



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



DIPARTIMENTO  
DI GEOSCIENZE

Università degli Studi di Padova

Scuola di Scienze

Corso di Laurea in Geologia e Geologica tecnica

***Tesi di laurea magistrale***

*Morfometrie di paleo-meandri fluviali Olocenici nella pianura Veneta nell'area compresa tra Correzzola e l'attuale linea di costa (Italia).*

*Morphometry of Holocene fluvial paleo-meanders of the Venetian Plain between Correzzola and the present-day shoreline (Italy).*

Relatore: Massimiliano Ghinassi

Correlatori: Alessandro Fontana, Paolo Mozzi, Marta Cosma

Laureando: Francesco Schiavon

11 Dicembre 2020

Anno Accademico: 2019/2020

## ***Riassunto***

Il seguente studio si è focalizzato su un'area ubicata nel settore più meridionale della Pianura Veneto-Friulana ed ha portato alla creazione di una mappa geomorfologica di dettaglio attraverso l'analisi di immagini satellitari, foto aeree, cartografia storica e letteratura scientifica dell'area in esame. Il database cartografico generato ha permesso di eseguire la digitalizzazione delle forme paleo-fluviali (*channel belt*, *crevasse splays*, *crevasse channels*) e ottenere di dati sulle geometrie dei paleo-meandri. In questo modo è stato possibile definire le diverse generazioni di tracciati fluviali e osservarne lo sviluppo spaziale e temporale. L'elaborazione dei dati morfometrici sui paleo-meandri è stata eseguita con lo scopo di mettere in risalto eventuali relazioni fra le diverse forme, soprattutto in considerazione dei diversi sistemi idrografici di appartenenza.

## ***Abstract***

*This study focuses on an area sited in the southernmost part of the Venetian-Friulan Plain, and allowed to create of a high-resolution geomorphological map through the analysis of satellite imagery, aerial photos, geomorphological maps and scientific literature. The obtained cartographic database allowed us to mark different fluvial paleo-features (e.g. channel belts, crevasse splays, crevasse channels) and characterize paleo-meander's geometry. This work allowed to define and highlight any differences between the paleo-river tracks and observe their spatial and temporal development. Morphometric data processing was performed with the aim to emphasize relationships among the studied paleo-meanders, especially considering their relationship with different hydrographic system.*

## **Indice**

1. Introduzione	pag. 4
2. Inquadramento geologico e geomorfologico	pag. 5
2.1 Pianura Veneto-Friulana	pag. 5
2.2 Area studio	pag. 8
3. Metodi	pag. 11
3.1 Carta geomorfologica	pag. 11
3.2 Analisi morfometrica	pag. 14
4. Risultati	pag. 17
4.1 Carta geomorfologica	pag. 17
4.2 Caratterizzazione morfometrica	pag. 20
5. Discussioni	pag. 37
5.1 Geomorfologia	pag. 37
5.2 Analisi morfometrica	pag. 38
6. Conclusioni	pag. 42

## ***1. Introduzione***

Negli ultimi 4000 anni, il settore della Pianura Veneto-Friulana è stato profondamente modellato dall'attività di due grandi fiumi, l'Adige e il Po. L'intera area è tuttora caratterizzata dalla presenza di un reticolo molto complesso di dossi fluviali e corsi d'acqua relitti, dovuti alle modificazioni geomorfologiche determinate, nel tempo, dai processi di aggradazione e avulsione fluviale (Mozzi et al., 2020). In passato alcune delle aree della Pianura Veneto-Friulana sono state inoltre bonificate a seguito di fenomeni di urbanizzazione o per essere adattate a diverse necessità quali agricoltura e acquacoltura (Da Lio et al., 2015). Lo sfruttamento del territorio ha giocato un ruolo fondamentale nello sviluppo economico delle aree costiere, le quali hanno subito modificazioni ambientali significative, che hanno spesso alterato le caratteristiche geomorfologiche (Da Lio et al., 2015).

Lo studio della sedimentazione fluviale è stato, ed è ancora oggi, un settore di grande interesse economico e scientifico poiché i depositi fluviali possono: costituire acquiferi e reservoir di idrocarburi, ospitare minerali economicamente redditizi (Gibling et al., 2006).

In letteratura esistono studi a carattere geomorfologico (Piovan et al., 2012) e sedimentologico (Amorosi et al., 2008) della Pianura Veneto-Friulana, che hanno analizzato l'evoluzione temporale dei diversi dossi fluviali, e stabilito un quadro geologico-stratigrafico e cronologico ben dettagliato (Bondesan et al., 2008; Piovan et al., 2012; Fontana et al., 2014; Mozzi et al., 2020).

Nonostante i numerosi studi, in passato è stata posta poca attenzione alle caratteristiche morfometriche dei paleo-corsi d'acqua che hanno drenato l'area negli ultimi millenni, e che risultano chiaramente visibili da immagini aeree e satellitari.

In particolare, molti degli studi geomorfologici finora effettuati sono stati svolti ad una dettagliata mappatura dei principali elementi geomorfici (Bondesan et al., 2004), mentre non è ancora stata condotta una caratterizzazione geomorfologica e morfometrica basata su immagini satellitari ad alta risoluzione dell'area.

Il presente lavoro di tesi si focalizza su un'area ubicata nel settore più meridionale della Pianura Veneto-Friulana, e cerca di contribuire a colmare questa lacuna attraverso due principali fasi di lavoro. In una prima fase è stata creata una mappatura geomorfologica ad alta risoluzione dell'area in studio tramite l'utilizzo di database satellitari (*Google Earth*) integrati con la cartografia geomorfologica preesistente. Nella seconda fase sono state analizzate le caratteristiche morfometriche dei paleo-corsi d'acqua identificati durante la fase di mappatura, con particolare riferimento alla caratterizzazione delle geometrie delle anse di meandro. Tale caratterizzazione morfometrica ha permesso di analizzare i paleo-meandri fluviali tramite parametri geometrici, evidenziando possibili relazioni tra gli stessi, così come tra questi ed altri elementi geomorfici (dossi fluviali e *channel belt*).

## 2. Inquadramento geologico e geomorfologico

### 2.1 La Pianura Veneto-Friulana

La Pianura Veneto-Friulana (fig. 1) si colloca nel bacino di foreland situato fra le Alpi meridionali, le Dinaridi e gli Appennini. In particolare, il bacino di avanfossa del sudalpino si è sviluppato fra l'Eocene e il Miocene superiore in relazione alla flessura crostale, causata dai *thrusts* sud-vergenti che hanno permesso la deposizione di una successione di molassa. A partire dal Miocene lo sviluppo del bacino adriatico è stato controllato dai *thrusts* appenninici nord-vergenti e dalla subduzione della placca adriatica (fig. 2) (Fontana et al., 2014). Durante il Pleistocene inferiore il bacino ha subito un rapido approfondimento, raggiungendo profondità batiali e



Fig. 1 area studio (rosso) all'interno della Pianura Veneto-Friulana (verde)

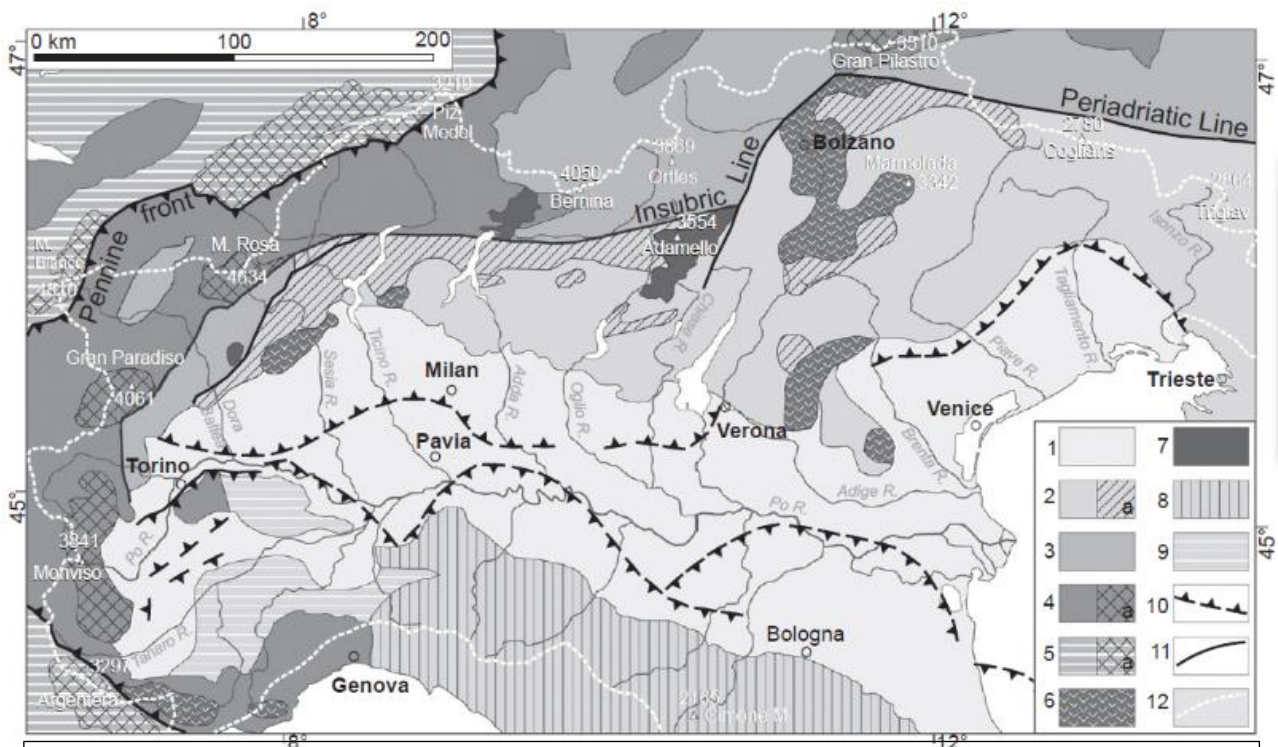


Fig. 2 Schema strutturale dell'Italia Settentrionale. Legenda: 1) Depositi alluvionali e costieri Plio-Quaternari; 2) Unità Sud-Alpine e Dinariche; 2a) Metamorfico; 3) Unità Australpina; 4) Unità Penninica; 4a) Massiccio interno; 5) Unità Elvetiche; 5a) Massiccio esterno; 6) Rocce vulcaniche; 7) Rocce plutoniche; 8) Bacino di top-wedge; 9) Appennini; 10) faglie inverse (*thrusts*); 11) faglie principali; 12) spartiacque del Po e dei fiumi sud-alpini. Modificato da Compagnoni e Galluzzo (2005); Garzanti et al. (2012). **Da Fontana et al. 2014**

subendo una drammatica riduzione dell'apporto sedimentario. Successivamente, nel Pleistocene



(Mozzi et al., 2005; Fontana et al., 2008; Fontana et al., 2010). In seguito, fra 17 e i 9 mila anni fa, l'area è entrata in una fase di *bypass*, caratterizzata da trasporto di sedimenti all'interno di valli fluviali incise e deposizione sullo *shelf* Adriatico. Questo ha prodotto un hiatus sedimentario riconoscibile lungo tutta la Pianura Veneto-Friulana (Fontana et al., 2008). La successiva trasgressione olocenica ha prodotto un arretramento della linea di costa verso Nord di diversi chilometri, fino alla laguna di Venezia (7.000 - 7.500 anni fa) (Favero & Serandrei Barbero, 1980). È possibile osservare una discontinuità stratigrafica dovuta alla superficie di trasgressione marina (TS), che comprende la transizione Pleistocene-Olocene e che può essere seguita lateralmente in gran parte della Pianura Veneto-Friulana. La diminuzione del tasso di innalzamento del livello del mare *post-LGM* ha consentito la progradazione dei sistemi deltizi della Pianura Veneto-Friulana e la costruzione dei dossi fluviali (Amorosi et al., 2008). Importante è anche il ruolo della subsidenza a lungo termine che caratterizza l'area (circa 0,6 mm/a), dovuta a fattori legati alla tettonica e al carico sedimentario (Carminati & Martinelli, 2002).

Nel corso del Quaternario la Pianura Veneto-Friulana è stata modellata da diversi fiumi che ne hanno modificato le caratteristiche e che hanno generato i grandi sistemi deposizionali a forma di ventaglio che sono presenti in tutta l'area (fig. 3). Il termine *megafan* alluvionale è usato generalmente per definire una forma a ventaglio generata dall'attività fluviale e con un'ampia estensione areale, superiore a 1.000 Km<sup>2</sup> nel caso della Pianura Veneto-Friulana (Fontana et al., 2014). Questi sistemi alluvionali presentano un apice a pendenza generalmente elevata da cui inizia la deposizione di sedimenti grossolani. All'aumentare della distanza dall'apice del *megafan*, la pendenza tende a diminuire e con essa la granulometria e lo spessore dei depositi. Si osserva perciò una diminuzione dello spessore e della granulometria andando dall'apice verso la porzione più distale.

## 2.2 Area studio

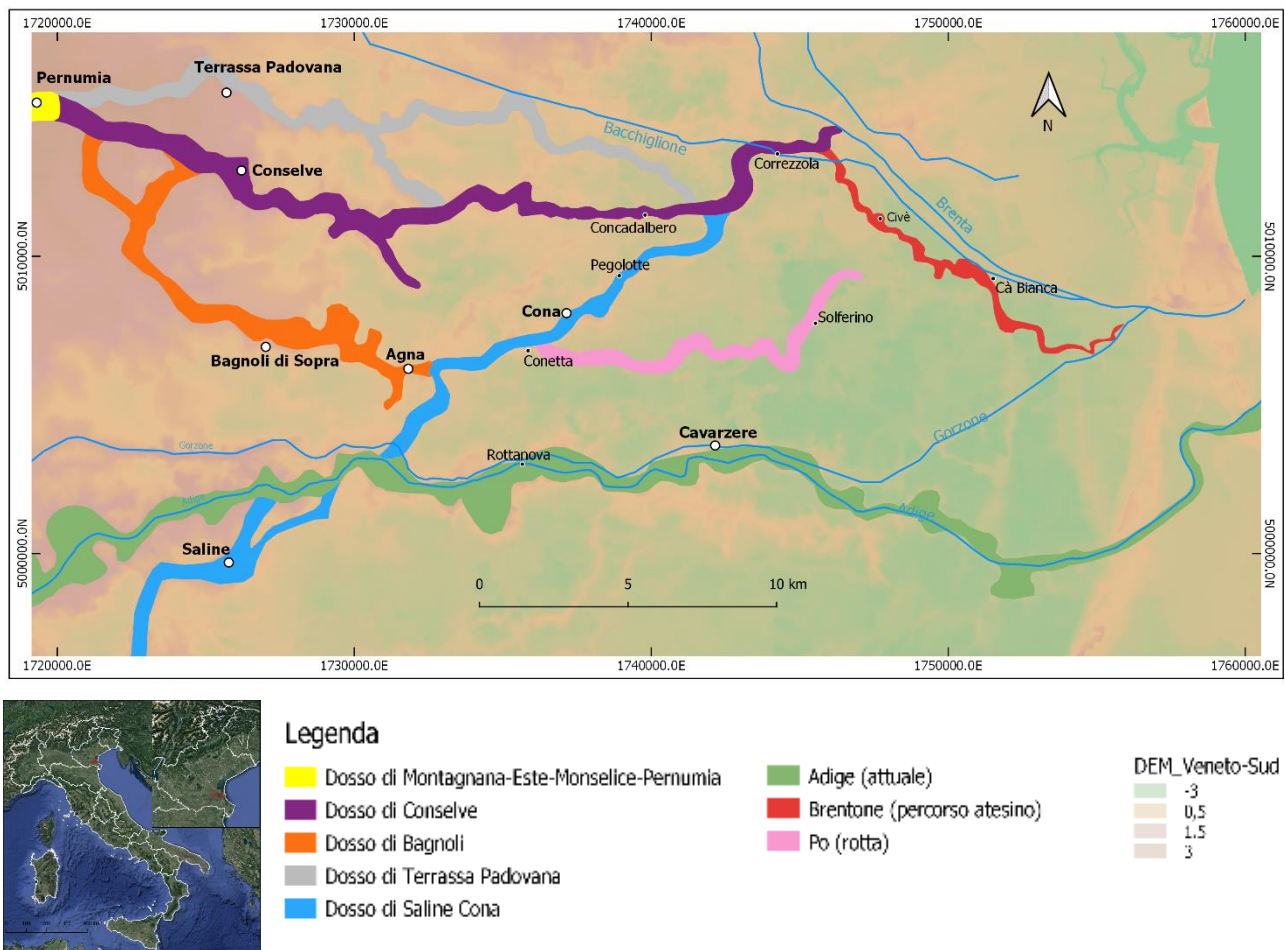


Fig. 4 carta geomorfologica dei principali dossi conosciuti in letteratura. Riferimento della posizione dell'area studio. Modificato da Mozzi et al., 2020. A fianco la localizzazione rispetto all'Italia.

L'area di interesse (fig. 4) ha un'estensione di circa 192 Km<sup>2</sup> ed è collocata geograficamente a Sud della laguna Veneta, il cui limite settentrionale è rappresentato dal fiume Bacchiglione, quello meridionale dall'Adige, mentre quello Est-Ovest tra il dosso di Saline-Cona e l'attuale litorale costiero. Dal punto di vista geografico rappresenta a tutti gli effetti la porzione meridionale della Pianura Veneta. Tuttavia, dal punto di vista geomorfologico e sedimentario, essa è localizzata in una zona di interdigitazione tra i sistemi del Po, dell'Adige e del Brenta. Questi sistemi hanno dato origine ad un network particolarmente complesso di dossi fluviali. Il reticolo attualmente osservabile è il risultato delle modificazioni geomorfologiche, sedimentarie, e antropiche avvenute dall'Età del Bronzo ad oggi. L'area analizzata è stata oggetto di diversi studi archeologici che hanno analizzato l'impatto delle attività umane (agricoltura, pesca, commercio, ecc.) sul tracciato fluviale, e in particolare delle opere di contenimento eseguite per evitare gli eventi di piena (es. costruzione di argini artificiali) (Mozzi et al., 2020).



Il fiume Po è il più lungo in Italia sia come lunghezza (652 Km) sia come area del bacino idrografico ad esso associato (oltre 71.000 Km<sup>2</sup>). Esso scorre dalle Alpi Occidentali lungo la Pianura del Po, ricevendo tributari sia dalla catena alpina che appenninica e sfociando nel Mar Adriatico a Sud dell'area in studio (Cremonini et al., 2007; Simeoni & Corbau, 2009). Dal punto di vista sedimentologico si osservano corpi ghiaiosi amalgamati nella porzione prossimale del bacino, verso depositi fangosi di piana alluvionale nella porzione più distale.

Il fiume Adige è il secondo in Italia per lunghezza con i suoi 410 Km e possiede un bacino idrografico di 12.200 Km<sup>2</sup> (Mozzi et al., 2020). L'alta pianura dell'Adige corrisponde alla porzione pedemontana del sistema sedimentario del fiume ed è caratterizzata da ghiaie e corsi d'acqua di tipo *braided* (intrecciati). Verso la bassa pianura i sedimenti passano a sabbie e limi-argillosi con il tracciato fluviale che adotta uno stile meandriforme, fino a sfociare nel Mar Adriatico a sud della Laguna di Venezia.

Il fiume Brenta è lungo 174 Km ed è caratterizzato da un ampio bacino di drenaggio con un'estensione di circa 1.800 Km<sup>2</sup>, che va dalle Alpi sud-orientali fino a comprendere parte delle Dolomiti (Mozzi et al., 2010). Datazioni al carbonio eseguite su tronchi provenienti dall'area di Piazzola sul Brenta, indicano come l'attività recente (< 1.000 anni a.C.) del fiume è rimasta pressoché invariata (Pellegrini et al., 1984; Mozzi et al., 2010).

