

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
Corso di Laurea Magistrale in Scienze forestali ed ambientali

CARATTERISTICHE E DINAMICA DELLE ISOLE FLUVIALI IN DUE SOTTOTRATTI DEL FIUME TAGLIAMENTO

Relatore
Prof. Mario Aristide Lenzi
Correlatore
Dott. Lorenzo Picco

Laureanda
Alessia Tonon
Matricola n. 1018889

ANNO ACCADEMICO 2011 - 2012

*All'AFRICA
dove il cielo
non è mai grigio,
ma sempre vivo di
colori. Luoghi, profumi,
suoni e persone da farmi
pensare che al mondo c'è
ancora qualcuno
che non ha nulla
da nascondere
perché ha
la fortuna
di non
possedere
"nulla"*

RIASSUNTO

Le isole fluviali possono essere definite come aree a vegetazione arborea poste all'interno dell'alveo e circondate da canali o ghiaie esposte. Sono dotate di una certa stabilità e rimangono esposte durante le piene alla *bankfull*. Sono elementi fluviali molto importanti sia dal punto di vista morfologico che ecologico. Rappresentano lo stato più naturale di un sistema fluviale e risentono molto delle interferenze umane. Questo studio si propone di analizzare le caratteristiche morfologiche e vegetazionali di isole pioniere, giovani e stabili nel Tagliamento, un fiume naturale a fondo ghiaioso avente caratteristiche elevate di naturalezza. Il fiume Tagliamento, con una lunghezza dell'asta principale di 178 km, è il principale corso d'acqua della regione Friuli Venezia Giulia e rappresenta una sorta di collegamento fra le Alpi e l'Adriatico. Per il ridotto impatto antropico, il corso del Tagliamento si caratterizza per dinamiche fluviali con un elevato grado di naturalità. Le analisi sono state condotte in due tratti di studio caratterizzati da differente morfologia ma ugualmente poco antropizzati. Con l'ausilio di foto aeree relative a due annate successive, 2010 e 2011, sono state analizzate le dinamiche delle diverse tipologie di isole a seguito di diversi eventi di piena verificatisi nel periodo compreso tra i rilievi fotografici stessi. Successivamente sono stati impiegati modelli digitali, generati a partire da rilievi LiDAR, al fine di valutare l'altezza media del suolo su cui si sviluppano le isole e le altezze massime e medie della vegetazione in esse presente.

Dai risultati ottenuti emerge che le isole fluviali si sviluppano ad altezze del suolo diverse e questo implica una diversa resistenza nei confronti dei rimaneggiamenti imposti dal verificarsi delle piene. Le isole pioniere e le isole giovani si trovano a quote più basse rispetto alle isole stabili e questo implica una loro incapacità, totale o parziale, di resistere alle piene. Vengono, infatti, disturbate anche da piene ordinarie e, nella maggior parte dei casi, si assiste ad una loro completa rimozione. Nel caso delle isole stabili invece, poste a quote più alte, la loro stabilità viene alterata solamente da piene significative: eventi con tempo di ritorno di 10-15 anni sembrano essere gli unici capaci di causare sostanziali erosioni nelle zone marginali delle isole più stabili. A conferire questo elevato grado di resistenza concorre anche la presenza di vegetazione capace di raggiungere altezze molto elevate, talvolta superiori a 30 m. Le isole fluviali sono elementi molto dinamici, la cui persistenza è strettamente collegata all'intensità ed alla frequenza degli eventi di piena nonché alle caratteristiche morfologiche del sistema fluviale. Le maggiori variazioni sono state documentate nel tratto caratterizzato da prevalente morfologia *braided*, la dinamicità e l'instabilità morfologica del tratto fluviale si ripercuote anche nella stabilità delle isole.

ABSTRACT

Characteristics and dynamic of fluvial islands in two sub-reaches of Tagliamento river

River islands could be defined as discrete areas of woodland vegetation located in the riverbed and surrounded by either water-filled channels or exposed gravel. Islands are very important from both morphological and ecological point of view, represent the most natural state of a fluvial system and are influenced by human impact. This study aim to analyze morphological and vegetation characteristics of pioneer, young and stable islands in Tagliamento river, a natural gravel bed river with high natural conditions. The Tagliamento river, with a length of 178 km, is the main river of Friuli Venezia Giulia region and it represents a linking between Alpine and Adriatic zones. Because of the low human impact, the main course of Tagliamento is characterized by highly complex fluvial dynamics. The analysis were carried out in two sub-reaches characterized by different morphology but equally low man-impacted. Island dynamics, in relation with flood events, have been analyzed using aerial photos taken over two consecutive years, 2010 and 2011. Mean elevation of islands surface and the maximum and mean height of the islands vegetation were estimated using digital models obtained from two LiDAR flights. The results suggest that fluvial islands lie at different elevations and this implies a different resistance of flood events. Pioneer islands and young islands lie at lower elevations than stable islands causing a total or partial incapacity to survive of flood events. In most cases they are removed by ordinary floods. Stable islands lie at higher elevations and only intense, infrequent flood events (RI > 10-15 years) are able to determine substantial island erosion. The presence of high vegetation, sometimes more than 30 meters high, contributes to increase the resistance and the stability of stable islands.

Fluvial islands are very dynamics elements, strictly associated to the occurrence of major floods and to the morphological characteristics of fluvial system. The main morphological changes have been documented in the braided sub-reach, the highly dynamic response to changes of fluvial reach also affects the islands stability.

INDICE

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Introduzione..... | 1 |
| 1.1 | Principi di Geomorfologia fluviale..... | 1 |
| 1.2 | Elementi morfologici del sistema fluviale..... | 3 |
| 1.3 | Classificazione dei sistemi fluviali..... | 10 |
| 1.3.1 | Classificazione di Billi..... | 10 |
| 1.4 | Le variazioni morfologiche fluviali..... | 18 |
| 1.4.1 | Erosione fluviale..... | 20 |
| 1.4.2 | Trasporto fluviale..... | 21 |
| 1.4.3 | Deposizione..... | 22 |
| 2 | Le isole fluviali..... | 24 |
| 2.1 | Importanza idrologica e biotica delle isole fluviali..... | 24 |
| 2.2 | Formazione delle isole fluviali..... | 25 |
| 2.3 | Classificazione delle isole fluviali..... | 29 |
| 2.4 | Processi di eliminazione delle isole fluviali..... | 32 |
| 2.5 | L'influenza delle dighe sulle isole fluviali..... | 33 |
| 3 | La vegetazione ripariale..... | 34 |
| 3.1 | Caratteristiche dei popolamenti vegetali ripariali..... | 34 |
| 3.2 | Strategie di insediamento e funzioni della vegetazione riparia..... | 36 |
| 4 | Obiettivi..... | 39 |
| 5 | Inquadramento generale dell'area di studio..... | 40 |
| 5.1 | Caratteristiche morfologiche ed idrologiche del bacino del Tagliamento..... | 40 |
| 5.2 | Andamento climatico e regime idrologico del Tagliamento..... | 46 |
| 5.3 | Influenze antropiche nel sistema idrofluviale..... | 49 |
| 5.4 | Aspetti naturalistici del fiume Tagliamento..... | 50 |
| 5.4.1 | Il Tagliamento come corridoio fluviale..... | 52 |

| | |
|--|-----|
| 5.4.2 Le isole fluviali nel Tagliamento..... | 54 |
| 5.5 Localizzazione dei sottotratti di studio | 56 |
| 6 Materiali | 59 |
| 6.1 La tecnologia LiDAR..... | 59 |
| 6.1.1 Principi di funzionamento | 60 |
| 6.1.2 Specifiche voli LiDAR e foto aeree | 63 |
| 6.2 I modelli digitali del terreno | 65 |
| 7 Metodi | 68 |
| 7.1 Modellazione e detrendizzazione del DTM | 68 |
| 7.2 Identificazione delle isole fluviali da foto aeree..... | 70 |
| 7.3 Attività di campo | 72 |
| 8 Risultati | 73 |
| 8.1 Sottotratto di Cornino, 2010-2011 | 73 |
| 8.1.1 Altezza del suolo e della vegetazione delle isole fluviali, Cornino 2010-2011 | 77 |
| 8.2 Sottotratto di Flagogna, 2010-2011 | 83 |
| 8.2.1 Altezza del suolo e della vegetazione delle isole fluviali, Flagogna 2010-2011 | 87 |
| 8.3 Parametri dendrometrici della vegetazione delle isole fluviali | 93 |
| 9 Discussioni..... | 95 |
| 10 Conclusioni | 99 |
| 11 Bibliografia..... | 101 |

INDICE DELLE FIGURE

| | |
|--|----|
| Figura 1.1: elementi dell'alveo fluviale (da Marchetti, 2000)..... | 4 |
| Figura 1.2: esempi di barre fluviali: 1- laterali; 2- di meandro; 3- di confluenza; 4- longitudinali; 5- a losanga; 6- diagonali; 7- dune di sabbia (da Kellerhals <i>et al.</i> , 1976)..... | 7 |
| Figura 1.3: linee di direzione del flusso in un meandro, processi erosivi e deposizionali..... | 8 |
| Figura 1.4: erosione e deposizione in un meandro (da Martini, 2010) | 8 |
| Figura 1.5: profilo longitudinale a riffle-pool | 10 |
| Figura 1.6: schema della classificazione morfologica di Billi | 11 |
| Figura 1.7: corso d'acqua rettilineo | 12 |
| Figura 1.8: rappresentazione grafica di un tratto braided (da Lenzi, 2010) | 14 |
| Figura 1.9: tratto braided lungo il Fiume Tagliamento (da Tockner, 2003) | 15 |
| Figura 1.10: sistema fluviale meandriforme, Big Nemaha River, Nebraska USA..... | 16 |
| Figura 1.11: processi di cambiamento di forma fiumi meandriformi (da Lenzi, 2010) | 17 |
| Figura 1.12: processi di modellamento fluviale a scala di bacino (da Autorità di Bacino del Fiume Po, 2008, modificato da Kondolf, 1994)..... | 18 |
| Figura 1.13: diagramma di Hjulström..... | 20 |
| Figura 2.1: esempio di isola formatasi per avulsione, Chase Creek in British Columbia, Canada. Giugno 1997. (Ministero per la protezione dell'acqua, suolo e aria, British Columbia) (da Wyrick, 2005) | 26 |
| Figura 2.2: codificazione delle isole fluviali in relazione alla loro prossimità ad altre isole (modificata da Kellerhals <i>et al.</i> , 1976)..... | 30 |
| Figura 2.3: principali forme delle isole fluviali (da Wyrick, 2005)..... | 31 |
| Figura 3.1: sezione trasversale raffigurante i diversi tipi di vegetazione (da Pautou, 1984) | 35 |
| Figura 3.2: aspetti influenzati dalla vegetazione ripariale (da Farioli, 2008)..... | 37 |
| Figura 5.1: localizzazione bacino del Tagliamento, principali città, maggiori affluenti e distinzione dei tre sottobacini (1 – 3) (da Ward <i>et al.</i> , 1999)..... | 41 |
| Figura 5.2: tratto montano del Fiume Tagliamento | 42 |
| Figura 5.3: il Tagliamento da Osoppo a Pinzano | 43 |
| Figura 5.4: panoramica del Tagliamento nei pressi della Piana di Osoppo (da Tockner, 2003)..... | 44 |
| Figura 5.5: mappa regionale della piovosità media annua 1960 – 2004 (Protezione civile Fvg) | 47 |
| Figura 5.6: schema del sistema idroelettrico “Alto e Medio Tagliamento” (Paronuzzi, 2006) | 49 |
| Figura 5.7: variazioni nell'abbondanza delle comunità vegetali in tre fiumi alpini a canali intrecciati con diverso grado di impatto antropico (Lippert <i>et al.</i> 1995, Muller 1995) | 52 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.8: distribuzione dei principali elementi paesaggistici lungo il corridoio fluviale (analisi su mappe 1:10000, 1984-1985) (Gurnell <i>et al.</i> , 2000) | 53 |
| Figura 5.9: numero di isole per km di fiume lungo l'intero corso fluviale (dati derivati da foto aeree e mappe 1:10'000, 1984-1985) (Tockner <i>et al.</i> , 2003) | 55 |
| Figura 5.10: sottotratto fluviale di Cornino..... | 57 |
| Figura 5.11: sottotratto fluviale di Flagogna | 58 |
| Figura 6.1: funzionamento del sistema LiDAR aerotrasportato (da Giuseppini, 2006) | 60 |
| Figura 6.2: strumentazione LiDAR..... | 62 |
| Figura 6.3: le riflessioni multiple del raggio (da Cavalli & Tarolli, 2010)..... | 62 |
| Figura 6.4: andamento dei livelli idrometrici del Tagliamento tra agosto 2010 e maggio 2011 | 64 |
| Figura 6.5: strutture del DTM: a) formato raster b) formato TIN (da Moore <i>et al.</i> 1991)..... | 65 |
| Figura 6.6: profilo DTM di una sezione d'alveo nel sottotratto di Flagogna..... | 66 |
| Figura 6.7: profilo DSM di una sezione d'alveo nel sottotratto di Flagogna..... | 66 |
| Figura 7.1: diagramma di flusso della creazione e detrendizzazione del DTM | 68 |
| Figura 7.2: DSM detrendizzato, sottotratto di Cornino | 69 |
| Figura 7.4: porzione di isola giovane nel sottotratto di Flagogna, fiume Tagliamento | 71 |
| Figura 7.5: isola stabile nel sottotratto di Cornino, fiume Tagliamento | 71 |
| Figura 7.6: misurazione del diametro con cavalletto dendrometrico..... | 72 |
| Figura 8.1: distribuzione in % delle isole fluviali, Cornino 2010 | 73 |
| Figura 8.2: area in % di ciascuna categoria rispetto all'area totale costituita da isole, Cornino 2010 | 73 |
| Figura 8.3: distribuzione in % delle isole fluviali, Cornino 2011 | 74 |
| Figura 8.4: area in % di ciascuna categoria rispetto all'area totale costituita da isole, Cornino 2011 | 74 |
| Figura 8.5: area media per le tre tipologie di isole fluviali, Cornino 2010 | 76 |
| Figura 8.6: area media per le tre tipologie di isole fluviali, Cornino 2011 | 77 |
| Figura 8.7: altezza media del suolo per le tre tipologie di isole, Cornino 2010..... | 78 |
| Figura 8.8: altezza media del suolo per le tre tipologie di isole, Cornino 2011 | 79 |
| Figura 8.9: altezza massima della vegetazione per le tre tipologie di isole, Cornino 2010..... | 80 |
| Figura 8.10: altezza media della vegetazione per le tre tipologie di isole, Cornino 2010 | 81 |
| Figura 8.11: altezza massima della vegetazione per le tre tipologie di isole, Cornino 2011 | 82 |
| Figura 8.12: altezza media della vegetazione per le tre tipologie di isole, Cornino 2011 | 82 |
| Figura 8.13: distribuzione in % delle isole fluviali, Flagogna 2010..... | 83 |

| | |
|---|----|
| Figura 8.14: area in % di ciascuna categoria rispetto all'area totale costituita da isole, Flagogna 2010..... | 83 |
| Figura 8.15: distribuzione in % delle isole fluviali, Flagogna 2011..... | 84 |
| Figura 8.16: area in % di ciascuna categoria rispetto all'area totale costituita da isole, Flagogna 2011..... | 84 |
| Figura 8.17: area media per le tre tipologie di isole fluviali, Flagogna 2010 | 86 |
| Figura 8.18: area media per le tre tipologie di isole fluviali, Flagogna 2011 | 87 |
| Figura 8.19: altezza media del suolo per le tre tipologie di isole, Flagogna 2010 | 88 |
| Figura 8.20: altezza media del suolo per le tre tipologie di isole, Flagogna 2011 | 89 |
| Figura 8.21: altezza massima della vegetazione per le tre tipologie di isole, Flagogna 2010 | 90 |
| Figura 8.22: altezza media della vegetazione per le tre tipologie di isole, Flagogna 2010..... | 91 |
| Figura 8.23: altezza massima della vegetazione per le tre tipologie di isole, Flagogna 2011 | 92 |
| Figura 8.24: altezza media della vegetazione per le tre tipologie di isole, Flagogna 2011..... | 92 |
| Figura 8.25: relazione diametro e altezza delle piante campionate lungo il sottotratto di Cornino .. | 93 |
| Figura 8.26: relazione diametro e altezza delle piante campionate lungo il sottotratto di Flagogna | 94 |

INDICE DELLE TABELLE

| | |
|--|----|
| Tabella 5.1: caratteristiche bacino del Tagliamento | 46 |
| Tabella 5.2: variazioni della portata media annua lungo il corso del Tagliamento..... | 48 |
| Tabella 5.3: portata media, deviata e residua nel Tagliamento e nei maggiori tributari (Tockner <i>et al.</i> , 2003)..... | 50 |
| Tabella 5.4: statistiche riassuntive del corridoio fluviale del Tagliamento (Ward <i>et al.</i> , 1999; Gurnell <i>et al.</i> , 2000)..... | 53 |
| Tabella 5.5: caratteristiche sottotratti di studio | 56 |
| Tabella 8.1: area alveo attivo di Cornino | 73 |
| Tabella 8.2: distribuzione numerica e relativa variazione % delle isole negli anni 2010-2011, sottotratto di Cornino | 75 |
| Tabella 8.3: numerosità delle isole per km ² d'alveo attivo, sottotratto di Cornino | 75 |
| Tabella 8.4: estensione delle isole rispetto l'alveo attivo (m ² /ha), sottotratto di Cornino..... | 75 |
| Tabella 8.5: area alveo attivo di Flagogna | 83 |
| Tabella 8.6: distribuzione numerica e relativa variazione % delle isole negli anni 2010-2011, sottotratto di Flagogna..... | 85 |
| Tabella 8.7: numerosità delle isole per km ² d'alveo attivo, sottotratto di Flagogna | 85 |
| Tabella 8.8: estensione delle isole rispetto l'alveo attivo (m ² /ha), sottotratto di Flagogna | 86 |

1 Introduzione

1.1 Principi di Geomorfologia fluviale

Nella letteratura internazionale sono state suggerite diverse descrizioni di quella che viene comunemente chiamata geomorfologia fluviale, la definizione che è forse la più completa è stata proposta da Newson & Sear (1993) che la definiscono come lo “studio dei processi di produzione, flusso ed immagazzinamento di sedimenti nel bacino idrografico e nell’alveo fluviale nella breve, media e lunga scala temporale, e delle forme risultanti nell’alveo e nella piana inondabile”.

Dalla definizione si evince come gli scopi principali di questa materia siano la conoscenza dei processi fluviali che generano e modificano le forme del paesaggio (Marchetti, 2000). Un ambiente fluviale, infatti, non rimane sempre uguale bensì è soggetto a variazioni esercitate dalla forza dei flussi che lo attraversano; la potenza della corrente, correlata positivamente alla pendenza delle superfici in cui scorre, può indurre cambiamenti morfologici che sono alla base dei processi morfodinamici dei sistemi fluviali. Le principali variazioni si hanno a carico della struttura planimetrica, della struttura altitudinale e della forma della sezione.

Quella di Newson & Sear è una definizione che ingloba al suo interno i principi cardini che devono essere rispettati nel considerare le variazioni fluviali: scale spaziali e temporali diverse. Le modifiche morfologiche a cui un fiume è soggetto sono il risultato di processi di regolazione la cui entità deve sempre essere riferita ad una specifica scala temporale e spaziale. Nell’ambito della geomorfologia fluviale possono essere distinte scale temporali di tre tipi: lungo, medio e breve periodo.

La scala temporale di lungo periodo prende in considerazione i cambiamenti avvenuti nell’arco di milioni di anni causati da fattori non direttamente collegati al sistema fluviale quali i movimenti tettonici e i cambiamenti climatici. La scala di medio periodo invece, basandosi su archi temporali di alcuni decenni, esamina le modifiche subite dal fiume in relazione alla variabilità di parametri idrologico-idraulici e morfometrici del corso d’acqua che solitamente risentono di sensibili, e talvolta radicali, trasformazioni (Merola, 2010). Infine, il breve periodo analizza i cambiamenti, verificatisi nel giro di pochi anni, avvalendosi di metodologie sperimentali come bacini pilota, indagini in campo e modelli fisici testati in laboratori idraulici (Lenzi *et al.*, 1996, 1997).

Per quanto riguarda le scale spaziali, si fa normalmente riferimento a scale di bacino oppure di collettore anche se, nell’analizzare le dinamiche fluviali, si tende ad operare solitamente ad una

scala spaziale di tratto o sottotratto sia per una maggiore semplicità a livello operativo, che per ottenere un grado di dettaglio più elevato.

Tuttavia, va ricordato che la scelta della scala spaziale e temporale di analisi dipende dagli aspetti che si intendono studiare (Rinaldi *et al.*, 2010).

I diversi processi fluviali, quali erosione, trasporto di sedimenti e deposizione, nell'apportare cambiamenti nelle forme dei corsi d'acqua danno vita a diverse configurazioni morfologiche che si presentano come il risultato finale di tutti quei fattori idrologici, idraulici, morfologici, sedimentologici, geologici, climatici, vegetazionali e biologici che caratterizzano il complesso ambiente fluviale (Lenzi *et al.*, 2000). Nell'effettuare analisi dell'evoluzione dei sistemi fluviali è, quindi, importante studiare sia le condizioni idrauliche che si verificano lungo il suo corso e che determinano il comportamento della corrente (Rinaldi *et al.*, 2010), sia tutte le altre caratteristiche che permettono di descrivere il comportamento del sistema fluviale e la sua possibile evoluzione.

Le dinamiche fluviali, essendo differenti per ogni fiume, portano alla formazione di configurazioni dei letti fluviali che, oltre ad avere caratteristiche proprie ed uniche (Billi, 1995), si contraddistinguono per l'aver elementi fisiografici con forme diverse.

L'insieme di questi fattori determina una certa varietà di configurazioni morfologiche la cui identificazione è possibile solo analizzando una vasta gamma di parametri distintivi, come:

- Sinuosità: rapporto tra la lunghezza del corso d'acqua e la lunghezza dell'asse della valle, (Leopold *et al.*, 1964);
- Granulometria: composizione granulometrica del materiale costituente l'alveo;
- Trasporto solido totale: somma del trasporto solido di fondo e quello in sospensione;
- Grado di intrecciamento: dato dal rapporto tra la larghezza del collettore in condizioni di piena, ovvero quando le forme di fondo sono completamente sommerse, e la larghezza dello stesso in condizioni di flusso normali;
- Incassamento: definito anche "grado di confinamento" esprime il rapporto tra la larghezza dell'area di esondazione e la larghezza al *bankfull* (Kellerhals, 1972; Rosgen, 1994, 1996);
- Rapporto larghezza/profondità: rapporto tra la larghezza del canale a piene rive e la relativa profondità media (Rosgen, 1994);
- Pendenza: è uno degli elementi di maggiore importanza nella determinazione delle caratteristiche idrauliche, morfologiche e biologiche di un corso d'acqua;

- Profilo longitudinale: rappresenta le variazioni di elevazione del fiume ed è usato come supporto per la suddivisione dei fiumi in categorie collegate alla pendenza, le quali riflettono la tipologia morfologica;
- Sezione trasversale: la forma della sezione trasversale è un parametro che fornisce indicazioni sul grado di incisione del canale così come sull'entità delle principali variabili idrologiche (Picco, 2010);
- Planimetria: riguarda l'aspetto che il fiume assume all'interno della sua zona di scorrimento tenendo in considerazione parametri come la sinuosità e il grado di intrecciamento.

Nonostante la possibilità di avvalersi di questi parametri, bisogna ricordare che esistono ancora incertezze per quanto riguarda i rapporti tra la morfologia e alcuni suoi parametri caratteristici. Talora, pur riconoscendo certi meccanismi che caratterizzano la dinamica di un alveo, non si riesce ancora a distinguere chiaramente quale sia la vera causa che origina alcuni assetti morfologici (Lenzi *et al.*, 2000).

1.2 Elementi morfologici del sistema fluviale

Come già accennato, un ambiente fluviale è formato da numerosi elementi la cui presenza va a determinare quella che viene chiamata complessità morfologica del sistema fluviale.

Infatti, come descritto da Rinaldi *et al.* (2010), un sistema fluviale non è limitato alle sole aree prossime all'alveo, bensì comprende tutte le porzioni di territorio che subiscono l'azione del corso d'acqua o ne sono state influenzate in passato, racchiudendo così al suo interno elementi che si differenziano per la forma, l'origine e le dinamiche evolutive. Sono elementi interconnessi tra loro e la loro presenza/assenza costituisce il fattore discriminante per la maggior parte delle classificazioni dei corsi d'acqua.

Gli elementi più importanti per descrivere il sistema fluviale sono di seguito descritti facendo riferimento ai lavori di Rinaldi *et al.* (2010), e Hupp & Osterkamp (1996).

Alveo (riverbed)

In un sistema fluviale, l'alveo è costituito dall'insieme dei canali principali e secondari, dalle barre e dalle isole. La delimitazione dell'alveo è solitamente data dalle sponde, però non sempre queste sono sufficienti a discriminarlo dall'adiacente pianura alluvionale, soprattutto in caso di passaggio graduale tra alveo e piana. A livello generale quindi, il limite dell'alveo viene fatto coincidere con il livello al *bankfull*, ovvero il livello

idrometrico corrispondente alla *bankfull discharge*: la portata massima che può transitare lungo un fiume senza inondare la piana attigua.

Analizzando una sezione trasversale dell'alveo, Marchetti (2000) individua tre tipologie di letto a seconda del tipo di portata a cui sono esposti (Fig. 1.1). Il letto ordinario, delimitato da sponde ben individuabili quali scarpate o argini naturali, si contraddistingue per la presenza d'acqua per la maggior parte del tempo. Il letto di magra, è interessato dalla porzione di flusso presente perennemente nell'alveo; infine, il letto di inondazione comprende quella parte di alveo che viene interessata dal flusso solamente in concomitanza di piene eccezionali superiori alle portate ordinarie.

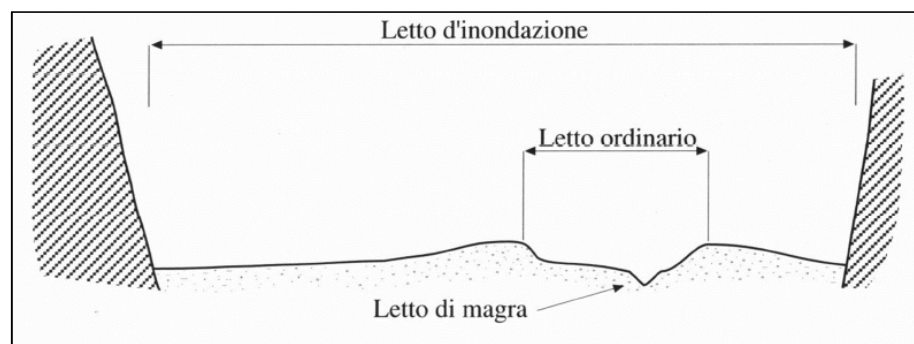


Figura 1.1: elementi dell'alveo fluviale (da Marchetti, 2000)

Le caratteristiche dell'alveo variano, lungo il percorso fluviale, riflettendo le peculiarità ambientali delle zone montane, pedemontane e pianeggianti. Procedendo da monte verso valle, si assiste ad una diminuzione del grado di confinamento, della pendenza e della velocità della corrente, a cui si associa una progressiva sostituzione dei processi erosivi con quelli deposizionali. Per quanto riguarda la granulometria, le dimensioni dei sedimenti che costituiscono l'alveo variano anch'esse a seconda delle zone: detriti grossolani non coesivi (massi, ciottoli e ghiaia) dei tratti montani si sostituiscono lentamente ai sedimenti fini dei tratti vallivi. Per descrivere questa variazione è stato introdotto a livello internazionale il termine *downstream fining* che esprime appunto la variazione longitudinale delle dimensioni dei sedimenti costituenti il letto nella direzione del deflusso, caratterizzata da una regolare diminuzione del diametro dei grani procedendo da monte verso valle (Moussavi-Harami *et al.*, 2004).

Sponde (*banks*)

Le sponde sono porzioni di suolo a pendenza elevata che delimitano lateralmente l'alveo separandolo dalla piana inondabile o da un terrazzo.

Piana inondabile (*floodplain*)

La piana inondabile, detta anche pianura alluvionale, è definibile come una superficie pianeggiante di origine deposizionale, adiacente al corso d'acqua, formata dalla progressiva deposizione dei sedimenti trasportati dalle portate.

Fenomeni come la migrazione laterale del corso d'acqua e la deposizione durante le esondazioni vanno a modificare la superficie della piana, mentre le sue dinamiche evolutive dipendono principalmente dall'intensità e granulometria degli apporti solidi, dalla disponibilità di spazi per l'accumulo dei sedimenti e dalle condizioni energetiche della corrente (Lenzi, 2008). In condizioni naturali la piana è solitamente interessata da piene con un tempo di ritorno pari a 1-3 anni (Surian *et al.*, 2009).

Secondo Nanson & Croke (1992) le piane inondabili possono essere distinte, a seconda del materiale di formazione e delle loro dinamiche evolutive, in tre tipologie: ad alta, a media e a bassa energia. Le prime sono costituite da materiali non coesivi (ghiaia e sabbia) e sono tipiche dei corsi d'acqua montani dove il confinamento causato da affioramenti rocciosi rende difficoltosa la migrazione laterale; le seconde, formate anch'esse da sedimenti non coesivi, sono proprie dei corsi d'acqua pedemontani e il processo principale è l'accrescimento laterale a partire da barre di meandro o da barre dei canali intrecciati. Infine, nelle pianure a bassa energia, caratterizzate da sedimenti coesivi e tipiche dei corsi d'acqua a bassa pendenza, prevalgono processi d'accrescimento verticale ed occasionali avulsioni, dato che le sponde coesive impediscono la migrazione laterale.

Terrazzo fluviale (*fluvial terrace*)

Il terrazzo è costituito da una superficie posta ad una elevazione maggiore rispetto alla piana inondabile in seguito ad una modificazione della posizione altimetrica del fiume provocata da esso stesso. In seguito a fenomeni di cambiamento del percorso del fiume, quali l'avulsione, esso tende a costruire una nuova piana inondabile abbandonando quella precedente che diventa il terrazzo. Il terrazzo fluviale può ancora essere soggetto ad inondazioni ma con tempo di ritorno superiore ai 3 anni. Esistono anche terrazzi di origine antropica la cui formazione è legata ad attività antropiche quali escavazioni, sistemazioni idraulico-forestali e costruzioni di dighe (Surian *et al.*, 2009).

Barre (*bars*)

Le barre sono corpi sedimentari presenti all'interno dell'alveo con dimensioni e forme variabili. La loro formazione è legata a processi deposizionali, sono infatti formate dai sedimenti trasportati dalla corrente e depositati più a valle dove la diminuzione della pendenza determina una riduzione della velocità del flusso favorendo i processi sedimentativi.

Le barre, come altri elementi del sistema fluviale, non sono stabili ma tendono a spostarsi nello spazio sia per distruzione e rigenerazione più a valle, sia per migrazione dovuta a processi erosivi a monte ed accrescimento sottocorrente (Marchetti, 2000). Le dinamiche evolutive delle barre sono però estremamente legate al loro grado di stabilità che a sua volta dipende dal livello topografico che occupano all'interno dell'alveo. Le barre a minore elevazione sono solitamente meno stabili perché interessate frequentemente dai flussi ordinari che impediscono lo sviluppo di vegetazione in superficie; al contrario le barre più elevate mostrano un maggior grado di stabilità in quanto investite dalla corrente solamente durante eventi di maggiore intensità. In quest'ultime prevalgono in superficie i sedimenti più fini che favoriscono lo sviluppo di una copertura vegetale che, a sua volta, attraverso l'intercettazione di materiale, contribuisce a stabilizzare la barra stessa aumentando la resistenza al moto e diminuendo quindi la velocità del flusso su di essa, favorendo in tal modo l'ulteriore deposizione di sedimento fine (Lenzi, 2008).

Oltre al livello altimetrico occupato all'interno dell'alveo, le barre possono essere distinte in diverse altre tipologie a seconda della forma che assumono, della posizione occupata in alveo e del materiale costituente.

I principali tipi di barre rinvenibili nei sistemi fluviali sono sintetizzati in Figura 1.2.

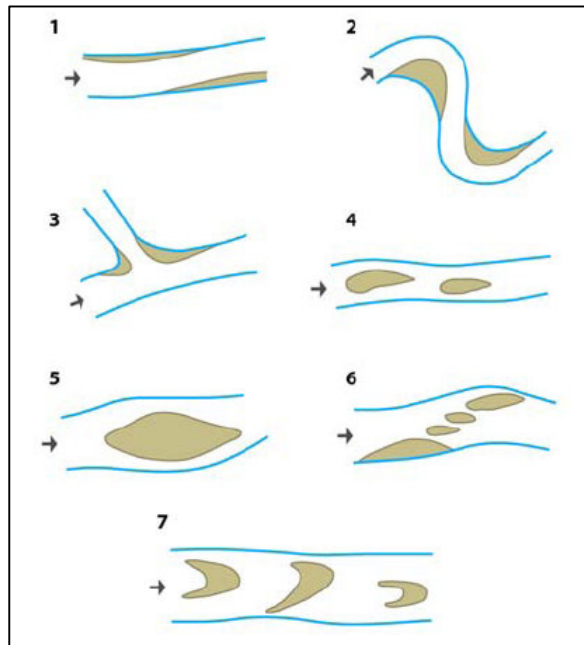


Figura 1.2: esempi di barre fluviali: 1- laterali; 2- di meandro; 3- di confluenza; 4- longitudinali; 5- a losanga; 6- diagonali; 7- dune di sabbia (da Kellerhals et al., 1976)

Le barre laterali alternate sono specifiche di fiumi rettilinei o a bassa sinuosità, le barre di meandro invece sono tipiche di fiumi con una sinuosità più marcata e tendono a formarsi nella parte interna delle curve dove il flusso è caratterizzato da un'energia più bassa. Le barre longitudinali e quelle a losanga, proprie dei sistemi *braided*, presentano solitamente una forma romboidale con l'asse maggiore nella direzione del flusso e mostrano una diminuzione della pendenza verso valle. Infine, le barre diagonali dei tratti curvilinei sono unità morfologiche derivate dall'espansione laterale delle barre longitudinali e sono posizionate a ridosso delle sponde.

Isole (*islands*)

Osterkamp (1998) definisce le isole fluviali come porzioni di terra, all'interno dell'alveo fluviale, separate dalla piana inondabile da canali attivi principali o secondari; queste mostrano una certa stabilità (Ward *et al.*, 1999) e rimangono esposte anche durante le piene al *bankfull*. Presentano vegetazione pluriennale arborea ed arbustiva e sono il risultato di processi deposizionali di sedimenti. Le tipologie, le caratteristiche morfologiche e le dinamiche di formazione delle isole verranno trattate in dettaglio nel capitolo 2.

Meandri (*meanders*)

I meandri sono anse curvilinee che si susseguono più o meno regolarmente lungo un corso d'acqua attribuendogli così un andamento planimetrico sinuoso.

Tipici di tratti fluviali a ridotta pendenza, i meandri sono unità morfologiche soggette a spostamenti longitudinali, solitamente dette migrazioni del meandro. Questi movimenti si verificano per la presenza di processi erosivi e deposizionali a carico delle due sponde: quella esterna, caratterizzata da massime velocità della corrente, è interessata da erosione fluviale, mentre nella sponda interna dove le velocità sono minime si hanno fenomeni di sedimentazione (Fig. 1.3).

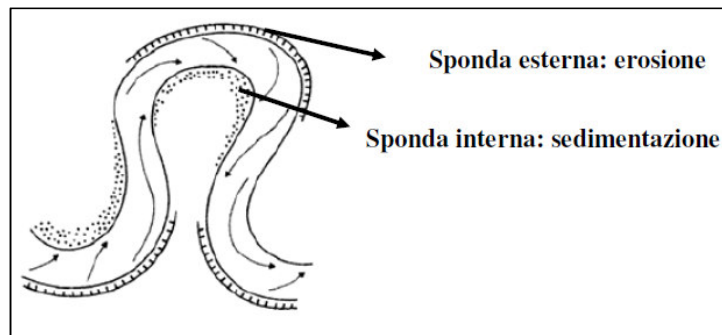


Figura 1.3: linee di direzione del flusso in un meandro, processi erosivi e deposizionali

In aggiunta a questi due processi che portano ad una evoluzione del meandro, si può assistere anche ad un aumento dell'ampiezza dell'ansa, con una traslazione e rotazione secondo il senso della corrente, insieme ad una diminuzione della pendenza (Buzzi, 2011). La concomitanza di queste variazioni morfologiche può portare, come esito finale, a cambiamenti di forma del percorso meandriforme (taglio di meandro, taglio di collo) illustrati nel paragrafo successivo. La Figura 1.4 evidenzia la zona di deposito nella parte interna del meandro e l'erosione sull'estradosso dell'ansa.

