

Valutazione delle condizioni di sicurezza idraulica del Canale “Cavo Napoleonico”

Ricerca finanziata da Regione Emilia-Romagna, Servizio Tecnico Bacino Reno

Giulia Biavati¹, Guido Mori¹, Enrico Mazzini²

con il contributo di Monica Ghirotti³, Ezio Todini³, Giuseppe Simoni⁴

¹ Geologo, libero Professionista

² Geologo, Regione Emilia-Romagna, Servizio Tecnico Bacino Reno

³ Professore, Università di Bologna, Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali

⁴ Ingegnere, Servizio Tecnico Bacino Reno, Regione Emilia-Romagna

1 - INTRODUZIONE

Il Cavo Napoleonico rappresenta una delle più importanti costruzioni idrauliche realizzate nella Pianura Padana. Esso esplica la duplice funzione di scolmatore delle piene del Fiume Reno e di bacino di irrigazione per le attività agricole di pianura. Per problemi di eccessiva permeabilità del fondo, dovuti principalmente al fatto che lungo il suo tracciato vengono attraversati antichi paleoalvei del Fiume Po, il Cavo non può essere utilizzato al meglio delle capacità di progetto. Il presente lavoro illustra un quadro degli studi svolti fin'ora da parte del Servizio Tecnico Bacino Reno, supportati in parte dall'Università di Bologna allo scopo di ottimizzare le potenzialità di tale opera idraulica. Vengono quindi descritti i problemi tecnici incontrati sin dai primi collaudi dell'opera, i lavori di parziale messa in sicurezza, il monitoraggio idrogeologico, i rilievi geognostici eseguiti, in particolare i rilievi eseguiti con il Georadar (GPR-Ground Penetrating Radar), nonché le future prospettive di utilizzo nell'ambito della gestione idraulica del Bacino del Reno. I dati del monitoraggio piezometrico hanno permesso di analizzare l'interazione tra i livelli idrometrici del canale con i livelli piezometrici dell'area circostante, individuando i tratti di canale a maggiore rischio idraulico e di calibrare i modelli numerici di filtrazione e stabilità arginale.

Il presente lavoro è stato pubblicato in una versione più estesa sulla rivista EngHydroEnv Geology 2009 (ex Giornale di Geologia Applicata), 11, 31-43 - doi: 10.1474/GGA.2009-11.0-03.0246

2 - DESCRIZIONE E STORIA DEL CAVO NAPOLEONICO

In passato, il progressivo spostamento verso Nord del Fiume Po ha reso incerto il corso dei torrenti

appenninici, mettendo a rischio gli insediamenti antropici delle aree di pianura (Bondesan, 2001). La costruzione del canale ebbe inizio nel 1808 in epoca napoleonica, ma i lavori non completarono l'opera. Dopo una serie di catastrofiche rotte del Reno, avvenute nel 1949 e nel 1951, si avviò una lunga fase di riprogettazione del Cavo, anche a seguito della necessità di collegarlo al Canale Emiliano-Romagnolo (CER), realizzato a scopi irrigui per la media pianura tra Bologna e Rimini. I lavori ripresero quindi nel 1951 e si conclusero nel 1965. Rispetto al progetto napoleonico, che prevedeva il collegamento del Reno al Po attraverso il Panaro, il nuovo tracciato del Cavo fu spostato più ad Est collegandosi direttamente al Fiume Po (Fig. 1b). Tale scelta ha, in questo modo, fatto sì che il Cavo fosse impostato su un substrato estremamente permeabile per lunghi tratti e, contestualmente, ha richiesto, affinché fossero raggiunti i livelli idraulici necessari per gli scopi irrigui, che i suoi argini venissero ulteriormente innalzati. Il primo collaudo del Cavo avvenne nel 1966, ma fu interrotto a causa di preoccupanti perdite di acqua dal fondo (Leoni, 1994). La soluzione tecnica a tali gravi problemi fu la realizzazione di una parziale impermeabilizzazione del fondo con lastre in cemento armato, attuata tra il 1966 e il 1973. Tuttavia, l'opera ingegneristica di rivestimento non ha portato al raggiungimento di adeguati livelli di sicurezza idraulica in quanto i problemi di filtrazione dal fondo hanno continuato a manifestarsi anche dopo la sua realizzazione. Attualmente, il Cavo Napoleonico (lungo 18 km, largo circa 180 m, con una capacità massima di $1,8 \times 10^7$ m³, corrispondente a una massima altezza di invaso di 14,5 m s.l.m.) possiede la doppia funzione di scolmatore delle piene del Fiume Reno (con flusso da Sud a Nord) e, con flusso invertito, di alimentazione del CER. Nel primo utilizzo, il Cavo devia le acque del Fiume Reno nel

