



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Geoscienze

Direttore Prof. Fabrizio Nestola

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

IN GEOLOGIA E GEOLOGIA TECNICA

**IL RECORD SEDIMENTARIO DI UN EVENTO
ESTREMO DI PIENA IN AMBIENTE DI BARRA DI
MEANDRO FLUVIALE: UN ESEMPIO DAL POWDER
RIVER (MONTANA, US)**

Relatore: Prof. Massimiliano Ghinassi

Correlatore: Dott. John A. Moody

Laureando: Matteo Guelfi

ANNO ACCADEMICO 2018/2019

INDICE

| | |
|--|----|
| ABSTRACT | 5 |
| RIASSUNTO | 7 |
| 1. INTRODUZIONE | 9 |
| 2. MORFODINAMICA E STRUTTURA DELLE POINT BARS | 12 |
| 2.1 <i>Classificazione geomorfologica dei canali e delle barre fluviali</i> | 12 |
| 2.2 <i>Struttura delle point bars</i> | 17 |
| 2.3 <i>Ontogenesi e caratteristiche delle point bars</i> | 18 |
| 2.4 <i>Forme di fondo e strutture sedimentarie associate alle point bars</i> | 20 |
| 3. SETTING GEOMORFOLOGICO | 23 |
| 3.1 <i>Inquadramento geologico del Powder River Basin</i> | 23 |
| 3.2 <i>Il Powder River</i> | 24 |
| 3.3 <i>Tipologie di eventi di piena</i> | 26 |
| 4. L'EVENTO ALLUVIONALE DEL MAGGIO 1978 | 28 |
| 4.1 <i>Cause della piena</i> | 28 |
| 4.2 <i>Risultati dell'evento alluvionale</i> | 30 |
| 5. METODI | 33 |
| 5.1 <i>Campionamento e attività in campagna</i> | 33 |
| 5.2 <i>Analisi granulometriche</i> | 36 |
| 6. POINT BAR PR163 | 39 |
| 6.1 <i>Unità Sedimentaria 1</i> | 41 |
| 6.2 <i>Unità Sedimentaria 2</i> | 43 |
| 6.3 <i>Transizione tra Unità 2 e Unità 4</i> | 44 |
| 6.4 <i>Unità Sedimentaria 4</i> | 46 |
| 6.5 <i>Unità Sedimentaria 5</i> | 48 |
| 7. CALCOLI E RISULTATI | 50 |
| 7.1 <i>Shear stress critico (τ^*) e diagramma di Shield</i> | 50 |
| 7.2 <i>Profondità di flusso critica</i> | 53 |
| 8. INTERPRETAZIONE DEPOSITI E DISCUSSIONE | 56 |
| 8.1 <i>Fase 1 – Unità Sedimentaria 1</i> | 56 |

| | |
|--|----|
| 8.2 Fase 2 – Unità Sedimentaria 2 | 58 |
| 8.3 Fase 3 – Transizione tra Unità 2 e Unità 4 | 59 |
| 8.4 Fase 4 – Unità Sedimentaria 4 | 59 |
| 8.5 Fase 5 – Unità Sedimentaria 5 | 60 |
| 8.6 Discussione | 61 |
| CONCLUSIONI | 63 |
| BIBLIOGRAFIA | 64 |

ABSTRACT

The effects of the discharge variability on point bar sedimentation are not well documented, although resulting changes in flow pattern are well known. The present work analyses a point bar of the Powder River (Montana, US) to reconstruct hydrology and development of an extreme flood event that affected the area of Powder River County in May 1978. A trench was excavated across the point bar to analyse the internal sedimentary features of deposits accumulated during the 1978 flood event. The section was analysed following a classical sedimentological approach. After detecting the main stratal pattern and sedimentary structures, 120 samples for grain size analyses were taken along the entire point bar. Grain size analysis allowed to calculate the bottom shear stress and the critical water depth when those sediments settled down. By comparing the estimated flood hydrograph of 1978 with the hydrographs at Moorhead and Broadus highly similar results were found. Merging together the grain size data and field observations was possible to reconstruct five flood stages and main changes in flow orientation. These changes caused development of particular features including downstream migration and coarsening upward grain size trend. We conclude that the available sedimentological models can still fail to describe the wide spectrum of deposits formed during extreme flood events.

RIASSUNTO

Gli effetti delle variazioni di portata sulla deposizione di una point bar non sono ancora molto chiari, sebbene siano ben note e studiate le modifiche che avvengono nel comportamento del flusso d'acqua. Il lavoro svolto in questa tesi si focalizza sull'analisi e lo studio di una point bar del Powder River (Montana, USA) al fine di ricostruire l'idrografia e lo sviluppo dell'evento di piena estremo che ha interessato il territorio della Contea di Powder River nel Maggio del 1978. Per questo lavoro è stato studiato un deposito di meandro situato tra le località di Moorhead e Broadus. Per analizzare la point bar è stata scavata una trincea lunga 75 metri. La trincea è stata orientata Nord-Ovest/Sud-Est lungo l'asse del meandro in modo da ottenere una sezione trasversale dei depositi della point bar. La sezione è stata analizzata seguendo un classico approccio sedimentologico. Prima sono state osservate le geometrie e le strutture sedimentarie del deposito e, successivamente, è stato eseguito un campionamento lungo tutta la sezione. Grazie alle analisi granulometriche è stato possibile ricavare parametri come il bottom shear stress e la profondità di flusso nel momento in cui si deponavano i sedimenti campionati. È stata quindi ricostruita l'idrografia dell'evento di piena del 1978 e, comparandola con gli idrogrammi misurati a Moorhead e Broadus, si è potuto constatare una notevole analogia. Integrando i risultati ottenuti dalle analisi granulometriche con le osservazioni effettuate in campagna è stato possibile ricostruire cinque diverse fasi dell'evento del 1978 constatando che, durante la fase della piena a maggiore energia, il flusso ha tagliato trasversalmente il meandro facendo assumere alla point bar caratteristiche peculiari di una side bar come la migrazione sottocorrente e la formazione di trend di coarsening upward nel deposito. Si è quindi giunti alle conclusioni che gli attuali modelli sedimentologici non sono validi per descrivere tutto il possibile spettro di depositi che si formano durante un evento di piena estrema.

