

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Geoscienze

Corso di laurea in Geologia e Geologia tecnica

**MORFOMETRIE DI MEANDRI FLUVIALI OLOCENICI NELLA
PIANURA VENETA NELL'AREA COMPRESA TRA MONSELICE
E COREZZOLA (ITALIA)**

Relatore:

Prof. Massimiliano Ghinassi

Correlatori:

Prof. Alessandro Fontana

Prof. Paolo Mozzi

Dott.sa. Marta Cosma

Laureando:

Luciaelisa Mario

ANNO ACCADEMICO 2019/2020

ABSTRACT:

The present study focuses in an area located in the southern-eastern part of the Venetian-Friulan Plain (Northern Italy). A detailed geomorphological map was produced by means of integration between satellite images, aerial photos, geomorphological maps and scientific literature. Different geomorphic elements were mapped, including main channel belt, secondary channel and crevasse channels and crevasse splays. The major channel belts have been dated and attributed to specific drainage system (Po and Adige rivers). Meander bends generated by the study paleo-channels were characterized measuring different parameters including sinuosity, amplitude, radius of curvature, asymmetry index, cartesian length, intrinsic length, belt width and channel width. The morphometric analysis highlighted the high variability of meander shapes, highlighting the extreme complexity of riverine bodies generated by the Po and Adige River over the past millennia.

RIASSUNTO:

Il presente studio è focalizzato all'analisi morfometrica dei corpi fluviali canalizzati tardo-olocenici presenti nell'area localizzata nella zona sud-orientale della Pianura Veneto-Friulana (Italia settentrionale). La prima parte dello studio è basata sulla stesura di una carta geomorfologica di dettaglio attraverso l'integrazione di immagini satellitari, foto aeree, carte geomorfologiche preesistenti e letteratura scientifica. Tale studio ha permesso di mappare diversi elementi geomorfici, tra cui le *channel belt* principali, canali secondari e canali di rotta e di associarle ai sistemi idrografici del fiume Po e Adige. Le tracce di paleo-meandri identificati durante lo studio sono stati parametrizzati considerando diversi elementi tra cui sinuosità, ampiezza, raggio di curvatura, indice di asimmetria, lunghezza cartesiana e lunghezza intrinseca, larghezza della *channel belt* associata e larghezza del canale. L'analisi morfometrica ha evidenziato un'estrema variabilità di forme dei meandri, sottolineando la complessità delle forme fluviali generate dal sistema Adige e Po durante gli ultimi millenni.

INDICE:

1. <u>INTRODUZIONE</u>	<u>pg.4</u>
2. <u>INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO</u>	<u>pg.5</u>
<u>2.1 La Pianura Vento-Friulana</u>	<u>pg. 5</u>
<u>2.2 L'area studio</u>	<u>pg.8</u>
<u>2.3 Cronologia delle belt</u>	<u>pg. 9</u>
<u>2.4 Interventi antropici</u>	<u>pg. 11</u>
3. <u>METODI</u>	<u>pg. 11</u>
<u>3.1 La carta geomorfologica</u>	<u>pg. 11</u>
<u>3.2 L'analisi morfometrica</u>	<u>pg.15</u>
4. <u>RISULTATI</u>	<u>pg. 17</u>
<u>4.1 Carta geomorfologica</u>	<u>pg. 17</u>
<u>4.2 Caratterizzazione morfometrica</u>	<u>pg. 24</u>
5. <u>DISCUSSIONE</u>	<u>pg. 34</u>
<u>5.1 Geomorfologia</u>	<u>pg.34</u>
<u>5.2 Analisi morfometriche</u>	<u>pg. 35</u>
6. <u>CONCLUSIONI</u>	<u>pg. 41</u>

1. INTRODUZIONE:

Le pianure alluvionali sono da sempre molto importanti per l'insediamento e lo sviluppo umano grazie alla presenza di suoli fertili utili all'agricoltura, presenza di acqua dolce per l'irrigazione dei campi e vie di mobilità e di commercio per l'economia. Tuttavia queste zone sono interessate anche da diverse problematiche come le inondazioni fluviali, per la rottura degli argini e l'instabilità delle rive dovuta alla migrazione laterale dei canali. La presenza antropica ha impattato molto su queste zone, attraverso la realizzazione di canali e fossati per la gestione delle acque a scopi agricoli, industriali e commerciali (Da Lio et al., 2015). La maggior parte delle pianure alluvionali costiere attuali si sono formate durante l'ultima trasgressione olocenica e in seguito sono state modellate dalla migrazione di canali fluviali e fluvio-tidali meandriiformi dovuta ad una complessa interazione tra processi di erosione, aggradazione ed avulsione.

I depositi fluviali sono molto diffusi nel record geologico a diverse scale, dai più piccoli canali delle pianure alluvionali fino a depositi di fiumi a scala continentale. I depositi di canali fluviali formano acquiferi e *reservoirs* di idrocarburi, ospitano minerali sfruttabili economicamente e possono essere associati ad importanti siti fossili (Gibling, 2006).

La Pianura Veneto-Friulana è un perfetto esempio di pianura alluvionale. Essa rappresenta il riempimento sedimentario del bacino di *foreland* del sistema Alpi-Appennino (Fontana et al., 2010). L'attuale configurazione geomorfica della Pianura Veneto-Friulana è il risultato delle variazioni ambientali che si sono succedute nel corso del Pleistocene superiore e dell'Olocene, e soprattutto degli effetti associati alla trasgressione marina olocenica che ha portato la linea di costa ad arretrare verso Nord fino all'attuale laguna (Favero & Serandrei Barbero, 1980). La stratigrafia e la geomorfologia della Pianura Veneto-Friulana sono state già ampiamente studiate e descritte (Mozzi et al., 2020, Piovan et al., 2010,2012; Bondesan & Meneghel,2004; Amorosi et al., 2005, 2008; Fontana et al., 2004,2010), tuttavia molti di questi studi sono focalizzati sulla caratterizzazione geomorfologica del territorio e sulla definizione dei principali tracciati dei corsi d'acqua tardo olocenici (Mozzi et al., 2020; Cucato et al., 2011). Nonostante questo, in passato, è stata posta poca attenzione alle caratteristiche morfometriche dei paleo-canali d'acqua che hanno drenato l'area negli ultimi millenni, e che risultano chiaramente visibili da immagini aeree e satellitari. Il presente lavoro di tesi si focalizza su un'area ubicata nel settore sud-est della Pianura Veneto-Friulana, tra il fiume Bacchiglione e l'Adige ed ha lo scopo di migliorare la mappatura dell'area tramite l'utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione e foto aeree.

Il lavoro è stato svolto attraverso due principali fasi. In una prima fase è stata sviluppata una mappa geomorfologica ad alta risoluzione tramite l'utilizzo di database satellitari integrati con la

cartografia geomorfologica preesistente, immagini aeree e letteratura scientifica. Nella seconda fase sono state studiate le caratteristiche morfometriche dei paleo-meandri identificati con la fase di mappatura, e sono state evidenziate le possibili relazioni tra esse così come tra queste ed altri elementi geomorfici (dossi fluviali e *channel belt*).

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO:

2.1 La Pianura Veneto-Friulana



Fig. 1 Localizzazione pianura veneto-friulana (in verde) e area studio (in rosso)

La Pianura Veneto-Friulana si trova in Italia nella zona nord-est tra Veneto e Friuli-Venezia Giulia (Fig.1). Essa fa parte del bacino di *foreland* localizzato tra le Alpi meridionali e gli Appennini. L'evoluzione del bacino di *foreland* e del suo riempimento è strettamente legata a queste due catene (Fig.2). La flessione crostale dovuta ai *thrusts* alpini meridionali sud-vergenti tra l'Eocene e il Miocene superiore causò lo sviluppo del *foredeep* sud-alpino portando alla deposizione di una spessa successione di molassa (Fontana et al., 2013). Dal Miocene in poi l'evoluzione del bacino di *foreland* venne controllata dall'accrescimento dei *thrusts* appenninici nord-vergenti e dalla subduzione della placca adriatica (Fontana et al., 2013).

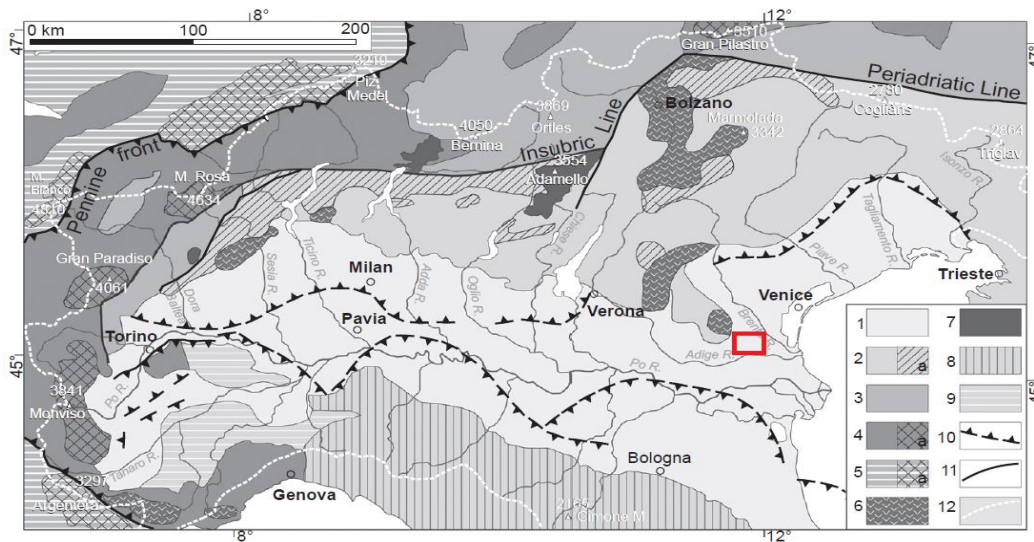


Fig. 2 Schema strutturale dell'Italia settentrionale 1) depositi costieri e alluvionali plio-quadernari; 2) unità Dinariche e sud-alpine, 2a) metamorfiche; 3) unità Austroapline; 4) unità Pennidica, 4a) massicci interni; 5) unità Elvetiche, 5a) massicci esterni; 6) rocce vulcaniche; 7) rocce plutoniche; 8) bacino di top-wedge; 9) Apennini; 10) thrusts; 11) faglie principali; 12) spartiacque del Po e dei fiumi delle Alpi meridionali (modificato da Fontana et al., 2013)

La tettonica sinsedimentaria relativa allo sviluppo dei *thrusts* sepolti più esterni degli Appennini ha deformato il riempimento del bacino Plio-Pleistocenico (Fontana et al., 2013). La successione sedimentaria quaternaria è caratterizzata alla base da un evento di rapido annegamento che ha portato fino a profondità batiali e ha causato un deficit nell'apporto dei sedimenti durante il Pleistocene inferiore. In seguito, fino al tardo Pleistocene, si è accumulata una successione spessa fino a 750 m che mostra un generale trend regressivo da torbiditi bacinali fino a depositi di delta e poi un'alternanza tra sedimenti di mare poco profondo e continentali (Kent et al., 2002; Massari et al., 2004; Piovan et al., 2012).

L'attuale configurazione della Pianura Veneto-Friulana (Fig. 3) è il risultato di due fattori principali: l'attività tettonica delle Alpi orientali e le variazioni ambientali che si sono succedute nel corso del Pleistocene superiore e dell'Olocene. In particolare queste variazioni sono legate alla formazione di ghiacciai nell'area montana durante il tardo Pleistocene e l'innalzamento eustatico del livello del mare durante l'Olocene con conseguente formazione dei sistemi lagunari. Un altro fattore non trascurabile è l'impatto antropico che ha influenzato notevolmente la geomorfologia della pianura negli ultimi millenni (Fontana et al., 2004).

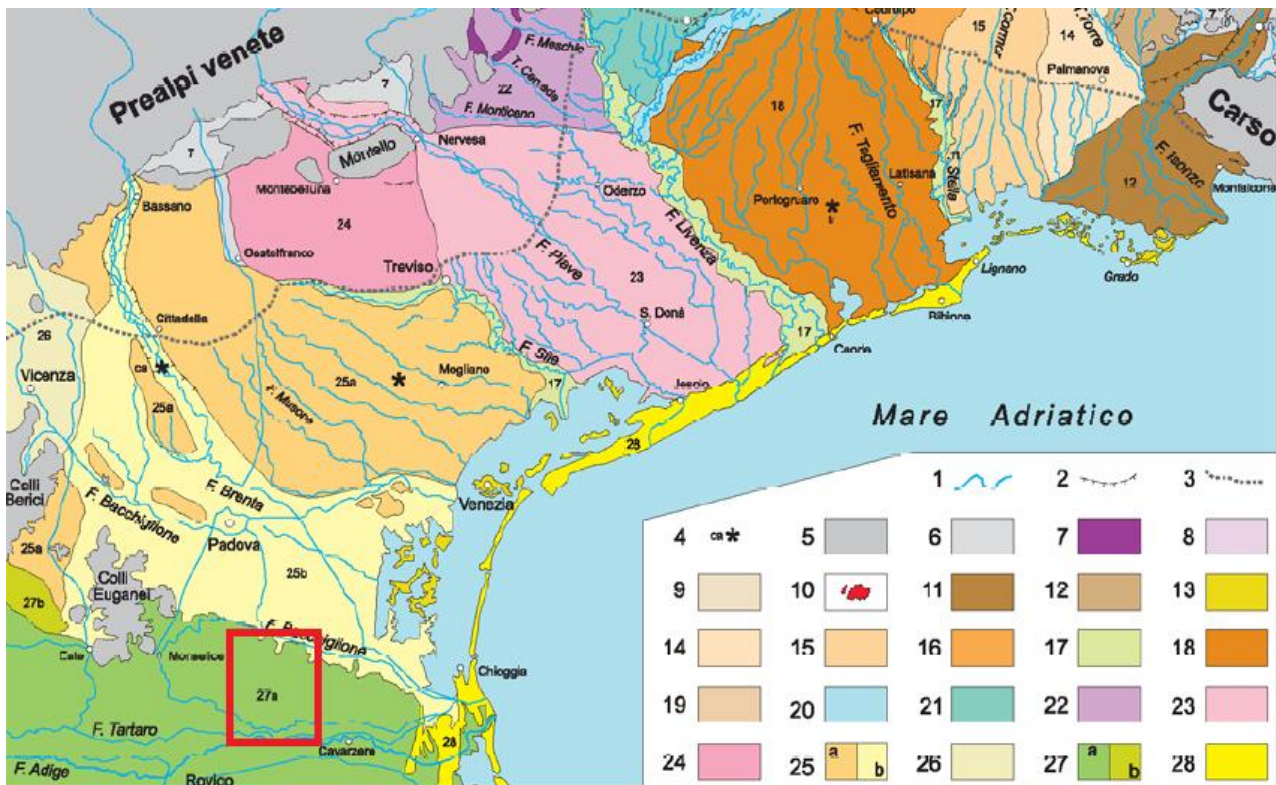


Fig. 3 Configurazione dell'attuale sistema deposizionale della pianura veneto-friulana (modificato da Bondesan e Meneghel, 2004)

LEGENDA: 1) Idrografia; 2) orlo delle principali scarpate fluviali; 3) Limite superiore delle risorgive; 5) Prealpi; Colli Euganei e Berici; 6) aree alluvionali di corsi d'acqua prealpini; 7) cordoni morenici degli anfiteatri i Piave e Tagliamento; 8) depressioni intermoreniche; 9) piana di Osoppo; 10) terrazzi tettonici dell'alta pianura friulana; 11) megafan dell'Isonzo-Torre; 12) conoide del Nazione-Judrio, 13) isole lagunari, 14) megafan del Torre; 15) megafan del coinor; 16) megafan del Corno di San Daniele; 17) sistemi dei principali fiumi di risorgiva (Stella, Livenza e Sile), localmente incisi; 18) megafan del Tagliamento; 19) aree interposte tra megafan appartenenti al sandur del Tagliamento; 20) megafan del Meduna; 21) conoide del Cellina; 22) conoidi dei fiumi Monticano, Cervada e Meschio, e degli scaricatori glaciali di Vittorio Veneto; 23) megafan del Piave di Nervesa; 24) megafan del Piave di Montebelluna; 25) sistema del Brenta: a) settore Pleistocenico (megafan di Bassano), b) pianura olocenica del Brenta con apporti del Bacchiglione; 26) conoide dell'Astico; 27) sistema dell'Adige: a) pianura olocenica con apporti del Po; b) pianura pleistocenica; 28) sistemi costieri e deltizi.

Dal Pleistocene superiore i fiumi veneto-friulani formarono i cosiddetti *megafan*, dei conoidi che arrivano a coprire anche migliaia di chilometri quadrati e si formano in seguito alla ripetuta variazione del corso fluviale in corrispondenza dello sbocco vallivo (Fig.3). In pianta hanno forma a ventaglio mentre in 3D hanno forma a cono. Inoltre sono caratterizzati da una soglia granulometrica che suddivide il conoide in alta e bassa pianura. Le prime decine di chilometri dallo sbocco vallivo sono caratterizzate da ghiaie e pendenze tra 7 e 3 % (alta pianura), andando verso valle la granulometria via via diminuisce a causa della diminuzione di capacità di trasporto dei fiumi.

La bassa pianura è quindi costituita da depositi di esondazione limoso-argillosi e da corpi di canale sabbiosi.