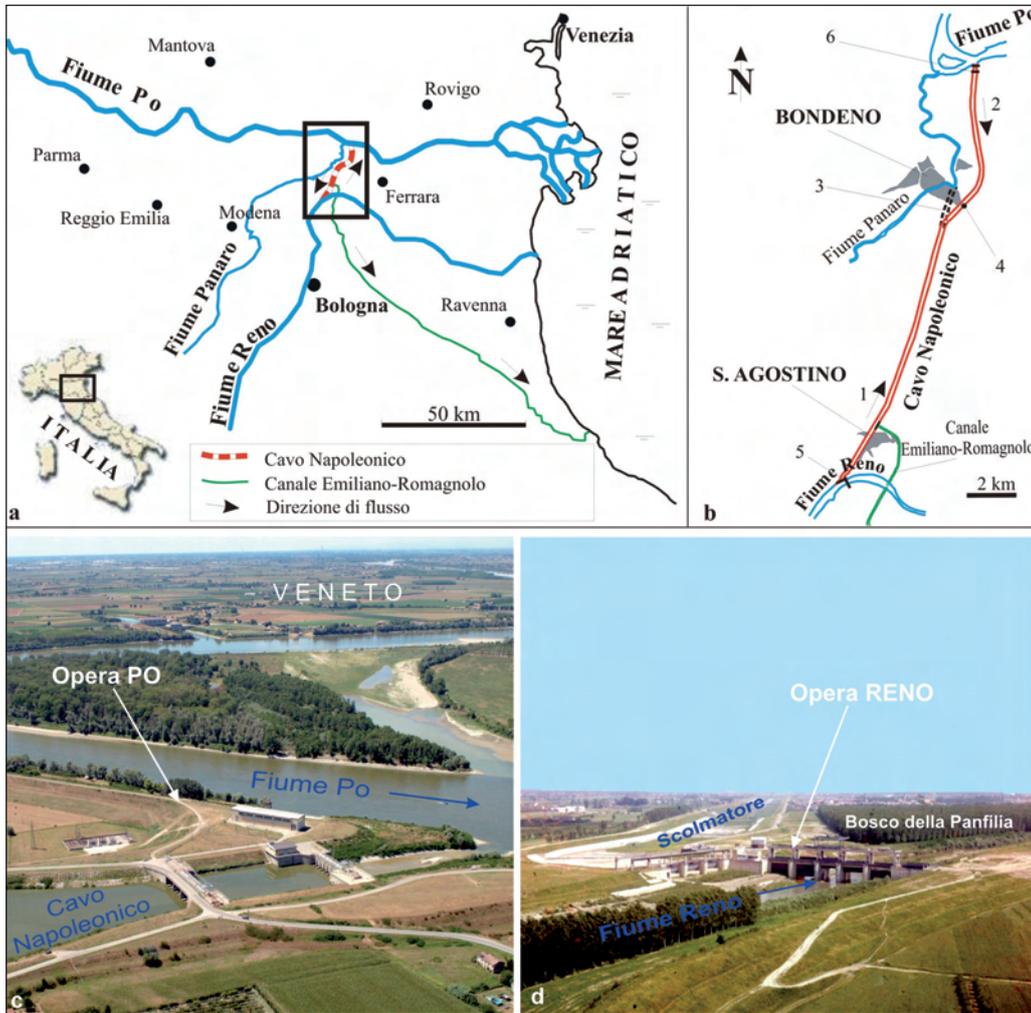


Figura 1. a) Inquadramento dell'area; b) dettaglio del Cavo Napoleonico: 1, direzione di flusso delle piene del Reno; 2, direzione di flusso dell'acqua derivata dal Fiume Po e indirizzata al CER; 3, traccia del percorso originale del Cavo progettato dalla commissione tecnica di Napoleone; 4, 5, 6, le opere idrauliche principali per la regimazione del flusso del Cavo; c) fotografia dell'Opera Po; d) fotografia dell'Opera Reno.

Fiume Po se quest'ultimo non è a sua volta in piena, oppure le trattiene nel proprio alveo per un tempo limitato. Quando il Cavo funge da alimentatore del CER, genera un sistema di irrigazione per l'alta pianura, convogliando l'acqua del Po sino alla riviera Romagnola, per una lunghezza complessiva del sistema di circa 148 km. Per assolvere tale doppia funzione, il fondo del Cavo Napoleonico ha pendenza nulla per quasi tutta la sua lunghezza. Il collegamento tra il Cavo ed i due fiumi che esso unisce è regolato da due opere idrauliche di regimazione del flusso, denominate Opera Po e Opera Reno (Fig. 1c, 1d). Per i problemi di eccessiva permeabilità del fondo, il canale attualmente non può essere utilizzato al meglio delle capacità di progetto: il volume immesso è limitato a non più di 1/3 del volume massimo invasabile ed è quindi utilizzato per l'irrigazione solo in un periodo ben limitato dell'anno (da aprile a settembre). La modifica del tracciato rispetto all'originale napoleonico, dunque, ha indebolito la sicurezza idraulica del territorio a causa delle peculiari condizioni geologico-tecniche del substrato in cui l'opera è stata realizzata (Mazzini *et alii*, 2006).

3 - ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DELL'AREA

L'area si trova in corrispondenza di accavallamenti tettonici con vergenza NE o NNE attualmente sepolti sotto una coltre plio-pleistocenica di depositi alluvionali dello spessore variabile da 100 a 350 m. Il sollevamento tettonico di quest'area rispetto alle zone circostanti sembra compensare almeno in parte gli elevati livelli di subsidenza misurati nell'alta pianura del Bacino del Reno (60-70 mm/anno), che risultano così limitati a non più di 10 mm/anno (Carminati & Martinelli, 2002).

Nell'area di studio sono evidenti le tracce di numerosi paleoalvei e dossi fluviali. Tra questi, è di particolare importanza il paleotracciato del Fiume Po presente a Est di Bondeno (Fig. 2).

Esso rappresenta il corso principale del Po attivo sino al XII Secolo (Bondesan, 2001). Le frecce in Fig. 2 indicano i tratti non impermeabilizzati del Cavo in cui il letto del canale è a diretto contatto con i materiali permeabili del paleoalveo; essi, tuttavia, non sarebbero stati intersecati, se fosse stato mantenuto il tracciato originale napoleonico (3 in Fig. 1b).

La sezione longitudinale di Fig. 3 è stata ricostruita recuperando gran parte delle indagini geognostiche eseguite sul tracciato dal 1949 a oggi (Regione Emilia-Romagna, Servizio Tecnico Bacino Reno). Essa è tracciata in corrispondenza del percorso del Cavo (sez. A-A' in Fig. 2) e semplificata al fine di evidenziare le relazioni tra topografia e geologia: in essa si può chiaramente individuare la presenza di uno spesso litosoma di sabbie pleistoceniche il cui letto raggiunge anche i 40 m di profondità e la cui origine sedimentaria è da attribuire ad una tipologia fluviale di alta energia del Fiume Po, collegabile ad una fase climatica glaciale. Al tetto delle sabbie würmiane si posizionano alternanze di sedimenti argilloso-limosi e sabbiosi olocenici per uno spessore complessivo variabile tra i 7 e i 12 m, messi in posto da

un corso prevalentemente a meandri, paragonabile all'attuale. L'insieme dei sedimenti grossolani pleistocenici e olocenici costituiscono l'acquifero multifalda regionale (Severi *et alii*, 2002).

4 - MONITORAGGIO IDROGEOLOGICO

Il Cavo interseca una serie di paleoalvei del fiume Po collegati idraulicamente al Po stesso mediante un meccanismo di alimentazione sia laterale (acquifero freatico) che sotterraneo (acquifero in pressione). Il modello idrogeologico dell'area in esame è stato affrontato da Colombani *et alii* (2007) nell'ambito della valutazione delle potenzialità dello sfruttamento idropotabile dell'acquifero, la cui conducibilità idraulica media viene stimata tra $4,1 \times 10^{-4}$ e $8,2 \times 10^{-4}$ m/sec e la trasmissività è compresa tra $1,6 \times 10^{-2}$ ed $4,1 \times 10^{-2}$ m²/sec. Sui livelli più superficiali degli stessi depositi, il Servizio Tecnico Bacino Reno ha stimato, mediante l'esecuzione di prove in foro di sondaggio, valori di permeabilità media di $2,2 \times 10^{-5}$ m/sec (Regione Emilia-Romagna, Servizio Tecnico Bacino Reno, rel. tecn. inedite).

Le intersezioni del Cavo con i paleoalvei del Po che causano problemi di filtrazione sono visibili nelle Figg. 2 e 4). L'esaurimento delle disponibilità economiche da una parte e, presumibilmente, un'errata interpretazione della tenuta idraulica dell'opera dall'altra, rappresentano i motivi per i quali l'impermeabilizzazione non fu realizzata su quei tratti di canale impostati su sedimenti sabbiosi (Sez. 5 e 6 di Fig. 4).