Il fiume Po durante la preistoria e in particolare fino all'Età del Ferro (1.500-200 a.C.), ha portato alla formazione di un dosso principale (ubicato fuori dell'area di studio) lungo Fratta Polesine (dosso di Fratta), che a sud di Rovigo si divideva in due rami, il dosso di Adria, a sud, e il dosso di Saline-Cona, a nord, con direzione SW-NE, che rientra nell'area di studio (Peretto et al., 1986; Marcolongo et al., 1987; Bondesan et al., 2008). Lo studio delle evidenze geomorfologiche del dosso di Saline-Cona ha permesso di dimostrare che si tratta di un elemento deposizionale connesso al dosso di Adria e che quest'ultimo è rimasto attivo tra l'Età del Bronzo (medio-recente) e l'inizio dell'Età del Ferro (VII secolo a.C.) (Mozzi et al., 2020). La disattivazione del ramo di Saline-Cona è relativa ad un'avulsione del tracciato fluviale avvenuta fra la seconda metà del III° millennio e la fine del II° millennio a.C., con conseguente spostamento del corso del fiume verso sud di 20-30 Km (Piovan et al., 2012).

Il dosso di Saline-Cona passa per Cona e Pegolotte verso Concadalbero dove termina a contatto con il dosso di Conselve relativo al sistema alluvionale dell'Adige. Oltre al ramo principale è possibile osservare un tracciato fluviale, probabilmente imputato ad un canale di rotta del Po, che si stacca presso Conetta e prosegue verso Est fino a Solferino per poi deviare verso Nord-Est fino a Civè (Bondesan & Meneghel, 2004).

L'attività fluviale dell' Adige ha generato il dosso di Montagnana-Este-Monselice-Pernumia da cui dipartono diversi dossi secondari, quali Terrassa Padovana, Conselve e Bagnoli di Sopra che possiedono elevato rilievo morfologico, con un'ampiezza media di 600 m e un'elevazione rispetto alla pianura circostante di circa 3 m. I tracciati fluviali si sono modellati a partire dall'Età del Bronzo (3.000-1.200 a.C.) e sono rimasti attivi fino alla grande avulsione avvenuta in epoca medioevale all'altezza di Bonavigo con uno spostamento del tracciato fluviale verso sud di circa 10-15 Km (Mozzi et al., 2020). Nei pressi di Correzzola è possibile osservare il dosso di Saline-Cona che termina adiacente al dosso di Conselve che prosegue verso nord; ciò è riconducibile alla disattivazione più antica del ramo di Saline-Cona (ampiezza media: 300 m; elevazione: 3 m) che sfociava all'interno della laguna di Venezia, con il ramo di Conselve che ha modificato il proprio tracciato fluviale deviando verso nord e riprendendo il paleoalveo del Po (Piovan et al., 2012). All'interno della stessa zona è possibile identificare una traccia sinuosa che si stacca dal dosso principale, riconducibile ad un canale di rotta del Po di Saline Cona. Il sistema alluvionale dell'Adige è totalmente costituito da depositi alluvionali appartenenti all'Unità di Cavarzere (I° millennio a.C. - attuale), che comprende i depositi legati alla direttrice fluviale attuale e ad un più antico dosso atesino appartenente al periodo precedente all'avulsione fluviale avvenuta nel Medioevo (Bondesan et al., 2008).

In riferimento all'attività del fiume Adige successiva all'avulsione medioevale, è possibile identificare diverse tracce fluviali provenienti dalla zona fra Rottanova e Cavarzere legati alle dinamiche fluviali (canali di rotta) successive al periodo romano e innescate dall'attivazione del ramo attuale del fiume. I sedimenti costituenti il dosso attuale del fiume Adige, raggiungono circa 1km di ampiezza e 2,5 m di altezza s.l.m. nei pressi di Cavarzere. Inoltre, come illustrato in (*fig. 4*) esiste un antico percorso atesino che da Concadalbero deviava verso Civè e Cà Bianca, che è stato attribuito all'Unità di Cavarzere tramite analisi su campioni di sabbia del Brenton. I dati sedimentologici, infatti, riflettono una possibile relazione con il fiume Adige, con successiva presa in carico da parte del Brenta in epoca medioevale (Bondesan et al., 2008).

L'area compresa fra il ramo del Po di Saline-Cona e il corso attuale dell'Adige si presenta come un'area depressa e caratterizzata da un drenaggio complesso, soprattutto a causa del prolungato ed esteso utilizzo del territorio (agricoltura) già a partire dell'età romana e delle diverse opere di bonifica eseguite. Le prime opere di bonifica furono eseguite dai monaci benedettini nella zona di Cona intorno al XII secolo, con lavori successivi eseguiti nel 1854 e nel 1862 (Bassan et al., 1994). L'area è infatti attraversata da diversi canali di bonifica, come il Canale dei Cuori e il Gorzone, entrambi con direzione W-E. L'intera area in studio presenta tracce diffuse di paleoalvei con frequenti intersezioni e assenza di una direzione prevalente, spesso anche con limiti laterali di difficile interpretazione. In

particolar modo, l'area fra il Canale dei Cuori e l'Adige a nord di Cavarzere mostra un caratteristico intreccio di canali anastomizzati, che corrispondono probabilmente a canali palustri o a canali di rotta dell'Adige. Il reticolo idrografico attuale è stato creato durante l'età moderna e contemporanea a causa della crescente necessità di territorio disponibile, che in precedenza era stato occupato da vaste zone palustri.

### **3. Metodi**

Nel seguente studio sono state utilizzate diverse metodologie per la stesura di una carta geomorfologica di dettaglio e per l'analisi morfometrica derivata dall'elaborazione dei dati cartografici.

#### **3.1 La carta geomorfologica**

Uno degli scopi del lavoro di tesi è quello di elaborare una carta geomorfologica di dettaglio dell'area. Per la digitalizzazione della carta è stato necessario un lavoro di sintesi che comprende: i) la fotointerpretazione di immagini satellitari e foto aeree; ii) l'analisi del DEM; e iii) l'analisi di articoli scientifici e delle carte geologiche e geomorfologiche disponibili per quest'area.

La *basemap* iniziale su cui si è basata la digitalizzazione è stata costruita seguendo alcuni passaggi.

- Esportazione di immagini ad alta risoluzione (4800x3142pixel) da *Google Earth*, assegnando ad ogni file diverse informazioni identificative (data, posizione geografica). Fra le immagini di *Google Earth* sono state scelte quelle che fornivano il maggior numero di informazioni per singola *tile*. Le immagini satellitari esportate sono riferite a date di acquisizione diverse: 25/03/2002 – 21/04/2010 - 04/02/2011 21/04/2012 – 16/08/2013 - 28/03/2015.
- Georeferenziazione di tutte le immagini satellitari esportate rispetto il sistema di riferimento Monte Mario (*Italy Zone 1*, EPSG:3003), utilizzando il *tool* apposito presente nel software QGis. L'operazione è stata eseguita considerando almeno 4 punti analoghi fra le immagini esportate e la *basemap* (*Bing Maps*), quali: incroci stradali e infrastrutture, abitazioni, divisioni catastali delle coltivazioni.
- Unione delle 104 immagini georeferenziate e creazione di un mosaico ad alta risoluzione dell'area in studio, utilizzabile per la digitalizzazione.

Inoltre sono stati utilizzati diversi database (immagini satellitari, foto aeree, cartografia), in modo da aumentare la rappresentatività dell'analisi digitale:

- Ortofoto a colori dell'anno 2012, importate su QGis utilizzando il *WMS (Web Map Service)* proveniente dal Portale della Regione Veneto. Le ortofoto a colori hanno permesso di avere immagini dettagliate dell'area in studio in modo da affinarne la digitalizzazione.
- Mappe storiche dell'Europa nel XIX secolo, derivate dal “*Mapire – Europe in the XIX Survey*” e visualizzabili nel sito *Mapire.eu*. Ricostruzione cartografica eseguita a partire dal “*Lombardy, Venice, Parma, Modena (1818 – 1829) – Second military survey of the Habsburg Empire*”. Utilizzata per identificare corpi sedimentari di origine fluviale attivi in epoca storica e migliorarne la digitalizzazione.
- *Yandex Maps 2020: basemap* caricata utilizzando un *tool* di QGis (*XYZ Tiles*) e proveniente dai dati cartografici dell'azienda russa *Yandex*. Utilizzata insieme alle altre *basemap* pubbliche, per migliorare la definizione di zone particolarmente incerte.
- *Bing Maps 2020: basemap* Bing caricata su QGis dal sito ufficiale di proprietà Microsoft.
- *ESRI Satellite: basemap* standard del software ArcGIS caricata dal sito ufficiale della ESRI tramite l'apposito *tool* di QGis.
- *Google Maps: basemap* utilizzata dal sistema di navigazione di proprietà di *Google* importata tramite il *tool XYZ Tiles*.
- Copertura regioni zona WGS89 – UTM32: database cartografico importato tramite *WMS* dal sito ufficiale del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare.
- *DEM* ad alta definizione (modificato da Ninfo et al., 2011): L'utilizzo del *DEM* è stato particolarmente utile nell'identificazione delle zone sopraelevate in corrispondenza dei dossi fluviali e di zone depresse corrispondenti alle aree palustri bonificate.

Attraverso la fotointerpretazione, è stato possibile identificare e localizzare alcune delle morfologie sepolte nel terreno. In particolare, la possibilità di digitalizzare le diverse *features* è data dalla presenza di materiali diversi, i quali permettono una crescita differenziale della vegetazione che sarà più rigogliosa in presenza di fango (maggior contenuto di acqua) e più sofferente in presenza di sabbia. Pertanto dalle immagini satellitari si potranno osservare dei contrasti di colore (chiaro-scuro) che evidenziano la presenza di diversi corpi sedimentari. Nei paragrafi successivi vengono descritte le diverse *features* digitalizzate con alcuni esempi esplicativi.

*Channel belt*: l'area di competenza del corso d'acqua attivo, che è identificabile come un corpo sedimentario sabbioso di colore chiaro (*fig. 5a*) su sfondo scuro. Al suo interno è possibile identificare i corpi di barra con rispettivi scroll-set, la linea di centro canale e i limiti laterali osservabili dalle modificazioni cromatiche dovute alla diversa granulometria del corpo sedimentario rispetto alla piana esondabile (costituita prevalentemente da depositi fini). Al fine di eseguire un'analisi statistica delle

morfometrie fluviali, sono state digitalizzate la linea di centro canale e la larghezza della *channel belt* in corrispondenza dell'apice dei meandri.

Canali minori: sono stati definiti in questo modo quei canali con dimensioni inferiori ai 20 m, osservabili in carta come corpi sedimentari di colore chiaro su sfondo scuro, su cui è talvolta possibile identificare la linea di centro canale (fig. 5b).



Fig. 5a porzione del corso d'acqua del Brenton presso Cà Bianca. Basemap Google Earth.



Fig.5b corsi d'acqua minori su basemap Google Earth digitalizzata.

*Crevasse splays* (ventagli di rotta): forme sedimentarie a forma di ventaglio dovute ad eventi di esondazione con rotture dell'argine, visualizzabili dalle immagini satellitari come corpi sedimentari di colore chiaro più o meno ramificati (fig. 5c).

*Crevasse channel* (canali di rotta): sono corpi sedimentari dovuti ad eventi di esondazione di entità maggiore rispetto ai precedenti e caratterizzati da un'elevata evoluzione spaziale e temporale (fig. 5c).

Oltre alle fonti sopracitate, la digitalizzazione è stata migliorata e convalidata utilizzando fonti storiche come mappe, articoli e prodotti cartografici di grande dettaglio. Le informazioni a grande scala dell'area in studio, che hanno



Fig. 5c crevasse channel e crevasse splay. Digitalizzazione da basemap Google Earth.

consentito di definire le principali direttrici fluviali e la ricostruzione geomorfologica, derivano

principalmente dallo studio di Mozzi et al. del 2020. Grazie ad esso è stato possibile riconoscere e digitalizzare le aree corrispondenti ai grandi dossi fluviali di Adige e Po e di poterne ricostruire l'evoluzione a scala minore. La carta geomorfologica di Venezia (Bondesan & Meneghel, 2004) è stata anch'essa utilizzata per migliorare la definizione della digitalizzazione e in alcuni casi per risolvere problemi di ambiguità interpretativa. L'impiego delle note illustrative della carta geomorfologica, ha invece consentito di verificare in modo preciso la presenza di corpi sedimentari sepolti, di cui verrà affinata la caratterizzazione in questo studio. L'utilizzo di immagini satellitari più recenti ha permesso sia di perfezionare le informazioni a carattere geomorfologico del territorio già identificate in studi passati, sia di introdurre nuove informazioni su corpi sedimentari ad oggi sconosciuti. La carta delle unità geologiche della provincia di Venezia (Bondesan et al., 2008) ha reso possibile la definizione dell'età dei corpi sedimentari in base all'appartenenza alle diverse unità geologiche, in particolare l'unità di Cavarzere (I° millennio a.C. – attuale) e l'unità di Pegolotte (III° - II° millennio a.C.). In questo modo, è stato possibile osservare come tutte le *channel belt* riguardanti il sistema idrografico del fiume Adige appartengano all'unità di Cavarzere, mentre le *channel belt* riferite al Po all'unità di Pegolotte. Perciò, dove possibile, è stata ricostruita l'età delle diverse *channel belt* appartenenti alle diverse unità geologiche, sulla base dei dati disponibili. All'interno delle note illustrative della carta delle unità geologiche (Bondesan et al., 2008) sono presenti diversi transetti eseguiti trasversalmente al tracciato fluviale a cui sono associate le rispettive sezioni geologiche. In particolare, i profili deposizionali hanno permesso di ottenere nuove informazioni sulla larghezza di canali e *belt* in alcuni particolari casi (transetto 41 "Motta Molara", transetto 42 "Brentone", transetto 44 "Saline").

### 3.2 L'analisi morfometrica

Il secondo importante scopo di questo lavoro di tesi è un'analisi statistica dei parametri morfometrici dei paleo-meandri fluviali riconosciuti nella prima fase del lavoro di tesi. I dati necessari alle analisi morfometriche dei meandri fluviali sono stati ottenuti tramite l'elaborazione degli *shapefiles*, riferiti alle singole linee di centro canale delle *belt*, da parte di un algoritmo di MATLAB (Finotello et al., 2020) che in modo semi-automatico riconosce i punti di flesso della center line, permette di eliminare i flessi spuri e identifica così i meandri appartenenti a ciascuna *channel belt*. L'algoritmo inoltre restituisce un file Excel contenente diversi parametri per i singoli meandri (*fig. 6*). Si sono così ottenuti i valori di sinuosità (S), ampiezza (A), curvatura (C), raggio di curvatura ( $R_c$ ), lunghezza cartesiana ( $L_{xy}$ ) (fra due flessi) e intrinseca ( $L_s$ ), indice di asimmetria ( $I_A$ ) e distanza fra l'apice del meandro e il flesso a monte/valle ( $L_{up}/L_{down}$ ).

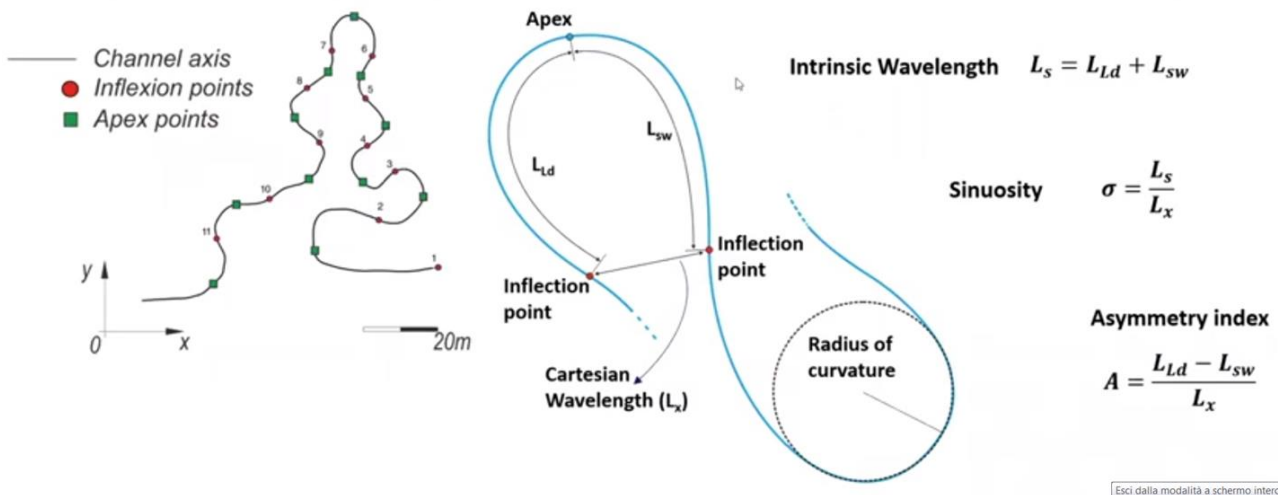


Fig. 6 immagine esplicativa dei parametri considerati per l'analisi morfometrica dei paleo-meandri.

Tramite i dati ottenuti dall'elaborazione con MATLAB sono stati creati diversi grafici in modo da avere un approccio statistico alla descrizione morfometrica delle forme digitalizzate. In particolare si è deciso di creare grafici di distribuzione di frequenza e grafici bivariati per i diversi parametri misurati.

I grafici di distribuzione di frequenza creati rappresentano le frequenze cumulate percentuali e la stima della densità di probabilità tramite *Kernel Density Estimation (KDE)* di sinuosità, raggio di curvatura, ampiezza e indice di asimmetria. Ciascuna centerline è stata analizzata singolarmente per diversi parametri chiave (sinuosità, asimmetria, ampiezza e raggio di curvatura), dai quali sono stati ottenuti grafici singoli e condensati, in modo da migliorare la leggibilità grafica.

La frequenza cumulativa percentuale è una funzione che permette di descrivere l'andamento di una serie di dati prima o dopo un certo valore di soglia, che nel caso studio sono classi di appartenenza. I grafici di probabilità cumulativa sono stati ricavati utilizzando la funzione "analisi dati" di Excel, impiegando come *bin range* il valore di *bandwidth* prodotto dall'analisi *KDE*, così da creare classi di larghezza adatta. Anche in questo caso sono stati generati dei grafici condensati per ogni parametro, comprendenti tutte le centerline analizzate con MATLAB e la probabilità cumulativa media, ottenuta dall'elaborazione di tutti i dati.

La *KDE* è un metodo che permette di stimare la densità di probabilità a partire da una serie di dati (fig. 7).

Fig. 7 definizione matematica di KDE

$$f_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right)$$

Definita una funzione *kernel* ( $K$ ), essa viene centrata in ogni punto della serie di dati ( $x-x_i$ ) e ne viene eseguita la sommatoria normalizzata ad  $n$  (numero di dati nella serie) in modo da ottenere una stima della *Kernel Density*. È fondamentale definire un valore di larghezza di banda (*bandwidth*)  $h$  adatto a ottenere una stima verosimile, poiché nel caso sia troppo piccolo può entrare in gioco il fenomeno dell'*overfitting*, mentre nel caso sia troppo grande, si verifica un aumento dell'errore nelle zone più addensate (*wikipedia*). I grafici di *KDE* sono stati ottenuti utilizzando un *add-in* di Excel (*Real Statistic*), disponibile gratuitamente online, che ha permesso di definire la densità di probabilità delle nostre serie di dati e di creare le curve ad essa associate. Per ogni parametro di cui è stata eseguita la *KDE*, è stata mantenuta una *bandwidth* più o meno costante, con valori simili a quelli utilizzati per i grafici di frequenza cumulativa percentuale, in modo da avere dei dati correlabili fra loro.