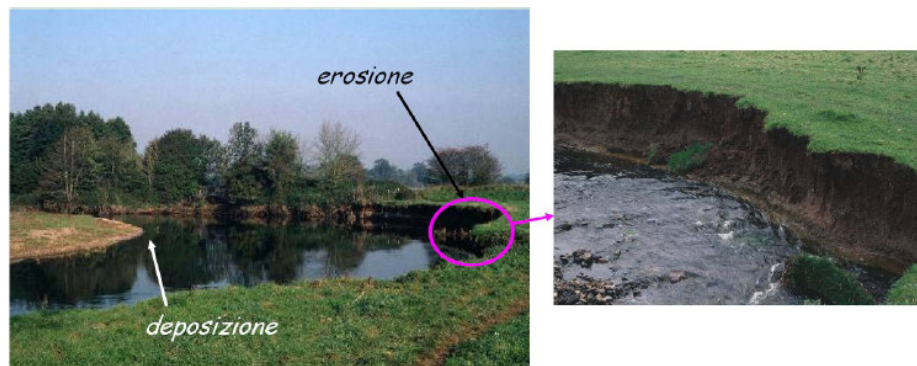


Figura 1.4: erosione e deposizione in un meandro (da Martini, 2010)

Raschi (*riffles*)

I raschi sono delle macro-forme di fondo che rappresentano degli “alti” topografici all’interno del profilo longitudinale dell’alveo. Si formano per deposizione di sedimenti grossolani come ciottoli e piccoli massi, mancano invece i sedimenti fini perché direttamente erosi dalla superficie del raschio. Sono elementi presenti nella maggior parte delle tipologie fluviali con prevalenza nei fiumi a fondo ghiaioso ad eccezione di quelli a pendenza elevata superiore a 3-5%, in questi casi si vengono a formare dei veri e propri gradini. I riffles tendono a formarsi in corrispondenza della testa di barre alternate presenti nell’alveo, dove la sezione presenta un restringimento e generando, in condizioni di magra, delle oscillazioni della corrente da una sponda all’altra; in altri casi invece, i *riffles* possono essere considerati come delle barre sommerse trasversali che provocano sbandamenti laterali della corrente (Lenzi, 2008). Per quanto riguarda la profondità di questi raschi, durante le fasi di morbida e magra, essa è maggiore rispetto a quelle degli elementi fluviali adiacenti; durante le fasi di piena invece, il profilo del pelo libero diventa più uniforme attenuando così anche le differenze di velocità.

Salti (*steps*)

Gli *steps* sono elementi fluviali di origine deposizionale formati dalla corrente stessa o, in alcuni casi, determinati dalla presenza di affioramenti rocciosi o tronchi d’albero; in questi casi si parla rispettivamente di *rock steps* e *log steps*. La loro presenza è assai diffusa nei corsi d’acqua montani dove oltre alla granulometria grossolana dell’alveo, sono presenti sia affioramenti del substrato roccioso che materiale legnoso di grandi dimensioni, condizioni essenziali per la formazione degli *steps*.

Pozze (*pools*)

Le pozze sono zone dell’alveo caratterizzate da tiranti idrici maggiori rispetto alle aree adiacenti. La loro formazione è legata alla presenza di disturbi, quali pendenze del fondo maggiori (*riffles*), salti o restringimenti della sezione per la presenza di barre, che generano un aumento della velocità della corrente seguito da un’azione erosiva localizzata che porta alla formazione delle *pools*. L’idrodinamica delle pozze si caratterizza per la presenza di correnti secondarie e dissipazioni energetiche causate dai gradienti di velocità tra la *pool*, solitamente minore, e le zone circostanti.

Gli elementi fluviali sopracitati, raschi, salti e pozze, sono le principali unità fluviomorfologiche e sedimentologiche che solitamente caratterizzano molti tratti dei torrenti alpini. Oltre ad essere presenti come unità singole è molto frequente anche la loro presenza in sequenza come ad esempio tratti a *step-pool* o *riffle-pool* (Fig. 1.5). Queste configurazioni sono solite alternarsi senza soluzione di continuità dando luogo ad una distribuzione spaziale che non sempre ricalca i modelli tradizionali di classificazione (Lenzi *et al.*, 2000) rendendo così necessarie delle integrazioni alle classificazioni esistenti in letteratura.

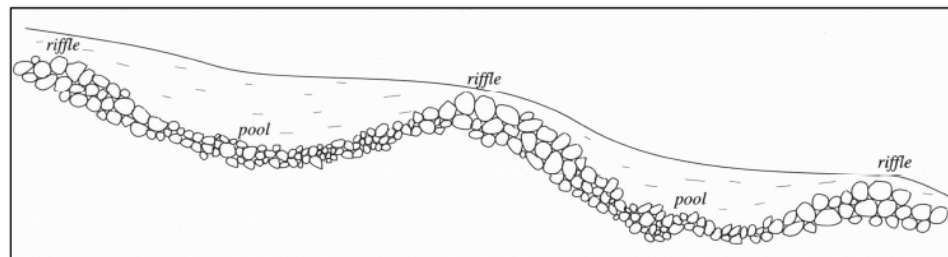


Figura 1.5: profilo longitudinale a riffle-pool

1.3 Classificazione dei sistemi fluviali

A livello internazionale sono state proposte numerose classificazioni dei corsi d'acqua a diversi livelli di dettaglio. Esse si distinguono per i criteri di classificazioni adottati e per la scala spaziale a cui fanno riferimento, esistono infatti classificazioni relative al tracciato planimetrico, ai parametri geometrici così come alle caratteristiche sedimentologiche, alle forme di fondo e alle dinamiche evolutive. Ad ogni modo, i diversi criteri risultano interconnessi tra loro, basti pensare all'influenza che le caratteristiche sedimentologiche hanno sulla morfologia del tracciato planimetrico.

Di seguito viene descritta la classificazione di Billi che ben descrive le caratteristiche morfologico - planimetriche dei diversi sistemi fluviali.

1.3.1 Classificazione di Billi

La classificazione di Billi (1994) raggruppa le diverse tipologie morfologiche dei corsi d'acqua in cinque configurazioni d'alveo principali: idrosistemi a canali rettilinei, a canali intrecciati, pseudomeandriformi, meandriformi e anastomizzati.

I parametri utilizzati per la classificazione (Fig. 1.6) fanno riferimento alla morfologia, granulometria e capacità di trasporto del sistema fluviale.

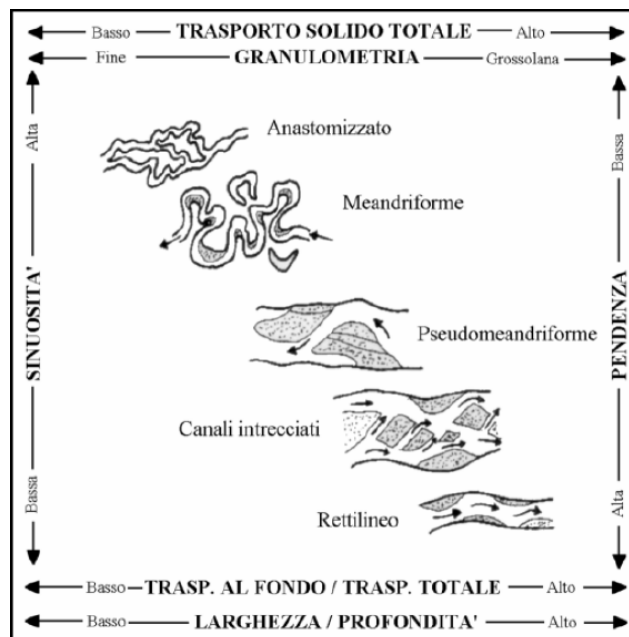


Figura 1.6: schema della classificazione morfologica di Billi

Corsi d'acqua rettilinei

I corsi d'acqua rettilinei (*straight rivers*) sono piuttosto rari in natura e si sviluppano in zone montane a pendenze elevate (> 0,5-1%) e con forte alimentazione di sedimenti, talvolta anche grossolani come ghiaia, ciottoli e massi. Nelle zone alpine e montane questi torrenti scorrono solitamente entro lo stretto fondo di valli a V e normalmente possiedono una piana alluvionale piuttosto ridotta. Un aspetto fondamentale di questi corsi d'acqua è che generalmente non si riscontrano tratti rettilinei di lunghezza superiore a dieci volte la larghezza dell'alveo.

Nonostante le sponde rettilinee, questi canali assumono un andamento leggermente sinuoso legato alla presenza di barre alternate che conferiscono al parametro di sinuosità valori prossimi all'unità (Fig. 1.7). Queste barre si formano in presenza di sedimento, che solitamente si presenta più grossolano alla testa della barra, perché investito direttamente dalla corrente, mentre la coda è formata da materiale più fine deposto in seguito alla separazione del flusso. Per quanto riguarda la dinamica delle barre, esse sono piuttosto mobili e durante gli eventi di piena tendono a spostarsi sottocorrente rimanendo sempre aderenti alla stessa sponda; altre volte invece, il loro sedimento viene

totalmente mobilizzato e le barre vengono riformate più a valle o nella stessa posizione da nuovo materiale proveniente da monte.

Una caratteristica morfologica particolarmente accentuata in questi sistemi fluviali è costituita dalla successione di *riffle-pools*, ovvero tratti a pendenza più sostenuta e modeste profondità di flusso (*riffle*) che si alternano a tratti con profilo più piatto e tiranti d'acqua più elevati (*pool*). In corrispondenza di pendenze più marcate (> 4%) e di una maggiore disponibilità di sedimenti, i *riffle* si accorciano dando luogo agli *step*, unità morfologiche a gradino. *Riffle-pools* e *step-pools* rappresentano dunque le forme di fondo tipiche dei canali rettilinei montani.

Relativamente alla dinamica di tali corsi d'acqua, essa è piuttosto limitata a causa delle condizioni al contorno molto vincolanti. Processi comuni e fonti di problematiche per la sicurezza idraulica sono le erosioni spondali e le modifiche del profilo longitudinale in seguito ad incisioni e fenomeni di sovralluvionamento; casi di avulsione invece, sono piuttosto rari data la ridotta piana alluvionale.



Figura 1.7: corso d'acqua rettilineo

Corsi d'acqua pluricursali a canali intrecciati

I corsi d'acqua a canali intrecciati (*braided rivers*) sono fiumi pluricursali piuttosto comuni, diffusi soprattutto sul fondo di ampie pianure alluvionali e nelle zone pedemontane a granulometria prevalentemente ghiaiosa. In Italia, esempi di fiumi *braided* sono rappresentati, per esempio, dai tratti pedemontani dei fiumi Tagliamento, Piave e Brenta.

Sono caratterizzati da alvei molto ampi costituiti da due o più canali che si intersecano nel percorso separati da isole e barre longitudinali. Il rapporto tra la larghezza dell'alveo e la profondità è, solitamente, molto alto, superiore a 40 ma con valori che possono arrivare fino a 400.

Scorrono in zone a significativa pendenza, variabile tra 0,1 e 3%, la quale favorisce condizioni energetiche piuttosto sostenute che, assieme a portate molto variabili, elevato trasporto solido di fondo e sponde non coesive, rappresenta uno dei principali fattori predisponenti la formazione di questi sistemi fluviali. Dove però, la forza della corrente si riduce al punto da favorire il deposito di sedimenti lungo le sponde aumentando così la loro stabilità, il fiume tende a perdere l'aspetto *braided* per avvicinarsi di più alla morfologia meandrifome (Picco, 2010).

L'elevata complessità morfologica che contraddistingue i sistemi *braided*, nasce dalla coesistenza di diverse strutture spaziali, controllate da scale spazio-temporali che interagendo nello sviluppo dei canali intrecciati danno luogo a forti fluttuazioni morfologiche sia nel tempo che nello spazio (Bertoldi *et al.*, 2009). Sono quindi ambienti molto instabili in cui anche piene non eccezionali possono rappresentare processi morfologicamente attivi (Picco *et al.*, 2012).

Relativamente alla morfologia dei fiumi a canali intrecciati, in essi possono essere distinti due tipi di barre poste a diversi livelli topografici: quelle soggette a modificazioni anche durante le piene ordinarie, e quelle invece più stabili raggiunte soltanto durante eventi di maggiore intensità. Le principali caratteristiche distintive di queste due tipologie di barre sono legate alla distribuzione granulometrica e alla presenza di vegetazione (Picco, 2010). Quelle a minore stabilità e più frequentemente soggette a sommersione sono prive di vegetazione e presentano sedimenti a grana grossa; le barre più stabili invece, essendo posizionate ad una elevazione maggiore, si contraddistinguono per la presenza di sedimenti fini in superficie così da favorire l'insediamento stabile di vegetazione. La copertura vegetale favorisce, a sua volta, una maggiore stabilizzazione del corpo sedimentario aumentando la resistenza al moto e diminuendo quindi la velocità del flusso sopra la barra.

I corsi d'acqua a canali intrecciati mostrano un'elevata dinamicità: i canali, le barre e le isole vengono rimodellati continuamente a seconda dell'intensità dei picchi di piena (Galay *et al.*, 1998). Le migrazioni laterali degli elementi fluviali avvengono per lo più all'interno dell'alveo attivo, in corrispondenza di piene eccezionali si possono avere anche modificazioni del tracciato planimetrico. L'aspetto che il fiume assume varia

dunque a seconda dell'entità delle portate (Fig. 1.8), in fasi di magra solo pochi canali risultano occupati dal flusso mentre al crescere della portata si attivano sempre più canali.

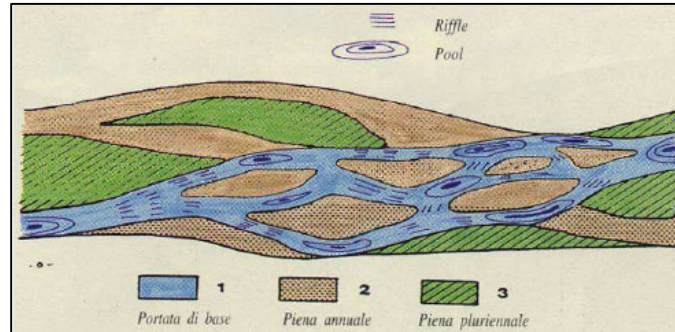


Figura 1.8: rappresentazione grafica di un tratto braided (da Lenzi, 2010)

Un aspetto ecologico molto importante che contraddistingue i sistemi *braided* è dato dalla numerosità dei microhabitat che si vengono a creare grazie alla presenza degli elementi fluviali sovraccitati. Isole, barre e canali attivi garantiscono l'alternanza di ambienti acquatici e terrestri, quali stagni perfluviali, ghiaia, accumuli di legname ed isole a vegetazione ripariale, che assicurano ospitalità a numerose specie sia vegetali che animali. È questo un aspetto essenziale per il mantenimento di una discreta biodiversità almeno all'interno dell'ambiente di pertinenza fluviale; alcuni Autori (Arscott *et al.*, 2000; Van der Nat *et al.*, 2003) hanno, infatti, affermato come i corsi d'acqua a canali intrecciati abbiano una complessità biotica maggiore rispetto ad altri sistemi fluviali. Tuttavia, attualmente si sta sempre più assistendo ad una diminuzione dell'estensione dei corsi *braided* nonché ad una riduzione del loro grado di intrecciamento; questa tendenza verso l'andamento unicursale è da imputare prevalentemente alle attività antropiche: l'artificializzazione dei regimi delle portate, la riduzione del trasporto solido per intercettazione negli invasi artificiali e il prelievo di inerti in alveo hanno infatti pesanti ripercussioni sulle dinamiche evolutive naturali dei corsi d'acqua.

In Figura 1.9 è riportato un esempio di sistema a canali intrecciati relativo al Fiume Tagliamento che mostra il complesso mosaico degli ecosistemi acquatici e terrestri, la piana alluvionale attiva ha una larghezza di circa 900 m (Tockner *et al.*, 2003).



Figura 1.9: tratto braided lungo il Fiume Tagliamento (da Tockner, 2003)

Corsi d'acqua pseudomeandriiformi

È questa una categoria morfologica (*wandering rivers*) intermedia tra i fiumi a canali intrecciati e quelli meandriiformi. Sono fiumi formati da un solo canale principale attivo e da barre laterali alternate dalla tipica forma a mezza luna. Possono essere presenti anche due tipi di canali secondari aderenti a una delle due sponde: canali di taglio e canali di morta. Mentre i primi sono attivi e si formano per taglio longitudinale delle barre durante piene di una certa entità, i secondi invece rappresentano la parte terminale di un canale non più attivo, alimentato solo durante le piene con acqua stagnante per portate medio-basse. La larghezza dei canali secondari è piuttosto variabile ma mai superiore a quella del canale principale (Picco, 2010). Per quanto riguarda le barre laterali, esse presentano una granulometria eterogenea, dalla ghiaia alla sabbia e tendono a migrare in modo più simile a quello delle barre dei canali rettilinei; inoltre, alla loro migrazione sono spesso associati fenomeni di erosione spondale.

La caratteristica principale di questi corsi d'acqua è, però, la variazione della sinuosità al variare della portata; essi, infatti, sono capaci di trasformarsi in fiumi rettilinei anche con piene non eccezionali, purché l'altezza dell'acqua sia tale da sommergere buona parte delle barre laterali. Tutto ciò in considerazione del fatto che i sistemi pseudomeandriiformi possiedono sponde con andamento pressoché parallelo e rettilineo. È, invece, durante le fasi di morbida che il sistema fluviale acquista il suo andamento sinuoso, scorrendo tra le barre alternate. La sinuosità dei fiumi pseudomeandriiformi può quindi variare, a seconda della portata, da valori superiori a 1,5, propri dei sistemi meandriiformi, a valori molto prossimi ad 1, tipici dei sistemi fluviali rettilinei o a canali

multipli intrecciati. È questo dunque l'aspetto peculiare che li caratterizza e che ha indotto a considerarli come una configurazione morfologica a sé stante (Billi, 1994).

Da un punto di vista idraulico e morfologico, i fiumi pseudomeandriiformi presentano una configurazione instabile e indefinita, al punto da poter evolvere in fiumi meandriiformi o a canali intrecciati (Picco, 2010). In effetti, questi sistemi sono ritenuti un'evoluzione di quelli *braided* derivante dalle influenze antropiche, sono di fatto molto comuni in Italia e in particolare nelle zone montane.

Corsi d'acqua meandriiformi

I corsi d'acqua meandriiformi (*meandering*) scorrono in valli a ridotta pendenza, anche inferiore allo 0,1%, e rappresentano la categoria fluviale maggiormente studiata proprio per la loro presenza nei territori da più tempo antropizzati. Essi si contraddistinguono per l'aver un tracciato planimetrico caratterizzato da anse curvilinee, chiamate meandri, che si susseguono nello spazio in modo ripetitivo ed uniforme (Fig. 1.10). Questi elementi conferiscono al sistema fluviale forti valori di sinuosità, variabili tra 1,5 e 3 e che, a differenza dei sistemi pseudomeandriiformi, non risentono delle variazioni del livello idrometrico della corrente. Dal punto di vista granulometrico, la bassa pendenza fa sì che i sedimenti siano per lo più fini e rientrano, in genere, nel campo delle sabbie.



Figura 1.10: sistema fluviale meandriiforme, Big Nemaha River, Nebraska USA

Per quanto riguarda il meccanismo di formazione dei meandri ci sono tuttora diverse ipotesi, le più attendibili riguardano l'instabilità del flusso lineare e l'instabilità dell'alveo che porterebbe alla formazione di perturbazioni come barre e isole all'interno

dello stesso. Ad ogni modo, la condizione essenziale per la formazione delle anse è la presenza di una discreta erodibilità delle sponde.

I meandri sono delimitati, al loro interno, dalle cosiddette barre di meandro, corpi sedimentari semiconici che si formano in seguito a fenomeni di deposizione di sedimenti, con una base a forma di mezzaluna e leggermente inclinate verso la sponda esterna. Le anse curvilinee non sono stabili nel tempo e nello spazio, ma sono soggette ad una migrazione sia trasversale che longitudinale, rispetto all'asse della valle, dovuta alla concomitante azione di erosione della sponda esterna e sedimentazione in quella interna durante gli eventi di piena. Questa migrazione dei meandri e delle rispettive barre porta ad un aumento della sinuosità che può determinare il cosiddetto taglio di collo del meandro, ovvero quando il sottile istmo separante le due sponde esterne di due meandri contigui cede durante una piena. Le due anse tendono ad avvicinarsi fino a chiudere ad anello il meandro tra di esse frapposto, la pozza che si viene così a formare è progressivamente riempito dai sedimenti fini trasportati dalle acque di esondazione fino ad essere inglobato nella pianura alluvionale adiacente.

Un altro fenomeno responsabile del cambiamento di forma e molto frequente nei fiumi meandriformi è l'avulsione, ovvero l'abbandono di un precedente percorso in seguito ad erosione spondale durante un evento di piena, con la formazione di un nuovo alveo all'interno della pianura alluvionale. In Figura 1.11 sono schematizzati i tre principali processi di cambiamento del percorso del fiume; il taglio della barra di meandro avviene con un processo simile a quello descritto per i canali di taglio dei sistemi pseudomeandriformi.

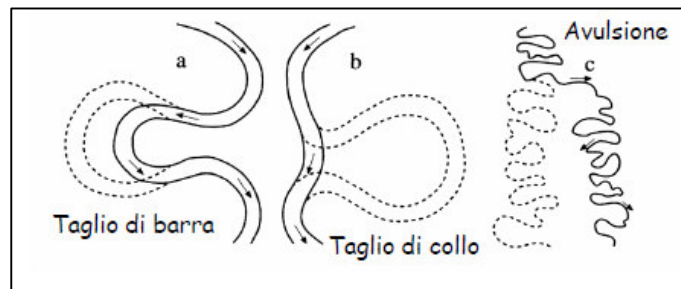


Figura 1.11: processi di cambiamento di forma fiumi meandriformi (da Lenzi, 2010)

Corsi d'acqua anastomizzati

I corsi d'acqua anastomizzati (*anastomosing river channels*) sono fiumi pluricursali formati da due o più canali relativamente stabili e con andamento meandriforme. I

canali, interconnessi tra loro, sono separati da porzioni di piana alluvionale e mostrano una sinuosità piuttosto variabile.

Questi fiumi scorrono in zone a bassa pendenza ($< 0,1\%$) e sono caratterizzati da una ridotta variabilità delle portate, scarso trasporto solido in sospensione e assenza di trasporto solido al fondo. Inoltre, le dinamiche evolutive sono molto lente a causa dell'elevata coesione delle sponde che aumentano la stabilità dell'alveo. Questa categoria morfologica è piuttosto rara e questo è da ricondurre alla difficoltà con cui si verifica, in natura, la concomitanza di situazioni e di fattori geomorfologici, tettonici e climatici responsabili della formazione di tali morfologie fluviali.

1.4 Le variazioni morfologiche fluviali

Come già presentato nei paragrafi precedenti, un sistema fluviale è sottoposto a variazioni morfologiche delle sue forme causate dai processi di modellamento fluviale. Questi processi possono essere distinti in tre tipologie: erosione, trasporto, deposizione e si verificano in zone precise del bacino idrografico. Secondo Schumm (1977), il territorio idrografico può essere suddiviso in tre zone in relazione ai fenomeni evolutivi preponderanti. Nella parte di monte è possibile individuare una zona di produzione di sedimenti in cui prevalgono i processi erosivi, nella parte mediana una zona di trasporto dei sedimenti precedentemente erosi e infine una zona di deposito nella porzione terminale del bacino idrografico dove prevalgono i processi di sedimentazione del materiale trasportato (Fig. 1.12).

Questi processi sono responsabili delle modifiche dell'alveo e della planimetria del corso d'acqua andando ad influenzare tutto ciò che riguarda l'ambiente fluviale compresa la vegetazione.

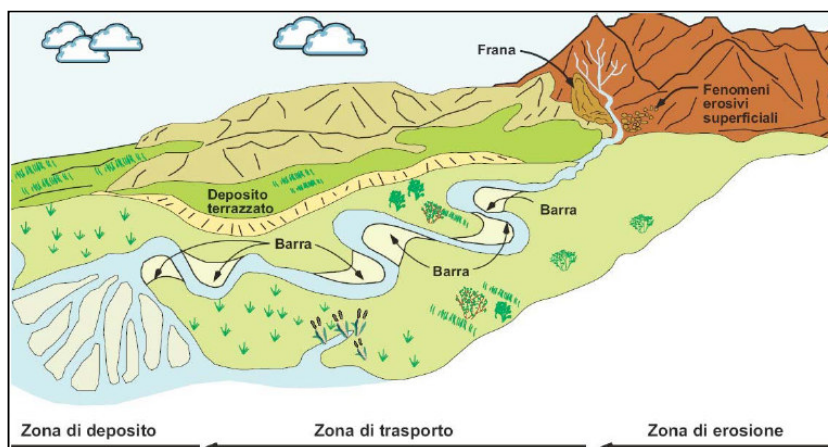


Figura 1.12: processi di modellamento fluviale a scala di bacino (da Autorità di Bacino del Fiume Po, 2008, modificato da Kondolf, 1994)

I corsi d'acqua dunque possono esser visti come dei mezzi di mobilitazione (Panizza, 1992) in cui grandi quantità di materiali vengono periodicamente movimentati dalla corrente e trasportati verso valle.

L'entità dei processi di modellamento varia però in relazione alle fluttuazioni delle portate liquide e solide che caratterizzano il fiume, al punto che il loro studio deve essere condotto tenendo in considerazione sia gli aspetti idrologici, responsabili della portata liquida, che i meccanismi di mobilitazione dei sedimenti che vanno ad alimentare la componente solida. Per quanto riguarda i meccanismi di mobilitazione dei materiali detritici, quindi l'attivazione della portata solida, essi dipendono strettamente dalla velocità e dal contenuto energetico della corrente che sono estremamente variabili da sezione a sezione all'interno del corso d'acqua (Marchetti, 2000). Portata, attrito, pendenza, forma e dimensione dei canali sono i principali elementi che influenzano velocità ed energia della corrente.

In aggiunta a ciò, altri due fattori chiave nel determinare l'alternarsi dei processi di erosione e sedimentazione sono la disponibilità di materiale in alveo mobilizzabile (*sediment supply*) e la capacità di trasporto della corrente liquida (*transport capacity*), definita come la massima quantità di detrito che un corso d'acqua può trasportare sul fondo data una certa energia disponibile. Essa dipende dalla portata del corso d'acqua, dalla sua velocità e infine dalla granulometria del materiale (Lenzi, 2009). È chiaro dunque che all'interno di un collettore fluviale la capacità di trasporto della corrente può variare da punto a punto generando, così, zone a prevalente erosione e zone a prevalente deposizione.

Alla disponibilità di sedimenti in alveo come elemento innescante i processi di modellamento fluviale, si aggiungono anche le dimensioni stesse dei materiali detritici. A tal proposito, il diagramma di Hjulström (1935) (Fig. 1.13) illustra dal punto di vista teorico le azioni di erosione, trasporto e sedimentazione che avvengono considerando la velocità della corrente (ordinate) e la dimensione dei clasti (ascisse). Sulla base di queste due variabili, il grafico delimita tre aree in ognuna delle quali predomina uno dei tre processi di modellamento fluviale. Il diagramma mostra come, per ogni elemento detritico, esista una velocità critica di erosione che, se superata, permette la mobilitazione dell'elemento stesso; allo stesso modo esiste una velocità critica di sedimentazione al di sotto della quale il flusso non è più in grado di mantenere in carico l'elemento ed è quindi costretto a depositarlo (Marchetti, 2000).

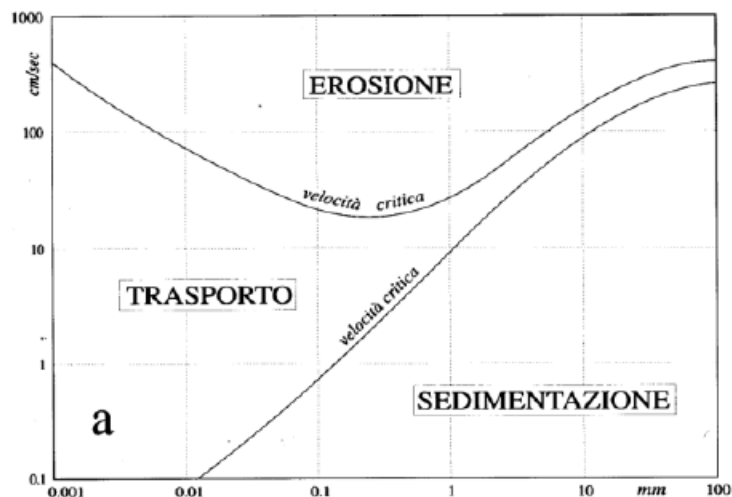


Figura 1.13: diagramma di Hjulström

Prima di descrivere singolarmente i processi di modellamento, è opportuno introdurre il concetto di equilibrio fluviale. Secondo Lenzi (2010), un tratto fluviale è considerato in equilibrio quando mantiene invariata la sua forma e le sue dimensioni caratteristiche, al contrario è definito instabile quando esso varia significativamente le sue dimensioni o la sua forma. La condizione di equilibrio per un fiume si verifica quando l'apporto di sedimento eguaglia la capacità di trasporto del fiume stesso; nel momento in cui uno di questi due fattori prevale sull'altro si avranno processi erosivi o deposizionali. Più precisamente, qualora l'apporto di sedimenti da monte supera la capacità di trasporto si ha aggradazione con formazione di barre; in condizione contraria si ha invece degradazione con erosione del fondo e successivi incisioni e restringimenti del letto fluviale.

1.4.1 Erosione fluviale

Analizzando separatamente questi processi, con il termine erosione fluviale si indicano i fenomeni di disgregazione di sedimenti e la successiva movimentazione del materiale detritico dovuti alle interazioni tra l'acqua, che fluisce in alveo, e le superfici con cui essa viene a contatto. I sedimenti erosi possono derivare dalla disgregazione diretta di roccia affiorante, o indirettamente dall'erosione di suoli, di depositi superficiali sui versanti e dei depositi alluvionali stessi (Castiglioni, 1986).

L'erosione fluviale può manifestarsi sia lateralmente che verticalmente, dando luogo rispettivamente ad erosione spondale e ad incisione del letto. I processi di erosione delle sponde fluviali sono quelli che determinano la mobilità planimetrica laterale del corso d'acqua e sono processi chiave per l'evoluzione morfologica dell'alveo, della piana

inondabile e degli habitat ripariali ad essi associati. L'arretramento delle sponde può avvenire attraverso la combinazione di una larga varietà di processi legati, oltre all'erosione stessa, ai movimenti di massa e alla degradazione meteorica che può comportare un progressivo indebolimento della sponda stessa (Thorne, 1982; Rinaldi & Dapporto, 2005). L'instabilità laterale ed i tassi di arretramento sono estremamente variabili sia nello spazio, da fiume a fiume e da monte a valle all'interno dello stesso sistema fluviale, che nel tempo rendendo così difficile ogni forma di previsione. Tuttavia, ci sono alcuni fattori che più di altri influenzano l'instabilità laterale del corso d'acqua come la composizione delle particelle costituenti la sponda, i tipi e la struttura della vegetazione presente e la presenza di forme deposizionali, per lo più barre, che possono forzare la corrente ad agire in particolari punti (Rinaldi & Darby, 2008; Rinaldi *et al.*, 2004; Luppi *et al.*, 2009).

Per quanto riguarda l'azione erosiva in profondità essa determina una variazione altimetrica del fondo detta incisione (*degradation*); questo abbassamento della quota, che può interessare tratti anche piuttosto lunghi, tende a regolarizzare le pendenze dei corsi d'acqua (Castiglioni, 1986).

1.4.2 Trasporto fluviale

Il trasporto fluviale, detto anche trasporto solido, costituisce il processo intermedio tra la mobilitazione dei sedimenti a monte e la loro deposizione a valle. Una corrente idrica può trasportare verso valle materiale solido in diversi modi a seconda delle caratteristiche del materiale stesso e delle caratteristiche energetiche della corrente. Ovviamente, più alta è la velocità del flusso e maggiore è la sua capacità di mobilitare sedimenti di più grandi dimensioni.

Relativamente alle tipologie di trasporto solido, esse possono essere distinte in quattro forme (Lenzi, 2010):

- per fluitazione (*floating debris*): riguarda materiale più leggero dell'acqua, tipicamente detriti vegetali, ed in particolare legname, che viaggiano vicino alla superficie della corrente. Questa forma è anche detta trasporto per galleggiamento;
- in soluzione (*dissolved load*): questa tipologia non è regolata dalla velocità della corrente ma è condizionata dalla litologia del bacino. Il materiale trasportato è costituito da ioni derivanti dalla dissoluzione di rocce solubili come i calcari e i gessi. Ad influenzare tale tipologia di mobilitazione concorrono, oltre alla

composizione delle rocce, anche le caratteristiche chimico-fisiche del fluido e le condizioni ambientali circostanti il canale (Marchetti, 2000);

- in sospensione (*suspended load*): detto anche trasporto torbido, consiste nel materiale dalle granulometrie fini presente in tutto il volume della corrente. Questo trasporto è determinato dal grado di turbolenza della corrente e le particelle, solitamente fini come argille e sabbie, viaggiano seguendo percorsi vorticosi associati appunto alle strutture turbolente presenti lungo tutto il profilo verticale della corrente;
- al fondo (*bedload*): è determinato principalmente dallo sforzo tangenziale esercitato dalla corrente sul contorno, che è funzione del gradiente di velocità in prossimità di esso. Il materiale movimentato è costituito da clasti grossolani, quali ghiaia, ciottoli e massi, che si muovono per rotolamento, strisciamento e saltazione in prossimità del fondo. Questo tipo di trasporto è uno dei più importanti da valutare per gli effetti che può provocare a livello di ambiente fluviale. La valutazione quantitativa del trasporto solido di fondo è infatti fondamentale per diversi aspetti: dalla progettazione di interventi di sistemazione idraulica alla valutazione dell'erosione in un tratto d'alveo, dalla previsione della forma di trasporto solido alla definizione e perimetrazione delle zone a rischio con conseguente mappatura del pericolo.

La soglia che discrimina queste ultime due tipologie di trasporto non è definita in modo univoco, in quanto anche nel trasporto al fondo per saltazione le particelle possono distaccarsi dal fondo dell'alveo per una certa altezza e seguire un breve percorso totalmente sospeso nella corrente. La differenza può essere ricondotta all'ordine di grandezza di questi percorsi: nel moto per saltazione il tragitto e l'altezza sono brevi, al contrario nel moto in sospensione le particelle vengono sollevate ad altezze dell'ordine del tirante idrico e percorrono distanze significative (Lenzi, 2010).

1.4.3 Deposizione

La deposizione dei sedimenti trasportati dalla corrente è un processo che si verifica quando le condizioni energetiche del flusso sono insufficienti a mantenere il trasporto, dando così luogo alla sedimentazione del materiale. Un classico elemento che può determinare una riduzione dell'energia della corrente è il cambiamento della pendenza;

in questi punti il flusso, perdendo energia, tende a depositare il materiale detritico e a dare vita a corpi sedimentari quali, ad esempio, le barre.

I depositi che si vengono a formare possono presentare una granulometria più o meno eterogenea e tendente alla stratificazione, vengono infatti depositati per primi i clasti più grossolani e pesanti e successivamente le particelle più fini. Va inoltre sottolineato che la fase più intensa della sedimentazione si ha quando la piena decresce; il tempo di esaurimento della piena, che dipende a sua volta dalle caratteristiche morfometriche del bacino e dal tipo di alimentazione liquida, è un fattore essenziale nel determinare la selezione granulometrica: più la piena decresce velocemente e maggiore è l'eterogeneità dei depositi (Panizza, 2005).

2 Le isole fluviali

Come accennato nel capitolo precedente, le isole fluviali sono aree vegetate presenti all'interno dell'alveo fluviale e sono separate dalla piana alluvionale da canali, attivi o di morta, o da ghiaie esposte, presentano una certa stabilità e rimangono esposte durante le piene al *bankfull* (Ward *et al.*, 1999; Osterkamp, 1998). Sono elementi fluviali di notevole importanza sia dal punto di vista idraulico che biotico in quanto hanno la capacità di migliorare considerevolmente la biodiversità acquatica ripariale grazie al loro perimetro caratterizzato da un mosaico di habitat aventi caratteristiche strutturali e geomorfologiche diverse (Gurnell *et al.*, 2001).

Esse tendono a formarsi preferenzialmente in aree con processi fluviali dinamici (Stanford *et al.*, 1996) ed hanno una permanenza limitata nel tempo, la loro stabilità viene infatti valutata su scale temporali di breve e medio periodo. Relativamente al concetto di stabilità fluviale, seppur non esista in letteratura una definizione precisa, si definiscono isole stabili quelle capaci di rimanere in loco anche dopo il passaggio di piene piuttosto significative (Wyrick, 2005). A tal proposito, un valido aiuto può essere fornito dall'analisi della vegetazione presente sull'isola, considerata un buon indicatore di stabilità (Kollmann *et al.*, 1999).

2.1 Importanza idrologica e biotica delle isole fluviali

Descritte da Ward *et al.* (1999) come elementi chiave per il funzionamento ottimale dell'ecosistema, le isole fluviali rivestono una elevata importanza tanto da poter essere considerate degli indicatori dello stato generale di salute e naturalità dell'ecosistema (Beechie *et al.*, 2006). Esse rappresentano infatti lo stato più naturale di un sistema fluviale e risentono molto delle interferenze umane. Gurnell & Petts (2002) hanno dimostrato che una volta, prima del 1900, la maggior parte dei fiumi europei erano ricchi di isole ma il pesante aumento delle attività antropiche ha determinato una progressiva diminuzione del loro numero tanto da eliminarle in molti tratti fluviali. Esse rimangono dunque una caratteristica comune dei paesaggi fluviali solamente in spazi lontani dalle zone agricole e urbane (Ward *et al.*, 1999).

