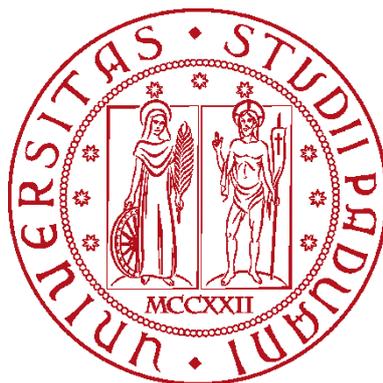


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE

Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in Ingegneria Civile



TESI DI LAUREA TRIENNALE

**PRIME VALUTAZIONI SUGLI EFFETTI DEL CANNETO
NELLA SICUREZZA DELLE STRUTTURE ARGINALI
TRAMITE TECNICHE DI INDAGINE IN SITO E IN
LABORATORIO**

Relatrice: Ing. Giorgia Dalla Santa

Laureanda: Chiara Locallo

Matricola: 2012311

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

Indice

Introduzione	1
1. Gli argini e le relative funzioni	3
1.1 Componenti e sezioni caratteristiche degli argini	5
1.2 Regimi di filtrazione	8
1.3 Meccanismi di rottura arginale	10
2. Effetto della vegetazione sugli argini	15
2.1 Le radici della vegetazione nella stabilità arginale	18
2.2 Effetti delle tane di animali negli argini	23
2.3 Gestione e manutenzione della vegetazione negli ambienti arginali	26
3. Inquadramento del sito test	29
3.1 Introduzione al Fiume Tagliamento	31
3.2 Arundo donax	34
3.3 Raccolta dei campioni di terreno dell'argine e analisi granulometrica	40
3.4 Campagne di volo con il drone	45
4. Risultati analisi granulometrica	47
4.1 Risultati dell'aereo-fotogrammetria e confronto con foto aeree storiche	59
Conclusioni	73
Bibliografia	77
Sitografia	80

Introduzione

Oggi giorno, il fenomeno delle inondazioni rappresenta uno dei più distruttivi pericoli ambientali che interessano il territorio non solo in Italia ma anche a livello mondiale. Questi eventi alluvionali devastanti sono sempre più frequenti a causa dei cambiamenti climatici e della variazione dei regimi idrologici, dell'aumento di suolo urbanizzato e dell'espansione in aree soggette a rischio idraulico. Anche a causa di questi avvenimenti, negli ultimi trent'anni sono state colpite da inondazioni costiere o fluviali circa 90 milioni di persone e alcuni studi prevedono che entro il 2050 il 15% della popolazione mondiale vivrà in aree soggette a inondazioni (EUCOLD, 2018). Queste previsioni sono preoccupanti per il territorio, in quanto le inondazioni recano danni a strutture e beni, e possono avere conseguenze anche sulla salute della popolazione.

Tra i sistemi per la gestione e mitigazione del rischio idraulico derivante dalle inondazioni rientrano le strutture arginali, il cui obiettivo è quello di difendere il territorio abitato dalle piene fluviali entro un livello d'acqua corrispondente al tempo di ritorno delineato da progetto (in genere per tempi di ritorno di 100-200 anni). La progettazione e costruzione di sistemi arginali nel corso della storia ha permesso di rendere fruibili territori in cui le inondazioni periodiche dovute alle piene nei fiumi, compromettevano le normali attività antropiche. Il fatto che tali opere siano sottoposte alle piene e quindi svolgano la loro funzione di protezione del territorio circostante per periodi di tempo limitati, porta generalmente ad una minore attenzione sulla sicurezza arginale: di conseguenza, la loro progettazione e successivo monitoraggio necessitano di attente valutazioni, errori di progettazione e/o danni alla struttura possono non soddisfare a pieno le prestazioni geotecniche ed idrauliche.

La vegetazione nel contesto arginale è parte integrante dell'ecosistema ripariale e gioca un ruolo importante per la conservazione di tali ambienti. Proprio per la sua naturale presenza in questi luoghi, spesso il ruolo della vegetazione viene trascurato o poco considerato dal punto di vista ingegneristico, ma può avere conseguenze anche negative per la sicurezza arginale. La vegetazione attraverso l'apparato radicale rinforza i sedimenti fluviali e il suolo, contribuendo ad aumentare la resistenza all'erosione superficiale con ulteriore coesione e permettendo una migliore stabilità dei terrapieni (B. Abernethy et al., 2001). D'altra parte, in determinate condizioni le radici possono creare una via preferenziale per la filtrazione dell'acqua nel corpo arginale, portando a conseguenti danneggiamenti idraulici dell'opera di difesa. La vegetazione possiede inoltre un altro importante aspetto, che è quello di essere un'attrattiva per gli animali, in quanto riesce a creare un habitat ideale dove possono vivere e rifugiarsi. La presenza di tane di animali negli argini rappresenta un serio problema per la stabilità arginale. Per mezzo dell'asportazione di terreno durante la costruzione delle tane da parte degli

animali, il comportamento idraulico subisce modifiche, soprattutto durante gli eventi di piena, poiché i cunicoli favoriscono la penetrazione rapida dell'acqua rendendo molto più veloce la saturazione del terrapieno, e aumentando di conseguenza il rischio di rottura arginale.

Oltre ad una prima ricerca in letteratura sulla funzione delle strutture arginale nel territorio e le possibili interazioni con la vegetazione, questo studio è stato supportato con un lavoro su campo, prendendo come sito test un settore di corpo arginale del fiume Tagliamento, in prossimità della località di San Giorgio al Tagliamento (VE). Sono state infatti svolte due campagne di indagine tramite volo con il drone, per eseguire un rilievo della geometria dell'argine e della distribuzione della vegetazione nell'area di studio, combinate con campagne di sondaggio del terreno, mediante prelievo di carote dal rilevato arginale e successiva caratterizzazione in laboratorio tramite analisi granulometrica. Grazie anche a queste tecniche di indagine, la tesi si è focalizzata principalmente su tre aspetti:

- la ricerca degli effetti meccanici e idrologici della vegetazione sulla stabilità e sicurezza arginale, con particolare attenzione alla tipologia di canneti presenti nell'argine di studio;
- l'utilizzo delle foto aeree ottenute con il volo del drone, come strumento di analisi speditiva per la determinazione di aree con medesime caratteristiche e necessità, attraverso l'identificazione di un specifico target quale la vegetazione;
- l'analisi della specie vegetale costituente il canneto del sito test, come indicatrice di un determinato tipo di terreno, attraverso la comparazione delle analisi granulometriche di terreni che presentano o meno la presenza di canna.

Capitolo 1

1. Gli argini e le relative funzioni

Gli argini sono strutture longilinee in terra sopraelevate, che si sviluppano lungo coste e corsi d'acqua dove, attraverso l'innalzamento delle sponde, consentono di aumentare la portata d'acqua che transita e limitare il rischio di inondazione contenendo il corso d'acqua all'interno delle arginature. Queste opere di difesa vengono progettate in modo tale da preservare la loro integrità nelle condizioni normali di esercizio e in modo che siano in grado di resistere e proteggere il territorio circostante da fenomeni alluvionali, fluviali e costieri.

Affinché un argine mantenga la funzione strutturale per cui è stato progettato, ogni componente che costituisce il corpo arginale deve garantire determinate funzioni, tra cui (CIRIA et al., 2013; Simonini et al., 2014):

- *impermeabilità*: funzione fondamentale di un'opera arginale, che deve contenere i moti di filtrazione attraverso il corpo arginale e nel terreno di fondazione;
- *filtrazione*: fenomeno che genera forze di volume che, nei terreni granulometricamente eterogenei possono indurre la migrazione della componente più fine del terreno stesso (erosione interna), causando un incremento della permeabilità locale e riducendo la resistenza meccanica. Inoltre, le forze di filtrazione possono innescare instabilità locali;
- *drenaggio*: sistemi con la funzione di limitare elevate pressioni dell'acqua nella zona lato campagna per prevenire crolli locali ed erosione interna. Tali sistemi creano una via preferenziale per il flusso di filtrazione verso zone dove l'acqua può essere raccolta e allontanata senza danni;
- *stabilità*: deve essere garantita in ogni condizione di esercizio, sia in condizioni di magra che di piena del fiume. Si fornisce progettando ogni componente del sistema arginale con adeguate caratteristiche di resistenza, in modo tale da evitare crolli parziali o profondi, che provocano l'instabilità meccanica della struttura arginale;
- *protezione esterna*: interventi atti a salvaguardare la superficie esterna degli argini dai vari tipi di azioni esterne a cui sono sottoposti (impatto delle onde e dei filoni di corrente, azione degli animali, attività umane ecc.), che generano effetti meccanici e/o idraulici capaci di provocare l'erosione del corpo arginale.

Oltre ad assicurare le caratteristiche sopra elencate, un corpo arginale deve risultare relativamente deformabile, per non generare rilevanti stati fessurativi in caso di cedimenti, e deve essere

sufficientemente resistente ai carichi sottoposti da eventi di tempesta e alluvione essendo che, per la maggior parte della loro vita utile, gli argini non sono sollecitati alla capacità massima di progetto (CIRIA et al., 2013; Simonini et al., 2014).

In fase di progettazione di un rilevato arginale, è importante considerare anche altri fattori che possono condizionare il comportamento dell'argine, come l'ubicazione rispetto al corso d'acqua, le caratteristiche dei terreni locali, sia di fondazione che del corpo arginale, che possono risultare non sempre idonei. Inoltre, dato che nella maggior parte dei casi gli argini sono strutture costruite nel corso di decenni e talvolta secoli, essi sono stati spesso realizzati utilizzando materiali diversi o addirittura non idonei per questo tipo di interventi, materiali che possono condizionare il corretto comportamento della struttura nel tempo, tanto che spesso possono richiedere interventi di modifica e rinforzo.

In base alle esigenze da soddisfare, gli argini possono essere costruiti lungo entrambe le sponde, posti a diretto contatto con il corso d'acqua oppure con l'interposizione di uno spazio libero tra la riva del fiume e l'argine stesso. Nel primo caso l'argine è detto *in frodo* e presenta la sponda con un'unica pendenza, mentre nel secondo caso, dove la struttura arginale risulta arretrata rispetto il fiume per comprendere parte della pianura alluvionale, quest'area viene per l'appunto detta *golena*. Questa tipologia consente di avere una maggiore capacità di invaso delle acque durante gli eventi alluvionali inoltre, in condizioni non di piena, la golena può essere adibita ad uso agricolo. L'arretramento degli argini può inoltre promuovere il ripristino delle pianure alluvionali perché la loro posizione influisce direttamente sulla quantità e sulla distribuzione degli habitat ripariali e acquatici (CIRIA et al., 2013).

1.1 Componenti e sezioni caratteristiche degli argini

La progettazione di una struttura arginale deve essere svolta in funzione di diversi aspetti, tra i quali il regime idraulico del corso d'acqua e del terreno di fondazione, i terreni disponibili per la costruzione e le relative caratteristiche geotecniche, l'altezza dell'argine, i vincoli presenti nel territorio in cui si va ad operare.

Di conseguenza, esistono diverse tipologie di sezioni arginali, con diverse entità di costo e facilità di costruzione, e la scelta in fase progettuale deve considerare il contesto in cui si va ad operare, le prestazioni da garantire in diverse situazioni di carico ma anche effettuare considerazioni ambientali ed economiche.

Gli argini sono generalmente costituiti di terra ma possono essere completati con sovrastrutture, strutture a pelo d'acqua e interne, utili a potenziare il sistema complessivo. Per la realizzazione degli argini in terra, per quanto possibile, si preferisce utilizzare i materiali che si trovano in loco, che possono variare dall'argilla alla ghiaia, piuttosto che reperire materiali da scavo con caratteristiche migliori, che necessitano di essere trasportati per distanze più lunghe, aumentando quindi i costi.

Considerando la struttura interna di un argine, essi si possono suddividere in due grandi categorie, omogenei e zonati, in base alla combinazione di materiali impiegata per formare il corpo del rilevato. Gli argini omogenei sono la tipologia più comune e presentano una sezione omogenea, composta generalmente da un unico materiale o da terreni miscelati, che presentino opportune caratteristiche di impermeabilità e coesione, come ad esempio argille e limi. Gli argini zonati vengono realizzati quando il materiale disponibile per la costruzione dell'argine risulti essere troppo permeabile e non idoneo, come sabbia a ghiaia. In questa tipologia, l'impermeabilità viene garantita inserendo elementi come nuclei poco permeabili, maschere, teli geosintetici o rivestimenti impermeabili.

La struttura arginale è composta da diversi elementi, ognuno con una funzione specifica per garantire l'integrità dell'argine. La Figura 1 mostra una generica sezione arginale con evidenziati gli elementi principali (CIRIA et al., 2013; Simonini et al., 2014):

- *terreno di fondazione*: situato al di sotto dell'argine, le cui caratteristiche dipendono da resistenza e permeabilità. Ha la funzione di filtrazione ed impermeabilità, di supportare il peso dell'argine e di fornire stabilità per l'argine stesso;

- *fianchi del rilevato arginale*: generalmente composti da materiali granulari o coesivi, oppure più comunemente sono realizzati con il materiale disponibile in loco. Hanno la funzione di diminuire la filtrazione, e provvedere alla stabilità;
- *corpo arginale*: detto anche nucleo, è necessario quando il materiale utilizzato per i fianchi del rilevato non presenta adeguate caratteristiche idrauliche. Di conseguenza, il corpo ha la funzione di incrementare la resistenza all'acqua e ai regimi di filtrazione;
- *rivestimento spondale*: è l'interfaccia tra ambiente esterno e argine, utile a garantire la stabilità e la resistenza all'erosione, specialmente lato fiume. I rivestimenti più comuni sono in erba, roccia o geotessili;
- *zone di filtro*: elementi in materiale geotessile o granulare, posizionati all'interno della sezione trasversale al fine di favorire la filtrazione;
- *sistemi di drenaggio*: opere come materassi drenanti, inseriti dietro il nucleo impermeabile o in corrispondenza del piede dell'argine lato campagna, con la funzione di convogliare via le acque di filtrazione e incrementare così lo stato tensionale efficace.
- *barriere impermeabili*: alternativa ai sistemi di drenaggio, atti quindi a ridurre la filtrazione attraverso il suolo permeabile e l'argine.



Figura 1: elementi che compongono una generica sezione arginale (CIRIA et al., 2013)

A seconda di diversi fattori, tra cui, l'ambiente, le caratteristiche di fondazione e di riempimento, l'altezza del terreno disponibile e il carico da supportare, la geometria degli argini può assumere varie forme. Generalmente, la sezione arginale assume una forma trapezoidale semplice, con una pendenza delle sponde che dipende dal terreno che costituisce l'argine e con altezza stabilita dal livello d'acqua previsto.

In contesti più grandi, l'argine può essere completato con elementi detti berme, che consistono in estensioni di terreno sia lato fiume che campagna, con lo scopo di stabilizzare il rilevato riducendo la pendenza media, di ridurre l'azione erosiva in caso di sormonto della cresta dell'argine, allungare i

percorsi di filtrazione in fondazione e contenere la linea di saturazione del corpo arginale (Simonini et al., 2014). La Figura 2 riporta alcuni esempi di sezioni arginali, sia omogenei che zonati.

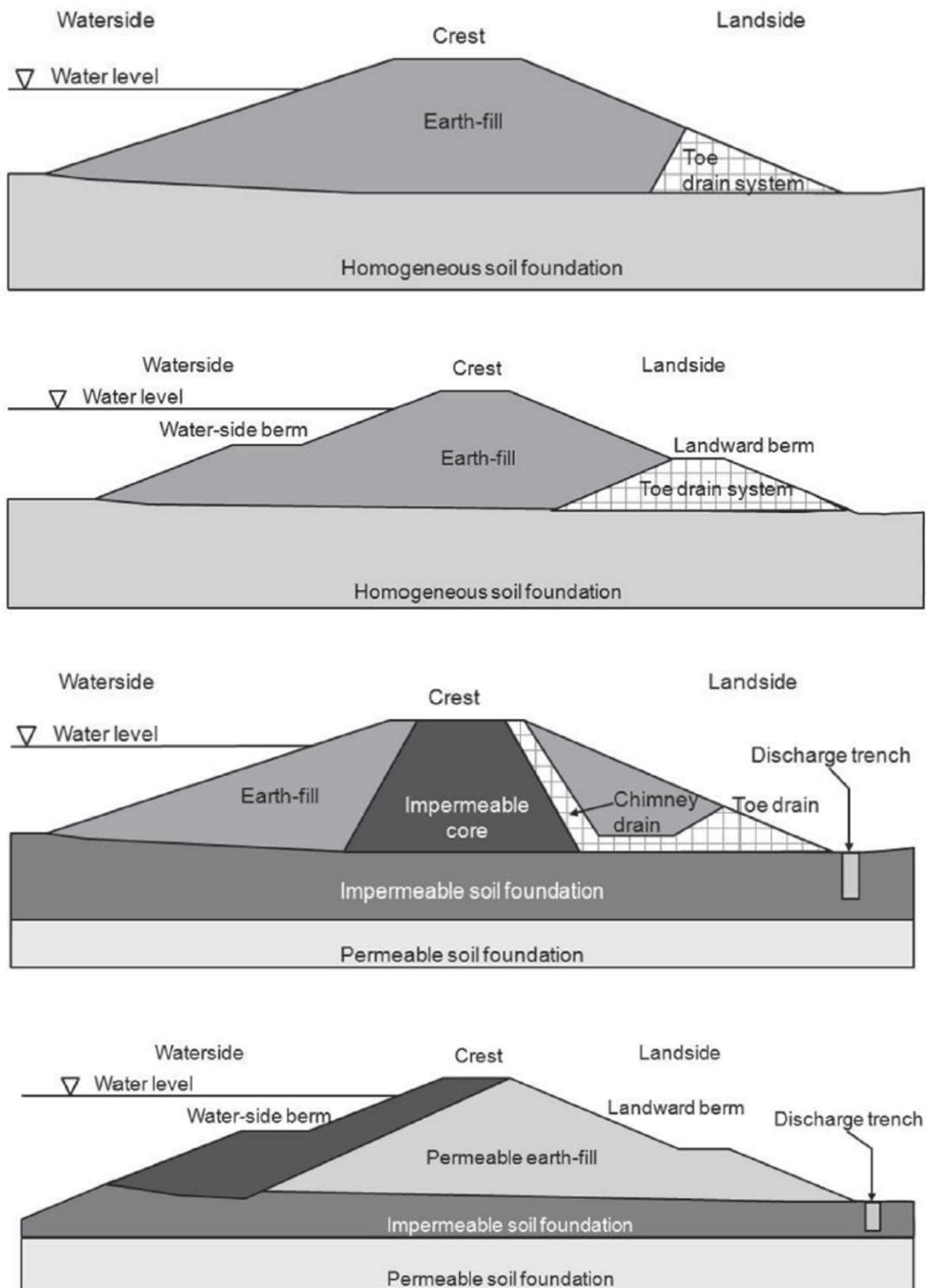


Figura 2: esempi di sezioni di argini omogenei e zonati (CIRIA et al., 2013)

1.2 Regimi di filtrazione

Il fenomeno di filtrazione consiste nel movimento d'acqua attraverso l'argine o lo strato di fondazione e può verificarsi come infiltrazione o sotto infiltrazione. La filtrazione avviene nel momento in cui vi è un gradiente di quota piezometrica che stabilisce la direzione del moto, e può essere generata da livelli elevati del corso d'acqua, quindi aver luogo dall'esterno dell'argine a causa del dislivello fra la piena e il terreno a lato campagna, oppure può generarsi dall'interno dell'argine a causa di perdite da tubazioni corrose e prive di un adeguato materiale isolante (CIRIA et al., 2013; Martire, 2015). Oltre al verificarsi di queste condizioni, la filtrazione può essere peggiorata da alcuni fattori, quali (CIRIA et al., 2013):

- radici di alberi morti o morenti che si stanno decomponendo all'interno dell'argine e che quindi forniscono un percorso preferenziale per la filtrazione;
- materiali permeabili utilizzati per la costruzione degli argini nella fondazione dell'argine (infiltrazioni sotterranee);
- tane e buche scavate da animali, che possono fornire un percorso di infiltrazione più breve attraverso l'argine;
- fessure nello strato impermeabile del pendio;
- perforazioni nel manto argilloso causate da attività come il dragaggio o lo scavo; assestamento irregolare del terreno intorno ad elementi rigidi (tubi o altre strutture passanti come chiavi, prese d'acqua ecc.) dell'argine in terra. Questo aumenta la vulnerabilità dell'argine all'interfaccia tra il terreno e l'elemento rigido.

La filtrazione dell'acqua nei mezzi porosi, in questo caso nei rilevati arginali, può dare origine a diversi problemi di tipo ingegneristico tra cui l'erosione, il sifonamento, l'instabilità, capaci di compromettere l'integrità degli elementi o portare al collasso. I fenomeni di instabilità, nella maggior parte dei casi, hanno origine da moti di filtrazione, che si possono manifestare come fenomeni localizzati al piede del lato campagna, detti "fontanazzi", per poi espandersi causando impatti più consistenti come cedimenti delle sponde arginali. I casi di rotture arginali causate dal fenomeno dell'infiltrazione sono principalmente riconducibili al sifonamento (Martire, 2015).

Il moto di filtrazione attraverso un mezzo poroso è descritto da un'equazione lineare detta Legge di Darcy:

$$v = ki \quad (1)$$

dove:

k è il coefficiente di permeabilità, legato al tipo di materiale costituente il mezzo poroso.

Rappresenta la capacità del terreno nel consentire il flusso;

i è il gradiente idraulico, e rappresenta l'energia dissipata per percorso unitario.

Per studiare i problemi di filtrazione si può far riferimento al reticolo idrodinamico, schema composto da linee equipotenziali e linee di flusso, ortogonali tra loro e relative ad uno specifico moto di filtrazione, per poter definire le condizioni energetiche e di pressione in ogni punto del campo di moto. Per sviluppare tale schema è necessario definire a priori le caratteristiche che descrivono il problema, tra cui le proprietà del terreno, la differenza di energia potenziale che genera il moto di filtrazione, la permeabilità del materiale o la differenza di permeabilità nei materiali idraulicamente anisotropi, la tipologia di sezione arginale, le condizioni di moto permanente o vario e di flusso confinato o non confinato, essendo che il reticolo idrodinamico cambia a seconda delle condizioni del caso in esame (Simonini et al., 2014). Ad esempio, al crescere dell'anisotropia tra la permeabilità orizzontale e verticale del terreno di riempimento dell'argine, la linea di saturazione (cioè la superficie libera del moto filtrante) si sposta verso il paramento lato campagna, invece all'aumentare dell'anisotropia tra la permeabilità dell'argine e il terreno di fondazione, la porzione di paramento del lato campagna interessata dalla fuoriuscita d'acqua si riduce per via dell'abbassamento della linea di saturazione (Simonini et al., 2014)..

Queste considerazioni sulla variazione del reticolo idrodinamico a seconda dei coefficienti di permeabilità valgono sia per argini omogenei che zonati, anche se la presenza di regimi di filtrazione in quest'ultimi, essendo progettati con un nucleo o una maschera impermeabile, destano preoccupazioni significative e possono essere dovuti ad errori di progettazione.

1.3 Meccanismi di rottura arginale

Il fallimento di una struttura arginale avviene con il manifestarsi di una rottura o di un collasso, che portano conseguentemente all'incapacità del rilevato di soddisfare le prestazioni per cui è stato progettato. Le rotture arginali si possono presentare sia in fase di costruzione, con instabilità del corpo arginale e del piede di fondazione in presenza di terreni poco permeabili e leggermente sovraconsolidati, sia in fase di esercizio, attraverso collasso idraulico o strutturale, che comportano l'impossibilità di impedire l'inondazione del territorio circostante. La rottura idraulica si verifica con l'ingresso di acqua nell'argine, con flusso, tracimazione o sormonto e senza danno per il rilevato stesso, mentre la rottura strutturale è dovuta da un'effettiva perdita di resistenza degli elementi che compongono l'argine e che non sono più in grado di garantire le proprie prestazioni (Simonini et al., 2014). I due tipi di rotture possono essere anche conseguenza uno dell'altro, ad esempio il sormonto del rilevato può portare all'erosione del paramento lato campagna e quindi alla rottura, in altri casi la presenza di fessure nel rilevato o nel terreno di fondazione, possono generare infiltrazioni attraverso l'argine e portare ad un'erosione interna (CIRIA et al., 2013).

Con riferimento all' EC7 2004 e alle NTC 2018, si può distinguere la rottura allo stato limite d'esercizio (SLE), dovuta a livelli tollerabili di degrado e danneggiamento derivanti da azioni di vario tipo (agenti esterni, fisico, chimiche, temperature, vegetazione, animali, azione umana) e allo stato limite ultimo (SLU), raggiunto di una condizione ultima a seguito del forte degrado degli elementi della struttura arginale. Risulta importante quindi intercettare in tempo i segni di degrado, come fessure, cavità, scoscendimenti locali, per poter agire con interventi mirati in modo da evitare il deterioramento e raggiungimento del collasso del tipo SLU, anche se, in molti casi, questi collassi avvengono ed evolvono molto rapidamente, come l'apertura di una breccia durante un evento di piena. Per quanto riguarda l'identificazione delle rotture o del danno arginale, è possibile individuare alcune categorie (Simonini et al., 2014):

- *erosione esterna*: erosione spondale lato fiume dovuta all'azione della corrente in alveo, o provocata dal moto ondoso in caso di sormonto dell'argine;
- *erosione interna*: provocata dalla formazione di condotti di acqua nel terreno di rilevato o di fondazione, che creano la migrazione interna delle particelle di terreno (a tale tipo di erosione possono contribuire anche gli animali scavando tane all'interno o al piede del rilevato);
- *instabilità del paramento arginale*: indotta dai regimi di filtrazione che possono rendere labile il paramento interno e/o esterno;
- *instabilità per liquefazione statica e sifonamento*: si può presentare al piede o al lato campagna dell'argine ed è indotta dai regimi di filtrazione nel terreno di fondazione;

- *instabilità del terreno di fondazione e dell'argine*: dovuto per sottopressione idraulica al piede lato campagna.

L'erosione esterna è un'erosione superficiale che può interessare sia il lato alveo che campagna dell'argine ed è dovuta principalmente dall'azione di correnti, onde e maree contro la superficie del terrapieno, ma anche l'azione di vegetazione legnosa, animali, umani, può contribuire a questo tipo di danneggiamento, poiché sono in grado di generare lo spostamento di parte del materiale (CIRIA et al., 2013). In genere, questo fenomeno si verifica quando il materiale costituente l'argine non è sufficientemente resistente allo sforzo di taglio indotto dal flusso idraulico, con conseguente riduzione del volume di terreno formante il rilevato, o di sottoescavazione alla base della scarpata (undercutting), che rendono la struttura più debole e soggetta a crolli (CIRIA et al., 2013; Simonini et al., 2014). L'erosione può essere stimata mediante un'equazione empirica del tipo (Simonini et al., 2014):

$$E_{rf} = k_d(\tau_b - \tau_c)^a \quad (2)$$

dove:

E_{rf} è la velocità di erosione fluviale unitaria;

τ_b la tensione tangenziale esercitata dalla corrente sul contorno;

a è un esponente empirico, generalmente assunto pari a 1.0;

τ_c e k_d sono il coefficiente di erodibilità e lo sforzo tangenziale critico, entrambi dipendenti dalla natura del terreno.

Alcune situazioni in cui si può verificare l'erosione esterna avvengono quando la tensione tangenziale sul contorno bagnato, per effetto della turbolenza della corrente in alveo, supera il limite di erodibilità del terreno presente, con conseguente erosione del piede dell'argine, come mostrato alla Figura 3 (Simonini et al., 2014). In altri casi, l'erosione esterna può verificarsi con l'apertura di una bocca di rotta arginale a seguito del sormonto dell'argine (overtopping and overflowing).

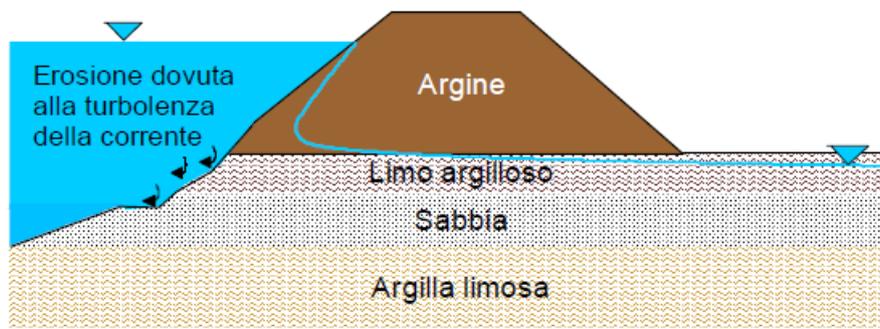


Figura 3: esempio erosione esterna argine lato alveo (Simonini et al., 2014)

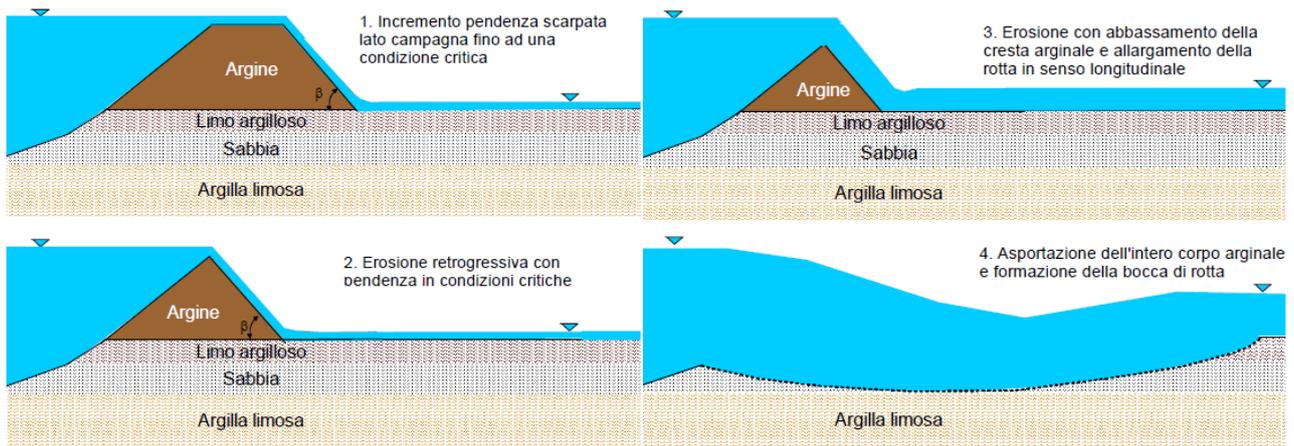


Figura 4: erosione esterna argine lato campagna (Simonini et al., 2014)

L'erosione interna è un meccanismo che avviene dall'interno dell'argine, generato dalle forze idrodinamiche di filtrazione che trasportano e allontanano le particelle di terreno fini, attraverso il corpo arginale o lo strato di fondazione (Simonini et al., 2014). In questo processo, il trasporto di particelle di terreno forma dei canali che minano e indeboliscono la struttura arginale, aumentando il rischio di rottura in caso di infiltrazioni incontrollate (CIRIA et al., 2013).

