



Commissione tecnico-scientifica
per la valutazione delle cause all'origine della rotta arginale lungo il fiume Panaro
in località Gaggio di Castelfranco Emilia



Relazione di dettaglio

Giovanni Menduni (Presidente)
Roberto Cocchi
Luca Manselli
Paolo Simonini

Marzo 2021

Sommario

Premessa	5
Posizione del problema e impostazione metodologica.....	7
Finalità e contesto generale	7
Considerazioni di carattere generale.....	7
Ulteriori considerazioni generali in merito alle possibili cause del dissesto	8
Linee di attività della Commissione.....	11
Parte prima: l'evento.....	12
Ubicazione e tempistica.....	12
Estensione dell'evento ed effetti al suolo	15
Ricostruzione del deflusso delle acque	24
Misure adottate per la gestione dell'emergenza	24
Parte seconda: la catena delle forzanti	25
Il bacino del Panaro	25
Considerazioni generali sulle forzanti idrologiche e idrauliche.....	25
La sollecitazione sul bacino chiuso alla cassa di espansione.....	27
La gestione della cassa di espansione in corso di evento.....	38
La sollecitazione idrologica nel sito di rotta	44
Parte terza: l'analisi di sito	47
Breve ricostruzione storica delle rotte del fiume Panaro	47
Collasso arginale parziale del 19/01/2014	49
Sifonamento al piede dell'argine individuato nel 2019.....	50
Inquadramento geologico	52
Caratterizzazione geomeccanica dell'arginatura del Panaro	55
Aspetti relativi al suolo e alla vegetazione nella zona della rotta	61
Caratterizzazione di dettaglio del sito e della struttura dell'argine	64
Ricostruzione geometrica dell'opera collassata.....	64
Descrizione delle indagini geotecniche e geofisiche	66
Indagini geotecniche e geofisiche sul rilevato arginale nella zona della rotta.....	67
Indagine nell'area golenale	68
Indagine nell'area del ventaglio di rotta	69
Indagini nella zona delle tane.....	74
Interpretazione delle indagini e formulazione del modello geotecnico nella zona della rotta	77
Interpretazione delle prove geofisiche.....	77
Interpretazione prove penetrometriche (CPTU e SCPTU).....	79
Interpretazione prove DMT	82

Risultati prove di laboratorio.....	83
Interpretazione delle indagini nella zona delle tane	88
Interpretazione delle prove geofisiche.....	88
Interpretazione delle prove penetrometriche	89
Ulteriori considerazioni sulla morfologia del sito di rotta.....	90
Parte quarta: la struttura nel contesto bio-naturalistico	92
Caratterizzazione faunistica e naturalistica del sito	92
Caratterizzazione faunistica	92
Istrice (<i>Hystrix cristata</i> Linnaeus, 1758)	92
Tasso (<i>Meles meles</i> Linnaeus, 1758)	95
Volpe (<i>Vulpes vulpes</i> Linnaeus, 1758)	98
Nutria (<i>Myocastor coypus</i> Molina, 1782).....	99
Caratterizzazione naturalistica	102
Indagine di campo sullo stato attuale	106
Analisi storica sulla dinamica delle specie fossorie nel sito	110
Gestione faunistica dell'area nel periodo 2016-2018	111
Gestione faunistica dell'area nel periodo 2019-2021	114
Discussione	116
Parte quinta: i meccanismi di collasso.....	119
Descrizione dei potenziali meccanismi di collasso arginale	119
Generalità	119
Osservazioni generali sulle caratteristiche dell'argine nella zona della rotta.....	122
Modellazione dei meccanismi di collasso.....	123
Instabilità della scarpata lato campagna.....	125
Sollevamento e instabilità globale del complesso argine-terreno di fondazione	128
Erosione al piede dell'argine	128
Erosione retrogressiva e sifonamento nel terreno di fondazione.....	129
Erosione concentrata.....	130
Discussione sui possibili meccanismi di collasso	136
Considerazioni conclusive sulla stabilità dell'argine	138
Parte sesta: conclusioni	140
Le piogge.....	140
La concomitanza con lo scioglimento del manto nevoso.....	140
I deflussi a monte della Cassa di espansione.....	141
La Cassa di espansione	141
I livelli a valle della cassa e in fregio all'argine dissestato	141



r_emi.ro.Giunta - Prot. 02/03/2021.0177836.F

Analisi generale di sito.....	141
La manutenzione	143
Indagini geognostiche.....	143
Modelli di collasso strutturale	143
Cause della rotta ed esiti del lavoro della Commissione.....	144
Bibliografia.....	146
Ringraziamenti.....	150

Premessa

Questa relazione presenta il lavoro svolto in forza della determinazione n. 23051/2020 del Direttore generale Cura del territorio e dell'ambiente Ing. Paolo Ferrecchi ove, in attuazione della deliberazione della Giunta regionale n. 1869 del 14/12/2020, che istituisce la "Commissione scientifica avente il compito di valutare le cause della rottura dell'argine destro del fiume Panaro in località Gaggio di Castelfranco Emilia (MO)".

La Determinazione fa riferimento all'evento meteorologico che ha interessato la Regione Emilia-Romagna nei primi giorni del mese di dicembre 2020, con nevicate che hanno coinvolto i comuni dal crinale appenninico fino ai capoluoghi di Provincia lungo l'asse della via Emilia. Le intense piogge dei giorni seguenti, associate ad alte temperature e forte vento, hanno determinato il completo scioglimento del manto nevoso e piene significative lungo numerosi corsi d'acqua, in particolare nel settore centrale del territorio regionale emiliano. In particolare, il Panaro ha raggiunto e superato i massimi livelli storici in numerose le sezioni di misura lungo l'asta fluviale. Nella mattina del giorno 6, in prossimità del transito del colmo di piena, si è determinata una breccia in destra idraulica in località Gaggio di Castelfranco Emilia, cui è seguito l'inondazione di un'ampia porzione di territorio tra le province di Modena e Bologna, in particolare nei comuni di Castelfranco Emilia, Nonantola, Ravarino, Sant'Agata Bolognese e Crevalcore provocando danni ingentissimi.

Ne scaturiva la richiesta di deliberazione dello stato di emergenza di rilievo nazionale, ai sensi dell'art. 24 del "Codice della protezione civile"¹, formulata dal Presidente della Regione Emilia-Romagna con nota del 7 dicembre, cui seguivano ulteriori note il 18 e il 22 dello stesso mese. In conseguenza di ciò il Consiglio dei Ministri, nella riunione del 23 dicembre 2020, deliberava appunto lo stato di emergenza *"in conseguenza degli eventi meteorologici verificatisi nei giorni dal 1° al 10 dicembre 2020 nel territorio delle province di Bologna, di Ferrara, di Modena e di Reggio Emilia"*, stanziando 17,6 milioni, a valere sul Fondo per le emergenze nazionali, per l'attuazione dei primi interventi, nelle more della valutazione dell'effettivo impatto dell'evento in rassegna.

A tale provvedimento faceva seguito l'ordinanza del Capo dipartimento della Protezione civile n 732 del 31 dicembre che, tra le altre cose, nominava il Presidente della Regione in qualità di Commissario delegato.

Intanto la Giunta Regionale, nella seduta del 14 dicembre aveva deliberato, come sopra cennato, di affidare al Direttore Generale per la Cura del Territorio e dell'Ambiente, il compito di costituire un'apposita *"Commissione di elevato profilo tecnico-scientifico avente il compito di analizzare e valutare le cause della rottura arginale del fiume Panaro, al fine di disporre di valutazioni altamente qualificate con la garanzia che le suddette valutazioni siano elaborate e formulate nel rispetto di principi di imparzialità e terzietà rispetto alle attività condotte dai soggetti a vario titolo coinvolti nel sistema regionale di sicurezza territoriale, con riferimento specifico all'ambito fluviale del fiume Panaro"*.

La stessa deliberazione indicava la composizione della Commissione scientifica in quattro membri dei quali un componente dell'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), esperto nella gestione della fauna ad abitudini fossorie, un componente esperto della Direzione Regionale Vigili del Fuoco Emilia-Romagna, due componenti tra docenti universitari altamente specializzati operanti presso atenei italiani particolarmente qualificati in materia idraulica e geostrutturale. Ai fini della scelta dei soggetti esperti, veniva richiesto che i suddetti membri non avessero intrattenuto precedenti rapporti con i soggetti coinvolti nella gestione idraulica del fiume Panaro.

Il Direttore Generale, in accordo con quanto disposto dalla deliberazione, provvedeva ad inviare note all'ISPRA, alla Direzione Regionale dei Vigili del fuoco dell'Emilia-Romagna, al Politecnico di Milano e

¹ Decreto Legislativo 2 gennaio 2018, n. 1

all'Università degli Studi di Padova. A seguito di tali comunicazioni, le Università e le strutture interpellate provvedevano a designare i propri esperti. In particolare,

- l'ISPRA, designava il Dott. Roberto Cocchi, tecnologo del Dipartimento BIO che ha maturato specifica competenza nella gestione della fauna ad abitudini fossorie;
- la Direzione Regionale dei Vigili del fuoco dell'Emilia-Romagna l'Ing. Luca Manselli, Comandante Provinciale dei Vigili del Fuoco di Ravenna;
- il Politecnico di Milano il Prof. Giovanni Menduni, Professore associato per il settore scientifico disciplinare ICAR/01 – Idraulica, presso il Dipartimento di Ingegneria civile e ambientale e docente di "Rischio idrogeologico e protezione civile" e "Hydrology for flood risk evaluation";
- l'Università degli Studi di Padova ha designato il Prof. Paolo Simonini, Professore Ordinario per il settore scientifico-disciplinare ICAR/07 – Geotecnica presso il Dipartimento di Ingegneria civile, edile e ambientale e docente di "Geotecnica" e "Analisi e modellazione geotecnica"

In forza di ciò, il Direttore Generale procedeva così alla costituzione della Commissione formata da tali esperti dando facoltà agli stessi di volta in volta richiedere allo stesso Direttore, per lo svolgimento della propria attività la collaborazione di professionalità presenti nell'organico della Giunta della Regione Emilia-Romagna, l'utilizzo di strumentazione a disposizione presso le strutture regionali, la formulazione di specifiche proposte di acquisizione di beni o servizi esterni.

Compito della Commissione scientifica al termine delle attività, è la consegna al Presidente della Giunta regionale di una relazione tecnica di dettaglio circa le analisi effettuate e le conseguenti valutazioni (la presente relazione), oltre a una relazione di sintesi relativa alle richiamate analisi e valutazioni.

La Commissione, non appena ricevuta comunicazione dell'avvenuta nomina nei giorni immediatamente seguenti alle festività natalizie dello scorso anno, ha immediatamente avviato le proprie attività nella mattinata del giorno 29 dicembre, con una riunione introduttiva presso la sede di AIPO in Modena, in via Attiraglio, cui è seguito un esteso sopralluogo nel sito della rotta ed una ulteriore riunione nel pomeriggio.

La Commissione ha poi proseguito il proprio lavoro, procedendo numerosi incontri e sopralluoghi, svolti considerando le indispensabili precauzioni dovute alla crisi pandemica. Si è acquisito il necessario materiale documentale, cartografico e di letteratura. Si sono disposti ed eseguiti rilievi, sondaggi, analisi e prove di laboratorio come sarà dettagliatamente riportato nel seguito del testo.

Nel corso dell'incarico si è largamente attinto alla disponibilità di numerosi enti ed istituzioni per ricevere informazioni, dati, documenti e prestazione di servizi. In particolare si tratta della Regione Emilia Romagna con la Direzione generale dell'Ing. Ferrecchi, AIPO, Direzione regionale dei Vigili del fuoco, del Comando provinciale dei Vigili del Fuoco di Modena, il Servizio Progetti telematici, Comunicazione e Città Intelligente del Comune di Modena, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale e il Dipartimento di Agronomia, animali, alimenti, risorse naturali e ambiente dell'Università di Padova, il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale del Politecnico di Milano.

In tali rapporti si è avuto cura che ogni valutazione fosse elaborata e formulata nel rispetto di principi di imparzialità e terzietà, in particolare per quanto attiene alle attività condotte dai soggetti a vario titolo coinvolti nel sistema regionale di sicurezza territoriale, con riferimento specifico all'ambito fluviale del fiume Panaro

I lavori si sono conclusi il giorno lunedì 1 marzo 2021, con la consegna della presente relazione e dell'ulteriore documento di sintesi prescritto nella determinazione.

Posizione del problema e impostazione metodologica

Finalità e contesto generale del lavoro

Si è appena ricordato che la Commissione ha il compito di analizzare e valutare le cause della rottura arginale del fiume Panaro avvenuta poco prima delle 6 del mattino in Località Gaggio. L'evento è ampiamente descritto nel Rapporto d'evento di Arpae (Celano, et al., 2020) cui si rimanda in particolare per i caratteri di ordine meteorologico e di inquadramento complessivo del fenomeno nel contesto regionale. Di seguito ne presenteremo gli aspetti salienti ai fini del compito assegnato alla Commissione. Ci limitiamo qui ad accennare che attorno alle 6 del mattino, in località Gaggio, nel tronco compreso tra Ponte S. Ambrogio e Ponte Navicello, si è improvvisamente aperta una breccia nell'argine in sponda destra che poi si è propagata nel corso della mattinata per una lunghezza di circa 80 metri.



Figura 1. Sito della rotta (segnaposto giallo) nel contesto della pianura modenese. In azzurro il corso del Panaro. In bianco i profili delle arginature maestre. (Immagine Google).

Secondo il citato report di evento, il volume di piena fuoriuscito dalla rotta è stato stimato dall'Autorità di bacino dai 7 ai 9 milioni di m³ ed ha allagato un'area di circa 15 km² in direzione nord-ovest, fino a raggiungere il centro abitato di Nonantola ed oltre, in direzione di Bomporto e Ravarino.

L'Agenzia Interregionale per il Fiume Po (AIPo) è intervenuta realizzando la chiusura della falla con massi ciclopici intorno nel giro di poco più di 24 ore dall'evento. I lavori sono poi proseguiti per parecchi giorni, al fine di ripristinare l'impermeabilità del rilevato ricostruito e operare la relativa messa in quota con terreno di adeguate caratteristiche. Per l'ulteriore sicurezza dell'arginatura si è provveduto all'infissione di un palancoato sul lato fiume e ad un ringrosso sul lato campagna.

Considerazioni di carattere generale

Riservandoci, come appena accennato, di descrivere gli ulteriori caratteri dell'evento in altra parte della relazione, conviene adesso riflettere sulla posizione del problema che richiede di individuare le cause del collasso di un'opera nelle seguenti condizioni:

1. la realizzazione dell'argine è molto risalente e oggetto di numerosi rimaneggiamenti nel corso del tempo;
2. il collasso è avvenuto alle prime luci dell'alba, in località relativamente distante dalle abitazioni, tanto da impedire ogni forma di osservazione ed è avvenuta in assenza di testimonianze dirette;

3. la maceria residua, dispersa su l'ampia area del ventaglio di rotta, è reperibile in quantità relativamente molto modesta rispetto al volume originale, essendo la maggior parte stata dispersa e trascinata altrove dalle acque di piena;
4. non sussiste alcuna informazione di ordine progettuale sull'argine, disegno o atto di collaudo;
5. non sussiste alcuna certificazione, informazione scritta, o semplicemente dato osservato sui materiali impiegati sebbene alcune di tali informazioni possano essere inferite per analogia dalle sezioni adiacenti;
6. il sito di rotta è stato necessariamente sconvolto, oltreché dalla piena, dai lavori svolti per il tamponamento della falla e l'ulteriore riparazione che ne hanno modificato radicalmente l'assetto, anche nelle aree immediatamente adiacenti, per via delle centinaia di passaggi di mezzi pesanti e la sistemazione della viabilità ad essi necessaria.



Figura 2. Immagine della rotta ripresa alle ore 8.30 del 6 dicembre, a oltre due ore dall'inizio del fenomeno. La larghezza della rotta è dell'ordine di una decina di metri. Si osserva bene, sull'argine, il massimo livello raggiunto dalla piena al momento del dissesto. Il piccolo casotto di caccia a sinistra nella foto crollerà a breve per erosione del piano di appoggio e sarà ritrovato nel ventaglio di rotta.

Si va dunque ad indagare il fenomeno per via indiretta, senza poter disporre di elementi osservazionali indisturbati quali quelli che è possibile trarre in generale dal teatro del dissesto, quali la natura o la distribuzione delle macerie, l'assetto del suolo, la presenza di elementi endogeni od esogeni da poter in qualche modo ricondurre a possibili elementi causali.

Ulteriori considerazioni generali in merito alle possibili cause del dissesto

Sono altresì note le condizioni idrologiche e idrauliche al momento in cui l'opera è collassata. Al momento conviene riferirsi alle seconde, e cioè al livello in fregio all'argine, lasciando ai prossimi paragrafi quelle sulle portate in transito in rapporto alla sollecitazione meteorologica. In questo senso osserviamo che la breccia non è occorsa in corrispondenza di una sollecitazione sovrachianta rispetto ai limiti di progetto, ma anzi in un momento in cui disponeva ancora di molta della resistenza che teoricamente, avrebbe potuto dispiegare:

è sufficiente l'osservazione dell'immagine di 2 per rendersi conto che, data la larghezza della strada d'argine dell'ordine di 4 metri, il franco residuo, al momento del collasso, è stimabile in poco meno di 1,5 metri.

Non si è dunque trattato di un caso di collasso per sormonto o di dissesto avvenuto con il livello al petto della struttura prossimo alla tracimazione, e dunque nelle condizioni di impegnare la struttura nella configurazione più gravosa prevista in progetto. Se dunque si prescinde dall'ipotesi di una sollecitazione in termini assoluti soverchiante rispetto alle capacità inerenti di resistenza del manufatto è lecito, almeno in linea generale, ipotizzare la concorrenza di fattori quali:

1. vizi occulti o difformità locali di realizzazione, eventualmente aggravatisi con l'azione del tempo e di altre circostanze esogene nel corso della vita tecnica; tra questi si può ipotizzare, ad esempio, la presenza di manufatti relitti all'interno nel corpo arginale quali piccoli manufatti rurali (quali baracche o depositi di attrezzi) poi inglobati nell'argine in occasione di una modifica di percorso o un ringrosso ovvero presenza di antiche chiaviche o tombini (assai frequenti nelle pianure arginate) magari realizzate in tempi remoti per consentire il drenaggio dei campi e poi abbandonate;
2. difetto di manutenzione reiterato al punto da compromettere del tutto la funzionalità dell'opera; in questo senso si fa riferimento al caso di argini severamente colonizzati da piante di alto fusto ed apparato radicale esteso, in grado di determinare una pericolosa azione meccanica sul rilevato allorché sono sollecitate dal vento, ovvero di determinare, attraverso le proprie radici, pericolose discontinuità e presenza di vuoti all'interno dei terreni da costruzione in modo da produrre vie preferenziali per il moto di filtrazione attraverso l'argine e portare a fenomeni di sifonamento;
3. alterazioni, manomissioni o danneggiamenti fatali accaduti tra l'ultimo ciclo di manutenzione o osservazione dell'opera e il momento del collasso; capita più spesso di quanto si pensi che gli argini possano essere manomessi anche severamente dai frontisti, sempre a puro titolo di esempio, al fine di agevolare l'accesso alle coltivazioni in golena, ovvero che vi si possano scavare passaggi per tubazioni che drenano acqua dal fiume a fini irrigui;
4. specifici danni relativi all'azione di animali con capacità fossorie nel corpo dell'argine; questo argomento sarà diffusamente trattato nel corso della relazione; basti qui ricordare che si tratta di problematiche diffuse che sono state poste a causa della rotta di Secchia avvenuta nel gennaio del 2014; si accenna qui che le tane praticate da questi mammiferi all'interno degli argini possono essere costituite da una rete estesa ed articolata di cunicoli in grado di determinare vie preferenziali per i moti di filtrazione e seri problemi per la stabilità della struttura.



Figura 3. Esempio negativo dell'arginatura maestra del fiume Tevere (2014) a valle della Diga di Montedoglio (AR), completamente colonizzata da vegetazione arbustiva e anche di alto fusto, all'interno della quale è presente la struttura di fondazione del traliccio



dell'elettrodotto ad alta tensione (a destra nell'immagine); Il corpo della struttura è stato parzialmente demolito e severamente abbassato dai frontisti per facilitare l'accesso dei mezzi agricoli alla golenata. L'immagine è ripresa da campagna verso fiume. La linea di sponda è in prossimità degli arbusti sullo sfondo. Il sito è stato peraltro oggetto di una alluvione disastrosa nel 2009.

Linee di attività della Commissione

La Commissione ha impostato il proprio lavoro attraverso le linee di azione descritte di seguito.

- ha provveduto, per quanto di interesse, ai fini della individuazione delle cause, alla ricostruzione di quanto accaduto; a tal proposito si spiegheranno, per quanto possibile, le modalità di sviluppo del fenomeno calamitoso e la dinamica degli accadimenti, utilizzando varie fonti e l'interpretazione di immagini da piattaforma aerea e satellitare, oltreché presentare le testimonianze ascoltate nel corso del lavoro della Commissione;
- ha operato una ricostruzione delle aree esondate attraverso un'analisi comparata dei dati reperiti (immagini, interventi ed *assessment* dei soccorritori, immagini e notizie dei media, testimonianza, immagini satellitari, rilievi di amministrazioni ecc);
- ha poi analizzato la catena delle circostanze forzanti che hanno determinato il dissesto; in sostanza si tratta della caratterizzazione dell'evento idrologico in termini di eziologia ed eccezionalità, tanto sul bacino di monte che sul tronco vallivo del Panaro; la Commissione ha dunque valutato il comportamento della Cassa di espansione in località Sant'Anna e le relative modalità di gestione in relazione ad una eventuale causalità o concausalità ai fini del dissesto;
- ha svolto indagini ed analisi a livello documentale e di letteratura, sul sito della rotta e nelle adiacenze al fine di acquisire un quadro completo ed esaustivo del dissesto nell'ambito del contesto circostante; in questo senso si darà conto dell'attività svolta in termini di raccolta e analisi della sequenza degli ortofotogrammi storici ad alta definizione, di elaborazione digitale delle immagini dell'argine in corso di collasso, dei sopralluoghi e delle analisi di sito con il reperimento di campioni tratti dal ventaglio di rotta, dei rilievi di ordine topografico e geognostico e del conseguente lavoro di esami ed analisi di laboratorio
- ha prodotto un inquadramento del contesto bio-naturalistico della struttura, con particolare riguardo alla presenza di mammiferi con attitudini fossorie sul sito di rotta e nelle adiacenze, in relazione, anche in questo caso, ad una eventuale causalità o concausalità ai fini del dissesto;
- sulla base delle osservazioni e del quadro conoscitivo prodotto, ha analizzato i diversi possibili meccanismi di collasso dell'argine, individuando quello che più probabilmente si è verificato nel corso di evento; a tal fine ha ricostruito la geometria dell'argine collassato, ne ha sviluppato il modello geotecnico (compreso il piano di fondazione) e ha svolto un diffuso lavoro di modellazione numerica;
- ha tratto infine le conclusioni e provveduto ad enumerare le cause di quanto accaduto

Parte prima: l'evento

Ubicazione e tempistica

Di tratta di una breccia nell'argine destro del Panaro avvenuta in località Gaggio di Castelfranco, in comune di Castelfranco Emilia, provincia di Modena. Le coordinate geografiche del punto baricentrico dell'evento sono latitudine 44°39'29.52"N e longitudine 10°59'13.81"E. Il tratto di argine collassato è situato tra gli stanti 034dx e 035dx. Il sito è accessibile tramite la Via Tronco dalla quale, in corrispondenza del viadotto ferroviario AV, è possibile l'accesso alla via d'argine.



Figura 4. Sito della rotta (marker giallo) nel contesto territoriale di prossimità. In bianco il tracciato delle arginature maestre. I marker bianchi indicano gli stanti bi-ettometrici di AIPo.

Non sussiste alcuna testimonianza diretta dell'evento di rotta o di eventuali precursori. L'osservazione dell'andamento delle portate all'idrometro di Ponte Navicello, sito circa 1700 metri a valle della rotta mostra una discontinuità nella serie storica delle misure riconducibile all'attivazione di una significativa derivazione delle acque di piena verso campagna.

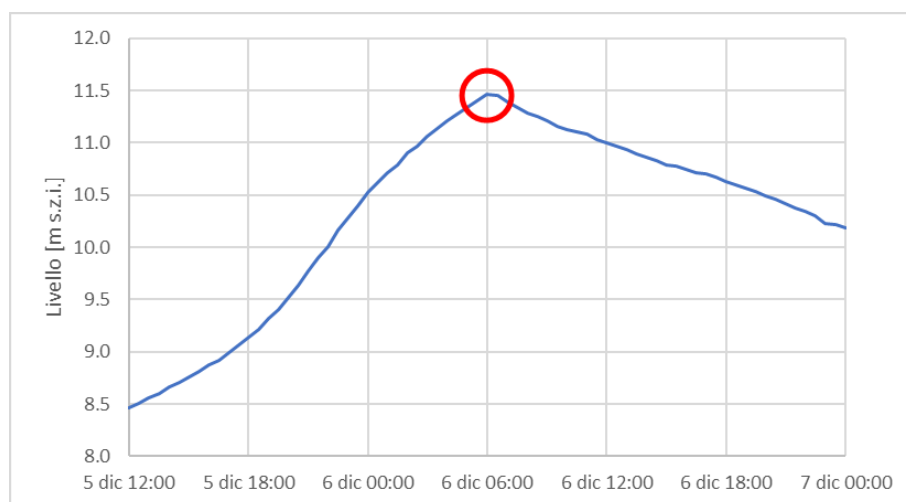


Figura 5. Andamento delle letture idrometriche a Ponte Navicello. Nel cerchio rosso il massimo (11.46 metri sullo zero idrometrico) registrato alle 6:00. I dati sono stati validati da ARPae e sono riferiti all'ora solare locale.

L'Agenzia Prevenzione, Ambiente, Energia dell'Emilia-Romagna (ARPae) ha rilasciato a questa Commissione la serie storica delle osservazioni idrometriche validate al sensore di Ponte Navicello con passo biorario. La serie è utile per la datazione dell'evento di rotta ed è graficata in Figura 5 per il periodo tra le 12:00 del 5 dicembre e le 00:00 del 7 dicembre.

Il diagramma illustra l'andamento cronologico dei livelli idrometrici che raggiungono il massimo alle 6:00 (ora locale) con 11.46 metri sullo zero idrometrico (s.z.i.). Tale valore resta pressoché costante nella successiva mezz'ora, per poi andare e a progressivamente a ridursi. La cuspide (ed il relativo cambio di concavità) nel diagramma testimonia chiaramente l'intervento di una anomalia nella portata in arrivo da monte.

In via orientativa si può dire che il momento nel quale la derivazione della portata dalla breccia è divenuta sensibile, può ricondursi, vista la distanza relativamente breve tra il sensore e la rotta (dell'ordine di 10-15 larghezze dell'alveo) a un periodo di poco antecedente a tale ora.

La rotta, d'altro canto, è stata tutt'altro che istantanea. Nella parte quinta di questa relazione si tratterà diffusamente della meccanica del fenomeno e della relativa evoluzione nel tempo. Basti qui ricordare alcuni fatti utili per inquadrare il problema.

L'evento si è verosimilmente manifestato con una apertura passante nel corpo dell'argine che è andata progressivamente allargandosi sotto l'azione dell'erosione dell'acqua da fiume verso campagna.



Figura 6. La rotta come si è presentata ai Vigili del fuoco giunti sul posto verso le 8:30 del mattino

Un fenomeno analogo è successo nel 2014 300 metri a monte dalla posizione attuale, sul medesimo argine destro e sussiste una testimonianza fotografica in tal senso. L'immagine, assieme ad una discussione approfondita del dissesto, è riportata nella parte quinta di questa relazione. Basti qui ricordare che, ai tempi, il fenomeno fu intercettato e bloccato prima che potesse creare danni rilevanti.

Nel nostro caso, al contrario, il processo è proseguito fino al collasso di una cospicua porzione della struttura. Difatti, quando l'apertura ha raggiunto una dimensione sufficientemente grande rispetto alle dimensioni caratteristiche del rilevato, è avvenuto il crollo della calotta superiore e il conseguente, pieno taglio sagittale del corpo del rilevato. Il meccanismo è andato poi propagandosi per susseguenti erosioni al piede e relativo crollo di porzioni dell'argine per sforzo di taglio dovuto alla perdita di appoggio alla base.



Figura 7. Evoluzione della rotta da immagine dei VVF ripresa alle 9:30 del mattino. Si nota la progressione della distruzione del rilevato rispetto all'immagine precedente.

Tutti i testimoni ascoltati dalla Commissione (in allegato il sono riportate tutte le trascrizioni) riferiscono che la rotta è avvenuta tra le ore 6 e le 7 antimeridiane del 6 dicembre 2020. Alcuni testimoni hanno riferito di essere salite sull'argine alle ore 5 notando ancora un franco cospicuo. Altre ricordano che verso le 6.30 circa vi è stata l'inversione del flusso di un fosso vicino casa: *“allora la notizia l'abbiamo data noi che al mattino alle 6.20, mio marito si è alzato perché non dormiva bene di notte, quindi mi ha chiamato e abbiamo detto ma io sento un rumore di acqua, abbiamo aperto la finestra e abbiamo visto che il fosso davanti a noi “rinculava” scusate l'espressione cioè buttava indietro l'acqua e niente! poi abbiamo visto che stava arrivando l'acqua (testimone M.Z. N.d.R.)”*.

Sempre dalla testimonianza di M.Z. si può avere un'idea anche di una prima evoluzione del fenomeno *“erano le 6.20 del mattino, si vedeva questo specchio d'acqua e non c'era questa grandezza (cioè la rotta d'argine N.d.R) che dopo si è creata”*. Si stima che a metà giornata la breccia abbia raggiunto la sua massima ampiezza dell'ordine degli 80 metri.

La Agenzia interregionale per il Po (AIPo) ha proceduto ad un sopralluogo con il proprio personale attivando, in coordinamento con il sistema di protezione civile presso il CUP di Marzaglia, cinque imprese specializzate. Apprendiamo da AIPo che le prime ore di lavoro sono state impiegate per la formazione delle piste di servizio e accesso per garantire la percorribilità dei mezzi d'opera. Si è lavorato sui due fronti della rotta, lato monte e lato valle: al contrario che nel caso della rotta di Secchia del 2014, la situazione logistica sul Panaro è apparsa subito molto più favorevole in termini di accessibilità dell'argine e di qualità della strada d'argine.

Le prime forniture di massi ciclopici di cava impiegati per la chiusura della falla sono iniziate a partire dalle ore 12 circa dello stesso giorno. I lavori sono proseguiti senza soluzione di continuità consentendo la chiusura della falla alle ore 8.30 del 7 dicembre, a poco più di 24 ore di distanza dalla rottura. Si calcola che siano stati impiegati circa 150 tra bilici e autocarri motrici per il trasporto di circa 4500 tonnellate di massi e circa altrettanti 80 mezzi per il trasporto di spaccato per la formazione delle piste di accesso.

I lavori sono poi proseguiti per diversi giorni ed erano ancora in atto durante i lavori della Commissione. In particolare, si è proceduto con fornitura e messa in opera di terra e argilla per garantire l'impermeabilizzazione del rilevato ricostruito e la messa in quota rispetto all'argine preesistente. Si è inoltre proceduto alla infissione di un palancoleto della lunghezza di circa 100 m e 8 m di profondità, lato fiume e un cospicuo ringrosso arginale lato campagna.

Estensione dell'evento ed effetti al suolo

La ricostruzione delle aree vulnerate in un evento alluvionale costituisce un tema di grande rilevanza. Altre tipologie di evento calamitoso, come ad esempio i terremoti o le frane, lasciano sul campo segni indelebili e rilevabili in maniera relativamente semplice ed accurata. I fenomeni alluvionali sono invece di per sé effimeri e non è immediato accertarne l'estensione areale, visto anche che la dinamica dell'evento si dispiega in condizioni meteorologiche e territoriali di per sé critiche.

La perimetrazione dell'area vulnerata ha al contrario una notevole importanza: di tipo operativo in corso di evento, per la gestione del rientro nell'ordinario durante lo stato di emergenza, e per la stima dei danni e la concettualizzazione di ulteriori modalità di difesa, nel medio periodo.

Stabilire l'estensione delle aree esondate, senza poter effettuare una misura diretta, consiste nella ricostruzione induttiva attraverso osservazioni, notizie e rilievi effettuati durante l'alluvione.

Con tal fine la Commissione ha acquisito:

1. georeferenziazione degli interventi del Corpo nazionale dei Vigili del fuoco effettuati durante l'alluvione. Il dispositivo di soccorso del CNVVF attraverso il supporto del servizio di Topografia Applicata al Soccorso (TAS) registra sul Geoportale VVF la posizione delle squadre per migliorare la gestione delle emergenze e la documentazione delle operazioni. L'acquisizione di tale informazione ha permesso di apprezzare dove gli interventi dei vigili del fuoco sono stati più concentrati, sinonimo di presenza di allagamenti. Gli interventi considerati sono della tipologia: danni d'acqua, recupero beni e soccorso persone;
2. tracce GPS rotte del Reparto volo del CNVVF effettuati durante le operazioni di *assessment* (valutazione) durante il disastro. Durante le emergenze il CNVVF secondo procedura, crea sul Geoportale VVF uno specifico *emergency asset* (tematismo emergenziale) dove si riportano i dati di cui al punto 1. Utilizzando una specifica applicazione, l'equipaggio sorvola i margini dell'area sinistrata seguendo i confini delle aree esondate e riportando così in maniera automatica le tracce sul geoportale, permettendo di stabilire di ottenere la necessaria perimetrazione;
3. immagini e dati satellitari da *earth observation* dei dati provenienti dalle principali piattaforme disponibili con la collaborazione del Dipartimento della Protezione civile nazionale e dell'Agenzia regionale per la sicurezza territoriale e la protezione civile dell'Emilia-Romagna. Le immagini impiegate provengono da due tipi di satelliti: quelli della costellazione COSMO-SkyMed, sviluppati dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI), e quelli della costellazione Sentinel - 1, della European Space Agency (ESA). Entrambi questi gruppi di satelliti sono dotati di radar ad apertura sintetica (SAR), che consentono di ottenere immagini anche quando il cielo è coperto di nuvole e in mancanza di luce. La successiva analisi delle firme spettrali provenienti dai diversi *pixel*, consente di identificare con chiarezza le superfici coperte d'acqua.
4. georeferenziazione delle immagini del disastro, in particolare quelle derivanti dai voli e riprese da terra del CNVVF. Questa operazione ha permesso di affinare e migliorare la stima delle aree alluvionate identificando in base ad elementi specifici la localizzazione della foto e confrontandola con i dati a disposizione;
5. rilievo delle aree esondate effettuate dall'Area tecnica del Comune di Nonantola. La Commissione, avuta notizia che l'Amministrazione comunale aveva proceduto ad una perimetrazione delle aree esondate, ha

acquisito il rilievo per confrontarlo con le altre fonti di informazione e integrare la conoscenza a disposizione;

6. notizie di stampa e più in generale dei media. Si è proceduto alla georeferenziazione delle notizie provenienti da diversi canali, nell'ottica di affinare l'estensione delle aree alluvionate e verificare e integrare quanto già noto;
7. recepimento delle informazioni relative alle operazioni per la gestione delle acque fuoriuscite dalla rotta nel comprensorio destra Panaro eseguite da parte del Consorzio di Bonifica della Burana per il deflusso delle acque dalle aree esondate;

Le informazioni raccolte sono state organizzate attraverso la realizzazione di un inquadramento GIS² dell'area in esame. Tale procedura ha permesso di ricostruire:

1. le diverse perimetrazioni delle aree inondate provenienti dalle fonti più sopra ricordate;
2. la ricostruzione speditiva dell'andamento della inondazione, ricostruita sulla base dell'orografia del territorio utilizzando il più recente rilievo LIDAR (Light Detection and Ranging) disponibile per la Regione Emilia-Romagna;

Le estensioni delle aree esondate, calcolate tramite l'applicazione GIS, sono riportate tabella di seguito riportata:

Tabella 1 Aree esondate divise per comuni. Viene riportata anche la fonte dell'informazione

Fonte	Estensione aree esondate (m ²)		
	Comune Castelfranco Emilia	Comune Nonantola	Totale
Comune di Nonantola	4.723.443	27.532.089	32.255.532
Sentinel 1 del 7/12/20 ore 16.12 L.T.	4.410.910	12.987.040	17.397.950
COSMO-SkyMed del 7/12/20 ore 6.04 L.T.	2.146.730	10.118.300	12.265.030
COSMO-SkyMed del 7/12/20 18.08 L.T.	7.672.440	14.908.160	22.580.600
Area circoscritta dal volo VF-147 del 7/12/20 ore 8.54 L.T.	4.723.443	24.324.338	29.0470.781
Cima foundation https://www.cimafoundation.org/news/fondazioni/le-alluvioni-di-dicembre-la-mappatura-delle-aree-allagate-e-la-stima-del-quantitativo-di-acqua	-	-	25.000.000
L.T. = Local Time			

Per una migliore comprensione dell'inquadramento GIS si elencano le informazioni riportate:

1. dati satellitari COSMO-SkyMed del 7/12/20 ore 6.00 L.T. e 18.08 L.T., Sentinel1 del 7/12/20 ore 16.12 L.T., Sentinel2 (dati non interpretabili) e Copernicus (dati non interpretabili). Attraverso il processamento dei dati satellitari con il software cartografico sono state delimitate e georeferenziate le aree, riportandoli ciascuno su uno specifico livello

² QGIS è un'applicazione GIS open source che permette di visualizzare, organizzare, analizzare e rappresentare dati spaziali. Attualmente è il software GIS open source più diffuso al mondo.

2. utilizzando il rilievo effettuato dal servizio tecnico del Comune di Nonantola è stato georeferenziata l'estensione delle aree esondate;
3. georeferenziazione interventi dei Vigili del fuoco per danni d'acque, recupero beni e soccorso persone utilizzando i dati del Geoportale VVF. In un livello sono riportati quelli relativi a tutta la provincia di Modena, su un altro soltanto quelli circoscritti dalla traccia GPS dal volo dell'AW 139 Drago VF-147;
4. tracce GPS dei sorvoli aerei del Reparto volo dei Vigili del fuoco effettuati in date 6 dicembre (senza orario), 7 dicembre ore 8.54 L.T e 9.11 L.T. ed infine 8 e 9 dicembre (senza orario), utilizzando i dati del Geoportale VVF;
5. l'associazione di coordinate geografiche alle immagini della stampa e dei soccorritori (come info del punto sulla rappresentazione è riportato il link o l'immagine);
6. reticolo canali di scolo, bacini e manufatti idraulici del consorzio di Burana;
7. movimento delle acque nelle zone alluvionate ricostruita considerando l'orografia del territorio ricostruito utilizzando il più recente rilievo LIDAR (Light Detection and Ranging) disponibile per il territorio.

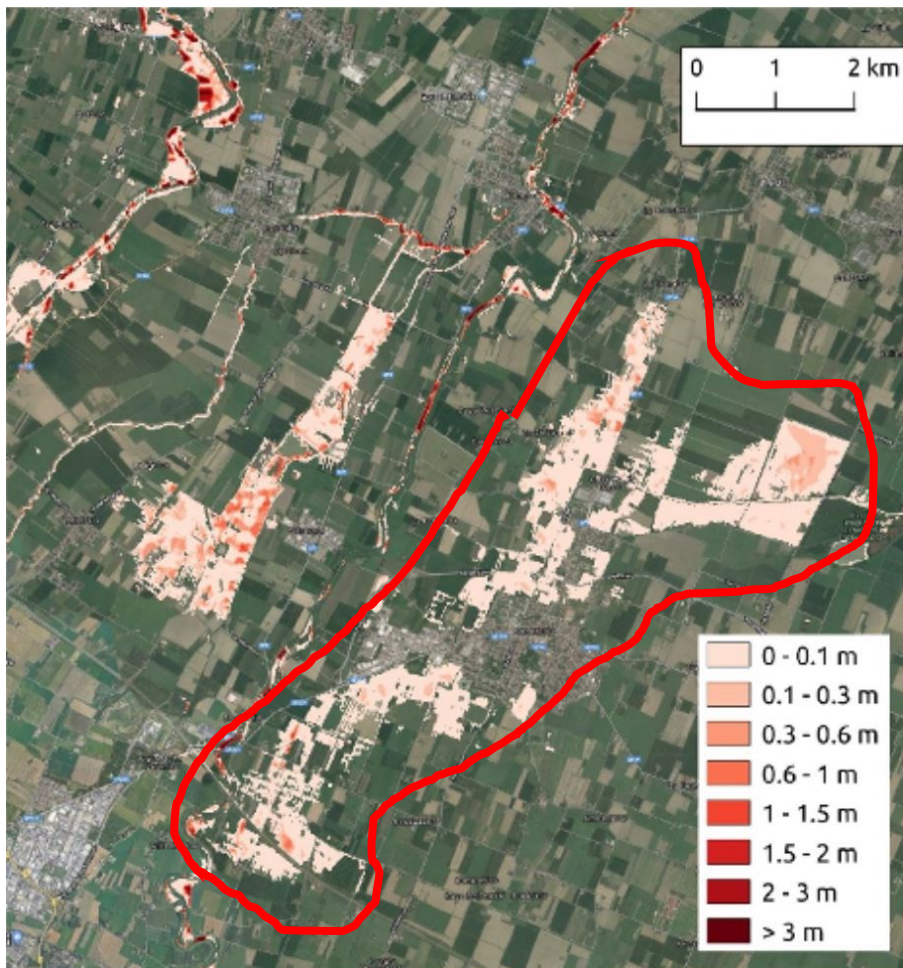


Figura 8 Stima della profondità raggiunta dall'acqua nelle aree inondate effettuato da con lo strumento il Floodwater Depth Estimation Tool unito al modello digitale del terreno (DTM) della Regione Emilia Romagna. Fonte: Fondazione CIMA

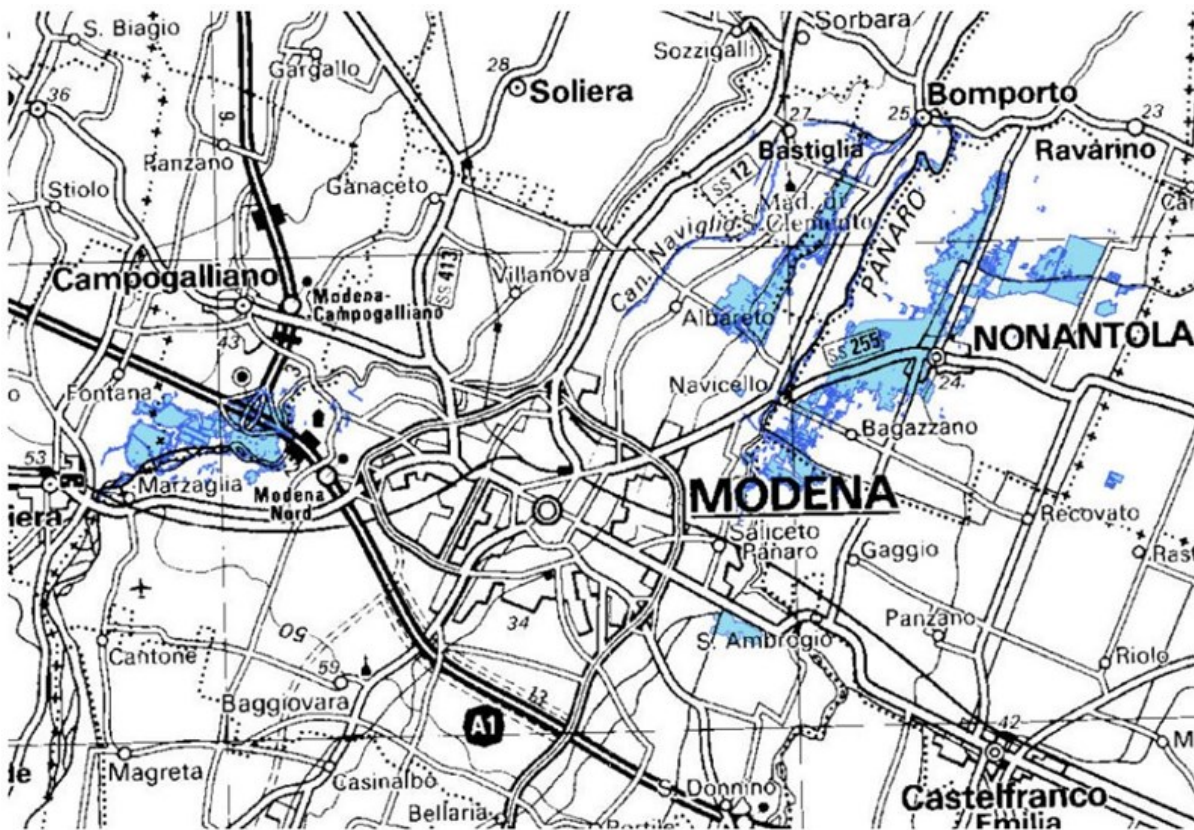


Figura 9 Prima mappa speditiva delle aree esondate. Fonte Relazione preliminare di evento della Regione Emilia Romagna³

La Figura 10 descrive sulla linea del tempo, la disponibilità dei diversi rilievi da piattaforma satellitare e aerea. Dal grafico si può osservare come la copertura satellitare sia fortunatamente abbondante, considerando che il tempo di visita di queste piattaforme è di diversi giorni, a seconda della costellazione.

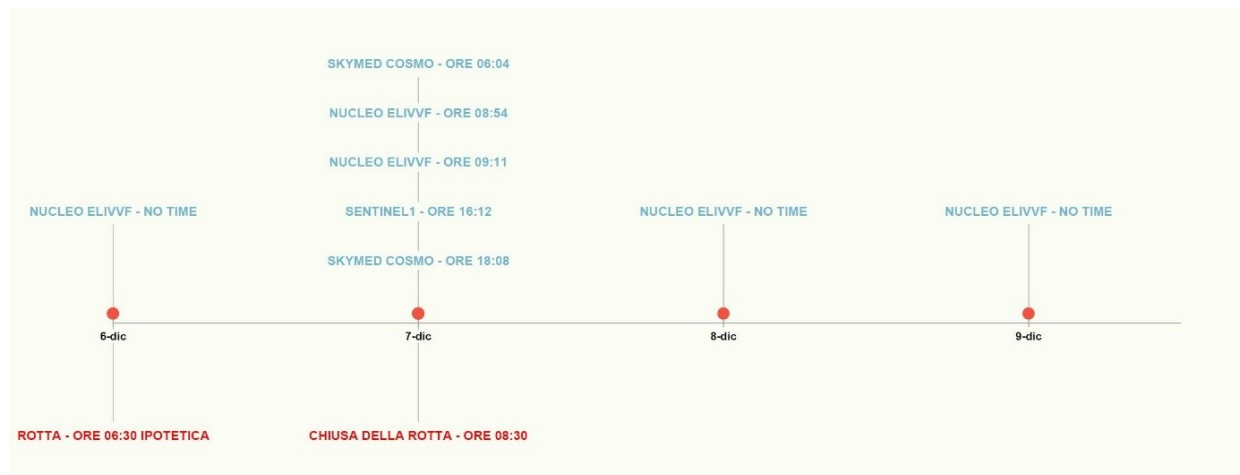


Figura 10 . Rilievi dal cielo delle zone alluvionate.

³ Eccezionali avversità atmosferiche, temporali, neve, vento, mareggiate, frane, piene e i conseguenti allagamenti che si sono verificati nel territorio della Regione Emilia-Romagna a partire dal 1° dicembre 2020. Allegato al PC/2020/0067835 del 18/12/2020



r_emiro.Giunta - Prot. 02/03/2021.0177836.E

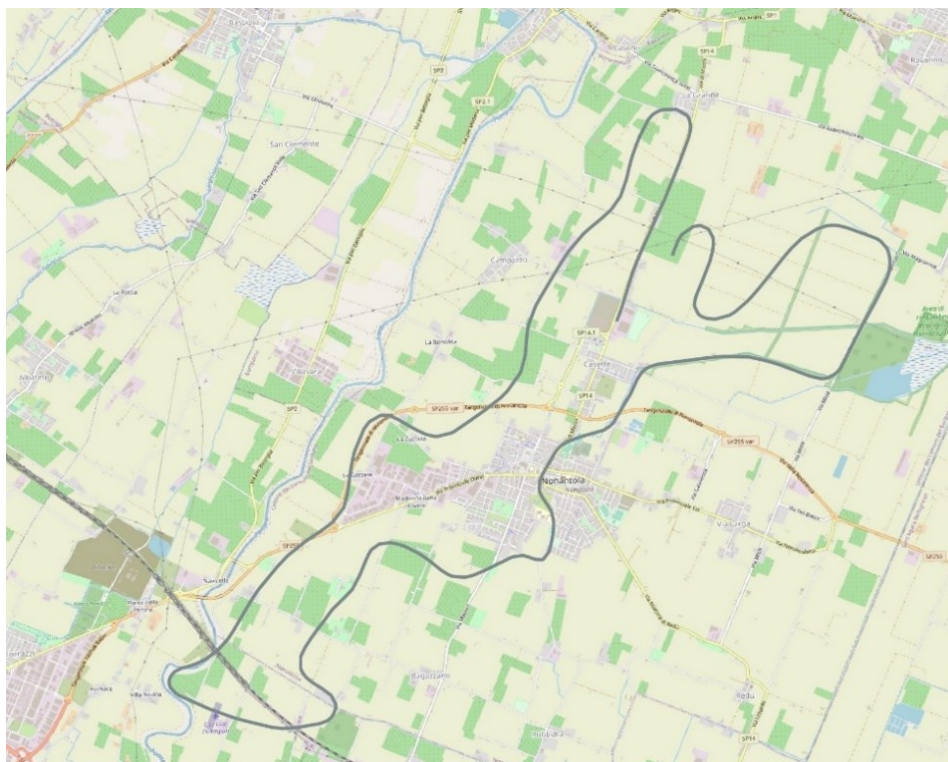


Figura 11 Immagine dell'inquadramento GIS. Traccia GPS rotta del Reparto volo del CNVVF effettuata durante le operazioni di un primo assestment del 7.12.20 ore 8.54.

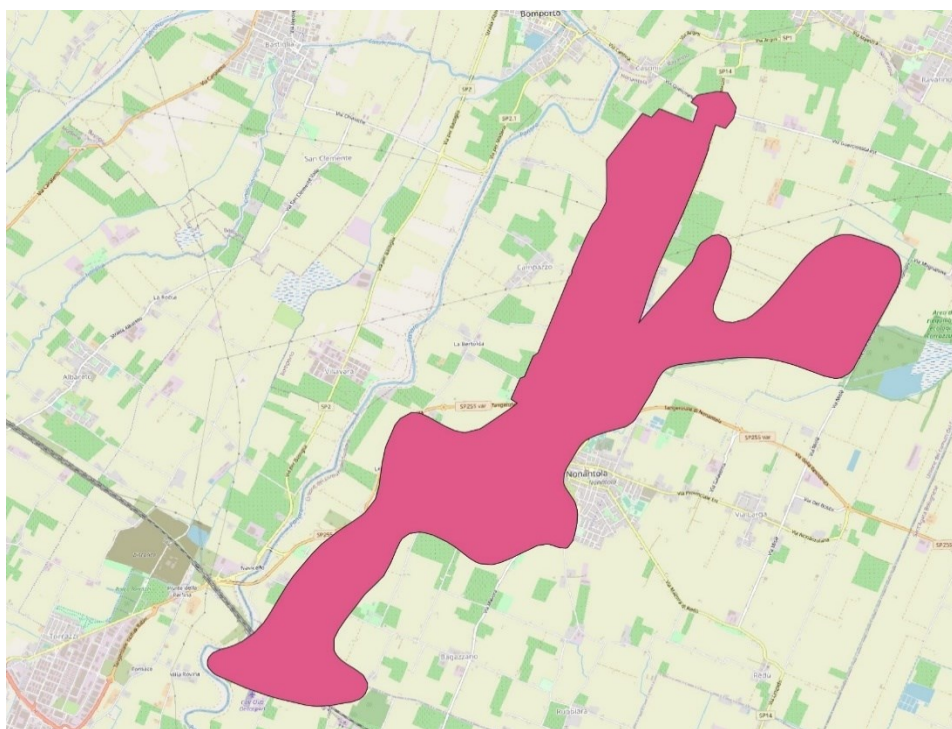


Figura 12 Immagine dell'inquadramento GIS. Area esondata fornita dal rilievo area tecnica del comune di Nonantola.

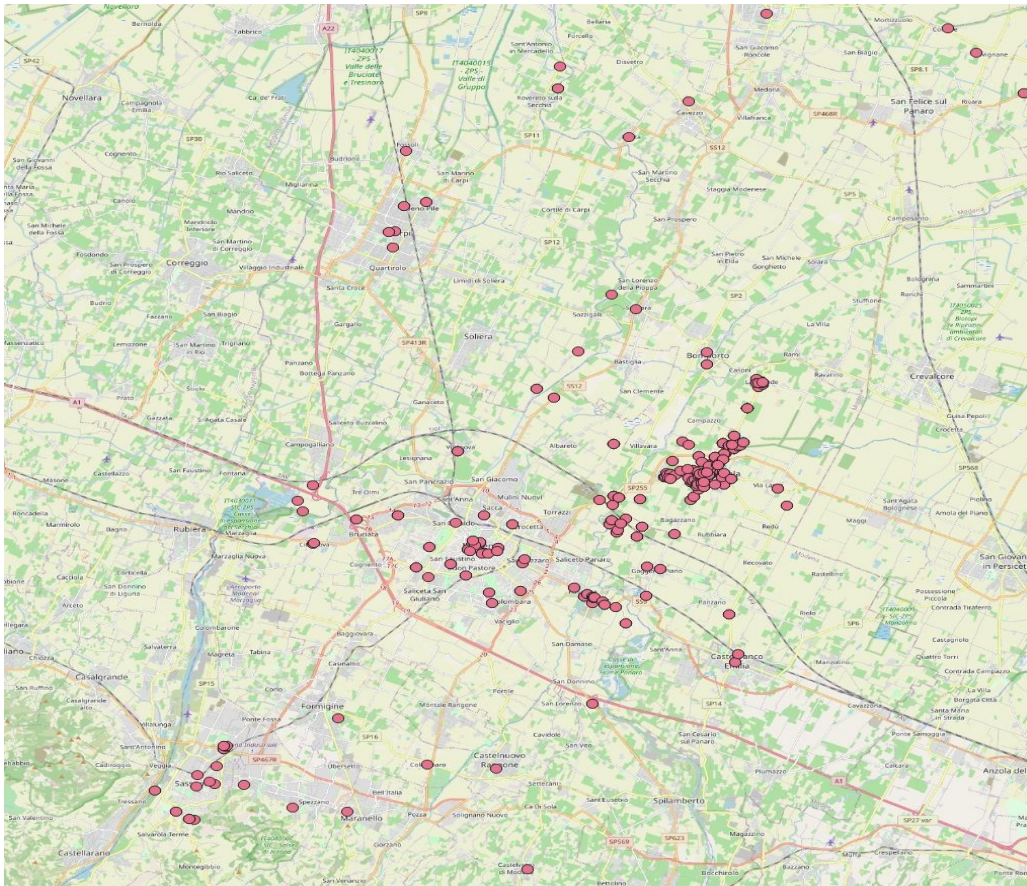


Figura 13 Immagine dell'inquadramento GIS. Interventi CNVVF del 7/12/2020 in tutta la provincia di Modena

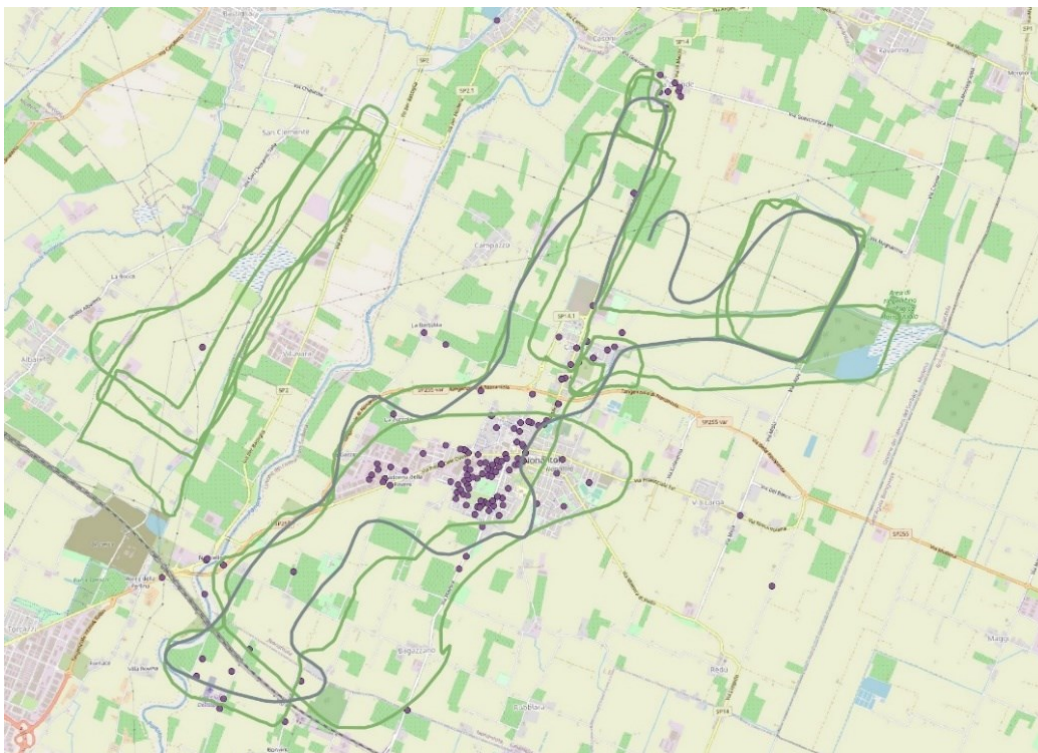


Figura 14 Immagine dell'inquadramento GIS. Interventi per allagamento, soccorso persona e recupero beni effettuati dal CNVVF nelle aree delimitati dai voli, situazione al 7/12/20.

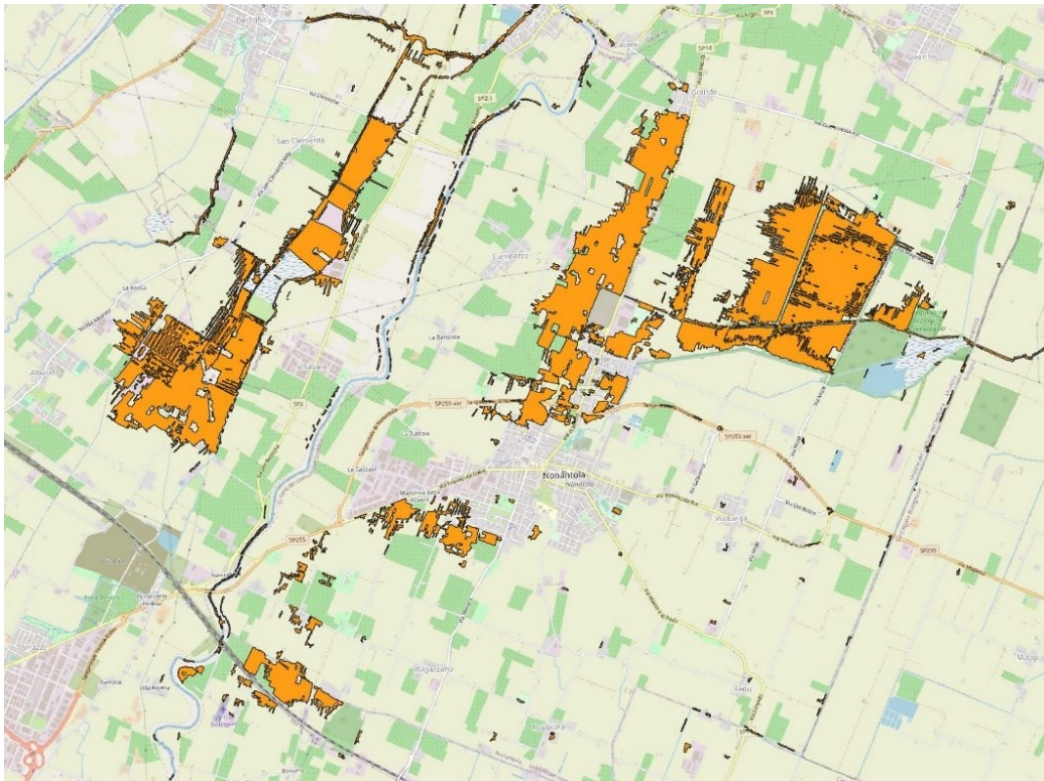


Figura 15 Immagine dell'inquadramento GIS. Immagine dal satellite Sentinel1 del 7/12/20 ore 16.12 L.T.

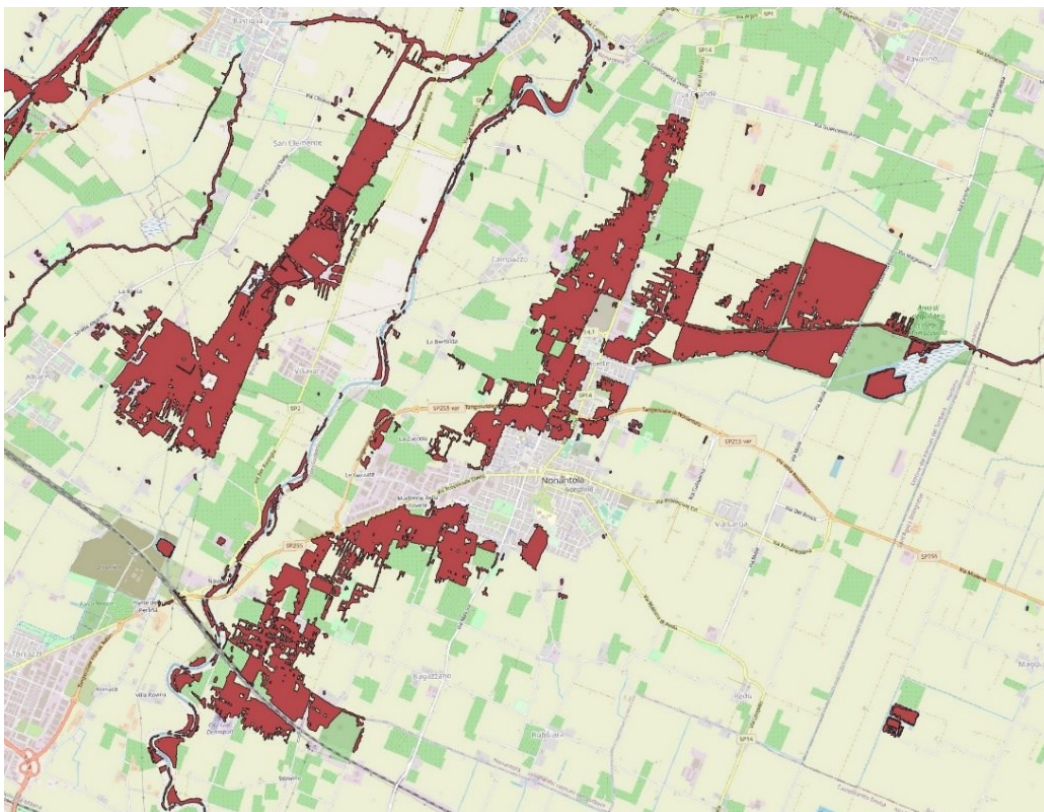


Figura 16 Immagine dell'inquadramento GIS. Immagine dal satellite COSMO-SkyMed del 7/12/20 ore 06.04 L.T.