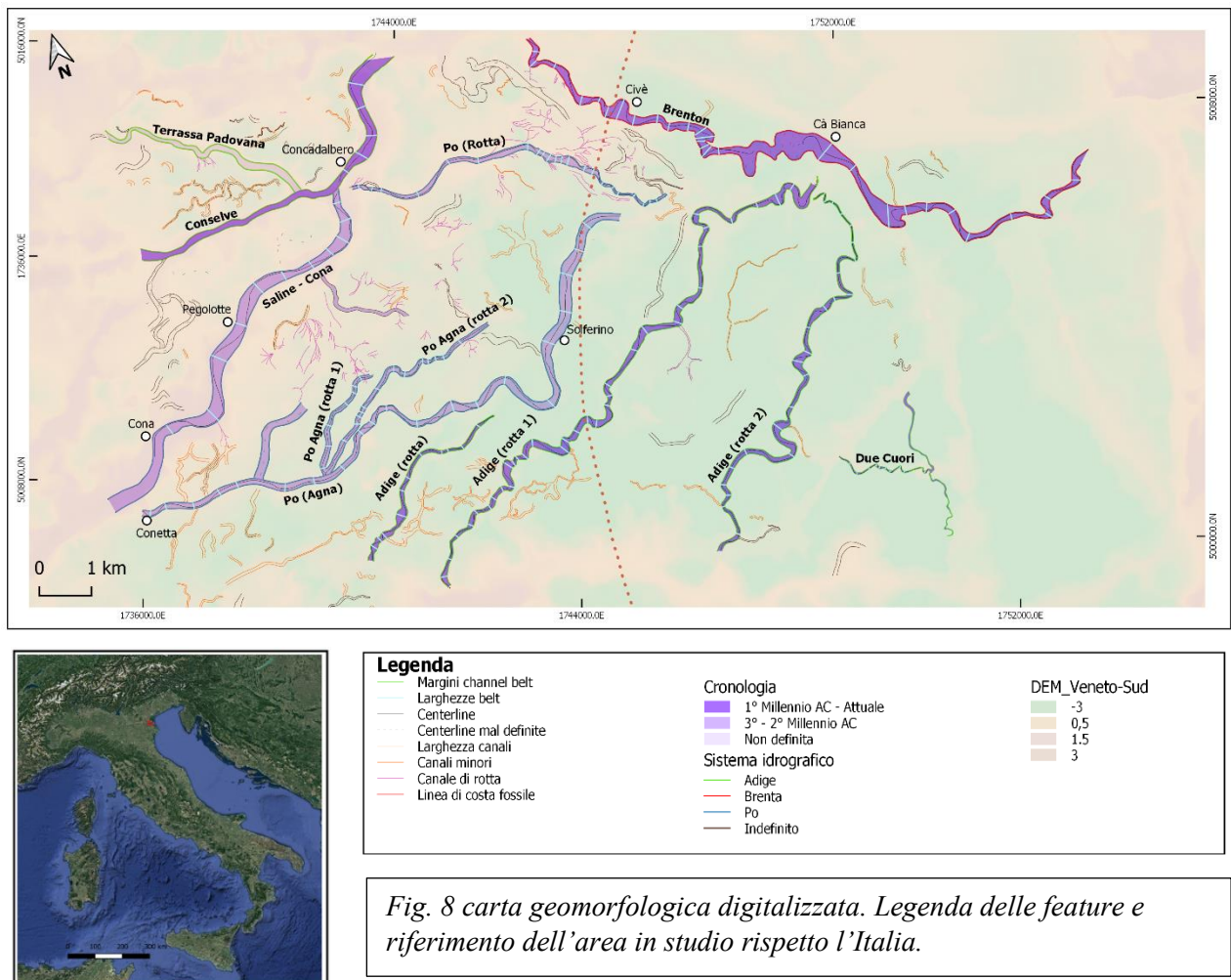
Utilizzando un metodo grafico con il software QGis, è stato possibile ottenere le larghezze delle diverse *channel belt* in corrispondenza di ciascun meandro fluviale. In questo modo è stato ottenuto un nuovo parametro utile alla creazione di grafici.

Per quanto riguarda i grafici bivariati, sono stati scelti i parametri in modo da poter osservare delle correlazioni; alcune già conosciute in letteratura (es.  $L_{xy}$  vs  $L_s$ ) in modo da avere una stima della qualità del metodo utilizzato, altre per poter valutare possibili relazioni non ancora studiate. I grafici bivariati creati in scala log-log sono:  $L_s$  vs  $L_{xy}$ ,  $R_c$  vs  $L_{xy}$ ,  $A$  vs  $L_{xy}$ ,  $R_c$  vs  $L_b$ ,  $A$  vs  $L_b$ . I valori di raggio di curvatura e ampiezza andrebbero normalizzati alla larghezza del canale, della quale però non disponiamo di una serie di dati statisticamente affidabile; perciò sono stati invece normalizzati alla distanza lineare fra due flessi successivi ( $L_{xy}$ ), in quanto è un parametro che scala linearmente con la larghezza.



## 4. Risultati

### 4.1 Carta geomorfologica



La digitalizzazione delle caratteristiche geomorfologiche ha prodotto un risultato cartografico di grande dettaglio (fig. 8). L'utilizzo di dati cartografici di varia natura ha permesso di ricostruire la forma e l'evoluzione di alcuni paleoalvei legati ai reticoli di Adige, Po e Brenta. Il sistema del Po è rappresentato in carta da 6 *channel belt*: Saline Cona, Po (Agnà), Po Agnà (rotta 1), Po Agnà (rotta 2), Po (rotta). L'Adige è invece testimoniato dalla presenza di 4 *belt*: Adige (rotta), Adige (rotta 1), Adige (rotta 2), Conselve e Terrassa Padovana. La *belt* Brenton è invece l'unica rappresentante per il fiume Brenta all'interno dell'area in studio.

La *belt* associata al dosso di Saline Cona, come già accennato in precedenza, possiede un'età che va dalla seconda metà del III° al II° millennio a.C. (Piovan et al., 2010) e costituiva la parte settentrionale del ramo del Po rimasto attivo fino all'avulsione fluviale, avvenuta alla fine del II° millennio a.C. (Bondesan et al., 1995; Stefani & Vincenzi, 2005). Il dosso partiva da Rovigo e passava per Cona e

Pegolotte fino a Concadalbero, dove deviava verso NE per sfociare infine all'interno della laguna di Venezia.

La *belt* di "Po (rotta)" (identificata in questo studio), che parte da Concadalbero e prosegue in direzione Est/Nord-Est verso Civè, fa parte del sistema del Po e probabilmente si tratta di un canale di rotta sviluppatosi a partire dalla *belt* di Saline Cona. Associato a questa *channel belt*, è presente un reticolo particolarmente sviluppato di canali di *crevasse*, osservabili in carta nella porzione di territorio a Nord della rotta principale (fig. 9).

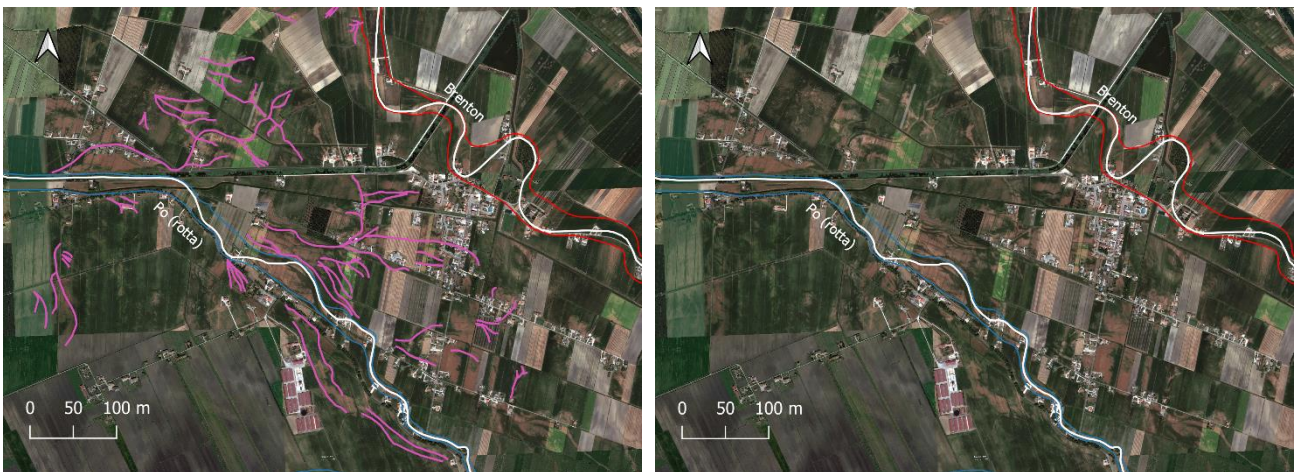


Fig. 9 *crevasse splays* e *crevasse channel* associati alla *belt* "Po (rotta)". A fianco la foto non digitalizzata.

Un esempio già conosciuto in letteratura (Bondesan & Meneghel, 2004) è quello della *belt* "Po Agna"; un canale di rotta del Po, che si stacca dalla *belt* di Saline Cona all'altezza di Conetta, prosegue verso Est fino a Solferino, per poi deviare verso Nord-Est verso Civè. Le *channel belt* di Po Agna (rotta 1) e Po Agna (Rotta 2) si staccano dalla rotta principale mantenendo una direzione Nord/Nord-Est. Sia le *belt* principali sia i canali di rotta associati al sistema idrografico del fiume Po appartengono tutte all'Unità di Pegolotte (III° - II° millennio a.C.) (Bondesan et al., 2008) e hanno perciò la stessa età. All'interno della mappa è presente solamente una parte della *belt* di Terrassa Padovana, che faceva parte della ramificazione del ramo dell'Adige di Monselice-Este-Pernumia e la cui età non è definita (Piovan et al., 2010). L'analisi delle immagini satellitari e dei database cartografici, non hanno permesso di ottenere dei dati riguardanti la linea di centro canale attendibile per questa *channel belt*, che non sarà presente nella successiva analisi statistica. La *belt* di Conselve è anch'essa uno dei prolungamenti del ramo del fiume Adige di Monselice-Este-Pernumia, ma nell'area in studio ne è presente solo la porzione terminale. Essa segue un andamento Est-Ovest fino al contatto con la *belt* di Saline Cona (Concadalbero), dove devia verso Nord in direzione della laguna. La porzione che da Concadalbero va verso Nord è la continuazione della *belt* di Saline Cona, che successivamente alla sua disattivazione, è stata presa in carico dal fiume Adige (Mozzi et al., 2020). L'appartenenza

all'Unità di Cavarzere ne conferma l'origine legata al sistema idrografico dell'Adige (I° millennio a.C. – attuale). Le *belt* di Terrassa Padovana e di Conselve si sono sviluppate precedentemente alla grande avulsione del fiume Adige, avvenuta a Bonavigo in epoca medioevale. Infatti, le *belt* denominate “Adige (rotta, rotta 1 e rotta 2)”, sono successive all'evento di avulsione e sono riconducibili a dei canali di rotta più o meno evoluti del tracciato fluviale dell'Adige attivo ancora oggi. Ciò è testimoniato anche dal fatto che esse seguono tutte uno sviluppo SW-NE, rimanendo parallele per la maggior parte del loro tracciato. La loro origine, essendo legata all'Adige attualmente attivo, le porta ad essere le *belt* più recenti presenti all'interno dell'area in studio, con età che vanno dal Medioevo al presente. La *belt* Due Cuori ha origine a contatto con il fiume Gorzone, spostandosi in direzione Sud-Est e dividendosi in due ramificazioni che divergono rispettivamente verso Nord e verso Sud. Facente parte dell'Unità di Cavarzere, legata al fiume Adige, ha un'età che va dal 1° millennio a.C. ad oggi (Bondesan et al., 2008). L'origine di questo tracciato è riconducibile ad un'idrografia relitta ereditata dall'ambiente palustre (oggi bonificato). Il Brenta è documentato nell'area in studio, solo dalla presenza della *channel belt* “Brenton” che da Santa Margherita prosegue in direzione Est/Sud-Est, passando per Civè e Cà Bianca, fino a unirsi al Gorzone. Analisi sedimentologiche eseguite su campioni di sabbia del Brenton, hanno rivelato un'origine legata al fiume Adige. Il tracciato fluviale è stato infatti preso in carico dal fiume Brenta durante il periodo medioevale (Bondesan et al., 2008).

I *crevasse channel* osservati sono concentrati principalmente in due aree, a E di Cona (fig. 10) e a Nord della *belt* di “Po (rotta)” già descritti in precedenza. L'area a Est di Cona è caratterizzata da *crevasse splays* e *crevasse channel* associati fra loro, dovuti probabilmente ad eventi di rottura



Fig. 10 *crevasse splays* e *crevasse channel* a E di Cona. A fianco la foto non digitalizzata.

dell'argine del dosso di Saline-Cona. Nei depositi di crevasse associati alla *belt* di “Po (rotta)” è possibile notare una maggiore continuità dei corpi canalizzati, che tendono a creare dei sistemi distributivi con ramificazioni molto marcate.

Nelle successive interpretazioni e discussione dei dati, sono escluse le *belt* di Terrassa Padovana e la porzione occidentale del ramo di Conselve fino a Concadalbero, per assenza di dati riferiti alle linee di centro canale.

#### 4.2 Caratterizzazione morfometrica

Nei successivi paragrafi verranno descritti i risultati relativi ai grafici di distribuzione di frequenza per ogni channel belt, rispetto ai parametri considerati. In particolare verranno considerati la sinuosità, il raggio di curvatura (normalizzato a  $L_{xy}$ ), l'ampiezza (normalizzata a  $L_{xy}$ ) e l'indice di asimmetria. Di seguito verranno trattati i grafici bivariati in modo da osservare possibili relazioni fra i parametri considerati. Nella tabella (fig. 11) sono inseriti i valori medi dei diversi parametri, per ogni belt analizzata.

<i>ID channel belt</i>	<i>L<sub>b</sub></i> (media) [m]	<i>n° meandri</i>	<i>S</i> (media)	<i>R<sub>c</sub></i> (media) [m]	<i>A</i> (media) [m]	<i>I<sub>A</sub></i> (media)
<b>SALINE-CONA</b>	208	11	1,11	585	120	0,09
<b>CONSELVE</b>	201	5	1,05	1129	61	0,16
<b>PO AGNA</b>	141	21	1,18	423	141	-0,04
<b>PO AGNA (rotta 1)</b>	80	7	1,04	377	30	0,09
<b>PO AGNA (rotta 2)</b>	75	13	1,13	392	44	0,00
<b>PO (rotta)</b>	76	22	1,09	271	51	0,07
<b>ADIGE (rotta)</b>	91	11	1,07	307	52	0,04
<b>ADIGE (rotta 1)</b>	111	33	1,34	287	101	-0,06
<b>ADIGE (rotta 2)</b>	76	24	1,36	235	107	-0,09
<b>BRENTON</b>	185	28	1,38	279	123	-0,01
<b>DUE CUORI</b>	42	11	1,26	131	44	0,17

Fig. 11 tabella contenente i valori medi dei parametri per i meandri digitalizzati.

## Sinuosità

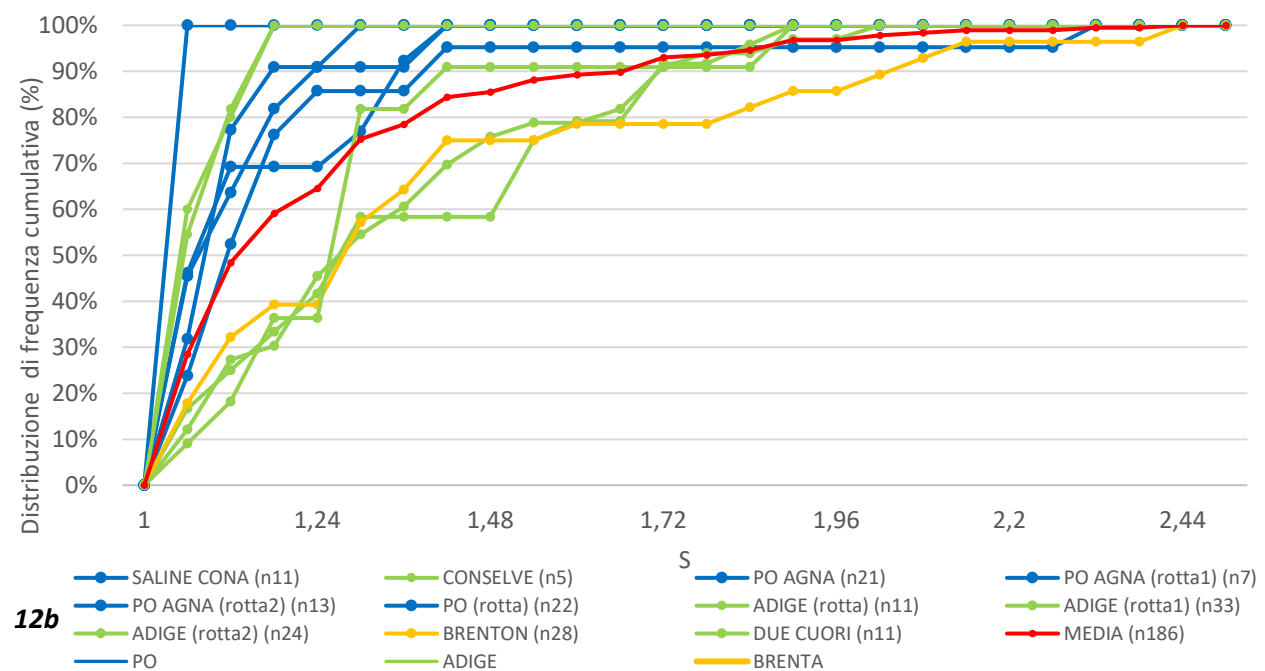
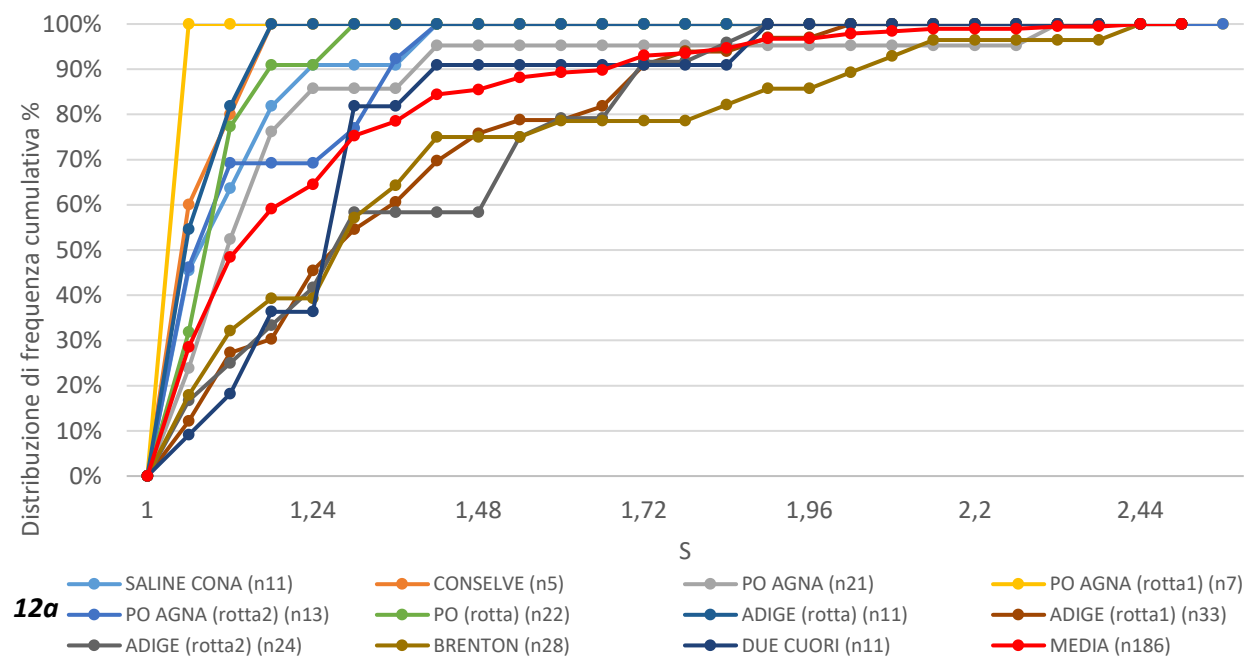


Fig. 12a) grafico di distribuzione di frequenza (sinuosità); 12b) classificazione per sistema idrografico.