Le infiltrazioni entro un terrapieno portano ad un'incapacità dell'argine di esercitare la funzione di impermeabilità, aumentano il rischio di scivolamento e le pressioni di sollevamento al di sotto della punta dell'argine generando instabilità, indeboliscono i materiali di riempimento, portando anche a fratture (CIRIA et al., 2013). Il fenomeno della filtrazione viene espresso attraverso la forza di filtrazione, che assume la seguente forma:

$$S_f = \rho g i = \gamma_w i \quad (3)$$

dove:

ρ è la densità del fluido;

g l'accelerazione di gravità;

γ_w il peso specifico dell'acqua;

i il gradiente idraulico.

La forza di filtrazione è influenzata principalmente dagli strati di terreno più o meno permeabili, ma la presenza di alcuni elementi in determinate condizioni, come fessure, tane di animali, vegetazione con radici che penetrano in profondità, strutture antropiche, possono aggravare il fenomeno di filtrazione (Simonini et al., 2014).

Esistono diversi meccanismi di erosione interna (Simonini et al., 2014):

- *erosione retrogressiva*: tale fenomeno ha luogo nel punto di uscita del flusso e l'asportazione delle particelle avviene in forma retrogressiva sviluppando un passaggio continuo quando il

gradiente eccede quello di flottazione del terreno. Questo meccanismo vale anche per sifonamento (piping);

- *erosione concentrata*: si manifesta lungo vie preferenziali preesistenti, come fessurazioni presenti o vuoti, quando la forza di trascinamento dell'acqua supera il valore critico;
- *erosione di contatto*: si verifica al contatto tra un terreno a grana fine e uno a grana grossa quando sono presenti fenomeni di dilavamento del terreno fine a seguito delle forze di filtrazione dirette parallelamente alla stratificazione;
- *erosione per migrazione* (suffosion): identifica la migrazione delle particelle fini entro la matrice grossolana nei terreni intrinsecamente instabili.

Al fine di evitare l'erosione interna, la filtrazione attraverso la struttura arginale è accettabile finché il suo effetto è ridotto: nel momento in cui le portate risultano eccessive, l'erosione si innesca, generando una cavità dove le pressioni neutrali aumentano, fino a aprire una rotta nell'argine (Simonini et al., 2014).

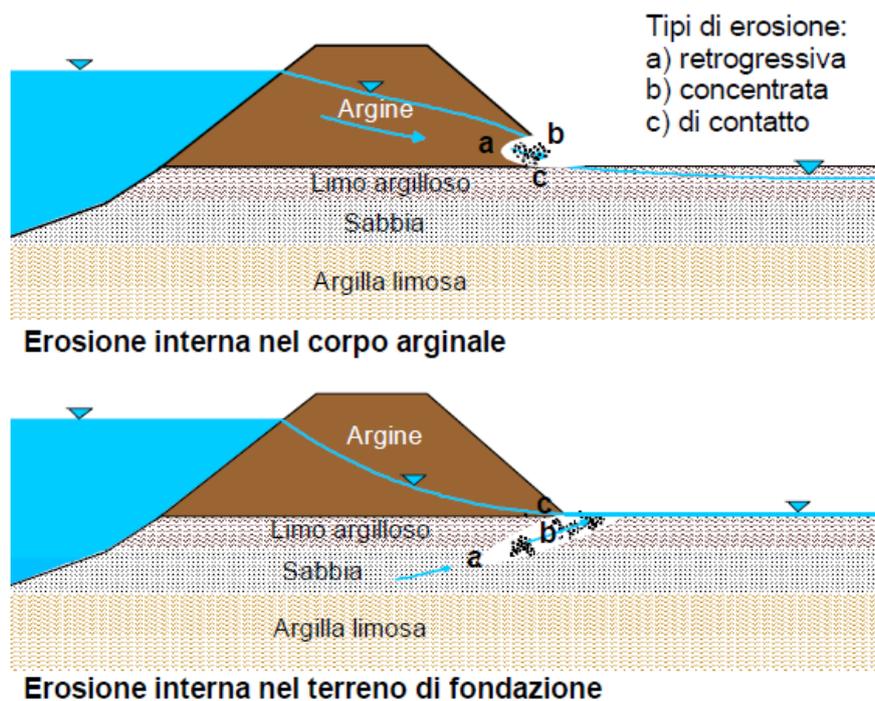


Figura 5: esempi di erosione interna argine (Simonini et al., 2014)

L'instabilità del paramento arginale interno ed esterno si presenta nel momento in cui le forze attive del movimento delle particelle del terreno superano le forze resistenti, generando scivolamenti lungo una superficie di taglio della struttura arginale (CIRIA et al., 2013). I fattori che causano l'instabilità delle scarpate arginali possono essere di vario tipo, tra cui: la pressione dell'acqua e i regimi di filtrazione, la vegetazione e lo sviluppo delle radici, la perdita delle proprietà meccaniche dei materiali, gli animali e lo sviluppo di cunicoli, l'attività antropica, l'effetto di carico e scarico

inappropriato, le sollecitazioni sismiche e la liquefazione sismica, l'effetto dell'erosione (Simonini et al., 2014).

L'instabilità può interessare sia il fianco lato fiume che il fianco lato campagna dell'argine e in entrambi i casi, la causa principale di innesco è dovuta dal regime di filtrazione, ma a seconda del versante, può essere influenzata anche dagli altri fattori sopra elencati.

La sponda lato alveo in genere raggiunge l'instabilità per via dell'oscillamento nel tempo del livello di piena del corso d'acqua, a causa delle forze di filtrazione che si instaurano nella struttura arginale a seguito della diminuzione del livello idrico (CIRIA et al., 2013). Tale situazione può essere peggiorata in presenza di fessure, sottoescavazioni dovute all'erosione generata dall'azione delle onde, della corrente e dalla filtrazione (Simonini et al., 2014). L'instabilità lato campagna è dovuta principalmente alla ripidità del pendio e alle proprietà meccaniche del terreno costituente l'argine, che nel tempo sotto azione degli agenti atmosferici e alle variazioni stagionali, può essere danneggiato, ammorbidito, fessurato ed essere sede di moti di filtrazione, tanto da ridurre il fattore di sicurezza e portare al collasso della scarpata (Simonini et al., 2014).

Il fenomeno dell'instabilità può essere descritto attraverso le condizioni di equilibrio limite, imponendo le adeguate considerazioni, noti i regimi di filtrazione nella fase finale della piena e le caratteristiche del materiale che compone l'argine (Simonini et al., 2014).

L'instabilità si può presentare con meccanismi diversi, come scorrimento rotazionale o traslazionale, l'assessamento, il ribaltamento, il sollevamento o la liquefazione, a seconda delle componenti arginali coinvolte e alla geometria del manufatto.

Altri meccanismi di instabilità legati allo strato di fondazione, legato alla fase di costruzione a seguito del dissipamento delle sovrappressioni, e il sifonamento statico, che si manifesta con fontanazzi durante gli eventi di piena, non sono correlati all'effetto della vegetazione.

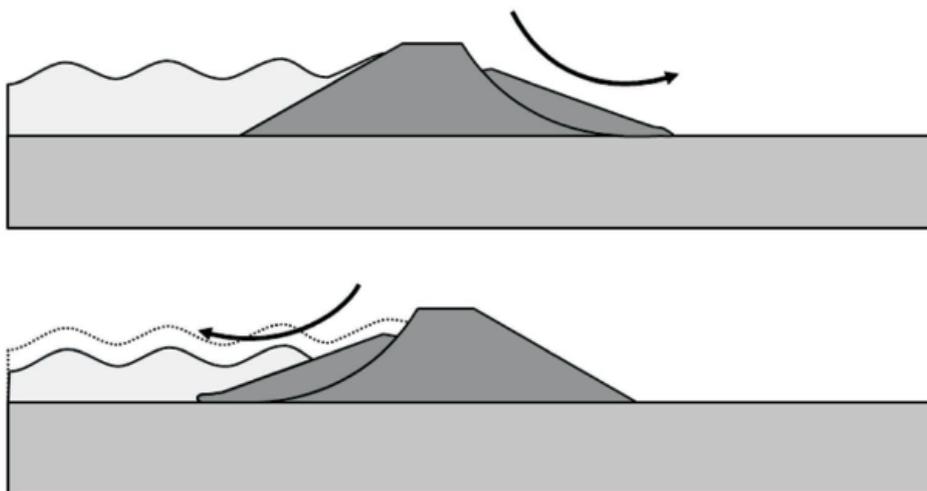


Figura 6: esempi di instabilità del paramento lato alveo e campagna (CIRIA et al., 2013)

Capitolo 2

2. Effetto della vegetazione sugli argini

La vegetazione nel contesto fluviale e delle opere di difesa arginali è parte fondamentale dell'ecosistema e del paesaggio e gioca un ruolo fondamentale per la conservazione di questi ambienti, anche se in alcuni contesti, le problematiche idrauliche possano negare grandi quantità di vegetazione (Nelson R. Nunnally et al., 1987). La vegetazione in questi habitat può essere naturale o piantata per mano artificiale, e può essere distribuita nelle sponde dei canali o argini in frodo, dove è comune trovare vegetazione erbacea o arbustiva flessibile soggetta a diversi livelli idrometrici durante l'anno, mentre negli argini in arretrato con piana inondabile (golena), si può trovare vegetazione arborea rigida che interagisce con la corrente solo quando la portata ha un tempo di ritorno significativo (Solari L. et al., 2014).

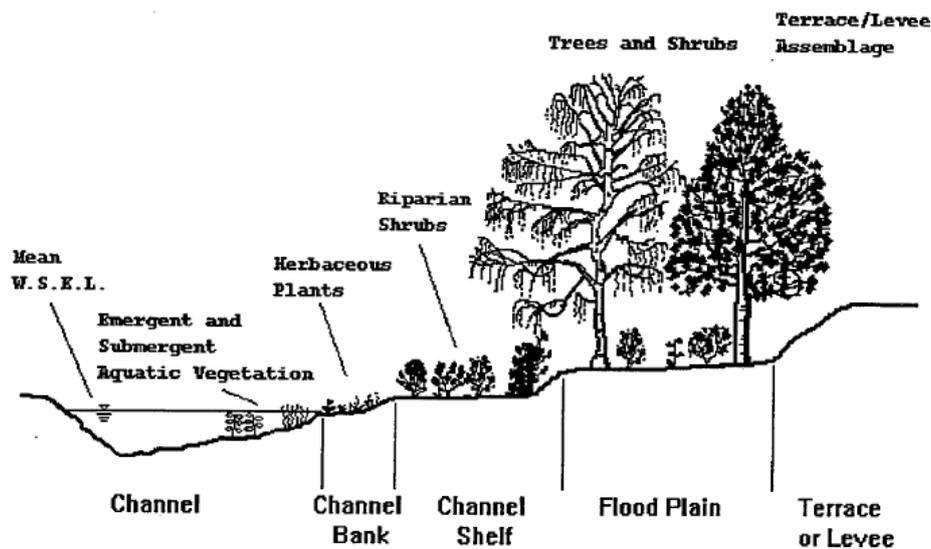


Figura 7: esempio di distribuzione delle diverse tipologie di vegetazione (Solari L. et al., 2014)

La vegetazione in questi contesti generalmente è in grado di aumentare la stabilità e la solidità delle sponde dei corsi d'acqua e degli argini, attraverso il contributo di effetti meccanici, idraulici e idrologici, dove questi effetti sono molto variabili in funzione alle condizioni della vegetazione (tipologia, età, ambiente di crescita, forza delle radici, clima) (Guo-An Yu et al., 2020; Jiana E. Stover et al., 2018). Il contributo meccanico della vegetazione sulla stabilità dei terrapieni è dovuto principalmente al rinforzo delle radici che aggiungono un ulteriore effetto di coesione al terreno, aumentano la resistenza al taglio del suolo e la resistenza al flusso, diminuendo la velocità della corrente nelle sponde dei canali (Guo-An Yu et al., 2020; Zegeye et al., 2018). La vegetazione, grazie

al rinforzo fornito dalle radici, è capace di controllare la formazione di fessure da tensione e l'erosione del terreno, difatti studi sugli effetti della vegetazione ripariale nella stabilità dei terrapieni, come lo studio (Guo-An Yu et al., 2020), hanno confermato che le radici delle piante ripariali hanno abbassato la frequenza del crollo degli argini, riducendo notevolmente il volume totale dell'erosione degli argini. La vegetazione assume quindi un compito importante per assicurare la stabilità delle sponde e degli argini, andando a diminuire le forze motrici agenti nel terreno. La stabilità degli argini può essere caratterizzata attraverso il Fattore di Sicurezza FS, che assume la seguente forma:

$$FS = \frac{\sum_i (c'_i L_i + S_i \tan \phi_i^b + [W_i \cos \beta - U_i + P_i \cos(\alpha - \beta)] \tan \phi'_i)}{\sum_i (W_i \sin \beta - P_i \sin(\alpha - \beta))} \quad (4)$$

dove:

c'_i è la coesione efficace dell' i -esimo strato;

L_i è la lunghezza del piano di rottura;

S_i è la forza della pressione interstiziale degli strati non saturi;

W_i è il peso dell' i -esimo strato;

U_i è la forza di sollevamento idrostatico del piano di rottura;

P_i è la forza normale idrostatica dovuta al livello esterno dell'acqua dell' i -esimo strato;

β è l'angolo del piano di rottura;

α è l'angolo medio della forza di confinamento.

Il Fattore di Sicurezza rappresenta l'equilibrio tra le forze motrici e resistenti che agiscono nel terreno. Secondo quanto riportato dallo studio sulla stabilità delle sponde condotto da (Guo-An Yu et al., 2020) lungo il fiume Tarim in Cina, la simulazione del processo di collasso eseguita per sei siti test lungo un argine, in presenza di vegetazione del tipo *Phragmites Australis*, *Populus Euphratica* e *Tamarix Ramosissima* e in assenza di vegetazione, hanno riportato (Figura 8) come le sponde non vegetate assumono valori di FS inferiori rispetto a quelle coperte da vegetazione e generalmente inferiori al valore critico di 1.3, mentre i siti di campionamento coperti da vegetazione presentano valori superiori a quello critico, di conseguenza con minore frequenza di crolli bancari.

Gli effetti idrologici forniti dalla vegetazione riguardano la riduzione di umidità del terreno e della pressione interstiziale, che comporta una maggiore coesione apparente al suolo. Inoltre, l'incremento della rugosità idraulica fornita dalla vegetazione, contribuisce a diminuire l'erosione del terreno, che si riflette come una minore perdita di suolo con l'aumentare della quantità copertura vegetale (Guo-An Yu et al., 2020; Gyssels et al., 2005). Dal punto di vista idraulico, la vegetazione è in grado di condizionare la resistenza al moto sia nell'argine che in golena, in particolare la vegetazione arbustiva

(tra cui i canneti) offre valori maggiori di resistenza al moto rispetto alle piante arboree, differenza associata all'altezza delle piante e al coefficiente di resistenza aerodinamica, in quanto generalmente la corrente negli arbusti investe l'intera struttura, mentre nella vegetazione arborea la corrente interessa il solo tronco (Solari L. et al., 2014).

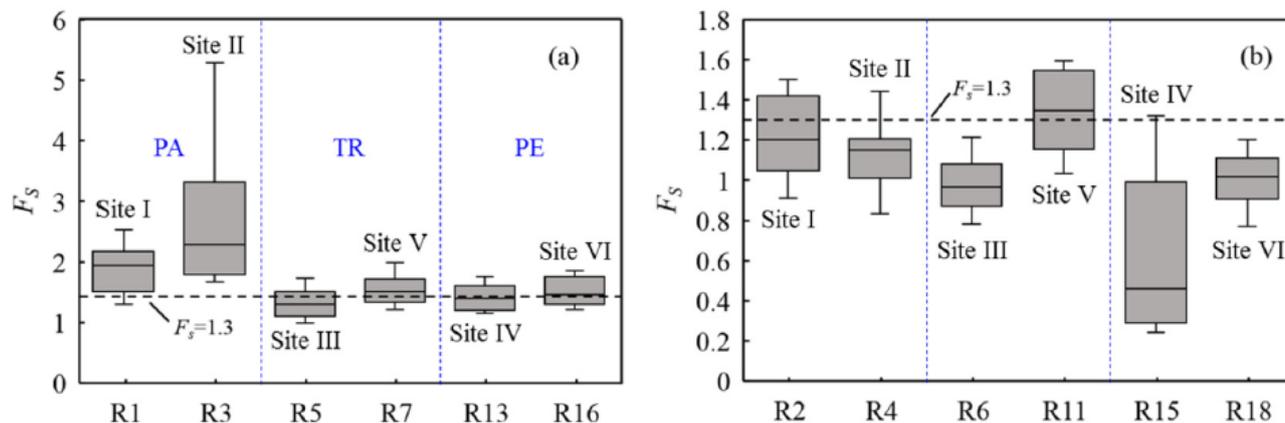


Figura 8: distribuzione di F_s delle sponde arginali con presenza di vegetazione *Phragmites australis* (PA), *Populus euphratica* (PE), *Tamarix ramosissima* (TR) (a), e assenza di vegetazione (b) (Guo-An Yu et al., 2020)

Al contrario, oltre agli effetti positivi elencati, la vegetazione può avere anche effetti negativi sulla stabilità di argini e sponde dei canali. Dal punto di vista meccanico, il sovraccarico esercitato dal peso della vegetazione può diminuire la stabilità del paramento per via delle forze motrici che spingono verso il basso (Guo-An Yu et al., 2020). La presenza di vegetazione con modesti apparati radicali che si sviluppano nel terrapieno, possono provocare instabilità nel momento in cui l'albero muore o cade, lasciando così le radici in decomposizione o vuoti all'interno dell'argine (CIRIA et al., 2013). L'aspetto negativo più rilevante che la vegetazione può avere nella stabilità arginale è legato all'alterazione dell'umidità del suolo e dei regimi di filtrazione, specialmente quando i suoli risultano saturi, dove il contenuto di umidità e la pressione dell'acqua nei pori aumenta in presenza di radici superficiali e nel caso di radici più profonde, possono portare alla concentrazione di flusso in profondità (CIRIA et al., 2013; Guo-An Yu et al., 2020). Inoltre, durante un evento di pioggia, l'intercettazione della chioma e del flusso d'acqua lungo il tronco, tendono a concentrare le precipitazioni attorno ai fusti delle piante, determinando pressioni interstiziali localmente più elevate (Durocher, 1990) e favorendo la consegna di acqua in profondità. In queste condizioni, le pressioni interstiziali positive sono capaci di ridurre la resistenza al taglio del terreno e aumentare il peso del materiale costituente l'argine, aumentando così la probabilità di crollo dell'argine stesso (Zegeye et al., 2018). Un altro potenziale aspetto negativo è costituito dal fatto che la vegetazione può creare un habitat ideale per gli animali, dove costruire le loro tane, che possono risultare un pericolo per la stabilità dell'argine, in quanto i cunicoli rappresentano una via preferenziale di flusso durante gli eventi di piena (CIRIA et al., 2013).

2.1 Le radici della vegetazione nella stabilità arginale

La presenza di vegetazione lungo argini e sponde dei corsi d'acqua è capace di influenzare il comportamento meccanico ed idraulico di questi rilevati. Gli effetti che la presenza di vegetazione può apportare nella stabilità del terreno, sono principalmente assoggettabili alle radici, essendo l'apparato della vegetazione che entra in diretto contatto con il terreno, le cui caratteristiche dipendono dalla loro architettura (densità delle radici, distribuzione in profondità, diametro), dalla forza delle radici nel sottosuolo, dalle condizioni locali e dal clima, dall'umidità del suolo, dalla tipologia ed età della pianta (Guo-An Yu et al., 2020; Jiana E. Stover et al., 2018). L'apparato radicale ancorato al terreno forma una massa monolitica (ad esempio composti di radici-sabbia) capace di fornire solidità all'argine e sostenere la biomassa fuori terra (Guo-An Yu et al., 2020), anche se, d'altro canto, rappresenta un elemento di diversità rispetto al resto dell'ammasso. Attraverso il sistema radicale della vegetazione si fornisce al terreno delle sponde e argini i seguenti elementi (B. Abernethy et al., 2001; 1990; Guo-An Yu et al., 2020; Jiana E. Stover et al., 2018):

- *rinforzo efficace*: riducendo lo stress locale nel suolo, trasferendo le sollecitazioni in profondità, in funzione della distribuzione delle radici nel terreno, dell'attrito tra radici e suolo, della forza delle radici;
- *stabilità*: le radici possono contribuire ad aumentare il Fattore di Stabilità (FS) delle sponde e argini grazie sia al rinforzo meccanico (aumentando la resistenza al taglio del suolo) che idraulico (riducendo il contenuto d'acqua nel suolo);
- *resistenza all'erosione superficiale*: le radici sono in grado di ridurre il tasso di infiltrazione e il contenuto di umidità in base al tipo di architettura, distribuzione, densità, lunghezza della radice;
- *coesione aggiuntiva*: effetto di resistenza al taglio aggiuntiva fornita al terreno, che varia in proporzione alla densità delle radici;
- *resistenza al taglio del terreno*: dovuta principalmente ad un aumento di forza coesiva, fornito anche da basse densità di radici;
- *resistenza alla trazione*: viene mobilitata all'interno del composito suolo-radice e conferisce maggior rinforzo al suolo.

I terreni permeati da radici presentano una minore resistenza alla compressione ma permettono di aumentare il rinforzo e l'elasticità dei suoli, in quanto le fibre radicali contribuiscono a trasferire gli

sforzi di taglio, presenti nella matrice del suolo: esse conferiscono la resistenza a trazione alle radici, con conseguente miglioramento anche della resistenza al taglio del terreno (Guo-An Yu et al., 2020). L'apporto di resistenza alla trazione conferito dalle radici varia a seconda della specie vegetale, del diametro delle radici, del clima e ambiente di crescita e dell'orientamento delle radici (B. Abernethy et al., 2001). La resistenza alla trazione della radice può essere misurata con una prova in sito attraverso il metodo proposto da Abernethy e Rutherford, che consiste nel sollecitare la radice tramite un carico di trazione limitato e costante, parallelo rispetto l'orientamento della radice (B. Abernethy et al., 2001). Il carico viene applicato all'estremità della radice utilizzando un piccolo morsetto metallico, fissato a sua volta ad un telaio metallico. Da questa prova viene misurato lo spostamento all'estremità della radice libera, il diametro nel punto di rottura e il relativo carico di punta che la determina. Per quantificare la resistenza alla trazione per unità di area delle radici si può utilizzare una funzione di potenza negativa nella forma (B. Abernethy et al., 2001):

$$T_r = aD^{-b} \quad (5)$$

dove:

D è il diametro della radice;

a e b sono costanti empiriche che dipendono dalla specie vegetale, con un range di valori $a = (29,1; 87,0)$ e $b = (0,76; 0,45)$.

Come si può osservare dall'equazione (5) e come riportato anche da molti risultati sperimentali, T_r diminuisce con l'aumentare del diametro della radice, poiché la massima resistenza a trazione delle radici aumenta linearmente con il diametro, ma T_r è calcolato per unità di superficie, di conseguenza valori più piccoli di diametro corrispondono a una maggiore resistenza a trazione per unità di superficie (Guo-An Yu et al., 2020). Osservando la Figura 9, riportante i risultati di due diversi studi della prova di resistenza a trazione delle radici eseguita per diverse specie di piante (*Phragmites australis* (PA), *Populus euphratica* (PE), *Tamarix ramosissima* (TR), *Arundo donax*, *Salix laevigata*), si può notare facilmente come entrambe queste prove siano accomunate dal fatto che le radici con diametro maggiore presentino meno resistenza per unità di superficie rispetto alle radici più piccole. Nel momento in cui viene mobilitata la massima resistenza a trazione delle radici, queste sono in grado di fornire la massima resistenza al cedimento al terreno, inoltre vari studi hanno dimostrato che anche dopo la rottura delle radici, la permanenza delle radici nel terreno è in grado ugualmente di fornire un rinforzo residuo al materiale della sponda o dell'argine. In altre condizioni, si può verificare una perdita di capacità delle radici a causa dell'estrazione delle radici, prima che raggiungano la massima resistenza alla trazione. In questi casi, il rinforzo che le radici possono fornire al terreno non

viene mobilitato in quanto l'ancoraggio delle radici al suolo dipende dalle caratteristiche della resistenza di attrito tra la superficie della radice e il substrato della sponda, che porta le radici a scivolare attraverso il terreno invece di rompersi. Se è presente una sufficiente tensione di confinamento e attrito nell'interfaccia tali da prevenire l'estrazione della radice, le radici riescono ad accumulare le sollecitazioni di trazione e attivare la resistenza al taglio nell'interfaccia suolo-radice, consentendo così al terreno di resistere alle continue deformazioni (B. Abernethy et al., 2001).

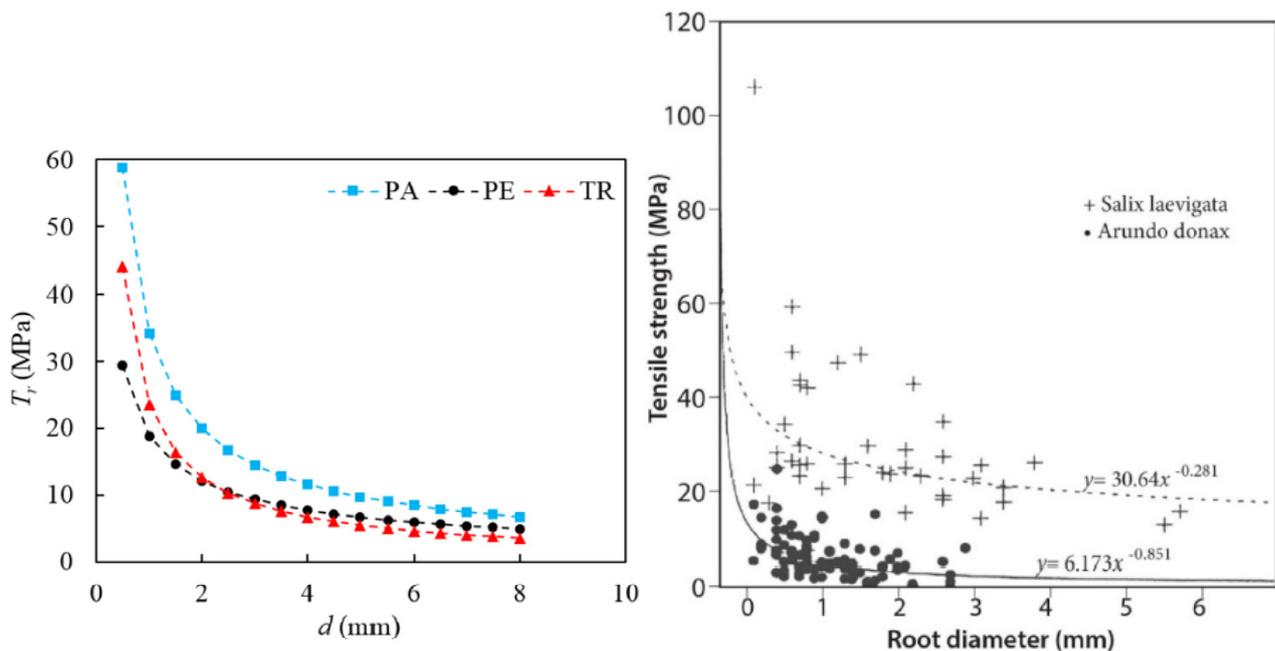


Figura 9: relazione tra diametro della radice e resistenza alla trazione per unità di area per diverse specie vegetali: *Phragmites australis* (PA), *Populus euphratica* (PE), *Tamarix ramosissima* (TR), *Arundo donax*, *Salix laevigata*. (a sinistra: Guo-An Yu et al., 2020; a destra: Jiana E. Stover et al., 2018)

La resistenza al taglio del suolo è influenzata dalla presenza di radici (anche basse densità di radici possono contribuire ad essa), dalla resistenza alla trazione delle radici e dal rapporto dell'area radicale rispetto una determinata superficie di terreno (Zegeye et al., 2018). Secondo alcuni studi, come quelli riportati da B. Abernethy et al. (2001), anche la distribuzione di densità radicale in una sponda può condizionare il rinforzo radicale in quanto i risultati di prove di taglio diretto nei composti suolo-radice mostrano come la resistenza al taglio del suolo aumenti linearmente all'aumentare della massa radicale (B. Abernethy et al., 2001).

La resistenza al taglio di un terreno permeato da radici può essere rappresentata attraverso il criterio di rottura di Mohr-Coulomb. Dato che le radici delle piante legate al terreno tendono a formare una massa monolitica che contribuisce alle proprietà meccaniche del suolo aggiungendo ulteriore coesione apparente (B. Abernethy et al., 2001), l'equazione di Coulomb è stata modificata da (Waldron, 1977), includendo il contributo dato dalle fibre radicali attraverso la coesione delle radici.

