m 48.812 s.l.m.
<u>Informazioni sul territorio inondato:</u> la superficie inondata per questa rotta (unitamente ad altri otto varchi aperti dal fiume lungo l'arginatura lodigiana) ammonta a 70 km ² , compresi tra l'altipiano insommergibile, il Lambro, il Po e l'Adda.

L'attività di censimento delle rotte storiche ha consentito inoltre di evidenziare come la tipologia di rottura più frequentemente verificatasi è quella associata al fenomeno di tracimazione dell'arginatura. Nel diagramma riportato in Figura 3.2.3 sono riportati, per alcune finestre temporali a partire dal 1801, i meccanismi di rottura e il corrispondente numero di rotte censite; mentre nella Figura 3.2.4 sono riportati i medesimi di rottura associati al modello fluviale originario sviluppato dal Po nel luogo della rotta e di cui in Figura 3.2.5 sono rappresentati in termini generali i tratti omogenei.

Figura 3.2.3: Rotte arginali, su diverse finestre temporali, suddivise per meccanismo che le ha prodotte.

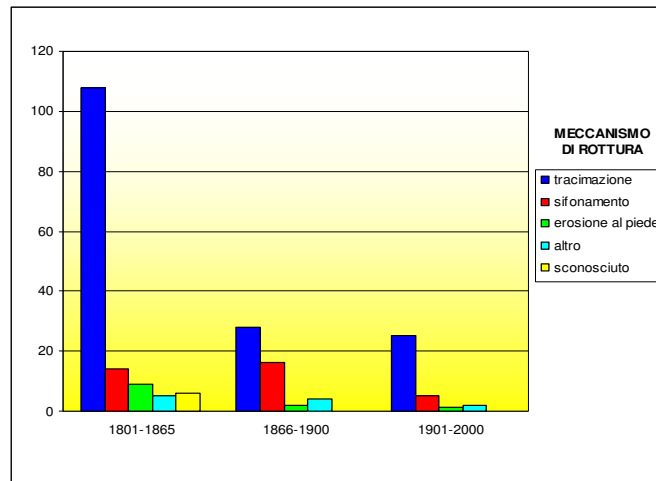


Figura 3.2.4: Rotte arginali suddivise per meccanismo che le ha prodotte e associate al modello fluviale originario sviluppato dal Po nel luogo di rotta.

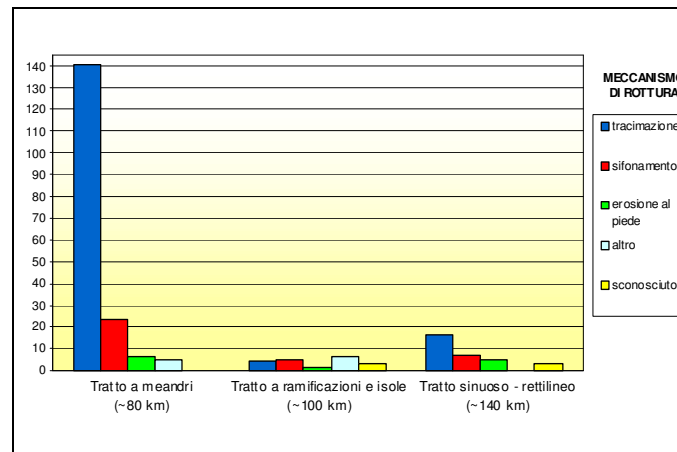


Figura 3.2.5: Alveotipi originariamente sviluppati dal corso d'acqua (in giallo: tratto unicursale a meandri fino all'Adda; in rosso: tratto a più canali di deflusso con isole interposte fra Adda e Oglio; in viola: tratto unicursale sinuoso-rettilineo fino alle diramazioni del Delta).



4. Il fenomeno di incisione del fondo alveo e la necessità di una corretta attività di monitoraggio e manutenzione dell'alveo

In relazione al fenomeno dell'instabilità altimetrica dell'alveo del fiume Po è significativo ricordare in premessa, senza risalire nel tempo oltre il XX secolo, quanto il Prof. Mario Giandotti affermava nel 1930 nella pubblicazione "Le piene del Po con speciale riguardo a quella del maggio 1926 – Proposte e provvedimenti per attenuarle".

Il fenomeno di rialzamento del letto del fiume veniva allora escluso alla luce di alcune considerazioni, fra cui in particolare:

- il confronto fra i rilievi topografici delle sezioni del Po eseguiti nel 1878 (Commissione Brioschi) e quelli eseguiti negli anni 1916-1917 evidenzia come l'area del deflusso riferita allo stesso livello della magra del 1874 *"non è generalmente diminuita, ma anzi in alcuni casi aumentata"*;
- l'esame dei livelli di magra alla stazione di Pontelagoscuro evidenzia una sostanziale situazione di equilibrio, con massimi e minimi che si alternano nel periodo considerato (1810 – 1919);
- *"i rilievi annuali del fondo fluviale a pelo contemporaneo di magra (la serie inizia nel 1905) opportunamente confrontati, tenendo conto di scrupolose cautele nella indagine, confermano, con la massima evidenza, la oscillazione del fondo fluviale intorno ad una linea di equilibrio"*;

Successivamente alle osservazioni e considerazioni del prof. Giandotti, numerosi studi e pubblicazioni sono stati condotti in relazione al fenomeno dell'instabilità altimetrica dell'alveo del Po fra cui si citano in particolare "Idrologia e Idrografia della regione padana" - Mario Rossetti, 1979; "Processi di dinamica fluviale lungo l'asta del Po" - Govi, Turitto, 1993; "Studio dell'abbassamento dell'alveo del fiume Po" - Lamberti, Schippa, 1994.

Nell'ambito del Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico, l'analisi dell'evoluzione morfologica dell'alveo del Po discende dal confronto tra le sezioni trasversali rilevate nel corso di campagne topografiche eseguite negli anni 1954, 1969, 1979, 1984, 1991.

Le elaborazioni sui valori delle quote di fondo alveo e dell'area dell'alveo inciso consentono di ottenere una quantificazione dell'effettiva evoluzione registrata lungo l'asta nel periodo 1954-1991.

In rapporto al fenomeno di *abbassamento massimo del fondo alveo* emergono le seguenti considerazioni:

- nel periodo complessivo di osservazione (1954-1991) si ha ovunque un abbassamento significativo, che raggiunge i suoi massimi valori (4,30-5,30 m) nei tratti: Isola Serafini-foce Taro; Casalmaggiore-foce Oglio, Ostiglia-Felonica;
- gli abbassamenti più significativi si sono manifestati nel periodo '54-'69 e soprattutto nel '69-'79, come effetto generalizzato e rilevante sull'intera asta fluviale in esame;
- nei periodi '79-'84 e '84-'91 si ha generalmente una tendenza all'attenuazione del trend e in alcuni casi all'inversione con l'instaurarsi di modesti fenomeni di recupero di quota di fondo alveo.

Relativamente alla *variazione dell'area della sezione incisa*, emergono le seguenti considerazioni:

- il fenomeno erosivo è stato particolarmente intenso nei periodi '54-'69 e '69-'79; in quest'ultimo la tendenza all'incremento della sezione di deflusso è generalizzata e assume valori decisamente elevati (la variazione media risulta quasi ovunque compresa tra il 25% e il 50%, con punte che raggiungono anche il 65%);
- nell'intero periodo di osservazione si è avuto un incremento medio di sezione (rispetto al valore del 1954) sempre significativo, ma particolarmente elevato nel tratto Isola Serafini-Casalmaggiore.

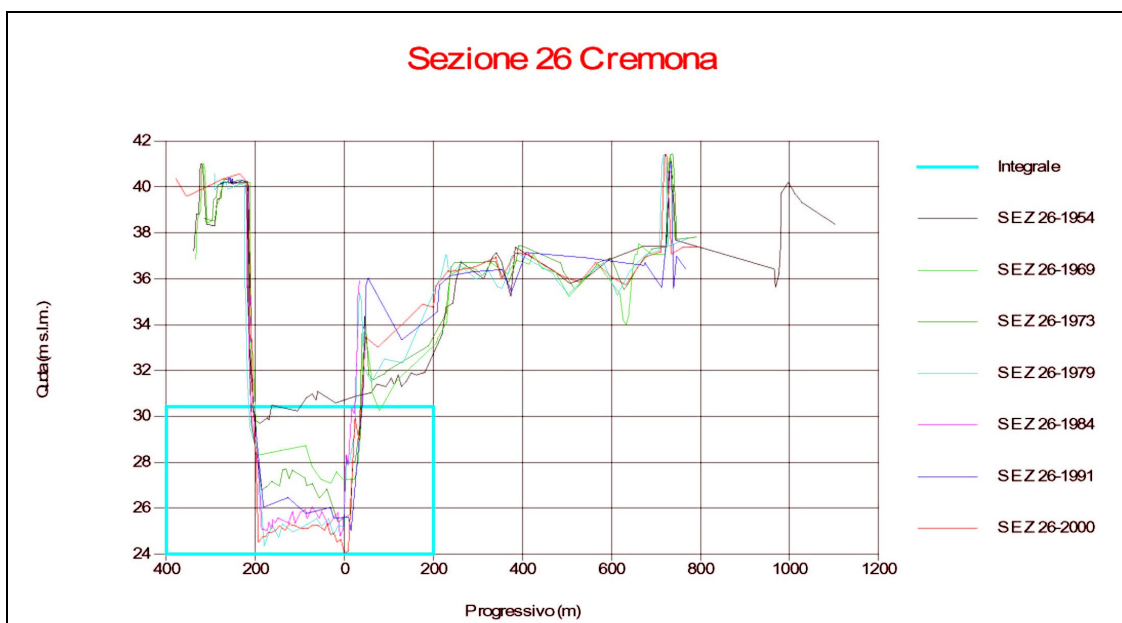
Complessivamente il quantitativo di materiale asportato per erosione nel tratto in esame, inteso come derivante da valori medi indicativi, può essere valutato in circa 117 milioni di m³, corrispondente a circa 345.000 m³/km di asta fluviale e 9.300 m³/km all'anno. Quest'ultimo valore assume diversa consistenza se valutato nel solo periodo 1969-1979 nel tratto Isola Serafini-Casalmaggiore (circa 49.400 m³/km x anno).

Tabella 4.1. Incrementi medi dell'area dell'alveo inciso nel tronco di Po tra confluenza Tanaro e Delta.

Tratto (sez. Brioschi)	Descrizione	Lunghezza (km)	Area media 1954 (m ²)	Area media nel periodo 54-91 (m ²)	Fattore di incremento	Volume eroso (m ³ x 10 ⁶)
Sez. 3- 8	Terdoppio-Olona	24,0	315,65	686,3	2,17	8,89
Sez. 8- 11	Olona-Tidone	18,2	412,13	581,98	1,41	3,09
Sez.11-17	Tidone-Trebbia	19,7	550,01	719,45	1,31	3,34
Sez.17-24	Trebbia- Is. Serafini	37,1	1.106,68	1.215,68	1,1	4,05
Sez.25-30	Adda-Is. Pescaroli	39,5	279,04	753,77	2,7	18,75
Sez.30-34	Is. Pescaroli-Sacca	19,4	285,97	1.019,85	3,57	14,25
Sez.34-40	Sacca-Cizzolo	39,5	946,01	1.362,44	1,44	16,46
Sez.40-49	Cizzolo-Serravalle	41,5	1.120,53	1.366,58	1,22	10,2
Sez.49-58	Serravalle-Felonica	28,7	1.413,16	1.720,93	1,22	8,84
Sez.58-67	Felonica-Mesola	38,2	1.135,7	1.514,69	1,33	14,48
Sez.67-74	Mesola-Po di Goro	32,6	1.142,53	1.589,49	1,39	14,56
Totale		338,4				116,91

Successivamente all'approvazione del PAI, il nuovo rilievo topografico delle sezioni trasversali eseguito dal Magistrato per il Po nel 1999 - 2000 evidenzia in alcuni tratti una significativa diminuzione del trend di abbassamento delle quote di fondo medio con in alcuni casi una stabilizzazione dei fondali rispetto al precedente rilievo. In allegato alla presente si riporta l'atlante delle sezioni trasversali sovrapposte nel periodo 1954 – 2000 e i profili di fondo alveo medio delle sezioni medesime (Allegato 1). A titolo di esempio si veda la Figura 4.1. in cui è rappresentata la sezione 26 in corrispondenza della città di Cremona.

Figura 4.1. Sezione trasversale numero 26 (Cremona) dell'Allegato 1.



Le cause che hanno influito sul processo di abbassamento dell'alveo del Po sono identificabili in cinque fattori principali:

- la sistemazione idrogeologica dei bacini montani;
- la stabilizzazione del fondo e la sistemazione delle sponde degli affluenti;
- la sistemazione dell'alveo di magra del Po;
- la costruzione dello sbarramento di Isola Serafini;
- l'attività estrattiva dagli alvei del Po e dei suoi affluenti.

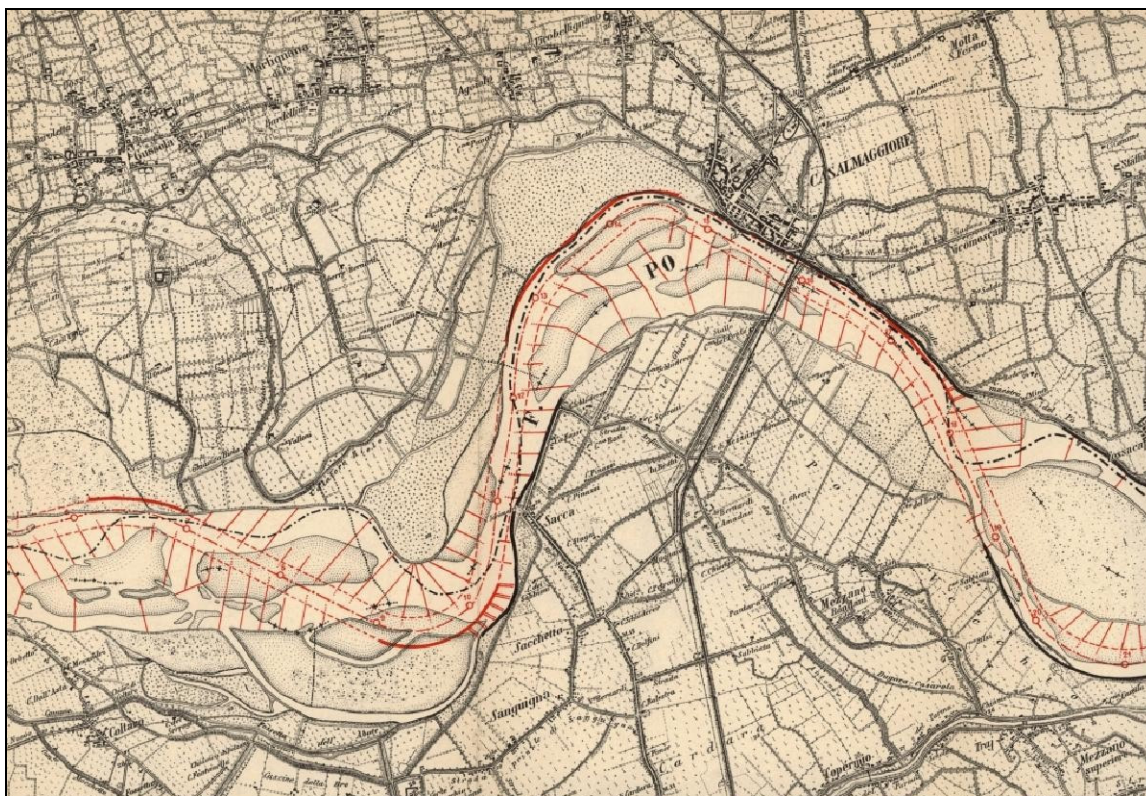
I primi due fattori sono diffusi sull'intero bacino e la loro influenza sull'asta principale non è valutabile direttamente, essendo i meccanismi di causa-effetto molto complessi, con evoluzione temporale molto diversificata.

Gli ultimi tre fattori hanno invece interessato direttamente l'alveo del Po, provocando alterazioni morfologiche dirette, di seguito brevemente descritte.

4.1. La sistemazione dell'alveo di magra per la navigazione

La sistemazione fu iniziata nel 1919, sulla base di un progetto che aveva come obiettivo principale la navigazione fluviale e tendeva ad assicurare fondali minimi di 2.50 m in tutto il tratto medio-basso del corso d'acqua; i lavori ebbero un forte sviluppo nel decennio 1955-1964, conseguendo verso il 1970 un grado di sistemazione pressoché definitivo (Figura 4.1.1). Il primo tratto interessato dalle opere fu quello compreso tra la confluenza dell'Adda e quella del Mincio, che per caratteristiche di alveo pluricursale molto instabile e irregolare presentava notevoli difficoltà alla navigazione commerciale con fondali minimi in magra attorno al metro. Successivamente i lavori vennero estesi anche al tratto fra foce Mincio e foce Panaro.

Figura 4.1.1. La sistemazione dell'alveo del fiume Po per la navigazione.



Il progetto venne eseguito sulla base dei rilievi a profilo contemporaneo di magra effettuati in parecchi anni tra il 1905 e il 1923, dai quali fu possibile rilevare le caratteristiche di tracciato planimetrico dell'alveo. I criteri generali dell'intervento furono i seguenti:

- realizzazione di un canale di magra regolato all'interno dell'alveo inciso, con andamento meandriforme e larghezza di 250-300 m sulle soglie e di 400 m nel vertice delle curve, su una portata di dimensionamento di $400 \text{ m}^3/\text{s}$, corrispondente alla magra ordinaria;
- curve regolari a tracciato parabolico, con semiparametro mai inferiore a 1000 m (in relazione alle osservazioni effettuate sui profili di erosione delle sponde) e vertici successivi a distanza media di 2.8 km, per un totale di 51 curve su 140 km di canale sistemato tra foce Adda e foce Mincio;
- mantenimento della lunghezza del thalweg naturale, al fine di non variare la pendenza motrice della corrente;
- definizione del tracciato del canale in modo da mantenere le confluenze degli affluenti nelle parti concave delle curve, allo scopo di favorire il trasporto del materiale solido di apporto.

Il canale di magra è stato realizzato eseguendo prevalentemente opere in alveo (pennelli) e opere in cassero, secondo lo schema illustrato nelle figure seguenti (Figure 4.1.2 e 4.1.3).

Figura 4.1.2: Schema tipo delle opere di navigazione.

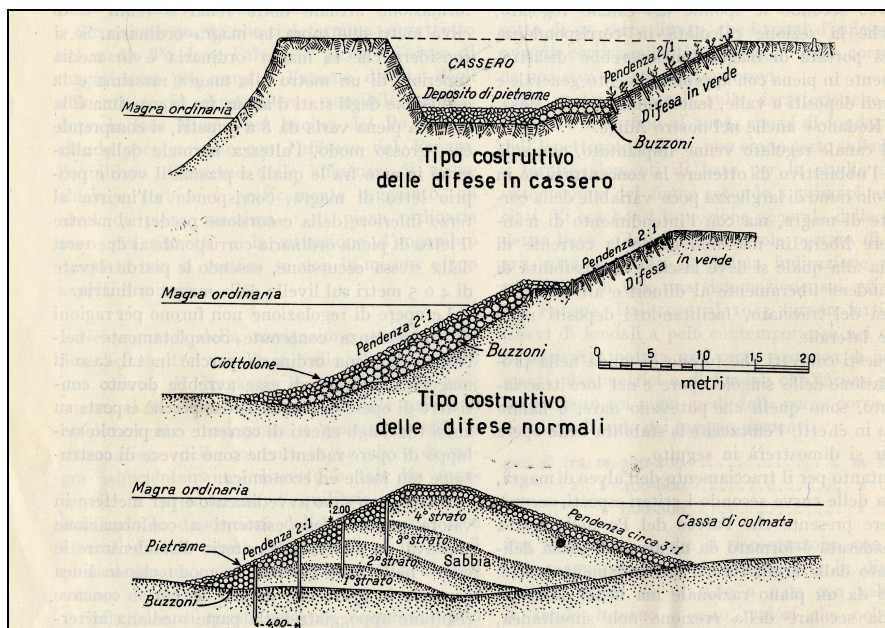
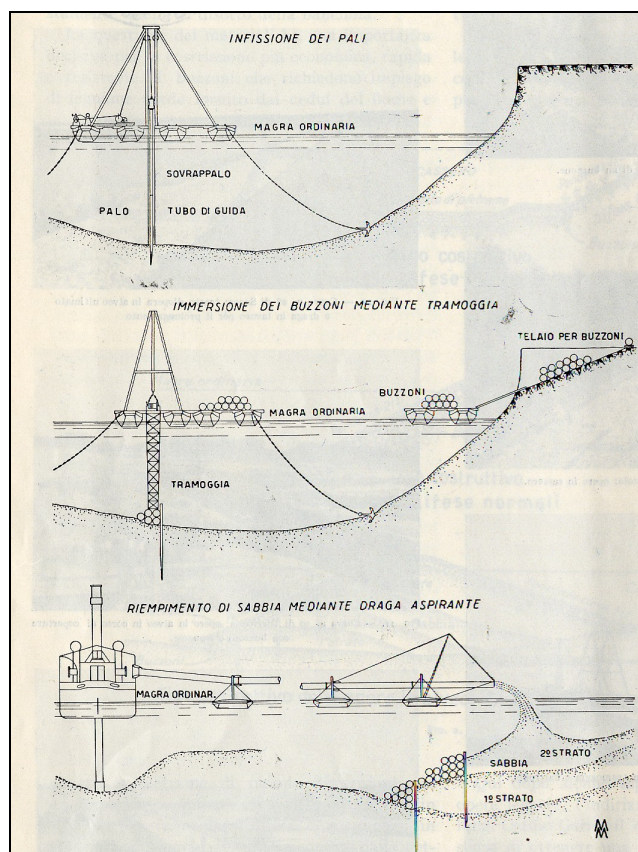


Figura 4.1.3: Fasi successive della costruzione delle opere tipo in alveo.



Tali opere hanno condizionato le dinamiche di evoluzione del corso d'acqua, consentendo nel tempo il raggiungimento di un assetto monocursale. In particolare tale assetto è stato ottenuto disconnettendo al regime di magra, e, in seguito all'approfondimento dell'alveo, anche al regime di piena ordinaria, i numerosi rami laterali esterni ai pennelli, come è visibile nella seguente sequenza cronologica di figure, in cui è rappresentato l'alveo del Po in corrispondenza di Viadana dal 1967 al 1988 (Figure 4.1.4, 4.1.5 e 4.1.6).

Figura 4.1.4: Alveo del Po nel 1967.

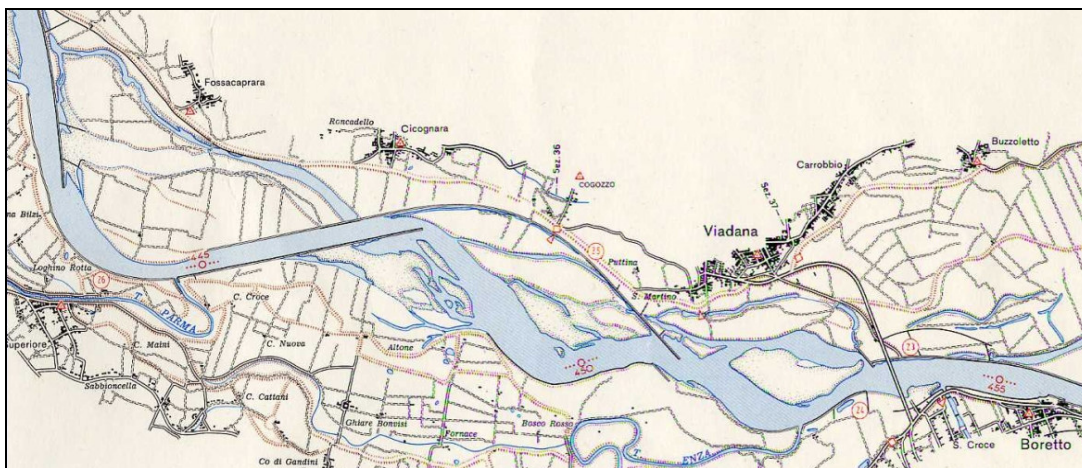


Figura 4.1.5: Alveo del Po nel 1972.

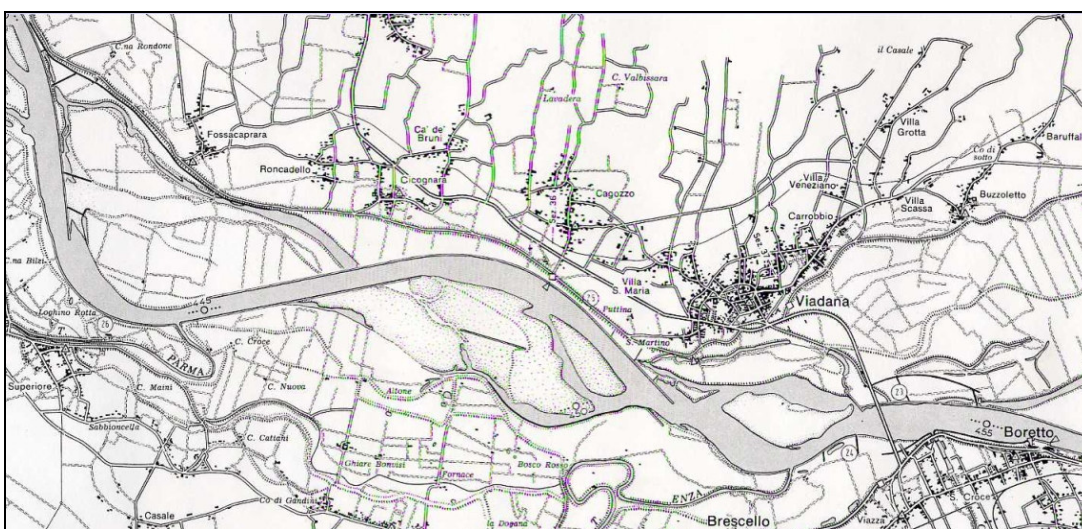
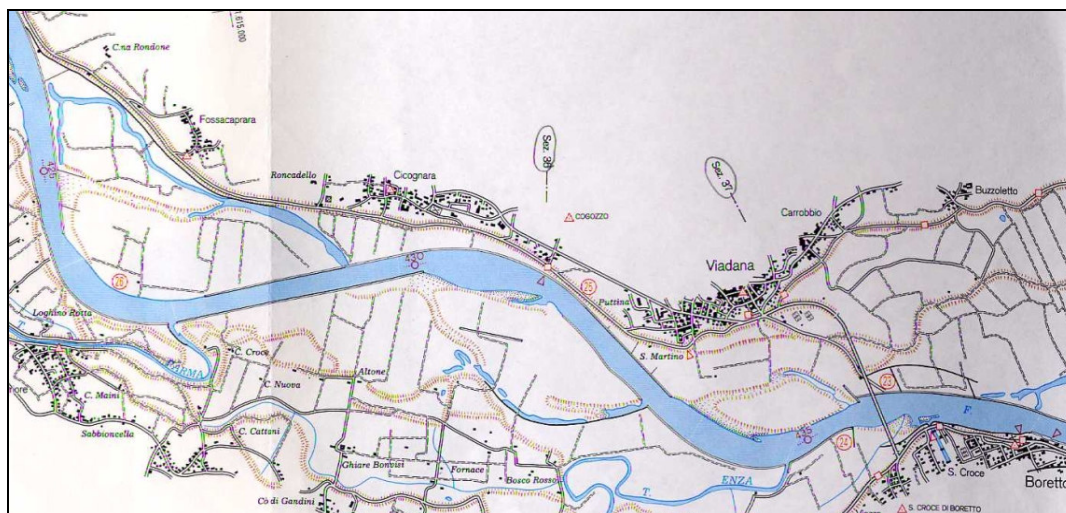


Figura 4.1.6: Alveo del Po nel 1988.



Nelle condizioni attuali si può ritenere che gli effetti attesi dalla realizzazione delle opere di regimazione siano stati conseguiti; l'alveo di magra ha infatti raggiunto una configurazione planimetrica sufficientemente stabile in circa tutto il tratto interessato.

Dal punto di vista altimetrico gli effetti della riduzione della larghezza della sezione trasversale naturale di magra da 450 m in media a 250 m erano naturalmente nella

direzione di un approfondimento del fondo, previsto sull'ordine di 1.50-2.0 m. In realtà si sono verificati abbassamenti superiori per gran parte del tratto; va osservato che alle modificazioni della morfologia dell'alveo di magra e del regime idrometrico per gli stati medi e di magra, conseguenti alle opere di sistemazione, si sono aggiunte le estrazioni in alveo e l'arresto del trasporto solido da monte determinato dalla traversa di Isola Serafini, che hanno giocato un ruolo di concausa di non facile identificazione in termini di peso relativo.