La scarsa tenuta idraulica fornita dal Cavo sin dal primo collaudo, rese quindi indispensabile l'avvio di una campagna di monitoraggio dei livelli di falda in rapporto ai carichi idraulici imposti dai due corsi d'acqua (Po e Cavo Napoleonico): essa è stata condotta con differenti modalità dal 1965 sino ad oggi. Un'impegnativa ricerca di archivio ha consentito di recuperare buona parte dei dati misurati (Regione Emilia-Romagna, Servizio Tecnico

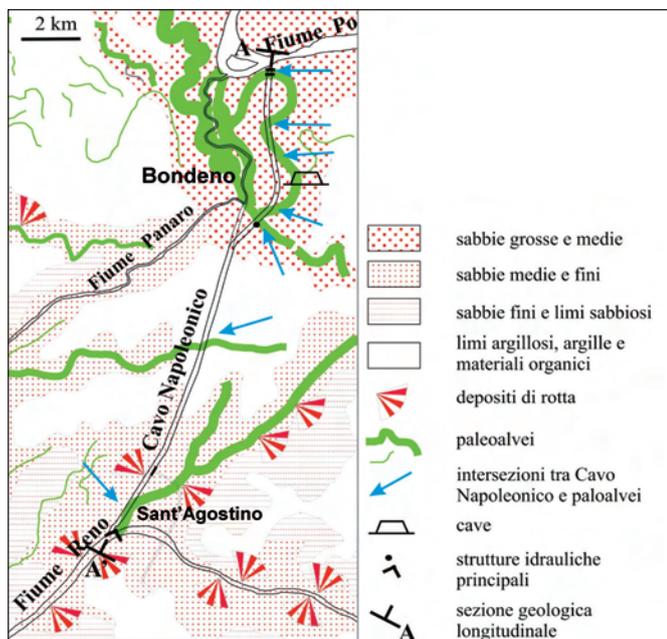


Figura 2. Schema geomorfologico e litologico dell'area (Regione Emilia-Romagna, 1990, modificata). Le frecce blu evidenziano i segmenti del Cavo Napoleonico dove l'alveo del canale interseca i paleoalvei del Po.

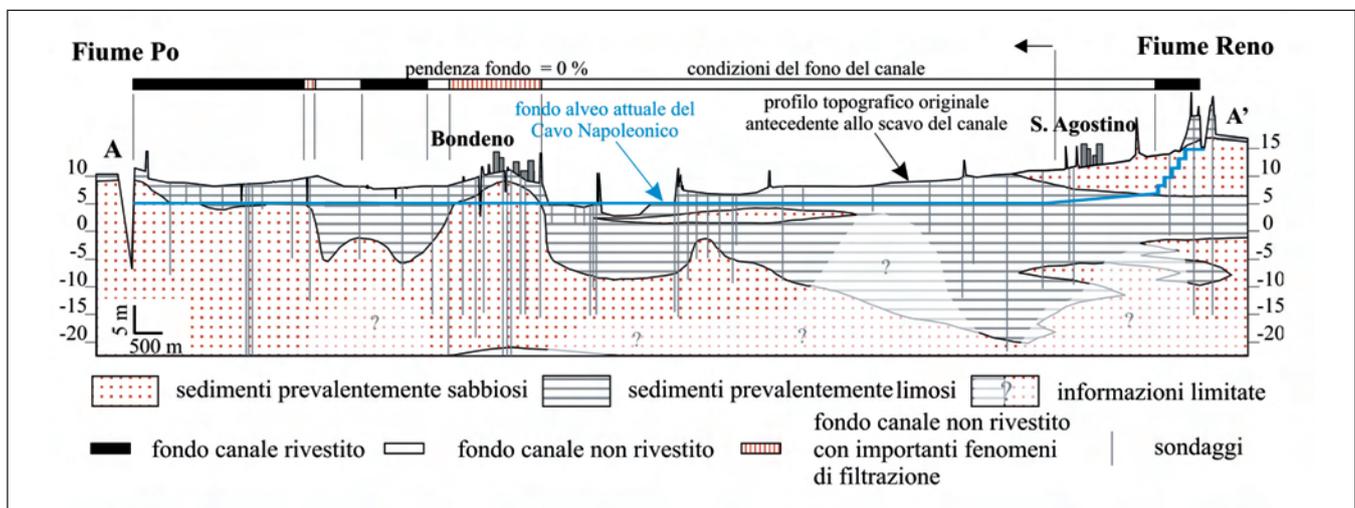


Figura 3. Sezione geolitologica longitudinale semplificata lungo l'asse mediano del Cavo Napoleonico (da Mazzini *et alii*, 1996 modificata).