Le isole, suddividendo il fiume in almeno due canali, creano condizioni idrauliche ed ecologiche variabili a causa dei diversi valori di larghezza, profondità e pendenza che i canali assumono (Thorp, 1992). La tipologia di isole presenti in un sistema fluviale può dunque aiutare a descrivere bene i processi che caratterizzano il sistema stesso.

L'importanza biotica di queste componenti fluviali si esplica sin da quando esse si separano dalla piana, in quanto offrono riparo e protezione per la fauna selvatica nei confronti dei loro predatori. Inoltre, le condizioni di flusso che si instaurano vicino all'isola, come la larghezza

del fiume, la profondità e la velocità della corrente, riducono la predazione e aumentano la produttività delle specie (Wyrick, 2005). Per di più, sulla base di studi eseguiti in tratti del fiume Tagliamento, è stato dimostrato come la presenza delle isole abbia la potenzialità di aumentare la complessità (Arscott *et al.*, 2000) e la stabilità (Van der Nat *et al.*, 2003) degli habitat acquatici rispetto ai tratti fluviali privi di isole.

A tal proposito, particolare attenzione deve esser posta nei confronti delle attività di *river management* che possono dar luogo a riduzioni nella superficie delle isole e produrre effetti negativi per le specie migratorie.

2.2 Formazione delle isole fluviali

Lo sviluppo delle isole è stato inizialmente discusso nella prima classificazione delle forme fluviali di Leopold *et al.* (1964) considerando solamente due processi: l'evoluzione di barre relativamente stabili attraverso l'insediamento della vegetazione e il distacco di porzioni di piana alluvionale per mezzo di avulsioni o tagli di meandro. Nel 1976, Kellerhals *et al.* hanno elaborato una classificazione delle isole sulla base della loro frequenza all'interno dell'alveo e del grado di sovrapposizione tra esse. Altri studi relativi alla formazione delle isole sono stati condotti da Tooth & Nanson (2000) nel fiume australiano Marshall River e da Gurnell *et al.* (2001) nel Fiume Tagliamento. Quest'ultimo in particolare, ha proposto un modello concettuale per la formazione delle isole che oltre a comprendere i due metodi classici sopracitati enfatizza il ruolo della vegetazione ripariale e dei detriti legnosi.

Un'analisi di maggior dettaglio è stata eseguita da Osterkamp (1998) considerando tutti i processi coinvolti nella formazione delle isole e proponendo almeno otto tipologie di isole fluviali sulla base del loro processo di formazione.

Vengono di seguito descritti i principali processi ritenuti responsabili della formazione delle isole.

Avulsione

Il termine avulsione indica il fenomeno per cui, durante piene intense, il fiume può abbandonare il suo tracciato e proseguire su un nuovo percorso all'interno della piana alluvionale portando alla dissezione di una parte di essa e alla conseguente creazione di una nuova isola fluviale (Fig. 2.1)

Il verificarsi di fenomeni avulsivi è legato, oltre all'erosione spondale, anche alla presenza di ostacoli quali detriti fluviali e alberi sradicati. Esempi di isole formatesi per

la presenza in alveo di tronchi legnosi sono documentate nel Morice River, British Columbia (Gottesfeld, 1990) e nel Little River, Virginia.

In quest'ultimo caso, il ruolo dei tronchi in alveo è stato cruciale per la formazione dell'isola in quanto durante i periodi di morbida essi fungevano da trappola per il materiale grossolano favorendone la sua deposizione fino a raggiungere una elevazione della superficie di 1,5 metri superiore rispetto alla piana adiacente. Il verificarsi di una piena più intensa ha causato poi l'avulsione del flusso e successiva formazione di una nuova isola (Kochel *et al.*, 1987).

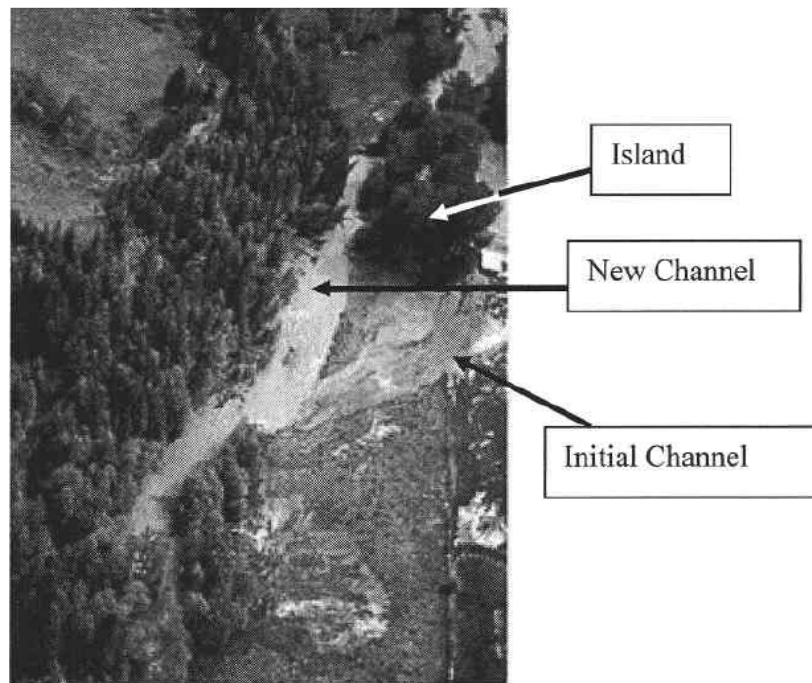


Figura 2.1: esempio di isola formata per avulsione, Chase Creek in British Columbia, Canada. Giugno 1997. (Ministero per la protezione dell'acqua, suolo e aria, British Columbia) (da Wyrick, 2005)

Degradazione dei canali

Le isole appartenenti a questa tipologia rappresentano solitamente il risultato di processi che causano una graduale degradazione dei canali fluviali. Classici fenomeni sono il trasporto costante di sedimenti alluvionali, l'erosione della piana e il cedimento delle sponde. Sono isole dalla forma prevalentemente triangolare e formate da materiale grossolano proveniente dagli affluenti secondari a maggiore energia; i sedimenti, una volta consegnati al canale principale tendono alla deposizione per effetto della minore energia del canale che non è quindi in grado di continuare il loro trasporto. La deposizione del materiale provoca, nel tempo, la creazione di isole fluviali.

Un esempio è dato dalle isole vicino Grand Junction in Colorado, la cui formazione è da imputare ai detriti glaciali mobilizzati dai deflussi delle Rocky Mountains (Osterkamp, 1998).

Spostamenti laterali dei canali

Le migrazioni laterali dei canali in fiumi pluricursali così come i tagli di meandro in fiumi meandriiformi possono dar luogo alla nascita di isole fluviali.

Ne sono testimonianza le innumerevoli isole lungo il fiume Mississippi a valle di Memphis, Tennessee, specialmente nei pressi della confluenza con i fiumi White e Arkansas (Osterkamp, 1998).

Stabilizzazione di barre o raschi

Queste isole sono tipiche di fiumi aventi un trasporto di fondo elevato e costante e si formano per processi di aggradazione e cernita dei sedimenti grossolani o per la redistribuzione dei sedimenti più fini, quali ghiaia e sabbia. La permanenza di condizioni di magra permette poi alla vegetazione ripariale di iniziare il processo di colonizzazione delle superfici deposizionali. A tal riguardo, gli studi di Hooke (1986) su fiumi inglesi hanno sottolineato come sia necessario un periodo di tempo variabile tra uno e tre anni affinché la vegetazione sia in grado di colonizzare e stabilizzare sufficientemente le barre esposte.

Alcuni esempi sono rappresentati dalle isole di aggradazione lungo il Platte River formatesi in seguito ad un lungo periodo di riduzione dei picchi di piena (Eschner *et al.*, 1983) e le isole nel Gila River, Colorado (Burkham, 1972).

Structural features

Sono isole che si formano quasi esclusivamente in canali non alluviali, spesso rocciosi, con geologia carsica, glaciale o vulcanica. Tendono a formarsi per l'azione erosiva del fiume a carico di vie preferenziali, solitamente dettate dalla presenza di fratture rocciose. Esempi includono la Goat Island che separa le Niagara Falls dalle American Falls (Tessmer, 1991) e le isole nel Potomac River a monte delle Great Falls, Virginia.

Incisione dei depositi durante la recessione delle piene

Sono isole che si formano per la rapida mobilitazione di sedimenti durante piene intense così come per movimenti di massa o per una generale instabilità dell'ambiente fluviale. Il verificarsi di un evento significativo può comportare, in condizioni di disponibilità di sedimenti, la loro mobilitazione e, successivamente, durante la recessione della piena, la deposizione di questi. La repentina diminuzione della portata liquida amplifica il fenomeno della sedimentazione e come risultato si avrà l'isolamento della sommità degli accumuli che potrebbero costituire i punti di partenza per la formazione di nuove isole fluviali.

La principale differenza tra questo tipo di isole e quelle che si formano per avulsione consiste nel fatto che queste sono formate dall'erosione dei sedimenti depositati recentemente dalle piene, mentre quelle per avulsione sono costituite dal materiale depositato nella piana in tempi passati.

Queste isole sono caratteristiche di torrenti soggetti ad alterazioni anche nel breve periodo, come quelli del Plum Creek vicino Denver, modificati fortemente dalla piena del 1965 (Friedman *et al.*, 1996).

Processi di deposizione

Le isole fluviali che si formano in seguito a processi di deposizione sono tipiche di fiumi ampi e con morfologia a canali intrecciati caratterizzati da un trasporto costante di sedimenti, soprattutto di fondo.

La presenza di ostruzioni del canale o altri ostacoli, soprattutto tronchi atterrati, determinano a valle la formazione di zone poco profonde e dalla ridotta velocità della corrente che, con la deposizione dei sedimenti, possono velocemente evolvere in isole vegetate. L'interazione tra il materiale in alveo, specialmente detriti legnosi, e un ostacolo costituisce il punto essenziale per la formazione e il mantenimento di isole all'interno dei canali, come documentato nei torrenti montani della regione nord-americana del Pacific Northwest (Grant *et al.*, 2001; Ward *et al.*, 2002).

Movimenti di massa

I movimenti di massa, come frane, caduta massi e cedimenti spondali, possono essere la causa della formazione di isole fluviali. La loro presenza è stata documentata per lo più in zone pianeggianti alterate da questi movimenti. Lo sviluppo dell'isola avviene per l'incapacità della corrente di erodere e trasportare a valle il materiale movimentato

perché troppo grossolano o coeso, esso tende dunque a depositarsi e ad essere aggirato dal flusso.

Creazione di bacini idrici artificiali

Un altro fenomeno che può determinare lo sviluppo di isole fluviali è la realizzazione di dighe, sia per effetto naturale che artificiale. Nel bacino d'acqua che si crea a monte dello sbarramento può formarsi un'isola qualora l'innalzamento del livello dell'acqua sia sufficientemente alto da isolare le superfici topograficamente più elevate.

Data la drastica riduzione della capacità erosiva del fiume all'interno dell'invaso, questo tipo di isole sono piuttosto stabili nel tempo e la loro eliminazione è subordinata alla rimozione della diga o ad un abbassamento del livello idrico.

2.3 Classificazione delle isole fluviali

In letteratura, la prima classificazione delle morfologie fluviali comprensiva anche delle isole è quella proposta da Kellerhals *et al.* (1976), una codificazione basata sulla sovrapposizione tra un'isola e l'altra tenendo conto, dunque, della distanza tra esse (Fig. 2.2). Sulla base di questo criterio le isole possono essere distinte in:

- Occasionali: assenza di sovrapposizione con una spaziatura media maggiore di 10 volte la larghezza dell'alveo
- Frequenti: rara sovrapposizione con una spaziatura media inferiore a dieci volte la larghezza dell'alveo
- *Split*: sovrapposizione frequente o continua tra le isole con la formazione di due - tre canali di flusso
- Intrecciate: marcata vicinanza tra le isole al punto da formare canali intrecciati suddivisi da isole e barre

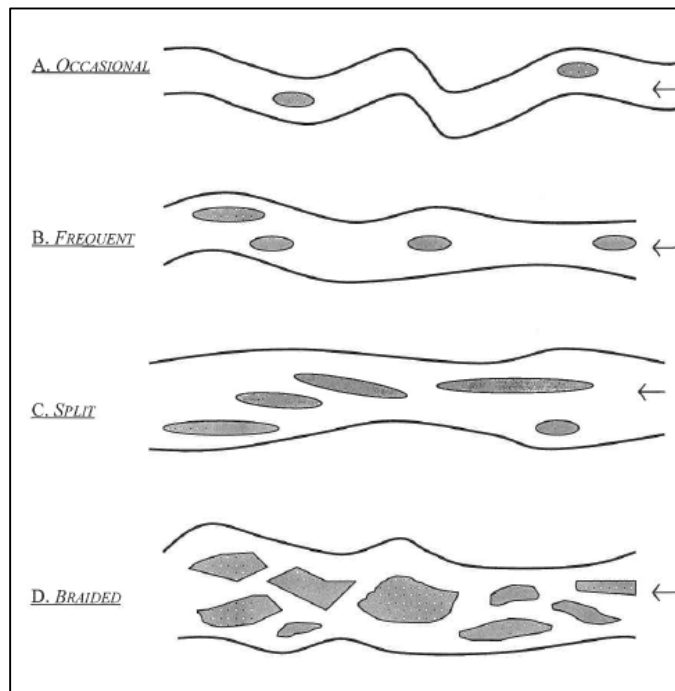


Figura 2.2: codificazione delle isole fluviali in relazione alla loro prossimità ad altre isole (modificata da Kellerhals et al., 1976)

Un'altra classificazione delle isole fluviali è stata proposta da Wyrick (2005) utilizzando come riferimento lo schema adottato da Rosgen (1994, 1996) nella sua classificazione dei sistemi fluviali.

Nello sviluppare lo schema di classificazione, Wyrick si è basato sulle caratteristiche distintive delle isole suddividendole in tre categorie in relazione alla modalità con cui vengono recepite. La prima categoria raggruppa le informazioni che possono essere misurate a partire da mappe topografiche e foto aeree, come la forma, la densità di isole nell'intero sistema fluviale e la posizione dell'isola rispetto al *thalweg*, dalla quale possono essere dedotti i processi di formazione dell'isola stessa.

Per quanto riguarda le forme delle isole, esse sono molto variabili e risentono, oltre che dell'età dell'isola, anche dei processi di formazione. Ad esempio, le isole che si sono formate in seguito a movimenti di massa o spostamenti laterali dei canali tendono ad essere più irregolari rispetto alle isole che formatesi per stabilizzazione di barre o per deposizione hanno invece una forma più aerodinamica.

In Figura 2.3 sono riportate le forme più comuni delle isole, suddivise, secondo Wyrick (2005), in tre principali categorie: aerodinamiche, angolari e irregolari.

Un altro dato che può essere ricavato dalle foto aeree è la larghezza relativa dell'isola, intesa come rapporto tra la larghezza massima dell'isola e la larghezza complessiva dei due canali

lateralali. A tal riguardo, si possono distinguere isole ampie, con un rapporto maggiore di 0,5, intermedie con rapporto compreso tra 0,5 e 1,5 e isole strette aventi valori inferiori a 0,5.








| CATEGORIA | FORMA | |
|---------------------|---|--|
| <i>Aerodinamica</i> | <i>Lemniscata (a monte o a valle)</i> |  |
| | <i>Ellittica</i> |  |
| | <i>Lenticolare</i> |  |
| | <i>Semicircolare o emisferica</i> |  |
| <i>Angolare</i> | <i>Triangolare</i> |  |
| | <i>Romboidale</i> |  |
| <i>Irregolare</i> | |  |

Figura 2.3: principali forme delle isole fluviali (da Wyrick, 2005)

La seconda categoria di caratteristiche distintive delle isole comprende le informazioni che possono essere raccolte direttamente *in situ* attraverso analisi di campo, come la composizione dei sedimenti, la loro probabile origine e lo stato di evoluzione della vegetazione presente sull'isola.

La composizione dei sedimenti può essere prevalentemente classificata in: roccia, massi/ciottoli, ghiaia, sabbia/limo o materiale coesivo. L'origine dei sedimenti invece, può aiutare a dedurre il processo di formazione dell'isola, ad esempio se l'isola è composta da particelle diverse rispetto a quelle dei canali circostanti è più probabile che essa si sia formata per processi alloctoni, ovvero esterni all'ambiente fluviale, come ad esempio colate detritiche o crollo delle sponde. Se invece la tipologia e la distribuzione granulometrica dei sedimenti dell'isola è simile a quella del canale, si può dedurre che i processi responsabili della sua formazione siano interni al canale.

Per quanto riguarda la vegetazione, con particolare riferimento alla tipologia e alle dimensioni, essa può essere un valido supporto per determinare l'età dell'isola. Sulla base di questo indicatore le isole vengono solitamente distinte in pioniere, giovani e stabili. Analisi dendrocronologiche condotte in un tratto fluviale del fiume Piave hanno infatti rilevato come le isole pioniere siano caratterizzate da vegetazione con età variabile tra 3 e 5 anni, le giovani tra 5 e 15, le stabili invece superiore ai 15 anni (Picco *et al.*, 2012).

La terza categoria di informazioni caratterizzanti le isole raggruppa tutte quelle informazioni che si possono ricavare sulla base delle conoscenze di cui si dispone riguardo l'intero ambiente fluviale. Ne sono esempi i processi di formazione, l'età dell'isola, la sua probabile durata nel tempo, la tipologia e l'entità dei cambiamenti che si possono verificare e i fattori causanti tali modifiche. La frequenza con cui le isole possono subire variazioni, sia in termini di estensione che di forma, dipende essenzialmente dalla natura dei sedimenti e dai processi idrografici che caratterizzano il fiume.

La persistenza dell'isola, invece, si riferisce alla probabilità che essa rimanga tale anche nel futuro ed è strettamente correlata alla tipologia di vegetazione presente, alla composizione dei sedimenti e alle modifiche che possono interessare il sistema fluviale.

Lo scopo di questo sistema di classificazione è quello di collegare queste caratteristiche distintive con i processi di formazione delle isole fluviali proposti da Osterkamp (1998), descritti nel paragrafo 2.2. Wyrick (2005), infatti, suggerisce una matrice di questi collegamenti che ha come obiettivo finale la classificazione delle isole e altri tipi di determinazioni.

2.4 Processi di eliminazione delle isole fluviali

I processi responsabili della scomparsa delle isole sono stati documentati in modo dettagliato da Osterkamp (1998), il quale ha proposto diversi scenari con i quali le isole possono sparire dall'ambiente fluviale.

Un primo metodo è legato al riempimento preferenziale di uno dei canali laterali attraverso il deposito di sedimenti, questo comporta un innalzamento del livello del letto solamente in un canale con il conseguente spostamento del flusso in un singolo percorso. Un secondo metodo si esplica attraverso la sedimentazione di materiale detritico attorno all'intero perimetro dell'isola fino a che essa si fonde o con la piana alluvionale o eventualmente con altre isole vicine. L'ultimo metodo riguarda l'incisione preferenziale, ad opera del flusso, di uno dei canali laterali lasciando l'altro secco. Questa situazione è solita verificarsi a valle di sbarramenti, ostruzioni, dighe in seguito alla riduzione dei picchi di piena, ed è stata ben evidenziata anche

da studi compiuti da Thorp (1992) e Ligon *et al.* (1995) in complessi sistemi fluviali i cui deflussi sono regolati dalla presenza di dighe artificiali. L'attenuazione dei picchi di piena determina infatti condizioni di minore velocità che favoriscono sia la sedimentazione dei materiali trasportati dalla corrente che il successivo insediamento della vegetazione, facilitando così l'aggregazione dell'isola alla piana alluvionale (Shull, 1944).

In aggiunta a ciò, anche gli eventi di piena possono essere responsabili dell'eliminazione delle isole fluviali secondo due principali metodi. Il primo è con il semplice aumento della piena fino ad un livello sufficientemente alto da erodere l'intera isola; il secondo invece è dovuto al cambiamento improvviso della direzione principale del flusso durante la piena andando così a degradare lentamente l'isola per abrasione (Wyrick, 2005).

2.5 L'influenza delle dighe sulle isole fluviali

L'azione umana sui sistemi fluviali è nota sin dall'antichità e al giorno d'oggi quasi tutti i grandi fiumi risultano, seppur con gradi diversi, regolati dalle attività antropiche. Tra le opere idrauliche a maggior impatto rientrano senza dubbio gli sbarramenti artificiali, quali le dighe, la cui presenza può avere delle implicazioni sullo sviluppo e stabilità delle isole fluviali.

Le dighe infatti portano ad una riduzione dei picchi di piena, ad un aumento del flusso di base e ad un incremento dello stoccaggio di sedimenti per lo più a matrice grossolana. Il materiale detritico presente a valle di uno sbarramento è infatti una frazione soltanto del normale trasporto solido che caratterizzerebbe il fiume in assenza dell'ostacolo.

Alla diminuzione dei picchi di piena a valle della diga ne consegue l'eliminazione della maggior parte dei processi di erosione dei canali e di rifornimento di sedimenti, così come la riduzione dei depositi alluvionali. L'insieme di questi fenomeni si traduce in una successiva diminuzione della diversità degli habitat biologici e delle interazioni tra i processi biotici e idrologici (Wyrick, 2005).

D'altro canto però, la presenza di sbarramenti artificiali favorisce il rinforzo e la stabilizzazione delle sponde delle isole per la diminuzione dei sedimenti perché intercettati dalla diga. La riduzione del materiale proveniente da monte costringe il fiume a mobilitare il materiale costituente il suo stesso letto, determinando così una progressiva incisione dell'alveo e un aumento dell'altezza della sponda dell'isola. In questo modo l'isola fluviale si verrà a trovare ad una quota più prossima a quella della piana piuttosto che a quella dell'alveo, aumentandone la stabilità e l'azione erosiva, di conseguenza, si limiterà solo al contorno.

3 La vegetazione ripariale

La vegetazione ripariale è rappresentata da fitocenosi fluviali che si interpongono tra quelle acquatiche e quelle terrestre-zonali (Pedrotti & Gafta, 1996). Sono composte da specie che prediligono gli spazi umidi, difatti si insediano lungo il bordo di un corpo d'acqua con struttura tale da creare dei corridoi che, talvolta, possono estendersi dalle sorgenti alla foce. L'esatto confine dell'area ripariale è spesso difficile da determinare proprio perché si tratta di una zona di transizione tra il corpo d'acqua e l'area vegetata adiacente (Picco, 2010).

Dal punto di vista ecologico, l'area riparia è condizionata dalla presenza del fiume: la deposizione, la germinazione e la sopravvivenza della vegetazione nel letto fluviale sono influenzati dalla portata, dalla sedimentazione e dalla stagionalità delle piene (Johnson, 1997, 2000). A sua volta la vegetazione, interagendo con la veicolazione dell'acqua, può influenzare il regime di flusso in diversi modi, come, ad esempio, deviando la direzione del flusso o riducendone la velocità. Quest'ultimo è un aspetto cruciale per l'evoluzione dei popolamenti perifluviali in quanto la riduzione della velocità favorisce la deposizione dei sedimenti veicolati dalla corrente che, oltre a formare degli abbozzi di isole (Coulthard, 2005), determina le condizioni ideali per la crescita di vegetazione e un aumento nell'altezza delle isole garantendo così un maggiore grado di stabilità (Hicks *et al.*, 2008).

Proprio per questa loro complessità di formazione e mantenimento, i popolamenti forestali ripariali stanno assumendo, a livello di studio, sempre maggiore importanza nell'ambito della gestione delle zone di pertinenza fluviale.

3.1 Caratteristiche dei popolamenti vegetali ripariali

La vegetazione degli ambienti fluviali è costituita da specie ed habitat particolari, sottolineati anche all'interno della Rete Natura 2000, che si differenziano da quelli del territorio circostante proprio per la loro assoluta capacità di occupare questi spazi e renderli funzionali.

La flora che caratterizza questi ambienti comprende specie dotate di particolari adattamenti che consentono loro di insediarsi in questo ambiente caratterizzato da fattori edafici estremi: si tratta di specie tolleranti le inondazioni, i periodi di siccità e i frequenti fenomeni di disturbo (Karremberg *et al.*, 2002). A livello generale, la vegetazione riparia comprende specie arboree in grado di germinare su legname morto, specie pioniere capaci di attecchire su suoli nudi, idrofite in grado di colonizzare ambienti acquatici e permanentemente saturi, semi e talee resistenti all'inghiainamento e un gran numero di specie in grado di sopportare traumi meccanici

quali l'azione della corrente, il deposito di sedimenti, l'abrasione e la rottura dei fusti (Minciardi, 2010).

Data questa diversità strutturale, lo sviluppo della vegetazione nel corridoio fluviale porta alla formazione di un mosaico complesso in risposta alle variazioni dei fattori climatici, della frequenza e intensità delle inondazioni (umidità del terreno), nonché dei gradienti dei disturbi (Gregory *et al.*, 1991; Malanson, 1993; Decamps, 1996; Naiman e Decamps, 1997).

Nonostante la vegetazione riparia abbia subito numerose modificazioni rispetto allo stato naturale a causa delle attività umane di sfruttamento, è comunque possibile individuare una composizione e una struttura di questi popolamenti comune a gran parte delle zone fluviali (Fig. 3.1).

In condizioni naturali di sviluppo, i tratti superiori della maggior parte dei fiumi europei sono dominati dalla presenza di specie dei generi *Alnus* e *Salix*, (Pinay *et al.*, 1990; Statzner e Kohmann, 1995; Schnitzler, 1997), dove, invece, il fiume abbandona la zona montano-collinare e il corso si fa più ampio, aumenta la presenza dei salici e compaiono specie appartenenti al genere *Populus*. Dal punto di vista del grado d'inondazione, le aree interessate più frequentemente dal passaggio della corrente, quali ad esempio le isole fluviali, presentano formazioni miste di salici *spp.*, specie con maggiore capacità di resistenza al moto. Nelle zone meno affette dalle piene invece, dominano i generi *Quercus* e *Ulmus* (Ward *et al.*, 2002).

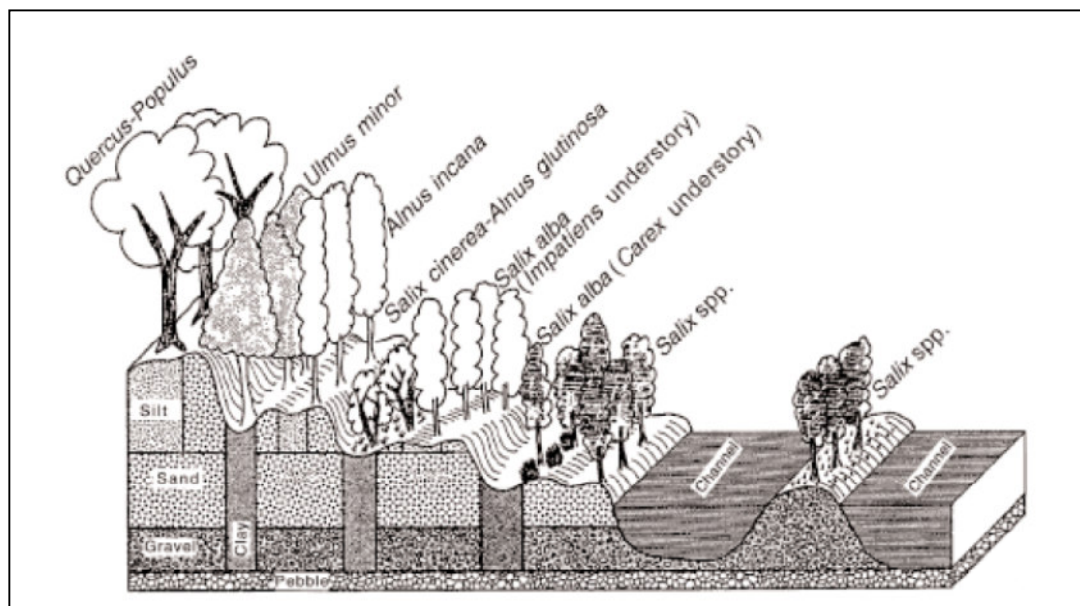


Figura 3.1: sezione trasversale raffigurante i diversi tipi di vegetazione (da Pautou, 1984)

3.2 Strategie di insediamento e funzioni della vegetazione riparia

La disponibilità e la persistenza di aree sufficientemente stabili per supportare lo sviluppo di una copertura arborea sono influenzate da fattori fisici sia a scala di bacino che di tratto, come l'intensità della corrente, le dimensioni dei sedimenti e le dinamiche di trasporto e deposizione. Tuttavia, a dettare le strategie per l'insediamento della vegetazione e il tasso al quale essa può crescere concorrono anche l'assenza di disturbi e la disponibilità di umidità (Gurnell *et al.*, 2001). Il regime idrologico del fiume, così come gli eventi di piena, giocano un ruolo significativo nello sviluppo della vegetazione riparia: le piene infatti, oltre a costituire l'input idrico per il bacino acquifero, forniscono anche il meccanismo con il quale i detriti vegetali vengono erosi, trasportati e depositati altrove all'interno dell'alveo attivo. Inoltre, il periodo tra due eventi di piena assicura il tempo per la redistribuzione dei frammenti di vegetazione e la loro deposizione attorno ad elementi di rugosità, in particolare presso gli accumuli di legno e le isole fluviali. Se però il tasso di insediamento è lento, è allora impossibile per la vegetazione svilupparsi in modo stabile e dare vita a nuove isole prima dell'avvento della nuova piena. Chiaramente molti altri fattori, compreso il punto di deposizione e l'apporto nutritivo, sono importanti nell'influenzare la potenzialità per le specie riparie di insediarsi con successo (Gurnell *et al.*, 2001).

Studi approfonditi su detriti legnosi e isole pioniere eseguiti in sottotratti fluviali del Tagliamento, hanno evidenziato due principali modalità con cui gli alberi ripariali possono insediarsi: tramite germinazione di semi o riproduzione vegetativa mediante talee (Gurnell *et al.*, 2001). In particolare, molte specie riparie germinano vigorosamente solo se la propaggine, sia fusto che ramo, viene depositata dove le condizioni ambientali sono favorevoli. A differenza di *Alnus incana*, specie quali *Populus nigra*, *Salix elaeagnos*, *Salix alba*, *Salix purpurea* e *Salix daphnoides* sono esempi di specie riparie che rigenerano liberamente in questo modo (Gurnell *et al.*, 2001). Tuttavia, la varietà floristica, legata alla permeabilità del substrato ed al regime idrologico, rimangono i fattori chiave nel governare l'insediamento e il successivo sviluppo della vegetazione ripariale all'interno delle zone fluviali attive.

La vegetazione degli ecosistemi fluviali è una componente ecosistemica a dinamicità multipla, al punto che nella zona riparia si svolgono alcuni dei processi principali che presiedono alla funzionalità del corso d'acqua e che garantiscono l'integrità del territorio circostante (Minciardi, 2010). La vegetazione ripariale può svolgere numerosi ruoli, attivi o passivi, nelle dinamiche fluviali ed è per questo che la gestione di queste formazioni richiede l'approfondimento delle conoscenze che ne regolano i meccanismi di evoluzione (Farioli, 2008). L'importanza di queste fitocenosi non si limita solamente all'ambiente di pertinenza

fluviale, bensì interessa una scala molto più ampia proprio per le interazioni con altri fattori esterni all'ambiente fluviale (Fig. 3.2).

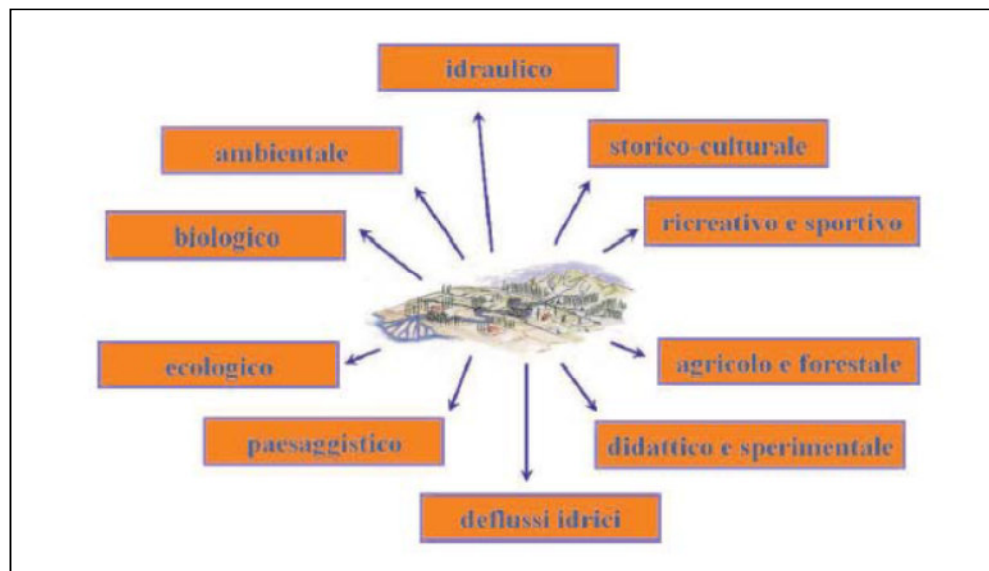


Figura 3.2: aspetti influenzati dalla vegetazione ripariale (da Farioli, 2008)

Una volta affermatasi, la vegetazione riparia può assolvere efficacemente ad una molteplicità di funzioni.

Tra le principali, Schweitzer (1995) riconosce:

- La protezione delle scarpate dall'erosione attraverso la stabilizzazione delle sponde ad opera delle radici di alberi e arbusti ripari.
- La creazione di un anello d'unione tra l'ambiente terrestre e quello acquatico, nonché la formazione di corridoi ecologici evitando così il completo isolamento con possibili fenomeni di *inbreeding* o deriva genetica.
- La formazione di una *buffer strip*, zona di filtro fra ambiente terrestre e collettore.
- Il miglioramento del microclima attraverso la copertura termica: la vegetazione ripariale protegge il fiume dalle temperature estreme, sia estive che invernali, evitando fenomeni di stress per la fauna acquatica. La copertura delle foglie e dei rami garantisce il mantenimento di temperature fresche in estate e moderate in inverno; inoltre, in acque fresche ed ombreggiate è presente una maggiore quantità di ossigeno disciolto favorendo i processi di respirazione della fauna ittica.
- L'aumento della capacità autodepurativa del corso d'acqua tramite la biofiltrazione degli agenti inquinanti, accrescendo in questo modo la qualità delle acque.

- L'aumento della biodiversità per la capacità di garantire habitat a fauna e flora selvatiche. In particolare, la vegetazione riparia fornisce cibo, siti di nidificazione e rifugio per animali selvatici; così come gli alberi sradicati che, cadendo in acqua, possono portare alla formazione di habitat idonei per la vita dei pesci (pozze o raschi). A scala di bacino, il contributo alla biodiversità dato dalla zona riparia è stato stimato essere, in taluni casi, anche del 50% (Minciardi, 2010).
- L'arricchimento dei microambienti acquatici e della varietà della fauna fluviale attraverso il supporto alla catena alimentare. La vegetazione riparia è infatti fonte indiretta di alimentazione per la fauna ittica attraverso la caduta di insetti presenti su foglie, rami, tronchi o altro materiale vegetale.
- Il controllo delle piene attraverso la dissipazione di energia. Questa funzione, oltre a prevenire l'erosione, garantisce allo stesso tempo la salvaguardia delle aree di deposizione delle uova della fauna ittica.
- La capacità di intrappolare sedimenti e facilitare i processi di germinazione di nuovi individui vegetali.
- L'incremento del valore paesaggistico-ricreazionale.

Alla luce di questi elementi appare sempre più evidente la necessità di passare da una gestione della vegetazione riparia di tipo "idraulico", cioè finalizzata esclusivamente alla mitigazione dell'interferenza causata dalla presenza di tale vegetazione, ad una gestione di tipo "integrato", in cui la vegetazione ripariale è concepita anche come elemento fondamentale dell'ecosistema fluviale, in grado di svolgere importanti e plurime funzioni, ottimizzabili tramite la sua gestione (Farioli, 2008).

4 Obiettivi

Il seguente studio si prefigge di analizzare la numerosità, le caratteristiche e le dinamiche delle isole fluviali in un fiume naturale a fondo ghiaioso.

Le isole fluviali, importanti per la biodiversità acquatica e ripariale, rappresentano una delle caratteristiche più naturali che si possono riscontrare all'interno di un sistema fluviale. A tale scopo è stato scelto, come area di studio, il fiume Tagliamento, da sempre considerato un sistema fluviale avente caratteristiche elevate di naturalezza. Per le analisi che ci si è prefissati di eseguire si sono, così, individuati due diversi tratti di studio caratterizzati da differente morfologia prevalente ma ugualmente poco antropizzati.

Le analisi si sono condotte attraverso l'utilizzazione di fotografie aeree di due annate successive, così da poter definire le dinamiche delle diverse tipologie di isole a seguito di diversi eventi di piena verificatisi nel periodo compreso tra i rilievi fotografici stessi.

In seguito, al fine di ottenere una panoramica generale sulle caratteristiche morfologiche e vegetazionali che contraddistinguono tali isole, ci si propone di eseguire una serie di analisi di tali caratteristiche attraverso l'impiego di modelli digitali generati a partire da rilievi LiDAR in nostro possesso.