Altro elemento da considerare è legato al fatto che la sistemazione dell'alveo ha modificato la capacità di trasporto solido della corrente nel tratto sistemato, lasciandola inalterata a valle; in questo modo mentre si sono esaltati gli effetti di abbassamento di fondo tra foce Adda-foce Mincio, con maggiore incidenza nel primo tronco, la parte a valle ha avuto un maggiore apporto, che ha compensato parzialmente gli effetti di abbassamento derivanti dagli altri fattori.

Nella situazione attuale si possono considerare esauriti nel tratto a monte gli effetti di maggiore trasporto solido indotti dalla sistemazione, mentre è da attendersi una ulteriore evoluzione del tratto a valle, non più compensata dal maggiore trasporto solido da monte.

4.2. Lo sbarramento di Isola Serafini

La costruzione dello sbarramento di Isola Serafini (Figura 4.2.1), entrato in esercizio nel 1963, sovrappostasi al taglio di meandro dell'Isola Mezzadra nel corso della piena del 1951, ha comportato due effetti che si sono sommati:

- ha impedito lo svilupparsi, a seguito del taglio di meandro, della naturale tendenza all'erosione del tratto a monte e di deposito a valle; il tronco a valle della traversa ha di conseguenza sviluppato una forte erosione di fondo e una elevata instabilità morfologica dell'alveo;
- ha ridotto il trasferimento a valle del trasporto solido di monte, in relazione sia alle modifiche strutturali dell'alveo sia alle modalità di gestione della regolazione della traversa (a quota idrica di monte invariata); il bilancio del trasporto solido riferito al periodo 1954-63, anteriore all'entrata in esercizio dell'opera, e 1963-70, posteriore, porta a stimare in circa 2 milioni di m³/anno il volume di trasporto solido trattenuto dallo sbarramento (dato quest'ultimo in corso di aggiornamento nell'ambito del programma generale di gestione dei sedimenti in seguito specificato).

Figura 4.2.1. Lo sbarramento di Isola Serafini.



L'effetto complessivo è rappresentato da elevati abbassamenti di fondo che hanno interessato il tronco di fiume immediatamente a valle della traversa, con valori particolarmente rilevanti in corrispondenza di Cremona, accompagnati da fenomeni di instabilità morfologica complessiva; non è per altro nota, in quanto di valutazione complessa e in mancanza della disponibilità degli elementi conoscitivi sufficienti sull'evoluzione complessiva, quale può essere l'estensione verso valle degli effetti ascrivibili all'intervento.

4.3. L'attività estrattiva in alveo

L'attività estrattiva può essere considerata la causa primaria, diretta e indiretta, dell'abbassamento dell'alveo, a cui si sono sommate concause minori, rappresentate dalle due sopra indicate.

A partire dagli anni '50 le estrazioni dagli alvei hanno registrato un notevole incremento, determinato dallo sviluppo del sistema viario e dell'edilizia. I valori estratti dal bacino del Po sono progressivamente aumentati dai 2.5 milioni di m³/anno fino a raggiungere 12.0 milioni di m³/anno negli anni '60-'80. A partire dal 1983 si è avuta una inversione di tendenza e i quantitativi estratti a fini di regimazione idraulica sono stati progressivamente ridotti e si sono instaurati controlli più severi sui quantitativi effettivamente asportati.

Una prima direttiva del Magistrato per il Po, nel 1988, limita la possibilità di estrazione e nel 1992 una più restrittiva disposizione dell'Autorità di bacino condiziona strettamente l'asportazione di inerti dal demanio fluviale a esigenze di carattere idraulico, arrestando di fatto l'attività estrattiva. Il trend evolutivo dell'abbassamento dell'alveo in questi ultimi anni, che evidenzia una riduzione dell'approfondimento e in qualche caso una inversione di tendenza, pare correlabile alle misure di limitazione e controllo adottate, assegnando alle stesse evidenti effetti positivi.

In sintesi sono possibili le seguenti considerazioni relative al fenomeno dell'abbassamento del fondo alveo del Po e ai fattori coinvolti:

- l'attività estrattiva è stato un fattore di importanza primaria nel determinare gli abbassamenti del fondo alveo di Po nel tratto a valle di Isola Serafini;
- all'abbassamento ha concorso l'effetto combinato dei lavori di sistemazione dell'alveo di magra per la navigazione e dello sbarramento suddetto; la sistemazione dell'alveo ha esaltato il fenomeno nel tratto tra foce Adda e foce Mincio e attenuato o ritardato gli effetti a valle, in ragione della maggiore capacità di trasporto solido dell'alveo regimato;
- l'abbassamento di fondo non è complessivamente esaurito e l'attuale tendenza all'attenuazione o a un leggero recupero delle quote minime è strettamente correlata alla rigorosa limitazione attuata delle asportazioni di inerti dall'alveo attivo.

4.4. La necessità di una corretta gestione dei sedimenti alluvionali dell'alveo

Alla luce delle considerazioni sopra riportate in relazione al fenomeno di incisione dell'alveo del fiume Po e alle cause che lo hanno nel tempo generato, emerge chiaramente la necessità di definire una corretta gestione dei sedimenti alluvionali dell'alveo.

Per gestione dei sedimenti si intende, in particolare, l'insieme delle attività di carattere non strutturale (approfondimenti conoscitivi sul tema del trasporto solido, definizione dell'assetto planaltimetrico di riferimento dell'alveo, monitoraggio delle caratteristiche morfologiche dell'alveo, individuazione di vincoli e di regole operative per la manutenzione

dell'alveo) e di carattere strutturale (interventi di movimentazione ed eventualmente asportazione di materiale litoide) necessarie al conseguimento di buone condizioni di officiosità idraulica, morfologica e ambientale del corso d'acqua.

In linea generale gli obiettivi di gestione dei sedimenti da conseguire sono:

- il recupero di configurazioni morfologiche dell'alveo caratterizzate da maggiori condizioni di stabilità e la ricerca di un maggior equilibrio nelle dinamiche di trasporto solido;
- il miglioramento della capacità di convogliamento delle portate di piena con particolare riguardo ai tratti canalizzati urbani;
- il miglioramento della capacità di laminazione naturale delle portate di piena nelle aree golenali con particolare riguardo ai tratti caratterizzati da alvei in forte incisione;
- il miglioramento dell'assetto ecologico del corso d'acqua;
- il ripascimento delle coste adriatiche attraverso il sistema di dispersione in mare dei sedimenti del fiume Po;
- il mantenimento di determinate condizioni di navigabilità sui tratti di corsi d'acqua navigabili del bacino del Po.

Al fine di conseguire una corretta gestione dei sedimenti degli alvei ed il raggiungimento, per stralci funzionali di parti significative di bacino idrografico, degli obiettivi sopra riportati è necessario predisporre uno specifico strumento conoscitivo, gestionale e di programmazione degli interventi, mediante il quale disciplinare e attuare nel tempo le attività di monitoraggio e manutenzione dell'alveo.

Fra Autorità di bacino, AIPO, Regione Lombardia, Regione Emilia Romagna e Regione Veneto, è stato sottoscritto nell'ottobre 2004, *"l'Accordo per la gestione dei sedimenti del fiume Po da confluenza Tanaro al mare"* (Allegato 2), nell'ambito del quale sono previste sia attività di rilievo topografico e aerofotogrammetrico che attività di studio sulle dinamiche di trasporto solido propedeutiche al *"Programma generale di gestione dei sedimenti"*, da predisporre coerentemente con i criteri e le prescrizioni indicate nella *"Direttiva tecnica per la programmazione degli interventi di gestione dei sedimenti degli alvei dei corsi d'acqua"* (Allegato 3), approvata nella seduta di Comitato Tecnico dell'Autorità di bacino del 23 marzo 2005.

Per quanto riguarda le attività di monitoraggio l'asta del fiume Po a valle della confluenza Ticino è oggetto di specifiche attività di rilievo che troveranno compimento entro autunno 2005 (sul tratto di monte da monte di Torino a confluenza Ticino le attività di rilievo si sono concluse nel 2004) e che in particolare consistono in:

- realizzazione della rete di raffittimento in collaborazione fra AdbPo, AIPO e IGM;
- rilievo topografico di sezioni trasversali e livellazioni lungo le arginature (AIPO);
- rilievo laserscanner per la produzione di piani quotati di elevato dettaglio (DTM passo 2 metri e per "sfoltimento mirato" passo 10 metri, con precisione altimetrica pari a 30 cm);
- esecuzione di ortoimmagini ad elevato grado di risoluzione (pixel pari a 20 cm);
- rilievi batimetrici dell'alveo inciso per la produzione di piani quotati ad integrazione del rilievo laserscanner;

In particolare nel realizzare tali attività di rilievo topografico e aerofotogrammetrico particolare cura è posta nella definizione di metodologie ripercorribili nel tempo, ancorate in particolare ad un'univoca rete di raffittimento definita insieme all'IGM, che consentiranno in futuro ad intervalli di tempo definiti (non superiori a tre – cinque anni), oppure in seguito ad eventi di piena particolarmente intensi, di poter aggiornare efficacemente l'attuale quadro conoscitivo ed avere di conseguenza indispensabili strumenti di monitoraggio dell'evoluzione planoaltimetrica dell'alveo.

Per quanto riguarda l'analisi delle dinamiche morfologiche, nel 2004 l'Autorità di bacino ha aggiornato, con il supporto tecnico della società Geomap la carta geomorfologia dell'asta fluviale da confluenza Tanaro a Pontelagoscuro (ST1.20), sulla scorta di una ripresa aerofotogrammetria del febbraio 2002 ed in aggiornamento di quanto già realizzato nel 1982 dalla stessa Geomap per conto del CER. A titolo di esempio si veda la figura seguente relativa al tratto di Po in corrispondenza della confluenza Ticino (Figura 4.4.1).

Figura 4.4.1a. Carta delle dinamiche morfologiche – Il caso della confluenza Po-Ticino (Cartografia).

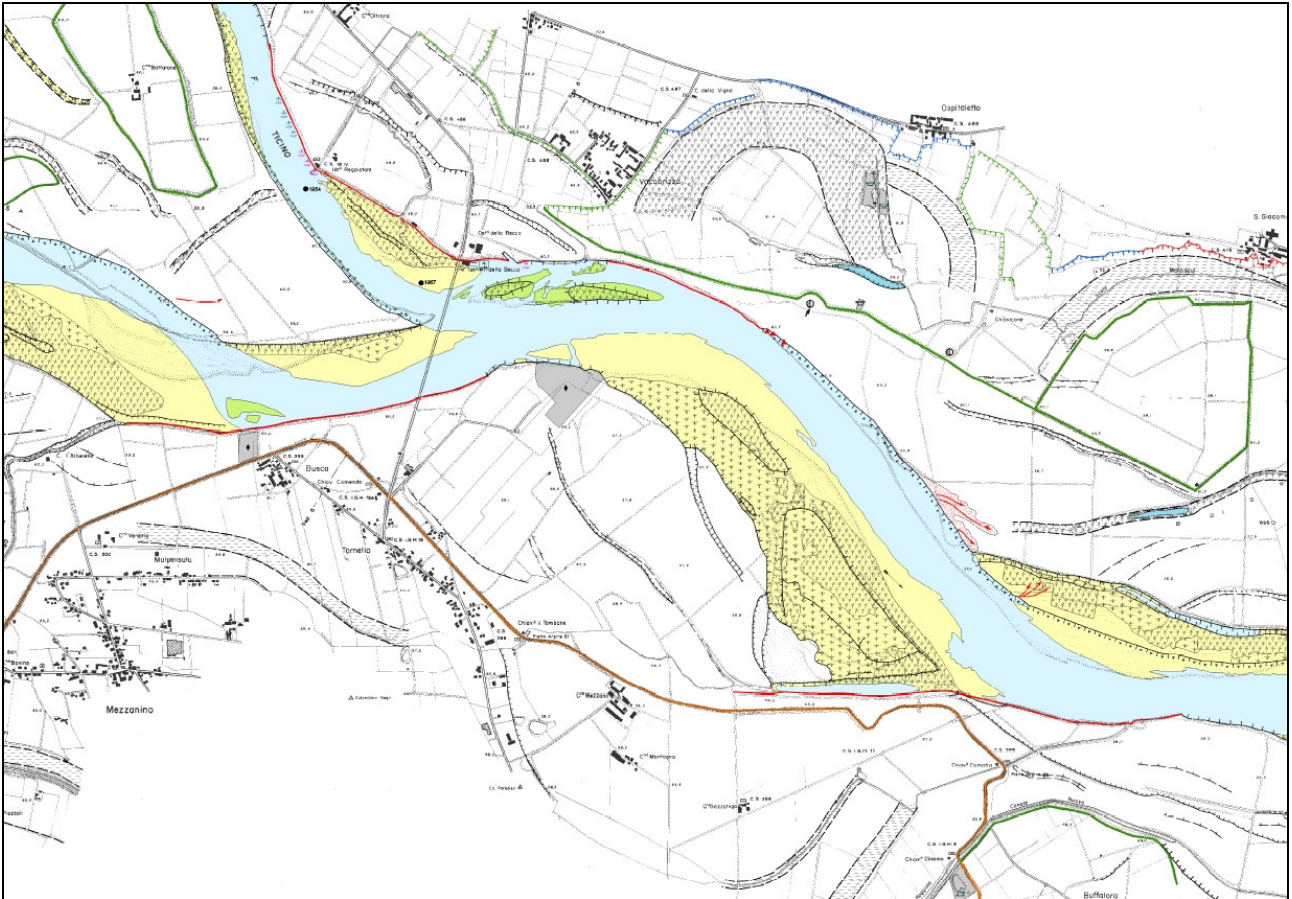
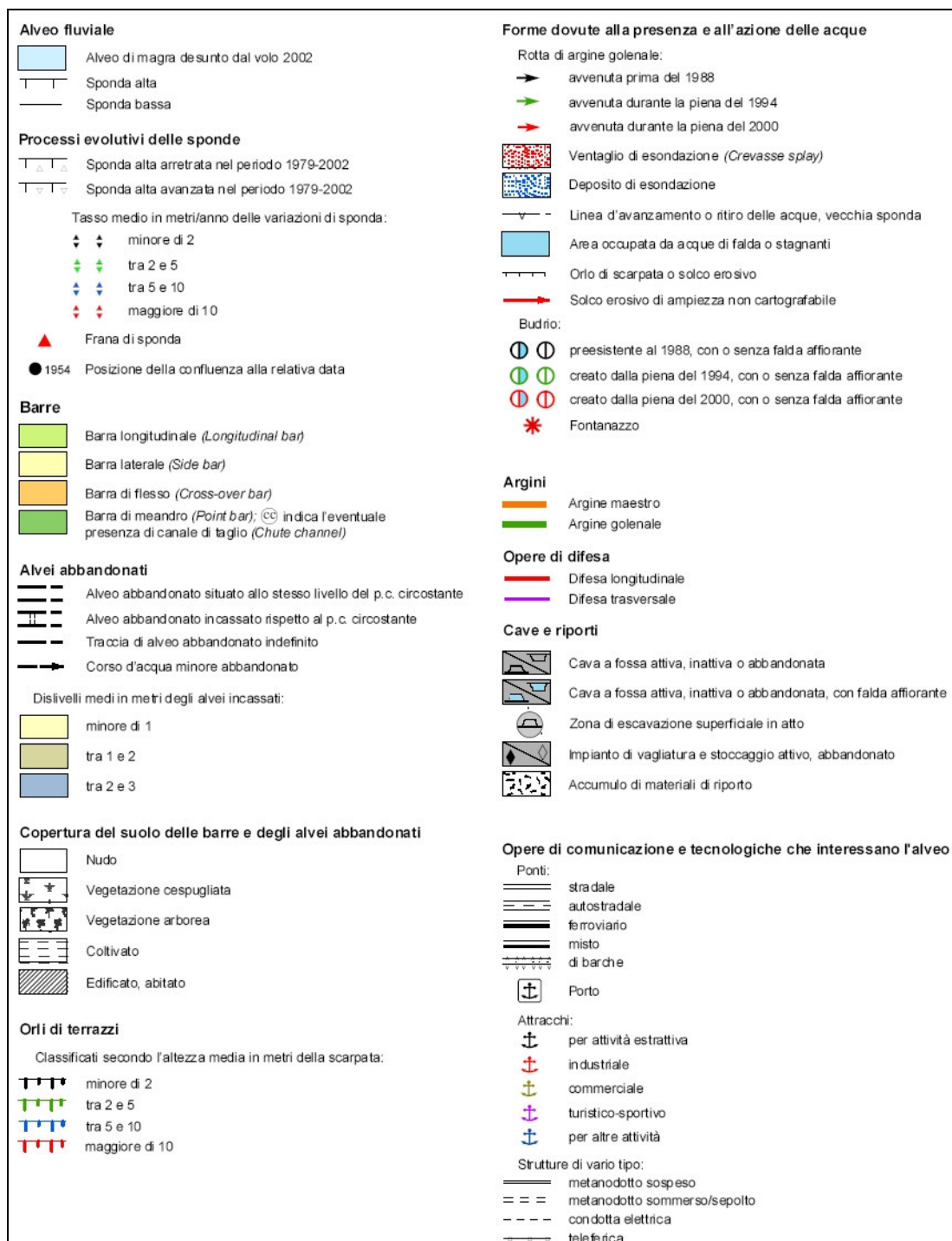


Figura 4.4.1b. Carta delle dinamiche morfologiche (Legenda).



Infine per quanto riguarda le attività di approfondimento sul trasporto solido e sugli interventi di gestione dei sedimenti alluvionali, le stesse, avviate nel 2004, sono in corso di ultimazione sul primo tratto di monte da confluenza Tanaro a Cremona e di svolgimento sul tratto di valle fino al mare.

Il processo conoscitivo, di pianificazione e programmazione sotteso dalla Direttiva sopraccitata ed in corso di applicazione sul fiume Po, consiste in particolare nelle seguenti attività:

- aggiornamento delle conoscenze in relazione alle dinamiche morfologiche in atto e al bilancio del trasporto solido;
- definizione dello stato attuale e delle criticità presenti lungo l'asta fluviale;
- definizione degli obiettivi di manutenzione;
- definizione di regole, criteri e linee di intervento per la corretta gestione dei sedimenti;
- programmazione e progettazione a livello di fattibilità degli interventi rilevanti a livello di intera asta fluviale;
- definizione e programmazione delle attività di monitoraggio delle caratteristiche morfologiche dell'alveo.

In relazione all'aggiornamento del quadro conoscitivo sono state effettuate specifiche analisi geomorfologiche ed idrauliche che hanno consentito una stima quantitativa del trasporto solido. In particolare sono state quantificate in termini volumetrici le modificazioni intercorse a carico delle sponde, delle forme di fondo e del fondo alveo durante l'ultimo ventennio per il quale si aveva la disponibilità delle due carte geomorfologiche sopradescritte (1982 e 2002) nonché dei rilievi topografici delle sezioni trasversali (1979 – 1999).

Le attività connesse all'aggiornamento del quadro conoscitivo, alla definizione degli obiettivi di manutenzione e all'individuazione degli interventi, sono state sintetizzate in specifiche cartografie di cui si allega un esempio in corrispondenza di foce Ticino (Figura 4.4.2, 4.4.3 e 4.4.4). Tali attività confluiranno nel sopraccitato "Programma generale di gestione dei sedimenti".

Figura 4.4.2. Carta dell'assetto attuale – Il caso della confluenza Po-Ticino.

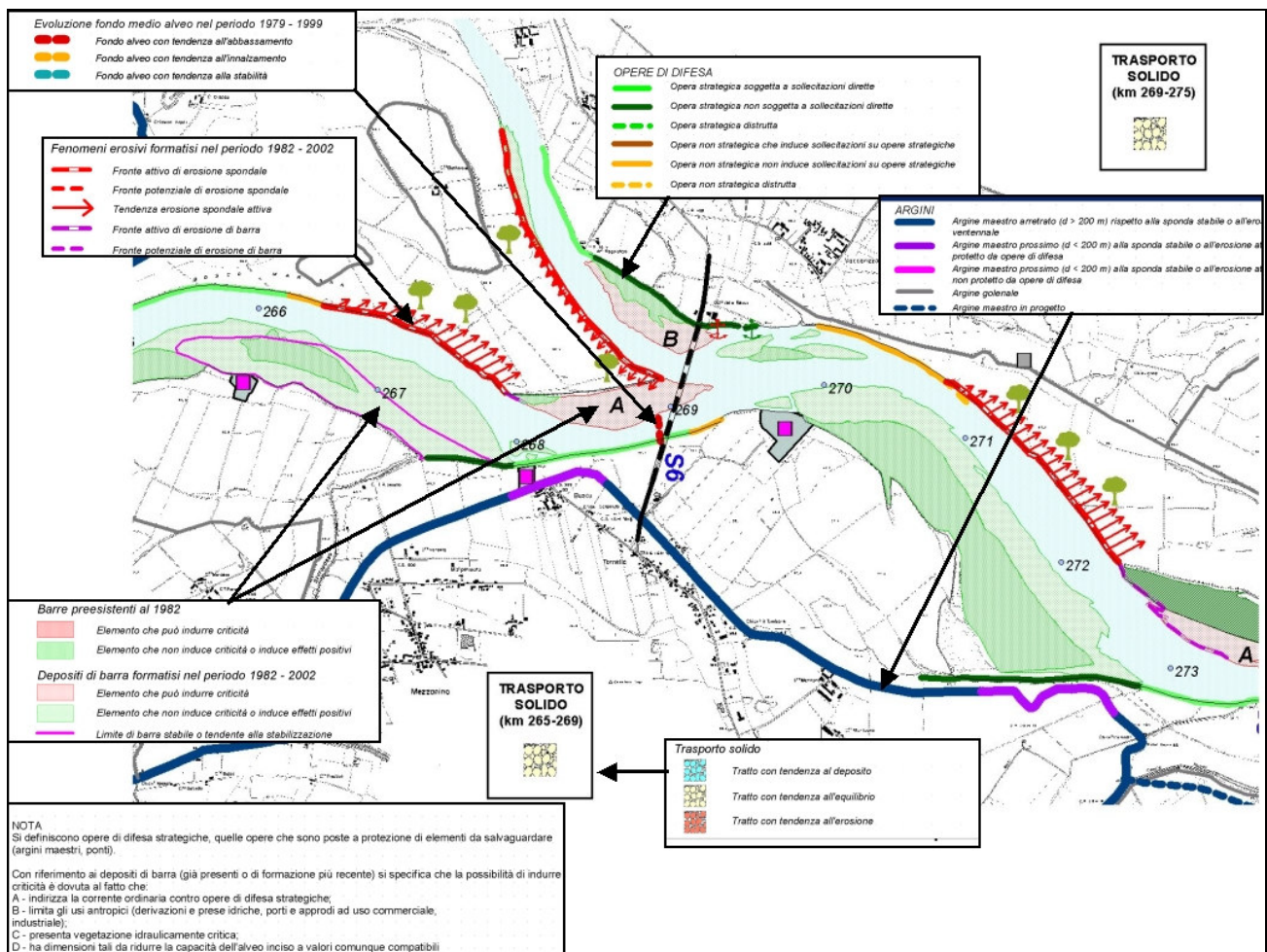


Figura 4.4.3. Carta degli obiettivi – Il caso della confluenza Po-Ticino (Cartografia).

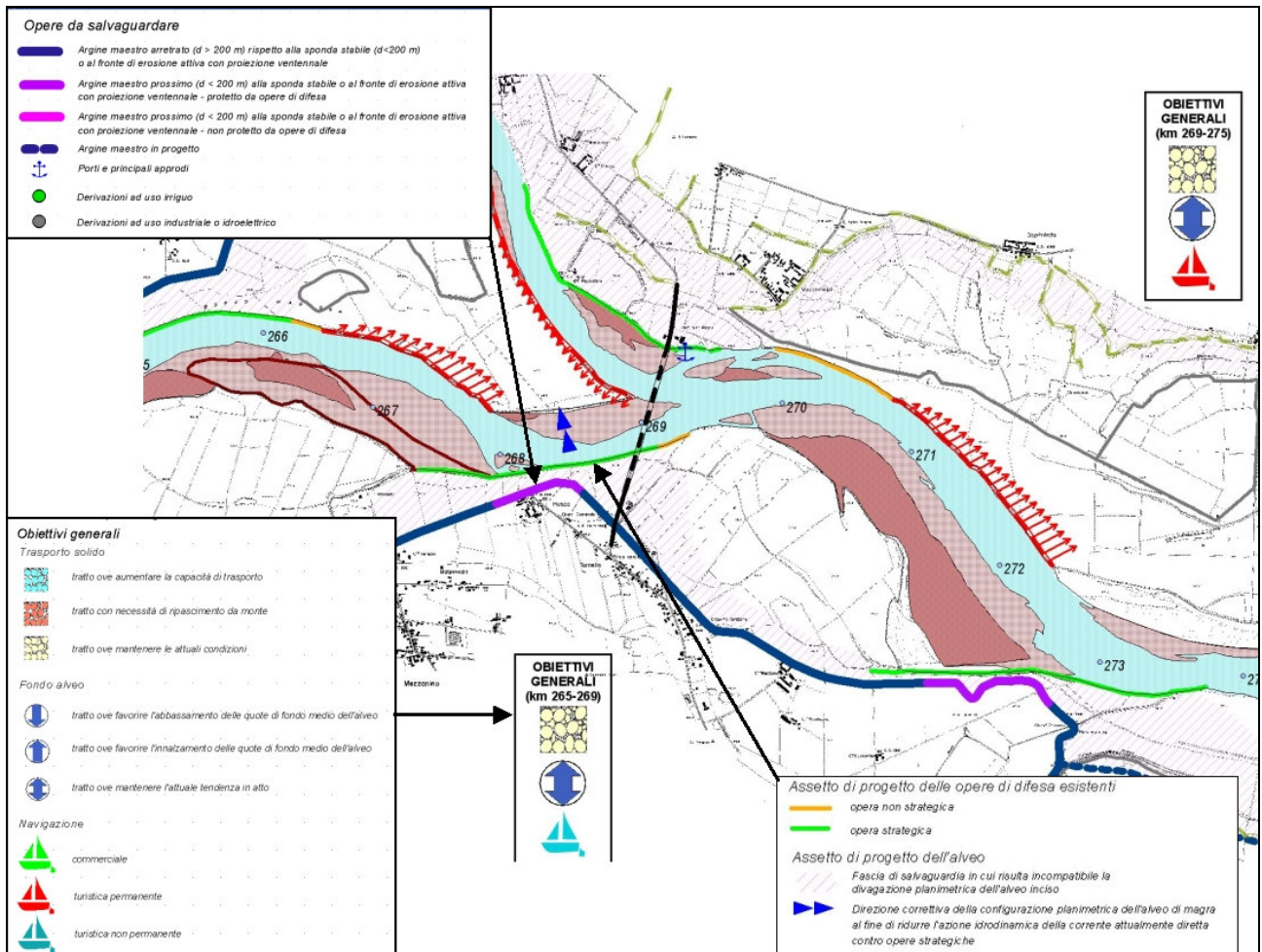
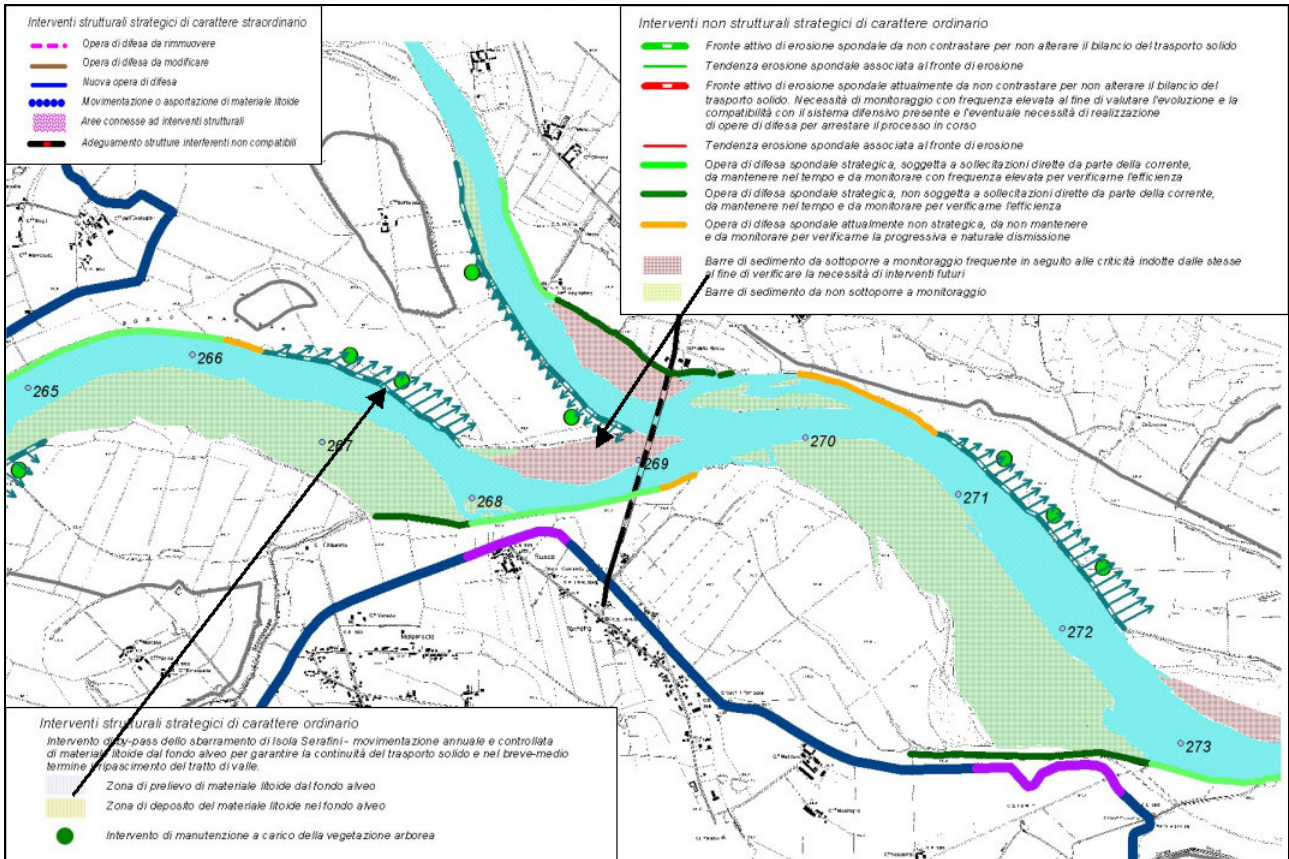


Figura 4.4.4. Carta degli interventi – Il caso della confluenza Po-Ticino.