Il criterio di rottura di Mohr-Coulomb per un terreno permeato di radici diventa (B. Abernethy et al., 2001):

$$s = c' + c_r + (\sigma - u)\tan\phi \quad (6)$$

dove:

- s è la resistenza al taglio del terreno;
- c' è la coesione effettiva del terreno;
- c_r è la coesione fornita dalla presenza di radici;
- σ è la tensione normale;
- u è la pressione dell'acqua interstiziale;
- ϕ è l'angolo di attrito interno del terreno.

Questa aggiunta di coesione apparente si manifesta attraverso forze adesive e di attrito tra le radici e le particelle di terreno (Jiana E. Stover et al., 2018), la cui entità varia a seconda di alcune caratteristiche dell'apparato radicale, tra cui la distribuzione delle radici nel terreno, dalla resistenza alla trazione, dall'orientamento delle radici, dall'attrito nell'interfaccia con il suolo, dal modulo di trazione (B. Abernethy et al., 2001; Pollen & Simon, 2005; Zegeye et al., 2018). La coesione delle radici può essere stimata attraverso il modello RipRoot sviluppato da Pollen e Simon (2005), che prevede di caricare un fascio di radici finché non viene superata la resistenza a trazione della radice più debole. Nel momento in cui cede una radice, il carico viene ridistribuito fra le radici ancora integre, continuando con questo approccio fino a che tutte le radici non si rompono (Jiana E. Stover et al., 2018).

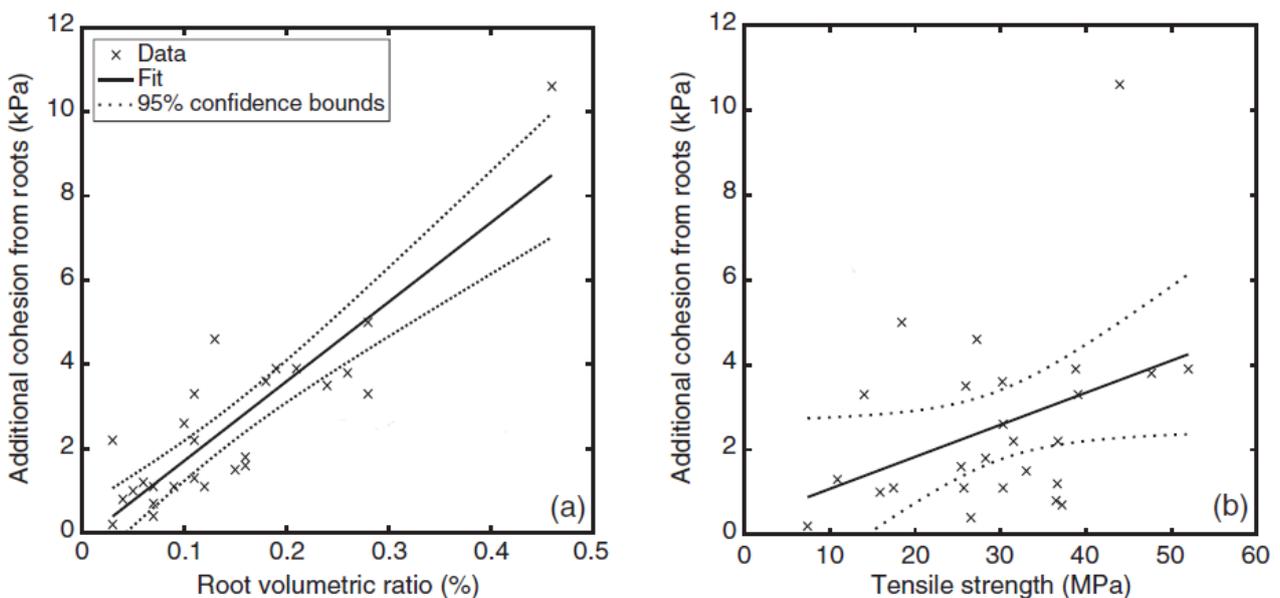


Figura 10: grafici rappresentanti la relazione tra la coesione delle radici e il rapporto volumetrico delle radici (a) e la resistenza alla trazione (b) (Zegeye et al., 2018)

Applicando questo metodo si osserva una relazione significativa tra la coesione delle radici e il rapporto volumetrico delle radici (o rapporto dell'area radicale), mentre la resistenza a trazione della singola radice risulta avere un effetto minore sulla coesione delle radici (Zegeye et al., 2018). La Figura 10 riporta i risultati condotti da Zegeye et al. (2018) sullo studio del rinforzo radicale apportato al suolo per 26 specie vegetali (tra cui *Arundo donax*), dove si può osservare come le piante con valori più elevati di rapporto volumetrico delle radici provvedono maggiormente al rinforzo radicale del suolo rispetto a piante con radici che presentano maggiore resistenza alla trazione.

Uno studio diverso condotto da Guo-An Yu et al. (2020) sul rinforzo radicale fornito da diverse specie di piante (*Phragmites australis* (PA), *Populus euphratica* (PE), *Tamarix ramosissima* (TR), *Arundo donax*, *Salix laevigata*) per diversi siti test lungo le sponde del fiume Tarim in Cina (Tabella 1), riporta valori maggiori di coesione delle radici e di stabilità di sponda in corrispondenza di valori di RAR più elevati, sintomo di un rinforzo al suolo maggiore.

Species	Sampling point	Root number in different diameter ranges (mm)*							RAR (%)	$\Delta S^{\#}$ (kPa)	F_s	
		0-1	1-2	2-3	3-5	5-10	10-20	20-40			With root	No root
PA	I	158	183	183	100	67	-	-	0.35	13.38	2.70	1.45
	II	253	110	441	625	63	-	-	0.95	48.94	5.87	1.45
TR	III	41	205	41	-	-	-	-	0.06	4.95	1.51	1.31
	V-1	-	-	-	-	8	-	-	0.04	1.05	1.35	1.31
	V-2	-	25	4	2	4	1	-	0.04	0.75	1.33	1.31
	V-3	-	33	2	6	6	-	-	0.03	0.99	1.34	1.31
	V-4	-	-	113	-	-	-	-	0.08	4.74	1.50	1.31
PE	IV-1	-	80	-	15	18	-	-	0.17	2.74	1.42	1.31
	IV-2	-	36	4	9	6	7	1	0.18	3.42	1.45	1.31
	IV-3	-	-	-	-	2	2	4	0.39	4.74	1.51	1.31
	VI-1	-	-	167	1	7	5	2	0.32	7.38	1.61	1.31
	VI-2	-	-	-	-	6	18	4	0.64	8.92	1.68	1.31

Tabella 1: valori di RAR, coesione delle radici e Fattore di Stabilità di diverse specie radicali (*Phragmites australis* (PA), *Populus euphratica* (PE), *Tamarix ramosissima* (TR), *Arundo donax*, *Salix laevigata*) sulle sponde arginali (Guo-An Yu et al., 2020)

Il rapporto volumetrico delle radici (RVR) corrisponde al rapporto tra il volume delle radici e il volume del campione di terreno, mentre il rapporto dell'area radicale (RAR) è definito come il rapporto tra l'area della sezione trasversale di tutte le radici di un campione e la superficie del campione di terreno. Questi valori utili a caratterizzare le radici in un suolo, variano a seconda della densità di radici, della distribuzione della vegetazione, delle condizioni del suolo e del clima (Guo-An Yu et al., 2020).

Oltre al diametro delle radici e al rapporto dell'area radicale (o al rapporto volumetrico delle radici), anche il tipo di architettura del sistema radicale può influire sul comportamento meccanico apportato al suolo. La vegetazione con un apparato radicale fibroso (formato da una serie di radici sottili che crescono dal fusto, come le graminacee) presenta una maggiore resistenza alla trazione rispetto una pianta con apparato radicale fittonante e di conseguenza riescono ad apportare un rinforzo al suolo maggiore (Zegeye et al., 2018).

2.2 Effetti delle tane di animali negli argini

La vegetazione lungo le strutture arginali può condizionare la vita e la diffusione della fauna negli ambienti ripariali, con importanti conseguenze sulla capacità portante degli argini e sulla sicurezza della pianura protetta da queste opere di difesa anti-alluvione. Gli argini, composti generalmente da materiale tenero e non saturo d'acqua per lunghi periodi, risultano spesso coperti da vegetazione, principalmente di tipo erbaceo e arbustivo, dove in gran parte dei casi, questa vegetazione resta incurata e indisturbata per gran parte del tempo. Per questi motivi gli animali escavatori (come nutrie, istrici, volpi, tassi) trovano nelle sponde dei fiumi e negli argini le condizioni ambientali ideali dove poter scavare tane come rifugio e creare così un habitat per vivere e riprodursi (Covelli, 2005). La vegetazione nei paramenti arginali, come ad esempio le canne ripiegate dei canneti e fragmiteti, costituiscono una copertura sufficiente per questi animali, inoltre per gli animali erbivori le foglie, gli steli e le radici di alcune tipologie di piante (come *Phragmites australis*, *Typha* e *Arundo donax*), possono essere fonte di cibo ed energia (Confagricoltura Venezia; Venturini S. et al., 2018).

Gli animali che tipicamente abitano gli argini in terra sono nutrie, lepri, volpi, tassi e istrici e sono soliti a scavare le loro tane negli argini, sia lato campagna che alveo, compromettendo l'integrità arginale. Le tane che questi animali scavano possono essere articolate, quindi composte da una serie di cunicoli e camere che si sviluppano all'interno del corpo arginale, oppure possono essere singoli cunicoli di lunghezza ridotta e più o meno ampi, a seconda dell'animale che le scava. In base alle necessità dell'animale, le tane possono essere scavate nel paramento lato campagna o fiume: ad esempio, animali come le nutrie che necessitano della vicinanza all'acqua, sono soliti costruire le tane nella sponda lato alveo a circa un metro dal livello dell'acqua (CIRIA et al., 2013; Confagricoltura Venezia; Covelli, 2005; Venturini S. et al., 2018).

Le tane degli animali risultano tutt'oggi un problema rilevante per la stabilità del rilevato e per la tenuta idraulica, in quanto: indeboliscono la struttura per via della rimozione di materiale, deformando la sagoma e/o abbassando il fronte cresta aumentando così la probabilità di tracimazione; aumentano il gradiente idraulico, accorciando il percorso di filtrazione; favoriscono il propagarsi del fronte di saturazione poiché consentono l'allagamento delle tane durante gli eventi di piena, facilitando l'imbibimento del corpo arginale e il possibile cedimento quando l'acqua si ritira (Covelli, 2005; Simonini et al., 2014; Venturini S. et al., 2018). Gli animali che scavano dentro e intorno agli argini possono causare (CIRIA et al., 2013):

- erosione interna, che può portare alla formazione di tubi di flusso (a causa della riduzione dei percorsi di infiltrazione);
- indebolimento meccanico (di sponde, scarpate fluviali);

- perforazioni dei componenti di impermeabilità;
- destabilizzazione delle murature, dei rivestimenti e delle carreggiate;
- crolli/dislivelli lungo la cresta;
- aperture sotto la linea di galleggiamento (perché l'ingresso delle tane può trovarsi sotto la superficie dell'acqua anche se la parte principale della tana potrebbe trovarsi sopra il livello dell'acqua);
- infiltrazioni dirette (attraverso le tane negli argini).

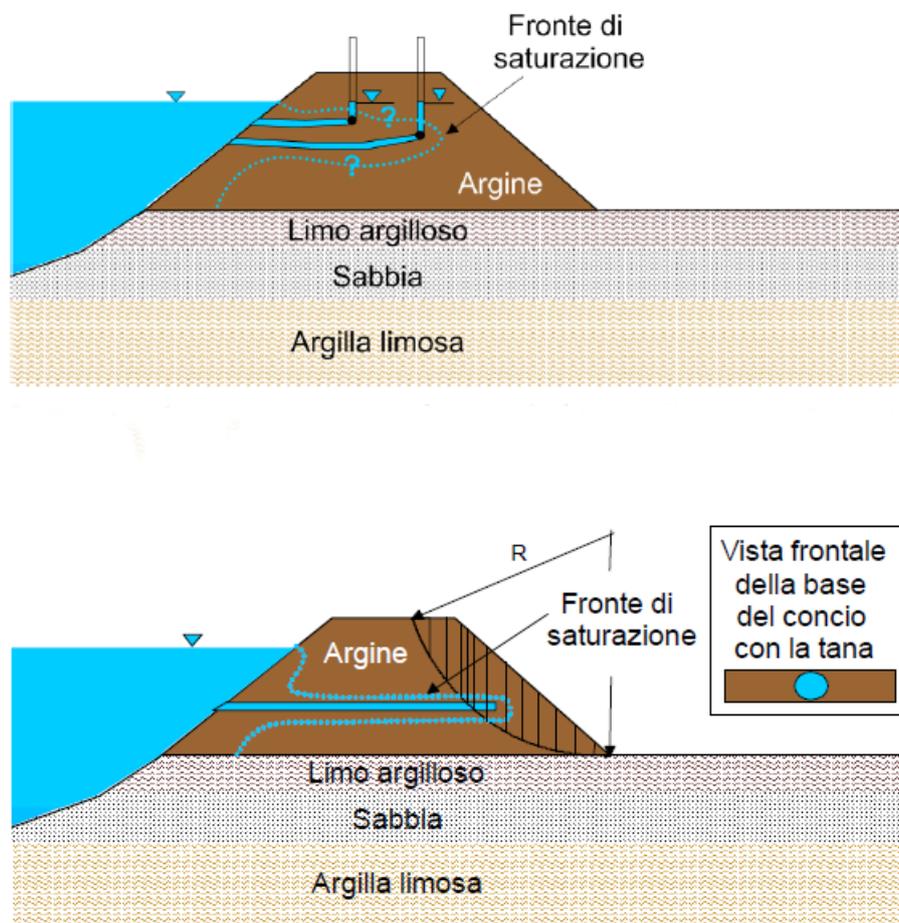


Figura 11: esempi di possibili effetti delle tane nella stabilità arginale (Simonini et al., 2014)

Esistono numerose tecniche per risolvere e limitare la compromissione della tenuta arginale causata dalle tane. Negli ambienti che lo consentono, la soluzione più rapida e funzionale consiste nella cementificazione di interi tratti spondali, che minimizzano drasticamente il rischio di infiltrazione e le conseguenti problematiche, ma non permettono di conservare il contesto ambientale. Un'altra tecnica meno invasiva per preservare le sponde, consiste nell'utilizzo di reti metalliche antintrusione, accostate ad un rivestimento in materiale "tessuto non tessuto", per favorire la crescita della vegetazione, e ad uno strato di materiale granulare utile ad evitare l'erosione (Venturini S. et al.,

2018). Tali reti hanno la funzione di intralciare la costruzione di tane, specialmente di nutrie, consentendo contemporaneamente la crescita della vegetazione.

In alcuni contesti per ridurre i danni da escavazione di tane, è sufficiente eseguire la manutenzione e pulizia periodica degli argini. Soprattutto nelle arginature più pendenti, dove gli animali prediligono l'escavazione, la rimozione di arbusti e cespugli eseguita con la manutenzione, elimina le fonti di cibo e diminuisce il livello di protezione agli animali che può garantire l'opera di difesa, scoraggiando gli animali a costruire i propri rifugi lungo quelle sponde (CIRIA et al., 2013). Accanto a queste pratiche che allontanano gli animali dalle strutture arginali, risulta opportuno prevedere la creazione di habitat alternativi dove gli animali possano comunque trovare riparo. Un metodo può consistere nella predisposizione di arbusti e cespugli in golena, adatti a ricreare un habitat ideale per ospitare alcune tipologie di animali, in uno spazio in genere non idoneo alle attività di agricoltura intensive (Martire, 2015).

2.3 Gestione e manutenzione della vegetazione negli ambienti arginali

La gestione della vegetazione nelle strutture arginali è una pratica fondamentale per preservare tali ambienti e garantire la corretta funzionalità del sistema di difesa. Le buone pratiche di gestione e manutenzione hanno il compito di assicurare che la vegetazione non comprometta l'integrità e le prestazioni degli argini e non limiti la visibilità e l'accesso, che sono aspetti fondamentali per l'ispezione (per individuare fessure e tane di animali) e gli interventi di manutenzione ordinaria (CIRIA et al., 2013). Le tecniche di gestione, oltre ad avere come priorità la sicurezza delle strutture arginali, devono avere un'impronta sostenibile, cercando di ridurre il più possibile gli impatti ambientali negativi che potrebbero provocare per l'habitat, quindi tenendo in considerazione nella programmazione delle attività, aspetti come i periodi di riproduzione e nidificazione degli animali e i periodi di germogliazione della vegetazione (Nelson R. Nunnally, 1987).

Il rivestimento degli argini con la vegetazione può essere utile a contrastare fenomeni di danneggiamento come erosione esterna e cedimento. Gli argini senza rivestimento sono più soggetti a tali danneggiamenti essendo maggiormente sottoposti ad eventi che disturbano l'integrità arginale (corrente del fiume, vento, precipitazioni, tracimazione, traffico animale e veicolare). Esistono varie tecniche di protezione dei paramenti arginali utilizzabili nelle varie situazioni di intervento. A meno che non sia previsto da progetto l'inserimento di specifiche specie vegetali, il rivestimento dei paramenti arginali tramite un robusto manto erboso risulta essere una pratica semplice, economica e sufficiente per proteggere gli argini dall'erosione esterna e a garantire l'accesso fisico e visivo (CIRIA et al., 2013). Questa tipologia di rivestimento è valida sia per il paramento esterno che interno, ma in alcuni casi, in quest'ultimo potrebbe essere necessario sostituire la copertura erbosa con rivestimenti di materiale lapideo. Le specie erbacee (che comprendono anche le graminacee) da prediligere per questa tipologia di rivestimento sono quelle che creano una copertura densa, in grado di resistere alle forze erosive, autoctone e adatte al terreno e clima del luogo, cercando di evitare le specie alloctone ed invasive anche se possono risultare una copertura erbosa efficace (CIRIA et al., 2013).

La vegetazione legnosa (piante arboree e arbustive), facilmente presente nelle zone ripariali dei fiumi, è capace di rinforzare il suolo dei paramenti e delle sponde fluviali e migliorare la stabilità attraverso vari meccanismi (esposti nei capitoli 2 e 2.1). Affinché sia garantita l'integrità e affidabilità dell'argine, i benefici apportati dalla vegetazione legnosa devono essere confrontati con i potenziali aspetti negativi che comporta, e laddove persistano rischi risulta necessario elaborare una strategia di

gestione. La vegetazione legnosa non tagliata potrebbe infatti diminuire la stabilità dei ripidi pendii sulle rive a diretto contatto con l'acqua, ostacolare la visibilità e l'accesso all'argine, aumentare il rischio di infiltrazione durante livelli idrometrici più elevati, provocare il danneggiamento dell'argine a seguito del ribaltamento della pianta (CIRIA et al., 2013). Nel caso di piena, il materiale flottante può inoltre accumularsi a monte dei ponti e ostruire il deflusso delle acque con gravi conseguenze per il deflusso e aumentando anche la sollecitazione trasversale esercitata sul ponte. Ai fini della sicurezza arginale e del territorio, per prevenire il manifestarsi di questi fenomeni di deterioramento, è importante monitorare le caratteristiche e il comportamento della vegetazione legnosa, programmando la rimozione con tecniche adeguate per evitare la rimozione impropria.

La manutenzione periodica degli argini diventa quindi fondamentale nel momento in cui queste strutture vengono rivestite e completate con la vegetazione, difatti il mancato intervento comporta il deperimento del manto erboso dovuto alla crescita spontanea di specie infestanti, il danneggiamento dell'opera di difesa e l'aumento dei costi di manutenzione nella stagione successiva (Covelli, 2005). Gli interventi di manutenzione sono quindi mirati a limitare la diffusione di popolamenti monospecifici e allo stesso tempo conservare i benefici che fornisce il manto erboso (Solari L. et al., 2014). La gestione dei programmi di manutenzione della vegetazione negli argini può avvenire attraverso interventi diffusi o selettivi. Le tecniche di gestione selettiva promuovono gli aspetti faunistici, ricreativi ed estetici della vegetazione, riducendo i costi di manutenzione, attraverso lo sviluppo di programmi di monitoraggio della fauna e dell'uso ricreativo, di valutazione della vegetazione più adatta ad ospitare la fauna selvatica, di controllo della vegetazione indesiderata, di valutazione del contributo di resistenza idraulica e all'erosione esterna fornito dalla vegetazione (Nelson R. Nunnally, 1987). Al contrario, le tecniche di gestione diffusa servono a ridurre la diversità della vegetazione e l'habitat della fauna selvatica, favorendo la crescita di sole specifiche specie vegetali, mediante operazioni di sfalcio periodico del manto erboso (con falciatura meccanica o manuale), taglio di rami e vegetazione arborea, applicazione di prodotti chimici, programmi di pascolo e di incendi preventivi (CIRIA et al., 2013; Nelson R. Nunnally, 1987). Lo sfalcio risulta essere la tecnica più frequentemente utilizzata per la manutenzione delle strutture arginali, essendo molto efficace per prevenire la presenza di vegetazione arborea e arbustiva che può ostacolare la visibilità e compromettere la stabilità del terrapieno. Nella progettazione di programmi di sfalcio della vegetazione negli argini esistono alcuni accorgimenti tecnici da considerare, tra cui: procedere con lo sfalcio in direzione alveo-argine per permettere agli animali di allontanarsi; effettuare lo sfalcio mantenendo circa 10-15 cm di vegetazione erbacea; conservare la vegetazione erbacea al piede della sponda; eseguire almeno uno sfalcio annuale per limitare lo sviluppo della vegetazione arborea; programmare tagli ciclici di canneti e fragmiteti (soprattutto delle specie infestanti) in funzione alle

specifiche esigenze del luogo (Solari L. et al., 2014). Nel caso di rimozione dei canneti dai paramenti arginali, buona pratica è quella di intervenire quando le canne sono alte circa 2 m (in modo da non ostacolare eccessivamente la visibilità arginale), con un paio di tagli annuali e dopo eventi di pioggia nel caso si intervenga con la rimozione anche delle radici, in modo da trovare un terreno più morbido (Solari L. et al, 2014). Esistono anche metodi più invasivi per il contenimento della diffusione dei canneti di *Arundo Donax*, che prevedono il taglio a raso suolo delle canne nel mese di maggio e il rivestimento del canneto tagliato con una tela cerata in modo oscurare la pianta e impedire la fotosintesi e quindi la ripresa (Solari L. et al, 2014).

Tuttavia, anche se le linee guida e le pratiche comuni raccomandino che gli argini siano coperti solo con un manto erboso, la gestione della vegetazione nelle sponde e nelle strutture arginali è un argomento complesso e ci possono essere molte opinioni e approcci diversi.



Figura 12: esempio di sfalcio meccanico dei paramenti arginali (www.sacapescia.it)

Capitolo 3

3. Inquadramento del sito test

La sezione arginale utilizzata come sito test per le campagne di volo con il drone e i campionamenti di terreno si trova in un'ansa del fiume Tagliamento (Figura 14), nei pressi della località di San Giorgio al Tagliamento, frazione di San Michele al Tagliamento (VE). Il luogo di indagine si trova nella parte terminale del Tagliamento, nella zona di bassa pianura, circa a 20 km dalla foce, il fiume assume una morfologia meandriforme e il corso d'acqua è delimitato da strutture arginali e l'interposizione della golena in alcuni tratti.

In questo luogo, lungo i paramenti e il piede dell'argine, si sviluppano una serie di canneti di *Arundo donax*, più o meno densi, che vanno a rivestire in parte il terrapieno. Questi canneti non si sviluppano con un assetto omogeneo, risultano invece come varie macchie più o meno estese.



Figura 13: mappa fiume Tagliamento, con identificazione dell'area del sito test (Spaliviero et al., 2003)



Figura 14: inquadramento dell'area del sito test a San Giorgio al Tagliamento (Google Earth)

In questo sito test sono stati condotti i seguenti rilievi in campo:

- due voli di rilievo con drone, il primo eseguito il 30 marzo 2023 e il secondo il 14 settembre 2023, a coprire l'intera area dell'ansa e la golenale pertinente, per rilevare attraverso ortofoto RGB la vegetazione a terra, e contemporaneamente ricavare il Digital Surface Model (DSM) che fornisce la geometria tridimensionale dell'area, compresa la vegetazione; l'obiettivo di questa attività consiste nell'utilizzo di un rilievo aereo come strumento di analisi speditiva per la determinazione di aree con medesime caratteristiche e necessità, attraverso l'identificazione della canna *Arundo donax* come specifico target;
- due serie di transetti tracciati sul paramento interno dell'argine che divide la campagna con l'area golenale, lungo i quali sono stati prelevati campioni di terreno tramite carotiere manuale alla profondità di 0,40 m e 1,40 m in cinque punti per ciascun transetto, in modo da poter classificare il materiale. Questi prelievi sono stati eseguiti allo scopo di analizzare la specie vegetale costituente il canneto del sito test, come indicatrice di un determinato tipo di terreno, attraverso la comparazione delle analisi granulometriche di terreni che presentano o meno la presenza di canna.

3.1 Introduzione al Fiume Tagliamento

Il Tagliamento è un fiume alpino che nasce nei pressi di passo della Mauria (1150 m s.l.m.), nel comune di Lorenzago di Cadore (BL), per poi scorrere attraverso le Alpi Carniche e sfociare nel Mar Adriatico. Il corso d'acqua del Tagliamento si sviluppa per 178 km, quasi interamente nella regione Friuli Venezia Giulia, mentre nel tratto medio-basso (da Latisana) segue il confine amministrativo tra la regione Veneto e del Friuli Venezia Giulia, per poi sfociare con una foce a delta nel Golfo di Venezia, tra Bibione (VE) e Lignano Sabbiadoro (UD) (Venturini et al., 2021).

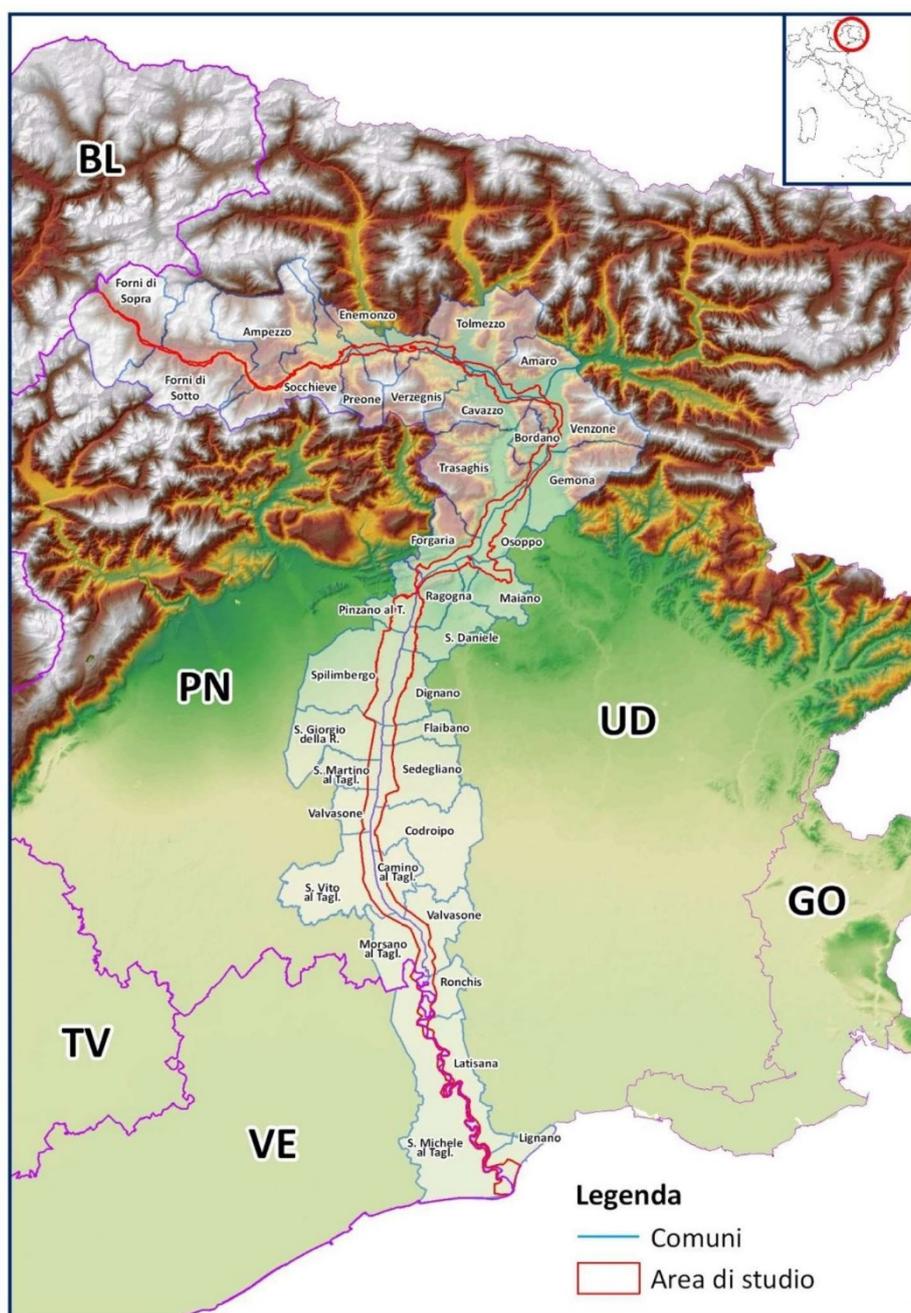


Figura 15: territorio che attraversa il fiume Tagliamento (Francescato et al., 2012)

Lungo il suo corso il fiume bagna 38 comuni e 4 province (Belluno, Udine, Pordenone e Venezia), attraversando nel tratto montano con direzione ovest-est l'area della Carnia, per poi all'altezza di Amaro (UD) procedere verso sud fino alla foce (Francescato et al., 2012).