Infine si è inteso analizzare il ruolo e l'impatto delle piene, anche non eccezionali, sulla dinamica delle diverse tipologie di isole e sulla loro capacità, o incapacità, di reazione e resistenza ai rimaneggiamenti imposti dal verificarsi delle piene stesse.

5 Inquadramento generale dell'area di studio

Il sistema idrografico superficiale del Friuli Venezia Giulia assume caratteristiche diverse a seconda delle peculiarità del territorio. Nella parte collinare e di pianura esso è orientato generalmente in direzione nord-sud e sfocia nel Mar Adriatico, mentre nel territorio montano tende a disporsi in direzione est-ovest a seguire le principali vallate che si estendono secondo tale direttrice.

Il carattere idrologico dei corsi d'acqua è estremamente diversificato, vi si trovano infatti corsi d'acqua a carattere prevalentemente torrentizio con portate di magra generalmente basse o nulle e portate di piena elevate, corsi d'acqua di risorgiva con portate stabili ed infine i corsi d'acqua principali che per un lungo tratto iniziale si comportano come torrenti e scorrendo verso la foce hanno portate sempre maggiori e si trasformano in fiumi con portata media significativa (protezione civile.fvg).

Il fiume Tagliamento è il principale corso d'acqua della regione Friuli Venezia Giulia; con una lunghezza dell'asta principale di 178 km e una superficie complessiva del bacino di 2871 km², esso viene considerato l'unico fiume dell'intero arco alpino ed uno dei pochi in Europa a preservare una morfologia naturale a canali intrecciati (Muller, 1995).

Nasce ad una altitudine di circa 1195 m s.l.m in prossimità del Passo della Mauria in Cadore e sfocia in territorio veneziano-friulano tra le località di Lignano Sabbiadoro e Bibione.

I principali centri abitati situati lungo il suo corso sono Latisana e San Michele al Tagliamento, Tolmezzo, Gemona del Friuli, San Daniele del Friuli, Ragogna, Osoppo, Forgaria nel Friuli, Spilimbergo, Casarsa della Delizia, Codroipo e San Vito al Tagliamento.

5.1 Caratteristiche morfologiche ed idrologiche del bacino del Tagliamento

Il bacino del Tagliamento ha la forma di un caratteristico imbuto, con un largo recipiente nella fascia montana, una strettoia nella fascia prealpina ed un lungo sinuoso canale in pianura (Martini, 2011). Esso è delimitato ad ovest dai bacini del Piave e del Livenza, a nord dalla catena delle Alpi Carniche e ad est dal bacino del torrente Torre. Il bacino può essere facilmente suddiviso in tre zone che possono idealmente individuare tre sottobacini: quello montano (1 in Fig. 5.1), quello intermedio (2 in Fig. 5.1) e quello di pianura (3 in Fig. 5.1).

Dal punto di vista morfologico il Tagliamento può essere considerato un fiume montano in quanto più del 70% del suo bacino ricade in area alpina – prealpina e la vetta più alta del bacino è data dai 2780 m s.l.m. del Monte Coglians. Per quanto riguarda l'andamento topografico della superficie, la pendenza media è di circa il 10% nella sezione a monte, lo 0,3%

nel tratto compreso tra la confluenza del Fella e quella del Cosa e lo 0,1% nella sezione terminale ad andamento meandriforme (Ward *et al.*, 1999).

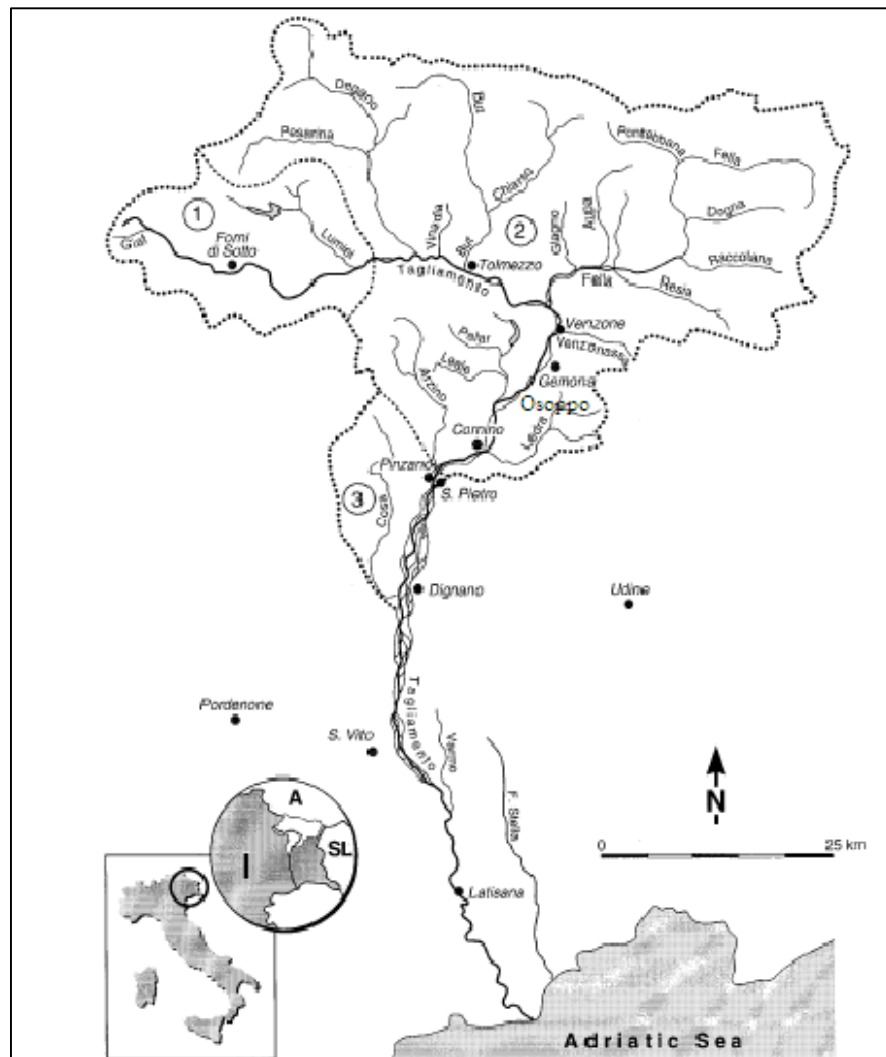


Figura 5.1: localizzazione bacino del Tagliamento, principali città, maggiori affluenti e distinzione dei tre sottobacini (1 – 3) (da Ward *et al.*, 1999)

Dopo aver iniziato il suo percorso in provincia di Belluno, il fiume prosegue in territorio friulano attraversando la Carnia. Il primo tratto montano, lungo circa 60 km, è orientato in direzione ovest-est e scorre sul fondo di un'ampia valle di origine glaciale parallelamente alla catena delle Alpi Carniche ed alle linee tettoniche presenti nella zona; tale direttrice viene mantenuta sino alla confluenza con il torrente Fella presso l'abitato di Stazione per la Carnia in comune di Venzone.

In questo tratto montano le caratteristiche morfologiche dell'alveo variano notevolmente, infatti sino a Forni di Sotto il fiume scorre in una valle molto incassata con forte pendenza, solamente in qualche breve tratto il letto si fa più ampio per allargarsi definitivamente solo dopo l'abitato di Socchieve. Da qui in poi il letto subisce un progressivo allargamento raggiungendo una larghezza media di 700 m e assumendo la tipica conformazione a canali intrecciati, che mantiene fino alla bassa pianura.

Lungo questo tratto, i principali affluenti di sinistra sono il Lumiei, il Degano ed il But (Fig. 5.2). In particolare il Lumiei, che si immette nel Tagliamento a 26 km dalla sorgente, segna il punto in cui la valle principale perde il caratteristico aspetto montano in quanto si allarga per contenere l'alveo del fiume che si suddivide in più rami.

Di notevole importanza è il fiume Fella, affluente di sinistra del Tagliamento e suo principale tributario in quanto ne determina quasi il raddoppio della portata drenando tutto il settore orientale del bacino.



Figura 5.2: tratto montano del Fiume Tagliamento

Superato il punto di confluenza con il Fella, il Tagliamento aggira il Monte San Simeone e piega bruscamente verso sud scorrendo in un'ampia vallata fino a raggiungere la Piana di Osoppo (Fig. 5.3). Dopo aver ricevuto le acque dei fiumi Ledra in sponda sinistra e Arzino in sponda destra, l'alveo subisce un drastico restringimento in corrispondenza della stretta di Pinzano, passando dai 1500 m di Cornino ai 150 m della stretta.

Questo punto rappresenta la sezione di chiusura del bacino montano ed intermedio del Tagliamento.



Figura 5.3: il Tagliamento da Osoppo a Pinzano

Nel tratto successivo a Pinzano, la piana inondabile comincia a distendersi nell'alta pianura friulana superando abbondantemente i tre chilometri di larghezza nei pressi di Spilimbergo, le dimensioni dell'alveo attivo rimangono pressoché costanti attorno a valori di 1,5 km. La costruzione del ponte stradale di Dignano avvenuta nel 1923 ha provocato però un cambiamento del territorio riducendo di fatto il letto attivo ad un chilometro di larghezza. Inoltre, la presenza di ghiaie molto permeabili determinano una notevole perdita di acqua per assorbimento facendo sì che l'alveo sia completamente occupato solamente in concomitanza di piene eccezionali, durante i periodi di deflusso normale invece, l'alveo occupato si riduce a qualche centinaio di metri. La portata in tale tratto, anche per effetto dell'andamento torrentizio delle precipitazioni, può quindi essere anche nulla per periodi più o meno lunghi.

Le acque che si infiltrano vanno ad alimentare le falde dell'alta pianura e le risorgive; nei pressi di San Vito al Tagliamento il fiume attraversa infatti la fascia delle risorgive, ovvero la zona di transizione tra le ghiaie dell'alta pianura e gli elementi fini della bassa pianura. Questo tratto costituisce anche la zona di mutamento della morfologia fluviale, che passa gradualmente dalla conformazione a canali intrecciati su fondo prevalentemente asciutto e ghiaioso, tipico dell'alta e media pianura, a quella con letto meandriforme e monocursale con portata costante tipica invece della bassa pianura a pendenza limitata (tagliamento.org).

La sinuosità tipica dei fiumi meandriformi accompagna poi tutto il corso inferiore del Tagliamento sino alla sua foce. In questo tratto terminale, la portata liquida tende ad un

sensibile incremento per l'apporto dei corsi d'acqua di risorgiva, come il fiume Varmo affluente in sinistra orografica.

In una distanza lineare inferiore a 100 km, il Tagliamento attraversa quindi quattro aree tipologicamente differenti, quali la zona montana delle Alpi Carniche e Giulie, la zona prealpina, la zona dell'alta e bassa pianura friulana e infine quella costiera. Data, quindi, questa funzione di connessione tra l'ambiente alpino e quello mediterraneo, attraverso un gradiente ambientale che da nord a sud comporta cambiamenti climatici per il variare delle precipitazioni e delle temperature, il corso fluviale si caratterizza per una grande varietà di ambienti, ancora oggi presenti in abbondanza nei tratti alto e medio.

Come detto in precedenza, la peculiarità che contraddistingue il Tagliamento è il susseguirsi di tipologie fluviali differenti. Superata la confluenza con il torrente Lumiei, il progressivo allargamento dell'alveo da inizio alla fase pluricursale del fiume, che si caratterizza per la sua dinamica a canali intrecciati. Questo tipo di alveo, formato da un letto ghiaioso molto ampio con numerosi canali d'acqua che si intrecciano nel percorso, consente la formazione di elementi morfologici quali le isole vegetate e le barre ghiaiose (Fig. 5.4) oramai considerate quasi estinte nella maggior parte dei fiumi dell'arco alpino.



Figura 5.4: panoramica del Tagliamento nei pressi della Piana di Osoppo (da Tockner, 2003)

Per quanto riguarda il numero medio di canali per sezione trasversale, conteggiato in condizioni di portata media, oscilla tra 4 e 6 nella sezione pluricursale di monte mentre a valle di Pinzano aumenta fino ad un massimo di 11; infine esso decresce progressivamente proseguendo verso valle fino a formare un singolo canale nella sezione unicursale meandriforme del tratto terminale (Ward *et al.*, 1999).

Come tutti i fiumi a canali intrecciati, anche il Tagliamento si caratterizza per una spiccata instabilità data dalle sponde facilmente erodibili, dall'elevato trasporto solido e dall'ampiezza del fondovalle (Buzzi, 2011) che si traduce poi in frequenti rimodellamenti degli elementi morfologici sopracitati. Studi condotti sulle isole vegetate del Tagliamento hanno infatti rilevato come la vegetazione arborea abbia un età media di dieci anni dovuta appunto ai cambiamenti molto repentini nelle dinamiche fluviali (Karrenberg, 2002).

Il fatto che il fiume in alcuni suoi tratti possa dividersi in più canali, grazie appunto alla presenza di isole e barre fluviali, fa sì che la lunghezza del fiume, calcolata seguendo la linea di sponda al livello medio dell'acqua, sia di 940 km, favorendo così la presenza e la conservazione di un'elevata densità di specie sia acquatiche che terrestri (Tockner *et al.*, 2002). Il mantenimento di questa biodiversità che contraddistingue il corso del Tagliamento è favorito anche dall'elevato grado di connettività ecologica sia in senso longitudinale che trasversale. Da un lato il fatto che il passaggio tra la parte montana e la parte di pianura sia piuttosto repentino e che lo sbocco in mare sia relativamente vicino alla catena alpina fa sì che questo corso d'acqua rappresenti una sorta di collegamento fra le Alpi e l'Adriatico mettendo a contatto flora e fauna di provenienza assai diversa, dall'altro la morfologia a canali intrecciati favorisce il diversificarsi di svariati microhabitat all'interno della stessa sezione trasversale.

Ed è proprio questa ricchezza in specie, correlata ad una complessità morfologica nonché a dinamiche fluviali ancora naturali, che contraddistingue il Tagliamento dal resto dei fiumi alpini e fa di esso un ecosistema modello per la gestione degli ambienti fluviali.

In Tabella 5.1 sono riassunte le principali caratteristiche del bacino fluviale del Tagliamento.

Tabella 5.1: caratteristiche bacino del Tagliamento

| | |
|---|------|
| Area bacino (km ²) | 2871 |
| Altitudine media (m s.l.m) | 1159 |
| Lunghezza asta principale (km) | 178 |
| Pendenza (%) | |
| Sezione a monte | 10 |
| Sezione intermedia | 0.3 |
| Sezione a valle | 0.1 |
| Portata media annua (m ³ /s) | |
| Forni di Sotto | 3 |
| Amaro | 31 |
| Ragogna | 78 |
| Camino al Tagliamento | 36 |
| Varmo | 40 |
| Precipitazione media annua (mm/anno) | 2150 |

5.2 Andamento climatico e regime idrologico del Tagliamento

Il territorio del Friuli Venezia Giulia presenta, sotto il profilo climatico, comportamenti piuttosto diversificati che si ripercuotono sul regime pluviometrico dell'intera regione.

I principali fattori di questa disomogeneità climatica sono da ricondurre essenzialmente alla collocazione geografica del territorio nella fascia temperata boreale e al suo andamento orografico. In particolare, a condizionare fortemente l'andamento climatico della regione, sono la presenza dei rilievi alpini e prealpini ad andamento longitudinale costituenti una barriera climatica a settentrione, e l'afflusso di masse di aria calda e umida provenienti dal Mare Adriatico.

La concomitanza di tutti questi fattori determina un clima temperato marittimo in pianura e nella fascia collinare caratterizzato da temperature medie poco elevate, escursioni annue piuttosto accentuate e precipitazioni abbondanti e ben distribuite. La zona montana e pedemontana presenta invece un clima che, risentendo delle variazioni altitudinali, dà luogo a fluttuazioni anche notevoli. Le precipitazioni medie annue del solo bacino montano

ammontano a 1830 mm, ma queste possono variare, a seconda della zona, tra i 1500 mm e i 2200 mm all'anno (Paronuzzi, 2006).

Il regime irregolare delle precipitazioni determina l'alternanza di periodi secchi e periodi piovosi, i mesi a maggior siccità corrispondono a gennaio, febbraio, luglio e agosto; le massime precipitazioni si registrano invece in autunno e nei mesi di aprile e giugno.

In Figura 5.5 è riportata la mappa della piovosità media annuale per il range temporale 1960-2004 elaborata dalla Protezione civile del Friuli Venezia Giulia.

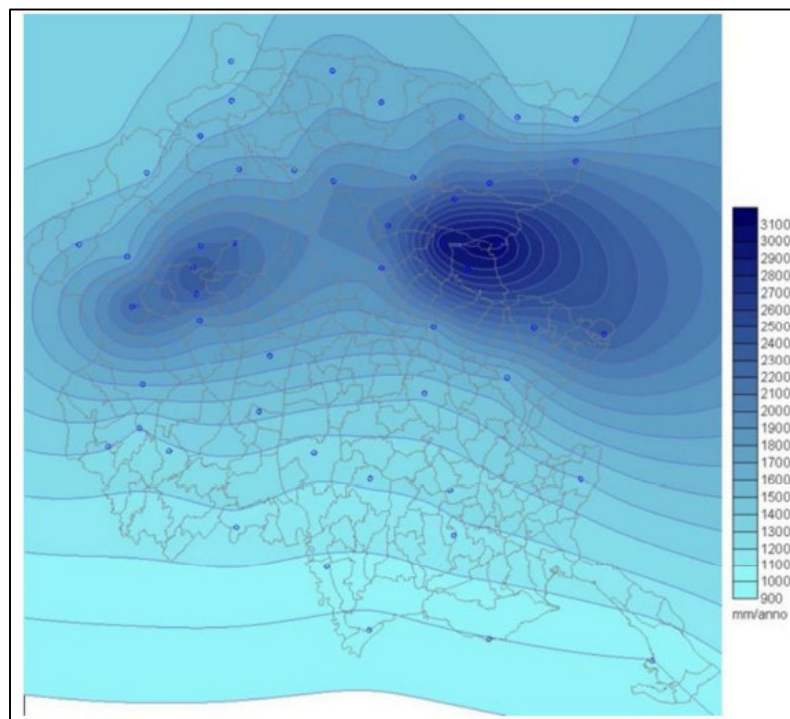


Figura 5.5: mappa regionale della piovosità media annua 1960 – 2004 (Protezione civile Fvg)

Emerge chiaramente la fascia di massima piovosità con punte superiori ai 3000 mm/anno localizzata nella parte montana orientale della regione e compresa tra le Alpi e Prealpi Giulie Occidentali e le Prealpi Carniche Occidentali. Da questa fascia di massima piovosità, si instaura poi un gradiente pluviometrico che tende a decrescere verso sud, nord ed ovest.

Per quanto riguarda il regime del fiume Tagliamento, è direttamente influenzato dagli andamenti delle precipitazioni che interessano il bacino. Ward *et al.* (1999), definiscono il Tagliamento un fiume a regime pluvio-nivale piuttosto marcato, le cui portate massime si concentrano in primavera in seguito allo scioglimento delle nevi, e in autunno in concomitanza con il periodo piovoso. Durante l'anno si alternano quindi periodi di magra, in cui la portata

non è superiore a 20 m³/s, a periodi di piena in cui le portate sono molto maggiori e questo permette di attribuire al Tagliamento la caratteristica di fiume torrentizio.

La dinamicità di questo regime idrologico si riscontra lungo tutto il corso del fiume ed è influenzata anche dal materiale costituente il letto fluviale. In condizioni di deflusso normale, la portata media annua è di 90 m³/s a Pioverno, 78 m³/s a Pinzano e decresce poi fino a 32 m³/s a San Vito al Tagliamento (Ward *et al.*, 1999). La differenza tra questi valori va imputata principalmente alle perdite che il fiume subisce nell'alta pianura; come accennato in precedenza, la zona compresa tra Pinzano e Latisana è interessata dal così detto materasso ghiaioso che essendo fortemente permeabile causa l'assorbimento di gran parte dei corsi d'acqua che vi scorrono; in particolare per il Tagliamento, le perdite dovute a tale fattore possono variare tra i 20 e i 30 m³/s (Arpa.fvg).

In condizioni di magra, questo tratto di fiume può anche essere privo di acqua in superficie, una caratteristica naturale di molti fiumi mediterranei le cui condizioni sono state aggravate dal prelievo delle acque superficiali e dall'estrazione delle acque sotterranee. Tuttavia, queste variazioni cicliche dei deflussi superficiali su base stagionale, sembrano essere un fenomeno naturale che contraddistingue molti fiumi alluvionali (Stanley *et al.*, 1997; Ward *et al.*, 1999).

Superata la zona di massima infiltrazione, la portata del fiume aumenta a 40 m³/s alla confluenza con il fiume Varmo fino a sfociare in territorio perilagunare con una portata di circa 70 m³/s. L'incremento della portata liquida è dovuto allo scorrimento del Tagliamento nella fascia delle risorgive dove l'affioramento di notevoli quantità d'acqua va ad alimentare l'apporto dei corsi d'acqua di risorgiva che confluiscono poi nel Tagliamento.

In Tabella 5.2 sono riportate le variazioni della portata lungo il corso del fiume.

Tabella 5.2: variazioni della portata media annua lungo il corso del Tagliamento

| | Portata media annua (m ³ /s) |
|-------------------------|--|
| Pioverno | 90 |
| Pinzano | 78 |
| San Vito al Tagliamento | 32 |
| Varmo | 40 |
| Foce | 70 |

5.3 Influenze antropiche nel sistema idrofluviale

Nonostante il Tagliamento sia considerato il sistema fluviale più naturale ancora oggi presente nelle Alpi, esso manifesta comunque una discreta presenza antropica sul territorio.

Le principali attività antropiche che influenzano direttamente o indirettamente l'idrosistema fluviale sono il prelievo di inerti in alveo, l'inquinamento organico e l'estrazione di acqua soprattutto nella parte montana del bacino.

L'estrazione di inerti, per lo più ghiaia, è tra le cause principali dei cambiamenti morfologici dell'alveo; a tal problema in molti piccoli tributari sono state costruite delle apposite strutture per inibire l'erosione e l'incisione nei canali (Stefanini, 1982).

Per quanto riguarda la qualità delle acque del Tagliamento, è molto variabile lungo l'asta fluviale. Essa è buona nel tratto montano del bacino ma diventa poi critica tra Tolmezzo e la confluenza con il Fella a causa dell'apporto inquinante del depuratore comunale che non riesce ad essere smaltito dalla portata relativamente esigua del corso principale in quanto è data solamente dal torrente But (Stoch *et al.*, 1995). Altra sezione critica dal punto di vista dell'inquinamento organico è il tratto canalizzato a valle di Latisana anche se i valori non raggiungono la criticità acuta di Tolmezzo; tuttavia, recenti analisi eseguite dalla Provincia di Udine e dall'Autorità di Bacino del Tagliamento dichiarano un notevole miglioramento della qualità dei corpi idrici nel corso degli ultimi anni.

Le influenze antropiche più significative sono sicuramente il prelievo idrico a scopo industriale – agricolo e la costruzione di sbarramenti idroelettrici per lo sfruttamento energetico. La zona occidentale del bacino montano è infatti interessata dal sistema idroelettrico “Alto e Medio Tagliamento” realizzato negli anni '50 dalla Società Adriatica di Elettricità SADE (Fig. 5.6).

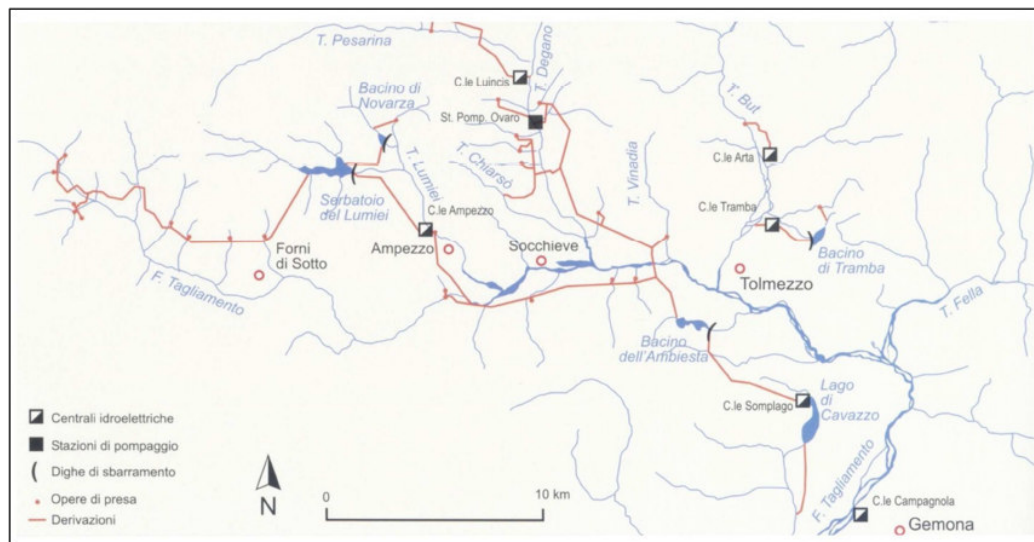


Figura 5.6: schema del sistema idroelettrico “Alto e Medio Tagliamento” (Paronuzzi, 2006)

Il sistema idroelettrico è costituito, nella sua parte principale, da due sbarramenti con rispettive derivazioni per il rifornimento di centrali idroelettriche. Il sistema è quindi suddivisibile in una parte superiore e una inferiore. Quella superiore, a monte di quota 980 m s.l.m., è regolata dalla diga in località La Maina, la quale ha determinato il formarsi del lago di Sauris. Questo invaso da circa 70 milioni di m³ viene sfruttato per alimentare la centrale idroelettrica di Ampezzo. La parte inferiore è invece regolata dalla diga dell'Ambiesta, la cui costruzione ha portato alla creazione del lago di Verzegnis il quale alimenta la centrale di Somplago, il più importante impianto di produzione idroelettrica della Regione (Buzzi, 2011).

Il complesso sistema idroelettrico, oltre alle due centrali sopracitate, comprende altri impianti minori, come le stazioni di pompaggio e le opere di presa. Il suo funzionamento ha un'influenza significativa sull'andamento dei deflussi (Tab. 5.3), in particolare altera il regime idrico del Degano, del Lumiei e di alcune sezioni del Tagliamento (Tockner *et al.*, 2003).

Tabella 5.3: portata media, deviata e residua nel Tagliamento e nei maggiori tributari (Tockner *et al.*, 2003)

| | Portata media (m ³ /s) | Portata deviata (m ³ /s) | Portata residua (m ³ /s) |
|---------------------------------|--------------------------------------|---|---|
| Tagliamento (Forni di Sopra) | 1,8 | 1,2 | 0,6 |
| Tagliamento (Forni di Sotto) | 5,4 | 1,7 | 3,7 |
| Tagliamento (Caprizzi) | 9,6 | 8 | 1,6 |
| Lumiei | 2,9 | 2,9 | 0 |
| Degano | 12,1 | 10 | 2,1 |
| Tagliamento (Invillino) | 25,6 | 21,1 | 4,5 |
| But | 16,3 | 0 | 16,3 |
| Fella | 37,6 | 0 | 37,6 |
| Tagliamento (Pioverno) | 87,3 | 21,1 | 66,2 |

5.4 Aspetti naturalistici del fiume Tagliamento

Il fiume Tagliamento, per la preziosità del suo ecosistema fluviale, è stato più volte preso come modello per interventi di ri-naturalizzazione fluviale (Ward *et al.* 1999).

A differenza degli altri fiumi europei, da secoli regolati con argini a protezione dalle piene e modificati morfologicamente per permettere le attività agricole e gli insediamenti umani, nel Tagliamento l'intervento invasivo dell'uomo è stato piuttosto ridotto limitandosi per lo più a partire dall'abitato di Latisana. Questo ha permesso il mantenimento di dinamiche fluviali con

un elevato grado di naturalità, considerato da molti autori come unico in Europa (Ward *et al.*, 1999; Tockner *et al.*, 2003).

Inoltre, la morfologia dell'alveo a canali intrecciati ha consentito la creazione di elementi morfologici come le isole vegetate e le barre ghiaiose che a loro volta hanno favorito lo sviluppo di un ecosistema fluviale con una ricca biodiversità floristica e faunistica.

A confermare questa naturalità del sistema fluviale, sono i fenomeni di dealpinismo che non raramente si verificano lungo il medio corso del fiume, spesso infatti in zona di pianura si trovano specie vegetali tipiche dei ghiaioni di montagna. Il Tagliamento funge quindi da corridoio fluviale sia longitudinale che latitudinale mettendo in comunicazione gli habitat montani con quelli di pianura.

La varietà di specie animali e vegetali presenti nel Tagliamento è notevole e la maggior ricchezza si concentra nella parte di medio corso compresa tra Amaro e Cornino. *Falco tinnunculus*, *Vulpes vulpes* e *Martes foina* sono tra le specie animali più importanti dal punto di vista cenotico presenti nel territorio di pertinenza fluviale, rare invece nel resto della pianura padana a causa delle attività umane.

Non è poi da sottovalutare le funzioni di corridoio migratorio e punto di riferimento che il Tagliamento svolge per numerose specie di uccelli migratori (tagliamento.org).

Nel 1999, Ward *et al.* eseguirono uno studio sulla diversità vegetazionale comparando tre fiumi alpini a canali intrecciati con un diverso grado di impatto antropico. I due fiumi presi in considerazione oltre al Tagliamento, sono il Lech, affluente di destra del Danubio e scorre in Austria e Germania e l'Inn in Tirolo. Come riportato in Figura 5.7, lo studio ha chiaramente dimostrato come all'aumentare delle attività antropiche segua una generale riduzione del numero delle comunità vegetali con la scomparsa di quelle maggiori. Contemporaneamente aumenta la presenza di specie vegetali pioniere tipiche di ambienti ruderali, anche per l'effetto delle attività agricole, con conseguente incremento dell'impatto ambientale nell'ecosistema fluviale.

Il Tagliamento, diversamente dal Lech e dall'Inn, presenta un basso livello di impatto antropico ed una elevata quantità di comunità vegetali tipiche di ambienti fluviali. In particolare, nella parte montana del bacino dominano specie alpine quali *Adenostyles glabra*, *Alnus viridis*, *Arabis alpina* e *Soldanella alpina* mentre nel tratto medio-terminale del corso d'acqua prevalgono specie tipiche di ambienti sub-mediterranei come *Cucubalus baccifer*, *Orchis laxiflora*, *Platanus hybrida* e *Populus alba* (Tockner *et al.*, 2003).

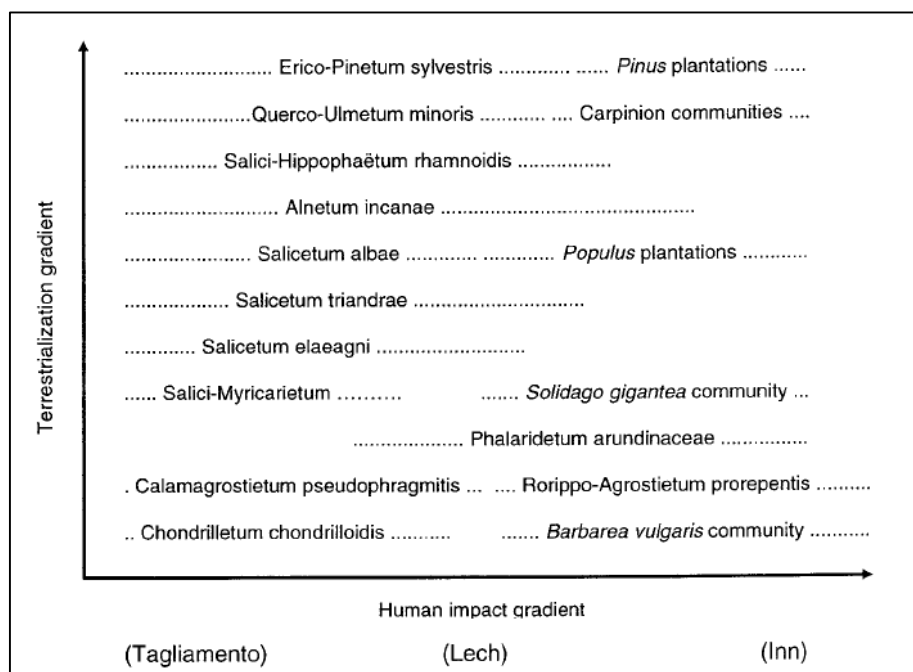


Figura 5.7: variazioni nell'abbondanza delle comunità vegetali in tre fiumi alpini a canali intrecciati con diverso grado di impatto antropico (Lippert et al. 1995, Muller 1995)

5.4.1 Il Tagliamento come corridoio fluviale

Come già accennato, il corso del Tagliamento rappresenta un perfetto esempio di corridoio fluviale che mette in comunicazione l'ambiente alpino con quello mediterraneo.

Escludendo i corridoi tributari, l'intero corridoio ripariale occupa un'area di circa 150 km², dimensioni paragonabili con quelle di alcuni parchi nazionali europei come l'Alluvial Zone National Park (93 km²) e lo National Park Neusiedlersee (200 km²) in Austria, e lo Swiss National Park (169 km²) in Svizzera (Tockner et al., 2003).

Come gran parte dell'ambiente ripariale, anche la zona del corridoio mantiene una naturalità quasi intatta in quanto gli interventi di ingegneria fluviale sono stati, da sempre, ridotti al minimo. Questo conferisce al corridoio fluviale le caratteristiche funzionali di un sistema quasi incontaminato, ovvero connettività sia laterale che verticale, alta eterogeneità di habitat e una diversità geomorfologica piuttosto marcata. Riguardo quest'ultimo aspetto, Tockner et al., (2003) suddividono l'ambiente del corridoio in cinque elementi paesaggistici di maggior rilievo: acque superficiali, ghiaie esposte, isole vegetate, boschi ripariali e piana alluvionale non boscata. Come riportato in Tabella 5.4, i primi tre elementi sopracitati vanno a formare un corridoio attivo con un' area totale di 61,7 km².

Tabella 5.4: statistiche riassuntive del corridoio fluviale del Tagliamento (Ward *et al.*, 1999; Gurnell *et al.*, 2000)

| | |
|--|-----------------------|
| Area corridoio attivo | 61,7 km ² |
| Area ghiaiosa | 38,7 km ² |
| Area isole | 10,6 km ² |
| Area acque superficiali | 12,4 km ² |
| Area bosco ripariale (1) | 32 km ² |
| Area corridoio ripariale (2) | ≥ 150 km ² |
| Numero di barre | 950 |
| Numero di isole (3) | 652 |
| Lunghezza ecotono ripariale (4) | 670 km |
| Lunghezza area di contatto fiume-isole-barre | 940 km |

1 fascia marginale del bosco ripariale il quale è periodicamente modificato dagli spostamenti laterali della zona attiva (Gurnell *et al.*, 2000)

2 il corridoio ripariale comprende la zona attiva, l'area interessata dalla foresta ripariale e la piana alluvionale su entrambi i lati del fiume (fino ad un massimo di 2km)

3 isole vegetate superiori a 0,01 ha

4 include il perimetro delle isole e la zona ripariale lungo la piana alluvionale adiacente (Ward *et al.*, 1999)

Nella Figura 5.8 che segue, è riportata invece la distribuzione dei principali elementi paesaggistici lungo il corridoio fluviale. La larghezza massima del corridoio attivo del Tagliamento è di circa 2 km e viene raggiunta all'inizio della medio – bassa pianura friulana. Una particolare caratteristica del Tagliamento è l'elevato numero di isole, in alcuni tratti più del 50% dell'area del corridoio attivo è occupata da isole fluviali vegetate (Tockner *et al.*, 2003; Gurnell *et al.* 2000).

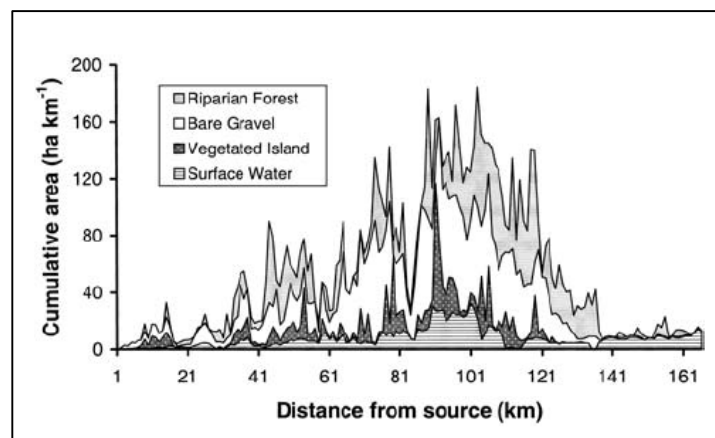


Figura 5.8: distribuzione dei principali elementi paesaggistici lungo il corridoio fluviale (analisi su mappe 1:10000, 1984-1985) (Gurnell *et al.*, 2000)

Per quanto riguarda il grado di eterogeneità degli habitat, esso è fortemente influenzato dalla morfologia che assume il corso fluviale. Arscott *et al.*, 2002, hanno studiato il

cambiamento degli habitat acquatici a seguito delle piene in cinque diversi tratti, dalle sorgenti sino alla foce. Il più alto grado di habitat acquatici (62%) è stato riscontrato a monte della sezione a canali intrecciati, in corrispondenza invece della zona meandriforme la diversità di habitat si riduce drasticamente fino ad un 20%. Nella morfologia a canali intrecciati, la presenza e l'alternanza di barre ghiaiose, isole vegetate e acque superficiali, determina una maggiore diversità ambientale che favorisce dunque una più numerosa eterogeneità degli habitat presenti.