INTRODUZIONE

Numerosi sono gli studi condotti in passato riguardo gli effetti degli eventi di piena su di un alveo, sia dal punto di vista morfologico che idrologico. Si è studiata l'origine, l'idrologia e i processi che portano a un evento di piena e come questo possa provocare importanti cambiamenti morfologici su un canale come l'approfondimento e l'allargamento dell'alveo (*Baker, 2008*). Altri studi sono stati condotti sulla deposizione di sedimenti a granulometria fine sulle porzioni di piana alluvionale prossime al corso d'acqua (*Cohen and Nanson, 2008*). Delle molteplici tipologie di canali (vedi Cap.2) risultano particolarmente studiati quelli meandriformi a causa delle complesse dinamiche che si creano quando il flusso d'acqua che scorre lungo un alveo rettilineo si imbatte in un meandro. Si tende infatti a formare un movimento elicoidale che, generando un flusso secondario, tende ad erodere la sponda esterna favorendo la deposizione di sedimenti lungo quella interna. Numerosi sono a tal proposito gli studi riguardo sedimentazione e erosione causata da un evento di piena estremo in un canale meandriforme (*Hagstrom et al., 2018*) piuttosto che riguardo la migrazione sottocorrente dei meandri e dei depositi associati (*Ghinassi et al., 2016*).

Quello che però, nonostante i lavori condotti riguardo la morfodinamica e l'evoluzione di un canale meandriforme, non si è ancora studiato e approfondito a sufficienza sono le relazioni tra un evento di piena eccezionale e i depositi di meandro, con le relative strutture sedimentarie, ad esso associati.

Lo scopo principale di questo lavoro è quindi quello di indagare le caratteristiche e le strutture di un deposito di barra di meandro formatosi in seguito a un evento di piena di eccezionale portata.

A questo scopo il Powder River è risultato particolarmente adatto per i seguenti motivi:

- È un corso d'acqua a carattere meandriforme che scorre attraverso un'area caratterizzata da un clima semi-arido che garantisce quindi lunghi periodi di siccità intervallati a forti eventi alluvionali.
- Non è interessato da opere ingegneristiche ed interventi antropici ad eccezione del prelievo di acqua per l'irrigazione dei campi limitrofi. (*Gay et al., 1998*). Rappresenta quindi un perfetto laboratorio naturale per l'osservazione della morfodinamica di un fiume a carattere meandriforme e delle relative point bars (*Moody and Meade, 2014*).

Nel Maggio del 1978 il territorio della Contea del Powder River venne interessato da un periodo di piogge di eccezionale intensità e durata che causarono un evento di piena estremo. Fortunatamente non ci furono vittime poiché, le case e gli edifici degli abitanti locali, memori della precedente devastante alluvione avvenuta nel 1923, erano state ricostruite lontane dall'alveo e non subirono eccessivi danni (*Meade and Moody, 2013*).

I ricercatori del US Geological Survey avevano già condotto una campagna di ricerca per osservare e studiare l'evoluzione del Powder River e dei suoi depositi nel 1976 e nel 1977. Dalla piena del 1978 poterono così ricavare numerose informazioni e proseguire le campagne di ricerca negli anni successivi che si concentrarono in un'unica porzione del Powder River lunga circa 100 km e compresa tra le località di Moorhead, a monte, e Broadus a valle (*Moody et al., 1990*). Per studiare le variazioni morfodinamiche del Powder River e dei depositi associati furono create 19 sezioni spaziate l'una dall'altra circa 5 km e taglienti trasversalmente il canale. Alcune furono posizionate in corrispondenza di un meandro mentre altre lungo tratti rettilinei del canale. Ciascuna sezione fu quindi identificata con il prefisso PR (Powder River) e il numero di km lungo alveo dal punto in cui il Crazy Woman Creek, uno dei principali affluenti del Powder River, si immette nel canale (*Moody and Meade, 2008*).

Le campagne di ricerca condotte con cadenza quasi annuale portarono alla pubblicazione di importanti lavori sul cutoff di alcuni meandri (*Gay et Al., 1998*), la deposizione di sedimenti su terrazzi fluviali (*Moody and Meade, 2008*), la ricostruzione di piane alluvionali negli anni seguenti alla piena (*Pizzuto, 1994*) e valutazioni cartografiche dei cambiamenti morfologici del Powder River durante i 40 anni precedenti la piena (*Martinson, 1984*). Non sono stati però condotti lavori con adeguato approfondimento sulla formazione e sullo sviluppo dei depositi di meandro durante l'evento del 1978.

L'enorme mole di dati raccolti dai ricercatori del US Geological Survey durante le numerose campagne di ricerca, sia prima che dopo la piena del 1978, si sono rivelati essenziali per condurre l'attività di ricerca illustrata in questo lavoro.