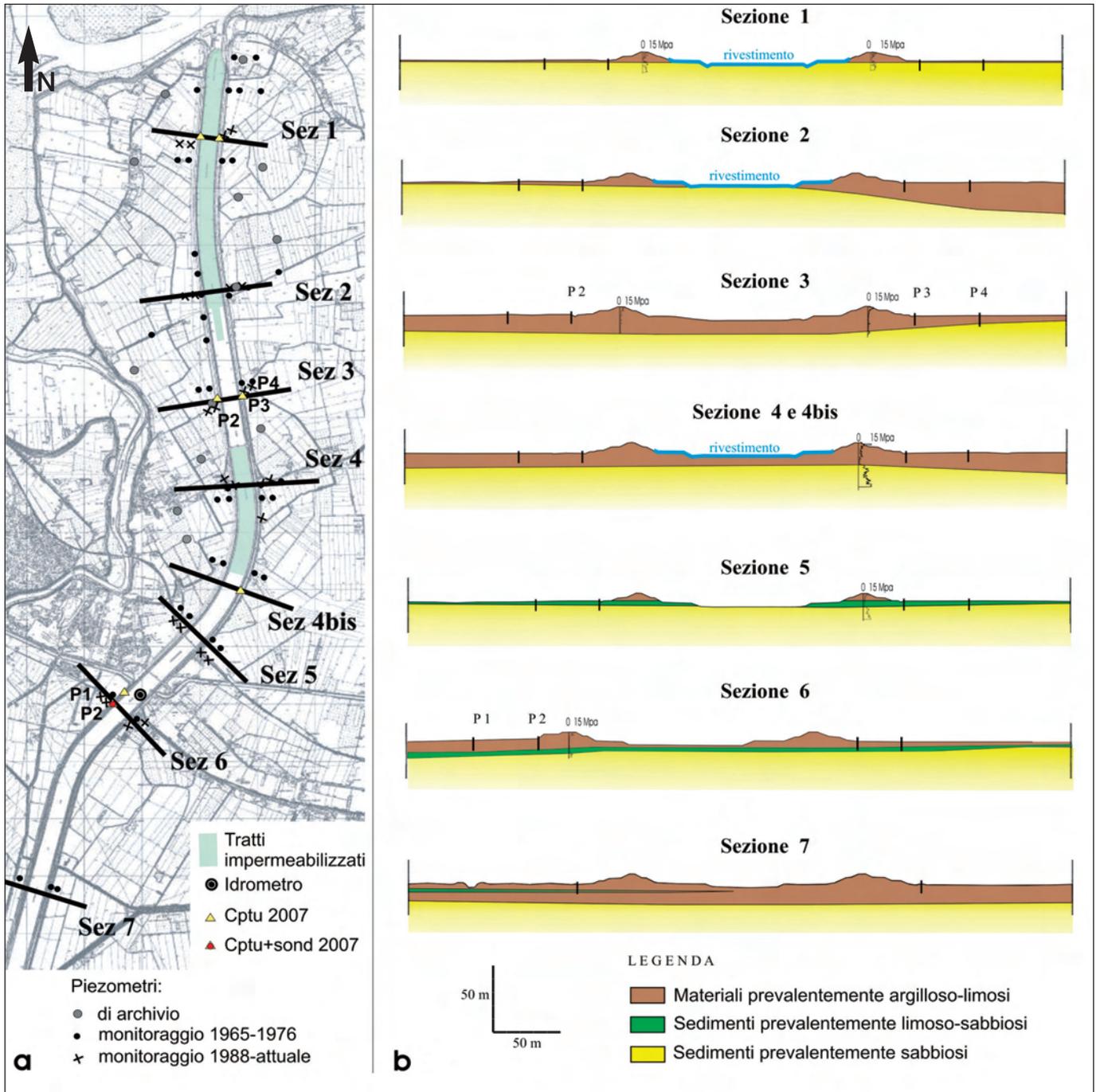


Figura 4. a) Area di studio con indicati i punti di monitoraggio (storici di archivio e attuali in continuo); b) Sezioni di studio e di monitoraggio piezometrico. (Scala d'origine 1:5.000)

Bacino Reno, relazioni tecniche inedite). I piezometri sono stati installati più volte nel corso degli ultimi 40 anni, ma la loro distribuzione è stata mantenuta fissa nei pressi di alcune sezioni trasversali al corso d'acqua artificiale, ritenute le più significative. In Figura 4b viene illustrata l'ubicazione dei piezometri lungo il tratto critico del Cavo Napoleonico compreso tra l'abitato di Bondeno (Fe) e l'Opera Po. A causa delle sostituzioni e rilocalizzazioni subite dai piezometri nel corso degli anni, la serie dei dati presenta molte discontinuità.

A titolo esplicativo, in Fig. 5 sono confrontate le fluttuazioni piezometriche di 4 sezioni (1, 5, 6 e 7 di Fig. 4), utilizzando da 1 a 4 piezometri per ogni sezione. Tali sezioni illustrano l'effetto congiunto dei due corsi d'acqua principali (Po e Cavo) sulla filtrazione da e per la falda più superficiale.

In particolare, si evidenzia come la realizzazione del rivestimento del fondo induca un drastico abbassamento dei carichi piezometrici. In corrispondenza di tali sezioni, infatti, i piezometri passano da un primo periodo (anni

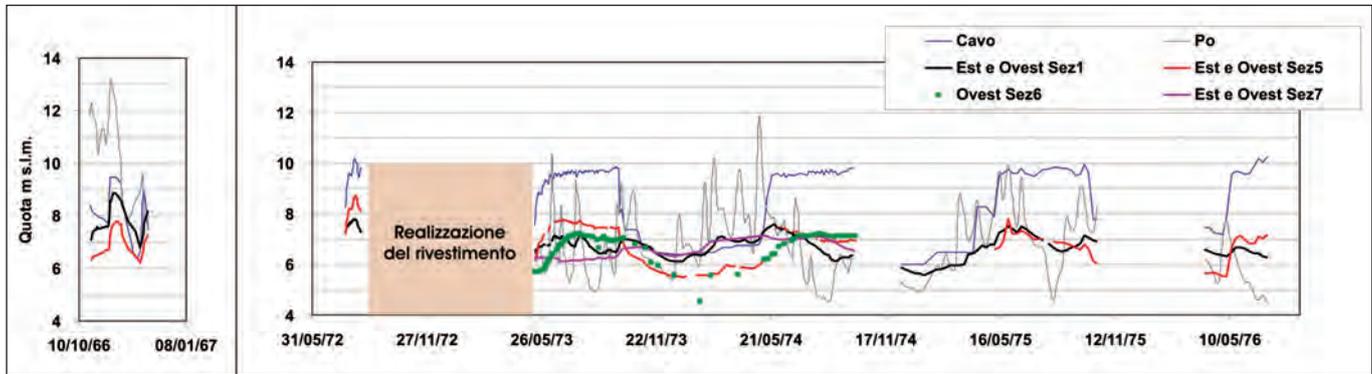


Figura 5. Monitoraggio idrogeologico del Cavo Napoleonico nel periodo 1966-1967 e successivamente nel periodo 1972-1976, relativo ad alcuni piezometri appartenenti alle sezioni 1, 5, 6 e 7 di Fig. 4.

'60), in cui riflettevano esattamente lo stesso comportamento dei livelli di innalzamento del Cavo, ad una fase che perdura sino ad oggi, in cui mostrano, con effetto quasi immediato, lo stesso trend idrometrico del fiume Po (si noti il grafico Est e Ovest Sez1 in Fig. 5). La Sez. 7, sebbene non rivestita, mostra un andamento poco influenzato dai corsi d'acqua, essendo caratterizzata da un fondo canale prevalentemente argilloso. Per tale motivo il suo monitoraggio è stato abbandonato nel 1974.

Le Sez. 5 e 6 denotano un'influenza composita dei carichi idraulici del Po e, soprattutto, del Cavo. Per comprendere meglio il comportamento delle sezioni di monitoraggio sono stati selezionati alcuni piezometri, i cui andamenti vengono proposti in un arco temporale annuale (2005-2006) nel diagramma di Fig. 6.

La risposta dei piezometri posizionati in prossimità dei segmenti non impermeabilizzati del Cavo (Sez. 5, Sez. 6) è quasi immediata. I piezometri posti nei segmenti impermeabilizzati (Sez. 1, Sez. 3) mostrano invece un andamento non collegabile, se non in misura molto ridotta, alle fluttuazioni del canale. I dati idrochimici e pluviometrici confermano le tendenze del flusso idrico da e per il fondo non impermeabilizzato del Cavo Napoleonico (Colombani *et alii*, 2007).

5 - MODELLO GEOLOGICO-GEOTENICO DELLE ARGINATURE

Rispetto al tipico modello arginale valido per i fiumi del bacino del Fiume Reno (Mazzini e Simoni, 2004), nel Cavo Napoleonico, a partire da Bondeno verso Nord, è possibile distinguere le unità arginali in:

A_{new} , corrispondente agli ultimi rialzi artificiali degli anni '60 (sabbia limosa);

A_{old} , corrispondente agli argini di età napoleonica (limo argilloso);

$B2$, corrispondente ai sedimenti di piana inondabile da prossimali a distali (limo e/o alternanze di limi e sabbie);

$B3$, corrispondente alle sabbie dell'antico paleoalveo.

In Tab. 1 sono riportate alcune proprietà di tali terreni.

Tabella 1: Principali parametri geotecnici delle unità litologiche di riferimento.