Anche la geometria dei corsi d'acqua varia da monte verso valle: inizialmente hanno un letto ghiaioso molto largo a canali intrecciati (*braided*) con profondità di 1-2m, più a valle l'alveo diventa monocursale, prima a isole fluviali e poi meandriforme (Fontana et al., 2004). Durante il *Last Glacial Maximum* (LGM 24.000-15.000 anni) la maggior parte dello *shelf* adriatico settentrionale era esposto a causa dell'abbassamento glacio-eustatico del livello del mare (MIS2) (Correggiari et al., 1996; Fontana et al., 2013) e la pianura alluvionale si estendeva per circa 300 km a sud dell'attuale area costiera veneta. Le condizioni ambientali glaciali e periglaciali hanno portato ad una massiccia produzione di detrito nelle aree alpine che ha contribuito ad una generale aggradazione dei *megafan* alluvionali nella Pianura Veneto-Friulana (Mozzi, 2005). Tra i 14.500 e gli 8.000 anni fa l'attività fluviale nella pianura era confinata in valli incise attraverso le quali transitavano i sedimenti e si depositavano nello *shelf* adriatico (Fontana et al., 2008; Piovan et al., 2012). Si creò quindi uno hiatus sedimentario che è riconoscibile lungo tutta la Piana Veneto-Friulana (Tosi, 1994; Mozzi et al., 2003; Fontana et al., 2008; Piovan et al., 2012).

In seguito la trasgressione Olocenica ha causato un arretramento verso Nord della linea di costa fino all'attuale laguna (Favero & Serandrei Barbero, 1980).

La subsidenza e l'afflusso di sedimenti hanno indotto la trasgressione Olocenica (Amorosi et al., 2005) che nel settore meridionale della Piana Veneta si è verificata attorno ai 7.000-7.500 anni fa (Amorosi et al., 2008; Piovan et al., 2012) ed era localizzata diversi chilometri verso terra rispetto all'attuale linea di costa. L'aumento del livello del mare durante il post glaciale causò una nuova fase di aggradazione nella pianura alluvionale.

2.2 L'area studio

L'area in studio si trova, nella zona sud occidentale della Pianura Veneto-Friulana (Fig.1), si estende per 275 km² ed è delimitata in direzione N-S dal fiume Bacchiglione e dal fiume Adige mentre in direzione E-W da Correzzola a Monselice. L'area in studio si trova in una pianura alluvionale a basso gradiente (<1‰).

Dal punto di vista stratigrafico l'area studio è situata in una zona di interdigitazione tra il sistema deposizionale dell'Adige e il sistema deposizionale del Po.

Attualmente il Po è il fiume più lungo d'Italia con una lunghezza di 652 km e un'area di cattura di 71000 km². Scorre dalle Alpi occidentali, attraversa quattro regioni: il Piemonte, la Lombardia, l'Emilia-Romagna e il Veneto (attraverso la Pianura Padana) ricevendo affluenti sia dalle Alpi che dagli Appennini. Raggiunge il mar Adriatico a sud-est della zona in studio dove ha formato un delta lobato a partire da 3500 anni fa (Piovan et al., 2012). L'Adige è il secondo fiume più lungo d'Italia

(410km), la sua area di cattura è di 12200 km². Lascia le Alpi nei pressi di Verona dopo aver attraversato la valle Alpina in direzione N-S incidendo principalmente rocce carbonatiche e vulcaniche felsiche (Piovan et al., 2010).

2.3 Cronologia delle *Belt*

Nella Pianura Veneta meridionale i fiumi Adige e Po negli ultimi quattro millenni si sono intersecati tra di loro diverse volte portando ad una complessa interdigitazione tra i due sistemi sedimentari in cui non si distinguono bene i confini. Da un punto di vista geomorfologico questo risulta in un network complesso di *ridges* alluvionali a cui appartengono le *channel belt* sopraelevate relative ai due fiumi Adige e Po (Fig.4) (Piovan et al., 2010,2012; Mozzi et al., 2020).

Uno dei *ridge* alluvionali più grandi è il *ridge* di Fratta-Polesine generato dal Po mentre scorreva da Castelnuovo Bariano attraverso Fratta Polesine (circa 4.300 anni fa). Questo *ridge* si divide in due: il *ridge* di Adria, più meridionale che si estende in direzione W-E in direzione di Adria e il *ridge* di Saline-Cona (in parte presente nell'area studio), più settentrionale che scorre in direzione SW-NE attraverso Rovigo, Agna e verso la Laguna di Venezia. Circa 3.000 anni fa si verificò un'avulsione che causò l'abbandono del ramo di Saline-Cona e lo spostamento del sistema del delta del Po verso Sud (Castiglioni, 1978; Piovan et al.,2010; 2012).

Il *ridge* di Saline-Cona ha una larghezza media di 600m e si eleva per più di 3m dal piano campagna (Piovan et al., 2012).

Un altro *ridge* principale è il *ridge* di Montagnana-Este (Fig.4) formato dal fiume Adige tra l'età del bronzo e l'epoca romana. Questo *ridge* passa attraverso Montagnana, Este, Monselice e Pernumia, ed è antecedente rispetto alla principale avulsione dell'Adige avvenuta in Epoca medioevale in corrispondenza di Bonavigo, che portò l'Adige a scorrere nella sua attuale posizione. I *ridges* minori che fanno parte dell'area studio (Bagnoli, Conselve, Terrassa Padovana e Pozzonovo) si diramano verso est dal *ridge* di Montagnana-Este. Il *ridge* di Bagnoli, che scorre in direzione NW-SE, si è formato durante l'età del bronzo (Piovan et al., 2010,2012) e nella sua parte prossimale è largo circa 2km mentre prima di incontrare il *ridge* di Saline-Cona in prossimità di Agna si restringe

fino a una larghezza di 500m. Il *ridge* di Conselve, attivo durante l'epoca romana, scorre da Pernumia a Concadalbero in direzione WNW-ESE dove incontra il *ridge* di Saline-Cona (Piovan et al., 2010,2012). Il *ridge* di Terrassa Padovana è il *ridge* più settentrionale del sistema alluvionale dell'Adige al confine con il sistema del fiume Brenta. Scorre in direzione W-E da Pernumia e a circa 2 km ad est di Terrassa Padovana si divide in due *ridges* che scorrono in direzione W-E e NW-NE e raggiungono il *ridge* di Conselve rispettivamente appena a monte di Concadalbero e a circa 2 km ad est di Arre. Entrambi i *ridge* di Conselve e di Terrassa sono larghi più di 600 m e alti più di 3 m rispetto la pianura circostante (Piovan et., al., 2012). Infine il *ridge* di Pozzonovo è il ramo più meridionale, si estende in direzione NW-SE e ha una larghezza tra i 600 e i 700 m.

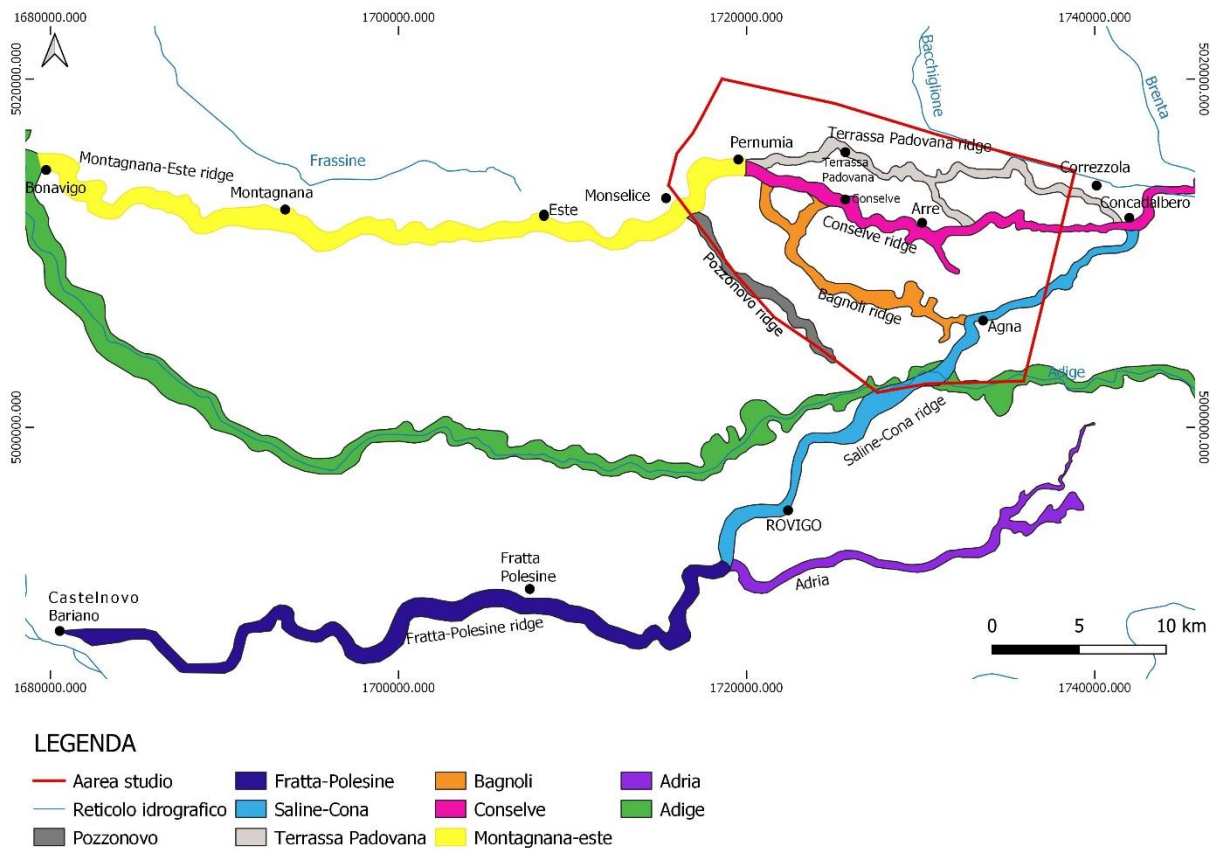


Fig. 4 Schema dei ridge principali modificato da Mozzi et al., 2020

2.4 Interventi antropici

A partire dal tardo Medioevo in questa zona i processi fluviali naturali sono stati modificati dal controllo umano a causa della bonifica su larghe aree e la costruzione di argini artificiali (Bondesan, 1989). La maggior parte dei canali fluviali del Po e dell'Adige sono stati raddrizzati e alcune volte deviati artificialmente specialmente a partire dal quindicesimo secolo quando la zona entrò a far parte della Repubblica Veneziana. Nel 1604 per impedire la progradazione del delta del Po in direzione nord e l'insabbiamento della laguna di Venezia si è disattivato il tratto finale del ramo più settentrionale del Po attraverso l'escavazione di un nuovo canale (il cosiddetto Taglio di Portoviro) (Simeoni & Corbau, 2009). 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, i quali possono essere considerati veri fiumi artificialmente canalizzati.

3. METODI:

I metodi utilizzati si riferiscono alla realizzazione della carta geomorfologica quindi fotointerpretazione, consultazione di carte geologiche e articoli della letteratura e all'analisi morfometrica delle forme digitalizzate con l'utilizzo di un software (MatLab) ed Excel.

3.1 La carta geomorfologica:

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

Per quanto riguarda l'interpretazione di foto aeree e satellitari, si sono create due *basemap* utilizzando, rispettivamente, immagini satellitari provenienti da Google Earth e ortofoto del Geoportale nazionale. Le immagini satellitari esportate da Google Earth presentano una risoluzione di circa mezzo metro e sono state selezionate da diversi anni (2002, 2012, 2013, 2015, 2017, 2018) in modo da massimizzare la resa per ogni area esportata. Le ortofoto del Geoportale presentano una risoluzione di 0,5 m e sono risalenti all'anno 2012 perché più risolutive per l'area in studio. Inoltre per rendere l'interpretazione il più completa possibile si sono utilizzate anche altre immagini provenienti dai satelliti ESRI e Yandex (Yandex Society), principalmente utilizzate per individuare i canali di rotta e ortofoto di diversi anni (2007, 2012, 2015) provenienti sempre dal Geoportale nazionale.

Tutte le immagini satellitari e ortofoto sono state caricate sul programma di digitalizzazione QGIS. Le immagini esportate da Google Earth sono state georeferenziate utilizzando lo strumento georeferenziatore, facendo attenzione a mantenere sempre la stessa altezza di volo e selezionando punti analoghi tra l'immagine e la *basemap* preimpostata di QGIS (ad esempio incroci di strade, case e fiumi). Tutte le immagini sono state riportate allo stesso sistema di riferimento ovvero Monte Mario (Italy Zone 1, EPSG:3003).

Si è quindi proceduto con la fotointerpretazione digitalizzando tutte le forme appartenenti a paleocanali, distinguendo le diverse morfologie e origini dei corpi sepolti. La digitalizzazione è stata eseguita attraverso *shapefile* lineari o poligonali seguendo il tracciato lasciato dai corsi fluviali sul terreno. Il limite dei corpi canalizzati è stato individuato grazie alla presenza di contrasti di colore chiaro scuro, in quanto i depositi di sabbia nel terreno appaiono più chiari rispetto a depositi fangosi e la vegetazione cresce più rigogliosa e quindi più scura al di sopra di depositi fangosi i quali trattengono maggiormente l'acqua rispetto a depositi sabbiosi in cui invece la vegetazione cresce più ingiallita.

I corpi canalizzati riconosciuti si distinguono in:

- *channel belt* (Fig. 5)
- ventagli di rotta e canali di rotta (Fig. 6)
- canali secondari (fig. 7)

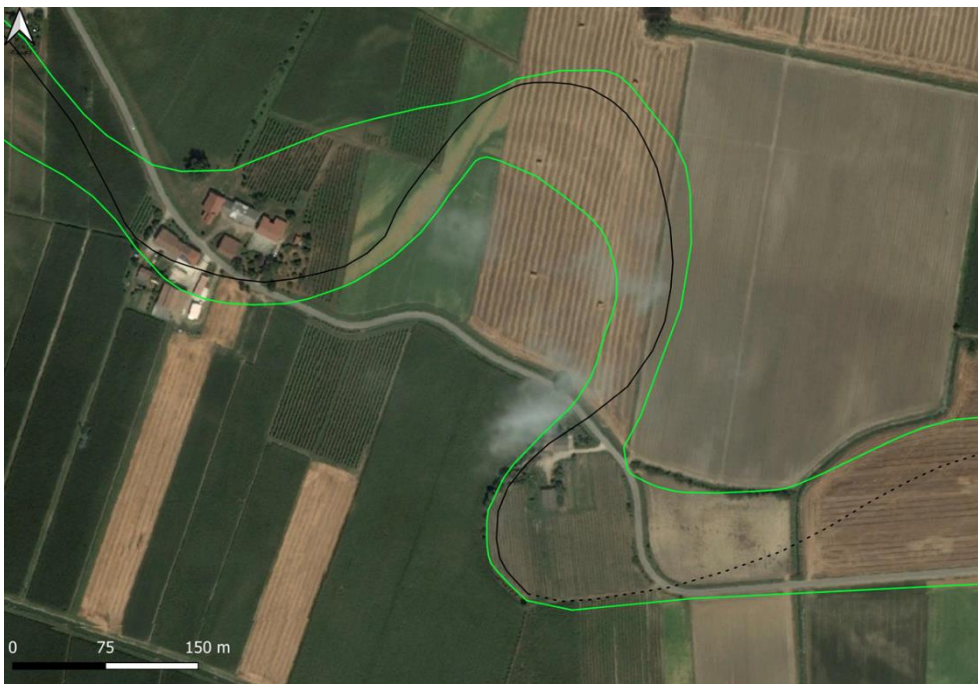


Fig. 5 Esempio di channel belt in verde chiaro e linea di centro canale in nero, linea di centro canale incerta in nero con tratto discontinuo