Il bacino idrografico si estende con una forma ad imbuto su 2871 km² (Spaliviero et al., 2003), in una regione che presenta un forte gradiente climatico (da condizioni alpine a mediterranee), che condiziona la temperatura, l'umidità, le precipitazioni (possono variare tra i 1000 e i 3000 mm/annui) e lo sviluppo della vegetazione. Proprio per il contesto climatico in cui si trova, il Tagliamento è considerato un fiume ad elevata complessità e dinamica eco-morfologica, difatti risulta essere un'importante corridoio biogeografico, con un'ampia eterogeneità di biodiversità e di habitat (Ravazzolo et al., 2015).

L'ampio bacino montano caratterizzato da pendii ripidi e le caratteristiche delle precipitazioni, conferiscono al corso d'acqua un regime torrentizio, causando in alcune circostanze alluvioni improvvise nella pianura alluvionale e alti picchi di flusso nella parte centrale e inferiore del bacino (Spaliviero et al., 2003). Il regime torrentizio comporta una portata assai variabile del fiume, con una differenza anche di ordini di grandezza fra i livelli di piena e di magra dove, in quest'ultimo caso, il corso d'acqua può risultare anche in secca a causa dell'intenso uso idrico di origine antropica e della elevata permeabilità del suolo. La portata media annua del fiume Tagliamento è di circa i 90 m³/s ma questa portata varia fortemente a seconda del luogo e del periodo (ad esempio, il massimo storico del Tagliamento equivale a circa 4000 m³/s misurato nel 1966 a Pinzano).

Il Tagliamento è caratterizzato da una morfologia a canali intrecciati (uno dei pochi in Europa a conservare questa morfologia) in un ampio alveo ghiaioso, che ne determina i consistenti carichi di sedimenti trasportati dall'acqua e la conseguente formazione del conoide alluvionale a partire dalla parte centrale del suo corso (Spaliviero et al., 2003). Oltre alla disposizione a canali intrecciati, caratteristica specialmente del tratto di alta pianura, il fiume presenta diverse morfologie fluviali nel tratto montano e di bassa pianura. Nel tratto montano, il corso d'acqua risulta confinato nelle valli fluviali, con pendenze elevate, alveo costituito di materiale grossolano e l'impossibilità di espandersi lateralmente, ma con diverse confluenze di singoli corsi nel corso principale (Francescato et al., 2012). La morfologia a canali intrecciati (Figura 16) che caratterizza il tratto di alta pianura ha inizio nei pressi di Pinzano, da dove il fiume è formato da una serie di canali intrecciati e separati tra loro da barre o isole fluviali, la cui disposizione risulta mutevole nel tempo per azione della corrente e assenza di coesione del materiale costituente le sponde. Gli aspetti che caratterizzano questo tratto sono una pendenza elevata, un'ampia larghezza dell'alveo, portata irregolare e carico di fondo elevato, sedimenti grossolani e sponde facilmente erodibili (Francescato et al., 2012; Spaliviero et al., 2003). Il tratto di bassa pianura è caratterizzato da una morfologia fluviale a meandri (Figura 17),

dove quindi il fiume si trasforma in un unico canale, con un andamento serpeggiante e ampia sinuosità del corso d'acqua. Questo cambiamento avviene nei pressi di Madrisio, dove in tale contesto presenta pendenze meno elevate, sedimenti a grana più fine nell'alveo (sabbie), larghezza minore del corso (in particolare si riduce drasticamente a Latisana), minore velocità della corrente (Spaliviero et al., 2003; Venturini et al., 2021). Questa metamorfosi del Tagliamento in un unico canale sinuoso è favorita dalle basse pendenze del territorio e dalla presenza di materiali meno porosi caratterizzanti la bassa pianura, che non sono più in grado di permettere le infiltrazioni di acqua attraverso l'alveo in profondità che avvengono invece nel tratto di alta pianura (Venturini et al., 2021). Al termine di quest'ultimo tratto il Tagliamento sfocia nel Mar Adriatico con una struttura deltizia a cuspidi, al cui termine si trovano i centri turistici di Bibione e Lignano Sabbiadoro (Francescato et al., 2012).

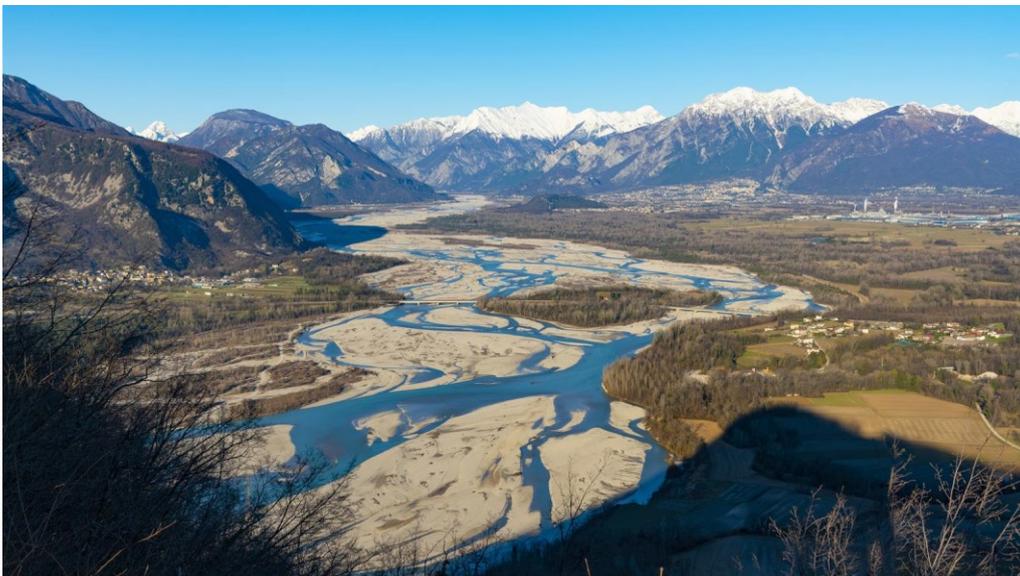


Figura 16: morfologia a canale intrecciato del fiume Tagliamento (www.turismoofvg.it)



Figura 17: morfologia a meandri del fiume Tagliamento (Google Earth)

3.2 Arundo donax

Lungo gli argini e gli spazi golenali del sito test in esame, nel tratto finale del fiume Tagliamento, si può osservare lo sviluppo di varie specie vegetali tra cui canneti di *Arundo donax* e di *Typha angustifolia*.

Anche detta comunemente canna comune, *Arundo donax* è una pianta erbacea perenne appartenente alla famiglia delle Poaceae (graminacee), dal fusto lungo, robusto ed eretto, simile alle piante di bambù. La canna comune è originaria dalle regioni dell'Asia occidentale ma è presente nelle regioni a clima Mediterraneo da diverso tempo. In Italia è diffusa in gran parte del territorio, ad esclusione della Valle D'Aosta e altre zone montane, ma a queste latitudini risulta essere una pianta alloctona e invasiva, prevalendo spesso sulla vegetazione autoctona (Solari L. et al., 2014). *Arundo donax* popola le zone ripariali lungo gli argini dei fiumi, in aree sabbiose ripariali, in prossimità delle foci e predilige gli ambienti caldi-umidi e terreni umidi e drenati, tra cui suoli inondati o inondabili, ma si adatta facilmente alle condizioni e suoli che trova (Ceccato et al., 2023; Discover Capolona, 2023; Solari L. et al., 2014).



Figura 18: canneto di Arundo donax in estate lungo gli argini del basso Tagliamento



Figura 19: canneto di Arundo donax in inverno al piede degli argini del basso Tagliamento

Arundo donax forma alti e densi popolamenti, i cui culmi (fusti) generalmente arrivano a 5-6 m di altezza, ma in condizioni ottimali possono raggiungere anche altezze maggiori (Jiana E. Stover et al., 2018). La loro sezione risulta cilindrica e cava, con un diametro di 1-4 cm e attorno al culmo nascono foglie, che possono raggiungere i 60 cm di lunghezza, in genere di colore verde ma ingialliscono in inverno e in periodi di siccità (Discover Capolona, 2023). I fiori densi e piumosi (lunghi dai 30 ai 60 cm) sbocciano tra luglio e settembre all'apice del fusto e assumono un colore inizialmente violaceo e poi dorato (Discover Capolona, 2023). La canna comune produce un profondo apparato radicale (come si osserva alla Figura 20) a partire dal sistema di rizomi (di circa 20 cm), che si estende lateralmente e poco sotto la superficie del terreno, dal quale partono le radici, che possono raggiungere il metro di profondità e tendono ad arrivare agli strati di terreno umidi (Lichtenegger E., 1997). Il rizoma, che presenta una consistenza carnosa e un colore bianco o beige, forma un sistema di radici più dense e con diametri maggiori (più grandi di 10 mm) nei primi 20 cm di profondità, per poi sviluppare radici via via più fini (con diametri di 1-3 mm), meno dense e raggiungere profondità di circa 1 m o poco più (Jiana E. Stover et al., 2018). Differentemente da quanto trovato in letteratura,

durante la raccolta dei campioni di terreno in corrispondenza dei paramenti dell'argine che presentavano macchie di *Arundo donax*, anche se tagliate, non sono state individuate possibili radici della canna, a parte qualche ceppo di possibili rizomi, nemmeno nei campioni più superficiali posti alla quota di 0,40 m che dovrebbe comprendere i rizomi e il primo strato di radici. Questo potrebbe essere dovuto appunto al fatto che le canne risultavano tagliate.

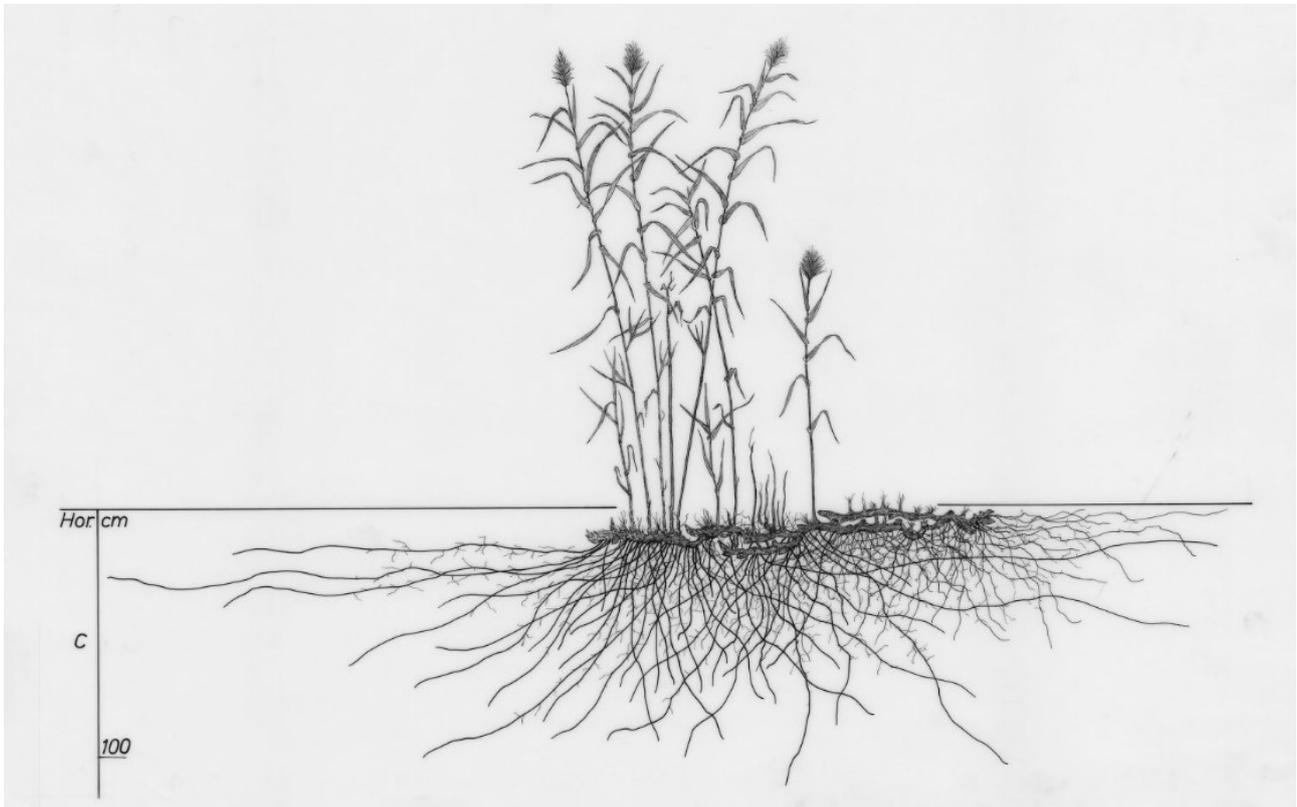


Figura 20: raffigurazione di *Arundo Donax* (Lichtenegger El., 1997)

Essendo una specie erbacea che sviluppa un modesto sistema radicale e secondo anche quanto riportato al capitolo 2.1, l'apparato radicale fibroso della canna comune può contribuire a rinforzare il suolo, grazie alla resistenza alla trazione delle radici stesse, considerati i diametri contenuti delle radici, aggiungendo ulteriore coesione apparente attraverso le radici e di conseguenza aumentare la resistenza al taglio del suolo e diminuire l'erosione del suolo visto il denso sistema radicale che sviluppa nello strato superficiale di terreno.

Jiana E. Stover et al. (2018) hanno analizzato gli effetti della canna comune sulla stabilità arginale nelle sponde sabbiose del fiume Santa Clara in California. *Arundo Donax* in questo territorio risulta essere una specie invasiva e tende ad occupare gli spazi della vegetazione autoctona. Il sistema radicale della canna comune presenta radici più grandi per unità di area e una maggior densità radicale nei primi 20 cm di profondità, rispetto ad altre piante che possono presentare una distribuzione più uniforme. Proprio per questo motivo la canna comune concentra la maggior parte della resistenza aggiuntiva (coesione apparente) e della forza radicale negli strati superiori (circa nei primi 20 cm) e

presenta meno forza in profondità. Questa non equa distribuzione della forza radicale potrebbe portare a fenomeni di cedimento della sponda. In particolare questo studio ha osservato fenomeni di cedimento in banche di sabbia e ghiaia e con strati intercalati di limo, relativamente basse (meno di 1 m) coperte da *Arundo Donax*, a seguito di un flusso moderato o elevato del corso d'acqua (Figura 21). Data la poca coesione del materiale sabbioso costituente la sponda e il contributo di coesione dovuto dalle radici concentrato nello strato più superficiale, a seguito di elevati livelli del corso d'acqua si sono verificati cedimenti da taglio sotto lo strato denso di radici e rizomi, cioè in corrispondenza dei banchi di sabbia più deboli (Jiana E. Stover et al., 2018).

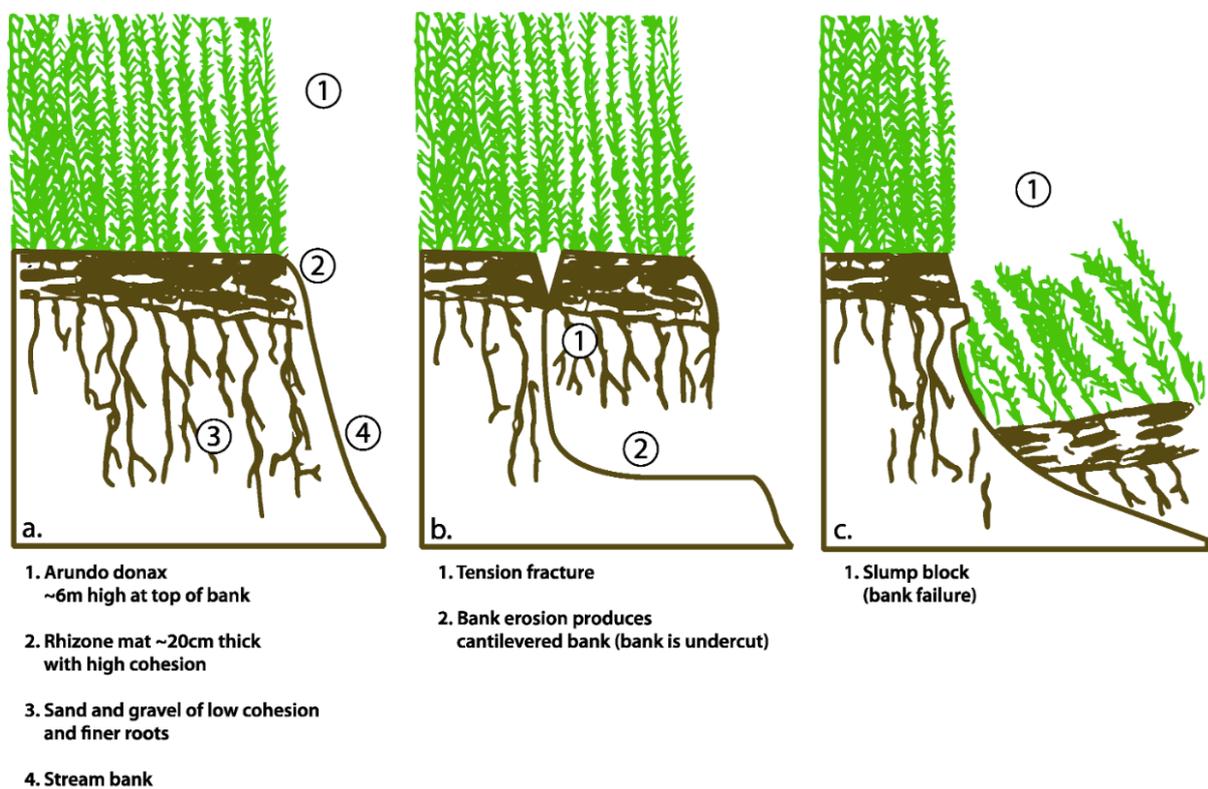


Figura 21: meccanismo di cedimento di sponde sabbiose coperte da *Arundo Donax* (Jiana E. Stover et al., 2018)

Questo studio ha in conclusione riportato una situazione di sponda instabile, nelle condizioni sopra descritte, con l'ipotesi che *Arundo Donax* possa diminuire la stabilità rispetto alla vegetazione autoctona. Tale osservazione potrebbe però non essere valida in altre condizioni in quanto le proprietà del terreno, come ad esempio la resistenza al taglio, e delle radici, come l'architettura e il rinforzo radicare, variano in base alle condizioni locali e della pianta (Jiana E. Stover et al., 2018).

Secondo alcuni studi, l'apparato radicale dell'*Arundo Donax* avrebbe una capacità di assorbimento costante di acqua lungo tutto il profilo radicale (Monti et al., 2009), difatti il rizoma si presenta con un modesto contenuto d'acqua al suo interno. Per la traspirazione, *Arundo donax* è fortemente dipendente dalle acque sotterranee, superficiali e dall'umidità del suolo, per cui per la sua espansione, la canna comune può trarre vantaggio dall'uso flessibile dei percorsi idrologici tipici degli ambienti

ripariali (Moore et al., 2011). Proprio per la sua capacità di assorbimento di acqua, un suo sviluppo rigoroso potrebbe indicare la presenza di acqua nel terreno e viceversa, uno sviluppo contenuto del canneto potrebbe al contrario indicare la presenza di un terreno povero e arido (Richard Lansdown, 2013).

Oltre all'aspetto meccanico e idrologico, la canna comune, come anche altre specie vegetali, costituisce una fonte di nutrimento e un ambiente ideale per l'insediamento della fauna selvatica, specialmente per gli animali escavatori, con le conseguenze di instabilità che possono causare la presenza di tane nelle strutture arginali (Bell et al., 1998).

Come già descritto nel capitolo 2.3, per questi motivi e per garantire la visibilità e l'accessibilità alle strutture arginali, le attività di manutenzione e pulizia delle sponde e degli argini dalla canna comune sono interventi fondamentali per la sicurezza delle opere di difesa. Di contro, le attività di rimozione di questi canneti (sia per via meccanica, manuale e incendiaria) possono contribuire alla loro espansione, in quanto la riproduzione avviene principalmente per via vegetativa, con la germinazione di gemme sui rizomi seppelliti. La rimozione meccanica, oltre a non garantire la completa rimozione dei rizomi, può lasciare cavità nel terreno dovute all'estrazione dei rizomi e radici o alla loro decomposizione. Oltre alla facile espansione, la canna comune risulta essere una delle specie vegetali a crescita più rapida, raggiungendo i 5-10 cm al giorno (Solari L. et al, 2014).

Anche se in concentrazione molto minore, lungo gli argini del sito test è stato osservato anche un altro tipo di canna, *Typha angustifolia* (Figura 22), una pianta erbacea perenne che popola comunemente gli ambienti umidi dell'emisfero settentrionale.



Figura 22: *Typha angustifolia* presente nel sito test

Questa cannuccia è presente nel sito test con dimensioni minori rispetto *Arundo donax*, con altezza di circa 1-2 m, e presenta un sistema radicale costituito da radici rizomatose e stolonifere. *Typha angustifolia* risulta essere una specie a rapida diffusione, in grado di sviluppare popolamenti monospecifici, occupando gli spazi della vegetazione autoctona e risultando in alcuni contesti invasiva per questo motivo (Selbo et al., 2004).

Questa specie vegetale non è stata studiata e considerata come specie target in questo studio in quanto è presente nel sito in un'unica porzione ridotta rispetto *Arundo donax*, che si sviluppa con varie macchie.

3.3 Raccolta dei campioni di terreno dell'argine e analisi granulometrica

Nella porzione arginale di studio del fiume Tagliamento sono stati raccolti 40 campioni di terreno al fine di determinare le caratteristiche granulometriche costituenti il materiale arginale. In genere, il terreno utilizzato per la costruzione degli argini dovrebbe essere omogeneo per un certo tratto, in modo tale da garantire le stesse funzioni e caratteristiche lungo il rilevato, ma talvolta il materiale presente può risultare differente a causa di interventi di manutenzione nel tempo o del materiale disponibile in loco per la realizzazione.

Le carote di terreno sono state raccolte tramite campionamento manuale in corrispondenza del paramento lato fiume, lungo quattro transetti diversi. La scelta delle sezioni lungo le quali raccogliere i campioni di terreno non è stata casuale, ma in modo tale da avere due transetti in corrispondenza della presenza di macchie di canna comune (transetto A e C) e due transetti lungo i quali la canna non era presente (transetto B e D). Inoltre, a due a due i transetti sono posizionati in porzioni arginali che presentano un'esposizione diversa rispetto l'ansa del fiume. Per ogni transetto sono stati eseguiti 5 sondaggi disposti lungo il paramento interno, a partire dalla cresta, fino alla golena lato fiume, e da ogni sondaggio sono state raccolte due campioni di terreno, uno alla profondità di 0.40 m e l'altro a 1.40 m di profondità dalla superficie del paramento. La Figura 23 riporta il posizionamento dei transetti lungo la struttura arginale e la Figura 24 riporta il posizionamento dei vari sondaggi lungo ogni transetto, dove il colore verde indica la presenza di canne nel transetto.



Figura 23: posizionamento dei transetti lungo la struttura arginale

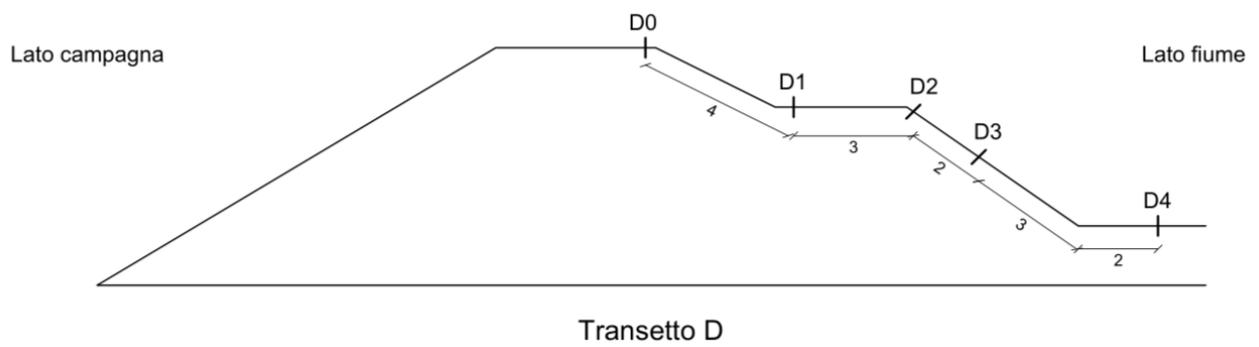
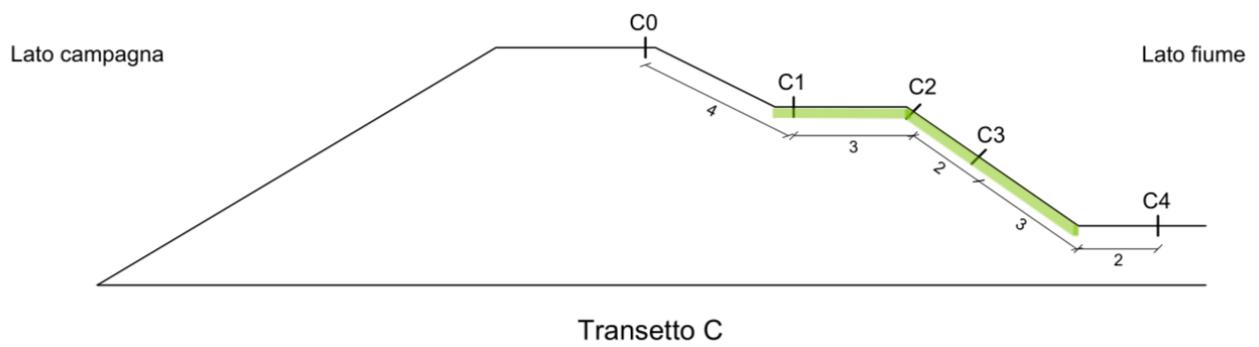
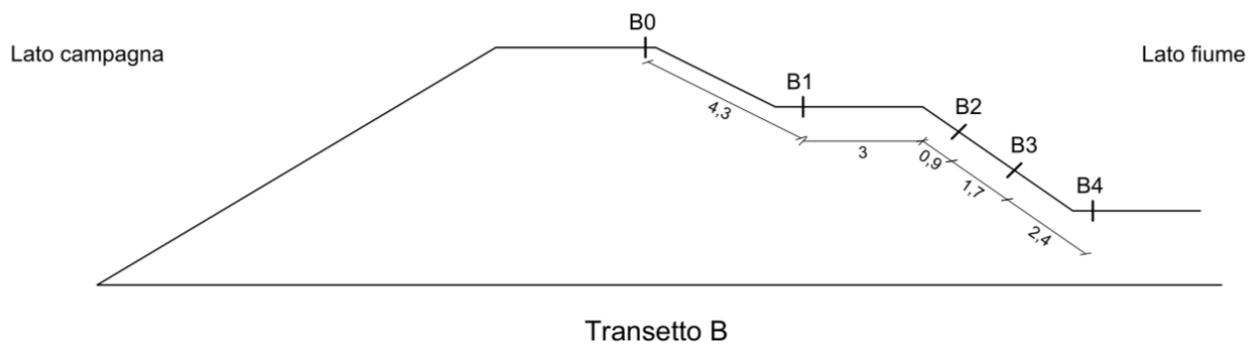
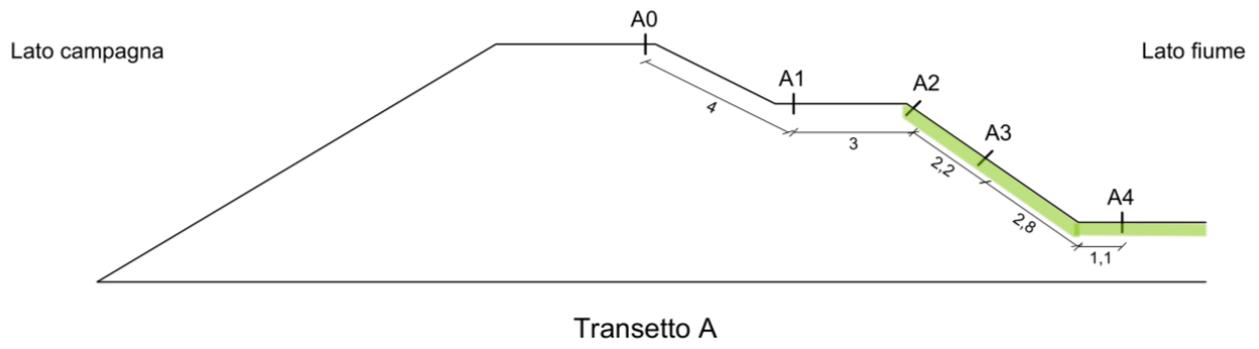


Figura 24: schema dei prelievi di terreno in ogni transetto

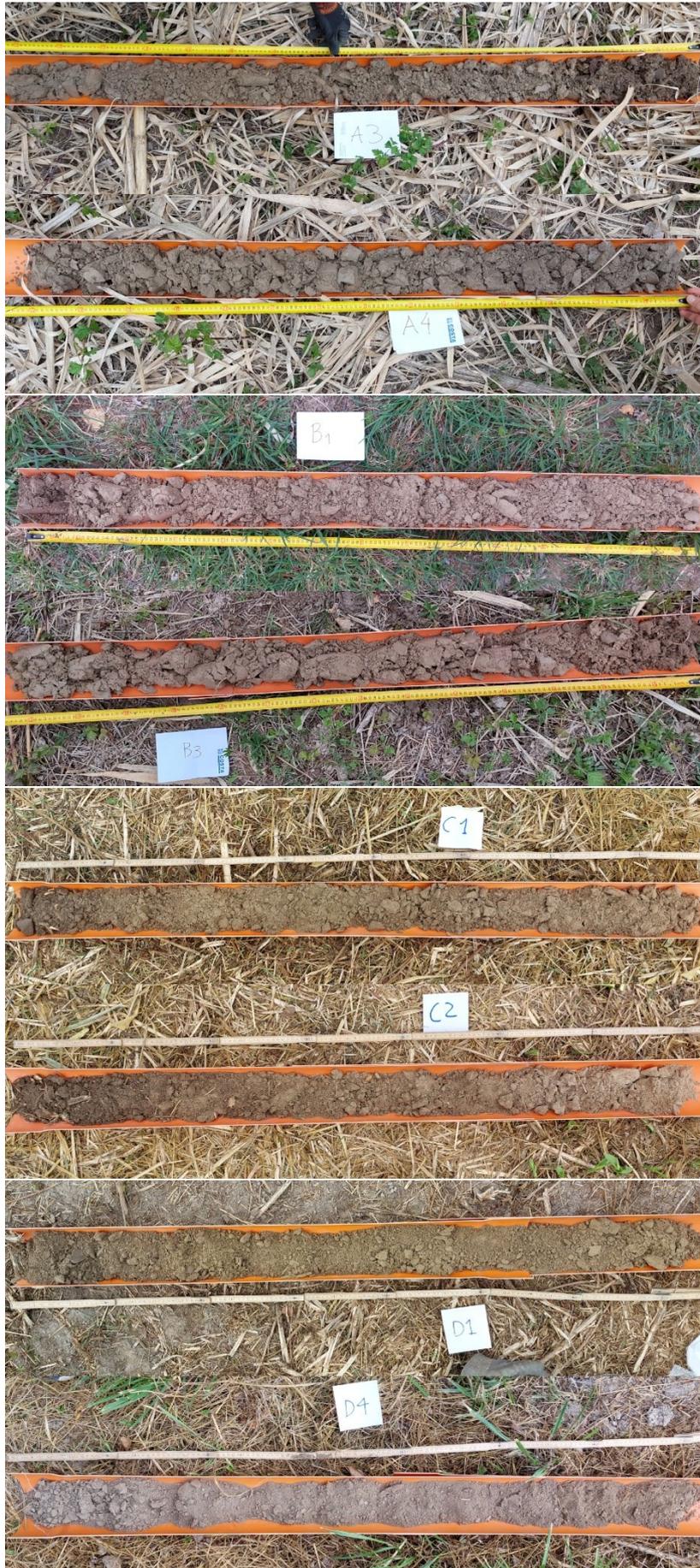


Figura 25:alcuni sondaggi di terreno dei transetti analizzati

Successivamente, i campioni di terreno raccolti sono state analizzati in laboratorio per determinarne le caratteristiche granulometriche attraverso l'analisi granulometrica.