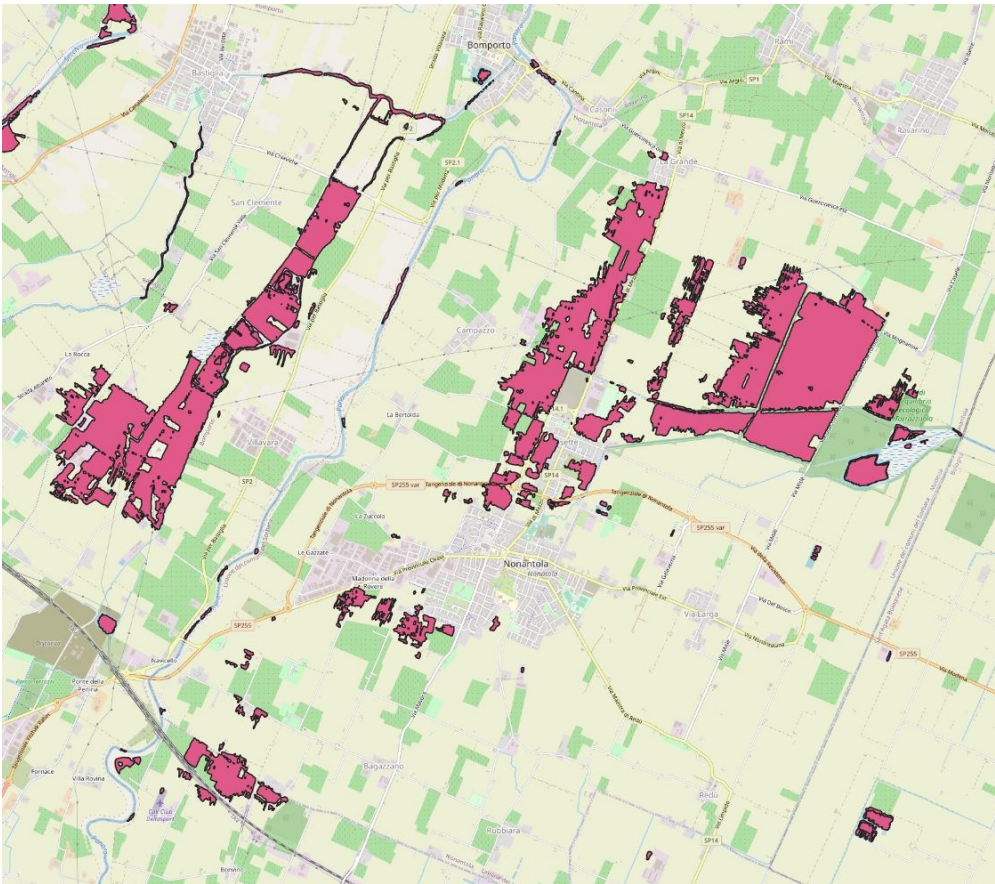


Figura 17 Immagine dell'inquadratura GIS. Immagine dal satellite COSMO-SkyMed del 7/12/20 ore 18.04 L.T.

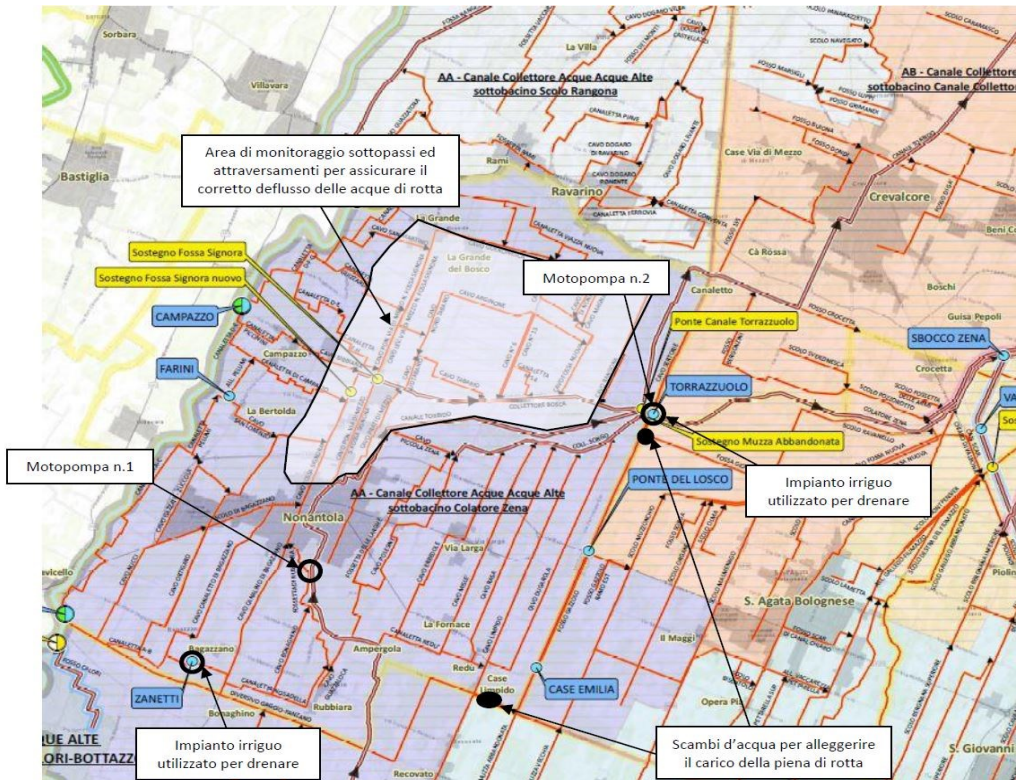


Figura 18. Gestione delle acque esondate il 6/12/2020 Consorzio di Nonantola. Fonte: Relazione illustrativa Consorzio della Bonifica Burana.



Figura 19 Immagine dell'inquadratura GIS. Reticolo idrografico del consorzio di Bonifica Burana.

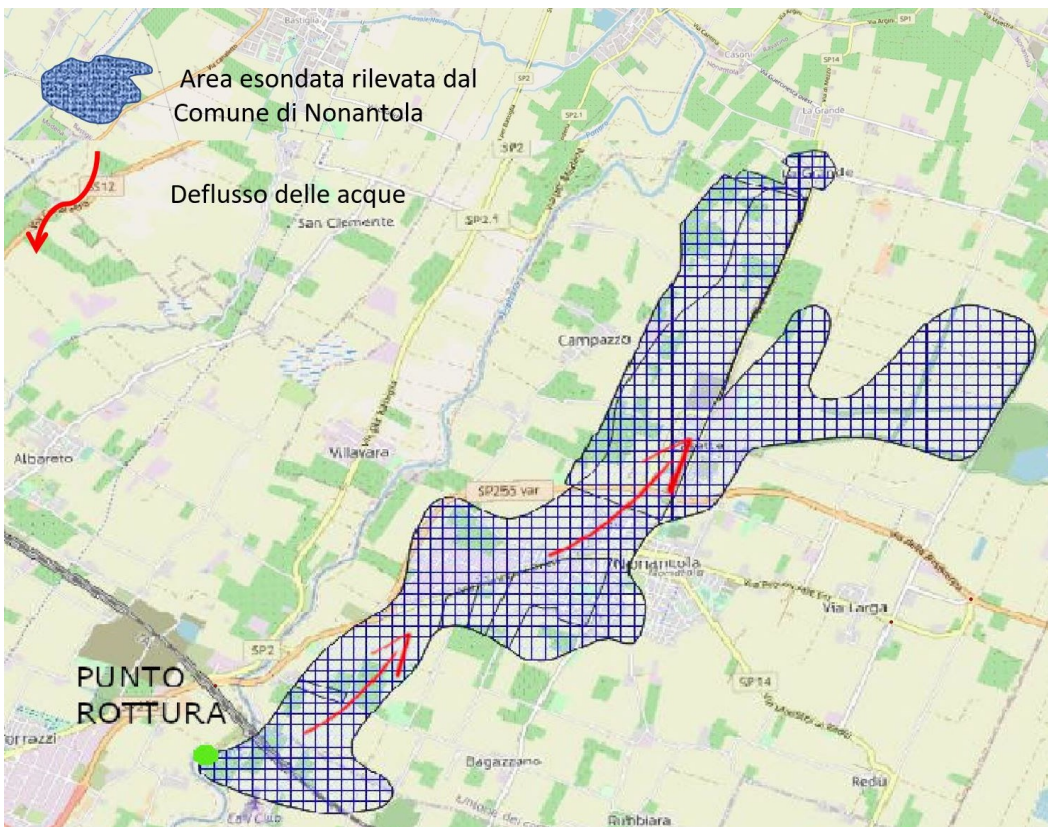


Figura 20. Inquadratura GIS. Deflusso delle acque.

Ricostruzione del deflusso delle acque

La ricostruzione spaziale delle direttrici del deflusso delle acque è illustrata nella Figura 20. La ricostruzione temporale del movimento della piena è stata effettuata utilizzando le testimonianze raccolte dai media e dai soccorritori.

La rotta avveniva intorno alle ore 6 del 6 dicembre. Le acque fuoriuscite raggiungevano dopo poco più di 6 ore l'abitato di Nonantola interessando anche l'area industriale nella periferia del paese. Nella serata del 6 dicembre arrivavano in località La Grande.

L'altezza idrica si attestava a circa 100 cm a La Grande, mentre raggiungevano circa 50 cm a Nonantola. In via Imperiale, via Bonvino, via Viazza, via Ortigara e via Tronco in prossimità della rotta l'acqua è arrivata oltre 150 cm. Nella frazione di Casette l'acqua è arrivata ad oltre 100 cm, in tale zona si sono concentrati anche parecchi interventi del CNVVF.

Misure adottate per la gestione dell'emergenza

Il dispositivo di soccorso mobilitato per l'evento è stato imponente, articolato e complesso che ha operato incessantemente per tutta la durata dell'emergenza. L'entità e la descrizione di tutto il sistema nazionale e regionale di protezione civile messo in campo è riportato in dettaglio nella *Relazione preliminare di evento* della Regione Emilia Romagna⁴.

Per quanto attiene il CNVVF si riportano, per pronto riferimento, gli elementi sintetici di risposta all'emergenza relativi all'esondazione del Panaro.

Sono stati portati a termine circa 1500 interventi di soccorso che hanno riguardato il salvataggio e soccorso delle persone, recupero di beni e masserizie nelle zone alluvionate, verifiche speditive della stabilità delle strutture e svuotamento di edifici allagati. Inoltre sono state condotte operazioni di *assessment* dello scenario e georeferenziazione degli interventi, funzionali alle operazioni di soccorso, anche con l'ausilio del Reparto volo di Bologna.

Sul teatro emergenziale sono confluiti i Nuclei Soccorso Subacqueo Acquatici di Bologna e Ravenna, i nuclei di Contrasto rischio acquatico di tutta la regione e della Toscana. Sono inoltre intervenuti i mezzi anfibi delle regioni Toscana, Piemonte, Veneto e Lazio.

Complessivamente per l'emergenza sono intervenute oltre 2000 unità provenienti da tutte la regione e dalle regioni limitrofe, 800 mezzi tra cui, oltre ai mezzi ordinari di soccorso, battelli pneumatici ed a chiglia rigida, unità di svuotamento *medium capacity pumping*, mezzi aerei, anfibi e mezzi di supporto (carelli fotoelettriche, gruppi elettrogeni, rifornimento carburanti, ecc.).

Prioritariamente il personale impiegato è stato quello specializzato nel contrasto rischio acquatico (soccorritori acquatici, soccorritori fluviali alluvionali, personale abilitato alla conduzione di mezzi acquatici).

Il comando regionale dell'area colpita è stato assunto dal Direttore regionale dell'Emilia – Romagna mentre il comando del distretto operativo è stato assunto dal Comandante provinciale di Modena.

⁴ Eccezionali avversità atmosferiche, temporali, neve, vento, mareggiate, frane, piene e i conseguenti allagamenti che si sono verificati nel territorio della Regione Emilia-Romagna a partire dal 1° dicembre 2020. Allegato al PC/2020/0067835 del 18/12/2020

Parte seconda: la catena delle forzanti

Il bacino del Panaro

Il funzionamento del bacino del Panaro è ampiamente descritto nella Relazione tecnica sulla Verifica funzionale delle arginature redatta da Unimore (Fiorentini, Moretti, & Orlandini, 2016) cui si rimanda per ogni approfondimento. Vale qui la pena di ricordare che il sistema può essere ricondotto a una parte montana, che cui sostanzialmente attiene il ruolo principale nella produzione dei deflussi ed una parte di pianura preposta a sostanzialmente a recapitare tali deflussi verso Po. La cassa di espansione di Sant'Anna funge in sostanza da cerniera idraulica tra i due sistemi, operando una parziale disconnessione tra le vicende idrologiche e idrauliche dei due ambiti.



Figura 21. Schema di funzionamento del sistema del Panaro da (Fiorentini, Moretti, & Orlandini, 2016)

Il bacino chiuso alla cassa di espansione misura 890 km^2 . Quello chiuso allo sbocco in Po misura poco meno di 2300 km^2 . Tra la sezione della cassa di espansione ed il sito di rotta troviamo lo sbocco del torrente Tiepido, principale affluente naturale in sinistra. Il secondo affluente in sinistra nella pianura è il canale Naviglio, canale che sbocca in Panaro a Bomporto. Ai fini del presente studio, si è constatato che gli afflussi del Tapedo, di per sé traslati nel tempo rispetto a quelli di Panaro per via del diverso tempo di corrivazione, non ha avuto particolare influenza nel determinare le condizioni idrauliche dell'asta principale e non sono stati considerati.

Considerazioni generali sulle forzanti idrologiche e idrauliche

Ai fini di valutare le cause del dissesto, la Commissione ha analizzato le caratteristiche di eccezionalità dell'evento idrologico. Le principali domande alle quali si è ritenuto di dover rispondere sono:

1. se la sollecitazione idrologica da monte fosse stata eccezionale;

2. se la presenza della cassa di espansione o la relativa gestione avessero o meno carattere di causa o concausa di quanto osservato.
3. se la sollecitazione cui il sistema arginale è stato sottoposto fosse mai stata osservata in passato;

La risposta a tali domande consente di acquisire elementi importanti per comprendere il funzionamento strutturale dell'argine ai fini di individuare le cause del dissesto. È chiaramente accertato, come già accennato nella premessa e nella prima parte di questa relazione, che il collasso sia occorso con un franco notevole rispetto al piano di coronamento e quindi quando l'opera disponeva ancora, dal punto di vista teorico, di una notevole riserva di resistenza. Cionondimeno è importante appurare se la stessa opera avesse sopportato analoghe sollecitazioni quantomeno nel passato recente.

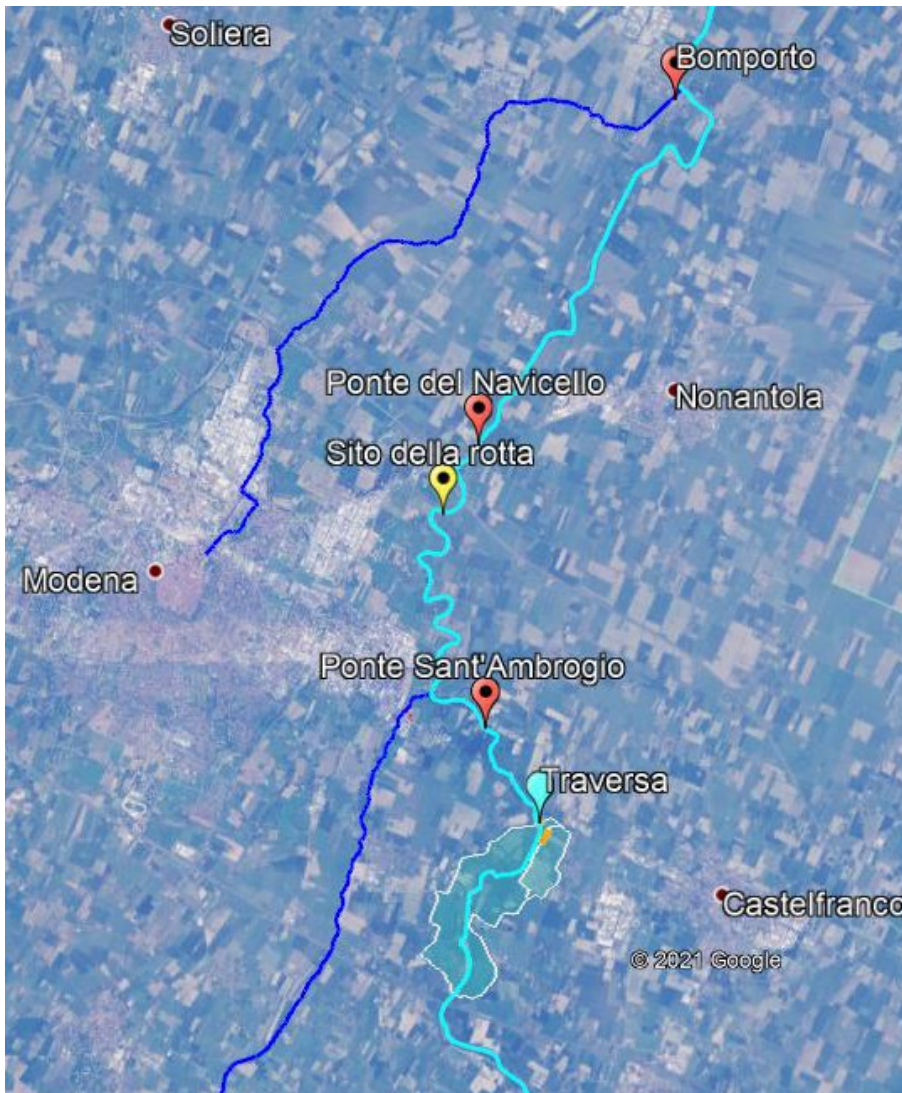


Figura 22. Il sito della rotta inquadrato nel contesto del sistema idraulico della pianura modenese. Si osservano i due affluenti in sinistra Tiepido e Naviglio e la traversa della Cassa di espansione col relativo bacino delimitato dalla linea bianca.

Ricordiamo a tale proposito che l'idraulica del Panaro a valle di San Cesario è drasticamente cambiata a seguito dell'entrata in funzione della cassa di espansione che ha iniziato a funzionare alla fine del 1999. La moderazione avviene tuttavia con gli scarichi liberi, come da progetto iniziale, fino al 2013, data di ultimazione dei lavori che appoggono 5 paratoie davanti alle luci di scarico.

Aggiungiamo, come poi avremo modo di discutere tra breve, che la cassa di espansione ha il duplice compito tanto di laminare i picchi di piena che di lasciare transitare indisturbate le portate ordinarie. È dunque un dato di fatto che la storia temporale delle portate in fregio all'argine dissestato abbia conservato

caratteristiche relativamente stazionarie per i bassi regimi, mentre sia sostanzialmente condizionata dalla presenza (e dopo il 2013 dalle operazioni di regolazione) del manufatto moderatore per la fase successiva fino ai giorni nostri. Questi brevi cenni sono sufficienti a comprendere che la serie storica dei livelli idrometrici a valle della cassa (e dunque in corrispondenza del sito di rotta) ha un carattere di non stazionarietà, per cui non ha particolare significato parlare di tempi di ritorno associati a determinati valori.

La sollecitazione sul bacino chiuso alla cassa di espansione

Conviene innanzitutto ricordare che l'evento idrologico di cui si tratta è determinato dalla concomitanza di due distinti fatti meteorologici che si sono combinati tra loro in una maniera risultata poi particolarmente insidiosa. Ci si limiterà qui a qualche breve cenno. Per una descrizione di dettaglio conviene fare riferimento a quanto riportato nei rapporti regionali relativi al primo (Cardinali & Costa, 2020) e al secondo (Celano, et al., 2020), di cui si dispone di un rapporto preliminare, rilasciato nell'immediatezza dell'evento (Regione Emilia-Romagna, 2020).

A livello di scala sinottica, possiamo dunque sintetizzare che il transito del ciclone associato alla discesa di una profonda onda depressionaria tra il 1 e 3 dicembre 2020 ha determinato l'irruzione di una intensa corrente aria fredda e un netto calo delle temperature su tutta la regione Emilia-Romagna. Il flusso freddo di origine polare, associato alla corrente ciclonica sud-occidentale, ha determinato abbondanti precipitazioni di carattere nevoso sul crinale appennino, che si sono propagate fino a quote di pianura.

Nei giorni successivi, tra il 4 e il 6 dicembre, la situazione meteorologica si è poi evoluta con l'approfondimento di un'onda depressionaria in quota sull'Europa occidentale, associata all'afflusso di correnti fredde sul Tirreno in movimento verso est. Tali componenti sono state ostacolate sul bordo orientale dalla presenza di un promontorio di aria calda e umida persistente sull'Europa orientale e sul bacino del Mediterraneo.

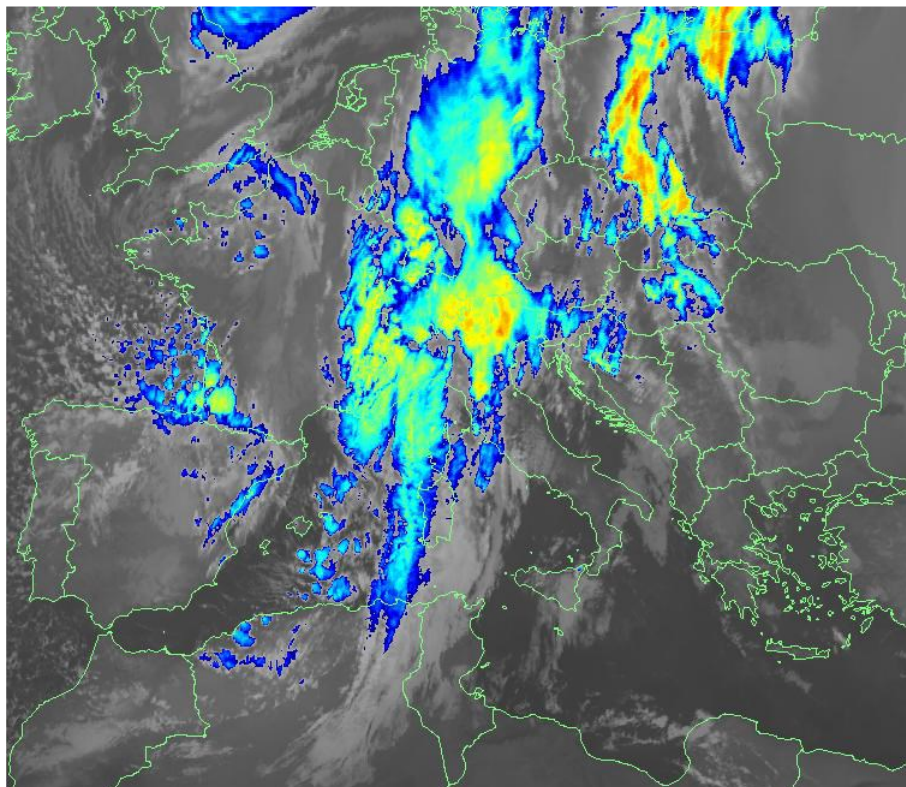


Figura 23. Immagine Enhanced Infrared da satellite Meteosat del 5 dicembre ore 19:00 locali, tratta dal Report di ARPAE. Le precipitazioni più intense, descritte dalle aree di colore giallo e arancione, sono concentrate sul bacino del Panaro.

Il forte gradiente termico tra le due masse d'aria, unito alla elevata disponibilità di umidità, ha alimentato l'intensità di peraltro notevoli precipitazioni che si sono verificate sui versanti meridionali dei crinali appenninici e alpini, fornendo l'energia necessaria per alimentare diversi nuclei temporaleschi, del tutto inconsueti sotto il profilo climatico nel periodo invernale. sostenuta ventilazione meridionale di aria calda, nella giornata del 5 dicembre, determinava poi il progressivo scioglimento del manto nevoso che si era accumulato nelle precedenti giornate sul settore appenninico centro-orientale della regione, e del quale si è appena detto.

Il 4 dicembre la massa d'aria fredda andava a manifestarsi più attivamente, provocando il primo evento di precipitazione sul territorio dell'Emilia-Romagna. Successivamente a una certa attenuazione nella notte tra il 4 ed il 5 dicembre, l'intensificazione del contrasto termico tra la massa d'aria fredda ed il promontorio di aria calda presente sul Mediterraneo, determinava un rapido innalzamento delle temperature ed una nuova ripresa delle precipitazioni che, intensificandosi, si mantenevano di carattere piovoso anche a quote elevate.

L'analisi alla mesoscala del territorio regionale indica che, la Regione, dalla mattina del 4 dicembre, è stata interessata dalla perturbazione proveniente da sud-ovest, portando precipitazioni su Piacentino, Parmense e Reggiano oltreché sui territori collinari del Modenese e Bolognese.

Dalla serata le precipitazioni hanno interessato sempre il settore occidentale, con fenomeni che sono andati ad estendersi anche sulla pianura tra Reggio Emilia, Modena e Bologna. Successivamente un esteso sistema con direttrice nord-sud ha interessato dapprima le province da Piacenza a Reggio Emilia per poi successivamente spostarsi sul Modenese. Precipitazioni diffuse che hanno interessato buona parte del territorio regionale, in particolare le zone collinari hanno poi fatto seguito, con fenomeni che si sono estesi anche alle pianure.

Nella notte tra il 4 ed il 5 dicembre le precipitazioni sono continuate dal Reggiano al Modenese, in Romagna e sulla costa ferrarese. A causa del flusso meridionale descritto nel paragrafo precedente, i sistemi precipitanti sono risultati allineati alla morfologia dei bacini fluviali.

Nella mattina del 5 dicembre le precipitazioni più intense si sono registrate inizialmente sul lato centro-orientale della Regione, in spostamento verso nord-ovest fino al Piacentino. La presenza di intense precipitazioni diffuse su tutto l'Appennino centrale ha fatto registrare i massimi di precipitazione sui bacini del Secchia e del Panaro intorno alle 08:00, in spostamento sui bacini di Enza e Parma nel corso della mattinata.

Le precipitazioni, sempre a carattere intenso e persistente, si sono poi osservate fino al primo pomeriggio del 5, sempre sui bacini di Parma, Enza, Secchia, Panaro e Reno, mentre sul resto del territorio regionale si osserva una graduale diminuzione delle precipitazioni.

A partire dal tardo pomeriggio del 5 dicembre, il persistere dei flussi meridionali ha continuato ad alimentare i sistemi precipitanti sulla parte centrale della Regione, con fenomeni più intensi sui bacini del Reno e del Panaro. Si sono osservati nel corso della giornata rovesci e precipitazioni intense inserite all'interno di vaste zone di precipitazioni deboli-moderate.

Dalla tarda serata del 5 alla prima mattina del 6 dicembre le precipitazioni, organizzate in un sistema con direttrice nord-sud, interessano diffusamente la parte più orientale della regione, cessando di insistere sui bacini modenesi.

La Commissione ha calcolato i tempi di ritorno per le stazioni del bacino che avessero almeno 15 anni di osservazioni. La Tabella 2 riporta le massime altezze di precipitazione registrate ai pluviografi del bacino del Panaro per le diverse durate. Le precipitazioni orarie sono state inferiori ai 30 mm/h in tutte le stazioni. I valori più elevati si sono registrati sul crinale appenninico per la durata di 24 ore.

Tabella 2. Precipitazioni di massima intensità registrate ai pluviografi del bacino del Panaro per le diverse durate

Stazione	quota [m s.l.m.]	1h [mm]	3h [mm]	6h [mm]	12h [mm]	24h [mm]
Lago Scaffaiolo	1794	25.8	63.0	81.0	137.4	201.0
Doccia di Fiumalbo	1371	17.6	35.2	61.6	112.2	161.8
Lago Pratignano	1319	21.0	44.8	63.8	114.6	173.0
Pievepelago	1083	18.4	46.0	80.2	142.2	186.2
Sestola	985	15.2	39.6	55.0	98.0	140.2
Montese	920	10.8	17.2	25.0	37.8	55.8
Guiglia	456	7.8	17.6	29.4	51.8	72.6
Ponte Samone	224	12.0	19.4	29.8	45.4	68.4
Vignola	100	6.2	15.0	23.2	43.4	63.8

La tabella che segue mostra invece i tempi di ritorno. Si può osservare come i valori risultino compresi tra 10 e 20 anni per le stazioni a quota maggiore. Osserviamo come, per tutte le stazioni con quota inferiore a 1000 metri s.l.m. l'evento sia assolutamente ordinario con tempi di ritorno stimabili tra 1 e 5 anni.

Tabella 3. Tempi di ritorno dell'evento calcolato per i sensori con almeno 15 anni di osservazioni

Stazione	quota [m s.l.m.]	1h [mm]	3h [mm]	6h [mm]	12h [mm]	24h [mm]
Lago Scaffaiolo	1794					
Doccia di Fiumalbo	1371	1.1	1.5	2.0	5.1	19.3
Lago Pratignano	1319	1.5	2.8	2.2	6.3	13.8
Pievepelago	1083	1.3	2.9	5.8	16.0	12.7
Sestola	985	1.1	2.8	3.3	12.4	19.4
Montese	920	1.0	1.1	1.1	1.2	1.5
Guiglia	456	1.0	1.0	1.1	1.7	2.2
Ponte Samone	224	1.0	1.1	1.2	1.9	4.5
Vignola	100	1.0	1.0	1.2	1.6	2.1

Ricorda invece giustamente il citato rapporto regionale (Cardinali & Costa, 2020), che il confronto con i massimi storici registrati nel periodo 1942-2019 per le piogge di più giorni consecutivi mostra invece come nelle stesse stazioni la pioggia complessiva del 5 e 6 dicembre abbia superato i massimi storici con cumulate totali nell'evento di 328,6 mm a Doccia di Fiumalbo, 254,2 mm a Lago Pratignano, 379,8 mm a Pievepelago e 248 mm a Sestola. Quindi un evento che si caratterizza soprattutto per una notevole persistenza della precipitazione.

Osserva ancora il rapporto regionale come lo scioglimento del manto nevoso presente al suolo all'inizio dell'evento abbia apportato un contributo relativamente modesto all'afflusso, stimabile da modello in circa 15-20 mm di pioggia equivalente media su tutto il bacino. È tuttavia opportuno osservare come tale contributo abbia comunque generato una pressoché totale saturazione iniziale dei suoli, favorendo la formazione della piena.

Occorre adesso ricordare come, a circa 7.6 km dalla sezione di imbocco della Cassa di espansione, si trovi la stazione idrometrica di Spilamberto, che dispone anche di una scala di deflusso aggiornata nel corso del tempo e che consente la stima delle portate. Nell'uso di tali portate come indicatore del contributo del Panaro di monte, vanno considerati la laminazione e lo *shift* temporale dovuto alla distanza e al transito all'interno dell'invaso (che, considerando la sezione della traversa, sale a quasi 12 km). A tal proposito conviene ricordare che il transito del colmo di piena è stato registrato a Spilamberto tra la mezzanotte e la

mezzanotte e mezza del 6 dicembre mentre il massimo livello al sensore posto subito a monte della traversa (11.188 m s.z.i.) si registra alle 3:45, quindi con un ritardo di tre ore e mezza circa.

Possiamo in ogni caso considerare la osservazione a Spilamberto come un buon *proxy* di quanto arrivi in termini di portata alla Cassa di espansione di San Cesario. Il sensore presenta 18 anni di osservazioni con alcune fallanze.

Nella notte tra il 4 il 5 dicembre, in concomitanza con il primo impulso di precipitazione, si sono immediatamente registrati rapidi incrementi dei livelli idrometrici, con il passaggio di un primo colmo di piena. Nel pomeriggio del 5 dicembre il secondo e più intenso impulso di precipitazione ha fatto registrare nuovi innalzamenti dei livelli idrometrici che sono andati a innestarsi sull'esaurimento dei precedenti con due nuovi colmi di piena ravvicinati, in corrispondenza di altrettanti picchi di precipitazione.

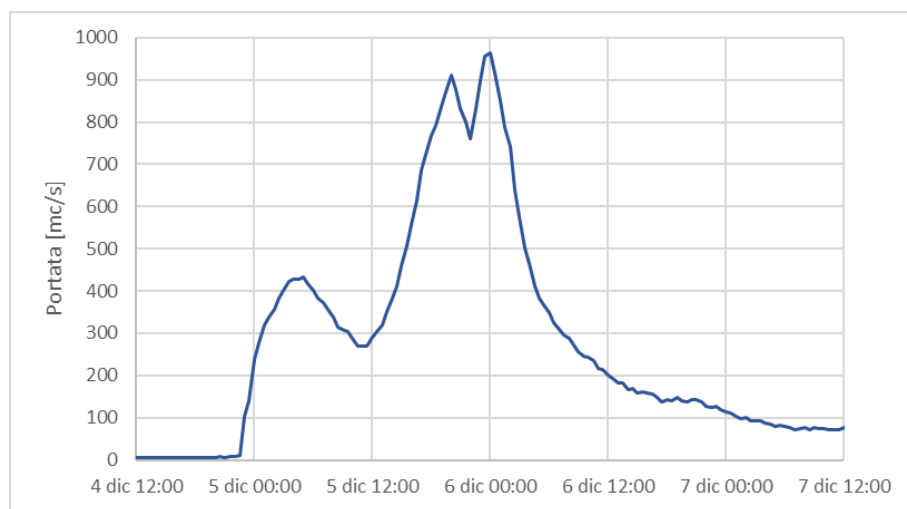


Figura 24. Andamento dei deflussi al sensore di Spilamberto. Si osservano i tre picchi di piena susseguenti.

La Figura 24 mostra l'andamento dei deflussi al sensore di Spilamberto. Si notano i tre picchi di piena susseguenti dei quali l'ultimo, alla mezzanotte del 5 dicembre, raggiunge il massimo valore attorno a 960 m³/s.

Tabella 4. Primi 5 massimi annuali di portata osservati al sensore di Spilamberto

Caso	Anno	portata [m ³ /s]
1	2012	1334
2	2020	963
3	2005	848
4	2019	825
5	2009	776

La Tabella 4 mostra i primi 5 massimi annuali di portata osservati al sensore di Spilamberto. Si osserva che il massimo valore di portata è registrato nel 2012 ed è superiore di quasi il 40% rispetto a quello osservato nel corso dell'evento in esame. I relativi tempi di ritorno, stimati con la distribuzione di probabilità di Gumbel, riportano in cifra tonda a poco più di 50 anni per il 2012 e poco meno di 10 anni per il 2020.

La sollecitazione in termini di portata appare comunque modesta, relativamente all'evento pregresso. Conviene allora chiedersi le ragioni per le quali questo evento, che oggettivamente è risultato estremamente gravoso per la gestione della cassa, può essere stato tanto critico.

Ora è bene condividere la considerazione che nel caso in esame non si sta valutando il rischio idrologico per un'opera quale può essere un ponte o un argine ove l'elemento critico prioritario è oggettivamente costituito dal massimo livello raggiunto dall'acqua. In tal caso difatti, ciò che si vuole scongiurare in sede di progetto (o valutare altresì in caso di verifica) è che il livello di piena si approssimi per non dire superi la quota dell'impalcato del ponte piuttosto che quella del piano di coronamento arginale. Quindi il rischio idrologico è connesso con la probabilità di superamento di un dato valore di portata che, a sua volta, viene poi tradotto in livello nella sezione considerata.

Questo approccio, per intendersi, vale per la cassa di espansione ma soltanto per il dimensionamento di alcuni organi quali, ad esempio, lo scarico di superficie, sorta di dispositivo emergenziale che tutela l'opera dalla sollecitazione determinata dal transito di portate catastrofiche di assegnata frequenza. Ciò che si sta discutendo in questa sede è sostanzialmente diverso.

La severità dell'evento in esame rispetto al funzionamento della cassa di espansione non vede al centro dell'analisi il massimo valore della portata che, come vedremo tra breve, non costituisce l'elemento critico per il funzionamento sistema.

Iniziamo da una osservazione preliminare. La Figura 25 mostra il confronto tra gli andamenti cronologici delle portate osservate a Spilamberto durante i due eventi del 2012 e quello del 2020. Si osserva immediatamente come il picco di piena del 2012 sia decisamente più alto di quello del 2020. Occorre tuttavia tenere presente che il volume di piena osservato, valutabile in termini di area sottesa dall'idrogramma, è al contrario molto maggiore per il secondo rispetto al primo. Il volume come vedremo, costituisce in effetti l'elemento critico che cerchiamo. La sua valutazione non è comunque immediata. Per affrontare il problema sono necessarie ulteriori considerazioni in merito al funzionamento della cassa di espansione.

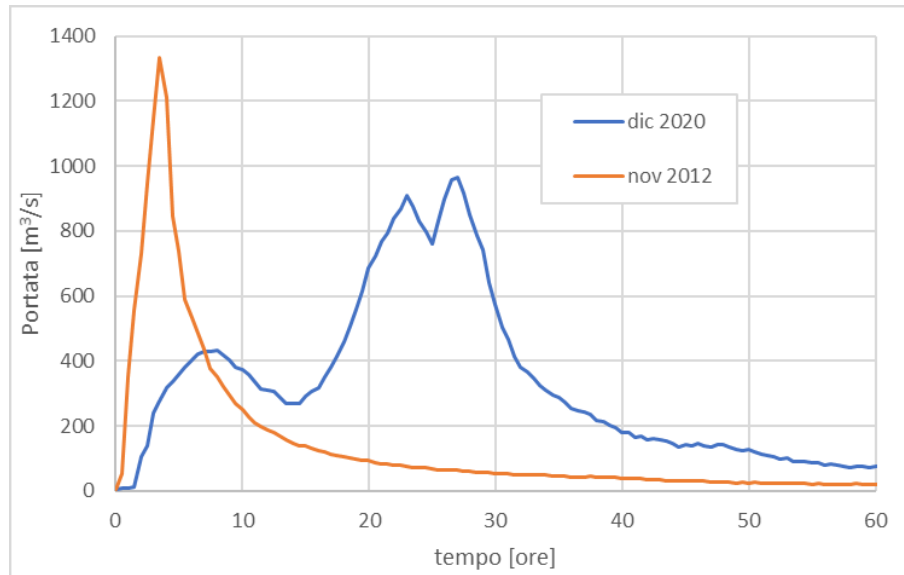


Figura 25. Confronto tra gli andamenti cronologici delle portate osservate a Spilamberto durante i due eventi del 2012 e quello del 2020.

A questo proposito ricordiamo che una cassa di espansione in linea come quella di San Cesario è progettata sulla base di un importante vincolo dato dalla effettiva capacità di smaltimento dell'alveo a valle dell'opera e cioè della massima portata rilasciabile in sicurezza.

La cassa difatti, quantomeno in linea teorica, dovrebbe consentire il transito indisturbato della portata verso valle fino a che questa si mantiene inferiore a tale valore. Non appena il deflusso in arrivo alla sezione di monte della cassa supera il limite, il manufatto moderatore dovrebbe agire in modo da mantenere costante quanto rilasciato a valle e stoccare al contempo tutto l'eccesso nell'invaso a monte. Una volta poi che la

portata in arrivo da monte decresce al disotto del valore limite, allora la il moderatore dovrebbe iniziare a rilasciare progressivamente quanto invasato, svuotando con gradualità l'acqua stoccata al passaggio del colmo.

Il volume della cassa tuttavia non è infinito e le sue capacità di fronteggiare i diversi eventi di piena facendo sì che la portata rilasciata non superi mai il vincolo di progetto, sono evidentemente condizionate dallo spazio a disposizione all'interno dell'invaso. Si può quindi affermare che, quantomeno in linea generale, ciò che cimenta la capacità di funzionamento dell'opera è il volume dell'evento, rapportato alla dimensione della cassa.

In questo senso conviene considerare quanto riportato nel citato studio di Unimore (Fiorentini, Moretti, & Orlandini, 2016) che propone due risultati molto importanti per il territorio vallivo del Panaro offerti:

1. dalla massima portata smaltibile a valle, indicata in $500 \text{ m}^3/\text{s}$ e con il *caveat* che tale portata sormonta comunque gli argini definiti dalla via Emilia in sinistra idraulica in prossimità della confluenza con il Torrente Tiepido in tre sezioni. E che il franco di sicurezza pari a 1 metro non è comunque soddisfatto per vari tratti fluviali compresi tra l'uscita della cassa di espansione e Camposanto;
1. dalla analisi della frequenza di fallanza dell'opera basata sulla valutazione del numero di volte in cui si supera la condizione critica per l'opera nella quale, in buona sostanza la costanza del deflusso limite verso valle non può essere conservata senza superare i franchi di sicurezza che limitano il volume massimo invasabile nella cassa.

Dunque, per calcolare la severità del nostro evento rispetto alla serie storica disponibile, occorre valutare il corrispondente volume di piena e confrontarlo con quello degli altri eventi passati. Il punto è tuttavia come valutare il "volume dell'evento" che, tendenzialmente è infinito, mancando la certezza di un "punto di inizio" nel quale la portata è nulla o, quantomeno trascurabile, e di uno di "fine" corrispondente al ritorno alle condizioni iniziali. Teniamo anche presente che fiumi come il Panaro tendono a generare piene improvvise mentre la "coda", ovvero la parte decrescente dell'idrogramma, può mantenersi relativamente elevata per giorni o addirittura settimane rispetto ai valori antecedenti all'evento.

La valutazione che ci accingiamo a svolgere che richiede dunque la fissazione di un qualche criterio per delimitare, appunto, l'estensione temporale da prendere in considerazione tanto per iniziare che terminare il calcolo.

Una procedura senz'altro ragionevole è quella di fissare una soglia di portata che tagli l'idrogramma parallelamente all'asse dei tempi fornendo, da un lato, gli estremi di integrazione sui quali procedere al calcolo del volume e, dall'altro, limitare l'analisi ai soli eventi coerenti con la statistica che si vuole portare avanti e cioè, in sostanza, quelli che impegnano effettivamente l'opera di difesa.

Per procedere in questa direzione occorre ricordare rapidamente presentare le caratteristiche della cassa di espansione di San Cesario. L'opera è del tipo "in linea": l'accumulo dei volumi nella cassa è ottenuto tramite il rigurgito determinato da un "manufatto moderatore" realizzato in forma di imponente traversa dotata di luci. Tali luci, 5 nel nostro caso praticate al fondo dell'opera, consentono appunto il regolare transito delle basse portate ma sono in grado di moderare appunto quelle più alte. Tale tipologia di opere presenta alcune criticità (tutte peraltro sperimentate nella pratica di questi anni) rispetto al tipo "in derivazione" per il quale le portate di piena in eccesso vengono prelevate da organi posti parallelamente (e non trasversalmente) alla direzione della corrente. Resta il fatto che la Cassa di San Cesario è una delle più importanti casse di espansione a livello nazionale e che costituisce una risorsa preziosa e imprescindibile per la sicurezza idraulica del territorio modenese.

Tutti i dati dell'impianto sono disponibili nel Foglio di condizioni all'esercizio e alla manutenzione (FCEM) a corredo della traversa che è, a tutti gli effetti, una "grande diga" vigilata dal Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti (MIT, 2020). L'opera nasce con un "progetto generale di massima" nel 1975. L'esecutivo è del 1976 ma subisce una serie di rimaneggiamenti fino al definitivo parere del Servizio nazionale Dighe del 1993. I lavori verbale di ultimazione dei lavori è del 5 ottobre 2000.

Successivamente, al fine di garantire una maggiore flessibilità gestionale e di ottimizzare la laminazione (ma anche per consentire gli invasi sperimentali, difficilmente realizzabili nella precedente configurazione), è stato redatto un ulteriore progetto esecutivo datato 11/06/2012 che prevede l'installazione di 5 paratoie piane, a presidio delle luci di fondo di cui è detto più sopra. L'installazione prevede un gruppo di sollevamento del tipo elettromeccanico a vite senza fine. I lavori sono stati realizzati nel periodo agosto 2012-giugno 2013.

Tabella 5. Dati principali del manufatto moderatore della Cassa di espansione di San Cesario (MIT, 2020)

altezza della diga (ai sensi della L. 584/1994)2	15,85 m
quota coronamento	44,62 m s.m.
quota massimo invaso	43,023 m s.m.
altezza di massima ritenuta	14,254 m
quota massima di regolazione:.	40,83 m s.m
quota minima di regolazione	29,27 m s.m.
franco	1,60 m
franco netto	1,00 m
sviluppo del coronamento	151,60 m
larghezza del coronamento (passerella)	2,50 m
volume del corpo diga	49.689,00 m3
classifica ai sensi del D.M. 26.06.2014	Tipo misto d (a.1+b)
quota (media) dei rilevati di spalla	44,50 - 44,60 m s.m.

I dati principali del manufatto moderatore sono desumibili dalla Tabella 5. Quelli del serbatoio sono invece riportati nella Tabella 6. A tal proposito ricordiamo che, oltre all'invaso principale determinato dal rigurgito della traversa, vi è un ulteriore serbatoio fuori linea, alimentato da uno sfioratore laterale non presidiato. Significa che l'invaso laterale (che cuba circa 3,5 milioni di metri cubi, si attiva quando il livello nella cassa principale supera un determinato valore. Torneremo più avanti su questo punto.



Figura 26. Rendering del manufatto moderatore visto da monte. Si osservano le 5 luci centrali, larghe 5 metri e alte 2.3 metri. Le quattro luci laterali di servizio sono tenute ordinariamente chiuse (fonte AIPo)

Conviene ricordare che la cassa viene di regola impegnata con le paratoie in posizione di completa apertura. La sezione fluviale, in tali condizioni, presenta una larghezza complessiva di 35 metri per una altezza di 2.3. Si tratta dunque di una non superficie tutt'altro che trascurabile che è in grado di far transitare portate dell'ordine di 200 m³/s senza praticamente provocare alcun significativo rigurgito verso monte.

Il funzionamento dell'efflusso dal manufatto moderatore è relativamente complesso e prevede la possibilità di conservare diversi valori di portata costante a valle, compatibilmente con il volume disponibile in cassa. Questi aspetti sono stati sviluppati attraverso due studi successivi svolti presso l'Università di Parma con altrettante serie di prove su modello (Mignosa, et al., 2015) mirate a chiarire una relazione univoca tra i livelli subito a monte e a valle dell'opera, il grado di apertura delle diverse paratoie e la portata smaltita a valle.

Le prove su modello hanno confermato che sussiste un intervallo ben definito dai livelli idrici a monte e a valle del manufatto, in cui l'efflusso dalle luci di fondo risulta libero e cioè non influenzato da quanto accade

a valle. Negli altri casi le canne funzionano sotto battente eventualmente con l'ulteriore contributo dello sfioratore posto sulla cresta del manufatto.



Figura 27. Il funzionamento degli scarichi di fondo in una prova su modello presso l'università degli studi di Parma da (Mignosa, et al., 2015)

Ciascun tipo di funzionamento è descritto in teoria da classiche equazioni della idraulica. Nella realtà dei fatti la questione è resa assai più complessa dalla presenza del non trascurabile rigurgito da valle, accentuato dal sistema di dissipazione dell'energia posto a valle del manufatto.

Tabella 6. Dati principali dell'invaso della cassa di espansione di San Cesario (MIT, 2020)

quota massimo invaso	43,02 m s.m.
quota massima di regolazione	40,83 m s.m.
quota minima di regolazione	29,27 m s.m.
superficie dello specchio liquido alla quota di massimo invaso	4,29 km ²
superficie dello specchio liquido alla quota massima di regolazione	4,05 km ²
volume di invaso	19,85 Mm ³
volume di invaso comprensivo della cassa fuori linea	23,29 Mm ³
volume totale di invaso	29,02 Mm ³
volume totale di invaso comprensivo della cassa fuori linea	32,56 Mm ³
superficie del bacino imbrifero sotteso	890 km ²

Le prove su modello hanno investigato i diversi campi di funzionamento, considerando numerose configurazioni del grado di apertura delle paratoie. Il grafico di Figura 28 è tratto appunto dalla relazione relativa alle prove. Il grafico riporta le portate smaltibili dalla traversa con le paratoie completamente aperte, caso che ci interessa in questo momento. Tale configurazione era peraltro quella originariamente prevista per l'opera prima della realizzazione degli ulteriori lavori di cui si è detto.

La portata rilasciata a valle è, come detto, condizionata dal differenziale tra i livelli a monte e a valle della struttura. Tale dislivello è trascurabile per le basse portate, quando l'acqua scorre liberamente attraverso il manufatto regolatore che, nei fatti, è pressoché trasparente nei confronti della corrente in transito.

Con l'incrementare dei deflussi provenienti da monte, il deflusso inizia a non avere energia sufficiente per transitare attraverso le canne e deve recuperare energia aumentando il proprio livello rispetto a quello che trova a valle. Questo concetto è ben esplicitato nel grafico di Figura 28. In ascisse troviamo il livello a valle del manufatto mentre in ordine vi è quello a monte, ambedue espressi in termini di quota sul livello del mare. La retta a 45 gradi indica la condizione nella quale i due livelli siano uguali che, quantomeno teoricamente,

corrisponde a portate nulle o comunque, in accordo a quanto si diceva poco più sopra, così basse da non necessitare di dislivelli significativi oltre la naturale pendenza del corso d'acqua.

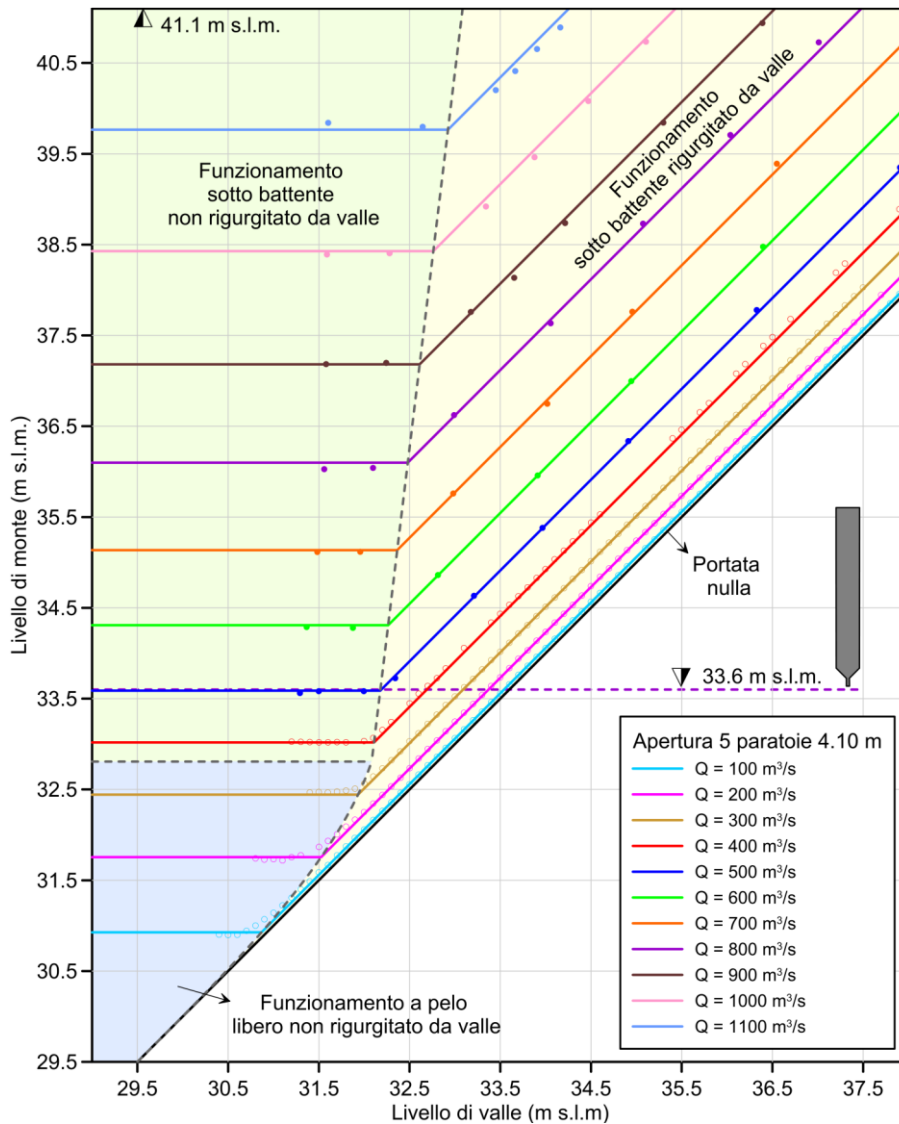


Figura 28 Modalità di funzionamento del manufatto moderatore con tutte le paratoie principali in posizione di massima apertura da (Mignosa, et al., 2015)

La parte superiore del grafico è a sua volta suddivisa in tre regioni rispettivamente con sfondo celeste, verde chiaro e giallino. Il primo riguarda il campo degli efflussi che si svolgono a pelo libero senza rigurgito da valle: in sostanza la corrente transita attraverso il manufatto senza riempire le canne, ma conservando l'assetto di una ordinaria corrente fluviale. Per livelli superiori le modalità sono quelle di efflusso in pressione (sotto battente) senza rigurgito da valle ed efflusso in pressione rigurgitato. Conviene porre l'attenzione sulla linea tratteggiata che separa il campo del moto in pressione rigurgitato dagli altri due. Nella parte a sinistra, le rette a portata costante sono orizzontali: significa che quei deflussi sono condizionati soltanto dal livello di monte, indipendentemente da quello a valle nei limiti, appunto, indicati dalla linea a tratteggio.

Le rette a portata costante si impennano poi a 45 gradi. Questo fatto è dovuto alla forte dissipazione energetica che si ha nel moto sotto battente. La portata non è più funzione del solo livello di monte, ma del differenziale tra i due livelli che si deve conservare inalterato per garantire la costanza del deflusso.

Il funzionamento della cassa è determinato proprio da questo fenomeno. Attraverso l'imposizione di una strozzatura, si richiede in sostanza alla corrente di guadagnare energia a monte (e dunque di innalzare il proprio livello) per recuperare l'energia potenziale necessaria al passaggio sotto la traversa. Possiamo

dunque assumere che il processo di invaso (e dunque l'effettiva entrata in funzione della cassa di espansione) abbia luogo proprio quando tale dislivello inizi a diventare sensibile

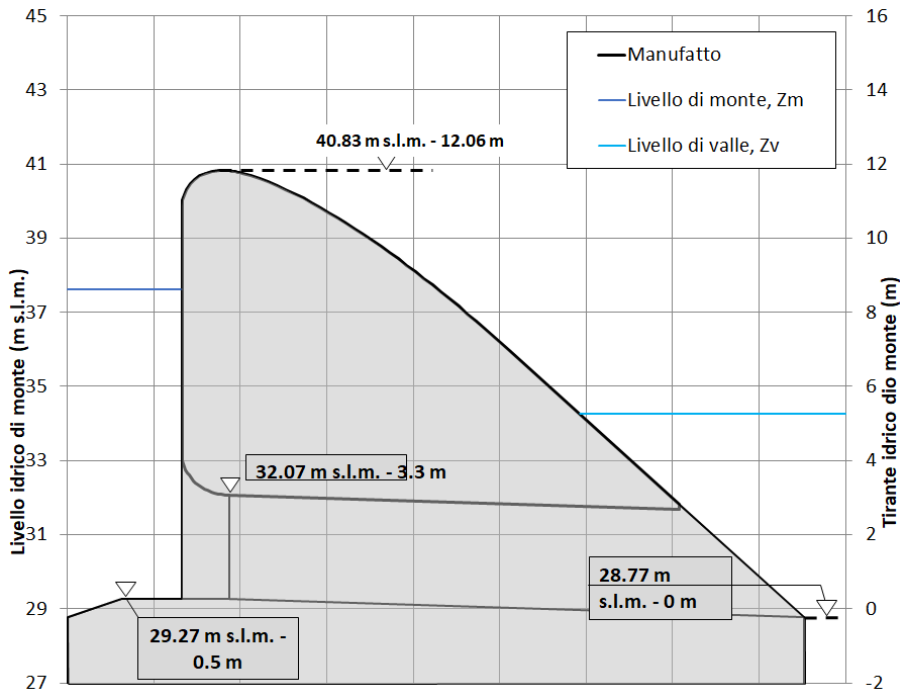


Figura 29. Sezione schematica del manufatto regolatore in corrispondenza di una delle luci di fondo principali

Dalla analisi del grafico, possiamo ragionevolmente fissare a $250 \text{ m}^3/\text{s}$, la soglia per gli eventi di portata da monte che effettivamente impegnano la cassa avviando un invaso significativo. Questa osservazione ci consente di fissare appunto il valore cercato.

La condizione per la quale la portata in arrivo alla cassa sia superiore a $250 \text{ m}^3/\text{s}$, si riscontra a Spilamberto 87 volte nei 18 anni della serie storica disponibile, e cioè poco meno di cinque volte l'anno in media. Il riferimento al superamento di una soglia è comodo perché, come più sopra cennato, consente di valutare in maniera definita ed omogenea, i volumi transitati per ogni evento ed effettuarne la statistica. Il grafico di Figura 30 mostra la serie storica di tali eventi sopra soglia. Nel diagramma si vede bene il picco del 2012. L'evento del dicembre 2020 è l'ultimo a destra.

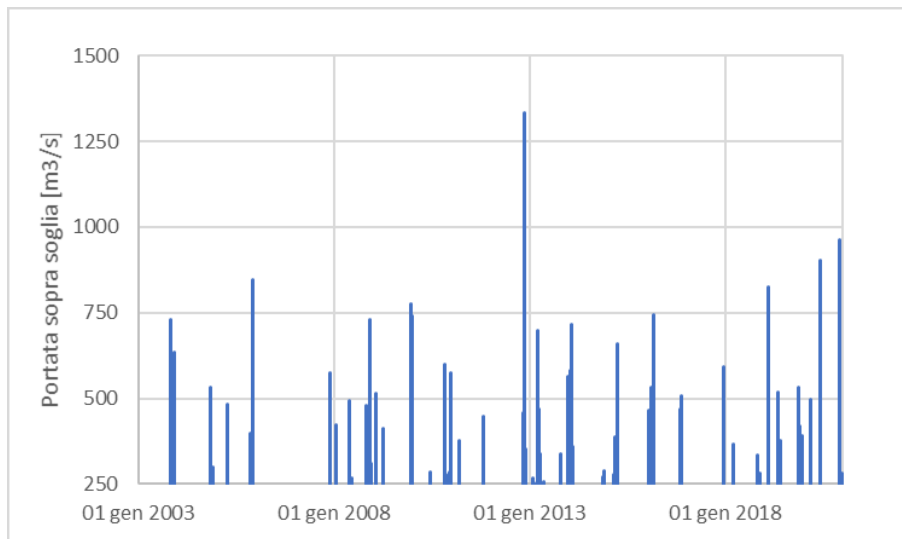


Figura 30. Eventi di portata sopra la soglia di $250 \text{ m}^3/\text{s}$ osservati al sensore di Spilamberto

Per ciascuno di tali eventi è adesso possibile calcolare il volume, calcolando numericamente l'integrale dell'idrogramma al disopra della soglia citata.

Tabella 7. I primi dieci valori della serie dei massimi volumi osservati a Spilamberto nel periodo di funzionamento della stazione (2003-2020) per eventi con portata al disopra della soglia di 250 m³/s che attiva il funzionamento della cassa

caso	data	Volume [Mm ³]
1	6 dicembre 2020	60.32
2	1 dicembre 2008	55.99
3	26 dicembre 2009	50.36
4	1 novembre 2010	46.03
5	24 dicembre 2010	39.62
6	19 gennaio 2014	37.79
7	20 novembre 2019	36.25
8	2 febbraio 2019	33.39
9	5 gennaio 2014	26.22
10	9 novembre 2003	25.70

La Tabella 7 mostra i primi dieci casi di volumi idrici osservati a Spilamberto al disopra della soglia di 250 m³/s. Si può agevolmente osservare che l'evento del 2020 è primo caso critico con un valore di oltre 60 milioni di metri cubi. Si nota altresì come l'evento del 2012 con i suoi "soli" 20.53 milioni di metri cubi, non rientra nella tabella pur essendo, come si è più volte ricordato, primo caso critico in quanto a portata.

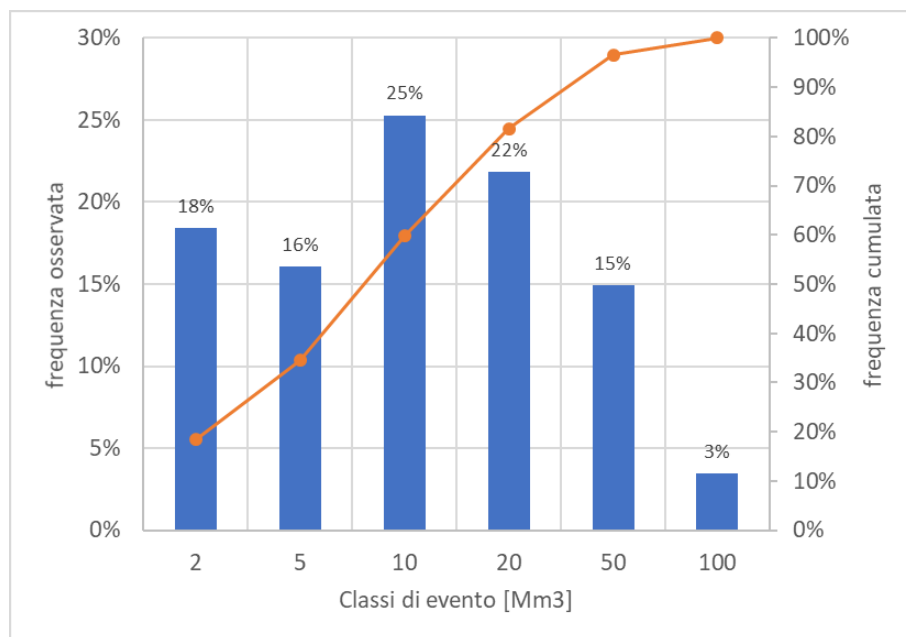


Figura 31. Distribuzione di frequenza dei volumi per gli eventi osservati a Spilamberto la cui portata eccede la soglia di 250 m³/s

Il grafico di Figura 31 mostra la distribuzione di frequenza dei dati volumi sopra soglia si cui si è sinora trattato. L'andamento del diagramma mostra come i valori della classe compresa tra 50 e 100 m³/s corrispondano al 3% del campione osservato. Si tratta dunque di un evento relativamente raro.

Quanto sinora discusso ci consente di rispondere alla prima delle tre domande che ci siamo posti all'inizio di questo paragrafo e cioè se la sollecitazione idrologica da monte fosse stata eccezionale. La risposta è affermativa. La sollecitazione meteorologica ai pluviometri è significativa soltanto per i sensori posti nei pressi del crinale appenninico, con tempi di ritorno tra 10 e 20 anni. La portata al colmo osservata a Spilamberto ha anch'essa tempi di ritorno dello stesso ordine e non è massimo valore osservato, essendo

superato del 40% da quello del novembre del 2012. Qui si sta tuttavia trattando di sollecitazione sulla cassa di espansione che svolge funzione di cerniera idraulica tra le vicende di monte e quelle di valle del bacino del Panaro e condiziona per buona parte l'entità dei deflussi (e dei livelli) sul sito di rotta. In questo senso osserviamo che la particolare dinamica dell'evento pluviometrico, associato allo scioglimento del manto nivale osservato accumulatosi nei giorni precedenti, ha determinato un volume di piena imponente, tale da sollecitare severamente la cassa di espansione. Tale volume, assieme alla sua distribuzione nel tempo, costituisce l'elemento preponderante che determina l'impegno della cassa di espansione.