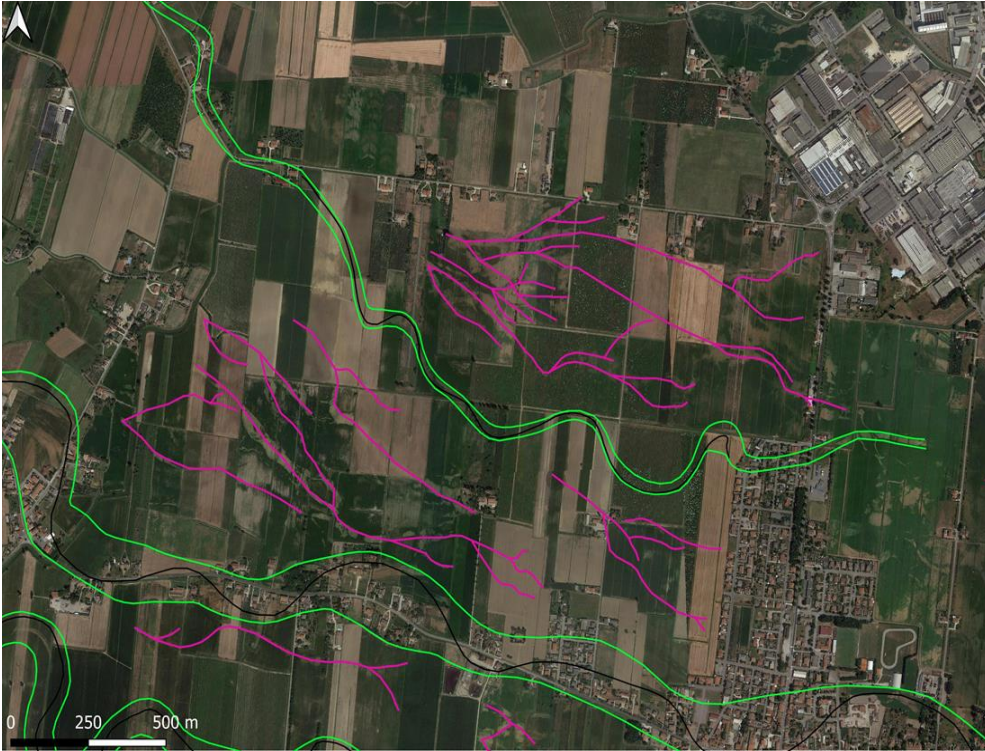


Fig. 6 Esempio di ventaglio di rotta in rosa e di canale di rotta in verde

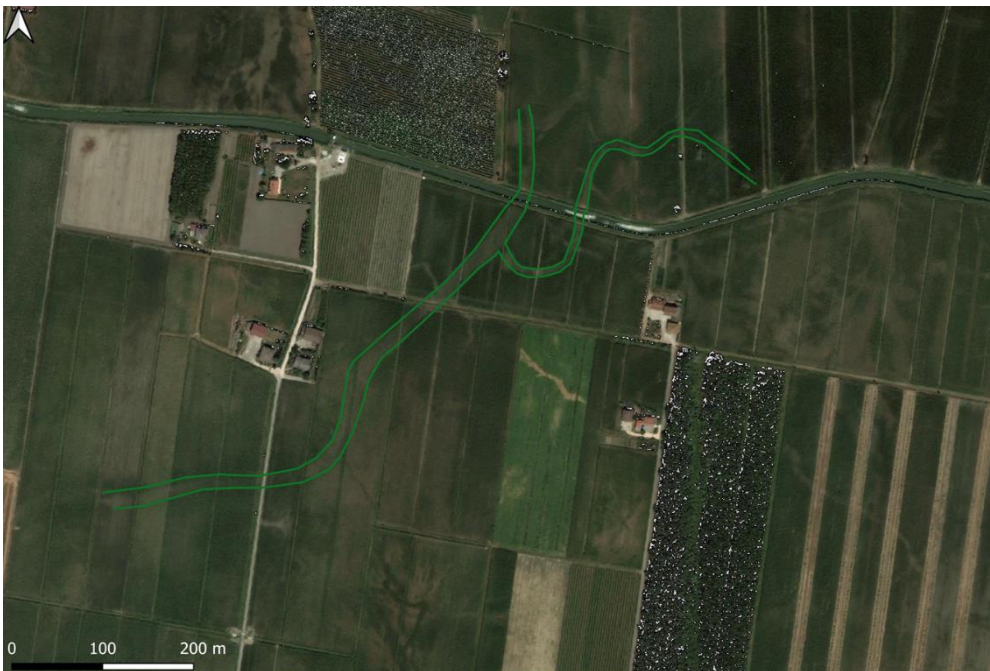


Fig. 7 Esempio di canale secondario in verde scuro

Oltre alle *channel belt* sono stati riconosciuti anche altri corpi canalizzati che però non presentano strutture tipiche delle *channel belt* come ad esempio gli *scroll sets*, questi quindi sono stati identificati semplicemente come corpi canalizzati indistinti (Fig. 7).

I ventagli di rotta e i canali di rotta sono stati individuati dalla fotointerpretazione, in particolare dalle immagini dei satelliti Yandex e ESRI nelle quali è ben visibile l'andamento ramificato dei ventagli di rotta (Fig.6). I canali di rotta sono più evoluti ed hanno dimensioni maggiori rispetto ai ventagli di rotta (Fig.6).

Infine si sono tracciate e misurate anche le larghezze delle *channel belt* e dei canali (Fig.8) utilizzate poi nell'analisi statistica. Dove possibile è stata disegnata la linea di centro canale con un tratto continuo dove era ben riconoscibile e con un tratto discontinuo dove era poco visibile e quindi è stata interpretata (Fig.5).



Fig. 8
esempio di
larghezza
della *channel belt*
in nero e
larghezza del
canale in
arancione

Oltre alla fotointerpretazione, la digitalizzazione è stata migliorata utilizzando il microrielievo, DEM ad alta definizione (modificato da Ninfo et al., 2011) particolarmente utile nell'individuazione delle zone di interdosso più depresse dalle zone di dosso più rilevate che costituiscono i *ridge*, ciò ha permesso di confermare i corpi digitalizzati ottenuti dalla fotointerpretazione.

L'analisi eseguita per la digitalizzazione dei corpi canalizzati è un'analisi di dettaglio eseguita su foto aeree e satellitari più recenti e quindi a più alta risoluzione rispetto a quelle usate in precedenza nella letteratura.

La letteratura è stata utilizzata in questa analisi con il fine di datare le *channel belt* principali e individuarne il bacino di appartenenza, oltre che per migliorare la digitalizzazione dei corpi canalizzati.

In particolare si è utilizzato uno studio svolto da Mozzi et al. del 2020 (Long-term drivers and impacts of abrupt river changes in managed lowlands of the Adige River and northern Po delta, Northern Italy) nel quale le *channel belt* principali sono state datate utilizzando la datazione al radiocarbonio eseguita in alcuni campioni di torba prelevati dai diversi carotaggi fatti lungo le *channel belt*.

Una volta datate le *channel belt* principali sono state caratterizzate con l'utilizzo di poligoni colorati disegnati al loro interno, in modo da rendere l'interpretazione più immediata e semplice. La datazione è stata eseguita per ottenere informazioni sulla distanza dalla linea di costa di ciascuna *channel belt* al momento della sua formazione. Conoscendo la distanza dalla linea di costa è possibile capire quanto le dinamiche costiere e lagunari abbiano influito sulla morfologia delle *channel belt*. Inoltre le *channel belt* sono state ricondotte per quanto possibile al loro bacino idrografico di appartenenza utilizzando i lavori di Mozzi et al., 2020; Piovan et al., 2010,2012 e la carta geologica d'Italia dell'ISPRA (Cucato et al., 2011). I bacini idrografici riconosciuti sono stati quello del Po e quello dell'Adige, identificati nella carta geomorfologica con due colori diversi (rispettivamente azzurro e verde chiaro) mentre per i corpi canalizzati a cui non è stato possibile attribuire con certezza un bacino idrografico di appartenenza è stato assegnato il colore marrone (Fig. 10).

3.2 L'analisi morfometrica:

La seconda parte del lavoro di tesi riguarda l'analisi statistica dei parametri morfometrici dei paleomeandri fluviali appartenenti alle principali *channel belt* riconosciute nella prima fase del lavoro di tesi. Gli *shapefile* delle center line delle diverse *channel belt* sono stati analizzati utilizzando il programma di elaborazione dati MatLab, nel quale si è inserito un algoritmo (Fitonello et al., 2020) che in un modo semi-automatico riconosce i punti di flesso delle center line, permette di eliminare i flessi spuri e identifica così i meandri appartenenti ad ogni *channel belt*. Questo algoritmo inoltre restituisce per ogni *channel belt* un file Excel contenente i diversi parametri relativi ad ogni meandro delle center line: sinuosità (S), raggio di curvatura (Rc), ampiezza (A), curvatura (C), lunghezza cartesiana (Lxy), lunghezza intrinseca (Ls), indice di asimmetria (IA), distanza apice flesso a monte (Lup) e distanza apice flesso a valle (Ldown) (Fig.9).

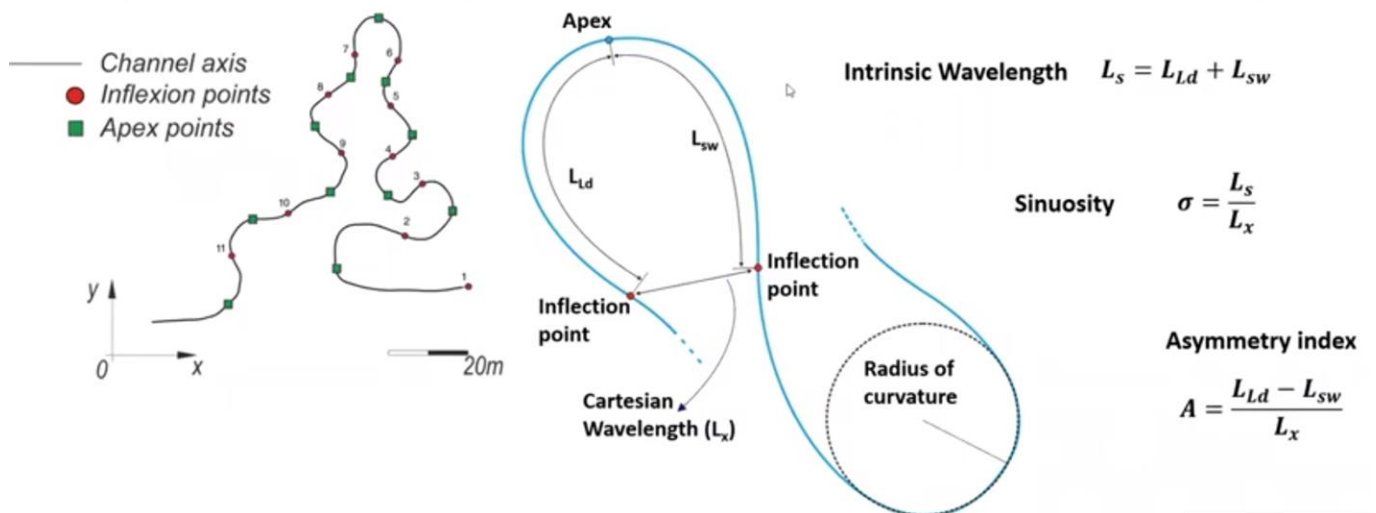


Fig. 9 Schema parametri elaborati da MatLab

I parametri ottenuti con l'elaborazione delle center line sono stati poi utilizzati per creare diverse tipologie di grafici di statistica descrittiva in modo da osservare le forme più ricorrenti nelle *channel belt* in studio. I grafici utilizzati rappresentano le distribuzioni di frequenza di alcuni grafici bivariati dei diversi parametri misurati. In particolar modo sono state utilizzate due modalità diverse per visualizzare la distribuzione delle frequenze: le frequenze cumulative percentuali e la stima della densità di probabilità tramite la Kernel Density Estimation (KDE).

La frequenza cumulativa percentuale in statistica descrittiva rappresenta il valore percentuale della funzione di distribuzione cumulata (F_x). Quest'ultima rappresenta il numero di osservazioni del fenomeno minori o uguali di un certo valore x che nel caso in studio sono i valori di soglia delle varie classi. Per ogni variabile analizzata (sinuosità, ampiezza, raggio di curvatura e asimmetria) si sono stabiliti dei *bin-range* adeguati in modo che i dati non siano tutti concentrati su poche classi né distribuiti in troppe classi con pochi dati. Nel caso dell'ampiezza e del raggio di curvatura i dati dovrebbero essere normalizzati alla larghezza del canale ma non avendo molte misurazioni di quest'ultima per mancanza di informazioni si è normalizzato tutto rispetto alla distanza flesso-flesso (L_{xy}) in quanto da letteratura è noto che scala linearmente con la larghezza del canale. Quindi tutte le center line ottenute dall'analisi di MatLab sono state riportate in un unico grafico, generato con la funzione "analisi dati" di Excel, rappresentate tutte le frequenze cumulative percentuali e la frequenza cumulativa percentuale media.

La Kernel Density Estimation è un metodo statistico che permette di stimare la densità di probabilità a partire da una serie di dati:

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

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 (Wikipedia).

Nella KDE per ottenere una stima di probabilità verosimile è importante determinare una larghezza di banda adeguata ricavata dai valori di *bin-range* già usati nella frequenza cumulativa. Tutti i dati ottenuti per ogni parametro sono stati raggruppati in un unico grafico condensato rappresentante la KDE per ogni center line analizzata.

I grafici bivariati sono stati eseguiti utilizzando i grafici a dispersione di Excel, in particolare i parametri messi a confronto sono:

- Lxy vs Ls
- Lxy vs Rc
- Lxy vs A
- Rc vs Lb
- A vs Lb

I grafici bivariati sono stati plottati utilizzando assi in scala logaritmica che permette di visualizzare al meglio le relazioni tra i diversi parametri.

4. RISULTATI:

4.1 Carta geomorfologica

L'analisi interpretativa dell'area in studio ha portato all'individuazione di cinque *channel belt* principali: Terrassa Padovana, Bagnoli, Conselve, Saline-Cona e Pozzonovo (Mozzi et al., 2020) e altre 4 *channel belt* minori, in totale sono state individuate 9 *channel belt* (Fig. 10). Principalmente le *channel belt* si dispongono in direzione E-W ad eccezione di alcune *belt* minori che hanno un orientamento NW-SE e della *channel belt* di Saline-Cona che ha un andamento SW-NE. Le *channel belt* hanno lunghezze che vanno da 10 a 20 km e sono larghe da 100 a 300 metri mentre le *channel belt* secondarie percorrono dai 3 ai 4 km e hanno larghezze che arrivano massimo a 110m.

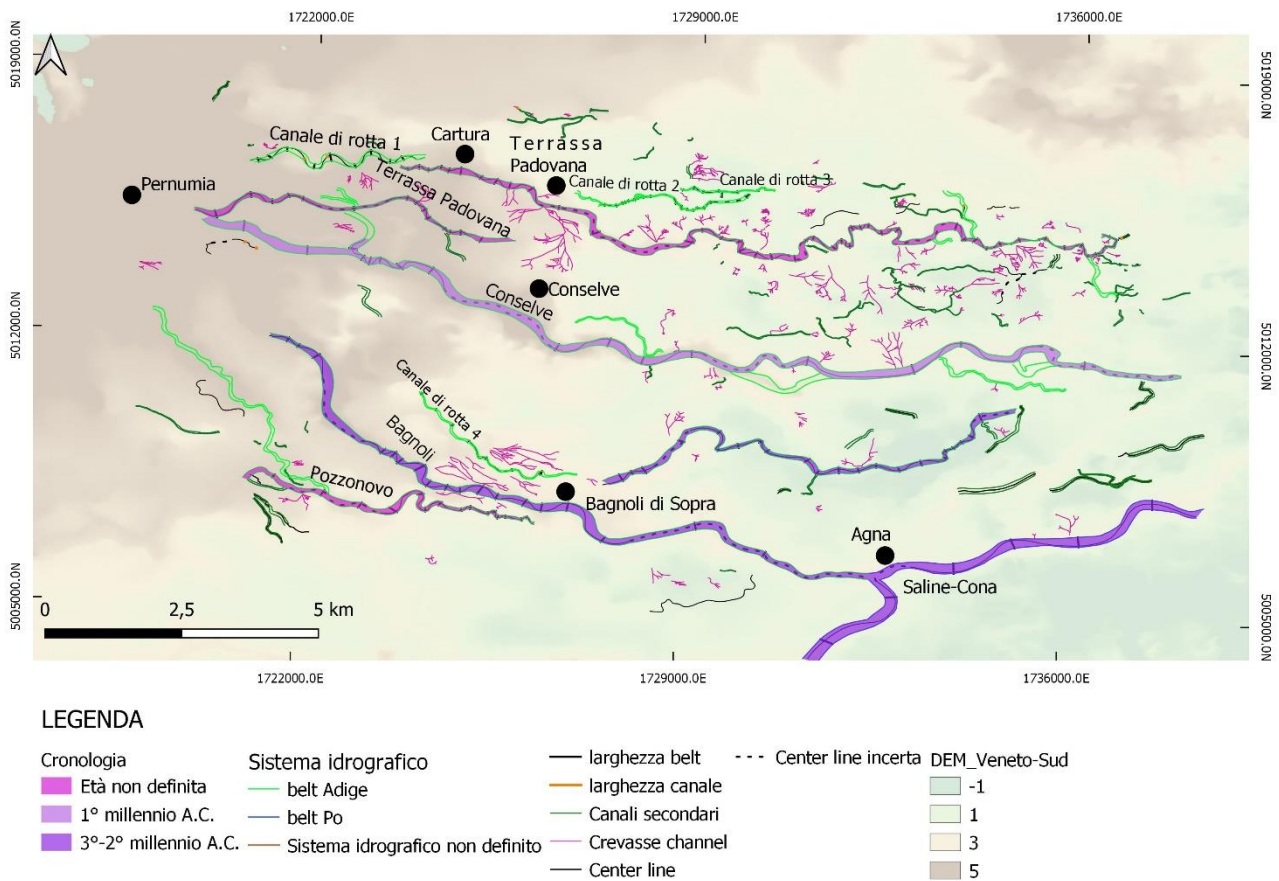


Fig. 10 Carta geomorfologica

Come descritto precedentemente nell'inquadramento geologico e geomorfologico le *channel belt* principali sono state datate e ricondotte ad un bacino idrografico di appartenenza seguendo la loro storia evolutiva nel tempo. La *channel belt* di Terrassa Padovana è la *channel belt* più settentrionale dell'area studio, è costituita da due canali principali e si trova in corrispondenza dell'omonimo comune, si estende in direzione NW-SE per circa 15 km e fa parte del bacino idrografico dell'Adige. La *channel belt* di Conselve è localizzata poco più a sud di quella di Terrassa Padovana, si estende per 18,5 km in direzione W-E, risale al primo millennio A.C. e fa parte del bacino idrografico dell'Adige (Piovane et al., 2010, 2012). Andando ancora più a sud si trova la *channel belt* di Bagnoli a cui sono stati attribuiti due rami principali (a differenza di quanto indicato da Mozzi et al., 2020), il ramo più grande si estende in direzione NW-SE per circa 13 km mentre il ramo inferiore ha un andamento SW-NE e scorre per circa 7,7 km in corrispondenza di Bagnoli di Sopra verso Concadalbero, entrambi i rami sono risalenti al 2°-3° millennio A.C. e fanno parte del bacino dell'Adige (Piovane et al., 2010, 2012).