5. Le fasi principali di sviluppo e attuale assetto delle arginature maestre

Le attuali arginature del fiume Po e dei suoi affluenti rappresentano il risultato finale della lotta che l'uomo ha ingaggiato contro le piene a difesa dei propri beni dalla più remota antichità. Da primitivi cumuli di terra a recinzione delle modeste aree coltivate, disseminate nella vasta palude padana, all'organico sistema arginale che si sviluppa per oltre millecinquecento chilometri dalla Becca al mare risalendo, per rigurgito, gli affluenti, sono trascorsi infatti migliaia di anni di storia.

Solo però dalla seconda metà del XIX secolo, le piene di Po si possono considerare contenute in un sistema regolare e pressoché continuo che, con argini maestri, chiaviche di interclusione dei colatori, argini di rigurgito degli affluenti, delimita le zone lasciate all'espansione delle acque da quelle definitivamente estromesse.

Tale sistema ha avuto nel XX secolo fasi significative di rialzo e ringrosso oltreché di estensione verso monte in corrispondenza degli affluenti principali, fasi che si sono in particolare intensificate in seguito agli eventi di piena più rilevanti del 1929, 1951, 1994 e 2000.

Dall'esame della relazione del Prof. Ing. Mario Giandotti sulla piena del fiume Po dell'anno 1926 emergono importanti elementi sullo sviluppo delle arginature che risalgono all'anno 1878. Lo sviluppo arginale di 2^a categoria nel 1878 si presentava con Km. 801,790 in destra e di Km. 772,146 in sinistra, con un totale di Km. 1574. Nel 1930 le arginature di sinistra avevano una lunghezza di Km. 1108,222 mentre quelle in destra avevano una lunghezza di Km. 1153,584 per un totale di Km. 2261,806. Vale a dire che dal 1878 al 1930 si è avuto un maggiore sviluppo di Km. 690 con un accresciuto cinturamento delle acque di piena di circa il 50%.

Allo stato attuale, vale a dire dal 1930 o meglio dal 1951 ad oggi, in quanto risulta che i maggiori interventi sulle arginature siano stati effettuati dopo il disastroso evento del 1951, lo sviluppo arginale di 2^a categoria è di poco superiore a Km. 2900 con un ulteriore cinturamento delle acque di piena del 30%.

L'asta principale del fiume Po, nel tratto da foce Tanaro all'incile del Po di Goro, presenta uno sviluppo delle arginature maestre di Km. 448 in sinistra e 390 in destra.

Le informazioni assunte presso i vari Uffici dell'AIPO fanno ritenere che, dopo la piena del nov. 1951, l'incremento in lunghezza degli argini degli affluenti rigurgitati sia stato per così dire esiguo ed in ogni caso rapportato all'adeguamento degli argini medesimi al nuovo profilo di piena.

Pertanto si può affermare che, dal 1930 ad oggi, il maggiore sviluppo delle arginature di 2^a categoria sia dovuto all'esecuzione di nuovi argini a difesa di territori ove prima non si erano verificati eventi di esondazione, talvolta significativi solo come fenomeno di interesse locale.

Le arginature maestre del Po, dopo l'evento del nov. 1951, sono state interessate da opere di un certo rilievo mirate a conseguire in generale un grado di sicurezza accettabile; interventi di rilievo ma quasi sempre frammentari rivolti laddove si erano manifestate le maggiori criticità.

Infatti sono reperibili presso l'Archivio dell'AIPO solo i titoli dei vari lavori eseguiti dagli Uffici del Genio Civile, a partire dal 1952 circa, con il coordinamento del Circolo Superiore di Ispezione per il Po prima e poi del Magistrato per il Po di Parma (istituito con legge 12/07/1956 n. 735)

Dai sopraccitati titoli sono desumibili i seguenti interventi tipo:

- Costruzione dei tratti di arginatura interessati dalle rotte;
- Ripristini di tratti di arginatura dissestati dalla piena;
- Costruzione di banche e adeguamento sagome;
- Costruzione di diaframmi al piede degli argini a difesa di centri abitati;
- Rivestimenti in calcestruzzo di scarpate arginali permeabili;
- Riparazione e costruzione di nuove chiaviche;
- Sistemazione di difese spondali in frodo, ecc.

Il rialzo delle arginature avvenuto in passato è sempre stato commisurato ai valori delle piene ricordando gli interventi susseguenti le piene del 1872, 1917, del 1926 e quella del 1951, a seguito della quale gli argini vennero elevati significativamente in alcuni punti da uno a due metri.

Risulta significativo ricordare le tre direttive di riferimento per la realizzazione e l'adeguamento delle arginature di Po:

- Direttiva n. 3651/2200 del 12 febbraio 1873 emanata dal Ministero dei lavori Pubblici in seguito alla piena del 1872;
- Direttiva del 25 luglio 1952 emanata dal Circolo Superiore di Ispezione per il Po in seguito alla piena del 1951;
- Direttiva del 12 agosto 1998 emanata dal Magistrato per il Po in seguito alla piena del 1994.

La sagoma tipo degli argini antecedente il nov. 1951 era nella maggior parte di tipo semplice come può evincersi dalla rappresentazione di alcune sezioni tipo di seguito riportate (Figure 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4), mentre nel corso inferiore era già presente almeno una banca; successivamente al nov. 1951 gli argini vennero in più riprese rinforzati in modo rilevante, come può desumersi dalle citate sezioni tipo.

Figura 5.1. Evoluzione tipo dell'argine di Po nel corso superiore.

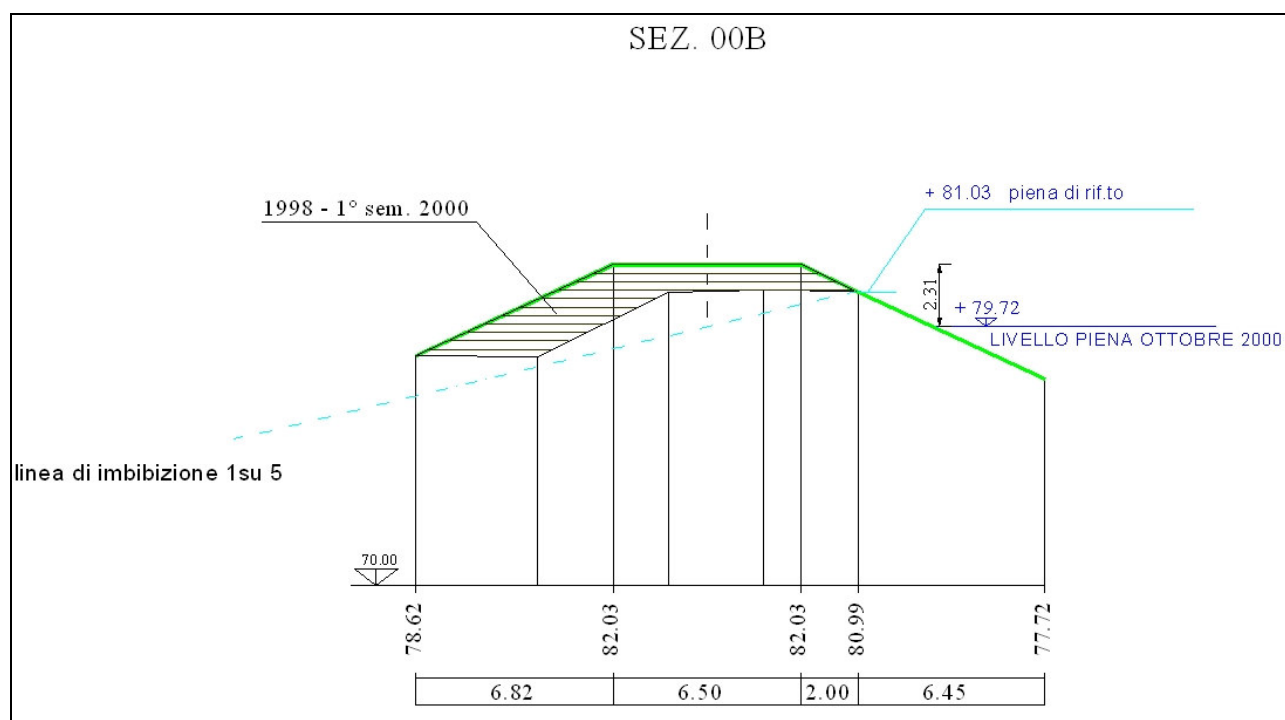


Figura 5.2. Evoluzione tipo dell'argine di Po nel corso medio superiore.

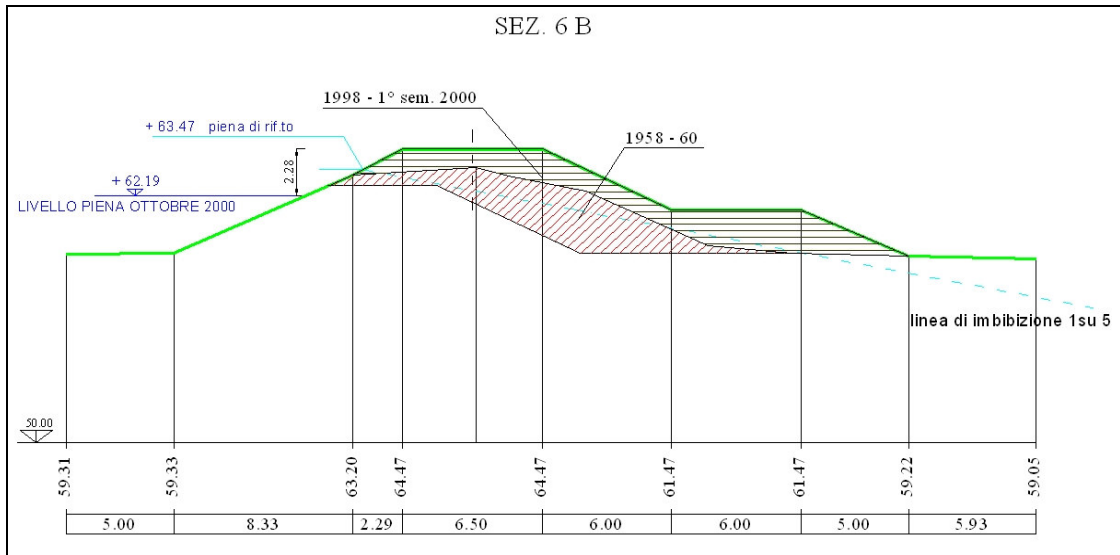


Figura 5.3. Evoluzione tipo dell'argine di Po nel corso medio.

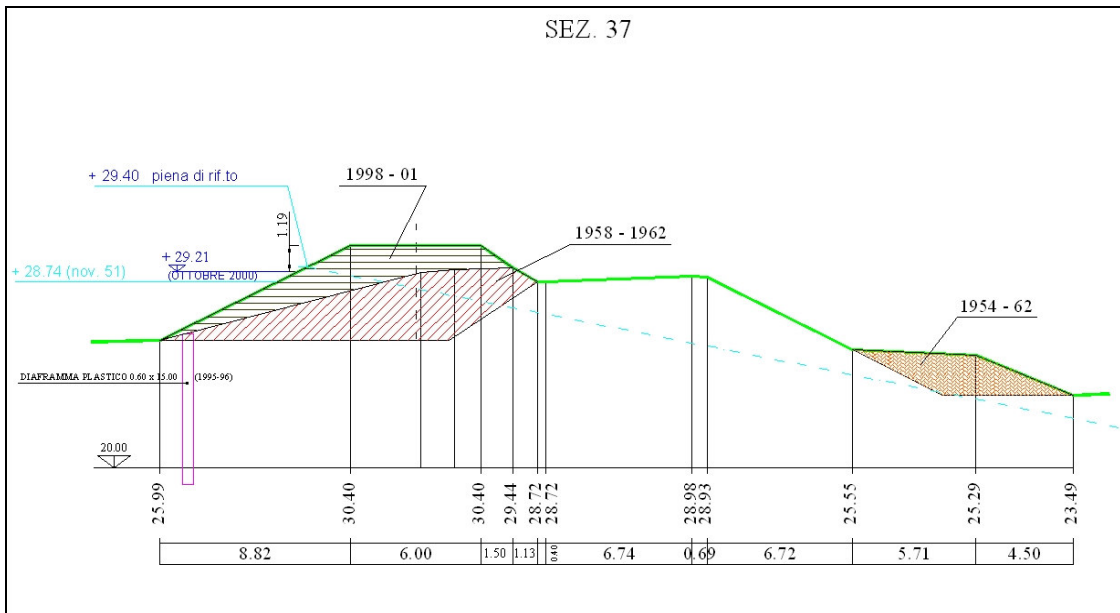
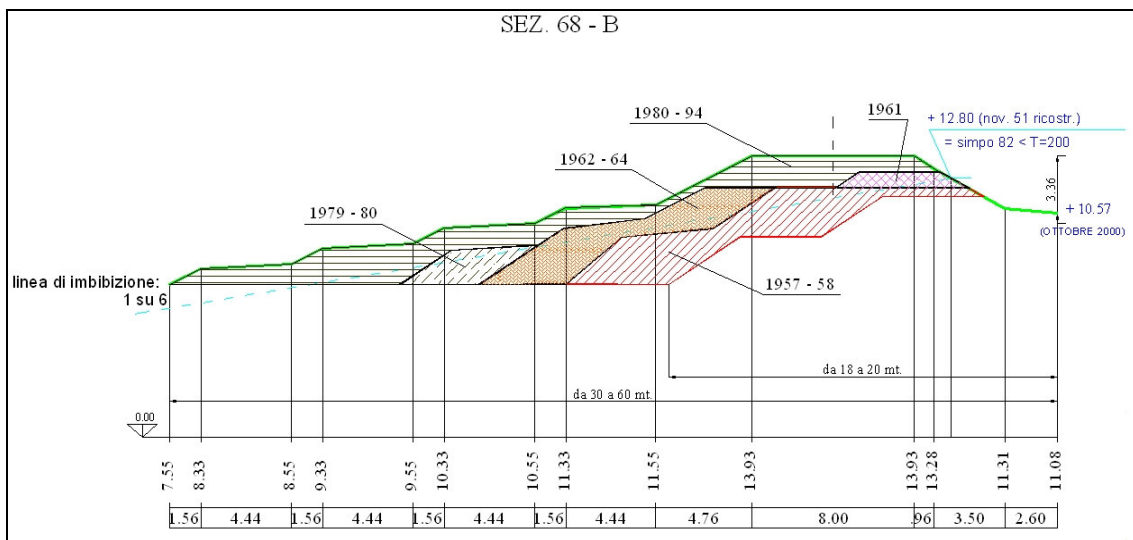


Figura 5.4. Evoluzione tipo dell'argine di Po nel corso inferiore.



Dopo l'evento di piena del novembre 1994, evento che può essere definito collaudo funzionale degli interventi realizzati dopo il 1951 (molti argini riparati da allora non sono stati più bagnati dalle piene fino al 1994), si è proceduto, in attuazione del Piano stralcio PS45, alla progettazione e realizzazione di molti interventi di adeguamento in quota ed in sagoma delle arginature.

L'esecuzione di detti interventi è stata ulteriormente intensificata in seguito alla piena dell'ottobre 2000; le arginature sono state generalmente adeguate con quote di sommità per lo più in sintonia con il progetto SIMPO 82, mentre per pochi tratti, prevalentemente in corrispondenza di centri abitati, l'adeguamento è stato commisurato al profilo di piena definito nel Piano Stralcio PAI (TR = 200 anni).

Gli interventi attuati e quelli in corso di attuazione in seguito agli eventi di piena del 1994 e del 2000 hanno rispettato le prescrizioni tecniche per la costruzione e l'adeguamento degli argini maestri come segue:

1. sagoma definitiva con linea piezometrica teorica (linea di imbibizione) contenuta entro un metro dal paramento esterno ed in ogni caso non inferiore a m. 0.50; pendenza della piezometrica teorica pari a metri uno in verticale e metri cinque in orizzontale da foce Tanaro fino ai confini MN-RO in sinistra e MN-FE in destra; piezometrica di metri uno in verticale e metri sei in orizzontale per i tratti compresi nei territori di Rovigo e di Ferrara.
- E' da sottolineare che recenti prove sperimentali su modello e studi eseguiti sulla permeazione dei corpi arginali hanno evidenziato la possibilità di aumentare la pendenza della linea di imbibizione per alcuni tratti oggetto di studio (argine destro mantovano a valle di foce Oglio) fino a metri uno in verticale e quattro in orizzontale;
2. larghezza in sommità m. 6.50 da foce Tanaro a Piacenza, m. 7.00 da PC a foce Oglio, m. 8 e più da foce Oglio a valle;
 3. scarpate degli argini con pendenze non maggiori di m. 1,00 su 1,50 a fiume e m. 1,00 su 2,00 a campagna;
 4. larghezza delle banche variabile da un minimo di m. 3,00 ad un massimo di m. 6,00 con qualche eccezione di larghezze superiori dovute a particolari condizioni locali.

E' significativo evidenziare che, come previsto dalla sopraccitata Direttiva del 1998 del Magistrato per il Po, gli interventi di rialzo e ringrosso arginale effettuati in seguito alle ultime due piene sono stati in gran parte realizzati lato fiume, diversamente da quanto generalmente prescritto in passato. Rimandando alla direttiva per una completa esposizione delle motivazioni connesse a tale indirizzo, si ricorderà solamente che ciò è da addurre sia a ragioni tecniche (possibilità di ridurre la pendenza del paramento lato fiume, possibilità di contenere la linea di imbibizione in gran parte all'interno del corpo arginale preesistente al ringrosso) che a ragioni economiche (minore utilizzo di terre).

Nel 2004 l'Autorità di bacino, con il supporto del geom. Coratza, ha condotto una dettagliata ed approfondita attività di aggiornamento del catasto delle arginature maestre (ST.1.2) mediante la raccolta e l'organizzazione di tutte le informazioni, disponibili presso i singoli uffici operativi dell'AIPO, in relazione ai lavori di rialzo e ringrosso delle arginature realizzati in seguito agli eventi alluvionali del 1994 e 2000. Si riportano di seguito alcuni esempi degli elaborati prodotti: la prima figura (Figura 5.5) fa riferimento all'atlante delle sezioni trasversali del corpo arginale, in cui in particolare è rappresentata la sagoma dell'attuale arginatura, la sagoma dell'arginatura precedentemente ai lavori di rialzo e ringrosso realizzati in seguito alle ultime piene (1994, 2000), il livello osservato della piena

del 2000 nonché la linea di infiltrazione (o di imbibizione teorica); la seconda (Figura 5.6) fa riferimento all'atlante cartografico generale in cui sono rappresentati gli argini maestri, le opere ad essi associate e la georeferenziazione dei fontanazzi verificatisi nel 1994 e nel 2000. Nelle Figure 5.7 e 5.8 si riportano invece due fotografie che evidenziano la presenza di filtrazioni diffuse e di fontanazzi relativamente all'area di Figura 5.6 (vicinanze di Castelnuovo).

Figura 5.5. Sezione tipo di arginatura.

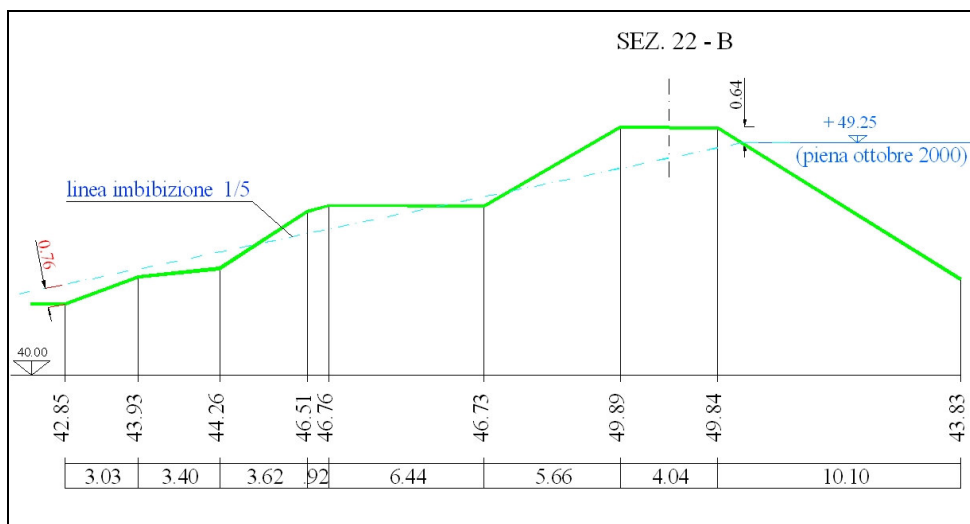


Figura 5.6. Planimetria tipo dei fenomeni di infiltrazione arginale.

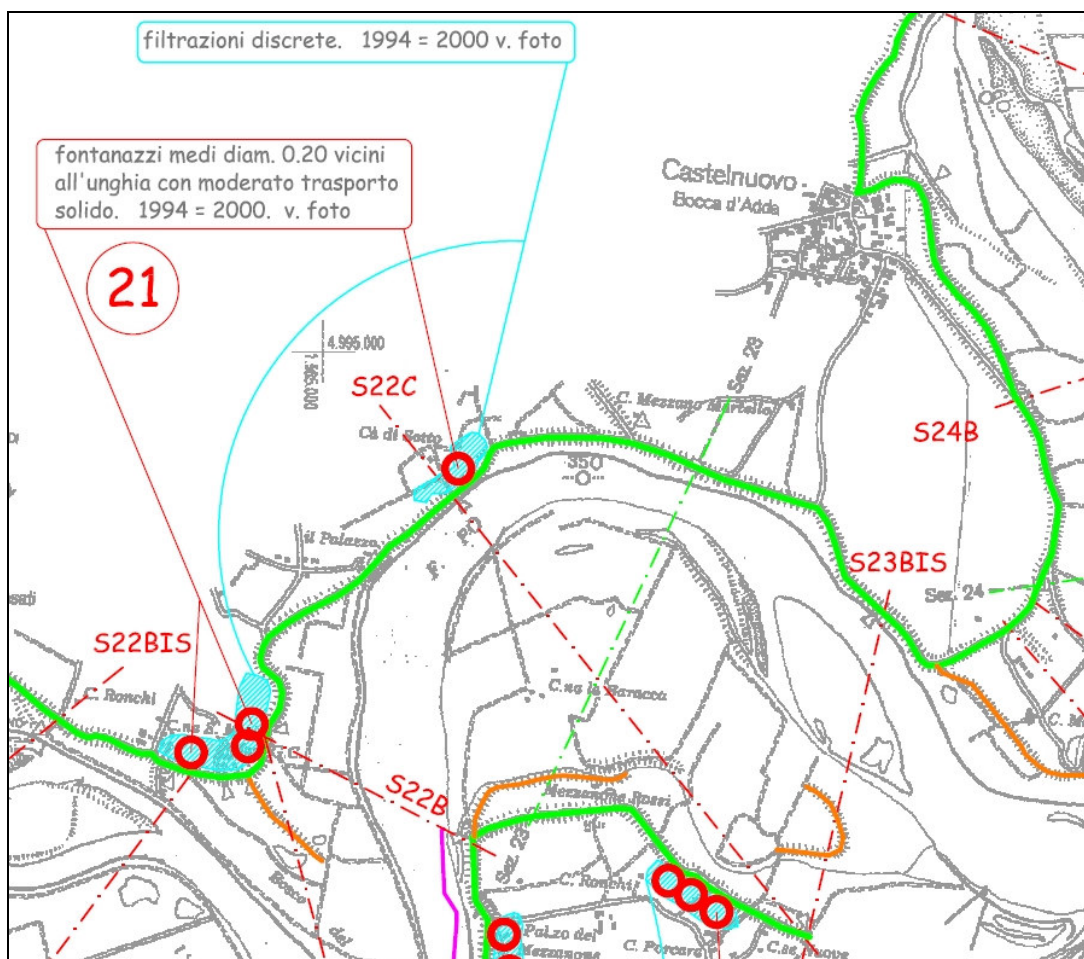


Figura 5.7. Filtrazione diffusa nelle vicinanze di Ca' di Sotto.



Figura 5.8. Fontanazzi nelle vicinanze di Cascina Ronchi.



6. Analisi statistica delle piene storiche

Per quanto riguarda gli aspetti idrologici del bacino del fiume Po ed in particolare la definizione delle portate di progetto lungo l'asta principale, allo stato attuale il documento di riferimento è il Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico, che contiene diverse informazioni sull'idrologia del bacino idrografico, oltre a tabelle con elencate le portate di riferimento per diversi tempi di ritorno lungo l'intero corso del fiume.

Rimandando, per quanto riguarda la descrizione metodologica, al documento del PAI "Linee generali di assetto idraulico e idrogeologico – asta Po", alla Direttiva del PAI "Piena di progetto" e all'aggiornamento effettuato nel 2002 (ST1.19), si riporta di seguito la tabella riguardante le portate storiche massime al colmo alle sezioni di misura (Tabella 5.1), e la tabella delle portate di progetto per i tempi di ritorno di 20, 100, 200 e 500 anni (tabella 5.2).

Tabella 6.1: Portate storiche massime al colmo.

Stazione	Bacino	Portata massima al colmo (m ³ /s)				Anni di osservazione
		Piene storiche				
	km ²	2000	1994	1968	1951	
ISOLA SANT'ANTONIO	25.320	10.500	10.500			
BECCA	37.770		11.500	9.060	11.250	1948-71
SPESSA		11.200				
PIACENZA	42.030	12.240**	11.055	9.500	12.800	1924-95
CREMONA	50.726	11.850	11.300	10.600		1972-95
CASALMAGGIORE	53.460					
BORETTO	55.183	11.900	10.400	8.700	12.100	1942-95
BORGOFORTE	62.450	11.800	11.000	7.940	11.800	1924-95
PONTELAGOSCURO	70.091	9.750	8.750	7.900	10.300*	1918-95

* Il valore del colmo a Pontelagoscuro, ricostruito per tenere conto della rotta di Occhiobello, è di 11.580 m³/s

** Il valore del colmo di Piacenza è stato desunto dalla scala di deflusso resa disponibile dagli uffici dello sbarramento Enel di Isola Serafini

Tabella 6.2: Portate di piena per il Po nel tratto da Isola Sant'Antonio (confluenza Tanaro) al Delta (incile Po di Goro).

Bacino	Corso d'acqua	Progr. (Km)	Sezione Cod.	Denomin.	Superficie (km ²)	Q20 (m ³ /s)	Q100 (m ³ /s)	Q200 (m ³ /s)	Q500 (m ³ /s)	Idrometro (denomin.)
Asta Po	Po	264.855	82	Becca	36770	9290	12190	13600	15050	Po a Becca
Asta Po	Po	322.250	67	Piacenza	42030	8970	11550	13000	14100	Po a Piacenza
Asta Po	Po	367.640	57	Cremona	50726	10090	13000	14300	15870	Po a Cremona
Asta Po	Po	428.545	41	Boretto	55183	9380	12060	13700	14720	Po a Boretto
Asta Po	Po	457.560	36	Borgoforte	62450	9600	12260	13100	14890	Po a Borgoforte
Asta Po	Po	548.805	10	Pontelagoscuro	70091	9470	12070	13000	14650	Po a Pontelagoscuro

In particolare l'analisi statistica per la stima delle portate di cui alla precedente tabella, è stata effettuata utilizzando la legge di Gumbel che, da un confronto su tutte le serie analizzate, è risultata essere quella che fornisce il migliore riscontro con i test statistici di adattamento.