Il valore relativo all'evento, stimato con riferimento alla soglia di portata che determina l'avvio di un sensibile rigurgito a tergo del manufatto moderatore, risulta primo caso critico nella serie storica delle osservazioni a Spilamberto corrispondente a frequenze di non superamento che fanno ritenere tale sollecitazione di ordine eccezionale.

La gestione della cassa di espansione in corso di evento

Ci troviamo adesso a rispondere alla seconda delle domande poste a proposito delle forzanti idrologiche e idrauliche sull'argine e cioè se la presenza della cassa di espansione o la relativa gestione possano o meno aver assunto carattere di causa o concausa dell'evento calamitoso.

La Cassa di espansione si estende su una superficie di circa 4,29 km² tra i comuni di Modena e San Cesario, racchiusa da una cintura continua di argini in terra interrotta soltanto dal corso del Panaro; alla sezione di monte è presente una modesta traversa mentre la sezione di valle è presidiata dal manufatto moderatore in calcestruzzo massiccio a gravità di cui si è detto.

Il serbatoio, come più sopra cennato, è suddiviso in due moduli, uno principale, in linea con la corrente fluviale, determinato dal rigurgito provocato dalla presenza del manufatto moderatore e capace di un volume di 18.85 milioni di metri cubi alla quota di massima regolazione (cioè al livello della soglia di sfioro della traversa). A tale volume si aggiungono gli ulteriori 3.44 milioni del secondo modulo di cui si è detto, accessibile dalle portate di piena attraverso una soglia sfiorante laterale libera in destra idraulica. Tali volumi si incrementano notevolmente alla quota di massimo invaso (corrispondente al massimo livello raggiungibile nella cassa), raggiungendo complessivamente 34.56 milioni di metri cubi.

Conviene sottolineare che l'impianto si trova attualmente nello stato di "esercizio sperimentale", il che vuol dire che l'invaso è soggetto a limitazioni in funzione del collaudo in corso ai sensi della normativa sulle dighe di ritenuta (L 1086/1971 e successive modifiche e integrazioni). Tali limitazioni indicano una "quota autorizzata" (quota nel serbatoio a monte della traversa) pari a 29.29 m. s.l.m. e una "quota sperimentale" raggiungibile in via straordinaria in caso di piena, pari a 37.49 m. s.l.m.

La portata in transito nel tronco vallivo di Panaro, per quanto si è accennato sinora, può essere per buona parte considerata "artificiale" in quanto condizionata appunto dai rilasci della Cassa di espansione. Per basse portate, come cennato grossolanamente dell'ordine di 250 m³/s, tali rilasci avvengono per così dire, "naturalmente" attraverso il sistema delle 5 luci di fondo del manufatto moderatore che trasferiscono pressoché immutata la portata in arrivo da monte.

Il manufatto è tuttavia congegnato in maniera che, per portate via via crescenti da monte, la strozzatura imposta al libero deflusso del fiume, ne impedisca il pieno trasferimento verso valle, determinandone il rigurgito a tergo del manufatto ove è a tale scopo prevista una vasta area debitamente arginata per il temporaneo stoccaggio. Tale forma di regolazione può essere definita "passiva".

La strozzatura può inoltre essere ulteriormente aumentata dosando la chiusura delle stesse luci di fondo, mediante l'abbassamento delle paratoie mobili meccanizzate. In tal modo si passa ad una regolazione di tipo "attivo" che (come chiaramente descritto nella citata relazione dell'Università di Parma) consente di

ottimizzare il valore della portata rilasciata, in modo che non vada a superare quello compatibile con il regolare deflusso tra gli argini.



Figura 32. Il sistema delle 5 paratoie del manufatto di moderazione della Cassa di espansione di S. Anna, visto da monte, in condizioni di portata ordinaria (Immagine Gazzetta di Modena)

A proposito di tale valore massimo il FCEM dell'opera di sbarramento riporta che *"Attraverso la modellazione idraulica monodimensionale, UNIMORE ha ottenuto i seguenti principali risultati: la portata smaltibile dall'asta fluviale a valle della cassa di espansione di Sant'Anna è pari a 500 m³/s seppure con alcune criticità più sopra rammentate.*

Se è vero che la portata in uscita dalla cassa di espansione è in parte disconnessa dai deflussi provenienti da monte, è altresì da considerare che la cassa, come già ricordato, ha un volume finito, che deve essere gestito in modo da garantirne la sicurezza. Ciò è particolarmente significativo per il sistema delle arginature di cintura la cui crisi aprirebbe scenari catastrofici per cui sono richieste le massime cautele.

In tal senso le decisioni del gestore, in condizioni di piena, sono condizionate da due fattori tra loro antagonisti: mantenere la portata in uscita al disotto del valore massimo smaltibile dall'alveo a valle e, al contempo, far sì che il volume invasato (crescente nel tempo) non vada a superare il livello massimo che metterebbe in pericolo la stabilità degli argini della Cassa;

Il processo decisionale è ulteriormente dalla ovvia mancata conoscenza sulla dinamica temporale delle portate che arriveranno da monte e che, pur contando sulle informazioni dei pluviometri e sulle previsioni meteorologiche ad area limitata, rimangono affette da una notevole dose di incertezza;

Osserviamo poi che la cassa non dispone di un piano di laminazione e cioè di un documento (previsto dalla Direttiva PCM 27 febbraio 2004, "Indirizzi operativi per la gestione del sistema di allertamento nazionale per il rischio idrogeologico e idraulico") che per diversi e possibili prefigurati scenari d'evento, prevede le misure e le procedure da adottare per la gestione degli scarichi per preservare la sicurezza delle opere e soprattutto, la salvaguardia della incolumità della vita umana, dei beni, degli insediamenti e dell'ambiente territorialmente interessati dall'evento. Segnaliamo a tale proposito che la Regione Emilia-Romagna, con Atto Numero 19453 del 05/11/2020 del Direttore della Direzione generale cura del territorio e dell'ambiente ing. Paolo Ferrecchi ha decretato la costituzione di un Gruppo di lavoro interistituzionale al fine della predisposizione dei piani di laminazione degli invasi in Regione.

Il Gestore, per mano dell'Ingegnere responsabile della sicurezza della Diga, ha gestito la cassa inizialmente in forma "passiva" e poi attraverso una serie di manovre delle quali AIPO ha dato conto alla Commissione la trasmissione di un documento nel quale è riportata l'ora di inizio e di conclusione di ciascuna manovra i

corrispondenti livelli a monte e a valle del manufatto regolatore, la portata in atto e la descrizione della manovra.

La gestione della cassa in corso d'evento da parte del Gestore è stata sostanzialmente corretta, nonostante oggettive difficoltà con le quali l'Ingegnere responsabile ha dovuto fare i conti, tra le quali la mancanza di un piano di laminazione, il fatto che l'impianto non fosse collaudato e pertanto soggetto a limitazioni di invaso, l'assenza di una storia tecnica dell'opera con episodi significativi da prendere a riferimento. Le attività possono essere ricondotte ai seguenti passaggi:

L'evento di cui si tratta si è manifestato alla sezione di Spilamberto sostanzialmente in due impulsi di portata: il primo è iniziato alle 22:30 del 4 dicembre con un repentino incremento nel deflusso, che ha raggiunto un picco a 423 m³/s alle 5 del mattino del 5. La portata è poi diminuita fino a un minimo di 284 m³/s alle 11 del mattino. L'onda di piena giunge alla cassa poco dopo la mezzanotte;

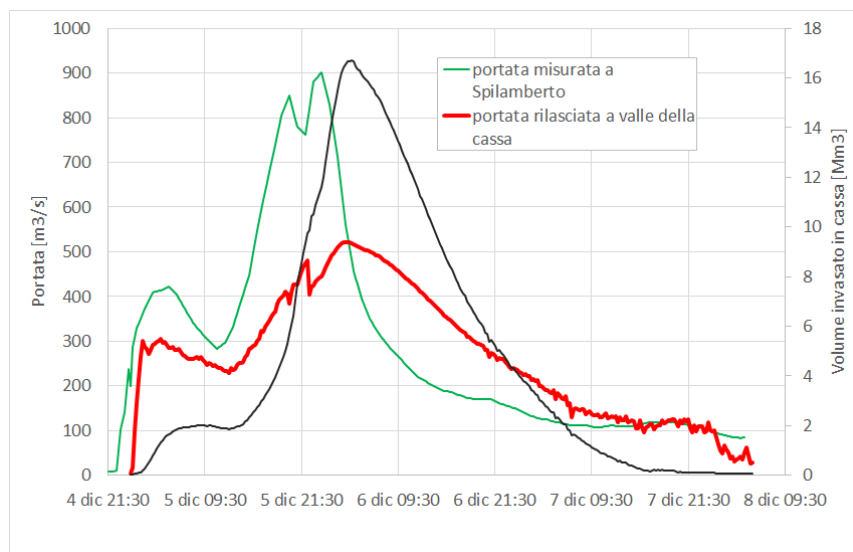


Figura 33. Andamento temporale della portata a Spilamberto (verde), in uscita alla cassa (rosso) e del volume di invaso (nero), quest'ultimo con riferimento all'asse verticale secondario a destra. La linea nera indica il volume invasato in cassa ed è riferita all'asse secondario sulla destra del grafico.

Dal grafico di Figura 33 si osserva appunto l'arrivo dell'onda di piena al manufatto moderatore e relativo, subitaneo incremento della portata in uscita alle 0:15. Lo sfasamento temporale tra i due digrammi è dovuto al tempo di transito, necessario alla corrente fluviale per percorrere la distanza tra la sezione dell'idrometro e la sezione di imbocco della cassa.

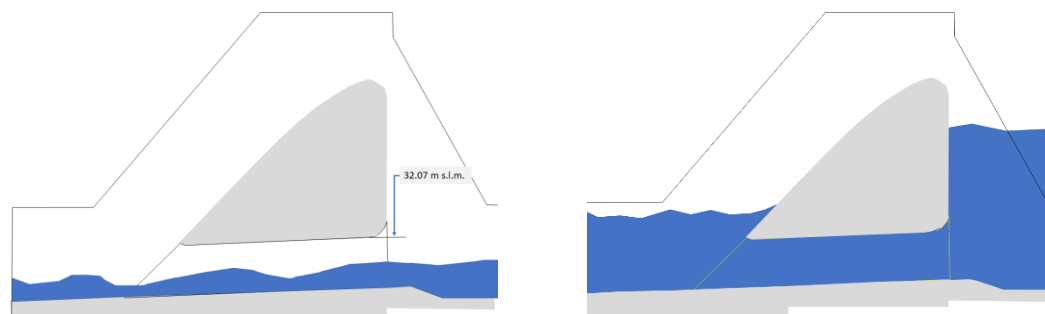


Figura 34. Sezione schematica del manufatto regolatore in corrispondenza di una delle luci di fondo principali. Si osserva a sinistra il classico efflusso a pelo libero mentre a destra, con l'incrementarsi del livello nella Cassa di espansione, il funzionamento a bocca sotto battente rigurgitata da valle

All'1:45 l'incremento della portata rilasciata a valle subisce una brusca frenata e la portata in uscita si stabilizza fino più o meno alle 4 del mattino, mentre la portata in arrivo continua a crescere; ciò avviene perché il livello in cassa ha raggiunto la soglia dei 3.3 metri sullo zero idrometrico che corrispondono alla

quota del cielo delle luci di fondo (32.07 m s.l.m.); l'efflusso delle luci cessa di funzionare a pelo libero per trasformarsi in moto in pressione, con i relativi condotti attraverso lo sbarramento che lavorano "a bocca piena"; questo provoca il brusco incremento della resistenza al moto del flusso in uscita e "congela" il valore della portata al disotto di 300 m³/s. Intanto, con l'incremento del livello all'interno dell'invaso, si attiva l'effetto di laminazione nell'ampia varice costituita dal territorio della cassa di espansione; questo favorisce l'avvio di una riduzione del valore di portata in uscita che, in fase con ciò che avviene più a monte a Spilamberto, raggiunge il minimo alle 12:30 con 330 m³/s circa;

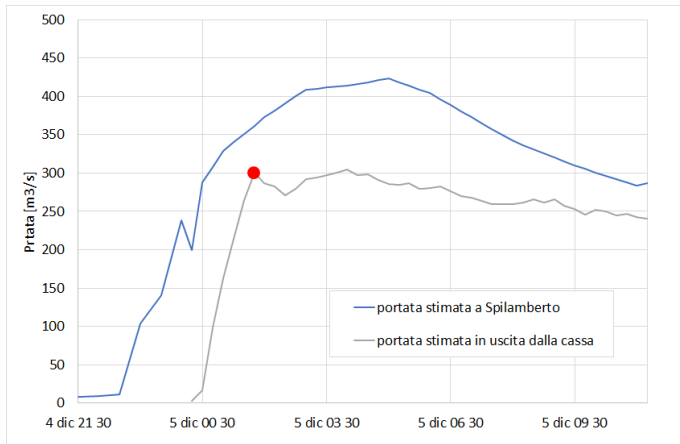


Figura . Il punto rosso indica il cambio della modalità di funzionamento degli scarichi che, da luce a pelo libero, iniziano a lavorare sotto battente

A questo punto, tra le 12:30 e le 13:30 del 5 dicembre, la portata in arrivo da monte riprende decisamente a crescere in maniera impetuosa, e lo farà fino a circa le 22:15, passando da 284 a 890 m³/s in poco meno di 10 ore: un incremento davvero impressionante; anche la portata in uscita cresce, ma a un rateo decisamente inferiore, grazie al volume che si va invasando nella Cassa (che difatti è progettata per questo).

Alle 19:30 la portata in uscita raggiunge il valore stimato di 400 m³/s mentre quella in ingresso (che ha lasciato il Ponte di Spilamberto ragionevolmente grossolanamente 2,5-3 ore prima) è dell'ordine ai 650 m³/s; il rapporto di laminazione (differenza percentuale tra ciò che entra nella cassa e ciò che ne esce) al manufatto regolatore è dell'ordine del 30%, di per sé molto elevato per questo tipo di opere;

Il valore in uscita va tuttavia ad approssimarsi a quello di 500 m³/s indicato nella rammentata relazione di Unimore (e nel foglio di condizioni), come la portata effettivamente smaltibile dall'asta fluviale a valle della cassa di espansione.

L'ingegnere responsabile della sicurezza procede così ad una prima manovra, abbassando di 2 metri la paratoia numero 5, posizionata nel corpo dello sbarramento in posizione centrale; la manovra ha l'effetto di stabilizzare temporaneamente la portata in uscita, a fronte in incremento dell'accumulo in cassa;

A questa manovra ne fanno seguito un'altra dopo 20 minuti che parzializza nella stessa misura anche le due paratoie adiacenti, numero 4 e 6; nel frattempo tuttavia, con l'aumentare del livello del serbatoio, aumenta anche l'energia disponibile per "pompate" l'efflusso della portata in uscita attraverso le luci di fondo (si tratta questo, di un problema classico delle casse di espansione in linea); l'effetto della manovra consente (e non si poteva fare di più) di controllare il tasso di incremento della portata, mantenendolo pressoché costante (invece di farlo impennare ulteriormente).

Tale controllo viene garantito dal Gestore attraverso una ulteriore manovra effettuata alle 20:45, che porta tutte le luci allo stesso livello, da 3.7 a 1.7 metri; in conseguenza di tale manovra, il differenziale tra portate in ingresso ed in uscita supera abbondantemente il 40%, valore di grande rilievo per una cassa in linea, (fortunatamente) consentito dal notevole volume disponibile a tergo del manufatto moderatore;

Più o meno alla stessa ora, anche in conseguenza delle manovre eseguite, il livello nel serbatoio si approssima alla quota 37.49 m s.l.m., corrispondente alla limitazione di invaso prevista nel Documento di protezione civile (DPC) della traversa come (massima) "quota sperimentale raggiungibile in caso di piena". Tale quota è fissata sulla base del fatto che il corrispondente livello di invaso era già stato raggiunto nel corso della vita dell'opera ai tempi della redazione; tale valore era stato poi superato nel 2019 fino alla quota di 39.84 m s.l.m. Vale la pena di riflettere sul fatto che il volume sopra soglia connesso con l'evento del 2 febbraio 2019 è settimo caso critico nella tabella Tabella 7, pur essendo l'esperienza più recente con la configurazione di cassa dotata di paratoie: il volume risulta pari a poco più della metà di quello che sarà poi dispiegato nella notte tra il 5 e il 6 dicembre 2020.

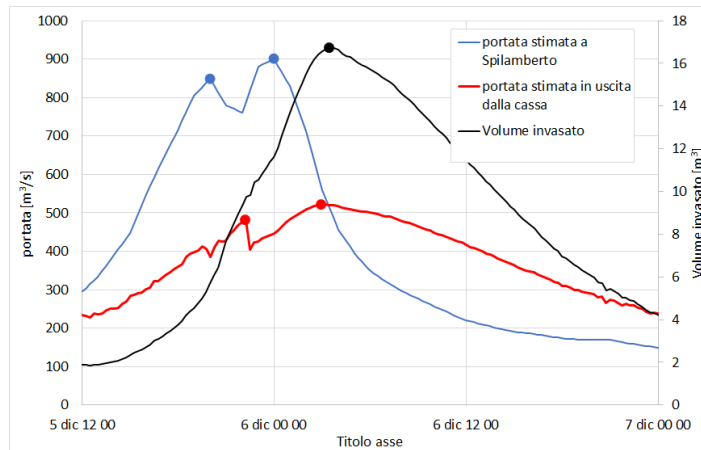


Figura 35. Dettaglio del grafico di Figura 33 al momento del passaggio del colmo. La linea blu riporta la misura dei deflussi a Spilamberto, i due colmi susseguenti sono indicati altrettanti punti blu. Lo sfasamento temporale rispetto alle vicende della cassa, in questa specifica fase dell'evento, vede un anticipo circa 2:30 ore, ma i fattori che determinano tale valore sono molteplici e di non facile interpretazione. La linea rossa indica la portata rilasciata a valle della cassa di espansione; anche in questo caso i due colmi sono evidenziati con un punto. La linea nera rappresenta il volume invaso nella cassa.

In considerazione della previsione di ulteriori ingenti afflussi previsti verso la cassa (fatto poi effettivamente avvenuto) veniva condiviso, in stretto raccordo con l'Ufficio Tecnico per le Dighe di Milano, di incrementare ulteriormente il livello (e di conseguenza il volume invaso nella cassa) per ridurre il deflusso a valle, assicurandosi al contempo di evitare la tracimazione della traversa (evento previsto in progetto ma mai occorso e comunque assolutamente da scongiurare su un'opera non collaudata).

Alle 22:15, alla sezione del manufatto moderatore, si verifica il transito di un primo colmo di piena registrato a Spilamberto attorno alle 20:00. Anche in questo caso vale la pena di sottolineare che i processi idraulici interessati dal transito dell'onda di piena lungo l'asta del Panaro, l'ingresso in cassa, la propagazione all'interno dell'ampia varice determinata dal serbatoio non consentono di determinare una precisa relazione quantitativa per tale sfasamento, che riportiamo qui come dato osservazionale. Da allora la portata in uscita, in accordo con quella in arrivo da monte, decresce sino alle 22:30 attestandosi attorno a 400 m³/s;

Purtroppo, già dalle 22 si manifesta a Spilamberto un nuovo ripido incremento della portata che darà luogo a un nuovo colmo verso la mezzanotte, il massimo assoluto, con oltre 960 m³/s. L'incremento si percepisce alla sezione del manufatto regolatore a partire dalla mezzanotte, mentre la portata già stava risalendo a causa dell'incremento di carico sulle luci dovuto ai livelli nel serbatoio; il colmo, attorno a 520 m³/s, si raggiunge a partire dalle 2:30 e permarrà attorno a tale valore per meno di due ore, fino a poco dopo le 4; mentre il rapporto di laminazione si conserva superiore al 40%. Corre l'obbligo di ricordare che per questo tipo di manufatti, si tratta di una prestazione di grande rilevanza.

È in questa fase, attorno alle 3:30 (e dunque nella fase del colmo di piena) che transita la portata che andrà a determinare, verso le sei del mattino, la rotta in località Gaggio.

Fino alle quattro del mattino il livello in cassa, e di conseguenza il volume invasato, continuerà a crescere fino a raggiungere alle 3:45 il valore massimo pari a 11.19 m s.z.i. (39.97 m s.l.m), corrispondenti a un volume di piena stoccato nel serbatoio dell'ordine di 16.7 Mm³; si tratta del massimo volume contenuto da sempre nella cassa; da questo momento il serbatoio inizia a svuotarsi e continuerà a farlo fino al tardo pomeriggio del 7 dicembre.

Dalle 2:30 del mattino intanto la portata in arrivo da monte inizia a decrescere mentre, come appena cennato, quella in uscita resta posizionata attorno ai valori di colmo per poi decrescere anch'essa seppure in maniera minore, essendo in atto la fase di lento svuotamento del serbatoio.

Per quanto attiene alla compatibilità della gestione in corso di evento, per quanto è possibile evincere dalla documentazione prodotta dal Gestore alla Commissione, si evince quanto segue:

1. La massima portata rilasciata a valle risulta sostanzialmente quella riportata nel FCEM trattando di un superamento di poche unità percentuali, del tutto compatibile con gli errori inerenti di misura; la metodologia di stima fa difatti riferimento agli esiti delle prove su modello fisico svolte nel 2011 e nel 2015 e mostra comunque margini di incertezza;
2. il "punto di pareggio", nel quale cioè la portata in uscita eguaglia quella in ingresso, può essere ragionevolmente posto attorno alle 5 del mattino; da tale momento, sino al termine dell'evento, la portata in uscita si manterrà superiore a quella in ingresso; tale fatto è fisiologico nel comportamento dell'opera e, anzi, inerente al suo funzionamento;
3. è da osservare che, conformemente alla Norma nazionale (CIRCOLARE 19 MARZO 1996, n. DSTN/2/7019), la portata in uscita è stata sempre inferiore alla portata in ingresso al serbatoio, per tutta la durata della fase di salita dell'idrogramma, confermando che la cassa non ha mai in alcun modo aggravato le condizioni a valle; è opportuno ricordare, appunto, il testo della norma che recita che *"le manovre volontarie degli organi di scarico siano svolte, in generale ed ove non diversamente specificato, adottando ogni cautela al fine di determinare un incremento graduale delle portate scaricate contenendone al massimo l'entità che [...] non deve superare, nella fase crescente, quella della portata affluente al serbatoio; nella fase decrescente la portata scaricata non deve superare quella massima scaricata nella fase crescente"*;
4. il secondo modulo della cassa non è entrato in servizio, dato che la alimentazione avviene per sfioro diretto da una soglia laterale posta alla quota di 40.18 m s.l.m., mentre il massimo livello in cassa è stato, come prima cennato, pari a 39.97 m s.l.m.



Figura 36. Cassa di espansione del Panaro; vista del manufatto moderatore da valle. In primo piano il sistema di dissipazione dell'energia dei getti provenienti dalle luci di fondo che si possono ben osservare sul paramento della traversa;

Possiamo, a questo punto rispondere alla seconda domanda che ci siamo posti, in merito alle forzanti idrologiche e idrauliche.

La Cassa di espansione di Sant' Anna (o di San Cesario) non è imputabile di alcun elemento causale o concausale nella determinazione della rotta arginale di cui si tratta. Tale affermazione riguarda sia la stessa presenza dell'opera che le modalità con la quale essa è stata gestita che sono state generalmente conformi al foglio di condizioni a meno dell'incremento di invaso oltre le limitazioni indicate dal FCEM che, da fonte AIPo, risulta debitamente è stato concordato ed autorizzato dall'Ufficio tecnico per le Dighe di Milano del Ministero delle infrastrutture e dei Trasporti.

Per quanto riguarda le polemiche di stampa in merito al fatto che il modulo ausiliario della cassa non sia stato impiegato occorre sottolineare quanto segue:

- a. il massimo livello nella cassa a monte della traversa è avvenuto, come più sopra ricordato, il 06 dicembre alle 3:45 del mattino con un valore 11.19 m s.z.i., corrispondenti a una quota di 39.96 m s.l.m.
- b. la massima piena storica era giunta a 39.49 m s.l.m. e dunque 2.47 metri più in basso;
- c. l'attivazione dello sfioro laterale avviene naturalmente quanto il livello nella cassa raggiunge la quota 40.18 m s.l.m. e dunque 22 cm al disopra del livello massimo raggiunto;
- d. la quota di massima regolazione, cioè quella che determina la tracimazione del ciglio sfiorante della traversa, è fissata a 40.83 m s.l.m. e cioè 87 cm oltre il livello effettivamente raggiunto.

Sulla base di queste osservazioni si può affermare che l'opera, con un collaudo in corso e pertanto soggetta a limitazioni di invaso, è stata sfruttata fino ad ogni ragionevole limite al fine di contenere la portata defluente verso valle, conservando al contempo un accettabile margine di sicurezza nei confronti della tracimazione.

La sollecitazione idrologica nel sito di rotta

È adesso il momento di rispondere alla terza domanda che ci siamo posti sulle forzanti idrologiche e idrauliche, e cioè se il livello raggiunto in fregio all'argine fosse stato raggiunto in passato, cioè se la struttura avesse già raggiunto una analoga sollecitazione in tempi più o meno recenti.

Da punto di vista idrologico possiamo osservare quanto segue. Il dissesto è stato evidentemente innescato dal verificarsi di un tirante idrico significativo sul petto della struttura. È dunque importante appurare l'entità e la frequenza di tale evento.

Dall'analisi delle immagini riprese in periodi più prossimi all'inizio del dissesto si è riscontrato che il livello idrometrico al momento del dissesto dovesse essere tale da lasciare un franco residuo dell'ordine di 1.3 - 1.5 metri. AIPo ha fornito alla Commissione i risultati della "picchettazione" della piena che riportano, per le adiacenze del sito di rotta in destra idrografica sia la quota arginale che il livello raggiunto al colmo dell'evento.

Tabella 8. Franchi residui da picchettazione della piena svolta da AIPo successivamente all'evento

picchetto	Progressiva [m]	quota argine [m s.l.m.]	quota piena [m s.l.m.]	franco [m]
5090 a monte della rotta	8320.58	33.97	32.653	1.317
5091 a valle della rotta	8438.91	34.00	32.530	1.469

A circa 1,5 km a valle del punto di rotta è situato l'idrometro di Ponte Navicello per il quale, come più sopra riportato, è disponibile l'andamento dei livelli in corso di evento con passo bi-orario. Si è dunque prodotto un modello di moto stazionario del tratto compreso tra le sezioni di ponte S. Ambrogio e il Ponte Navicello. Il modello, cimentato da portate crescenti ha consentito di individuare il livello all'idrometro di Navicello che corrisponde all'impegno del piede arginale da parte della corrente di piena.

Tale livello è stato individuato in una quota assoluta del pelo libero della corrente pari a 29.57 metri sul livello del mare.

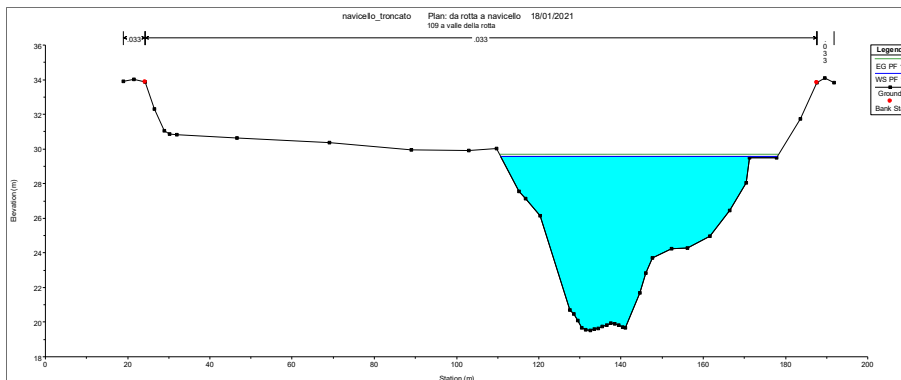


Figura 37. La sezione PA_109, posta qualche decina di metri a valle della rotta, riprodotta dal modello idraulico con la corrente di piena che lambisce il piede dell'argine. Tale condizione corrisponde alla quota assoluta del pelo libero di 29.00 m s.l.m. all'idrometro di Navicello.

ARPAE ha reso disponibile a questa Commissione le registrazioni all'idrometro (appositamente verificate e validate) a partire dal 2002. Si tratta dunque di una serie lunga poco meno di 20 anni. Occorre ricordare che, per le vicissitudini relative alla cassa di espansione di cui si è detto, la serie delle portate non può essere considerata stazionaria dipendendo, tra le altre cose, dalle modalità di regolazione dell'opera, tanto di tipo attivo che passivo. Per cui non si ritiene utile, parlare al momento di tempo di ritorno della piena osservata.

È stato invece possibile verificare che, nel periodo di osservazioni, il piede d'argine nel sito di rotta è stato verosimilmente impegnato 24 volte; è più significativo riscontrare che il livello idrometrico raggiunto il 6 dicembre 2020 è stato il massimo della serie storica e che il secondo livello più alto risale all'anno precedente con un differenziale di 64 centimetri nel corso del già ricordato evento del 2 febbraio 2019; il terzo livello più alto, è al disotto di un ulteriore centimetro ed è stato registrato nel 2014, anch'esso oggetto di citazione in questo rapporto.

Tabella 9. Primi 5 casi critici nella serie dei livelli idrometrici osservati a Ponte Navicello dal 2003. La colonna "differenza" indica lo scarto rispetto alla quota di 29.57 che corrisponde all'impegno della golena nel sito di rotta e dunque la sollecitazione sull'argine.

Caso	Anno	Livello [m s.l.m.]	Differenza [m]
1	2020	32.14	2.57
2	2019	31.49	1.92
3	2014	31.48	1.91
4	2008	31.45	1.88
5	2017	31.44	1.87

Se ne desume che l'argine, quantomeno nell'ultimo ventennio, non aveva mai riscontrato una sollecitazione idraulica della stessa entità; si desume inoltre che tale sollecitazione è stata significativamente superiore rispetto a quella del secondo e del terzo caso critico riscontrato nella serie storica misurata a Navicello

La Commissione ha poi condotto una ulteriore verifica sulla durata del periodo di impegno continuativo dell'argine in corso di evento, ciò al fine di valutare se tale fattore può aver avuto un'influenza o, quantomeno, offrire indicazioni su quanto è accaduto. L'analisi dei dati di Navicello ci dice alcune cose di un qualche interesse.

L'argine, durante l'evento di dicembre, è stato impegnato verosimilmente per oltre 41 ore, il dato maggiore della intera serie storica. questo fatto non deve fare dimenticare che il collasso è avvenuto dopo "soltanto" 14 ore dal momento che la corrente di piena aveva attaccato il piede d'argine, quindi non è ragionevole

dedurre una qualche ulteriore forma di eccezionalità dell'evento, quale fattore concausale del collasso: diverse volte, nel passato, il manufatto arginale aveva "lavorato" (seppur con livelli più bassi) più a lungo;

Mette tuttavia conto osservare un ulteriore fatto rilevante, quantomeno al fine di organizzare le politiche di manutenzione per il futuro: i dati di impegno del piede d'argine nel sito di rotta per oltre trenta ore, indicano nessuna occorrenza per i primi 7 anni della serie storica, praticamente fino al dicembre del 2008; da allora, nei successivi 12 anni (dal dicembre 2008 al dicembre 2020) riscontriamo 6 occorrenze; le due maggiori sono riferite ai due ultimi eventi, del 2019 e 2020.

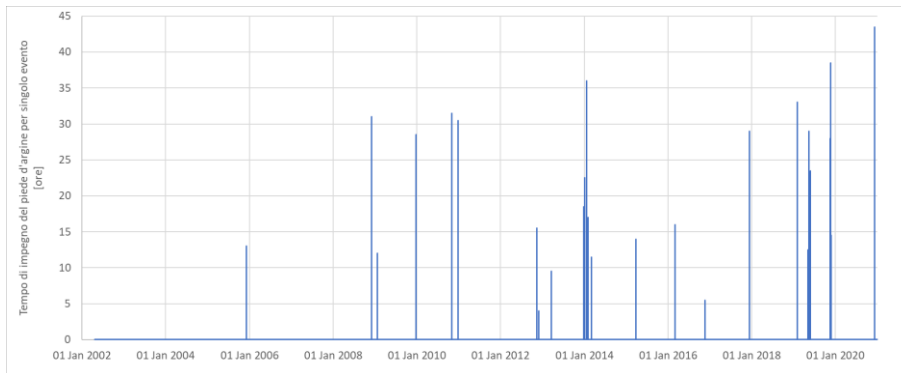


Figura 38. Stima del numero di ore consecutive di impegno del piede d'argine nel sito di rotta a partire dall'analisi della serie storica dei livelli osservati al sensore di Ponte Navicello

In questo senso si può affermare che la presenza della Cassa di espansione ha fisiologicamente allungato i tempi di evoluzione dei fenomeni di piena, con un maggiore impegno temporale dei rilevati arginali. Non si tratta di un fenomeno inatteso, ma del tutto inerente con il funzionamento di qualsiasi cassa di espansione e, spesso, risulta più rilevante per il tipo "in linea" come quella di Sant'Anna.

Questo aspetto non è di per sé pericoloso, ma richiede una qualche attenzione in più sulle modalità di manutenzione e sorveglianza dei manufatti, tanto in tempo di pace che in corso di evento. Si osserva infine che la rotta non è avvenuta in tronchi morfologicamente vulnerabili ai fenomeni di erosione, quali porzioni esterne di curve, presenza di singolarità quali passaggi tra le pile di ponti, soglie o salti di fondo o quant'altro.

In conclusione, si può dunque formulare la risposta al terzo dei quesiti sulle forzanti idrologiche. L'argine è stato sollecitato da un livello idrometrico che, seppur lontano dai limiti strutturali dell'opera, non era stato mai raggiunto nell'ultimo ventennio, secondo i dati rilevati a Ponte Navicello. Per tale livello di sollecitazione non conviene parlare di tempo di ritorno dato che la serie storica non è stazionaria a causa della presenza della cassa di espansione e dei cambiamenti di configurazione e gestione che sono avvenuti dal momento in cui sono disponibili le paratoie per la regolazione "attiva" dell'opera.

Si tratta dunque del primo caso critico snella serie di osservazioni storiche che, peraltro, si mostra relativamente distante da quello immediatamente antecedente, occorso peraltro lo scorso anno. Si sottolinea anche che tale livello, che può dunque definirsi eccezionale.

Parte terza: l'analisi di sito

Breve ricostruzione storica delle rotte del fiume Panaro

Le rotte, i sormonti e gli allagamenti conseguenti dell'asta valliva del Panaro sono stati molteplici nel corso dei secoli e anche in tempi relativamente recenti. Essi sono stati oggetto di diversi studi, principalmente riconducibili a Moratti e Pellegrini (1972), Moratti (1987), Castaldini e Pellegini (1989), Panizza et al. (2004) e citati nel dettagliato lavoro di Carnevali (2017).

La *Figura 39* mostra la ricostruzione di Castaldini e Pellegini (1989) delle zone di rotta. Come si può notare, tra Sant'Ambrogio e Bomporto, nel tratto dove è occorsa la rotta del 2020, sono occorsi diversi casi di brecce o sormonti arginali.

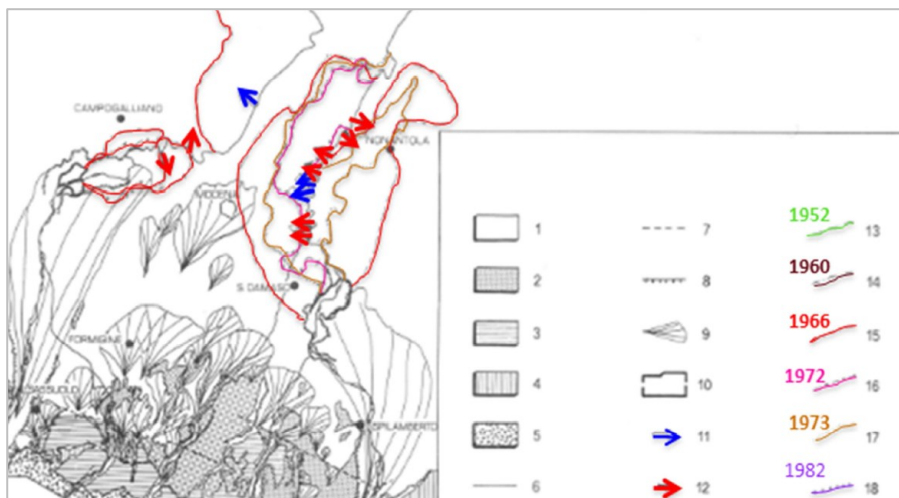


Figura 39 Alluvioni del Secchia e del Panaro dal 1952 al 1982 (Castaldini e Pellegini, 1989).

La ricostruzione storica delle alluvioni, riportata da Carnevali (2017), indica che già a partire dal 1770 e fino al 1950 sono censite decine di alluvioni indotte da varie cause. In tempi più recenti, in particolare a partire dalla seconda metà del secolo scorso, le alluvioni causate solamente da rotture strutturali del corpo arginale (non tracimazioni) sono frequenti:

- 19-20/11/1952: rotta che ha interessato i comuni di Camposanto, Finale Emilia e San Felice sul Panaro (Moratti e Pellegrini, 1973); la breccia fu favorita dalle precarie condizioni della arginatura bersagliata dai bombardamenti del 1944 e alla successiva ricostruzione in carenza di risorse economiche;
- 19-20/11/1952: rotta dell'argine sinistro a Saliceto Panaro, in prossimità della linea ferroviaria Modena-Bologna;
- 4-5/11/1966: l'alluvione del 1966 è tristemente famosa in tutta Italia e la zona di Modena non fece eccezione. Le rotte del Panaro avvennero in destra alla "Chiavica Nonantolana" a monte di Ponte Navicello e in sinistra in corrispondenza del Torrente Tiepido per rigurgito (Moratti, 1987);
- 5/4/1969: la piena del Panaro e del Tiepido provocarono allagamenti alla periferia di Modena presso Fossalta e il Ponte di S. Ambrogio (Pellegrini, 1972). Carnevali (2017) riporta di una falla nell'argine destro del Panaro, a sud della via Emilia ed esattamente sulla sinistra di via Montecatini in corrispondenza del fondo Farri;
- 10-16/9/1972: La rotta avvenne in sinistra idrografica in località Gorgo Tre Frati e vi furono delle tracimazioni da Modena est e tra quest'ultima e Nonantola (Moratti, 1987); il 16/9 l'argine si ruppe in località Navicello, in destra, provocando una breccia di 75 metri di lunghezza e in sinistra per una lunghezza di qualche decina di metri.

- 25-26/05/1973 (*Figura 40*): le rotte avvennero in sinistra, a Fossalta per una lunghezza di circa 30 m, a ridosso della ferrovia Milano-Bologna per una lunghezza di circa 20 m, a un chilometro a valle della stessa ferrovia all'altezza delle scuole vecchie di Saliceto Panaro per una lunghezza di circa 40 m e a Gorgo Tre Frati, per una lunghezza di circa 100 m, e in destra nel tratto compreso tra il Ponte Navicello e l'ex ferrovia di Modena-Ferrara, per una lunghezza di circa 40 m;
- 10-14/11/1982: il 10/11/1982 rottura dell'argine sinistro presso la località Cà Bianca per effetto del sifonamento e nuova rottura, sempre nello stesso punto, il 14/11/1982.



Figura 40 Una rotta dell'argine del Panaro del 1973 (Carnevali, 2017).

Una mappa di maggiore dettaglio, nell'intorno del sito della rotta del 2020, che riporta le rotte e i sormonti dal 1966 in poi è mostrata in *Figura 41*. La mappa è stata consegnata agli scriventi dai tecnici del Comune di Modena in occasione di un sopralluogo al sito in data 15/1/2021. In tale mappa, oltre alla recente breccia del 2020, sono stati ubicati anche due episodi recenti, uno dei quali di collasso parziale nel 2014 ed un fontanazzo occorso nel 2019.

Si nota che, in un tratto di circa 3 km, di alveo si possono contare:

- 1966: rotta dell'argine destro circa 400 m più a valle della rotta del 2020;
- 1972: rotta dell'argine sinistro circa 300 m più a monte della rotta 2020;
- 1973: due rotte, delle quali una nell'argine destro circa 900 m e una nell'argine sinistro approssimativamente di fronte alla rotta del 2020;
- 1972 e 1973: tre tracimazioni delle quali due a monte ed una a valle della rotta del 2020;
- 2014: rotta parziale, provvidenzialmente riparata;
- 2019: un fenomeno di sifonamento per il quale è stato già eseguito un intervento di messa in sicurezza.

Come è possibile notare dalla numerosità degli eventi anche recenti, questo tratto di argini del Panaro, in destra ed in sinistra idrografica, è caratterizzato, da un'estrema fragilità.

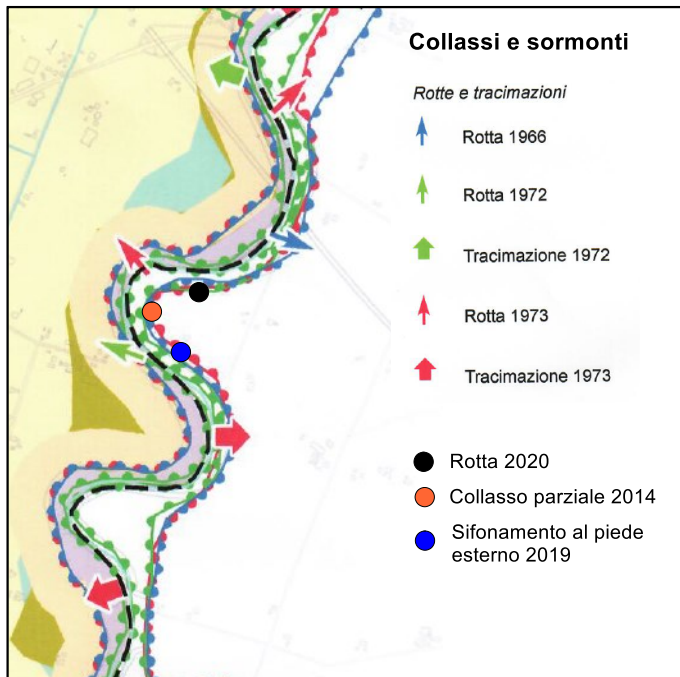


Figura 41 Alluvioni del Panaro dal 1966 (Comune di Modena, 2021).

Una attenzione particolare meritano due eventi molto recenti, del 2014 e del 2019, descritti in seguito.

Collasso arginale parziale del 19/01/2014

In concomitanza con la rotta dell'argine del fiume Secchia, il 19/01/2014 si è osservato un fenomeno erosivo concentrato, potenzialmente molto pericoloso, in un tratto di argine circa 200 m a monte della rotta del 2020 (D'Alpaos et al., 2014, Orlandini, 2015), che è stato bloccato grazie ad un tempestivo intervento di riparazione.

Nella Figura 42a, scattata alle 16:01, si può intravedere il livello idrico del fiume e la lama d'acqua torbida che invade la campagna ai piedi della schiena dell'argine. Al centro dell'immagine si vede il fenomeno di erosione concentrata che ha scavato un condotto interno all'argine e che è responsabile di tale allagamento.

Nella Figura 42b è mostrata la fotografia, scattata alle 19:48 (a distanza di circa 6 ore da quella precedente) del collasso della sommità arginale per effetto dell'erosione interna sottostante. Il collasso ha prodotto un abbassamento locale della sommità arginale di circa 3 m, che è stato prontamente ritombato per mezzo di un escavatore, evitando un fenomeno di sormonto.

Tale tipo di fenomeno è stato attribuito alla presenza di una tana da Orlandini et al. (2015). Come mostrato in Figura 43 la presenza della tana era già evidente in una immagine satellitare del 30/3/2012.

Va osservato che, a distanza di circa 30 m più, durante il sopralluogo del 29/12/2020 è stata rilevata la posizione dell'ingresso di una tana nel paramento interno dell'argine.

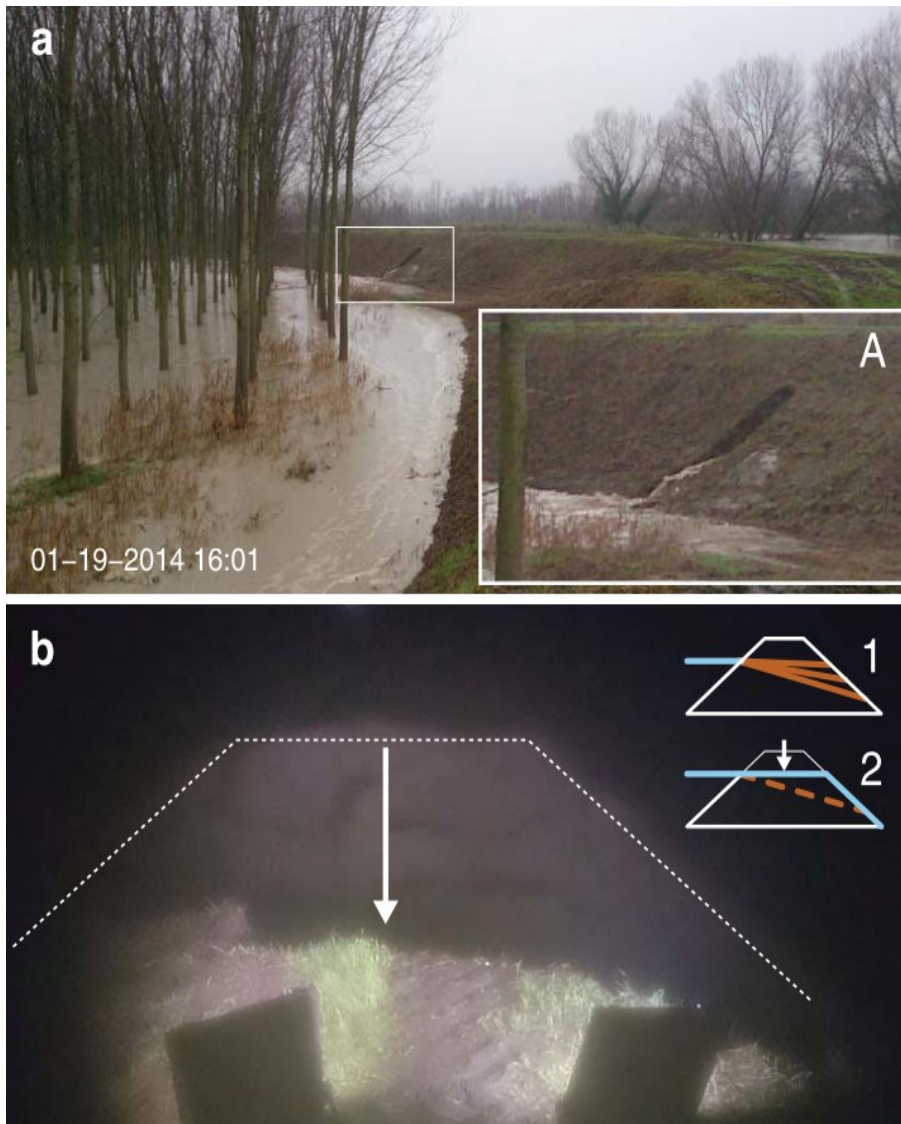


Figura 42 Erosione concentrata nell'argine poco a monte della zona della rotta (19/01/2014) (Orlandini et al. 2015)



Figura 43 Immagine aerea obliqua dell'ingresso della tana che ha dato luogo al collasso parziale.

Sifonamento al piede dell'argine individuato nel 2019

Nel febbraio 2019 è comparso un fontanazzo, localizzato in sponda idrografica destra, poco più sud della zona della rotta del 2020, con un'attivazione inizialmente molto limitata. La *Figura 44* mostra il fontanazzo circondato dalle opere di presidio idraulico.

All'attivazione del fontanazzo, il livello a Bomporto a febbraio 2019 era oltre 9 m con la banca lato fiume sommersa. Le piene di novembre 2019, caratterizzate da tre colmi successivi, hanno riattivato in maniera significativa il fontanazzo (AIPo, 2020).

Sulla base di informazioni visive fornite da chi si è occupato della messa in opera dei sacchi per formare la coronella, l'attivazione è avvenuta con l'acqua al di sopra della banca e si è ovviamente potenziata all'aumentare della piena.

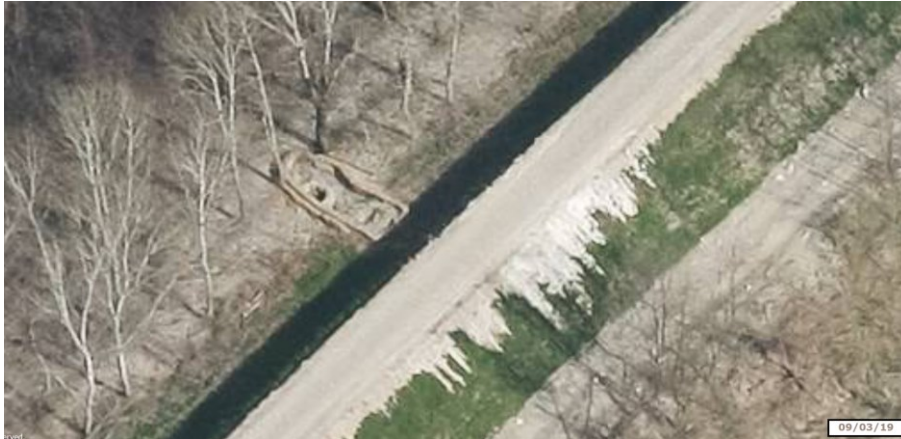


Figura 44 Immagine satellitare del 9/3/2019 della bocca del sifone.

Nella zona, il corso del fiume è in froldo con piano campagna a circa 31 m s.l.m. e la sommità arginale è a quota 34.4 m s.l.m. L'argine è caratterizzato da una banca interna alla quota di circa 30 m s.l.m. e il fondo dell'alveo è circa a quota 18-19 m s.l.m.

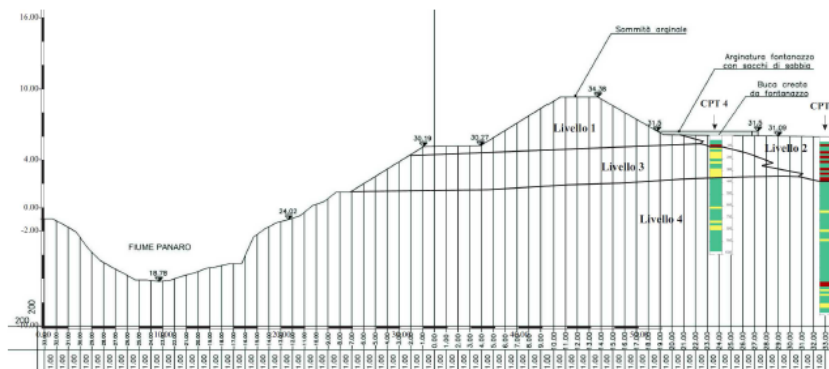


Figura 13: Sezione geologica – idrogeologica attraverso il fontanazzo

Livelli	Caratterizzazione litologica	Permeabilità K (m/sec)	γ (kN/mc)	γ_{sat} (kN/mc)
Livello 1	Rilevato arginale – sabbie limose, limi sabbiosi e limi	1-7 E-7	18,50	19,00
Livello 2	Argille compressibili, argille organiche e torbe	8 E-9	16,00	17,00
Livello 3	Sabbie fini, sabbie limose e limi sabbiosi	5 E-6 1 E-5	19,00	20,00
Livello 4	Argille, argille limose e limi argillosi	1-5 E-8	19,50	20,00

Figura 45 Modello geotecnico dell'argine nella zona del sifonamento (AIPo 2020).

La campagna di indagini è consistita in n° 4 prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT). Purtroppo, non sono state eseguite indagini anche dalla sommità arginale che consentissero di conoscere il profilo stratigrafico al di sotto dell'argine.

Le prove CPT hanno consentito di schematizzare il profilo del terreno indicato in *Figura 45*. In particolare la prova CPT4, eseguita vicinissima al fontanazzo, ha mostrato la presenza di formazioni sabbiose erodibili mentre la prova CPT2, a valle del fontanazzo, ad alcuni metri di distanza dal margine esterno della coronella in sacchi di sabbia, ed è caratterizzata da limi ed argille con frequenti intercalazioni di torbe ed argille organiche.

Analisi numeriche effettuate nell'ambito del progetto di sistemazione (che ha previsto la realizzazione di una banca a campagna), hanno indicato nella presenza di una discontinuità stratigrafica molto permeabile la possibile causa di innesco del fenomeno del sifonamento.

Inquadramento geologico

La morfologia e la geologia di questo settore di pianura sono il risultato dell'azione deposizionale ed erosiva dei fiumi Panaro e Secchia, il cui bacino di alimentazione è ubicato nell'Appennino Emiliano.

L'assetto geologico profondo è conosciuto in virtù della interpretazione delle indagini condotte in passato per lo sfruttamento di idrocarburi. La *Figura 46* (Gasperi e Pellegrini, 1981) mostra una sezione geologica fino a rilevanti profondità. Procedendo dall'alto verso il basso, si distinguono:

- 1) i depositi alluvionali del Pleistocene-Olocene;
- 2) i sedimenti marini del Pliocene superiore – Pleistocene;
- 3) sedimenti marini del Pliocene inferiore;
- 4) sedimenti marini del Paleogene-Miocene;
- 5) formazioni calcaree del Mesozoico costituenti le pieghe Ferraresi.

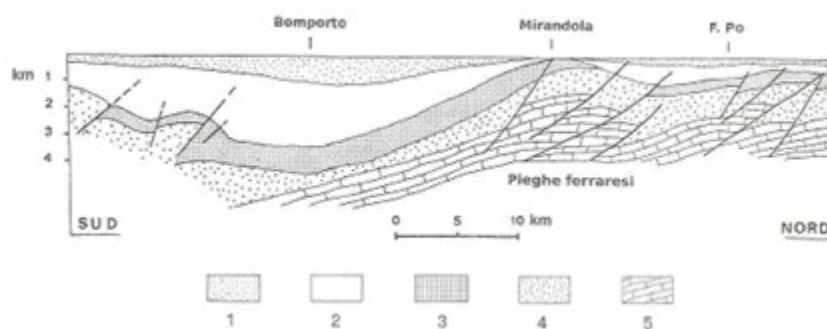


Figura 46 Sezione geologica della pianura modenese ricostruita sulla base delle stratigrafie dei pozzi di idrocarburi (Gasperi e Pellegrini, 1981). Legenda: 1) depositi alluvionali (Pleistocene-Olocene); 2) sedimenti marini del Pliocene superiore – Pleistocene; 3) sedimenti marini del Pliocene inf.; 4) sedimenti marini del Paleogene-Miocene; 5) formazioni calcaree del Mesozoico costituenti le pieghe Ferraresi.

La zona appartiene al Supersistema Emiliano-Romagnolo, che è l'unità stratigrafica che comprende l'insieme dei depositi quaternari di origine prevalentemente continentale affioranti in corrispondenza del margine appenninico padano ed i sedimenti ad essi correlati nel sottosuolo della pianura emiliano-romagnola.

Questa unità comprende due Sintemi distinti: il Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore, AEI e il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore, AES, separati da una discontinuità rilevabile nelle aree marginali della pianura legata a una fase tettonica di importanza regionale.

Nell'area del Panaro affiorano solo i depositi di AES di età compresa tra 400.000 anni e il presente; più specificatamente, la parte di questa successione alluvionale che forma il sottosuolo degli argini (20-30 m) appartengono al Subsistema di Ravenna (AES8), di età Olocenica (12000 anni – presente).

La Figura 47 (Progetto CARG, 2009; Relazione geologica, idrogeologica e sismica, "Progetto Esecutivo Fiume Panaro", AIPo 2018) mostra una sezione geologica del Foglio CARG n. 201 "Modena" dove i terreni appartenenti ad AES8 sono costituiti da sedimenti di piana alluvionale depositati nell'ultimo periodo postglaciale.

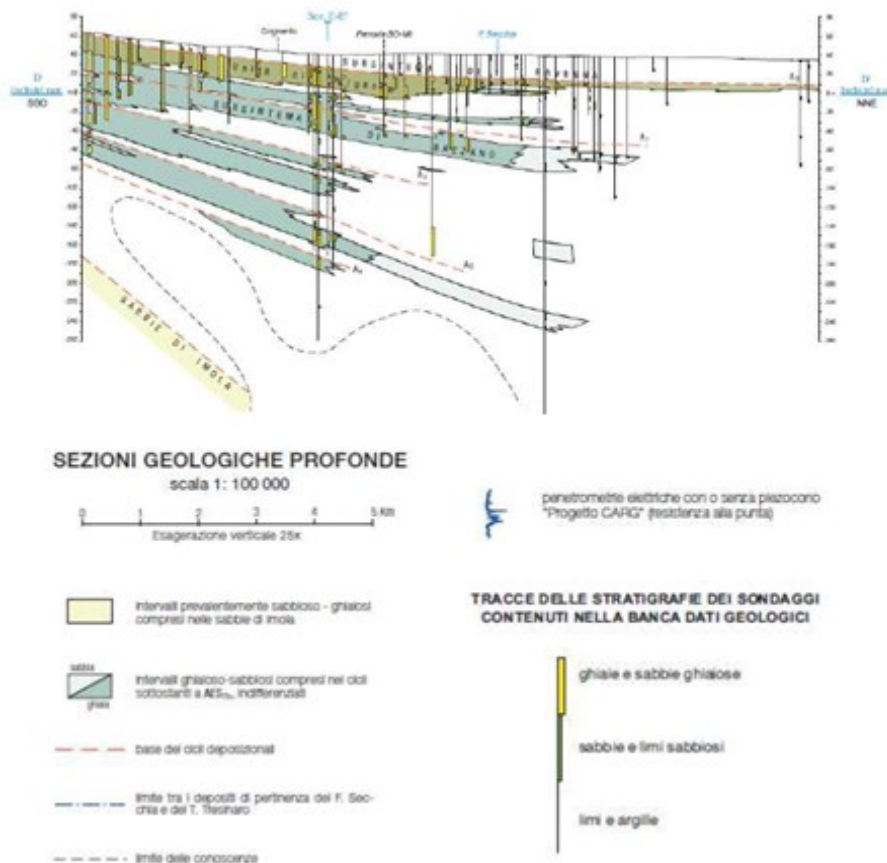


Figura 47 Sezione geologica – Allegato "Geologia e Sottosuolo" del Foglio Carg 201 "Modena".

Più specificatamente, la parte del terreno alluvionale che può essere considerata il suolo di fondazione degli argini del Panaro è costituita da alternanze di strati sabbiosi, sabbie limose e limi sabbiosi, con livelli argillo-limosi.

Le sabbie e i limi sabbiosi affiorano secondo fasce allungate da sud a nord che, dipartendosi dal piede delle conoidi, corrispondono ad antichi argini fluviali od a fasce di migrazione dei meandri, spesso in parte sepolti dalle alluvioni più recenti. La corrispondenza di alcune fasce limoso-sabbiose con dossi è indicativa della presenza di sponde fluviali naturali. Le argille ed i limi hanno spesso una distribuzione del tutto irregolare che riflette una stratificazione lenticolare derivante da singoli episodi di tracimazione. (Relazione geologica, idrogeologica e sismica, "Progetto Esecutivo Fiume Panaro", AIPo 2018).

La parte superiore del subsistema, sino al piano campagna, è caratterizzata da maggiore frequenza di livelli limo-sabbiosi o limo-argillosi con frequenti intercalazioni sabbiose, a testimonianza di un aumento degli ambienti di argine e di rotta fluviale legati ad una maggiore dinamica dei corsi d'acqua (Figura 47).

All'interno del Subsistema di Ravenna è distinta l'Unità di Modena (AES8a) che è caratterizzata dalla presenza al tetto di un suolo a bassissimo grado di alterazione. Ad essa appartengono i sedimenti depositi dopo l'età romana (post V secolo d.C.). (Relazione geologica, idrogeologica e sismica, "Progetto Esecutivo Fiume Panaro", AIPo 2018).

La Figura 49 mostra le caratteristiche granulometriche dei terreni in superficie in un tratto abbastanza ampio, comprendente la zona della rotta.

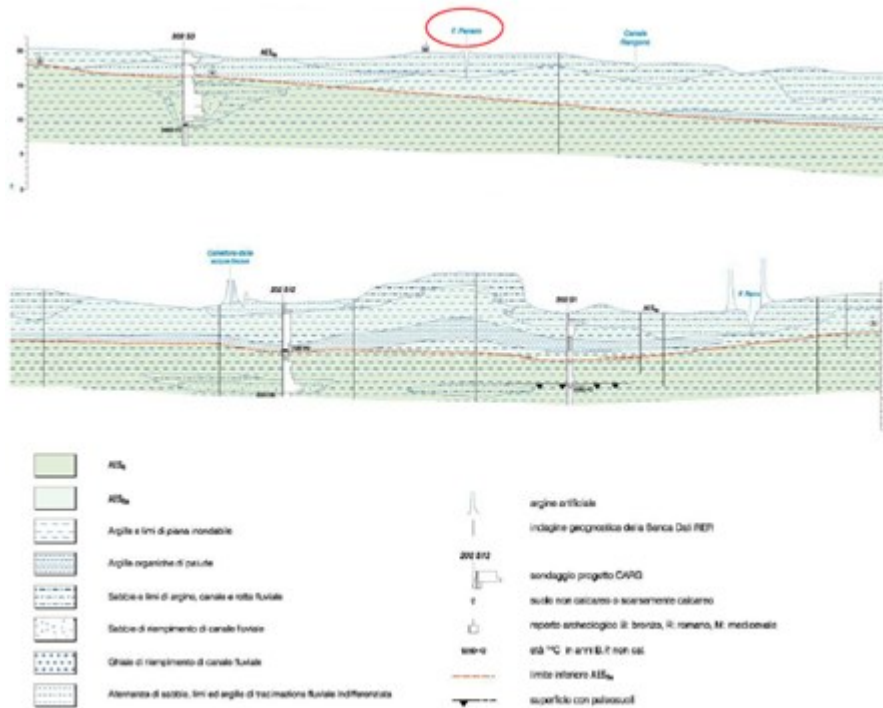


Figura 48 Sezione geologica Foglio CARG 202 "San Giovanni Persiceto". (Relazione geologica, idrogeologica e sismica, "Progetto Esecutivo Fiume Panaro", AIPo 2018)

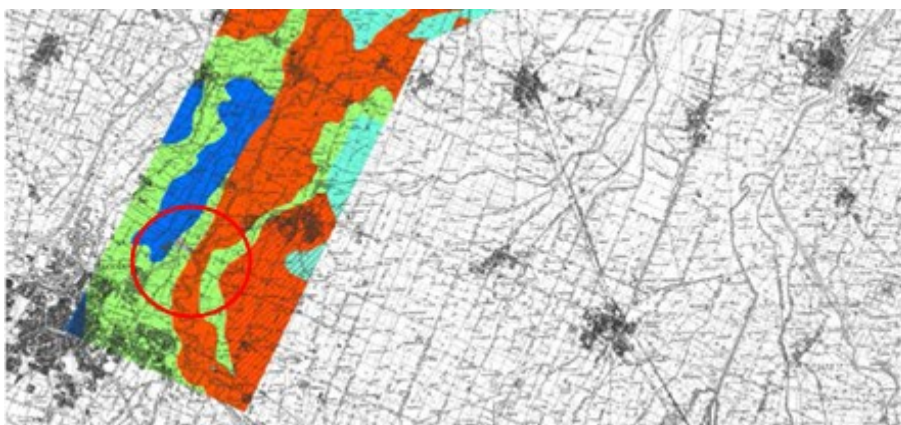


Figura 49 Ambienti deposizionali e litologie.