L'importanza del corridoio come connessione biogeografia tra Alpi e Mare Adriatico è confermata anche dalla manifestazione del già accennato fenomeno del dealpinismo. Un chiaro esempio di questo fatto, è rappresentato da *Gypsophila repens*, comunemente nota come Saponaria diffusa, che segue il corso del Tagliamento dalle sorgenti fino alla foce (Poldini, 1991). Altre piante vascolari che illustrano questo fenomeno sono *Achnatherum calamagostris*, *Globularia cordifolia*, *Linaria alpina* e *Satureja montana*. La presenza del corridoio facilita la migrazione anche di altre specie, come ad esempio le neofite *Amorpha fruticosa*, *Helianthus tuberosus*, *Oenothera biennis*, *Solidago gigantea* e *Parthenocissus quinquefolia*; in questo caso il tipo di distribuzione è diverso in quanto sono specie solitamente rare nella zona alpina e più comuni nella zona pianeggiante. La continuità del corridoio ripariale consente in ogni caso il loro spostamento fino alla zona perilagunare delle foci.

In ogni modo, entrambe le neofite e le specie alpine soggette a dealpinismo, illustrano l'importanza dei corridoi fluviali nel mantenere la biodiversità regionale (Malanson, 1993). Il Tagliamento può quindi esser considerato come uno degli ultimi fiumi a canali intrecciati nelle Alpi in cui è ancora possibile osservare la migrazione longitudinale delle piante lungo l'intero corridoio (Tockner *et al.*, 2003), fenomeno per cui è possibile il mantenimento di un elevato grado di biodiversità a scala di bacino.

5.4.2 Le isole fluviali nel Tagliamento

Una delle principali caratteristiche distintive del Tagliamento è la presenza di un grande numero di isole vegetate e di barre ghiaiose, più volte oggetto di studio a livello internazionale.

In letteratura sono infatti presenti molteplici scritti relativi alle isole fluviali del Tagliamento con particolare riguardo all'abbondanza e alla loro distribuzione. Lungo l'intero corso sono state monitorate più di 652 isole stabili con estensione superiore a

70 m² (Ward *et al.*, 2000), più di 400 isole per km² di piana alluvionale attiva e una numerosità massima per chilometro pari a 25 (Tockner *et al.*, 2003).

L'abbondanza delle isole varia a seconda della sezione fluviale (Fig. 5.9): vicino alle sorgenti si ha la massima numerosità per chilometro e prevalgono isole di dimensioni minori rispetto a quelle delle sezioni intermedia e finale, caratterizzate da un numero inferiore di isole seppur di maggiori estensioni. In ogni sezione, tuttavia, c'è un'elevata eterogeneità nelle dimensioni delle isole, variabili tra 0,007 ha e 41,7 ha (Tockner *et al.*, 2003).

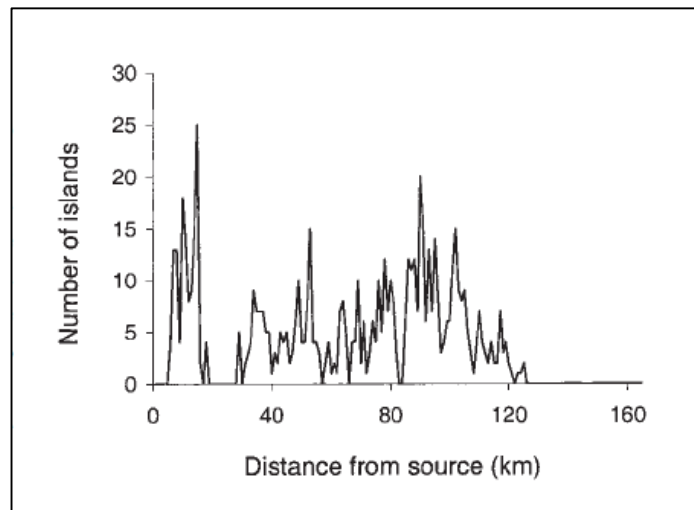


Figura 5.9: numero di isole per km di fiume lungo l'intero corso fluviale (dati derivati da foto aeree e mappe 1:10'000, 1984-1985) (Tockner *et al.*, 2003)

Oltre alle isole stabili, è stata riscontrata anche la presenza di innumerevoli isole pioniere particolarmente interessanti per la loro capacità di intercettare materiale trasportato dalla corrente. Gurnell *et al.* (2001) hanno infatti sottolineato che le isole pioniere, nonostante le loro dimensioni piuttosto limitate, rivestono un'importante ruolo nel trattenimento di materiale legnoso di grandi dimensioni (*Large Wood*). È stato difatti calcolato un immagazzinamento medio tra le 293 e le 1'664 ton/ha di LW sulle isole pioniere rispetto alle 1-6 ton/ha delle barre ghiaiose.

Dal punto di vista ambientale, la presenza di queste isole contribuisce considerevolmente alla lunghezza totale dell'ecotono ripariale: circa il 50% della sua lunghezza può infatti essere attribuita alla presenza delle isole (Ward *et al.*, 2000) che, per la loro importanza ecologica già vista, forniscono una grande varietà di habitat acquatici e terrestri accrescendo così il valore della biodiversità.

5.5 Localizzazione dei sottotratti di studio

Le attività di analisi sono state condotte lungo due sottotratti fluviali del fiume Tagliamento nei pressi del comune di Forgaria nel Friuli.

Il sottotratto di monte (Fig. 5.10), sito in vicinanza dell'abitato di Cornino, si presenta con prevalente morfologia a canali intrecciati separati da isole vegetate e barre ghiaiose; si estende per una lunghezza di circa 3 km e la larghezza dell'alveo attivo oscilla tra un massimo di 1 km e un minimo di 700 m. Dal punto di vista sedimentologico, il tratto è caratterizzato da una composizione granulometrica eterogenea che va dalle sabbie medio-fini ai ciottoli grossolani (Martini, 2011). Tale sottotratto è privo di affluenti.

Il sottotratto di valle, in località Flagogna, si caratterizza invece per una prevalente morfologia *wandering* con presenza anche di barre centrali e canali di morta. Come visibile in Figura 5.11, il canale principale scorre con andamento pseudomeandriforme scorrendo quasi esclusivamente in sinistra idrografica e, come nel caso precedente, sono presenti un gran numero di barre longitudinali, laterali e isole fluviali localizzate per lo più in destra idrografica. Il tratto considerato ha una lunghezza di circa 3,5 km e una larghezza dell'alveo attivo variabile tra un massimo di 800 m e un minimo di 300 m. A differenza di Cornino, in destra idrografica del sottotratto di Flagogna è presente il torrente Arzino, affluente secondario del Tagliamento. In Tabella 5.5 sono riassunte le principali caratteristiche dei due sottotratti di studio.

Tabella 5.5: caratteristiche sottotratti di studio

| | Sottotratto di Cornino | Sottotratto di Flagogna |
|-----------------------|------------------------|-------------------------|
| Morfologia prevalente | <i>braided</i> | <i>wandering</i> |
| Lunghezza (km) | 3 | 3,5 |
| Larghezza max (km) | 1 | 0,8 |
| Larghezza min (km) | 0,7 | 0,3 |



Figura 5.10: sottotratto fluviale di Cornino

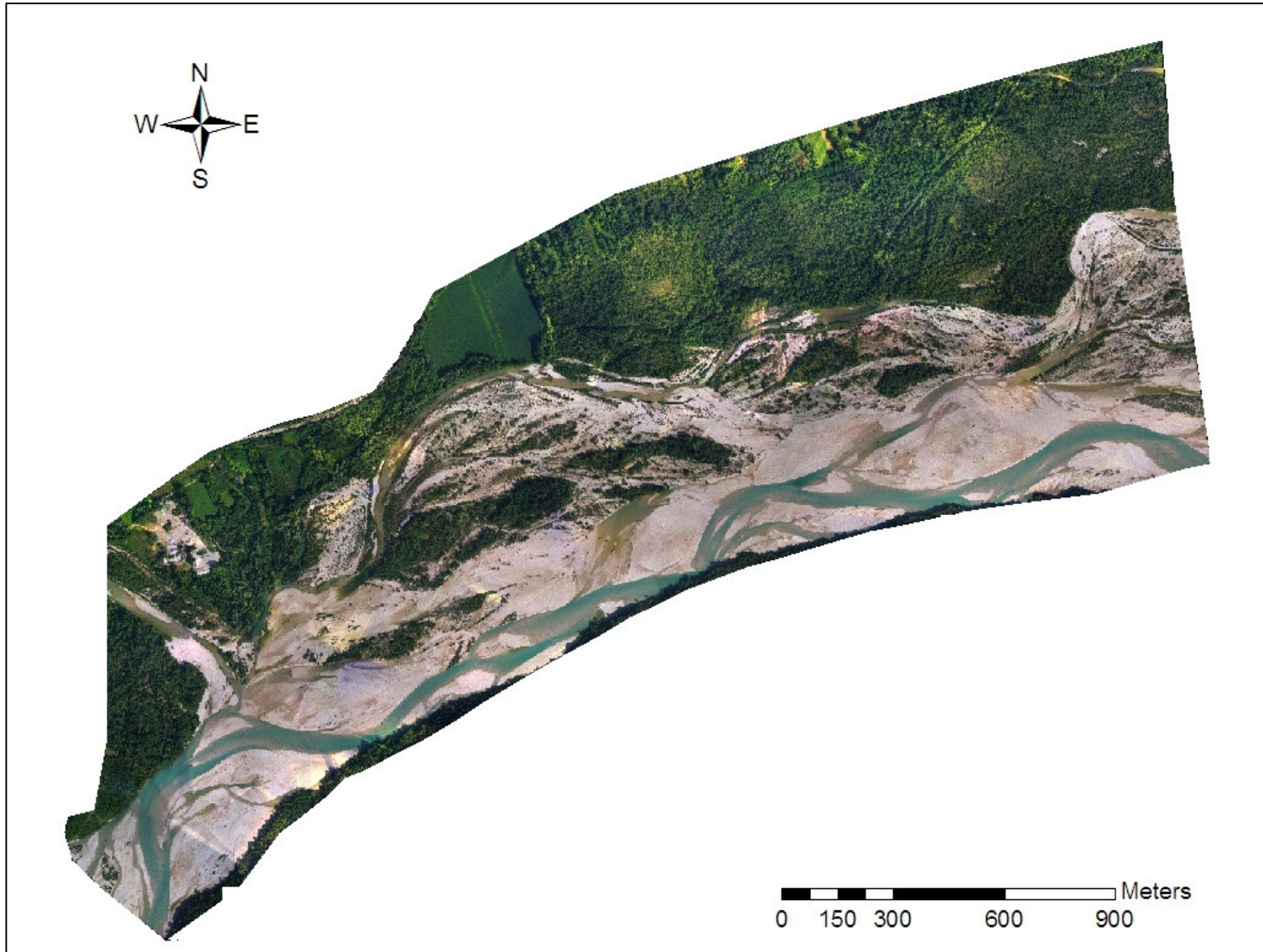


Figura 5.11: sottotratto fluviale di Flagogna

6 Materiali

Per la realizzazione di questo studio sono state utilizzate differenti tipologie di materiali a seconda del diverso step dell'analisi. Sono stati impiegati dati ottenuti da voli LiDAR (*Light Detection and Ranging*), foto aeree, modelli digitali del terreno, software GIS (*Geographic Information System*) ed altri programmi informatici quali Statistica 7 e Microsoft Excel.

Sono state inoltre eseguite delle analisi dendrometriche delle isole fluviali rilevando l'altezza e il diametro della vegetazione costituente le isole.

Di seguito viene riportata una breve descrizione delle caratteristiche e del funzionamento dei principali materiali utilizzati.

6.1 La tecnologia LiDAR

Nelle analisi dei processi idro-geomorfologici la risoluzione dei dati topografici di partenza rappresenta una delle questioni più sensibili (Tarolli, 2008) perché capace di influenzare la qualità e l'accuratezza degli studi. La risoluzione di scala, per l'analisi e l'interpretazione dei processi che si manifestano in natura, si rivela un punto cruciale in quanto a seconda della qualità di dettaglio sul quale vengono basate le analisi, un processo può essere più o meno correttamente rappresentato (Tarolli & Tarboton, 2006; Tarolli & Dalla Fontana, 2008; Tarolli & Dalla Fontana, 2009).

Nelle ultime due decadi, la qualità e il dettaglio delle informazioni topografiche disponibili sono progressivamente migliorate grazie alla crescente diffusione di nuove modalità di rilievo come, ad esempio, la tecnica LiDAR che si basa sull'utilizzo di un sensore laser montato su un aeromobile. Questa tecnologia consente l'acquisizione di dati topografici ad alta risoluzione, con accuratezza verticale ed orizzontale di pochi centimetri (Cavalli, 2009), contribuendo significativamente ad una migliore rappresentazione della superficie terrestre (Ackerman, 1999; Kraus & Pfeifer, 2001; Briese, 2004). Uno degli aspetti più innovativi del LiDAR, che segna vantaggi rispetto alle tradizionali tecniche di rilievo, è la possibilità di ricavare Modelli Digitali del Terreno (DTM) ad alta risoluzione dall'ultimo impulso LiDAR ricevuto filtrando i punti relativi alla vegetazione ed alle strutture antropiche (Slatton *et al.*, 2007). Inoltre, a differenza delle metodologie tradizionali per la costruzione dei modelli digitali, il LiDAR aereo si dimostra uno strumento molto efficiente anche in zone articolate e complesse, quali piane inondabili di grandi fiumi o piccoli bacini montani, caratterizzate da vegetazione densa e ad alto fusto (Tarolli & Dalla Fontana, 2009).

Alcuni autori (Wehr & Lohr, 1999) propongono l'utilizzo del termine ALS (*Airborne Laser Scanning*) quando si vuole fare riferimento agli apparati laser scanner montati su elicotteri o

aeroplani per distinguerlo dal sistema laser scanner terrestre. In questo lavoro, per semplicità, sarà utilizzato il termine generico LiDAR per indicare la scansione laser da aeromobile.

6.1.1 Principi di funzionamento

La tecnologia LiDAR (Baltsavias, 1999; Casella, 2003) è basata sulla scansione del territorio, sorvolato da un aereo o da un elicottero, per mezzo di un telemetro laser che misura la distanza tra il punto di emissione, rappresentato dal telemetro, ed il punto di riflessione corrispondente ad un generico punto della superficie rilevata colpito dal laser (Fig. 6.1).

Il tempo impiegato dall'impulso laser a percorrere il percorso di andata e ritorno, denominato tempo di volo Δt , viene misurato dal telemetro tramite un orologio con una frequenza stabilizzata al quarzo. La distanza di presa (D) risulta essere funzione del tempo di volo e viene calcolata con la seguente formula:

$$D = \frac{\Delta t \cdot c}{2}$$

dove c rappresenta la velocità di propagazione del segnale e, in questo caso, corrisponde alla velocità della luce ($3 \cdot 10^8$ m/s).

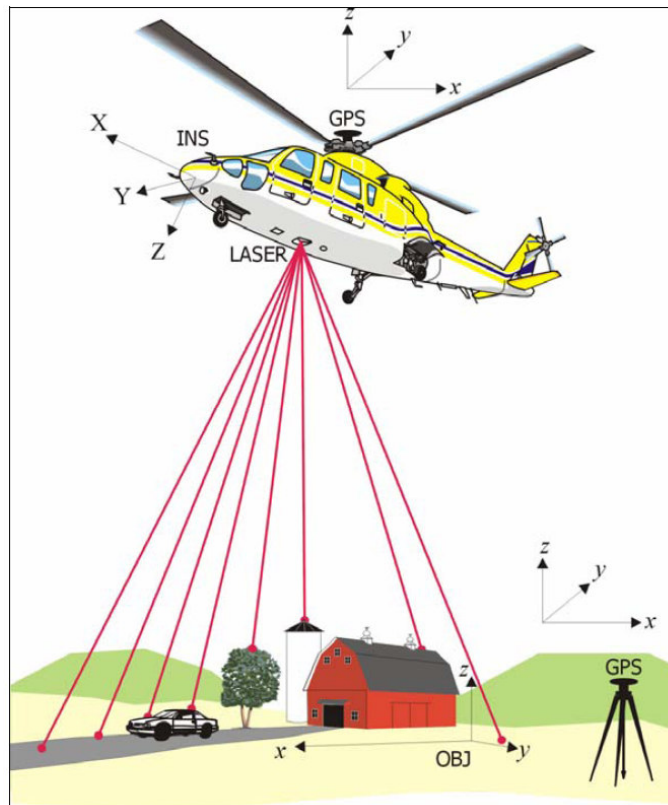


Figura 6.1: funzionamento del sistema LiDAR aerotrasportato (da Giuseppini, 2006)

Una particolare caratteristica del sistema LiDAR aerotrasportato consiste nell'essere progettato in modo da rispettare le condizioni di non ambiguità: prima che un nuovo raggio sia emesso è necessario che tutti gli echi del precedente raggio siano tornati al sensore. Questo requisito impone, dunque, un vincolo che lega la frequenza massima dello strumento e l'altezza massima di volo. Infatti, un'elevata quota di volo comporta una diminuzione della densità di punti rilevati proprio a causa del maggiore tempo impiegato dagli echi per tornare al sensore; per ottenere buone densità di punti a quote di volo elevate è necessario aumentare le frequenze di acquisizione (Casella, 2003).

Il risultato finale di un rilievo LiDAR è la restituzione delle coordinate x , y , z per ogni misura rilevata. Per il successivo calcolo delle coordinate dei punti colpiti è necessario conoscere la distanza fra il velivolo ed il punto a terra e la posizione ed assetto del velivolo in ogni istante di volo. Per soddisfare tali esigenze, nel sistema LiDAR sono integrati, oltre al telemetro, un sistema inerziale INS (*Inertial Navigation System*) per la determinazione dell'assetto del velivolo rilevando i tre gradi di libertà (rollio, beccheggio, deriva) ed un sistema GPS (*Global Position System*) per definire la posizione assoluta del telemetro rispetto al sistema di coordinate di riferimento.

Una volta determinati mediante i sensori GPS ed INS le coordinate del telemetro e l'orientamento della retta normale all'aereo, è possibile ricavare l'equazione della retta passante per il sensore montato sul velivolo ed il punto colpito dall'impulso laser. La conoscenza della distanza fra i due punti consente, infine, di ricavare le coordinate x e y del punto bersaglio.

Riepilogando, le principali componenti che costituiscono un sistema LiDAR sono (Fig. 6.2): il telemetro, l'orologio, il sensore GPS ed il sensore INS. Tuttavia, sono richieste ulteriori apparecchiature quali dispositivi per l'alimentazione ed il controllo dei sensori ed un supporto per la registrazione dei dati prodotti. A questi strumenti viene spesso aggiunta una fotocamera ad alta risoluzione utile ai fini di una documentazione visiva del territorio sorvolato.



Figura 6.2: strumentazione LiDAR

Per quanto riguarda l'impronta a terra del raggio laser, proporzionale all'altitudine di volo e all'apertura angolare del sensore, essa può generare i così detti echi multipli: quando il raggio emesso incontra un primo ostacolo, una parte del segnale viene riflessa generando un primo eco che torna al telemetro, la rimanente prosegue fino ad arrivare a terra ed essere successivamente riflessa.

In presenza di ostacoli quindi, ogni raggio genera delle riflessioni multiple che vengono registrate dal ricevitore in tempi diversi potendo così discriminare le diverse classi di appartenenza degli echi di ritorno già in fase di registrazione.

Ipotizzando una superficie boscata (Fig. 6.3) il primo eco di ritorno (*first pulse*) corrisponderà alla sommità della chioma dell'albero, gli echi successivi ad altri ostacoli quali rami, foglie posti a quote inferiori e l'ultimo eco (*last pulse*) sarà riconducibile alla quota del terreno sotto copertura (Cavalli & Tarolli, 2010).

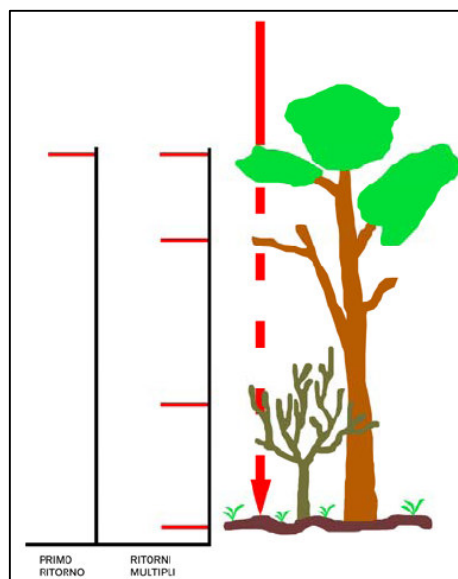


Figura 6.3: le riflessioni multiple del raggio (da Cavalli & Tarolli, 2010)

Una volta ottenuta la nuvola dei punti rilevati è possibile, ricorrendo ad opportune operazioni di post-processamento basate sull'utilizzo di algoritmi di filtraggio, discriminare i punti relativi ad eventuali edifici, veicoli, vegetazione, cavi di linee elettriche etc., dai punti corrispondenti alla superficie terrestre generando, così, i rispettivi modelli digitali della superficie e del terreno.

Questa particolare caratteristica del LiDAR aerotrasportato di produrre le riflessioni multiple ha permesso di ampliare le sue applicazioni anche nel campo dell'ambiente forestale (Pirotti *et al.*, 2010). A tal riguardo sono già stati prodotti studi riguardanti la stima della biomassa (Patenaude *et al.*, 2004), l'altezza dei singoli alberi (Suarez *et al.*, 2005) e la misura della struttura tridimensionale della foresta (Andersen *et al.*, 2005).

Uno dei principali limiti della tecnologia LiDAR si riscontra negli ambienti fluviali dove, in aggiunta alla complessità morfologica ed alla varietà di copertura, possono essere presenti corpi idrici di elevate profondità che comportano una scarsa restituzione del segnale. Tuttavia, la possibilità di eseguire rilievi topografici anche di aree sommerse è stata resa possibile grazie all'introduzione del LiDAR batimetrico, detto anche *green LiDAR*, che emette impulsi laser sia alla lunghezza d'onda dell'infrarosso che del verde. Mentre l'infrarosso viene riflesso dall'acqua, la lunghezza d'onda del verde penetra la colonna d'acqua e viene riflessa quando raggiunge il fondo o un altro ostacolo. Una volta che il sensore ha registrato il segnale di ritorno dei due impulsi laser, vengono calcolate le distanze sensore-superficie dell'acqua e sensore-fondale considerando la velocità della luce nell'aria e nell'acqua (Hilldale & Raff, 2008; McKean *et al.*, 2009).

6.1.2 Specifiche voli LiDAR e foto aeree

Per il presente studio sono stati utilizzati due *dataset* LiDAR relativi a due voli: il primo eseguito nel mese di agosto 2010 dalla Blom CGR Spa mediante sistema OPTECH ALTM Gemini, ed il secondo nel mese di aprile 2011 dall'OGS utilizzando un sistema RIEGL LMS-Q560.

Entrambi i voli sono stati effettuati ad una quota di 850 m s.l.m, in condizioni climatiche favorevoli e con bassi livelli idrometrici dei canali. Le scansioni hanno interessato un area di circa 4,5 km² per il sottotratto di Cornino e 3,5 km² per il sottotratto di Flagogna. Contestualmente al rilievo LiDAR è stata effettuata una ripresa ortofotografica ad alta risoluzione (15 cm per *pixel*) con una fotocamera digitale montata anch'essa a bordo del velivolo.

Il breve periodo di tempo tra i due voli è motivato da una successione di eventi di piena verificatisi tra fine agosto 2010 e inizio aprile 2011.

In Figura 6.4 è riportato l'andamento dei livelli idrometrici del Tagliamento registrati dalla stazione idrologica di Villuzza (Comune di Ragogna). In particolare vanno segnalate le due piene di fine 2010 che hanno raggiunto rispettivamente 2,9 m e 2,57 m (classificate con tempo di ritorno di circa 15 anni). Si sono inoltre verificate altre cinque piene, con tempo di ritorno di 10-12 anni, i cui picchi hanno superato abbondantemente l'1,5 m e raggiungendo quasi i 2 m nel caso della piena del 14-15 marzo 2011.

La disponibilità di dati LiDAR, così come di ortofoto, pre e post evento consente di esaminare le variazioni morfologiche a carico di isole e canali indotte dalle piene.

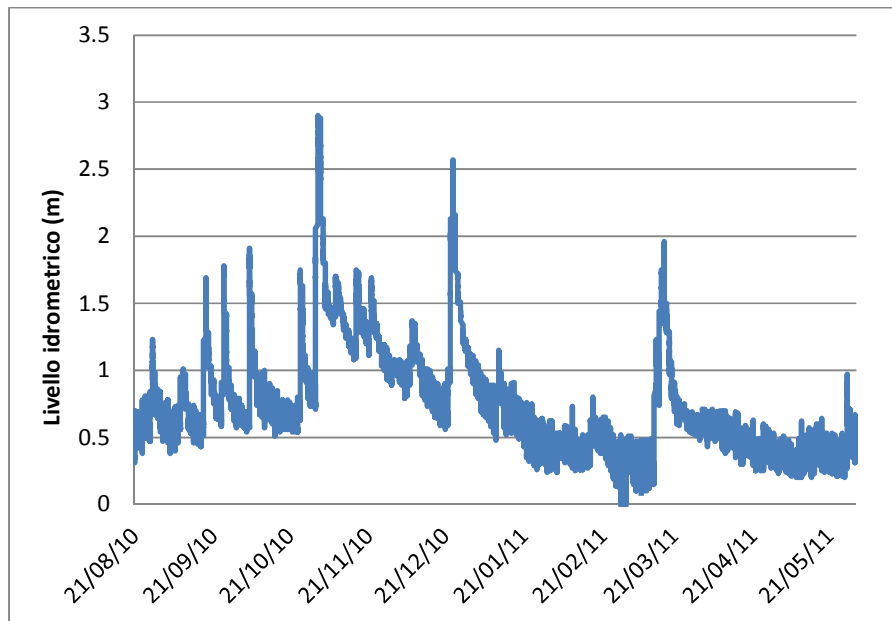


Figura 6.4: andamento dei livelli idrometrici del Tagliamento tra agosto 2010 e maggio 2011

6.2 I modelli digitali del terreno

Il DTM (*Digital Terrain model*) è una rappresentazione digitale della superficie mediante punti quotati e costituisce la base topografica di partenza per gli studi riguardanti i processi naturali che avvengono nel territorio.

I dati altimetrici usati per la creazione dei DTM possono essere rilevati con tecniche diverse influenzando la qualità del risultato finale. Fino a qualche decennio fa, la tecnica più usata per acquisire i dati si appoggiava alla cartografia tradizionale attraverso la digitalizzazione delle curve di livello, per essere progressivamente sostituita con tecniche di rilevamento diretto sul terreno e tecniche di telerilevamento aereo (LiDAR). La rappresentazione digitale del terreno viene ottenuta per interpolazione a partire dalla nuvola di punti acquisita durante il rilievo.

I dati che vanno a comporre un DTM possono essere rappresentati in due diverse strutture (Fig. 6.5):

- Formato TIN (*Triangular Irregular Network*), una rete di triangoli disposti irregolarmente nello spazio i cui vertici corrispondono ai punti di rilievo. Questa tipologia di rappresentazione si presta bene per la riproduzione di zone caratterizzate da brusche variazioni della pendenza perché i lati dei vari triangoli possono essere allineati con le discontinuità del terreno (Guarnieri, 2008).
- Formato *raster*, ovvero una griglia regolare suddivisa in tante piccole celle di uguale dimensione. Ogni cella contiene un solo valore che codifica in forma alfanumerica un attributo associato alla porzione di area rappresentata dalla cella stessa; in questo modo a zone del territorio aventi le stesse caratteristiche corrispondono celle di uguale valore (Guarnieri, 2008). Il grado di dettaglio dell'informazione è inversamente proporzionale all'ampiezza della cella, più piccola è la cella e tanto più corretta è l'approssimazione della superficie reale.

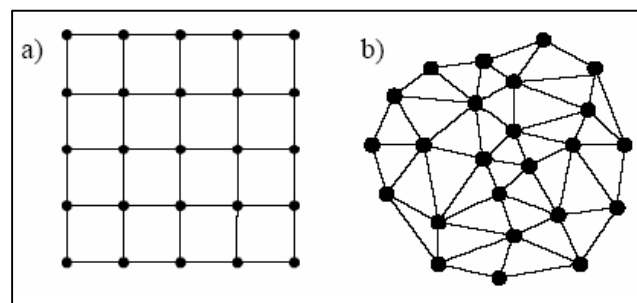


Figura 6.5: strutture del DTM: a) formato raster b) formato TIN (modificato da Moore et al. 1991)

Il principale impiego dei DTM è dato dalla loro implementazione in sistemi informativi geografici consentendo di ottenere, tramite opportune elaborazioni, nuovi dati di partenza per successivi studi del territorio con particolare riguardo alle indagini di mitigazione dei rischi naturali.

Diversamente dal DTM i cui valori numerici delle celle si riferiscono esclusivamente alla quota altitudinale del terreno, nel modello DSM (*Digital Surface Model*) i valori quotati delle celle comprendono anche tutti gli elementi posti a quote maggiori rispetto al terreno, come le infrastrutture e la vegetazione. La discriminazione tra questi due modelli viene eseguita tramite specifiche operazioni di filtraggio dei punti eseguite in ambiente GIS.

Nelle Figure 6.6 e 6.7 sono riportati, rispettivamente, il profilo del DTM e del DSM per una sezione d'alveo localizzata nel sottotratto di Flagogna. I grafici esemplificano la differenza tra i due modelli digitali.

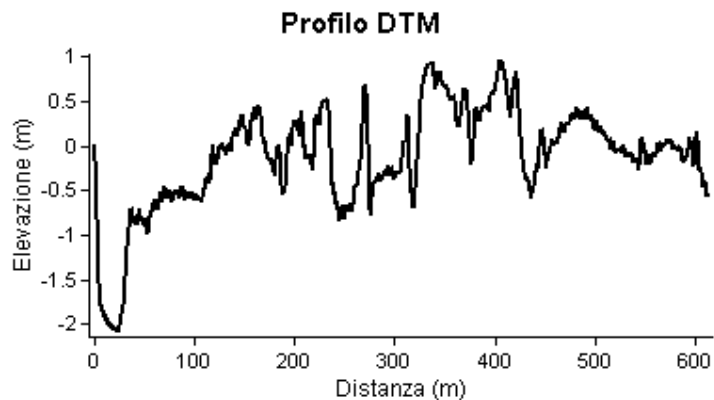


Figura 6.6: profilo DTM di una sezione d'alveo nel sottotratto di Flagogna

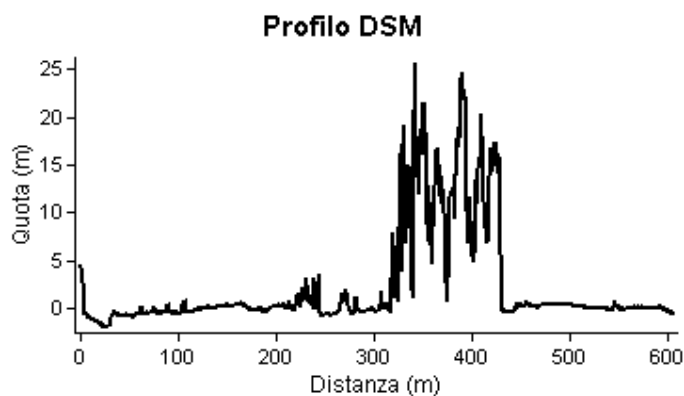


Figura 6.7: profilo DSM di una sezione d'alveo nel sottotratto di Flagogna

In questo studio è stato utilizzato, come base topografica, un DTM con risoluzione pari a 0,5 m ottenuto da dati LiDAR. Tutte le elaborazioni sulle nuvole di punti finalizzate alla costruzione del DTM, così come la visualizzazione e l'analisi dei dati territoriali, sono state condotte utilizzando il *software ArcGIS 10* (ESRI), un sistema informativo geografico che consente di lavorare con mappe e informazioni geografiche all'interno di una vasta gamma di applicazioni. I grafici relativi alle analisi statistiche delle isole fluviali sono stati elaborati con il *software Statistica 7* (Statsoft).

Il procedimento per la modellazione del DTM è descritto in dettaglio nel paragrafo 7.1.

7 Metodi

7.1 Modellazione e detrendizzazione del DTM

I ritorni LiDAR sono stati inizialmente filtrati, mediante algoritmi del software *TerrascanTM*, al fine di ottenere una classificazione dei punti laser in terreno (DTM) e vegetazione (DSM). Successivamente, le nuvole di punti in formato *.xyz sono state convertite in formato *shapefile multipoint* mediante la funzione *From File ASCII 3D to Feature Class* di *ArcGIS 10*.

Gli *shapefile* così creati sono stati poi convertiti in formato *raster* attraverso un *tool* d'interpolazione. Come funzione interpolante è stato adottato il metodo *Natural neighbours*, capace di fornire precisi dati di elevazione a partire da punti distribuiti sia in modo regolare che sparso o casuale (Sibson, 1981). Inoltre, rispetto ad altre funzioni interpolatrici quali *spline* e *kriging*, tale interpolatore è in grado di produrre minori effetti leviganti consentendo una rappresentazione morfologica capace di rilevare anche piccole convergenze e depressioni, fattori critici per il riconoscimento di elementi morfologici come i canali (Tarolli *et al.*, 2009).

Il DTM così creato, con risoluzione pari a 0,5m, è stato successivamente detrendizzato in modo tale da eliminare le variazioni altimetriche dovute all'andamento del trend generale delle pendenze. La detrendizzazione consta in due passaggi: calcolo di un DTM medio attraverso la funzione *Focal Statistics*, e sua successiva sottrazione dal DTM originale mediante il *Raster Calculator* di *ArcGIS 10*. In figura 7.1 è riportata una schematizzazione del procedimento sopradescritto.

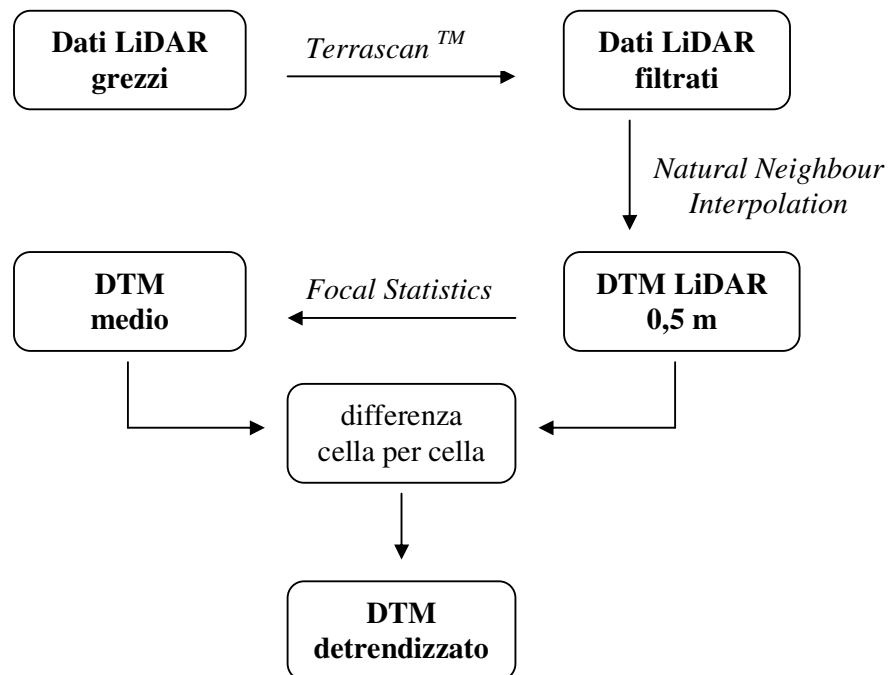


Figura 7.1: diagramma di flusso della creazione e detrendizzazione del DTM

Le operazioni di creazione e detrendizzazione del DTM sono state condotte allo stesso modo anche per il DSM.

A titolo dimostrativo viene di seguito riportato il DSM detrendizzato del sottotratto di Cornino (Fig. 7.2).