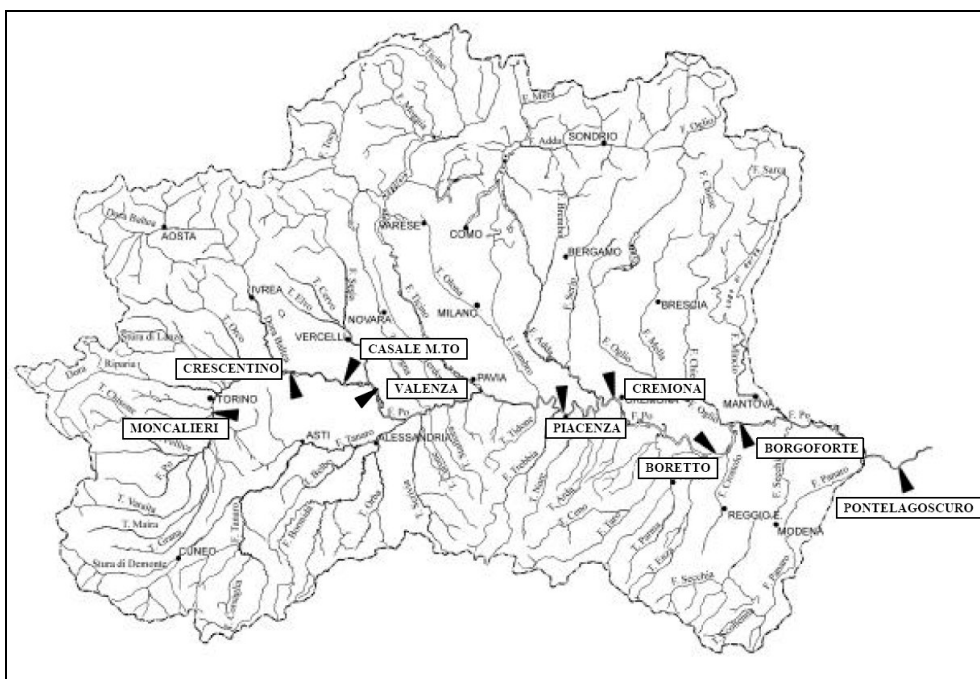
Il calcolo statistico risente ovviamente della disuniformità della lunghezza delle serie storiche e del fatto che in non tutte le serie sono misurati gli stessi eventi di piena.

Come sopraindicato, nell'ambito del PAI sono state definite solamente le portate al colmo per assegnati tempi di ritorno in alcune sezioni fluviali significative. Tuttavia queste portate

di progetto non danno informazioni sufficientemente esaustive sull'intero evento di piena, che è invece ovviamente sintetizzabile con l'intero idrogramma. Per completare tale quadro conoscitivo nel 2002 è stato affidato al DIAR del Politecnico di Milano (ST1.11) il compito di mettere a punto una metodologia che consentisse di ricavare idrogrammi di progetto di assegnato tempo di ritorno, il che comporta, oltre alla stima di portate al colmo di progetto, la stima dei volumi di piena e della forma dell'idrogramma stesso. Il progetto di ricerca ha raggiunto gli obiettivi prefissati, definendo idrogrammi sintetici per i diversi tempi di ritorno presi in considerazione. Di seguito si riporta una breve sintesi di tale metodologia.

Per la definizione di un'onda di progetto in una sezione fluviale a partire dall'analisi dei dati idrometrici è necessario acquisire le registrazioni relative alle onde di piena più rilevanti per portata al colmo e volume in assegnata durata verificatesi storicamente in quella sezione. Nel caso dell'asta del Po, le stazioni idrometrografiche funzionanti nell'ultimo cinquantennio e utilizzate nello studio sono quelle mostrate in Figura 6.1.

Figura 6.1: Stazioni idrometriche utilizzate nello studio del Politecnico di Milano.



Considerato un generico idrogramma di piena, al fine di estrarre le informazioni utili a definire un idrogramma di progetto è possibile procedere in due modi:

- a. fissare una serie di valori di portate di soglia e analizzare i volumi al di sopra di quelle portate;
- b. fissare una serie di valori di durata e analizzare, mediante un'analisi a finestra mobile, il valore massimo del volume (o della portata media) compreso in dette durate.

Una prima difficoltà connessa con il metodo a) consiste nella progressiva diminuzione della numerosità dei campioni di dati disponibili al crescere dei valori di portata di soglia considerati. Tale aspetto è tanto più limitante quanto maggiore è il tempo di ritorno di riferimento. Con il tempo di ritorno cresce infatti la differenza tra il valore della portata al colmo dell'onda sintetica ed il valore massimo della portata di soglia ammissibile, in relazione al mantenimento di una sufficiente numerosità del campione dei volumi di piena.

Una seconda difficoltà consiste nel fatto che occorre definire un qualche criterio per analizzare le piene in cui è presente più di un picco. In questi casi l'onda di piena può intersecare il valore della portata di soglia più di due volte (come invece avviene per le piene monopicco) e non è univoco come ci si debba comportare in questi casi. Nei periodi intermedi in cui la portata scende al di sotto della soglia occorrerebbe infatti tenere conto di un parziale svuotamento delle capacità di invaso presenti nel tronco fluviale in esame.

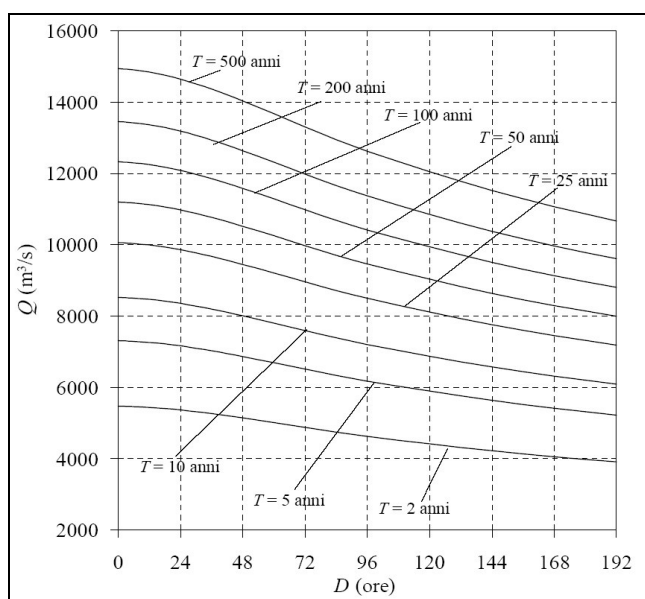
Il secondo tipo di approccio si basa sull'elaborazione statistica delle massime portate medie in assegnata durata D dove il massimo è calcolato rispetto a tutte le possibili finestre temporali $(t-D, t)$ di ampiezza D contenute nel generico idrogramma di piena. Tale metodologia non è soggetta alle limitazioni sopra evidenziate relativamente all'approccio a). Infatti la finestra temporale di riferimento è compatta, sicché non vi è alcuna necessità di introdurre ipotesi circa il comportamento idraulico del sistema da analizzare. Inoltre il numero di dati disponibili per l'analisi non decresce con l'aumentare dei valori di portata considerati, ossia con il diminuire della finestra temporale.

Quindi per ciascun idrogramma di piena è stato calcolato il valore massimo assunto dalla portata media per n durate prefissate, ottenendo n serie di portate composte ciascuna da un numero di dati pari al numero di eventi.

Per le elaborazioni sulle onde di piena si considerano diverse durate D ; la scelta di tali finestre temporali deve essere fatta in base ad un'analisi preliminare della durata della porzione più significativa degli idrogrammi di piena registrati, che nel caso del fiume Po è maggior parte dei casi di 10 giorni.

Lo scopo delle elaborazioni statistiche è la determinazione della legge che esprime l'equazione della curva di riduzione dei colmi di piena, dalla quale verranno ricavati gli idrogrammi di riferimento in corrispondenza dei tempi di ritorno di interesse. Tale curva – analoga alla curva IDF (Intensità-Durata-Frequenza) per le precipitazioni – rappresenta la relazione che lega la portata media di una certa finestra temporale D alla corrispondente durata D , fissato il generico valore del tempo di ritorno T . Alcuni esempi di curve di riduzione dei colmi di piena per differenti tempi di ritorno sono riportati in Figura 6.2, relativamente alla stazione di Cremona.

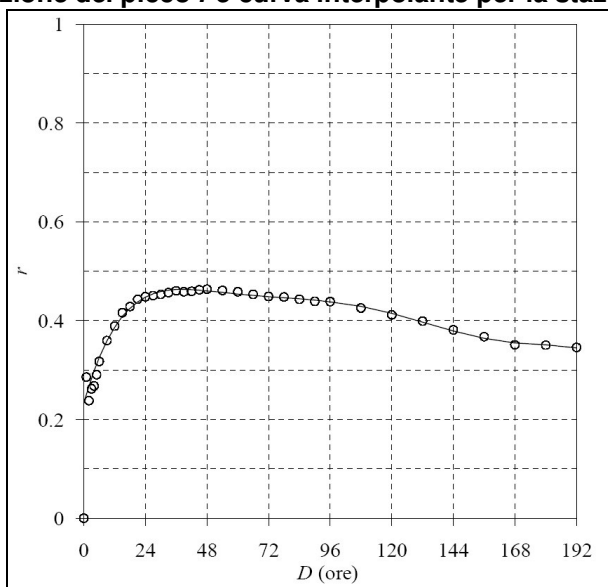
Figura 6.2: Curve di riduzione dei colmi di piena per diversi tempi di ritorno per la stazione di Cremona.



Per ricostruire la forma dell'onda di piena è necessario ricavare dagli idrogrammi di piena storici l'informazione sulla posizione r che la portata al colmo assume all'interno della finestra temporale che contiene il valore massimo delle portate medie di assegnata durata.

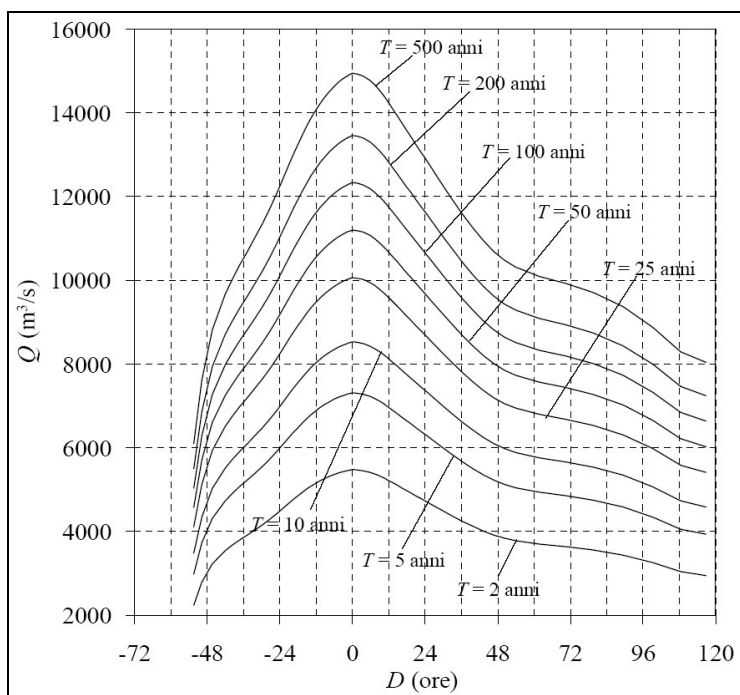
Il valore della posizione del picco r , definito come il rapporto tra la finestra temporale che precede il picco e l'intera durata considerata, può variare tra 0 e 1. In particolare assume il valore 0 se il picco cade all'inizio della finestra temporale considerata mentre assume valore 1 se il picco cade alla fine della finestra temporale. In Figura 6.3, sempre relativamente alla stazione di Cremona, è riportato un esempio di curva interpolante i valori sperimentali di r .

Figura 6.3: Posizione del picco r e curva interpolante per la stazione di Cremona.



Ottenuta la curva di riduzione dei colmi di piena e la posizione del picco r , la costruzione dell'idrogramma sintetico si effettua imponendo che la massima portata media in ciascuna durata coincida con quella prevista dalla curva di riduzione; mentre la forma dell'idrogramma è determinata dal coefficiente esprime la posizione del picco r . In Figura 6.4 sono riportate a titolo di esempio gli idrogrammi sintetici così ottenuti per la stazione di Cremona.

Figura 6.4: Onde di piena sintetiche per la stazione di Cremona.



Il valore di portata al colmo delle singole onde di piena è sintetizzato in Tabella 5.3; tali valori differiscono parzialmente da quelli stimati nel PAI e riportati in Tabella 5.2, sia a causa della diversa metodologia di regolarizzazione delle serie storiche che a causa della differente estensione temporale delle serie medesime.

Tabella 6.3. Quantili della portata al colmo degli idrogrammi sintetici (m3/s).

Stazione	2 anni	5 anni	10 anni	25 anni	50 anni	100 anni	200 anni	500 anni
Meirano-Moncalieri	779	1206	1490	1848	2113	2377	2639	2986
Crescentino	2655	4357	5484	6908	7965	9013	10058	11436
CasaleMonferrato	2011	3184	3960	4940	5668	6390	7109	8058
Piacenza	4664	6290	7366	8725	9734	10735	11733	13049
Cremona	5475	7310	8525	10061	11199	12330	13456	14942
Boretto	5449	7397	8687	10316	11525	12725	13920	15498
Borgoforte	5527	7352	8560	10087	11219	12344	13464	14941
Pontelagoscuro	5653	7149	8140	9392	10321	11243	12162	13374

Inoltre, in un recente lavoro del Prof. Ing. Ugo Maione e del Prof. Massimo Tomirotti, "A Trans-national Regional Frequency Analysis of Peak Flood Flows" pubblicato su *L'Acqua* nel 2004, si sono definiti alcuni importanti concetti che si inseriscono nelle tematiche dell'analisi delle portate storiche e della conseguente definizione delle portate di progetto. In tale studio è stata infatti quantificata la soglia di imprevedibilità degli eventi di piena, utile a distinguere un evento di piena eccezionale da uno assolutamente imprevedibile, vale dire caratterizzato da un'intensità al di fuori di ogni esperienza storica, con riferimento ad un arco temporale molto ampio (dell'ordine dei secoli) ed, appunto, ad aree altrettanto vaste (milioni di Km², se ci si riferisce alle aree geografiche considerate nel lavoro sopra citato). È evidente l'importanza di tali concetti in un'ottica di attribuzione delle responsabilità, in quanto i danni provocati da un evento assolutamente imprevedibile, proprio in virtù della sua definizione, non dovrebbero essere addebitati a qualsivoglia soggetto. Al contrario, ad eventi eccezionali ma non imprevedibili - dei quali, cioè, pur avendo bassissima probabilità di accadimento, se ne deve prevedere in futuro la possibilità del verificarsi in quanto di intensità confrontabile con quelle di eventi osservati in passato - responsabilità potrebbero essere ricercate nella errata individuazione, in sede di progettazione e/o pianificazione delle opere di difesa idraulica, dell'evento di riferimento con riguardo sia alla rarità che ai valori delle grandezze assunte a caratterizzarlo (portata al colmo, volume).

Particolarmente complessa è la definizione della imprevedibilità degli eventi di piena. Non appare infatti opportuno definire la soglia che divide un fenomeno eccezionale da uno imprevedibile semplicemente sulla base di un tempo di ritorno (seppur molto alto) fissato a priori, in quanto innanzitutto sarebbe difficile stabilire criteri per fissarlo, ed inoltre la stima della corrispondente portata necessiterebbe di una forte estrapolazione, pratica che contiene sempre elementi di elevata incertezza. L'imprevedibilità dovrebbe invece essere definita come il limite estremo superiore del campo di interpolazione, limite da ricavare a posteriori attraverso l'analisi dei dati storici disponibili. Naturalmente questi dati debbono comprendere tutta l'informazione che, nello spazio e nel tempo, si può ritenere significativa. Per trattare un tale insieme di dati occorre necessariamente fare ricorso all'analisi regionale. La procedura proposta nello studio si basa su una analisi regionale applicata alle serie storiche delle portate al colmo massime annue relative a più di 7000 stazioni idrometrografiche appartenenti a diverse aree geografiche (principalmente Italia, Svizzera, Gran Bretagna e America del Nord) e caratterizzate da almeno 20 anni di informazione. Avendo introdotto la variabile normalizzata $Y=(Q-\mu)/(\sigma CV^{0.33})$ - dove μ , σ e CV indicano media, scarto quadratico medio e coefficiente di variazione della portata al

colmo Q – e avendo mostrato che la distribuzione di probabilità di tale variabile può essere ritenuta con buona approssimazione invariante da sito a sito, si sono accorpati i valori massimi delle serie storiche normalizzate. La soglia di imprevedibilità viene in seguito assunta pari al limite superiore dell'intervallo di valori della variabile Y per i quali l'interpolazione dei valori massimi osservati in un diagramma probabilistico appare credibile; tale valore adimensionale, pari a 7 e corrispondente ad un tempo di ritorno di 4000 anni, risulta dunque valido all'interno delle vaste aree considerate e in particolare, sull'intero territorio nazionale. In Tabella 6.4 sono riportati, per alcune sezioni del fiume Po, i valori della portata al limite della prevedibilità (portata di soglia Q_s) elaborati secondo il procedimento descritto e confrontati con i valori massimi registrati per la portata al colmo (Q_{colmo}).

Tabella 6.4. Valori massimi registrati per la portata al colmo (Q_{colmo}) e valori calcolati per la portata di soglia (Q_s).

Stazione	Superficie (km ²)	Q_{colmo} (m ³ /s)	Q_s (m ³ /s)
Meirano	4885	2058	4241
Crescentino	13090	8188	9858
Casale	13940	6416	10339
Piacenza	42030	12850	17628
Cremona	50726	12340	17295
Boretto	55183	12215	16809
Borgoforte	62700	11860	15622
Pontelagoscuro	70091	10300	14139

I valori derivanti dall'applicazione del criterio possono essere presi a riferimento nella progettazione delle opere di difesa idraulica in situazioni di rischio particolarmente elevato, allorché può essere ritenuto ammissibile prescindere da qualsiasi considerazione in ordine alla probabilità di accadimento degli eventi di piena, così come nella valutazione del rischio residuale.

7. La vulnerabilità delle arginature in relazione a fenomeni di tracimazione

7.1. Il profilo di piena osservato nell'evento dell'ottobre 2000

Come già anticipato precedentemente nel documento, alle stazioni idrometriche principali dell'asta del fiume Po sono disponibili le registrazioni dei livelli idrici in occasione degli eventi di piena più significativi.

Nella tabella che segue (Tabella 7.1) sono riportati i livelli di piena dell'ottobre 2000 e delle piene del 1951 e del 1994, così come raccolti nell'aggiornamento del catasto delle arginature maestre di Po (ST.1.2).

Il confronto fra tali livelli e le ore di registrazione del colmo consente, oltre che di evidenziare i valori idrometrici massimi raggiunti (in rosso), di confrontare i tempi e le velocità di propagazione del colmo.

Tabella 7.1: Dati relativi alle piene del 1951, 1994 e 2000 (ST.1.2).

Idrometro di	quota dello ZERO idrometrico s.l.m.m.	livello di GUARDIA	PIENA NOV. 1951	PIENA NOV. 1994	PIENA OTT. 2000	colmo piena ott. 2000	distanze parziali Km.	Propag. colmo ott. 2000 ore	quota s.l.m.m pelo acqua al colmo	velocità propagazione colmo Km/h	dislivello in mt. con il colmo dell'idr. precedente	Pend. in m x 1000 colmo
PONTE VALENZA	84,65	3,50	6,74	5,90	5,56	ore 12 del 16/10			90,21			
PONTE BECCA	55,10	4,50	7,85	7,60	7,81	ore 6 del 17/10	53	18 (12)	62,98	2,94 (4.42)	27,23	0,51
PIACENZA	42,16	6,00	10,25	9,88	10,50	ore 16 del 17/10	60	11 (8)	52,66	5,45 (7.50)	10,32	0,17
CREMONA	34,34	4,00	5,96	5,94	6,15	ore 2 del 18/10	49	9 (7)	40,49	5,44 (7.00)	12,17	0,25
CASALMAGGIORE	23,49	4,60	7,64	7,64	8,01	ore 1 del 19/10	47	23 (15)	31,50	2,04 (3.13)	8,99	0,19
BORETTO	19,95	5,50	8,59	8,43	9,06	ore 8 del 19/10	15	7 (4)	29,01	2,14 (3.75)	2,49	0,17
BORGOFORTE	14,70	6,00	9,96	9,28	9,93	ore 11 del 19/10	33	3 (6)	24,63	11,00 (5.50)	4,38	0,13
REVERE	9,58	6,00	11,02 (ric.)	8,94	9,38	ore 3 del 20/10	39	16	18,96	2,44	5,67	0,15
PONTELAGOSCURO	8,18	1,00	4,28	3,04	3,66	ore 7 del 20/10	47	4	11,84	11,75	7,12	0,15
POLESELLA	1,23	6,50	12,60 (ric)	8,51	9,14	ore 8 del 20/10	16	1	10,37	16,00	1,47	0,09

Nelle colonne relative alla propagazione del colmo ed alla sua velocità i numeri tra parentesi rappresentano i tempi medi e le velocità medie osservati nel corso delle piene di maggiore frequenza.

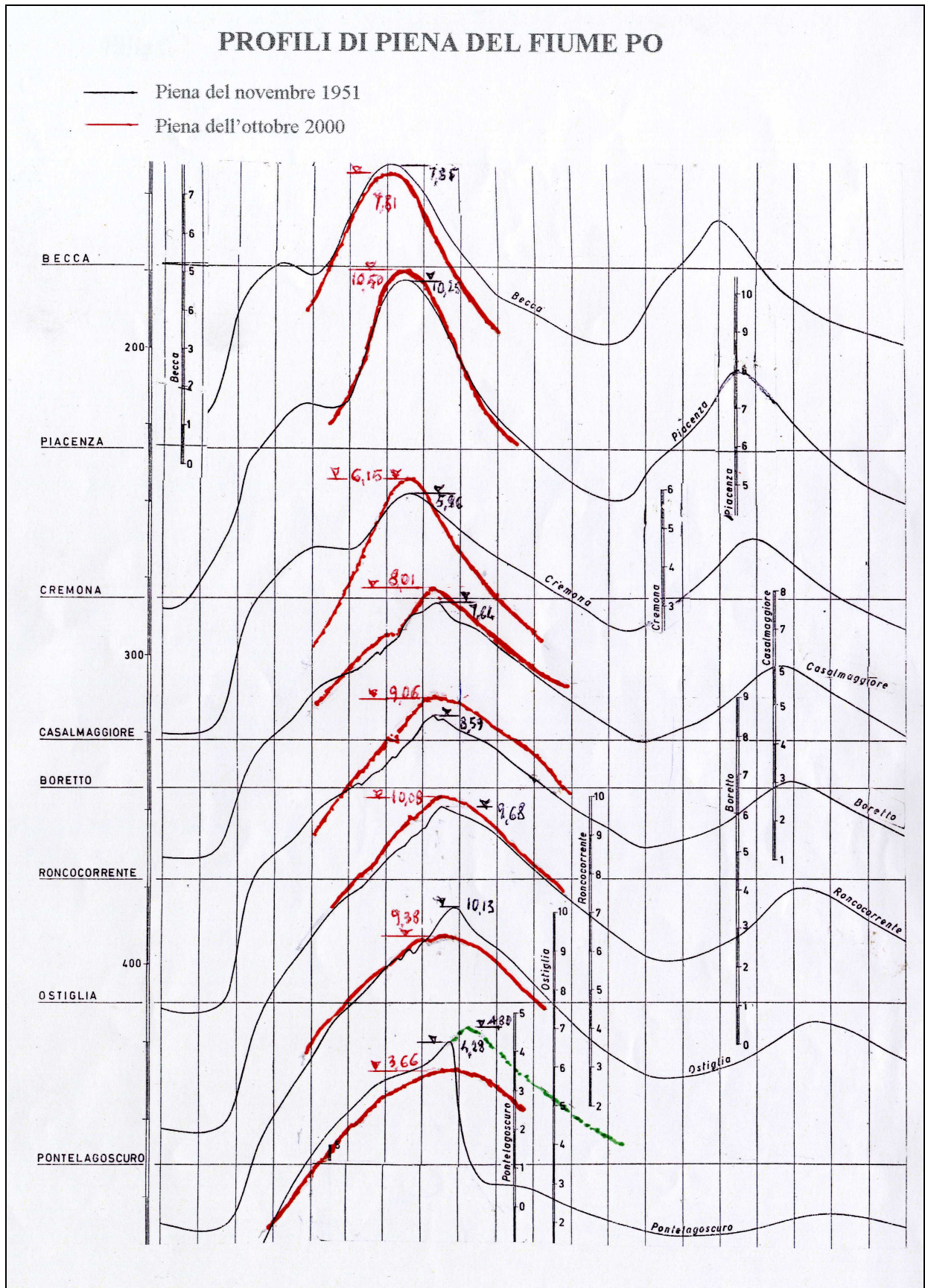
La piena dell'ottobre 2000 è stata caratterizzata sì dai livelli massimi raggiunti ma, in modo particolare, dalla durata del colmo, elementi compatibili con i rilevanti valori delle precipitazioni registrate nei bacini dell'alto Po, specialmente in quelli della Dora Baltea, del Sesia, del Tanaro, del Ticino e dell'Adda.

La velocità di propagazione del colmo nel tratto compreso tra Ponte Valenza e Boretto è risultata significativamente ridotta rispetto alla velocità media osservata nel corso delle piene di maggiore frequenza; la riduzione varia dal 22% al 47% mentre non possono essere confrontate le velocità registrate a valle di Boretto in quanto l'invaso delle golene ha determinato la quasi contemporaneità del colmo agli idrometri di Revere, Pontelagoscuro e Polesella.

Si può concludere che l'evento di piena dell'ottobre 2000 è stato superiore a quello del 1951 per il tratto fino a Borgoforte mentre è risultato inferiore nel tratto a valle, come è ben evidente anche dall'esame della figura 7.1 (profili di piena del 1951 e del 2000), predisposta dall'Ing. Gian Carlo Cerutti. Tale differenza fra le due piene può essere addebitata al mancato apporto degli affluenti appenninici emiliani durante l'evento del 2000, all'effetto di laminazione addebitabile al rigurgito del Po all'interno degli affluenti medesimi e alle favorevoli condizioni di deflusso in mare

Oltre alle informazioni idrometriche presso le stazioni strumentate, l'attività già sopra citata ha consentito per l'evento del 2000 di raccogliere ed organizzare per l'intero sviluppo delle arginature maestre dell'asta medio inferiore del Po, tutte le informazioni disponibili presso i singoli uffici operativi dell'AIPO in relazione alla picchettatura della piena effettuata in coda di piena (vedasi Figura 5.5).

Figura 7.1: Profili di piena del 1951 e del 2000



7.2. I profili di piena simulati

Nelle condizioni attuali il sistema arginale di Po è riferito a un profilo di piena teorico (denominato “piena massima di riferimento”) costruito nell’ambito dello “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”, 1982, redatto dal Magistrato per il Po, per mezzo della società SIMPO. La piena SIMPO ‘82 è costituita da un profilo ricavato dall’applicazione di un modello numerico di simulazione idraulica (in moto non stazionario), in cui per diversi tronchi fluviali è applicata un’onda di piena con portata al colmo mediamente superiore del 10% rispetto alla massima storica del ‘51.

Successivamente, nell’ambito del Piano Stralcio per l’Assetto Idrogeologico (PAI), è stato aggiornato il profilo di piena SIMPO ‘82 mediante una modellazione numerica monodimensionale in moto vario tarata sull’evento del 1994 e utilizzante come input idrologico la stessa piena del 1994 in ingresso alla confluenza Tanaro – Po a cui è stato sommato il contributo degli affluenti emiliani del 1951 (scenario “94+51”).

Il nuovo profilo di piena, che risulta in alcune sezioni significativamente superiore al precedente, è contenuto nella Direttiva del PAI “Piena di Progetto” (consultabile dal sito www.adbpo.it).

Come previsto dalla Direttiva del Magistrato per il Po del 1998 (citata al precedente capitolo 5), seppure per un criterio di omogeneità i rialzi arginali eseguiti in seguito dell’evento del 1994 sono stati realizzati garantendo il franco previsto sul profilo SIMPO ‘82, in corrispondenza dei centri abitati la stessa direttiva evidenziava l’opportunità di adeguare la quota rispetto al profilo PAI “94+51”, garantendo un franco minimo di 50cm.

Nel 2003, l’Autorità di bacino con il supporto tecnico di Italcopo (ST1.19), ha aggiornato la modellazione della piena impiegando la nuova geometria derivante dai rilievi topografici dell’AIPO del 2000 ed utilizzando come nuova taratura l’evento osservato del 2000. Il nuovo modello aggiornato in geometria e taratura, è stato utilizzato per simulare diversi scenari idrologici di piena: 94+51, 2000+51, idrogrammi sintetici.