L'analisi granulometrica consente di classificare i campioni di terreno determinando la massa in percentuale delle particelle per i vari intervalli di grandezza (Craig, 2004). Per determinare la distribuzione granulometrica della parte grossolana dei terreni viene utilizzato il metodo della vagliatura meccanica a secco (Figura 26), che consiste nel far passare il terreno per una serie di setacci con dimensioni di maglia diversa e calcolare il peso del terreno trattenuto da ogni setaccio. Ogni campione di terreno viene essiccato in forno a 105° per 24 ore e successivamente ne vengono pesati 200 g, cioè la quantità necessaria per eseguire la prova. Se necessario, il materiale pesato può essere frantumato con un mortaio, in modo da rompere i grumi di terreno più fine che si sono legati durante l'essiccamento. Una volta pronto, il terreno viene inserito in una pila di setacci con dimensione delle aperture decrescenti e vengono fatti vibrare in modo da far cadere al setaccio successivo il materiale passante per la maglia e questa procedura viene ripetuta fino al setaccio #200. Il materiale trattenuto da ogni setaccio viene pesato ed in seguito viene valutato come percentuale passante attraverso la formula:

$$P_i = \frac{P_{tot} - (T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_i)}{P_{tot}} 100 \quad [\%] \quad (7)$$

dove:

P_{tot} è il peso secco dell'intero campione;

T_i è il peso trattenuto dall'i-esimo vaglio;

P_i è la frazione passante dall'i-esimo vaglio.

Tramite la frazione di materiale passante da ogni vaglio è possibile tracciare la curva di distribuzione granulometrica su un grafico in scala semilogaritmica. Le dimensioni delle maglie dei setacci per l'analisi granulometrica può variare dall'ordine di qualche pollice, fino al setaccio più fine (vaglio #200) dove le aperture misurano 0.074 mm (secondo il sistema ASTM).

Se il terreno analizzato presenta una modesta quantità di particelle fini, cioè quelle passanti al setaccio #200, il campione deve essere sottoposto alla vagliatura umida per sedimentazione (Figura 27), o detta anche aerometria, al fine di completare la distribuzione granulometrica. Questa prova si basa sulla legge di Stokes che descrive la velocità con cui le particelle di materiale si depositano in una sospensione e secondo la quale, le particelle con diametri più grandi presentano una maggiore velocità di sedimentazione (Craig, 2004). La legge di Stokes è descritta nella forma:

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\mu} D^2 \quad (8)$$

dove:

v è la velocità di sedimentazione;
 γ_s è il peso di volume delle particelle;
 γ_w è il peso di volume dell'acqua;
 D è il diametro delle particelle;
 μ è la viscosità dell'acqua.

Per il test vengono analizzati 30-40 g di campione secco, vengono messi in sospensione in 1 l di acqua e soluzione antiflocculante e lasciati depositare. Ad intervalli di tempo viene misurata la densità della sospensione mediante densimetro fino al raggiungimento della densità dell'acqua.

In seguito, i dati raccolti dai due metodi di vagliatura vengono elaborati per ottenere le curve granulometriche di ogni campione di terreno.



Figura 26: strumentazione per la vagliatura meccanica a secco



Figura 27: strumentazione per l'aerometria

3.4 Campagne di volo con il drone

In corrispondenza dell'ansa del fiume Tagliamento compresa nell'area di studio sono stati eseguiti due voli fotogrammetrici con il drone, con l'obiettivo di mappare il terreno ed individuare tutti i canneti di *Arundo donax* attraverso i fotogrammi restituiti dal volo. La fotogrammetria con drone permette infatti di svolgere rilievi di vaste zone in tempi ridotti, con immagini ad alta precisione e geolocalizzate.

Il volo è stato eseguito con il drone DJI Mavik 3 Enterprise (Figura 28) con modulo RTK, che consente di avere una precisione a terra di tipo centimetrico (circa 2 cm). Le principali caratteristiche del drone sono: fotocamera con sensore 4/3, risoluzione 20 MP, obiettivo 24 mm. Per controllare e gestire il drone durante la fase di volo è stato utilizzato il software DJI Pilot 2, che consente di effettuare la missione di volo in modalità automatica, impostando in precedenza l'area e il percorso del drone (Figura 29 (a)). Il rilievo è stato effettuato a 120 m di quota e i fotogrammi presentano una sovrapposizione dell'80% tra foto e una sovrapposizione del 75% tra strisciate.



Figura 28: drone DJI Mavik 3

Prima di effettuare il volo, sono stati posizionati 14 target in maniera distribuita e ad altimetrie diverse su tutta l'area di rilievo, in modo da poter georeferenziare il volo tramite la conoscenza delle coordinate note dei target rilevate direttamente tramite GPS. Per ognuno di questi target sono state materializzate le coordinate attraverso il GPS Leica con Smartantenna GNSS (Global Navigation Satellite System), che consente di conoscere le posizioni spaziali per mezzo dell'utilizzo dei satelliti. Successivamente, il rilievo è stato elaborato attraverso il software per fotogrammetria Metashape per poter: georeferenziare il rilievo attraverso le coordinate dei target; convertire il sistema di riferimento

geografico del rilievo da WGS84, restituito dal GSP che si basa sull'ellissoide, al sistema di riferimento RDN2008 in coordinate piane, completo di quota ortometrica; estrapolare le ortofoto; restituire la distribuzione delle quote del volo sotto formato DSM (Digital Surface Model). A differenza di altri modelli che riproducono l'andamento della superficie geodetica e quindi del solo "terreno", il modello DSM tiene conto delle quote e della forma di tutti gli oggetti presenti nella superficie, tra cui la vegetazione.

I due voli sono stati eseguiti a distanza di sei mesi, con condizioni ambientali diverse dovute alla stagione: il primo volo è stato svolto a marzo 2023 dove la vegetazione risultava assente o ingiallita a seguito dell'inverno, come nel caso dei canneti di *Arundo donax*; il secondo volo è stato svolto a settembre 2023, dove in questo caso la vegetazione risultava rigogliosa in tutta l'area arginale (specialmente in golena) e i canneti di canna comune si presentavano verdi e voluminosi a seguito della fioritura estiva.

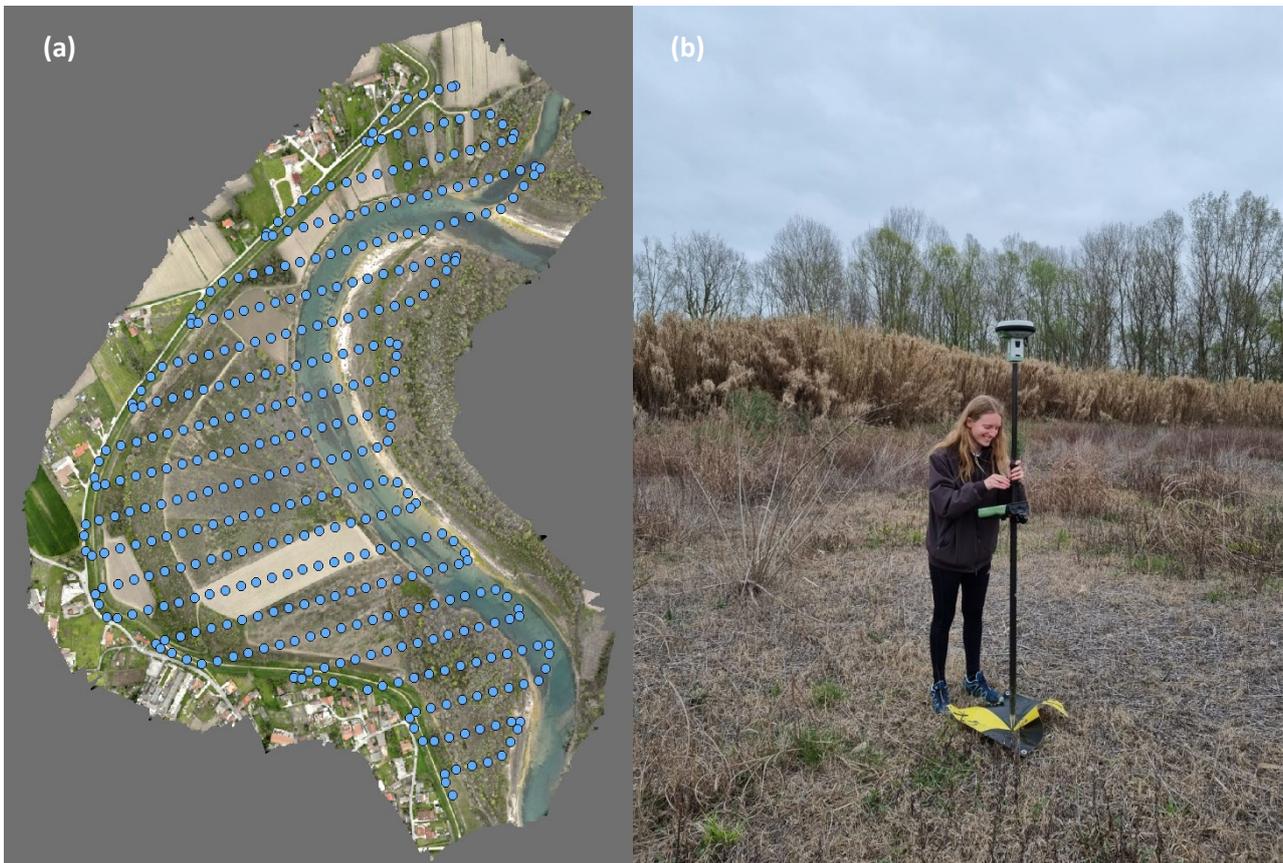


Figura 29: programmazione della missione di volo (a); acquisizione mediante GPS Leica delle coordinate dei target nell'area di studio (b)

Capitolo 4

4. Risultati analisi granulometrica

I campioni di terreno estratti lungo i transetti ortogonali all'argine sono stati analizzati in laboratorio tramite le prove di vagliatura meccanica e aerometria descritte nel capitolo 3.3. Queste prove restituiscono la distribuzione granulometrica dei vari terreni, rappresentata attraverso una curva in un grafico semilogaritmico, che riporta sulle ascisse i diametri dei grani (in mm) e sulle ordinate la percentuale passante di materiale. La curva granulometrica permette di caratterizzare il terreno determinando la percentuale del materiale componente, i diametri delle particelle di terreno, il loro grado di omogeneità. A seconda della configurazione che assume, la curva può indicare un'ampia gamma di dimensioni delle particelle, quando la curva risulta piatta, o viceversa, può indicare un materiale uniforme quando la curva risulta molto ripida (Craig, 2004). Si possono quindi quantificare i valori dei diametri più significativi denominati D10, D30, D50 e D60, dove i rispettivi valori equivalgono al diametro del setaccio che lascia passare tale percentuale di materiale, in peso (ad esempio, d60 equivale al diametro del vaglio che trattiene il 40% di materiale e lascia passare il 60%). Con l'extrapolazione di questi diametri è possibile calcolare alcuni parametri come il coefficiente di curvatura (C_C) e di uniformità (C_U):

$$C_C = \frac{d_{30}^2}{d_{60}d_{10}} \quad (8)$$

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (9)$$

Il coefficiente di curvatura indica la variazione graduale o brusca dei cambi di pendenza della curva (in genere $C_C > 3$ indica l'assenza di certe dimensioni dei grani). Il coefficiente di uniformità indica quanto il terreno risulti omogeneo rispetto alla dimensione dei grani (in genere $C_U < 5$ indica un materiale uniforme, mentre $C_U > 15$ indica un materiale ben gradato). In Tabella 2 vengono riportati i valori dei vari diametri e coefficienti che caratterizzano ogni campione di terreno.

Campione	z [m]	dist [m]	D10	D30	D50	D60	Cu	Cc
A0_0,4	0,4	0	0,015	0,038	0,060	0,075	5,000	1,284
A1_0,4	0,4	4	0,010	0,027	0,050	0,060	6,000	1,215
A2_0,4	0,4	7	0,015	0,033	0,050	0,062	4,133	1,171
A3_0,4	0,4	9,2	0,016	0,035	0,056	0,070	4,375	1,094
A4_0,4	0,4	13,1	0,004	0,010	0,025	0,045	10,976	0,542
B0_0,4	0,4	0	0,010	0,025	0,046	0,055	5,500	1,136
B1_0,4	0,4	4,3	0,012	0,028	0,047	0,057	4,750	1,146
B2_0,4	0,4	8,4	0,007	0,018	0,047	0,060	9,231	0,831
B3_0,4	0,4	10,1	0,015	0,029	0,050	0,060	4,000	0,934
B4_0,4	0,4	12,5	0,007	0,017	0,035	0,050	7,143	0,826
A0_1,4	1,4	0	0,012	0,030	0,050	0,060	5,000	1,250
A1_1,4	1,4	4	0,015	0,035	0,052	0,064	4,267	1,276
A2_1,4	1,4	7	0,018	0,045	0,070	0,090	5,000	1,250
A3_1,4	1,4	9,2	0,021	0,042	0,065	0,080	3,810	1,050
A4_1,4	1,4	13,1	0,012	0,025	0,045	0,054	4,500	0,965
B0_1,4	1,4	0	0,013	0,029	0,049	0,059	4,538	1,096
B1_1,4	1,4	4,3	0,024	0,045	0,075	0,080	3,333	1,055
B2_1,4	1,4	8,4	0,014	0,033	0,058	0,070	5,000	1,111
B3_1,4	1,4	10,1	0,013	0,030	0,054	0,066	5,077	1,049
B4_1,4	1,4	12,5	0,005	0,017	0,040	0,054	10,385	1,029
C0_0,4	0,4	0	0,015	0,030	0,049	0,060	4,000	1,000
C1_0,4	0,4	4	0,019	0,049	0,085	0,110	5,789	1,149
C2_0,4	0,4	7	0,016	0,035	0,059	0,080	5,000	0,957
C3_0,4	0,4	9	0,016	0,035	0,060	0,075	4,688	1,021
C4_0,4	0,4	14	0,003	0,007	0,013	0,018	5,806	0,853
C0_1,4	1,4	0	0,026	0,065	0,140	0,170	6,538	0,956
C1_1,4	1,4	4	0,015	0,033	0,052	0,065	4,333	1,117
C2_1,4	1,4	7	0,015	0,035	0,052	0,065	4,333	1,256
C3_1,4	1,4	9	0,020	0,040	0,060	0,070	3,500	1,143
C4_1,4	1,4	14	0,003	0,007	0,014	0,020	7,407	0,987
D0_0,4	0,4	0	0,010	0,027	0,051	0,072	7,200	1,013
D1_0,4	0,4	4	0,009	0,028	0,050	0,060	6,667	1,452
D2_0,4	0,4	7	0,016	0,032	0,055	0,069	4,313	0,928
D3_0,4	0,4	9	0,014	0,031	0,052	0,065	4,643	1,056
D4_0,4	0,4	14	0,003	0,007	0,014	0,017	5,000	0,848
D0_1,4	1,4	0	0,016	0,040	0,070	0,110	6,875	0,909
D1_1,4	1,4	4	0,013	0,030	0,050	0,060	4,615	1,154
D2_1,4	1,4	7	0,013	0,032	0,050	0,062	4,769	1,270
D3_1,4	1,4	9	0,017	0,037	0,058	0,070	4,118	1,150
D4_1,4	1,4	14	0,003	0,008	0,014	0,020	5,882	0,827

Tabella 2: valori di D10, D30, D50, D60, Cu e Cc per ogni campione di terreno

Le analisi granulometriche eseguite sui primi 20 campioni, relativi ai transetti A e B, hanno mostrato terreni molto simili tra loro, che presentano come componente principale sabbia fine e limo (Figura 30), in percentuale diversa tra un campione e l'altro; inoltre in ogni campione è presente una piccola percentuale di sabbia media. In generale, i campioni di terreno raccolti alla profondità di 0,40 m risultano essere più fini rispetto quelli più profondi raccolti a 1,40 m, sia nel transetto A che in B. Inoltre, il transetto A tracciato in area con presenza di canne, presenta un materiale leggermente più

grossolano rispetto al transetto B, tracciato in una zona in assenza di canne. A sua volta il transetto A presenta materiale leggermente più grossolano in corrispondenza dei campioni A2 e A3, cioè nella parte di paramento dove si sviluppa il canneto di Arundo Donax. In entrambi i transetti, le carote A4 e B4 in corrispondenza del piede dell'argine lato alveo, quindi in golena, presentano un materiale più fino rispetto al resto dei campioni.

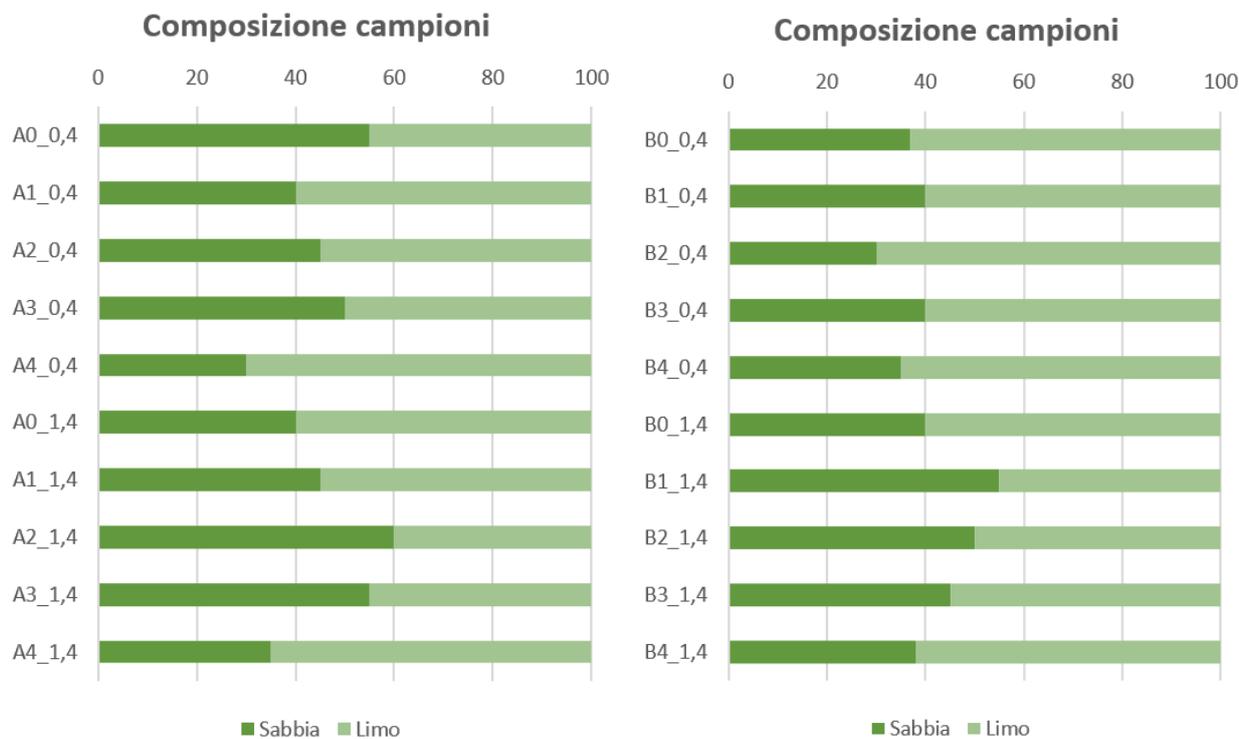


Figura 30: composizione in percentuale del materiale costituente i campioni dei transetti A e B

Osservando i dati riportati nella Tabella 2, la (Figura 31) e la (Figura 32) i campioni del transetto A prelevati alla profondità di 0,40 m presentano un D10 e un D50 maggiore in confronto dei rispettivi campioni del transetto B, mentre quelli prelevati alla profondità di 1,40 m risultano con diametri simili in entrambi i transetti.

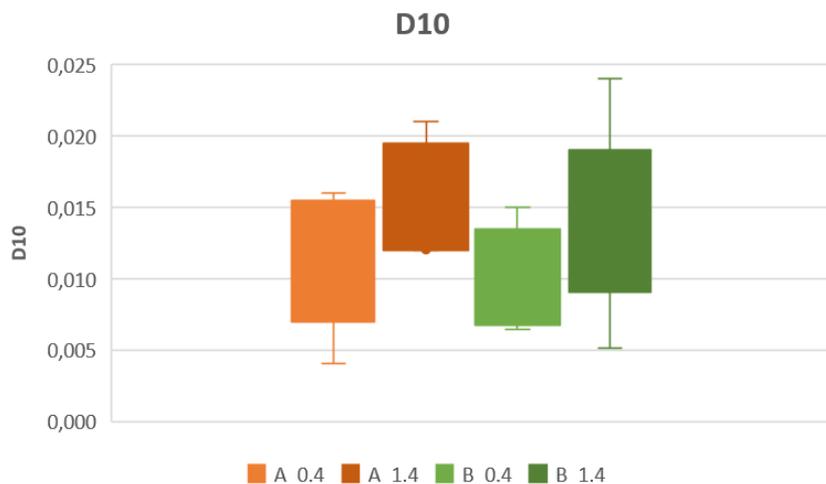


Figura 31: range valori D10 per i campioni dei transetti A e B alla profondità di 0,40 m

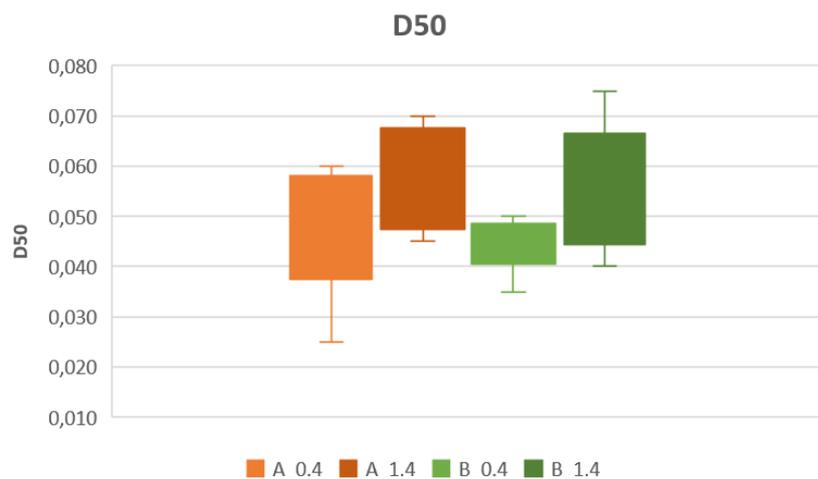


Figura 32: range valori D50 per i campioni dei transetti A e B alla profondità di 1,40 m

Mettendo in relazione il D10 e il D50 si nota un legame lineare tra i due diametri (Figura 33), che suggerisce che le proporzioni tra le dimensioni medie (50% di passante) e della parte più fine (10% di passante) si mantengono al variare delle dimensioni delle particelle.

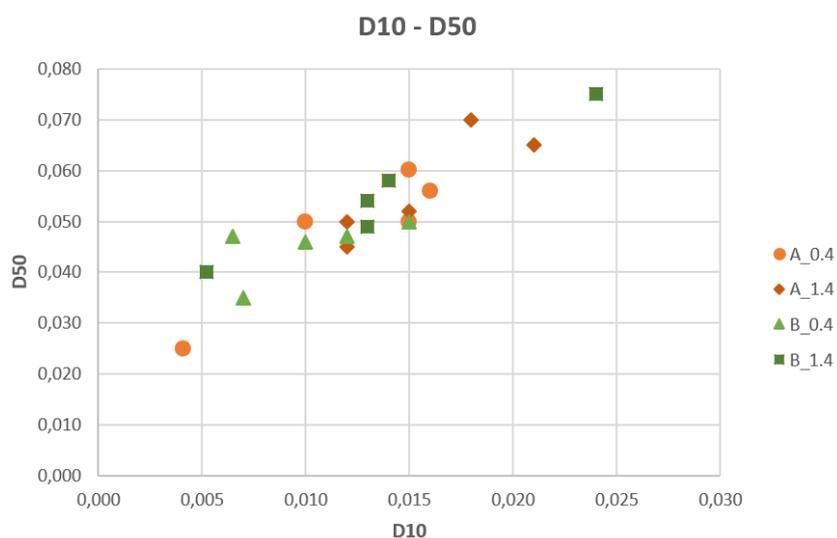


Figura 33: relazione tra D10 e D50 dei campioni appartenenti ai transetti A e B

Calcolando i coefficienti di uniformità (C_U) riportati nella Tabella 2 si nota che i campioni prelevati lungo il transetto A alle varie quote risultano abbastanza omogenei ($C_U < 5$), dal punto di vista granulometrico, tranne il campione A4 alla profondità di 0,4 m che risulta essere non uniforme ($C_U > 5$), cioè un materiale più gradato. Anche il transetto B presenta campioni abbastanza omogenei tranne il campione 4 ad entrambe le profondità. L'omogeneità del materiale è osservabile anche attraverso le curve granulometriche (Figura 34 e Figura 35), dove una disposizione più distesa della curva è indice di un materiale con dimensioni dei grani più assortita.