In direzione SW-NE troviamo invece la *channel belt* di Saline-Cona di cui è presente un breve tratto di circa 7,4 km il quale attraversa i comuni di Agna e Cona, risale al 1° millennio A.C. e fa parte del

bacino idrografico del Po (Piovane et al., 2010, 2012). Infine nella zona più meridionale della mappa (poco più a sud della *channel belt* di Bagnoli) si trova un canale appartenente alla *channel belt* di Pozzonovo identificata da Mozzi et al., 2020, tale canale non era ancora stato identificato nella letteratura e viene analizzato per la prima volta in questo studio, ha un andamento W-E e si estende per circa 5 km, fa parte sempre del bacino idrografico dell'Adige.

Dalle diverse *channel belt* si diramano numerosi ventagli di rotta che in alcuni casi sono più sviluppati e formano corpi canalizzati anche di dimensioni discrete che costituiscono le *channel belt* minori. In particolare sono stati presi in considerazione quattro casi: canale di rotta 1,2,3 e 4 tutti appartenenti al sistema idrografico dell'Adige. Questi sono stati scelti perché hanno dimensioni maggiori e la center line ben visibile.

Il canale di rotta 1 si estende in direzione W-E in corrispondenza di Pernumia verso Cartura e presumibilmente ha origine dalla *channel belt* principale di Terrassa Padovana, ha una lunghezza di 3,4 km e una larghezza media di 105 m.

I canali di rotta 2 e 3 si estendono entrambi in direzione W-E poco al di sopra di Terrassa Padovana e si distaccano dalla *channel belt* principale di Terrassa Padovana. Sono lunghi rispettivamente 2,9 e 1,8 km e con larghezze medie di 30 e 40m.

Infine il canale di rotta 4 si trova nettamente più a sud di quelli sopracitati, si estende in direzione NW-SE verso Bagnoli di Sopra per circa 3,6 km e con una larghezza media di 40m. Appartiene alla *channel belt* principale di Bagnoli e intorno ad esso si sviluppa un ventaglio di rotta preesistente probabilmente sempre appartenente al sistema dell'Adige. (Fig.11.2)

CHANNEL BELT	LARGHEZZA CHANNEL BELT (MEDIA)	NUMERO DI MEMANDRI	SINUOSITA' MEDIA	AMPIEZZA MEDIA (m)	RAGGIO DI CURVATURA MEDIO (m)	INDICE DI ASIMMETRIA MEDIO
TERRASSA PADOVANA	88 m	54	1,26	71 m	161 m	-0,05
CONSELVE	161m	13	1,22	162m	396m	-0,09
BAGNOLI	130m	33	1,16	79m	273m	-0,13
POZZONOVO	78m	11	1,44	88m	131m	0,14
SALINE-CONA	249m	5	1,12	271m	935m	-0,39
ROTTA 1 (ADIGE)	113m	10	1,31	120m	178m	0,05
ROTTA 2 (ADIGE)	32m	14	1,11	20m	79m	-0,07
ROTTA 3 (ADIGE)	35m	9	1,14	34m	141m	0,002
ROTTA 4 (ADIGE)	47m	8	1,21	49m	110m	0,06

Tab. 1 parametri morfometrici delle *channel belt* principali e dei canali di rotta

Oltre alle *channel belt* sono stati individuate una serie di frammenti di corpi canalizzati di dimensioni inferiori nei quali non si notano strutture interne riconducibili a *scrollsets* e quindi non sono stati considerati come *channel belt* ma semplicemente come canali secondari (tracciati in verde scuro nella mappa).

Infine sono stati identificati dei ventagli di rotta a cui sono associati dei canali di *crevasse* (tracciati in rosa nella mappa) principalmente nella zona nord dell'area studio e associati alla *channel belt* di Terrassa Padovana sia in direzione sud che in direzione nord (Fig.12.2). Nella zona più meridionale si trova un altro ventaglio di rotta di dimensioni notevoli probabilmente associato alla *channel belt* di Bagnoli, è orientato in direzione W-E ed è attraversato da un canale di rotta più evoluto (canale di rotta 4) (Fig.11.2).



Fig. 11.1 Immagine satellitare da Google Earth

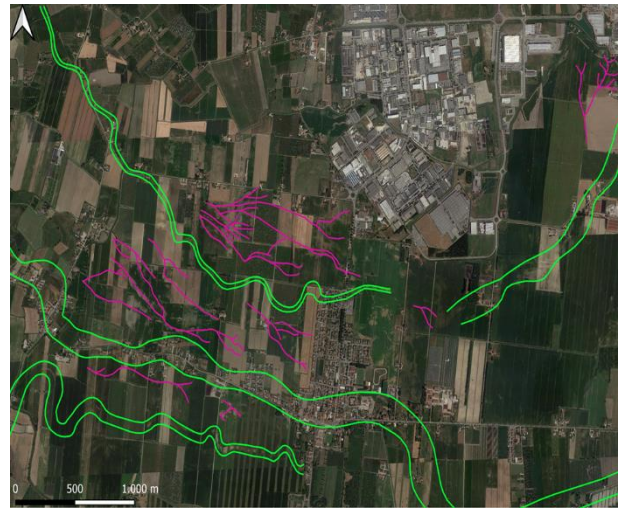


Fig. 11.2 Esempio di canale di rotta



Fig. 12.1 immagine satellitare di una porzione della zona studio (Google Earth)

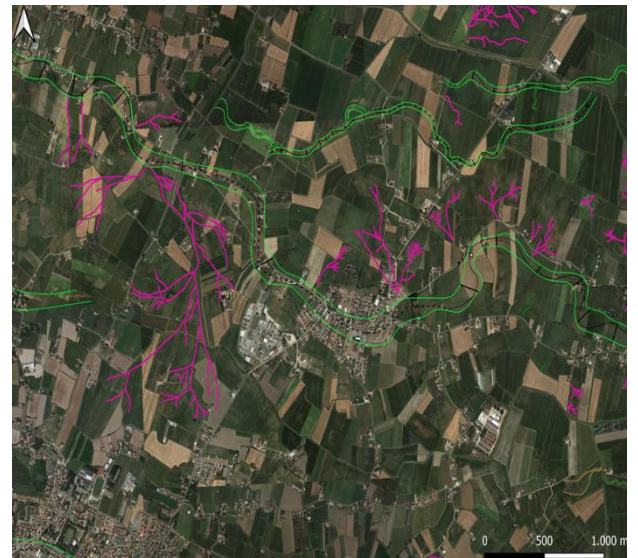


Fig. 12.2 esempio di canali di crevasse (in rosa)

4.2 Caratteristiche morfometriche:

Nei paragrafi sottostanti vengono inizialmente descritti i risultati relativi ai grafici di distribuzione di frequenza dei parametri analizzati per ogni *channel belt*. In particolare la sinuosità, l'ampiezza normalizzata su L_{xy} , il raggio di curvatura normalizzato su L_{xy} e l'asimmetria. Successivamente vengono descritti i grafici bivariati.

In tutti i grafici è stata inserita anche la *belt* di Saline-Cona, costituita da soli cinque meandri. Dato il numero esiguo di meandri, le informazioni relative a questa *belt* possono essere trascurate.

Sinuosità:

Il grafico in Fig.14a mostra la distribuzione della frequenza cumulativa percentuale della sinuosità rispetto alle diverse *channel belt* e la loro media (in rosso). Il bin range utilizzato è pari a 0,06.

Calcolando il primo quartile, la mediana e il terzo quartile è stato possibile notare come il 25% dei meandri analizzati abbia valori di sinuosità inferiori a 1,16. La metà dei meandri risulta avere valori compresi tra 1,09 (per il canale di rotta 3) e 1,33 (per il canale di rotta 1). Si osserva inoltre come la maggior parte dei meandri (il 75%) abbia un'alta variabilità: alcune *belt* hanno sinuosità molto bassa (1,17 per il canale di rotta 2) mentre altre *belt* raggiungono sinuosità più elevate (1,62 per la *belt* di Pozzonovo).

Il grafico di KDE in Fig.15a mostra l'andamento delle sinuosità. In questo caso per il parametro della sinuosità sono state individuate diverse larghezze di banda a seconda della *channel belt*: in particolare per la *channel belt* di Terrassa Padovana, Conselve e Pozzonovo è stata usata una larghezza di banda di 0,09 mentre per la *channel belt* di Bagnoli, Saline-Cona e per i canali di rotta 1,2 e 3 la larghezza di banda utilizzata è di 0,05. I tre picchi principali relativi alla *channel belt* di Bagnoli e ai due canali di rotta dell'Adige 2 e 3 hanno sinuosità molto basse, quasi rettilinee. Un picco relativo alla *belt* di Terrassa Padovana e Pozzonovo si trova a circa 1,1. A circa 1,2-1,26 si trova un terzo picco relativo alla *belt* di Conselve e ai canali di rotta dell'Adige 3 e 4. Infine un quarto picco a 1,5-1,6 della *channel belt* di Pozzonovo e il canale di rotta 1 dell'Adige. In generale si nota una distribuzione abbastanza omogenea di sinuosità tra 1 e 1,5 come già notato dai grafici di distribuzione di frequenza cumulativa percentuale

Ampiezza:

Il grafico riportato in Fig.14b mostra la distribuzione della frequenza cumulativa percentuale delle ampiezze normalizzate su L_{xy} relative ad ogni *belt* e la loro media (in rosso). In questo caso il bin range utilizzato coincide con la larghezza di banda pari a 0,04.

Dividendo il grafico in quartili si osserva come il 25% dei meandri ha valori di ampiezza inferiori a 0,25m. La mediana assume valori compresi tra 0,17 m (valore corrispondente al canale di rotta 2) e 0,33 m (valore corrispondente alla *channel belt* di Pozzonovo) con un valore medio di 0,26 m che sta a significare un rapporto di ampiezza su L_{xy} basso. Infine anche il terzo quartile mostra un'elevata variabilità di valori tra 0,26 per il canale di rotta 2 e 0,58 per la *channel belt* di Pozzonovo.

L'alta variabilità di valori corrispondenti all'ampiezza rispecchia l'andamento già in visto in precedenza anche per la sinuosità.

In Fig. 15b sono riportate le distribuzioni di frequenza relative all'ampiezza normalizzata a L_{xy} per ogni *channel belt*. La larghezza di banda è uguale per tutte le *channel belt* ed è 0,04.

Il primo picco riconoscibile dell'ampiezza si trova tra 0,1 e 0,15 e corrisponde alla *channel belt* di Bagnoli e ai canali di rotta dell'Adige 2 e 3. Tra 0,2 e 0,3 si trova un secondo picco relativo alla *channel belt* di Pozzonovo, Terrassa Padovana e al canale di rotta 1 dell'Adige. Tra 0,3 e 0,4 è presente un terzo picco della *channel belt* di Conselve e del canale di rotta 4 dell'Adige. Infine si nota un quarto picco a circa 0,5 relativo al canale di rotta 1 dell'Adige.

L'andamento generale ricalca quello della sinuosità in quanto questi due parametri sono spesso correlati. In particolare il picco principale relativo a Bagnoli e ai due canali di rotta dell'Adige (2 e 3) si trova sempre nella parte più sinistra del grafico e quindi presenta valori sia di sinuosità sia di ampiezza molto bassi. La *channel belt* di Terrassa Padovana e di Pozzonovo hanno valori intermedi sia di sinuosità che di ampiezza, la *channel belt* di Conselve e i canali di rotta 4 e 3 dell'Adige presentano valori leggermente più alti e infine si ha sempre che la *channel belt* di Pozzonovo e il canale di rotta 1 raggiungono i valori più alti sia di sinuosità che di ampiezza.

Raggio di curvatura:

Il grafico in Fig.14c mostra la distribuzione della frequenza cumulativa percentuale relativa al raggio di curvatura normalizzato alla distanza cartesiana. Come *bin-range* è stato utilizzato 0,07 ottenuto dalla media delle diverse larghezze di banda.

Il grafico è stato diviso in primo quartile, mediana e terzo quartile: ne risulta che il 25 % dei meandri ha valori di raggio di curvatura normalizzati a L_{xy} compresi tra 0,48 relativo al canale di rotta 1 dell'Adige e 0,59 per il canale di rotta 2 dell'Adige. La mediana mostra come il 50% dei meandri assume valori tra 0,54 (del canale di rotta 4) e 0,79 (del canale di rotta 2) con un valore medio di 0,60. Infine il terzo quartile mostra una variabilità di valori tra 0,63 e 1,04 relativi rispettivamente alla *channel belt* di Pozzonovo e al canale di rotta dell'Adige 3.

Nel grafico di KDE (Fig. 15c) relativo ai raggi di curvatura normalizzati su L_{xy} le larghezze di banda variano a seconda della *channel belt*: 0,09 per Terrassa Padovana, Conselve, Bagnoli, Saline-Cona e per i canali di rotta 2,3 e 4. Per la *channel belt* di Pozzonovo la larghezza di banda utilizzata è stata di 0,005 mentre per il canale di rotta 1 0,07.

Si evidenzia lo stesso comportamento osservato nel grafico di distribuzione di frequenza cumulativa percentuale: il picco principale si trova tra 0,5 e 0,7 e corrisponde alle *channel belt* di Pozzonovo, Conselve, Terrassa Padovana, Bagnoli e ai canali di rotta dell'Adige 1,2,3 e 4. Il canale di rotta mostra un secondo picco a circa 0,9 e il canale di rotta 3 e la *channel belt* di Bagnoli hanno un picco a circa 1,1. In questa tipologia di grafici è maggiormente evidente la presenza di rumore di fondo all'interno dei dati.

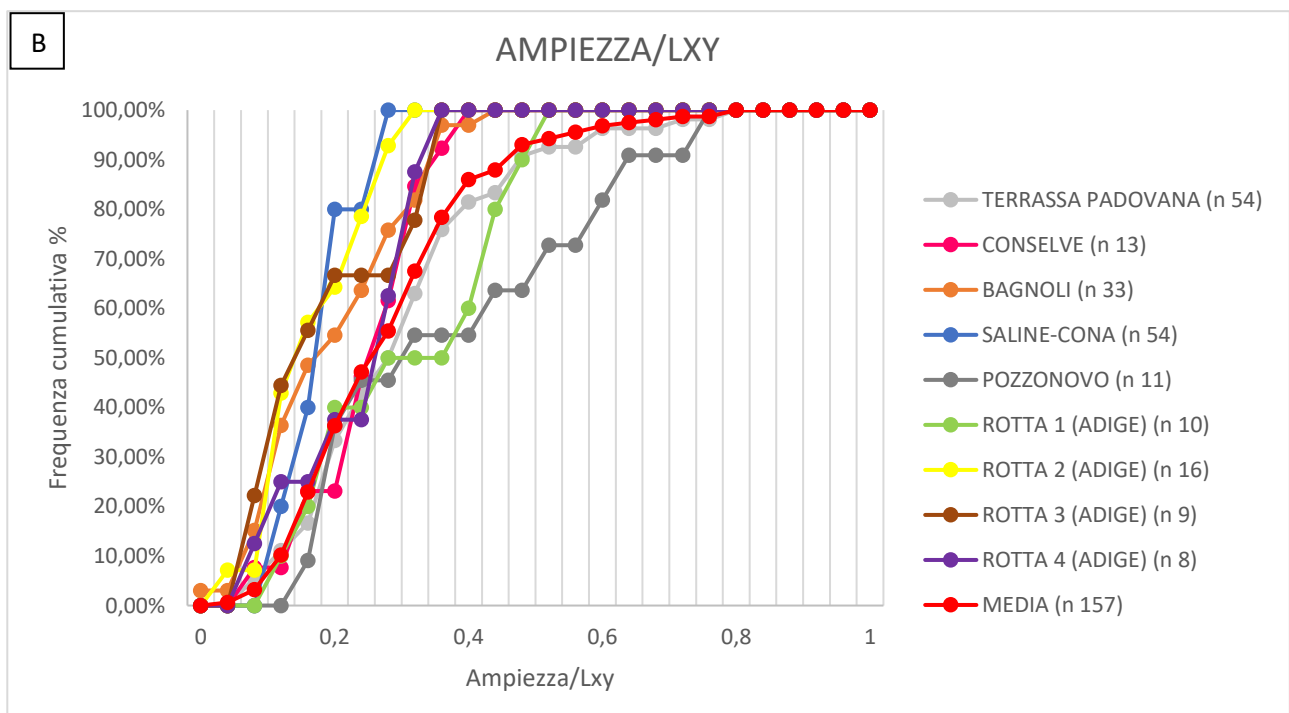
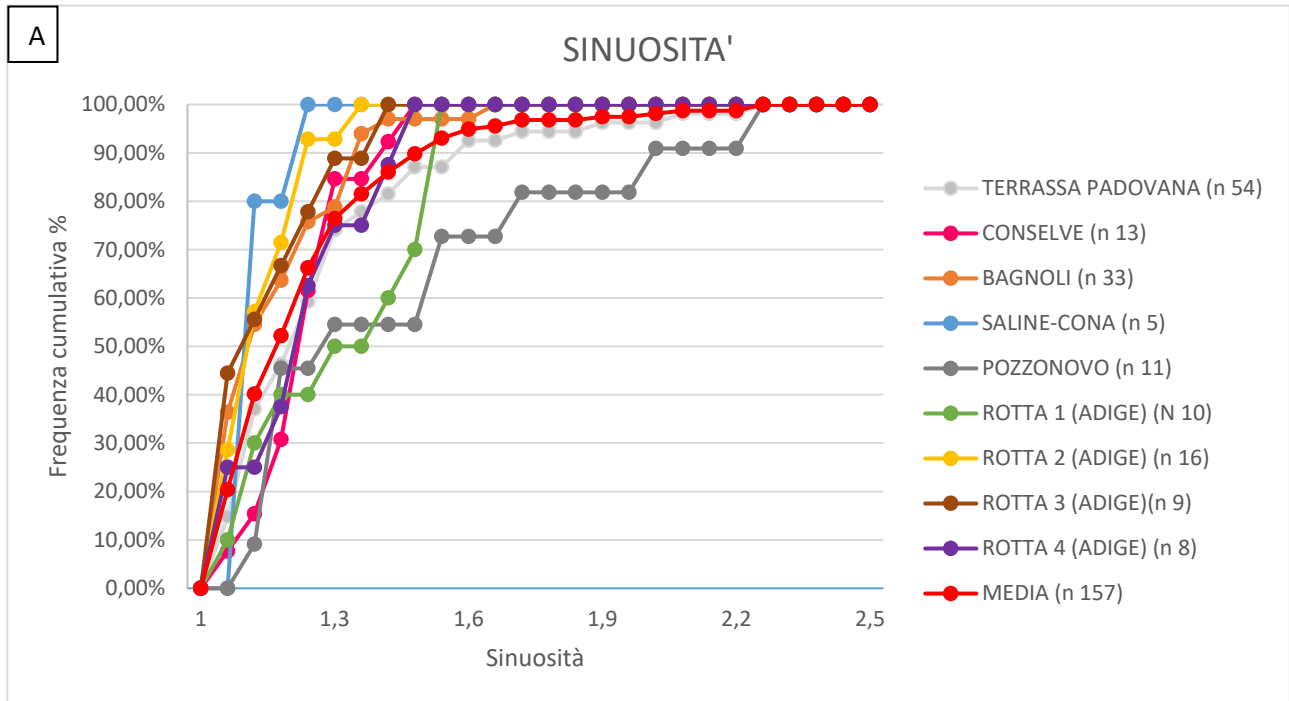
Asimmetria:

Il grafico in Fig. 14d raffigura la distribuzione della frequenza cumulativa percentuale relativa all'asimmetria delle *channel belt* in studio e la loro media. Il bin range utilizzato è di 0,15.