Nella Figura 49 gli ambienti deposizionali e le litologie sono relative a AES8 e AS8a. La prima affiora nel margine sud-est dell'area ed è barrata in figura.

Ai colori corrispondono:

- arancio: alternanze di sabbie e limi sabbiosi di argine, canale e rotta fluviale;
- azzurro: argille e limi di piana inondabile;
- verde: alternanze di sabbie, limi ed argille di traccimazione fluviale indifferenziata;

- blu: argille e limi con sostanza organica palustri.

Un dettaglio della tipologia di terreno superficiale nella zona della rotta (stante 34) è mostrato in Figura 50 la quale conferma che il terreno superficiale di fondazione dell'argine è composto, come è già stato evidenziato in precedenza, da sabbie limose e limi sabbiosi.



Figura 50 Carta delle caratteristiche granulometriche dei terreni superficiali nella zona della rotta.

Caratterizzazione geomeccanica dell'arginatura del Panaro

La relazione geologica, idrogeologica e sismica riporta in allegato i risultati di un'estesa campagna di indagine consistente in indagini geofisiche, prove penetrometriche con piezocono e sondaggi con prove di laboratorio condotte nell'ambito del progetto di adeguamento del fiume Panaro del 2018 (Progetto Esecutivo Fiume Panaro, AIPo, 2018). I sondaggi sono stati eseguiti a partire dalla sommità arginale, mentre le prove penetrometriche anche nella zona dell'alveo e a campagna.

L'indagine di laboratorio è consistita in prove laboratorio su 48 campioni indisturbati prelevati in 12 sondaggi. Essa ha incluso analisi della distribuzione granulometrica, determinazione dei limiti di Atterberg sul materiale a grana fine, del contenuto in acqua, del peso di volume, dell'indice dei vuoti e del grado di saturazione. Per la determinazione della resistenza al taglio sono state eseguite numerose prove di taglio diretto e prove di compressione triassiale non drenata.

I risultati sono di particolare interesse per l'analisi delle cause della rotta arginale del 6/12/2020, perché consentono un esame complessivo delle caratteristiche dei terreni che formano il corpo arginale e il terreno di fondazione per un lungo tratto dell'asta fluviale. Tali risultati possono essere confrontati con quelli eseguiti sui campioni indisturbati ottenuti dai sondaggi S1 e S2 nella zona della rotta.

I risultati delle determinazioni delle proprietà elementari per tutti e 48 i campioni sono riportati nella *Tabella 10* e *Tabella 11*.

Nella *Tabella 10* sono indicati:

- contenuto d'acqua W (%);
- limite di liquidità WL (%);
- limite di plasticità WP (%);
- indice di plasticità (%)
- limite di ritiro WR (%)
- il grado di saturazione SR (%)

- L'indice dei vuoti.

Nella *Tabella 11* sono riportati:

- frazioni percentuali della composizione granulometrica del terreno;
- diametro efficace D_{10} ;
- diametro D_{60} ;
- diametro medio D_{50} ;
- coefficiente di uniformità $U=D_{60}/D_{10}$.

Di particolare rilievo sono le determinazioni eseguite sui terreni che costituiscono gli argini e che sono rilevabili dalle coppie di campioni CI1 e CI2 di tutti i sondaggi.

Tabella 10 Proprietà elementari dei terreni delle arginature del Panaro e loro fondazioni

SOND.	CAMP.	PROF. (m)	W (%)	WL (%)	WP (%)	WR (%)	IP(%)	SR(%)	IND. VUOTI
S1	CI1	1,75	12	31	19	16	12	37	0,68
	CI2	3,45	15	27	20	16	7	92	0,43
	CI3	6,75	34	34	22	16	12	98	0,91
	CI4	9,75	32	47	22	15	25	100	0,80
S9	CI1	1,75	17	27	19	15	8	37	0,68
	CI2	3,45	15					72	0,53
	CI3	6,75	11					43	0,68
	CI4	9,75	24					92	0,66
S20	CI1	1,75	12	27	21	12	6	54	0,56
	CI2	3,45	12					52	0,60
	CI3	6,75	20	32	19	16	13	98	0,52
	CI4	9,75	32	56	28	13	28	100	0,83
S27	CI1	1,75	10					37	0,68
	CI2	3,45	12	27	19	12	8	47	0,65
	CI3	6,75	17	25	19	16	6	78	0,55
	CI4	9,75	33	41	25	17	16	100	0,74
S34	CI1	1,75	9	27	20	17	7	39,7	0,61
	CI2	3,45	15	27	18	16	9	68,15	0,55
	CI3	6,75	18					87	0,56
	CI4	11,25	22					99	0,58
S35	CI1	1,75	10	25	19	16	6	46	0,54
	CI2	3,45	21	29	20	13	9	94	0,60
	CI3	8,30	20					87	0,57
	CI4	9,75	29	53	28	19	25	100	0,73
S39	CI1	1,75	12					42	0,76
	CI2	3,45	17					69	0,63
	CI3	6,75	18					67	0,70

	CI4	9,75	36	38	22	17	16	100	0,93
S44	CI1	1,75	9					33	0,70
	CI2	3,45	9	25	18	9	7	37	0,64
	CI3	6,75	20	28	20	18	8	91	0,57
	CI4	9,75	35	28	17	15	11	100	0,90
S58	CI1	1,75	8	28	19	17	9	34	0,60
	CI2	3,80	11					50	0,56
	CI3	6,75	22	33	21	17	12	100	0,54
	CI4	10,00	33					100	0,81
S63	CI1	1,75	7			16		25	0,70
	CI2	3,80	11	29	19	14	10	48	0,59
	CI3	6,75	13	28	17	14	11	62	0,53
	CI4	9,75	21					84,8	0,64
S72	CI1	1,75	8	27	18	14	9	47,12	0,45
	CI2	3,80	7	28	17	8	11	33,2	0,54
	CI3	6,75	19	29	20	14	9	88,13	0,57
	CI4	9,75	28	37	24	18	13	100	0,88
S76	CI1	1,75	7					25,7	0,70
	CI2	3,85	12					55	0,59
	CI3	6,75	11	25	18	14	7	52,2	0,57
	CI4	9,75	32	33	22	12	11	100	0,83
S1	CI1	1,75	24	72	4	0,0030	0,0420	0,0350	14,0
	CI2	3,45	24	68	8	0,0024	0,0410	0,0270	17,1
	CI3	6,75	11	84	5	0,0030	0,0270	0,0210	9,0
	CI4	9,75	13	56	31				
S9	CI1	1,75	43	54	3	0,0050	0,0640	0,0500	12,8
	CI2	3,45	50	48	2	0,0090	0,0690	0,0600	7,7
	CI3	6,75	63	35	2	0,0150	0,1130	0,0800	7,5
	CI4	9,75	70	29	1	0,0180	0,1300	0,0950	7,2
S20	CI1	1,75	47	51	2	0,0080	0,0670	0,0550	8,4
	CI2	3,45	50	47	3	0,0050	0,0710	0,0600	14,2
	CI3	6,75	26	67	7	0,0030	0,0390	0,0230	13,0
	CI4	9,75	8	64	28				
S27	CI1	1,75	45	51	4	0,0060	0,0600	0,0500	10,0
	CI2	3,45	43	54	3	0,0040	0,0640	0,0480	16,0
	CI3	6,75	43	55	2	0,0060	0,0640	0,0500	10,7
	CI4	9,75	12	73	15	0,0010	0,0110	0,0070	11,0

S34	CI1	1,75	42	50	8				
	CI2	3,45	31	54	15	0,0030	0,0620	0,0480	20,7
	CI3	6,75	44	54	2	0,0040	0,0650	0,0500	16,3
	CI4	11,25	70	28	2	0,0090	0,1270	0,1000	14,1
S35	CI1	1,75	49	47	4	0,0040	0,0740	0,0550	18,5
	CI2	3,45	25	71	4	0,0040	0,0410	0,0280	10,3
	CI3	8,30	48	47	5	0,0040	0,0720	0,0550	18,0
	CI4	9,75	6	62	30				

Tabella 11 Proprietà elementari dei terreni delle arginature del Panaro e loro fondazioni

SOND.	CAMP.	PROF. (m)	SABBIA (%)	LIMO (%)	ARGILL A (%)	D10 (mm)	D60 (mm)	D50 (mm)	U
S39	CI1	1,75	52	47	1	0,0080	0,0820	0,0500	10,3
	CI2	3,45	36	62	2	0,0070	0,0550	0,0430	7,9
	CI3	6,75	46	53	1	0,0120	0,0670	0,0400	5,6
	CI4	9,75	8	72	20				
S44	CI1	1,75	44	54	2	0,0100	0,0640	0,0500	6,4
	CI2	3,45	42	56	2	0,0070	0,0630	0,0500	9,0
	CI3	6,75	26	67	7	0,0030	0,0430	0,0330	14,3
	CI4	9,75	32	66	2	0,0090	0,0520	0,0440	5,8
S58	CI1	1,75	37	60	3	0,0040	0,0560	0,0400	14,0
	CI2	3,80	48	50	2	0,0070	0,0700	0,0550	10,0
	CI3	6,75	22	69	9	0,0022	0,0370	0,0270	16,8
	CI4	10,00	41	54	5	0,0040	0,0630	0,0480	15,8
S63	CI1	1,75	40	58	2	0,0060	0,0600	0,0500	10,0
	CI2	3,80	27	68	5	0,0030	0,0420	0,0300	14,0
	CI3	6,75	38	55	7	0,0030	0,0560	0,0400	18,7
	CI4	9,75	44	54	2	0,0090	0,0660	0,0500	7,3
S72	CI1	1,75	34	64	2	0,0060	0,0520	0,0400	8,7
	CI2	3,80	48	49	3	0,0060	0,0710	0,0550	11,8
	CI3	6,75	28	69	3	0,0050	0,0450	0,0320	9,0
	CI4	9,75	9	82	9	0,0020	0,0150	0,0110	7,5
S76	CI1	1,75	57	41	2	0,0110	0,0960	0,0700	8,7
	CI2	3,85	44	52	4	0,0050	0,0670	0,0500	13,4
	CI3	6,75	42	55	3	0,0050	0,0620	0,0500	12,4
	CI4	9,75	14	83	3	0,0050	0,0270	0,0220	5,4

I grafici che seguono mostrano le grandezze significative per tutti i terreni che vanno dallo stante N. 0 a N. 139 assieme a quelli sui campioni ottenuti nel sito della rotta (tra gli stanti 34 e 35 dx). Le specifiche prove condotte su questi ultimi saranno commentate in un punto successivo.

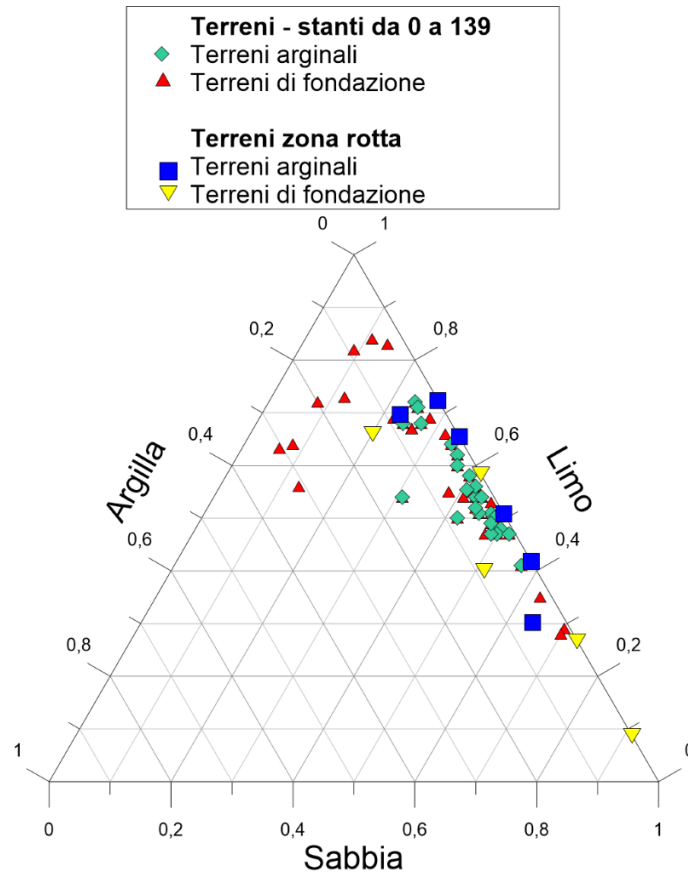


Figura 51 Diagramma ternario sabbia-limo-argilla.

Il diagramma ternario di Figura 51 mostra che i terreni che formano il corpo arginale sono composti da una miscela di limo con sabbia e una piccola percentuale di argilla. I valori medi di tale composizione indicano un 41% di sabbia, 55% di limo e 4% di argilla. In sostanza si tratta di limi sabbiosi o sabbie limose, con percentuali di sabbia variabili da un minimo del 24% ad un massimo del 57% mentre la percentuale di limo varia da un minimo del 42% ad un massimo del 71%. La componente a grana fine è poco plastica con un valore medio di $WL = 27\%$ ed un valore di $IP = 8\%$ ed appartiene, secondo la carta di Casagrande, alle argille inorganiche di bassa plasticità.

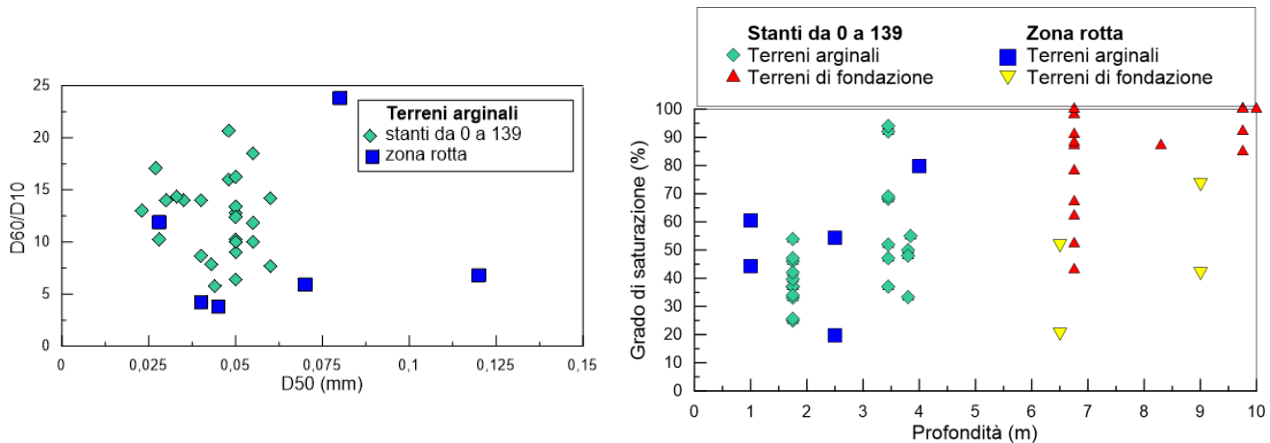


Figura 52 A sinistra diametro medio e coefficiente di uniformità per i terreni dell'argine e, a destra, grado di saturazione in funzione della profondità.

I terreni arginali del sito della rotta sono invece caratterizzati da una minima componente fine, per altro non plastica.

Il coefficiente di uniformità indica che si tratta di un terreno non uniforme, con oscillazioni significative delle componenti estreme della distribuzione granulometrica (Figura 52).

I terreni di fondazione presentano una maggiore variabilità ed includono, localmente, terre a maggiore composizione argillosa.

Il grafico di Figura 52 mostra l'andamento del grado di saturazione misurato in laboratorio con la profondità. Nell'ambito del periodo di esecuzione delle prove di laboratorio (primavera 2017), il grado di saturazione nelle zone più superficiali dell'argine è caratterizzato da un valore medio del 38%, che raggiunge il 57% a profondità di 3.5-4.0 m dalla sommità arginale. Le oscillazioni sono però molto elevate partendo da un 30-40% fino a raggiungere valori del 70-90%. Il terreno di fondazione mostra condizioni di saturazione superiori al corpo arginale fino a raggiungere la condizione di totale saturazione alle maggiori profondità.

Anche i terreni del sito della rotta mostrano valori simili a quelli di tutto il tratto arginale, con i valori relativi al corpo arginale più elevati, probabilmente a causa della maggiore piovosità nel novembre - dicembre 2020.

L'indagine di laboratorio per tutte 12 le verticali ha previsto l'esecuzione di un significativo numero di prove di taglio diretto sui campioni del rilevato arginale e del terreno di fondazione. I grafici della Figura 53 illustrano i risultati in termini di angolo di attrito e coesione efficace. Si può osservare come a fronte di un limitato campo di escursione dell'angolo di attrito, la coesione sia caratterizzata da un ampio campo di valori, che vanno da 0 a più di 12 kPa. Come è noto, tale parametro è di fondamentale importanza nella valutazione del grado di stabilità delle scarpate arginali.

I terreni degli argini della zona della rotta mostrano valori dell'angolo di attrito in linea con quelli caratteristici di tutto il tratto, mentre la coesione assume localmente valori leggermente inferiori se si esclude una singola determinazione nella quale essa supera 10 kPa.

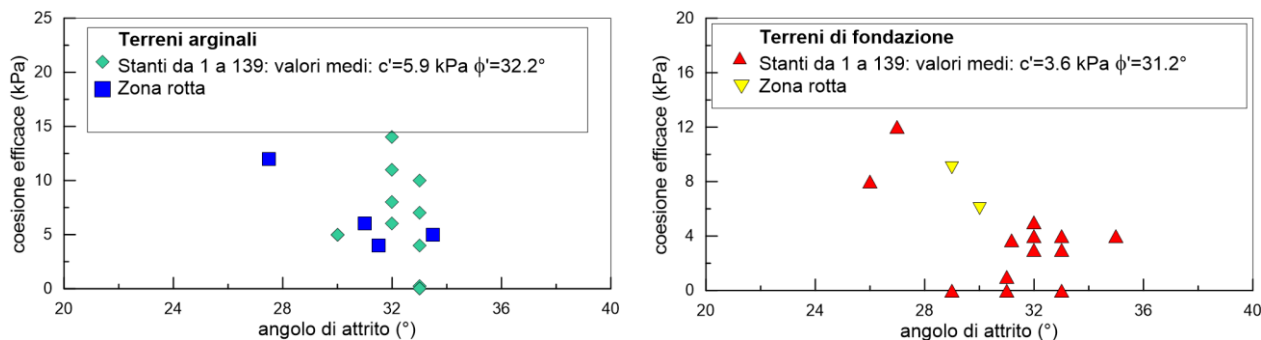


Figura 53 Angolo di attrito (a) e coesione (b) per i terreni arginali e di fondazione.

I grafici di Figura 54 mostrano l'andamento dei parametri resistenti per i terreni che costituiscono il solo corpo arginale in funzione della frazione granulare. Si nota come il campo di oscillazione dell'angolo di attrito sia particolarmente limitato, controllato dalla frazione limosa e non dipendente dalla percentuale sabbiosa. Più ampio è il campo di variazione della coesione, il quale sembrerebbe leggermente diminuire al crescere della frazione sabbiosa.

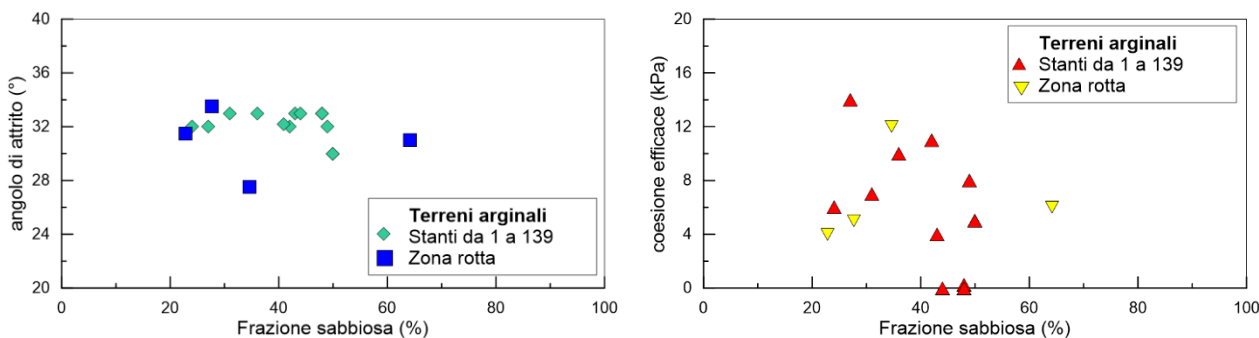


Figura 54 Parametri resistenti dei terreni dell'argine in funzione della componente sabbiosa.

In conclusione, dall'esame dei risultati delle prove di laboratorio condotte su campioni di terreno arginale e di fondazione unitamente a quelli provenienti dalla zona della rotta emerge che:

- i terreni che formano gli argini del Panaro sono una miscela non uniforme di sabbia e limo in percentuale molto variabile soprattutto da zona a zona, ma anche, in qualche caso, con la profondità, a testimonianza di una storia costruttiva complessa, risultato delle diverse disponibilità di terreno naturale lungo tutto il tracciato, delle tecniche di posa in opera e compattazione e, presumibilmente, di riparazione;
- la frazione argillosa è quantitativamente particolarmente modesta, caratterizzata da bassa plasticità e comunque tale da non influenzare il comportamento meccanico complessivo;
- i terreni di fondazione presentano, in gran parte, caratteristiche simili a quelle dei rilevati arginali soprastanti;
- il terreno arginale si presenta, nelle stagioni di campionamento, in condizioni di parziale saturazione, con contenuti in acqua che aumentano con la profondità e che variano da tratto a tratto di argine, con una escursione abbastanza ampia e non particolarmente dipendente dalle caratteristiche granulometriche locali del terreno;
- la resistenza al taglio, espressa in termini di angolo di attrito e coesione efficace, è caratterizzata da una estrema variabilità di quest'ultimo parametro in relazione alle condizioni locali;
- considerando la natura delle particelle di terreno, gli angoli di attrito oscillano in un campo limitato, non dipendente dalla frazione sabbiosa presente;
- Le caratteristiche meccaniche dei terreni della zona della rotta sono in linea con quelle di tutto il tratto considerato nel Progetto Panaro.

Aspetti relativi al suolo e alla vegetazione nella zona della rotta

Un aspetto di particolare interesse è quello relativo alla evoluzione del suolo e della vegetazione nella zona della rotta ed in particolare in corrispondenza del suo lato sinistro.

È stato possibile recuperare una serie di immagini da ortofoto e foto oblique che mostrano l'evoluzione della vegetazione nel corso degli anni, a partire dal 2008, nelle seguenti date: 15/5/2008; 31/3/2010; 30/3/2012; 16/4/2014; 22/4/2017; 11/3/2019. La Figura 55 mostra una prima immagine con il punto di interesse e un ingrandimento relativo al 2008, 2010, 2012 e 2014 mentre la Figura 56 riporta l'ingrandimento degli anni 2017 e 2019.

È da osservare che il terreno, nel sito di rotta e poco a valle per una settantina di metri, appare spesso denudato o comunque rimaneggiato rispetto alla parte di argine adiacente. Questo fatto può essere dovuto alla presenza di una rampa per l'accesso alla via d'argine e lo scavalco del rilevato. Può dunque trattarsi di un sito con un traffico di macchine agricole più intenso rispetto ad altre zone, ovvero che la rampa abbia

necessitato nel tempo di interventi di ricarica o di manutenzione. Una specifica richiesta nei confronti di AIPo non ha esitato alcuna documentazione su lavori significativi svolti in quel punto. Si tratta di una evidenza che si ritiene comunque opportuno porre tra le osservazioni svolte da questa Commissione.

Di particolare interesse sono le immagini del 2010 dove appare la presenza di una fitta vegetazione costituita da canna comune (*Arundo donax* L. 1753) a cavaliere dell'argine. Rizomi di tale pianta sono stati chiaramente rinvenuti nelle macerie del ventaglio di rotta.



Figura 55 Evoluzione della vegetazione sul lato sinistro della zona della rotta (anni-2008-14)(scaricate da Blomweb).

Tale vegetazione è rimasta in posto fino attorno al 2012. A partire dalle immagini del 2014 si nota che l'*Arundo donax* è stata rimossa, con il rifacimento della scarpata arginale. In particolare nel 2017 è evidente una ampia zona di terreno riportata che ricopre il piede dell'argine e l'argine stesso fino alla quota sommitale. Testimonianza di tale presenza è stata rilevata, come più sopra accennato, anche nel ventaglio di rotta dove erano presenti ceppaie di rizomi di *Arundo donax*.

Questa pianta, detta anche “canna comune” o “canna domestica”, ha un ritmo di crescita molto elevato e forma dense macchie in terreni umidi di ambiente ripariale, lungo gli argini di fiumi e stagni ma anche sui margini di campi coltivati e sulle dune sabbiose, anche vicino al mare.



Figura 56 Evoluzione della vegetazione sul lato sinistro della zona della rotta (anni-2017-19). Si nota peraltro chiaramente una persistente alterazione della superficie del suolo.

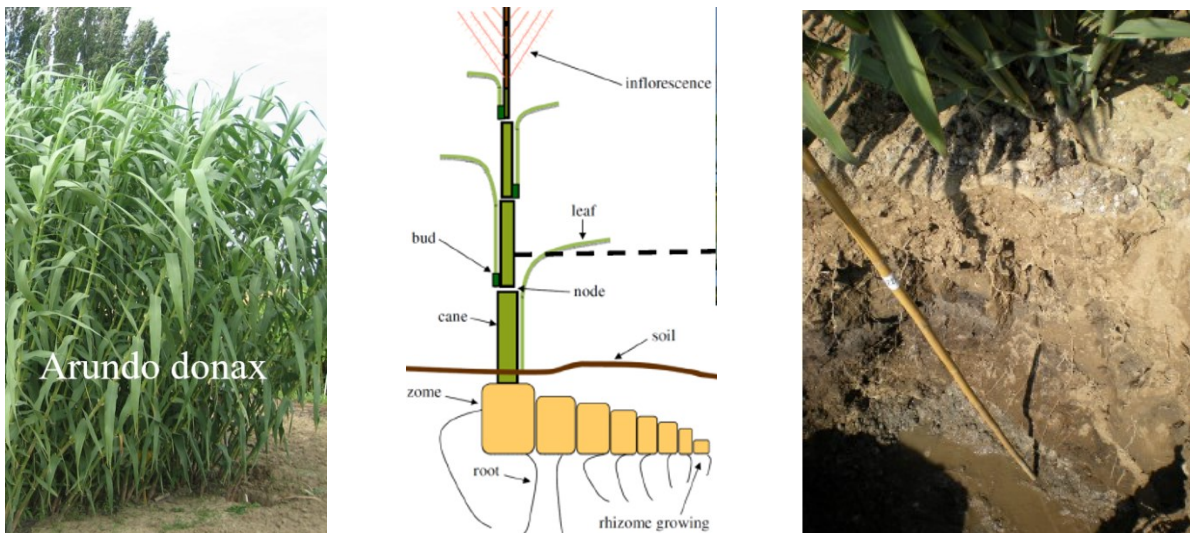


Figura 57 A sinistra esempio di *Arundo donax*, al centro, parti della pianta, a destra uno scavo mostra che le radici possono raggiungere la profondità di 2m.

La sua riproduzione avviene per lo più per via vegetativa, con rizomi sotterranei (Figura 57). Questi ultimi sono legnosi, fibrosi e formano estesi tappeti nodosi che penetrano fino a un metro di profondità nel terreno. La parte aerea della pianta durante l'autunno secca e cade a terra, per rigenerarsi poi in primavera a partire dai rizomi. L'apparato radicale esplora il terreno fino a notevoli profondità (oltre 3 m) e permette alla pianta di raggiungere, ove presente, la falda superficiale.

La pianta predilige terreni piuttosto arenati, prevalentemente sabbiosi o sabbio-limosi, in condizione di parziale saturazione e ristagno d'acqua limitato. Le radici che si dipartono da rizomi muoiono se il rizoma viene rimosso.

Uno studio condotto su un impianto di *Arundo donax* (Barco et al., 2018) ha mostrato una percentuale umidità ottimale per la crescita come quello mostrato con valori massimi, variabili da 30-35% in sommità ad oltre 40% in profondità, durante il periodo tardo primaverile-inizio estate. Le condizioni di umidità sono in linea con quelle valutate sui campioni di laboratorio prelevati nel terreno della parte sommitale dell'argine.

Con riferimento allo specifico caso della rotta del Panaro, si osserva che gli apparati radicali profondi, al di sotto dei rizomi che in parte sono stati rimossi, sono rimasti nel corpo arginale e si sono presumibilmente decomposti nel tempo creando vie di percolazione verticale delle acque di pioggia o delle acque che hanno

invaso l'area golenale. La presenza di queste vie preferenziali può aver avuto una influenza concausale nella rotta e sarà discusso nelle conclusioni.

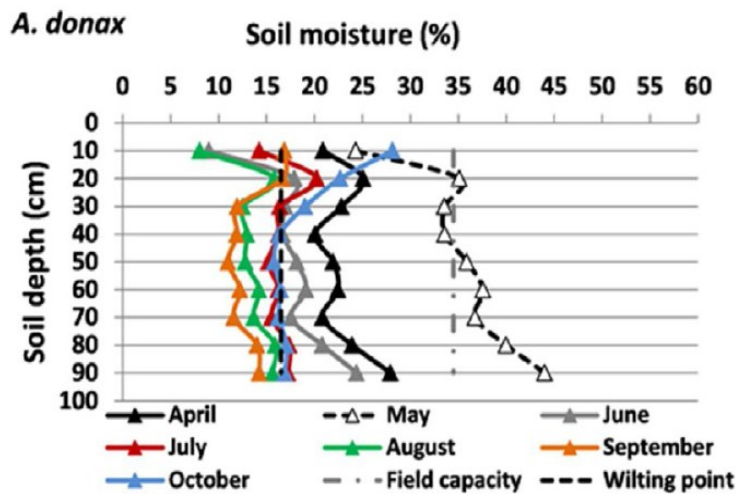


Figura 58 Percentuali di umidità nel terreno caratteristici dell'Arundo Donax

Caratterizzazione di dettaglio del sito e della struttura dell'argine

Ricostruzione geometrica dell'opera collassata

Si è detto in altra parte della relazione che la topografia dell'area interessata dal dissesto è stata fortemente rimaneggiata: prima dal collasso dell'argine e dalla successiva dispersione di buona parte della maceria. Poi dai lavori di ricostruzione che, oltre ad essere svolti (per ovvie ragioni di incremento della sicurezza) in difformità dal manufatto originale, hanno comportato un intenso traffico di decine e decine di mezzi pesanti nel giro di poche ore.

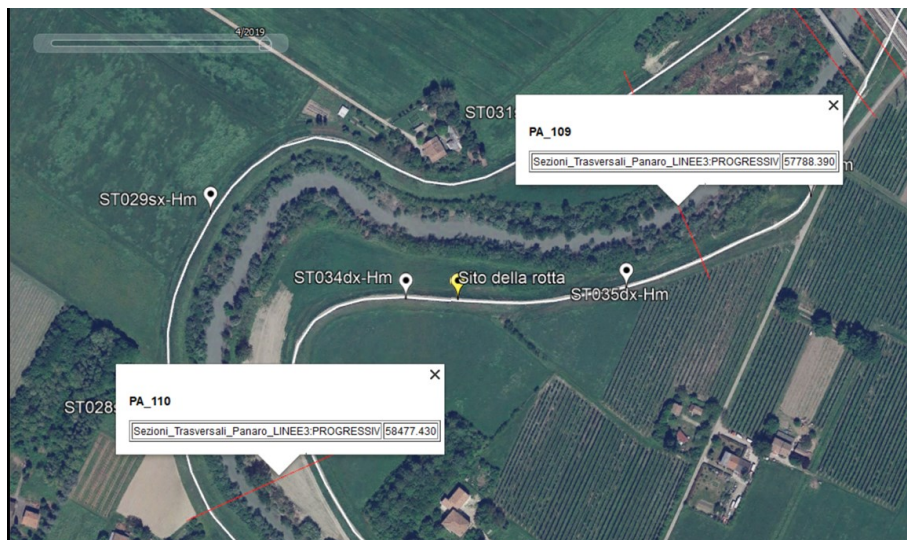


Figura 59. Inquadramento del punto di rotta tra le sezioni trasversali PA_109 (progressiva 57.788.39) e PA_110 (progressiva 58.477)

I rilievi eseguiti nel 2017 resi disponibili da AIPo vedono il punto di rotta compreso tra le sezioni PA_109 (progressiva 57.788.39) e PA_110 (progressiva 58.477). La distanza tra i due rilievi è poco meno di 700 metri. Tali rilievi consentono di stimare, sia pur grossolanamente, le caratteristiche geometriche dell'argine. Si è dunque ritenuto di poter trovare nel Lidar POT2016 un riferimento per inferire qualche considerazione quantitativa sulla morfologia della zona di rotta. Per questo si può fare riferimento a tre sezioni nelle immediate vicinanze della rotta, ricavate da tale modello, ottenute grazie alla collaborazione dei topografi di AIPo (Figura 60).

La quota di fondo alveo è di circa 21.5m, la zona golenale e la zona di campagna si trovano mediamente ad una quota di 30.5m e 29.2m rispettivamente, la sommità arginale raggiunge una quota di 34.3m. Pertanto l'argine ha un'altezza media di circa 5.1m dal lato campagna e una larghezza di circa 16m. Le scarpate sono mediamente piuttosto ripide, circa 35°, ma si nota che la sezione centrale in corrispondenza della rotta ha una scarpata molto acclive, fino a 50° (Figura 62).

Tali sezioni, ferme restando le approssimazioni di cui si è detto, costituiscono comunque un'immagine ragionevolmente affidabile della forma della struttura collassata.

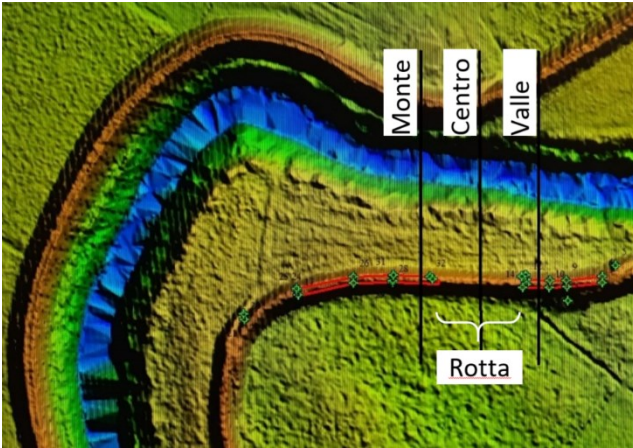


Figura 60 Tracce delle sezioni considerate

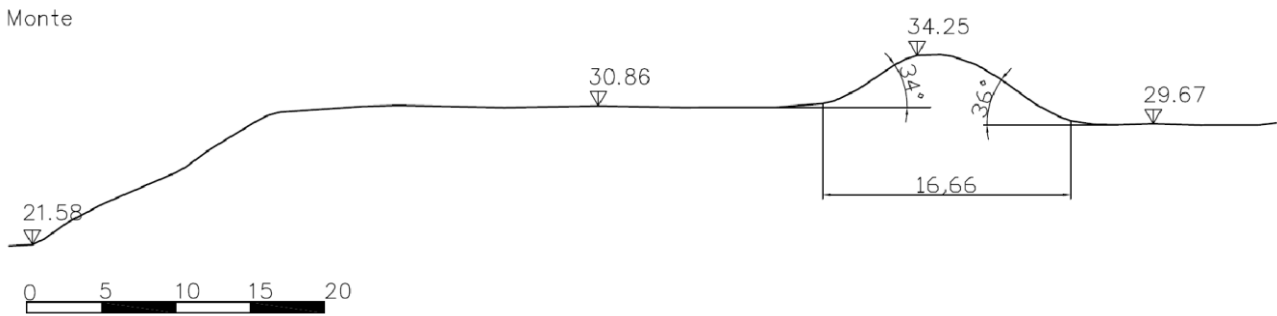


Figura 61 Sezione immediatamente a monte della rotta

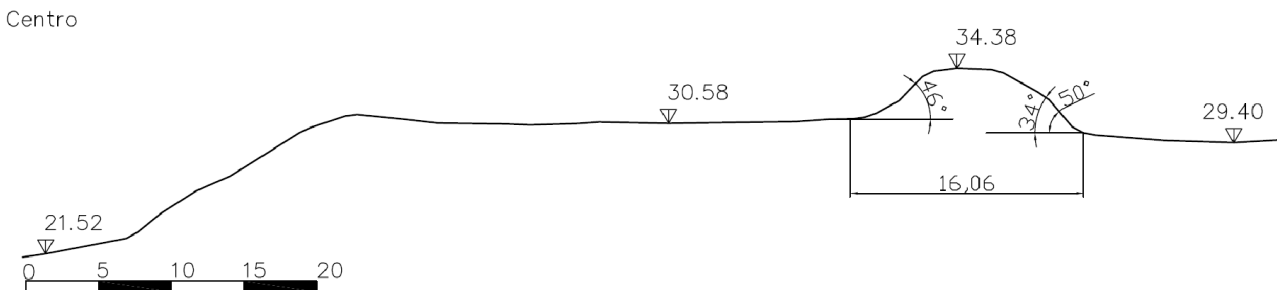


Figura 62 Sezione centrale della rotta

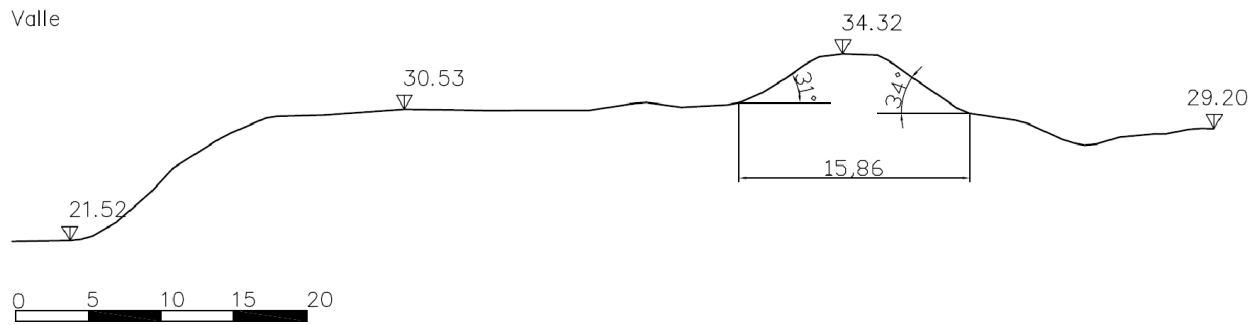


Figura 63 Sezione immediatamente a valle della rotta

Descrizione delle indagini geotecniche e geofisiche

L'indagine geotecnica, geofisica e, in generale, sui materiali della rotta è stata finalizzata ad una accurata caratterizzazione di tutti gli elementi necessari per l'esecuzione delle analisi di filtrazione e di stabilità arginale.

La campagna di indagini è stata suddivisa in parti distinte:

- Indagine sul rilevato arginale e sui terreni di fondazione nelle zone ad Est e Ovest della rotta;
- Indagine sui terreni e su altri materiali presenti nella zona golenale;
- Indagine sui terreni e su altri materiali nella zona del ventaglio di rotta;
- Indagine in un tratto di argine dove sono state individuate tane di animali fossori collocato a monte della rotta (denominata 'area ansa').

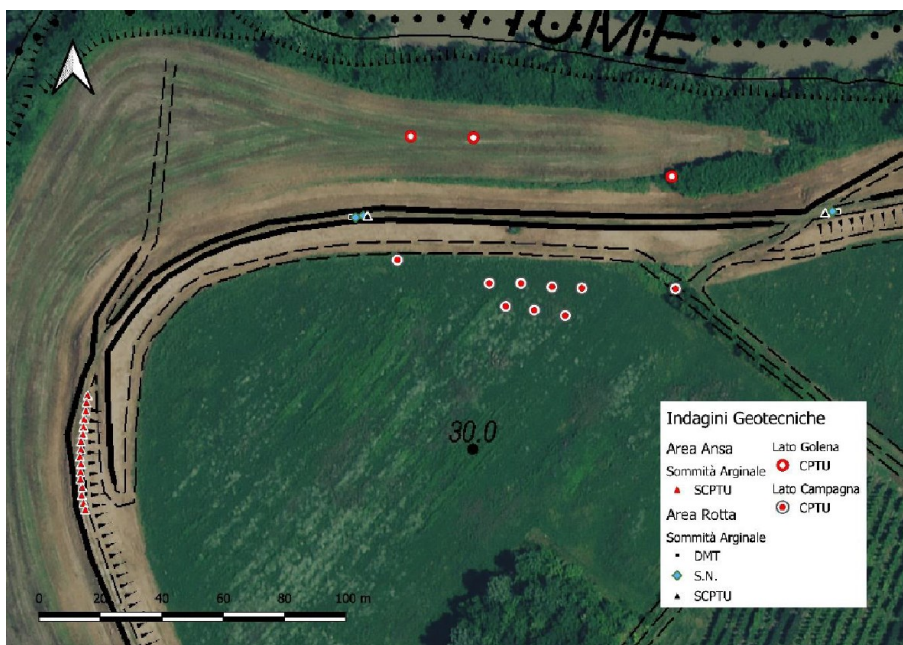


Figura 64 Ubicazione prove CPTU, SCPTU e DMT

L'ubicazione delle indagini geotecniche (SCPTU, CPTU, DMT, sondaggi) è riportata nella Figura 64. L'ubicazione delle prove ERT è indicata in Figura 65. Inoltre, sono state eseguite prove con gradiometro e magnetometro in entrambe le aree. I risultati di tutte le indagini sono riportati in allegato.

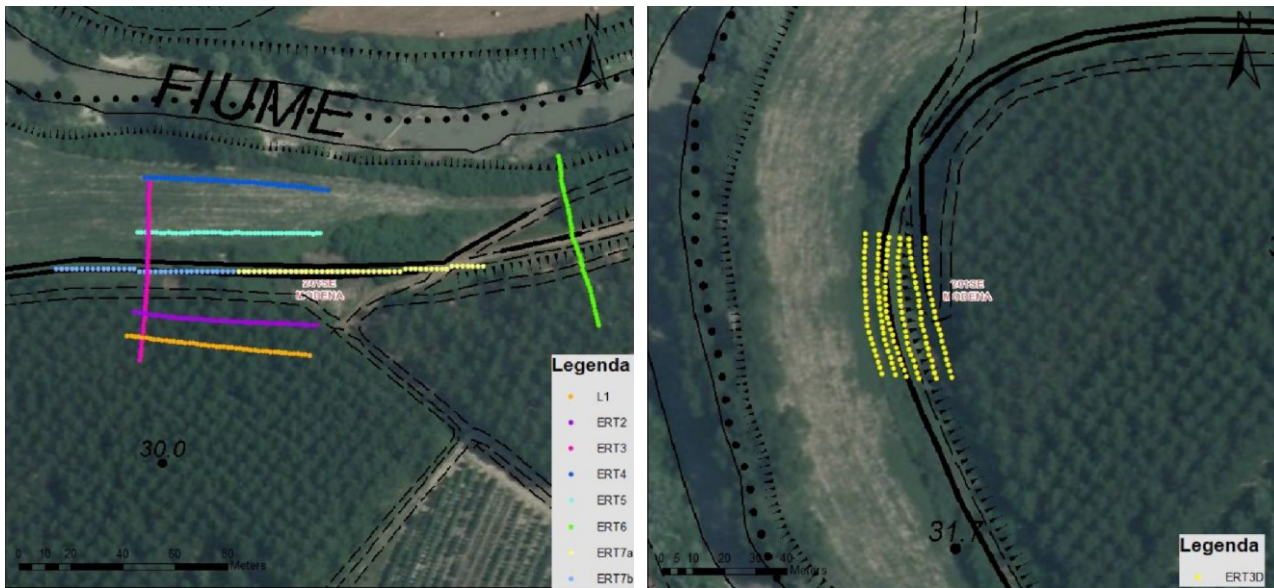


Figura 65 ubicazione prove ERT: nella zona della rotta (a sinistra) e sull'ansa fluviale (a destra)

Indagini geotecniche e geofisiche sul rilevato arginale nella zona della rotta

Le indagini geotecniche sono consistite in:

- N. 2 sondaggi a carotaggio continuo spinti fino a 25 m dalla sommità arginale, uno dei quali sul lato Est ed uno sul lato Ovest della rotta. Le perforazioni nel tratto di rilevato arginale sono state eseguite a secco, per evitare ogni effetto di fluidi di perforazione sulla struttura del terreno parzialmente saturo. Entro i due sondaggi, denominati S1 e S2, sono stati prelevati N. 5+6=11 campioni indisturbati che sono stati sottoposti a prove di laboratorio presso il Laboratorio di Geotecnica del Dipartimento ICEA dell'Università di Padova, presso il Laboratorio Geodata di Padova e presso il Laboratorio di Agronomia del Dipartimento DAFNAE dell'Università di Padova;
- N. 2 prove con piezocono sismico (SCPTU) e N. 2 prove dilatometriche (DMT), ognuna delle quali sia sul lato Est che sul lato Ovest della rotta.

Tabella 12 Prove di laboratorio eseguite sui campioni indisturbati

Camp.	prof. (m)	Gran.	W	WL WP	Peso di volume	Peso spec.	Curva ritenz.	TD	TX	Perm.
S1-C1	1	1	1	1	1	1	1		1	
S1-C2	2,5	1	1	1	1		1	1		
S1-C3	4	1	1	1		1	1		1	1
S1-C4	6,5	1	1	1	1		1	1		
S1-C5	9	1	1	1	1		1			
S2-C1	1	1	1	1	1		1			
S2-C2	2,5	1	1	1	1	1	1			
S2-C3	4	1	1	1	1		1		1	
S2-C4	6,5	1	1	1	1		1		1	
S2-C5	9	1	1	1	1					1
S2-C6	12	1	1	1	1					1

Le indagini geofisiche sono consistite in stendimenti elettroresistivi (ERT) ed elettromagnetici (EM) longitudinali e trasversali all'argine.

Sui campioni di laboratorio sono state eseguite prove di classificazione e di caratterizzazione idromeccanica dei terreni sia in condizioni sature che parzialmente sature come elencato in Tabella 12.

Indagine nell'area golenale

L'area golenale è stata oggetto di una specifica indagine volta alla caratterizzazione dei terreni inondati durante la piena. Tali terreni sono infatti quelli che per primi sono oggetto di regimi di filtrazione dal fiume verso campagna.

Le prospezioni geotecniche sono consistite in N. 3 CPTU mentre quelle geofisiche in stendimenti ERT e EM.

La fine di accertare la possibile presenza una condotta sotterranea di drenaggio delle acque che, passando sotto l'argine, collegasse campagna con il fiume è stata scavata una trincea parallela al corso del fiume fino a profondità di circa 3.5 m.

Con la trincea non si è individuato alcun manufatto ma si è potuto analizzare visivamente il terreno golenale (Figura 66), raccogliere elementi di laterizio (Figura 67) e raccogliere 3 campioni di terreno dei quali 2 rimaneggiati ed uno parzialmente indisturbato. Sui campioni rimaneggiati sono state condotte analisi granulometriche mentre sul campione parzialmente indisturbato si è eseguita anche una prova di permeabilità in condizioni sature.



Figura 66 Foto della trincea scavata nell'area golenale (Foto di Erika Parmeggiani del 20/01/2021).



Figura 67 Elementi di laterizio raccolti nella trincea dell'area golenale (foto di Paolo Simonini del 21/01/2021)

Indagine nell'area del ventaglio di rotta

La tipologia di detrito nella zona del ventaglio di rotta comprende sedimenti sciolti, blocchi originariamente costituenti il rilevato arginale ed in particolare della parte sommitale pavimentata, mattoni, pezzi di mattoni, elementi di laterizio e pezzi di conglomerato.

Una visione generale dell'area è riportata in *Figura 68*, *Figura 69* e *Figura 70*. Tra gli elementi degni di nota, sono presenti anche rizomi di *Arundo donax* rimaste all'interno del corpo arginale.

Le figure seguenti mostrano:

- blocchi di terreno compatto (*Figura 68*, *Figura 70*, *Figura 71*);
- blocchi di terreno rivestiti su un lato da elementi litici provenienti dal sottofondo stradale recentemente rifatto (*Figura 72*);
- rizomi di *Arundo Donax* (*Figura 73*);
- mattoni e elementi di laterizio (*Figura 69*, *Figura 74*);
- elementi di conglomerato a base di malta di calce (*Figura 75*);

Su due blocchi di terreno compatto prelevati in posto sono state condotte analisi granulometriche in laboratorio.

Al fine di ricostruire il profilo stratigrafico nella zona antistante la rotta sono state condotte N. 9 CPTU e stendimenti ERT ed EM. Tale scelta è stata dettata dall'esigenza di conoscere la zona antistante la rotta (la zona golenale non è stata accessibile a causa delle condizioni del terreno) con un dettaglio tale da individuare nel terreno possibili eterogeneità locali, sede di flussi di filtrazione concentrati come nel caso del sifonamento del 2019 occorso poco più a monte.

La rilevante presenza di mattoni, pezzi di mattone, elementi di laterizio e conglomerato cementizio ha suggerito la possibile presenza di una struttura o i resti di una struttura immersa nel corpo arginale e/o nel terreno di fondazione.

Al fine di analizzare la consistenza di tale ipotetica struttura è stato eseguito un rilievo della posizione dei singoli elementi di laterizio presenti nel ventaglio di rotta. Sono stati censiti 518 pezzi di varie dimensioni ubicati in un'area piuttosto ampia (longitudinalmente per circa 120 m e trasversalmente per circa 80 m) come mostrato nella Figura 74. Considerato il numero e le dimensioni medie degli elementi, si tratta di un volume complessivo piuttosto limitato, compatibile con una struttura di piccole dimensioni inserita nell'argine o al piede dell'argine o con un riempimento e riparazione arginale, ricorrendo a materiale di demolizione di un fabbricato in zona.



Figura 68 Visione dell'area del ventaglio di rotta (foto di Paolo Simonini del 29/12/2020).



Figura 69 Visione dell'area del ventaglio di rotta (foto di Paolo Simonini del 29/12/2020).



Figura 70 Visione dell'area del ventaglio di rotta (foto di Paolo Simonini del 29/12/2020).



Figura 71 Blocchi di rilevato arginale (si noti la tenenza alla rottura fragile) (foto di Paolo Simonini del 29/12/2020).



r_emiro.Giunta - Prot. 02/03/2021.0177836.E



Figura 72 Blocchi della parte sommitale dell'argine con la pavimentazione stradale (foto di Paolo Simonini del 29/12/2020).



Figura 73 Rizomi di Arundo Donax (foto di Paolo Simonini del 29/12/2020).

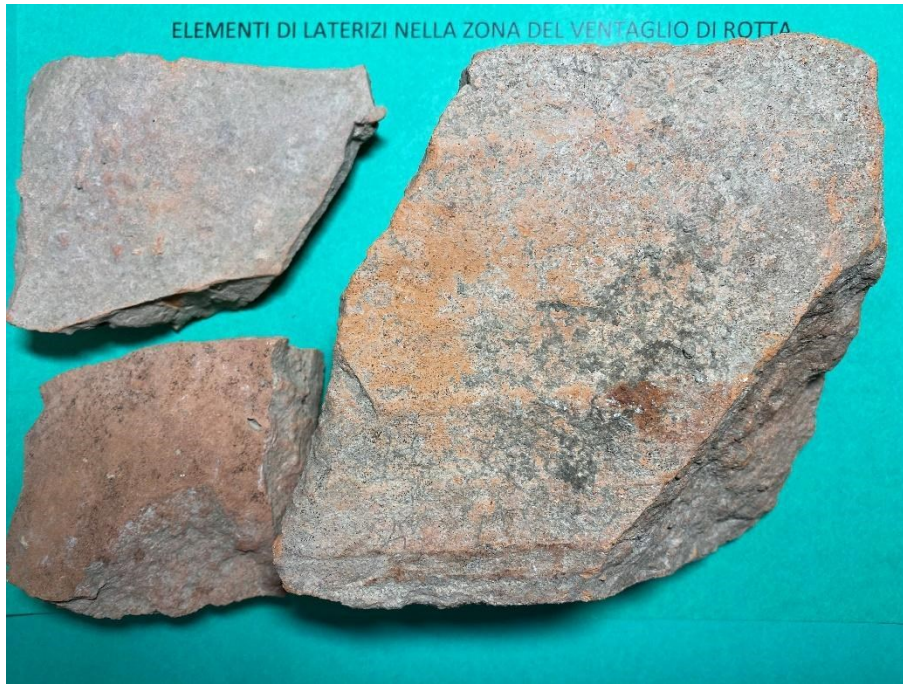


Figura 74 Elementi di laterizi nella zona del ventaglio di rotta (foto di Paolo Simonini del 21/01/2021).

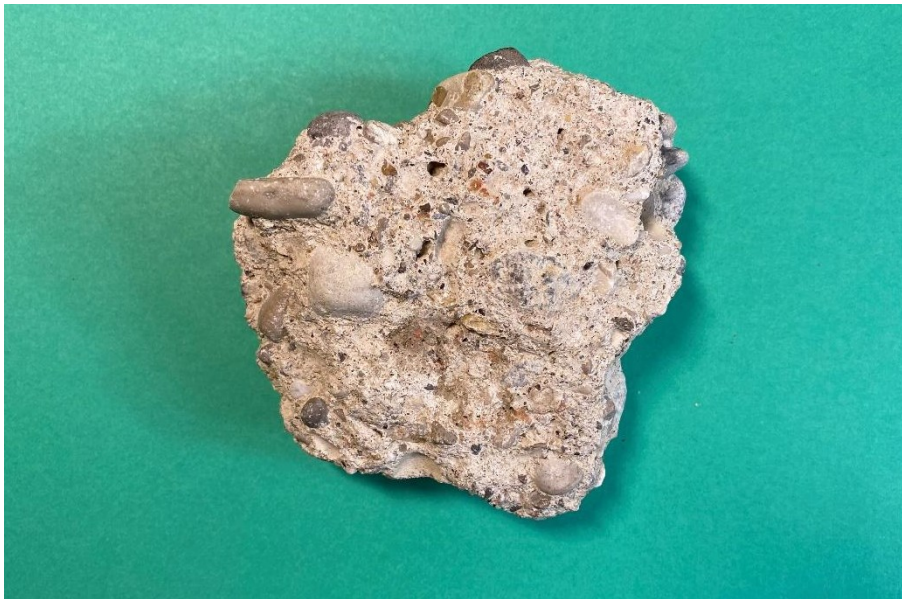


Figura 75 Elemento di malta carbonatica (foto di Paolo Simonini del 21/01/2021).

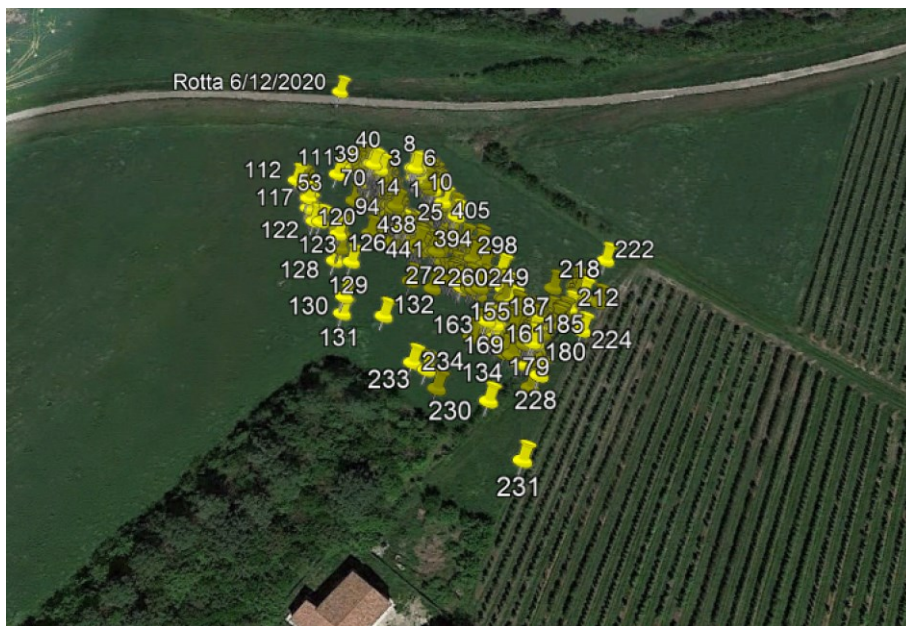


Figura 76 Distribuzione degli elementi di laterizio nel ventaglio di rotta.

In nessuna delle immagini satellitari disponibili a partire dalla prima metà del 2010, né dalle immagini dai voli aerei eseguiti nella zona nel secolo scorso, è rilevabile una struttura esistente nella zona.

Per quanto riguarda l'epoca storica, i mattoni sono databili alla fine del tardo 1800 e gli inizi del 1900. Essi sono il risultato di produzione in serie, ma non a livello industriale.

In base ad indagini geochimiche e mineralogiche condotte presso il Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova il campione di conglomerato di *Figura 75* è riconducibile ad una malta grossolana con materiale inerte (sabbia di natura fluviale, ghiaia) principalmente carbonatico (calcite, dolomite), con minori silicati (miche, quarzo e feldspati). La malta non contiene materiale pozzolanico o cocchiopesto e quindi si può escludere la presenza di un legante di epoca Romana; essa può essere una tipica malta prodotta nel tardo 1800 o nei primi del 1900.

Indagini nella zona delle tane

Durante il sopralluogo del 29 dicembre sono state individuate diverse tane di animali fossori. Considerate le dimensioni, due di esse, una sul petto e l'altra sulla schiena arginale, appaiono essere state scavate da animali fossori quali l'istrice o il tasso. La *Figura 77* mostra l'ingresso della tana sul paramento lato campagna dell'argine. Va osservato che le tane sono state chiuse nei giorni immediatamente successivi alla rotta arginale, comunque dopo il loro rinvenimento occorso il 29/12/2020.

Al fine di caratterizzare le eterogeneità eventualmente indotte dalle tane e il comportamento meccanico del tratto di argine interessato dalle stesse, sono state eseguite 16 prove 'down-hole' SCPT (*Figura 78*), che interessano il solo rilevato arginale, fino a circa 5.5 m di profondità, con verticali di indagine poste ad interasse di 3 m una dall'altra. La punta elettrica è stata attrezzata con quattro geofoni in grado di misurare le onde S e le onde P secondo la procedura 'true interval' (Amoroso et al. 2020). La procedura di prova prevede la misura della velocità di propagazione delle onde sismiche ogni 25 cm di avanzamento della punta CPT.

Nello stesso tratto di argine sono stati eseguiti stendimenti ERT (*Figura 78*), prove EM (*Figura 79*) e con gradiometro per una ricostruzione tridimensionale della struttura arginale al fine anche di individuare eventuali eterogeneità.



r_emiro.Giunta - Prot. 02/03/2021.0177836.E



Figura 77 Ingresso di una tana in prossimità della zona della rotta.



Figura 78 Ubicazione prove SCPT e ERT nella zona delle tane

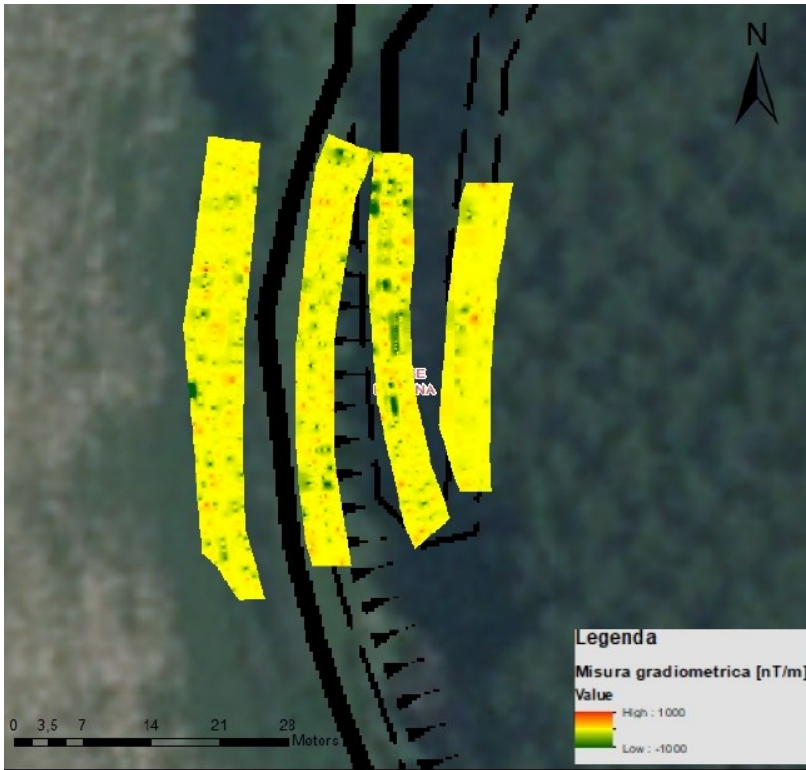


Figura 79 Stendimenti con l'elettromagnetometro nella zona delle tane.

Interpretazione delle indagini e formulazione del modello geotecnico nella zona della rotta

Interpretazione delle prove geofisiche

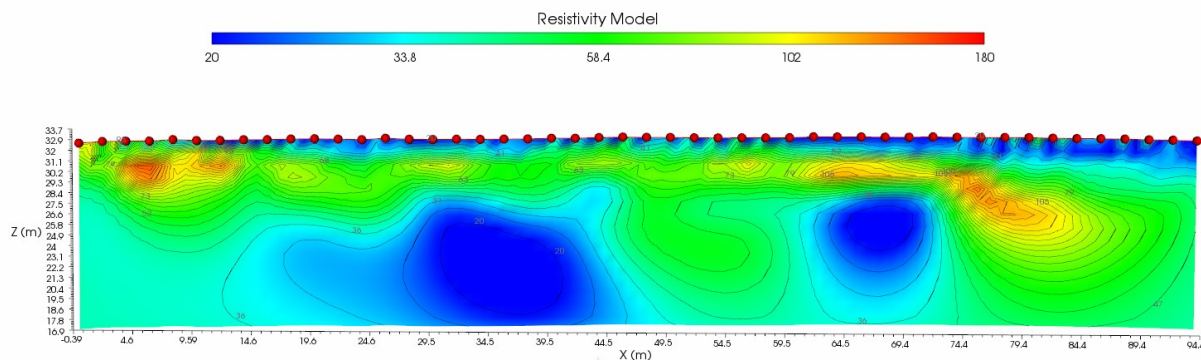
I principali risultati che si ottengono dai profili geoelettrici tomografici (ERT), sono mappe costituite da gradienti di resistività e polarizzazione indotta (caricabilità).