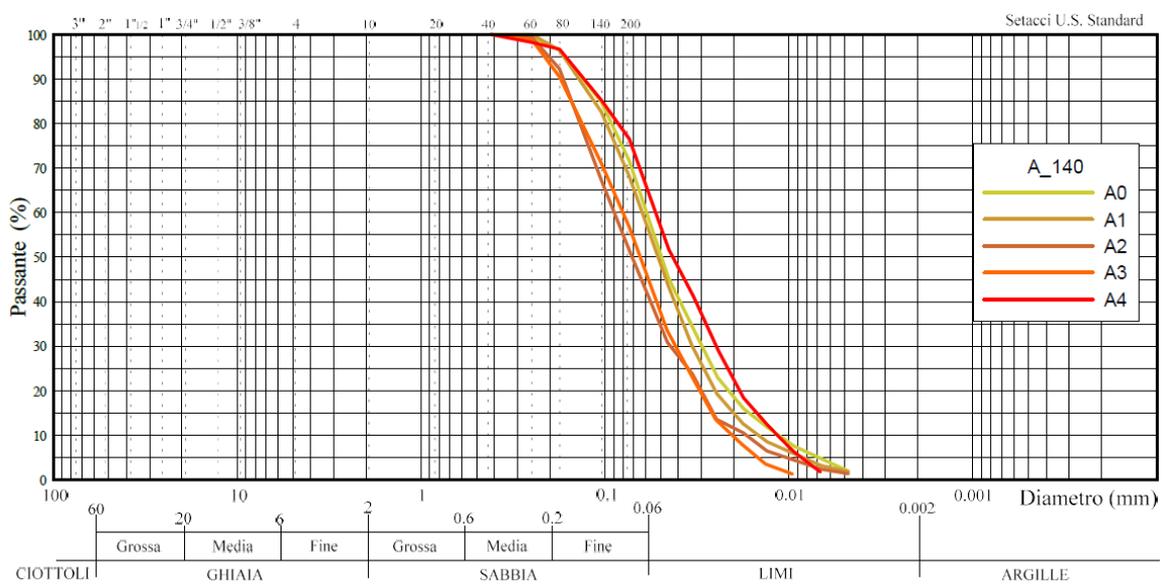
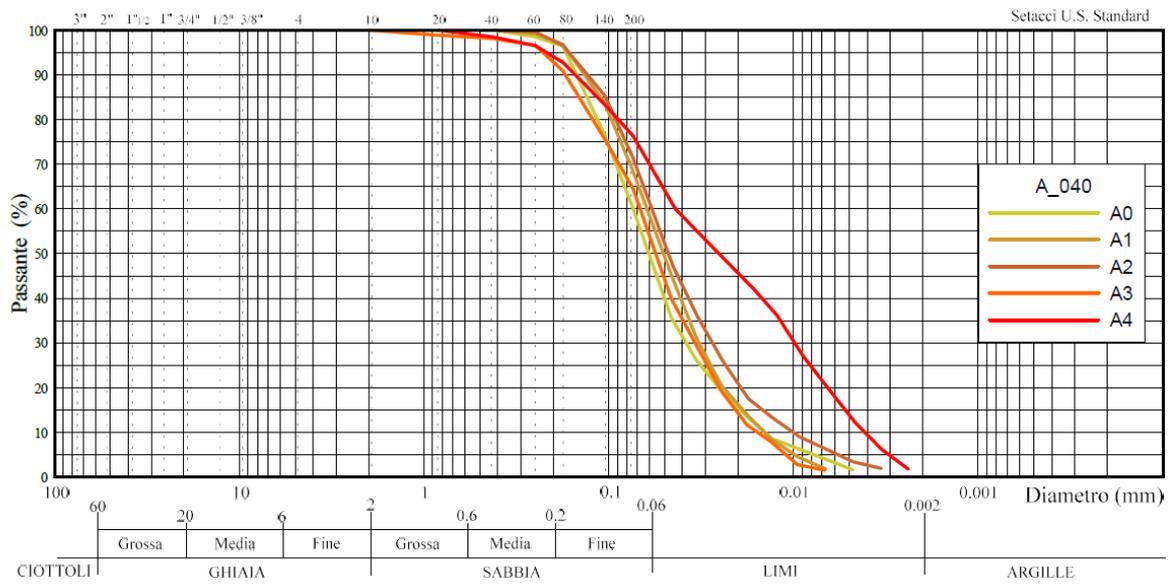
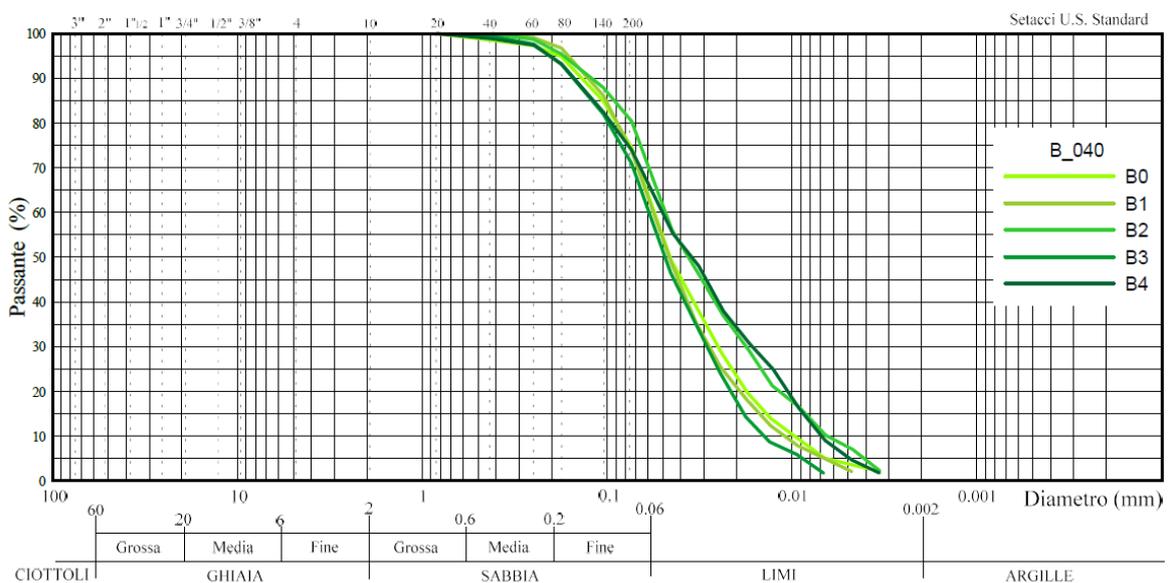


Figura 34: curve granulometriche dei campioni appartenenti al transetto A, alla profondità di 0,40 m (sopra) e 1,40 m (sotto)



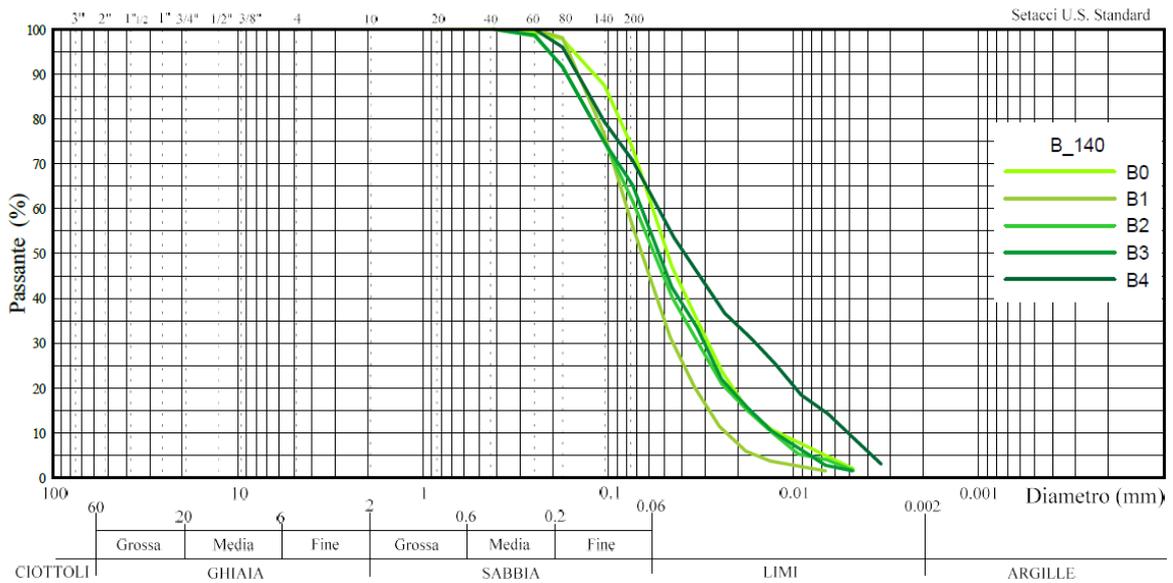


Figura 35: curve granulometriche dei campioni appartenenti al transetto B, alla profondità di 0,40 m (sopra) e 1,40 m (sotto)

Altri 20 campioni sono stati prelevati in corrispondenza dei transetti C e D localizzati in un'altra porzione dell'argine, che presenta un'esposizione diversa rispetto al sole e alla direzione del flusso nell'alveo e una maggiore distanza dal corso d'acqua. Attraverso l'analisi granulometrica si è osservato come anche questi terreni risultano principalmente composti da sabbia fine e limo (Figura 36), con una piccola percentuale di sabbia media.

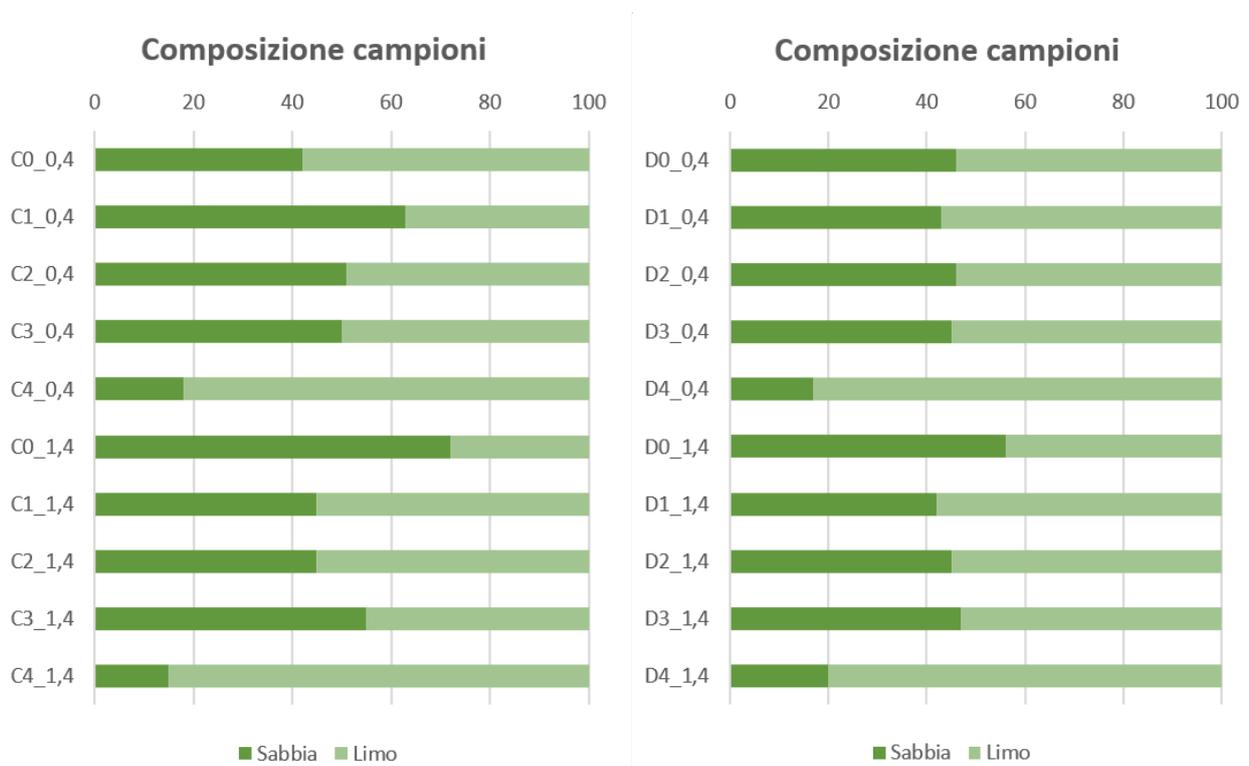


Figura 36: composizione in percentuale del materiale costituente i campioni dei transetti C e D

Anche in questo caso, la maggior parte dei sondaggi presenta campioni di materiale più fine alla quota di 0,40 m rispetto quelli più profondi; inoltre il transetto C tracciato in corrispondenza di una zona con presenza di canne (specialmente le carote C1, C2 e C3), presenta un terreno con particelle di diametro leggermente maggiore rispetto al transetto D, tracciato in corrispondenza di una zona con assenza di canne. Anche in questa porzione di argine, il terreno al piede del rilevato, cioè i campioni C4 e D4, risultano più fini rispetto ai restanti campioni, e simili ai corrispondenti campioni del transetto A e B.

Estrapolando le dimensioni del D50 e D10 dalle curve granulometriche C e D, riportati alla Tabella 2, tali diametri risultano maggiori nei campioni del transetto C, ad entrambe le profondità, rispetto i rispettivi valori del transetto D. Anche per questi campioni sembra sussistere una relazione lineare tra i valori di D10 e D50, come si osserva alla Figura 37, se si escludono i campioni prelevati in golena, che appaiono diversi e molto più fini.

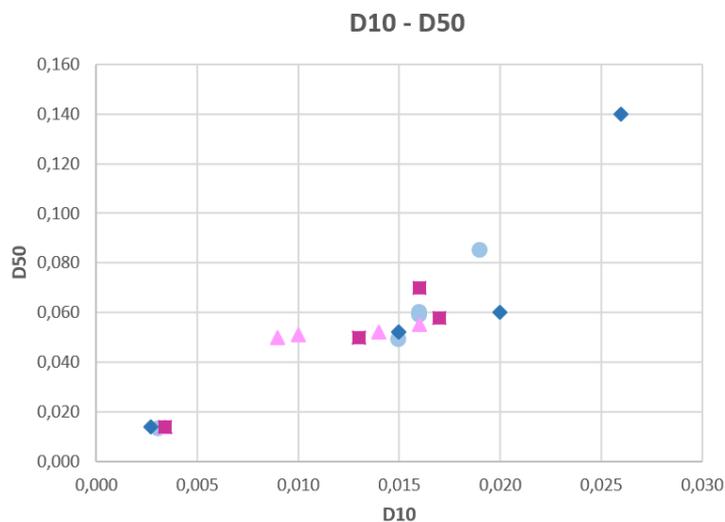


Figura 37: relazione tra D10 e D50 dei campioni appartenenti ai transetti C e D

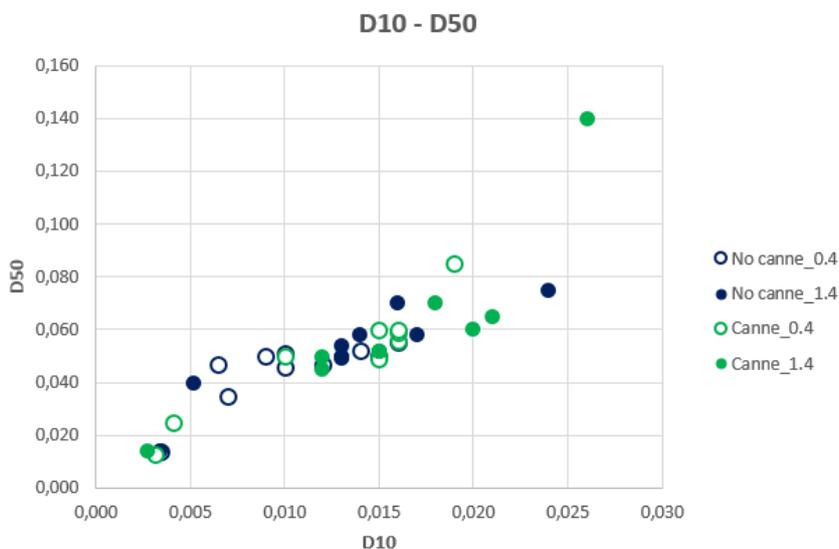


Figura 38: relazione tra D10 e D50 dei campioni con e senza canne alle varie profondità

Osservando il coefficiente di uniformità (C_U) alla Tabella 2, i transetti C e D presentano valori più o meno simili, con alcuni campioni meno uniformi degli altri.

Di seguito vengono riportate le curve granulometriche dei sondaggi relativi ai transetti C e D (Figura 39 e Figura 40), dove si può notare in maniera più evidente come i campioni di terreno al piede dell'argine (C4 e D4) siano più fini rispetto gli altri campioni, come evidenziato dalla traslazione della relativa curva verso la parte destra del grafico. Inoltre, sempre con riferimento ai campioni C4 e D4 al piede dell'argine, si notano bruschi cambi di pendenza delle relative curve granulometriche, indice dell'assenza di alcuni diametri dei grani, mostrando un comportamento diverso rispetto la maggior parte dei campioni, ma che si ripete in entrambe le profondità e sezioni, denotando quindi una certa omogeneità del terreno in golenia, le cui caratteristiche potrebbero essere ascrivibili al fatto che sia un'ansa di sedimentazione in occasione di fase decrescente di eventi caratterizzati da portate consistenti.

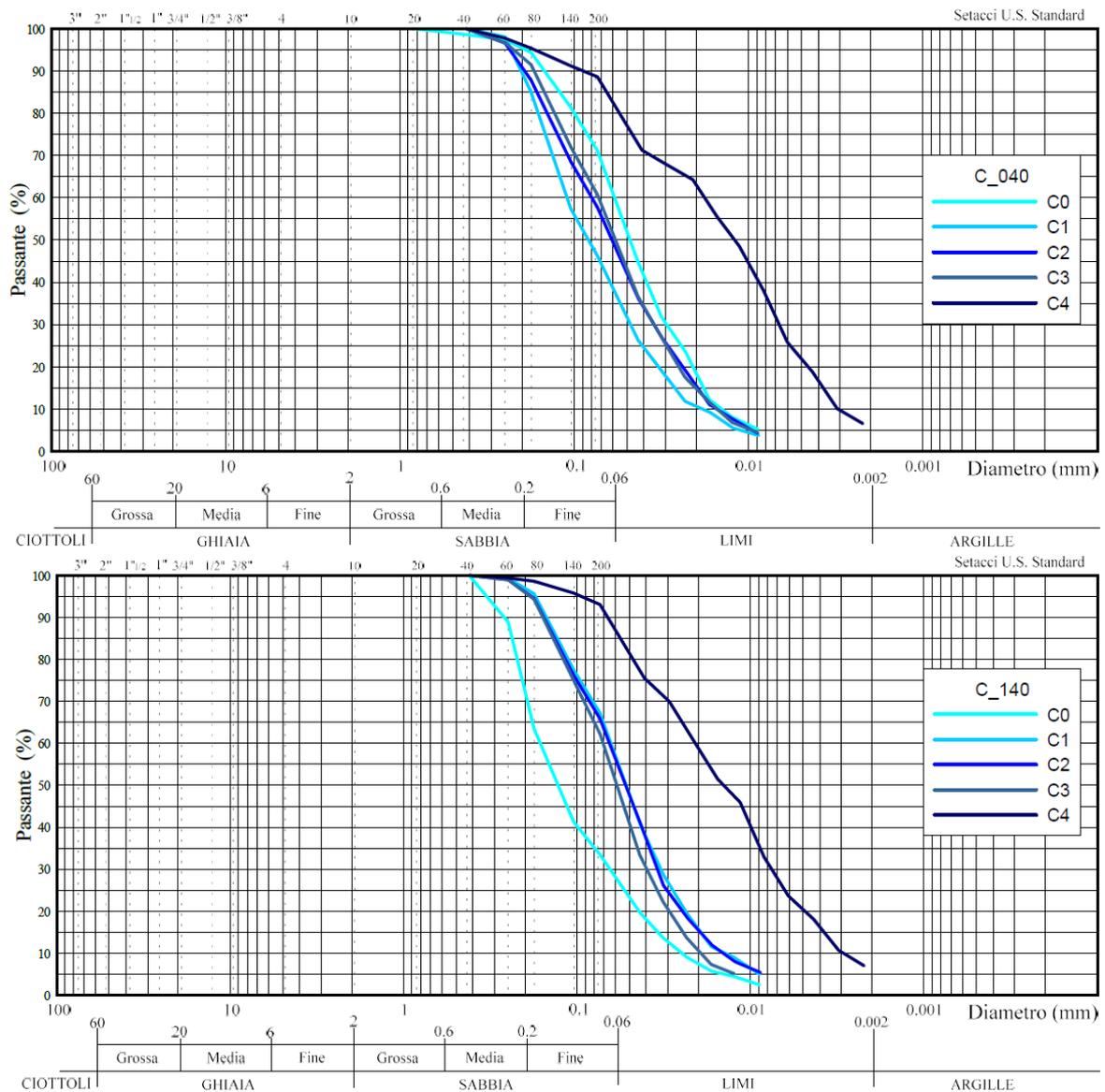


Figura 39: curve granulometriche dei campioni del transetto C, alla profondità di 0,40 m (sopra) e 1,40 m (sotto)

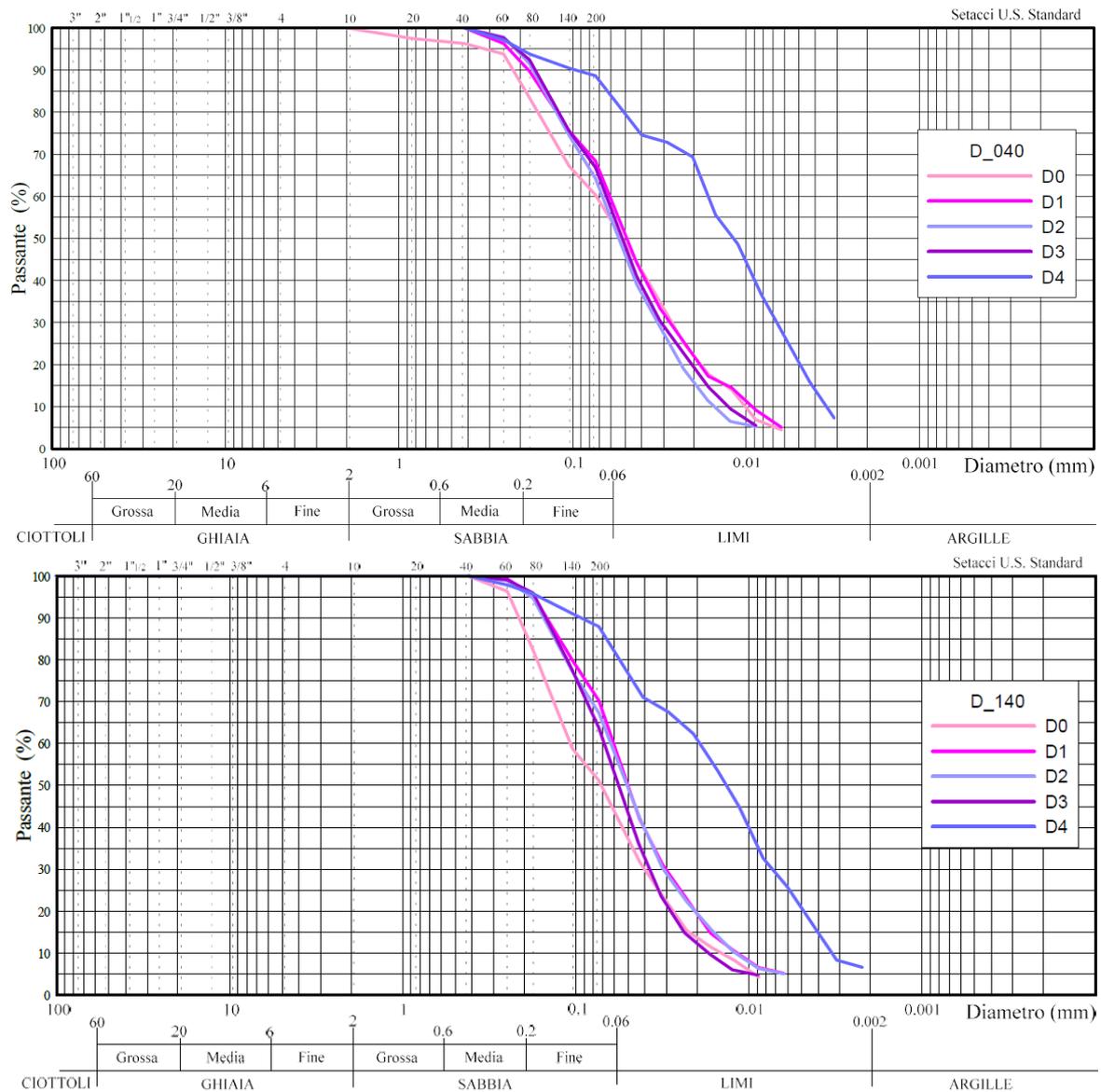


Figura 40: curve granulometriche dei campioni del transetto D, alla profondità di 0,40 m (sopra) e 1,40 m (sotto)

Mettendo in relazione la componente fine dei campioni (D10) e il coefficiente di uniformità (C_U), si è ottenuto un legame descritto da una potenza negativa tra questi due valori (Figura 41), dove al diminuire della dimensione della componente fine, diminuisce l'omogeneità del materiale, che si traduce in un aumento del coefficiente di uniformità. Questo fattore si è osservato per tutti i transetti, specialmente in A e B dove i terreni più fini risultano effettivamente più gradati, mentre in C e D questa relazione sembra sussistere in maniera meno forte in quanto alcuni campioni, precisamente quelli in testa e al piede dell'argine (C0_1.4, C1_0.4, C4_0.4, C4_1.4, D0_1.4, D4_0.4, D4_1.4), si discostano da tale andamento.

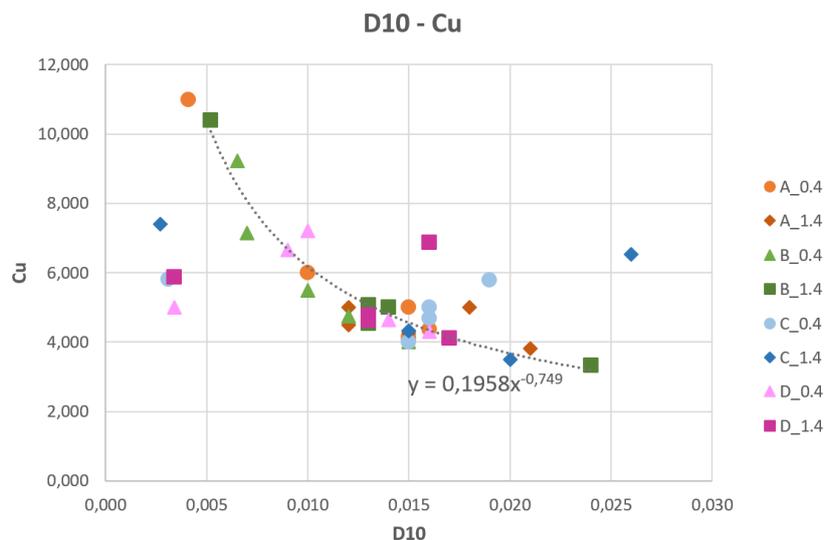


Figura 41: : relazione tra D10 e Cu dei campioni appartenenti ai transetti A, B, C e D

Valori elevati di C_U descrivono un materiale ben gradato, cioè con varie dimensioni delle particelle che portano ad occupare maggiormente anche gli spazi interstiziali tra una particella e l'altra e così a ridurre la dimensione dei vuoti. In questi terreni l'acqua trova un minor spazio in cui transitare, che si traduce generalmente con un inferiore valore di permeabilità. Per verificare questo, è stato stimato il coefficiente di permeabilità (k) mediante la formula di Hazen, valida per terreni grossolani, che permette di calcolare un valore approssimato di k in funzione della componente fine del materiale. La formula di Hazen assume la seguente forma (Craig, 2004):

$$k = 10^{-2} D_{10}^2 \quad (10)$$

I risultati del coefficiente di permeabilità di ogni campione sono riportati alla Tabella 3.

Campione	z [m]	D10	k [m/s]	Cu	Campione	z [m]	D10	k [m/s]	Cu
A0_0,4	0,4	0,015	2,25E-06	5,000	C0_0,4	0,4	0,015	2,25E-06	4,000
A1_0,4	0,4	0,01	1,00E-06	6,000	C1_0,4	0,4	0,018	3,24E-06	6,667
A2_0,4	0,4	0,015	2,25E-06	4,133	C2_0,4	0,4	0,016	2,56E-06	5,000
A3_0,4	0,4	0,016	2,56E-06	4,375	C3_0,4	0,4	0,016	2,56E-06	4,688
A4_0,4	0,4	0,0041	1,68E-07	10,976	C4_0,4	0,4	0,0031	9,61E-08	5,806
B0_0,4	0,4	0,01	1,00E-06	5,500	D0_0,4	0,4	0,01	1,00E-06	7,200
B1_0,4	0,4	0,012	1,44E-06	4,750	D1_0,4	0,4	0,009	8,10E-07	6,667
B2_0,4	0,4	0,0065	4,23E-07	9,231	D2_0,4	0,4	0,016	2,56E-06	4,313
B3_0,4	0,4	0,015	2,25E-06	4,000	D3_0,4	0,4	0,014	1,96E-06	4,643
B4_0,4	0,4	0,007	4,90E-07	7,143	D4_0,4	0,4	0,0036	1,30E-07	4,722
A0_1,4	1,4	0,012	1,44E-06	5,000	C0_1,4	1,4	0,026	6,76E-06	6,538
A1_1,4	1,4	0,015	2,25E-06	4,267	C1_1,4	1,4	0,015	2,25E-06	4,333
A2_1,4	1,4	0,018	3,24E-06	5,000	C2_1,4	1,4	0,015	2,25E-06	4,333
A3_1,4	1,4	0,021	4,41E-06	3,810	C3_1,4	1,4	0,02	4,00E-06	3,500
A4_1,4	1,4	0,012	1,44E-06	4,500	C4_1,4	1,4	0,003	9,00E-08	7,000
B0_1,4	1,4	0,013	1,69E-06	4,538	D0_1,4	1,4	0,015	2,25E-06	7,333
B1_1,4	1,4	0,024	5,76E-06	3,333	D1_1,4	1,4	0,013	1,69E-06	4,615
B2_1,4	1,4	0,014	1,96E-06	5,000	D2_1,4	1,4	0,013	1,69E-06	4,769
B3_1,4	1,4	0,013	1,69E-06	5,077	D3_1,4	1,4	0,017	2,89E-06	4,118
B4_1,4	1,4	0,0052	2,70E-07	10,385	D4_1,4	1,4	0,0034	1,16E-07	5,588

Tabella 3: valori del coefficiente permeabilità k dei campioni di terreno di tutti i transetti A, B, C e D

Successivamente, mettendo in relazione il coefficiente di permeabilità e il coefficiente di uniformità si è ottenuto un legame tra questi due coefficienti rappresentato da una potenza negativa.

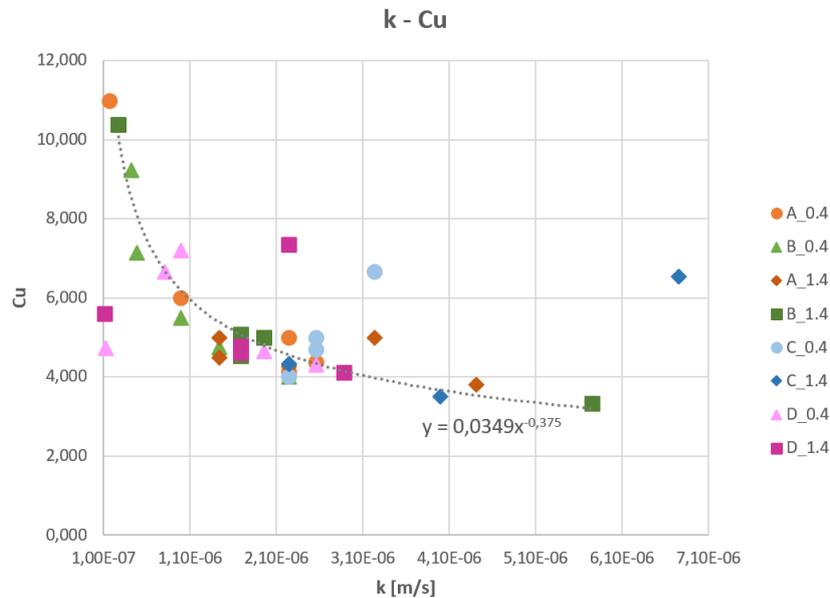


Figura 42: relazione tra k e C_u dei campioni appartenenti ai transetti A, B, C e D

Dalla Figura 42 si può osservare che a valori di C_u più elevati corrisponde un terreno con minor permeabilità (valore di k più piccolo), in accordo con le ipotesi descritte precedentemente. Questa relazione sembra valere per la maggior parte dei sondaggi, ad esclusione di alcuni campioni posti in sommità e al piede dell'argine dei transetti C e D (C0_1.4, C1_0.4, D0_1.4, D4_0.4, D4_1.4), che si discostano da questo andamento.