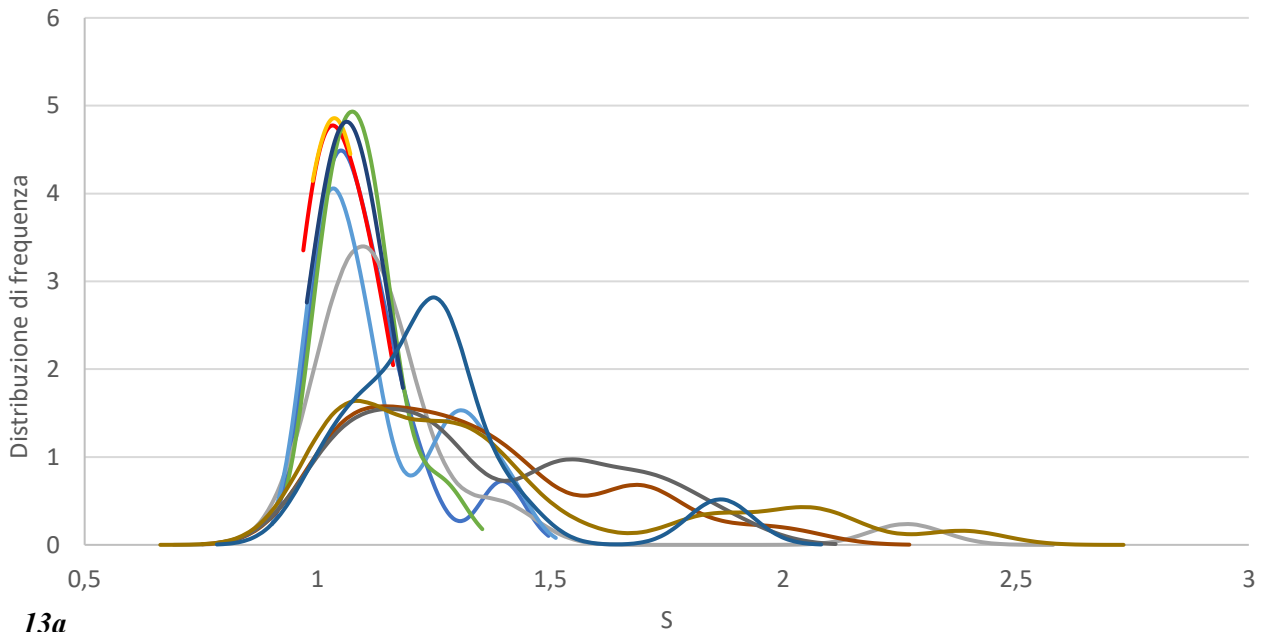
Il grafico (fig. 12a) mostra la distribuzione di frequenza cumulativa percentuale della sinuosità. La larghezza delle classi (o *bin range*) ha un valore di  $h=0,06$ , simile a quelli delle *bandwidth* utilizzate per creare i grafici di *Kernel Density Estimation*, che fornisce una divisione in classi utile ad evitare fenomeni di *overfitting* (nei quali ogni valore cadrebbe in una classe diversa). Utilizzando la divisione in quartili, è stato possibile fare le dovute considerazioni rispetto ai grafici di distribuzione di frequenza cumulativa percentuale. Si può notare come il 25% dei valori abbia sinuosità minore di

1,13 (“Due Cuori”). Il secondo quartile (mediana) è caratterizzato da valori di sinuosità da 1,05 a 1,26 (“Adige (rotta)” e “Brenton”), con un valore medio di sinuosità pari a 1,13, che indica come il 50% dei valori abbia valori di sinuosità molto bassi. Il terzo quartile possiede un’elevata variabilità di valori, che vanno da 1,10 a 1,54 (“Adige (rotta)” e “Brenton”), ma che si mantengono a sinuosità molto basse. Il fatto che il 75% dei valori non superi la soglia di sinuosità pari 1,54 è fortemente indicativo della bassa sinuosità dei meandri analizzati.

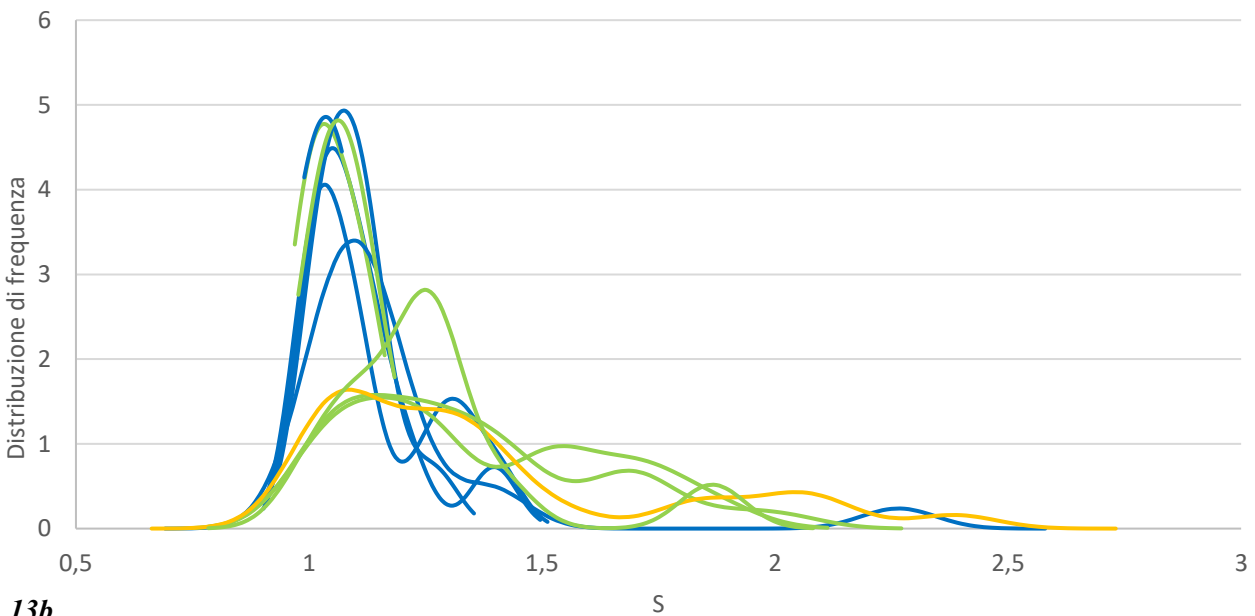
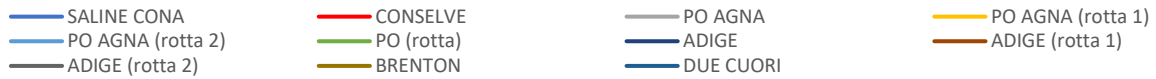
Eseguendo una classificazione cromatica delle curve (*fig. 12b*), distinguendole rispetto al diverso sistema idrografico, è stato possibile fare alcune osservazioni. Considerando il terzo quartile (75% dei valori) si è potuto notare, per quanto riguarda il fiume Po, che il valore di sinuosità maggiore viene raggiunto dalla *belt* “Po Agna” ( $S=1,17$ ), mentre quello minore dalla *belt* “Po (rotta)” ( $S=1,12$ ). Mantenendo le stesse considerazioni, per il fiume Adige si osserva un valore di soglia massimo  $S=1,54$  per “Adige (rotta 2)” e minimo  $S=1,10$  per “Adige (rotta)”. Si denota quindi una variabilità molto marcata per i valori dell’Adige, con *belt* che raggiungono valori del parametro  $S$  molto più elevati. È inoltre possibile osservare come le *belt* riferite al sistema idrografico del fiume Adige si discostino dall’andamento a sinuosità elevata delle altre, ovvero “Conselve”, “Adige (rotta)” e “Due Cuori”. Il “Brenton”, sebbene sia l’unico rappresentante del sistema idrografico del fiume Brenta possiede un comportamento analogo alle *channel belt* del fiume Adige, con una sinuosità riferita al terzo quartile pari a 1,45. È possibile quindi notare come le *belt* collegate al sistema idrografico del Po (e appartenenti ad un’idrografia più antica) abbiano un comportamento comune in termini di sinuosità, con l’eccezione della *belt* “Adige (rotta)”. Ricordiamo inoltre che la *belt* del dosso di Conselve appartiene al sistema idrografico del fiume Adige in quanto è la continuazione dei rami dell’Adige di Este-Monselice-Pernumia, tuttavia il tratto analizzato fa parte dell’antica continuazione del ramo settentrionale del Po (Saline-Cona) che sfociava in laguna e che è stato successivamente preso in carico dall’Adige. È perciò ragionevole pensare ad un comportamento analogo ai canali del sistema idrografico del fiume Po. Per quanto riguarda il Brenton è necessario precisare come esso appartenga al sistema idrografico del fiume Brenta, che fa però parte di un antico percorso atesino legato al fiume Adige (comprovato da analisi petrografiche sulle sabbie) (Bondesan et al., 2008). Il canale Due Cuori mostra un comportamento di sinuosità borderline fra i due sistemi idrografici, ma appartenendo all’Unità di Cavarzere, legata al fiume Adige, è stato scelto di assegnarlo a questo fiume. La tendenza potrebbe essere collegata alla scala, poiché il tracciato in questione è di dimensioni modeste rispetto alle altre *belt* analizzate (larghezza media = 41,8m, lunghezza = 2260,7m) La *belt* denominata “Adige (rotta)” mostra un andamento analogo alle curve del reticolo

del Po, il che potrebbe essere dovuto al basso numero di meandri analizzati (11) rispetto agli altri canali di rotta del fiume Adige.

Il grafico (fig. 13a) mostra la KDE dei valori di sinuosità delle diverse *channel belt*, considerando un valore di *bandwidth* di  $h=0,05-0,09$ . Rappresentando le curve appartenenti ai diversi sistemi idrografici, similmente a quanto fatto per il grafico precedente, si osserva (fig. 13b) come questo tipo



13a



13b

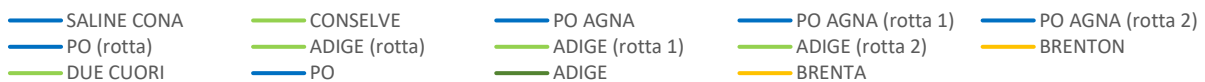


Fig. 13a) grafico KDE (sinuosità) 13b) classificazione per sistema idrografico.

di elaborazione dei dati fornisca un'interpretazione analoga alla precedente. Si denota, con alcune eccezioni, come le *belt* appartenenti al Po siano caratterizzate da picchi ben definiti e centrati per valori di  $S=1,0$ , mentre le *belt* dell'Adige mostrino picchi molto appiattiti e centrati a sinuosità più elevate ( $S=1,0$  e  $1,5$ ). Le anomalie osservate nei grafici di distribuzione di frequenza cumulativa percentuale, si confermano essere le *belt* di "Adige (rotta)" e "Conselve", le quali mostrano dei picchi ben definiti per bassi valori di sinuosità. Il "Brenton" anche con questo metodo di visualizzazione si identifica come una *channel belt* con andamento affine al sistema dell'Adige. La *channel belt* "Due cuori", già discussa in precedenza, mostra un primo picco ben definito centrato a valori di  $S=1,25$  e un secondo meno marcato a sinuosità maggiori.

### Raggio di curvatura

Il grafico in figura (fig. 14a) mostra la distribuzione di frequenza cumulativa percentuale per il raggio di curvatura (normalizzato alla lunghezza cartesiana) nelle diverse *channel belt*, per un valore di *bin range* di  $h=0,07$ . In merito al *bin range* è stato deciso un valore diverso rispetto a quello utilizzato per i grafici *KDE* (con  $h=0,3$ ), poiché un valore così basso sarebbe risultato in una divisione in classi di difficile interpretazione.

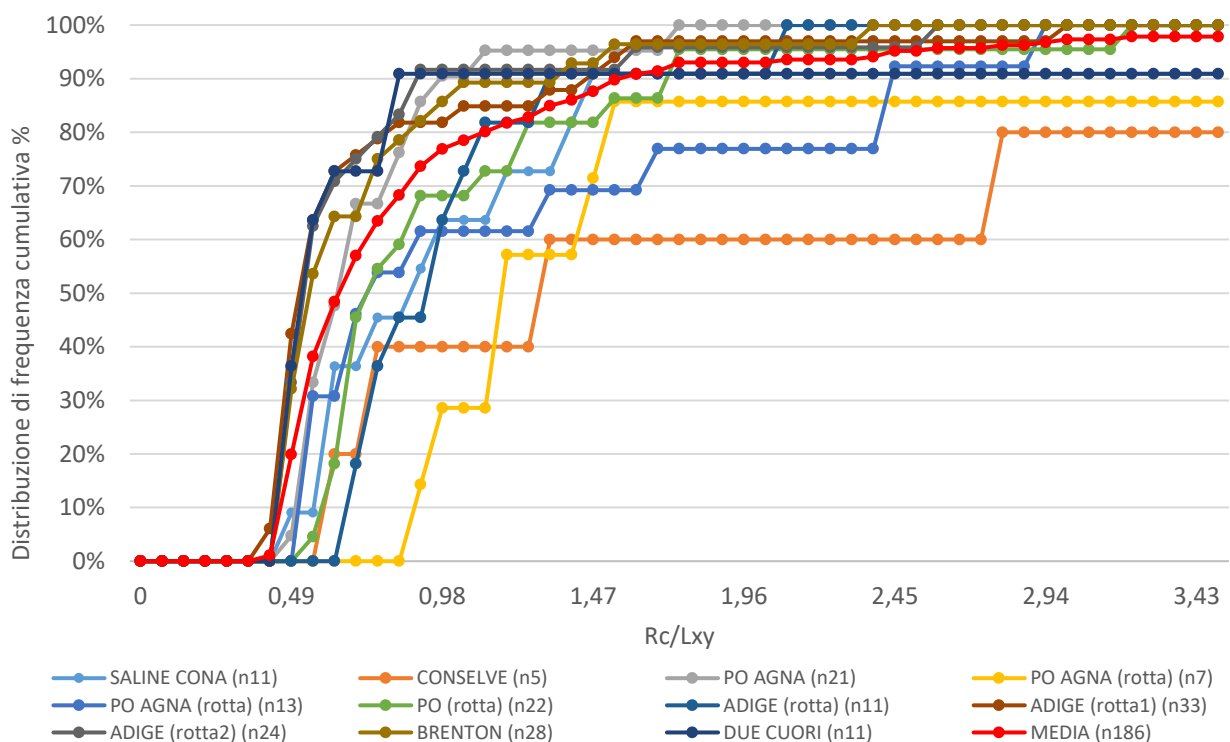


Fig. 14a) grafico distribuzione di frequenza (raggio di curvatura).



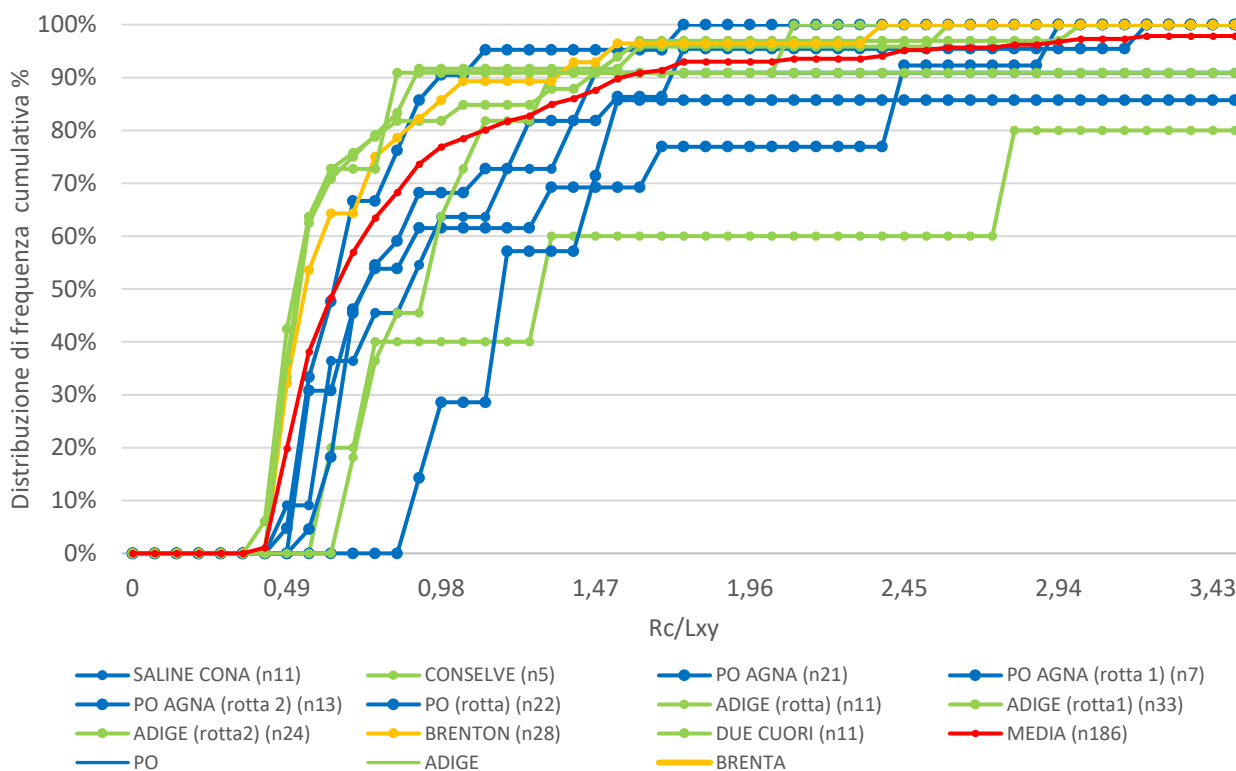


Fig. 14b) grafico distribuzione di frequenza (raggio di curvatura), classificazione per sistema idrografico.

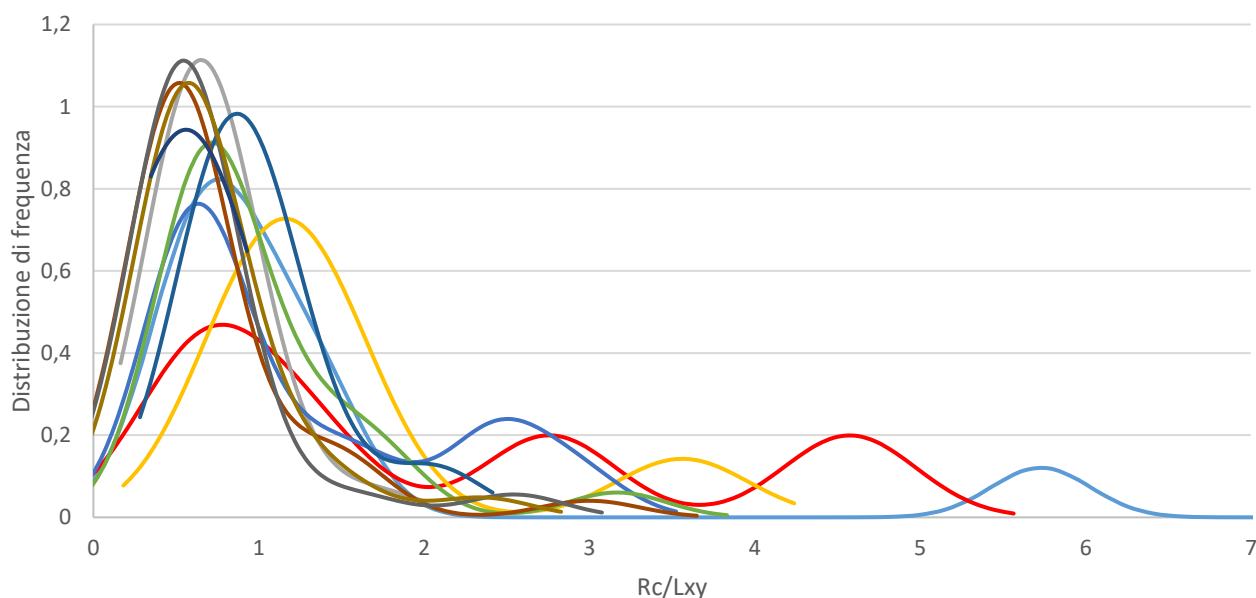
Andando ad analizzare il primo quartile, si può notare una variabilità molto bassa nei valori di raggio di curvatura normalizzato, che rimane nell'intervallo fra 0,47 e 0,55, calcolato rispettivamente dalle curve di "Adige (rotta 1)" e "Po Agna (rotta 2)". Dal calcolo dei quartili sono state escluse le *belt* di "Conselve" e "Po Agna (rotta 1)" perché risultanti dall'analisi di un basso numero di meandri. Il valore del parametro, considerando la mediana, si assesta invece in un intervallo di  $R_c$  di 0,51-0,95 ("Adige (rotta 1)" e "Adige (rotta)" rispettivamente) e denota una variabilità alta nei valori di raggio di curvatura (media=0,64). Il terzo quartile rispetto ai casi precedenti, è caratterizzato da un ampio intervallo di valori ( $R_c$  fra 0,64 e 1,67) che rappresenta come le *belt* abbiano dei valori di raggio di curvatura molto diversi fra loro.