La resistività elettrica ($\Omega \cdot m$), definita anche come resistenza elettrica specifica, rappresenta l'attitudine di un materiale a opporre resistenza al passaggio di una corrente elettrica. La resistività dei terreni è funzione della porosità, permeabilità, contenuto ionico dei fluidi di ritenzione e mineralizzazione argillosa. Si riportano in *Tabella 13* i valori di riferimento della resistività delle varie tipologie di terreni.

Tabella 13 valori di riferimento della resistività

Roccia/Materiale	Resistività ($\Omega \cdot m$)
Argille, marne grasse	3 - 30
Argille, marne magre	10 - 40
Argille sabbiose, silt	25 - 105
Sabbie con argille	50 - 300
Sabbia, ghiaia in falda	200 - 400
Sabbia, ghiaia asciutta	800 - 5000
Calcare, gesso	500 - 3500
Arenaria	300 - 3000
Granito	2000 - 10 000
Gneiss	400 - 6000
Rifiuti domestici	12 - 30
Fanghi industriali	40 - 200
Plume contaminato da rifiuti domestici	1 - 10
Olio esausto	150 - 700

I profili resistivi sono relativamente omogenei, non si evidenziano singolarità (*Figura 80*). La litologia prevalente risulta essere sabbia limosa e limi sabbiosi, come confermato dai valori di resistività elettrica riscontrati. La diminuzione di resistività osservato intorno ai 25m s.l.m. è dovuto alla presenza della falda freatica.



(a) ERT7A

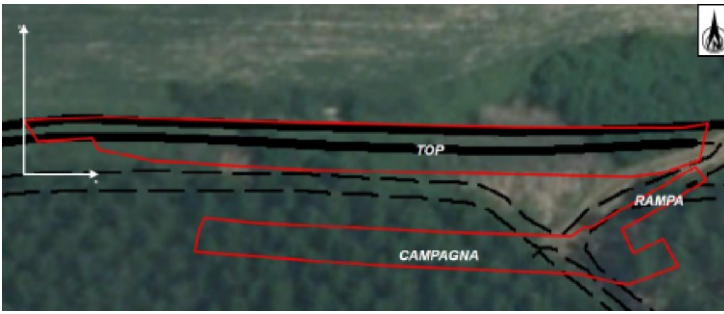
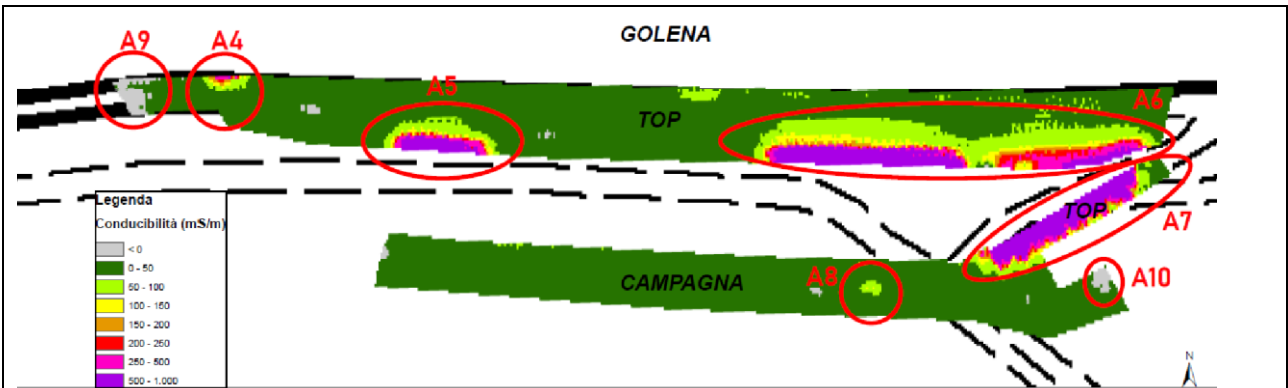
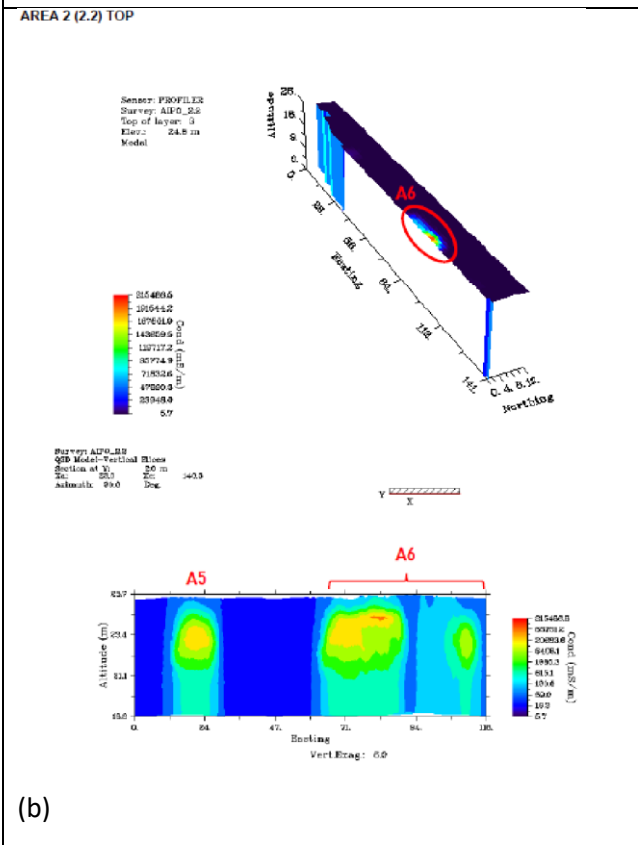


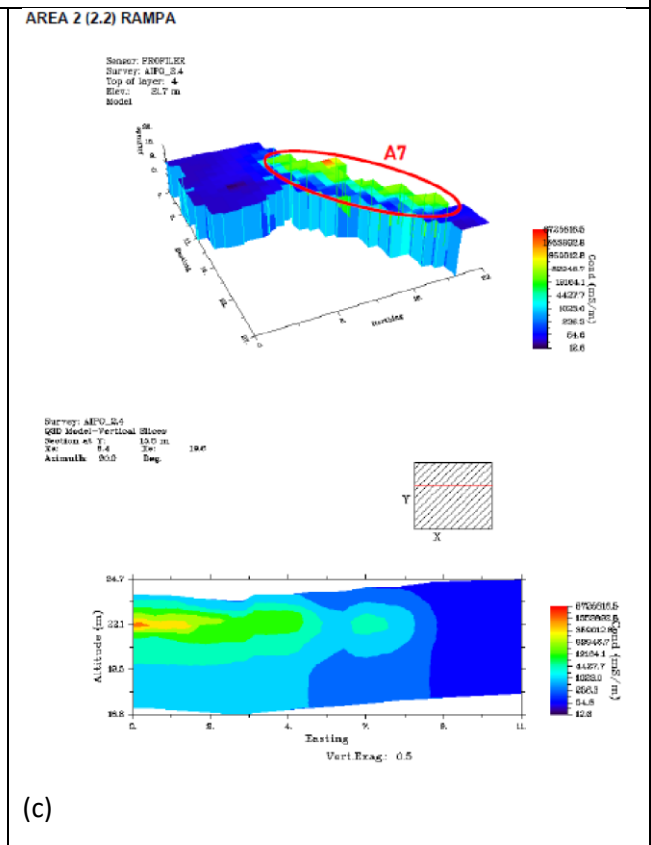
Figura 81 Area investigate con EM



(a)



(b)



(c)

Figura 82 Risultati prova EM: (a) pianta, (b) area TOP, (c) area RAMPA

Interpretazione prove penetrometriche (CPTU e SCPTU)

Le prove penetrometriche (CPTU, SCPTU) sono state impiegate per identificare la sequenza litostratigrafica applicando la procedura proposta da Robertson (2009) e successivamente integrata da Robertson (2016).

L'approccio prevede di stimare un indice di materiale (I_c), funzione della resistenza alla punta corretta (q_t) e della resistenza di attrito laterale (f_s):

$$I_c = [(3.47 - \log \log Q_{t1})^2 + (\log \log F_r + 1.22)^2]^{0.5}$$

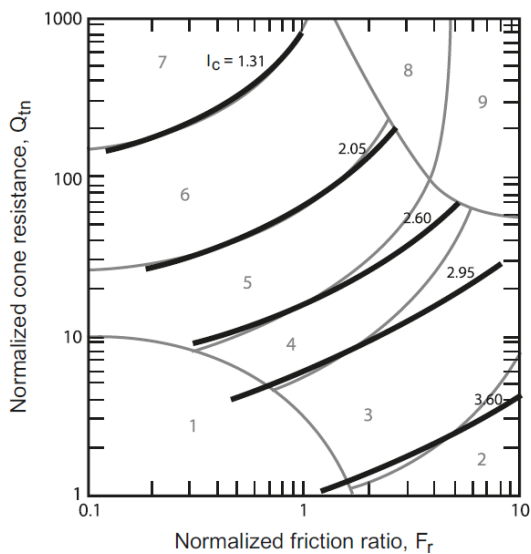
Dove

$$Q_{t1} = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} = \text{resistenza alla punta normalizzata}$$

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} = \text{rapporto di resistenza d'attrito laterale}$$

σ_{v0} , σ'_{v0} sono rispettivamente la tensione normale totale ed efficace.

I valori di Q_{t1} e F_r vengono riportati nel grafico rappresentato in *Figura 83* da cui si può dedurre il tipo di terreno anche con l'ausilio di I_c .



1. Argille sensitive
2. Terreni organici ($I_c > 3.60$)
3. Argille ($2.95 < I_c < 3.60$)
4. Argille limose e limi argillosi ($2.60 < I_c < 2.95$)
5. Limi sabbiosi e sabbie limose ($2.05 < I_c < 2.60$)
6. Sabbie ($1.31 < I_c < 2.05$)
7. Sabbie dense e ghiaie ($I_c < 1.31$)
8. Sabbie e sabbie argillose addensate
9. Argille sovraconsolidate

Figura 83 Grafico per l'identificazione del tipo di terreno proposto da Robertson (2009)

Per i terreni a grana grossa (sabbie, $I_c < 2.60$) è possibile stimare l'angolo d'attrito del materiale con la formula di Robertson and Campanella (1983):

$$\phi'_p = \arctan \left[0.10 + 0.38 \log \left(\frac{q_t}{\sigma'_{v0}} \right) \right]$$

Per i terreni a grana fine (argille, $I_c > 2.60$), è possibile stimare la resistenza al taglio non drenata con la relazione

$$c_u = (q_t - \sigma_{v0}) / N_c$$

Dove il coefficiente N_c varia tra 10 e 25, ed è stato qui assunto pari a 15.

È anche possibile ricavare una stima approssimativa della conducibilità idraulica del materiale con la relazione:

$$k = \begin{cases} 10^{0.952 - 3.04 I_c} & \text{per } I_c < 3.27 \\ 10^{-4.52 - 1.37 I_c} & \text{per } 3.27 < I_c \leq 4 \end{cases}$$

A titolo esemplificativo si riportano i risultati ricavati dalla prova SCPTU4 (Figura 84), condotta fino alla profondità di 25m, la relativa interpretazione con il grafico di Robertson (Figura 85), e la stima di I_c , φ , c_u e k (Figura 86).

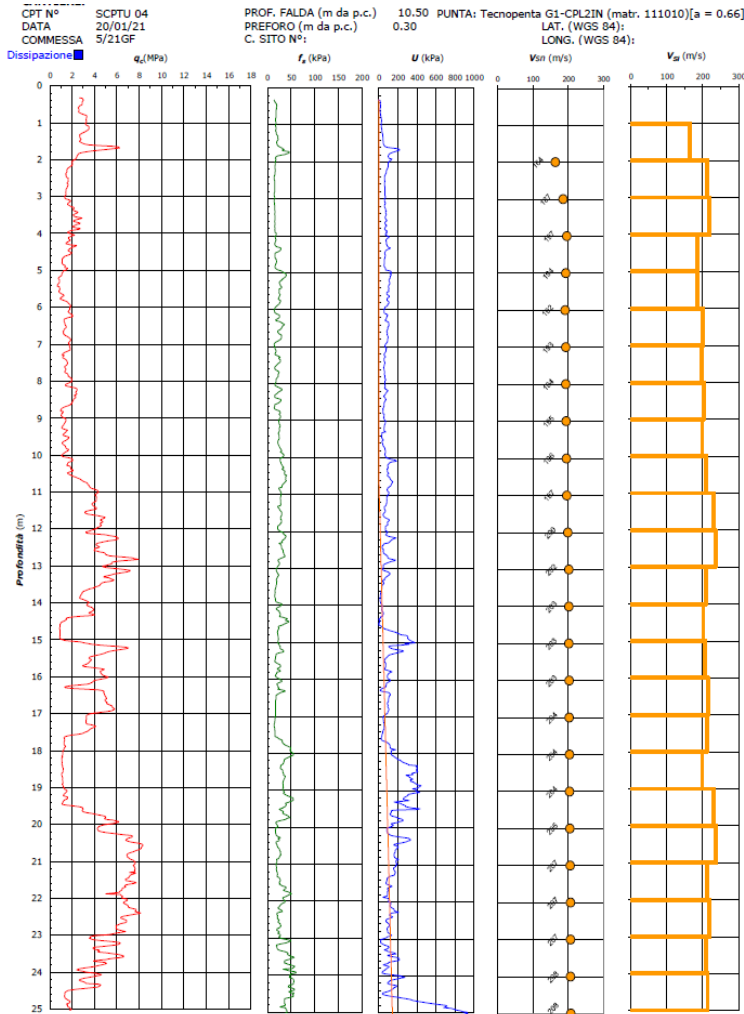


Figura 84 Misure SCPTU 4

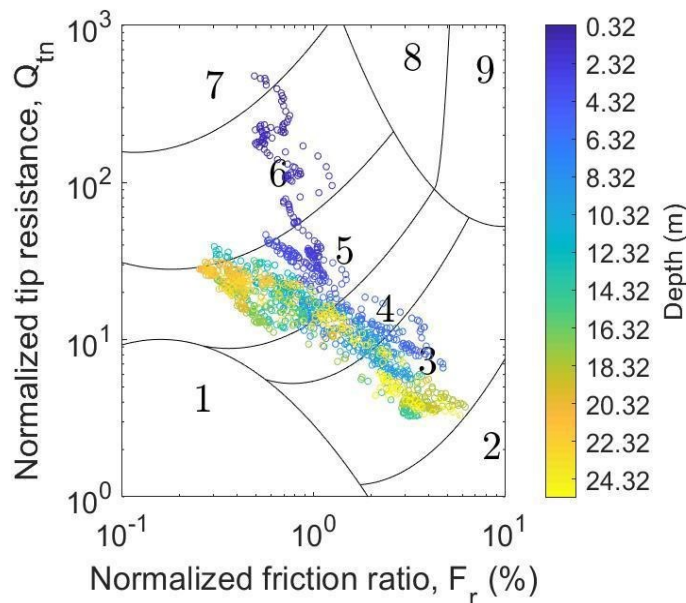


Figura 85 Rappresentazione nel grafico di Robertson (2009) dei punti della prova SCPTU 4

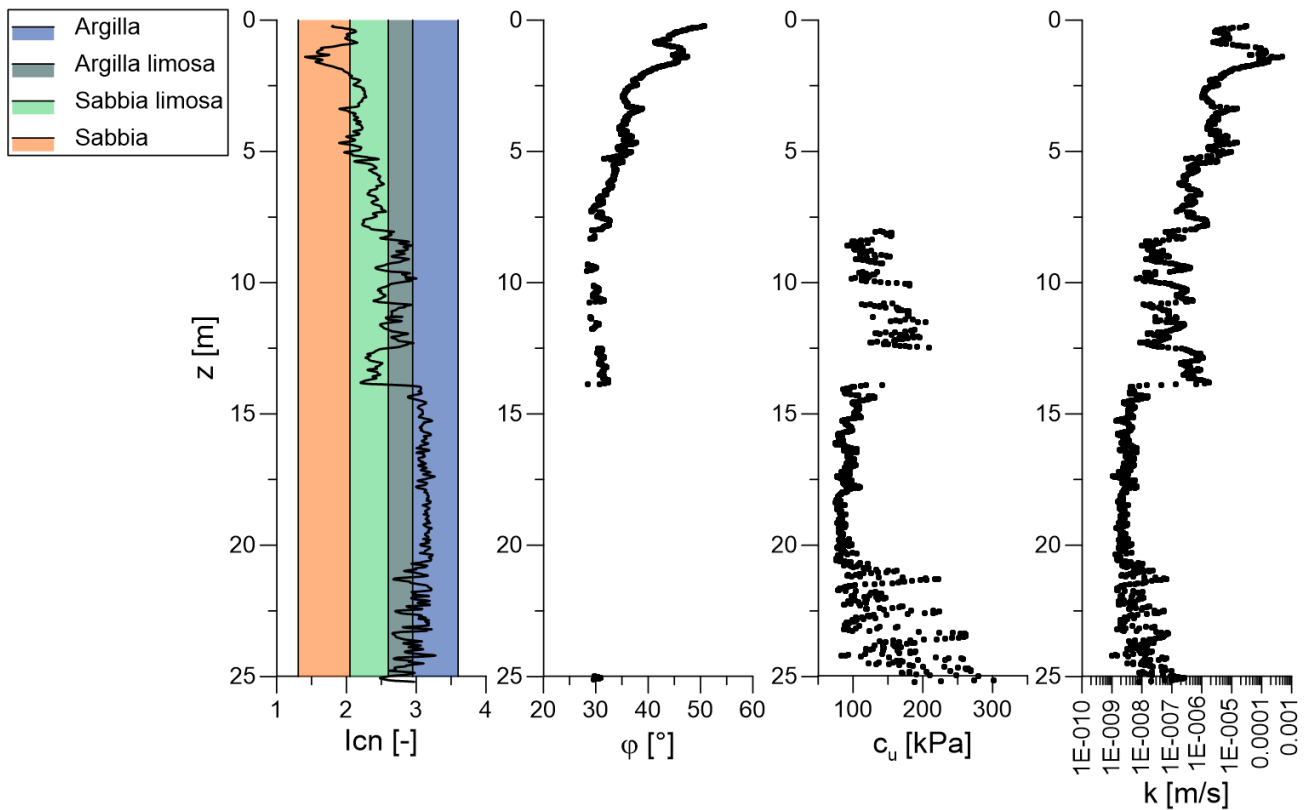


Figura 86 Indice di materiale I_c e stima dell'angolo d'attrito, della resistenza non drenata e della permeabilità per la prova SCPTU 4

Interpretazione prove DMT

Lo strumento è formato da una lama piatta d'acciaio, su una faccia della quale è presente una sottile membrana circolare d'acciaio che viene deformata per mezzo di aria compressa (Figura 87). La lama viene infissa verticalmente nel terreno con la spinta di una forza statica. Alla profondità prefissata la membrana viene dilatata orizzontalmente. La prova sollecita il terreno orizzontalmente e la resistenza del terreno viene dedotta dalla misura della pressione d'aria introdotta all'interno dello strumento per ottenere la dilatazione predeterminata della membrana. Dalla resistenza orizzontale del terreno si riesce a risalire al tipo di terreno, attraverso l'indice di materiale I_D , e ad una serie di parametri geotecnici come il coefficiente di spinta a riposo (K_0), il modulo edometrico (M), l'angolo d'attrito (φ) e la resistenza al taglio non drenata (c_u). La Figura 88 riporta i risultati della prova DMT1, mentre la Figura 89 riporta i dati della prova DTM2.

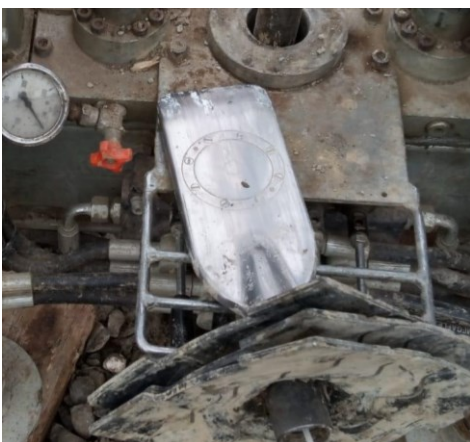


Figura 87 Dilatometro (Foto di Emiliano Quartenari del 3/2/2021)

r_emiro.Giunta - Prot. 02/03/2021.0177836.E

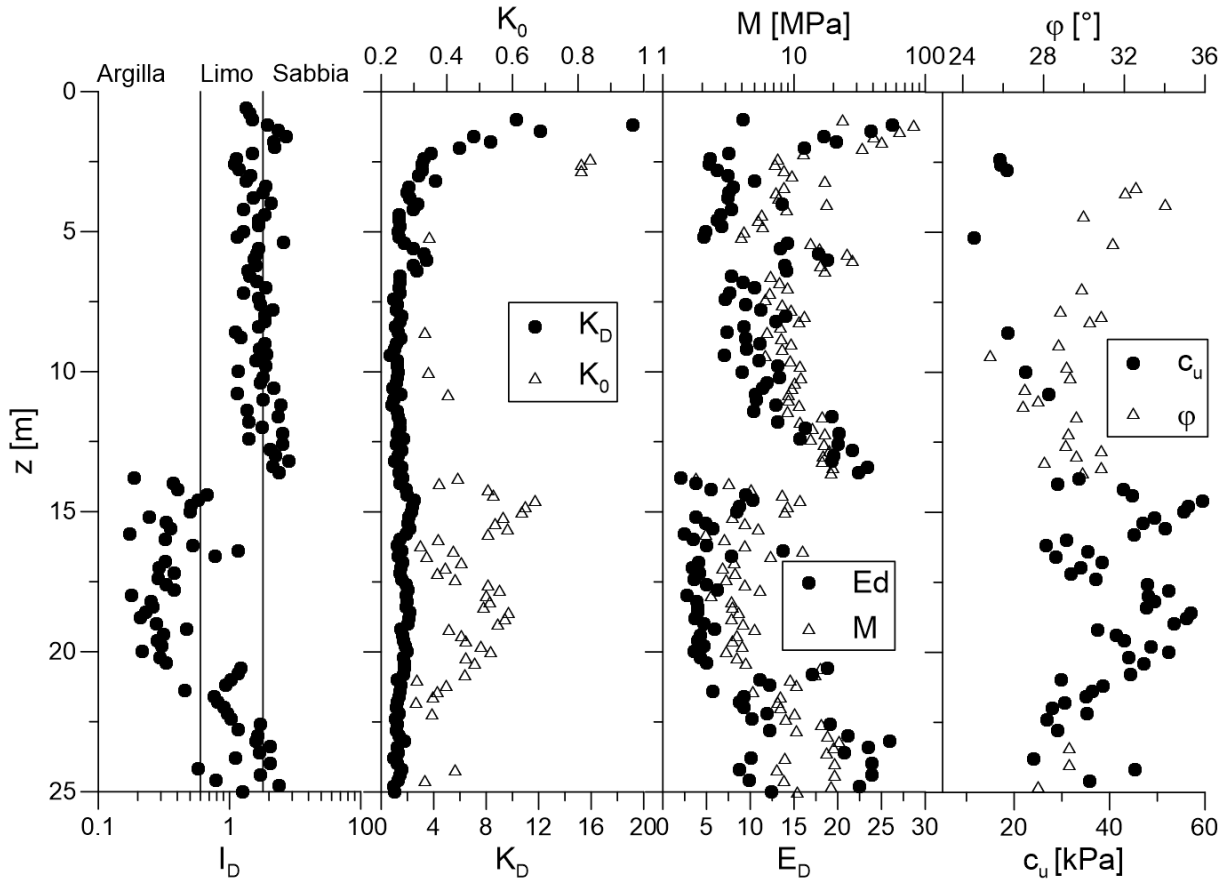


Figura 88 Risultati ricavati dalla prova DMT1

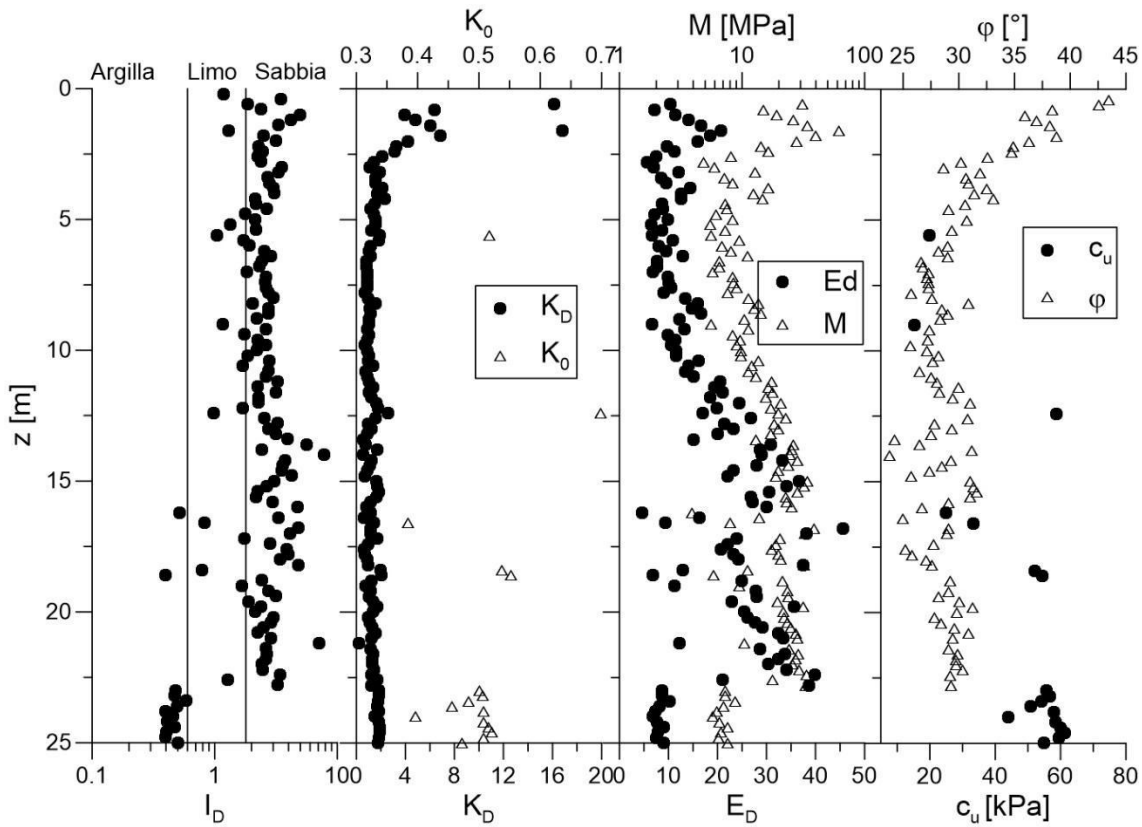


Figura 89 Risultati ricavati dalla prova DMT2

Risultati prove di laboratorio

I risultati delle prove di laboratorio sono riassunti nella *Tabella 14* e riepilogati in funzione della profondità in Figura 90.

I terreni sono sabbie limose o limi sabbiosi (Figura 91). Si osserva che tutti i campioni contengono percentuali piuttosto elevate di sabbia con una media del 43% nei primi 5 m di profondità, che costituiscono il corpo arginale, e del 48% in fondazione, ad eccezione del campione S2-C6, prelevato a 12m di profondità che si colloca all'interno di uno strato molto più sabbioso. La frazione fine è ovunque caratterizzata da plasticità bassa o nulla.

Il contenuto d'acqua naturale del terreno e il grado di saturazione crescono con la profondità. Nei primi 5 m il grado di saturazione medio è del 51.8%, mentre in fondazione è del 74.5%. Si tratta quindi di terreni in condizione di parziale saturazione, cioè con significativi livelli di suzione.

Il peso di volume del materiale è mediamente di 17.9 kN/m³ per il rilevato e 18.6 kN/m³ per il terreno di fondazione.

Sono state eseguite prove di taglio diretto (TD), prove di taglio triassiale drenate (TxCiD) e non drenate (TxCiU) che hanno restituito valori dell'angolo d'attrito compresi tra 27,5° e 33,5° e coesione efficace compresa fra 4 kPa e 12 kPa (Figura 92).

La permeabilità in condizioni sature dei campioni ha registrato valori dell'ordine di 10⁻⁷ m/s per il rilevato arginale, la sua fondazione e il terreno golenale. Si tratta di valori di permeabilità relativamente bassi, ma tipici delle sabbie fini limose. Inoltre, va ricordato che nei terreni parzialmente saturi, la permeabilità può essere anche di ordini di grandezza inferiore rispetto a quella misurata in condizioni sature, pertanto i valori riportati in *Tabella 14* sono da considerare limiti superiori.

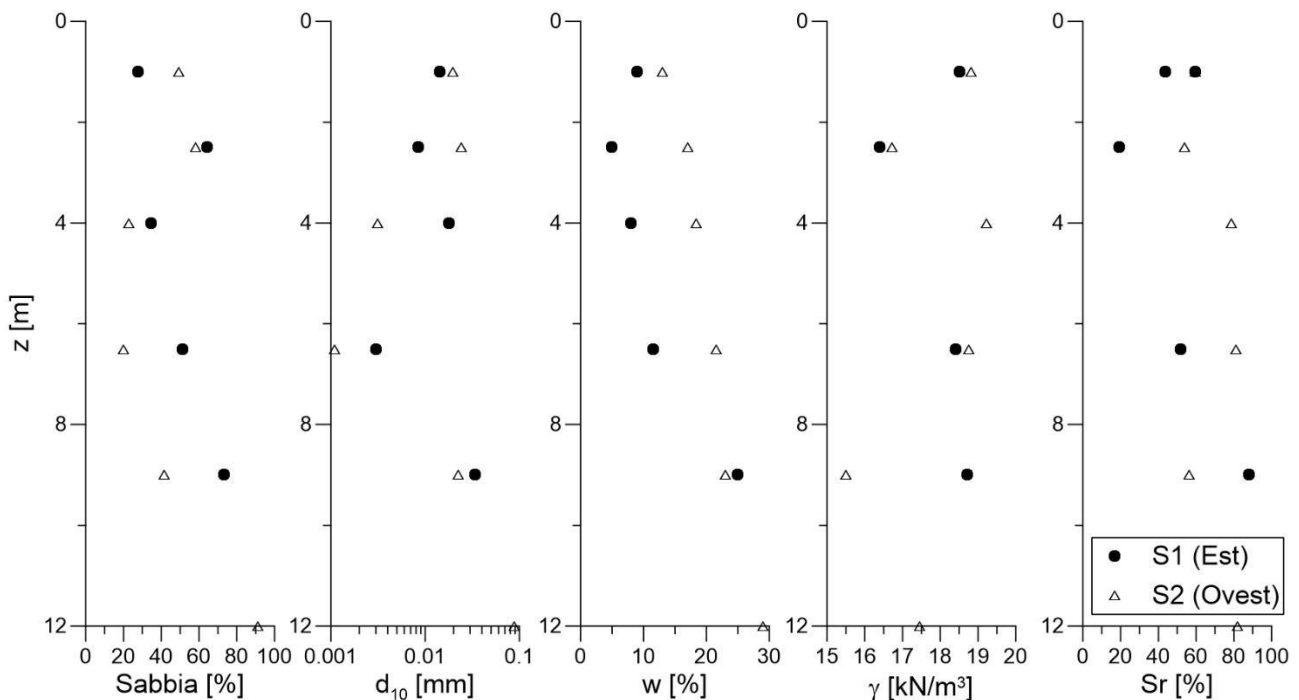


Figura 90 Rappresentazione delle caratteristiche del terreno con la profondità

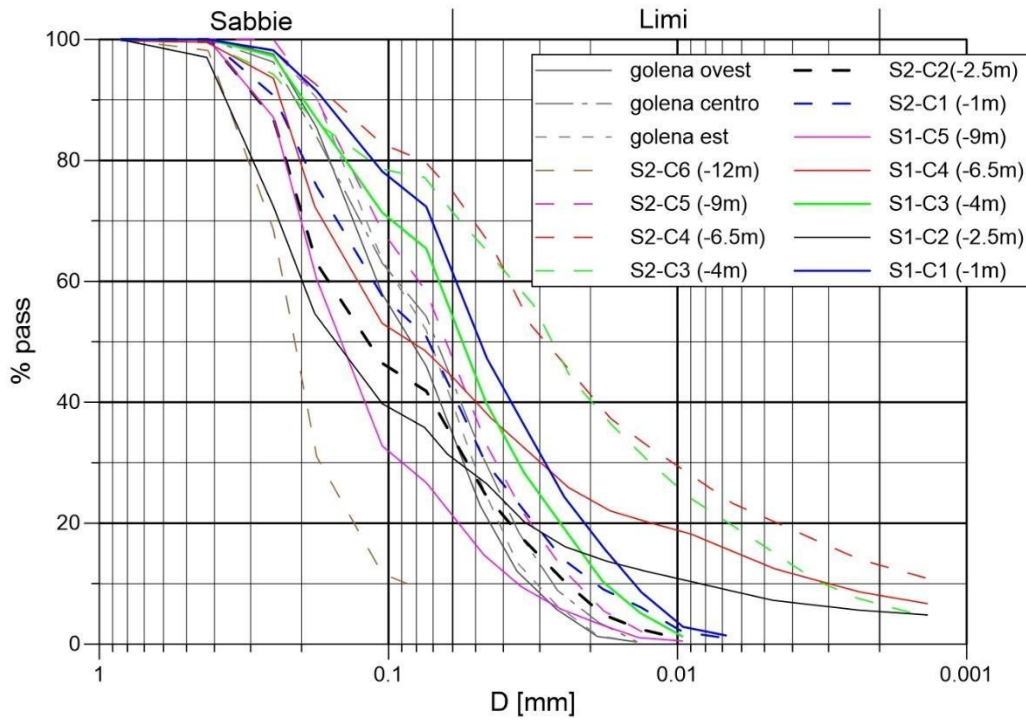


Figura 91 Curve granulometriche dei campioni analizzati

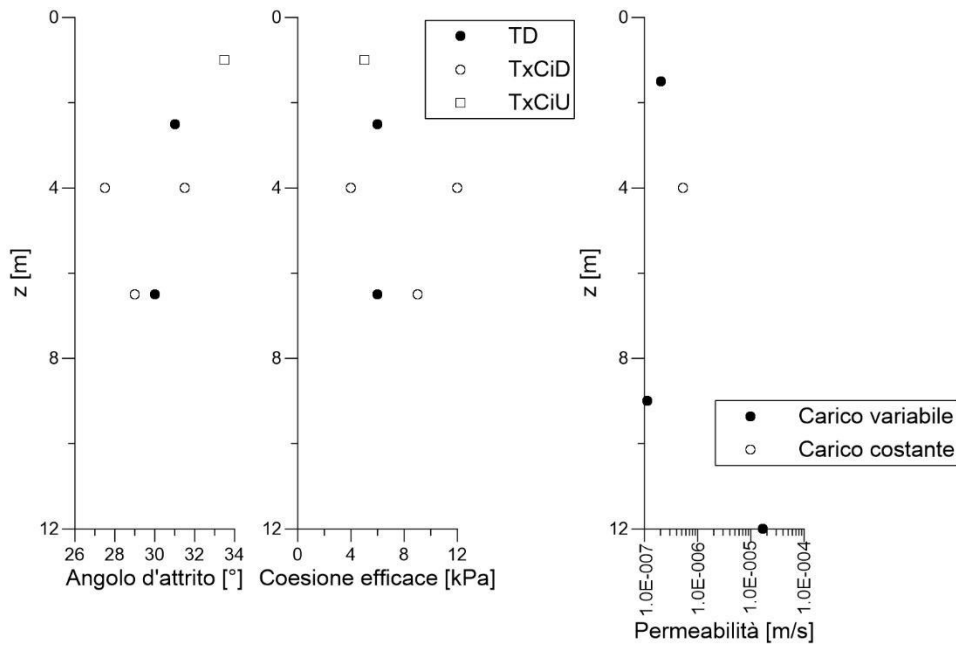


Figura 92 Angolo d'attrito e coesione efficace ricavati dalle prove di taglio

Tabella 14 Risultati prove di laboratorio(*campione parzialmente disturbato, #campione rimaneggiato, T=trincea in golenia, W=ovest, E=est, C=centro
Camp=campagna)

campione	Prof. [m]	Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)	d ₁₀ [mm]	d ₆₀ [mm]	U	w (%)	w _L	w _p	IP	γ [kN/m ³]	G _s	e	S _r	φ [°]	c [kPa]	Perm. [m/s]
S1-C1	1	27,7	72,3	0,0	0,0142	0,0600	4,2	9				18,52	2,673	0,54	44,28	33,5	5	
S1-C2	2,5	64,2	30,2	5,6	0,0084	0,2011	23,8	5	21	0	0	16,4	2,673	0,68	19,69	31	6	
S1-C3	4	34,6	65,4	0,0	0,0178	0,0681	3,8	8					2,673			27,5	12	5,35E-07
S1-C4	6,5	51,4	40,0	8,6	0,0030	0,1320	43,7	11,6	25	22	3	18,4	2,673	0,59	52,52	30	6	
S1-C5	9	73,3	26,7	0,0	0,0335	0,1761	5,3	25				18,72	2,673	0,75	88,99			
S2-C1	1	49,2	50,8	0,0	0,0195	0,1145	5,9	13				18,82	2,673	0,57	60,49			
S2-C2	2,5	58,2	41,8	0,0	0,0242	0,1640	6,8	17				16,72	2,677	0,84	54,33			
S2-C3	4	22,8	69,6	7,6	0,0032	0,0375	11,9	18,4	27	21	6	19,23	2,677	0,62	79,84	31,5	4	
S2-C4	6,5	20,1	65,9	14,0	0,0011	0,0386	35,3	21,5	30	22	8	18,75	2,677	0,70	82,02	29	9	
S2-C5	9	41,7	58,3	0,0	0,0225	0,0792	3,5	23				15,5	2,677	1,08	56,80			1,14E-07
S2-C6	12	91,3	8,7	0,0	0,0874	0,2334	2,7	29				17,45	2,677	0,94	82,47			1,69E-05
TW-I*	1,5	52,9	47,1	0,0	0,0354	0,1034	2,9	12				15,22	2,673	0,93	34,50			2,06E-07
TW	1	54,0	46,0	0,0	0,0328	0,1105	3,4											
TC#	1	45,8	54,2	0,0	0,0271	0,0944	3,5											
TE#	1	48,10	51,90	0,00	0,0311	0,0956	3,1											
Camp 1#		75,6	22,9	22,9	0,0170	0,0312	1,8											
Camp 2#		85,3	14,3	14,3	0,0114	0,1026	9,0											

Definizione del modello geotecnico

Dall'insieme delle prove in sito e di laboratorio sono state ricavate tre sezioni geotecniche rappresentate in *Figura 93*, *Figura 94*, e *Figura 95*, la cui traccia è indicata in *Figura 60*.

La *Tabella 15* riporta sinteticamente la descrizione delle diverse unità stratigrafiche individuate e i parametri geotecnici caratteristici.

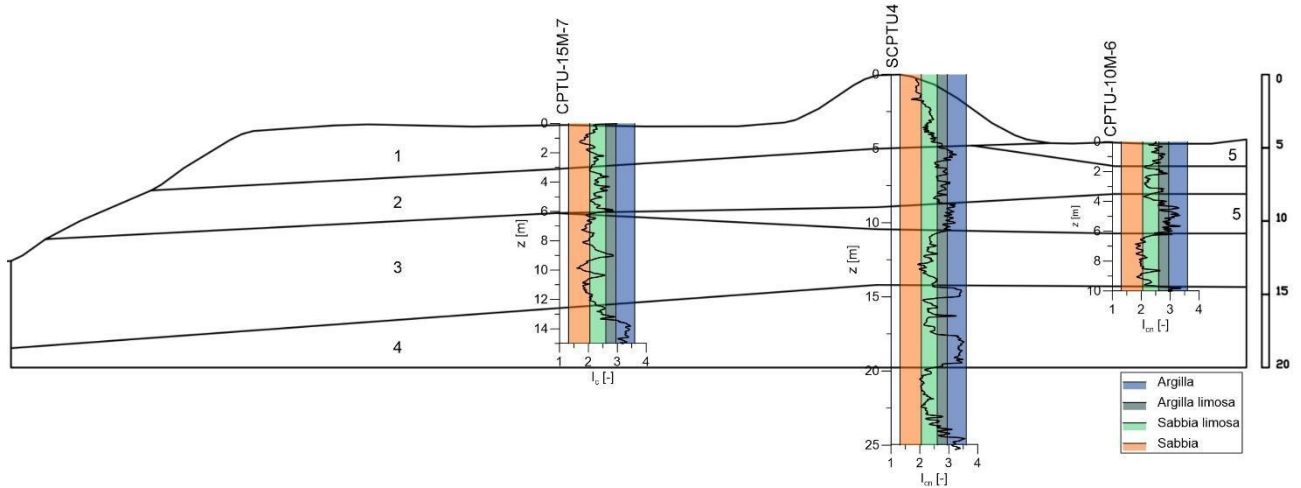


Figura 93 Modello geotecnico sezione 1 (a monte della rotta)

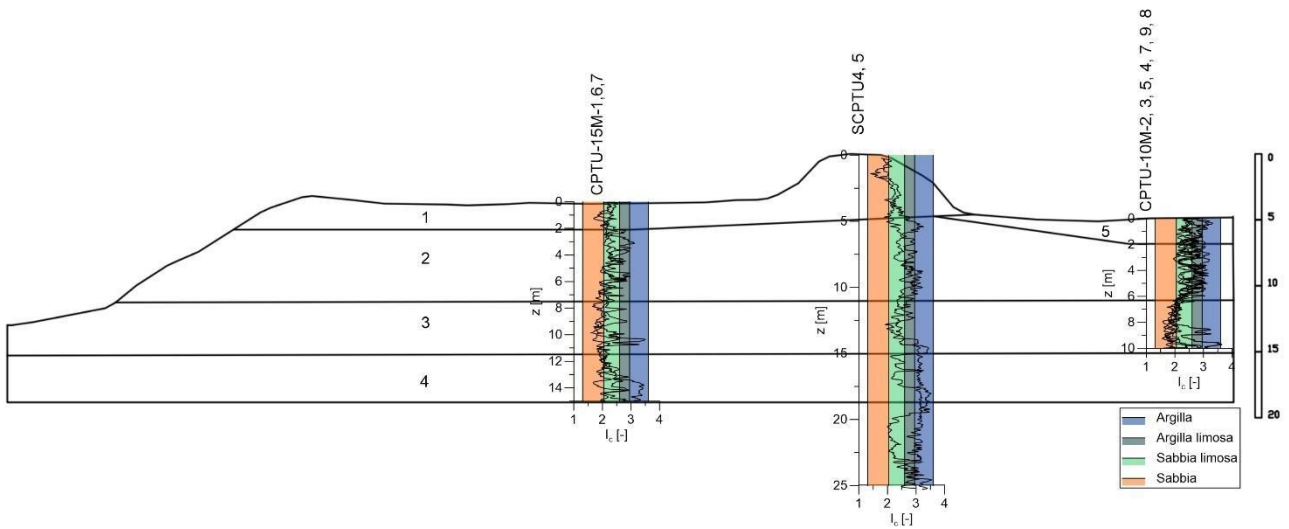


Figura 94 Modello geotecnico sezione (centro della rotta)

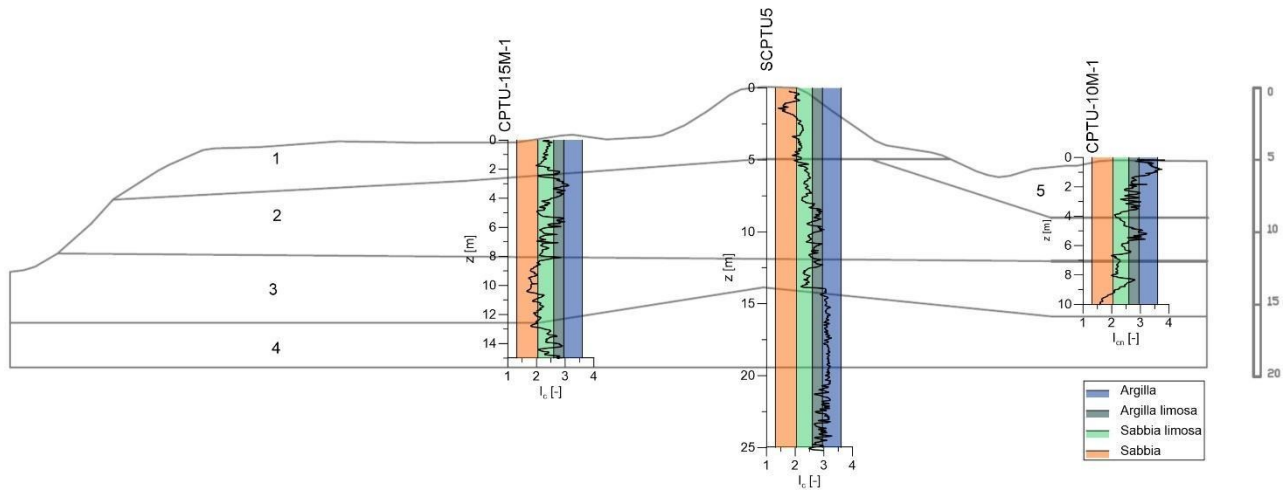


Figura 95 Modello geotecnico sezione 3 (a valle della rotta)

Tabella 15 Unità stratigrafiche e parametri geotecnici

Unità	Descrizione	φ' [°]	c' [kPa]	C_u [kPa]	k [m/s]
1	Corpo arginale: sabbia fine limosa	28-32	2-12	n.p.	1E-07 – 5E-06
2	Sabbia limosa e limo sabbioso	29-31	6-9	n.p.	5E-08 – 5E-07
3	Sabbia e sabbia debolmente limosa	30-34	0	n.p.	2E-06 – 2E-05
4	Limo argilloso	n.p.	n.p.	60-80	1E-09 – 1E-08
5	Limo	n.p.	n.p.	20-50	1E-09 – 4E-08

Interpretazione delle indagini nella zona delle tane

Interpretazione delle prove geofisiche

Nella zona delle tane sono stati eseguiti profili geoelettrici in modalità 3D con posizione degli elettrodi come indicato in *Figura 65b*. L'indagine ha messo in evidenza che l'argine è costituito da una miscela di sabbie e limi con elevata eterogeneità. Si osservano infatti variazioni della resistività compatibili con la presenza di materiale a diverso stato di addensamento e contenuto d'acqua (*Figura 96*). Tale eterogeneità è confermata anche dalle prove penetrometriche e può essere riconducibile alle modalità con cui l'opera fu costruita.

Sono ben visibili zone ad elevata resistività (*Figura 97*), esterne al campo di valori caratteristico dei terreni usati per la costruzione degli argini. Tali zone sono associabili a disomogeneità significative, collegabili con la presenza di zone ad alta concentrazione di frazioni granulari o alla presenza di elementi comunque diversi. Nonostante la elevata resistività di tali zone, esse non sembrerebbero associabili alla presenza di tane ramificate, anche relitte, di animali fossori che siano spinte in profondità all'interno del rilevato arginale. Tuttavia al fine di verificare tali anomalie è necessario attendere l'interpretazione delle misure down-hole condotte con le SCPT, purtroppo non ancora terminata alla data di ultimazione della presente relazione.

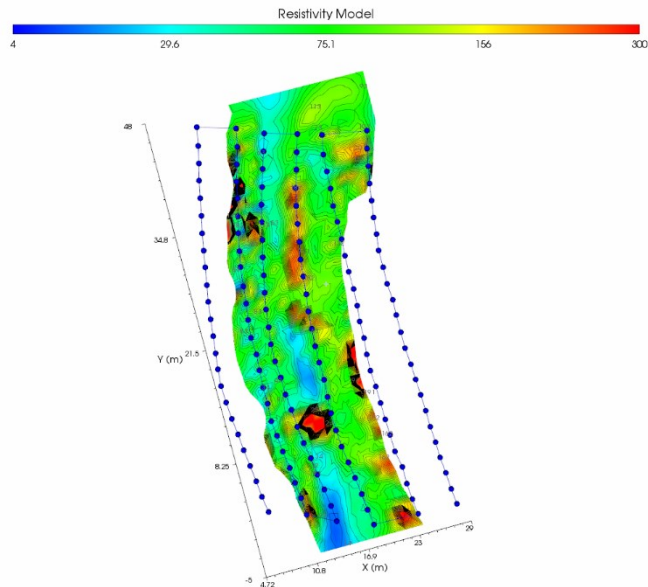


Figura 96 Sezione orizzontale alla quota di 31m s.l.m.

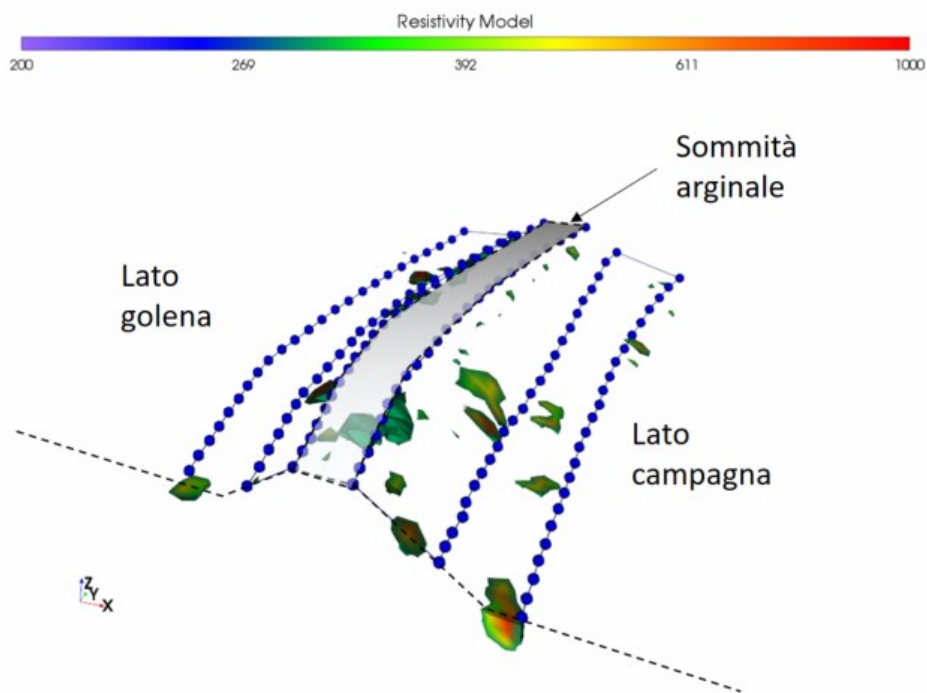


Figura 97 Volumi molto resistivi ottenuti da ERT3D nella zona delle tane

Le indagini con gradiometro ed elettromagnetometro non hanno evidenziato singolarità significative.

Interpretazione delle prove penetrometriche

Alla data di consegna della presente relazione, gli scriventi hanno avuto a disposizione il risultato delle prove SCPTU (numerate da 1 a 16) in termini di parametri penetrometrici (q_c , f_s , u_2), ma non i risultati della propagazione delle onde sismiche. Nel seguito vengono quindi discussi i primi risultati disponibili, a cui seguirà un documento integrativo con i risultati dell'analisi sismica.

In quest'area le prove sono state eseguite a distanza molto ridotta tra di loro (3 m per un tratto di 50 m) per valutare l'eterogeneità del corpo arginale, che ha mostrato essere assai significativa e che ha un importante impatto sulla resistenza complessiva dell'opera. Durante l'esecuzione delle prove sono state misurate anche le onde P e S per una tomografia sismica con tecnica down-hole del breve tratto arginale.

In *Figura 98* si riportano complessivamente i risultati in termini di resistenza alla punta (q_c) e resistenza laterale (f_s), la linea nera spessa indica il valore dello scarto quadratico medio (μ), mentre l'area grigia delimita la zona compresa all'interno dello scarto quadratico medio (σ), i.e. $\mu + \sigma$ e $\mu - \sigma$.

L'indagine mette in evidenza che, nonostante il rilevato sia costituito da sabbie limose, la risposta meccanica in termini di resistenza è estremamente eterogenea e relativa a un terreno compatto ma molto fragile. Tenuto conto che la componente attritiva della resistenza complessiva non mostra una significativa variabilità, tale eterogeneità è legata prevalentemente alla componente della coesione efficace, la quale, come è già stato messo in evidenza precedentemente, è condizionata dallo stato di suzione e di cementazione dello scheletro solido.

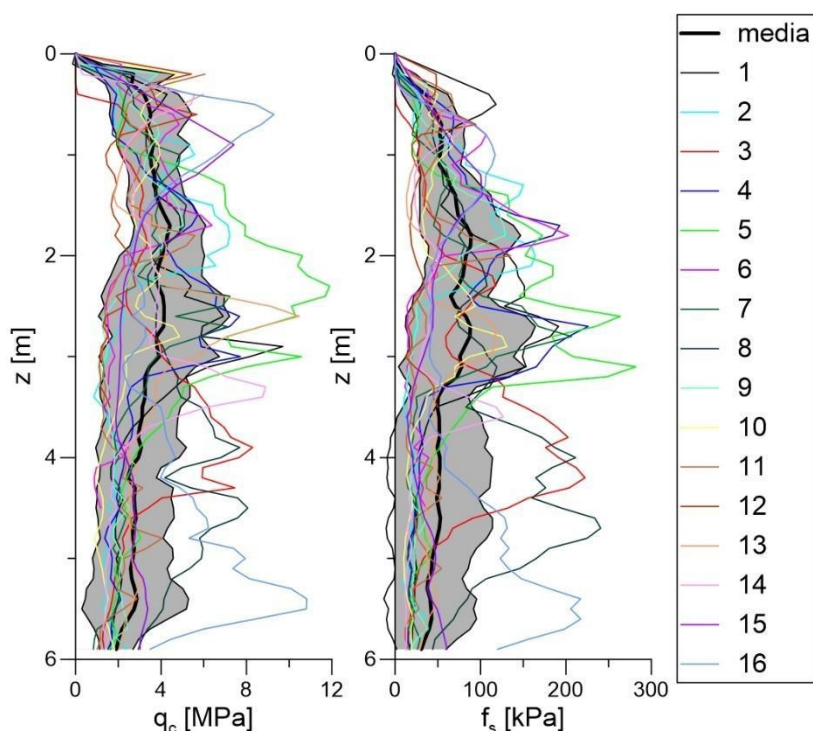


Figura 98 Risultati prove SCPTU zona delle tane.

Ulteriori considerazioni sulla morfologia del sito di rotta

Il sito della rotta è stato esaminato dal punto di vista della morfologia locale. Si sintetizzano le emergenze più significative ai fini di poter individuare eventuali concause.

Il del sito presenta tuttora la testimonianza di un antico sistema di scoline campestri che ha il suo punto di recapito in corrispondenza del piede d'argine in prossimità della rotta. Sulla base di queste considerazioni si è studiato l'assetto locale delle pendenze attraverso il rilievo LIDAR ad altissima risoluzione fornito alla Commissione da Regione.

L'analisi mostra chiaramente le scoline campestri. Su di esse sono stati posizionati i segmenti corrispondenti alle componenti del reticolo e ne sono state analizzate le direzioni di scolo e le relative pendenze;

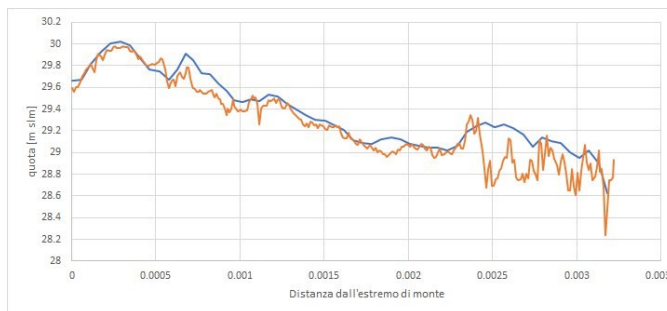


Figura 99. Rilievo LIDAR ad alta risoluzione della zona della rotta e rete di scolo storica e tuttora presente sul territorio (a sinistra). Il grafico a destra mostra il profilo altimetrico lungo il collettore principale (linea rossa nella figura a sinistra) utilizzando, sia il rilievo ad altissima risoluzione (arancio) che il classico rilievo a risoluzione 2 metri, tratto dal Piano nazionale di telerilevamento di Minambiente. Si osserva chiaramente come lo scolo delle acque converge a pochi metri dal sito della rotta, che si presenterebbe quindi come un sito di ristagno delle acque.

Anche dall'immagine di Figura 99 si può constatare che il recapito di tale reticolo si trova nelle immediate adiacenze del punto di rotta che dunque presenta una morfologia depressa e favorevole al ristagno delle acque.

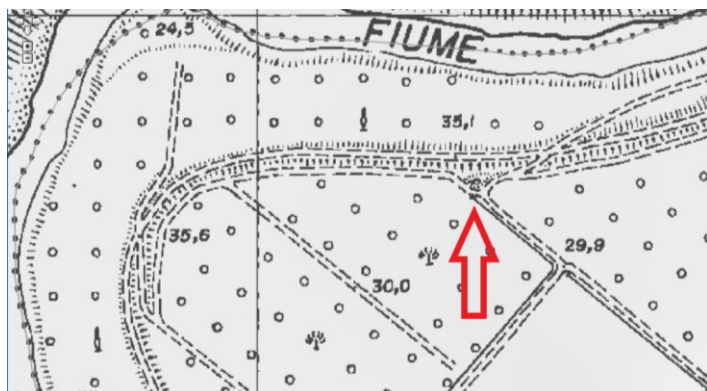


Figura 100. Tavoleta IGM che mostra chiaramente la presenza di un qualche manufatto nelle immediate vicinanze del sito di rotta.

Sul tema sono state raccolte testimonianze tra i frontisti delle quali si trova la trascrizione in allegato. Sintetizziamo qua che taluni ricordano la presenza di un qualche manufatto, altri ipotizzano un tombino che sottopassava l'argine, altri ancora la presenza di una vasca di raccolta dalla quale le acque di pioggia venivano poi sollevate e recapitate in Panaro attraverso una motopompa e una tubazione disposta a cavaliere dell'argine.

Tale usanza si sarebbe poi persa con l'abbandono della coltura del pesce e con la sua sostituzione con il pioppo che, al contrario dell'altro, non teme i suoli umidi.

Parte quarta: la struttura nel contesto bio-naturalistico

Caratterizzazione faunistica e naturalistica del sito

Caratterizzazione faunistica

I mammiferi di medie dimensioni che scavano cunicoli ipogei lungo il corso del fiume Panaro in Provincia di Modena sono il Tasso e la Volpe, appartenenti all'ordine dei carnivori, e Istrice e Nutria che sono invece roditori. Queste entità zoologiche condividono la caratteristica comportamentale di scavare tane e gallerie ipogee anche articolate, perciò definite anche "sistemi di tana". Questa attività serve loro per rifugiarsi dai pericoli dell'ambiente esterno, disporre di dormitori utilizzati principalmente di giorno, nonché di siti riproduttivi allocati entro camere appositamente costruite. In realtà questi *taxa* scavano nel terreno anche alla ricerca di tuberi, radici e rizomi utili per assolvere a un'altra esigenza basilare e cioè quella trofica. Tuttavia in questi casi le perforazioni presentano volumi sostanzialmente più ridotti.

Sebbene di norma ciascun individuo o nucleo familiare costruisca un proprio sistema di tane, tuttavia è noto come vi possa essere una condivisione mutualistica nell'uso delle tane; nel senso che queste vengono impiegate, a volte anche contemporaneamente, da parte di Tasso, Istrice e Volpe oltre che in comunione con altri roditori, Mustelidi e Lagomorfi (Mori et. al., 2015). Questo fatto, in assenza di altri indicatori di presenza (fatte, impronte, aculei), può rendere non sempre agevole il riconoscimento della specie occupante una data tana.

Come si avrà modo di illustrare di seguito, lo status ecologico (distribuzione e consistenza numerica) delle specie sopra citate, così come il loro inquadramento normativo, hanno subito variazioni e dinamiche di un certo rilievo nel corso di tempi anche recenti. In alcuni casi si tratta di spostamenti naturali, in altri invece di traslocazioni artificiali operate dall'uomo (Nutria). Tutto ciò non ha mancato di esercitare effetti anche nel territorio in esame.

Istrice (Hystrix cristata Linnaeus, 1758)

L'Istrice è il più grosso roditore europeo dopo il castoro. Per quanto attiene all'habitat, si tratta di una specie termofila di origine africana (Africa mediterranea ed Africa centrale). In Europa è presente solo nella penisola italiana e in Sicilia. Attivo quasi esclusivamente di notte, trascorre il giorno riparato in tane che la femmina



Figura 101. Istrice (*Hystrix cristata*)

utilizza anche per l'allevamento dei piccoli. Si nutre di vegetali, tuberi, frutta, ecc. Predilige ambienti coltivati alternati a boscaglie, arbusteti o incolti a clima mediterraneo.

Intorno agli anni 70 dello scorso secolo le presenze in Regione Emilia-Romagna si attestavano a ridosso della dorsale appenninica, che costituiva il margine settentrionale dell'areale distributivo paleartico della specie.



Figura 102. Areale geografico dell'Istrice (IUCN Red List). In verde presenza incerta

Successivamente si è gradualmente espanso a partire dalla Romagna in direzione nord - nordovest occupando ampie porzioni di territori di pianura. La ricca vegetazione ripariale limitrofa ai corsi d'acqua costituisce un corridoio ecologico utilizzato dal roditore come direttrice preferenziale d'espansione.

Come evidenziato in Figura 102 la specie si sta espandendo in pianura Padana anche grazie ai corridoi ecologici costituiti dai sistemi naturali e semi naturali rappresentati dai corsi d'acqua di pianura. Negli ultimi decenni nell'Italia centro-settentrionale si è osservato un sensibile incremento della specie che ha colonizzato nuove aree rispetto a quelle note fino agli anni '70 (Tedaldi e Scaravelli, 1993). In Regione Emilia-Romagna la presenza storica dell'istrice è stata documentata con una certa regolarità a partire dalla Romagna (Ginanni, 1774; Zangheri, 1946, 1957, 1969; Silvestri, 1971).

A partire dagli anni '80 dello scorso secolo la specie ha mostrato una chiara tendenza ad ampliare l'areale verso nord, dapprima colonizzando nuovi territori nell'ambito dell'area romagnola (Bassi e Fabbri, 1985, 1987; Casini et al., 1988; Zavalloni e Castellucci, 1991) e successivamente facendo la sua comparsa in Provincia di Modena nel 1984 (Sala, 1987) e di Parma nel 1989 (Ferri e Sala, 1992). In Provincia di Modena segnalazioni certe della presenza dell'istrice si sono susseguite negli anni successivi in numerose località della fascia appenninica a conferma dell'esistenza di una popolazione consolidata (Ferri e Sala, 1992). Da alcuni decenni a questa parte l'istrice ha progressivamente occupato il territorio modenese in direzione sud-nord. La distribuzione attuale della popolazione interessa ampie porzioni del territorio provinciale. L'areale distributivo italiano è arrivato a ridosso delle Prealpi (Piemonte centrale, Province di Verona e Vicenza).