Come accennato nel capitolo 3.2, Arundo Donax non si sviluppa in un solo tipo di terreno ma si adatta facilmente a diversi contesti, anche se di sua natura predilige terreni umidi e drenati. Dall'analisi granulometrica svolta sui campioni prelevati, si evince come i campioni di terreno siano molto simili nella composizione sebbene prelevati a varie profondità, lungo transetti diversi, in presenza o assenza di canne, presentando solo alcune differenze nella curva granulometrica e nelle percentuali in cui è presente ogni componente. In particolare i terreni in cui si sviluppa Arundo Donax, transetti A e C, risultano essere leggermente più grossolani e con meno percentuale di fine rispetto ai transetti senza vegetazione (B e D), presentando una maggiore quantità di sabbia e valori di permeabilità maggiori se confrontati con i rispettivi transetti appartenenti alla medesima area ma senza la presenza di canne, in accordo con quanto trovato in letteratura, cioè confermando il fatto che le canne per svilupparsi prediligono terreni più drenati. Comunque, i transetti C e D risultano formati da terreno più grossolano di A e B. La differenza di terreno più sostanziale si nota tra i vari campioni appartenenti al medesimo transetto, dove, in quasi tutti i casi, i campioni prelevati sulla sommità dell'argine risultano particolarmente sabbiosi (specialmente il campione C0_1.4), mentre i campioni prelevati al piede dell'argine risultano molto più fini, presentando come componente principale quella limosa.

Viste le caratteristiche simili dei terreni e considerando la natura invasiva di *Arundo Donax*, potrebbe essere probabile che la canna si espanda facilmente anche dove ora non è presente, soprattutto nel transetto D che risulta comunque più grossolano rispetto sia A che B.

Di seguito, alla (Tabella 4), viene riportata la tipologia di terreno di ogni campione raccolto nell'argine.

Campione	z [m]	Terreno
A0_0,4	0,4	Sabbia fine con limo e tracce di sabbia media
A1_0,4	0,4	Limo sabbioso con tracce di sabbia media
A2_0,4	0,4	Limo con sabbia fine e tracce di sabbia media
A3_0,4	0,4	Limo con sabbia fine e tracce di sabbia media
A4_0,4	0,4	Limo sabbioso con tracce di sabbia media
B0_0,4	0,4	Limo sabbioso con tracce di sabbia media
B1_0,4	0,4	Limo sabbioso con tracce di sabbia media
B2_0,4	0,4	Limo sabbioso con tracce di sabbia media
B3_0,4	0,4	Limo sabbioso con tracce di sabbia media
B4_0,4	0,4	Limo sabbioso con tracce di sabbia media
A0_1,4	1,4	Limo sabbioso con tracce di sabbia media
A1_1,4	1,4	Limo con sabbia fine e tracce di sabbia media
A2_1,4	1,4	Sabbia fine con limo e tracce di sabbia media
A3_1,4	1,4	Sabbia fine con limo e tracce di sabbia media
A4_1,4	1,4	Limo sabbioso con tracce di sabbia media
B0_1,4	1,4	Limo sabbioso con tracce di sabbia media
B1_1,4	1,4	Sabbia fine con limo e tracce di sabbia media
B2_1,4	1,4	Limo con sabbia fine e presenza di sabbia media
B3_1,4	1,4	Limo con sabbia fine e tracce di sabbia media
B4_1,4	1,4	Limo sabbioso con tracce di sabbia media
C0_0,4	0,4	Limo con sabbia fine e tracce di sabbia media
C1_0,4	0,4	Sabbia limosa con presenza di sabbia media
C2_0,4	0,4	Sabbia fine con limo e presenza di sabbia media
C3_0,4	0,4	Sabbia fine con limo e tracce di sabbia media
C4_0,4	0,4	Limo con presenza di sabbia fine e tracce di sabbia media
C0_1,4	1,4	Sabbia limosa con presenza di sabbia media
C1_1,4	1,4	Limo con sabbia fine e tracce di sabbia media
C2_1,4	1,4	Limo con sabbia fine e tracce di sabbia media
C3_1,4	1,4	Sabbia fine con limo e tracce di sabbia media
C4_1,4	1,4	Limo con presenza di sabbia fine e tracce di sabbia media
D0_0,4	0,4	Limo con sabbia fine e presenza di sabbia media
D1_0,4	0,4	Limo con sabbia fine e tracce di sabbia media
D2_0,4	0,4	Limo con sabbia fine e tracce di sabbia media
D3_0,4	0,4	Limo con sabbia fine e tracce di sabbia media
D4_0,4	0,4	Limo con presenza di sabbia fine e tracce di sabbia media
D0_1,4	1,4	Sabbia fine con limo e presenza di sabbia media
D1_1,4	1,4	Limo con sabbia fine e tracce di sabbia media
D2_1,4	1,4	Limo con sabbia fine e tracce di sabbia media
D3_1,4	1,4	Limo con sabbia fine e tracce di sabbia media
D4_1,4	1,4	Limo con presenza di sabbia fine e tracce di sabbia media

Tabella 4: tipologia di materiale di ogni campione di terreno raccolto nell'argine

4.1 Risultati dell'aereo-fotogrammetria e confronto con foto aeree storiche

I rilievi fotogrammetrici ottenuti con i voli aerei tramite drone sono stati successivamente elaborati attraverso il software GIS (Geographic Information System) ArcGIS Pro, che permette di visualizzare, analizzare, modificare e gestire i dati geografici raccolti.

Attraverso il software GIS, e grazie anche all'alta risoluzione delle ortofoto in RGB restituite dal drone, si è potuto visualizzare tutti i canneti presenti nell'area di acquisizione del rilievo, attraverso la loro identificazione visiva. Il colore delle canne (giallo nel primo volo e verde nel secondo volo) e la particolare texture che assume dall'alto (Figura 43), ha permesso di identificare tutte le macchie di *Arundo donax* che sono state successivamente elaborate tramite software di tipo GIS, determinandone le caratteristiche principali (estensione a terra, altezza, forma, distanza dall'argine). Per via del colore che assume il terreno nelle aree di canna dopo lo sfalcio, è stato inoltre possibile risalire ad ulteriori macchie di canne, nonostante non esistessero fisicamente nel momento in cui sono stati eseguiti i voli.

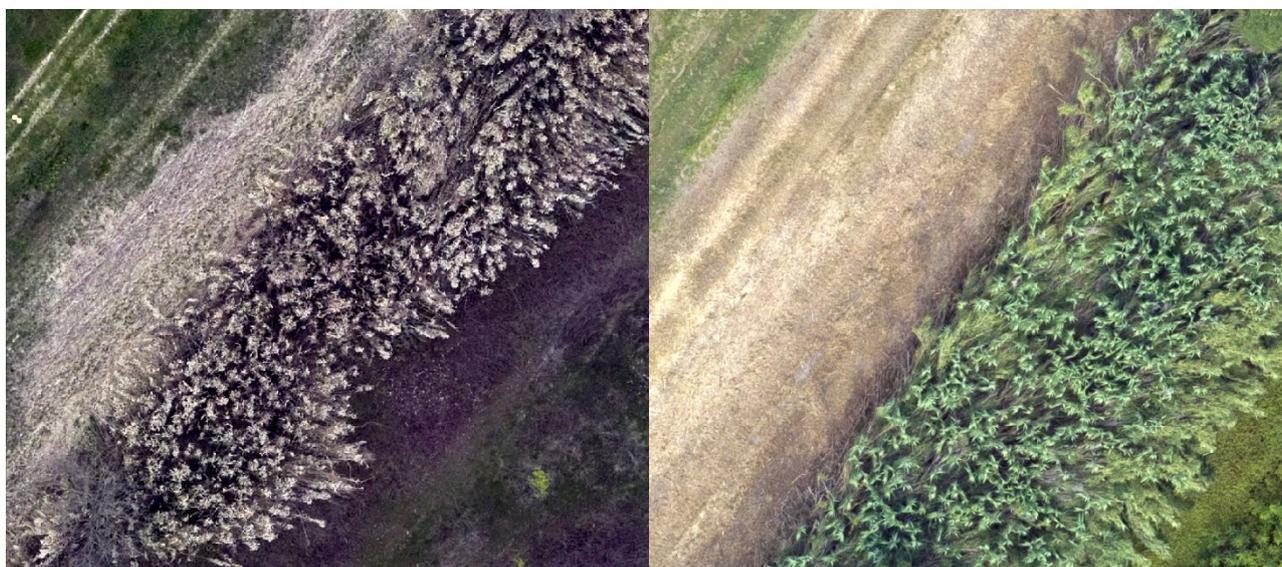


Figura 43: vista dall'alto dei canneti di Arundo Donax, nella foto a sinistra si riconosce anche l'area coperta da canneto, ma ormai tagliata.

Dal primo volo (Figura 44), eseguito ad inizio primavera, si vede che i canneti di *Arundo donax* sono presenti principalmente ai piedi dell'argine (vedi aree contornate di giallo in Figura 44) e nella parte meridionale della golena considerata nello studio, in prossimità del corso d'acqua. I canneti lungo l'argine sono presenti solo in corrispondenza del piede lato alveo e non nei paramenti dove il canneto, sia da osservazioni in sito che dalle ortofoto, risulta tagliato a raso terra in corrispondenza del

paramento, lasciando una macchia di colore beige che ne rende facile l'identificazione (vedi aree contornate di magenta in Figura 44). Inoltre le canne lungo l'argine formano un numero maggiore di popolamenti e più densi, con un maggiore numero di canne, nella parte alta dell'area di studio. Una giustificazione a questo fatto potrebbe essere a causa della distanza rispetto all'alveo del fiume, in quanto *Arundo donax* risulta una specie vegetale che richiede un costante assorbimento d'acqua per uno sviluppo rigoroso (come accennato nel capitolo 3.2). Un'altra possibile causa potrebbe essere dovuta all'orientamento dell'argine rispetto alla direzione della corrente durante le piene, quando il flusso arriva ad investire l'argine, poiché nei momenti di piena la corrente investe in maniera diversa le varie porzioni arginali per via della forma sinuosa del fiume e del terrapieno stesso.

Elaborando i dati del primo volo, i canneti di *Arundo donax* presenti al piede dell'argine lato alveo, occupano una superficie di circa 4185 m², a cui si sommano circa altri 2570 m² di superficie occupata da canne che però risultano tagliate in corrispondenza dei paramenti. In golena è presente qualche ciuffo di *Arundo donax* ma il canneto di dimensioni maggiori, circa 2293 m², si sviluppa nella parte meridionale della golena, in prossimità del fiume. Si osservi comunque che la maggior parte del territorio golenale è coltivata e quindi soggetta ad interventi antropici che influenzano la crescita spontanea della vegetazione.

Dal secondo volo (Figura 45), eseguito a fine estate durante il periodo vegetativo della canna, i canneti più consistenti di *Arundo donax* si presentano sempre lungo l'argine e nella parte meridionale della golena considerata nello studio. Anche in questa occasione, i canneti si presentano solamente in corrispondenza del piede del terrapieno, dal momento in cui è stato eseguito uno sfalcio dell'argine pochi giorni prima dell'indagine con drone. Questo ha comportato maggiori difficoltà nel riconoscere le porzioni di paramento che presentavano le canne prima dello sfalcio, in quanto il manto erboso doveva ancora rigenerarsi e tutto il paramento risultava dello stesso colore, ma comunque le aree sono state identificate tramite rilievo a terra, osservando la presenza o meno degli scarti dello sfalcio. Elaborando l'ortofoto restituita dal volo tramite GIS, si è identificato uno sviluppo complessivo del canneto al piede dell'argine per 3866 m², a cui si somma una superficie di circa 3288 m² dove le canne risultano tagliate, ma quest'ultimo dato risulta indicativo in quanto, come accennato in precedenza, i canneti tagliati non risultano ben visibili come nel primo volo. Inoltre, la superficie occupata dai canneti estrapolata dal secondo volo risulta minore rispetto a quella individuata nel primo: questo può essere ascrivibile al fatto che nel volo eseguito a settembre erano ben visibili le chiome degli alberi, non presenti nel primo volo che è stato eseguito a fine inverno, e queste essendo di altezza maggiore, vanno in parte a coprire i canneti. Considerando tali osservazioni, si può stimare approssimativamente che nel secondo volo la superficie coperta da canne risulta ridotta di circa l'8% rispetto al primo volo e l'area in cui le canne risultano tagliate è di circa il 12% più estesa.

Identificazione canneti di Arundo Donax

Ortofoto marzo 2023

Scala 1:5000

Legend

- reeds
- cut_reeds
- cross_sections



Figura 44: ortofoto marzo 2023 con identificazione dei canneti di Arundo Donax

Identificazione canneti di Arundo Donax

Ortofoto settembre 2023

Scala 1:5000

Legend

- reeds2
- cut_reeds2
- cross_sections



Figura 45: ortofoto settembre 2023 con identificazione dei canneti di Arundo Donax

La Figura 44 e la Figura 45 identificano i canneti di *Arundo Donax* (in giallo) e le macchie dove questa è stata tagliata (in magenta) ottenuti dall'elaborazione dei dati acquisiti durante i due voli.

Di seguito vengono riportate delle tabelle che raccolgono le caratteristiche (area, altezza media, distanza dall'argine e dal fiume) dei canneti individuati nelle ortofoto restituite dai voli di marzo e settembre 2023. Le distanze dei canneti dall'argine sono misurate a partire dal centro del canneto fino al piede dell'argine, mentre le distanze dal fiume fanno riferimento dal centro del canneto fino alla riva del corso d'acqua.

Canneto (03/23)	Area [mq]	Alteza media canneto [m]	Distanza dall'argine [m]	Distanza dal fiume [m]
a	665,68	6,00	10,20	145,20
b	1017,48	5,50	10,10	192,50
c	624,37	5,00	8,20	253,10
d	11,66	3,00	18,70	279,60
e	32,44	5,00	2,30	314,30
f	229,13	3,50	22,30	295,00
g	192,80	4,50	5,10	188,50
h	198,13	4,50	8,00	148,00
i	897,85	5,00	13,30	177,20
j	316,03	3,00	27,00	155,70
k	2292,85	6,00	113,30	58,60

Canneto tagliato (03/30)	Area [mq]	Alteza media canneto [m]	Distanza dall'argine [m]	Distanza dal fiume [m]
a1	38,17	0,00	paramento	72,6
b1	27,21	0,00	paramento	97,4
c1	1413,42	0,00	paramento	196,3
d1	124,37	0,00	paramento	316,3
e1	88,45	0,00	paramento	335,9
f1	69,57	0,00	paramento	369
g1	40,51	0,00	paramento	462,4
h1	5,90	0,00	paramento	463
i1	62,75	0,00	paramento	492,7
j1	19,57	0,00	paramento	459,4
k1	26,56	0,00	paramento	460,4
l1	6,77	0,00	paramento	442,8
m1	73,69	0,00	paramento	443,1
n1	12,76	0,00	paramento	396
o1	8,08	0,00	paramento	400,4
p1	77,71	0,00	paramento	214,1
q1	24,00	0,00	paramento	136,1
r1	298,20	0,00	paramento	186,5
s1	27,82	0,00	paramento	180,2
t1	97,85	0,00	paramento	169,9

Tabella 5: descrizione delle macchie di canne di *Arundo donax* presenti nel sito test nel primo volo di marco 2023

Canneto (09/23)	Area [mq]	Alteza media canneto [m]	Distanza dall'argine [m]	Distanza dal fiume [m]
a2	74,17	6,00	16,90	91,60
b2	589,30	5,50	10,20	145,20
c2	1114,51	6,00	13,10	192,50
d2	613,74	5,00	8,20	253,10
e2	10,43	3,00	18,70	279,60
f2	261,19	4,00	22,30	295,00
g2	29,18	5,00	2,30	314,30
h2	136,60	5,00	7,40	189,3
i2	224,38	4,50	8,00	148,00
j2	502,97	5,00	13,30	177,20
k2	155,33	4,00	28,00	143,20
l2	31,04	4,00	9,10	161,50
m2	13,82	3,00	14,00	153,40
n2	65,52	3,50	26,20	141,30
o2	17,50	5,00	25,70	127,90
p2	15,30	5,00	3,80	164,6
q2	10,62	4,00	14,30	155,6
r2	2362,34	6,00	113,30	58,60

Canneto tagliato (09/23)	Area [mq]	Alteza media canneto [m]	Distanza dall'argine [m]	Distanza dal fiume [m]
a3	1893,22	0,00	paramento	196,30
b3	63,29	0,00	paramento	460,40
c3	56,98	0,00	paramento	462,40
d3	96,59	0,00	paramento	492,70
e3	186,61	0,00	paramento	443,10
f3	21,15	0,00	paramento	400,40
g3	28,61	0,00	paramento	257,70
h3	103,57	0,00	paramento	195,70
i3	110,43	0,00	paramento	142,10
j3	17,86	0,00	paramento	143,20
k3	182,20	0,00	24,9	159,00
l3	28,96	0,00	paramento	175,20
m3	425,42	0,00	paramento	186,50
n3	68,50	0,00	paramento	169,90

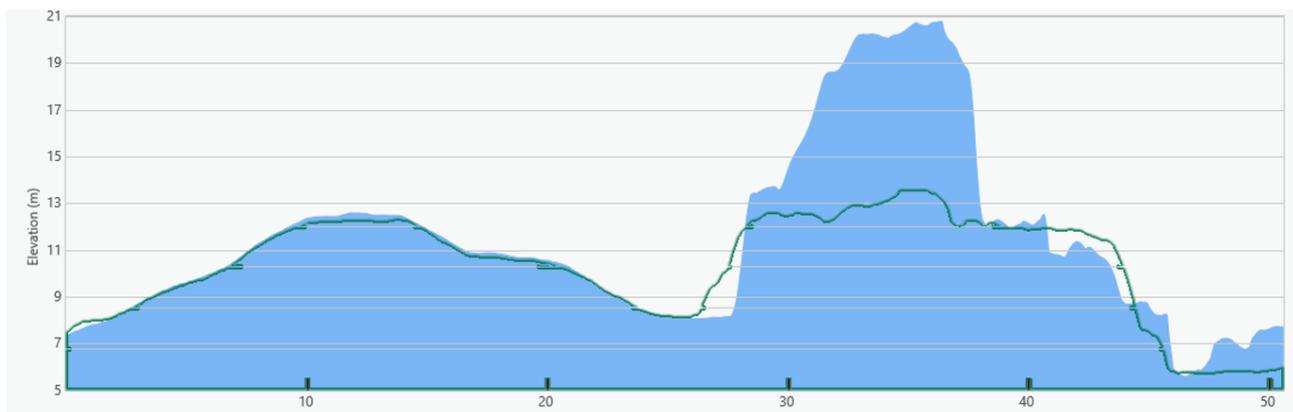
Tabella 6: descrizione delle macchie di canne di *Arundo donax* presenti nel sito test nel secondo volo di settembre 2023

Leggendo la Tabella 5 e la Tabella 6, si può notare come i canneti che presentano un maggiore sviluppo sia di superficie occupata sia di altezza, risultino quelli più prossimi al corso d'acqua, come il canneto in golena (identificato come k e r2 rispetto il primo e secondo volo) e le macchie a, b, c, i del primo volo, situate al piede dell'argine (corrispondenti ad b2, c2, d2, j2 del secondo volo). Le macchie di canne tagliate più estese (vedi c1 e a3) poste lungo il paramento, risultano in corrispondenza dei canneti più rigogliosi posti al piede dell'argine sopra citati, come a formare un unico canneto nel momento in cui non risultano tagliate. Inoltre le porzioni di argine in cui si

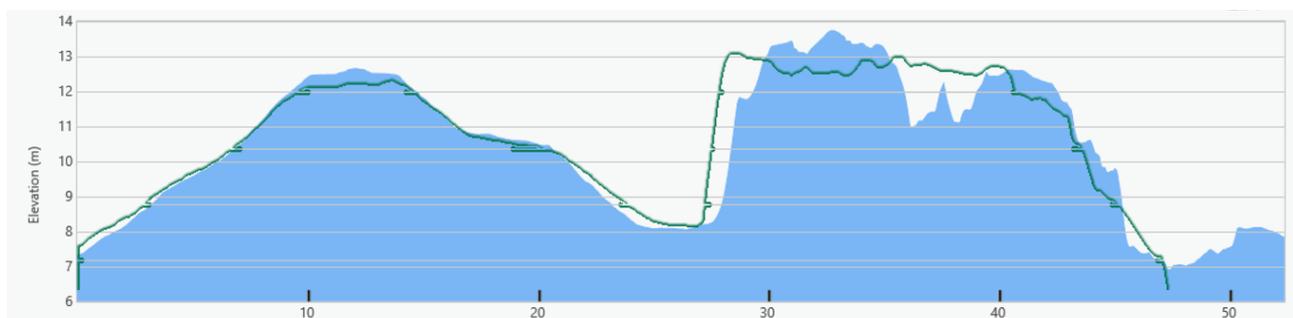
sviluppano questi canneti più consistenti, risultano poste in punti in cui la corrente investe l'argine parallelamente durante le portate di piena.

Il volo tramite drone ha restituito anche il modello DSM dell'area, da cui è stato possibile ricavare delle sezioni trasversali lungo alcuni transetti, per poter visualizzare la geometria dell'argine, la forma e l'altezza dei canneti identificati. Il rilievo dell'altezza della vegetazione tramite ortofoto risulta non semplice in quanto per la triangolazione, che permette di fornire le quote, è necessario che il software identifichi un medesimo punto su più foto con punti di vista diversi. Questo metodo trova difficoltà nel caso in cui si voglia mappare elementi mobili e variabili nell'immagine, come la vegetazione a canneto, a causa del vento, di variazioni di luce, di piccoli spostamenti o forme variabili se viste da angolazioni diverse. La Figura 46 mostra alcune sezioni trasversali delle porzioni arginali che presentano canneti di *Arundo donax* al piede del terrapieno (in contorno verde per il primo volo e in azzurro per il secondo volo), dove si può confrontare l'altezza, la forma, la variazione dei canneti rispetto i due voli, grazie alla sovrapposizione di tali sezioni.