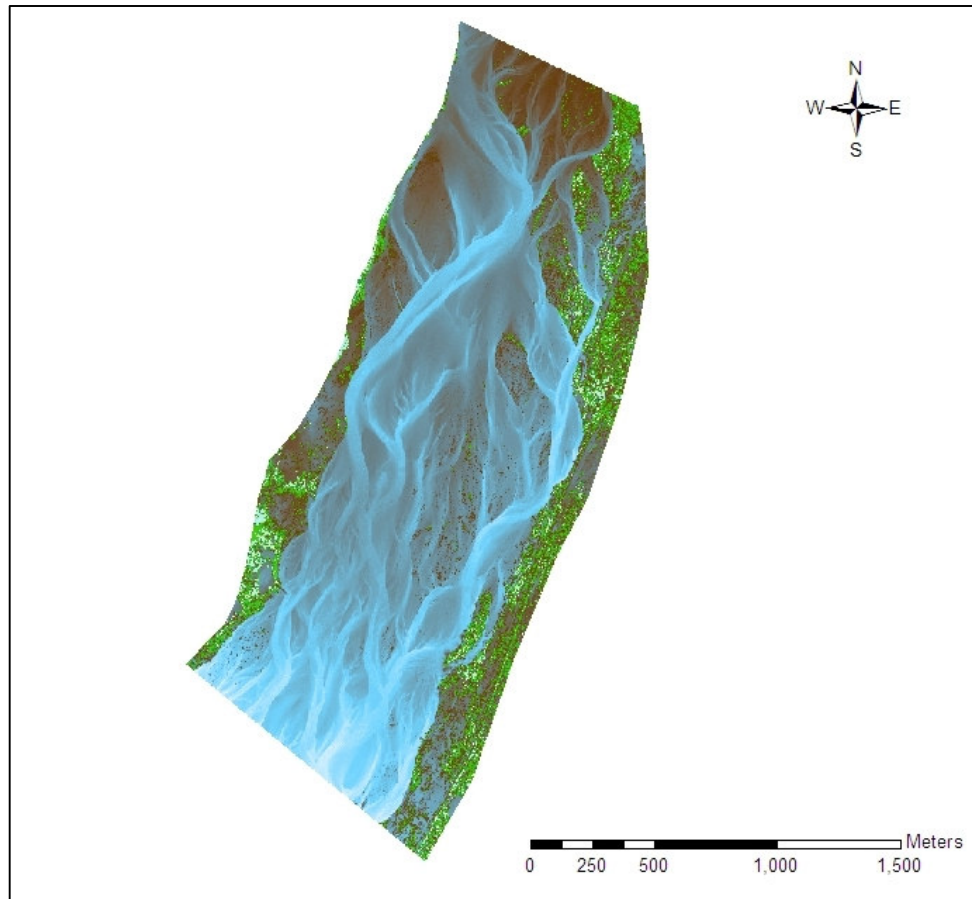


Figura 7.2: DSM detrendizzato, sottotratto di Cornino

Un altro modello digitale utilizzato in questo studio è il CHM (*Canopy Height Model*), ottenuto come differenza tra il DSM ed il DTM. In questo *raster*, il valore assegnato a ciascun pixel rappresenta l'altezza da terra della vegetazione.

Nonostante una buona verosimiglianza con il caso reale, è stato comunque dimostrato come i valori espressi nel CHM siano leggermente inferiori rispetto a quelli misurati in campo con l'utilizzo di clinometri. Questa sottostima è da ricondurre per lo più alla struttura delle chiome, solitamente con apice stretto, che può causare una mancata rilevazione da parte del segnale laser delle cime degli alberi (St-Onge *et al.*, 2001).

7.2 Identificazione delle isole fluviali da foto aeree

L'attività principale di questo studio è stata l'individuazione delle isole fluviali e la loro distinzione in pioniere, giovani e stabili utilizzando come supporto di base le foto aeree ottenute dai voli LiDAR.

Il lavoro di fotointerpretazione è stato condotto per i due sottotratti di studio e per gli anni 2010 e 2011.

La caratterizzazione delle isole nelle tre tipologie è stata eseguita utilizzando come indicatori la maturità e le dimensioni della vegetazione; secondo un modello di sviluppo delle isole proposto da Gurnell & Petts (2006) infatti, maggiori sono le dimensioni della vegetazione e più vecchia è l'isola.

Nelle foto aeree, la distinzione tra pioniere, giovani e stabili è stata fatta stimando l'altezza della vegetazione sulla base della struttura, delle forme e delle ombre. Un valido aiuto alla fotointerpretazione è stato fornito dai dati tridimensionali dei modelli digitali (DTM e DSM).

Di seguito vengono riportate le tre classi di distinzione delle isole fluviali:

- Isole pioniere: sono state classificate come isole pioniere quelle barre ghiaiose aventi copertura vegetale a chiazze con nuclei di vegetazione di altezza compresa tra 3 m e 5 m (Fig. 7.3);
- Isole giovani: sono il risultato del progressivo sviluppo della vegetazione e rispetto alle pioniere si caratterizzano per coperture vegetali più dense ed altezze comprese tra 5 m e 15 m (Fig. 7.4);
- Isole stabili: sono isole caratterizzate da vegetazione molto densa i cui individui possono raggiungere elevati valori in altezza (Fig. 7.5). Analisi condotte nelle isole fluviali del fiume Piave hanno documentato altezze di 30 m e diametri di 57 cm (Picco, 2010).

Per ogni isola individuata sono state successivamente calcolate le statistiche zonali utilizzando il comando *Spatial Analyst Zonal Statistics* presente in ArcGIS 10. Adottando come base topografica il DTM ed il CHM sono state ottenute informazioni sull'altezza massima, minima e media del suolo costituente le isole così come sull'altezza massima e media della vegetazione presente.



Figura 7.3: nucleo pioniero nel sottotratto di Flagogna, fiume Tagliamento



Figura 7.4: porzione di isola giovane nel sottotratto di Flagogna, fiume Tagliamento



Figura 7.5: isola stabile nel sottotratto di Cornino, fiume Tagliamento

7.3 Attività di campo

All'identificazione da ortofoto è stata associata un'analisi in campo delle isole fluviali al fine di valutarne i principali parametri dendrometrici. In ciascun sottotratto sono stati individuati gli alberi di maggiori dimensioni e per ciascuno sono stati misurati il diametro (Fig. 7.6) e l'altezza.

In totale sono stati campionati 50 alberi, appartenenti prevalentemente ai generi *Populus*, *Salix* ed *Alnus*, con diametro variabile tra 12 cm e 47 cm ed altezza tra 8 m e 28 m.



Figura 7.6: misurazione del diametro con cavalletto dendrometrico

8 Risultati

8.1 Sottotratto di Cornino, 2010-2011

Come riportato in Tabella 8.1, l'alveo attivo del sottotratto di Cornino ha subito una lieve variazione in aumento (0,04 km²) passando da 2,55 km² nel 2010 a 2,59 km² nel 2011.

Tabella 8.1: area alveo attivo di Cornino

| | Alveo attivo (km ²) |
|------|---------------------------------|
| 2010 | 2.55 |
| 2011 | 2.59 |

Nel 2010 a Cornino sono state individuate 1987 isole, tra le quali le pioniere risultano essere l'86%, le giovani il 14% e le stabili lo 0,3% (Fig. 8.1).

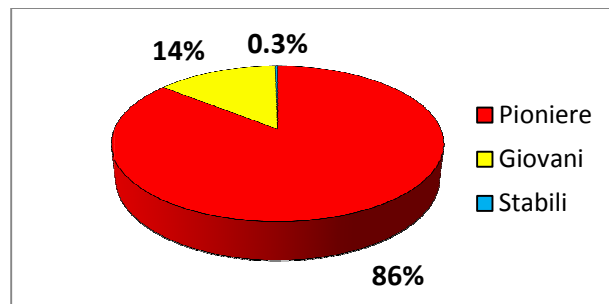


Figura 8.1: distribuzione in % delle isole fluviali, Cornino 2010

Dall'analisi dell'area totale costituita da isole fluviali (Fig. 8.2), si vede come le isole stabili occupano il 49% dell'intera area, le isole giovani il 18% e le isole pioniere il rimanente 33%.

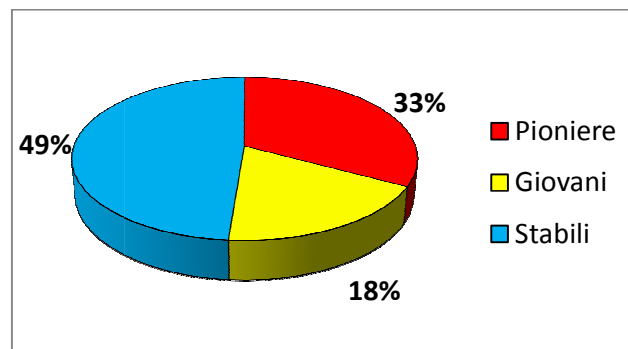


Figura 8.2: area in % di ciascuna categoria rispetto all'area totale costituita da isole, Cornino 2010

Sempre lungo il sottotratto di Cornino, nel 2011 sono state, invece, individuate 1222 isole di cui l'84% sono isole pioniere, il 16% sono isole giovani e il rimanente 0,4% sono isole stabili (Fig. 8.3).

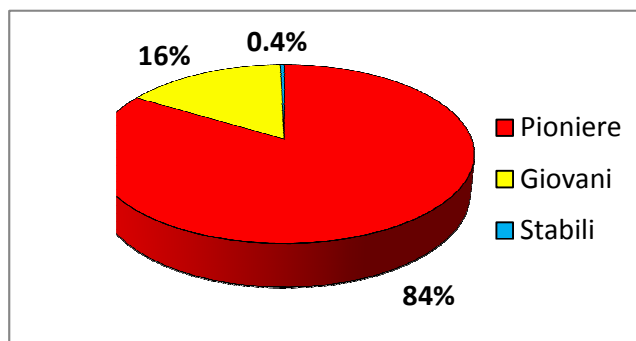


Figura 8.3: distribuzione in % delle isole fluviali, Cornino 2011

Analizzando invece la superficie totale costituita dalle tre tipologie di isole (Fig. 8.4), emerge che le isole stabili ricoprono il 56% dell'area fluviale costituita da isole, le isole giovani il 18% e le isole pioniere il 26%.

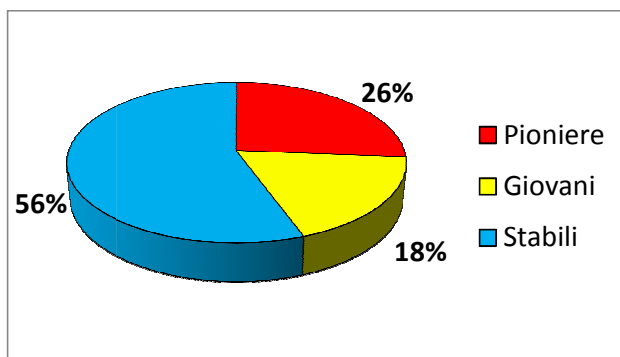


Figura 8.4: area in % di ciascuna categoria rispetto all'area totale costituita da isole, Cornino 2011

In Tabella 8.2 è riassunta la distribuzione numerica delle isole fluviali all'interno delle tre tipologie relativa agli anni 2010 e 2011; vi è riportata anche la corrispondente variazione in percentuale. Ad eccezione delle isole stabili per le quali non si hanno variazioni, le isole pioniere evidenziano una diminuzione del 40% passando da 1703 isole nel 2010 a 1022 nel 2011. Situazione simile si verifica per le isole giovani con una riduzione del 30% passando da 279 nel 2010 a 195 nel 2011.

Tabella 8.2: distribuzione numerica e relativa variazione % delle isole negli anni 2010-2011, sottotratto di Cornino

| | 2010 | 2011 | Variazione % |
|----------|------|------|--------------|
| Pioniere | 1703 | 1022 | -40% |
| Giovani | 279 | 195 | -30% |
| Stabili | 5 | 5 | 0% |
| Totale | 1987 | 1222 | |

In Tabella 8.3 è riportato, per ciascuna tipologia e per i due anni presi in considerazione, il numero di isole normalizzato all'area dell'alveo attivo. Tutte e tre le categorie presentano una diminuzione della loro numerosità: nel corso dell'anno preso in considerazione, le isole pioniere sono diminuite passando da 667,8 N/km² (2010) a 394,6 N/km² (2011), le isole giovani da 109,4 N/km² (2010) a 75,3 N/km² (2011) e infine le isole stabili da 1,96 N/km² (2010) a 1,93 N/km² (2011).

Tabella 8.3: numerosità delle isole per km² d'alveo attivo, sottotratto di Cornino

| N/km ² | 2010 | 2011 |
|-------------------|-------|-------|
| Pioniere | 667.8 | 394.6 |
| Giovani | 109.4 | 75.3 |
| Stabili | 1.96 | 1.93 |

Dall'analisi dell'estensione delle isole rispetto l'alveo attivo (m²/ha) (Tab. 8.4), le isole pioniere sono diminuite del 38,9% passando da 144,7 m²/ha nel 2010 a 88,3 m²/ha nel 2011. Le isole giovani mostrano una riduzione del 24,6% passando da 81 m²/ha nel 2010 a 61 m²/ha nel 2011. Riguardo le isole stabili anch'esse subiscono una diminuzione seppure di entità inferiore, pari a 12,9%, passando da 214,6 m²/ha a 186,9 m²/ha.

Tabella 8.4: estensione delle isole rispetto l'alveo attivo (m²/ha), sottotratto di Cornino

| m ² /ha | 2010 | 2011 | Variazione % |
|--------------------|-------|-------|--------------|
| Pioniere | 144.7 | 88.3 | -38.9 |
| Giovani | 81.0 | 61.0 | -24.6 |
| Stabili | 214.6 | 186.9 | -12.9 |

Dall'analisi dell'estensione media delle tre distinte tipologie di isole (Fig. 8.5) si vede come, nel 2010, la distribuzione dei valori differisca notevolmente tra le tre classi. Isole pioniere e isole giovani hanno valori estremamente bassi e simili tra di loro contrariamente alle isole stabili le quali si caratterizzano per un valore mediano di circa 13000 m² ed un *range* dominante molto ampio compreso tra 2000 m² e 15000 m². Tra le isole stabili, le più estese coprono una superficie pari a circa 24000 m², valore massimo riscontrato. Le isole giovani e le isole pioniere mostrano aree ridotte con valori molto bassi, in molti casi anche inferiori ai 10 m². È comunque possibile individuare un intervallo in cui ricadono la maggior parte dei valori, questo oscilla tra 90 m² e 150 m² per le isole giovani e 20 m² e 60 m² per le isole pioniere.

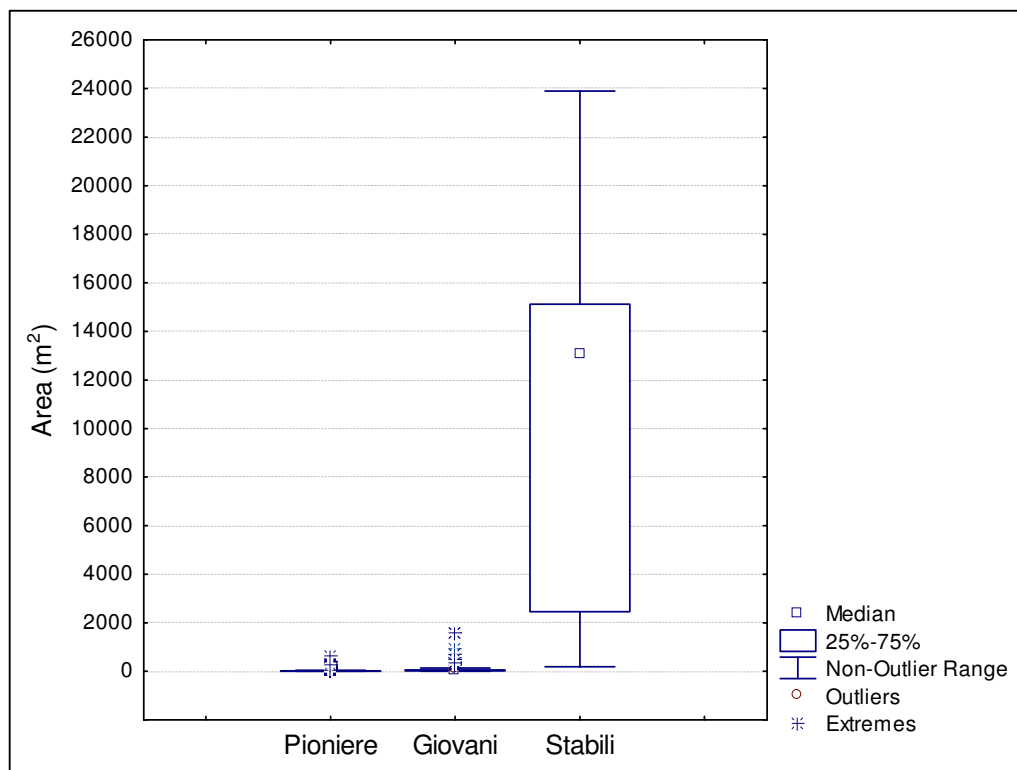


Figura 8.5: area media per le tre tipologie di isole fluviali, Cornino 2010

L'analisi dell'area eseguita per il 2011 (Fig. 8.6) ha portato a risultati molto simili a quelli del 2010 sopra descritti con la sola eccezione delle isole stabili i cui valori si mostrano leggermente più bassi. In particolare il valore mediano si attesta attorno a 12000 m² e il valore massimo è di poco superiore ai 22000 m².

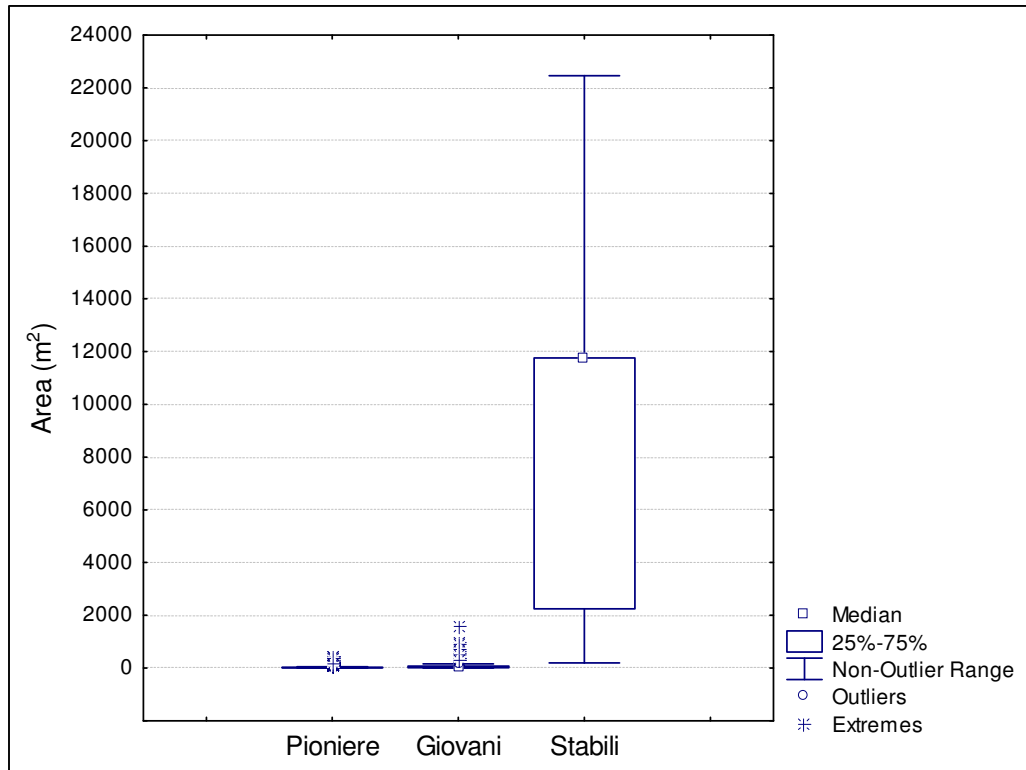


Figura 8.6: area media per le tre tipologie di isole fluviali, Cornino 2011

8.1.1 Altezza del suolo e della vegetazione delle isole fluviali, Cornino 2010-2011

Sulla base del DTM ottenuto dai dati LiDAR è stata determinata l'altezza del suolo alla quale le isole fluviali si sviluppano. L'altezza è da intendere come lo sviluppo verticale del terreno costituente le isole.

La Figura 8.7 mostra la distribuzione dell'altezza media per ciascuna delle tre classi di isole relativamente al 2010. Osservando il grafico si può notare come ci siano delle variazioni lievi tra le isole pioniere e le isole giovani, e differenze piuttosto significative tra queste due tipologie e le isole stabili.

Queste ultime risultano trovarsi a quote più alte rispetto le altre con un valore mediano di 3,3 m; la totalità dei valori è comunque superiore a 3 m e ricade in un *range* piuttosto ristretto. Le isole giovani e le isole pioniere si trovano, invece, a quote più basse, nella maggior parte dei casi sono inferiori al metro. I valori mediani sono pari a 0,5 m per le isole giovani e 0,4 m per le isole pioniere.

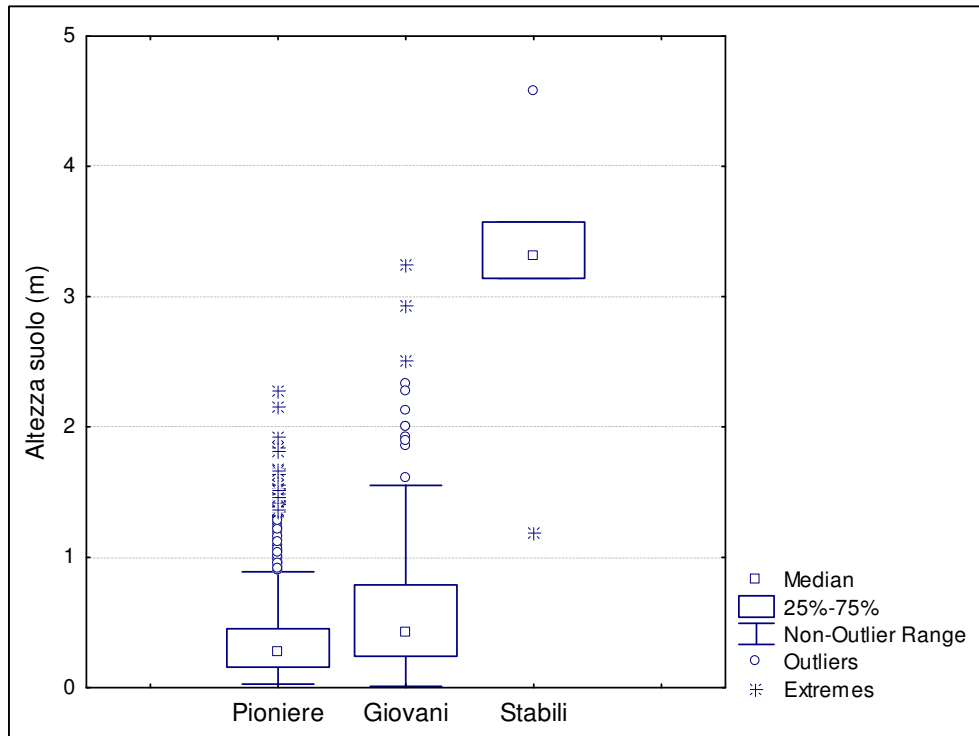


Figura 8.7: altezza media del suolo per le tre tipologie di isole, Cornino 2010

Allo stesso modo per il 2011, l'analisi dell'altezza media del suolo delle isole (Fig. 8.8) ha condotto a risultati simili soprattutto per quanto riguarda la differenza in altezza tra le tre tipologie. Le isole stabili si confermano essere isole aventi altezze maggiori rispetto alle isole giovani ed alle isole pioniere, le quali mantengono valori d'altezza più bassi. Tuttavia, rispetto al 2010 le variazioni più significative sono a carico delle isole stabili i cui valori appaiono leggermente inferiori. Osservando il valore mediano esso è uguale a 2,3 m nelle isole stabili, 0,5 m nelle isole giovani e 0,4m nelle isole pioniere.

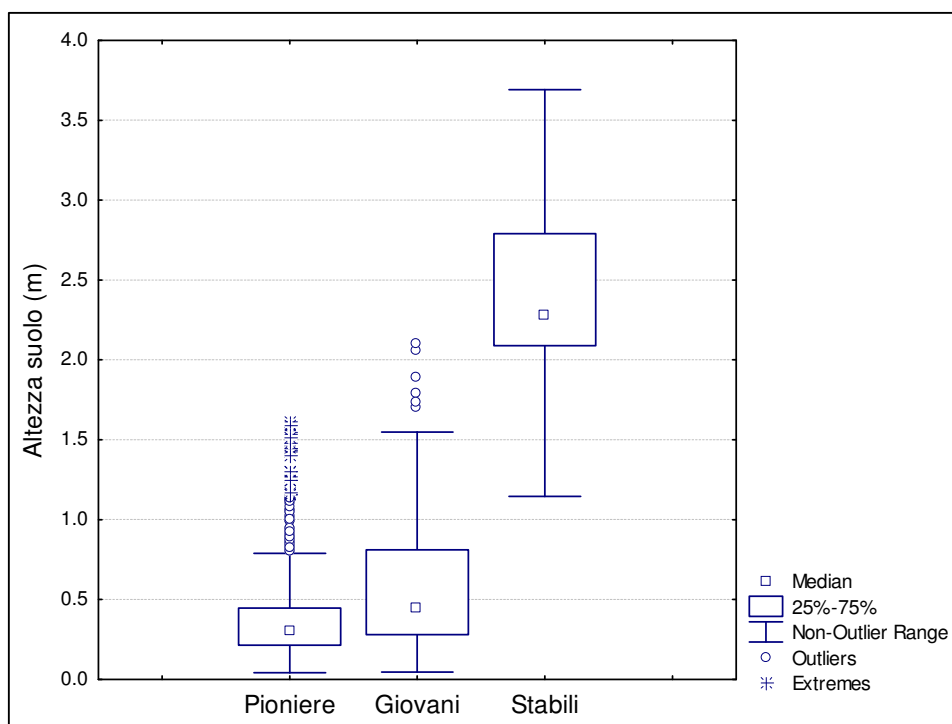


Figura 8.8: altezza media del suolo per le tre tipologie di isole, Cornino 2011

Dall'analisi del CHM è stato possibile determinare alcune caratteristiche relative all'altezza della vegetazione delle isole fluviali, in particolare l'altezza massima e media.

In Figura 8.9 è riportata l'altezza massima della vegetazione per le tre tipologie di isole. Osservando la distribuzione dei valori si nota come ci sia una netta distinzione tra le tipologie. Le isole stabili presentano un valore mediano poco inferiore ai 20 m e un valore massimo che raggiunge i 22 m, la gran parte dei valori ricadono in un *range* variabile tra i 19 m e i 21 m. Le isole giovani si caratterizzano invece per un valore mediano di circa 6 m e un'altezza massima di 15 m; a livello generale invece, la maggioranza dei valori oscilla tra i 4 m e gli 8 m. Infine, le isole pioniere presentano vegetazione che raggiunge un'altezza massima poco superiore ai 6 m (escludendo gli *outliers* e gli estremi) con un valore mediano di 2 m.

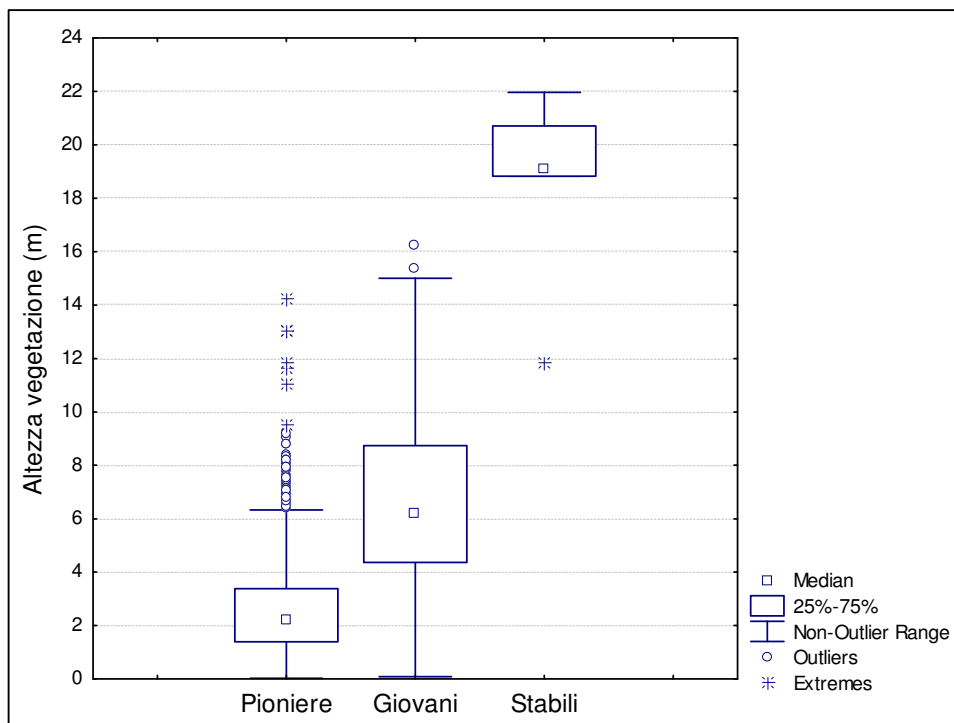


Figura 8.9: altezza massima della vegetazione per le tre tipologie di isole, Cornino 2010

Osservando invece l'altezza media della vegetazione (Fig. 8.10), le isole stabili hanno un valore mediano poco inferiore ai 5 m e un intervallo in cui ricade la maggior parte delle altezze che varia tra 4 m e 4,5 m. Le isole giovani presentano valori molto dispersivi, con valore mediano di 3 m e un intervallo dominante tra 2 m e 4 m. Infine, le isole pioniere si caratterizzano per altezze medie della vegetazione comprese in un *range* tra 0,8 m e 1,5 m ed un valore mediano pari ad 1 m (*outliers* ed estremi esclusi).

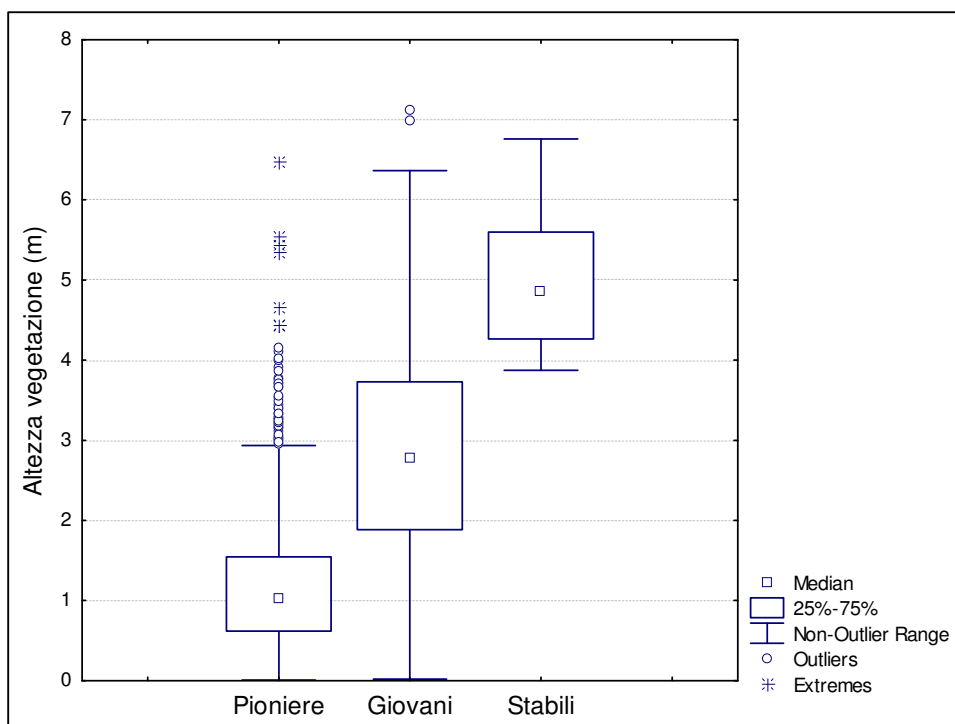


Figura 8.10: altezza media della vegetazione per le tre tipologie di isole, Cornino 2010

Allo stesso modo è stata eseguita l'analisi dell'altezza massima e media della vegetazione per le isole del 2011.

Esaminando l'altezza massima (Fig. 8.11) le isole stabili si caratterizzano per un *range* dominante variabile tra 11 m e 15 m con valore mediano poco superiore ai 12 m. Le altezze massime non superano i 18 m. Le isole giovani mostrano invece un valore mediano pari a 3 m, la maggior parte dei valori ricadenti nell'intervallo compreso tra 1 m-4 m e altezze massime inferiori a 8 m (*outliers* esclusi). Passando infine alle isole pioniere esse sono caratterizzate da una distribuzione dei valori piuttosto ridotta con un *range* ristretto variabile tra 0,5 m e 1,5 m, il valore mediano è pari a 1 m. Escludendo *outliers* ed estremi le altezze massime delle isole pioniere sono sempre inferiori a 3 m.

Analizzando invece le altezze medie (Fig. 8.12) in tutte tre le classi si notano valori estremamente ridotti, quasi mai superiori a 0,6 m (escludendo gli *outliers* ed i valori estremi). Nonostante i bassi valori le isole stabili mantengono comunque altezze medie leggermente più alte rispetto alle isole pioniere e alle isole giovani con altezza mediana di 0,3 m ed un intervallo decisamente ristretto. Isole pioniere e giovani presentano invece una distribuzione delle altezze medie quasi del tutto simile tra loro con valore mediano di 0,1 m ed altezze medie massime di poco superiore a 0,6 m (*outliers* ed estremi esclusi).

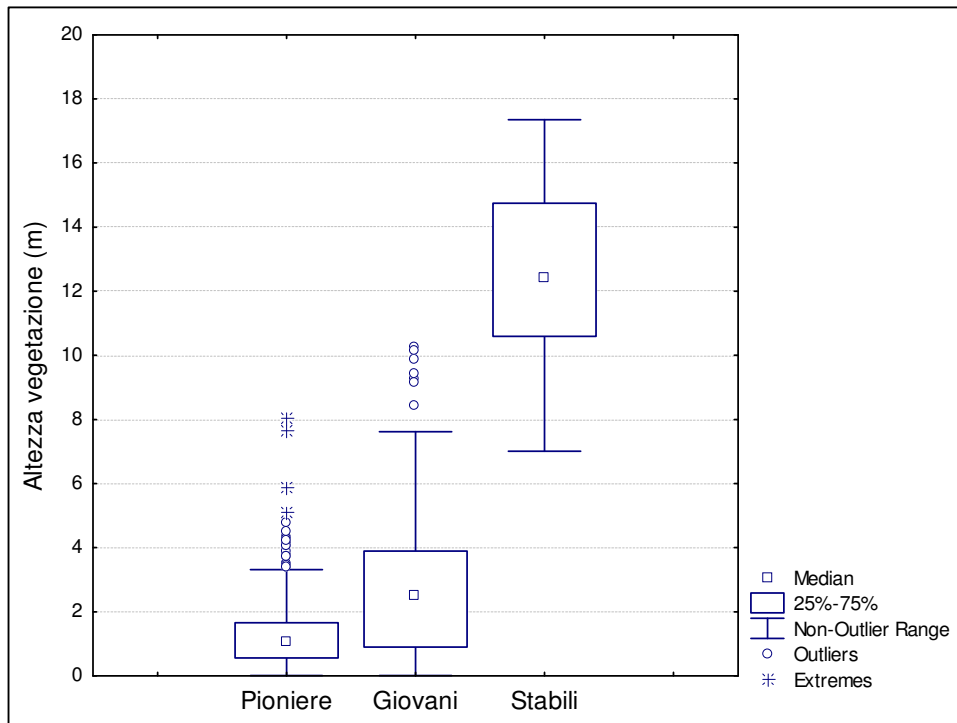


Figura 8.11: altezza massima della vegetazione per le tre tipologie di isole, Cornino 2011

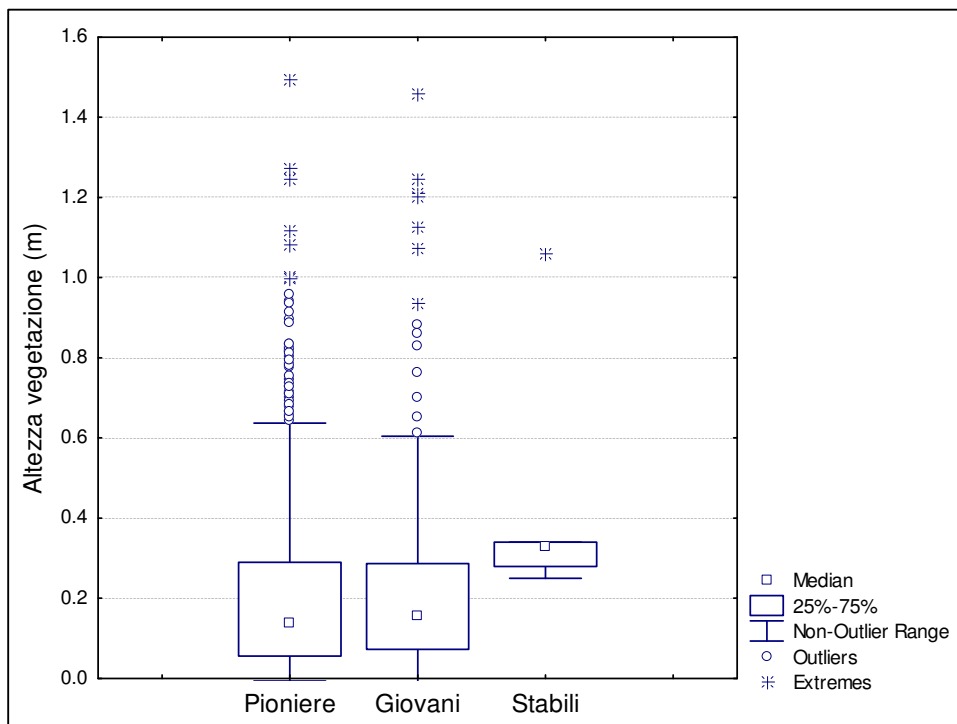


Figura 8.12: altezza media della vegetazione per le tre tipologie di isole, Cornino 2011

8.2 Sottotratto di Flagogna, 2010-2011

La Tabella 8.5 riporta l'area dell'alveo attivo di Flagogna negli anni 2010 e 2011. Si può notare come, nell'intervallo di tempo considerato, non ci siano state variazioni significative se non un leggero allargamento dell'alveo ($0,01 \text{ km}^2$) passando da $1,9 \text{ km}^2$ nel 2010 a $1,91 \text{ km}^2$ nel 2011.