Dividendo il grafico in tre quartili si nota come il 25% dei meandri ha un indice di asimmetria tra -0,57 (per la *channel belt* di Conselve) e -0,19 per il canale di rotta 4 dell'Adige. La mediana mostra come il 50% dei meandri ha un indice di asimmetria tra -0,26 riferito alla *channel belt* di Conselve e 0,29 riferito alla *channel belt* di Pozzonovo con un valore medio di -0,10. Il terzo quartile evidenzia che il 75% dei meandri ha valori compresi tra 0,21 e 0,54 rispettivamente relativi alla *channel belt* di Bagnoli e alla *channel belt* di Conselve.

Nel grafico di KDE in Fig.15d la larghezza di banda utilizzata è stata di 0,2 per tutte le *channel belt*. Si nota come la maggior parte delle *belt* presenti un andamento asimmetrico, ad eccezione della *channel belt* di Bagnoli e della rotta 1 dell'Adige che sono abbastanza simmetriche, la *channel belt* di Bagnoli ha una buona parte dei meandri che sono inclinati in direzione *upstream*, mentre il canale di rotta 1 dell'Adige ha diversi meandri inclinati in direzione *downstream*.

In particolare la *channel belt* di Terrassa Padovana, Saline-Cona, i canali di rotta 2 e 3 hanno i meandri principalmente inclinati in direzione *upstream*, mentre i meandri della *channel belt* di Pozzonovo e della rotta 4 sono più inclinati in direzione *downstream*. Infine la *belt* di Conselve ha un comportamento ibrido con inclinazioni dei meandri sia *upstream* che *downstream*.



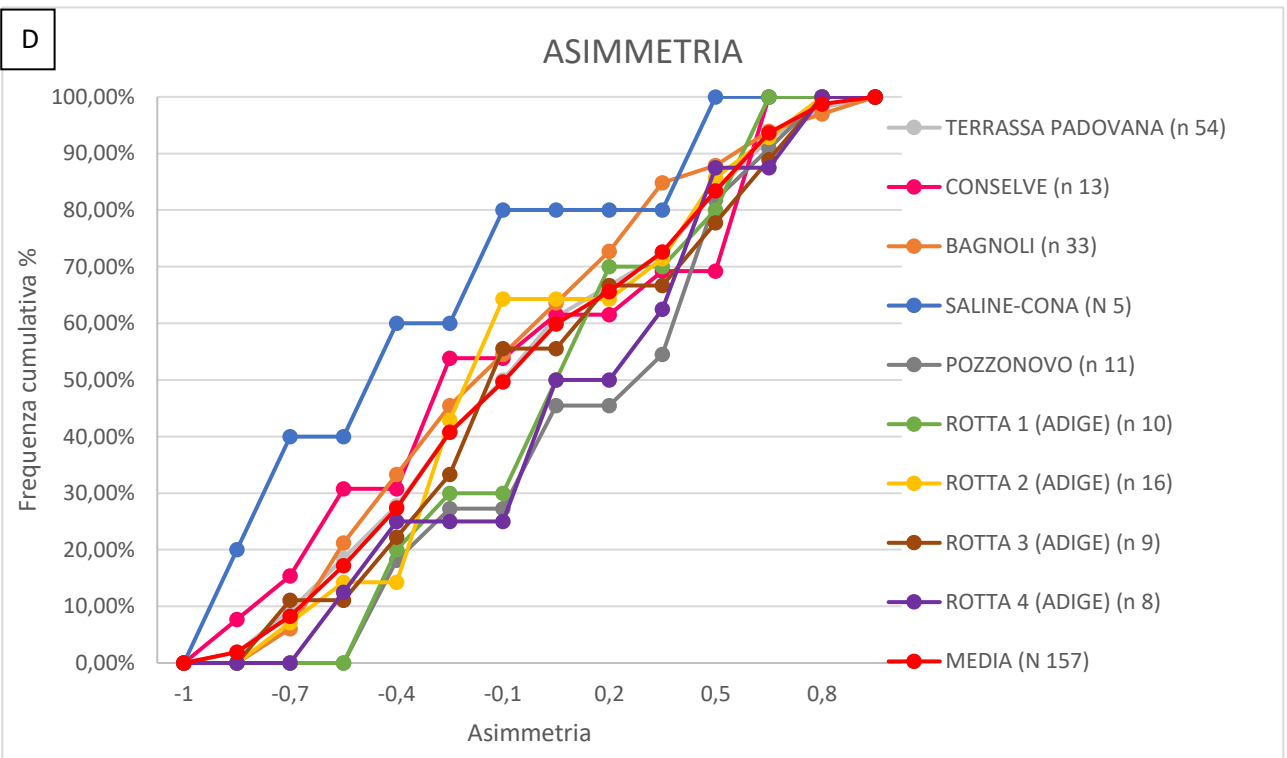
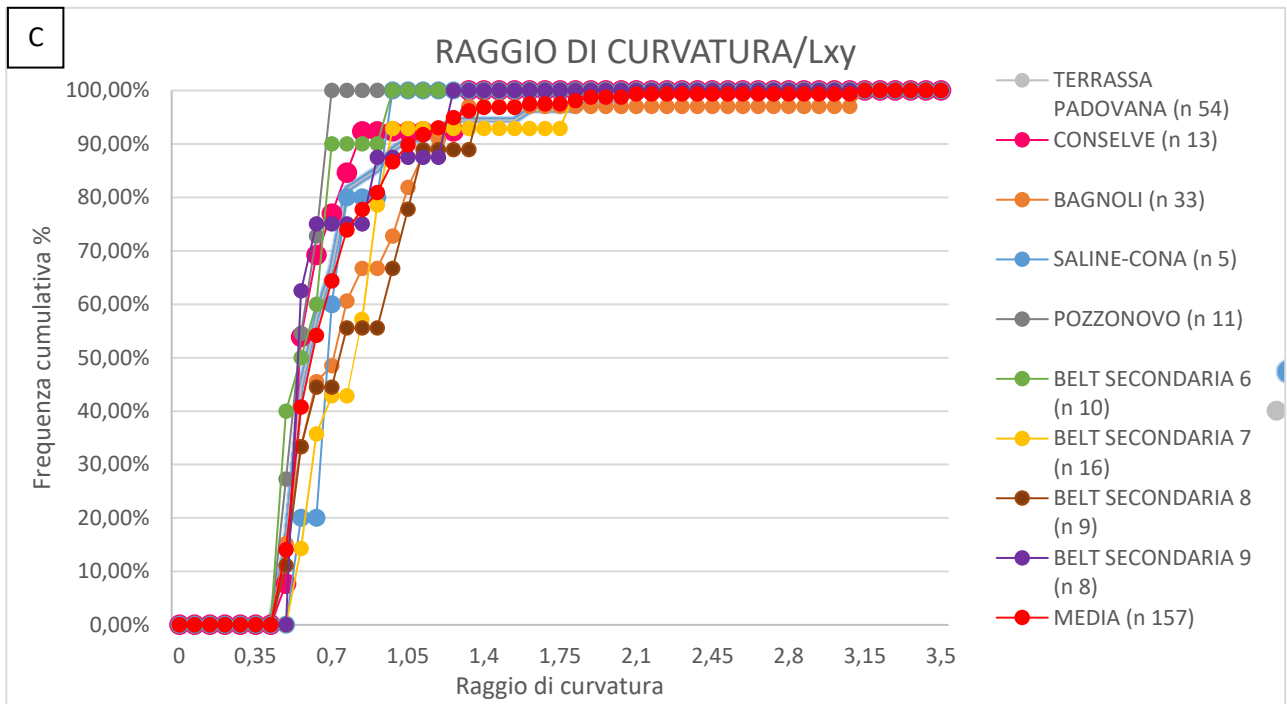
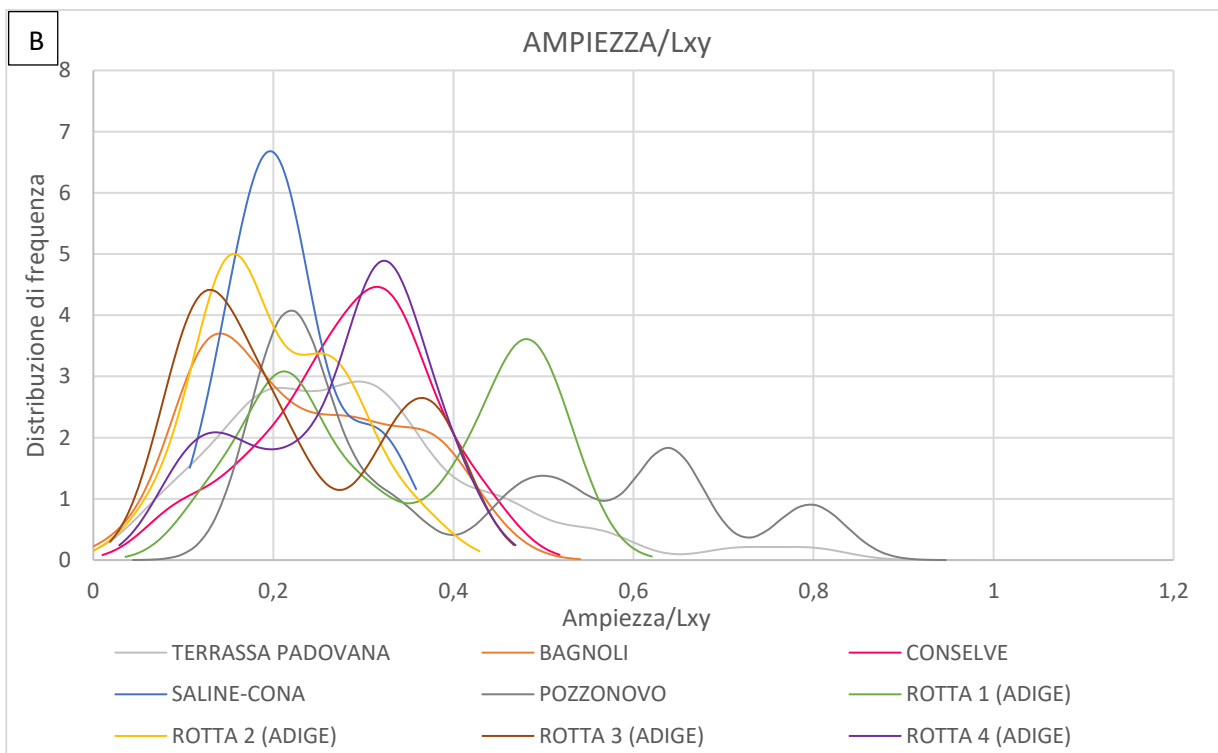
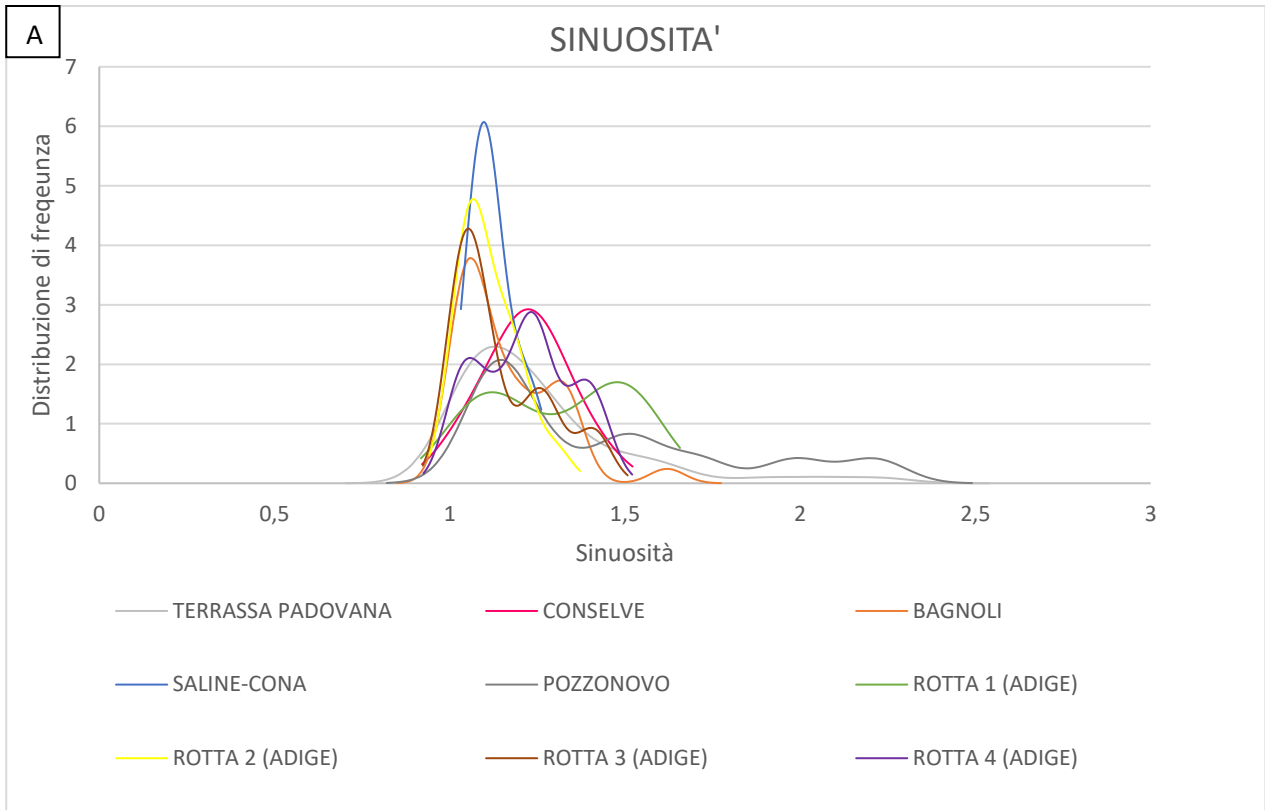


Fig.14 Grafici di Frequenza cumulativa percentuale, il numero tra parentesi si riferisce al numero di meandri appartenenti alla channel belt considerata