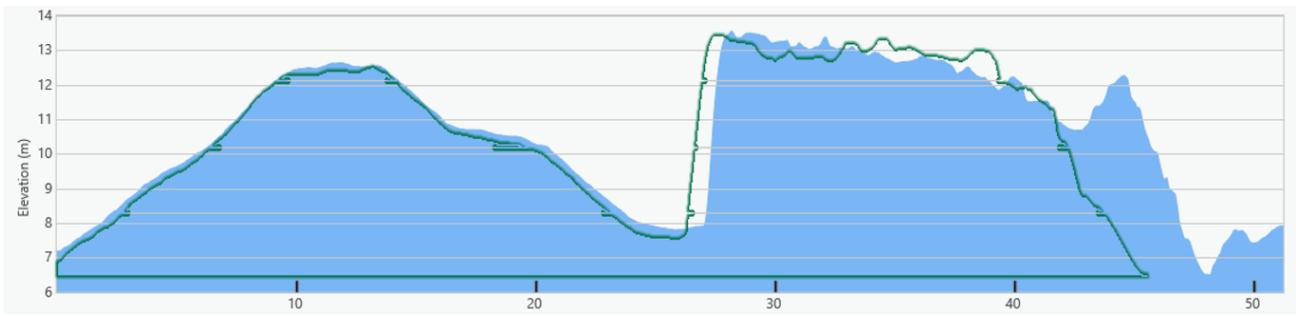
Sezione I



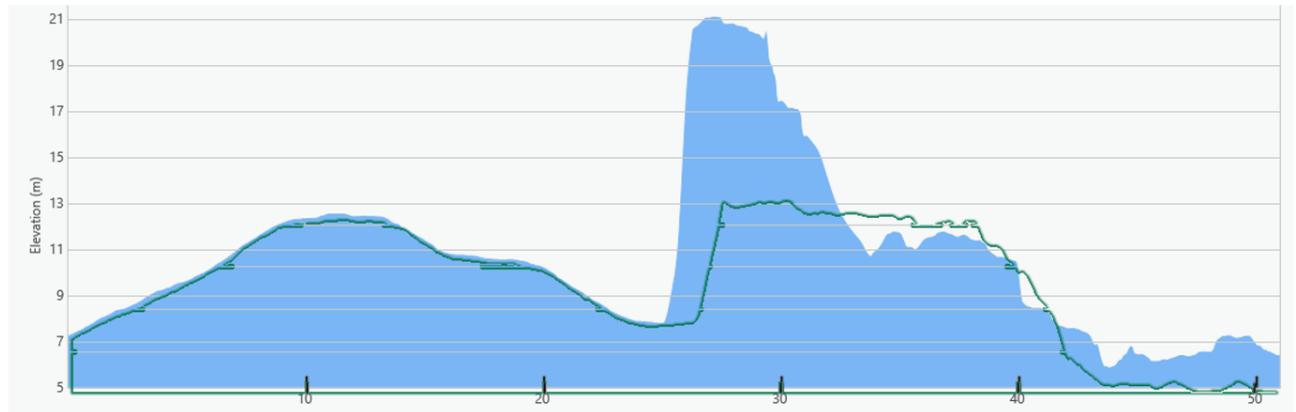
Sezione II



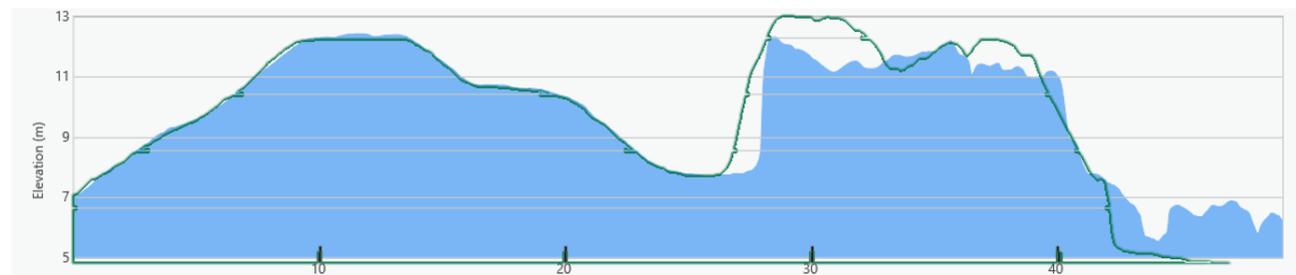
Sezione III



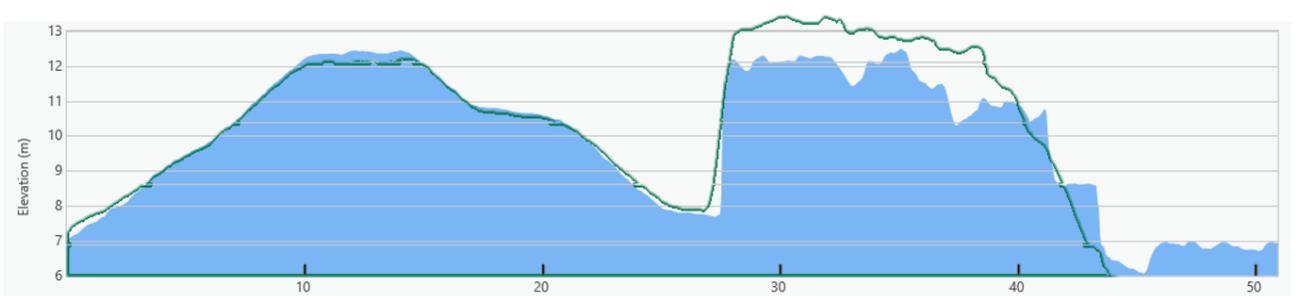
Sezione IV



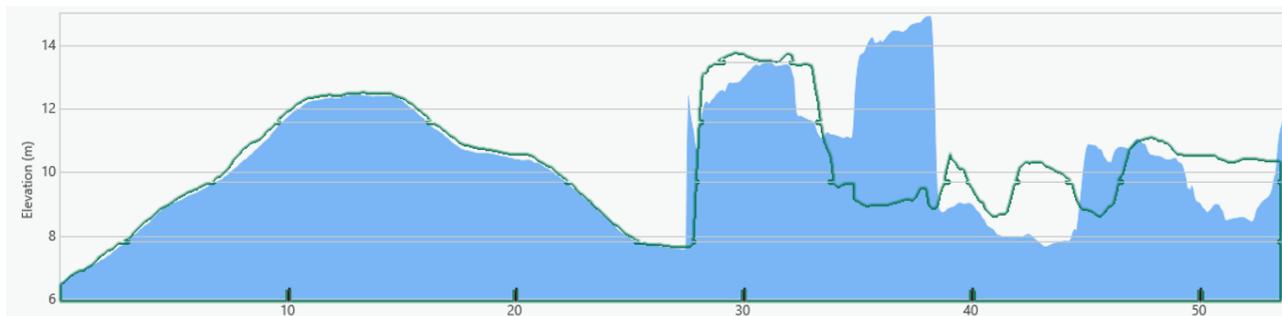
Sezione V



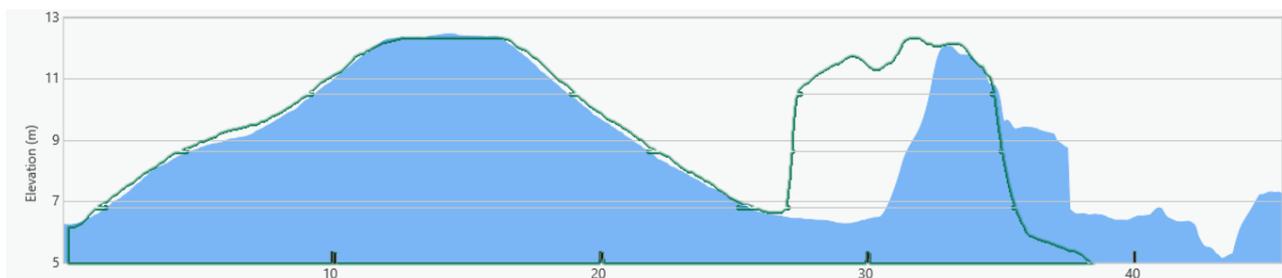
Sezione VI



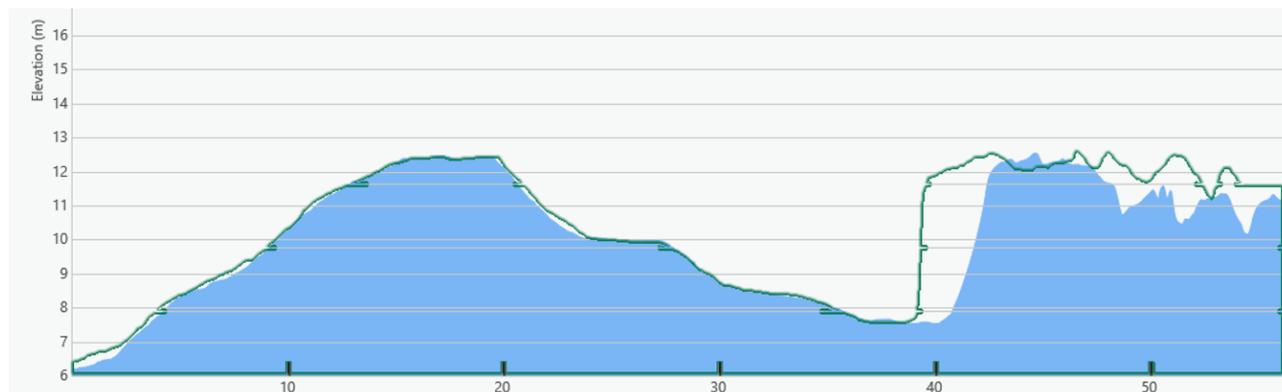
Sezione VII



Sezione VIII



Sezione IX



Sezione X

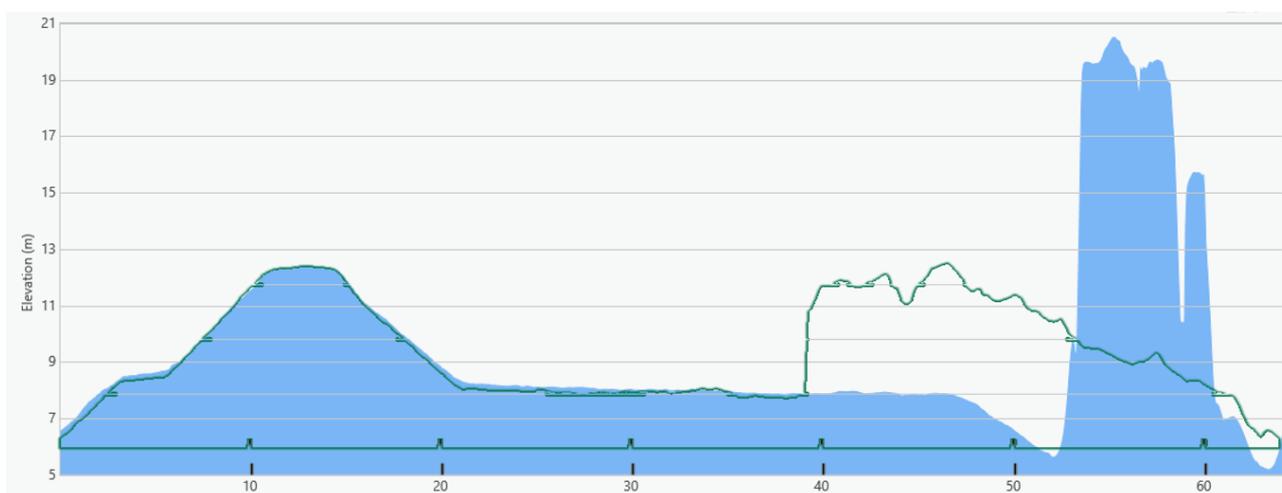


Figura 46: sovrapposizione delle sezioni trasversali delle porzioni arginali che presentano canneti di *Arundo donax*, relative al primo volo di marzo 2023 (in verde) e del secondo volo di settembre 2023 (in azzurro)

Le sezioni trasversali ottenute grazie al modello DSM, permettono di visualizzare l'altezza dei canneti di *Arundo Donax*. Le altezze delle canne risultano simili tra i due voli e variano tra i 3 e 7 m. In alcuni tratti le canne rilevate durante il secondo volo risultano più basse di circa 1 m rispetto alla prima ricognizione, ma potrebbe essere una non corretta identificazione della quota, a causa del fatto che le canne sono state piegate a seguito dell'azione del vento. Inoltre, la forma del canneto nel primo volo risulta più compatta rispetto al secondo e la causa potrebbe essere riconducibile sempre all'azione del vento. Alcune sezioni presentano altezze dei canneti maggiori di altre (sezione II, sezione III, sezione VI) e questo potrebbe essere dovuto dal fatto che la canna è presente da diverso tempo e che trova condizioni ottimali dove crescere e non viene soggetta a sfalcio artificiale. Osservando le varie sezioni si nota come le canne si sviluppano in maniera più consistente nelle prime sezioni, che fanno riferimento alla parte alta dell'area di studio. Nelle sezioni I, IV, VII, X si possono notare altezze molto maggiori nel secondo volo, ma questo è dovuto al fatto che in mezzo ai canneti sono presenti alberi con la chioma. Nelle sezioni V, VIII, IX del secondo volo, si nota una larghezza minore del canneto al piede dell'argine, ascrivibile ad un possibile sfalcio più invasivo, visto che in corrispondenza di questi canneti, grazie alla sovrapposizione delle due sezioni, è visibile la mancanza di una porzione di canneto tagliato, invece visibile nel primo volo. Nella sezione X del secondo volo si osserva la mancanza di una macchia di canne, invece presente nel primo volo, dovuto sicuramente allo sfalcio recente.

Il modello DSM permette quindi di valutare la variazione della vegetazione come il canneto, in quanto rileva l'altimetria degli oggetti presenti nella superficie terrestre e ne consente di valutare lo spazio che essi occupano. Questa tipologia di rilievo può essere sufficiente anche per la valutazione di eventuali variazioni di geometrie degli argini, nei casi in cui queste strutture siano prive di vegetazione e rivestite del solo manto erboso. Di contro, i risultati di questo rilievo utilizzato nella mappatura di oggetti mobili possono risultare non sempre precisi per via di possibili errori nella triangolazione. Questo modello però non risulta efficace nel momento in cui sia necessario valutare fenomeni relativi all'assetto del terreno, in quanto se presenti oggetti come la vegetazione, il modello non rileva la superficie geodetica, quindi quella del terreno. Ad esempio per la valutazione dell'erosione della sponda del fiume, fenomeno che era visibile durante il sopralluogo di marzo, con i modelli DSM restituiti dai due voli non è possibile fare un confronto per valutare l'erosione in quanto il secondo volo ha rilevato la vegetazione cresciuta lungo la riva nel periodo estivo, invece non presente nel primo volo eseguito a fine inverno. Per valutare fenomeni erosivi o cedimenti di elementi come argini o sponde del fiume, risulta probabilmente più efficace la mappatura del territorio con un rilievo DTM (Digital Terrain Model), dato che, a differenza del modello DSM, rileva l'andamento della superficie del suolo senza considerare gli elementi antropici e vegetazionali. In

alternativa, potrebbe essere sufficiente il rilievo DSM per la valutazione di fenomeni erosivi quando non presenti elementi antropici o vegetali dell'area di interesse.

Analizzando lo storico delle foto aeree dell'area di studio attraverso la piattaforma Google Earth Pro, si è potuto osservare come le canne si sviluppino in questa parte del fiume Tagliamento già da diversi anni. In particolare, i fotogrammi disponibili risalgono alle annate 2010, 2015 e 2017.

Nella vista aerea risalente ad aprile 2010 (Figura 47), a causa della scarsa definizione dell'immagine, risulta complicato visualizzare con esattezza la presenza della canna lungo la struttura arginale. Si ipotizza comunque che sia presente il canneto al piede del terrapieno e in particolare che questo risulti tagliato in corrispondenza del paramento. Invece, nelle foto aeree del 2015 e 2017 (Figura 48 e Figura 49), scattate nel periodo estivo durante il periodo vegetativo, la canna risulta ben visibile grazie alla sua texture e al colore verde, e presente sia nel paramento che al piede dell'argine. In generale, è possibile notare attraverso Google Earth Pro, come nel tempo i canneti di *Arundo Donax* si espandano lungo l'argine, prendendo lo spazio della vegetazione autoctona.

Attraverso il servizio Web Map Service fornito dal Geoportale della Regione Veneto, nel software GIS è stato possibile elaborare l'ortofoto del 2021 per analizzare le caratteristiche del canneto (Figura 50). Anche in questo caso le canne visibili sono in corrispondenza del piede dell'argine, con uno sviluppo complessivo di circa 3277 m² (in arancione), nella parte meridionale della golena con un canneto in prossimità della riva del fiume, mentre lungo il paramento il canneto risulta tagliato per una superficie di circa 1830 m² (in verde).



Figura 47: foto aerea aprile 2010 dell'area di studio (Google Earth Pro)



Figura 48: foto aerea luglio 2015 dell'area di studio (Google Earth Pro)



Figura 49: foto aerea giugno 2017 dell'area di studio (Google Earth Pro)



Figura 50: ortofoto 2021 con identificazione dei canneti di Arundo Donax

Di seguito (Tabella 7) vengono riportate delle tabelle che raccolgono le caratteristiche (area, altezza media, distanza dall'argine e dal fiume) dei canneti individuati nelle ortofoto del 2021, dove a differenza della medesima analisi del canneto condotta per le ortofoto dei voli col drone, in questo caso non è stato possibile definire l'altezza media delle varie macchie di *Arundo donax* in quanto non è disponibile il modello DSM relativo a questa ortofoto. Da una prima osservazione della Figura 50 e delle ortofoto degli anni precedenti, si nota come i canneti, anche se in forma ridotta, siano posti nelle stesse porzioni arginali di dove sono presenti ora, ascrivibile al fatto che tale canna si stia espandendo in questa zona da diverso tempo. Rispetto a come si presentano attualmente, i canneti nel 2021 risultano circa il 20% più ristretti. Anche nell'ortofoto del 2021, *Arundo donax* presenta canneti di sviluppo maggiore nella parte superiore dell'area di studio, dove è più vicina al corso d'acqua e dove la corrente affianca il terrapieno durante gli eventi di piena. Quello che si può notare dal confronto della Tabella 7 con la Tabella 5 e Tabella 6 è che in corrispondenza dei medesimi canneti, questi risultano più vicini al fiume nell'ortofoto del 2021, indice nel fatto che il fiume cambia il suo percorso nel tempo.

Canneto (2021)	Area [mq]	Alteza media canneto [m]	Distanza dall'argine [m]	Distanza dal fiume [m]
a4	615,22	-	12,20	142,90
b4	1065,82	-	14,10	197,80
c4	664,11	-	8,80	145,40
d4	219,81	-	8,50	187,50
e4	226,50	-	9,20	139,00
f4	223,71	-	9,10	140,00
g4	262,26	-	32,10	132,10
h4	1876,19	-	108,90	54,20

Canneto tagliato (2021)	Area [mq]	Alteza media canneto [m]	Distanza dall'argine [m]	Distanza dal fiume [m]
a5	446,97	0,00	paramento	163,00
b5	69,53	0,00	paramento	187,60
c5	651,38	0,00	paramento	230,00
d5	83,85	0,00	paramento	461,80
e5	10,84	0,00	paramento	493,70
f5	112,00	0,00	paramento	443,10
g5	24,45	0,00	paramento	397,10
h5	68,27	0,00	paramento	197,80
i5	38,62	0,00	paramento	166,80
j5	43,17	0,00	paramento	148,20
k5	201,51	0,00	paramento	177,30
l5	10,07	0,00	paramento	180,90
m5	23,27	0,00	paramento	155,00
n5	46,09	0,00	paramento	169,90

Tabella 7: descrizione delle macchie di canne di *Arundo donax* presenti nel sito test nell'ortofoto del 2021

Conclusioni

Le strutture arginali sono opere strategiche per la difesa del territorio dal rischio di inondazioni, e affinché mantengano la funzione per cui vengono costruite, è necessario, oltre ad una corretta progettazione, un controllo sullo stato dell'opera e una manutenzione periodica. Proprio per il fatto che tali strutture vengono realizzate in ambienti naturali, risultano fortemente in relazione con la fauna e la flora del luogo, che possono influire sia positivamente che negativamente sulla funzionalità e sicurezza dei terrapieni. Essendo gli argini strutture lunghe migliaia di chilometri e molto eterogenee, è necessario ricercare nuove tecniche di indagini speditive (di primo livello) che possono essere condotte velocemente su vasta scala e che permettano di identificare le zone o le sezioni che presentano possibili criticità e che quindi richiedono ulteriori indagini ed approfondimenti localizzati (indagini di secondo livello).

In questo lavoro di ricerca è stata svolta una prima serie di esperienze per testare l'uso del rilievo svolto con drone e capire se esso sia efficace per svolgere l'analisi di primo livello. I due voli effettuati con il drone in corrispondenza del sito test nelle vicinanze di San Michele al Tagliamento hanno restituito ortofoto RGB georeferenziate e il DSM 3D dell'area sorvolata. Da questi output sono state ricavate (I) le geometrie di una serie di transetti, di cui è stato possibile poi eseguire il confronto, e (II) la distribuzione delle aree occupate da canna, con le loro caratteristiche geometriche (estensione, altezza, distanza dall'argine ecc). A terra poi sono stati eseguiti 4 transetti sul paramento lato golena dell'argine in posizioni diverse e caratterizzati dalla presenza o meno della canna, con prelievo di campioni di terreno a 0,40 m e 1,40 m di profondità. I terreni sono stati infine analizzati in laboratorio per confrontarli e capire se ci fosse una differenza tra il terreno prelevato nei transetti con canna e quello prelevato nei transetti senza canna, in modo da capire se la presenza di canne del tipo *Arundo Donax* possa essere un indicatore di sezioni arginali caratterizzate da una particolare tipologia di terreno, che richiede un secondo livello di indagine.

Dalla letteratura si evince che, in linea generale, la vegetazione attraverso il suo apparato radicale è in grado di contribuire principalmente in maniera positiva alla sicurezza delle strutture arginali. Il sistema radicale incrementa la resistenza dei suoli aumentando la resistenza all'erosione e la resistenza al taglio, grazie al contributo di coesione aggiuntiva, e di conseguenza ha un effetto positivo sulla stabilità.

In particolare la canna comune (*Arundo Donax*), potrebbe avere degli effetti positivi per le sue caratteristiche strutturali, ed in particolare delle sue radici, in quanto i diametri contenuti garantiscono maggiore resistenza a trazione per unità di area, contribuendo così al rinforzo del terreno, e anche lo sviluppo del fitto sistema di rizomi concentrato nello strato superficiale diminuisce l'erosione

superficiale del paramento. Di contro, Jiana E. Stover et al. (2018) nel loro studio hanno riscontrato problemi di stabilità di sponde sabbiose-ghiaiose bagnate dal corso d'acqua e con elevata concentrazione di *Arundo Donax* in quanto, data l'assenza di coesione del suolo e la non equa distribuzione della forza radicale per via della struttura del sistema radicale che vede una elevata concentrazione di radici in un livello orizzontale superficiale particolarmente fitto, porta a meccanismi di cedimento in presenza di livelli idrometrici del corso d'acqua che insistono su quote inferiori rispetto alla fascia rinforzata dalla presenza delle radici. Questo risultato risulta però difficile da generalizzare in quanto dipende dall'altezza e dal materiale costituente la sponda, dai livelli idrometrici e dalle caratteristiche delle radici, che riflettono le condizioni locali.

Oltre a questo possibile comportamento meccanico, la canna comune rappresenta una fonte di riparo e nutrimento per gli animali escavatori, che potrebbero costruire le loro tane nell'argine all'interno della zona con la presenza di canna che costituiscono un ambiente protetto, con le conseguenti problematiche di filtrazione che si possono instaurare nel corpo arginale. La presenza di tane di animali rappresenta una delle problematiche più pericolose per gli argini, in quanto durante gli eventi di piena possono portare alla saturazione rapida del corpo arginale, o al trasferimento diretto di alta pressione all'interno del corpo arginale attraverso la penetrazione dell'onda di piena all'interno della galleria con conseguenti cedimenti o aperture di brecce, che possono compromettere anche drasticamente la tenuta dell'opera di difesa. Inoltre, la presenza di vegetazione nelle strutture arginali potrebbe anche ostacolare l'identificazione di queste tane.

In base a quanto rilevato in letteratura, *Arundo Donax* è una specie vegetale che predilige terreni umidi e drenati, in ambienti inondabili, ma viste le sue caratteristiche invasive e di rapida crescita, si adatta facilmente anche ad altri contesti. Le analisi granulometriche svolte sui campioni di terreno prelevati nel corpo arginale nella zona del sito test (40 in tutto), non hanno mostrato differenze sostanziali tra i campioni di terreno provenienti dai paramenti coperti dalla canna comune e quelli che ne erano privi. I sondaggi manuali hanno evidenziato terreni composti da percentuali diverse di sabbia fine e limo, con la presenza di materiale più grossolano in testa all'argine e più fine al piede del rilevato, lato golena. I campioni raccolti alle varie profondità dei sondaggi presentano delle differenze, risultando più fini i campioni superficiali alla quota di 0,40 m rispetto a quelli prelevati a 1,40 m. In genere, il terreno dove si sviluppano i canneti (transetti A e C) risulta più grossolano e più uniforme rispetto quello senza vegetazione, corrispondente ai transetti B e D, in quanto, dalla comparazione di D10 e D50, i terreni in presenza del canneto hanno presentato valori maggiori di questi diametri, indicando quindi un terreno più areato, dove la parte più fine è comunque caratterizzata da una certa dimensione: a sua volta però nemmeno i transetti con e senza vegetazione risultano identici tra loro, risultando il terreno di C e D rispettivamente più grossolano di A e B.

Analizzando il coefficiente di permeabilità si è visto che i campioni in cui è presente la canna risultano anche più permeabili, in accordo col fatto che *Arundo Donax* predilige terreni più drenati. Questi primi segnali devono comunque essere approfonditi con ulteriori campionamenti ed analisi per avere una base di dati a maggiore validità statistica. Inoltre in letteratura (Jiana E. Stover et al. (2018)) sono presenti ricerche condotte su terreni sabbiosi-ghiaiosi, mediamente più grossolani di quelli identificati nel sito test del Tagliamento.

Osservando le ortofoto restituite dai due voli effettuati, i canneti di *Arundo Donax* sono facilmente riconoscibili grazie al colore e alla trama che li caratterizza. Questi canneti nell'aerea sorvolata si concentrano in macchie più dense ai piedi dei corpi arginali più prossimi al fiume, particolarmente nell'area settentrionale dell'area testata, mentre lungo il restante argine le canne sono presenti solo con macchie sporadiche sui paramenti, dove vengono tagliati periodicamente per questioni di manutenzione. Questa diversa distribuzione potrebbe essere dovuta alla posizione geometrica rispetto al corso del fiume, dato che *Arundo Donax* predilige terreni prossimi all'acqua e con elevata umidità per il suo sviluppo e traspirazione, oppure dal fatto che nei momenti di piena la corrente investe in maniera diversa i diversi settori arginali.

La stessa geometria si è riscontrata in entrambi i voli, e anche nel volo eseguito nel 2021 dalla Regione Veneto e disponibile online. La canna quindi si configura stabile nel tempo come distribuzione, e in continuo sviluppo essendo che le aree coperte sono circa 6984 m² nel 2021, 9022 m² a marzo 2023 e 9510 m² a settembre 2023 (+ 27% rispetto al 2021). Il rilievo aereo-fotogrammetrico risulta quindi efficace per individuare le zone in cui questi canneti sono presenti in quanto, grazie al suo colore e geometria, *Arundo Donax* risulta essere un target di facile visualizzazione. Grazie a questo specifico target, si potrebbero quindi identificare le macchie dove *Arundo Donax* si presenta con uno sviluppo rigoglioso, in quanto potrebbe essere indicatore di un terreno più umido e areato, e quindi più sabbioso, più sensibile a problemi di filtrazione, possibile presenza di tane e problemi di erosione in caso di sormonto arginale; viceversa, uno sviluppo contenuto del canneto potrebbe indicare la presenza di un terreno più fine. Oltre all'aspetto idrologico, l'utilizzo di questo target potrebbe essere utile nell'individuazione nelle aree in cui la canna comune si sviluppa nei paramenti al fine di programmare operazioni di falciatura periodica della canna, per evitare la costruzione di tane da parte degli animali.

Il rilievo DSM utilizzato risulta efficace nella valutazione delle caratteristiche (forma, espansione, altezza) della vegetazione come il canneto e anche per la valutazione di eventuali variazioni di geometria dell'argine, nel caso in cui l'argine sia rivestito del solo manto erboso. Questo metodo non risulta però efficace nel controllo di fenomeni erosivi e franosi di argini o sponde che presentivo

vegetazione, in quanto tale rilievo non mappa il solo terreno ma anche gli oggetti presenti sopra di esso, per cui per l'osservazione di tali fenomeni potrebbe risultare più efficace un rilievo DTM.

Alla luce di questo studio, sono sicuramente necessari ulteriori ricerche per testare ulteriormente l'efficacia di queste tecniche di indagine e stabilire l'influenza della canna comune sulla stabilità e sicurezza delle strutture arginali, in quanto la crescita e gli effetti che produce sono in funzione di diversi fattori locali, tra cui l'ambiente, il clima, la tipologia di terreno, la vicinanza all'acqua. Al fine di definire la corretta gestione di questa specie vegetale per garantire le prestazioni arginali gli studi futuri si potrebbero concentrare:

- sull'approfondire la conoscenza dell'apparato radicale di *Arundo Donax* e analizzarne l'effetto sulla stabilità di argini e sponde con materiali e condizioni diverse, per valutare se produce gli stessi effetti di quelli riscontrati nel caso di sponde sabbiose-ghiaiose;
- nel valutare una possibile relazione tra la crescita dei canneti e la vicinanza al corso d'acqua, vista la dipendenza della canna comune dalle acque e dall'umidità del suolo, e dai percorsi idrologici tipici degli ambienti ripariali.

Bibliografia

- Abernethy, Bruce, e Ian D. Rutherford. (2001). «The Distribution and Strength of Riparian Tree Roots in Relation to Riverbank Reinforcement». *Hydrological Processes* 15 (1): 63–79.
- Bell, Gary P. (1998). «Ecology and Management of *Arundo Donax*, and Approaches To Riparian Habitat Restoration In Southern California». Document. California. 1998.
- Ceccato F., Simonini P. (2023). «The Effect of Heterogeneities and Small Cavities on Levee Failures: The Case Study of the Panaro Levee Breach (Italy) on 6 December 2020». *Journal of Flood Risk Management* 16 (2): e12882.
- CIRIA, Ministry of Ecology of United Kingdom, USACE (2013). *The International Levee Handbook*. CIRIA, London 2013, ISBN: 978-0-86017-734-0.
- Craig, R F., seventh edition (2004). «Craig’s Soil Mechanics, Seventh Edition». Spon Press, Taylor & Francis Group, ISBN: 0-203-57441-9.
- Covelli C. (2005). «Sulla formazione di brecce nei rilevati arginali: implicazioni relative alla protezione idraulica del territorio». Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria delle Reti Civili e dei Sistemi Territoriali (depositata presso le Biblioteche Nazionali di Roma e Firenze), Napoli, Novembre 2005.
- Durocher, M.G. (1990). *Monitoring spatial variability of forest interception*. *Hydrol. Process.* 4, 215–229.
- EUCOLD Working group on levees and flood defences, e Comité français des barrages et réservoirs, a c. di. (2018). *European and US Levees and Flood Defences: Characteristics, Risks and Governance*. Le Bourget-du-Lac: Éditions CFBR.
- Francescato C. (2012). «Paesaggi vegetali, biodiversità cenotica e funzionalità fluviale. Il caso del fiume Tagliamento». Tesi di Dottorato di ricerca in Metodologie di biomonitoraggio dell’alterazione ambientale, Università degli Studi di Trieste.
- Guo-An Yu, Zhiwei Li, Hanyuan Yang, Jianying Lu, He Qing Huang e Yujun Yi. (2020). «Effects of riparian plant roots on the unconsolidated bank stability of meandering channels in the Tarim River, China». *Geomorphology* 351 (febbraio): 106958.

- Gyssels, G., J. Poesen, E. Bochet, e Y. Li. (2005). «Impact of Plant Roots on the Resistance of Soils to Erosion by Water: A Review». *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 29 (2): 189–217.
- Jiana E. Stover, E. Keller, T. Dudley e E. Langendoen (2018). «Fluvial Geomorphology, Root Distribution, and Tensile Strength of the Invasive Giant Reed, *Arundo Donax* and Its Role on Stream Bank Stability in the Santa Clara River, Southern California». *Geosciences* 8 (8): 304.
- Malvestio S. (2022). «Effetto di piccole cavità sulla stabilità arginale – analisi all’equilibrio limite e agli elementi finiti». Tesi Magistrale in Ingegneria Civile, Università degli Studi di Padova.
- Martire M. (2015). «Analisi tridimensionale di fenomeni di filtrazione attraverso rilevati arginai in presenza di alterazioni». Tesi Magistrale in Ingegneria Civile, Università degli Studi di Padova.
- Monti A. e Zatta A. (2009). «Root Distribution and Soil Moisture Retrieval in Perennial and Annual Energy Crops in Northern Italy». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 132 (3–4): 252–59.
- Moore, G. W., J. B. West, F. Li, e L. Kui. 2011. «Rooting depth and water source flexibility of *Arundo donax* across a wide and topographically varied floodplain inferred from stable isotopes» 2011 (dicembre): H51J-1345.
- Nelson R. Nunnally, F. Douglas Shields, e James Hynson. (1987). «Environmental Considerations for Levees and Floodwalls». *Environmental Management* 11 (2): 183–91.
- Pollen N. e Simon A. (2005). «Estimating the Mechanical Effects of Riparian Vegetation on Stream Bank Stability Using a Fiber Bundle Model». *Water Resources Research* 41 (7).
- Ravazzolo D., Mao L., Picco L., Sitzia T. e Lenzi M. A. (2015). «Geomorphic effects of wood quantity and characteristics in three Italian gravel-bed rivers». *Geomorphology* 246 (ottobre): 79–89.
- Selbo, Sarena M, e Allison A Snow. 2004. «The Potential for Hybridization between *Typha Angustifolia* and *Typha Latifolia* in a Constructed Wetland». *Aquatic Botany* 78 (4): 361–69. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2004.01.003>.
- Simonini P., Cola S., Bersan S. (2014). «Caratterizzazione geotecnica, meccanismi di collasso e monitoraggio degli argini fluviali». Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (ICEA), Università di Padova. *La geotecnica nella difesa del territorio e delle infrastrutture dalle calamità naturali: XXV Convegno Nazionale di Geotecnica, Baveno, 4-6 giugno 2014. I., Volume 1*. 2014. S.l.: s.n.

- Solari L., De Cicco P. N., Piccoli F., Francalanci S. e Gabellini F. (2014). «Interazione vegetazione in alveo e corrente: studi sperimentali e indirizzi operativi». Regione Toscana e Dipartimento di ingegneria civile e ambientale dell'Università degli Studi di Firenze.
- Spaliviero M. (2003). «Historic fluvial development of the Alpine-foreland Tagliamento River, Italy, and consequences for floodplain management». *Geomorphology* 52 (3): 317–33.
- Venturini C. (2021). «TAGLIAMENTO - TILIMENT – TAIAMENT, sorprese e meraviglie di un piccolo grande fiume».
- Venturini S., Marin M., Amidani D. et al. (2018). «La Nutria (*Myocastor coypus*) – Biologia e gestione». PROGECO, Ambiente & Natura – ONLUS.
- Waldron, L.J., 1977. «The shear resistance of root permeated homogeneous and stratified soil». *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41, 843–849.
- Zegeye A. D., E. J. Langendoen, S. A. Tilahun, W. Mekuria, J. Poesen e T. S. Steenhuis (2018). «Root Reinforcement to Soils Provided by Common Ethiopian Highland Plants for Gully Erosion Control». *Ecohydrology* 11 (6): e1940.

Sitografia

Confagricoltura Venezia. La Nutria (*Myocastor coypus*) problematiche e controllo a fini di eradicazione. Prontuari EPS Veneto.

<https://www.confagricolturave.it/attachments/article/915/Prontuario%20Nutria.pdf>

Discover Capolona (2023). «Canna comune (*Arundo donax*)».

<https://www.discovercapolona.it/2023/03/31/canna-comune-arundo-donax/>.

Lichtenegger E., (1997). «*Arundo donax*». Linz, Land Oberösterreich, Zur Zeit zu erhalten bei Pflanzensoziologisches Institut 4822 Bad Goisern, Pichlern 9.

<https://images.wur.nl/digital/collection/coll13/id/880/rec/111>.

Richard Lansdown (2013). *Arundo Donax*. *The IUCN Red List of Threatened Species* in 2012.

<https://www.iucnredlist.org/species/164340/1043245>.