Le risultanze delle simulazioni consentono un ulteriore affinamento dei profili di piena contenuti nel PAI.

Nell’ambito dell’attività di aggiornamento del catasto delle arginature maestre (ST1.2) è stato effettuato un confronto fra le attuali quote arginali, i due profili PAI e SIMPO e il profilo picchettato durante l’evento del 2000. Si riporta a titolo di esempio la tabella di sintesi contenuta nel citato Studio ST1.2 che evidenzia i franchi arginali sopraccitati.

Tabella 7.2a: Tabella di riepilogo dati.

ARGINATURA SINISTRA											ARGINATURA DESTRA											
franco piena simpo82	franco piena Tr=200	franco piena 2000	n. sezione	foto	note	somm. arg. rilievo 1959	quota arg. Sin	livello piena ott. 2000	livello piena Tr=200 anni	località	distanze progressive alveo	località	livello piena simpo82	livello piena ott. 2000	quota arg. Dex	somm. arg. rilievo 1959	foto	note	n. sezione	franco piena 2000	franco piena Tr=200	franco piena simpo82
0.94	0.77	3.28	61A			17.52	17.52	14.24	16.75		546418.00	Foss FANARO	16.58	14.28	17.91	17.85			61A	3.63	1.16	1.33
1.15	0.95	3.47	61			17.89	17.89	14.42	16.94		544827.00	Cavale PISTRETTI	16.74	14.42	17.97	18.15			61	3.55	1.03	1.23
0.81	0.61	3.07	60A			17.56	17.56	14.49	16.95	PONTE	544189.00	PONTE STELLATA	16.75	14.49	18.24	18.28		50Ade.doc	60A	3.75	1.29	1.49
0.99	0.79	3.20	60			17.76	17.76	14.56	16.97	FIGAROLO	543542.00	QUATTRELLE	16.77	14.60	17.99	17.99			60	3.39	1.02	1.22
1.18	0.97	3.11	59D			18.09	18.09	14.98	17.12	ZUCCHERIFICIO	542164.00		16.91	14.99	17.64	17.64			59D	2.65	0.52	0.73
0.91	0.70	2.87	59C			18.00	18.00	15.13	17.30		540707.00		17.09	15.13	17.91	18.11			59C	2.78	0.61	0.82
1.00	0.78	2.97	59B			18.25	18.25	15.28	17.47	LA CAMPAGNINA	539181.00		17.25	15.28	18.12	18.16			59B	2.84	0.65	0.87
0.92	0.68	2.90	59A			18.30	18.30	15.40	17.62		537841.00	Cavale Mazzone	17.38	15.38	18.68	18.68			59A	3.30	1.06	1.30
0.99	0.75	2.99	59			18.48	18.48	15.49	17.73	CAMPAGNOLA	537004.00		17.49	15.45	18.96	18.96			59	3.51	1.23	1.47
0.87	0.62	2.88	58A			18.48	18.48	15.60	17.86	CALTO	535897.00	FELOMCA	17.61	15.60	18.93	18.93		58Ade.doc	58A	3.33	1.07	1.32
0.76	0.51	2.79	58			18.49	18.49	15.70	17.98	CARLINI	534868.00	SABBIONI	17.73	15.66	19.00	19.00			58	3.34	1.02	1.27
0.69	0.45	2.80	57B			18.60	18.64	15.84	18.19	BOGOD TROLLI	533420.00		17.95	15.86	19.27	19.20			57B	3.41	1.08	1.32
0.51	0.27	2.68	57A			18.59	18.64	15.96	18.37		532234.00		18.13	15.96	19.15	19.46			57A	3.19	0.78	1.02
0.94	0.70	3.18	57			19.32	19.32	16.14	18.62	GASTELMASSA	530482.00	SERMEDE	18.38	16.14	19.52	19.88			57	3.38	0.90	1.14
0.49	0.27	2.59	56D			19.00	19.00	16.41	18.73	PONTE	529208.00	PONTE	18.51	16.40	19.48	19.74			56D	3.08	0.75	0.97
0.71	0.53	2.77	56C			19.38	19.38	16.61	18.85	SABBIONI	527865.00	Meila	18.67	16.58	19.50	19.61			56C	2.92	0.65	0.83
0.69	0.52	2.82	56B			19.42	19.42	16.60	18.90		527075.00	San. Empronta S. Maria Rossone	18.73	16.68	19.63	19.71			56B	2.95	0.73	0.90
0.65	0.53	2.69	56A			19.60	19.60	16.91	19.07	BARIANO	525077.00	CARBONAROLA	18.95	16.93	19.88	19.79			56A	2.95	0.81	0.93
1.06	0.98	3.02	56			20.28	20.24	17.22	19.26	YALLONA	523127.00		19.18	17.24	20.45	20.93			56	3.21	1.19	1.27
0.91	0.86	2.86	55B			20.18	20.18	17.32	19.32		522642.00		19.27	17.24	20.45	20.45			55B	3.21	1.13	1.18
0.73	0.76	2.61	55A			20.19	20.19	17.58	19.43	BERGANTINO	521787.00	COLOMBARO	19.46	17.52	19.89	19.89		55Ade.doc	55A	2.37	0.46	0.43
0.55	0.73	2.59	55			20.40	20.40	17.81	19.67		519926.00	CARBONARA DI PO	19.85	17.74	20.12	19.78			55	2.38	0.45	0.27
0.67	0.78	2.70	54A			20.63	20.63	17.93	19.85		518626.00		19.96	17.91	21.07	20.03			54A	3.16	1.22	1.11
0.96	0.96	2.83	54			21.12	21.12	18.29	20.16	MELARA	516355.00	BORGOFRANCO PO	20.16	18.01	21.20	20.27			54	3.19	1.04	1.04
0.71	0.47	2.44	53D			21.09	21.09	18.65	20.62	POLESINE	514238.00	BONIZZO	20.38	18.32	21.38	20.63			53D	3.06	0.76	1.00
0.54	0.18	2.31	53C			21.04	21.04	18.73	20.86		513097.00		20.50	18.70	21.64	22.20			53C	2.94	0.78	1.14
0.70	0.18	2.50	53B			21.35	21.35	18.85	21.17		511685.00		20.65	18.82	21.90	21.86			53B	3.08	0.73	1.25
0.66	0.00	2.52	53A			21.45	21.45	18.93	21.45	PONTE ST. 12	510234.00	PONTE ST. 12	20.79	18.94	21.95	21.93		53Ade.doc	53A	3.01	0.50	1.16
0.28	-0.41	2.16	53			21.12	21.12	18.96	21.53		510140.00	REVERE	20.84	18.96	21.99	22.01			53	3.03	0.46	1.15
1.42	0.58	3.43	52			21.99	22.45	19.02	21.87	OSTIGLIA	508855.00		21.03	19.06	21.00	21.00		T argine di frontiera di Revere	52	1.94	-0.87	-0.03
0.85	0.02	2.91	51	Sisin.doc		22.01	22.01	19.10	21.99		508855.00		21.16	19.16	20.87	20.87			51	1.71	-1.12	-0.28
0.67	-0.16	2.85	50			22.03	22.03	19.18	22.19	BUGNO S. ROMANO	509499.00	REVERE	21.36	19.08	20.83	20.83			50	1.75	-1.36	-0.53
0.43	-0.35	2.57	49B			21.88	21.88	19.31	22.23	SERRAVALLE PO	507270.00		21.45	19.34	22.07	21.90			49B	2.73	-0.16	0.62
0.80	0.06	2.76	49A			22.34	22.34	19.58	22.28	CASALLE	506097.00	LOGHINO BEOZZI	21.54	19.53	22.16	21.99			49A	2.63	-0.12	0.62
0.64	-0.06	2.52	49			22.26	22.26	19.74	22.32		504999.00	GERBASONA	21.62	19.72	22.14	22.14			49	2.42	-0.18	0.52
0.82	0.12	2.59	48D			22.49	22.49	19.90	22.37	GROLETTA	503867.00		21.67	19.93	22.24	22.24			48D	2.31	-0.13	0.57

Tabella 7.2b: Tabella di riepilogo dati (Legenda).

SIMBOLI DELLE CRITICITA' PER SORMONTO		SIMBOLI DEL PROFILO DI PIENA	
	franco minore di m. 0,30		profilo piena OTT. 2000 rilevato
	franco compreso tra m. 0,30 e 0,70		profilo piena OTT. 2000 ricostruito
	franco compreso tra m. 0,70 e 1,00		piena OTT. 2000 - colmo rilevato all'idrometro
	franco maggiore di m. 1,00		(rif. Piena simpo 82 e Tr=200 anni) quote ricavate per interpolazione

8. Le golene: i processi di laminazione delle piene e la sicurezza degli insediamenti golenali

Il tratto medio inferiore del fiume Po è caratterizzato dalla presenza di importanti aree golenali di espansione delle piene. Il tratto di asta del Po da foce Ticino a foce Adda in particolare è caratterizzato prevalentemente dalla presenza di golene aperte, il restante tratto fino a Pontelagoscuro da golene chiuse, che per estensione sono più rilevanti nel tratto cremonese, parmense e mantovano del corso d'acqua.

La caratterizzazione di insieme e ubicazione delle golene chiuse presenti lungo l'asta del Po è riportata in Tabella 8.1.

Tabella 8.1: Caratteristiche dimensionali delle golene presenti nel tratto da foce Ticino al Delta.

N.	Tronco	Località	Superficie.	Volume invasabile max	Superficie progressiva	Volume invasabile max progressivo	Volume relativo	Volume relativo progressivo
			ha	10 ³ m ³	ha	10 ³ m ³	10 ³ m ³ /km	10 ³ m ³ /km
	Becca					0	0	0
50	Trebbia - Ticino	valle di foce Ticino	76	1.672	76	1.672		
49	Trebbia - Ticino	monte di Pieve Porto Morone	30	990	106	2.662		
48	Trebbia - Ticino	monte di foce Tidone	49	1.421	155	3.083		
47	Trebbia - Ticino	valle di foce Lambro	57	1.767	212	4.850		
46	Trebbia - Ticino	monte di S. Rocco al Porto	340	14.654	552	19.504		
	Piacenza	Totale cumulato			552	19.504	340	340
45	Adda - Trebbia	valle di Piacenza	413	26.133	413	26.133		
44	Taro - Adda	monte di Cremona	138	2.475	551	28.608		
	Cremona	Totale cumulato			1.103	48.112	630	468
43	Taro - Adda	valle di Cremona	98	3.920	98	3.920		
42	Taro - Adda	valle di Cremona	30	750	128	4.670		
41	Taro - Adda	monte di Brancere	128	3.623	256	8.293		
40	Taro - Adda	monte di foce Ongina	109	3.270	365	11.563		
39	Taro - Adda	Brancere (interna alla 38)	137	2.419	502	13.982		
38	Taro - Adda	tra Brancere e S. Daniele Ripa Po	2.116	56.233	2.618	70.215		
37	Taro - Adda	monte di Roccabianca	880	29.512	3.498	99.727		
36	Taro - Adda	Motta Baluffi	962	29.845	4.460	129.572		
35	Taro - Adda	Motta Baluffi (interna alla 36)	58	1.218	4.518	130.790		
34	Taro - Adda	Motta Baluffi (interna alla 36)	31	930	4.549	131.720		
33	Parma - Taro	monte di Casalmaggiore (interna alla 32)	40	800	4.589	132.520		
32	Parma - Taro	monte di Casalmaggiore	1.653	51.213	6.242	183.733		
	Casalmaggiore	Totale cumulato			7.345	231.845	3.914	1.548
31	Parma - Taro	monte di foce Parma	497	15.691	497	15.691		
30	Oglio - Parma	valle di foce Parma	443	12.347	940	28.038		
	Boretto	Totale cumulato			8.285	259.883	1.487	1.542
29	Oglio - Parma	golena di Viadana	366	11.431	366	11.431		
28	Oglio - Parma	foce Crostolo (interna alla 27)	74	1.406	440	12.837		
27	Oglio - Parma	monte di foce Corostolo (Gualtieri)	439	14.203	879	27.040		
26	Oglio - Parma	valle di Guastalla (interna alla 25)	51	1.581	930	28.621		
25	Oglio - Parma	golena di Guastalla	528	18.648	1.458	47.269		
24	Oglio - Parma	valle di Luzzara	125	5.250	1.583	47.794		
23	Oglio - Parma	valle di Luzzara	233	10.326	1.816	58.120		
22	Oglio - Parma	monte di foce Oglio	122	5.246	1.938	63.366		
21	Oglio - Parma	foce Oglio	345	16.213	2.283	79.579		
20	Mincio-Oglio	valle di Scorzarolo	36	1.008	2.319	80.587		
	Borgoforte	Totale cumulato			10.604	340.470	2.996	1.742
19	Mincio-Oglio	valle di Borgoforte	82	1.968	82	1.968		
18	Mincio-Oglio	monte di S. Nicolò a Po	83	3.237	165	5.205		
17	Mincio-Oglio	valle di Portiolo (interna alla 16)	37	925	202	6.130		
16	Mincio-Oglio	golena di S. Benedetto Po	618	34.018	820	40.148		

N.	Tronco	Località	Superficie.	Volume invasabile max	Superficie progressiva	Volume invasabile max progressivo	Volume relativo	Volume relativo progressivo
			ha	10 ³ m ³	ha	10 ³ m ³	10 ³ m ³ /km	10 ³ m ³ /km
15	Mincio-Oglio	valle di S. Giacomo di Po	230	9.220	1.050	41.070		
14	Mincio-Oglio	foce Mincio	99	4.059	1.149	45.129		
13	Panaro - Mincio	foce Mincio, valle di Mirasole	65	2.665	1.214	47.794		
12	Panaro - Mincio	golena di Sustinente	542	22.004	1.756	69.798		
11	Panaro - Mincio	tra Ostiglia e Melara	240	8.262	1.996	78.060		
10	Panaro - Mincio	monte di Carbonara Po	140	5.593	2.136	83.653		
9	Panaro - Mincio	Bergantino	50	2.214	2.186	85.867		
8	Panaro - Mincio	Bergantino	53	2.385	2.239	88.252		
7	Panaro - Mincio	monte di Castelmassa	44	2.068	2.283	90.320		
	Sermide	Totale cumulato			12.887	430.790	1.642	1.716
6	Panaro - Mincio	valle di Sermide	121	4.936	121	4.936		
5	Panaro - Mincio	monte di Felonica	56	1.736	177	6.672		
4	Panaro - Mincio	valle di Felonica	74	2.916	251	9.588		
	Ficarolo	Totale cumulato			13.138	440.378	747	1.669
3	Po di Gor -Panaro	monte di Stienta	135	6.070	135	6.070		
	Pontelagoscuro	Totale cumulato			13.273	446.448	303	1572
2	Po di Goro-Panaro	monte di Guardia Veneta	24	864	24	864		
1	Po di Goro-Panaro	monte del Po di Goro	78	3.353	102	4.217		
		Totale cumulato			13.375	450.665		

Complessivamente tra Becca e Pontelagoscuro il volume di invaso disponibile nelle golene chiuse ammonta a circa 500 milioni di m³, a cui corrisponde un invaso equivalente sulla lunghezza dell'asta di circa 1,6 milioni di m³/km; l'incidenza diventa per altro significativa, in termini di volumi invasabili, a partire da Cremona fin circa a Sermide.

La massima concentrazione delle golene chiuse si trova nel tratto tra Cremona e Casalmaggiore (circa 47 km di lunghezza), sia in termini assoluti (circa 184 milioni di m³ di invaso) che per unità di lunghezza dell'alveo (circa 4 milioni di m³/km); significativamente alta è comunque ancora la capacità di invaso nel tratto tra Boretto e Borgoforte (circa 81 milioni di m³ di invaso, pari a 3,0 milioni di m³/km) mentre già sensibilmente minore, seppur ancora significativa, tra Borgoforte e Sermide (circa 90 milioni di m³ di invaso, pari a 1,6 milioni di m³/km) e tra Casalmaggiore e Boretto (circa 28 milioni di m³ di invaso, pari a 1,5 milioni di m³/km).

Con riferimento all'evento del 2000, in Tabella 8.2 sono sintetizzate le superfici ed i volumi di invaso delle principali golene difese con la cronologia dell'inizio dell'invaso, così come raccolte nel corso dell'aggiornamento del catasto delle arginature maestre di Po.

Tabella 8.2: Superfici, volumi di invaso e cronologie di inizio invaso per le principali golene difese.

Sequenza rotta golene		superficie in Ha.	Data e ora inizio invaso	volume in m3 * 1000
San Rocco (a valle PC)	sx	413	15/10/00 20	26.133
San Rocco al Porto	sx	340	15/10/00 20	14.654
Lorenzini Luzzara	dx	125	16/10/00 18	5.250
Cavallara a monte Oglio	sx	265	17/10/00 10	11.395
Viadana	sx	365	17/10/00 12	11.431
Fogarino Luzzara	dx	233	17/10/00 14	10.326
Malaspina Gualtieri	dx	439	17/10/00 14	14.203
Consorzio Tombone PR	dx	950	17/10/00 15	31.859
San Giacomo MN	sx	230	17/10/00 16	9.220
Ghiaie Bonvisi PR	dx	369	17/10/00 17	10.285
Casalmaggiore CR	sx	1653	17/10/00 18	51.213
Sommo con Porto CR	sx	2253	17/10/00 19	59.873
Motta Baluffi CR	sx	962	17/10/00 21	29.845

<i>Sequenza rotta golene</i>		<i>superficie in Ha.</i>	<i>Data e ora inizio invaso</i>	<i>volume in m3 * 1000</i>
Libiola Sustinente MN	sx	345	18/10/00 03	14.006
Consorzio Colorno PR	dx	497	18/10/00 05	15.691
Cinta Bacchi Guastalla RE	dx	528	18/10/00 11	18.648
Po Morto - S.Benedetto MN	dx	727	18/10/00 12	40.018
Tabellano MN	dx	327	18/10/00 15	13.275
Correggio Micheli MN	sx	106	18/10/00 17	4.300
San Sebastiano Ostiglia MN	sx	240	18/10/00 20	8.262
Carbonara Po MN	dx	140	19/10/00 08	5.593
		11507	Totale mc. x 1000	405.480

L'invaso dei maggiori volumi ha avuto inizio tra le ore 10.00 del 17/10/2000 con evidenti effetti di laminazione come emerge dagli idrogrammi di piena:

- Casalmaggiore sensibile calo tra le ore 18 e le 23 del giorno 17 da m. 6.90 a m. 6.75;
- Boretto sensibile calo tra le ore 20 e le 22,30 del giorno 17 da m. 7.56 a m. 7.39;
- Borgoforte stasi del livello dalle ore 20 alle 23 del giorno 17, calo di 5 cm. tra le 22 e le 24 del giorno 18, ulteriore calo di 20 cm. tra le ore 11 e le 14 del giorno 19;
- Pontelagoscuro stasi del livello dalle ore 22 del giorno 17 alle 03 del 18 con ulteriore stasi dalle ore 05 alle ore 10 del giorno 18.

Gli effetti della laminazione sono risultati notevolmente marcati nel tratto a valle di Cremona fino a Revere con una riduzione dei livelli di colmo stimata tra 20 e 30 cm., mentre da Revere a valle si è aggiunta alla laminazione la favorevole condizione delle maree che ha consentito un regolare deflusso della piena in mare.

Le aree golenali, con particolare riguardo a quelle chiuse, pur rappresentando, come sopra descritto, un elemento indispensabile dell'assetto idraulico difensivo dell'asta medio inferiore del Po, sono in alcuni casi interessate dalla presenza di insediamenti, perlopiù agricoli, rispetto ai quali deve essere ricercato e conseguito un livello di rischio compatibile con i fenomeni idraulici di laminazione delle piene principali.

In tal senso l'Autorità di bacino ha avviato nel 2003 una specifica attività denominata SAFE (Sviluppo di un Ambiente Fluviale Ecosostenibile, Allegato 4) finalizzata alla valutazione della vulnerabilità e del rischio idraulico degli elementi antropici presenti all'interno delle fasce fluviali e alla definizione degli interventi non strutturali necessari alla mitigazione dello stesso. Attività preliminare ed indispensabile del SAFE è il censimento puntuale di tutte gli insediamenti presenti e riguardante in particolare le caratteristiche geometriche, strutturali nonché le tipologie d'uso.

Nel caso delle golene di Po ed in particolare per quelle difese da argini golenali la presenza di insediamenti può avere un carattere di compatibilità con i fenomeni di laminazione delle piene alla luce del fatto che i tempi di preannuncio della piena sono tali da consentire l'evacuazione delle persone ed in molti casi anche dei beni principali incompatibili con l'allagamento. Al di là del rinforzo delle arginature golenali che se compatibile con l'assetto complessivo del sistema difensivo e con il miglioramento delle capacità di laminazione della golena chiusa, può consentire la difesa gli insediamenti golenali per le piene più frequenti, le misure più efficaci per ridurre il rischio a valori compatibili con la presenza degli insediamenti golenali, sono da ricercare nella diminuzione della vulnerabilità degli stessi, intesa come aliquota dell'elemento a rischio che viene danneggiata (definizione di rischio di cui al capitolo 10). Tale riduzione di vulnerabilità può essere conseguita sia con la messa punto di adeguate attività di previsione della piena e di protezione civile che con accorgimenti strutturali in corrispondenza delle abitazioni medesime (chiusure a tenuta idraulica, costruzioni su palafitte, etc).

9. La vulnerabilità delle arginature in relazione ai fenomeni di filtrazione nel corpo arginale e nelle fondazioni dello stesso

9.1. I fontanazzi ed i fenomeni di sifonamento e sfiancamento dell'argine

I fenomeni di sifonamento e sfiancamento innescati da moti di filtrazioni nel corpo arginale e nelle fondazioni dello stesso costituiscono una delle principali cause di rottura arginale verificatesi in passato, come documentato nel lavoro del CNR-IRPI descritto al precedente capitolo 3.

Il fenomeno di filtrazione può riguardare una canale di flusso ben delimitato e confinato che confluisce a lato campagna in un fontanazzo, oppure può non essere confinato e riguardare in modo più distribuito una più ampia superficie sia dello stesso terreno di fondazione che del corpo arginale. Nel primo caso il fontanazzo se non opportunamente controllato in modo da riequilibrare i carichi può portare al cedimento per sifonamento dell'arginatura. Il fontanazzo è tanto più pericoloso quanto maggiore è il carico solido trasportato dalle acque di filtrazione all'esterno del piede arginale.

Nel caso in cui i fenomeni di filtrazione non siano confinati ed interessino vaste porzioni del paramento lato campagna del rilevato arginale nonché dei terreni presenti al piede dello stesso i fenomeni di imbibizione possono dar luogo allo sfiancamento dell'arginatura e al conseguente crollo.

In seguito alle piene dell'ultimo secolo molti interventi sono stati realizzati per cercare di contrastare tali fenomeni di filtrazione (ringrossi, diaframmi, protezioni della banca).

Il recente lavoro dell'Autorità di bacino, oltreché aggiornare il catasto delle opere presenti lungo l'intero sviluppo arginale come descritto al precedente capitolo 6, ha consentito di georeferenziare i fenomeni di filtrazione più rilevanti verificatisi durante l'evento del 1994 e del 2000, distinguendo in particolare fra i fenomeni di fontanazzi piccoli, medi e grandi e i fenomeni di filtrazione diffusa (vedasi Figura 5.5).

I principali fenomeni verificatisi nel 2000 sono di seguito descritti:

- In destra idraulica a monte di foce Scrivia (AL) un fontanazzo grande neutralizzato con sacchetti di terra durante la piena e poi in maniera definitiva con un diaframma in c.a. di 400 metri per la profondità di 6 m.;
- In sinistra tra foce Olona e foce Reale (PV) numerosi fontanazzi medi neutralizzati con sacchetti di terra. L'altezza dell'arginatura sul piano di campagna varia da m. 5.20 a 6.40. Tutto il tratto presenta parziali diaframature realizzate in varie epoche e rivestimenti di scarpate con lastronature;
- In destra da foce Tidone a foce Trebbia (PC) numerosi fontanazzi medi e piccoli neutralizzati con sacchetti di terra. L'altezza dell'arginatura sul piano di campagna varia da m. 5.40 a 6.10;
- In sinistra da foce Lambro fino al confine territoriale di Castelnuovo Bocca d'Adda (MI) numerosi fontanazzi piccoli, medi e grandi neutralizzati con sacchetti di terra in zone con frequenti infiltrazioni d'acqua. L'altezza dell'arginatura sul piano di campagna varia da m. 4.50 a 7.10;
- In destra da Piacenza fino a Monticelli d'Ongina numerosi fontanazzi piccoli e medi neutralizzati con sacchetti di terra in zone con frequenti infiltrazioni d'acqua. L'altezza dell'arginatura sul piano di campagna varia da m. 4.50 a 6.00;

- In sinistra in loc. a monte di San Daniele Po (CR) un fontanazzo grande neutralizzato con sacchetti di terra e fontanazzi piccoli associati a filtrazioni in prossimità del confine CR-MN.;
- In destra da foce Ongina a foce Enza (PR) un fontanazzo grande multiplo a Sacca di Colorno, neutralizzato con sacchetti di terra durante la piena e poi con la esecuzione di un diaframma in c.a.; due fontanazzi medio piccoli a valle di Polesine e di Pieve Ottoville neutralizzati con sacchetti; un fontanazzo in località Stagno di Roccabianca, in corrispondenza di un pozzo artesiano;
- In destra da foce Enza a Luzzara (RE) n. 3 fontanazzi medi neutralizzati con sacchetti di terra; la zona è protetta da diaframma plastico le cui tracce sono state riscontrate nel trasporto solido di due dei fontanazzi; l'altezza dell'arginatura sul p.c. è di m. 7.30;
- In destra da Luzzara a Carbonarola (MN) numerosi fontanazzi piccoli, medi e grandi neutralizzati con sacchetti di terra in zona frequentemente soggette a filtrazione; l'altezza dell'arginatura varia da m. 5 fino a quasi 10; in loc. Revere e Carbonarola esistono fontanazzi storici ricorrenti e dotati di presidio permanente;
- In sinistra da Cicognara a Libiola (MN) numerosi fontanazzi piccoli, medi e grandi neutralizzati con sacchetti di terra in zona frequentemente soggette a filtrazione; l'altezza dell'arginatura varia da m. 6 a 9; in loc. Bugno di Cavallara e valle di foce Olgio esistono fontanazzi storici ricorrenti e dotati di presidio permanente;
- In sinistra da foce Panaro al Po di Goro un fontanazzo piccolo in loc. Stellata, sei fontanazzi medi ricorrenti in zona soggetta a filtrazione in loc. Boaria Balzana e un fontanazzo medio a monte di Berra; l'altezza media dell'arginatura sul p.c. è di m. 6.50;
- In destra da Melara a Papozze (RO) n. 20 fontanazzi medi ricorrenti che non hanno dato luogo ad interventi (viene proposta una diaframmatrice come rimedio permanente); due fontanazzi in loc. Stienta e Calto manifestatisi per la prima volta e ripresi con coronelle in sacchi di terra; l'altezza media dell'arginatura sul p.c. è di m. 8.00.

Nonostante il nutrito elenco dei fontanazzi verificatisi nel corso della piena dell'ottobre 2000, si può affermare che gli stessi sono stati efficacemente controllati durante la piena e che pertanto rilevanti pericoli di sifonamento degli argini se ne siano avuti in percentuale molto esigua.

In linea di massima si ritiene che il maggiore pericolo di crollo dell'arginatura possa individuarsi in quei tratti ove unitamente all'attivazione dei fontanazzi si siano verificati diffusi fenomeni di filtrazione con emersione della linea di imbibizione al piede dell'argine o sopra di esso.

Infatti i fontanazzi singoli e confinati, per lo più noti in quanto quasi sempre ricorrenti, possono essere neutralizzati mediante circondamento con coronelle di sacchi in terra mentre più complesso risulta intervenire ove si manifestino fontanazzi, numerosi ancorchè piccoli, associati all'emersione della linea di imbibizione; in tal caso al fine di evitare il pericolo di rottura dell'argine è indispensabile intervenire prontamente (meglio sarebbe prima dell'arrivo della piena) rivestendo la scarpata a fiume con teli di polietilene e con il controllo e circondamento dei fontanazzi.

E' chiara a tal riguardo l'importanza di un attento monitoraggio dei punti critici al fine di adottare tempestivamente provvedimenti di riparazione ove si manifestassero segnali di sconcerto quali l'attivazione di fontanazzi con elevato trasporto solido, l'attivazione di

numerosi fontanazzi all'unghia arginale associata a copiosa filtrazione dalla scarpata sovrastante ed infine un elevato grado di imbibizione del corpo arginale; questo ultimo aspetto, che è legato sia al tipo di sagoma, sia alla qualità delle terre che compongono l'argine, è il segnale fortemente premonitore di un possibile sfiancamento dell'arginatura aggravato dallo scollamento della base del corpo arginale per l'eventuale presenza di fontanazzi diffusi.