Il grafico (fig. 14b) presenta le diverse curve ricolorate in base all'appartenenza al proprio sistema idrografico. Nel calcolare la variabilità rispetto al terzo quartile fra i diversi sistemi idrografici, si è deciso di includere la curva di "Conselve" fra quelle del Po, poiché il suo andamento si discosta di molto dalle altre curve dell'Adige e la sua origine è legata alla *belt* di Saline-Cona (Po). La variabilità del raggio di curvatura risulta in un intervallo fra 0,64 e 1,07 per l'Adige, mentre fra 0,78 e 2,76 per il Po. Evitando di considerare la *belt* "Conselve", per il basso numero di meandri analizzati, diminuisce la variabilità con un intervallo di  $R_c$  fra 0,64 e 1,67.

Il 75% dei dati della *belt* "Brenton" possiede un valore di raggio di curvatura minore di 0,75, il quale si avvicina molto ai valori ottenuti per le *belt* dell'Adige (visualizzabile anche dall'andamento della

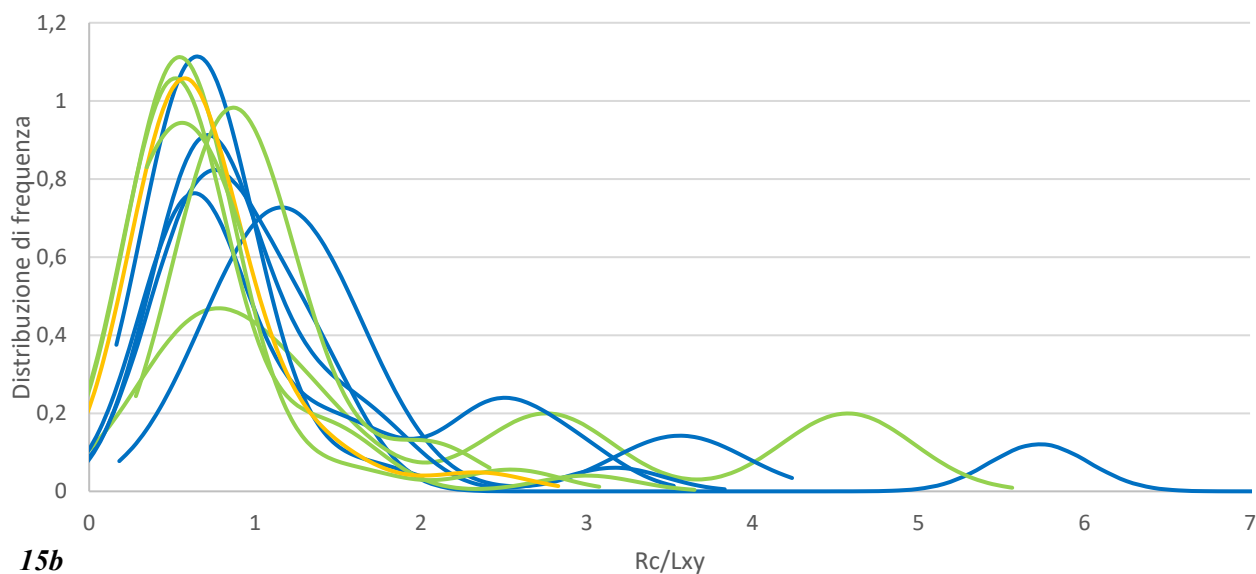
curva all'interno del grafico), a prova della possibile relazione con questo sistema idrografico. Le *belt* di "Po Agna" e "Adige (rotta)" mostrano inoltre un andamento ibrido fra i sistemi idrografici di Po e Adige. In particolare "Adige (rotta)" per basse percentuali segue il comportamento delle *belt* del Po, mentre nella porzione finale (a percentuali > 80%) sembra essere affine a quelle dell'Adige.

I grafici di *KDE* del raggio di curvatura (per  $h=0,3$ ) raffigurano curve con gran parte dei picchi centrati fra 0,5 -1,5, e picchi secondari più appiattiti per valori leggermente più elevati (fig. 15a). Considerando anche in questo caso l'appartenenza ai due diversi sistemi idrografici è possibile fare diverse considerazioni rispetto all'andamento delle curve (fig. 15b).



**15a**

— SALINE CONA	— CONSELVE	— PO AGNA	— PO AGNA (rotta 1)
— PO AGNA (rotta 2)	— PO (rotta)	— ADIGE (rotta)	— ADIGE (rotta 1)
— ADIGE (rotta 2)	— BRENTON	— DUE CUORI	



**15b**

— SALINE CONA	— CONSELVE	— PO AGNA	— PO AGNA (rotta 1)	— PO AGNA (rotta 2)
— PO (rotta)	— ADIGE (rotta)	— ADIGE (rotta 1)	— ADIGE (rotta 2)	— BRENTON
— DUE CUORI	— PO	— ADIGE	— BRENTA	

Fig. 15a) grafico KDE (raggio di curvatura) 15b) classificazione per sistema idrografico.

Una caratteristica comune delle curve dell'Adige è quella di avere dei singoli picchi, con distribuzione di probabilità elevata, centrati a valori di raggio di curvatura fra 0,20 e 1,00. Il comportamento simile fra le *belt* dell'Adige è possibile osservarlo dalle curve di "Adige (rotta 1)", "Adige (rotta 2)" e "Due Cuori". Sebbene alcune delle curve del Po mostrino un andamento simile alle precedenti per quanto riguarda i picchi principali, sono generalmente caratterizzate dalla presenza di picchi secondari centrati a valori di  $R_c$  fra 0,40 e 1,20; ben visibili nelle *belt* di "Po Agna (rotta 1)", "Po Agna (rotta 2)" e Saline-Cona. Utilizzando questo approccio descrittivo, possiamo osservare come alcune curve possiedano delle caratteristiche borderline fra i due sistemi idrografici. Un esempio è la *belt* "Adige (rotta)" che presenta un singolo picco ben definito, simile alle curve dell'Adige, ma centrato a valori di raggio di curvatura più elevati, che denota un'affinità anche con il sistema del Po. La *belt* "Po Agna" invece, pur appartenendo al sistema idrografico del Po, appare nei grafici *KDE* come un singolo picco ben definito centrato a valori fra 0,20 e 1,00 di raggio di curvatura. Per quanto riguarda la curva di "Conselve", l'andamento anomalo potrebbe essere dovuto al basso numero di meandri da cui è composta la *channel belt*. Il "Brenton" anche in questa rappresentazione grafica, si mostra conforme al sistema idrografico dell'Adige, con un picco singolo analogo a quelli appena descritti.

## Ampiezza

Il grafico in (fig. 16a) mostra l'andamento delle curve di probabilità cumulativa percentuale rispetto al parametro dell'ampiezza (normalizzata alla lunghezza cartesiana) per un valore di  $h=0,04$ , definito a partire dalla *bandwidth* dei grafici *KDE*. Nella successiva analisi statistica, per il calcolo dei quartili non sono state considerate le curve con numero di meandri troppo basso ( $< 10$ ).

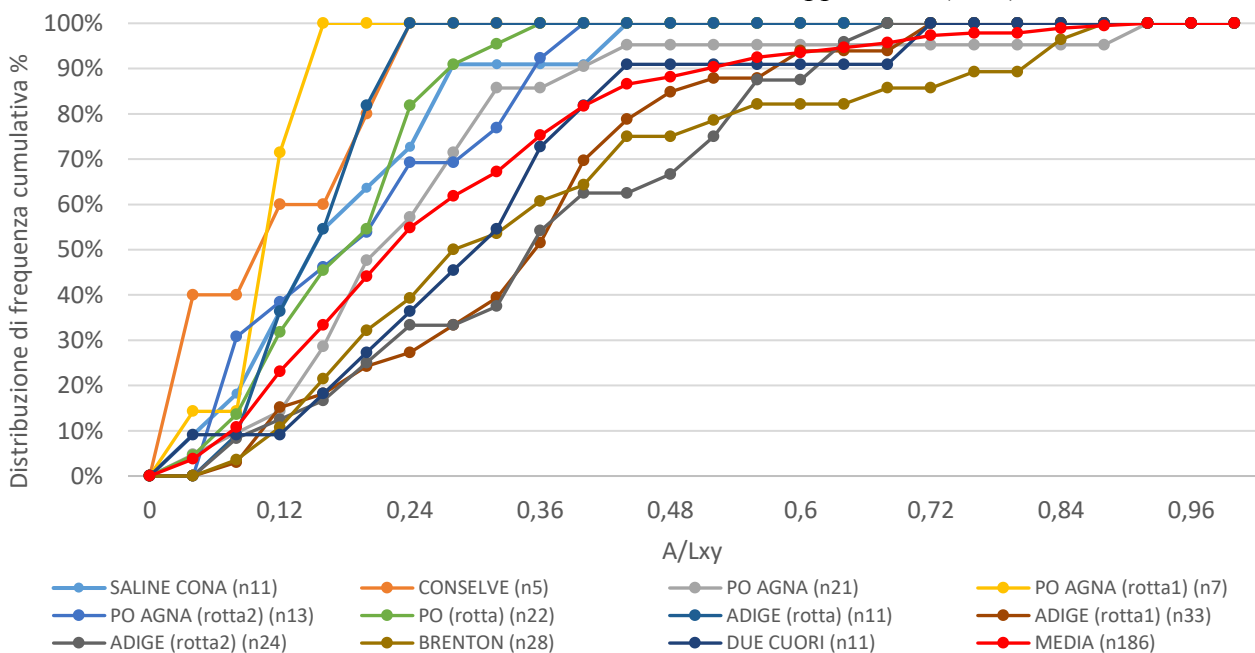


Fig. 16a) grafico distribuzione di frequenza (ampiezza).

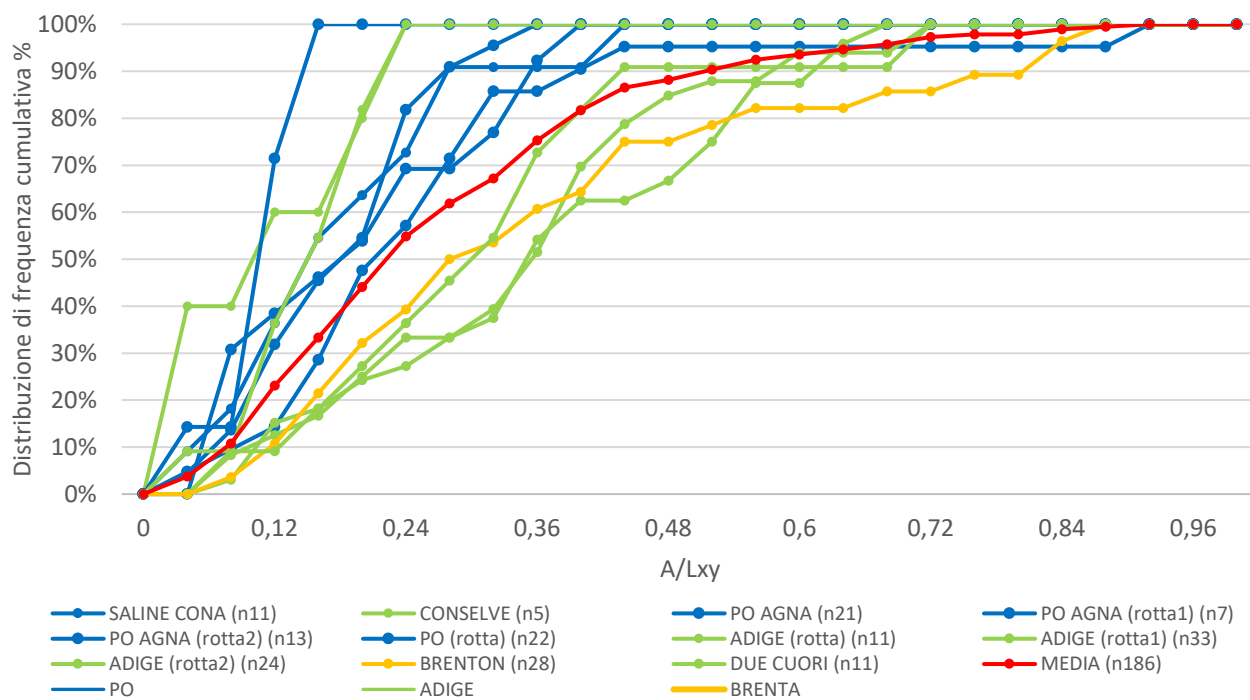


Fig. 16b) grafico distribuzione di frequenza (ampiezza), classificazione per sistema idrografico.

Il primo quartile mostra come il 25% dei dati assuma valori di ampiezza normalizzata minori di 0,22, un valore soglia calcolato dalla *belt* “Adige (rotta 1)”. L’elaborazione rispetto alla mediana, è stata eseguita sulle curve “Adige (rotta)” e “Adige (rotta 1)” ed evidenzia invece una certa variabilità fra i valori di ampiezza, con un intervallo che va da 0,13 a 0,35 (media = 0,22) e che riflettono dei valori di ampiezza molto bassi. Utilizzando come riferimento il terzo quartile, si denota una maggiore variabilità nei valori di ampiezza ( $A = 0,19 - 0,51$ , riferiti a “Adige (rotta)” e “Adige (rotta 2)”), che rimangono comunque piuttosto bassi.

Anche in questo caso le diverse curve sono state classificate utilizzando come criterio l’appartenenza ad un sistema idrografico (Po, Adige, Brenta) (fig. 16b). Utilizzando questa visualizzazione è verosimile affermare che in linea generale le curve riferite ai diversi sistemi idrografici seguano degli andamenti molto diversi fra loro; similmente a quanto osservato nei parametri trattati in precedenza.

Studiando separatamente le *belt* appartenenti ai sistemi idrografici e utilizzando come riferimento il valore del terzo quartile, sono stati calcolati gli intervalli di variabilità delle curve, considerando anche quelle con un basso numero di meandri. In particolare per il Po è stato calcolato utilizzando le curve di “Po Agna (rotta 1)” e “Po Agna (rotta 2)”, con un intervallo pari a  $A/L_{xy} = 0,13 - 0,32$ , mentre per l’Adige sono state adottate le *belt* “Conselve” e “Adige (rotta 2)”, con un intervallo  $A/L_{xy} = 0,04 - 0,51$ . Come è possibile osservare anche dal grafico (fig. 16b), le *belt* appartenenti all’Adige mostrano curve molto disperse fra loro, in particolare “Adige (rotta)” e “Conselve” sono simili alle curve del Po, e sono le stesse che nei casi precedenti mostravano un comportamento anomalo.

L'intervallo riferito al terzo quartile per le *belt* dell'Adige, calcolato senza le curve anomale vale  $A/L_{xy} = 0,36 - 0,51$ . Anche la serie "Po Agna (rotta 1)" si discosta dall'andamento generale delle altre *belt* del Po ma potrebbe essere dovuto dal limitato numero di meandri (7). La *channel belt* "Brenton" presenta anche in questo caso una curva in linea con quelle inerenti al sistema dell'Adige, con un valore di  $A/L_{xy} = 0,44$ ; all'interno dell'intervallo dell'Adige. Alcune di queste *belt* hanno tuttavia comportamenti ibridi rispetto ai due sistemi idrografici, ad esempio la curva ripida "Adige" che mostra caratteristiche analoghe alle curve del Po. La *channel belt* "Po Agna viceversa, anche mostrando un comportamento conforme alle *belt* del proprio sistema idrografico di appartenenza, tende a raggiungere valori di ampiezza dei meandri maggiori rispetto alle altre.

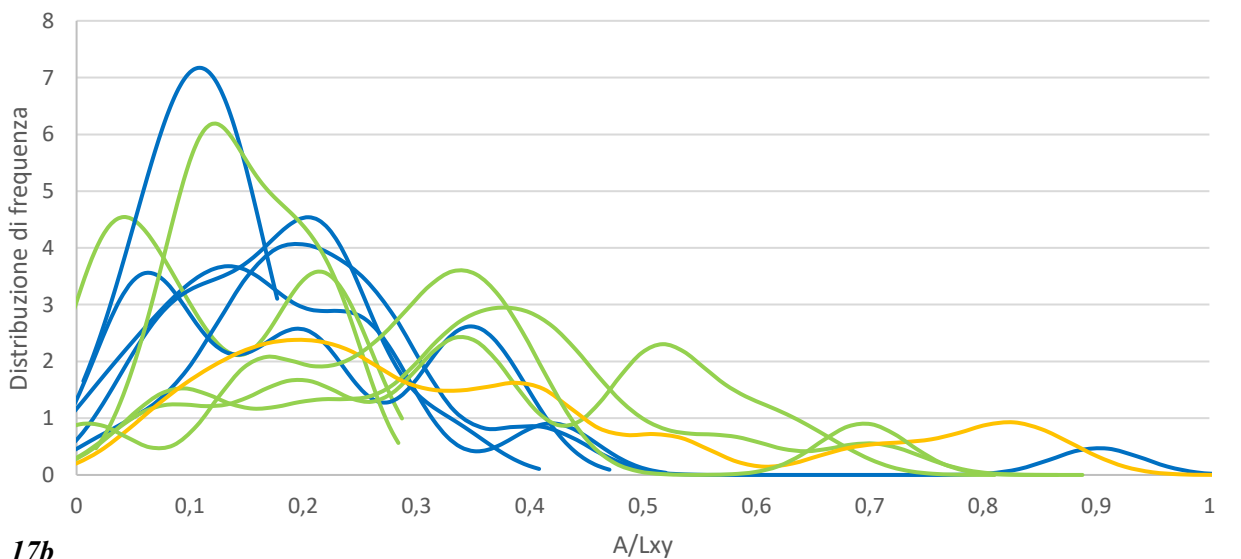
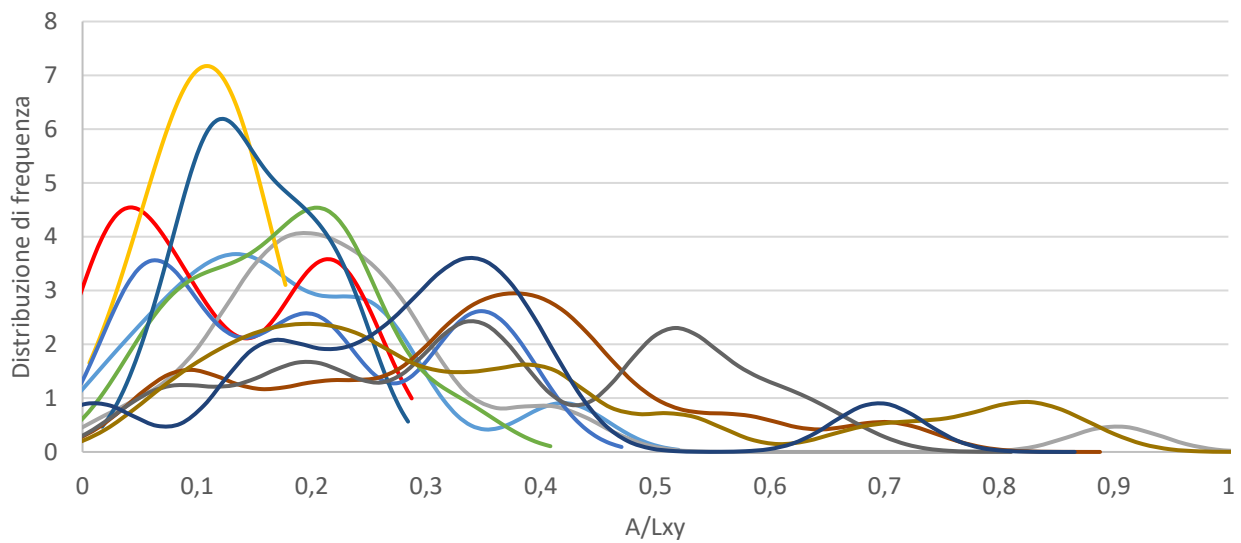


Fig. 17a) grafico KDE (ampiezza); 17b) classificazione per sistema idrografico.

I grafici di *KDE* (con *bandwidth*  $h=0,04$ ) (fig. 17a) mostrano curve con andamenti diversi fra loro in cui è possibile riconoscere due famiglie principali; una prima con picchi più definiti e centrati per valori fra 0 e 0,4, mentre una seconda con picchi tendenzialmente più appiattiti che occupano valori di ampiezza fra 0 e 0,8.