2. MORFODINAMICA E STRUTTURA DELLE POINT BARS

Da milioni di anni i corsi d'acqua di tutto il Mondo modellano il paesaggio erodendo e trasportando una grande quantità di sedimenti. Quando la velocità del flusso d'acqua diminuisce, i sedimenti in sospensione tendono a depositarsi sul fondo del canale a velocità differenti in base alla loro taglia granulometrica. I depositi fluviali, tendenzialmente, si formano in seguito a ripetuti eventi di piena nei quali si alternano fasi deposizionali a fasi erosive e prendono il nome di barre fluviali. Ogni singola piena forma una unit bar; più unit bars costituiscono una barra fluviale che, per questo motivo, prende il nome di compound bar (*Fig. 2.1A*). È bene sottolineare che una barra non sempre entra nel record sedimentario ma spesso viene erosa e rimossa, parzialmente o totalmente, dalla piena successiva. Il rapporto tra sedimentazione e erosione determina infatti la forma e lo sviluppo del deposito. La probabilità di preservazione di una barra dipende da numerosi fattori tra cui l'intensità dell'evento erosivo, la granulometria dei sedimenti, la posizione e l'altezza del deposito (*Moody and Meade, 2014*).

2.1 Classificazione geomorfologica dei canali e delle barre fluviali

Esistono numerose classificazioni di corsi d'acqua prevalentemente basate su caratteristiche idrologiche e geomorfologiche (*Schumm, 1981. Church, 2006. Surian et al., 2009*). Quando si studiano i depositi fluviali è di fondamentale importanza caratterizzare la tipologia di alveo poiché ogni tipo di canale forma delle specifiche tipologie di barra fluviale (*Fig. 2.1B*) La maggior parte delle classificazioni sono concordi nel distinguere canali singoli e canali multipli.

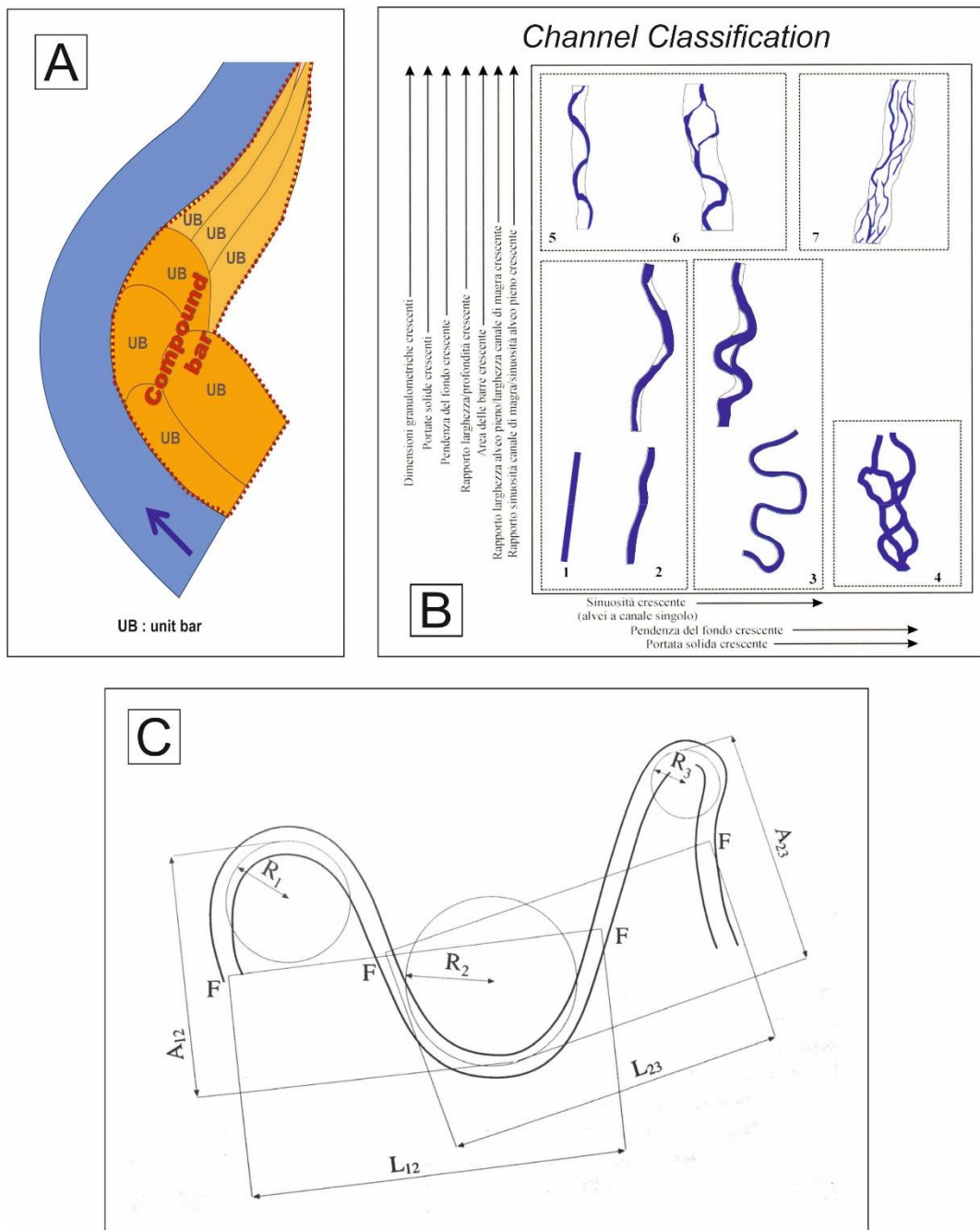


Fig. 2.1 A) *Illustrazione schematica di una point bar composta da più unit bars (modificata da Ghinassi).* B) *Classificazione canali (modificata da Rinaldi, 2003).* C) *Illustrazione parametri descrittivi di un meandro (modificato da Marchetti, 2000).*

I sistemi di canali multipli sono caratterizzati da diversi canali separati tra loro da aree temporaneamente emerse. I canali multipli si dividono ulteriormente in canali *braided* o *wandering* e canali anastomizzati (Bridge, 2003). I sistemi *braided* presentano le aree emerse non stabilizzate dalla vegetazione e un percorso dell'alveo generalmente più semplice. I sistemi anastomizzati, invece, sono caratterizzati da aree emerse vegetate più stabili e un percorso dell'alveo tendenzialmente più complesso.