Tabella 8.5: area alveo attivo di Flagogna

| | Alveo attivo (km^2) |
|------|--------------------------------|
| 2010 | 1.9 |
| 2011 | 1.91 |

Nel 2010, lungo il sottotratto di Flagogna sono state identificate 2147 isole, tra le quali le isole pioniere risultano essere il 66%, le isole giovani il 33% e le isole stabili il rimanente 1,4% (Fig. 8.13).

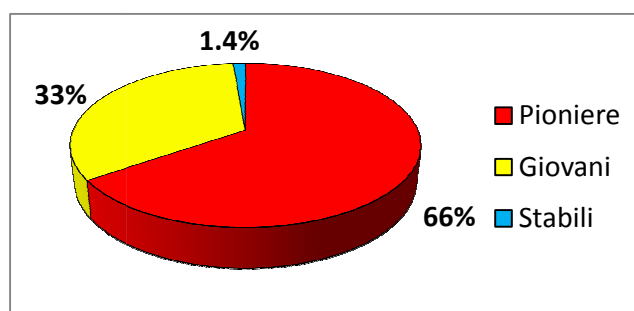


Figura 8.13: distribuzione in % delle isole fluviali, Flagogna 2010

Relativamente all'area totale di ciascuna categoria, le isole stabili, proprio per le loro maggiori dimensioni, ricoprono il 41% dell'intera area fluviale costituita da isole, le isole giovani il 31% e le isole pioniere il 28% (Fig. 8.14).

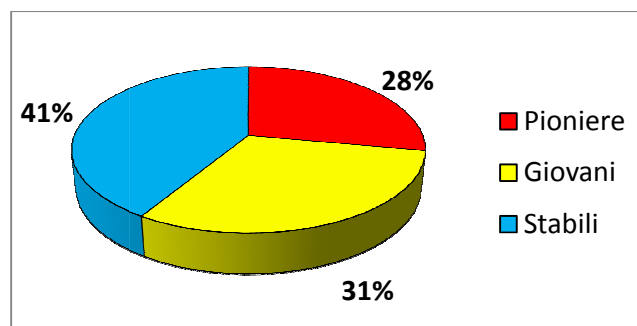


Figura 8.14: area in % di ciascuna categoria rispetto all'area totale costituita da isole, Flagogna 2010

Passando all'anno 2011, sono state localizzate 1527 isole, di cui il 62% sono isole pioniere, il 36% isole giovani ed il restante 1,8% sono isole stabili (Fig. 8.15).

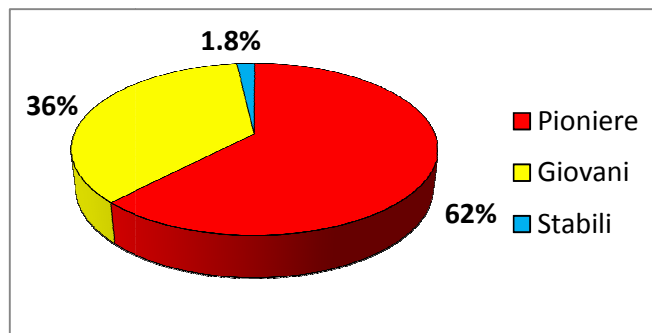


Figura 8.15: distribuzione in % delle isole fluviali, Flagogna 2011

Anche in questo caso, esaminando l'estensione delle tre tipologie di isole, si nota come le isole stabili ricoprono il 44% dell'intera area fluviale costituita da isole, le isole giovani il 32% e, infine, le isole pioniere il restante 24% (Fig. 8.16).

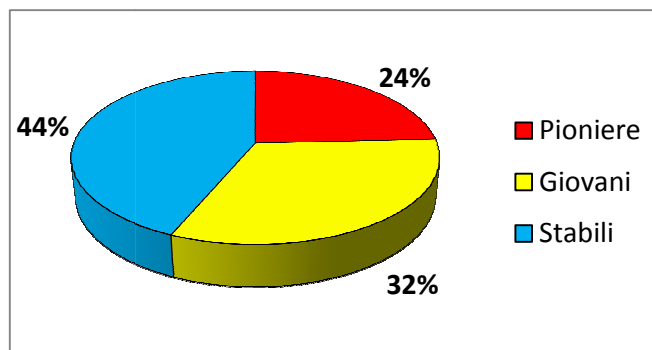


Figura 8.16: area in % di ciascuna categoria rispetto all'area totale costituita da isole, Flagogna 2011

In Tabella 8.6 viene mostrata la distribuzione numerica delle isole nelle tre classi relativa all'intervallo 2010-2011 con la corrispondente variazione in percentuale. A differenza delle isole stabili, in cui la variazione è piuttosto lieve (3%), le isole pioniere e quelle giovani subiscono una diminuzione più significativa pari al 32% per le prime, passando da 1404 isole nel 2010 a 950 nel 2011, e al 23% per le seconde riducendosi da 714 isole nel 2010 a 549 nel 2011.

Tabella 8.6: distribuzione numerica e relativa variazione % delle isole negli anni 2010-2011, sottotratto di Flagogna

| | 2010 | 2011 | Variazione % |
|----------|------|------|--------------|
| Pioniere | 1404 | 950 | -32% |
| Giovani | 714 | 549 | -23% |
| Stabili | 29 | 28 | -3% |
| Totale | 2147 | 1527 | |

Considerando la numerosità delle isole rispetto all'area dell'alveo attivo (N/km^2), nel 2010 le isole pioniere mostrano una numerosità di $738,9 N/km^2$ che si riduce a $497,4 N/km^2$ nel 2011. Situazione simile, seppur con una diminuzione più contenuta, si ha per le isole giovani la cui numerosità passa da $375,8 N/km^2$ nel 2010 a $287,4 N/km^2$ nel 2011. Per quanto riguarda le isole stabili la variazione è decisamente più ridotta passando da $15,3 N/km^2$ nel 2010 a $14,7 N/km^2$ nel 2011 (Tab. 8.7).

Tabella 8.7: numerosità delle isole per km^2 d'alveo attivo, sottotratto di Flagogna

| N/km^2 | 2010 | 2011 |
|----------|-------|-------|
| Pioniere | 738.9 | 497.4 |
| Giovani | 375.8 | 287.4 |
| Stabili | 15.3 | 14.7 |

La Tabella 8.8 riporta, per ciascuna tipologia di isole e per i due anni presi in considerazione, l'estensione delle isole rispetto l'alveo attivo (m^2/ha). Anche in questo caso si notano valori differenti per i due anni, nel 2010 le isole pioniere presentano un'estensione di $258,3 m^2/ha$ che si riduce a $189,4 m^2/ha$ nel 2011 con una diminuzione del 26,7%. Nelle altre due categorie le variazioni appaiono più contenute, in particolare le isole giovani mostrano una diminuzione dell'11,6% con un'estensione che varia da $284,9 m^2/ha$ nel 2010 a $251,9 m^2/ha$ nel 2011, per le isole stabili invece l'estensione si riduce del 10,6% passando da $381,9 m^2/ha$ nel 2010 a $341,5 m^2/ha$ nel 2011.

Tabella 8.8: estensione delle isole rispetto l'alveo attivo (m^2/ha), sottotratto di Flagogna

| m^2/ha | 2010 | 2011 | Variazione % |
|----------|-------|-------|--------------|
| Pioniere | 258.3 | 189.4 | -26.7 |
| Giovani | 284.9 | 251.9 | -11.6 |
| Stabili | 381.9 | 341.5 | -10.6 |

Come per il sottotratto di Cornino, allo stesso modo per Flagogna è stata condotta l'analisi dell'area di ciascuna isola individuata.

La Figura 8.17, relativa al 2010, mostra la distribuzione dei valori dell'area media per le tre classi. Quelle appartenenti alle categorie pioniere e giovani sono isole con estensioni assai ridotte e simili tra loro, diversamente dalle stabili dove è invece possibile individuare un range dominante più ampio variabile tra $200 m^2$ e $2000 m^2$ con valore mediano di $300 m^2$. Escludendo gli *outliers* e gli estremi, l'estensione massima raggiunta dalle isole stabili è pari a $3000 m^2$. Nel caso delle isole giovani le aree si riducono notevolmente rimanendo sempre al disotto di $200 m^2$; in questo caso il valore mediano è pari a $40 m^2$. Infine, le isole pioniere mostrano aree ancora più ridotte con un valore mediano di circa $20 m^2$ e valori massimi che non superano gli $80 m^2$ (estremi esclusi).

Risultati del tutto analoghi sono stati ottenuti nell'analisi relativa al 2011 (Fig. 8.18).

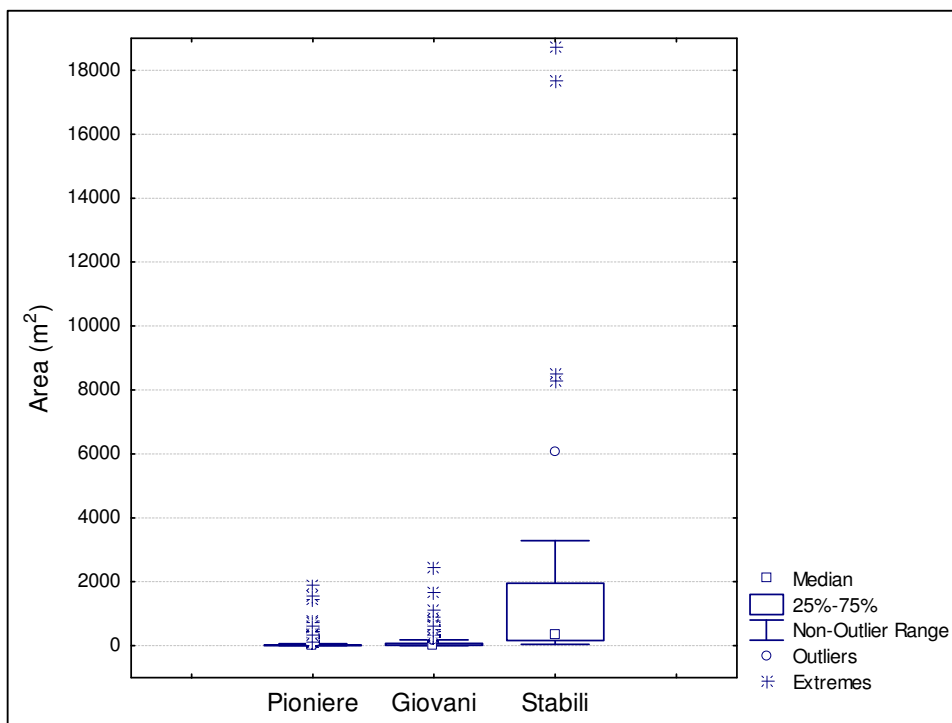


Figura 8.17: area media per le tre tipologie di isole fluviali, Flagogna 2010

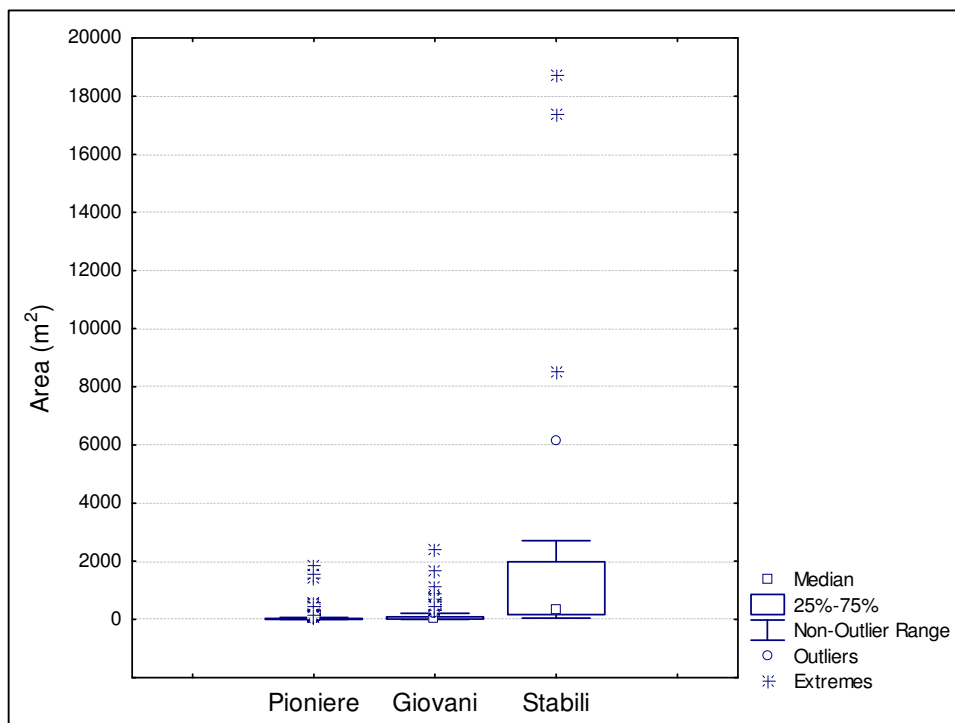


Figura 8.18: area media per le tre tipologie di isole fluviali, Flagogna 2011

8.2.1 Altezza del suolo e della vegetazione delle isole fluviali, Flagogna 2010-2011

In Figura 8.19 è riportata l'altezza media del suolo delle isole fluviali di Flagogna relativa al 2010. I dati sono stati ottenuti sulla base del DTM ricavato dai dati LiDAR.

È possibile osservare come ci siano differenze abbastanza significative tra le tre tipologie di isole soprattutto per quanto riguarda le isole stabili. Esse si mostrano ancora una volta come le isole situate a quote più alte rispetto alle altre due tipologie. Nelle isole stabili il valore mediano è di poco inferiore a 1,5 m e la maggior parte dei valori ricadono nell'intervallo compreso tra 1 m e 2,5 m. Tuttavia, in taluni casi, l'altezza del suolo delle isole raggiunge abbondantemente i 4 m.

Nel caso delle isole giovani e delle isole pioniere, il valore mediano si attesta attorno a 0,5 m per le prime e 0,3 m per le seconde; in entrambi i casi la maggior parte dei valori si colloca sotto al metro, ad eccezione delle isole giovani in cui si riscontrano altezze medie massime che raggiungono quasi i 2 m (escludendo *outliers* ed estremi).

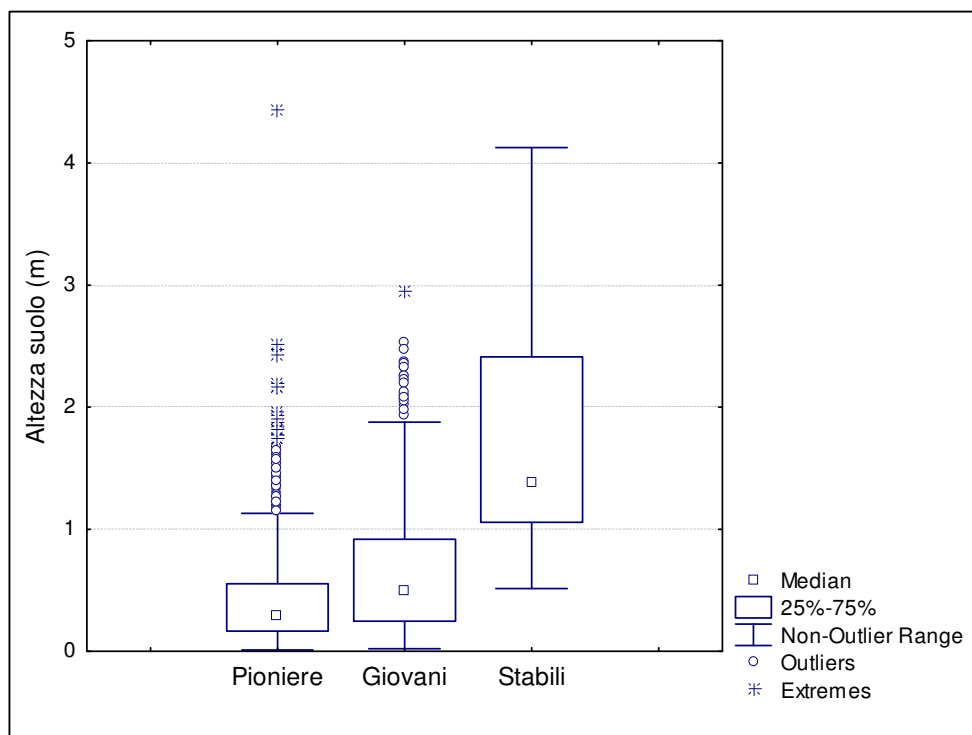


Figura 8.19: altezza media del suolo per le tre tipologie di isole, Flagogna 2010

Per quanto riguarda l'altezza media del suolo delle isole relativa al 2011, l'analisi ha portato a risultati piuttosto simili, con una distribuzione generale debolmente inferiore, (Fig. 8.20). In particolare, la categoria delle isole stabili presenta un valore mediano lievemente più basso rispetto al 2010, che si attesta attorno a 1,5 m. Isole giovani e isole pioniere, invece, mantengono pressoché invariata l'altezza mediana del suolo, circa 0,5 m per entrambe le classi. Osservando i valori massimi dell'altezza media (*outliers* ed estremi esclusi) si nota anche in questo caso una tendenza leggermente inferiore rispetto al 2010 soprattutto nelle isole stabili il cui valore massimo non raggiunge i 3,5 m. Isole pioniere e isole giovani mantengono invariati i valori.

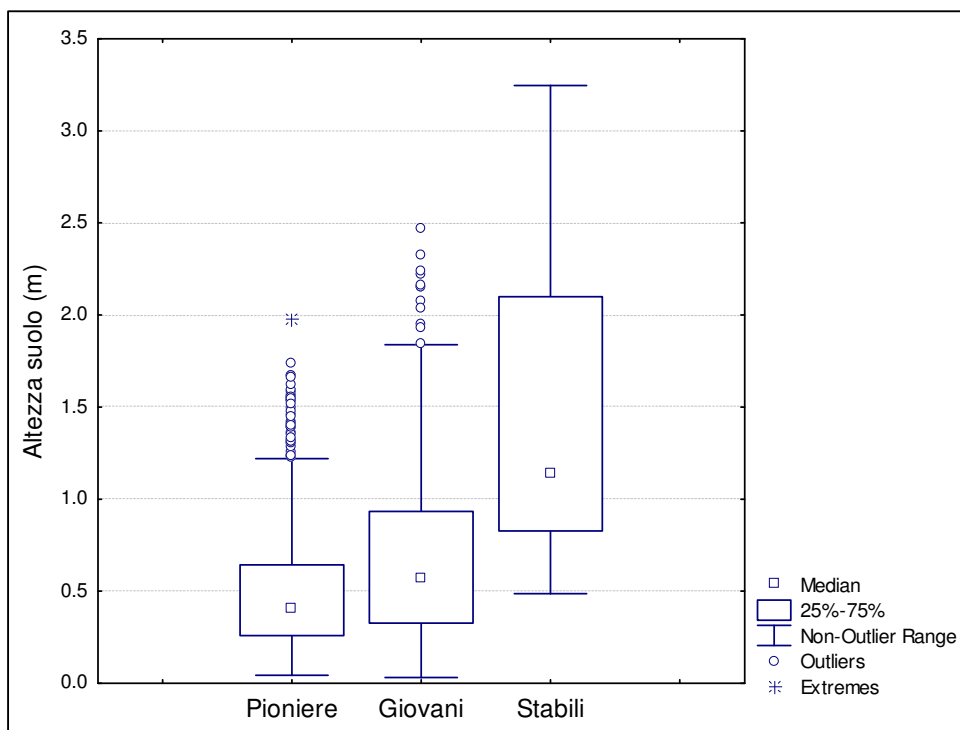


Figura 8.20: altezza media del suolo per le tre tipologie di isole, Flagogna 2011

Utilizzando come base topografica il CHM, sono state determinate le altezze massime (Fig. 8.21) e medie della vegetazione presente nelle isole.

Il sottotratto di Flagogna è caratterizzato da isole la cui vegetazione raggiunge altezze molto più elevate rispetto al sottotratto di Cornino. Le isole stabili, infatti, rappresentate da un valore mediano di circa 16 m, hanno valori massimi che raggiungono i 32 m e la maggior parte dei valori ricade nell'intervallo tra 10 m e 22 m. Per quanto riguarda le isole giovani, il valore mediano è attorno a 6 m anche se l'intervallo dominante varia tra 5 m e 9 m. In questo caso, escludendo gli *outliers*, i valori massimi si attestano attorno ai 16 m. L'ultima categoria di isole, le pioniere, si presenta con un valore mediano di 4 m ed un *range* dominante compreso tra 3 m e 5 m, perfettamente conforme a quanto assunto nella distinzione tra le tre tipologie. Tuttavia, ci sono valori che raggiungono altezze massime anche di 8 m (*outliers* esclusi).

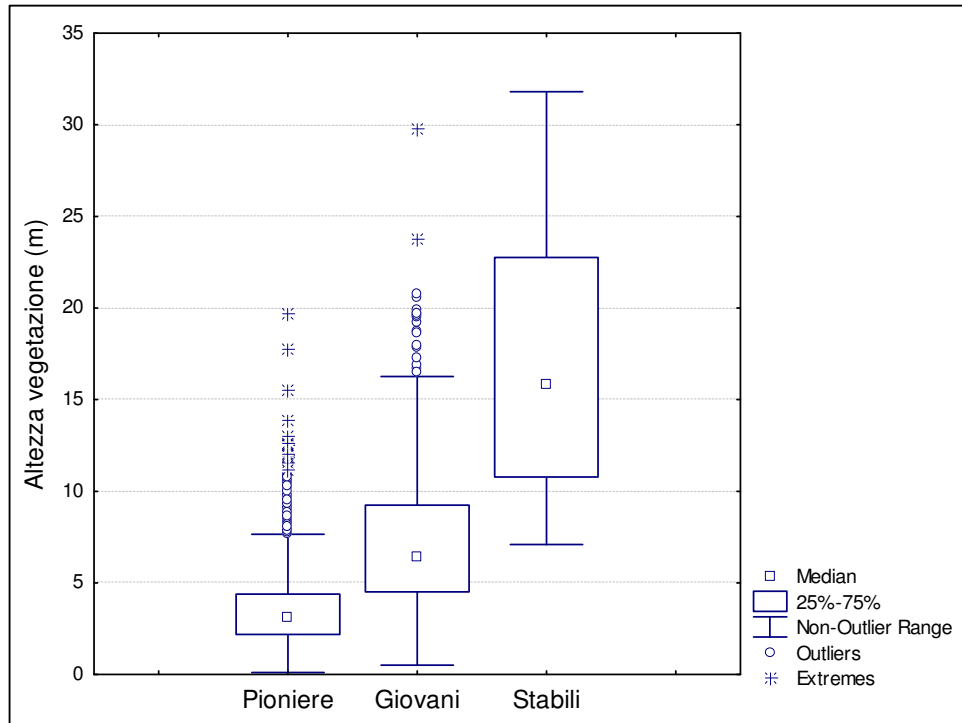


Figura 8.21: altezza massima della vegetazione per le tre tipologie di isole, Flagogna 2010

Di seguito è riportato il grafico relativo all'altezza media per le tre tipologie di isole (Fig. 8.22). Osservando il grafico si può notare come anche in questo caso i valori differiscano significativamente tra le tre tipologie. Il valore mediano è pari a 5 m per le isole stabili, 2,5 m per le isole giovani e 1,5 m per le isole pioniere. Nel caso delle isole stabili i valori sono abbastanza dispersivi, con un *range* dominante tra 4 m e 7 m ed un valore massimo superiore a 10 m. Diversamente per le isole giovani e quelle pioniere dove, tralasciando gli *outliers* e gli estremi, i valori rimangono piuttosto contenuti in un intervallo tra 1 m e 2 m per le isole pioniere e 2 m e 3,5 m per le isole giovani.

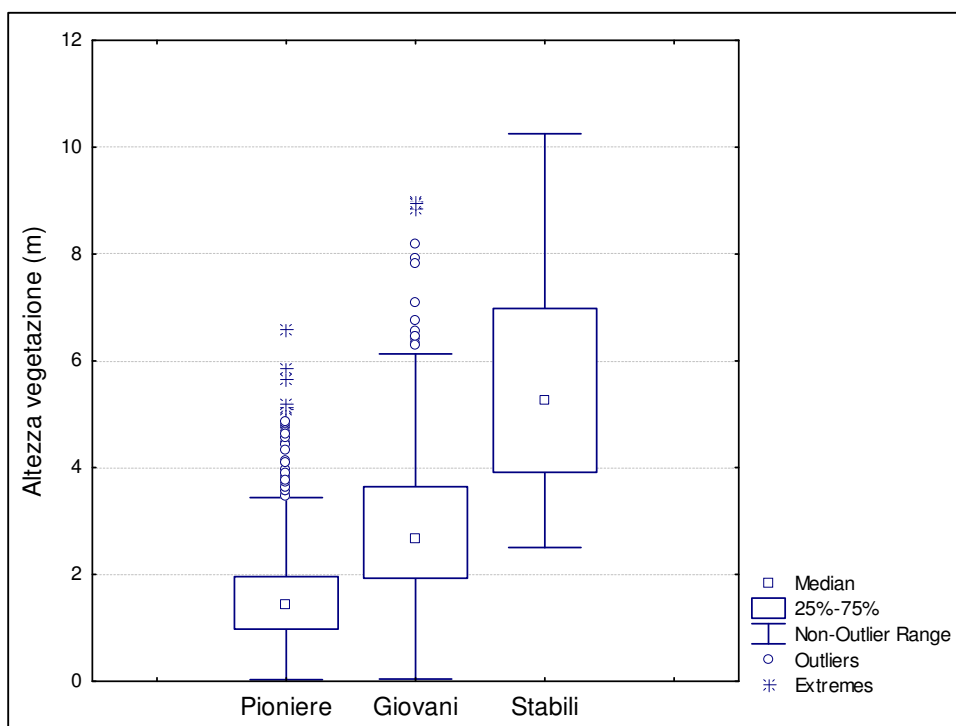


Figura 8.22: altezza media della vegetazione per le tre tipologie di isole, Flagogna 2010

I successivi grafici mostrano i valori, relativi al 2011, dell'altezza massima (Fig. 8.23) e media (Fig. 8.24) della vegetazione delle isole.

Analizzando l'altezza massima è evidente una chiara distinzione a seconda della tipologia di isole. Le isole stabili presentano, ancora una volta, i valori più alti con un'altezza mediana di circa 9 m e la gran parte dei valori compresi tra 6 m e 16 m. L'altezza massima raggiunta dalla vegetazione è pari a 28 m, la minima invece 3 m. Le isole giovani si caratterizzano invece per un valore mediano di 3 m ed un intervallo dominante variabile tra 2 m e 5 m. Escludendo gli *outliers* e gli estremi, l'altezza massima è uguale a 9 m. Valori ancora più bassi caratterizzano le isole pioniere, le quali mostrano un'altezza mediana di 2 m e massima di 5 m (*outliers* ed estremi esclusi).

Considerando, poi, l'altezza media i valori risultano piuttosto simili tra le isole pioniere e quelle giovani con un valore mediano di poco superiore a 0,2 m ed un *range* dominante compreso tra 0,1 m e 0,4 m (*outliers* ed estremi esclusi). Leggermente diversa è la situazione per le isole stabili che si caratterizzano per un'altezza mediana di 0,5 m ma con valori medi massimi che raggiungono anche 1,5 m di altezza.

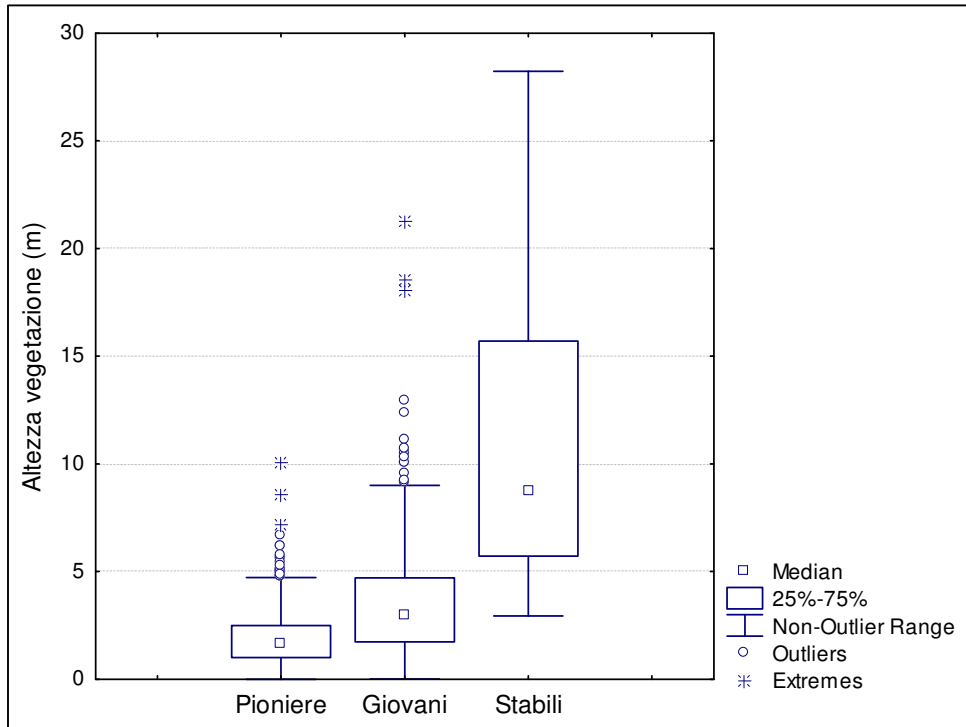


Figura 8.23: altezza massima della vegetazione per le tre tipologie di isole, Flagogna 2011

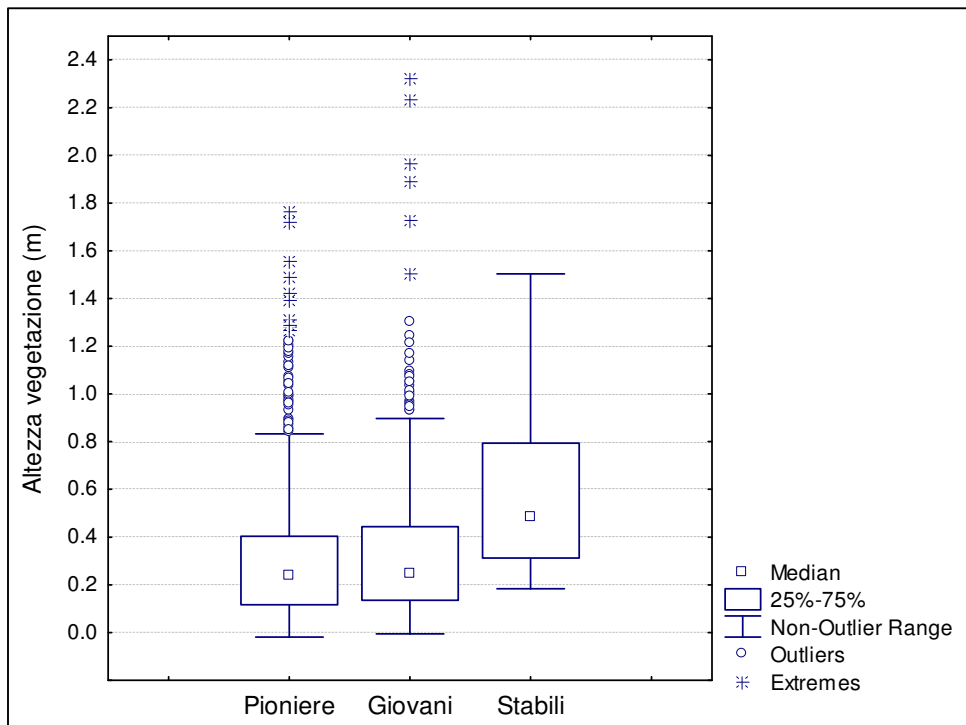


Figura 8.24: altezza media della vegetazione per le tre tipologie di isole, Flagogna 2011

8.3 Parametri dendrometrici della vegetazione delle isole fluviali

I dati, raccolti durante i rilievi in campo condotti nei due sottotratti di studio, sono stati successivamente elaborati al fine di ricavare la relazione tra il diametro delle piante e la loro altezza.

In Figura 8.25 è riportata tale relazione riferita agli alberi campionati nelle isole del sottotratto di Cornino. Osservando il grafico si può notare come, relativamente alla specie, il tratto di Cornino sia caratterizzato prevalentemente da alberi appartenenti al genere *Populus*, più sporadica risulta invece la presenza del genere *Alnus*. Per quanto riguarda la distribuzione dei valori è possibile vedere come, nel caso dei pioppi, essi si distribuiscano in modo piuttosto lineare e costante andando ad occupare l'intero *range* dei diametri rilevati. Il ridotto campionamento di *Alnus* e *Platanus* non permette di ricavare alcuna relazione tra il loro diametro e l'altezza. Tra i pioppi censiti, quello di maggiori dimensioni presenta un diametro di 40 cm e altezza di 22 m, altezza massima pienamente concorde con quanto restituito dal CHM.

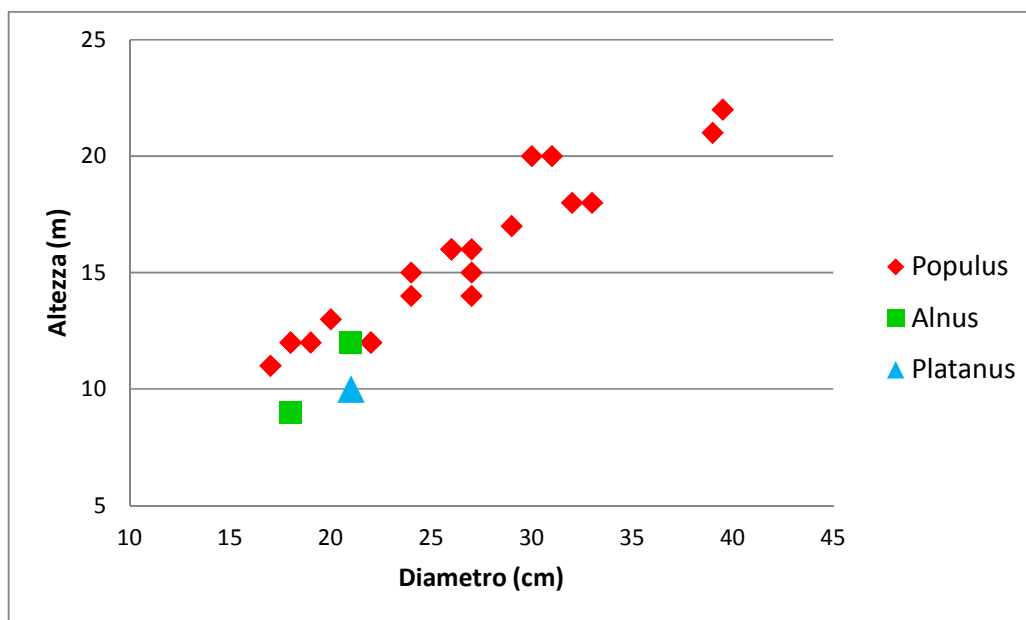


Figura 8.25: relazione diametro e altezza delle piante campionate lungo il sottotratto di Cornino

In Figura 8.26 viene illustrata la relazione tra il diametro e l'altezza degli individui censiti nelle isole fluviali del sottotratto di Flagogna.

Rispetto a Cornino le isole fluviali di Flagogna mostrano una composizione vegetazionale più articolata dove, oltre al genere *Populus* che rimane essere dominante, compaiono in maggiori quantità anche i generi *Salix* ed *Alnus*. La distribuzione dei valori si diversifica a seconda del

genere: in *Salix* e *Populus* è possibile individuare una relazione lineare tra il diametro e l'altezza in cui a diametri maggiori corrispondono altezze elevate. Anche in questo caso l'individuo più grande rilevato risulta essere un pioppo con diametro di 47 cm e altezza di 28 m. Il genere *Alnus*, invece, si discosta da questo tipo di distribuzione in quanto i valori si distribuiscono in modo casuale senza alcuna relazione ma rimangono comunque all'interno di un range ristretto variabile tra 14 cm e 24 cm in diametro e 8 m e 12 m in altezza.