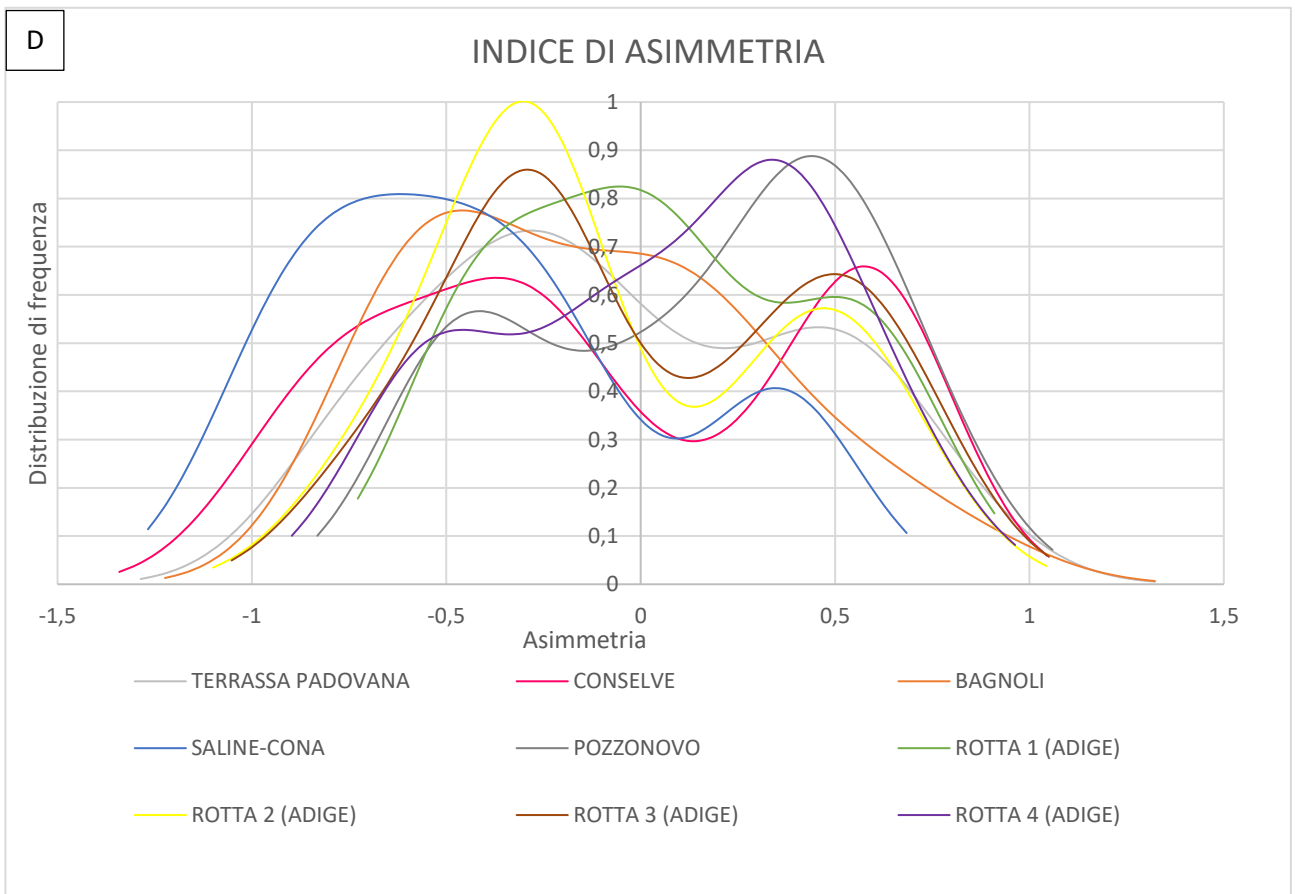
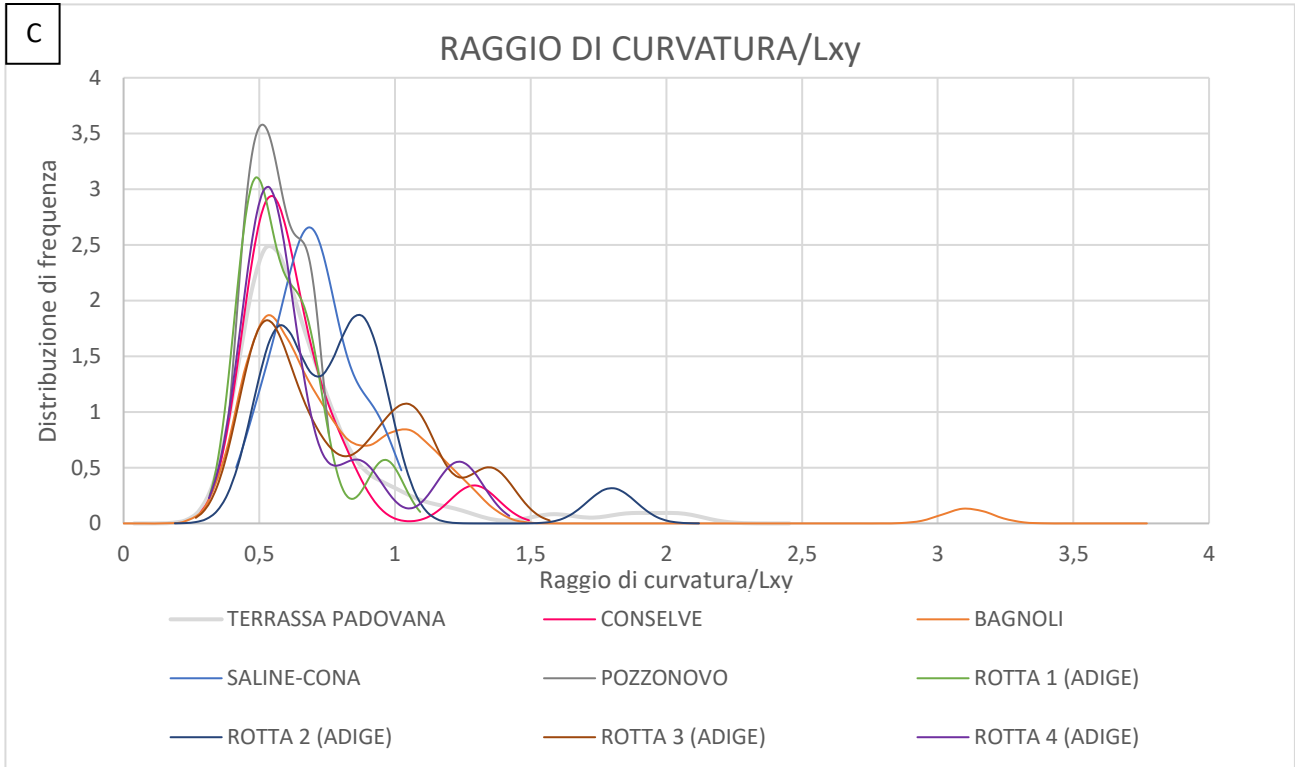


Fig. 15 Grafici di KDE

Grafici bivariati:

Considerando che il rapporto L_s/L_{xy} rappresenta la sinuosità, uno dei primi grafici bivariati analizzati mette a confronto proprio tali parametri.

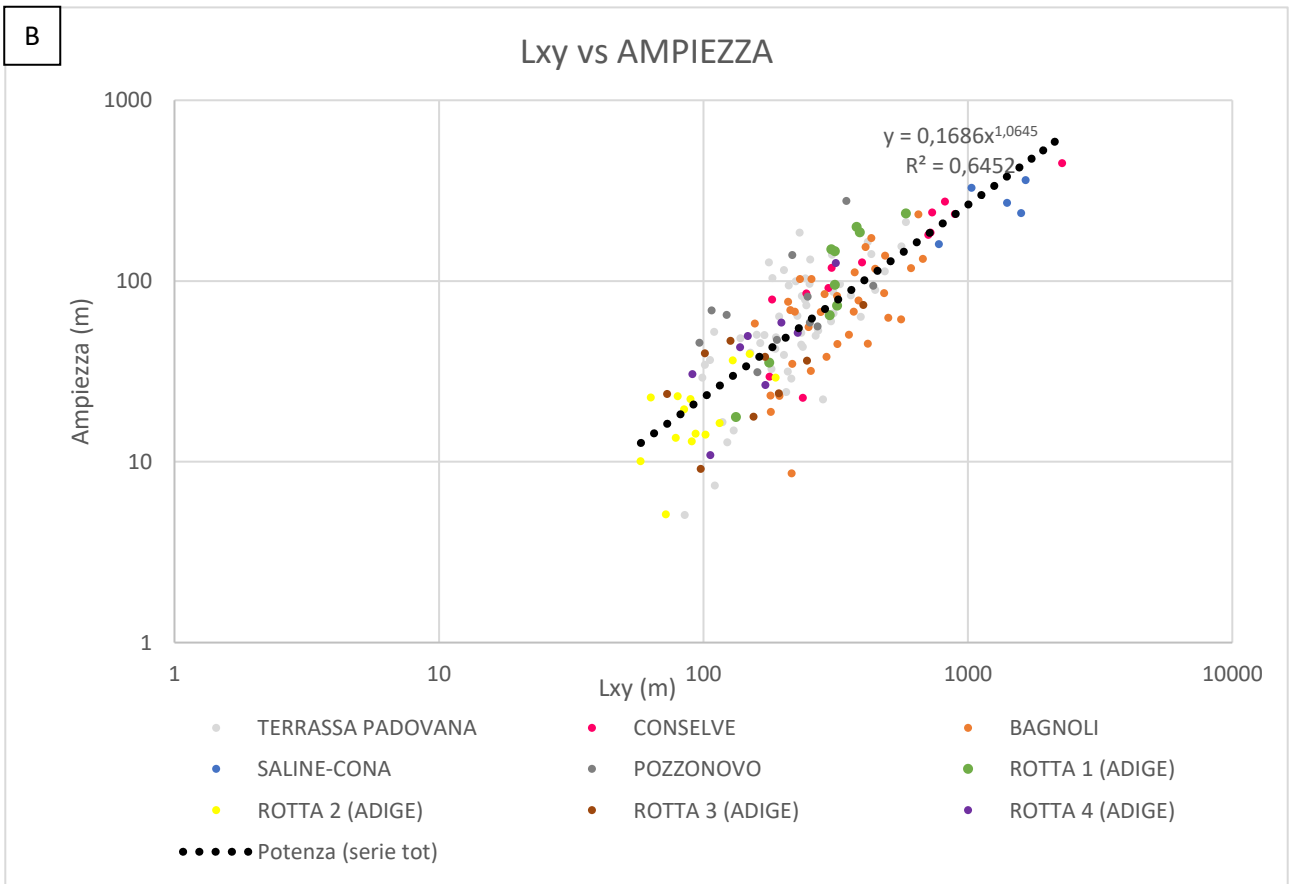
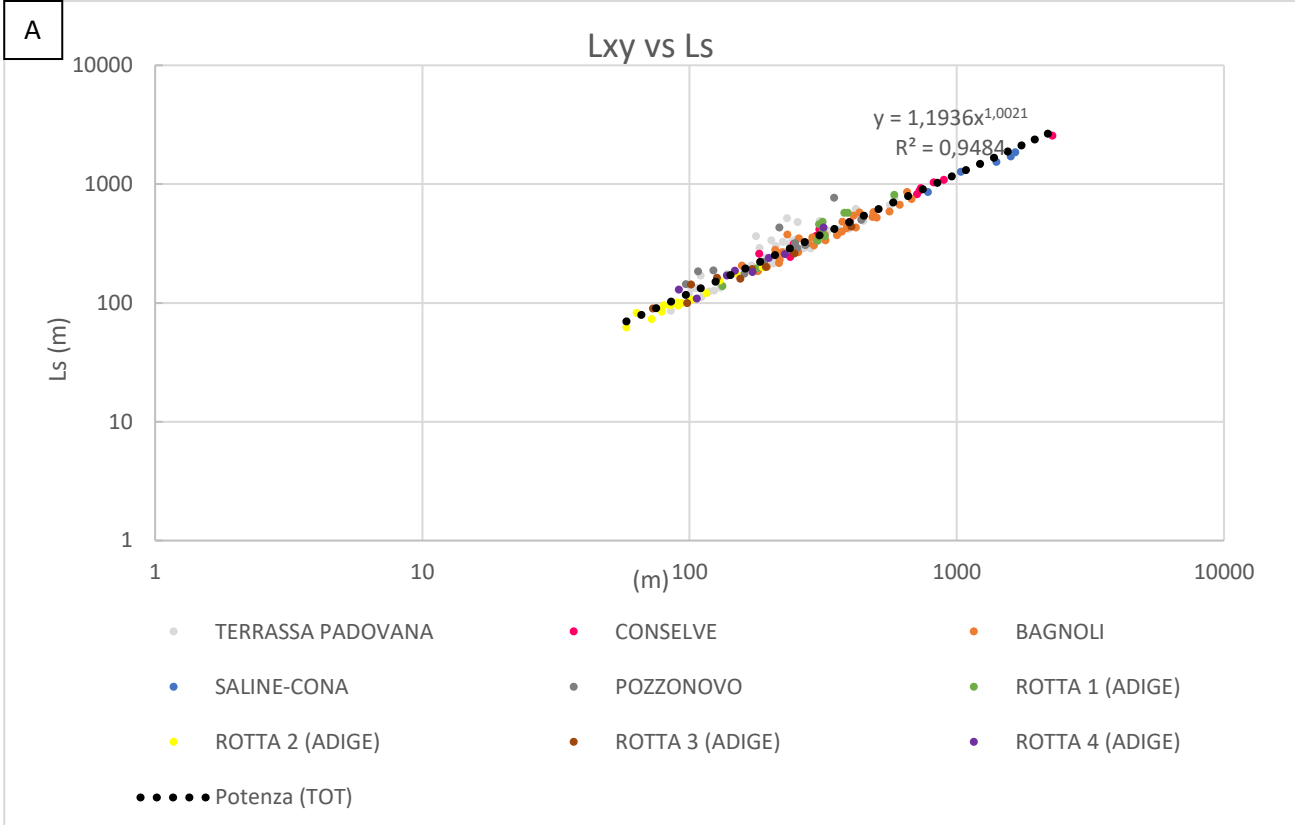
In Fig.16a il grafico mostra una correlazione diretta tra i due parametri L_s e L_{xy} in scala logaritmica, all'aumentare della distanza cartesiana flesso-flesso (L_{xy}) aumenta anche la lunghezza intrinseca del meandro (L_s). Osservando il grafico si nota che tutti i dati si dispongono in maniera ordinata lungo una retta e con poca dispersione. È stato quindi possibile tracciare una retta di regressione con la seguente equazione $L_s = 1,1936L_{xy}^{1,0021}$ e un valore di correlazione (R) pari a 0,974, quindi la correlazione è molto buona essendo R vicino a +1 (+1 corrisponde alla perfetta correlazione lineare).

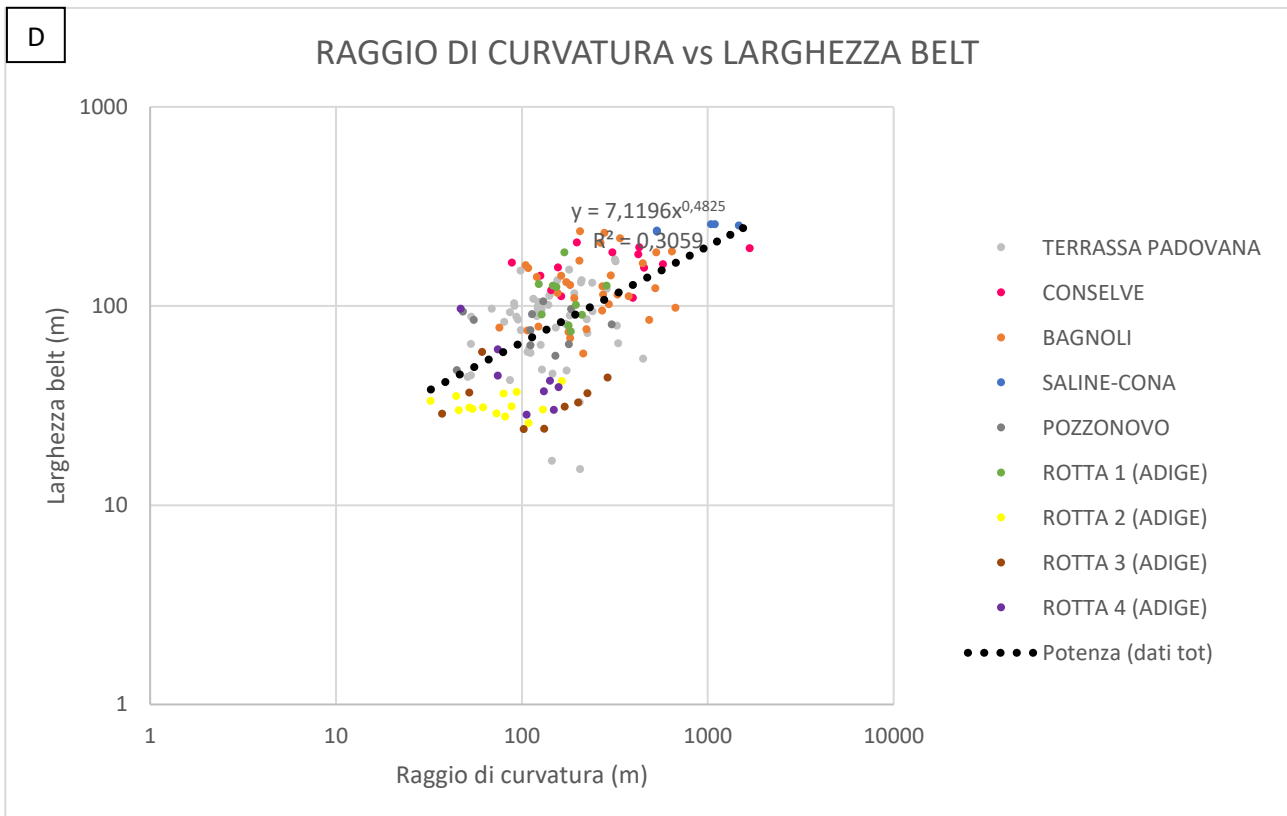
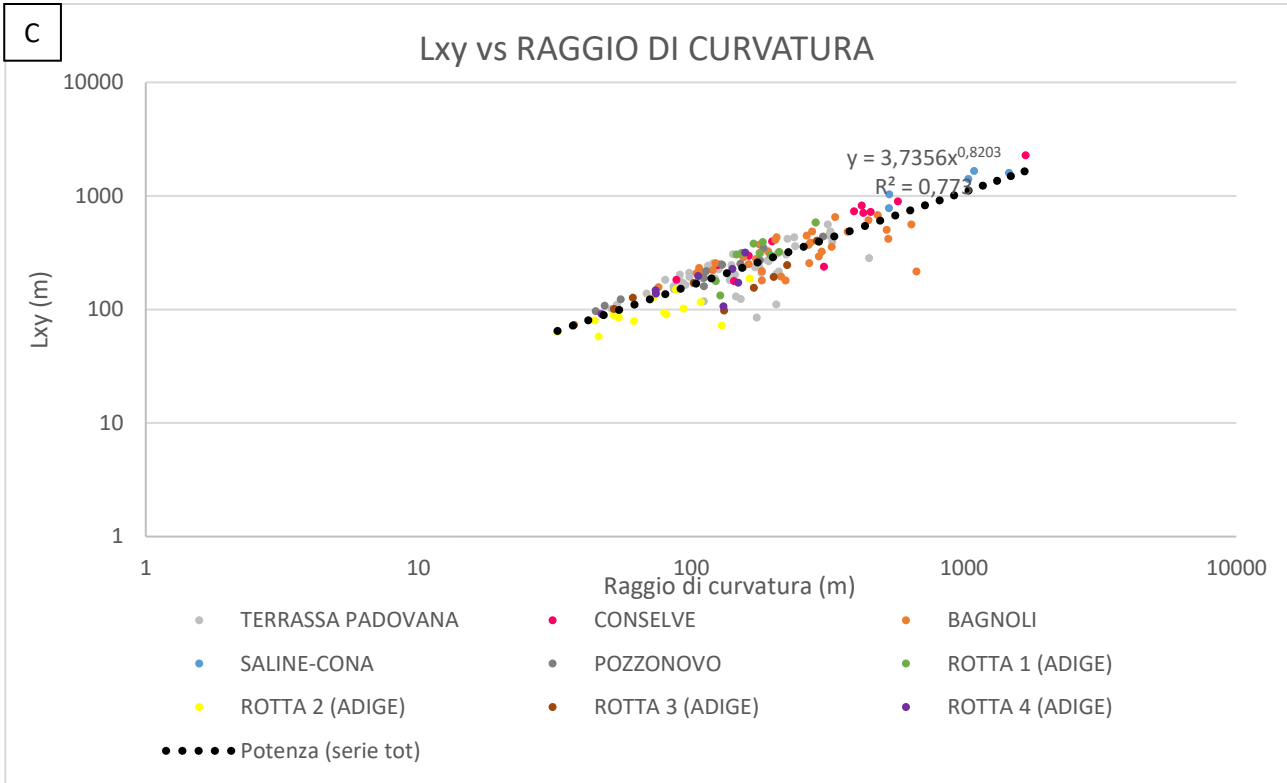
Il grafico in Fig.16b evidenzia la correlazione lineare in scala logaritmica tra il raggio di curvatura (R_c) e L_{xy} , i dati sono poco dispersi e si dispongono abbastanza ordinatamente lungo una retta. Perciò anche in questo caso il tipo di correlazione è positivo e la retta di regressione ha la seguente funzione $R_c = 0,9164L_{xy}^{0,9423}$ con un coefficiente di correlazione R pari a 0,879 che conferma la correlazione lineare.