Unità	γ_d [kN/m ³] peso unità volume	W_n [%] Contenuto in acqua	k_{min} [m/s] Permeabilità minima	k_{max} [m/s] Permeabilità massima	S [%] sabbia	L [%] limo	A [%] argilla
A_{new}	1,61	12,53	2,80E-06	7,41E-04	60	29	11
A_{old}	1,65	24,09	1,44E-07	7,10E-07	4	56	40
$B2$	1,38	31,9	1,30E-07	6,90E-07	2,5	64,5	33,0
$B3$	1,44	36,18	8,20E-06	1,50E-05	91,0	7,5	1,5

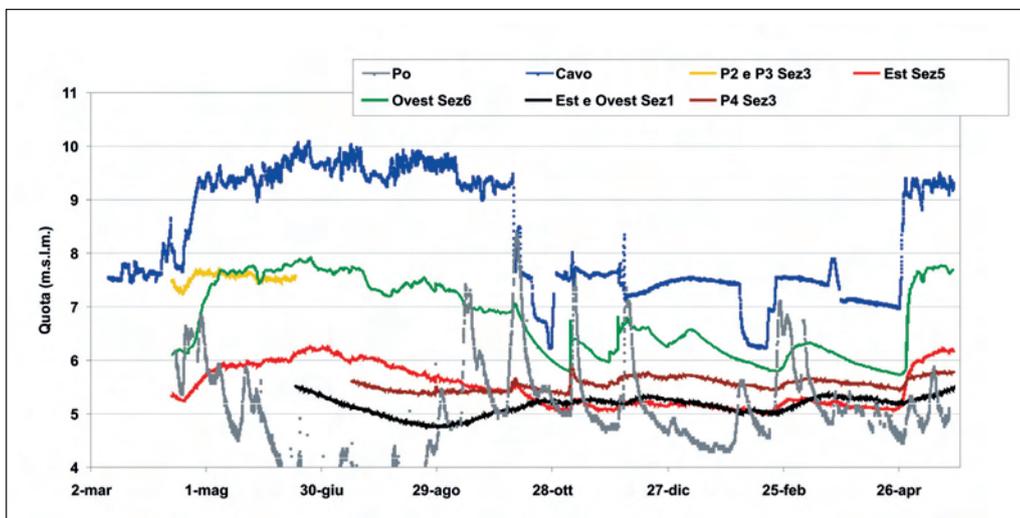


Figura 6. Monitoraggio idrogeologico del Cavo Napoleonico nel periodo 2005-2006 di alcuni piezometri appartenenti alle Sez. 1, 2, 5 e 6 di Fig. 4.

La distinzione in A_{new} e A_{old} è basata sui dati delle recenti indagini geognostiche. In particolare, le CPTU del 2007 hanno evidenziato una composizione più sabbiosa della porzione sommitale dell'argine (che si estende sino a 2-3 m di profondità) corrispondente ai rialzi eseguiti nel 1965.

Per quanto riguarda le caratteristiche di permeabilità dei materiali costituenti gli argini, queste sono state indagate mediante l'esecuzione di specifiche prove in situ. Dai risultati di tali prove, suffragate anche dai dati di laboratorio geotecnico, si è riconosciuto come l'unità A_{old} e l'unità $B2$, differiscono tra loro solo per un diverso grado di compattazione; è per tale motivo che il modello geologico-geotecnico di Fig. 7 le accorpa in una sola unità.

6 - RILEVAMENTO CON GEORADAR

Allo scopo di dare continuità spaziale alla già notevole quantità di dati geognostici a disposizione per lo studio (Regione Emilia-Romagna Servizio Tecnico Bacino Reno, rel. tecniche inedite), circa 3 km di argini del Cavo Napoleonico sono stati indagati mediante l'utilizzo del *Ground Penetrating Radar* (GPR) (Biavati *et alii*, 2008). Rispetto alle tecniche tradizionali di prospezione geofisica, il GPR garantisce un'elevata risoluzione spaziale del dato, con una velocità di acquisizione nettamente superiore ai metodi geoelettrici e sismici; tuttavia, la sua profondità di penetrazione è fortemente limitata quando si indagano materiali a granulometria fine.

Il GPR è uno strumento basato sull'interpretazione delle riflessioni che si producono nel sottosuolo a seguito dell'immissione di un treno di onde elettromagnetiche (EM), a frequenze che possono assumere valori tra 50 MHz e 1 GHz. In base ai differenti tempi di riflessione del segnale EM all'interfaccia tra materiali dalle diverse caratteristiche elettriche, è possibile risalire alla profondità di tali contatti e discontinuità. Diffuso per la sua capacità di localizzare cavità ed oggetti sepolti come tubature e condotte (Lester & Bernold, 2007), oppure per l'ispezione di tunnel e miniere (Cardarelli *et alii*, 2003), esso ha trovato utilizzo anche in ambito geologi-

co (si veda ad esempio Otto & Sass, 2005, Jol & Bristow, 2003). Soltanto in tempi recenti, in seguito a disastrosi eventi alluvionali, le applicazioni del GPR sono state rivolte allo studio dei rilevati arginali (Morris, 2005; Niederleithinger *et alii*, 2007).

L'utilizzo del GPR lungo gli argini del Cavo Napoleonico ha permesso di individuare anomalie presenti all'interno del rilevato (dovute ad esempio a porzioni di argine ricostruito, rialzi arginali, discontinuità stratigrafiche, presenza di corpi sepolti/conduitture) e, nel caso specifico, di definire con accuratezza le intersezioni del tracciato del canale con quello del paleoalveo sepolto. Il rilievo principale, di circa 2 km, è stato eseguito su manto stradale a base argine, mentre altri profili, per un totale di circa 1 km, sono stati svolti in corrispondenza di testa e gradoni laterali. In Fig. 8 sono riportati parte dei profili realizzati sul corpo arginale.

In particolare, i radargrammi riportati in Fig. 8a e 8b, si riferiscono a tratti arginali per i quali i dati da CPTU (Sez. 3 e 4bis in Fig. 4) indicano il tetto delle sabbie rispettivamente a 10 m e 2 m di profondità dalla testa argine. Il rilievo GPR, eseguito con antenna 100 MHz lungo la porzione arginale compresa tra le due CPTU, ha evidenziato l'andamento del tetto delle sabbie: sono ben riconoscibili, infatti, al di sotto dell'asfalto, due differenti risposte del terreno al segnale EM prodotto. La prima parte del rilievo (Fig. 8a) non mostra riflessioni evidenti entro i limiti di penetrazione del segnale (4-5 m); l'ultimo tratto del rilievo (Fig. 8b), mostra intorno a 2,5 m di profondità una discontinuità evidente, interpretata come corrispondente al passaggio tra le unità $B2$ (limi sabbiosi) e $B3$ (sabbie del paleoalveo).

Infine, sempre lungo un tratto del Cavo Napoleonico, il rilievo GPR ha portato all'identificazione di un'interessante anomalia (ampia circa 20 m e profonda 1,5 m), corrispondente ad una discontinuità litologica ed interpretata come un riempimento arginale con materiale di riporto (Fig. 8c). Misure in sito hanno confermato la presenza di materiali più grossolani in corrispondenza di tale riempimento, caratterizzati da valori di permeabilità di 2 ordini di grandezza superiori rispetto alle zone ad esso adiacenti.