Gli scenari futuri relativi ai cambiamenti climatici evidenziano un'ulteriore espansione dell'areale distributivo del roditore in Italia verso aree dove la specie sinora non è mai stata presente (Mori et al., 2018).

Di norma la tana è scavata su terreni asciutti e compatti ricoperti da una fitta vegetazione che garantisce protezione dai predatori e dal bracconaggio. Le tane sono generalmente composte da una serie di camere connesse tra loro da tunnel con uno o diversi accessi (Tinelli & Tinelli, 1988; Felicioli & Santini 1994). La presenza di sponde arginali dei corsi d'acqua con inclinazione compresa tra 20° e 59° costituisce elemento preferenziale per l'ubicazione delle tane. Altri elementi preferenziali sono l'esposizione verso meridione con

angolazione compresa tra 46° e 225°, la presenza di suoli ben drenati a tessitura preferibilmente sabbiosa, nonché una fitta vegetazione arbustiva ed arborea ricoprente (Monetti et al., 2005). Gli istrici possono utilizzare anche buchi naturali come grotte, fessure rocciose e buchi creati da altri animali, oppure scavano le proprie tane all'interno di un sistema ampio ed elaborato.

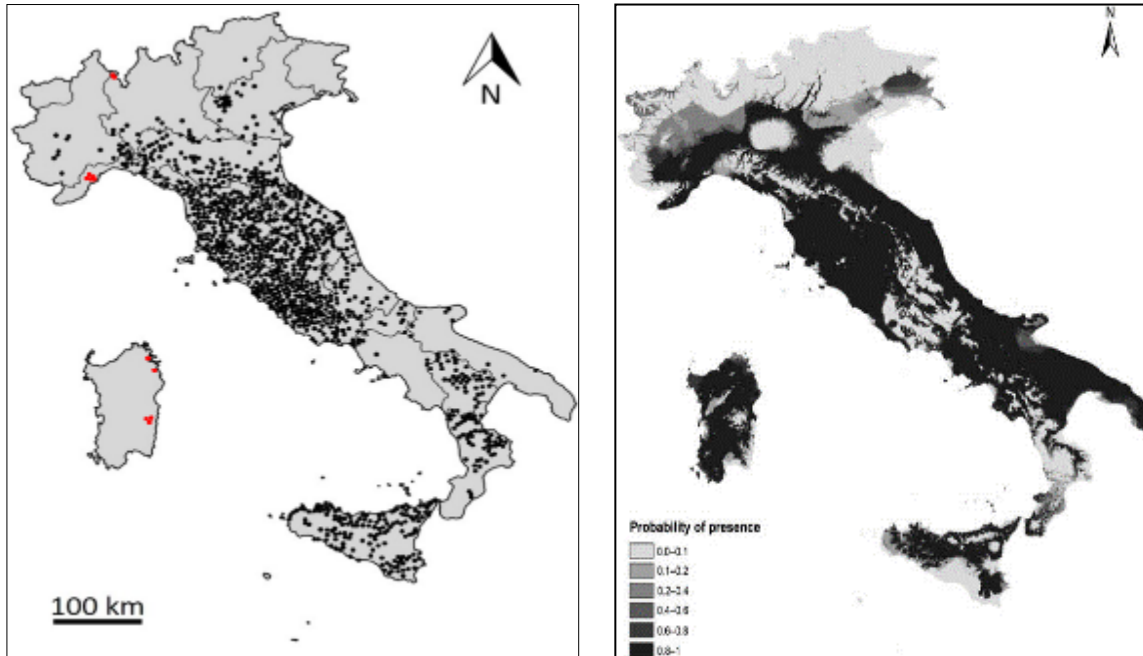


Figura 103. Aree distributive dell'Istrice in Italia (Mori et al., 2013). In rosso i punti d'immissione artificiale (a sinistra) e Modello di predizione della possibile distribuzione geografica dell'Istrice in Italia. Gradazione di grigi; scuro: probabilità elevata (Mori et al., 2013) (a destra)

Nel parco regionale della Maremma (GR) l'altezza mediana delle tane di istrice è di 24 cm e la larghezza di 25 cm. Le coppie riproduttive mostrano una maggiore fedeltà alle tane rispetto ai soggetti singoli. Vi è inoltre una selezione negativa per l'esposizione a nord delle entrate delle tane.

Il roditore è attivo quasi esclusivamente di notte. Si nutre nel corso dell'intero anno poiché non va in letargo (Corsini et al., 1995). Predilige ambienti diversificati con presenza di coltivato, boscaglie, incolti. È dotato di elevata plasticità ecologica nei confronti di diversi habitat pur prediligendo foreste decidue ed arbusteti. Recenti studi genetici hanno messo in dubbio la presenza autoctona di questa specie in Italia propendendo per una sua introduzione da parte dei Romani.

In quanto allo stato di conservazione l'Istrice è classificato come specie LC (Least Concern) nella Red List IUCN (2016). Le ragioni dell'espansione della specie verificatasi soprattutto negli ultimi decenni vanno ricercate nel consolidamento delle popolazioni già esistenti legato, almeno in parte, alla protezione legale accordata alla specie nel 1977 (L. 968/1977).

Per quanto riguarda il regime di tutela il *taxon* è inserito in allegato II (specie di fauna rigorosamente protetta) della Convenzione di Berna del 19 settembre 1979 relativa alla conservazione della vita selvatica e dell'ambiente naturale in Europa. Inoltre, è specie collocata in allegato IV (specie che richiedono una protezione rigorosa) della Direttiva 92/43/CEE (Habitat) inerente la conservazione degli habitat naturali e della flora e della fauna selvatiche. Ciò nonostante, il congiunto disposto dell'art. 16 della suddetta Direttiva (deroghe) e dell'art. 11 del DPR 357/97 (regolamento di attuazione della direttiva), consente di derogare dal regime di tutela rigorosa al fine di "salvaguardare l'interesse della sicurezza pubblica o per altri motivi imperativi di rilevante interesse pubblico." Condizioni necessarie per l'applicazione del regime di deroga

sopra richiamato sono: *i)* che non vi siano altre soluzioni valide e *ii)* che non si pregiudichi il mantenimento delle popolazioni interessate in uno stato di conservazione soddisfacente.

L'autorità nazionale di riferimento per l'ottenimento delle deroghe è il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare sentito il parere di ISPRA. Nel corso degli ultimi lustri alcune Amministrazioni locali, tra cui anche Regione Emilia-Romagna, hanno richiesto ed ottenuto l'attivazione di interventi in deroga finalizzati a fronteggiare situazioni di rischio idraulico su arginature pensili. Dette azioni (piani di controllo) prevedono, tra l'altro, la cattura e la traslocazione di un predeterminato numero di esemplari (istrici e tassi).

In particolare, la Provincia di Modena, con atto n. 204 e 205 del 14/10/2015 e n. 208 del 15/10/2015, ha approvato piani di limitazione numerica lungo le aste fluviali principali dei fiumi Secchia e Panaro per le specie Tasso, Istrice e Volpe con scadenza al termine 2018. Con successivo atto di Deliberazione della Giunta Regionale Emilia-Romagna n. 612 del 15 aprile 2019 è stata approvata la prosecuzione delle suddette attività per il periodo 2019-2021 (per un consuntivo di dette attività si rimanda al capitolo sulla gestione faunistica).

Tasso (Meles meles Linnaeus, 1758)

Il Tasso è un carnivoro di medie dimensioni appartenente alla famiglia dei mustelidi ad indole semi fossoria presente in tutta Europa e fino al Giappone e parti della Cina con limite settentrionale in Scozia, Svezia e Finlandia centrali. Ha abitudini prevalentemente notturne e trascorre la maggior parte del giorno all'interno di tane comuni (Neal, 1977).

In Italia il Tasso è distribuito nell'intera penisola mentre è assente in Sicilia, Sardegna e nelle isole minori (Spagnesi et al., 2000). L'habitat del Tasso è variegato e spazia da quello tipicamente forestale sino alla pianura. Preferisce boschi di latifoglie anche di limitata estensione alternati a zone aperte, cespugliate, sassose e incolte. Il mustelide denota elevata adattabilità ecologica in virtù della quale è in grado di colonizzare anche aree agricole quando dotate di una minima presenza di vegetazione naturale che possa offrire riparo e protezione.



Figura 104. Esemplare di Tasso (*Meles meles*)

Il Tasso vive in clan o gruppi familiari costituiti anche da alcune decine di individui e caratterizzati da complesse strutture sociali. Abitudini strettamente notturne. I tassi possono costruire tane anche in aree aperte o periurbane (Mori & Assandri, 2019). Le tane sono composte da sistemi ipogei anche molto articolati con funzione di rifugio, dormitorio e sito riproduttivo. Il Tasso si nutre di vari invertebrati, soprattutto lombrichi e piccoli vertebrati oltre a cereali, frutta, tuberi ed altri vegetali. Non disdegna le carogne così come i funghi. Specie storicamente diffusa sul territorio nazionale. In Emilia-Romagna nel corso degli ultimi decenni

si è registrata una fase espansiva verso i territori di pianura. Tale espansione, originata dalle aree collinari, trova direttrice preferenziale di propagazione lungo i tratti di pianura delle aste fluviali e delle relative aree golenali che fungono da corridoi ecologici preferenziali (Toso et al., 1998). La carta faunistica della Regione Emilia-Romagna segnala i danni da collasso dei terrapieni dovuti a scavi del mustelide all'interno di argini di fiumi a seguito dell'innalzamento del livello idrico. Vi sono altresì segnalazioni di frequentazione di aree urbane.

Il *trend* delle popolazioni a scala globale è stabile (IUCN Red List, 2015). Il Tasso è considerato LC (Least Concern) nella Red List IUCN (2015). In Italia è specie protetta ai sensi della norma vigente e quindi non cacciabile.

Il Tasso scava tane nel terreno o utilizza quelle scavate da altri animali (Istrice e Volpe) con i quali a volte convive. Diverse specie di roditori, lagomorfi e carnivori usano le tane di tasso come rifugio (Roper, 2010). Alcune specie possono convivere nella stessa tana del tasso; tra queste l'istrice, la volpe (Tinelli e Tinelli, 1980; Pigozzi 1986; Kowalczyk et al, 2008).



Figura 105. Areale geografico del Tasso (IUCN Red List).

Le tane principali prevedono una serie di entrate e possono essere abitate da oltre 27 individui (Kruuk, 1989). Lo scavo procede per gradi e, con il passare del tempo, può originare sistemi di tana molto complessi seppure non visibili dall'esterno. Si consideri che siti di tana preferiti possono essere occupati da generazioni successive anche per secoli (Neal, 1977) e che spesso è complicato allontanare i tassi dalle loro gallerie (Roper et al., 1991). La conformazione delle tane dipende dal numero di animali che le producono e dalla loro anzianità.

Il Tasso può condividere la tana con altre specie di mammiferi terrestri. In Toscana meridionale la condivisione interspecifica avviene nel corso dell'anno, sebbene da osservazioni dirette risulta che i tassi evitano gli istrici in inverno perché in fase riproduttiva. l'istrice è il più frequente coabitante di tane di tassi ma anche la Nutria può condividere le tane di Tasso (Mori et al., 2015). Tasso e l'istrice creano sistemi di tana simili che condividono anche con la Volpe. Visto che l'area arginale del fiume Panaro risulta frequentata da

tutte tre questi taxa, è plausibile che qui abbia luogo questo scambio mutuale di tane. I tassi possono creare complessi sistemi di tane che posti principalmente su pendii ripidi preferibilmente con copertura di vegetazione.

I set di tane sono costruiti preferibilmente in terreni argillosi o sabbiosi-argillosi. La preferenza per i terreni sabbiosi e asciutti è giustificata dal fatto che sono più friabili e quindi risulta più facile scavarli (Kruuk, 1978, Reddi et al., 2008).

La costruzione di tane è facilitata dalla presenza di copertura vegetale, dalla pendenza e dal tipo di terreno scavabile. La vegetazione le protegge, le radici forniscono supporto strutturale al sistema di gallerie e facilitano il drenaggio. Anche i pendii possono migliorare il drenaggio, mantenendo asciutta la struttura (Byrne et al. 2012). Inoltre, le sponde arginali inclinate offrono un ambiente favorevole allo scavo e allo smaltimento del terreno.

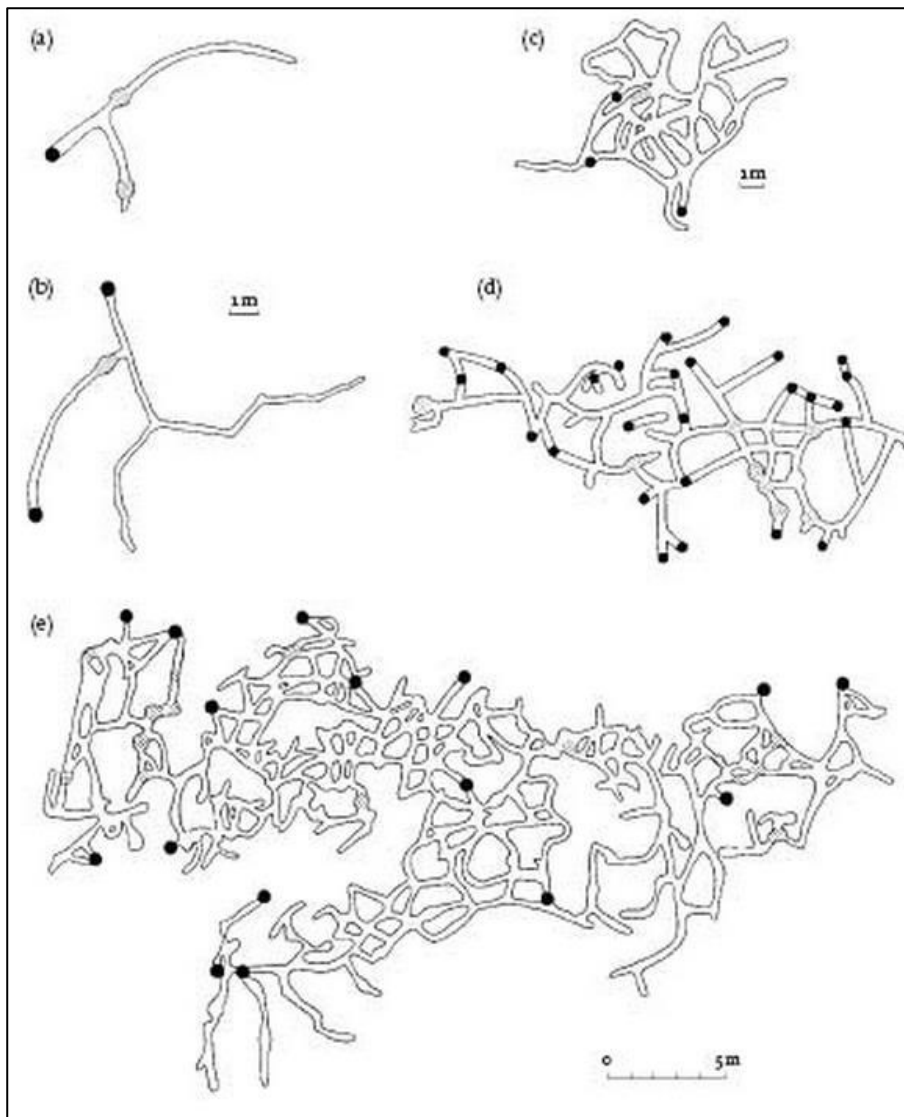


Figura 106. Schematizzazione di siti di tana di Tasso di differenti estensioni e complessità; siti secondari (a e b), siti sussidiari (d), e siti principali (c ed e). Le entrate sono indicate dai cerchi neri (da Roper, 2010).

I set possono essere usati da più clan e sono costituiti da complessi sistemi sotterranei composti da diversi passaggi e camere. La parte centrale è costituita da un insediamento principale occupato dalla maggior parte dei membri della colonia, ha più ingressi ed è occupato stabilmente con funzione riproduttiva.

In prossimità del sito principale, da 50 m a 150 m di distanza, possono essere presenti tane con funzione secondaria con minor frequenza di utilizzo. I siti secondari spesso non vengono occupati e dispongono di un solo ingresso. In Irlanda si è visto in cinque studi che il 77% dei set sono secondari (Byrne et al., 2012).

Un sito di tana può avere da 1-2 fino a 44-50 ingressi. Tra questi solo alcuni possono essere molto utilizzati mentre gli altri sono abbandonati. I fattori che influenzano le dimensioni e la complessità dell'insediamento sono la sua funzione, il tipo di terreno e la sua età. In particolare, più il terreno è facilmente scavabile, più il sistema è sviluppato. Va inoltre tenuto presente che i sistemi più datati sono i più grandi e complessi.

Il numero degli ingressi, delle camere, della lunghezza delle gallerie e del volume interno dei tre pozzetti riportati in Tabella 1 danno un'idea delle dimensioni degli scavi effettuati dai tassi.

Tabella 16. Sviluppo e dimensione di tre set di tana di Tasso esplorati in Irlanda (Roper, 2010)

Tana	N. entrate	Camere	Sviluppo m	Volume mc
1	16	57	310	15
2	38	78	360	25
3	178	50	879	39

In Italia il Tasso non è specie cacciabile ai sensi della L. 11 febbraio 1992 n. 157 su norme per la protezione della fauna selvatica omeoterma e per il prelievo venatorio. Tuttavia, in caso di dimostrati danni le regioni possono deliberare il ricorso ad azioni di controllo faunistico condotte ai sensi dell'art. 19 della suddetta norma nazionale, sentito il parere di ISPRA.

Volpe (Vulpes vulpes Linnaeus, 1758)

La Volpe è un predatore generalista ed eclettico estremamente adattabile sotto il profilo sia ambientale che alimentare. Grazie a queste caratteristiche è in grado di colonizzare varie tipologie di ambienti. Distribuzione ubiquitaria a livello nazionale e di Regione Emilia-Romagna seppure con differenze di densità relazionate al gradiente di idoneità ambientale. In Provincia di Modena la Volpe era scomparsa in pianura nel secolo scorso ed era considerata non comunissima anche in ambito collinare (Massa, in Ferri, 1992).



Figura 107. Esemplare di Volpe (Vulpes vulpes)

Successivamente la specie ha mostrato un incremento generalizzato che ha portato alla ricolonizzazione della pianura accertata nel 1983 nei pressi di Finale Emilia (Ferri, 1992). Nel recente passato i dati disponibili indicano una chiara tendenza all'espansione dell'areale regionale verso la pianura, oltre a un aumento pressoché generalizzato degli effettivi laddove l'areale è consolidato. Durante la stagione riproduttiva utilizza tane che scava nel terreno o che sottrae ad altre specie fossorie. Le tane delle volpi si trovano nei boschi, nella macchia, nelle praterie ma anche negli ambienti urbani, in particolare nei luoghi con terreno è ben drenato. I sistemi di tana creati dalla Volpe hanno una struttura semplice solitamente costituita da un cunicolo principale che porta ad una tana dalla quale si diramano passaggi laterali.

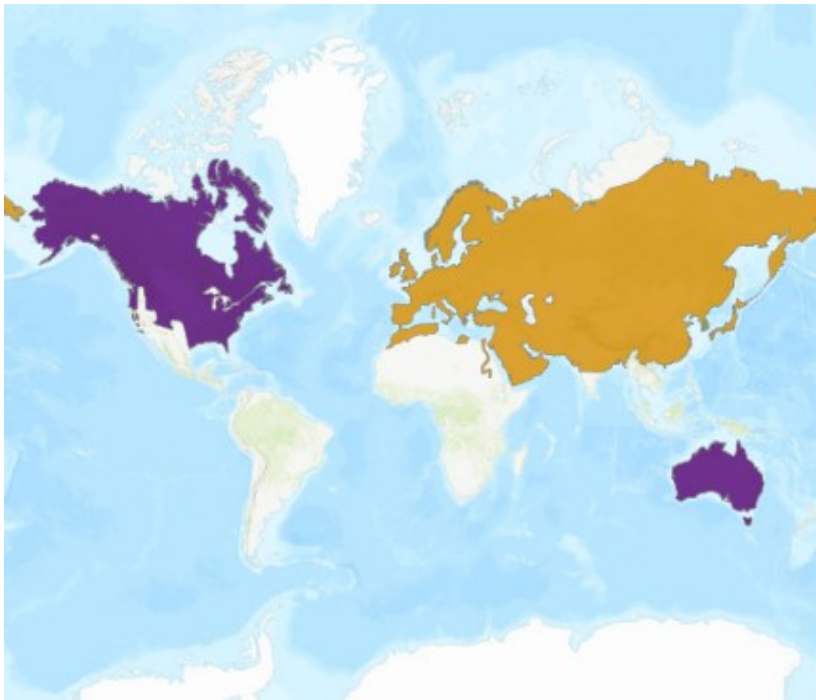


Figura 108. Areale geografico della Volpe (IUCN Red List). In viola l'areale di introduzione artificiale.

Le tane vengono generalmente riutilizzate per più anni consecutivi. La specie ha un regime trofico molto vario essendo in grado di utilizzare una grande varietà di risorse alimentari che spaziano dai vegetali, agli invertebrati ai giovani ungulati. A ciò si somma la capacità di cibarsi da discariche di rifiuti, da allevamenti di animali domestici di bassa corte nonché dai ripopolamenti con selvaggina allevata.

Lo stato di conservazione è generalmente buono. Il *trend* delle popolazioni a scala globale è stabile. La Volpe è classificata LC (Least Concern) nella Red List IUCN (2015).

In Italia ai sensi dell'art. 18 della L. 157/92, la Volpe è specie cacciabile dalla terza domenica di settembre al 31 gennaio. Inoltre, nei casi di dimostrati impatti (soprattutto predazione su fauna selvatica e domestica) le regioni possono deliberare il ricorso ad azioni di controllo faunistico condotte ai sensi dell'art. 19 della suddetta norma nazionale adottando metodi selettivi. Diverse Province emiliano romagnole hanno deliberato l'attuazione di piani di controllo del carnivoro.

A seguito dell'accentramento delle competenze faunistiche, la materia è passata in capo alla Regione la quale con Deliberazione della Giunta Regionale Emilia-Romagna n. 611 del 15 aprile 2019 ha autorizzato l'attuazione di un piano di controllo regionale valido per l'intero territorio regionale con esclusione dei Parchi Nazionali e Regionali nonché nelle Riserve Statali e Regionali con valenza per il quinquennio 2019-2023.

Nutria (Myocastor coypus Molina, 1782)

Si tratta di un roditore di medie dimensioni di origine esotica (Argentina) introdotto artificialmente in Italia nei primi decenni dello scorso secolo.



Figura 109. Esempio di Nutria (*Myocastor coypus*)

L'habitat preferenziale della Nutria è tipicamente quello delle zone umide, acque dolci ferme, paludi, laghi e corsi d'acqua a lento decorso ma anche aree agricole irrigue. Preferisce aree con presenza di ricca vegetazione ed acqua. Effettua spostamenti anche via terra. In Italia il roditore è distribuito su estese porzioni del territorio in particolare nelle pianure dell'Italia settentrionale e centrale. Nelle aree della pianura irrigua le consistenze possono raggiungere valori elevati.

Si tratta di un roditore ad abitudini strettamente erbivore che si nutre di un'ampia varietà di piante comprese quelle coltivate. Costruisce tane ricavate su sponde inclinate con apertura poco sopra all'acqua nella quale si rifugia, si riproduce e partorisce la prole. Il sistema riproduttivo è di tipo poliginico. Specie dotata di un elevato potenziale biotico che, negli ambienti maggiormente idonei, può manifestare tassi di crescita importanti.

Roditore alloctono per il territorio italiano ad indole invasiva originario del continente americano meridionale da dove è stato importato negli anni '20 dello scorso secolo.

La Nutria è inserita nell'elenco delle specie aliene invasive (IAS) per le quali il Regolamento EU 1143/2014 prevede l'adozione da parte degli Stati membri di azioni volte all'eradicazione dal territorio comunitario. La Figura 7 ben evidenzia la progressione della distribuzione del roditore sul territorio europeo avvenuta nell'intervallo 1980-2018.

La specie risulta impattante sotto diversi profili: anzitutto quello ecologico essendo una specie aliena non nativa del territorio italiano che può compromettere la sopravvivenza di comunità animali e vegetali locali. Inoltre, rappresenta un problema sotto il profilo economico per via della sottrazione di porzioni di coltivazioni da reddito. Infine lo scavo delle tane può compromettere la pubblica incolumità a seguito del cedimento di banchine e arginature.

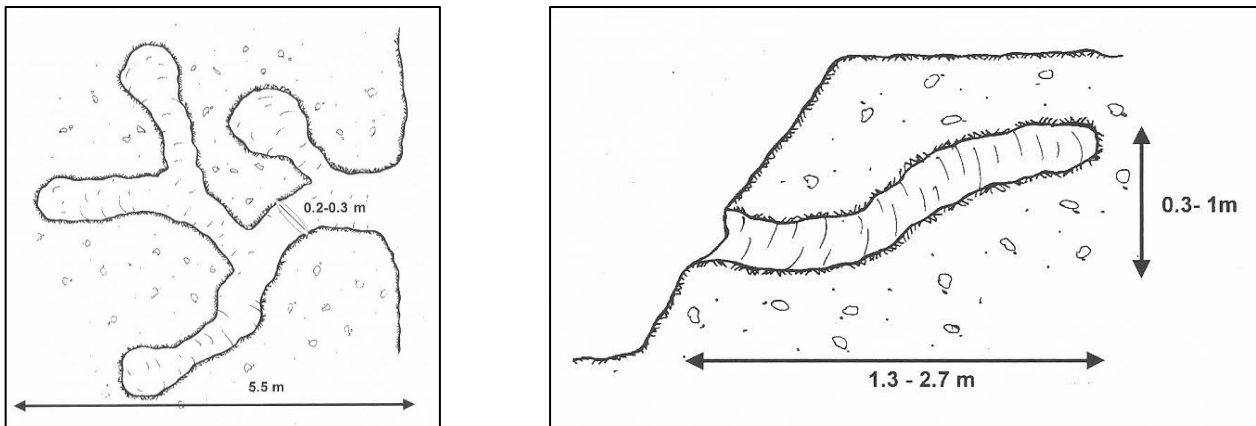


Figura 110. Struttura di tana di Nutria complessa con ramificazione di cunicoli (Tocchetto, 2000) (a sinistra) e sezione trasversale e sviluppo in quota di tana da un unico cunicolo (Tocchetto, 2000) (a destra).

Un'indagine sullo sviluppo delle tane di Nutria condotta in Provincia di Padova ha evidenziato come, su un totale di 12 tane esaminate, tutte erano dotate di un'unica entrata ma tre disponevano di gallerie ramificate e complesse (Fig. 76 a sinistra) mentre le altre nove erano composte da cunicoli lineari semplici (Fig. 76 a destra) (Tocchetto, 2000).

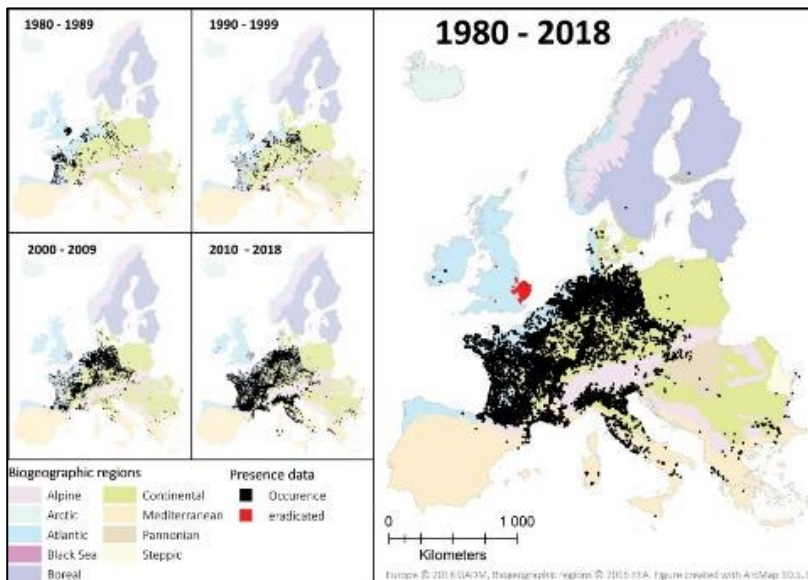


Figura 111. Incremento della distribuzione della Nutria in Europa dal 1980 al 2018 (Schertler et al., 2020)

Le tane presentano uno sviluppo ascendente con un dislivello tra entrata e punto più alto (camera) variabile tra 0, 6 e 1 m. Sulle arginature è comune vedere l'imboccatura di queste tane in vicinanza del piede arginale. Le tane possono essere poste a distanze relativamente ravvicinate tra loro e non mancano casi di cedimento delle cavedagne poste in testa agli argini a seguito del transito di mezzi agricoli.

Per quanto attiene alla normativa di riferimento va osservato che sino al 2014 i conflitti attribuibili alla Nutria sono stati gestiti mediante applicazione dell'art. 19 (controllo) della L. 157/92 in virtù del quale diverse Amministrazioni adottavano piani di controllo coordinati dal personale delle Polizie Provinciali.

Poi la L. 116/ 2014 ha escluso il roditore dall'appartenenza alla fauna selvatica (analogamente a ratti, topi, arvicole). La successiva L. 221/2015, in virtù del conclamato stato di specie esotica invasiva attribuito al roditore (regolamento CE n. 1143/2014), ha espressamente indicato la finalità eradicativa che deve contraddistinguere la gestione della Nutria o tutt'al più il controllo numerico delle popolazioni secondo il disposto dell'art. 19 della L. 157/92 riammettendo quindi la competenza delle regioni in materia.



Figura 112. Apertura e misurazione dei cunicoli della tana di cui all'immagine di sinistra della Figura 76 (Tocchetto, 2000).

Con delibera di Giunta Regionale n. 551/2016, Regione Emilia-Romagna si è dotata di un Piano di controllo della Nutria con valenza quinquennale (Deliberazione di Giunta Regionale n. 551/2016 successivamente modificato e integrato con Deliberazione 31 gennaio 2018 n. 111).

Caratterizzazione naturalistica

Rete Natura 2000 è un importante strumento della politica dell'Unione Europea per quanto riguarda la conservazione della biodiversità. Si tratta di una rete di siti di interesse comunitario (SIC) e di zone di protezione speciale (ZPS) istituita ai sensi della direttiva 92/43/CEE creata dall'Unione europea per la protezione e la conservazione degli habitat e delle specie, animali e vegetali, identificati come prioritari dagli Stati membri.

La funzione è quella di proteggere habitat, piante ed animali minacciati (aree naturali connotate da un vario grado d'importanza dal punto di vista naturalistico e conservazionistico) con ciò favorendo la mobilità e l'interscambio di specie animali e vegetali contrapponendosi quindi alla minaccia rappresentata dalle barriere infrastrutturali (strade, autostrade, linee ferroviarie, corsi d'acqua, elettrodotti, ecc.).

Particolare interesse rivestono le aree ad alta naturalità che collegano l'ambiente antropico e l'ambiente naturale con una funzione di corridoio ecologico.

Regione Emilia-Romagna tutela la biodiversità animale e vegetale attraverso il sistema regionale delle Aree protette e dei siti Rete Natura 2000 collegati tra loro da Aree di collegamento ecologico di livello regionale⁵.

Come si può vedere in Figura 113, elementi fondamentali favorenti la connettività ecologica a scala regionale sono i corsi d'acqua naturali, che svolgono un importante ruolo di collegamento nella direttrice sud nord e viceversa. In questo ambito il sistema fluviale del Panaro, comprensivo delle golene e delle arginature, assolve ad un'importante funzione di vettore ecologico favorendo la conservazione, l'incremento numerico e l'espansione spaziale di diverse entità vegetali ed animali.

⁵ <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/parchi-natura2000/sistema-regionale/rete-ecologica/rete-ecologica-regionale-1>

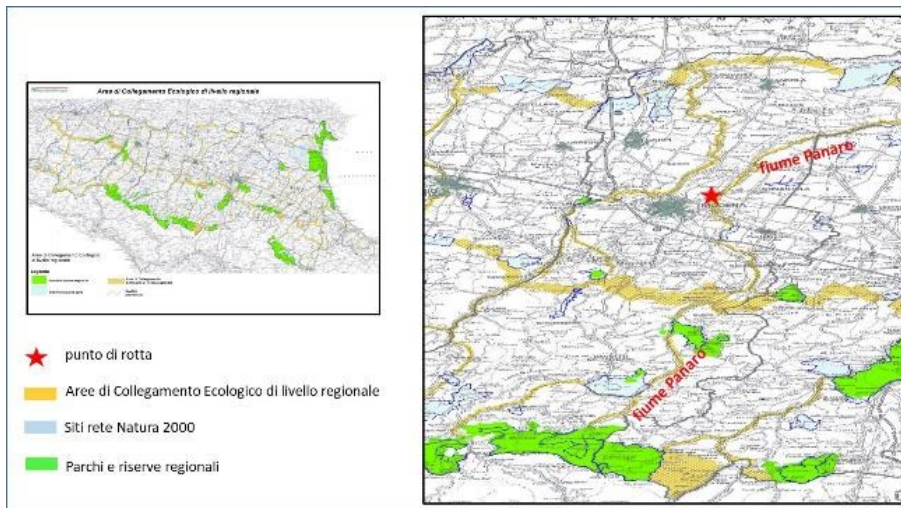


Figura 113. Aree di collegamento ecologico di livello regionale.

Oltre alla relativa tranquillità assicurata per ampi periodi stagionali, tra le peculiarità proprie di questo ambiente spicca la funzione di preziosa area di sosta e rifugio difficilmente rinvenibili nel circostante contesto pianiziale (pianura industrializzata). Ciò rende questi habitat particolarmente utili e ricercati da un ampio numero di taxa animali e vegetali.

La Figura 114 evidenzia il ruolo di catalizzatore ecologico svolto dal fiume Panaro; la distribuzione spaziale delle colonie di Istrice e Tasso recentemente monitorate nella pianura modenese segue infatti la direttrice dei fiumi Panaro e Secchia.

Elemento qualificante questo ambiente, sotto l'aspetto naturalistico, è la presenza delle casse di espansione dei fiumi Secchia e Panaro che, oltre ad assolvere ad un prezioso ruolo di regimazione idraulica, costituiscono altrettanti SIC-ZPS (Siti di Importanza Comunitaria e Zone di Protezione Speciale) contrassegnati rispettivamente con codice "IT4030011 Casse di espansione del Secchia" e "IT4040011 Casse di espansione del fiume Panaro"⁶.

Gli habitat e le specie di maggior rilevanza conservazionistica proprie del SIC-ZPS casse di espansione del fiume Panaro, posta alcuni chilometri a monte del punto di rotta del 6 dicembre scorso, interessano ambienti acquatici e/o ripariali con prevalenza di foreste a *Salix alba* e *Populus alba* anche con qualche ontano e di melme con chenopodiati e paspaleti e con acque mesomorfe con vegetazione bentica di *Chara* spp. oppure ad elevato contenuto trofico e vegetazione galleggiante, non senza canneti perimetrali. L'avifauna comprende almeno tredici specie prevalentemente presenti durante le fasi di dispersione post-riproduttiva, migrazione e svernamento che frequentano l'area per la sosta e l'alimentazione. Tra le specie nidificanti, oltre a Martin pescatore e Averla piccola, sono presenti Tarabuso e Bigia padovana. Quest'ultima specie è attualmente presente in Regione con poche decine di coppie.

Come per la generalità degli habitat fluviali anche sul Panaro la vegetazione si dispone secondo la successione tipica degli ambienti fluviali prevedendo, dal letto del fiume fino ai primi tratti di riva, prima gli arbusti del genere *Salix* e poi a seguire i pioppi e gli ontani. Ciò consente una buona esposizione alla luce delle diverse specie, una facile propagazione dei semi tramite il vento o le acque e una maggiore resistenza agli eventi di piena.

⁶ <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/parchi-natura2000/rete-natura-2000/siti/rete-natura-2000-in-emilia-romagna>

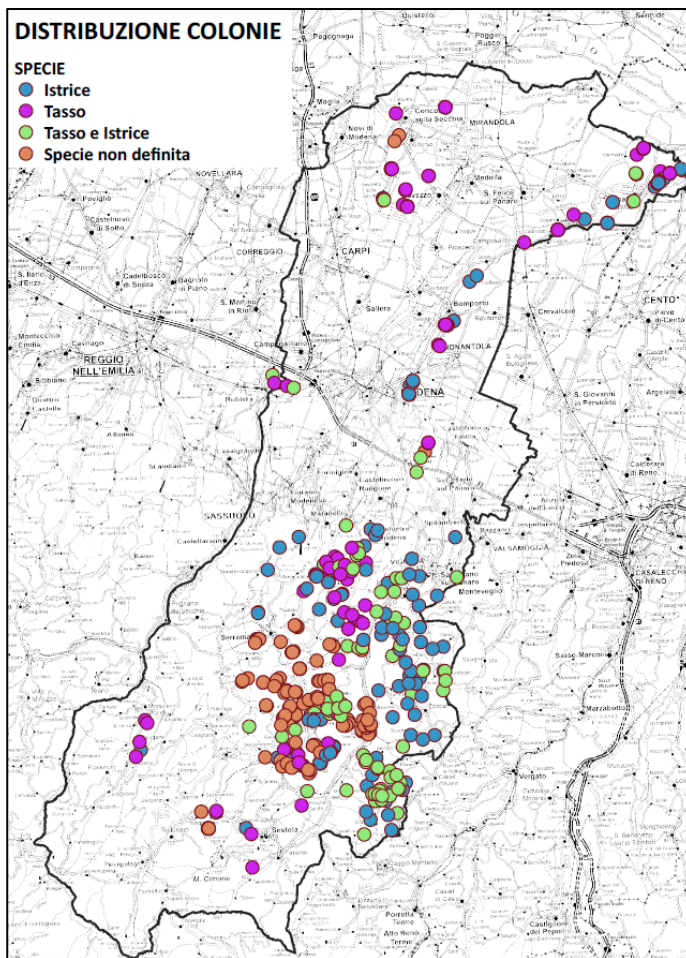


Figura 114. Distribuzione aggiornata delle colonie di Istrice e Tasso in Provincia di Modena (Fontana, 2019)

L'ordinaria gestione della vegetazione con finalità idrauliche lungo la tratta arginale del fiume Panaro interessata dalla rotta del 6 dicembre scorso, prevede l'effettuazione di tagli a raso. Secondo informazioni acquisite in loco gli sfalci di norma avvengono nei mesi tardo primaverili e ad ottobre con ricorrenza annuale. Nelle immagini riportate in figura 14 e 15, che si riferiscono all'argine in destra idrografica del fiume Panaro in prossimità del punto di rotta, si nota l'assetto vegetazionale dell'area a distanza di circa un mese dall'evento di rotta. Come si può vedere, la componente vegetale è il frutto di un taglio meccanico a raso della vegetazione condotto nell'autunno precedente sia sulla schiena dell'argine maestro, sia sul petto e parapetto arginale. La gola più prossima all'alveo invece non viene fatta oggetto di interventi di taglio e rimane ad un'evoluzione naturale.

Sotto il profilo di una corretta prevenzione faunistica, la routinaria pulizia meccanica dell'argine può indurre alcuni benefici effetti il primo dei quali è quello di assicurare una maggiore visibilità generale consentendo quindi di scorgere più facilmente fori o punti di discontinuità della superficie arginale. Va detto inoltre che la creazione di estese aperture, modificando sostanzialmente la conformazione fisica e vegetale del contesto, disincentiva alcune specie di mammiferi fossori dal costruire tane o li induce ad abbandonare quelle frequentate. Ciò in ragione sia di una conclamata preferenza per contesti ambientali caratterizzati da vegetazione che offre chiusura e riparo, sia per il disturbo arrecato dalle macchine operatrici. Si ha motivo di ritenere che, qualora opportunamente calendarizzata, la pulizia degli argini possa fornire un utile fattore disincentivante la presenza di animali fossori e la costruzione di tane.

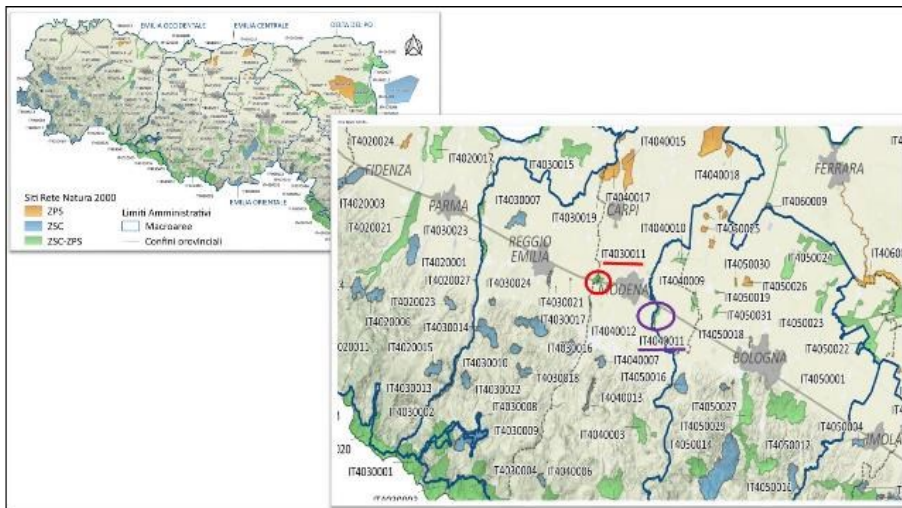


Figura 115. Siti Rete Natura 2000 della Regione Emilia-Romagna (Cassa di espansione fiume Panaro IT4040011)

Di contro, nei periodi immediatamente antecedenti gli sfalci e quando gli intervalli tra un taglio e l'altro siano più ampi, la vegetazione può originare consistenze vegetazionali più chiuse preferite da Istrice, Tasso e Volpe.

Interessante, a questo riguardo, è quanto evidenziato da Mori & Assandri (2019) i quali indicano come il taglio del bosco e lo sfalcio della vegetazione riparia circostante i siti di tana, forzi tassi ed istrici ad abbandonare i loro rifugi. Inoltre, valutando la probabilità di rioccupazione dei siti mediante foto trappolaggio per un arco temporale di 9 anni, gli Autori hanno visto che la probabilità di rioccupazione cresce con il trascorrere del tempo dalla cessazione del disturbo.



Figura 116. Conformazione dell'alveo fluviale del Panaro lato destro idrografico in prossimità del ponte di Navicello

Un pattern simile si è osservato anche per il Tasso per il quale però la probabilità di rioccupazione è negativamente correlata con la presenza dell'Istrice nella medesima tana, con ciò confermando il comportamento aggressivo del roditore. In generale l'Istrice è più sensibile del Tasso alle operazioni di rimozione della vegetazione. Un singolo evento è in grado di portare all'abbandono del sito di tana a cui segue una lenta ricolonizzazione con il crescere della vegetazione. Al contrario il Tasso è sensibile nei casi di operazioni di sfalcio reiterate nel tempo ma può colonizzare tane di Istrice abbandonate dopo un singolo disturbo.

Occorre peraltro tenere in considerazione le difficoltà insite nell'attuazione di un'efficace azione di prevenzione del rischio idraulico. Elementi quali l'estensione complessiva degli argini dell'ordine di alcune

centinaia di chilometri e il fenomeno naturale della crescita della vegetazione spontanea che rende difficoltoso scorgere eventuali perforazioni, non facilitano di certo l'opera.



Figura 117. Argine destro del Panaro in prossimità dell'intersezione con la linea AV

Inoltre, anche quando individuato un foro, possibile punto di accesso ad un cunicolo, non è dato conoscere lo sviluppo ipogeo della eventuale tana o, più spesso, del sistema di cunicoli che può estendersi per decine di metri in funzione, tra l'altro, del tempo impiegato per la sua costruzione e del contributo offerto da esemplari diversi e da specie diverse (è documentato il contributo mutualistico alla costruzione e condivisione delle tane da parte di Tasso, Istrice e Volpe).

Indagine di campo sullo stato attuale

Nel corso dei sopralluoghi condotti dalla Commissione nelle settimane immediatamente successive all'evento di rotta (29 dicembre, 6 gennaio, 13 gennaio, 20 gennaio) nell'area interessata dalla rotta e nelle aree arginate limitrofe (stanti da 29 a 42 in destra idrografica e stanti da 25 a 37 in sinistra idrografica), si è potuto rinvenire quanto segue:

È stata rinvenuta la presenza di tane e/o fori alimentari posti sulle arginature in destra e sinistra fiume nei pressi della zona di rotta. L'immagine di Figura 84 lato destro, rinvenuta ad un centinaio di metri a valle dello stante 31 sull'argine sinistro lato campagna, evidenzia un accumulo di terra antistante l'entrata e rappresenta con buona probabilità l'entrata di una tana operata da un mammifero fossorio di medie dimensioni.

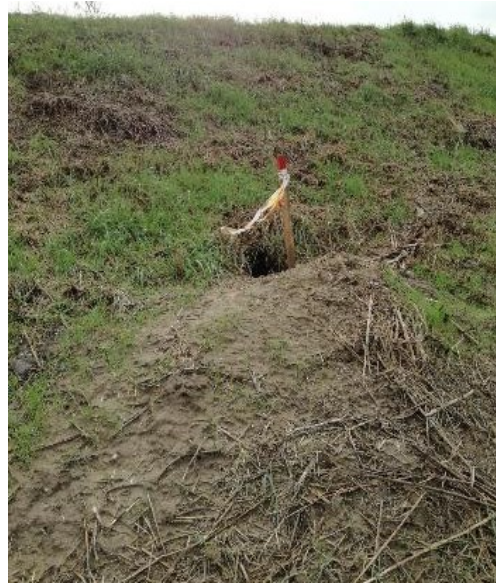


Figura 118. Perforazione posta sulla scarpata dell'argine destro in prossimità dello stante 31, lato campagna (a sinistra) e imboccatura di tana rinvenuta su scarpata argine sinistro, a circa 100 m a valle dello stante 31, lato campagna (a destra).

Tutte le tane qui illustrate sono state prontamente richiuse da AIPO nel volgere di alcuni giorni successivi al rinvenimento. In corrispondenza di due tane è stata rinvenuta la presenza di picchetti in legno probabilmente usati per marcarle durante operazioni di monitoraggio.



Figura 119. Imboccatura di foro posto sulla scarpata dell'argine sinistro a circa 20 m a monte dello stante 27 lato fiume.

La perforazione di cui alla Figura 119, evidenzia la presenza di una rete metallica, ricoperta da rivestimento plastificato, interrata a circa 20-30 cm dal piano campagna che impedisce l'accesso alla sottostante cavità. La perforazione prosegue al di sotto della rete. Potrebbe trattarsi di un sito precedentemente fatto oggetto di intervento di riparazione arginale con stesura di rete di protezione usata come dissuasore nei confronti dei fossori, poi fatto oggetto di un successivo tentativo di ricolonizzazione da parte degli animali.



Figura 120. Perforazione su scarpata dell'argine destro a 50 m a monte dello stante 35 lato campagna (a sinistra) e relativo dettaglio (a destra).

Da notare inoltre la perforazione illustrata nella Figura 87 che è posizionata alla base della scarpata dell'argine destro in prossimità del tratto soggetto a rotta.

Sulla tratta oggetto di rotta, nel dicembre scorso, risultano effettuate catture con successiva traslocazione di 3 esemplari di Istrice nel febbraio e novembre 2016. Si tratta di interventi condotti nell'ambito dei piani di controllo faunistico approvati e coordinati dall'Amministrazione.



Figura 121 Perforazione rinvenuta su scarpata dell'argine destro in prossimità dello stante 33 lato campagna.

A gennaio 2021, nel corso dei sopralluoghi, è stato avvistato un esemplare adulto di Nutria al piede del tratto arginale ripristinato, poco oltre la rotta lato campagna in prossimità di un canale di scolo secondario.



Figura 122. Perforazione rinvenuta sulla scarpata dell'argine destro in prossimità dello stante 33 lato campagna.

Testimonianze rese da cacciatori frequentatori del sito e da abitanti del luogo riportano di una frequentazione dell'area limitrofa al punto di rotta da parte di istrici, tassi e volpi. In minor misura da parte di nutrie.



Figura 123. Immagine della sezione arginale in corrispondenza della rotta sull'argine destro del Panaro lato a monte.

Vi sono inoltre, alcune immagini, scattate dai Vigili del fuoco che riprendono la sezione dell'argine in corso di rotta nelle prime ore del giorno 6 dicembre 2020. Tali immagini evidenziano diverse disomogeneità sul piano del taglio nell'ambito del materiale che, stando alle modalità generali di realizzazione dell'arginatura, dovrebbe al contrario presentarsi omogeneo.

Tali disomogeneità potrebbero rappresentare porzioni di gallerie ipogee scavate da animali fossori in senso longitudinale rispetto alla direzione dello sviluppo arginale, ed anche apicale (Figura 123). Per l'analisi di queste situazioni si rimanda ad altra parte della relazione.

Analisi storica sulla dinamica delle specie fossorie nel sito

L'analisi della serie storica di immagini oblique ad alta risoluzione in corrispondenza del tratto di rotta risalenti agli anni compresi tra il 2007 e il 2019, acquisite sul portale dell'Ufficio digitale sistema informativo territoriale del Comune di Modena (BlomWEB viewer), non ha evidenziato la pregressa presenza di tane.

Sulla base delle informazioni fornite da AIPo, in Tabella 17 si sintetizza il numero ed i periodi in cui si sono svolte le operazioni di occlusione delle tane sugli argini del fiume Panaro dal 2015 ad oggi. Il totale ammonta a quasi 400 interventi.

Tabella 17. Riparazione di tane sulle arginature del fiume Panaro

Periodo	Numero di tane riparate
novembre 2015	110
2016-2017	92
2017 fino a marzo 2018	165
aprile 2020	38
dal 21 novembre al 5 dicembre 2020	13

Nel periodo compreso tra la fine di marzo 2018 ed aprile 2020 pare esservi stata un'interruzione delle attività della durata di quasi due anni. Nelle Figure 90 e 91 si riportano i punti ove sono avvenute le riparazioni di tane.

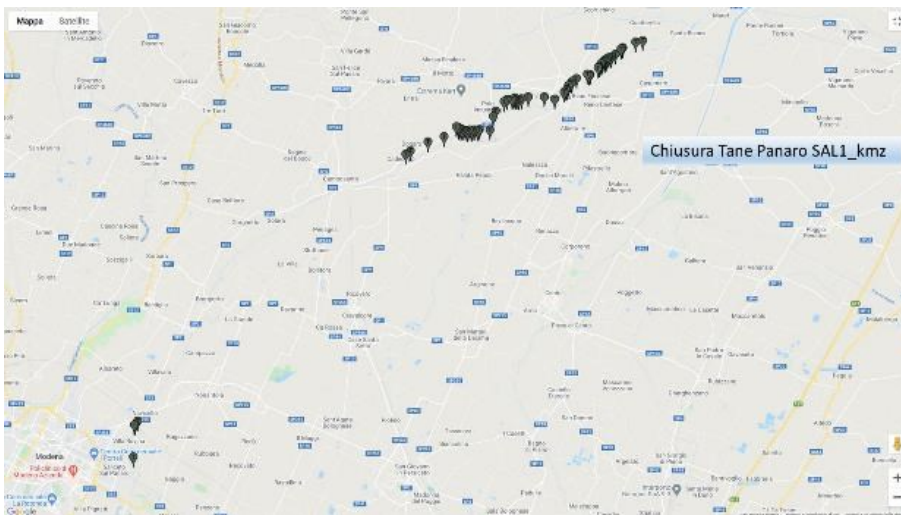


Figura 124 Localizzazione delle riparazioni delle tane (parte 1).

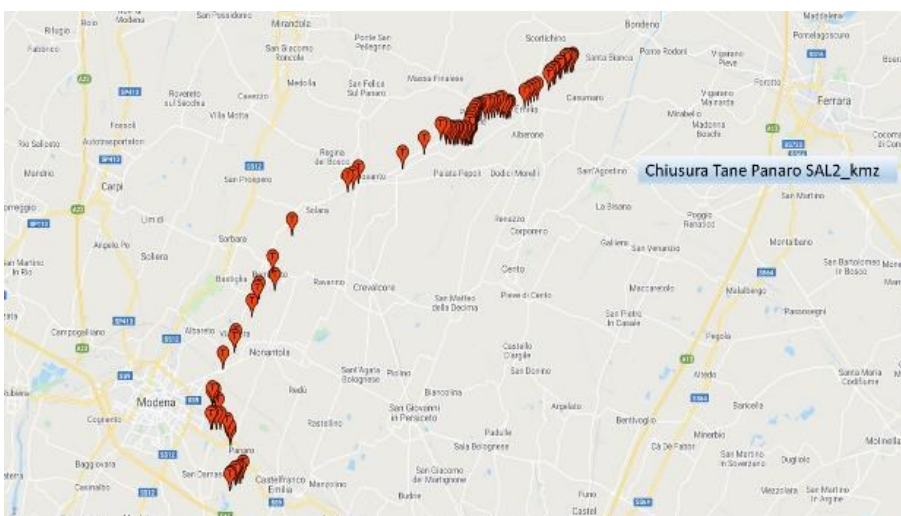


Figura 125. Localizzazione delle riparazioni delle tane (parte 2).

Meritevole di menzione è il fatto che in corrispondenza del tratto arginale che ha rotto il 6 dicembre 2020, risultano essere state riparate due tane nel 2016.

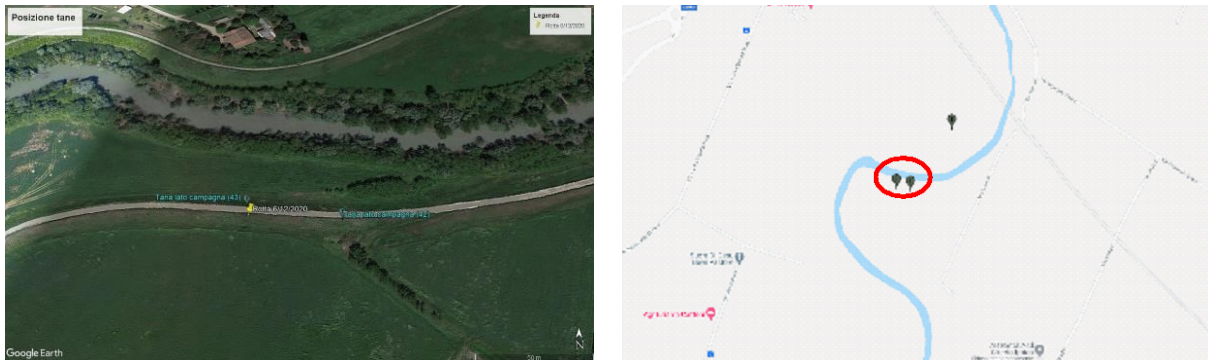


Figura 126. Tane riparate nel 2016 in prossimità della rotta del dicembre 2020 (a sinistra) e punti di riparazione delle tane nell'area interessata dalla rotta (a destra).

Gestione faunistica dell'area nel periodo 2016-2018

Pare anzitutto opportuno evidenziare come a seguito dell'emanazione del D.L. 74/2014, poi convertito con L. n. 93/14, è stato approvato il "Programma di messa in sicurezza idraulica" che stanziava fondi per il superamento dell'emergenza dei fiumi Secchia e Panaro attraverso la realizzazione di una serie di interventi. Il Programma è stato affidato alla gestione di un Commissario straordinario individuato nella figura del Presidente della Regione Emilia-Romagna. La regia per il superamento della situazione emergenziale è stata affidata ad uno Staff Tecnico con ordinanza n. 1 del 5/6/2014. Lo Staff ha il compito di formulare al Comitato istituzionale le proposte degli interventi necessari al superamento dei contesti emergenziali conseguenti agli eventi alluvionali.

Il Presidente della Provincia di Modena, con atto n. 63 del 20 aprile 2016, ha provveduto alla nomina di un Gruppo di Lavoro per la gestione ottimale e coordinata per le attività previste dai piani di limitazione numerica delle specie fossorie.

Per quanto riguarda in particolare le azioni di gestione faunistica, come in precedenza indicato, con gli atti del Presidente della Provincia di Modena n. 204 del 14 ottobre 2015 (Disposizione per la specie Tasso), n. 205 della medesima data (Disposizione per la specie Istrice) e n. 208 del 15 ottobre 2015 (Disposizione per la specie Volpe), sono state attivate una serie di azioni volte a contenere i danni arrecati da specie fossorie sulle arginature dei fiumi Secchia e Panaro e del canale Naviglio nell'arco temporale 2016-2018.

Per la gestione della Nutria si è invece fatto riferimento alla delibera di Giunta Regionale n. 551/2016 di Regione Emilia-Romagna con la quale si è dato attuazione ad un Piano di controllo della Nutria con valenza quinquennale a scala regionale successivamente modificato e integrato con deliberazione del 31 gennaio 2018 n. 111.

Dal "Resoconto delle attività del triennio 2016-2018 e proposta di rinnovo dei piani di controllo" allegato alla richiesta di Regione Emilia-Romagna di prot. 739296 del 12/12/2018 sono estratti e riportati in tabella 3 i risultati delle attività di cattura affidate a Studio Geco nel periodo compreso tra febbraio 2016 e maggio 2018 sulle arginature dei principali corsi d'acqua modenesi.

Tabella 18. Totali degli animali catturati suddivisi per specie. Evidenziati in grassetto gli interventi sui fossori.

numero di esemplari	
Cane	2
Fagiano	4

Faina	2
Gatto	15
Gazza	1
Istrice	20
Nutria	6
Riccio	2
Tasso	8
Volpe	1

Come previsto dai piani, gli esemplari di tasso (8) e di istrice (20) catturati sono stati traslocati in aree idonee del comprensorio collinare mentre le volpi e le nutrie sono state rimosse.

Per quanto riguarda Nutria e Volpe, al contingente riportato in tabella 3 va aggiunto quello delle tabelle 4 e 5. Va tuttavia precisato che quest'ultimo contingente afferisce alle attività di controllo di nutrie e volpe effettuate sull'interezza delle superfici dei comuni indicati nelle tabelle e non alle sole arginature pensili.

Tabella 19. Nutrie abbattute nell'ambito del piano di controllo nei comuni e negli anni indicati (estratto da: Resoconto attività del triennio 2016-2018 e proposta di rinnovo dei piani di controllo).

Nutria	Modena	Nonantola	Castelfranco Emilia
2016	344	50	129
2017	1016	173	578
2018	717	377	607

Tabella 20. Volpi abbattute nell'ambito del piano di controllo nei comuni e negli anni indicati (estratto da: Resoconto attività del triennio 2016-2018 e proposta di rinnovo dei piani di controllo).

Volpe	Modena	Nonantola	Castelfranco Emilia
2016	39	18	35
2017	50	27	39
2018	49	19	11

Come illustrato nelle precedenti figure, la localizzazione degli interventi di rimozione di istrici e tassi nel triennio considerato ha riguardato principalmente le arginature prossime a Finale Emilia interessando solo in parte i contesti arginali più meridionali.

Pur tuttavia nelle date 9 febbraio, 22 e 24 novembre 2016 sono state condotte tre catture di altrettanti esemplari di Istrice (2 Juv e 1 maschio adulto) in prossimità del tratto arginale poi interessato dalla rotta del 6 dicembre 2020 (Figura 25). Una cattura è avvenuta a ridosso dell'argine destro.

Il Resoconto delle attività del piano di controllo 2016-2018 dà conto anche di alcune criticità riscontrate durante l'attuazione del piano. Oltre a problematiche quali il furto e la distruzione di alcune gabbie di cattura e il calo di efficienza degli operatori delegati al trappolaggio, si riportano casi di rapida e inattesa ricolonizzazione da parte di atri fossori (con tempi compresi tra 24 ore ed un mese) dei sistemi di tana successivamente alla loro bonifica.



Figura 127. A sinistra, localizzazione delle catture di istrice e tasso nel periodo 2016-2018. La stella indica il punto di rotta (da Resoconto attività piano di controllo 2016-2018-Regione Emilia-Romagna). A destra, catture di istrice condotte nel 2016 nei pressi dell'area di rotta (ID 22, 59, 60).

Si indica inoltre di una “fortunata serie di catture accidentali” avvenute, in un caso, anche in assenza di esca alimentare. Questo evento viene messo in relazione con non trascurabili presenze numeriche di specie target che spiegherebbe l'aumento del successo di cattura pur in assenza di inviti (esca alimentari). Infine l'Indagine faunistica preliminare condotta da Studio Geco, sempre contenuta nel sopra menzionato Resoconto, conferma l'idoneità ambientale per i fossori di numerosi elementi del territorio circostante all'argine fluviale.

Questa serie di elementi prefigura una situazione di presenza diffusa di fossori (in particolare istrice e tassi) che pare non interessare esclusivamente le sponde arginali ma comprendere ambiti spaziali più estesi sebbene non meglio definiti spazialmente. Inoltre, le considerazioni conclusive del documento su “Risultati dell'indagine faunistica finalizzata all'ampliamento dell'area di attività del piano di limitazione numerica dei mammiferi ad abitudini fossorie” prodotto da Studio Geco in data 30 maggio 2018 ed allegato alla richiesta di parere acquisita da ISPRA con prot. 70557 del 12/12/2018, supportano questa ipotesi indicando che “sul territorio limitrofo all'area di applicazione del piano di limitazione numerica, sono distribuite numerose e ben strutturate colonie serbatoio di istrice e tasso dalle quali probabilmente originano gli esemplari che utilizzano le arginature e che ripristinano con estrema rapidità, sovente nelle posizioni originali, i sistemi di tana bonificati a seguito delle operazioni di risistemazione delle strutture arginali”.

Contestualmente alle azioni di gestione faunistica, l'Amministrazione ha attivato il monitoraggio dei corpi arginali alla ricerca di tane. In questo ambito, a seguito dell'alluvione del 19 gennaio 2014 che ha interessato il fiume Secchia in località S. Matteo ed in relazione ai conseguenti interventi strutturali urgenti individuati nell'Allegato 1 dell'Ordinanza commissariale n. 3 del 5 giugno 2014, è stata programmata un'attività di monitoraggio delle arginature dei fiumi Secchia e Panaro e delle rispettive casse di espansione e del Canale Naviglio per un totale di oltre 235 km di arginature suddivisi in base alle pertinenze amministrative (Tabella 6).

Nel periodo considerato sono stati completati 12 monitoraggi: 2 nell'anno 2014 (Agosto e Novembre), 3 nel 2015 (Gennaio, Estate e Novembre), 3 nel 2016 (Marzo, Estate e Dicembre), 3 nel 2017 (Aprile, Estate e Novembre) e 1 nel 2018 (Estate).

Tabella 21. Lunghezza in km dei tratti arginali monitorati dai Comuni per competenza territoriale (da Resoconto attività 2016-2018 Regione Emilia-Romagna).