I canali singoli, in base al grado di sinuosità, possono essere caratterizzati e distinti in alvei rettilinei, sinuosi e meandriiformi. Si parla di alveo rettilineo quando l'indice di sinuosità I_s (distanza lungo valle/distanza lungo fiume) $1 < I_s < 1.05$, alveo sinuoso quando $1.05 < I_s < 1.5$ e alveo meandriiforme quando $I_s > 1.5$ (Surian et al., 2011). Maggiore è lo sviluppo del corso d'acqua rispetto alla distanza in linea d'aria tra sorgente e foce e maggiore risulta quindi l'indice di sinuosità. I canali rettilinei e sinuosi si formano più facilmente con gradienti topografici elevati mentre i canali meandriiformi si generano più frequentemente con gradienti ridotti. Le valli debolmente inclinate e le pianure alluvionali rappresentano gli ambienti più comuni per lo sviluppo di un fiume meandriiforme. Un meandro fluviale viene solitamente descritto in base ad alcuni parametri caratteristici come la lunghezza d'onda del meandro (L), l'ampiezza del meandro (A), il raggio di curvatura del meandro (R) e la larghezza del canale (W) (Fig. 2.1C) (Marchetti, 2000). Un meandro fluviale è caratterizzato da una sponda esterna e una interna. La zona presente oltre la sponda esterna viene chiamata *outer bank* mentre la zona presente oltre la sponda interna viene chiamata *inner bank* (Fig. 2.2A). Generalmente, in qualsiasi tipo di canale, la zona più profonda dell'alveo prende il nome di *thalweg*. Il *thalweg* in corrispondenza di un meandro costituisce la *pool*. Un tratto dell'alveo rettilineo tra due *pool* viene invece definito *riffle* (Fig. 2.2B) (Allen, 1982).

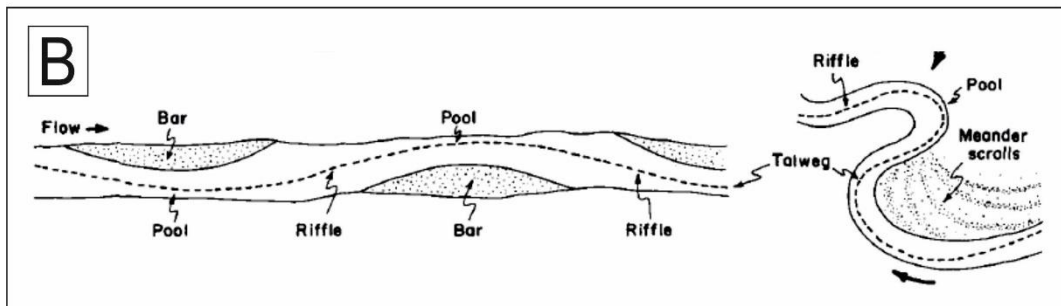
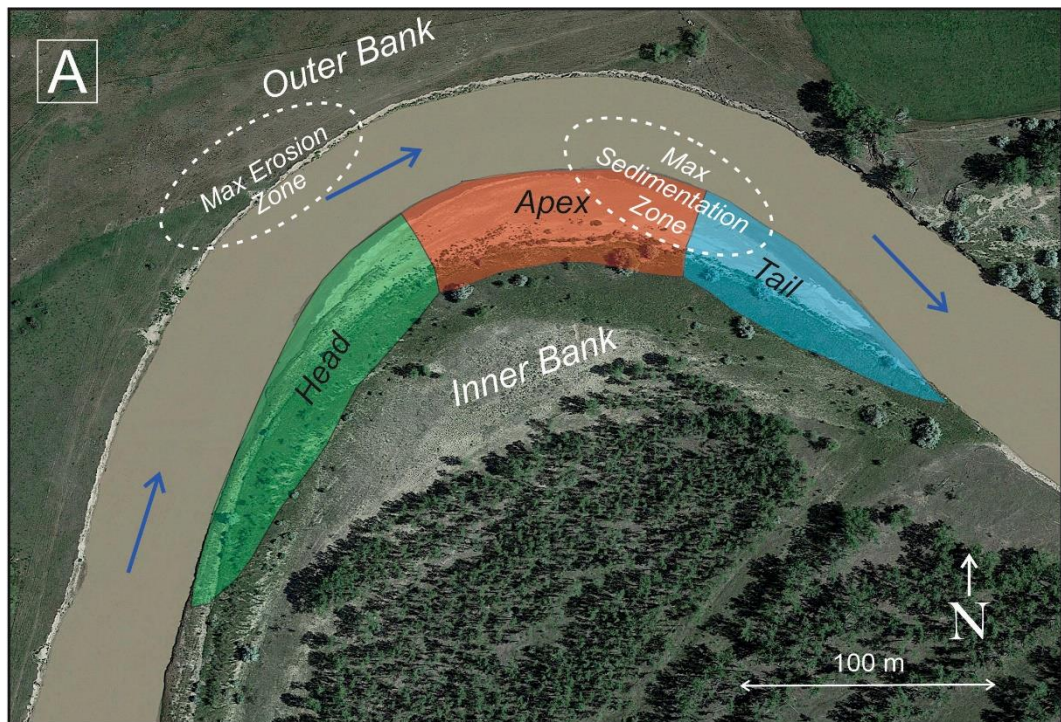


Fig. 2.2 A) Schematizzazione di un meandro e point bar associata. B) Illustrazione schematizzata di un canale meandriforme (modificato da Allen, 1982).