E' da evidenziare, come nota degna di rilievo, che diversi fontanazzi e fenomeni di filtrazione manifestatisi nel 1994 non si sono ripetuti nel 2000 e ciò trova una possibile spiegazione nell'azione di assestamento dei rilevati realizzati dopo il 1951, bagnati nel corso della piena del 1994 fino a quote rilevanti ed in qualche caso per la prima volta (argini protetti da golene chiuse).

Inoltre l'esame delle Figure 5.5 e 5.6, evidenzia una buona e significativa corrispondenza fra i tratti di arginatura dove si sono registrati fenomeni di fontanazzo e filtrazione diffusa durante l'evento del 2000 e i tratti in cui la linea piezometrica teorica (linea di imbibizione) emerge al di sopra del piede arginale lato campagna.

E' necessario infine ricordare che, in relazione ai fenomeni di filtrazione attraverso il corpo arginale, riveste rilevante importanza la costante manutenzione del cotico erboso che ricopre i paramenti arginali. A tal riguardo è necessario effettuare almeno due sfalci annuali, evitando la reiterata triturazione della vegetazione con abbandono dei residui in sito (fra gli sfalci importanti sono quelli di maggio, prima delle piene primaverili, e di settembre prima delle piene autunnali).

9.2. La necessità di una caratterizzazione stratigrafica e meccanica dei terreni del corpo arginale e delle fondazioni: la campagna sperimentale di Caselle Landi

Elemento principale e fondamentale per qualsiasi attività volta a descrivere qualitativamente o quantitativamente i moti di filtrazione che si sviluppano durante le piene nei terreni del corpo arginale e delle fondazione dello stesso, è la definizione delle caratteristiche stratigrafiche e meccaniche dei terreni medesimi con particolare riguardo all'alternanza di strati a differente permeabilità.

La conoscenza di tali caratteristiche ad oggi purtroppo non risulta di adeguato dettaglio per gran parte dello sviluppo arginale ed è esclusivamente connessa alla presenza di sondaggi puntuali nel tempo realizzati congiuntamente all'esecuzione di lavori di diaframmatatura. Tale deficit conoscitivo è in parte giustificato dall'elevato costo necessario all'esecuzione di sondaggi diretti che come noto non possono essere utilizzati per caratterizzare in modo continuo e omogeneo lunghi tratti di sviluppo arginale.

Il ricorso ad indagini di tipo indiretto è pertanto l'unico in grado di poter fornire informazione continue ed omogenee lungo perlomeno i tratti di arginatura più critici in relazione ai fenomeni di filtrazione nel corpo arginale e nelle fondazioni dello stesso.

Sulla scorta delle indicazioni emerse dalle esperienze pilota e dalle recenti iniziative condotte nell'ambito della ricerca applicata, la metodologia di indagine che attualmente consente l'ottimizzazione del rapporto costi – benefici appare quella dei metodi elettrici.

In particolare la realizzazione di profili di resistività elettrica multitemporali, associati a mirati sondaggi meccanici in corrispondenza di alcuni cantieri da predisporre per una adeguata taratura delle indagini indirette, consentirebbe di monitorare i tratti più critici delle arginature del Po individuati con le attività di prima fase e di fornire i parametri necessari per la progettazione degli eventuali interventi strutturali necessari.

In relazione alle indagini campione effettuate da questa Autorità di bacino particolare rilevanza riveste l'esperienza effettuata nel 2004 sull'area sperimentale di Caselle Landi, di

cui di seguito sono riportati alcune considerazioni in relazione alle attività svolte ed ai risultati ottenuti, integrate con le cartografie riportate in Allegato 5. Per una lettura analitica dei risultati delle attività effettuate si rimanda invece alla relazione tecnica e ai relativi allegati della società Geovit, che ha svolto le indagini e le sperimentazioni in campo e in laboratorio (ST1.22).

9.2.1 Le attività sul terreno

Le indagini di campo sono state effettuate nei mesi di marzo e aprile 2004, dopo una serie di sopralluoghi preliminari per la definizione degli aspetti logistici e cantieristici.

Il programma di indagini, definito in un apposito documento progettuale, ha previsto una campagna di indagini integrate, dirette ed indirette, comprendenti sondaggi meccanici con prove di laboratorio, prove penetrometriche (CPTe, CPTU), tomografia geoelettrica, sondaggi elettrici verticali (SEV), sondaggi elettrici orizzontali (Profili di resistività, PRES).

Le indagini si sono svolte secondo il progetto originario, salvo la parziale introduzione di una tecnologia inizialmente non prevista, ma di cui si è voluto testare l'applicabilità e affidabilità in simile contesto, rappresentata dai profili di conduttività-resistività (FDEM – Frequency Domain Electro-Magnetic).

I punti di indagine sono stati rilevati tramite apposito rilievo topografico con strumentazione GPS e tradizionale, con materializzazione di un caposaldo locale di cui è stata realizzata apposita monografia.

9.2.2. Gli obiettivi

Con il campo sperimentale di Caselle Landi, ancorché con riferimento ad un caso specifico, si è cercato di dare una risposta ai seguenti obiettivi:

- tentare di capire perché avvengano i fenomeni di fontanazzo e, in genere, i fenomeni di sifonamento a carico dei terreni di fondazione degli argini;
- tentare di capire come avvengano;
- individuare (e sperimentare) uno schema di attività (o anche più d'uno purché pochi e tutti accessibili) capaci di fornire i dati necessari e sufficienti a zonizzare l'intero sviluppo degli argini maestri di Po dal Ticino al mare in termini (di tipo, grado e livello) di vulnerabilità al crollo per fenomeni di sifonamento/fontanazzo od altro.

9.2.3. I risultati di taglio generale

Nel merito è bene sottolineare preliminarmente che l'area di Caselle Landi, con la sua specifica casistica storica di crolli, esondazioni e fenomeni di fontanazzo rappresenta certamente un'area campione ideale e assai rappresentativa, ma non esaurisce certamente la casistica presente lungo l'intero sviluppo delle arginature di Po, che è sicuramente assai diversificata.

La fase sperimentale di Caselle Landi fornisce, quindi, prezioso materiale sia per "una" prima risposta ai quesiti di fondo (perché e come) e chiari indirizzi per l'organizzazione di ulteriori cantieri pilota da ubicare al più presto in altre aree rappresentative, opportunamente assai limitate nel numero.

Tra i risultati acquisiti e di valore universale possiamo annoverare con sicurezza i seguenti:

- una fase di prospezioni e prove è certamente necessaria ma può essere assai limitata nello spazio e deve essere estremamente “mirata” col non disdicevole corollario di una significativa possibilità di contenere enormemente l’impegno economico;
- lo studio della vulnerabilità, peraltro, non può che partire dalla utilizzazione di molteplici fonti di dati territoriali specifici e affidabili che il Gruppo ritiene di avere sostanzialmente individuato e determinato (sull’argomento si rinvia a successivo apposito paragrafo).

I risultati puntuali

A – “Perché” (a Caselle Landi)

A Caselle Landi, tutto concorre a far ritenere che il fenomeno coinvolga uno “spessore” di piana alluvionale molto contenuto; nel settore nel quale si verificano storicamente i fontanazzi, un livello fondamentale, permeabile e a granulometria grossolana, al quale è affidato il compito di “mezzo”, posto a profondità massima di circa 8-10 metri, sostenuto da un letto argilloso di spessore idrogeologicamente significativo, è coperto da sedimenti sabbiosi fini e finissimi.

Si ritiene di avere ricostruito una struttura tridimensionale del materasso alluvionale a “canali”, anche tortuosi, definiti da variazioni verticali e orizzontali di composizione litologico/granulometrica e di connesso comportamento idrogeologico. Assai marcate le variazioni in senso verticale, talvolta meno marcate quelle in senso orizzontale, queste ultime, peraltro, possono essere persino più importanti e sono comunque avvertibili. Le differenze di comportamento sono soprattutto in chiave idrogeologica, ma anche geotecnica.

Si ritiene di avere registrato la presenza di sistematici contrasti di permeabilità in senso verticale negli spessori sopra indicati. Infatti, le aree soggette al fenomeno, o al rischio del fenomeno dei fontanazzi, propongono una successione stratigrafica caratterizzata dalla presenza di alluvioni molto permeabili e acquifere (sabbie grossolane e sabbie-ghiaiose talvolta persino minimamente ciottolose) a quote prossime al piano campagna – ma non ovunque fino al medesimo – “sostenute” da limi-argillosi, talvolta sabbiosi, comunque decisamente meno permeabili dei sedimenti sciolti e grossolani sovrastanti, di potenza decisamente significativa. Le aree che risultano esenti dal fenomeno di risorgenza non sembrano avere la stessa successione stratigrafica, soprattutto manca il marcato acquifero grossolano abbastanza prossimo al p.c. oppure, questo, risulta confinato dalla presenza sovrapposta di un livello a permeabilità decisamente più bassa.

Nelle specifiche e ristrette aree di fontanazzo si segnala la presenza, in superficie, ossia fino a p.c. e per spessori anche contenuti, di sabbie fini con variabilissima percentuale di matrice pelitica. In merito non si esclude neppure che alcune carote che hanno dato sabbie particolarmente “pulite”, povere cioè di frazione finissima, abbiano attraversato contesti già interessati da antichi episodi di fontanazzo con conseguente sottrazione soprattutto di frazioni fini e finissime (fontanazzi di fango). Le aree che risultano storicamente esenti dal fenomeno di risorgenza non propongono la stessa successione stratigrafica, in merito manca decisamente il livello di sabbie fini con o senza limi.

Nell’area compresa tra la sponda del fiume e l’argine maestro si segnala la presenza di coperture agrarie (e di substrati delle medesime) caratterizzate da notevole permeabilità, con lunghi episodi di aridità e conseguenti possibili fenomeni di “crepatura” organizzate secondo fasce tortuose o arcuate, continue o episodiche, talvolta assai prossime all’argine, inserite (o affiancate) in contesti caratterizzati da coperture superficiali agrarie e di substrato, a bassa permeabilità con presenza o meno di ristagni o di durevoli condizioni di saturazione o di sub-saturazione eventualmente per fenomeni di risalita per capillarità di acque da falde molto superficiali.

Sembra di poter rilevare (almeno a livello di elevata probabilità) una condizione di particolare contiguità e continuità tra letto incassato di Po, base della sponda attuale e piana rialzata golenale (in quest'ultimo ambiente a qualche decimetro e fino a più di un metro di profondità dal piano campagna), tutti e tre in facies di sabbie grossolane più o meno ghiaiose sempre per fasce nastriformi.

Ancorché in carenza di prove sperimentali (si potranno avere solo a seguito di un prolungato monitoraggio freaticometrico, peraltro predisposto), è fondata l'ipotesi che in occasione dell'attivazione dei fontanazzi si determini un concomitante gradiente freatico con flusso tendenziale diretto dalla pianura verso l'alveo inciso di Po, secondo geometrie di flusso sotterraneo che seguirebbero la struttura a fasce e canali granulometrici prima descritta.

Seppure a seguito di dati oggettivamente scarsi, allo stato si registra un significativo grado di addensamento dei sedimenti al di sotto dell'edificio arginale e con effetti sulle caratteristiche geotecniche e sul comportamento dei livelli alluvionali acquiferi ancora da approfondire, ma con ogni probabilità incidenti sulla particolare e puntuale localizzazione dei fontanazzi.

Infine, si conferma una diretta, correlazione tra suscettività al fenomeno e presunta o accertata presenza di alvei abbandonati.

B – “Come”

In condizioni di particolare pinguedine generale degli acquiferi e di particolare saturazione dei livelli superficiali predisposti, quali possiamo ben presumere si verifichino al sopraggiungere della piena di Po, possiamo motivatamente immaginare che le “condizioni predisponenti” sopra elencate per riscontro dei dati raccolti, risultino nei fatti notevolmente accentuate.

Con l'uscita dalle sponde ordinarie, l'allagamento golenale e il rapido aumento dell'altezza dell'acqua a ridosso dell'argine, il materasso alluvionale interno all'argine viene “sollecitato” da un carico idraulico crescente e non usuale, mentre lo stesso terreno, che si trova però al di fuori dell'argine, viene a trovarsi assai poco “sovraccaricato” idrogeologicamente dalle eventuali lame d'acqua - sempre modestissime - connesse a presumibili e assai probabili difficoltà di smaltimento (vuoi per permeazione vuoi per circolazione e deflusso superficiale) delle acque di precipitazione diretta. E' tuttavia possibile che anche su questa porzione di acquifero alluvionale, con riferimento alla sola sottile fascia sopra indicata (8-10 m) vada “gonfiandosi” per particolare entità dell'afflusso sotterraneo e sub-superficiale da monte (dalla pianura verso il Po), soprattutto l'acquifero a più alta permeabilità costituito dal livello di sabbie grosse e di sabbie ghiaioso-ciottolose, come s'è detto a forma canalizzata (nastriforme). Si può immaginare qualcosa che rassomiglia al noto fenomeno di rigurgito che si verifica a carico delle acque fluenti negli affluenti in concomitanza con le piene del corso d'acqua principale.

A prescindere dal fatto che si tratti di una enorme massa d'acqua certamente in movimento, per semplificare la ricostruzione del fenomeno possiamo anche immaginare che l'allagamento sia compiuto da acque persistenti e ferme.

Sulla piana golenale viene pertanto a verificarsi un eccezionale fenomeno di percolazione e infiltrazione che sarà decisamente diverso da una parte in corrispondenza delle fasce caratterizzate da coperture superficiali permeabili e molto permeabili e dall'altra in corrispondenza delle fasce caratterizzate da coperture fortemente limose e limoso-argillose soprattutto se sature. La pressione va a trasmettersi in sotterraneo e, in corrispondenza dei “canali” caratterizzati dalla successione più indiziata (dall'alto verso il basso: copertura agraria permeabile, sabbie fini pulite (ma anche non franche), acquifero

alluvionale grossolano, letto limoso argilloso), verrà “subita” con assai limitate perdite di carico per andarsi poi a trasmettere, “nel medesimo acquifero”, in tutte le direzioni dello spazio.

Entrano a questo punto in azione le differenze composizionali e di trasmissività/permeabilità dei diversi sedimenti prima indicati, per cui è assai fondato supporre che agli ostacoli costituiti (verticalmente) verso il basso dal letto limoso-argilloso e (in direzioni orizzontali) verso i fianchi dalle facies decisamente meno permeabili, influiscano pesantemente sulle modalità di dissipazione della “sovrapressione”, esaltando in tal modo la struttura idrogeologica a nastri e canali; è così, infine, che la falda ospitata nel livello macro-sabbioso variamente ghiaioso entra in pressione con spiccata tendenza a scorrere verso la piana esterna, ossia verso l’argine e l’esterno dello stesso (verso monte), ma anche verso l’alto, ciò appena possibile, o appena costretta da sopraggiunti ostacoli o appena favorita dalla presenza di una copertura particolarmente permeabile e poco densa (le sabbie fini superficiali sopra citate).

Ancora più banalmente, se assimilassimo i contrasti di permeabilità sopra descritti al fondo e alle pareti di un canale, vedremo scorrere l’acqua nella direzione opposta a quella della zona dove avviene la potente ricarica (anche se topograficamente fosse sottomessa) e, sempre nel canale, vedremo rigurgitare e crescere la superficie libera dell’acqua, ossia vedremo gli effetti di una pressione vistosamente diretta ed efficace anche verso l’altro.

Nei casi in cui la “copertura” di questo pseudo-canale, è costituita da materiali impermeabili si ha essenzialmente la sola accentuazione del movimento di falda verso l’esterno.

Nei casi in cui la “copertura” è costituita da sedimenti puliti, permeabili, grossolani si può arrivare fino a fenomeni di allagamento dell’area esterna all’argine, senza tuttavia la fuoruscita di materiale, soprattutto dell’assente materiale pelitico.

Nei casi in cui, infine, la “copertura” è costituita da sedimenti sabbiosi fini, anche per la loro classica concentrazione in forme limitate lenticolari e non planarmente troppo estese, oppure nel caso di coperture sabbiose estese ma a luoghi molto sottili, si potrà avere lo sviluppo di un fontanazzo, o di una collana di fontanazzi.

Inoltre se il sedimento superficiale è costituito da sabbie fini con significativi contenuti in limi e limi argillosi (fin anche in casi di limi sabbioso a luoghi molto sottili) si potranno verificarsi uno o più fontanazzi fangosi con fuoruscita appunto di sedimenti fini e finissimi e conseguente sottrazione di materiale dal sottosuolo.

In questo “processo” il sovraccarico indotto sui terreni ex-superficiali e allo stato sottomessi all’edificio arginale come terreni di fondazione del medesimo (eventualmente anche in termini crescenti a causa di successive fasi di rialzo e consolidamento, e comunque persistente nel tempo) ha inevitabilmente modificato le condizioni naturali di addensamento del sedimento originario (anche se in termini diversi a seconda delle terreno), creando un certo contrasto di trasmissività tra lo stesso tipo di sedimento all’interno dell’argine, sotto l’argine e all’esterno del medesimo, introducendo – probabilmente – condizioni che favoriscono una sorta di effetto “sifone” che può ritardare e al tempo stesso rendere più dinamico lo stesso fenomeno di risorgenza.

Ribadiamo, inoltre, che sul fenomeno può influire una sorta di ostacolo al deflusso sotterraneo nella direzione dal fiume verso l’area extra-arginale dovuto all’incremento del flusso idrico naturale diretto nella direzione opposta (dalla piana verso il Po), conseguente al contestuale eccezionale ravvenamento delle falde anche all’esterno degli argini.

Resta comunque determinante la possibilità di ottenere informazioni affidabili (o riscontri oggettivi) sul tipo di fontanazzo che si è verificato in una determinata area: tra fontanazzi fangosi, quindi con sottrazione di materiale dal sottosuolo, e fontanazzi di acque chiare, infatti, ai nostri fini corre una significativa differenza.

La sottrazione di materiale dal terreno di fondazione al di sotto degli argini, non accentua soltanto il naturale e durevole fenomeno di “penetrazione” del corpo arginale nello stesso terreno di fondazione (nel sondaggio n 4, che ha interessato anche lo spiccatto e tutto il corpo arginale, questa “penetrazione” risulterebbe stimabile in circa m 1,5, misura in una certa misura sorprendente, ma in materia i prossimi cantieri pilota dovranno scendere assai più in dettaglio), ma per il fatto che si verifica solo in corrispondenza di fasce nastriformi, spesso strette, compromette ancor più la tenuta del manufatto in quanto induce in esso vere lesioni e più diffuse superfici di anomala dilatazione per cedimento differenziale che – indubbiamente – possono compromettere le caratteristiche del corpo rilevato, aprendo la via a forme diverse e complesse di sifonamento nel corpo stesso, ma anche di vera e propria rottura per cedimento dell’apparato.

Peraltro, la campagna di Caselle Landi non ha fornito elementi nuovi per la stima della vulnerabilità dell’argine al sifonamento in condizioni potremmo dire di “normalità”. Del resto questa problematica, tutt’altro che trascurabile o minimamente marginale, attiene alle caratteristiche tecniche e alle scelte originarie, progettuali ed esecutive, e alla adeguatezza dei programmi di manutenzione. Altre indagini, in parte già svolte, in parte avviate, in parte forse da promuovere soprattutto in termini di organicità, integrazione e interezza, dovranno dare informazioni e risposte in merito.

10. Il rischio residuale

Nel presente capitolo è definita e sperimentata su alcuni comparti campione la metodologia e le procedure necessarie per la definizione del rischio residuale all'interno della fascia C del fiume Po, delimitata nel Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) come quella porzione di pianura padana potenzialmente inondabile in seguito a fenomeni di tracimazione e rotta arginale. Prima di introdurre la metodologia messa a punto per la valutazione del rischio residuale è richiamato il concetto di rischio idraulico così come definito nel PAI.

10.1. Il concetto di rischio idraulico nel PAI

Secondo la definizione contenuta nel PAI e coerentemente con quanto definito in sede nazionale e internazionale, i diversi fattori che compongono il rischio idraulico connesso a scenari di inondazione delle aree golenali, si riassumono nella seguente espressione:

$$R = E \times (H \times V)$$

dove:

R = rischio relativo a un determinato elemento, inteso come il valore atteso del danno che mediamente può subire l'elemento stesso in un prefissato periodo di tempo;

E = entità degli elementi a rischio, cioè le persone e i beni che possono subire danni quando si verifica un evento, misurata in modo diverso a seconda della loro natura;

H = *pericolosità*, corrispondente alla probabilità di accadimento dell'evento in uno specifico intervallo di tempo (t) e in un'area tale da influenzare l'elemento a rischio; il valore di H è funzione del tempo di ritorno T dell'evento, che esprime l'intervallo di tempo nel quale l'evento si verifica in media una volta. Vale infatti la relazione $H = 1 - (1 - 1/T)^t$.

V = vulnerabilità, definita come attitudine dell'elemento a rischio a subire danni per effetto dell'evento stesso (aliquota dell'elemento a rischio che viene danneggiata); è compresa tra 0 e 1.

È evidente che ad un determinato elemento a rischio possono competere, in funzione delle caratteristiche dell'evento, valori diversi di E e V ; inoltre, a parità di condizioni, gli stessi E e V possono variare in base a fattori puramente casuali, quali ad esempio il periodo dell'anno, il giorno della settimana e l'ora in cui l'evento si verifica. Pertanto E e V possono essere considerate come variabili casuali.

A seconda della scala spaziale di analisi e del livello delle conoscenze disponibili l'equazione del rischio può essere applicata in forma quantitativa o in forma semplificata. Nel primo caso ad esempio – a puntuali valutazioni idrauliche effettuate sulla scorta di dettagliate conoscenze topografiche e morfologiche dei luoghi – è possibile associare una precisa valutazione delle componenti sociali, economiche e territoriali presenti nell'area in esame e dell'attitudine delle stesse a sopportare i fenomeni di inondazione presi in considerazione. Nel secondo caso l'equazione del rischio può essere semplificata in modo da consentire – anche in mancanza di dati puntuali di elevato dettaglio – analisi di rischio a scale spaziali più ampie.

Nell'ambito del PAI è stata definita una metodologia speditiva per la valutazione del rischio idrogeologico a scala di intero territorio comunale che in particolare consente di tener conto anche delle forme di dissesto tipiche dei bacini montani per i quali risulta molto complessa la valutazione quantitativa della pericolosità.

Alla formula del rischio sono state inserite le seguenti semplificazioni:

- l'entità E degli elementi a rischio è rappresentata mediante il valore economico medio (espresso in lire) degli insediamenti, delle infrastrutture e delle attività produttive presenti nell'unità territoriale di riferimento (la quantificazione esclude la presa in conto del rischio per l'incolumità delle persone);
- la vulnerabilità V è stimata come valore medio riferito a ogni singola tipologia di elemento a rischio;
- la pericolosità H è valutata tramite un indicatore correlato allo stato di dissesto presente all'interno dell'unità territoriale di riferimento, espresso tramite valori parametrici di densità superficiale.

La versione semplificata della relazione del rischio idraulico e idrogeologico diventa pertanto:

$$R = S \times E \times V$$

dove S rappresenta l'indicatore di pericolosità.

Con le semplificazioni assunte l'espressione del rischio esprime una valutazione relativa, ovvero consente una zonizzazione del territorio su basi semi-quantitative la cui funzione principale è quella di evidenziare in termini relativi la distribuzione del rischio a cui il territorio soggiace a causa di fenomeni naturali idrogeologici. I valori di rischio determinati tramite l'impiego dell'equazione sono aggregati poi in quattro classi a valore crescente (1=Moderato, 2=Medio, 3=Elevato, 4=Molto Elevato); i limiti di ciascuna classe sono stati individuati attraverso procedure d'analisi statistica della distribuzione dei valori ottenuti.

La metodologia di analisi della pericolosità e del rischio di inondazione per i territori soggiacenti ad alvei pensili difesi da rilevati arginali differisce sostanzialmente dalla procedura normalmente impiegata nella valutazione della pericolosità e del rischio in corrispondenza di aree golenali. Ciò deriva dalla differente modalità di sviluppo del fenomeno fisico in esame che può essere determinato, oltre che dalla tracimazione del rilevato, da fenomeni di collasso strutturale del rilevato.

La documentazione storica in merito alle rotte in passato avvenute lungo il sistema arginato del Po e le risultanze dei modelli di simulazione numerica evidenziano come le dinamiche di inondazione siano decisamente diverse dalle dinamiche di allagamento in corrispondenza di aree golenali aperte. La rottura arginale ha luogo in tempi non istantanei, dell'ordine mediamente delle 3 ore, per una larghezza complessiva della breccia mediamente pari a 100 metri.

Le dinamiche di allagamento e di svuotamento dei territori retrostanti il sistema arginato dipendono poi strettamente dalla topografia e dalla morfologia del terreno e sono solitamente contenute all'interno dei comparti idraulici, macroaree omogenee delimitate in linea generale per tre lati dal sistema arginato del Po e dei due affluenti adiacenti e per il quarto da discontinuità altimetriche più o meno marcate. Le stesse dinamiche all'interno del comparto sono inoltre fortemente influenzate dalle break lines naturali o artificiali presenti (terrazzi morfologici, rilavati stradali, ferroviari, arginali, canali, ect) e dalla altimetria caratteristica del terreno.

Coerentemente con la definizione di rischio idraulico precedentemente richiamata, è possibile definire:

- pericolosità idraulica residuale di inondazione per tracimazione: probabilità che si verifichino eventi di entità superiore alla piena di progetto assunta per il dimensionamento in quota del sistema arginale, sia in ordine alla dimensione

dell'evento sia per le caratteristiche non prese in considerazione nell'analisi dello stesso;

- pericolosità idraulica residuale di inondazione per rotta arginale: probabilità congiunta di accadimento di un evento di piena che determini livelli idrometrici elevati e del cedimento strutturale del rilevato;
- rischio residuale di inondazione: prodotto della pericolosità residuale per il danno sociale ed economico potenziale, rappresentato dal valore degli elementi a rischio e della loro vulnerabilità.

La definizione quantitativa dei parametri sopra definiti difficilmente può essere applicata per la valutazione del rischio residuale all'interno della fascia C del Po. Questo in particolare alla luce delle difficoltà di valutazione quantitativa della pericolosità idraulica residuale di inondazione per rotta arginale in termini di probabilità di accadimento del fenomeno. Alla probabilità di accadimento dell'evento con dato tempo di ritorno nell'orizzonte temporale preso come base della pianificazione si dovrebbe infatti considerare (come fattore moltiplicativo in quanto trattasi di probabilità congiunta) la probabilità di collasso del sistema arginale.

10.2. La metodologia per la valutazione del rischio residuale del Po

Alla luce delle considerazioni sopra sviluppate, all'interno della fascia C è necessario definire uno specifico indicatore del rischio residuale caratterizzato dal prodotto dei seguenti tre parametri:

$$R_r = I \times V_{tp} \times V_{td}$$

dove:

$I =$ Indicatore puntuale di intensità idraulica del fenomeno: funzione dei tiranti massimi e dei tempi di arrivo.

$V_{tp} =$ Indicatore puntuale di vulnerabilità del territorio: funzione dell'uso del suolo in atto e programmato.

$V_{td} =$ Indicatore diffuso di vulnerabilità del territorio: funzione di parametri socio economici che caratterizzano il comune preso in considerazione.

La valutazione del rischio residuale deve essere quindi effettuata all'interno di ciascun comparto idraulico con scale spaziali di analisi che a seconda degli indicatori presi in considerazione possono variare dall'intero territorio comunale (indicatori diffusi) ad una cella regolare di dimensioni orientativamente pari a circa 100 metri (indicatori puntuali).

L'espressione del rischio residuale definita esprime una valutazione relativa, ovvero consente una zonizzazione del territorio su basi semi-quantitative la cui funzione principale è quella di evidenziare in termini relativi la distribuzione del rischio a cui il territorio soggiace in relazione ad uno scenario di rottura arginale.

Il metodo per la definizione del rischio residuale è stato messo a punto e sperimentato su alcuni comparti campione (Secchia-Panaro, Parma-Enza, Lambro-Adda) dall'Autorità di bacino con il supporto tecnico dell'Università di Parma e di Pavia per quanto attiene la valutazione dell'intensità idraulica (ST1.18, ST1.17, ST1.8, ST1.10) e dal Centro Studi PIM di Milano per quanto attiene la valutazione della vulnerabilità (ST1.21).

Di seguito si descrive la procedura e le analisi effettuate per la definizione dei tre indicatori che caratterizzano il rischio residuale.