Comune	cassa Secchia	Secchia	Cassa Panaro	Panaro	Naviglio	Totale
Bastiglia		3,2			8,0	11,2
Bomporto		2,2		14,4	4,0	20,6
Campogalliano	5,0	1,6				6,6
Camposanto				12,2		12,2
Carpi		10,4				10,4
Castelfranco				6,6		6,6

Cavezzo		8,4				8,4
Concordia s/S		15,2				15,2
Finale Emilia				31,0		31,0
Modena	2,3	28,0	2,0	9,6	9,2	51,1
Nonantola				9,0		9,0
Novi		8,4				8,4
Ravarino				10,8		10,8
San Cesario			5,5	1,0		6,5
San Possidonio		6,8				6,8
San Prospero		9,8				9,8
Soliera	6 10	10,6				10,6
TOTALE	7,3	104,6	7,5	94,6	21, 2	235,2

Come indicato nel sopra citato Resoconto regionale delle attività del triennio 2016-2018, i monitoraggi sono stati svolti percorrendo transetti pari alla lunghezza del tratto di competenza sia sulla sommità che alla base del corpo arginale, lato fiume e lato campagna (Figura 26). Le criticità individuate venivano segnalate in loco posizionando picchetti in legno con la testa colorata e registrate nelle schede di monitoraggio in dotazione. Per molte segnalazioni, inoltre, sono state indicate le coordinate geografiche per mezzo di ricevitori GPS.

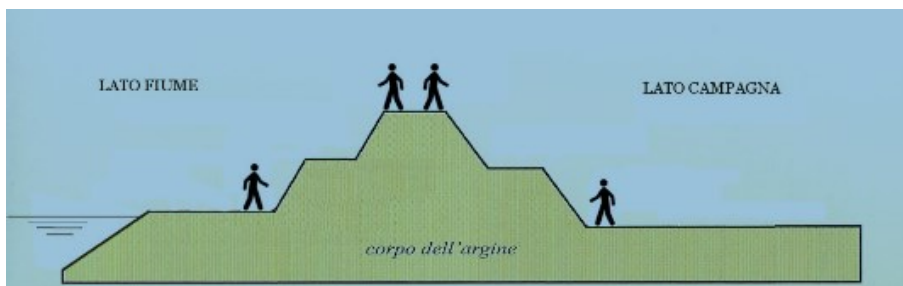


Figura 128. Modalità di conduzione dei monitoraggi finalizzati ad individuare criticità arginali.

Le segnalazioni raccolte hanno riguardato principalmente tre categorie di criticità: tane e scavi di animali sui corpi arginali, erosioni, frane e smottamenti della sezione arginale lato fiume e depositi di materiale vegetale/legnoso in alveo e nelle golene. Durante l'ultima ricognizione sono state raccolte oltre 90 segnalazioni, di cui 40 riguardano scavi e tane di animali fossori.

I rilievi hanno permesso di attivare ed implementare i successivi interventi di messa in sicurezza dei corpi arginali (chiusura tane, ripresa frane e smottamenti, rimozione depositi di materiale vegetale in golena e alveo).

Gestione faunistica dell'area nel periodo 2019-2021

Con nota di protocollo generale n. 739296 del 12/12/2018 Regione Emilia-Romagna ha avanzato richiesta al Ministero dell'Ambiente e ad ISPRA per la prosecuzione del piano di controllo di specie fossorie. Successivamente alla produzione di una nota integrativa regionale, ISPRA ha espresso parere favorevole al piano con prospezione triennale (2019-2021).

Il Piano di controllo di specie fossorie Istrice e Tasso per il territorio di Modena è stato approvato con deliberazione della Giunta della Regione Emilia-Romagna del 15 aprile 2019 n. 612. La deliberazione evoca la necessità di garantire continuità anche per il triennio 2019-21 alle azioni intraprese, nelle more della predisposizione di un "Piano strategico di limitazione delle specie fossorie ai fini della sicurezza idraulica" attualmente in fase di studio. Il piano di controllo dei fossori prevede una durata sino a tutto l'anno 2021 e l'estensione dell'area oggetto di intervento passa a 15.000 ettari con un incremento del 53% rispetto al piano precedente includendo, tra l'altro, i Siti Rete Natura 2000 afferenti alle due casse di espansione dei fiumi Secchia e Panaro.

Come indicato da ISPRA, è prevista la cattura e traslocazione di 50 unità totali di animali di cui 35 istrici e 15 tassi. Viene altresì previsto che eventuali ulteriori necessità saranno oggetto di una specifica richiesta ad ISPRA. Il piano prevede che venga proseguito il monitoraggio della distribuzione delle criticità arginali indicativamente con cadenza trimestrale (4 passaggi all'anno) poiché il monitoraggio della dinamica temporale del numero e localizzazione delle tane e delle gallerie costituisce il fondamentale riferimento cui parametrare la valutazione dell'efficacia dell'azione.

Si indica inoltre che "al fine di rimuovere la causa primaria del rischio di rotta delle arginature e di limitare la ricolonizzazione delle tane individuate durante le fasi di monitoraggio standardizzato, con la collaborazione degli Enti preposti alla messa in atto delle azioni necessarie a garantire la stabilità del rilevato arginale (Aipo), saranno chiuse tutte le tane e le gallerie rinvenute sulle arginature pensili. Nel caso di tane "attive" la chiusura avverrà al termine delle azioni finalizzate alla limitazione numerica e/o traslocazione dei soggetti appartenenti alle specie occupanti (intervento *ex-post*). L'intervento di chiusura delle perforazioni delle arginature costituisce parte essenziale ed improrogabile del Piano."

In tabella 7 sui riportano i dati forniti dalla Provincia di Modena in ordine alle catture sin qui effettuate nell'ambito del piano 2019-2021.

Tabella 22. Catture di dicembre 2020 e gennaio 2021.

Specie	Data cattura	Comune	Destinazione
Nutria	1/12/2020	Finale Emilia	-
Nutria	21/12/2020	cassa Panaro	-
Istrice	6/01/2021	cassa Panaro	Area Monte Lauro
Istrice	13/01/2021	cassa Panaro	CRAS Pettiroso
Istrice	15/01/2021	cassa Panaro	CRAS Pettiroso

Per quanto riguarda l'occlusione delle tane, queste hanno interessato unicamente il periodo compreso tra aprile e dicembre 2020 per un totale di 51 interventi.

In aggiunta ai 12 monitoraggi arginali riportati nel capitolo precedente, in tabella 8 si illustrano i numeri di segnalazioni effettuate dai gruppi comunali appositamente istituiti per i monitoraggi arginali dei fiumi Secchia, Panaro, canale Naviglio e relative casse di espansione volti alla ricerca di tane, di scavi di animali sul corpo arginale, erosioni, frane e smottamenti con i relativi periodi di acquisizione (fonte: Agenzia Regionale per la Sicurezza Territoriale e la Protezione Civile-Regione Emilia-Romagna).

Tabella 23. Monitoraggi tane nel periodo tra ottobre 2018 e novembre 2020.

Periodo		N. segnalazioni totali	N. segnalazioni su Panaro
2a fase 2018	ottobre-novembre-dicembre 2018	185	120
1° fase 2019	tra marzo e agosto 2019	71	33
2° fase 2019	tra novembre 2019 e febbraio 2020	42 (*)	33 (*)
1° fase 2020	tra ottobre e novembre 2020	221	129

(*) in questo periodo i monitoraggi non sono stati svolti in tutti i territori comunali.

In Tabella 9 si illustra invece il dettaglio dei monitoraggi condotti nel periodo di cui sopra, riferiti specificamente al tratto del fiume Panaro compreso tra lo stante 30 e il 40 in destra idraulica (fonte: Agenzia Regionale per la Sicurezza Territoriale e la Protezione Civile-Regione Emilia-Romagna).

Tabella 24. Dettaglio dei monitoraggi arginali tra lo stante 30 e 40 in destra idrografica Panaro

Periodo	ID	Tipologia	Sito	Coordinate
18/11/2018	2475	lato fiume deposito rifiuti	50 m a valle stante 40	10°59'33" 44°39'57"

18/11/2018	2476	lato campagna	sbancamento sotto al ponte navicello nuovo	60 m a valle stante 40	10°59'33" 44°39'57"
14/7/2019	2672	lato campagna	frana	80 m a valle stante 33	10°59'07" 44°39'29"
08/11/2020	2820		RIFIUTI: GUAINA E CAVI ELETTRICI	nei pressi stante 35	

Discussione

L'area interessata dalla rotta dell'argine destro del fiume Panaro del 6 dicembre 2020 in località Gaggio di Castelfranco Emilia in prossimità degli stanti 34-35 è stata, ed è tutt'ora, interessata da attiva frequentazione da parte di nuclei di mammiferi fossori di medie dimensioni riconducibili, nello specifico, a Istrice, Tasso, Volpe e Nutria.

Diversi fattori, in parte naturali (espansione delle specie, mutamenti climatici), in parte indotti dall'uomo (introduzione artificiale della Nutria in Italia) ed in parte dovuti al mutato regime di protezione accordato dal quadro normativo, hanno favorito la progressiva crescita numerica e dell'areale di distribuzione delle quattro specie sopra citate nel corso degli ultimi decenni nelle aree planiziali della Provincia di Modena.

Il corso del fiume Panaro, comprensivo delle sue pertinenze (golene e argini), consente alle specie fossorie di svolgere, in toto o in parte, le principali funzioni biologiche (alimentazione, rifugio, riproduzione). Inoltre, grazie anche al ridotto disturbo qui presente, assicura una funzione di connessione ecologica favorendo gli spostamenti espansivi di diverse specie selvatiche. È del tutto plausibile che gli animali frequentino queste aree con assiduità, come peraltro evidenziato da recenti indagini più sopra documentate. Resta invece da appurare quale sia, per alcune delle specie in parola, la funzione ecologica svolta dalle arginature fuori terra sotto il profilo della preferenza ambientale e di come questa funzione possa variare al modificarsi delle condizioni gestionali (sfalci, disturbo, ecc.).

Elementi oggettivi raccolti, evidenze riportate da addetti ai lavori nonché testimonianze fornite da residenti e frequentatori dell'area, indicano che la frequentazione non è limitata solamente alle strette pertinenze arginali ma interessa un buffer circostante le arginature di estensione non precisata. Inoltre, i sopralluoghi condotti dalla Commissione hanno consentito di verificare la presenza di perforazioni varie sulle scarpate arginali prossime al punto di rotta anche nelle settimane successive alla rotta, poi prontamente richiuse.

Occorre peraltro evidenziare le difficoltà insite nell'attuazione di un'efficace azione di prevenzione del rischio idraulico cagionato dalla presenza di tane sulle arginature pensili dei fiumi modenesi. Elementi quali l'estensione complessiva degli argini nell'ordine di alcune centinaia di chilometri e il fenomeno naturale della crescita della vegetazione spontanea che rende difficoltoso scorgere eventuali perforazioni, non facilitano di certo l'opera. Inoltre, anche quando individuato un foro, possibile punto di accesso ad un cunicolo, non è dato conoscere lo sviluppo ipogeo della eventuale tana o, più spesso, del sistema di cunicoli che può estendersi per decine di metri in funzione, tra l'altro, del tempo impiegato per la sua costruzione e del contributo offerto da esemplari diversi e da specie diverse (è documentato il contributo mutualistico alla costruzione e condivisione delle tane da parte di Tasso, Istrice e Volpe).

La gestione faunistica ed arginale dell'area, attuata dalle Autorità preposte a seguito del precedente episodio di rotta arginale del fiume Secchia del gennaio 2014, è apparsa adeguata e, per diversi aspetti, innovativa in particolare nel corso dei primi anni di attività fino al 2018. In questo periodo l'Amministrazione ha ideato, messo a punto ed attuato un articolato sistema di prevenzione basato sullo sfalcio periodico della vegetazione arginale, il monitoraggio delle tane, la cattura degli animali e la chiusura finale delle perforazioni. Sotto diversi punti di vista questo modello rappresenta un progetto innovativo a scala regionale e nazionale.

Negli anni successivi al 2018 si osserva però un calo nell'intensità delle operazioni relativamente sia al numero di tane richiuse, sia al numero di catture effettuate. Non è dato sapere se ciò sia dipeso da una fase di calo delle problematiche in parola, peraltro non riscontrato, o da altri fattori. In particolare in tema di catture faunistiche si registra una riduzione confrontando il numero di istrice e tassi catturati nel triennio 2016 -2018 con il triennio successivo (2019-2021). Nel biennio (2019-2020) sono stati catturati solo 3 individui, dei 50 pianificati per il triennio, concentrati a dicembre 2020 e gennaio 2021 (tabella 7) a fronte dei 28 rimossi nel triennio precedente. Detto calo si sovrappone temporalmente al calo del numero di tane richiuse.

La gestione delle tane richiede un accurato lavoro di ispezione e bonifica che, se svolto senza adeguate accortezze e congrua ricorrenza, può lasciare pericolose discontinuità nel corpo arginale. Inoltre l'azione di chiusura delle tane va preceduta/accompagnata dalla sistematica rimozione dei fossori.

Le indagini condotte da questa Commissione non consentono di indicare con chiara evidenza e al di là di ogni ragionevole dubbio, che i mammiferi fossori siano stati causa o concausa dell'evento di rotta di cui si tratta. Pur tuttavia corre l'obbligo di richiamare l'attenzione sulla possibile relazione che accomuna alcuni elementi fattuali, sopra illustrati, **acquisiti sul tratto oggetto di rotta**, di seguito elencati:

- nel febbraio e novembre 2016 il tratto è stato interessato dalla cattura di alcuni esemplari di Istrice.
- In prossimità del punto dove sono avvenute le catture, o a poca distanza da questo, AIPO nel corso del 2016 ha provveduto alla chiusura di tane.
- Immagini relative alla sezione dell'argine sul fronte di rotta acquisite in corso di evento, evidenziano la presenza di diversi elementi di discontinuità arginale che possono essere ricondotti a cunicoli scavati da animali fossori. Le immagini sono riprese in condizioni di luce non perfette e potrebbero indicare anche altre possibili cause; resta il fatto che le fattispecie illustrate restano comunque compatibili con attività di mammiferi fossori quali quelli osservati nel sito da parte di molteplici fonti.

La prossimità spaziale dei tre elementi sopra descritti (cattura di esemplari, chiusura di tane, riscontro sulla compatibilità delle discontinuità visibili sull'argine con la presenza di cunicoli scavati da fossori) induce ad ipotizzare l'esistenza di un nesso che lega i fattori sopra elencati.

In tale ottica, elementi quali la chiusura delle tane incompleta o condotta in forma non adeguata, piuttosto che la rioccupazione dei cunicoli bonificati da parte dei fossori, possono spiegare la presenza di discontinuità sul fronte di rotta assimilabili a cunicoli scavati da fossori che potrebbero aver facilitato il verificarsi dell'evento di rotta.

A ciò si aggiunge il fatto che, durante il sopralluogo del 29 dicembre 2020 svolto presso il sito di rotta, sopralluogo al quale hanno partecipato anche rappresentanti di AIPO e di Regione Emilia-Romagna, la Commissione ha potuto riscontrare, sul corpo del rilevato, la presenza di alcune perforazioni dovute ad attività fossorie; tali perforazioni erano ubicate presso il piede arginale, entro una decina di metri dalle sezioni immediatamente a monte e a valle della riparazione effettuata a seguito della breccia. Altre perforazioni, in alcuni casi attribuibili chiaramente a fossori, sono state riscontrate nel corso di successivi sopralluoghi sulle scarpate arginali.

In generale l'insieme delle operazioni di gestione faunistica condotte nel corso dell'ultima decade, non pare abbia determinato una riduzione significativa della presenza di animali fossori i quali restano presenti sulle arginature ed aree limitrofe continuando ad operare aperture sulle sponde arginate nonostante la traslocazione e rimozione di alcune decine di soggetti. Né è dato sapere se, e in che misura, tali azioni abbiano ridotto le densità faunistiche visto che la dinamica di consistenza delle popolazioni non risulta essere stata fatta oggetto di monitoraggi standardizzati ad hoc.

La riapertura di tane dopo la loro bonifica, operata da parte di altri esemplari, stante la traslocazione di quelli catturati, fa supporre che, almeno in parte, i soggetti traslocati o rimossi vengano sostituiti da altri residenti in aree limitrofe o transienti. Si noti che il fenomeno della rioccupazione da parte di conspecifici di nicchie ecologiche liberate artificialmente a seguito del controllo numerico di popolazioni selvatiche, è noto a chi si occupa di gestione faunistica costituendo una risposta naturale ad interventi riduttivi esterni volta a recuperare le consistenze numeriche antecedenti. Questo fenomeno può presentare tempistiche di recupero anche rapide e caratterizza in particolare gli areali ecologicamente contraddistinti da estesa continuità distributiva ed ampia densità di popolazione.

La vigente gestione degli istrice e tassi catturati sui fiumi Panaro e Secchia prevede la traslocazione in habitat alternativi (aree della collina modenese). Ad oggi sono stati spostati una trentina di esemplari. Si ha motivo di ritenere che il prosieguo di questa attività vada valutato con attenzione in considerazione del potenziale rischio insito in tale azione. Con approccio pragmatico occorre valutare l'opportunità o meno di proseguire il trasferimento di esemplari che, nei siti di neo immissione, possono riproporre problemi analoghi a quelli evidenziati nei territori di provenienza e che, riproducendosi, possono verosimilmente incrementare le consistenze nelle aree d'immissione ed accelerare l'espansione dei nuclei in ambiti territoriali più estesi. Si rammenta, a tal proposito, che la popolazione italiana di Istrice sta conoscendo, da alcuni decenni, un'espansione del proprio areale distributivo. Tale areale, nella sua estremità più settentrionale, ha oltrepassato il crinale appenninico e sta occupando la pianura Padana utilizzando preferenzialmente i corridoi ecologici costituiti dai corsi d'acqua che solcano questa direttrice. Qualora l'Amministrazione ritenga di confermare la via del trasferimento, si reputa opportuno appurare preventivamente la presenza di una serie di condizioni ritenute indispensabili alla traslocazione. Anzitutto i siti di neo insediamento vanno individuati ad una distanza adeguata dai corpi arginali di origine tale da non permettere il ritorno degli esemplari al sito di provenienza. Inoltre i siti devono risultare idonei sotto il profilo ambientale e non presentare situazioni di potenziale rischio (presenza di arginature di corsi d'acqua e/o coltivazioni ortive appetite) in un intorno di adeguate dimensioni dal punto di liberazione. Dopo di che si suggerisce di accertare, mediante la conduzione di indagini puntuali, le interazioni sociali intra ed inter specifiche, oltre che ecologiche, che i soggetti istaurano nei nuovi ambienti.

Sotto il profilo normativo, il fatto che Istrice e Tasso siano specie oggetto di tutela a scala comunitaria e nazionale non pregiudica la possibilità del ricorso ad azioni di contenimento numerico anche diretto come previsto dal regime di deroga di cui all'art. 16 della direttiva comunitaria 92/43/CEE e dall'art. 19 della L. n. 157/92. La norma vigente attribuisce all'Amministrazione regionale margini d'intervento relativamente estesi che le consentono di modellare i contenuti operativi dei piani di controllo dei fossori per quanto riguarda il numero di capi da rimuovere, le modalità d'intervento, i tempi necessari e l'eventuale traslocazione dei capi catturati. A tale riguardo si desidera evidenziare che tra le finalità indicate all'art. 1 lettera c) dell'art 16 (deroghe) della direttiva comunitaria vi è "l'interesse della sanità e della sicurezza pubblica e per altri motivi imperativi di rilevante interesse pubblico". Inoltre, le sole condizioni poste dalla direttiva per l'adozione di deroghe al regime di protezione sono "che non esista altra soluzione valida e che la deroga non pregiudichi il mantenimento, in uno stato di conservazione soddisfacente, le popolazioni della specie interessata nella sua area di ripartizione naturale". Analogo approccio può riguardare le altre specie (Volpe e Nutria) per le quali il problema pare riguardare anche l'allocazione dei piani non specificamente prevista sulle arginature.

Parte quinta: i meccanismi di collasso

Descrizione dei potenziali meccanismi di collasso arginale

Generalità

Un collasso di un argine è raggiunto per degrado e danneggiamento nel tempo di uno o più elementi che formano il sistema arginale. Danneggiamento e degrado sono attivati da azioni di vario tipo, quali l'azione ciclica del flusso idraulico in alveo e subalveo, degli apporti meteorici, l'effetto della vegetazione, l'azione umana e degli animali. Tra i sintomi principali del degrado ci sono fessurazioni, formazione di cavità, scarpate arginali più acclivi, scoscendimenti locali e cambiamenti della vegetazione.

L'evoluzione temporale da soglia di deterioramento a soglia di collasso può essere lenta oppure può essere rapidissima, senza passaggi intermedi: il collasso per apertura di una breccia arginale durante un evento di piena è rapido, anche se può essere accompagnato da una fase di innesco molto lenta, senza particolari e visibili segni premonitori.

In generale, il collasso arginale è attivato da un'azione precisa, quale un livello dell'acqua della piena eccessivo o una rapida variazione dello stesso o la forza dell'acqua indotta da elevati gradienti idraulici nel corpo arginale o nel terreno di fondazione. Queste azioni possono agire su un singolo elemento o su più elementi arginali, anche in forma ripetuta fino alla rottura totale.

Con riferimento al caso della rotta del Panaro, le principali tipologie di instabilità che comportano il collasso arginale e la formazione di una breccia sono (Figura 129) (Simonini et al., 2014):

- Instabilità globale della scarpata arginale esterna;
- Sollevamento e instabilità globale del complesso argine-terreno di fondazione;
- Fenomeni erosivi come erosione di piede, erosione interna al corpo arginale o in fondazione ed erosione concentrata.

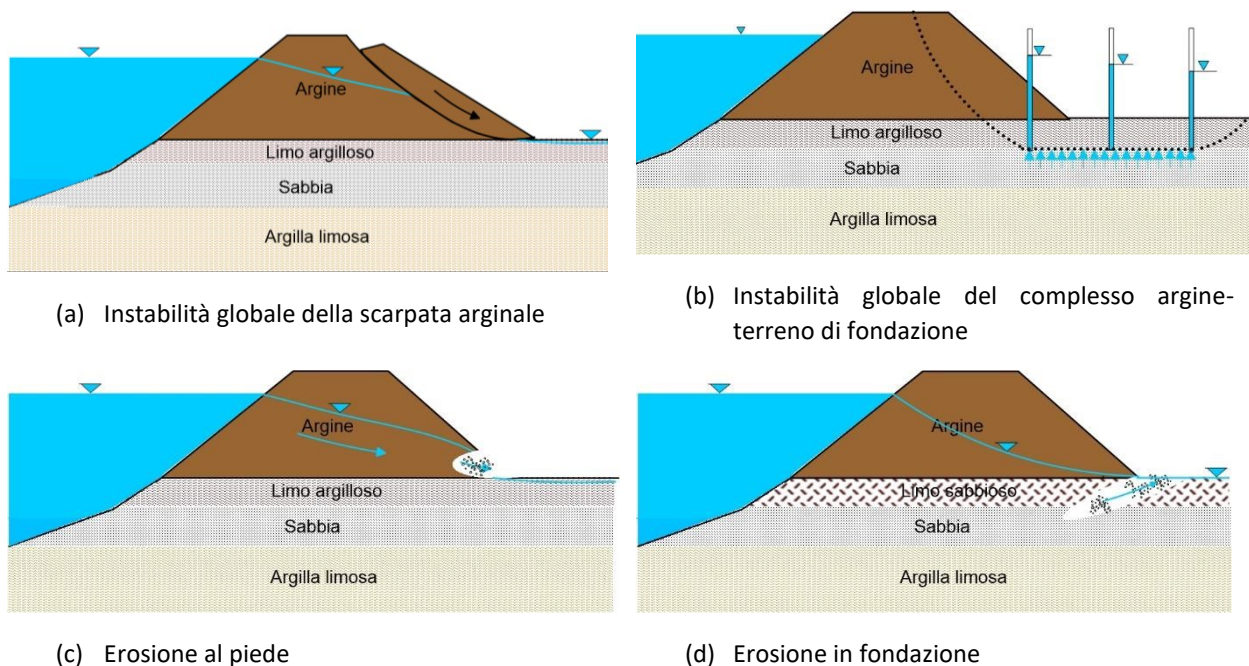


Figura 129 Meccanismi di instabilità arginale

Instabilità globale della scarpata arginale

L'instabilità della scarpata arginale può essere causata da numerosi fattori come il regime di filtrazione e delle pressioni dell'acqua, effetti dell'erosione, peggioramento nel tempo delle caratteristiche meccaniche dei materiali, attività dell'uomo e degli animali, effetto della vegetazione, sollecitazioni sismiche, ma, tra essi, uno dei più rilevanti è quello legato agli effetti di un regime di filtrazione transitorio sulle scarpate.

L'instabilità della scarpata lato campagna dipende fortemente dalle caratteristiche geometriche dell'argine (pendenza delle scarpate) e meccaniche del terreno con il quale è realizzato. Queste ultime possono essere significativamente deteriorate per effetto del degrado dovuto alle variazioni stagionali delle condizioni meteorologiche. Infatti, la scarpata lato campagna rimane per la maggior parte dell'anno in condizioni di parziale saturazione, per cui i cicli di imbibizione e di essiccazione, legati a quelli stagionali, possono aver degradato le caratteristiche meccaniche del terreno e creato uno stato fessurativo dell'argine stesso.

A tale degrado può contribuire anche la presenza di vegetazione, specialmente con radici profonde. Le fessurazioni o gli eventuali canali interni localizzati in presenza di apparati radicali possono poi essere sede di moti di filtrazione e di conseguenti rilevanti regimi di pressione neutrale, i quali, assieme al rammollimento del terreno, possono progressivamente portare al collasso la scarpata arginale. Rimaneggiamenti del terreno che forma la scarpata possono contribuire al peggioramento delle condizioni di stabilità.

La verifica di stato limite ultimo si può eseguire, in forma disaccoppiata, con i metodi all'equilibrio limite dopo aver determinato la distribuzione delle pressioni interstiziali nell'argine e nel terreno di fondazione con un'analisi di filtrazione, oppure in forma accoppiata, impiegando un approccio agli elementi finiti.

Sollevamento e instabilità globale del complesso argine-terreno di fondazione

La rottura per sollevamento al piede può avere luogo quando uno strato superficiale poco permeabile, caratterizzato anche da modesta resistenza meccanica, si trova sopra uno strato di terreno granulare interessato, in condizioni di piena, da un fenomeno di filtrazione diretto dall'alveo verso campagna. In tale caso, la pressione nello strato granulare può essere maggiore del valore idrostatico relativo al livello della falda freatica dal lato campagna: questa pressione riduce lo stato tensionale efficace e, conseguentemente, la resistenza al taglio disponibile. Se la resistenza all'interfaccia tra strato poco permeabile e strato permeabile profondo si riduce a valori molto bassi o quasi nulli, la scarpata arginale perde il sostegno laterale fornito dal terreno a campagna e può scivolare verso valle.

La verifica di stato limite ultimo si può eseguire, in forma disaccoppiata, con i metodi all'equilibrio limite dopo aver determinato la distribuzione delle pressioni interstiziali nell'argine e nel terreno di fondazione con un'analisi di filtrazione, oppure in forma accoppiata, impiegando un approccio agli elementi finiti.

Fenomeni erosivi

Per erosione interna s'intende l'asportazione e l'allontanamento delle particelle fini del terreno nel corpo arginale o negli strati di fondazione per effetto delle forze idrodinamiche di filtrazione. La migrazione delle particelle genera dei canali (*pipes*) dentro il corpo arginale o nel terreno di fondazione, che possono, se non adeguatamente contrastate, creare le condizioni per la rotta arginale, qualora la filtrazione proceda in forma incontrollata e tale da formare un collegamento diretto tra l'alveo e il paramento esterno o il piano campagna. Se la filtrazione è accompagnata da asportazione di terreno, il terreno diventa progressivamente più permeabile e, conseguentemente, il flusso aumenta assieme alla forza erosiva dell'acqua. L'insorgere di tale fenomeno è comunque legato alla possibilità che la linea di saturazione raggiunga il piede esterno dell'argine o il terreno di fondazione fino alla superficie.

Questo fenomeno è difficile da prevedere perché il gradiente idraulico locale, che genera la forza di filtrazione, è fortemente condizionato dalla eterogeneità del materiale (lenti di materiale più permeabile) e dalla presenza di altri elementi quali:

1. fessure di trazione conseguenti ad assestamenti del corpo arginale;
2. tane di animali, anche relitte, scavate nel corpo arginale o nel terreno di fondazione;
3. vegetazione, soprattutto in decomposizione, quando le radici penetrano in profondità nella scarpata esterna dell'argine;
4. strutture antropiche parzialmente o totalmente intercettanti la sezione arginale.

La presenza degli elementi 2-3 è molto probabile nel sito in esame.

L'erosione interna può presentarsi in differenti modi:

- a. *Erosione retrogressiva*: l'innescò ha luogo al punto di uscita del flusso e l'asportazione delle particelle avviene in forma retrogressiva formando una cavità che si allarga fino a provocare il collasso arginale;
- b. *Erosione concentrata*: ha luogo lungo vie preferenziali preesistenti, quali possono essere fessurazioni dovute al degrado del materiale o a radici decomposte della vegetazione, o tane di animali, quando la forza di trascinamento dell'acqua eccede la soglia critica;
- c. *Erosione di contatto*: si verifica al contatto tra un terreno a grana fine e uno a grana grossa quando si ha il dilavamento del terreno fine a seguito delle forze di filtrazione dirette parallelamente alla stratificazione;
- d. *Erosione per migrazione*: identifica la migrazione delle particelle fini entro la matrice grossolana nei terreni intrinsecamente instabili.

I terreni del sito della rotta non sono tali da causare fenomeni erosivi del tipo c) e d), che non sono quindi considerati.

L'evoluzione dei meccanismi a) e b) è controllata dalla velocità di asportazione che può essere stimata mediante un'equazione empirica del tipo (Parteniades, 1965):

$$E_{rf} = k_{er}(\tau_b - \tau_c)^a$$

dove E_{rf} è la velocità di erosione unitaria, τ_b è la tensione tangenziale esercitata dalla corrente sul contorno, a è un esponente empirico, generalmente assunto pari a 1.0, mentre k_{er} e τ_c sono, rispettivamente, il coefficiente di erodibilità e lo sforzo tangenziale critico, entrambi parametri dipendenti dalla natura del terreno.

La Tabella 25 (Bonelli et al., 2007) riassume i valori dello sforzo tangenziale critico e del coefficiente di erodibilità dei terreni in funzione della loro natura. È possibile notare come i valori minori dello sforzo critico e la massima erodibilità siano da mettere in relazione con le miscele di limo e sabbia, come quelli caratteristici degli argini del Panaro. La presenza di una componente argillosa limita fortemente il livello di erodibilità, ma nella zona della breccia essa non è presente.

La verifica di questo tipo di stato limite ultimo è assai complessa perché dipende da molti fattori di difficile quantificazione. Nel caso del sifonamento la procedura è regolata dal quadro normativo nazionale, mentre per gli altri fenomeni la procedura non è consolidata. La base di partenza è lo studio dei regimi di filtrazione e conseguenti pressioni dell'acqua per mezzo di un modello numerico di filtrazione, al quale applicare le considerazioni specifiche relative ai vari tipi di fenomeni erosivi potenzialmente occorrenti.

Tabella 25 valori tipici di τ_c e k_{er} (Bonelli et al. 2007)

Soil		%Gravel	%Sand	%Fines	%<2 μ m	τ_c (Pa)	k_{er} (10^{-4} s/m)
Bradys	high plasticity sandy clay	1	24	75	48	50 - 76	3 - 5
Fattorini	medium plasticity sandy clay	3	22	75	14	6	8
Hume	low plasticity sandy clay	0	19	81	51	66 - 92	0.3 - 3
Jindabyne	clayey sand	0	66	34	15	6 - 72	3 - 9
Lyell	silty sand	1	70	29	13	8	140
Matahina	low plasticity clay	7	43	50	25	128	1
Pukaki	silty sand	10	48	42	13	13	10
Shellharbour	high plasticity clay	1	11	88	77	99 - 106	0.5 - 3
Waranga	low plasticity clay	0	21	79	54	106	1

Osservazioni generali sulle caratteristiche dell'argine nella zona della rotta

Sulla base delle indagini svolte è possibile riassumere alcune caratteristiche specifiche dell'argine nella zona della rotta:

1. la geometria della scarpata lato campagna, è caratterizzata dalla presenza di una sezione centrale particolarmente acclive, con pendenza fino a 50°, molto superiore all'angolo d'attrito del terreno. Le sezioni laterali sono anch'esse piuttosto ripide, con pendenze di 34° e 36°, tutte superiori all'angolo di attrito del terreno. La stabilità di queste scarpate è quindi resa possibile solamente dalla presenza della componente della resistenza dovuta alla coesione efficace;
2. al piede dell'argine è presente un'area di ristagno locale, risultato combinato della natura localmente più argillosa dei sedimenti superficiali e di una zona di compluvio proprio nella zona della rotta, che potrebbe favorire la saturazione del piede dell'argine;
3. all'interno del ventaglio di rotta si sono rinvenuti blocchi di terreno compatto, blocchi di terreno rivestiti su un lato da elementi litici della recente pavimentazione stradale, rizomi di canna (*Arundo Donax*), mattoni, pezzi di laterizi ed elementi di malta a base carbonatica; che dimostrano la presenza di importanti eterogeneità i cui effetti sulla risposta dell'argine sono difficilmente quantificabili;
4. Il terreno che forma il rilevato arginale nella zona della rotta è costituito da una miscela di sabbia e limo, senza la presenza di frazione argillosa. L'assenza della frazione argillosa con comportamento plastico conferisce al terreno arginale un comportamento di tipo fragile, tendente a frantumarsi in blocchi e rapido nell'evoluzione verso la condizione di rottura;
5. la composizione granulometrica rende questo tipo di terreno, facilmente erodibile da una corrente fluida che ne lambisca la superficie; di ciò vi è testimonianza nei due recentissimi fenomeni in instabilità idraulica dei terreni del 2014 e del 2019, occorsi a brevissima distanza dal sito della rotta;
6. la resistenza del terreno, che è somma del contributo dell'attrito e della coesione efficace, è caratterizzata da una notevole variabilità della coesione efficace (che consente la stabilità delle scarpate acclivi) in relazione alle condizioni locali di parziale saturazione, variabile significativamente nei cicli stagionali, e di cementazione, legata alla presenza di una componente carbonatica dei sedimenti;
7. La accertata presenza in passato di tane, riparate nel 2016, non esclude la presenza di tane relitte all'interno del corpo arginale o di piccole tane attive non riscontrabili con le immagini satellitari, che hanno sicuramente rappresentato elementi preferenziali per i flussi idraulici e indebolimenti del comportamento strutturale complessivo dell'argine.

Sulla base della dinamica della forzante idrologica descritta nella Parte terza di questa relazione, dell'evoluzione temporale rapidissima della rotta e degli elementi elencati ai punti da 1 a 7 si sono esaminati i potenziali meccanismi di collasso arginale.

Modellazione dei meccanismi di collasso

In questo paragrafo si presentano le analisi dei singoli meccanismi di collasso illustrati in precedenza ed in particolare:

1. Instabilità globale della scarpata a lato campagna;
2. Sollevamento e instabilità globale del complesso argine-terreno di fondazione;
3. Erosione al piede dell'argine;
4. Erosione retrogressiva e sifonamento nel terreno di fondazione (*piping*);
5. Erosione concentrata.

Le verifiche vengono eseguite considerando il modello geotecnico descritto nella parte terza della presente relazione con riferimento alla geometria dell'argine in corrispondenza della sezione centrale della rotta ricavata dal rilievo del 2016 così come fornito dai topografi di AIPo.

L'analisi di filtrazione è condotta attraverso il software agli elementi finiti SEEP/W (GEO-STUDIO International Ltd 2015). L'equilibrio limite è valutato con il software SLOPE/W (GEO-STUDIO International Ltd 2015). I parametri del terreno del rilevato arginale e dei terreni di fondazione sono riportati nella Tabella 26.

Per le unità 1, 3 e 5 si è considerato il comportamento in condizioni di parziale saturazione del materiale, assumendo, in assenza di determinazioni sperimentali (ancora in corso alla data della presente relazione) le curve di ritenzione e di conducibilità idraulica riportate in Figura 131.

Il modello di filtrazione applica l'idrogramma di piena rappresentato in Figura 132a e l'infiltrazione data dalle precipitazioni meteoriche rappresentate in Figura 132b. Una pressione nulla è applicata alla zona immediatamente a valle dell'argine per tener conto che tale area è un punto di ristagno dell'acqua a causa della presenza del fosso di cui discusso in precedenza. La scarpata è invece una potenziale superficie di efflusso libero. La falda viene assunta inizialmente ad una profondità di 1 m dalla superficie del terreno nella zona a campagna e raccordata linearmente con il livello di magra del fiume dal lato dell'alveo.

Tabella 26 Parametri geotecnici del modello numerico

Unità	Descrizione	γ [kN/m ³]	ϕ' [°]	c' [kPa]	c_u [kPa]	k [m/s]	e [-]
1	Corpo arginale: sabbia fine limosa	17,9	31	4	n.p.	5,8 E-007	0,6
2	Limo sabbioso e sabbia limosa	18,6	30	7	n.p.	1,0 E-007	0,6
3	Sabbia e sabbia debolmente limosa	18	33	0	n.p.	5,0 E-05	0,6
5	Limo	18	n.p.	n.p.	30	1,0 E-007	0,6

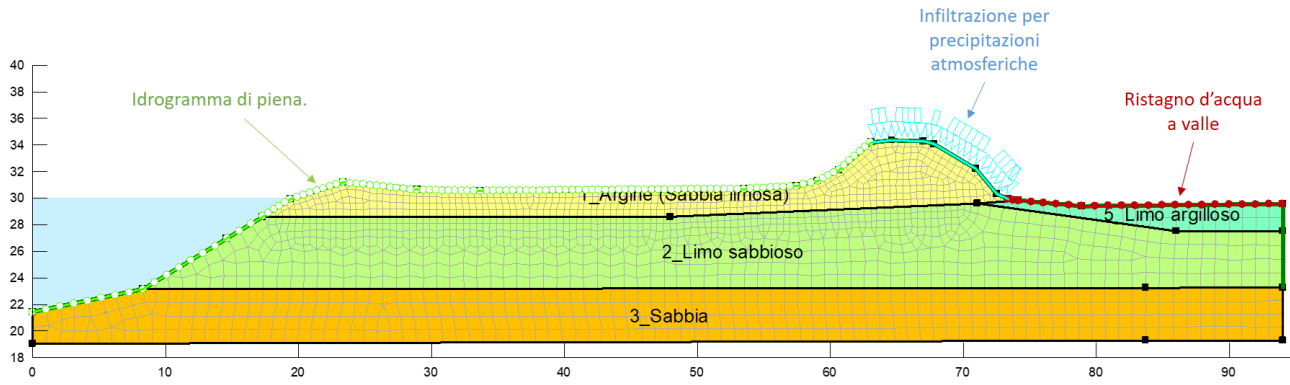


Figura 130 Modello di filtrazione con mesh e condizioni al contorno

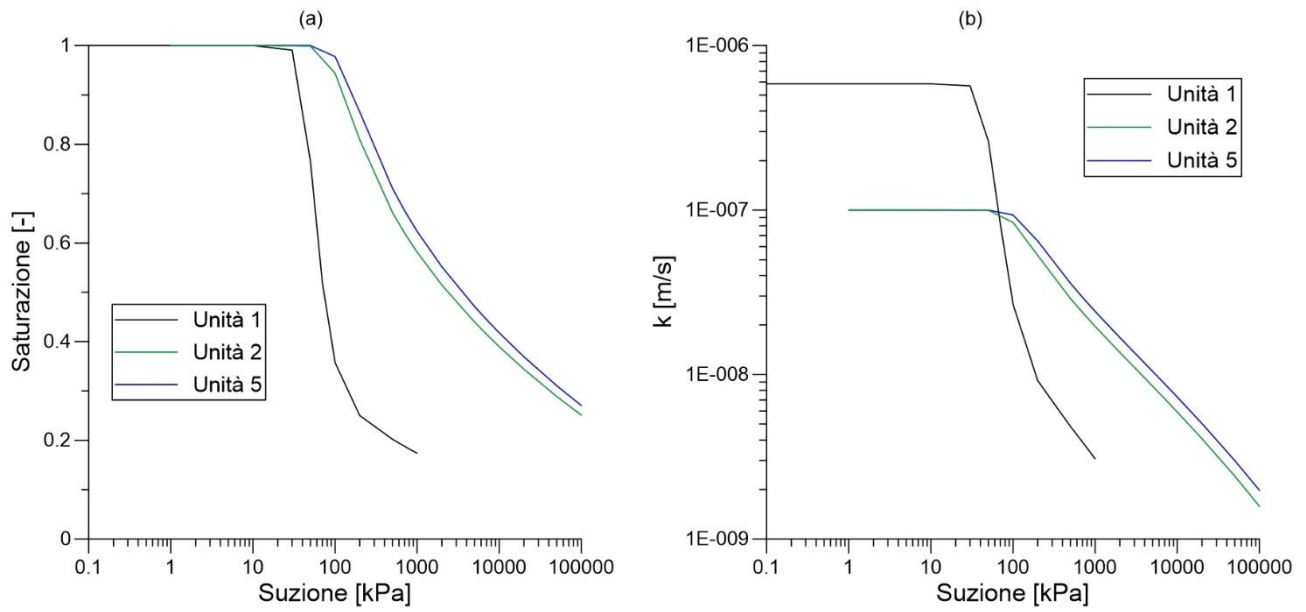


Figura 131 Curve di saturazione e di conducibilità idraulica

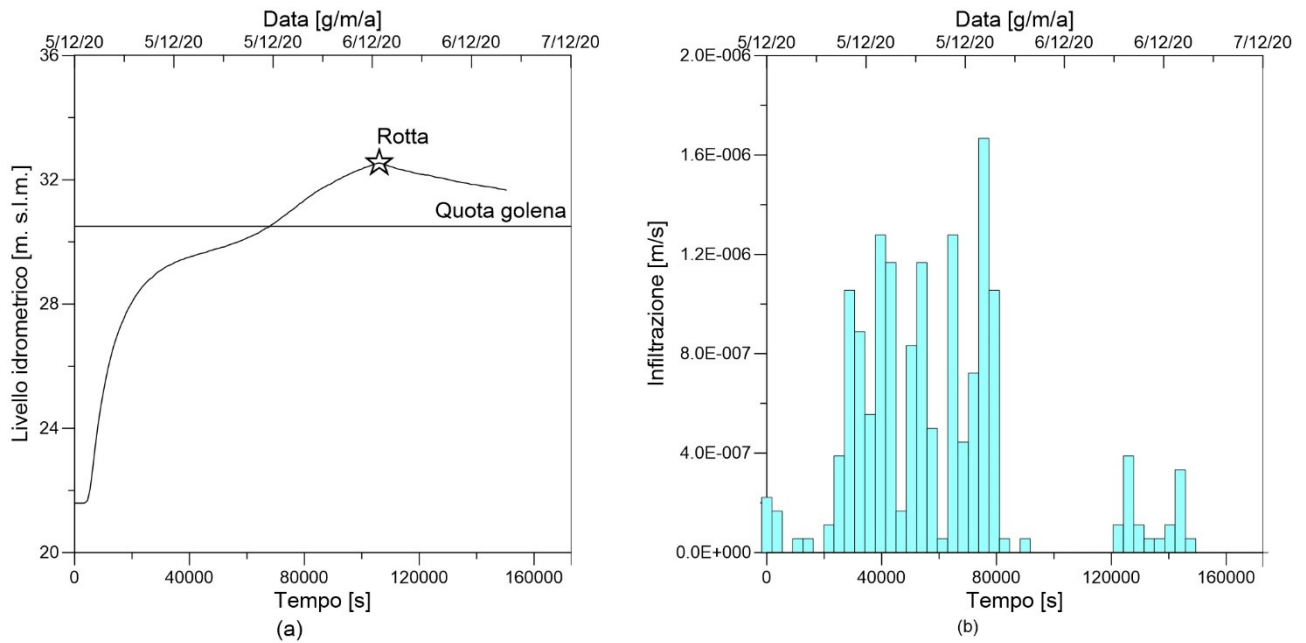


Figura 132 Condizioni al contorno in termini di (a) carico idraulico totale (b) infiltrazione per le precipitazioni

Instabilità della scarpata lato campagna

La verifica, condotta accoppiando all'analisi di filtrazione eseguita con il codice agli elementi finiti all'analisi di stabilità globale applicando il metodo all'equilibrio limite di Morgenstern-Price, è stata eseguita per ricercare la superficie di rottura con il minimo fattore di sicurezza. L'analisi di stabilità, che utilizza per il rilevato arginale la coppia di parametri resistenti di Tabella 26, viene ripetuta ad ogni ora durante l'evento di piena.

La Figura 133 riporta la distribuzione delle pressioni dell'acqua nel terreno per diversi istanti di tempo in cui è evidente che il fronte di saturazione penetra limitatamente e la variazione delle pressioni nel rilevato è ridotta. Questo è dovuto alla bassa permeabilità del terreno e alla rapidità dell'evento di piena.

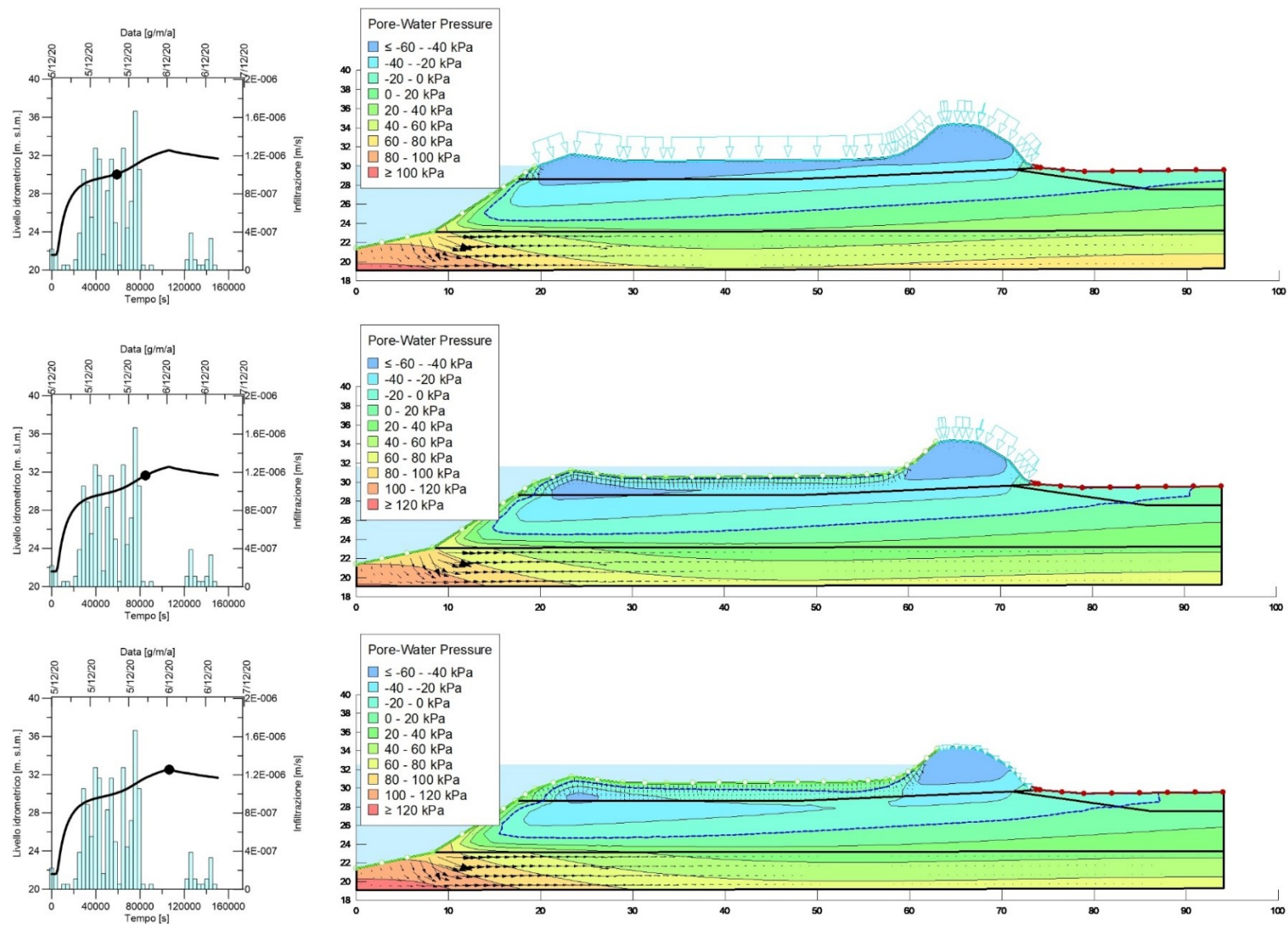


Figura 133 Risultati del modello di filtrazione per diversi istanti di tempo

La Figura 134 riporta l'andamento del coefficiente di sicurezza nel tempo, che risulta essenzialmente invariato durante l'evento. Il suo valore minimo è $FS=1.456$, valore che indica che la scarpata arginale è stabile. Il risultato è, ovviamente, conseguente al limitatissimo aumento della pressione dell'acqua nella scarpata esterna dell'argine (ipotizzato come un mezzo omogeneo), a causa della bassa permeabilità e rapidità della piena.

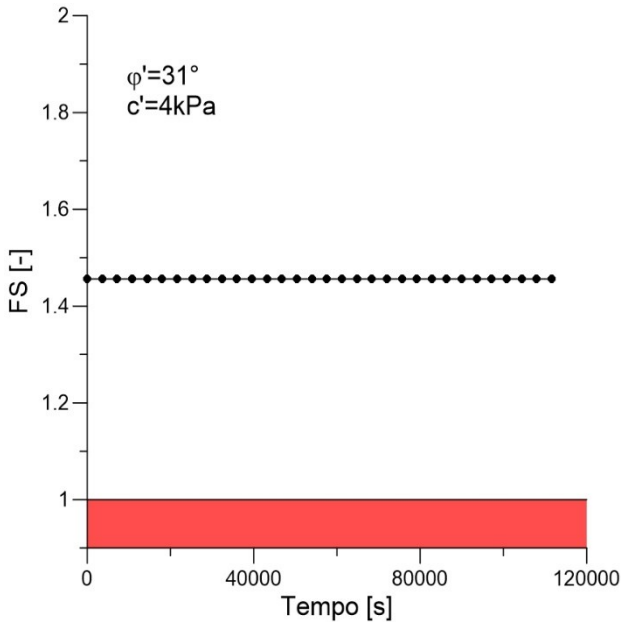


Figura 134 Andamento di Fs nel tempo

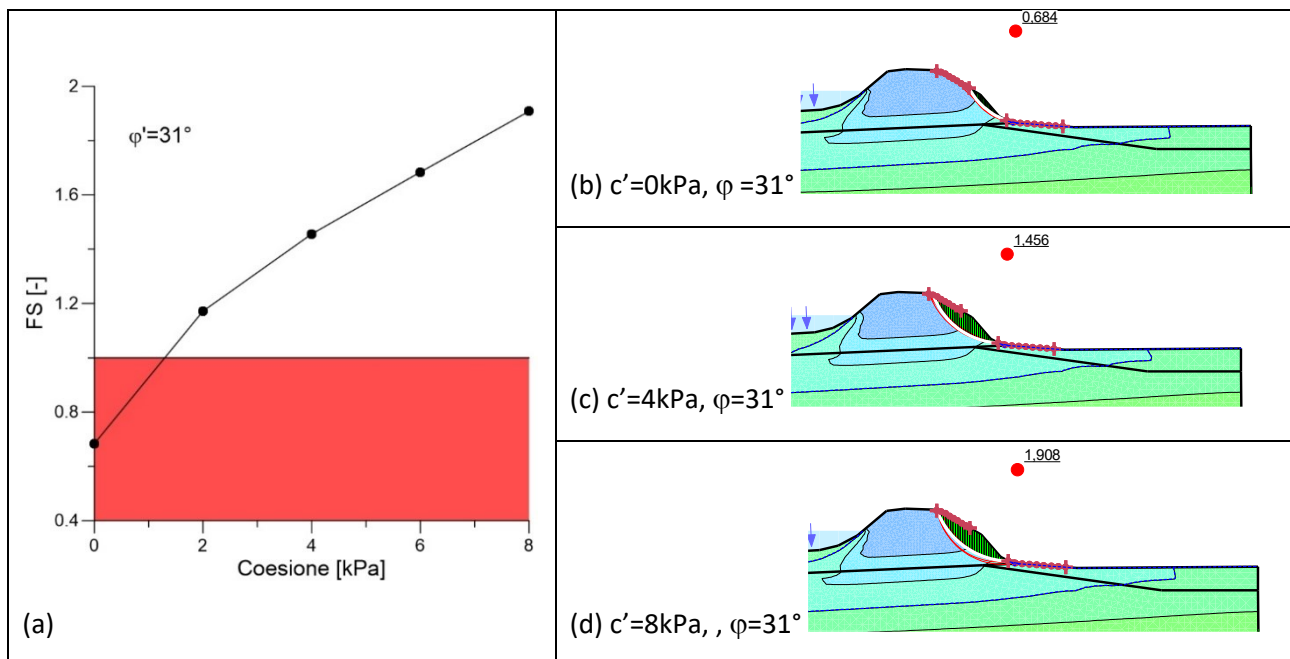


Figura 135 (a) effetto della coesione sul fattore di sicurezza. (b-d) Superfici critiche per coesione rispettivamente pari a 0, 4, e 8 kPa

Il parametro che più influenza l'analisi di stabilità, è la coesione efficace, che può variare in un campo molto più ampio dell'angolo di attrito e che è influenzata dalla locale condizione del terreno e dalle eterogeneità presenti.

Al fine di valutare l'influenza di una riduzione della coesione efficace è stato eseguito uno studio di sensitività calcolando il fattore di sicurezza minimo per diversi valori della coesione. Come si può osservare dalla Figura 135, il valore del fattore di sicurezza può scendere sotto l'unità per valori molto bassi della coesione efficace,

inferiori a 1.5 kPa. Si noti che, al diminuire della coesione, la superficie di scivolamento critica diventa più superficiale (Figura 135b-d). L'avvicinamento alla scarpata della superficie di rottura caratterizzata da coefficiente di sicurezza sotto l'unità, rende però la formazione della breccia poco probabile, e possibile solo se in presenza di eterogeneità nella struttura arginale in grado di fare avvicinare il fronte fluido alla scarpata esterna. In assenza di queste eterogeneità, la parte restante avrebbe posseduto riserve di resistenza le quali, anche in presenza di uno scoscendimento superficiale, avrebbero evitato la breccia arginale.

Sollevamento e instabilità globale del complesso argine-terreno di fondazione

Questo meccanismo di collasso è favorito dalla presenza nella fondazione dell'argine di uno strato relativamente poco permeabile (limo) al di sopra di uno molto permeabile (sabbia) nel quale la pressione dell'acqua può raggiungere livelli elevati come illustrato in Figura 129b.

L'innesco ha luogo quando la tensione verticale efficace si riduce significativamente all'interfaccia tra orizzonte di sabbia e livello limoso superiore, riducendo così la resistenza del terreno.

Nel caso in esame, dalle indagini geotecniche svolte, è presente uno strato di limo sabbioso di spessore di circa 6.5 m soprastante lo strato permeabile di sabbia profondo. Il modello numerico di filtrazione consente di calcolare la pressione dell'acqua all'interfaccia tra la sabbia e il limo che vale 31.4 kPa. Il confronto con la tensione verticale totale pari a circa 117 kPa (per un peso di volume minimo di 18kN/m^3), consente di escludere l'insorgenza di tale meccanismo.

Erosione al piede dell'argine

Questo tipo di meccanismo può avere luogo quando il fronte di saturazione interseca il piede di valle dell'argine. In questo caso, la forza di filtrazione, data dal prodotto del gradiente idraulico e del peso specifico dell'acqua, può innescare un'erosione localizzata (Figura 136) che può evolvere nei seguenti meccanismi:

1. estendersi retrogressivamente portando alla formazione di una cavità che poi si allarga causando il collasso dell'argine (Figura 137a)
2. innescare l'instabilità globale della scarpata per mancato supporto al piede (Figura 137b)

Il meccanismo di cui al punto 1 ha un'evoluzione relativamente lenta, mentre il meccanismo di tipo 2 può portare rapidamente al collasso della scarpata arginale.

Dalle analisi di filtrazione di Figura 133 risulta che il fronte di saturazione generato dalla piena, nel caso di omogeneità del rilevato arginale e del terreno di fondazione, non interseca mai il piede dell'argine; i gradienti orizzontali permangono molto bassi così come le conseguenti forze di filtrazione.

Questo meccanismo è pertanto ritenuto poco probabile, tuttavia potrebbe essere favorito dalla presenza di eterogeneità locali che possono localmente aumentare il gradiente idraulico in direzione orizzontale, eventualità che non si può escludere vista l'eterogeneità dei materiali rinvenuti nel ventaglio di rotta.

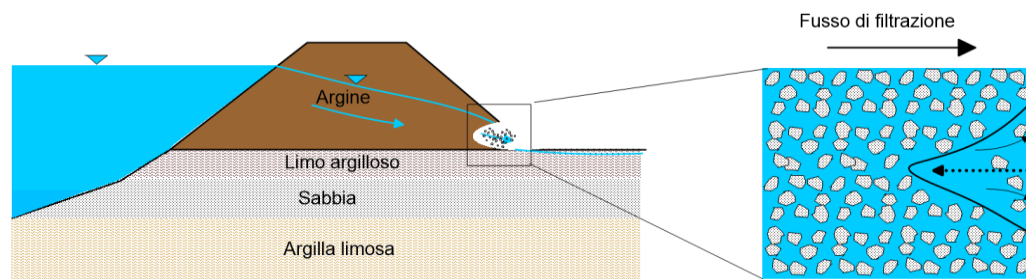


Figura 136 Erosione al piede

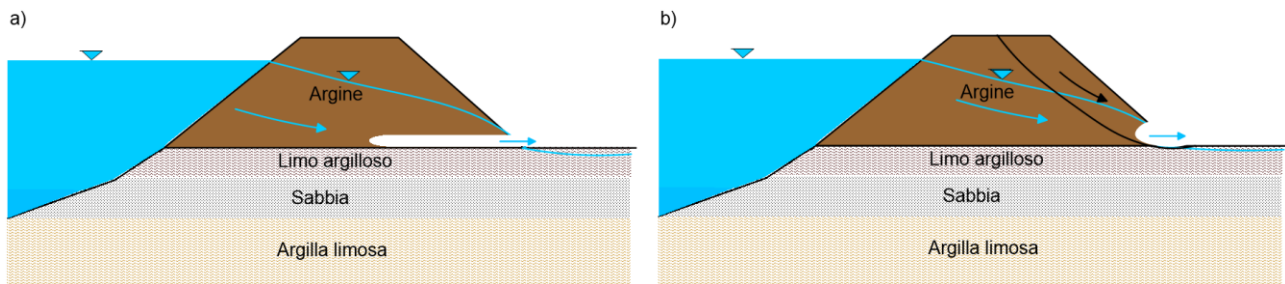


Figura 137 (a) erosione retrogressiva (piping) al piede dell'argine; (b) instabilità globale per erosione al piede dell'argine

Erosione retrogressiva e sifonamento nel terreno di fondazione

Questo tipo di fenomeno è molto diffuso nelle zone a campagna di molti argini fluviali dei fiumi che scorrono nella bassa pianura Padana.

L'evoluzione del sifonamento può essere schematizzata in alcune fasi:

1. innesco dell'erosione (Figura 138a);
2. progressione fino a formare un sifone e/o una cavità con incremento locale della filtrazione e delle pressioni neutrali (Figura 138b);
3. formazione di una rotta nel corpo del rilevato arginale (Figura 138c).

Tipicamente esso si innesca, durante le piene, all'interno di fossi di drenaggio prossimi al corso d'acqua o in aperta campagna, manifestandosi con fontanazzi e può procedere in forma retrogressiva fino a raggiungere l'alveo fluviale formando una via di comunicazione sotterranea tra l'alveo e la campagna a lato dell'argine portando al collasso del rilevato.

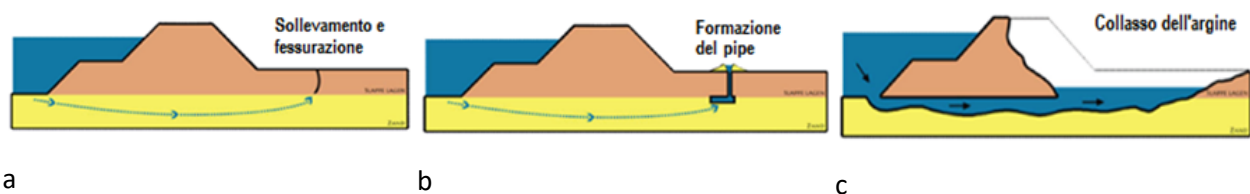


Figura 138 Fasi essenziali del fenomeno di erosione retrogressiva nel terreno di fondazione

Un meccanismo di questo tipo è stato osservato nel 2019 nei pressi dello stante 32 dx, quindi molto prossimo all'attuale rotta, senza che esso evolvesse verso il collasso arginale.

Affinché il fenomeno si inneschi e possa proseguire fino a causare il collasso dell'argine è necessario che si verifichino le seguenti condizioni:

1. l'occorrenza di un punto di efflusso libero per effetto del sollevamento o la fessurazione dello strato superficiale del terreno;
2. la presenza di materiale erodibile come le sabbie fini, i limi e le miscele di sabbie e limi;
3. un canale preferenziale di filtrazione stabile e sostenuto da un tetto di materiale dotato di coesione (argilla, sabbia cementata);
4. l'instaurarsi di un regime di filtrazione nel terreno di fondazione, in regime di saturazione, sufficientemente perdurante e che colleghi l'alveo alla campagna.

Nel caso in esame il gradiente idraulico nel terreno di fondazione è basso e tale da rendere improbabile il verificarsi della condizione 1. Il materiale tuttavia è facilmente erodibile e il corpo arginale è costituito da una sabbia con una debole coesione, pertanto le condizioni 2 e 3 sono verificate. La condizione 4 non è verificata poiché la piena è stata breve e il terreno di fondazione, caratterizzato da una bassa permeabilità non ha raggiunto la condizione di saturazione.

Pertanto questo meccanismo appare poco probabile.

Erosione concentrata

In un rilevato arginale omogeneo, il gradiente idraulico, che genera le forze di trascinarsi delle particelle dello scheletro solido, si distribuisce nel tempo e nello spazio in funzione della durata dell'onda di piena. La direzione della forza di filtrazione è concorde con il moto dell'acqua e può causare fenomeni erosivi qualora ecceda la resistenza locale del terreno.

Nelle simulazioni numeriche illustrate in Figura 133 appare come il fronte di saturazione avanzi molto lentamente all'interno dell'argine e come la direzione del moto non sia mai tale da creare l'insorgenza di condizioni di equilibrio limite nella matrice solida. Se però all'interno della struttura arginale esistono cavità in collegamento idraulico con l'alveo, il flusso idraulico procede più rapidamente, aumentando le pressioni dell'acqua e riducendo la resistenza a taglio del terreno. Allo stesso tempo il gradiente idraulico locale aumenta, favorendo l'insorgere del fenomeno della erosione concentrata e la sua rapida progressione, in particolare nei terreni altamente erodibili. È evidente che il manifestarsi di questo meccanismo è subordinato all'esistenza di discontinuità nel corpo arginale quali possono essere:

1. fessure di trazione;
2. tane di animali;
3. cavità lasciate dalla vegetazione;
4. strutture antropiche parzialmente o totalmente intercettanti la sezione arginale.