Come già introdotto, studiare il tipo di alveo è fondamentale per capire le tipologie di barra associate. Se il sistema fluviale è multiplo si formano in prevalenza *braid bars*, barre che si depositano in mezzo al canale. Le *braid bars*, a seconda della morfologia e posizione rispetto all'alveo, possono essere longitudinali, trasversali, diagonali o a diamante. Se il canale invece è singolo si formano più facilmente *side bars* e *point bars* (Fig. 2.3A). Le barre fluviali che si formano lungo le sponde di un canale rettilineo prendono il nome di *side bars*.

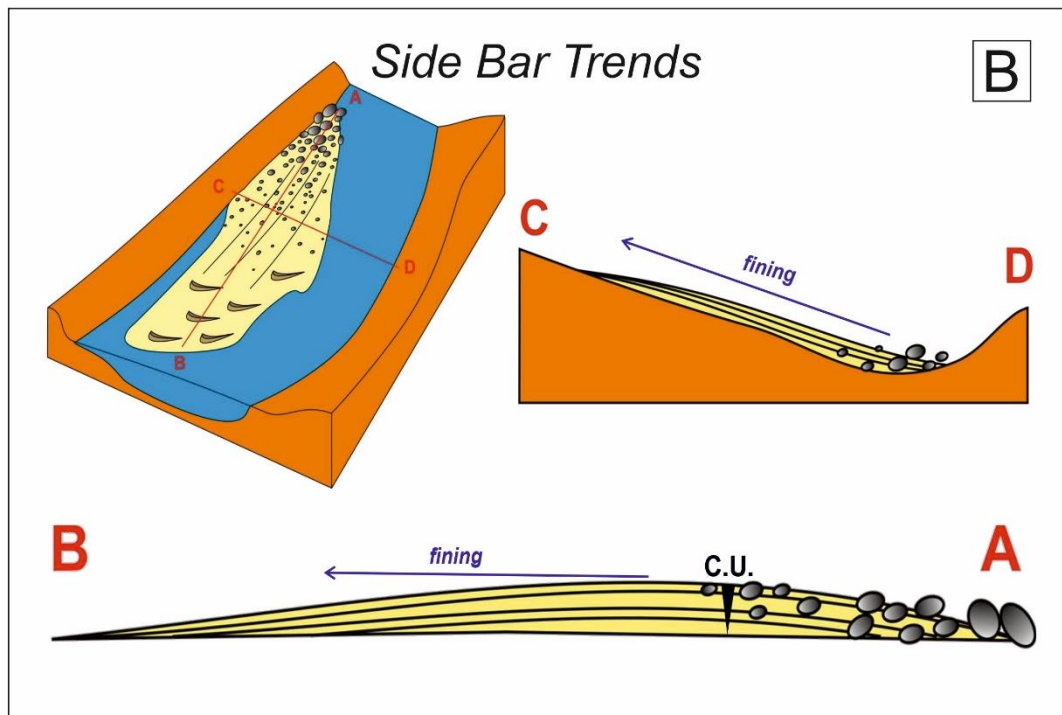
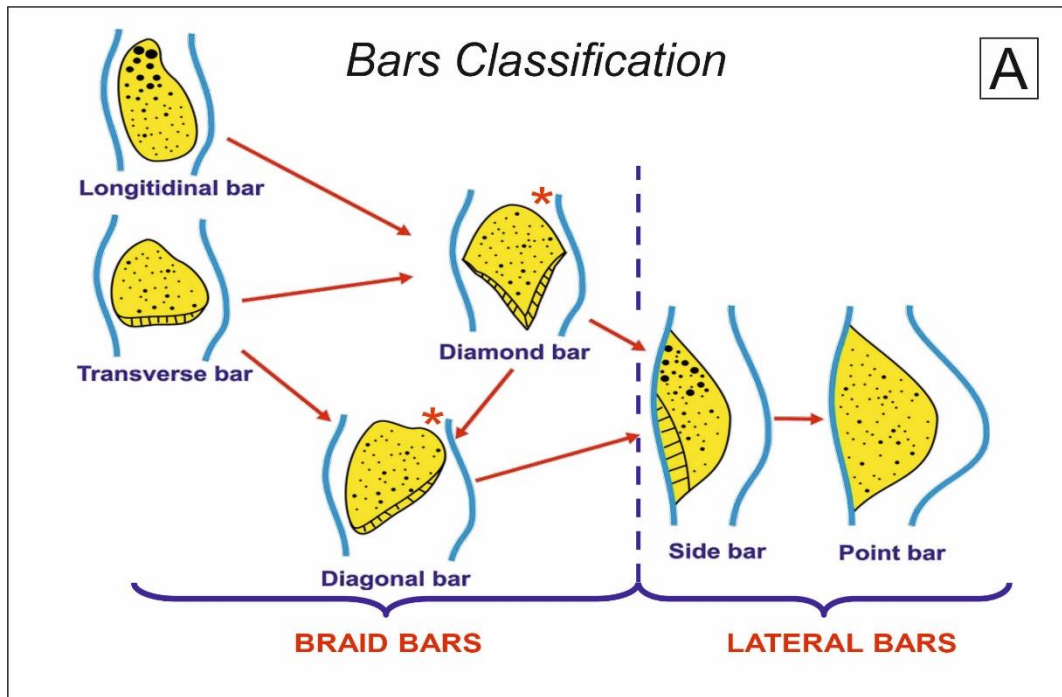


Fig. 2.3 A) *Classificazione barre fluviali (modificata da Ghinassi).* B) *Illustrazione schematica dei trend granulometrici che si sviluppano in una side bar (modificato da Ghinassi).*

Le side bars, essendo fortemente modellate dall'erosione del flusso d'acqua, sono caratterizzate da forma allungata e trend granulometrico fining dalla zona sopracorrente, chiamata testa, a quella sottocorrente, che prende il nome di coda. Le particelle più fini, come silt e sabbia, vengono infatti trasportate dalla corrente dalla testa verso la coda della barra concentrando nella testa i sedimenti più grossolani come ghiaia e ciottoli; tale fenomeno prende il nome di armorning della barra. Nei depositi di side bars si può riconoscere il tipico trend coarsening upward causato dalla migrazione sottocorrente della barra. La direzione di crescita di una side bars è infatti parallela alla direzione del flusso principale (*Fig 2.3B*). I depositi sedimentari che si formano all'interno di un meandro fluviale invece vengono definiti *point bars*.