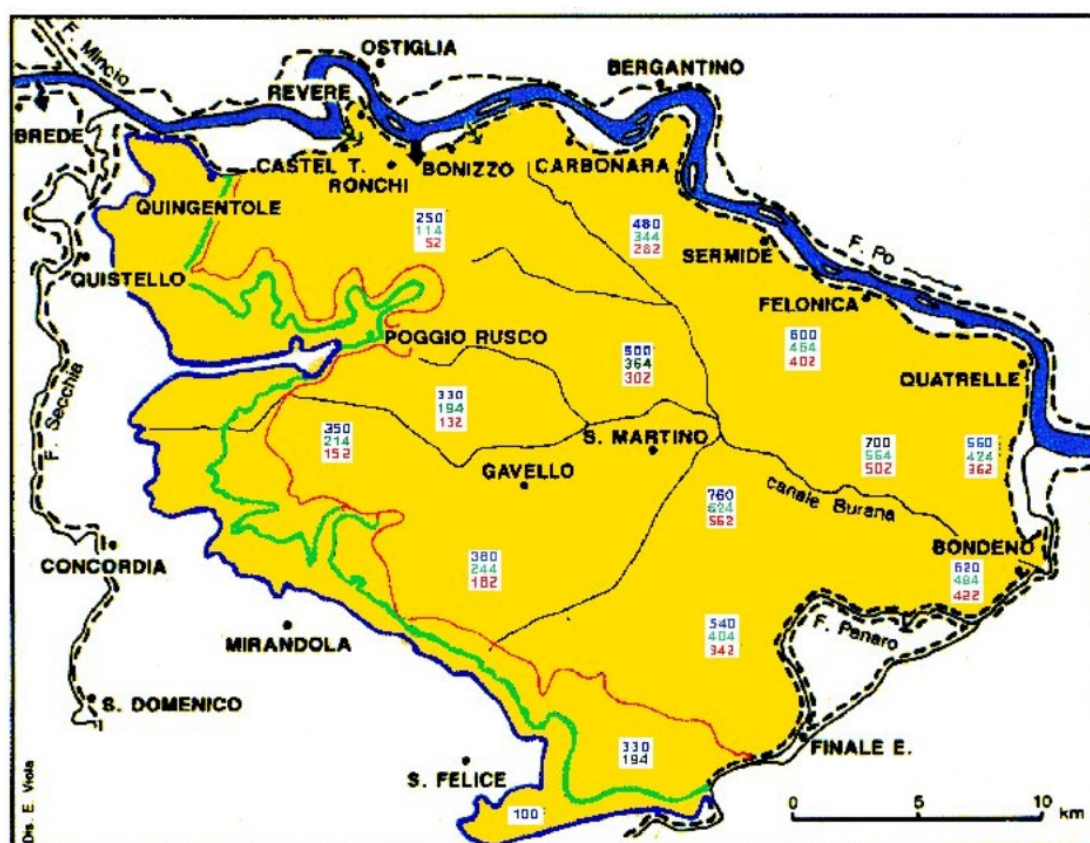
10.2.1. I processi di allagamento e la valutazione dell'intensità idraulica del fenomeno

Le dinamiche di allagamento conseguenti alla rottura arginale possono essere simulate all'interno di ciascun comparto idraulico mediante l'implementazione di modelli numerici bidimensionali in moto vario in grado simulare sia la traslazione dell'onda di piena all'interno di un sufficientemente esteso tratto di alveo fluviale che il deflusso delle acque dal varco arginale e la loro propagazione sul territorio.

Le simulazioni bidimensionali permettono in tal modo di stimare i parametri idraulici necessari alla caratterizzazione dell'intensità del fenomeno di allagamento all'interno del comparto ed alla messa a punto dell'insieme delle misure di protezione civile necessarie per la gestione dell'emergenza. Fra questi parametri in particolare assumono significativa importanza le superfici e i volumi esondati, i tiranti, le velocità, i tempi di arrivo del fronte dell'onda, i tempi di permanenza e le modalità di svuotamento.

Sul comparto compreso fra Secchia e Panaro, ad esempio, è stato implementato un modello idraulico bidimensionale a griglia regolare pari a 100 metri; l'informazione topografica è stata ottenuta mediante una impegnativa attività di raccolta e omogeneizzazione dei dati topografici disponibili per la piana allagabile unitamente alle sezioni disponibili per l'alveo del Po. La dimensione della griglia è stata scelta tenendo conto dell'ampiezza dell'area di calcolo, del livello di dettaglio richiesto e dei tempi di calcolo necessari per le simulazioni. Le simulazioni effettuate hanno in primo luogo ricostruito con buona approssimazione le aree esondate durante alcune rotte storiche di cui, nell'ambito del lavoro del CNR-IRPI (ST1.1, ST1.9), sono state raccolte tutte le informazioni disponibili in relazione all'area allagata, all'idrogramma alla stazione più vicina e all'ampiezza della breccia (Figura 10.2.1.1).

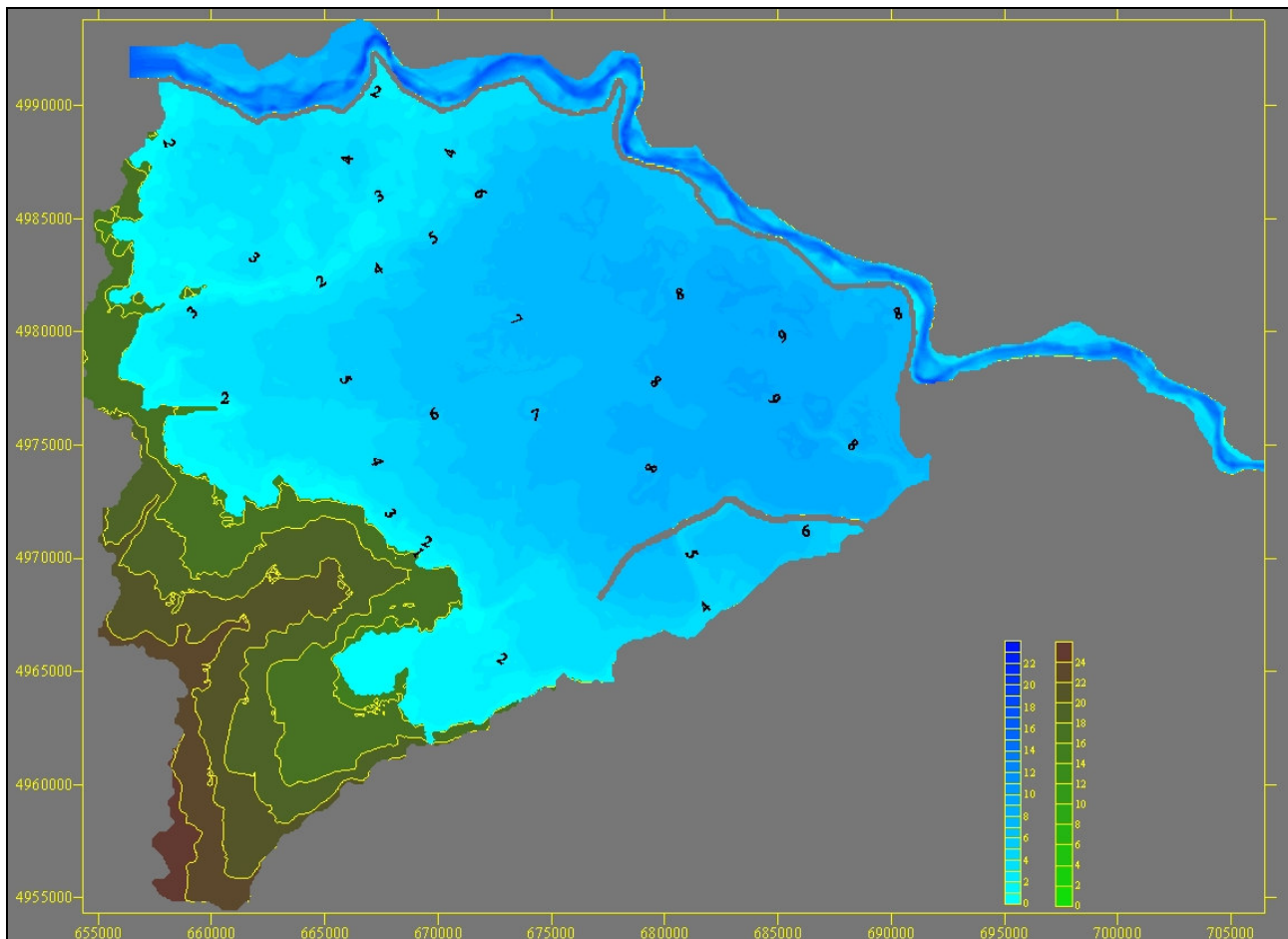
Figura 10.2.1.1: Aree allagate in seguito alle rotte del: 1839 (linea verde), rotte per erosione a Bonizzo e Casteltrivellino; 1872 (linea blu), rotta per tracimazione a Ronchi; 1879 (linea rossa), rotta per sifonamento a Carbonara.



Successivamente sono state condotte simulazioni ipotizzando tre distinti punti di rottura (Quingentole, Bonizzo e Felonica) per una larghezza della breccia pari a 400 metri. L'idrogramma di piena utilizzato (stazione di Boretto) è quello definito nell'attività messa a punto dal Politecnico di Milano e descritta al precedente capitolo 6 mentre l'istante della rotta è stato ipotizzato al raggiungimento della portata di 12000 m³/s.

In particolare lo scenario di rotta più gravoso è quello in cui la breccia è ipotizzata più a monte (Quingentole), in quanto le acque esondate si propagano lungo la naturale pendenza del terreno (nord – sud est) e, una volta arrivate all'argine del Panaro, non potendo riconfluire in Po rigurgitano verso monte, aumentando il tirante idrico in corrispondenza dell'argine del Panaro e allagando così in modo significativo ulteriori superfici poste più a sud. All'istante più gravoso (circa 10 giorni dopo la rottura), in cui si raggiungono quote idriche livelle su gran parte del comparto pari a circa 16 m s.l.m., i volumi esondati sono pari a 3.4 miliardi di m³, la superficie pari a 640 km², i tiranti massimi attesi di circa 8-9 metri su porzioni significative dell'area allagata (Figura 10.2.1.2).

Figura 10.2.1.2: Inviluppo dei tiranti idrici massimi relativamente ai tre scenari di rotta.



Stimati in tal modo i parametri idraulici più significativi è stata messa a punto una metodologia specifica per sintetizzare quegli più significativi in un unico parametro (denominato intensità idraulica), come segue:

1. Si è ammesso che l'intensità possa essere valutata esclusivamente in funzione: a) dei tempi di arrivo del fronte di allagamento e b) del tirante idrico massimo raggiunto, trascurando quindi la dipendenza dalla velocità. Ciò in quanto, a parte

alcune zone localizzate in prossimità della rotta, i valori di velocità sono così modesti da non configurarsi come un fattore significativo di pericolosità.

2. Si è ammesso che la relazione che lega l'intensità ai due fattori considerati (tempi di arrivo e tiranti idrici massimi) possa essere espressa come:

$$I = \frac{\alpha \cdot h^\beta}{(t + t_0)^\gamma}$$

La relazione richiede quattro vincoli per determinare i quattro parametri (t_0 , γ , β , α). I vincoli non possono essere qualsiasi. Dopo alcune considerazioni si è scelto di porre i quattro vincoli seguenti:

Vincolo	Intensità	h (m)	t_{arrivo} (ore)
1	100	10	1
2	75	10	24
3	60	5	18
4	50	3	24

che consentono di individuare la seguente quaterna di parametri:

t_0 (ore)	γ (-)	β (-)	α (ore ^{γ} /m ^{β})
-0.9927187	0.03570	0.33749	38.5646

L'espressione adottata è quindi la seguente:

$$I = \frac{38.5646 \cdot h^{0.33749}}{(t_{arrivo} - 0.9927187)^{0.0357}}$$

I tempi di arrivo del fronte di allagamento sono stati aumentati per tener conto del fatto che la breccia non è istantanea (come supposto nel calcolo) ma si sviluppa in un certo arco temporale, dipendente da molti fattori (idrologici, geotecnici, ecc.) non conosciuti. Nel caso specifico tale maggiorazione è stata assunta pari a 1 ora.

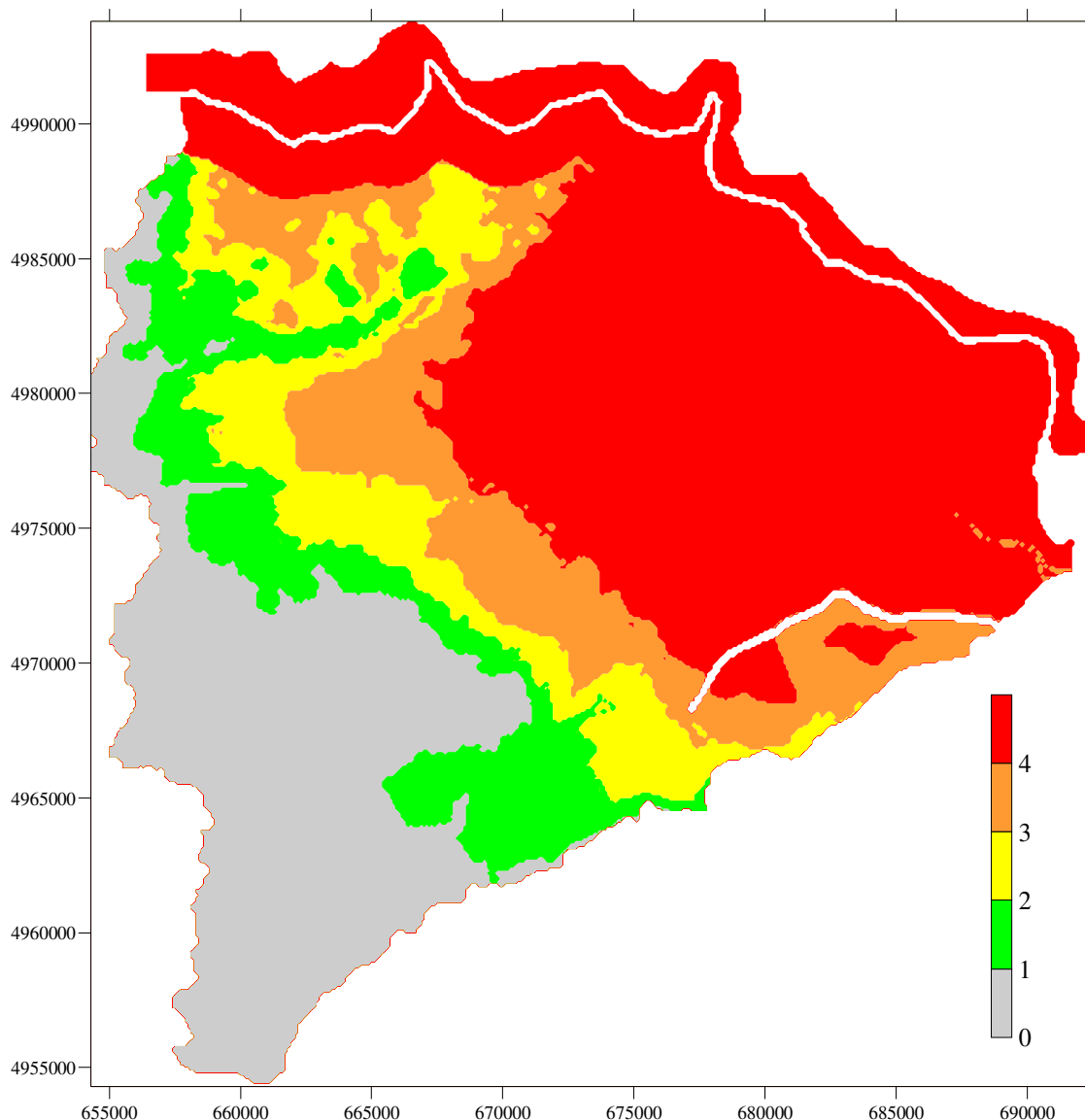
Volendo poi ricondurre l'intensità a solo quattro livelli (1 = bassa, 2 = moderata, 3 = alta, 4 = altissima), si sono convertiti i valori di intensità secondo la seguente scalatura:

(0-40) = bassa; (40-50) = media; (50-60) = alta; >60 = altissima.

Nella prima fascia immediatamente a ridosso dell'argine la valutazione dell'intensità risente, come ovvio, della posizione della rotta. Dal momento che tale posizione non è possibile individuarla a priori ma per ipotesi è stato assunto che potesse avvenire in un qualsiasi punto dello sviluppo arginale, è stato associato a tutto il territorio posto ad una distanza inferiore a 1000 metri dal piede dello stesso, il valore massimo di intensità.

A titolo di esempio si riporta in Figura 10.2.1.3 la mappatura dell'intensità idraulica del fenomeno nel comparto Secchia Panaro secondo le quattro fasce precedentemente individuate.

Figura 10.2.1.3: Mappatura dell'intensità idraulica (0 - 4) nel comparto Secchia Panaro.



10.2.2. La vulnerabilità del territorio: l'indicatore diffuso (Vtd)

L'indicatore diffuso di vulnerabilità del territorio (Vtd) è una funzione di parametri di natura socio-economica - demografici, urbanistici, economici, ecc. - che definiscono il livello di vulnerabilità presente a livello comunale a cui è soggetto un Comune a seguito di inondazione residuale.

Per la definizione del sistema socio-economico sono state selezionate alcune variabili che meglio permettessero di valutare la vulnerabilità socio-economica a livello comunale, conseguente ad un evento di rottura di arginatura maestra del fiume Po.

Una volta determinate le variabili socio-economiche, si è rapportato tale valore assoluto, assunto a livello comunale, al corrispondente valore medio assunto da tutti i 255 comuni del Bacino del Po appartenenti alla fascia fluviale C.

Infine per ottenere per ogni Comune l'indicatore diffuso di vulnerabilità del territorio, è stato necessario individuare dei pesi da assegnare alle singole variabili considerate, ovvero

valutare l'importanza attribuita alla vulnerabilità di ognuna delle variabili. La valutazione dei pesi da assegnare varia in base agli obiettivi dell'analisi e alla scelta delle variabili considerate, come elencato nella successiva tabella.

Una volta assegnati i pesi, è possibile effettuare il calcolo dell'indicatore diffuso di vulnerabilità del territorio (Vtd) attraverso il seguente procedimento come sinteticamente mostrato nella tabella seguente:

$$Vtd = V_1 \cdot p_1 + V_2 \cdot p_2 + \dots + V_n \cdot p_n$$

in cui V_i rappresenta le variabili selezionate e p_i il peso loro assegnato. In Tabella 10.2.2.1 è riportato, a titolo esemplificativo, il calcolo dell'indicatore diffuso di vulnerabilità del territorio per il comune di Bastiglia.

Tabella 10.2.2.1: Calcolo dell'indicatore diffuso di vulnerabilità territoriale (comune di Bastiglia).

Cl.	Variabili (comune di Bastiglia)	Valori comunali [1]	Valori d'area [2]	Rapporto Com/Area [3=1/2]	Peso variabili [4]	Vulnerab. diffusa [5=3*4]
a	Densità della popolazione (POP1)	319,30	200,32	1,59	0,18	0,29
b	Peso dei residenti a maggior rischio (POP2)	82,23	61,84	1,33	0,10	0,13
c	Concentrazione edilizia 1 (URB1)	586,49	417,66	1,40	0,11	0,15
d	Concentrazione edilizia 2 (URB2)	31,84	16,96	1,88	0,11	0,21
e	Peso dell'attività agricola (SAU)	0,82	0,77	1,07	0,05	0,05
f	Carico zootecnico 1 (ZOO1)	761,70	231,82	3,29	0,03	0,10
g	Carico zootecnico 2 (ZOO2)	14.258,71	635,23	22,45	0,02	0,45
h	Saldo "addetti-attivi occupati" (ADDTOT)	0,14	0,32	0,45	0,05	0,02
i	Indice di attrattività delle attività agricole (ADD1)	6,55	8,35	0,78	0,05	0,04
j	Indice di attrattività produttiva (ADD2)	19,80	15,69	1,26	0,08	0,10
k	Indice di attrattività terziaria (ADD3)	13,07	18,21	0,72	0,08	0,05
l	Indice di attrattività dei servizi pubblici (ADD4)	1,88	6,71	0,28	0,09	0,03
m	Indice di attrattività ricettiva (RIC)	4,47	6,74	0,66	0,05	0,03
Indice di variabilità diffusa (VTd)						1,66

Al fine di evidenziare sul territorio le diverse vulnerabilità, occorrerà quindi classificare il rischio per fasce omogenee. Poiché il valore del rischio socio-economico non può che essere superiore a zero, si possono dare tre casi "tipici":

- per valori compresi tra zero ed uno, il rischio socio-economico è stimato essere inferiore alla media del danno mediamente atteso per i 225 comuni della fascia C;
- il valore uno indica che il rischio socio-economico è stimato essere linea con il danno mediamente atteso per i 225 comuni della fascia C;
- per valori superiori ad uno, il rischio socio-economico è stimato essere superiore alla media del danno mediamente atteso per i 225 comuni della fascia C.

Come già anticipato, l'indicatore diffuso di vulnerabilità del territorio (VTd) così definito verrà moltiplicato per l'indicatore puntuale di vulnerabilità del territorio (VTp), permettendo in questo modo di calcolare la vulnerabilità complessiva.

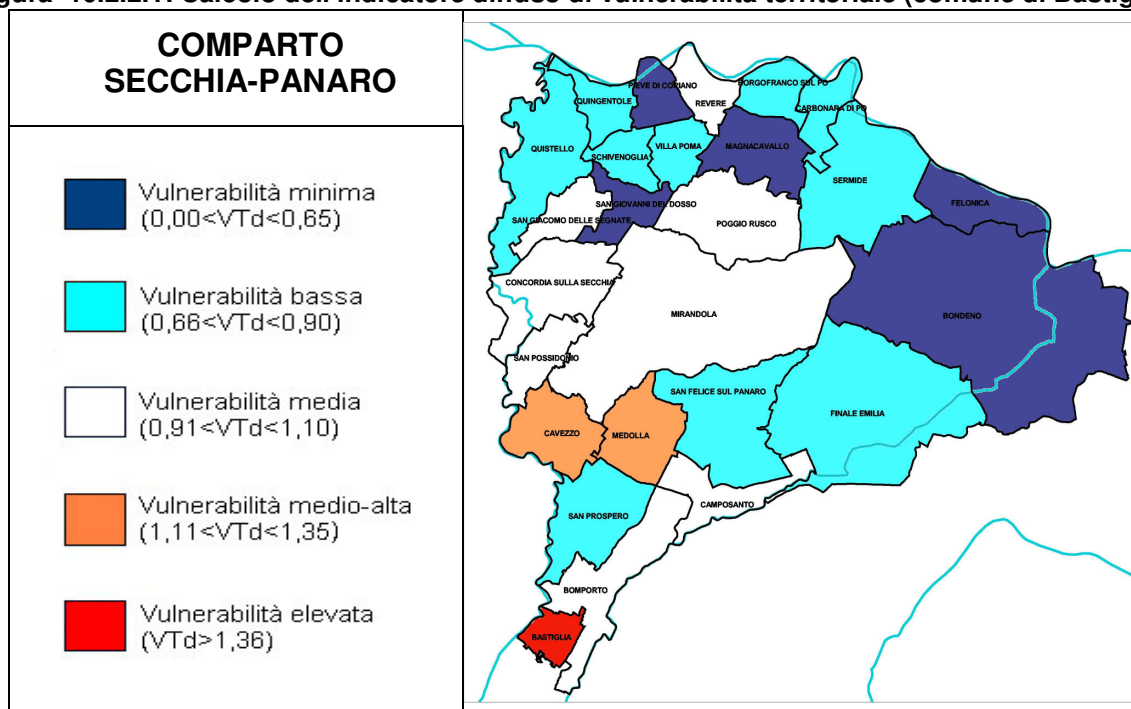
Il raggruppamento dei comuni della fascia C in classi di rischio socio-economico omogenee può rivelarsi interessante in quanto permetterà di individuare le aree caratterizzate da una maggiore vulnerabilità diffusa e di consentire un'analisi più

approfondita delle aree a maggior rischio. Sono state quindi scelte cinque classi di vulnerabilità:

- a) $0,00 < V_{td} < 0,65$ - *vulnerabilità minima*;
- b) $0,66 < V_{td} < 0,90$ - *vulnerabilità bassa*;
- c) $0,91 < V_{td} < 1,10$ - *vulnerabilità media*;
- d) $1,11 < V_{td} < 1,35$ - *vulnerabilità medio-alta*;
- e) $V_{td} > 1,36$ - *vulnerabilità elevata*.

Un esempio dei risultati dell'analisi è rappresentato in Figura 10.2.2.1.

Figura 10.2.2.1: Calcolo dell'indicatore diffuso di vulnerabilità territoriale (comune di Bastiglia).



10.2.3. La vulnerabilità del territorio: l'indicatore puntuale (V_{Tp})

L'indicatore puntuale di vulnerabilità del territorio (V_{Tp}) analizza l'uso del suolo in atto nel territorio e quello programmato nei principali strumenti di pianificazione territoriale con una scala spaziale di analisi pari ad una cella regolare di 100 x 100 metri.

Ad ogni elemento territoriale individuato nella "carta dell'utilizzo del suolo e delle previsioni urbanistiche" (Fase I – Studio ST1.21), è stato attribuito un valore di "sensibilità al danno sociale" (variabile fra 1 e 4).

Sulla carta dell'utilizzo del suolo si è sovrapposta la griglia (celle di 100 x 100 m) utilizzata per il calcolo dell'indicatore puntuale di intensità idraulica del fenomeno e, tramite una procedura informatizzata, si sono estrapolati, per ogni cella, gli elementi territoriali presenti.

Il valore di V_{tp} è stato, pertanto, ricavato rilevando, in primo luogo, per singola cella, gli elementi areali, ovvero le destinazioni d'uso presenti.

Sono stati, inoltre, rilevati i seguenti elementi lineari:

- strade, distinte per tipologia (autostrade, statali, provinciali e comunali),
- ferrovie,
- corsi d'acqua

- elettrodotti ad alta tensione,

e con lo stesso procedimento sono stati anche individuati gli elementi puntuali, già evidenziati nella Carta dell'utilizzo del suolo.

Ad ogni elemento (areale, lineare e puntuale) individuato nella singola cella è associato il rispettivo valore di Sensibilità al danno sociale.

Il valore finale di V_{tp} della singola cella è dato dalla sommatoria di tutti i valori **i-esimi** di Sensibilità calcolati al suo interno (valori areali+valori lineari+valori puntuali).

La cartografia di rappresentazione del rischio residuale (Fase II –Studio ST1.21) è articolata in quattro fasce di valori (per intensità diverse), a loro volta suddivise in quattro sottoclassi (per vulnerabilità diverse).

Dall'analisi delle carte del rischio si evidenzia, sia per il comparto Adda – Lambro che per il comparto Secchia – Panaro, come il valore finale del rischio sia maggiormente influenzato dagli elementi socio – economici – territoriali presenti che dal valore di intensità idraulica rilevato nella cella.

Infatti le aree maggiormente a rischio risultano essere comunque, indipendentemente dal rispettivo valore di intensità idraulica, le aree urbanizzate, ovvero le aree dove maggiormente sono presenti elementi territoriali, come strade, residenze, servizi alle persone, ai quali sono stati attribuiti dal modello messo a punto i maggiori valori di sensibilità al danno sociale.

11. Conclusioni: gli interventi per il miglioramento delle condizioni di sicurezza idraulica dei territori di pianura lungo il fiume Po

Dall'esame delle attività condotte e descritte nei capitoli precedenti emerge chiaramente come lo scenario di tracimazione e rottura degli argini maestri del fiume Po costituisca uno scenario di catastrofe nazionale che per intensità ed estensione deve essere fronteggiato con mezzi e poteri straordinari di protezione civile (lettera c, art. 2 L.225/1992 e D.M. 650/1995).

Allo stesso modo le attività in tempo differito connesse alla pianificazione di bacino devono assumere particolare rilevanza strategica per l'asta medio inferiore del fiume Po alla luce dell'entità del rischio residuale presente che non ha eguali sia nello stesso bacino del Po che nella restante parte del territorio nazionale.

Da queste considerazioni è emersa la necessità di avviare specifiche attività di approfondimento sull'asta del fiume Po in questione, di cui in questa relazione ne sono stati sintetizzati i contenuti e le risultanze finali, e di definire specifiche linee progettuali strategiche per il miglioramento delle condizioni di sicurezza dei territori di pianura lungo l'asta medio inferiore del fiume Po.

A ciò necessariamente si devono aggiungere gli interventi ordinari di manutenzione a carico delle arginature fra cui in particolare si segnala la necessità di garantire un costante ed omogeneo manto erboso sui paramenti dell'argine.

Le linee progettuali strategiche individuate sono:

Linea A Il monitoraggio e la manutenzione dell'alveo e il controllo della vulnerabilità delle arginature in relazione al fenomeno di erosione.

Linea B Il monitoraggio delle arginature e il controllo della vulnerabilità in relazione al fenomeno di sifonamento e sfiancamento

Linea C La valutazione e la gestione del rischio residuale in fascia C

Linea D Il miglioramento della capacità di laminazione delle golene e la laminazione controllata in fascia C della "piena al limite di prevedibilità"

Di seguito sono descritte tali linee, distinguendo fra quelle già avviate ed in corso di esecuzione e quelle da attivare a breve medio termine.