Eseguendo la differenziazione cromatica in base al sistema idrografico (fig. 17b), è possibile distinguere le diverse curve all'interno delle famiglie appena descritte. Tuttavia il criterio utilizzato non è funzionale all'analisi delle *belt* "Adige (rotta)" e "Conselve" che, come nei casi precedenti, mostra un comportamento non uniforme alle *belt* associate al reticolo del fiume Adige. Pertanto è verosimile indentificare nei due sistemi idrografici due distribuzioni distinte rispetto al parametro ampiezza.

### Asimmetria

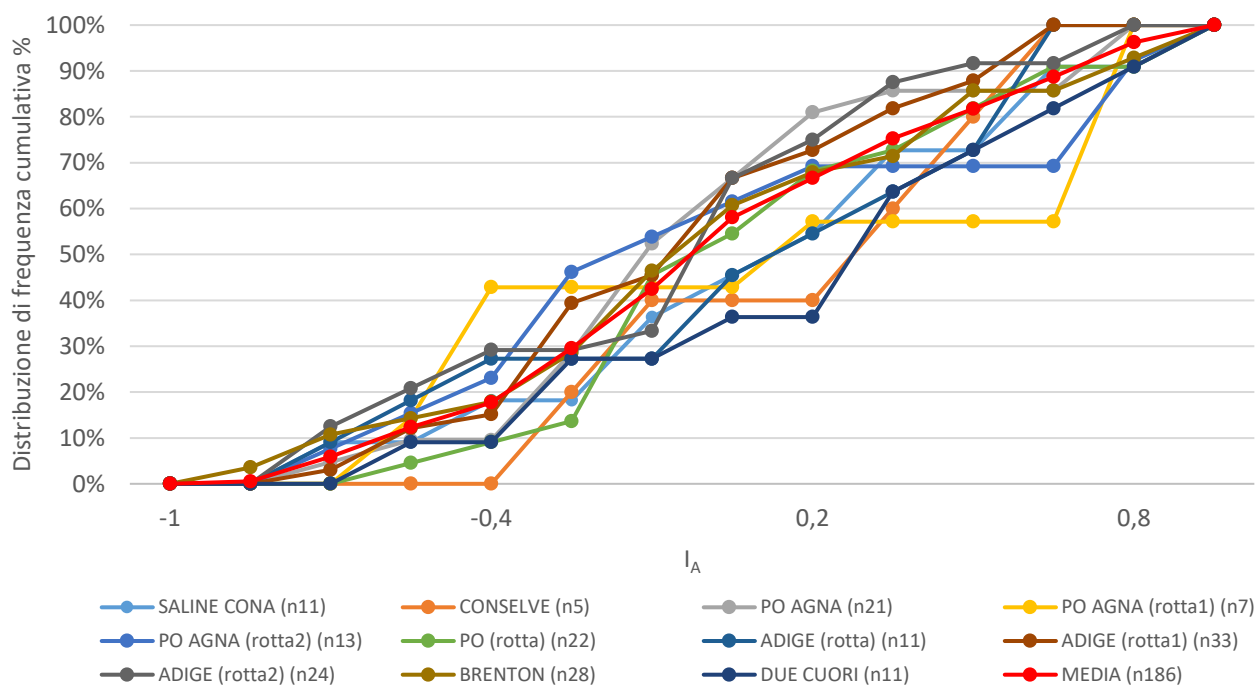


Fig. 18a) grafico di distribuzione di frequenza (asimmetria).

Il grafico in (fig. 18a) mostra le curve di probabilità cumulativa percentuale riferite all'indice di asimmetria per ogni *channel belt* analizzata, la cui divisione in classi si basa su una *bandwidth*  $h=0,15$ . Come nei casi precedenti è stata eseguita un'analisi statistica utilizzando i valori soglia dei quartili. Il primo quartile mostra una bassa variabilità dell'indice di asimmetria che rimane in un intervallo fra -0,44 e -0,19 (riferite a "Adige (rotta 2)" e "Po (rotta)"). Ciò indica che il 25% dei meandri sono meandri da simmetrici a poco asimmetrici (*upstream skewed*). La mediana descrive un intervallo fra -0,22 ("Po Agna (rotta 2)") e 0,25 ("Due Cuori"), che anche con una variabilità più elevata indica la presenza di meandri prevalentemente simmetrici. Il valore della media, che vale -0,04, conferma

questa previsione. Il terzo quartile comprende i valori soglia del 75% dei valori, con un intervallo molto ampio (fra 0,08 e 0,71) riferito alle *belt* di “Po Agna” e “Po Agna (rotta 2)”, che mostra una variabilità dei valori molto elevata. Il fatto che il 75% dei valori assuma valori di  $I_A$  minori di 0,71 indica la presenza di meandri asimmetrici *downstream skewed*.

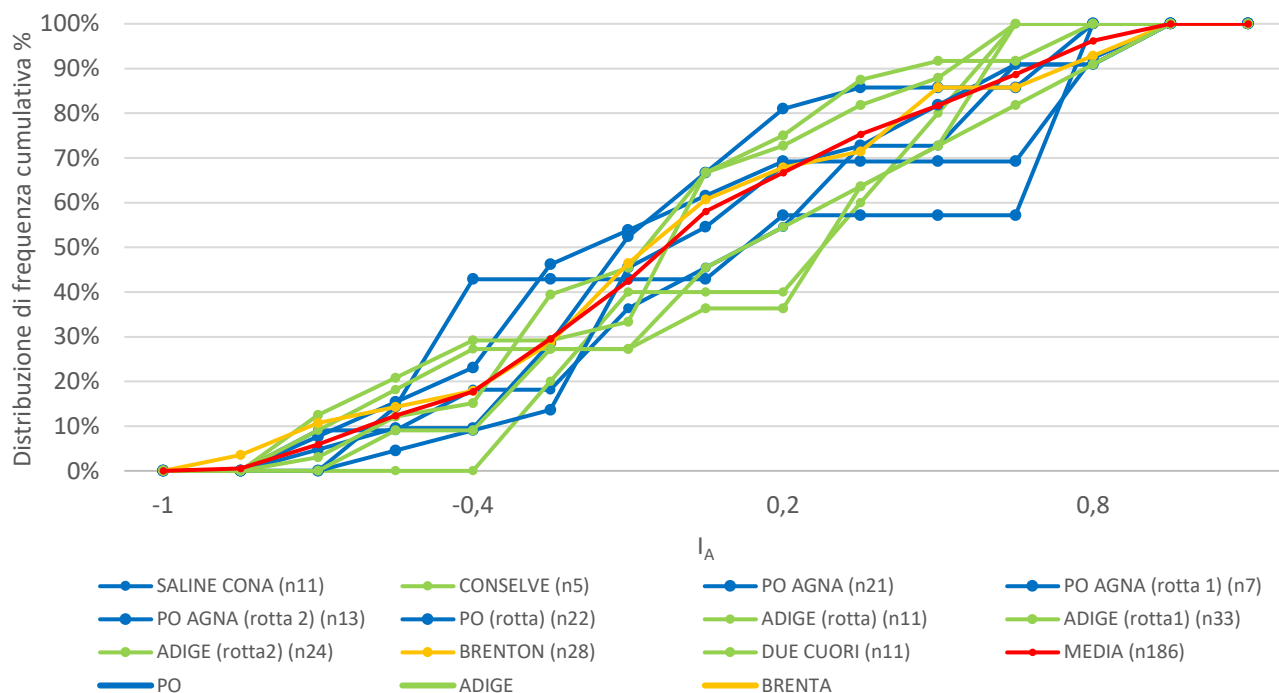


Fig. 18b) grafico di distribuzione di frequenza (asimmetria), classificazione per sistema idrografico.

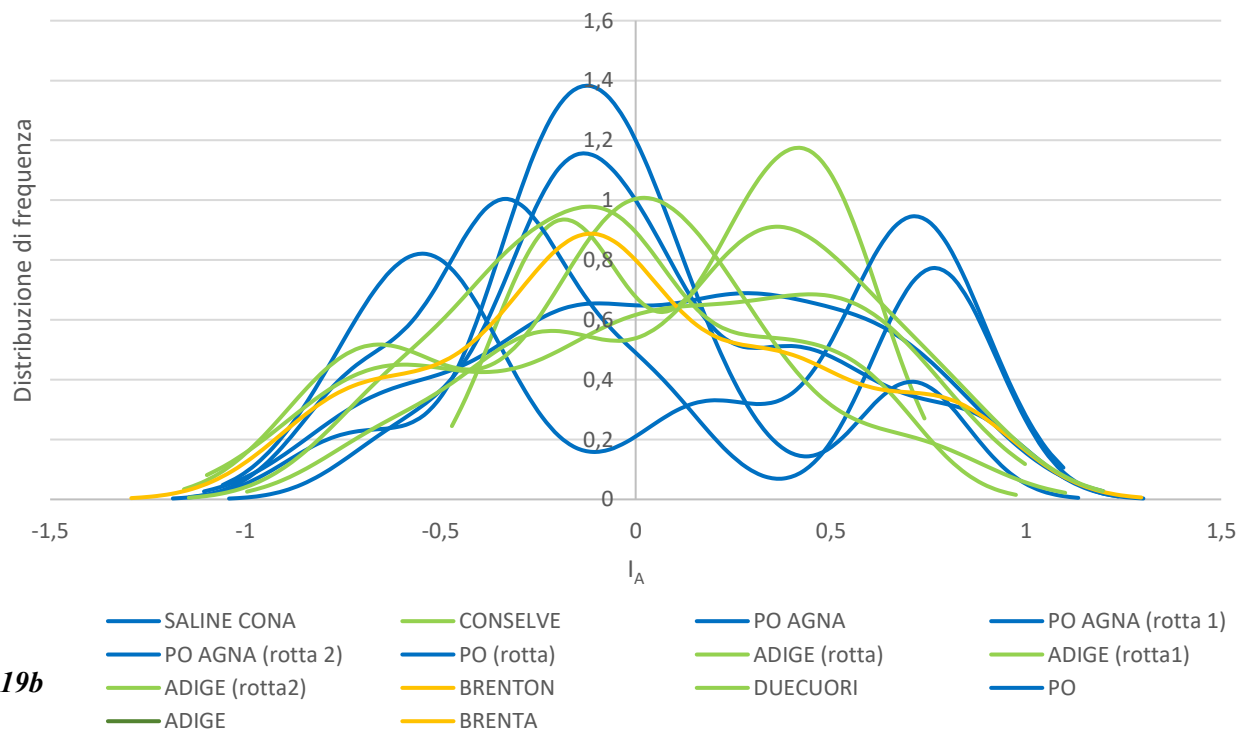
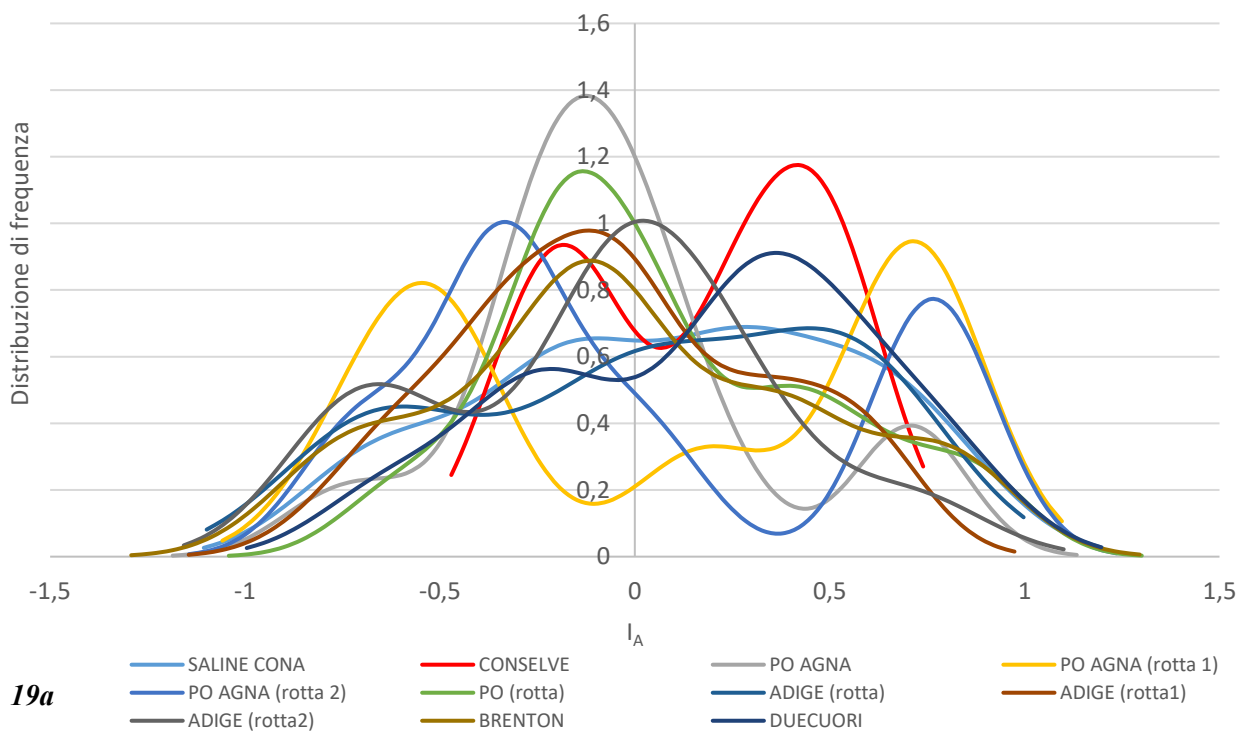
Nel grafico in (fig. 18b) è stata applicata la divisione delle curve sulla base del reticolo idrografico di appartenenza, come eseguito per i parametri precedenti. L’analisi della variabilità rispetto al terzo quartile ha evidenziato due intervalli diversi per i diversi sistemi idrografici:

- Il Po ha un indice di asimmetria che va da 0,08 a 0,71 e che mostra un’alta variabilità dei dati (riferiti a “Po Agna” e “Po Agna (rotta 2)”).
- L’Adige mostra una variabilità minore dell’indice di asimmetria che va da 0,20 a 0,46; riferiti rispettivamente a “Adige (rotta 2)” e “Due Cuori”.
- Il Brenta (“Brenton”) mostra un valore dell’indice di asimmetria pari a  $I_A=0,37$ .

In questo caso la differenziazione in base all’appartenenza ai diversi sistemi idrografici non ha messo in evidenza differenze sostanziali, se non nella variabilità dei meandri analizzati.

Il grafico esposto (fig. 19a) è il risultato dell’elaborazione in *KDE* dei valori di asimmetria, utilizzando diversi valori di *bandwidth* per le diverse curve (tabella fig. 20), mantenendo i valori di *h*

all'interno di un range fra 0,14 e 0,23. Le curve sono state divise sulla base del diverso sistema idrografico di appartenenza (*fig. 19b*) in modo da poter osservare eventuali diversità.



*Fig. 19a) grafico KDE (asimmetria); 19b) classificazione per sistema idrografico.*

Le curve correlate al sistema del Po mostrano meandri generalmente asimmetrici (*upstream/downstream*), con due picchi distribuiti specularmente all'origine, tranne alcune eccezioni;



la *belt* di “Po (rotta)” con un singolo picco centrato a valori vicini allo zero (*belt* simmetrica) e la *belt* di “Po Agna” con un picco più pronunciato centrato sull’origine e uno con distribuzione di frequenza minore per valori di asimmetria positivi (*downstream skewed*). Le *belt* legate al sistema dell’Adige presentano picchi generalmente più appiattiti (es. “Adige (rotta)”) a testimonianza di una maggior variabilità dei valori, sia per valori positivi che negativi (meandri asimmetrici). Inoltre è possibile osservare come la *belt* di “Saline-Cona” abbia un comportamento conforme con le *belt* legate all’Adige, con un picco molto appiattito simile alla *belt* “Adige (rotta)”. L’unica *belt* relativa al sistema del Brenta (“Brenton”), relativamente a questo parametro, non mostra una marcata affinità al sistema dell’Adige come invece era stato possibile osservare per i precedenti.

<b>ID channel-belt</b>	<b><i>h</i></b>
SALINE CONA	0,19
CONSELVE	0,15
PO AGNA	0,14
PO AGNA (rotta)	0,18
PO AGNA (rotta)	0,15
Po (rotta)	0,14
ADIGE (rotta)	0,23
ADIGE (rotta1)	0,15
ADIGE (rotta2)	0,19
BRENTON	0,17
DUE CUORI	0,18

*Fig. 20 tabella con i valori di bandwidth utilizzati per l’analisi KDE del parametro asimmetria.*

Nei paragrafi sottostanti sono stati creati e discussi i grafici bivariati in modo da poter osservare possibili relazioni matematiche fra le variabili considerate. In particolare sono stati creati i seguenti grafici in scala log-log:  $L_s$  vs  $L_{xy}$ ,  $R_c$  vs  $L_{xy}$ ,  $A$  vs  $L_{xy}$ ,  $R_c$  vs  $L_b$ ,  $A$  vs  $L_b$ .

Il grafico (*fig. 21a*) mostra una forte correlazione in scala log-log fra i due parametri. I dati rappresentati sono caratterizzati da bassa dispersione, posizionandosi lungo una linea retta. È possibile osservare una proporzionalità diretta fra la lunghezza intrinseca del meandro ( $L_s$ ) e la distanza fra due flessi successivi ( $L_{xy}$ ). Il valore del coefficiente di correlazione è pari a  $R = 0,9636$  il quale, essendo vicino a +1, prova la presenza di una relazione lineare. L’equazione della retta che descrive la legge di correlazione vale  $L_s = 1,422L_{xy}^{0,9715}$ .

L’analisi grafica (*fig. 21b*) evidenzia la possibile presenza di una relazione lineare fra i parametri  $R_c$  e  $L_{xy}$ , con dati che risultano più dispersi rispetto al precedente. I valori si dispongono infatti su una

retta (in scala log-log) di equazione  $R_c = 0,9159L_{xy}^{0,9678}$ . Il coefficiente di correlazione  $R = 0,7738$  mostra come esista una proporzionalità diretta non perfetta fra le due variabili in esame.

In figura (fig. 21c) si osserva una forte dispersione dei dati rispetto alla retta di regressione visualizzata. Il valore di  $R = 0,6511$  conferma una correlazione lineare debole ( $R < 1$ ) fra il due parametri ( $A$  vs  $L_{xy}$ ) considerati. L'equazione della retta  $A = 0,2518L_{xy}^{0,9632}$  mostra invece la relazione matematica che intercorre fra le due variabili.

L'analisi dei valori di raggio di curvatura in relazione alla larghezza della *belt* (fig. 21d) riflette una forte dispersione dei valori rispetto alla retta di regressione. Il valore del coefficiente di correlazione pari a  $R = 0,2311$  ( $\ll 1$ ) denota l'assenza di una vera e propria correlazione lineare fra le variabili.

Come nel grafico precedente, anche fra i parametri ampiezza ( $A$ ) e larghezza della *belt* ( $L_b$ ) (fig. 21e) si osserva una marcata dispersione dei dati, testimoniata dal basso valore del coefficiente di correlazione pari a  $R = 0,1887$ . Si può affermare quindi che non esista una relazione lineare fra le due variabili considerate.