L'effetto delle discontinuità dovute a tane di animali fossori è stato oggetto di indagine sugli argini del Secchia e del Panaro da parte di Orlandini et al. (2015), i quali hanno dimostrato come esso abbia potuto innescare l'instabilità globale del rilevato arginale. Questo tipo di fenomeno è avvenuto nel 2014, a piccola distanza dalla rotta attuale. In quel caso era presente una discontinuità nell'argine, costituita da una tana.

Rispetto ai casi del Secchia e del Panaro riportati da Orlandini et al (2015), non vi è però nessuna chiara evidenza della presenza di tane attive di animali fossori sul paramento lato campagna dalle immagini satellitari dell'argine nella zona della rotta disponibili alla Commissione negli ultimi anni, così come invece appariva chiaro per il collasso parziale del 2014.

Vi sono però delle interpretazioni di fotografie delle sezioni trasversali dell'argine scattate durante l'evoluzione della rotta del 2020, che suggeriscono comunque la presenza di un sistema di tane, anche relitte, all'interno del corpo arginale. Queste tane potrebbero avere uno sviluppo tale da avvicinarsi alla scarpata dell'argine dal lato campagna. Inoltre, due tane sul lato campagna sono state bonificate nel 2016, proprio nella zona della rotta (Figura 139).



Figura 139 Posizione delle tane bonificate nel 2016 e posizione del fenomeno di erosione localizzata del 2014 e della rotta del 2020

Considerate le proprietà idrauliche dei terreni e la durata della sollecitazione idrologica sul paramento arginale lato fiume, affinché l'acqua possa esercitare la sua influenza in modo significativo è necessario ipotizzare un collegamento idraulico preesistente che consenta all'acqua di penetrare rapidamente all'interno del rilevato arginale, senza necessariamente raggiungere la scarpata lato campagna. Inoltre, non è vincolante che tale collegamento sia costituito da cavità di dimensioni significative, in quanto il fattore rilevante non è la quantità d'acqua ma la sua pressione massima nel terreno all'interno della cavità.

La presenza di un probabile collegamento idraulico con il fiume ha consentito all'acqua di entrare facilmente nel corpo arginale e di seguire la crescita della piena come in un sistema di vasi comunicanti, senza peraltro saturare il terreno attorno alla cavità interna (se si tiene conto della bassissima permeabilità in condizioni di parziale saturazione che non consente al fronte di saturazione di penetrarvi).

Se la cavità è sufficientemente estesa fino ad arrivare in prossimità della scarpata esterna costituita da terreno poco strutturato, con inclusi elementi eterogenei e di riporto recente, quale quello presumibilmente impiegato per riparare e tane o per bonificare la rigogliosa vegetazione riparia, si può ipotizzare che la pressione dell'acqua abbia esercitato la sua azione sul terreno superando localmente la modesta resistenza al taglio disponibile.

Il meccanismo di collasso può essere schematizzato come nella Figura 140.

L'innesco può essere definito '*punzonamento della scarpata arginale*', come mostrato in Figura 140a: la pressione dell'acqua sulla superficie di una cavità genera una forza alla quale si oppone la resistenza meccanica del cuneo di terreno che separa la cavità stessa dalla superficie della scarpata.

Gli elementi che concorrono a determinare la condizione di equilibrio limite sono la dimensione della cavità, la pressione dell'acqua al suo interno, la distanza dalla superficie laterale della scarpata, la pendenza della scarpata e le caratteristiche meccaniche del terreno, attrito e coesione efficace. Quest'ultima, come è stato messo in evidenza precedentemente, è il parametro maggiormente variabile e determinante nella formazione della resistenza locale complessiva del terreno, quando la pendenza della scarpata supera, come nel caso della zona della rotta, l'angolo di attrito del terreno.

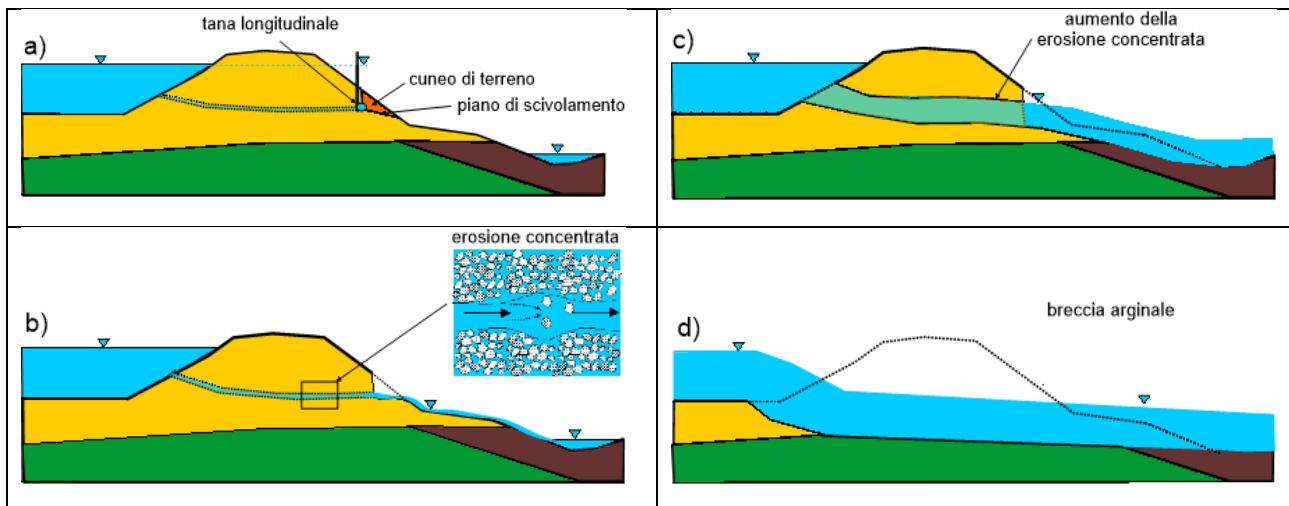


Figura 140 Evoluzione dell'erosione concentrata conseguente a punzonamento arginale

Una volta superata la resistenza ed espulso il cuneo di terreno dalla scarpata arginale, l'acqua può scorrere rapidamente all'interno del condotto, erodendone le pareti e allargandolo fino al collasso della parte sommitale dell'argine.

Il fenomeno dell'erosione concentrata è molto rapido in presenza di terreni formati da sabbie limose senza alcuna frazione argillosa plastica come quelli del corpo arginale nella zona della rotta.

L'effetto di una cavità vicino alla scarpata lato campagna soggetta ad una pressione dell'acqua crescente con la piena è stato simulato tramite un modello bidimensionale ad elementi finiti con il software Midas GTX, come quello mostrato nella Figura 141.

È stata modellata la sola scarpata lato campagna e una porzione ridotta di argine, come indicato nel riquadro rosso in Figura 141, ipotizzando la presenza di una cavità longitudinale di diametro $D=25$ cm, posta a distanza $L=70$ cm dal paramento esterno e a quota $S=1$ m al di sopra del piede arginale.

I parametri resistenti del terreno sono angolo di attrito $= 31^\circ$ e coesione efficace $= 2$ kPa, valore leggermente inferiore rispetto a quello usato nella simulazione dell'instabilità globale del paramento arginale, per tener conto della minore resistenza dello strato più superficiale oggetto di rimaneggiamenti nel corso degli anni. La pressione dell'acqua all'interno della cavità viene incrementata progressivamente, simulando l'evoluzione della piena e calcolando gli spostamenti del terreno corticale.

La Figura 142 mostra i valori degli spostamenti tali da condurre al punzonamento dell'argine con l'espulsione del cuneo di terreno, che, nel caso specifico, ha luogo per una pressione dell'acqua interna della cavità di 16 kPa, corrispondente ad un dislivello tra la cavità e la piena del fiume di 1.6 m di colonna d'acqua. Questo valore è compatibile con gli istanti della evoluzione della piena poco prima della formazione della breccia.

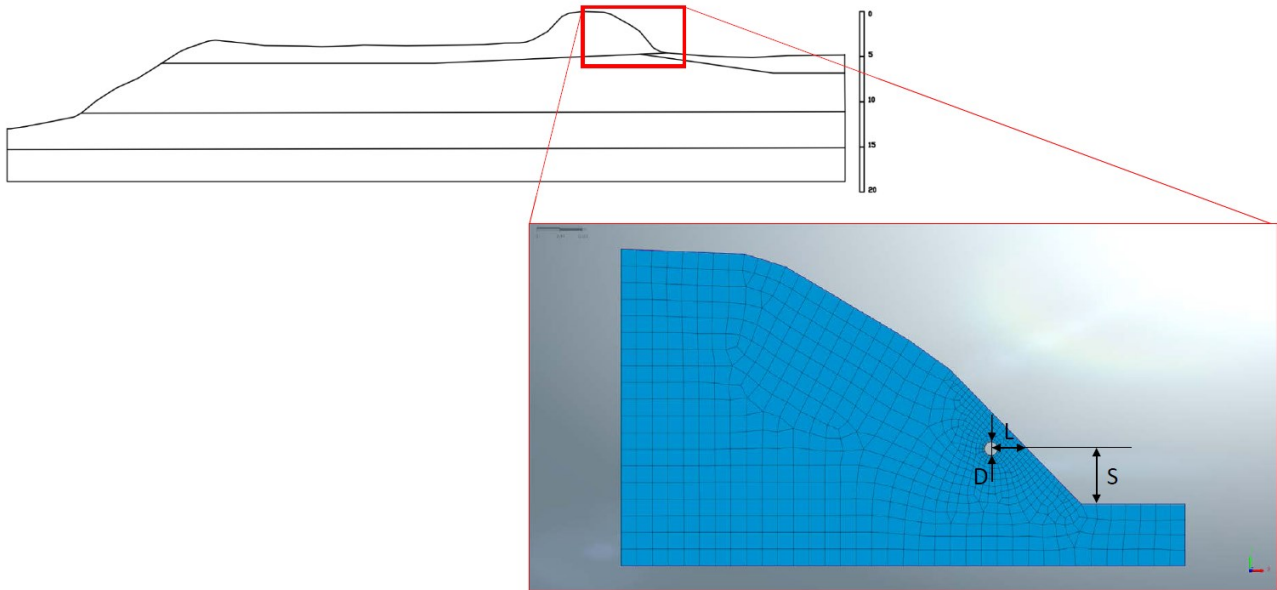


Figura 141 Modello FEM di punzonamento arginale

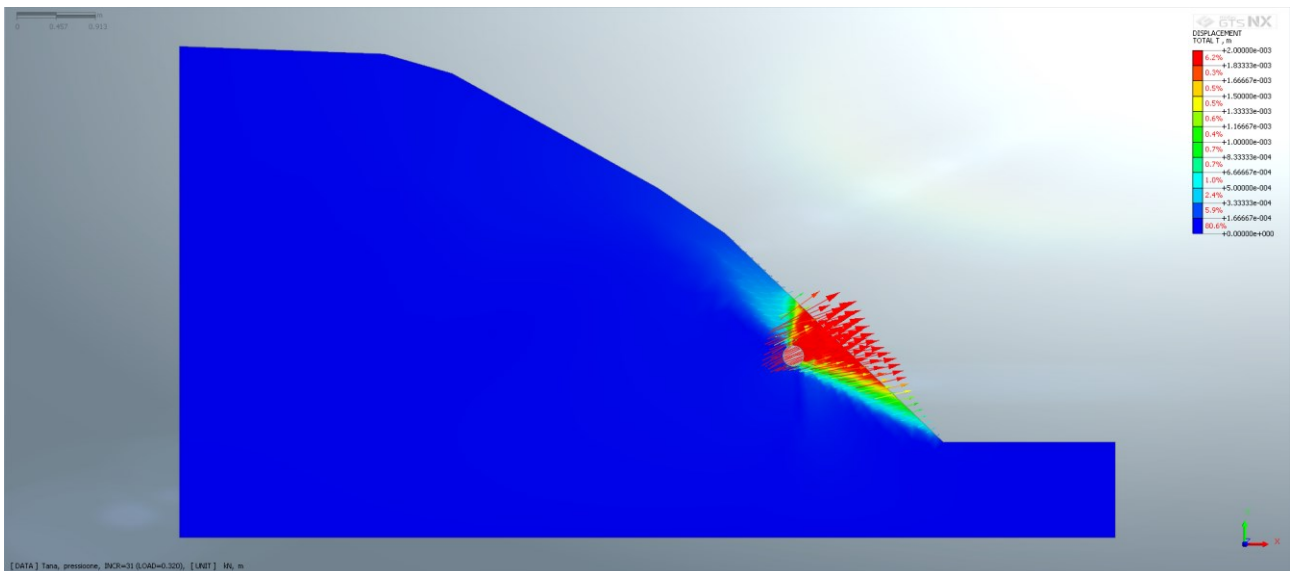


Figura 142 Spostamenti per una pressione interna alla cavità di 16kPa

Una volta aperto il varco in terreni non plastici facilmente erodibili come quelli costituenti l'argine, la cavità si allarga velocemente portando la struttura al collasso.

È possibile stimare approssimativamente il tempo necessario a raggiungere un raggio massimo della cavità tale da provocare il collasso della sommità attraverso il modello analitico proposto da Bonelli et al. (2007). Tale modello semplificato assume che l'argine sia formato da terreno omogeneo caratterizzato dai parametri di erodibilità τ_c e k_{er} , entro cui si colloca una cavità cilindrica inizialmente di raggio R_0 .

Il modello permette di calcolare il raggio della cavità ad un certo tempo t , calcolato a partire dall'innesco del fenomeno erosivo, con la formula seguente:

$$\frac{R(\tilde{t})}{R_0} = \tilde{\tau}_c + (1 - \tilde{\tau}_c) \exp(\tilde{t})$$

Dove

$R(\tilde{t})$ = raggio della cavità al tempo \tilde{t} ;

R_0 =raggio iniziale della cavità;

$\tilde{t} = \frac{t}{t_{er}}$ =tempo adimensionalizzato;

$t_{er} = \frac{2\rho_d}{k_{er} \frac{\Delta p}{L}}$ =tempo caratteristico del fenomeno erosivo;

$\rho_d \cong 1600 \text{ kg/m}^3$ =densità del terreno secco;

k_{er} =coefficiente di erodibilità dipendente dalle caratteristiche del terreno;

Δp =differenza di pressione in entrata e uscita dal condotto di filtrazione;

L = lunghezza del condotto;

$\tilde{\tau}_c = \frac{\tau_c}{\frac{R_0 \Delta p}{2L}}$ =tensione tangenziale critica adimensionalizzata;

τ_c =tensione tangenziale critica dipendente dalle caratteristiche del terreno.

Va osservato che la legge è di tipo esponenziale, cioè il raggio si allarga esponenzialmente con il fattore tempo adimensionalizzato,

$$\tilde{t} = t k_{er} \left(\frac{\Delta p}{L} \right) / 2\rho_d$$

che, a sua volta, dipende dalle caratteristiche del materiale (k_{er} e ρ_d) e dal gradiente idraulico $\Delta p/L$. Più il materiale è erodibile e poco compatto (k_{er} elevato e ρ_d ridotto), più velocemente si allargherà il condotto. La differenza di pressione fra entrata e uscita del condotto, Δp , è direttamente collegata al livello dell'acqua nel fiume e può essere ben approssimata con la pressione della colonna d'acqua virtualmente presente al di sopra dello sbocco della cavità ($\Delta p = H\gamma_w$, dove $\gamma_w = 9.81 \text{ kN/m}^3$ è il peso di volume dell'acqua, Figura 143). Quindi più aumenta il dislivello tra la quota di sbocco della cavità e la quota dell'acqua nel fiume, più il fenomeno è rapido nella sua evoluzione temporale.

Questo modello non tiene conto che il livello dell'acqua nel fiume cambia nel tempo, né che la cavità abbia una forma diversa da quella cilindrica, come accade nella realtà, tuttavia offre un valido supporto per comprendere come questo tipo di dissesto possa portare al collasso dell'argine in tempi anche molto brevi come osservato nel caso in esame.

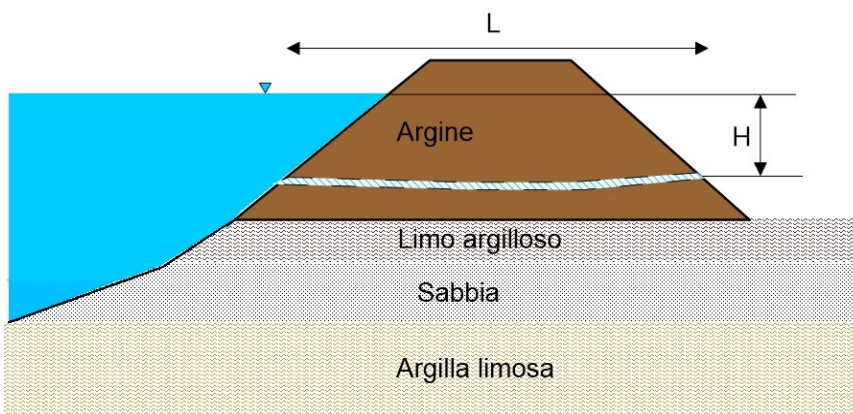


Figura 143 Discontinuità circolare passante.

Supponendo di essere in presenza di una cavità perfettamente cilindrica di raggio $R_0 = 0.125 \text{ m}$ (compatibile con le dimensioni di una tana di animale), lunghezza $L=10 \text{ m}$, soggetta al carico idraulico $H = 1.6 \text{ m}$

(corrispondente al valore di innesco del punzonamento arginale, Figura 143) si può stimare l'allargamento del raggio nel tempo assumendo valori tipici di τ_c e k_{er} per sabbie limose come da Tabella 25.

Il raggio massimo della cavità prima del collasso dell'argine dipende dalla posizione della tana nel corpo arginale e dalla resistenza del materiale; in questo caso si può assumere che abbia un valore compreso fra 1.0 m e 1.6 m.

Si può ipotizzare che tra l'innesco dell'erosione e il collasso sia verosimilmente trascorso un tempo fra i 30 e i 60 minuti, che non ha purtroppo consentito di intervenire in alcun modo. Infatti il Sig. M.B., residente in prossimità della rotta, ha raccontato in una intervista di essersi recato nelle vicinanze del fiume circa alle ore 6:00 senza notare elementi critici, mentre alle 6:45 circa ha visto una lama d'acqua invadere violentemente la sua proprietà a conferma che la rotta era già avvenuta.

Il grafico di *Figura 144* mette in relazione il tempo di evoluzione del fenomeno dal momento di innesco dell'erosione concentrata con il raggio della cavità. L'area colorata di rosso e giallo rappresenta la possibile evoluzione temporale del fenomeno assumendo parametri di erodibilità da molto sfavorevoli ($\tau_c = 8kPa$ e $k_{er} = 0.014s/m$) a meno sfavorevoli ($\tau_c = 13kPa$ e $k_{er} = 0.001s/m$). L'area tratteggiata rappresenta le condizioni più probabili per il sito della rotta in termini di tempi e valori del raggio di collasso, che appaiono essere quindi compatibili con le caratteristiche del materiale rinvenuto in sito.

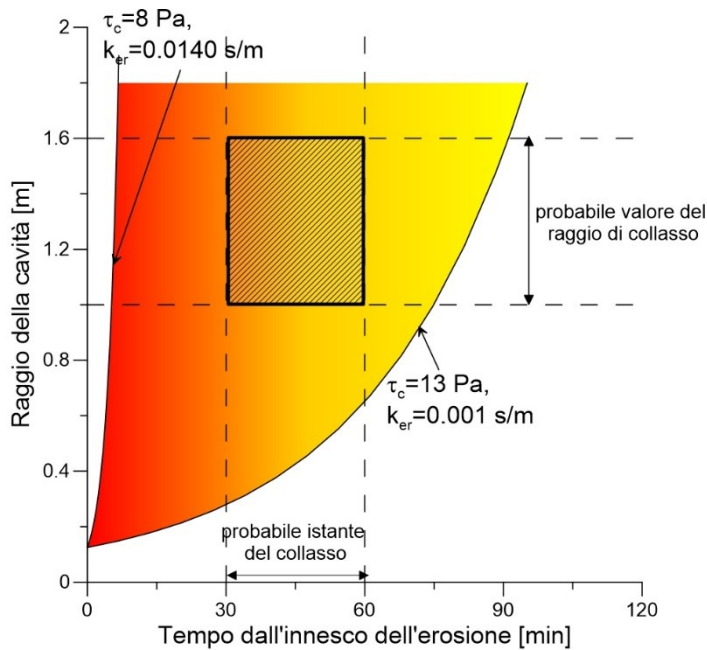
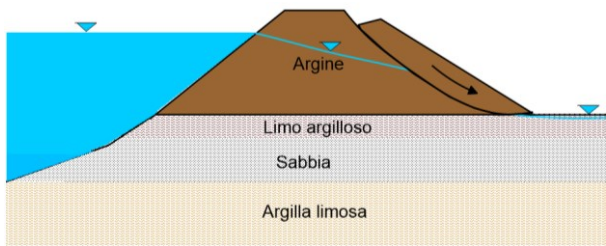
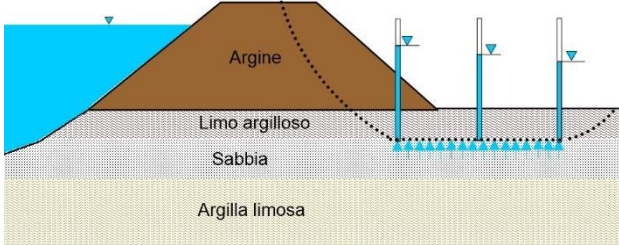
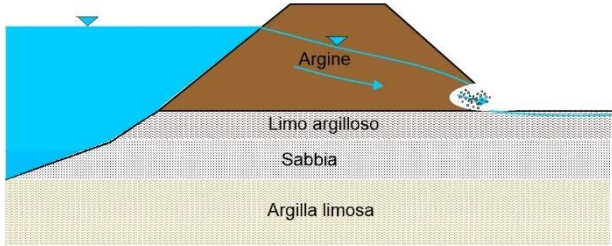


Figura 144 Evoluzione nel tempo del raggio della discontinuità. L'area tratteggiata rappresenta le condizioni più probabili della rotta del 6/12/2020

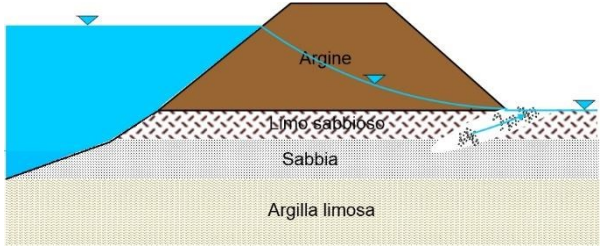
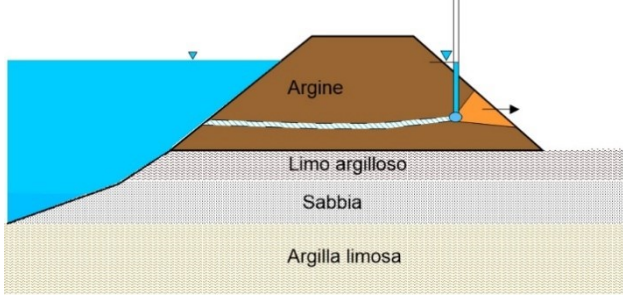
Discussione sui possibili meccanismi di collasso

La tabella seguente riassume i meccanismi di collasso analizzati in precedenza

Meccanismo	Descrizione	Immagine	Metodo di analisi	Conclusione
Instabilità della scarpata (lato campagna)	L'instabilità della scarpata lato campagna dipende fortemente dalle caratteristiche del terreno e se esso sia stato oggetto di degrado dovuto alle variazioni stagionali delle condizioni meteorologiche.		Analisi di filtrazione (FEM) + equilibrio limite (Morgenstern-Price)	Poco probabile
Sollevamento e instabilità globale del complesso argine-terreno di fondazione	La rottura per sollevamento al piede può avere luogo quando uno strato superficiale poco permeabile, si trova sopra uno strato di terreno granulare molto permeabile. La pressione nello strato granulare riduce lo stato tensionale efficace e, conseguentemente, la resistenza al taglio disponibile. La scarpata arginale perde il sostegno laterale fornito dal terreno a campagna e può scivolare verso valle.		Analisi di filtrazione (FEM) + equilibrio limite	Non probabile
Erosione al piede dell'argine	Quando la linea di saturazione interseca il piede di valle dell'argine, il moto di filtrazione può innescare un'erosione localizzata che può evolversi nei seguenti meccanismi: (1) estendersi retrogressivamente portando alla formazione di una cavità che poi si allarga portando al collasso dell'argine, (2) innescare l'instabilità globale della scarpata per mancato supporto al piede		Analisi di filtrazione (FEM) + considerazioni da letteratura	Poco probabile



Relazione di dettaglio

<p>Erosione retrogressiva nel terreno di fondazione (piping)</p>	<p>Asportazione e allontanamento delle particelle fini del terreno nel corpo arginale o negli strati di fondazione per effetto delle forze idrodinamiche di filtrazione. La migrazione delle particelle genera dei canali (<i>pipes</i>), che possono creare le condizioni per la rotta arginale.</p>		<p>Analisi di filtrazione (FEM) + equilibrio limite</p>	<p>Non probabile</p>
<p>Erosione concentrata conseguente al punzonamento dell'argine</p>	<p>Ha luogo lungo vie preferenziali preesistenti, quali possono essere fessurazioni, vuoti interconnessi o tane di animali, oppure formatesi a seguito della rottura locale del paramento arginale (punzonamento argine). Il foro si allarga con una rapidità che dipende dall'erodibilità del terreno fino a portare al collasso arginale.</p>		<p>Analisi meccanica (FEM) + metodo di Bonelli et al. (2007)</p>	<p>Probabile in presenza di discontinuità in comunicazione idraulica con l'argine (tane, fessure, ecc)</p>



Considerazioni conclusive sulla stabilità dell'argine

Dalle analisi condotte è possibile concludere quanto segue:

1. la geometria dell'argine destro in corrispondenza della zona della rotta, è molto acclive;
2. la resistenza del terreno, che è somma del contributo dell'attrito e della coesione efficace, è caratterizzata da valori dell'angolo di attrito relativamente costanti, pari a circa 30-32°, inferiori alla pendenza delle scarpate;
3. La coesione efficace, che è quella grandezza che fornisce al terreno la resistenza necessaria per costruire i rilevati piuttosto acclivi del sito con pendenze superiori all'angolo di attrito, è altamente variabile e fortemente dipendente dalle condizioni locali di compattazione, di parziale saturazione e di cementazione. Ciò non consente alla struttura dell'argine di possedere quegli adeguati margini di sicurezza soprattutto in presenza di eterogeneità nel corpo arginale come quelle rilevate nella zona della rotta;
4. Il terreno è una miscela parzialmente satura e poco permeabile di sabbia e limo, quindi molto erodibile e con comportamento fragile, elementi che contribuiscono fortemente a ridurre il grado di sicurezza della struttura arginale perché una volta superata la resistenza limite il collasso accelera in modo repentino e difficilmente controllabile;
5. Sulla base dei modelli geotecnici del complesso-argine terreno di fondazione si sono esaminati, ricorrendo all'analisi numerica agli elementi finiti e all'equilibrio limite, i potenziali meccanismi di collasso arginale: 1) instabilità globale della scarpata a lato campagna; 2) sollevamento e instabilità globale del complesso argine-terreno di fondazione; 3) erosione retrogressiva al piede dell'argine; 4) erosione retrogressiva e sifonamento nel terreno di fondazione (piping); 5) Erosione concentrata.
6. Sulla base dei risultati delle analisi geotecniche, tenendo conto della dinamica fisico-temporale della rotta, si sono ritenuti non probabili i meccanismi da 2) e 4); poco probabili, ma possibili solo in presenza di significative eterogeneità, i meccanismi 1).e 3); il meccanismo 5) appare probabile ed molto simile a quello parzialmente avvenuto nel 2014 appena più a monte del sito della rotta. Tuttavia mentre per il caso del 2014, è evidente la presenza di una tana passante, nella rotta del 2020 non si sono rilevate evidenze dirette di tane di animali fossori dall'esame delle immagini satellitari;
7. l'esame dettagliato delle foto scattate successivamente alla formazione della breccia sui tratti di argini non collassati è però compatibile con la presenza di tane o di tane relitte nella struttura dell'argine;
8. tenendo conto di:
 - a. riparazione delle tane avvenuta nel 2016,
 - b. particolare acclività locale dell'argine,
 - c. rimaneggiamenti delle parti corticali della scarpata legati alla bonifica delle tane e della vegetazione riparia,
 - d. variabilità dei materiali rinvenuti nel ventaglio di rotta,
 - e. eterogeneità, fragilità ed erodibilità del terreno limo-sabbioso non plastico che forma l'argine,
9. si è considerata l'occorrenza di un meccanismo specifico, denominato *punzonamento della scarpata arginale*;
10. tale meccanismo considera l'evenienza che la pressione dell'acqua sulla superficie di una cavità o di una tana non necessariamente visibile dall'esterno, ma in collegamento con la zona

golenale, genera una forza alla quale si oppone unicamente la resistenza meccanica di un cuneo di terreno che separa la cavità stessa dalla superficie della scarpata. Una volta superata la resistenza limite del terreno ed espulso il cuneo dalla scarpata arginale, l'acqua può scorrere rapidamente all'interno del condotto che si forma, erodendo, in modo del tutto analogo al fenomeno del 2014, le pareti del condotto e allargandolo fino al collasso della parte sommitale dell'argine;

11. analisi geomeccaniche sulla struttura arginale condotte con gli elementi finiti hanno mostrato che è sufficiente un carico idraulico relativamente modesto agente all'interno della cavità o tana parietale, perfettamente compatibile con le caratteristiche della piena del dicembre 2020, per punzonare la scarpata arginale creando così le condizioni di innesco del processo di erosione concentrata fino al collasso strutturale;
12. una modellazione semplificata della successiva evoluzione del fenomeno erosivo ha altresì mostrato che i tempi rapidi con cui è avvenuto il fenomeno sono compatibili con la natura limo-sabbiosa dei terreni che formano la struttura arginale.

Parte sesta: conclusioni

Dal lavoro svolto, si possono trarre le indicazioni che sinteticamente andiamo a descrivere.

L'argine è collassato quando lo stato del Panaro registrava un livello ben al disotto della quota del piano sommitale: si tratta di una misura compresa 1.3 e 1.4 metri. Quindi il dissesto è avvenuto in condizioni che, teoricamente, residuavano al manufatto ampi margini di resistenza al sormonto, anche nei confronti di portate di entità ben superiore di quella effettivamente osservata.

Non si è dunque trattato di un caso di collasso per sormonto o di dissesto avvenuto con il livello al petto della struttura prossimo alla tracimazione, e dunque nelle condizioni di impegnare il manufatto nella configurazione più gravosa prevista in progetto (o addirittura più severa). Le ipotesi sulle quali la Commissione ha dunque operato sono state quelle di:

5. vizi occulti o difformità locali di realizzazione, eventualmente aggravatesi con l'azione del tempo e di altre circostanze endogene o esogene nel corso della vita tecnica;
6. difetto di manutenzione reiterato al punto da compromettere del tutto la funzionalità dell'opera;
7. alterazioni, manomissioni o danneggiamenti fatali, accaduti tra l'ultimo ciclo di manutenzione o osservazione dell'opera e il momento del collasso;
8. specifici danni relativi all'azione di animali con capacità fossorie nel corpo dell'argine,

ovvero si è considerata una combinazione di tali fattori.

Preliminarmente i lavori si sono concentrati, tra le altre cose, sulla sollecitazione idrologica, al fine di valutare l'eventuale eccezionalità delle condizioni nelle quali è avvenuto il dissesto. Successivamente si sono svolte le attività di ricerca e studio del problema al fine di procedere, principalmente per esclusione, ad individuare la causa o il complesso di cause che hanno determinato il collasso.

Le piogge

La precipitazione sull'alto bacino del Panaro durante l'evento di cui si tratta, è stata caratterizzata da due episodi, il primo dal pomeriggio del 4 dicembre, in progressiva attenuazione nella notte ed il secondo più intenso, dalla mattina del 5, in estensione dal crinale alla media collina. I valori cumulati più elevati si sono osservati sul crinale appenninico per le piogge di durata 24 ore, con tempi di ritorno stimabili tra 10 e 20 anni. I tempi di ritorno si riducono drasticamente per le altre durate e per le stazioni a bassa quota. Si tratta dunque di un evento intenso ma non catastrofico. Significativo invece il carattere persistente dell'evento, dato che la pioggia di due giorni consecutivi, per il 5 e il 6 dicembre, ha superato i massimi valori storici osservati nel periodo 1942-2019 per diverse stazioni del bacino.

La concomitanza con lo scioglimento del manto nevoso

Altresì significativo il fatto che l'evento pluviometrico ha fatto seguito a intensi fenomeni a carattere nevoso accaduti nei giorni immediatamente precedenti. La nuova perturbazione del 5 e 6 dicembre, ha dato luogo al parziale scioglimento del manto accumulatosi, apportando un contributo all'afflusso stimato da ARP Ae in tra 15 e 20 mm di pioggia equivalente, oltre ad incrementare sensibilmente il livello di saturazione dei suoli.

I deflussi a monte della Cassa di espansione

I deflussi a Spilamberto, stazione idrometrica posta non lontano dalla sezione di monte della Cassa di espansione, indicano portate al colmo di ordine decennale e quindi non particolarmente eccezionali. Risulta invece assolutamente significativo il volume di piena che è massimo valore osservato per la serie storica disponibile. Tale fattore riveste invece carattere di assoluta eccezionalità, in particolare per quanto attiene alla sollecitazione in ingresso alla Cassa, che ha raggiunto il massimo storico in termini di livello e volume invasato.

La Cassa di espansione

La Cassa ha determinato un'imponente laminazione dell'onda di piena, abbattendo il colmo in arrivo da monte di una quantità stimabile nell'ordine del 40%. La gestione è stata di tipo "passivo" nelle fasi iniziali dell'evento, mentre sono state svolte alcune manovre sulle paratoie in prossimità del passaggio del colmo di piena.

La portata rilasciata a valle è stata sostanzialmente coerente con le indicazioni derivanti dallo Studio effettuato dall'Università di Modena e Reggio Emilia sulla massima portata esitabile a valle, a meno di uno scostamento di qualche unità percentuale al passaggio del colmo.

La cassa altresì è notoriamente in fase di collaudo e pertanto soggetta a severe limitazioni di invaso. Tali limitazioni sono state peraltro superate in corso di evento, in accordo con l'Ufficio dighe di Milano, per moderare al meglio la portata preservando al contempo la traversa dalla tracimazione e, più in generale, la sicurezza dell'invaso. La Commissione, avendo attentamente analizzato l'opera e ricostruito la gestione in corso di evento, non ravvede alcun elemento causale o concausale ai fini della produzione del collasso arginale.

I livelli a valle della cassa e in fregio all'argine dissestato

È stato analizzato l'evento idrometrico a valle della Cassa e, in particolare, nel tronco di alveo in fregio alla rotta. Si ricorda a tale proposito che la portata in tale tratto è sostanzialmente artificiale in quanto determinata dai rilasci dal manufatto moderatore.

Tali rilasci non sono condizionati soltanto dal valore della portata al picco in arrivo da monte, ma anche e soprattutto, come cennato, dal volume di piena, in questo caso di carattere eccezionale. Il sito di rotta si trova circa 1,5 km a monte del sensore idrometrico di Ponte Navicello. Per tale sensore è disponibile una serie di osservazioni di 18 anni. Attraverso la modellazione idraulica del tronco fluviale, si è potuto valutare che l'argine nel sito di rotta, nelle prime ore del mattino del 6 dicembre, è stato cementato dalla massima sollecitazione registrata nella serie storica.

In questo senso la sollecitazione idrometrica è stata di carattere eccezionale, visto anche il nuovo regime delle portate indotto dalla presenza della Cassa di espansione.

Analisi generale di sito

La Commissione ha svolto numerosi sopralluoghi ed ispezioni sul sito, oltre a raccogliere il necessario materiale cartografico, bibliografico e documentale. Nonostante la significativa alterazione del teatro del dissesto e la costruzione del nuovo argine, è stato possibile reperire ed evidenziare alcuni elementi significativi.

La morfologia dell'area di rotta a campagna dell'argine, da epoca storica, coincide con una zona morfologicamente depressa, storicamente adibita a recapito di una serie di scoline campestri. Testimoni, interpellati dalla Commissione, ricordano anche l'impiego di motopompe per il sollevamento o, in forma assai più incerta, la remota presenza di qualche tombino per il drenaggio degli afflussi meteorici verso fiume. Tali indicazioni denotano con certezza quantomeno la sistematica presenza di fenomeni di ristagno prossimi al piede dell'argine. Altresì potrebbero suggerire la presenza di un manufatto relitto nel corpo del rilevato che tuttavia non ha trovato evidenze dirette, anche a fronte di specifiche indagini. La presenza di un manufatto relitto all'interno del corpo della struttura, ove effettivamente accertata, può costituire un significativo elemento di concausa nella produzione del dissesto.

La maceria rinvenuta nel ventaglio di rotta (per alcune aree ancora indisturbato) ha mostrato numerosi reperti di natura eterogenea rispetto al materiale da costruzione con cui è formato il corpo arginale. Si tratta in particolare di mattoni e altri elementi di laterizio, porzioni di conglomerato di calce, la cui datazione, svolta a cura della Commissione, è assai risalente nel tempo. Oltre a ciò sono state rinvenute ceppaie di notevoli dimensioni, riconducibili a canna comune. Il numero dei reperti relativi a laterizi e conglomerato non è sufficiente per indicare con buona certezza la presenza di un manufatto relitto nel corpo dell'argine o nel piano di fondazione, ma testimonia comunque e chiaramente l'occorrenza di materiali eterogenei nel corpo del rilevato. Tali caratteri sono peraltro chiaramente ribaditi anche dalle indagini strumentali e possono aver rivestito un carattere concausale nella meccanica della breccia.

Nella serie storica delle ortofoto e immagini oblique del sito di rotta è stata rinvenuta la rigogliosa presenza della cosiddetta "canna comune" (*Arundo donax*). Tale forma di vegetazione è rimasta in posto, anche a cavaliere dell'argine, fino attorno al 2012. A partire dalle immagini del 2014 si nota che tale occorrenza è stata rimossa, con la manutenzione delle scarpate. Nel 2017 è evidente una ampia zona di terreno riportato che ricopre il piede dell'argine e l'argine stesso fino alla quota sommitale. Testimonianza della presenza di *Arundo donax* è stata rilevata anche nel ventaglio di rotta, dove sono state riscontrate ceppaie di rizomi di notevoli dimensioni. È verosimile che gli apparati radicali profondi, al di sotto dei rizomi che in parte sono stati rimossi, siano rimasti all'interno nel corpo arginale, andando presumibilmente a decomporsi nel tempo e creando vie di percolazione verticale della pioggia o delle acque di piena in golena, quando l'argine è in carico. La presenza di queste vie preferenziali può aver avuto una influenza concausale nella rotta.

La geometria della schiena dell'argine nel sito di rotta risulta particolarmente acclive rispetto ad altre sezioni, oltretutto confrontata con gli ordinari parametri geometrici utilizzati per la progettazione di queste strutture. Ne risulta un margine di sicurezza limitato di per sé, anche in assenza di anomalie all'interno del corpo dell'argine. La struttura, in buona sostanza, pur essendo stabile in condizioni ordinarie, non presenta le caratteristiche di resilienza tipiche delle strutture arginali più robuste, quali pendenza relativamente modesta, presenza di banche o ringrossi, che consentono di supplire, magari anche temporaneamente, al verificarsi di eventi o anomalie locali impreviste.

L'argine risulta certamente colonizzato da mammiferi di medie dimensioni con attitudine fossoria che praticano abitualmente le loro tane all'interno del corpo della struttura. Si tratta di cunicoli ramificati che possono estendersi per metri e metri nel corpo del rilevato. Le specie sono riconducibili a Istrice, Tasso, Volpe e Nutria. L'evidenza di queste tane è stata direttamente e ripetutamente constatata nel corso dei sopralluoghi. L'analisi digitale delle fotografie della sezione di rotta in corso di evento, pare

indicare cavità compatibili con la presenza di tane attive o relitte. Si tratta tuttavia di elementi che non possono offrire riscontri certi, date le modalità di ripresa e le condizioni ambientali. In questo senso non si sono trovati specifici e indiscutibili riscontri fotografici della presenza di tane nel tratto di argine effettivamente poi collassato nel periodo antecedente all'evento. È tuttavia un dato di fatto che la presenza di una tana, sia essa attiva o relitta, possa verosimilmente costituire un elemento di innesco per un dissesto quale quello che è poi andato a verificarsi.

La manutenzione

Lo stato generale di manutenzione dell'argine è apparso di buon livello, con l'evidenza (anche sulla base della serie storica di immagini aeree) di due sfalci l'anno. I paramenti presentano profilo regolare, assenza di imbozzamenti o dissesti di tipo profondo e corticale. Non si riscontrano difetti di manutenzione tali da costituire un evidente elemento causale o concausale del dissesto.

Indagini geognostiche

La Commissione ha disposto una vasta campagna di indagini geotecniche e geofisiche e in particolare due sondaggi a carotaggio continuo (con prelievo di undici campioni indisturbati e prove di laboratorio), due prove dilatometriche, due prove con piezocono sismico, in adiacenza al punto di rotta. Prove con piezocono sono state condotte nell'area antistante la rotta e nell'area golenale al fine di ricostruire profili stratigrafici il più dettagliati possibile necessari per l'analisi dei meccanismi di collasso strutturale. Tali indagini geotecniche sono state integrate con indagini geofisiche consistenti in stendimenti elettroresistivi ed elettromagnetici.

Accanto alle indagini nel sito della rotta, sono state eseguite indagini geotecniche e geofisiche in un'area limitrofa interessata dalle tane individuate durante i sopralluoghi, al fine di valutare gli effetti delle eterogeneità presenti nella struttura dell'argine.

Tali prove, oltre a fornire gli elementi per la realizzazione del modello geotecnico della porzione di argine dissestato, hanno evidenziato in estrema sintesi, materiali da costruzione costituiti da una miscela sabbia e limo con importanti eterogeneità, i quali, pur apparentemente compatti e resistenti, sono caratterizzati da comportamento fragile e sono facilmente erodibili, come peraltro dimostrato dalle ripetute testimonianze storiche di rotte, anche in tempi relativamente recenti.

Modelli di collasso strutturale

I risultati delle indagini e dei successivi esami hanno consentito alla Commissione di formulare più modelli geotecnici dell'argine, assegnando ai terreni le proprietà idromeccaniche determinate dalle indagini in sito e in laboratorio. È stata poi condotta una analisi numerica di filtrazione in regime transitorio, al fine di valutare la progressione del fronte di saturazione indotto dalla piena nel corpo arginale e nel terreno di fondazione.

Successivamente si sono considerati i possibili meccanismi di collasso strutturale, tenendo in particolare conto di quello incipiente osservato nel 2014 e del sifonamento del 2019, ambedue occorsi poco a monte della breccia attuale. Si sono altresì valutate le caratteristiche della breccia e dei meccanismi con i quali si è formata nel tempo.

La Commissione ha poi confrontato i vari tipi di meccanismo di collasso, assegnando una probabilità di occorrenza a ciascuno di essi. Quello che, allo stato dei fatti, appare più verosimile è generato dal

punzonamento della scarpata arginale lato campagna in corrispondenza con una qualche discontinuità o sistema di discontinuità. Ad esempio, si può immaginare una tana attiva o relitta, non visibile da lato campagna ma comunque presente da tempo nel corpo del rilevato arginale.

Questo tipo di meccanismo richiede la comunicazione idraulica tra alveo e corpo del rilevato, anche attraverso meati determinati da eterogeneità nella struttura dell'argine, che induca una pressione idraulica sufficiente a superare la resistenza meccanica del terreno. In questo senso riparazioni e rimaneggiamenti sul paramento a campagna potrebbero essere stati causa di sensibili riduzioni locali delle proprietà meccaniche.

Una volta innescato il fenomeno del punzonamento locale (e dunque attivato un collegamento idraulico passante attraverso il corpo dell'argine), la progressione della rotta avviene in maniera rapida perché il condotto che collega l'alveo con la campagna si allarga rapidamente, fino al collasso finale. Un ruolo decisivo è giocato dalla particolare natura dei terreni composti, come detto, da una miscela di sabbia e limo, che sono di per sé i terreni più erodibili in assoluto per questo tipo di strutture.

Cause della rotta ed esiti del lavoro della Commissione

La arginatura, nel tronco in esame, è risultata alle analisi di per sé stabile seppure con margini di sicurezza assai limitati. Ciò è dovuto all'assetto geometrico e alla qualità dei materiali da costruzione. Questo può risultare critico a causa dei molteplici fattori di incertezza tipici di questa classe di opere. Si tratta della natura e messa in opera dei materiali, delle varie vicissitudini subite nel corso della vita tecnica e del carattere intrinsecamente stocastico della sollecitazione idraulica.

In tale contesto sostanzialmente fragile, è venuta ad agire la eccezionalità della sollecitazione idrologica. Tale sollecitazione, in fregio al sito di rotta, è stata la maggiore dell'ultimo ventennio. Questa osservazione avvalorava fortemente l'ipotesi di un qualche vizio interno al corpo della struttura, che si è manifestato non appena la sollecitazione complessiva ha raggiunto i limiti di resistenza del materiale.

Nel caso specifico si sono rinvenuti numerosi fattori di carattere indiziario che indicano una situazione particolarmente critica del sito. Il meccanismo di rottura probabile dell'argine richiede, in sostanza, la presenza di una cavità all'interno della struttura, il fatto che tale cavità sia connessa idraulicamente con la corrente di piena sul petto dell'argine e che la stessa cavità si estenda fino ad essere prossima al paramento lato campagna.

La presenza di una o più tane attive o relitte, magari residuo di una bonifica incompleta, può costituire verosimilmente il fattore predisponente più probabile. Questo è avvalorato dalla presenza di diverse tane di animali fossori osservate in prossimità del dissesto anche durante i sopralluoghi della Commissione. Allo stesso tempo, il fatto che l'argine abbia rotto in "quel" momento e in "quella" specifica posizione indica altrettanto probabilmente l'occorrenza di una serie di fattori concausali che, nel corso di queste brevi note, si sono tratteggiati e che qui si elencano senza la pretesa di un criterio di priorità:

- a. la presenza di discontinuità dovute al degrado degli apparati radicali dell'*Arundo donax*, pianta la cui presenza è stata osservata, oltreché sul sito in esame, soltanto in alcuni punti dello sviluppo dell'intera arginatura di Panaro da San Cesario a Bomporto; tale presenza è indiscutibilmente testimoniata dalle ceppaie riscontrate nel ventaglio di rotta;

- b. La presenza, nel corpo della struttura, di elementi eterogenei, quali mattoni, parti di coppi e conglomerato a base di malta di calce, la cui datazione è estremamente risalente nel tempo. La Commissione ha disposto la geolocalizzazione di tali frammenti che risultano nell'ordine delle centinaia e che indicano con certezza la presenza di pericolose discontinuità nelle terre da costruzione. Sebbene il volume sia complessivamente modesto, tali osservazioni potrebbero indurre il sospetto della presenza di un qualche manufatto relitto o parte di esso, nel corpo o al piede della struttura;
- c. La presenza di una zona di ristagno delle acque alla base dell'argine, che potrebbe avere contribuito alla saturazione del piede della scarpata diminuendone la resistenza meccanica;
- d. L'acclività estremamente elevata delle scarpate del tratto dissestato, per come la si è potuta riscontrare sezionando i rilievi LIDAR ad altissima risoluzione effettuati nel 2015 e nel 2016. Tale acclività è superiore all'angolo di attrito della miscela di sabbia e limo utilizzata come materiale da costruzione, e quindi non in grado di garantire, per tali ripide geometrie, adeguati margini di sicurezza;
- e. La natura dei terreni costituenti la struttura dell'argine, i quali, pur mostrando un aspetto sostanzialmente compatto e apparentemente resistente, sono caratterizzati da una risposta meccanica di tipo fragile e da un elevato grado di erodibilità, che rende l'evoluzione dei meccanismi di collasso particolarmente rapida.

Bibliografia

Aipo, 2020. Lavori urgenti per il miglioramento delle condizioni di stabilità del corpo arginale nei confronti dei fenomeni di filtrazione, fiume Panaro a protezione arginatura stante 32, Comune di Castelfranco Emilia (MO)

Amoroso, S., Comina, C., and Marchetti, D. (2020). "Combined P- and S-Wave measurements by seismic dilatometer test (SPDMT): A case history in Bondeno (Emilia Romagna, Italy)." *Geotechnical Testing Journal*, 43(2), 383–393.

Barco A., Maucieri C., Borin M. (2018). Root system characterization and water requirements of ten perennial herbaceous species for biomass production managed with high nitrogen and water inputs. *Agricultural Water Management* 196 (2018) 37–47.

Bassi S., Fabbri I., 1985 - *L'Istrice nella Vena del Gesso Romagnola*. Ipogea, Boll. Gr. Spel. Faentino 1981-85: 16-17.

Bassi S., Fabbri I., 1987 - *Uccisi gli istrici della Vena del Gesso*. Ipogea, Boll. Gr. Spel. Faentino 1986-87: 15.

Bonelli, S., Brivois, O., and Lachouette, D. (2007). "The scaling law of piping erosion." *18ème Congrès Français de Mécanique, 18ème Congrès Français de Mécanique Grenoble, 27–31 août 2007*, 1–6.

Burenkova, V. V. (1993). "Assessment of suffusion in non-cohesive and graded soils." *Filters in geotechnical and hydraulic engineering.*, 357–360.

Byrne A. W., Sleeman D. P., O'Keeffe J., Davenport J. 2012 - *The Ecology Of The European Badger (Meles Meles) In Ireland: A Review. Biology and environment: Proceedings of the Royal Irish Academy*. Royal Irish Academy 112.

Cardinali, C., & Costa, S. (2020). Rapporto dell'evento meteorologico dal 1 al 3 dicembre 2020. Bologna: Arpae Emilia-Romagna - Struttura Idro-Meteo-Clima.

Carnevali, E. (2017). La pericolosità alluvionale del Fiume Panaro nel tratto a nord di Modena (Emilia-Romagna). Padova: Tesi di laurea Magistrale, Scuola di Scienze, Università degli studi di Padova.

Castaldini D. & Pellegrini M., 1989 – A review of the flow regulation system on the Secchia and Panaro rivers (Modena area, Italy). *Suppl. Geogr. Fis. Dinam. Quat.* II, 35-39.

Casini L., Santolini R., Semeraro G., 1988 - *Uccelli e Mammiferi*. In: AA.VV., *La Valle del Marecchia*. Regione Emilia-Romagna, Bologna.

Celano, M., Foraci, R., Bolchi, L., Selvini, A., Valentini, A., Unguendoli, S., . . . Pizziolo, M. (2020). Rapporto dell'evento meteorologico, delle piene e delle frane occorsi dal 4 all'8 dicembre 2020. Bologna: Arpae Emilia-Romagna - Struttura Idro-Meteo-Clima.

Corsini M.T., Lovari S., Sonnino S. 1995 - *Temporal activity patterns of crested porcupine Hystrix cristata*. *Journal of Zoology (London)* 236:43-54.

Felicioli A., Santini L. - 1994 *Burrow entrance hole orientation and first emergence time in the crested porcupine* *Hystrix cristata* L.: *space-time dependance on sunset*. Polish Ecological Studies 20: 317-321.

Ferri M., 1992 - *Tutela della Fauna e disciplina della caccia e della pesca*. Relazione sullo stato dell'ambiente nella provincia di Modena, vol. 2°: 93-112. Provincia di Modena.

Ferri M., Sala L. 1992 - *Nuove documentazioni sui mammiferi nel modenese*. In: Relazione sullo stato dell'ambiente nella provincia di Modena. Assessorato Difesa dell'Ambiente. Provincia di Modena.

Florentini, M., Moretti, G., & Orlandini, S. (2016). Relazione tecnica sulla verifica funzionale della arginature del fiume Panaro. Modena: Dipartimento di Ingegneria Enzo Ferrari, Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia.

Fontana R. 2019 - *Servizio di realizzazione di indagine conoscitiva finalizzata alla stima delle dimensioni delle unità di popolazione di tasso e istrice nel territorio della Provincia di Modena*. Studio Geco.

Gasperi e Pellegrini (1981), - Note di geologia del comprensorio di pianura della bassa pianura modenese, Povegliano Veronese (VR), 98.

GEO-SLOPE International Ltd. (2015). "Geostudio 2012 v 8.15.1.11236."

Ginanni F., 1774 - *Historia civile e naturale delle Pinete ravennati*. Salomoni, Roma.

Kruuk, 1989 - *The social badger: ecology and behaviour of a group living carnivore* (*Meles meles*). Oxford University Press, Oxford, UK.

Kowalczyk R., Jedrzejewska B., Zalewski A., Jedrzejewski W. 2008 - *Facilitative interactions between the Eurasian badger* (*Meles meles*), *the red fox* (*Vulpes vulpes*) *and the invasive racoon dog* (*Nyctereutes procyonoides*) *in Bialowieza Primeval Forest, Poland*. Can J Zool. 86:1389-1396.

MIT. (2020). Foglio di Condizioni per l'esercizio e la manutenzione, Dida Panaro nel Comune di Modena, numero archivio 1498. Direzione generale per le Dighe e le infrastrutture idriche ed elettriche

Monetti L., Massolo A., Sforzi A., Lovari S. - 2005 *Site selection and fidelity by crested porcupines for denning*. Ethology Ecology & Evolution 17: 149-159.

Mignosa, P., Chiapponi, L., D'Oria, M., Prandi, A., Prost, F., Baldini, S., & Pellegrini, F. (2015). Esecuzione di prove sul modello fisico del manufatto di regolazione della cassa di espansione sul fiume Panaro. AIPo - DICATeA Università degli Studi di Parma.

Mori E., Sforzi A., Di Febbraro M. 2013 - *From the Apennines to the Alps: recent range expansion of the crested porcupine* *Hystrix cristata* L., 1758 (*Mammalia: Rodentia: Hystricidae*) *in Italy*. Italian Journal of Zoology 80: 469-480.

Moratti L., 1987 – Rischi da alluvione derivante dai fiumi Secchia, Panaro ed affluenti in Linee e orientamenti per la predisposizione di piani di Protezione Civile. Modena.

Moratti L. & Pellegrini M., 1972 – Caratteristiche delle alluvioni e dei dissesti verificatisi nei bacini dei fiumi Secchia e Panaro (province di Modena e Reggio Emilia) nel settembre 1972. Atti Soc. Nat. Mat. Di Modena 103 (1972), 183-195.

Mori E., Menchetti M., Balestrieri A. 2015 - *Interspecific den sharing: a study on European badger setts using camera traps*. Acta ethol 18:121-126.

Mori E., Sforzi A., Bogliani G., Milanesi P. 2018 - *Range expansion and redefinition of a crop-raiding rodent associated with global warming and temperature increase*. Climatic Change 150:319-331.

Mori E., Assandri G. 2019 - *Coming back home: recolonisation of abandoned dens by crested porcupine *Hystrix cristata* and European badger *Meles meles* after wood-cutting and riparian vegetation mowing events*. Hystrix, It J Mamm. 30(1):39-43.

Neal E. 1977 - *Badgers*. Blanford Press, Poole.

Orlandini S., Moretti G., Albertson J.D. - 2015 *Evidence of an emerging levee failure mechanism causing disastrous floods in Italy*. Water Resources Research 51: 7995-8011.

Panizza M., Castaldini D., Pellegrini M., Giusti C. & Piacentini D., 2004 – *Matrici geo-ambientali e sviluppo insediativo: un'ipotesi di ricerca*. In *Per un Atlante Storico Ambientale Urbano di MAZZIERI C.* (a cura di), Comune di Modena, Ufficio Ricerche e Documentazione sulla Storia Urbana, Modena, 31-62.

Partheniades E., 1965. *Erosion and deposition of cohesive soils*. JHD ASCE, 91(1), 105-139.

Pigozzi G. 1986 - *Crested porcupine *Hystrix cristata* within badger setts *Meles meles* in the Maremma Natural Park, central Italy*. Saugetierkd Mitt Band 33:261-263.

Progetto Esecutivo fiume Panaro (Provincia di Modena), AIPo, 2018: *Avvio adeguamento strutturale e funzionale del sistema arginale alla portata progettuale di riferimento, tramite interventi di sistemazione morfologica dell'alveo, adeguamento in quota e in sagoma, a valle della cassa al confine provinciale. Intervento di realizzazione per stralci funzionali. Ordinanza N. 8 del 23/6/2015, Allegato 1, codice di intervento n. 11784, come modificata ordinanza N. 2 del 23/2/2106.*"

Progetto CARG n. 201 – Modena (ISPRA, 2009).

Reddi, N., Etherington, T. R., Wilson, G., Montgomery W. I. 2008 - *Badger Survey of Northern Ireland 2007/20*. Report prepared by Quercus and Central Science Laboratory for the Department of Agriculture & Rural Development (DARD) Northern Ireland, UK.

Regione Emilia-Romagna. (2020). *Eccezionali avversità atmosferiche, temporali, neve, vento, mareggiate, frane, piene e i conseguenti allagamenti che si sono verificati nel territorio della regione emilia-romagna a partire dal 1 dicembre 2020*. Relazione preliminare. Regione Emilia- Romagna.

Robertson, P. K. (2009). "Interpretation of cone penetration tests — a unified approach." *Canadian Geotechnical Journal*, 46(11), 1337-1355.

Robertson, P. K. (2016). "Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system — an update." *Canadian Geotechnical Journal*, 53(12), 1910-1927.

Robertson, P. K., and Campanella, R. G. (1983). "Interpretation of cone penetration tests. Part I: Sand." *Canadian Geotechnical Journal*.

- Roper T.J., Tail A.I., Christian S., Fee D. 1991 - *Excavation of three badger (Meles meles) setts*. Zeitschrift Fur Saugertierkd 56: 129-134.
- Roper T. J. 2010 - *Badger*. Harper Collins Publishers. London, 388 pp.
- Sala L., 1987 - *Prima segnalazione di istrice, Hystrix cristata L., in provincia di Modena*. Atti Soc. It. Sci. nat. Museo Civ. Stor. nat. Milano: 203-206.
- Schertler A., Rabitsch W., Moser D., Wessely J., Essl F. 2020 - *The potential current distribution of the coypu (Myocastor coypus) in Europe and climate change induced shifts in the near future*. NeoBiota 58:129-160.
- Silvestri A., 1971 - *L'Istrice (Hystrix cristata L.) in Romagna*. Natura, 62: 412-413.
- Simonini P., Cola S., Bersan S. (2014). *Caratterizzazione geotecnica, meccanismi di collasso e monitoraggio delle arginature*, XXV CNG – AGI- Roma – ISBN .- 978-88-97517-03-0
- Spagnesi M., Toso S., De Marinis A.M. 2000 - *Iconografia dei Mammiferi d'Italia*. Ministero dell'Ambiente e della tutela del Territorio. Istituto Nazionale per la Fauna Selvatica "Alessandro Ghigi".
- Tedaldi G., Scaravelli D., 1993 - *Considerazioni sull'espansione dell'areale dell'Istrice Hystrix cristata L., 1758 nell'Italia settentrionale*. In: Spagnesi M. e E. Randi (Eds.), Atti VII Convegno dell'Associazione A. Ghigi per la Biologia e la Conservazione dei Vertebrati, Suppl. Ric. Biol. Selvaggina, XXI: 253-257.
- Tinelli A., Tinelli P. - 1988 *L'istrice*. Siena. Editori del Grifo.
- Tocchetto G. - 2000 *Indagine sulla struttura di tane di Nutria Myocastor coypus (Molina, 1782) e loro impatto sulle arginature dei corsi d'acqua*. Atti 3° Convegno Faunisti Veneti. Rovigo 14-15 ottobre 2000. Suppl. al Bollettino del Museo Civico di Storia Naturale di Venezia. Vol 51.
- Toso S., Turra T., Gellini S., Matteucci C., Benassi M.C., Zanni M.L. - 1998 *Carta delle vocazioni faunistiche della Regione Emilia-Romagna*. Istituto Nazionale per la Fauna Selvatica. STERNA.
- United States Bureau of Reclamation. (2019). "D-6: Internal Erosion Risks for Embankments and Foundations." *Dam Safety, Best Practices*, (July).
- Zangheri P., 1946 - *Fauna di Romagna: l'Istrice (Hystrix cristata L.) nel versante romagnolo dell'Appennino*. Natura, 37: 57-59.
- Zangheri P., 1957 - *Fauna di Romagna: Mammiferi*. Boll. Zool. XXIV, Torino.
- Zangheri P., 1969 - *Repertorio sistematico e topografico della Flora e Fauna vivente e fossile della Romagna*. Vol. 4, Museo Civico di Storia Naturale di Verona, Memorie fuori serie n. 1.
- Zavalloni D., Castellucci M. 1991 - *Segnalazioni di Istrice (Hystrix cristata L. 1758) in Romagna*. In: Fasola M. (Red.), Atti II Seminario Italiano Censimenti Faunistici dei Vertebrato. Suppl. Ric. Biol. Selvaggina, XVI: 655-658.

Ringraziamenti

Un doveroso ringraziamento agli ingegneri Francesca Ceccato dell'Università di Padova, Federica Zambrini del Politecnico di Milano ed al Vigile del Fuoco Alessandro Bollini del Comando Provinciale di Ravenna che hanno lavorato senza tregua per raggiungere l'obiettivo assegnato dalla Regione Emilia Romagna - Direzione generale cura del territorio e dell'ambiente fornendo un contributo essenziale, altamente specializzato e con i massimi livelli scientifici e professionali.

Si ringraziano inoltre le Amministrazioni, Organizzazioni e gli Enti elencati che hanno fornito, con una solerzia ed efficienza che va ben oltre i loro compiti istituzionali le informazioni necessarie a portare a compimento questo delicato lavoro a servizio della comunità.

Si riportano in ordine alfabetico:

Agenzia per la sicurezza territoriale e la protezione civile della regione Emilia Romagna

Agenzia di Stampa La Pressa

AIPO Agenzia Interregionale per il fiume Po

ARPAE Agenzia regionale prevenzione, ambiente ed energia dell'Emilia-Romagna

CGRA Compagnia Generale Riprese Aeree

CIMA Fondazione

Citynews

Comando Provinciale dei Vigili del fuoco di Modena

Comune di Modena

Comune di Nonantola

Comune di Castelfranco Emilia

Dipartimento della Protezione Civile Nazionale

Direzione Regionale dei Vigili del fuoco Emilia Romagna

Direzione Centrale per l'Emergenza ed il Soccorso tecnico ed antincendio boschivo

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale

Ministero delle infrastrutture e dei trasporti - Direzione generale per le dighe e le infrastrutture idriche ed elettriche

Regione Emilia Romagna

Regione Emilia Romagna - Direzione generale cura del territorio e dell'ambiente

Politecnico di Milano

Provincia di Modena

Università degli studi di Modena e Reggio Emilia

Università degli Studi di Padova