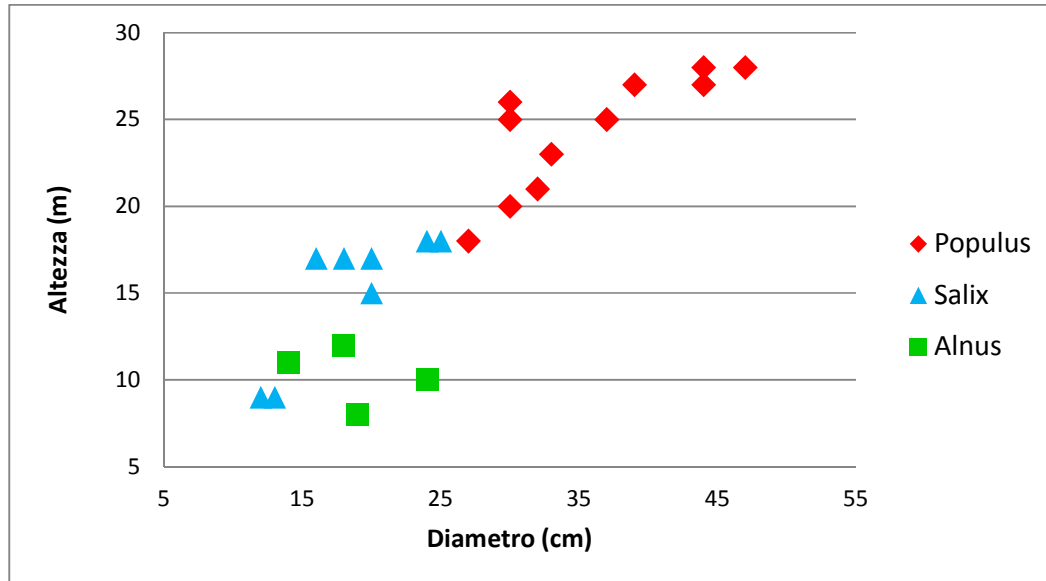


Figura 8.26: relazione diametro e altezza delle piante campionate lungo il sottotratto di Flagogna

9 Discussioni

Dai risultati precedentemente illustrati, si è visto come i due sottotratti abbiano subito un lieve allargamento dell'alveo fluviale a seguito delle frequenti piene verificatesi nell'intervallo di tempo considerato.

Il sottotratto di Cornino mostra variazioni di entità maggiore (0,04 km²) rispetto a quello di Flagogna (0,01 km²) e questo è probabilmente dovuto alla diversa configurazione morfologica dei due sottotratti. Cornino, caratterizzato da prevalente morfologia *braided*, subisce un allargamento dell'alveo in diversi punti: oltre ad un rimaneggiamento dell'intera sponda sinistra si possono evidenziare due zone, una a monte del sottotratto in sinistra idrografica ed una in destra idrografica, in cui la forza erosiva della corrente ha eroso le sponde generando così l'allargamento dell'alveo. Diversa appare, invece, la situazione a Flagogna, caratterizzato da prevalente morfologia *wandering*. Qui, oltre ad una variazione della sinuosità, non si evidenziano alcune erosioni significative della piana inondabile, tranne un leggero rimodellamento della sponda destra limitatamente alla zona di monte. La maggiore stabilità di questo ambiente fluviale, nei confronti degli eventi di piena, può essere ricondotta a due fattori principali legati alle caratteristiche morfologiche del sottotratto. In sponda destra la presenza di un gran numero di isole, anche di considerevoli dimensioni, contribuisce al confinamento dei deflussi in sinistra idrografica garantendo, così, una maggiore protezione nei confronti della piana adiacente. In sponda sinistra, invece, la presenza del Monte di Ragogna, oltre a costringere il canale a scorrere nella stessa posizione limitandone gli spostamenti, non permette un ulteriore allargamento dell'alveo.

È chiaro, dunque, come le caratteristiche del sottotratto abbiano un ruolo fondamentale nell'influenzare le risposte del fiume agli eventi di piena (Rigon *et al.*, 2012). A differenza dei sistemi pseudomeandriiformi dove il grado di stabilità è maggiore, gli ambienti a canali intrecciati si distinguono, invece, proprio per un'elevata dinamicità ed instabilità in cui anche piene non eccezionali possono generare processi morfologicamente rilevanti (Picco *et al.*, 2012).

L'analisi delle foto aeree ha permesso di analizzare la numerosità e la distribuzione delle isole fluviali. Come già documentato da diversi autori (Gurnell *et al.*, 2001; Tockner *et al.*, 2003) il Tagliamento presenta, se comparato ad altri fiumi quali Brenta e Piave, un elevato numero di isole a testimonianza del basso impatto antropico che da sempre contraddistingue tale fiume.

Per quanto riguarda la loro distribuzione nelle tre tipologie individuate, si è visto come, nonostante la netta prevalenza in numerosità delle isole pioniere, esse, per la loro ridotta estensione, vadano a ricoprire una limitata parte dell'area totale costituita da isole. Al contrario, le isole stabili, seppur numericamente inferiori (5 isole a Cornino e 29 isole a Flagogna), hanno estensioni così grandi

tanto da ricoprire quasi la metà dell'area totale costituita da isole (49% a Cornino e 41% a Flagogna). In particolare per le isole stabili, si è visto come la loro numerosità sia maggiore a Flagogna (1,4% nel 2010 e 1,8% nel 2011) rispetto a Cornino (0,3% nel 2010 e 0,4% nel 2011). Questo aspetto è probabilmente da ricondurre, ancora una volta, alla maggiore stabilità del sottotratto di Flagogna nonché alla preminente localizzazione delle isole in destra idrografica a differenza del canale che scorre per lo più in sinistra idrografica.

Per quanto riguarda le dinamiche delle isole fluviali si è visto come esse abbiano subito una forte riduzione, tra il 2010 ed il 2011, causata dai numerosi eventi di piena verificatisi nell'arco temporale considerato. L'entità delle variazioni differisce notevolmente a seconda delle tipologie di isole; la maggiore riduzione si ha a carico delle isole pioniere le quali subiscono una consistente diminuzione del 40% nel sottotratto di Cornino e del 32% nel sottotratto di Flagogna. Questa notevole riduzione è da imputare alla forza erosiva delle piene sulla struttura ancora troppo giovane di queste isole. Vale la pena, infatti, sottolineare come non sia mai stata riscontrata una rimodellazione di queste isole bensì la loro totale eliminazione, testimoniata dalla presenza di alberi sradicati ben visibili dalle foto aeree. Inoltre si è visto come buona parte delle isole pioniere rimaste anche dopo il passaggio delle piene fossero posizionate in condizioni tali da non subire direttamente la forza della corrente perché protette, ad esempio, da nuclei di vegetazione giovane o stabile. Riguardo le isole giovani, anch'esse sono state considerevolmente rimaneggiate dalle piene, si presume soprattutto da quelle con tempo di ritorno di 15 anni, diminuendo del 30% a Cornino e del 23% a Flagogna. Oltre alla completa eliminazione di alcune isole giovani, si è notato, in diversi casi, una loro parziale rimodellazione esclusivamente nelle zone di margine, a testimonianza del maggiore grado di stabilità rispetto alle isole pioniere. Infine, relativamente alle isole stabili si è visto come esse si caratterizzino per dinamiche completamente diverse. Data la conformazione di queste isole, la loro estensione e l'altezza della vegetazione, le isole stabili sono state interessate, più che da una diminuzione numerica, da un rimaneggiamento nelle zone di margine. Interessante sottolineare come, ad eccezione di un singolo nucleo stabile nel sottotratto di Flagogna, non sia mai stata osservata una rimozione completa di isole stabili ma solamente una loro rimodellazione con asportazione di aree, più o meno grandi, in seguito all'azione della corrente. A conferire tale stabilità a questa tipologia di isole concorre, oltre all'altezza del suolo su cui si sviluppano, anche l'elevata altezza della vegetazione che, disponendo di sviluppati apparati radicali, garantisce un maggiore ancoraggio e stabilizzazione del suolo.

È chiaramente evidente, quindi, come ci sia una stretta connessione tra le dinamiche delle isole e l'intensità delle piene; i due eventi con tempo di ritorno stimato di 15 anni così come le altre cinque piene con tempo di ritorno di 10-12 anni hanno avuto un ruolo fondamentale nel determinare

variazioni morfologiche a carico delle isole. Queste osservazioni rispecchiano quanto affermato da Bertoldi *et al.* (2009) riguardo il fiume Tagliamento, in cui stimavano in 10-15 anni il tempo di ritorno di quelle portate capaci di determinare significative erosioni delle isole così come di modificare la forma e la planimetria del fiume. Inoltre, risultati simili sono stati ottenuti da Comiti *et al.* (2011) riguardo il fiume Piave dove, piene con tempo di ritorno di 10-15 anni avvenute nel 1993 e nel 2002 hanno determinato significative diminuzioni della copertura vegetale nonché forti erosioni delle zone marginali delle isole.

Per quanto riguarda le analisi condotte sul DTM, ottenuto a partire da dati LiDAR, si è visto come, in accordo con quanto ci si aspettava, le isole stabili si sviluppano ad altezze del suolo maggiori rispetto alle isole giovani e pioniere, nella maggior parte dei casi i valori delle altezze medie del suolo oscillano tra 1,5 m e 3,5 m. Questo aspetto è da ricondurre, come evidenziato da Picco (2010), al maggiore strato di sedimenti fini presente in superficie la cui deposizione è probabilmente dovuta alla maggiore resistenza del flusso che, a sua volta, favorisce la crescita della vegetazione con ulteriore stabilizzazione dell'isola. Al contrario, le isole giovani e le isole pioniere hanno valori d'altezza media del suolo piuttosto simili tra loro, anche se, in entrambi i sottotratti, le isole giovani mostrano altezze del suolo leggermente superiori alle isole pioniere, manifestando così un maggior grado di stabilità. Le isole pioniere sono elementi molto instabili la cui persistenza nel medio termine potrebbe essere garantita o da una riduzione nella frequenza delle piene o da un maggiore tasso di crescita della vegetazione tra una piena e l'altra in modo tale da aumentare la resistenza al flusso.

Passando alle analisi condotte sul CHM, relative all'altezza massima e media della vegetazione costituente le isole, si è visto come i valori differiscono significativamente tra le tre tipologie di isole. In accordo con quanto detto prima riguardo la stabilità e lo spessore di sedimenti fini presenti sulle isole stabili, esse si caratterizzano per una vegetazione capace di raggiungere altezze nettamente superiori rispetto alle altre due tipologie di isole. Mentre nel sottotratto di Cornino, caratterizzato da elevata dinamicità, le altezze massime si attestano attorno a 20 m e 22 m, nel sottotratto di Flagogna esse superano anche i 30 m. Questa differenza può probabilmente essere dovuta, oltre alla diversa morfologia dei sottotratti, alla prevalente localizzazione delle isole in destra idrografica a differenza del canale che scorre per lo più in sinistra idrografica, questo fa sì, quindi, che le isole siano meno disturbate dagli eventi di piena. Nelle isole giovani e nelle isole pioniere, invece, le altezze degli alberi sono decisamente più basse e questo trova giustificazione con quanto affermato prima: una ridotta altezza del suolo fa sì che esse siano interessate anche da piene ordinarie. Lungo il corso del fiume Tagliamento, definito da Ward *et al.* (1999) come un fiume dal regime idrologico piuttosto dinamico, l'abbondanza degli eventi di piena a cui esso è

soggetto fa sì che il tempo che intercorre tra una piena e l'altra non sia sufficiente a garantire una considerevole crescita della vegetazione in queste due tipologie di isole.

Per ciò che riguarda le altezze massime e medie della vegetazione si è visto come ci sia una netta differenza tra il 2010 ed il 2011. Nel 2011 i valori, soprattutto quelli relativi all'altezza media, appaiono drasticamente più bassi, tanto da rimanere quasi sempre al di sotto di 0,5 m anche nel caso delle isole stabili. Questa cospicua variazione dei valori non è legata a cambiamenti nella copertura vegetale bensì al periodo in cui è stato eseguito il volo LiDAR. A differenza del primo volo eseguito in agosto 2010 in piena stagione vegetativa, il secondo è stato condotto ad aprile 2011 a stagione vegetativa non ancora completamente iniziata. La carenza di copertura vegetale fa sì che durante il rilievo LiDAR vengano prodotti meno segnali di ritorno poiché il sensore laser, incontrando meno ostacoli lungo il suo percorso (foglie, rami, ecc), raggiunge direttamente la superficie del terreno andando così a sottostimare la reale altezza della vegetazione.

Si può, dunque, affermare come il periodo di ripresa sia fondamentale nel garantire l'affidabilità dei risultati.

10 Conclusioni

I risultati ottenuti con il presente studio evidenziano chiaramente come le isole fluviali rappresentino una delle caratteristiche più naturali che si possono riscontrare all'interno di un sistema fluviale dal ridotto impatto antropico.

È risaputo, infatti, che l'alto-medio corso del Tagliamento si contraddistingue per una minima presenza di interventi antropici che hanno permesso a tale fiume di mantenere un alto livello di naturalità, a cui si associa una forte dinamicità del regime idrologico proprio per la ridotta alterazione dei deflussi idrici.

Data questa naturalità del Tagliamento, si può comprendere come l'insediamento e la persistenza della vegetazione ripariale, così come le variazioni morfologiche a carico delle isole e dell'alveo, siano fenomeni dominati principalmente da processi fluviali.

Anche a seguito di piene ordinarie il Tagliamento è soggetto a variazioni morfologiche, quali rimaneggiamenti delle isole fluviali, erosioni spondali ed allargamenti dell'alveo attivo, indotte essenzialmente dalle frequenti piene che periodicamente si verificano. L'entità di tali variazioni appare essere strettamente correlata alla dinamicità morfologica del territorio: nel caso esaminato, la morfologia *braided* di Cornino è soggetta a modificazioni più significative rispetto a quella *wandering* di Flagogna.

I risultati delle analisi relative alle isole fluviali hanno messo in evidenza come esse siano degli elementi morfologici molto dinamici che si differenziano tra loro per una serie di fattori: a variare, oltre all'estensione e alle dimensioni della vegetazione, varia anche l'altezza del suolo su cui si sviluppano, conferendo all'isola un divergo grado di stabilità nonché una diversa capacità di resistenza nei confronti delle piene.

Il disturbo dato dagli eventi di piena è importante nell'erosione delle isole e nei margini della piana boscata perché garantisce il mantenimento di una zona attiva molto dinamica, con la presenza di più canali ed isole. In questo contesto, la forte variabilità delle portate che contraddistingue il Tagliamento assume un ruolo fondamentale nella conservazione di questi ambienti fluviali. Infatti, un eventuale aumento dell'impatto antropico potrebbe comportare l'alterazione dei deflussi idrici con una possibile diminuzione nella frequenza delle piene. A scala temporale di medio-lungo periodo, queste modificazioni nel regime idrologico potrebbero portare ad una maggiore stabilizzazione delle isole ma, allo stesso tempo, ad un cambiamento delle forme fluviali con la fusione di isole alla piana alluvionale e, di conseguenza, la semplificazione dei modelli pluricursali.

Per quanto riguarda l'impiego di dati LiDAR in questo tipo di studio vale la pena puntualizzare come il periodo di acquisizione dei dati abbia giocato un ruolo fondamentale nell'influenzare i risultati delle analisi. Si ritiene importante, quindi, sottolineare come il periodo di acquisizione dei

dati dovrebbe tener conto anche delle finalità delle analisi. Nel caso di progetti finalizzati esclusivamente alla realizzazione di DTM le riprese possono essere eseguite indifferentemente dal periodo vegetativo, anche se il periodo migliore risulta essere quello prima dello scoppio vegetativo in quanto l'assenza di copertura vegetale permette un aumento del numero di punti a terra. Al contrario, per studi legati alla stima di parametri dendrometrici o della biomassa forestale che richiedono, dunque, la realizzazione di un CHM, sarebbe opportuno che le riprese aeree coincidessero con il massimo sviluppo vegetativo.

In conclusione, con questo studio si è voluto ottenere una panoramica generale riguardo le caratteristiche e le dinamiche che contraddistinguono le isole fluviali in un fiume morfologicamente ancora intatto. Il fatto che corsi d'acqua antropizzati presentino un ridotto numero di isole avvalorano ancor di più il ruolo e l'importanza che le isole rivestono al fine di garantire la giusta complessità ecosistemica negli ambienti fluviali.

La disponibilità di informazioni riguardanti le relazioni tra isole e fiumi potrebbe essere, a nostro avviso, un valido aiuto sia per azioni di ripristino e rinaturalizzazione nei sistemi fluviali antropizzati, che per una corretta gestione del territorio in zone di pertinenza fluviale.

11 Bibliografia

- Ackerman F., 1999. Airborne laser scanning – present status and future expectations. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54, 64-67.
- Andersen H., McGaughey R. J., Reutebuch S. E., 2005. Estimating forest fuel parameters using LiDAR data. *Remote Sensing of Environment* 84, 441-449.
- Arscott D. B., Tockner K., Ward J. V., 2000. Aquatic habitat diversity along the corridor of an Alpine floodplain river (Fiume Tagliamento, Italy). *Archiv für Hydrobiologie* 149, 679-704.
- Arscott D. B., Tockner K., Van der Nat D., Ward J. V., 2002. Aquatic habitat dynamics along a braided Alpine river ecosystem (Tagliamento River, Northeast Italy). *Ecosystems* 5, 802-814.
- Baltsavias E. P., 1999. Airborne laser scanning: existing systems and firms and others resources. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54, 164-198.
- Beechie T. J., Liermann M., Pollock M. M., Baker S., Davies J., 2006. Channel pattern and river-floodplain dynamics in forested mountain river systems. *Geomorphology* 78, 124-141.
- Bertoldi W., Zanoni L., Tubino M., 2009. Planform dynamics of braided streams. *Earth Surfaces Processes and Landforms* 34, 547-557.
- Billi P., 1994. Morfologia dei corsi d'acqua. *Verde ambiente* 5, 61-70.
- Billi P., 1995. Dinamica fluviale e antropizzazione. *ACER* 1, 5, 71-75.
- Briese C., 2004. Breakline Modeling from Airborne Laser Scanner Data. PhD Thesis, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology.
- Burkham D. E., 1972. Channel Changes of the Gila River in Safford Valley, Arizona, 1846-1970, U.S. *Geological Survey Professional Paper* 422-D.

- Buzzi E., 2011. Indagine sulle variazioni fluvio-morfologiche di breve termine del fiume Tagliamento mediante l'impiego di TLS. Tesi di laurea specialistica, Università degli Studi di Padova.
- Casella V., 2003. Introduzione al laser scanning aereo. In: Crosilla F. & Galletto R. (eds) – La tecnica del laser scanning – Teoria ed applicazioni, 1-37, CISM, Udine.
- Castiglioni G. B., 1986. Geomorfologia. UTET.
- Cavalli M., 2009. Caratterizzazione idrologica e morfologica dei bacini montani mediante scansione laser da aeromobile. Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Padova.
- Cavalli M. & Tarolli P., 2010. Applicazione della tecnologia LiDAR per lo studio dei corsi d'acqua. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, Special Issue 1 (2010).
- Comiti F., Da Canal M., Surian N., Mao L., Picco L., Lenzi M. A., 2011. Channel adjustments and vegetation cover dynamics in a large gravel bed river over the last 200 years. *Geomorphology* 125, 147-159.
- Coulthard T. J., 2005. Effects of vegetation on braided stream pattern and dynamics. *Water resources research* 41, W04003, doi:10.1029/2004WR3201, 2005.
- Décamps H., 1996. The renewal of floodplain forests along rivers: a landscape perspective. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* 26, 35-59.
- Eschner T. R., Hadley R. F., Crowley K. D., 1983. Hydrologic and morphologic changes in the channels of the Platte River Basin in Colorado, Wyoming and Nebraska: a historical perspective, in *Hydrologic and Geomorphologic Studies of the Platte River Basin*, pp. A1-A39, U.S. Geological Survey Professional Paper 1277.
- Farioli C., 2008. I progetti dell'Autorità di bacino del Fiume Po. Quaderni di tutela del territorio 3: 28-39.

- Friedman J. M., Osterkamp W. R., Lewis W. M., 1996. The role of vegetation and bed-level fluctuations in the process of channel narrowing. *Geomorphology* 14, 341-351.
- Galay V. J., Rood K. M., Miller S., 1998. Human interferences with braided gravel-bed rivers. In *Gravel bed rivers in the environment*. Edited by P.C. Klingeman.
- Giuseppini G., 2006. Validazione altimetrica di un rilievo LiDAR aereo del torrente Cormor. Tesi di Laurea in Ingegneria per l'ambiente ed il territorio, Facoltà di Ingegneria dell'Università di Udine.
- Gottesfeld A. S., Gottesfeld L. M. J., 1990. Floodplain dynamics of a wandering river, dendrochronology of the Morice River, British Columbia, Canada. *Geomorphology* 3, 159-179.
- Grant G. E., Lancaster S. T., Hayes S., 2001. Interactions among riparian vegetation, wood, and fluvial processes: a Pacific Northwest drainage basin perspective, paper presented at Fall Meeting 2001, American Geophysical Union, San Francisco, CA.
- Gregory S.V., Swanson F.J., McKee W.A., Cummins K.W., 1991. An ecosystem perspective of riparian zones. *Bioscience* 41, 540-551.
- Gurnell A. M., Petts G. E., Hannah D. M., Smith B. P. G., Edwards P. J., Kollmann J., Ward J. V., Tockner K., 2000. Wood storage within the active zone of a large European gravel-bed river. *Geomorphology* 34, 55-72.
- Gurnell A. M., Petts G. E., Harris N., Ward J. V., Tockner K., Edwards P. J., Kollmann J., 2000. Large wood retention in river channels: the case of the Fiume Tagliamento, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms* 25, 255-275.
- Gurnell A. M., Petts G. E., Hannah D. M., Smith B. P. G., Edwards P. J., Kollmann J., Ward J. V., Tockner K., 2001. Riparian vegetation and island formation along the gravel-bed Fiume Tagliamento, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms* 26, 31-62.
- Gurnell A. M., Petts G. E., 2002. Island-dominated landscapes of large floodplain rivers, a European perspective. *Freshwater Biology* 47, 581-600.

- Gurnell A. M. & Petts G., 2006. Trees as a riparian engineers: the Tagliamento River, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms* 31, 1558-1574.
- Hicks D.M., Duncan M.J., Lane S.N., Tal M. & Westaway R., 2008. Contemporary morphological change in braided gravel-bed rivers: new developments from field and laboratory studies, with particular reference to the influence of riparian vegetation. In *Gravel-Bed Rivers VI: From process Understanding to River Restoration*. Habersach H., Piégay H., Rinaldi M., Editors; 557-584.
- Hilldale R. C. & Raff D., 2008. Assessing the ability of airborne LiDAR to map river bathymetry. *Earth Surface Processes and Landforms* 33, 773-783.
- Hjulström F., 1935. Studies of the geomorphological activity of rivers illustrated by the river Fyris. Uppsala Univ. Geol. Inst. Bull 25.
- Hooke J. M., 1986. The significance of mid-channel bars in an active meandering river. *Sedimentology* 33, 839-850.
- Hupp C. R., Osterkamp W. R., 1996. Riparian vegetation and fluvial geomorphic processes. *Geomorphology* 14, 277-295.
- Johnson W.C., 1997. Equilibrium response of riparian vegetation to flow regulation in the Platte River, Nebraska. *Regulated Rivers Research & Management* 13, 403-415.
- Karrenberg S., 2002. Tree regeneration on the floodplain of an alpine river. Tesi di Dottorato, ETH, Zurigo.
- Karrenberg S., Edwards P. J. & Kollmann J., 2002. The life history of Salicaceae living in the active zone of floodplains. *Freshwater Biology* 47, 733-748.
- Kellerhals R., Church M., Bray D. I., 1976. Classification and analysis of river processes. *Journal of the Hydraulics Division* HY7, 813-829.

- Kellerhals R., Neill G. R., Brail D. I., 1972. Hydraulic and geomorphic characteristics of rivers in Alberta. River Engineering and Surface Hydrology Report, Research Council of Alberta, 52 pp.
- Kochel R. C., Ritter D. F., Miller J., 1987. Role of tree dams in the construction of pseudo-terraces and variable geomorphic response to floods in the Little River valley, Virginia. *Geology* 33, 839-850.
- Kollmann J., Vicli M., Edwards P. J., Tockner K., Ward J. V., 1999. Interactions between vegetation development and island formation in the Alpine River Tagliamento. *Applied Vegetation Science* 2, 25-36.
- Kondolf G. M., 1994. Geomorphic and environmental effects of instream gravel mining. *Landscape and Urban Planning* 28, 225-243
- Kraus K. & Pfeifer N., 2001. Advanced DTM generation from LiDAR data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 34-3/W4, 23-35.
- Lenzi M. A., Marchi L., Tecca P. R., 1996. Field studies on sediment transport and debris flows in small basins of the Italian Alps. In: Krecek J., Rajwar G. S. and Haigh M. J. (eds.), *Hydrological Problems and Environmental Management in Highlands and Headwater*, New Dalhi, pp 71-79.
- Lenzi M. A., Paterno P., 1997. La progettazione e la valutazione di impatto ambientale degli interventi di sistemazione idraulico-forestali. Edizione Progetto, Padova, 158 pp.
- Lenzi M. A., D'Agostino V., Sonda D., 2000. Ricostruzione morfologica e recupero ambientale dei torrenti. Editoriale Bios Cosenza.
- Leopold L. B., Wolman M. G., Miller J. P., 1964. *Fluvial processes in Geomorphology*. Freeman: San Francisco.
- Ligon F. K., Dietrich W. E., Trush W. J., 1995. Downstream ecological effects of dams. *BioScience* 45 (3), 183-192.

- Lippert W., Muller N., Rossel S., Schauer T., Vetter G., 1995. Der Tagliamento – Flussmorphologie und Auenv egetation der groessten Wildflusslandschaft in der Alpen. *Jahrbuch des Vereins. Schutz der Bergwelt* 60, 11-70.
- Luppi L., Rinaldi M., Teruggi L. B., Darby S. E., Nardi L., 2009. Monitoring and numerical modelling of riverbank erosion processes: a case study along the Cecina River (Central Italy). *Earth Surface Processes and Landforms* 34 (4), 530-546.
- Malanson G. P., 1993. Riparian landscapes, Cambridge University Press, Cambridge.
- Marchetti M., 2000. Geomorfologia fluviale. Pitagora Editrice Bologna.
- Martini A., 2011. Caratterizzazione della granulometria e della scabrezza d'alveo in fiumi a fondo ghiaioso. Tesi di laurea specialistica, Università degli Studi di Padova.
- McKean J., Isaak D., Wright W., 2009. Geomorphic controls on salmon nesting patterns described by a new, narrow-beam terrestrial-aquatic LiDAR. *Frontiers in Ecology and Environment* 6 (3), 125-130.
- Minciardi M.R., 2010. Caratteristiche degli ambienti perfluviali: significato ecologico e valenze ambientali. Centro Ricerche ENEA di Saluggia (VC).
- Moore I. D., Grayson R. B., Ladson A. R., 1991. Digital Terrain Modelling: a Review of Hydrological, Geomorphological and Biological Applications. *Hydrological Processes* 5, 3-30.
- Moussavi-Harami R., Mahboubi A. & Khanehbad M., 2004. Analysis of controls on downstream fining along three gravel-bed rivers in the Band-e-Golestan drainage basin NE Iran. *Geomorphology* 61, 143-153.
- Muller N., 1995. River dynamics and floodplain vegetation and their alterations due to human impact. *Arch. Hydrobiol. Suppl.* 101, 477-512.

- Naiman R.J. & Décamps H., 1997. The ecology of interfaces: riparian zones. *Annual review of Ecology and Systematics* 28, 621-658.
- Nanson G. C., Croke J. C., 1992. A genetic classification of floodplains. Australia and New Zealand Geomorphology Research Group, 5th Conference, Port Macquaire.
- Newson M. D., Sear D. A., 1993. River Conservation, River Dynamics, River Maintenance: Contradictions? In *Conserving our Landscape*, Joint Nature Conservancy, White, S., Green, J. and Macklin, M.G. (eds), Peterborough, pp. 139-146.
- Osterkamp W. R., 1998. Processes of fluvial island formation, with examples from Plum Creek, Colorado and Snake River, Idaho. *Wetlands* 18, 530-545.
- Panizza M., 1992. Geomorfologia. Pitagora, Bologna, 397 pp.
- Panizza M. (a cura di), (2005). Manuale di geomorfologia applicata. Franco Angeli, Milano.
- Paronuzzi P., 2006. Le acque. In *il Tagliamento*, Circolo Menocchio - Cierre Edizioni. Università di Udine.
- Patenaude G., Hill R. A., Milne R., Gaveau D. L. A., Briggs B. B. J., Dawson T. P., 2004. Quantifying forest above ground carbon content using LiDAR remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 93, 368-380.
- Pautou G., 1984. L'organisation des forêts alluviales dans l'axe Rhodanien entre Genève et Lyon; comparasion avec d'autres systèmes fluviaux. *Documents de Cartographie Ecologique Grenoble* 27, 43-64.
- Pedrotti F. e Gafta D., 1996. Ecologia delle foreste ripariali e paludose dell'Italia. Centro Interdipartimentale, Audiovisivi e Stampa, Dipartimento di Botanica ed Ecologia, Università degli Studi di Camerino.

- Pinay G., Décamps H., Chauvet E. & Fustec E., 1990. Functions of ecotones in fluvial systems. Naiman R.J. & Décamps H. (Eds.). *The ecology of aquatic-terrestrial ecotones. Man and the Biosphere series 4*. The Parthenon Publishing Group, Carnforth, 141-164.
- Pirotti F., Grigolato S., Lingua E., Sitzia T., Tarolli P., 2010. Applicazioni laser scanner per l'ambiente forestale. Atti 14^a Conferenza Nazionale ASITA, Brescia 9-12 Novembre 2010.
- Picco L., 2010. Long period morphological dynamics in regulated braided gravel-bed rivers: comparison between Piave River (Italy) and Waitaki River (New Zealand). Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Padova.
- Picco L., Mao L., Rigon E., Moretto J., Ravazzolo D., Delai F., Lenzi M. A., 2012. Medium term fluvial Island evolution in relation with flood events in the Piave River. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, pp 12.
- Picco L., Mao L., Cavalli M., Buzzi E., Rigon E., Moretto J., Delai F., Ravazzolo D., Lenzi M. A., 2012. Using Terrestrial Laser Scanner to assess the morphological dynamics of a gravel-bed river. *Geomorphology* (in revisione).
- Poldini L., 1991. Atlante corologico delle piante vascolari nel Friuli Venezia Giulia. Università degli Studi di Trieste, Trieste.
- Rigon E., Moretto J., Mao L., Picco L., Delai F., Ravazzolo D., Lenzi M. A., Kaless G., 2012. 30 years (1981-2011) of vegetation cover dynamics and planform changes in the Brenta River (Italy): implication for channel recovery. *Geomorphology* (in revisione).
- Rinaldi M., Casagli N., Dapporto S., Gargini A., 2004. Monitoring and modelling of pore water pressure changes and riverbank stability during flow events. *Earth Surface Processes and Landforms* 29 (2), 237-254.
- Rinaldi M., Dapporto S., 2005. Monitoraggio e analisi dei processi di arretramento e dei meccanismi di instabilità di sponde fluviali. In: Brunelli M. & Farabollini P. (Eds), *Dinamica Fluviale, Atti Giornate di Studio sulla Dinamica Fluviale*, Grottammare, Giugno 2002, Ordine dei Geologi Marche, 165-201.

- Rinaldi M. & Darby S. E., 2008. Modelling river-bank-erosion processes and mass failure mechanisms: progress towards fully coupled simulations. In: Habersack H., Piégay H., Rinaldi M (Eds), Gravel-Bed Rivers 6- From Process Understanding to River Restoration. *Earth Surface Processes and Landforms* 11, 213-239.
- Rinaldi M., Surian M., Comiti F., Bussetini M., 2010. Manuale tecnico – operativo per la valutazione ed il monitoraggio dello stato morfologico dei corsi d’acqua. Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale, ISPRA, Roma.
- Rosgen D. L., 1994. A classification of natural rivers. *Catena* 22, 169-199.
- Schnitzler A., 1997. River dynamics as a forest process: interactions between fluvial systems and alluvial forests in large European river plains. *Botanical Review* 63, 40-64.
- Schumm S. A., 1997. *The Fluvial System*. Wiley, New York.
- Shull C. A., 1944. Observations of general vegetational changes on a river island in the Mississippi River. *American Midland Naturalist* 32 (3), 771-776.
- Sibson R., 1981. A brief description of natural neighbor interpolation. *Interpreting Multivariate Data*. Barnett V. (eds) John Wiley: Chichester, 21-36.
- Slatton K. C., Carter W. E., Shrestha R. L., Dietrich W. E., 2007. Airborne laser swath mapping: achieving the resolution and accuracy required for geosurficial research. *Geophysical Research Letters* 34, L23S10.
- Stanford J. A., Ward J. V., Liss W. J., Frissell C. A., Williams R. N., Lichatowich J. A., Coutant C. C., 1996. A general protocol for restoration of regulated rivers. *Regulated Rivers: Research & Management* 12, 391-413.
- Stanley E. H., Fischer S. G., Grimm N. B., 1997. Ecosystem expansion and contraction in streams. *BioScience* 47, 427-435.

- Statzner B. & Kohmann F., 1995. River and stream ecosystems in Austria, Germany and Switzerland. In *River and Stream Ecosystems* (Eds. Cushing C.E., Cummins K.W. & Minshall G.W.), 439-478. Elsevier, Amsterdam.
- Stefanini S., 1982. Le sistemazioni idraulico-forestali nella Carnia (bacino montano del Fiume Tagliamento), Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, Trieste.
- Stoch F., Dancevich M. B., Paradisi S., Desio F., 1995. Mappaggio biologico di qualità dei corsi d'acqua della provincia di Udine. Cooperativa OIKOS, Studi Ambientali, Udine.
- Suarez J. C., Ontiveros C., Smith S., Stewart S., 2005. Use of airborne LiDAR and aerial photography in the estimation of individual tree heights in forestry. *Computer & Geosciences*, 31, 253-262.
- Surian N., Mao L., Giacomini M., Ziliani L., 2009. Morphological effects of different channel-forming discharges in a gravel-bed river. *Earth Surfaces Processes and Landforms* 34, 1093-1107.
- Tarolli P., Tarboton D. G., 2006. A new method for determination of most likely landslide initiation points and the evaluation of DTM scale in terrain stability mapping. *Hydrological and Earth System Sciences* 10, 663-677.
- Tarolli P., 2008. High resolution topography: new opportunities, issues, feature trends. University of Padua.
- Tarolli P., Dalla Fontana G., 2008. Analysis of the headwater basins' morphology by high resolution LiDAR-derived DTM. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (5/C55), 297-306.
- Tarolli P., Dalla Fontana G., 2009. Hillslope to valley transition morphology: new opportunities from high resolution DTMs. *Geomorphology* 113, 47-56.

- Tarolli P., Dalla Fontana G., Moretti G., Orlandini S., 2009. Cell Size Dependence of Threshold Conditions for the Delineation of Drainage Networks from Gridded Elevation Data. *Proceedings of Geomorphometry, Zurich*.
- Tessmer I. H. (eds), 1991. *Colossal Cataract- the Geologic History of Niagara Falls*, State University of New York Press, Albany, NY, USA.
- Thorne C. R., 1982. Processes and mechanisms of river bank erosion. In: Hey R.D., Bathurst J.C., Thorne C.R. (Eds), *Gravel-bed Rivers*, Wiley, Chichester, 221-271.
- Thorp J. I., 1992. Linkage between islands and benthos in Ohio River, with implications for river management. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 49, 1873-1882.
- Tockner K., Stanford J. A., 2002. Riverine floodplains: present state and future trends. *Environmental conservation* 29, 308-330.
- Tockner K., Ward J. V., Arscott D. B., Edwards P. J., Kollmann J., Gurnell A. M., Petts G. E., Maiolini B., 2003. The Tagliamento River: a model ecosystem of European importance. *Aquatic Sciences* 65, 239-253.
- Tooth S., Nanson G. C., 2000. The role of vegetation in formation of anabranching channels in an ephemeral river, Northern plains, arid central Australia. *Hydrological Processes* 14, 3099-3117.
- Van der Nat D., Tockner K., Edwards P. J., Ward J. V., Gurnell A. M., 2003. Habitat change in braided floodplains (Tagliamento, NE-Italy). *Freshwater Biology* 48, 1799- 1812.
- Ward J. V., Tockner K., Edwards P. J., Kollmann J., Bretschko G., Gurnell A. M., Petts G. E., Rossaro B., 1999. A reference river system for the Alps: the "Fiume Tagliamento". *Regulated Rivers: Research & Management* 15, 63-75.
- Ward J. V., Tockner K., Edwards P. J., Kollmann J., Bretschko G., Gurnell A. M., Petts G. E., Rossaro B., 2000. Potential role of island dynamics in river ecosystems. *Verh Internat Verein Limnol.* 27, 2582-2585.

Ward J. V., Tockner K., Arscott D. B., Claret C., 2002. Riverine landscape diversity. *Freshwater Biology* 47, 517-539.

Wehr A. & Lohr U., 1999. Airborne laser scanning – an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54, 68-82.

Wyrick J. R., 2005. On the Formation of Fluvial Islands. PhD Thesis, Oregon State University.

Altre consultazioni

Guarnieri A., 2009. Introduzione ai GIS. Appunti del corso “Cartografia numerica e Sistemi Informativi Territoriali”. Università degli Studi di Padova.

Lenzi M. A., 2010. Appunti del corso “Fluviomorfologia e riqualificazione fluviale”. Università degli Studi di Padova.

www.arpa.fvg.it

www.protezionecivile.fvg

www.tagliamento.org

*Questa parte di albero
è diventata tesi
sotto i moderni torchi di
Linea Copy - Matra Document Service
nel mese di Ottobre 2012.
Possa un giorno
dopo aver compiuto il suo ciclo
presso gli uomini desiderosi di conoscenza
ritornare alla terra
e diventare nuovo albero.*