Sebbene nel Cavo Napoleonico la presenza di litologie fini e di un livello di falda prossimo a p.c. abbiano influenzato fortemente la penetrazione del segnale, limitata a 1,5-2 m per l'antenna 200-600 MHz e 4-5 m per l'antenna 100 MHz, il GPR si è rivelato una tecnica idonea per lo svolgimento di indagini in cui si necessiti di informazioni superficiali molto dettagliate ed in tempi brevi (Mori, 2009).

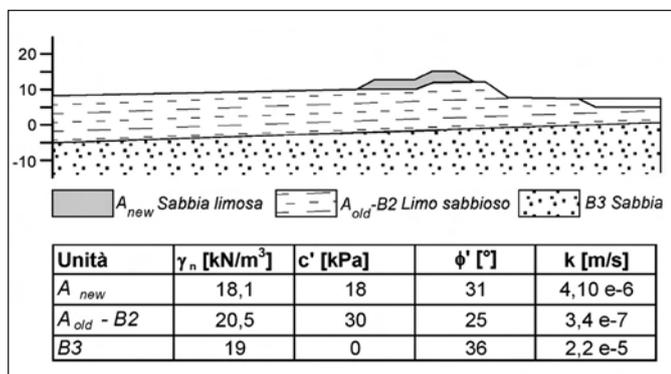


Figura 7. Dettaglio del modello geologico-geotecnico del Cavo Napoleonico in corrispondenza della Sez. 6.

7 - VERIFICHE IDRAULICHE E GEOTECNICHE

Con le informazioni raccolte dall'analisi storica, dal monitoraggio piezometrico e dalle indagini geognostiche è stato realizzato un modello numerico delle argi-

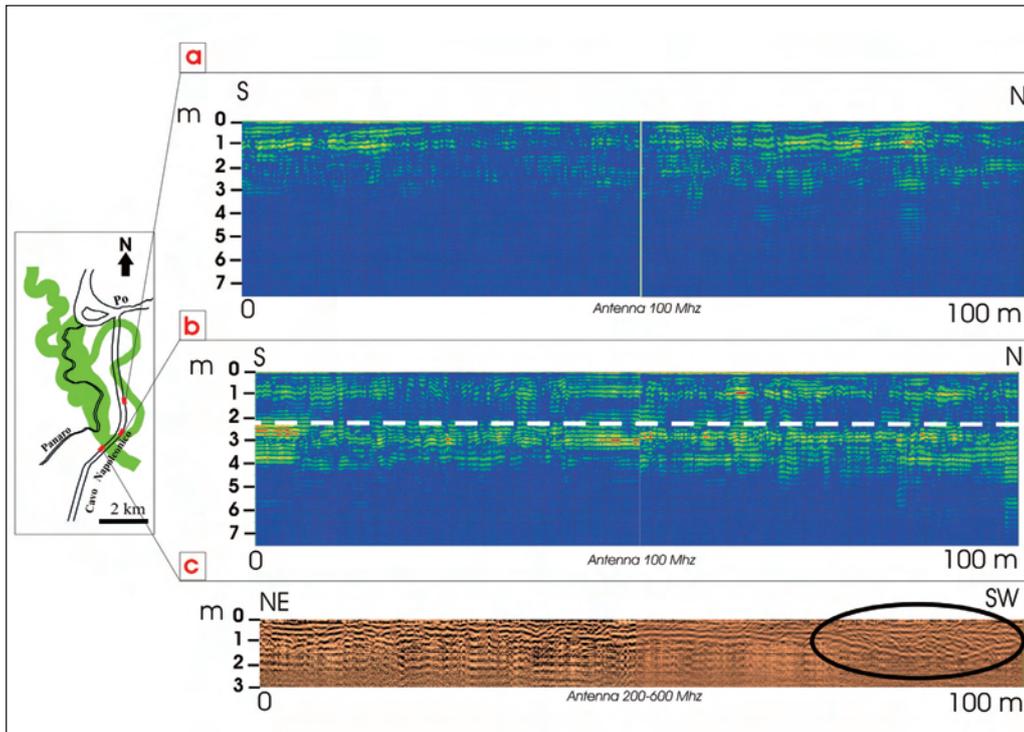


Figura 8. Profili georadar: a) radargramma assiale all'argine, in corrispondenza della Sez. 3 di Fig. 4; b) radargramma assiale all'argine, in corrispondenza della sez. 4bis di Fig. 4; c) anomalia corrispondente ad una discontinuità litologica ed interpretata come un riempimento arginale con materiale di riporto.

nature del Cavo Napoleonico, finalizzato alla verifica della tenuta idraulica e della stabilità degli argini del canale nell'ipotesi di innalzamento del livello idrometrico da quello attuale di utilizzo di 9 m s.l.m. al massimo di progetto di 14,5 m. Per le analisi è stato utilizzato il codice di calcolo agli elementi finiti Seep/w (Krahn a, 2004) che permette di studiare i processi di filtrazione in ipotesi di stato transitorio. Le sezioni scelte per l'analisi sono tutte situate dall'abitato di Bondeno verso Nord (Sez. 1, 3, 4bis e 6 di Fig. 4) per le quali si hanno a disposizione anche dati dalle più recenti indagini geognostiche. Le sezioni sono state discretizzate in regioni corrispondenti alle unità del modello geologico-geotecnico riportato in Fig. 7, con elementi quadrangolari di 2 m di lato.

Come condizioni al contorno laterali al canale si è considerata la presenza di una falda a una profondità dal p.c. tale da rispettare i livelli misurati nei piezometri; in corrispondenza del piano campagna viene consentita la fuoriuscita di acqua (*seepage boundary*) nel caso di condizioni di filtrazione dal canale verso l'esterno dell'argine, e nella porzione compresa tra gli argini il carico idraulico corrisponde all'acqua all'interno del canale. Per quanto riguarda le condizioni iniziali, si è considerato un livello del canale corrispondente a quello minimo di utilizzo (7,5 m s.l.m.).

La calibrazione dei modelli è stata eseguita per la Sez. 6 sulla base della risposta piezometrica dei piezometri P1 e P2 (Fig. 4b) all'abbassamento controllato del livello del canale di circa 2 m. La risposta di tale abbassamento è di circa 1,5 m in P2 e di 0,5 m in P1.

Le analisi in stato transitorio sono state eseguite impo-

nendo un aumento del livello idrometrico costante e graduale da 7,5 a 14,5 m s.l.m. in 30 giorni. In tali condizioni si verifica impaludamento su uno o su entrambi i fianchi esterni arginali ancor prima del raggiungimento del livello massimo, in un tempo variabile da sezione a sezione. E' stata, quindi, modificata la curva idrometrica impostando un livello massimo diverso per ogni sezione tale da garantire condizioni di sicurezza per un certo tempo. Dai risultati (Fig. 9) si osserva come in corrispondenza della Sez. 3 sarebbe possibile portare il livello idrometrico a 14 m s.l.m. in sicurezza. Rispetto alla Sez. 4bis, invece, il livello non può essere rialzato più di 11,75 m s.l.m., in quanto dopo poco più di 3 giorni si verifica impaludamento a partire dal fianco orientale. La Sez. 6 presenta una situazione intermedia tra quelle analizzate, in quanto permette di innalzare in sicurezza il livello a 12,5 m. La sezione 1 è in corrispondenza del fondo impermeabilizzato del canale. Al fine di verificare la capacità di tenuta dell'impermeabilizzazione, si è ipotizzata l'esistenza di perdite nel rivestimento stesso: con il livello del canale a 11,75 m s.l.m.: dopo 6 giorni si verificherebbero fuoriuscite d'acqua a lato campagna.