Nel grafico in Fig.16c si nota ancora una correlazione lineare in scala logaritmica tra l'ampiezza (A) e L_{xy} , la disposizione dei dati è abbastanza ordinata e si distribuisce lungo una retta con la seguente equazione $A = 0,1686L_{xy}^{1,0645}$ R è pari 0,80 perciò la correlazione lineare è ancora buona.

Dal grafico in Fig. 16d si nota una disposizione dei dati relativi alla larghezza della *channel belt* (L_b) rispetto il raggio di curvatura meno ordinata e più dispersiva, si può comunque individuare una tendenza dei dati a disporsi lungo una retta con equazione $L_b = 7,1196R_c^{0,4825}$ ma con un coefficiente di correlazione $R=0,553$ che corrisponde sempre ad una correlazione lineare ma meno marcata.

Nell'ultimo grafico in Fig. 16e la correlazione lineare su scala logaritmica tra ampiezza e larghezza della *channel belt* è abbastanza evidente vista la disposizione ordinata dei dati lungo la retta di regressione ($y = 12,295x^{0,4695}$) e con un $R=0,665$ che indica una correlazione lineare ancora accettabile.





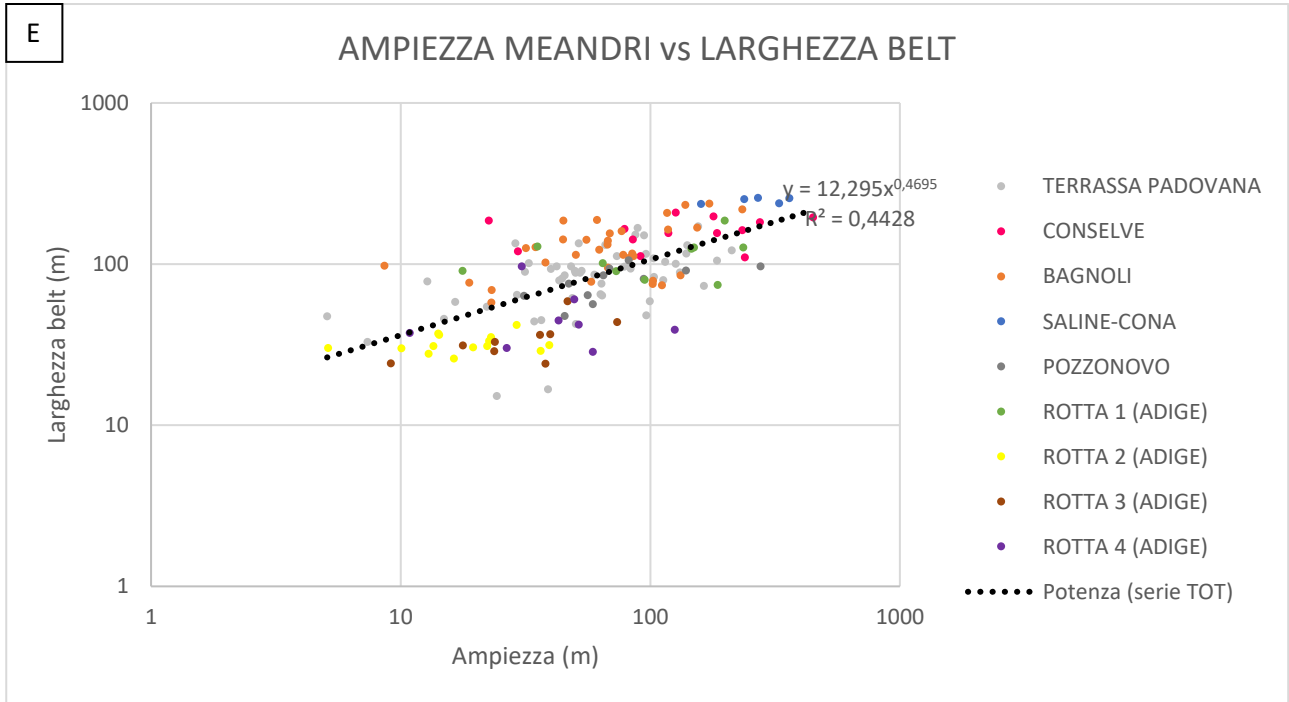


Fig. 16 Grafici bivariati

5. DISUSSIONI:

5.1 Geomorfologia:

La carta geomorfologica mette in evidenza le principali *belt* presenti nell'area studio e ne mostra l'andamento, evidenziando la scarsa sinuosità dei canali associati ad esse e la tendenza delle stesse ad assottigliarsi verso est (verso la linea di costa) (Fig. 10).

In particolare la *channel belt* di Terrassa Padovana ha una larghezza di 160m nella porzione più prossimale mentre in quella più distale è larga 40 m. La *channel belt* di Conselve passa da una larghezza di 197 m ad una di 121 m. Anche la *channel belt* di Bagnoli mostra un restringimento da 190m a 134 m e infine la *channel belt* di Pozzonovo anche se più corta passa da 122 m nella porzione prossimale a 40 m in quella più distale.

Analizzando le morfologie dei corpi canalizzati sepolti è possibile ipotizzare quali siano state le tipologie di avulsione diverse che hanno portato alla formazione delle principali *belt*. Seguendo la definizione di Slingerland e Smith (2004) si identificano tre tipologie principali di avulsione: per annessione, per incisione e per progradazione.

Il meccanismo dell'avulsione per annessione si verifica quando un canale, durante la sua formazione, incontra un canale abbandonato e lo occupa (Slingerland & Smith, 2004). Tuttavia nel caso studio non sono presenti esempi di avulsione per annessione.

Quando la portata fluviale viene deviata dal canale di origine ad un bacino di inondazione adiacente, essa subisce una brusca diminuzione della competenza e della capacità di trasportare sedimenti. Questo causa un'improvvisa espansione della sezione trasversale del flusso portando alla sedimentazione immediata dei sedimenti più grossolani mentre quelli più piccoli vengono trasportati più a lungo nella piana alluvionale. Al procedere dell'avulsione si ha la formazione di un cuneo di sedimenti in corrispondenza del punto di rottura in direzione sottocorrente (Slingerland & Smith, 2004). I ventagli di rotta vicini interagiscono in un processo di *compensational stacking*. In genere dopo un periodo di progradazione e di riempimento del bacino, il cuneo di sedimenti viene abbandonato quando il gradiente tra il canale e il bacino di inondazione viene ridotto dalla deposizione. Se il flusso di avulsione continua il cuneo di sedimenti si sviluppa in un singolo canale dominante.

Le avulsioni per incisione implicano l'erosione di un nuovo canale direttamente nella superficie della piana alluvionale. Un evento iniziale di avulsione genera un flusso dal canale principale alla piana alluvionale. Mentre il flusso procede verso il basso dello *slope* nella piana alluvionale attraverso percorsi che connettono zone a quote più basse, esso può intercettare un altro canale come un tributario o un ramo sottocorrente del canale principale. La migrazione in direzione *upstream* del *knickpoint* (punto in cui si ha una brusca variazione di pendenza del canale) combinata con l'estensione in direzione *dowstream* dal sito di deviazione iniziale può portare alla formazione di un nuovo canale ben definito che prende in carico tutta o buona parte della portata del canale principale (Slingerland & Smith, 2004).

Nella zona più a Nord dell'area studio si nota una presenza maggiore di *crevasse splay* perciò il meccanismo di avulsione sarà principalmente per progradazione, nella zona centrale, in particolare per la *channel belt* di Conselve (Fig.1), si osserva un'avulsione locale (Slingerland & Smith, 2004) probabilmente legata al meccanismo di incisione.

La presenza maggiore di *crevasse splay* nella zona Nord dell'area studio principalmente associati alla *channel belt* di Terrassa Padovana (Fig. 2) può essere spiegata dalla presenza del meccanismo di avulsione per progradazione che genera una serie di ventagli di rotta inizialmente con tanti canali e poi progressivamente si forma un canale dominante che costituirà la *channel belt*. Un'altra ipotesi per spiegare tale fenomeno è la progressiva evoluzione del canale principale che quindi aumenta la sua sinuosità favorendo la rottura degli argini e quindi la formazione di ventagli di rotta.

5.2 Analisi morfometriche:

Come si osserva dai risultati dei grafici KDE e di frequenza cumulativa la sinuosità ha valori inferiori a 1,5 perciò la maggior parte delle *channel belt* ha sinuosità bassa e questo potrebbe essere dovuto al fatto che il sistema idrografico dell'Adige (quello maggiormente presente nell'area studio) crea facilmente nuove *channel belt* o tratti di esse ma senza dargli il tempo di evolversi e quindi raggiungere sinuosità più elevate. Questa tendenza viene confermata dai grafici relativi al raggio di curvatura e all'ampiezza (normalizzata a L_{xy}) entrambi con valori generalmente inferiori a 1.

Lo studio morfometrico evidenzia anche come ci sia un'elevata presenza di rumore di fondo nei dati acquisiti, indicando un'alta variabilità delle forme relative ai meandri delle *channel belt*. Questo potrebbe essere dovuto al fatto che alcune *belt* riescono ad evolversi più di altre perché più stabili nel tempo (come nel caso della *channel belt* di Terrassa Padovana) e altre invece si spostano in nuove zone dopo poco tempo o comunque vengono abbandonate prima di riuscire ad evolversi.

Infine per quanto riguarda i dati relativi all'asimmetria si evidenzia una leggera tendenza dei meandri a sviluppare forme asimmetriche inclinate sovracorrente o sottocorrente. Generalmente, le forme inclinate sovracorrente sono più comuni nelle zone verso costa perché legate al fenomeno del *backwater effect* (Blum et al., 2013) mentre quelle sottocorrente testimoniano la localizzazione della zona in un'area prossimale ancora lontana dalla linea di costa. Nel presente studio i dati analizzati non sono sufficienti per determinare pattern ricorrenti nella distribuzione dei meandri inclinati sovracorrente o sottocorrente rispetto alla distanza dalla linea di costa. Servirebbero quindi ulteriori analisi per verificarlo.

I grafici bivariati relativi a L_s vs L_{xy} e R_c vs L_{xy} come già detto in precedenza mostrano una buona correlazione lineare tra i parametri, già dimostrata in letteratura da Leopold e Wolman, 1990 (Fig.4)

Tuttavia tale correlazione è un po' meno evidente per i grafici di A vs L_{xy} questo potrebbe essere dovuto alla presenza di diversi meandri poco evoluti (testimoniato anche dalle basse sinuosità osservate in precedenza). In tal caso i meandri potrebbero presentare la stessa lunghezza cartesiana (L_{xy}) per diverse ampiezze.

Per quanto riguarda i grafici relativi al rapporto tra i raggi di curvatura e la larghezza delle *channel belt* la correlazione non è molto alta ($R=0,55$) e i dati appaiono sparsi probabilmente a causa dell'elevata variabilità di forme dei meandri che si osserva in questa zona, sempre correlato al fatto che si hanno *channel belt* più o meno evolute.

Infine anche i grafici di ampiezza vs larghezza della *channel belt* non mostrano una correlazione evidente si può ipotizzare come questo sia collegato al fatto che le *channel belt* presenti mostrano un comportamento normale infatti i loro limiti non sono rettilinei ma sinuosi, in alcuni casi seguono la sinuosità del canale stringendosi intorno ad esso quindi diminuiscono la loro larghezza (Fig.5).



Fig. 17 esempio di avulsione per incisione

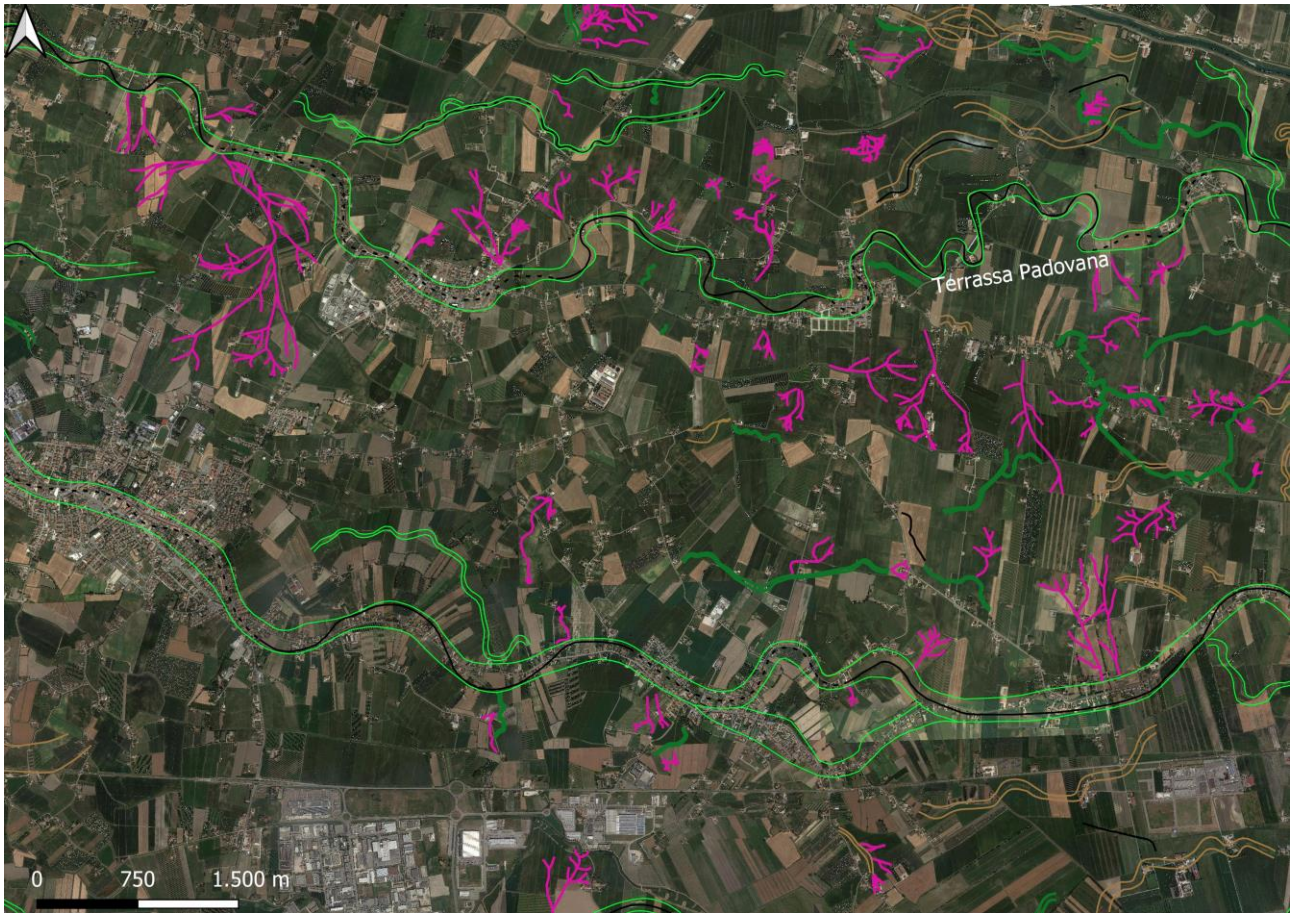


Fig. 18 esempio ventagli di rotta (in rosa) e porzione della channel belt di Terrassa Padovana