2.2 Struttura delle point bars

Le point bars, per loro natura, solitamente si formano nei corsi d'acqua a carattere meandriforme, canali caratterizzati dall'indice di sinuosità (distanza lungo valle/distanza lungo fiume) superiore a 1.5. Una point bar generalmente è caratterizzata da una granulometria piuttosto eterogenea variabile in funzione della parte del deposito considerata. Una point bar può essere infatti suddivisa in tre parti secondo *Hagstrom et al., 2018: (fig. 2.2A)*

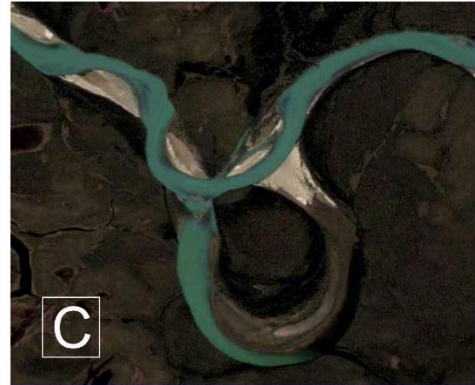
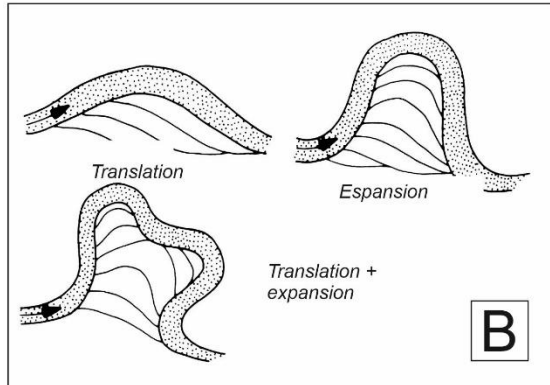
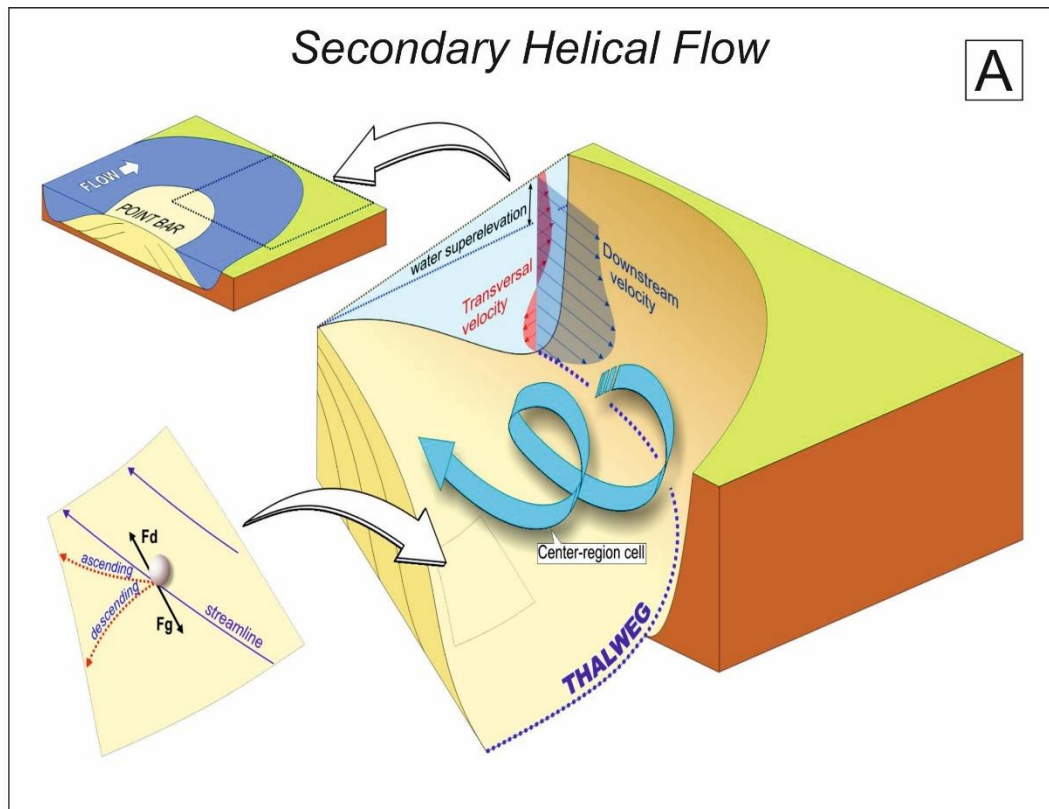
- *Testa*: la testa rappresenta la parte sopracorrente del deposito ed è caratterizzata da sedimenti più grossolani. La testa è caratterizzata dalla maggiore energia di flusso e, conseguentemente, è la zona dove il tasso erosivo è più elevato.
- *Apice*: l'apice della barra è situato nel punto di massima curvatura del meandro. Questa parte della barra è caratterizzata da elevati tassi di sedimentazione e da depositi generalmente di spessore elevato.
- *Coda*. La coda rappresenta la parte sottocorrente del deposito ed è caratterizzata da bassa energia di flusso e conseguenti depositi formati da sedimenti a granulometria minore.