Linea A - Il monitoraggio e la manutenzione dell'alveo e il controllo della vulnerabilità delle arginature in relazione al fenomeno di erosione.

Il monitoraggio dell'alveo del fiume Po costituisce attività strategica e necessaria non solo ai fini della valutazione del grado di sicurezza delle arginature, ma anche per altri aspetti, fra cui il tema della manutenzione del corso d'acqua, sul quale particolare attenzione è stata riposta da parte dell'Autorità di bacino con specifiche iniziative di cui in seguito si darà conto.

A partire dalla fine del XIX secolo e con cadenza circa cinquantennale, e successivamente ventennale, le sezioni inizialmente individuate dall'ing. Brioschi nel 1873 sono state periodicamente rilevate topograficamente e ad oggi consentono, come già evidenziato precedentemente nella relazione, di rappresentare l'evoluzione dell'alveo.

Nel paragrafo 4.4 sono state descritte le attività di monitoraggio in corso sull'asta fluviale riguardanti l'esecuzione di rilievi topografici e aerofotogrammetrici. In particolare tali attività, che si concluderanno entro il 2005, consentiranno di avere una rappresentazione tridimensionale quantitativa e qualitativa (piani quotati, sezioni, ortoimmagini) dell'intera asta fluviale di elevatissimo dettaglio mai raggiunta in precedenza. Inoltre nel realizzare tali attività di rilievo particolare cura è stata posta nella definizione di metodologie ripercorribili nel tempo, ancorate in particolare ad un'univoca rete di raffittimento definita insieme all'IGM, che consentiranno in futuro ad intervalli di tempo definiti, oppure in seguito ad eventi di piena particolarmente intensi, di poter aggiornare efficacemente l'attuale quadro conoscitivo ed avere di conseguenza indispensabili strumenti di monitoraggio dell'evoluzione planoaltimetrica dell'alveo.

Come accennato in premessa con riferimento al tema della manutenzione dell'alveo, particolare attenzione è stata riposta dall'Autorità di bacino all'avvio di specifiche attività connesse alla corretta gestione dei sedimenti dell'asta fluviale medio inferiore: è stata approvata nella seduta di Comitato Tecnico dell'Autorità di bacino del 23 marzo 2005 la *"Direttiva tecnica per la programmazione degli interventi di gestione dei sedimenti degli alvei dei corsi d'acqua"* (Allegato 3), ed è stato sottoscritto nell'ottobre 2004 (Allegato 2) un apposito accordo fra Autorità di bacino, AIPO, Regione Lombardia, Regione Emilia Romagna e Regione Veneto nell'ambito del quale sono attualmente in corso sia le attività di rilievo topografico sopra definite che le attività di studio sulle dinamiche morfologiche e sul bilancio del trasporto solido necessarie alla definizione del *"Programma generale di gestione dei sedimenti"* previsto dalla citata direttiva. Nell'ambito di tale programma generale particolare attenzione è posta alle sponde in erosione anche e soprattutto in relazione alla posizione delle stesse nei confronti delle arginature maestre, al fine di monitorare, e se del caso arrestare, tali processi di instabilità planimetrica.

Le attività connesse alla presente linea strategica sono state tutte avviate o lo saranno a breve e non risulta pertanto attualmente necessario attivare altre iniziative oltre quelle già in corso.

Linea B - Il monitoraggio delle arginature e il controllo della vulnerabilità in relazione al fenomeno di sifonamento e sfiancamento

Le attività condotte nell'ambito del Piano di bacino e degli approfondimenti conoscitivi condotti successivamente all'evento di piena del 2000, hanno evidenziato le notevoli carenze conoscitive purtroppo presenti in relazione alle caratteristiche stratigrafiche e geotecniche dei terreni costituenti il rilevato arginale e le fondazioni dello stesso.

Tali carenze non consentono ad oggi una completa ed omogenea valutazione delle condizioni di vulnerabilità dell'intero sistema arginale in relazione al fenomeno di sifonamento e sfiancamento.

A tal riguardo è bene ricordare che la valutazione effettuata nell'ambito del PS267, descritta precedentemente nel capitolo 2, è stata condotta raccogliendo informazioni di carattere qualitativo presso i singoli uffici operativi del Magistrato per il Po.

A tale valutazione hanno fatto seguito specifiche attività di approfondimento, descritte precedentemente nella relazione e finalizzate, in sintesi, a:

1. recuperare tutti i dati storici disponibili in relazione alle rotte e ai fenomeni di fontanazzo verificatisi lungo l'asta fluviale;
2. definire in modo omogeneo per l'intero sviluppo arginale le caratteristiche dimensionali della sagoma del rilevato e delle principali opere connesse (diaframmi, chiaviche, ...);
3. individuare i tratti arginali realizzati al di sopra di alvei abbandonati;
4. approfondire e tarare metodologie di indagine indirette per la caratterizzazione dei terreni di fondazione del corpo arginale in relazione all'alternanza di strati di differente permeabilità;

Una caratterizzazione della vulnerabilità delle arginature, in aggiornamento a quella effettuata nell'ambito del PS267, può essere ad oggi effettuata secondo due fasi di approfondimento successive: la prima fase da condurre sulla scorta delle informazioni raccolte in modo omogeneo per l'intera asta fluviale relativamente ai primi tre punti sopraindicati; la seconda riguardante la caratterizzazione con adeguate indagini di larga scala delle caratteristiche geotecniche del terreno costituente la fondazione ed il corpo del rilevato arginale.

Prima fase

Come in precedenza specificato, la vulnerabilità rispetto ai fenomeni di sifonamento e sfiancamento del corpo arginale condotta nell'ambito del PS267 è caratterizzata da informazioni composite e di diverso livello di dettaglio e aggiornamento raccolte presso i singoli Uffici Operativi del Magistrato per il Po in seguito alla piena del 2000. L'aggiornamento di tale caratterizzazione, mediante una valutazione sintetica, è oggi possibile sulla scorta dell'insieme delle informazioni raccolte in modo omogeneo sull'intera asta fluviale e descritte in precedenza nel presente documento (punti 1, 2 e 3).

L'impegno temporale di tale attività si ritiene possa essere di ridotte dimensioni, comportando solamente attività di sintesi ed interpretazione dell'insieme delle informazioni raccolte. Inoltre già nell'ambito del lavoro di aggiornamento del catasto delle arginature (ST1.2) è già stata effettuata una valutazione di sintesi delle principali criticità connesse a fenomeni di tracimazione (rispetto alla piena PAI), sifonamento e sfiancamento (rispetto ai fontanazzi e alle filtrazioni diffuse verificatesi nel 1994, 2000 e tenendo conto dei diaframmi e della sagoma arginale). Tale sintesi è pertanto da verificare e se del caso integrare con le informazioni di cui ai sopraccitati punti 1 e 3.

Seconda fase

Una caratterizzazione di maggior dettaglio della vulnerabilità delle arginature rispetto ai fenomeni in questione non può prescindere dalla descrizione delle caratteristiche geotecniche del corpo arginale e dei terreni di fondazione dello stesso e fra queste in particolare dall'alternanza di strati di differente permeabilità.

Sulla scorta delle indicazioni emerse dalle esperienze pilota e dalle recenti iniziative condotte nell'ambito della ricerca applicata, la metodologia di indagine che attualmente consente l'ottimizzazione del rapporto costi – benefici appare quella dei metodi elettrici.

In particolare la realizzazione di profili di resistività elettrica multitemporali, associati a mirati sondaggi meccanici in corrispondenza di alcuni cantieri da predisporre per una adeguata taratura delle indagini indirette, consentirebbe di monitorare i tratti più critici delle arginature del Po individuati con le attività di prima fase e di fornire i parametri necessari per la progettazione degli eventuali interventi strutturali necessari.

Di seguito, sulla scorta anche dell'esperienza del cantiere pilota di Caselle Landi, descritto al precedente capitolo 9, si riporta un elenco di alcuni punti fermi da tenere in considerazione nell'ambito delle future attività di rilievo.

1. All'interno dei tratti critici individuati in prima fase è necessario procedere preliminarmente ad una "lettura" puntuale (geologica l.s., idrologica, storico-infrastrutturale ...) e, solo dopo, si potranno predisporre progetti specifici di indagini.
2. In ciascuno dei lotti di intervento è sin d'ora evidente che si rende necessario lo svolgimento di una campagna di rilevamenti (prima di tutto, ma non solo integrazioni e omogeneizzazioni dei rilievi topografici disponibili) e di una campagna di prospezioni e prove.
3. E' altrettanto chiaro che si devono predisporre strumenti e programmi di monitoraggio dei fenomeni accertati o presunti e dell'evoluzione della piana, del fiume, delle strutture arginali, dei loro rapporti reciproci.
4. Tra le forme di prospezioni è già oggi assodato che non potranno mancare i sondaggi meccanici, con annesse prove idrogeologiche e geotecniche e gli allestimenti per il monitoraggio. Essi, tuttavia, dovranno essere estremamente dosati affidando loro funzioni ineludibili e fondamentali di analisi e taratura.
5. Tra le altre forme a carattere estensivo in sotterraneo, sembra al momento emergere l'utilità marcata dei "profili geoelettrici di resistività"; forma di attività geofisica, questa, tanto "vecchia" quanto consolidata (ma non automatica né facile soprattutto in termini di lettura), capace come poche di fornire indicazioni chiare dei passaggi e contrasti laterali di granulometria alle quote di interesse.

Con attenzione ai prossimi cantieri pilota è inoltre opportuno proporre alcune integrazioni e ottimizzanti rispetto alla campagna di Caselle Landi.

Innanzitutto si dovrà prevedere che tutti i sondaggi (e non solo alcuni) vengano attrezzati alla fine con tubi piezometrici. Sarà bene prevedere diversi tipi di allestimento e, soprattutto, l'installazione dei moderni sistemi di rilevamento in continuo con trasmissione dei dati a distanza.

Sarà bene aumentare il numero di SPT all'avanzamento, potranno essere diminuite le Prove statiche, ma introdotte prove penetrometriche dinamiche continue leggere e pesanti, sia in sostituzione di alcune prove statiche, sia accanto ad alcune delle statiche. Le prove penetrometriche dovranno essere concentrate sull'argine e nei pressi dello stesso e rarefatte in corrispondenza dei sondaggi lontani dall'argine.

Massima attenzione dovrà essere riservata al terreno di fondazione dell'argine estendendo il prelievamento di campioni e l'esecuzione di prove in sito fino ad almeno tre metri al di

sotto del materiale dell'argine e all'interno del corpo arginale stesso. Tra sondaggi meccanici, S.E.V. e prove penetrometriche continue, com'è stato a Caselle Landi, si dovrà disegnare una sorta di maglia di "punti" - variamente densa - di conoscenze verticali da raccordare con profili geofisici. La densità dei punti della maglia dovrà privilegiare la stretta fascia di terreno occupato dall'argine e dai terreni immediatamente contigui, mentre i profili geofisici dovranno privilegiare i raccordi tra i punti verticali soprattutto in senso parallelo ad una linea ottenuta mediando l'andamento della fascia arginale e l'andamento "interpolato storico" del tracciato del Po. In ogni "cantiere" sarà infine utile accompagnare la ricostruzione di utilissime sezioni trasversali agli argini con almeno un profilo geofisico appoggiato al maggior numero possibile di sondaggi meccanici, S.E.V. e prove penetrometriche.

Tra le questioni discriminanti per la stessa definizione esecutiva e dettagliata della campagna ottimale, deve essere annoverata sicuramente la "previsione" della profondità del "meccanismo" che può favorire, caso per caso, il sifonamento. La sua profondità, infatti, deve condizionare molte scelte operative, prima tra tutte quella della profondità a cui sviluppare i profili geofisici.

Per questo è sempre utile e talvolta necessario far precedere l'apertura del cantiere (o addirittura la sua progettazione, o per contro - in estrema analisi - porre tra le prime operazioni di cantiere) con l'individuazione di una o più stratigrafie "tipo" dell'area in oggetto. Con lo sguardo alla fase attuativa della presente linea strategica potrebbe essere opportuno prevedere una prima campagna di prospezioni di "messa a punto" (ma ovviamente di totale e preziosa utilità anche finale) molto rada (solo due o tre sondaggi meccanici di circa 25 metri ciascuno per ogni cantiere).

Linea C - La valutazione e la gestione del rischio residuale in fascia C

Come già introdotto nella premessa della presente relazione, l'attuale sistema arginato del fiume Po, per quanto ben realizzato, monitorato e mantenuto nel tempo non può comunque garantire un livello di sicurezza assoluto per il territorio circostante, sia in relazione a scenari di rottura arginale sia in relazione a scenari di tracimazione.

Nonostante la probabilità di accadimento di uno scenario di rotta arginale sia abbastanza ridotta in quanto connessa al verificarsi di un evento superiore alla piena di riferimento, oppure al verificarsi di un evento di piena significativo connesso al contemporaneo collasso strutturale del rilevato arginale (probabilità congiunta), l'entità del rischio conseguente a tale scenario può essere estremamente elevata alla luce della forte antropizzazione che caratterizza gran parte della pianura padana ed in particolare i territori adiacenti l'asta del Po.

L'entità di tale rischio che, in quanto connesso a scenari di mancata efficacia di un'opera idraulica, può essere definito residuale, deve essere dunque adeguatamente valutata secondo i parametri e la metodologia messa a punto in alcuni comparti campione e descritta precedentemente.

Il prof. Enrico Marchi durante l'introduzione al convegno di Rovigo tenutosi il 29 e il 30 novembre 2001 in occasione del cinquantenario della rotta del 1951, evidenziava la necessità di *"...promuovere uno studio generale, documentato e dettagliato che, pur senza predeterminare la localizzazione di un'eventuale rotta arginale, assuma l'ipotesi di una sua evenienza e preveda la via più facile per far defluire al mare le acque esondate con minore danno possibile ..."*. Lo stesso prof. Marchi evidenziava come tale studio non potesse essere affrontato dal singolo comune e nemmeno dalla singola amministrazione provinciale ma che, proprio alla luce dell'ampiezza spaziale delle analisi da condurre necessitasse dell'impegno degli enti competenti sull'intero bacino idrografico.

Nel precedente capitolo 11 è descritto il metodo, individuato nell'ambito di alcune iniziative pilota, per la definizione dell'entità del rischio residuale nonché dei singoli indicatori di pericolosità e di vulnerabilità del territorio che la compongono.

E' evidente come la conoscenza di tali fattori in tempo differito sia di fondamentale importanza in relazione alla gestione del rischio residuale in tempo reale mediante la messa a punto di adeguate misure di protezione civile. Nei casi pilota analizzati è stato preso in considerazione, ad esempio, il tempo di arrivo dell'onda di piena e quello di permanenza, i tiranti massimi attesi, la valutazione dell'influenza dei rilevati principali sui fenomeni di convogliamento delle acque esondate e di come la stessa influenza possa essere migliorata procedendo con opportuni interventi di taglio dei rilevati.

Quanto sopra evidenzia la necessità di estendere la valutazione del rischio residuale all'intero territorio potenzialmente esondabile in seguito a scenari di rottura arginale del tratto medio ed inferiore del fiume Po, su di una superficie complessiva stimata in circa 7000 km².

La disponibilità di tali analisi del rischio residuale e delle singole componenti che lo compongono, consentirebbe oltre ad una zonizzazione di maggior dettaglio della fascia C, la messa a punto, la taratura ed il coordinamento per l'intero territorio padano degli strumenti di protezione civile comunali e provinciali, nell'ambito di un unico ed omogeneo strumento di previsione e prevenzione del rischio residuale per l'intera asta medio inferiore del fiume Po, che come già sopra indicato per sua natura deve necessariamente essere di natura sovra regionale.

Va da sé che l'attivazione e lo svolgimento di tali attività (definizione della topografia di base, implementazione di modelli idraulici bidimensionali, ricerca di notizie di dettaglio in relazione all'estensione delle aree inondate a seguito di rotture arginali, valutazioni socioeconomiche, predisposizione degli strumenti di previsione, prevenzione del rischio idraulico e di gestione dell'emergenza) deve essere opportunamente coordinato e condiviso fra le singole amministrazioni coinvolte, fra cui in particolare, oltre l'Autorità di bacino del fiume Po, il Dipartimento di Protezione Civile, le Regioni e le loro Agenzie, le Prefetture, le Province, i Comuni e gli altri centri di competenza istituiti ai sensi del Decreto della Presidenza del Consiglio dei Ministri- Dipartimento della Protezione Civile n. 252 del 26.01.2005.

Tale "*progetto finalizzato*" alla valutazione del rischio residuale e alle iniziative di protezione civile necessarie per la gestione dello stesso costituisce anche fondamentale ed indispensabile elemento di completamento delle attività di previsione della piena recentemente organizzate e sistematizzate, anche in seguito alla costituzione dei Centri funzionali e dei Centri di competenza (Dir.P.C.M. 27.02.2004 – pubblicato sulla G.U. n.59 del 11.03.2004), nell'ambito di una specifica convenzione (rep. AdbPo n° 271 del 27/04/2005) stipulata fra il Dipartimento della Protezione Civile, l'Autorità di bacino del fiume Po, l'AIPO, l'ARPA della Regione Emilia Romagna, la Regione Lombardia, l'ARPA della Regione Piemonte, la Regione Valle d'Aosta e la Regione Veneto "*per la realizzazione di un sistema di modellistica idraulica per la previsione ed il controllo delle piene fluviali dell'asta principale del fiume Po*" (Allegato 6).

Linea D - Il miglioramento della capacità di laminazione delle golene e la laminazione controllata in fascia C della “piena al limite di prevedibilità”

Sul fatto che le attuali conoscenze tecnico - scientifiche in materia di meteorologia, idrologia ed idraulica fluviale non consentano di fissare un limite superiore certo e non superabile in relazione alla portata di piena attesa a singole sezioni del reticolo idrografico, è dato certo ed inequivocabile. Non solo, come già ricordato in premessa, il prof. De Marchi, in un rapporto del 1952, evidenziava come le piene del fiume Po nel tratto medio inferiore erano progressivamente aumentate nel corso degli ultimi secoli ed erano destinate ad aumentare ancora in avvenire. Tale affermazione è stata recentemente confermata nel corso delle piene del 1994 e del 2000, durante le quali in alcuni tratti del fiume Po i livelli hanno raggiunto e superato i valori massimi storici.

Mentre il prof. De Marchi poneva alla base di tale affermazione l’osservazione dei cambiamenti intercorsi sul sistema fisico di deflusso e laminazione delle piene intercorso nel corso degli ultimi secoli (fra cui in particolare l’aumento progressivo dello sviluppo delle arginature maestre), nella recente *Comunicazione della Commissione Europea in materia di prevenzione, protezione e mitigazione delle inondazioni (luglio 2004)* si associa un futuro e possibile aumento dell’intensità e della frequenza delle inondazioni ai cambiamenti climatici in atto.

Quanto sopra per evidenziare come gli interventi di difesa attivi consistenti nel miglioramento delle capacità di laminazione delle portate di piene siano gli unici in grado di contrastare il fenomeno di incremento delle portate e dei livelli di piena nel tratto medio inferiore del fiume Po e siano nel prossimo futuro gli interventi di sistemazione idraulica da privilegiare e sui quali investire maggiormente impegno e risorse.

Rispetto all’obiettivo largamente condiviso sia a livello nazionale che comunitario di miglioramento della capacità di laminazione dell’asta del fiume Po, due sono le possibili linee progettuali da attivare:

1. il miglioramento della capacità di laminazione all’interno delle arginature maestre rispetto agli eventi di piena di progetto (TR 200 anni);
2. la laminazione controllata della piena al limite della prevedibilità all’esterno delle arginature maestre.

Come descritto nel capitolo 8 le golene chiuse rivestono un importantissimo ruolo nella laminazione delle piene lungo l’asta del Po, consentendo di invasare durante il deflusso delle piene più rilevanti circa 500 milioni di m³ su di una superficie pari a circa 14.000 ettari.

L’effetto di laminazione delle golene chiuse è chiaramente tanto più efficace quando più consente il temporaneo stoccaggio dei volumi in prossimità del colmo dell’onda di piena.

Scenari di miglioramento del funzionamento delle golene chiuse devono cercare di massimizzare, secondo criteri di ottimizzazione complessiva del rapporto costi – benefici, tale efficacia e potrebbero, in linea generale, essere compatibili con interventi di consolidamento degli argini golenali aventi la duplice finalità di:

- garantire una maggior sicurezza delle aree golenali chiuse per le piene caratterizzate da tempi di ritorno bassi (circa 20 – 50 anni);
- impedire fenomeni di tracimazione e di rotta in corrispondenza della fase di crescita delle onde di piena di riferimento e consentire l’invaso della golena nel momento e nel punto più favorevole rispettivamente per la laminazione complessiva e per la sicurezza dei beni presenti all’interno della golena stessa.

Scenari di rialzo e ringrosso delle arginature golenali, semprechè compatibili con l'assetto e le quote delle arginature maestre, devono pertanto comprendere gli eventuali accorgimenti strutturali affinché sia garantito l'invaso al superamento dei livelli idrometrici delle piene più rilevanti.

La laminazione delle piene all'interno delle golene chiuse, oltrechè naturalmente il sistema difensivo presente, non può comunque garantire una sicurezza assoluta per il territorio difeso dalle arginature medesime, sia alla luce del possibile aumento futuro delle portate cui si è accennato sopra che comunque in relazione all'impossibilità dell'uomo di controllare i fenomeni meteorologici naturali causa principale delle piene.

Proprio per tale motivo risulta indispensabile riuscire a laminare in modo controllato anche eventi di piena di cui a priori non è possibile fissare un limite superiore cercando di minimizzare complessivamente i danni attesi sull'intero territorio soggetto a rischio residuale.

Già il prof. De Marchi nel rapporto sopraccitato del 1952 evidenziava l'opportunità che il sistema arginale maestro non fosse pensato come un limite invalicabile dalle acque di piena e che fossero individuati, in particolare nel tratto medio superiore dell'asta fluviale, precisi punti in cui effettuare, in caso di piene superiori a quelle attese, prelievi mirati di volumi di piena mediante una tracimazione controllata dell'arginatura maestra.

E' evidente che per prelievo mirato il prof. De Marchi intendesse esclusivamente la tracimazione dell'arginatura maestra in tratti ben definiti in cui un necessario ed indispensabile rivestimento del paramento lato campagna del rilevato potesse escludere la possibilità di rottura dell'arginatura medesima.

Le valutazioni idrauliche e socioeconomiche alla base della caratterizzazione del rischio residuale descritte al punto precedente, consentirebbero anche l'individuazione sull'intero territorio della fascia C del fiume Po delle aree in cui laminare le piene al limite della prevedibilità e l'avvio della progettazione dei necessari interventi strutturali e non strutturali (consolidamento dei punti di tracimazione, misure non strutturali di riduzione della vulnerabilità nelle aree interessate dalla laminazione, interventi strutturali per facilitare l'evacuazione delle acque tracimate, etc).

Note finali

La presente relazione tecnica è stata redatta dalla Segreteria Tecnica dell'Autorità di bacino del fiume Po con il supporto tecnico – scientifico del Gruppo tecnico di lavoro costituito dal Segretario Generale, dott. Michele Presbitero, operante da febbraio 2003 a maggio 2004 e composto da Prof. U. Maione, Prof. P. Mignosa, Dott. A. De Stefanis, Arch. B. Ottolini, Ing. A. Colombo.

La relazione medesima inoltre tiene conto delle principali risultanze dei lavori della Commissione scientifica costituita dal Segretario Generale, Prof. R. Passino, operante nel 2000 e composta da Prof. U. Maione, Prof. M. Govi, Prof. P. Mignosa, Prof. L. Natale, Prof. G. Di Silvio, Prof. R. Lancellotta, Dott.sa F. Maraga.

Allegati

1. Atlante delle sezioni trasversali sovrapposte nel periodo 1954 – 2000 e dei profili di fondo alveo medio delle sezioni medesime (AdbPo, 2000).
2. Accordo per la gestione dei sedimenti del fiume Po da confluenza Tanaro al mare (AdbPo, AIPO, Regione Lombardia, Regione Emilia Romagna e Regione Veneto, 5 ottobre 2004).
3. Direttiva tecnica per la programmazione degli interventi di gestione dei sedimenti degli alvei dei corsi d'acqua (AdbPo, 2005).
4. Progetto di riduzione del rischio, sostenibilità e conservazione integrata nelle Fasce Fluviali (Progetto strategico Sviluppo di un Ambiente Fluviale Eco-sostenibile, SAFE) (AdbPo, 2002).
5. Caratterizzazione della vulnerabilità delle arginature di Po – cartografia di sintesi delle indagini del campo sperimentale di Caselle Landi (Dott. A. De Stefanis, 2004).
6. Convenzione (rep. AdbPo n° 271 del 27/04/2005) stipulata fra il Dipartimento della Protezione Civile, l'Autorità di bacino del fiume Po, l'AIPO, l'ARPA della Regione Emilia Romagna, la Regione Lombardia, l'ARPA della Regione Piemonte, la Regione Valle d'Aosta e la Regione Veneto *“per la realizzazione di un sistema di modellistica idraulica per la previsione ed il controllo delle piene fluviali dell'asta principale del fiume Po”*.

Studi condotti dall'Autorità di bacino

- ST1.1 CNR-IRPI Responsabile scientifico O. Turitto, Gruppo di lavoro: C. G. Cirio, P. Bossuto, F. Viale, *Censimento delle rotte storiche negli argini maestri del fiume Po. Quadro conoscitivo sulle rotte nell'arginatura maestra del Po documentate a partire dal 1800 lungo il percorso fluviale da Zerbo (PV) a Serravalle (FE)*, 2004.
- ST1.10 Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale Università di Pavia, *Caratterizzazione idraulica dell'asta principale del fiume Po nel tratto per il quale esiste l'aggiornamento del rilievo topografico delle sezioni al 1999 e definizione di scenari di inondazione a seguito di rotta arginale mediante impiego di un modello 2D*, 2002.
- ST1.17 Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università degli Studi di Parma (R.S. P. Mignosa Gruppo di lavoro: F. Aureli, A. Maranzoni, C. Ziveri), *Definizione di scenari di inondazione a seguito di rotta arginale mediante impiego di modellazioni numeriche 2D nel comparto Parma Enza*, 2004.
- ST1.18 Dipartimento di Ingegneria Civile Università degli Studi di Parma Gruppo di lavoro: P. Mignosa F. Aureli, A. Maranzoni, C. Ziveri, *Definizione di scenari di inondazione a seguito di rotta arginale mediante impiego di un modello numerico 2D nell'area in destra Po, tra la confluenza del Secchia e Panaro. Integrazione: Calcolo della pericolosità idraulica e simulazioni numeriche 1D*, 2004.
- ST1.19 Consorzio Italcopo, *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*, 2002.
- ST1.2 L. Coratza, *Aggiornamento del catasto delle arginature maestre di Po*, 2005.
- ST1.20 GeoMap, *Caratterizzazione geomorfologica dell'alveo e delle aree inondabili dalla confluenza del f. Tanaro a Pontelagoscuro*, 2004.
- ST1.21 Centro Studi PIM, *Valutazione del rischio residuale connesso a scenari di rotta di arginatura maestra del fiume Po su due aree campione*, 2004.
- ST1.22 GEOVIT, *Definizione delle indagini di campo necessarie a definire la vulnerabilità del sistema arginale ai fenomeni di sifonamento*, 2004.
- ST1.8 Dipartimento di Ingegneria Civile Università degli Studi di Parma : P. Mignosa, F. Aureli, A. Agnetti, S. Bianchi, *Definizione di scenari di inondazione a seguito di rotta arginale mediante impiego di un modello numerico 2D nell'area in destra Po, tra la confluenza del Secchia e Panaro*, 2002.
- ST1.9 Consiglio Nazionale delle Ricerche Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica nel bacino Padano: O. Turitto, F. Maraga, *Censimento delle rotte storiche degli argini, con approfondimento di indagine per la ricostruzione delle stesse e caratterizzazione geomorfologica dell'alveo e delle aree inondabili e valutazione della vulnerabilità degli argini*, 2002.
- ST1.7 Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Marittima e Geotecnica dell'Università degli Studi di Padova: *Impostazione metodologica di un protocollo di supporto alla decisione in tempo reale durante gli eventi critici di piena sull'asta principale del fiume Po*, 2003.
- ST 1.11 Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale e del Rilevamento del Politecnico di Milano: *Caratterizzazione idrologica dell'asta principale del fiume Po nel tratto che va dalla confluenza della Dora Baltea all'incile del Po di Goro*, 2001.

ST1.12 Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica del politecnico di Torino:
Studio dei terreni di fondazione di un tratto campione degli argini maestri del
fiume Po attraverso prospezioni geofisiche da eseguirsi mediante metodi
sismici ed elettrici, 2001.