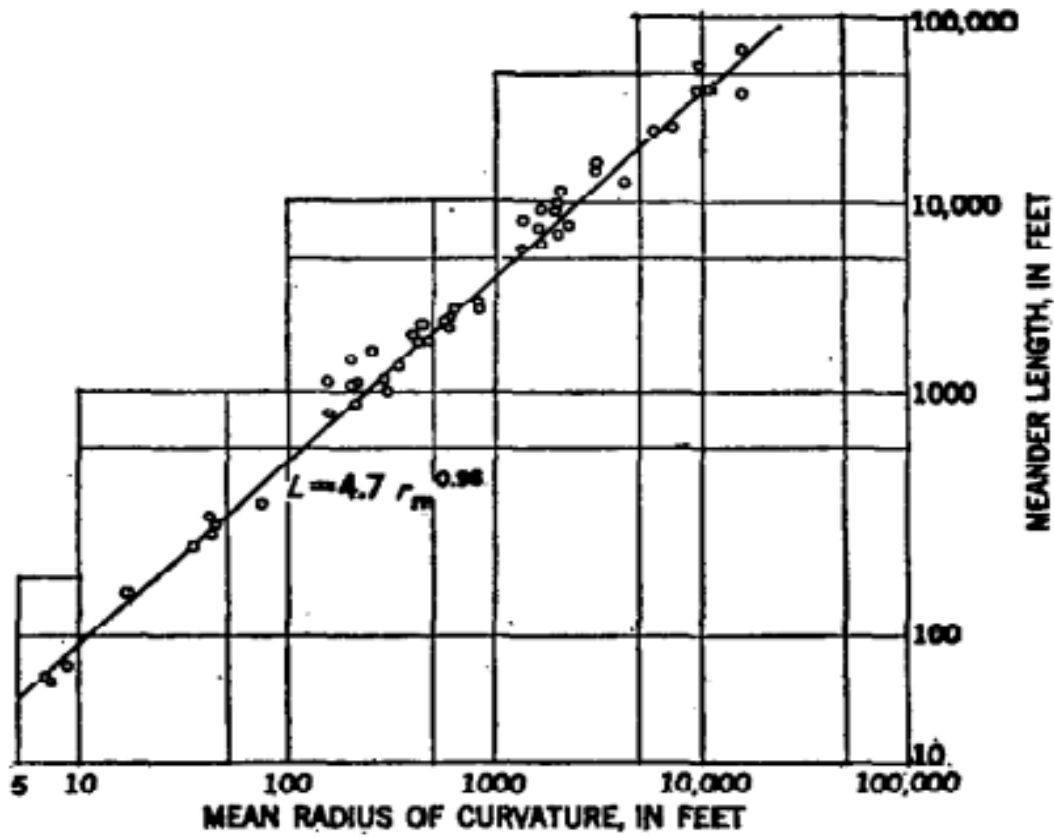
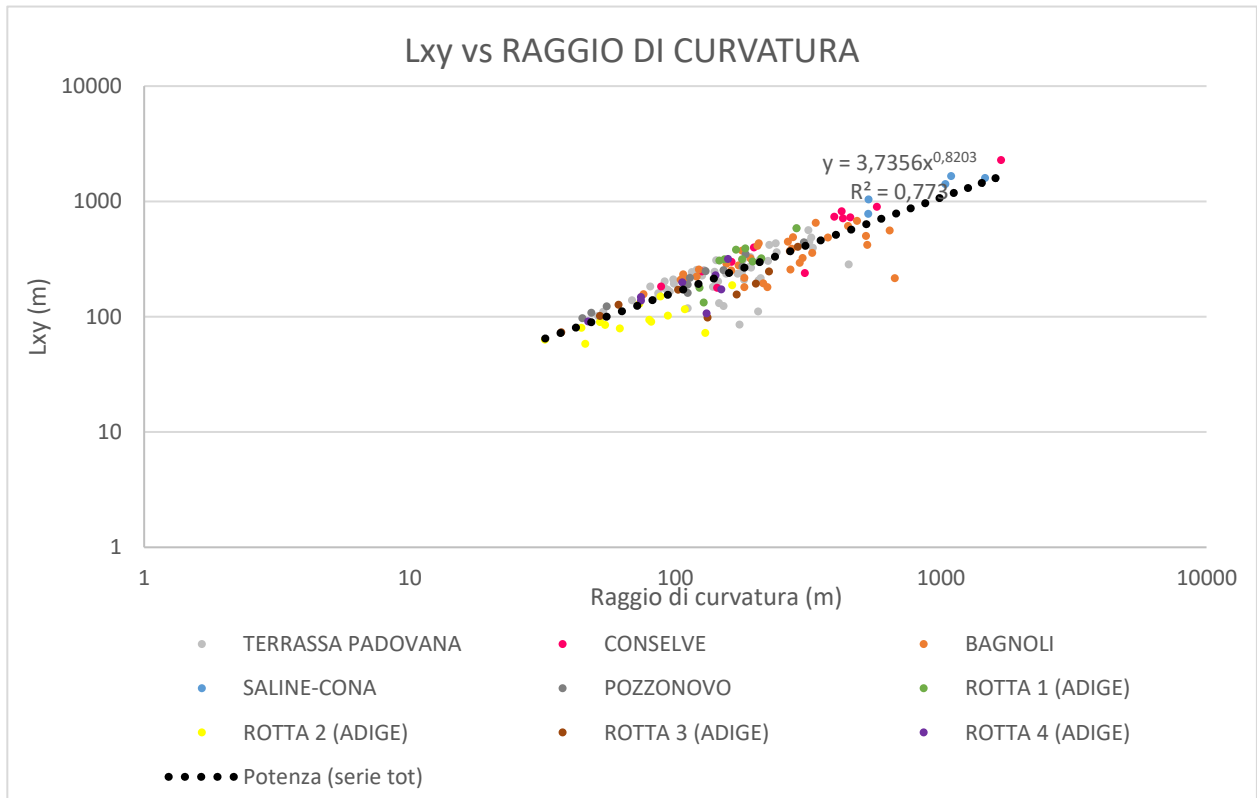


Fig 19 confronto tra il grafico ottenuto dal presente studio e quello di Leopold e Wolman,1990. La lunghezza del menadro è approssimabile alla lunghezza cartesiana

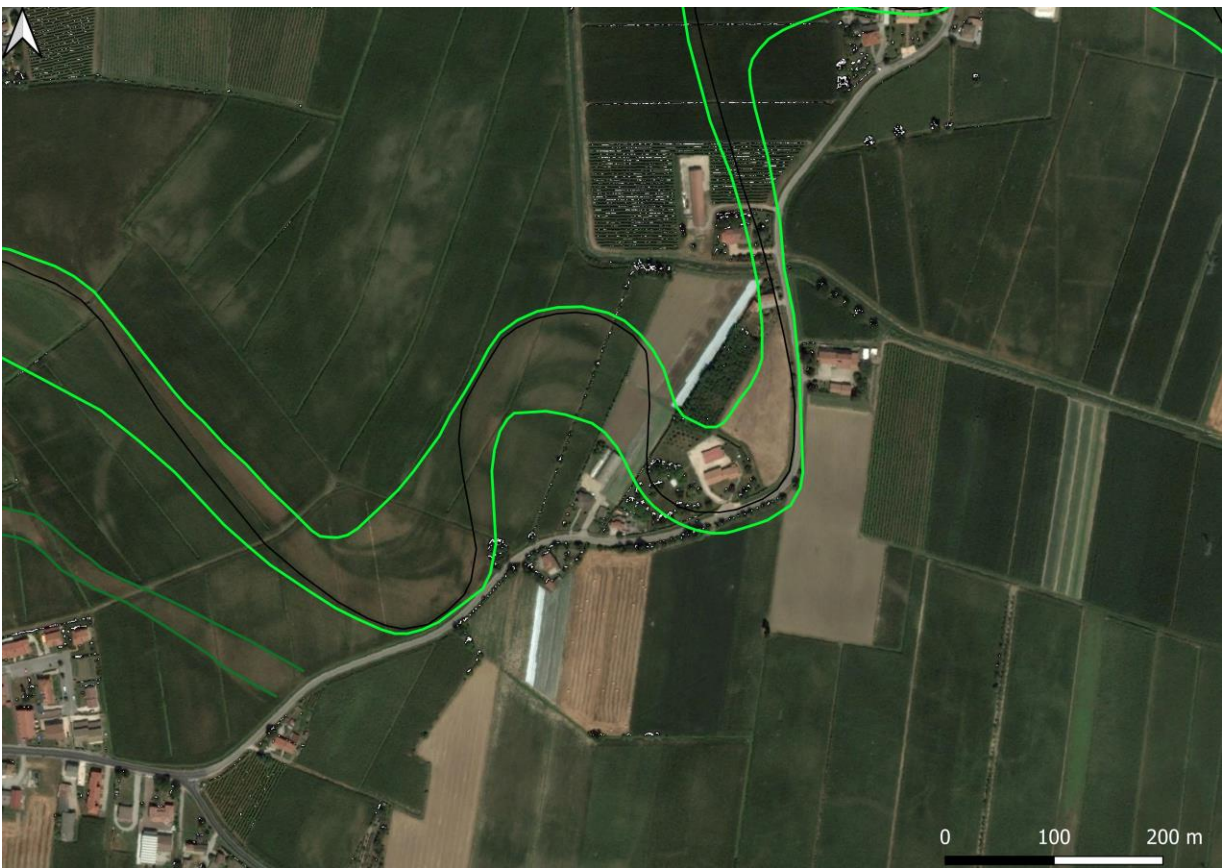


Fig. 20 Esempio di channel belt sinuosa

6. CONCLUSIONI:

L'attuale Pianura Veneta, si è formata durante l'ultima trasgressione olocenica ed è stata ampiamente modellata dalla migrazione di canali fluviali meandriformi, tra cui il Po e l'Adige.

L'analisi morfometrica di tali paleocanali aiuta a capire le loro principali caratteristiche geometriche, e forniscono uno strumento utile a futuri studi di modellizzazione relativi ai depositi ad essi legati.

Il presente lavoro di tesi ha esaminato le caratteristiche morfologiche dell'area localizzata nella zona sud-occidentale della Pianura Veneto-Friulana.

Le osservazioni che risultano dalla carta geomorfologica compilata indicano la presenza di cinque *channel belt* principali (Terrassa Padovana, Conselve, Bagnoli, Saline-Cona e Pozzonovo) tutte appartenenti al sistema idrografico del fiume Adige fatta eccezione per la *channel belt* di Saline-Cona che invece risulta essere associata al sistema idrografico del fiume Po. In queste *channel belt* sono presenti due meccanismi di avulsione, per incisione e per progradazione descritti in precedenza. Inoltre sono stati identificati quattro canali di rotta che sono riusciti ad evolvere a tratti fluviali con meandri ben sviluppati (canale di rotta 1, 2, 3 e 4) e che fanno sempre parte del sistema idrografico dell'Adige. Sia i canali associati alle *channel belt* che quelli collegati con i canali di rotta del Fiume Adige sono stati analizzati dal punto di vista morfometrico.

L'analisi morfometrica condotta sui palo-canali meandriformi riconosciuti nell'area studio ha prodotto una serie di dati relativi a diversi parametri (e.g. sinuosità, raggio di curvatura, ampiezza, indice di asimmetria, larghezza delle *channel belt* e dei canali, lunghezza cartesiana e lunghezza intrinseca). In particolare si è notato come i meandri associati alle diverse *channel belt* presentino scarse sinuosità e quindi anche ampiezze di meandro basse, probabilmente a causa della loro scarsa evoluzione planimetrica nel tempo. Tra le *channel belt* principali con canali a sinuosità più elevata c'è quella di Terrassa Padovana a cui sono associati i principali ventagli di rotta presenti nella zona. Lo studio effettuato evidenzia l'elevata variabilità dei parametri morfometrici misurati che è rappresentativa della varietà di forme dei meandri, probabilmente dovuta alla diversa evoluzione e collocazione dei canali fluviali studiati.

BIBLIOGRAFIA:

Amorosi A., Centineo M. C., Colalongo M.L., Fiorini F. (2005): Millennial-scale depositional cycles from the Holocene of the Po Plain, Italy

Amorosi A., Fontana A., Antonioli F., Primon S., Bondesan A. (2008): Post-LGM sedimentation and Holocene shoreline evolution in the NW Adriatic coastal area

Bassan V., Favero V., Vianello G., Vitturi A., 1994 Studio geoambientale e geopedologico del territorio provinciale di Venezia.

Blum M, Martin J., Milliken K., Garvin M., 2013 Paleovalley systems: Insights from Quaternary analogs and experiments. *Earth-Science Reviews* 116 (2013) 128-169.

Bondesan, A. and Meneghel, M. (2004) Geomorfologia della provincia di Venezia. Note illustrative della carta geomorfologica della provincia di Venezia. 513 pp.

Bondesan A. (1989) Geomorphological hazards in the po delta and adjacent areas. *Suppl. Geografia fisica e dinamica quaternaria* vol 4, pg 33-44

Castiglioni G. B. (1978): Il ramo più settentrionale del Po nell'antichità. *Atti e memorie Accademia Patavina SS.LL.AA.* 90, 157-164.

Correggiari A., Roveri M., Trincardi F. 1996 Erosione trasgressiva tardo quaternaria e deposizione in una piattaforma epicontinentale moderna: il bacino semichiuso dell'Adriatico

Cucato M., De Vecchi Gp., Mozzi P., Abbà T., Paiero G., Sedea R., 2011 Note Illustrative della carta geologica d'Italia. Foglio 147, Padova Sud

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: A assessment of vulnerability.

Favero V., Serandrei Barbero S., 1980 Origine ed evoluzione della laguna di Venezia–bacino meridionale

Fitonello A., D'Alpaos A., Ghinassi M. 2020, Remotely-sensed planform morphologies reveal fluvial and tidal nature of meandering channels.

Fontana A., Mozzi P., Bondesan A. 2008: Late Pleistocene evolution of the Venetian-Friulian Plain

Fontana, A., Mozzi, P. e Bondesan A., 2010 Late Pleistocene evolution of the Venetian–Friulian Plain

Fontana, A., Mozzi, P. and Bondesan, A. 2004 L'evoluzione geomorfologica della pianura veneto-friulana. In: *Geomorfologia della Provincia di Venezia* (Ed. A. Bondesan and M. Meneghel), Padova: Esedra Editrice, 113–138.

Fontana, A., Mozzi, P. and Marchetti, M. 2013 Alluvial fans and megafans along the southern side of the Alps

Gibling M. R. 2006 Width and thickness of fluvial channel bodies and valleys fills in the geological record: a literature compilation and classification

Kent D. V., Rio D., Massari F., Kukla G., Lanci L., 2002 Emergence of Venice during the Pleistocene

Luna B. Leopold and M. Gordon Wolman, 1990 River meanders

Massari F., Rio D., Serandre Barbero R., Asioli A., Capraro L., Fornaciari E., Vergerio P.P. 2004, The environment of Venice area in the past two million years

Mozzi P. 2005 Formazione della pianura alluvionale durante il tardo quaternario tra il margine alpino meridionale e la laguna di Venezia (Nord Italia)

Mozzi P., Bini C., Zilocchi L., Becattini R., Lippi M.M. 2003: Stratigraphy, palaeopedology and palynology of late Pleistocene and Holocene deposits in the landward sector of the Lagoon of Venice (Italy), in relation to the Caranto level

Mozzi P., Piovan S., Corrà E., 2020 Long-term drivers impacts of abrupt river changes in managed lowlands of the Adige River and northern Po delta (Northern Italy)

Ninno 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

Piovan S., Mozzi P., Stefani C., 2010 Bronze Age Paleohydrography of the Southern Venetian Plain

Piovan S., Mozzi P., Zecchin M., 2012 The interplay between adjacent Adige and Po alluvial systems and deltas in the late Holocene (Northern Italy)

Simeoni U., E Corbau C., 2009 A review of the Delta Po evolution (Italy) related to climatic changes and human impacts

Rudy Slingerland and Norman D. Smith, 2004 River avulsions and their deposits

Koen A. van Toorenburg, Marinus E. Donselaar¹ and Gert Jan Weltje, 2018 The life cycle of crevasse splays as a key mechanism in the aggradation of alluvial ridges and river **avulsion**

Tosi L., 1994 L'evoluzione paleoambientale tardo-quaternaria del litorale veneziano nelle attuali conoscenze