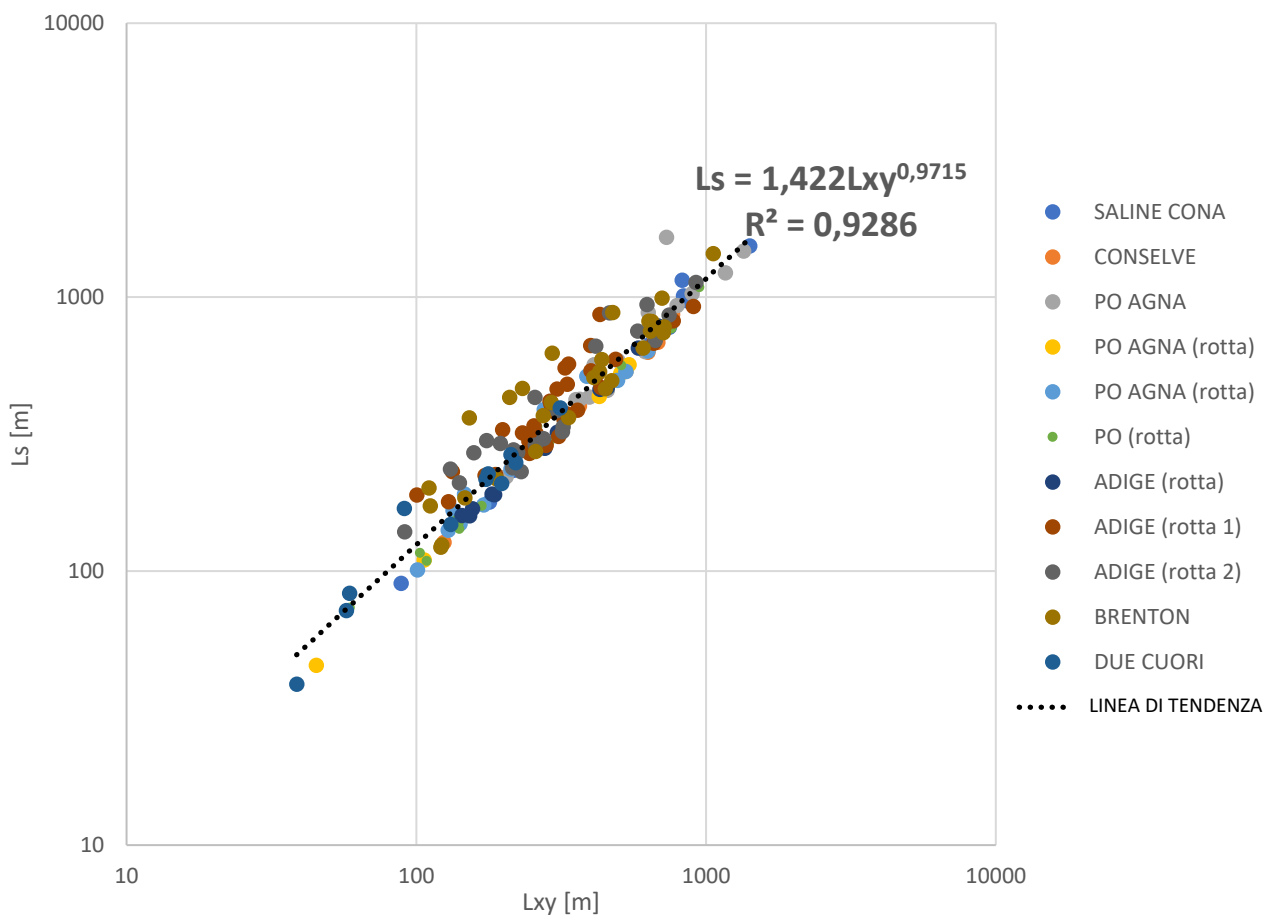
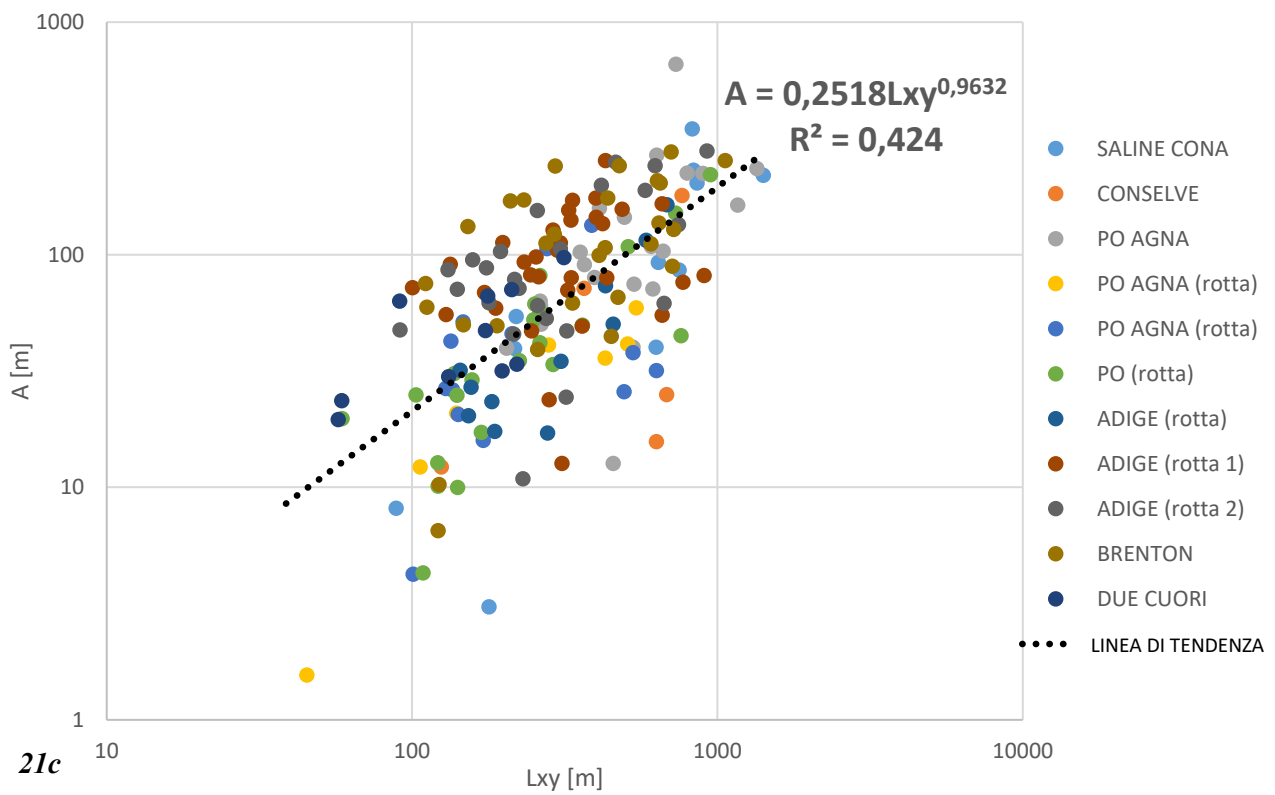
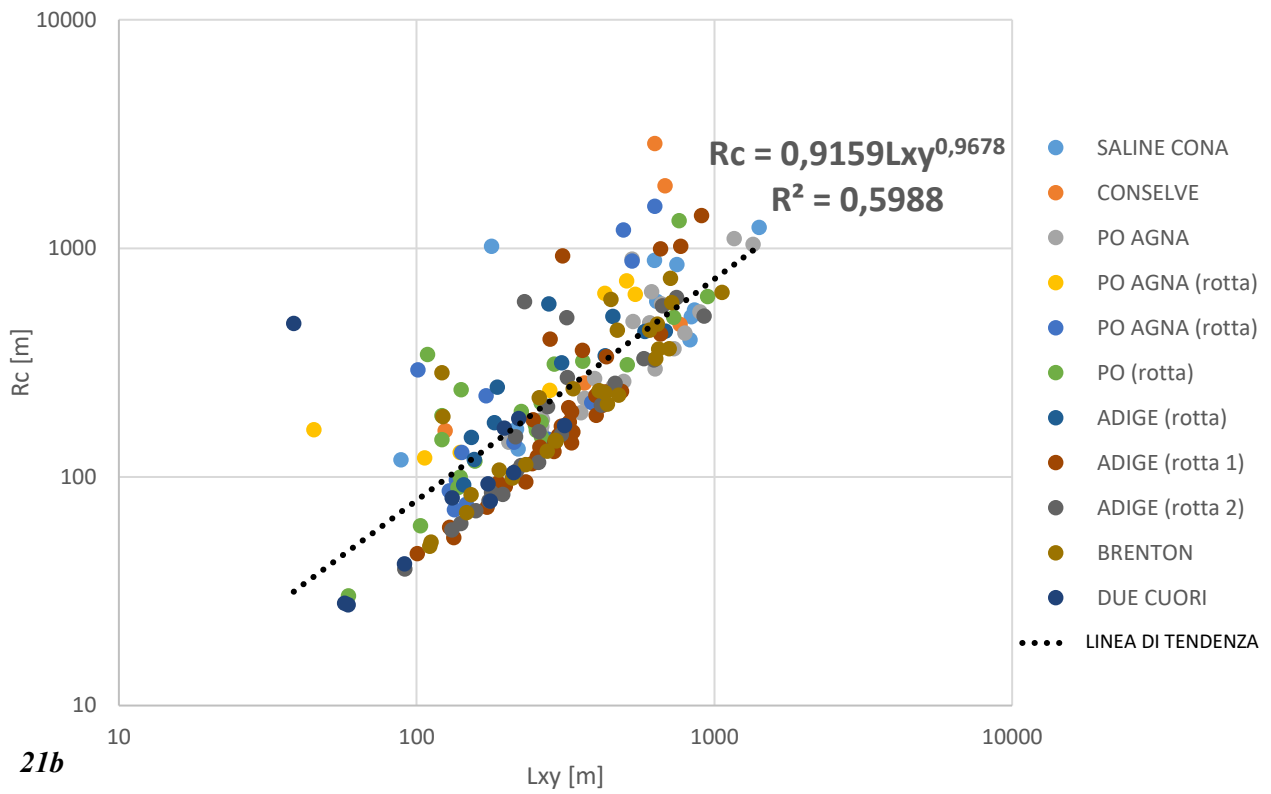


Fig. 21a grafico  $l_s$  vs  $L_{xy}$ .



*Fig. 21b) grafico Rc vs Lxy; 21c) grafico A vs Lxy.*

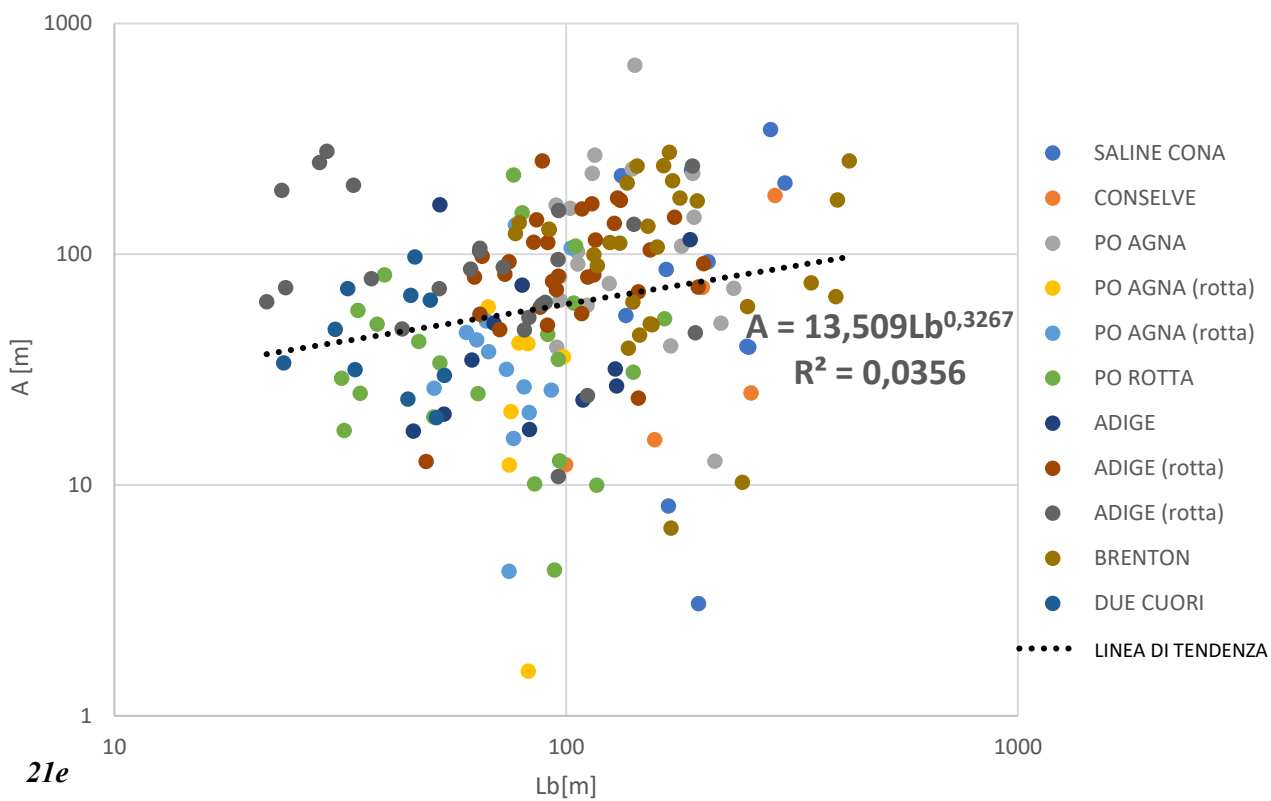
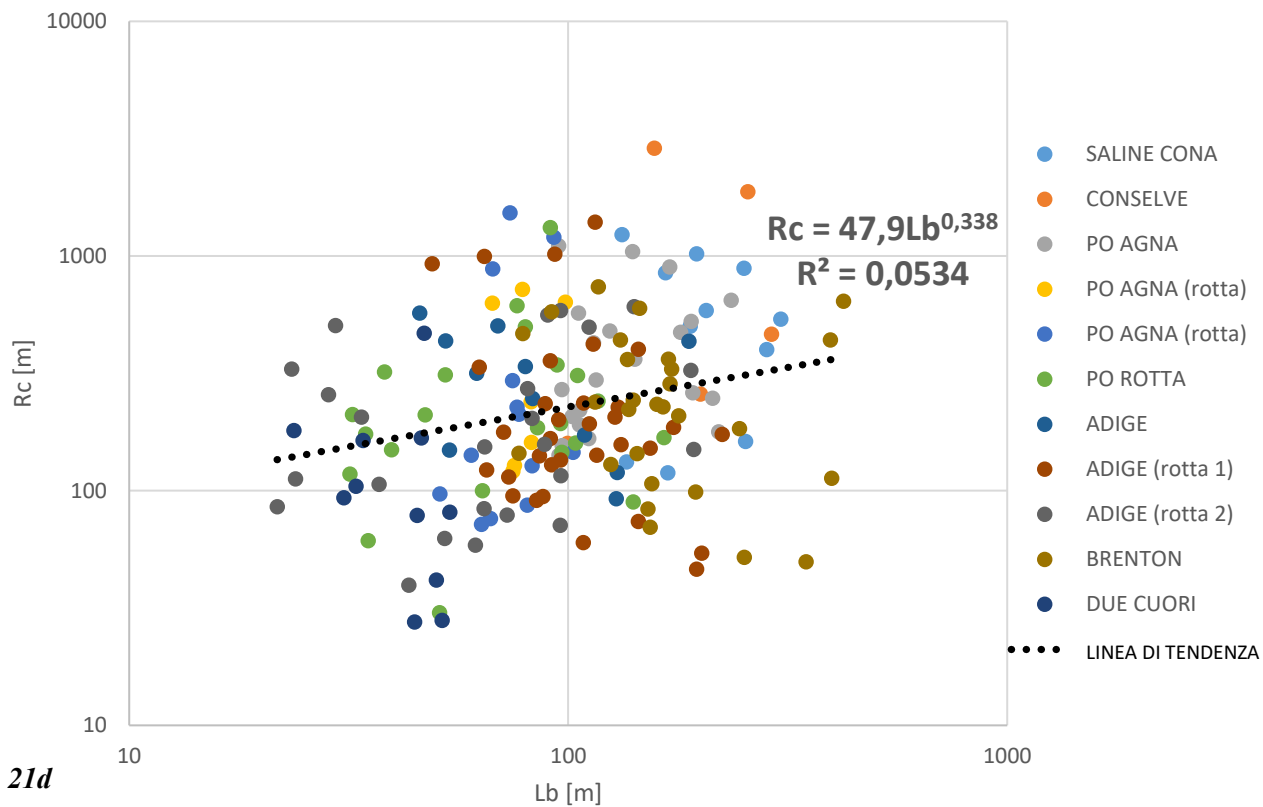


Fig. 21d) grafico Rc vs Lb; 21e) grafico A vs Lb.

## 5. Discussioni

### 5.1 Geomorfologia

La mappa geomorfologica realizzata mostra diverse *channel belt* appartenenti ai sistemi idrografici di Adige, Po e Brenta che riflettono andamenti fra loro simili. In particolare, è possibile osservare una tendenza del flusso a scorrere in direzione NE (tranne il “Brenton”), verso Cà Bianca, dove è verosimile proporre la presenza di un depocentro. Questa ipotesi è sostenuta dalla presenza di una zona a elevata complessità geomorfologica (*fig. 22*) all’interno del paleoalveo del Brenton.

I tracciati di rotta fluviale sono particolarmente sviluppati nella porzione occidentale della carta e subiscono una graduale diminuzione di larghezza muovendosi verso mare. Ciò può essere dovuto sia all’allontanamento dalla sorgente (punto di rotta dell’argine), con diminuzione della portata liquida e solida del corso d’acqua, sia all’avvicinamento alla linea di costa. Un esempio è quello “Po (rotta)” che si origina dal ramo di Saline-Cona e tende a diminuire progressivamente la sua larghezza andando verso E (*fig. 8*).

Una tipologia di meccanismo di avulsione è quello per progradazione, chiamato in questo modo perché caratterizzato dalla deposizione di sedimento che viene trasportato dal canale principale verso la *floodplain*. Il processo è favorito in zone a basso gradiente della piana alluvionale, fortemente vegetate e con livelli superficiali della tavola d’acqua che ne diminuiscono ulteriormente il drenaggio. Nei casi di avulsione parziale si ha la formazione di un cuneo di sedimenti comunemente costituito da depositi di *crevasse splays*, che possono assumere varie forme fra le quali lobata, ellittica, elongata e che sono spesso caratterizzati da canali distributari. Dopo un periodo di progradazione e deposizione nel bacino, i *crevasse splays* vengono via via abbandonati a causa della diminuzione di gradiente fra canale e *floodplain*. Nel caso invece in cui il flusso continui, il sistema di *crevasse* sviluppa un singolo canale principale che incanala la maggior parte del flusso verso la *floodplain* (Slingerland & Smith, 2004). La *channel belt* “Po (rotta)” è un ottimo esempio di avulsione parziale per progradazione, nella quale si possono osservare due nodi di avulsione, uno più a Ovest (prossimale) e uno più a Est (distale), con un sistema di drenaggio sviluppato e la presenza di un canale principale che convoglia gran parte del flusso. La disattivazione di questo canale di rotta è probabilmente dovuta all’avulsione del Po che ha causato l’abbandono del ramo di Saline-Cona.

Un’altra tipologia di avulsione è quella che avviene per annessione ed è dovuta alla varietà di canali attivi e abbandonati, con diversa orientazione, presenti all’interno della *floodplain*. Infatti la presenza di canali con orientazione ottimale, può causare la deviazione di una parte del flusso principale con conseguente avulsione. In molti casi di avulsione per annessione, il canale intercettato è troppo

piccolo o troppo grande rispetto al flusso del canale principale. Nel caso in cui sia troppo piccolo, il canale può dare fenomeni di *overspilling*, con aumento della sezione, oppure può andare incontro alla rottura degli argini e formare ventagli di rotta (Slingerland & Smith, 2004). Un esempio particolarmente caratteristico di meccanismo di avulsione per annessione è testimoniato all'intersezione fra la *channel belt* di Conselve e quella di Saline-Cona, nella quale la prima mostra un'evidente modificazione del proprio tracciato in direzione N.

All'interno della mappa è inoltre possibile notare come in prossimità della linea di costa ci sia una diminuzione del numero di canali di rotta. Questo fatto può essere dovuto alla lunghezza di *backwater*, ovvero la distanza alla quale il flusso del corso d'acqua (riferita al litorale) è affetto dai processi idrodinamici presenti nel bacino antistante (mare o lago). Numerosi studi indicano infatti come l'avulsione fluviale è meno probabile nella porzione *downstream* della zona di *backwater*, poiché durante gli eventi di piena, la superficie della tavola d'acqua tende ad equilibrarsi con la superficie del mare, causando fenomeni di escavazione dell'alveo e relativa diminuzione dei fenomeni di rotta (Chatanantavet et al., 2012).