Le analisi di stabilità all'equilibrio limite (Slope/w, Krahn b, 2004), sono state effettuate sia nelle condizioni idrauliche precedentemente descritte, sia in condizioni di svasso rapido, ipotizzando un abbassamento da 11,75 m a 7 m s.l.m. in 9 ore. Tali condizioni hanno indotto alla scelta di eseguire verifiche a lungo termine, in termini dunque di sforzi efficaci (Pilot *et alii*, 1982). Le verifiche sono state eseguite anche in condizioni sismiche (pseudostatiche), applicando un

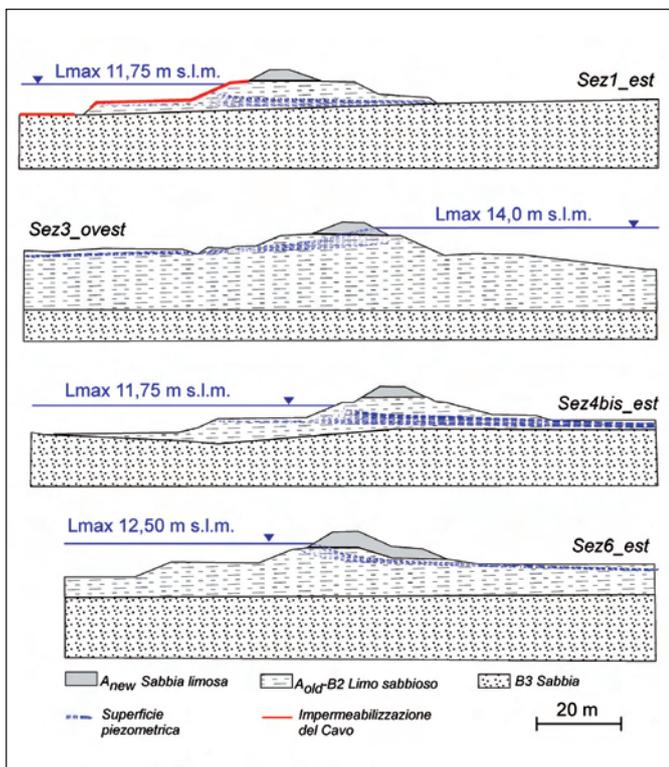


Figura 9. Variazione della superficie piezometrica in funzione dell'innalzamento del livello dell'acqua all'interno del canale fino al massimo invaso (L_{max}) per le quattro sezioni di studio (dettaglio del lato della sezione più a rischio).

sima con accelerazione orizzontale massima (a_0) pari a $0,15g$. I risultati indicano che in nessuna delle sezioni di studio vengono raggiunte condizioni di instabilità dei rilevati arginali: il fattore di sicurezza minimo ottenuto è pari a 1,3, in corrispondenza del lato interno dell'argine orientale della sezione 4bis e nell'ipotesi di svaso rapido (Fig. 10).

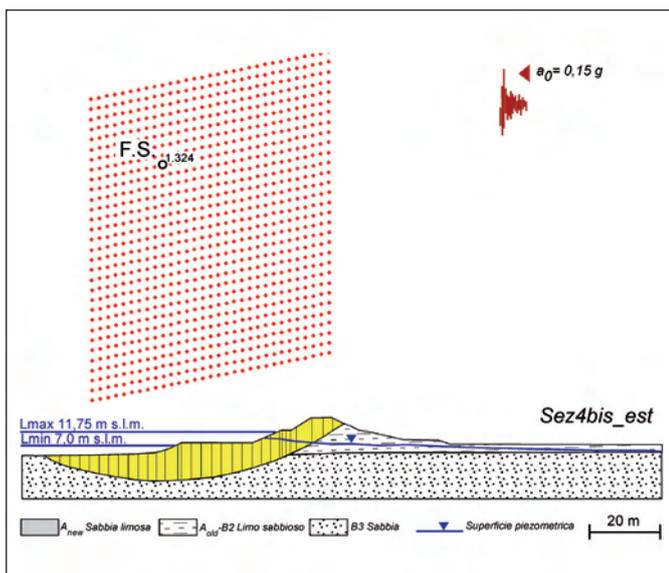


Figura 10. Analisi di stabilità pseudostatica nell'ipotesi di svaso rapido del Cavo Napoleonico: risultato relativo alla sezione 4bis_est.

8 - CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il Cavo Napoleonico, costruito per far fronte a più problematiche nel quadro del delicato equilibrio del sistema idrico del Bacino del Fiume Reno, richiede un costante monitoraggio dei suoi argini al fine di garantire la funzionalità dell'opera nel contesto geologico e idrogeologico esistente.

Il lavoro illustra le caratteristiche geomorfologiche dell'area in relazione al tracciato del Cavo, esamina ed elabora i dati di archivio disponibili relativi al monitoraggio piezometrico per un quarantennio, descrive i risultati di alcune nuove indagini geognostiche condotte con la metodologia Georadar ed infine, presenta l'analisi dei moti di filtrazione e di stabilità degli argini in previsione di una futura funzionalità dell'opera in condizioni di massima capacità di invaso.

Ogni tematica sviluppata ha portato ad un aggiornamento delle conoscenze:

- l'interferenza tra l'alveo del Cavo Napoleonico ed un paleoalveo del Po, intersecato più volte nel tratto tra Bondeno e la confluenza con il Fiume Po, è fondamentalmente la causa dei problemi di filtrazione che affliggono il canale sin dal suo primo utilizzo. Ad essa sono quindi riconducibili i complessi rapporti tra gli acquiferi;
- il monitoraggio piezometrico ha evidenziato come i tratti del Cavo Napoleonico impermeabilizzati mediante rivestimento del fondo e delle golene con lastre di calcestruzzo siano ancora in grado di garantire un sufficiente isolamento della falda dall'influsso delle variazioni dei carichi idraulici del canale, mentre i tratti non rivestiti, ma in comunicazione con il paleoalveo del Po (Sez. 3, 5 e 6, e secondariamente sez. 7 di Fig. 4) reagiscono al riempimento dello scolmatore in modo complesso. Nelle fasi di riempimento del canale sono state notate influenze dirette sulla falda, mentre nel periodo invernale, quando il Cavo è vuoto, è il sistema idrografico principale, in particolare il livello del Fiume Po, a determinare le fluttuazioni della falda;
- i rilievi GPR, eseguiti ad integrazione di altri tipi di indagine sia dirette che indirette disponibili per l'area, sono in grado di individuare alcuni tipi di anomalie nella struttura arginale difficilmente riconoscibili con altre metodologie. Nonostante la profondità di indagine di tale strumento sia limitata, a causa della presenza di terreni fini a circa 2,5 m dal p.c., esso è risultato utile per affrontare due problematiche differenti: l'identificazione di zone a differente granulometria dei materiali all'interno dei rilevati e la ricostruzione della stratigrafia della base arginale. L'identificazione di anomalie strutturali all'interno del corpo arginale o del substrato rappresentano luoghi di debolezza dell'argine stesso e fattori predisponenti all'innescarsi di fenomeni di sifonamento o rottura arginale. La metodologia Georadar (applica-