Generalmente la massima zona di sedimentazione si trova subito dopo l'apice della barra, in posizione quindi sottocorrente. La zona di massima erosione, invece, si colloca sulla testa della barra e nella zona di outer bank, quindi nella parte esterna del meandro.

2.3 Ontogenesi e caratteristiche delle point bars

Quando in un canale meandriforme il flusso incontra un meandro, impattando contro la sponda esterna, tende a impilare l'acqua a ridosso della zona di outer bank. Questo rigonfiamento nel flusso, per effetto della forza di gravità, induce un gradiente di pressione che provoca lo spostamento dell'acqua dalla sponda esterna verso quella interna innescando un flusso secondario caratterizzato da una geometria elicoidale (*Fig 2.4A*). Il flusso elicoidale secondario è tanto più intenso quanto maggiore è la curvatura del meandro. Il movimento elicoidale provoca un aumento del bottom shear stress e del tasso erosivo sulla sponda esterna. I sedimenti erosi vengono trasportati verso la sponda interna accrescendo così la point bar a ridosso dell'inner bank.

Lo sviluppo del movimento elicoidale tende a creare un flusso che, risalendo la barra, genera nel deposito un trend granulometrico di fining dal thalweg verso la parte più alta della barra. Ciottoli e ghiaia vengono infatti depositati nella parte più bassa del deposito mentre sabbia, silt e argilla vengono trasportati fino alla sommità della point bar. Il flusso secondario risalente la barra forma inoltre una stratificazione immergente verso il centro del canale e caratterizzata da un'inclinazione moderata, generalmente tra 5° e 20°. Quando la point bar si accresce tende ad espandersi verso il thalweg del canale dove sono presenti i clasti a granulometria maggiore. Infatti, osservando un deposito di point bar in sezione, è facilmente riconoscibile il classico trend di fining upward caratterizzato dai ciottoli e ghiaia verso la base mentre sabbia e silt verso la parte sommitale della barra. Il trend di fining dal thalweg alla sommità della barra e il trend di fining upward rappresentano quindi le due principali caratteristiche distintive di un deposito di point bar (*Ghinassi et al., 2019*).



2.4 A) *Illustrazione schematica del movimento elicoidale del flusso secondario che si sviluppa in un meandro fluviale (modificato da Ghinassi). B) Illustrazione schematica delle diverse tipologie di propagazione di un meandro (modificato da Bridge, 2003). C) Vista da satellite di un esempio di taglio di meandro (modificato da Ghinassi).*

Anche se generalmente le point bars tendono ad accrescersi espandendosi lateralmente, in alcuni casi possono avere una certa componente traslazionale concorde con la direzione del flusso principale (*Fig. 2.4 B*). Non è raro infatti trovare fenomeni di armoring anche in alcune point bars caratterizzate dalla testa ricca di ciottoli e ghiaia e la coda più ricca di sabbia e silt. Quando nel meandro la componente traslazionale è prevalente rispetto a quella espansionale, analogamente alle side bars, si può formare un trend granulometrico coarsening upward (*Ghinassi et. al, 2016*).

Il comportamento del flusso in un meandro può comunque variare in funzione di diversi fattori come il grado di curvatura del meandro e la portata del canale. Per portate molto elevate infatti, il flusso, invece che seguire il percorso del meandro nella zona più profonda del canale, tende a tagliare trasversalmente la barra, erodendola e asportandola parzialmente (*Ghinassi et al., 2019*). Durante gli eventi alluvionali più intensi il flusso può arrivare a tagliare l'intero meandro, soprattutto per i meandri caratterizzati da sinuosità particolarmente elevata (*Gay et al., 1998*). Tale fenomeno viene denominato taglio di meandro (*Fig. 2.4C*). È importante sottolineare che i meandri più sviluppati, a causa dell'eccessiva espansione, possono essere tagliati anche durante eventi di ordinaria portata dalla formazione di un nuovo meandro nella zona più interna.

2.4 Forme di fondo e strutture sedimentarie associate alle point bars

Un deposito di point bar, a causa delle caratteristiche del flusso fluviale, è generalmente formato da forme di fondo e strutture sedimentarie tipiche dei moti trattivi unidirezionali. Tra le forme di fondo che si sviluppano in una point bars sono presenti principalmente ripples e dune che, propagandosi in direzione parallela al flusso secondario elicoidale, tendono a migrare risalendo la barra. Ripples e dune sono forme di fondo simili, caratterizzate entrambe da una zona di erosione, chiamata *stoss side*, e una zona di accumulo, definita *lee side*. Entrambe le forme possono avere geometrie semplici 2D o più complesse 3D. La differenza principale però è che i ripples si formano principalmente con sedimenti fini (silt e