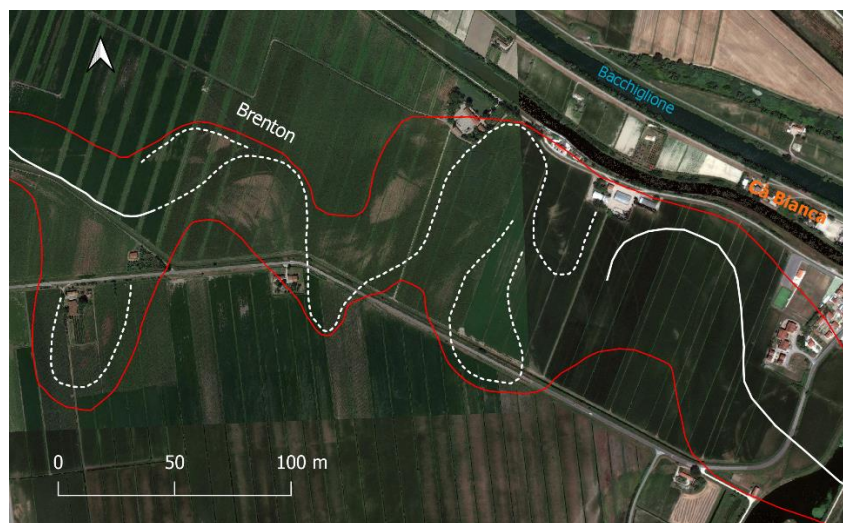


Fig. 22 Brenton nella zona di Cà Bianca.

## 5.2 Analisi morfometriche

Le *belt* analizzate possiedono sinuosità generalmente basse, dovuto probabilmente al fatto che molti dei tracciati digitalizzati sono riferiti a canali di rotta, e pertanto non molto evoluti. I canali di rotta del Po rispetto a quelli dell'Adige, che sono legati al reticolo attuale del fiume e quindi successivi alla grande avulsione di Bonavigo (Medioevo), sono riferiti alla *belt* di Saline-Cona, la cui attività sedimentaria va la seconda metà del III° millennio e la fine del II° millennio a.C. In particolare è possibile notare come sebbene i canali di rotta dell'Adige rimangano attivi per tempi ridotti,

producano meandri con sinuosità maggiori di quelli legati al Po. Il parametro di raggio di curvatura è fortemente legato alle caratteristiche di sinuosità dei meandri fluviali, pertanto i due valori presentano tendenze simili.

Dai grafici di distribuzione di frequenza si possono osservare diversi comportamenti delle *belt* rispetto all'indice di asimmetria. In particolare le *belt* "Po Agna (rotta 1)" e "Po Agna (rotta 2)" mostrano un andamento simile, con meandri fortemente asimmetrici, con geometrie *upstream* o *downstream skewed*, il che è probabilmente dovuto al fatto che sono dei canali di rotta secondari rispetto alla *belt* di "Po Agna". Sia nei due casi precedenti che nel caso della *belt* di "Conselve", anch'essa con meandri fortemente asimmetrici, non è stata osservata una disposizione preferenziale dei meandri fra monte e mare. Le *belt* "Po Agna" e "Po (rotta)" hanno invece dei meandri generalmente simmetrici, similmente al caso di Saline-Cona, la *belt* da cui originano entrambi i canali di rotta. In realtà la *belt* di Saline-Cona presenta una curva "a campana" particolarmente piatta a causa dell'esiguo numero di valori su cui è stata praticata l'analisi di KDE.

Dalle analisi effettuate è possibile distinguere in linea di massima i diversi andamenti dei sistemi idrografici. In particolare è possibile osservare che per i diversi parametri le *belt* di "Saline-Cona", "Po (rotta)", "Po Agna", "Po Agna (rotta 1)" e "Po Agna (rotta 2)", abbiano un comportamento simile fra loro. Per quanto riguarda l'Adige è possibile notare come le *belt* di "Adige (rotta 1)", "Adige (rotta 2)" e "Due Cuori" abbiano una tendenza simile fra loro. Una delle eccezioni è la *channel belt* di "Conselve", che fa parte del sistema idrografico dell'Adige ma appartiene ad un percorso relitto ereditato dalla *belt* di Saline-Cona, perciò è associata a morfometrie simili a quelle delle *belt* associate al Po. La *belt* "Adige (rotta)" invece, pur appartenendo al sistema idrografico dell'Adige (appartiene all'Unità di Cavarzere), ha un comportamento che per quasi tutti i parametri è più simile a quello del Po. La *belt* inoltre segue lo stesso andamento di "Adige (rotta 1)" e "Adige (rotta 2)", ma con un'evoluzione molto meno marcata rispetto le altre due. La lunghezza della *belt* di "Adige (rotta)" è infatti solo di 4.225 m, contro i 15.900 m e 11.165 m delle altre due *channel belt*.

La *belt* "Brenton" all'interno dei grafici di distribuzione di frequenza mostra sempre un andamento simile alle *channel belt* "Adige (rotta 1)", "Adige (rotta 2)" e "Due Cuori", in accordo con i dati sedimentologici che riflettono un'origine legata al fiume Adige con successiva presa in carico da parte del Brenta in epoca medioevale (Bondesan et al., 2008). Nel transetto 42 "Brentone" (fig. 24) è mostrata la sezione del tracciato del "Brenton" vicino a Cà Bianca, in cui è possibile osservare la presenza di un corpo canalizzato di grandi dimensioni appartenente all'Unità di Cavarzere al di sotto dell'Unità del Brenta. Sono, però, necessari ulteriori studi approfonditi per poter verificare la relazione fra il Brenton e il sistema dell'Adige.

Il grafico di lunghezza cartesiana su raggio di curvatura è in linea con i risultati presenti in letteratura (e.g. Leopold et al., 1960) (fig. 23), che mostrano una relazione lineare molto forte fra i due parametri. Il coefficiente esponenziale dell'equazione della retta è infatti molto vicino all'unità, a comprova della forte dipendenza fra le due variabili.

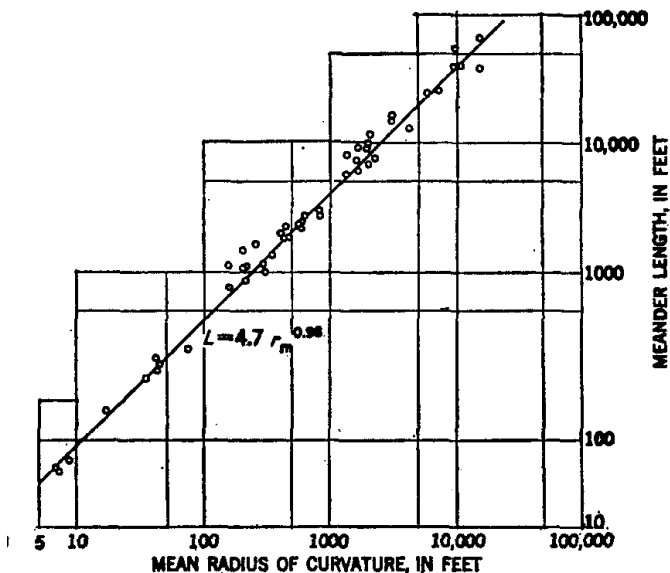


Fig. 23 grafico lunghezza d'onda del meandro sul raggio di curvatura medio. Modificato da Leopold et al., 1960.

Per quanto riguarda la relazione successiva ( $R_c$  vs  $L_{xy}$ ) è possibile notare come l'esponente sia molto vicino all'unità e la relazione fra le due componenti è di tipo lineare. Assumendo come lunghezza d'onda del meandro ( $\lambda$ ) il valore di  $L_{xy}$ , poiché legate linearmente, è possibile identificare delle similitudini con le relazioni già conosciute in letteratura (e.g. Leopold et al., 1960).

Nel caso dei grafici di ampiezza su lunghezza cartesiana, come osservabile dal valore del coefficiente di correlazione, non c'è una forte relazione lineare fra i parametri. La spiegazione al fenomeno potrebbe derivare dal breve periodo di attività dei corsi d'acqua, che non ne hanno permesso un'evoluzione sufficiente a sviluppare canali fortemente meandriiformi e anse di meandro sufficientemente ampie.

Il valore del coefficiente esponenziale della retta nel grafico  $R_c$  vs  $L_b$ , molto vicino allo 0, mostra l'assenza di una relazione fra i due parametri. A parità di larghezza della *belt* è possibile notare come la maggioranza dei meandri possiedano valori di raggio di curvatura molto diversi fra loro. Ciò può essere dovuto all'elevata variabilità di forma del meandro osservate nella digitalizzazione.

L'assenza di una relazione lineare è visualizzabile anche nel grafico  $A$  vs  $L_b$ . È possibile osservare infatti, come a parità di larghezza della *channel belt* si possano formare meandri con ampiezze molto diverse fra loro. Il fenomeno è giustificabile dal comportamento anomalo delle *channel belt* analizzate, che non sono rettilinee ma possiedono una loro sinuosità legata a quella del canale che le



ha generate. Pertanto a parità di larghezza delle *belt* è possibile avere valori di ampiezza dei meandri associati estremamente variabili.

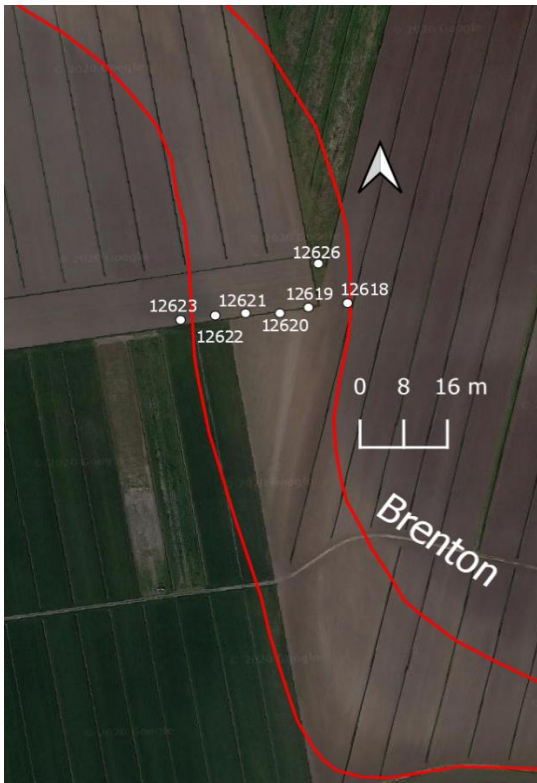
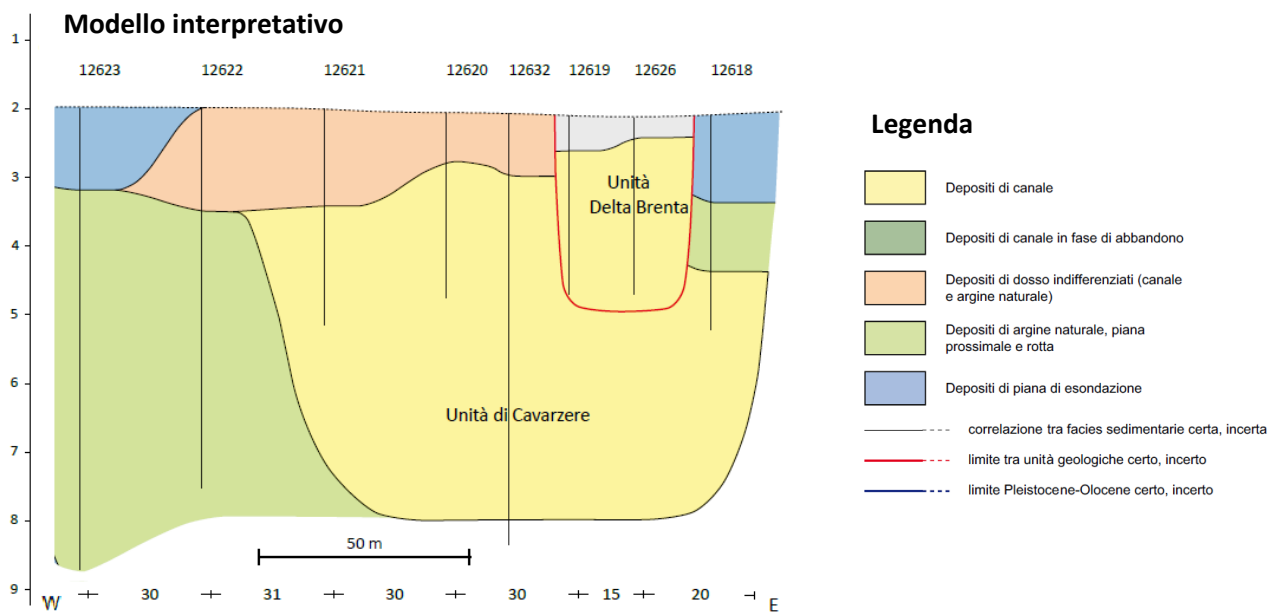


Fig. 24 Schema del Transetto 42. "Brentone" con associato il modello interpretativo e legenda. Modificato da Bondesan et al., 2008.



## 6. Conclusioni

L'area in studio negli ultimi 4000 anni ha subito delle modificazioni geomorfologiche profonde, legate alla mobilità dei sistemi fluviali legati alla Pianura Veneto-Friulana e all'impatto antropico. La stesura di una mappa geomorfologica di dettaglio, ha consentito di individuare corpi canalizzati relitti non documentati dalla letteratura e di inserirli in un contesto evolutivo più ampio dell'area in studio. Sono state identificate le *channel belt* di Saline-Cona, Po (Agnà), Po Agnà (rotta 1), Po Agnà (rotta 2), Po (rotta) per il sistema del Po; le *belt* di Adige (rotta), Adige (rotta 1), Adige (rotta 2), Conselve e Terrassa Padovana per il sistema dell'Adige e la *belt* "Brenton" per il sistema del Brenta. La presenza di diversi canali di rotta ben sviluppati ha permesso inoltre di osservare diversi meccanismi di avulsione legati ai sistemi di *crevasse*, particolarmente sviluppati in alcune zone dell'area in studio.

L'analisi morfometrica dei meandri ha evidenziato le differenze fra i diversi sistemi idrografici sulla base di parametri geometrici e ha permesso di aggiungere informazioni di dettaglio sull'evoluzione dei sistemi fluviali associati. In particolare è stato possibile osservare come le *belt* associate al fiume Po possiedano generalmente un comportamento più variabile in termini di geometrie, rispetto ai corsi d'acqua legati all'Adige. Inoltre il sistema dell'Adige ha la tendenza a formare delle *channel belt* con meandri sinuosi, più o meno simmetrici (*upstream/downstream skewed*) e con ampiezze minori rispetto al sistema del Po, che descrive invece dei meandri più rettilinei, asimmetrici (sia *upstream* che *downstream skewed*) e più ampi. Alcune *belt* hanno presentato eccezioni rispetto all'andamento del sistema idrografico d'origine. La *belt* di "Conselve" è stata soggetta ad un meccanismo di avulsione per rioccupazione del tracciato relitto del dosso di Saline-Cona, mentre "Adige (rotta)" per motivazioni probabilmente legate al basso grado di evoluzione del canale di rotta. Per quanto riguarda il "Brenton" è stato possibile riscontrare delle prove a favore del possibile collegamento con il sistema dell'Adige, che dovranno però essere confermate da studi specifici.

La creazione di grafici bivariati ha permesso sia di verificare alcune relazioni già conosciute in letteratura ( $L_s$  vs  $L_{xy}$ ,  $R_c$  vs  $L_{xy}$ ), sia come metodo di valutazione della qualità dell'analisi morfometrica. In alcuni casi non è stato possibile riconoscere una relazione matematica fra le variabili. Il grafico  $A$  vs  $L_b$  in particolare, non mostra alcuna relazione fra le due variabili, dovuto probabilmente al comportamento "anomalo" dei tracciati fluviali analizzati, che si discostano dal modello classico di *belt*.

## **Bibliografia**

- Amorosi A., Dinelli E., Rossi V., Vaiani S.C., Sacchetto M., 2008a – Late Quaternary palaeoenvironmental evolution of the Adriatic coastal plain and the onset of Po River Delta. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 268, 80-90.*
- Bassan V., Favero V., Vianello G., Vitturi A., 1994. Studio geoambientale e geopedologico del territorio provinciale di Venezia.*
- Bondesan, M., Favero, V., Vinals, M.J., 1995. New evidence on the evolution of the Podelta coastal plain during the Holocene. Quat. Int. 29–30, 105–110.*
- Bondesan A., Meneghel M., 2004. Geomorfologia della provincia di Venezia. Note illustrative della carta geomorfologica della provincia di Venezia. 513pp.*
- Bondesan, A., Primon, S., Bassan, V., Vitturi, A., 2008. Le unità geologiche della provincia di Venezia. Cierre, Verona, (160 pp.).*
- Carminati E., Martinelli G., 2002. Subsidence rates in the Po Plain, northern Italy: the relative impact of natural and anthropogenic causation. Engineer Geology 66, 241-255.*
- Da Lio C., Carol E., Kruse E., Teatini P., Tosi L., 2015. Saltwater contamination in the managed low-lying farmland of the Venice coast, Italy: An assessment of vulnerability. Science of the Total Environment 533 (2015) 356-369.*
- Favero V. Serandrei Barbero R., 1980. Origine ed evoluzione della Laguna di Venezia – Bacino Meridionale. “VOL. 5”*
- Fontana A., Mozzi P., Bondesan A., 2008. Alluvial megafans in the Venetian-Friulian Plain (northeastern Italy): Evidence of Venetian sedimentary and erosive phases during Late Pleistocene and Holocene. Quaternary International 189, 71-90.*
- Fontana A., Mozzi P., Marchetti M., 2014. Alluvial fans and megafans along the southern side of the Alps. Sedimentary Geology 301, (2014) 150-171.*
- Gibling M. R., 2006. Width and thickness of fluvial channel bodies and valley fills in the geological record: a literature compilation and classification. Journal of Sedimentary Research, 2006, v. 76, 731-770.*
- Marcolongo B., 1987. Ricostruzione paleoidrografica attraverso interpretazione di immagini telerilevate. In Marcolongo B., Paleoidrografia tarsoquaternaria della pianura veneta sudoccidentale e il suo significato in una ricostruzione paleoclimatica. C.N.R.m Padova, 6-9.*

- Massari F., Rio D., Serandrei Barbero R., Asioli A., Capraro L., Fornaciari E., Vergerio P. P., 2004. *The environment of Venice area in the past two million years. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 202,273-308.
- Mozzi P., Piovan S., Rossato S., Cucato M., Abbà T., Fontana A., 2010. *Palaeohydrography and early settlements in Padua (Italy). Il Quaternario (Italian Journal of Quaternary Sciences)* 23(2Bis), 2010 – Volume Speciale – 387-400.
- Mozzi P., Piovan S., Corrò E., 2020. *Long-term drivers and impacts of abrupt river changes in managed lowlands of the Adige River and northern Po delta (Northern Italy). Quaternary International* 538, 80-93.
- Ninfa A., Ferrarese F., Mozzi P., Fontana A., 2011. *High resolution DEMs for the analysis of fluvial and ancient anthropogenic landforms in the alluvial plain of Padua (Italy). Geogr. Fis. Dinam. Quat.* 34 (2011), 95-104.
- Pellegrini G.B., Paganelli A., Penso D., 1984. *Aspetti geomorfologici e palinologici dei depositi fluviali nei dintorni di Carturo sul Brenta (Padova). Geogr. Fis. Din. Quat.*, 7, 36–39.
- Peretto, R., 1986. *Ambiente e strutture antropiche nell'antico Polesine. In: L'antico Polesine, testimonianze archeologiche e paleoambientali, Catalogo delle esposizioni di Adria e Rovigo, Febbraio-Novembre 1986. Antoniana, Padova, pp. 21–100.*
- Piovan S., Mozzi P., Stefani C., 2010. *Bronze Age Paleohydrography of the Southern Venetian Plain. Geoarchaeology: An International Journal, Vol. 25, No. 1, 6-35 (2010).*
- Piovan S., Mozzi P., Zecchin M., 2012. *The interplay between adjacent Adige and Po alluvial systems and deltas in the late Holocene (Northern Italy). Géomorphologie: relief, processus, environment, 2012, n°4, p. 427-440.*
- Simeoni, U., Corbau, C., 2009. *A review of the Delta Po evolution (Italy) related to climatic changes and human impacts. Geomorphology* 107, 64–71.
- Slingerland R. and Smith N.D., 2004. *River avulsions and their deposits. Department of Geosciences, University Park, Pennsylvania. Annu. Rev. Earth Planet Sci.* 2004. 32:257-285.
- Stefani, M., Vincenzi, S., 2005. *The interplay of eustasy, climate and human activity in the late Quaternary depositional evolution and sedimentary architecture of the Po Delta system. Mar. Geol.* 222–223, 19–48.