ta estensivamente ad oltre 15 km di rilevati arginali del Fiume Reno) si è rivelata in grado di indagare alcune caratteristiche delle strutture arginali; tuttavia, il suo impiego fornisce risultati precisi ed immediati solo nel caso di indagini di dettaglio a debole profondità (Biavati *et alii*, 2008);

infine, nella previsione di un innalzamento del livello di invaso dall'attuale massimo di utilizzo di 10 m s.l.m. al massimo di progetto pari a 14,5 m s.l.m., i modelli di filtrazione hanno evidenziato che, per evitare impaludamenti a lato campagna, la massima quota di invaso non dovrebbe superare gli 11,75 m s.l.m.. Sebbene, dunque, non possa essere migliorata di molto la capacità di invaso, l'aumento stimato di portata irrigua gioverebbe nei periodi di crisi idrica; la funzione di scolmo delle piene del Fiume Reno non sarebbe compromessa in quanto necessaria in altri periodi dell'anno. In tali condizioni, la stabilità dei rilevati risulta garantita anche in condizione di sollecitazione sismica ed ipotizzando condizioni realistiche di svasso rapido rispetto alla massima portata in uscita del canale.

L'approccio interdisciplinare utilizzato ha permesso un aggiornamento del modello geologico-geotecnico del Cavo Napoleonico ed ha fornito indicazioni importanti ai fini della sicurezza territoriale, utilizzabile sia ai fini di una corretta manutenzione e gestione dell'opera idraulica esistente, sia in prospettiva della realizzazione di nuovi bacini per la laminazione delle piene. Una lacunosa conoscenza del contesto geologico, geomorfologico e idrogeologico nel quale l'opera si inserisce, infatti, rischia di introdurre ulteriori problematiche sull'attuale fragile sistema idrico di pianura. Lo studio intende aprire la strada a futuri approfondimenti di carattere idrogeologico e idraulico che potranno avere rilevanza anche dal punto di vista della tutela e dello sfruttamento sostenibile delle risorse idriche, affrontando altresì il delicato tema dell'inquinamento delle acque superficiali, come le recenti cronache ci hanno menzionato.

BIBLIOGRAFIA

- Biavati G., Ghirotti M., Mazzini E., Mori G., Todini E., 2008. The use of GPR for the detection of non-homogeneities in the Reno River embankments (North-Eastern Italy). In: J. Locat, D. Perret, D. Turmel, D. Demers et S. Leroueil (Eds.). Proceedings of the 4th Canadian Conference on Geohazards: From Causes to Management. Presse de l'Université Laval, Québec, 133-140.
- Bondesan M., 2001. L'evoluzione idrografica e ambientale della pianura ferrarese negli ultimi 3000 anni. Storia di Ferrara, Vol. 1, Territorio e Preistoria, Corbo Ed., 228-263.
- Cardarelli E., Marrone C., Orlando L., 2003. Evaluation of tunnel stability using integrated geophysical methods. Journal of Applied Geophysics 52, 93- 102.
- Carminati E., Martinelli G., 2002. Subsidence rates in the Po Plain, northern Italy: the relative impact of natural and anthropogenic causation. Engineering Geology 66, 241-255.
- Colombani N., Gargini A., Mastrocicco M., Messina A., 2007. L'acquifero di Settepolesini di Bondeno: una risorsa idrica potenzialmente alternativa per l'attingimento idropotabile della provincia di Ferrara. In: Atti del Convegno Risorse Idriche sotterranee della provincia di Ferrara, a cura della Regione Emilia-Romagna, 63-80.
- Jol H.M., Bristow C.S., 2003. Ground Penetrating Radar in sediments. Geological Society Special Publication No. 211, London.
- Krahn J., 2004 (a). Seepage modelling with Seep/W. GeoSlope International Ltd., Calgary, Alberta, Canada, 398 pp.
- Krahn J., 2004 (b). Stability modelling with Slope/W. GeoSlope International Ltd., Calgary, Alberta, Canada, 396 pp.
- Leoni G., 1994. Idrografia e bonifica del bacino del Reno: notizie storiche. Consorzio della Bonifica Renana. Grafiche A&B, Bologna, 126 pp.
- Lester J., Bernold L.E., 2007. Innovative process to characterize buried utilities using GPR, Automation in Construction 16, 546-555.
- Mazzini E., Simoni G., 2004. Aspetti geotecnici ed idraulici degli argini fluviali nella pianura del Bacino del Reno. In: Atti del XXII Congresso Nazionale di Geotecnica, 22-24 Settembre 2004, Palermo, 555-562.
- Mazzini E., Luciani P., and Simoni G., 2006. The "Cavo Napoleonico" Channel: from the past to the present hydraulic risk reduction programs. In: Culshaw, M. et alii (eds.): IAEG 2006 'Engineering geology for tomorrow's cities', Nottingham, United Kingdom, 6-10 September 2006. Geological Society of London, Paper Number 99.
- Mori G. 2009. The use of Ground Penetrating Radar and alternative geophysical techniques for assessing embankments and dykes safety. Tesi di Dottorato in Modellistica Fisica per la Protezione dell'Ambiente, Università di Bologna, XXI Ciclo.
- Morris M. 2005. Investigation of Extreme Flood Processes and Uncertainty, Project IMPACT, Final Technical Report, 72 pp. Project website: www.impact-project.net
- Niederleithinger E., Weller A., Lewis R., Stötzner U., Fechner Th., Lorenz B., Nießen J., 2007. Evaluation of Geophysical methods for River Embankment Investigation. In: Proceedings of EFRM, Dresden, 6-7 February 2007. Project website: <http://www.deistrukt.bam.de/>
- Otto J.C., Sass O., 2005. Comparing Geophysical Methods for Talus Slope Investigation in the Turtmann Valley (Swiss Alps). Geomorphology 76, 257-272.
- Pilot G., Trak, B., La Rochelle, P. 1982. Effective stress analysis of the stability of embankments on soft soils. Canadian Geotechnical Journal 19, 433-450.
- Regione Emilia-Romagna Servizio Tecnico Bacino Reno. Documentazione tecnica archiviata presso l'Archivio Regionale di San Giorgio di Piano (BO). (Relazioni tecniche inedite).
- Severi P., Laruccia N., Frassinetti G., 2002. Cartografia della vulnerabilità degli acquiferi: contributi della geologia e dei suoli. In: Atti del Terzo seminario di cartografia geologica, Bologna febbraio 2002, 36-43.