2D vs 3D ripples and dunes

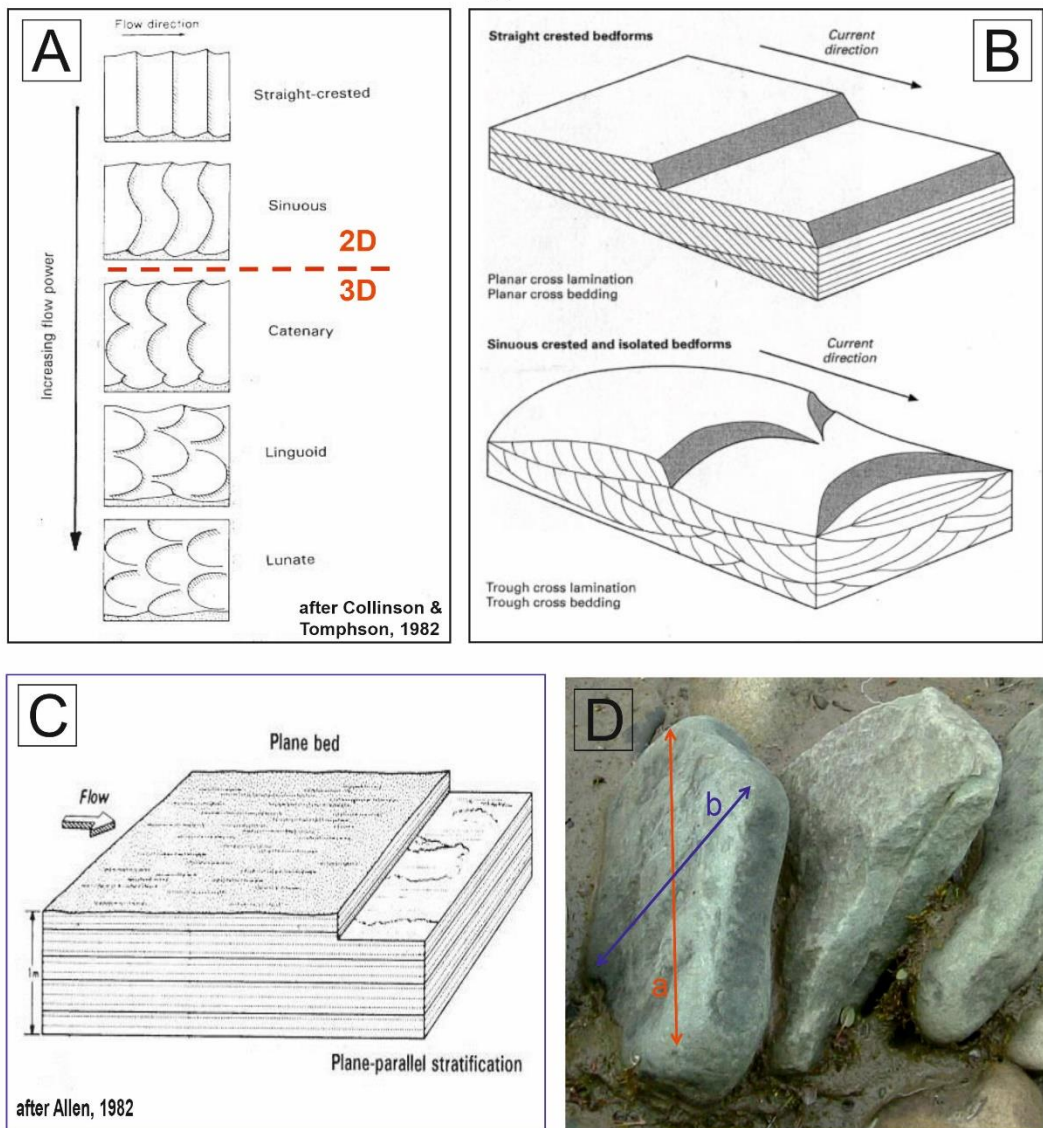


Fig. 2.5 A) Illustrazione delle diverse forme che caratterizzano le creste di ripples e dune in base al tipo di geometria 2D o 3D. B) Illustrazione delle diverse strutture sedimentarie che ripples e dune possono creare in sezione in base al tipo di geometria 2D o 3D. C) Illustrazione di strutture piano parallele. D) Foto di clasti embricati orientati con l'asse lungo perpendicolare al flusso. Si tratta di un'embricatura trattiva.

sabbia) e flussi moderati mentre le dune si sviluppano più facilmente in presenza di sedimenti grossolani (ghiaia e ciottoli) e flussi più intensi. Inoltre, mentre l'altezza dei ripples è indipendente dalle condizioni ambientali in cui si formano, le dune tendono a scalare con la profondità. Una duna, infatti, è alta generalmente la metà della profondità del flusso in cui si è formata. È quindi possibile ricavare la profondità di flusso studiando l'altezza delle dune prestando comunque attenzione a un'eventuale erosione che porterebbe a una sottostima del flusso.

Ripples e dune tendono a creare strutture differenti a seconda della loro geometria 2D, caratterizzata da creste lisce o sinuose, o 3D, formata da creste curve (Fig. 2.5A) (*Collinson and Tomphoson, 1981*). Quando si formano flussi regolari e costanti nel tempo si sviluppano forme di fondo con geometrie bidimensionali che, nei depositi in sezione, formano le classiche laminazioni e stratificazioni planari incrociate. Quando invece il flusso tende a essere irregolare si sviluppano forme di fondo con geometrie tridimensionali e, nei depositi in sezione, si osservano laminazioni e stratificazioni incrociate concave (Fig. 2.5B).

Nei depositi di point bars, oltre a ripples e dune, si possono formare anche altre strutture e forme di fondo come le stratificazioni piano-parallele e le antidune. Le stratificazioni piano parallele si sviluppano tipicamente con velocità di flusso moderate e sedimenti grossolani (*Fig. 2.5C*). Le antidune si sviluppano invece con velocità di flusso estremamente elevata. Per questo motivo la loro preservazione nel record sedimentario è molto rara. Infatti, anche leggeri aumenti della velocità di flusso possono condurre alla loro erosione. Nei depositi di point bars sono facilmente osservabili anche le embricature a carattere trattivo. Le embricature, osservabili nei depositi ad elevata granulometria, rappresentano accumuli di clasti di grossa dimensione, generalmente ciottoli centimetrici, che, durante il trasporto, vengono bloccati da un ostacolo che può essere di varia natura. Se l'embricatura è formata da un flusso unidirezionale trattivo, come quello fluviale, i clasti tendono a disporsi con l'asse più lungo perpendicolare alla direzione di flusso (*Fig. 2.5D*).

3. SETTING GEOMORFOLOGICO

3.1 Inquadramento geologico del Powder River Basin

Il bacino del Powder River è classificato come *foreland basin*, o bacino di avampaese, ed è caratterizzato in prevalenza da rocce sedimentarie terrigene e depositi fluviali generati dall'erosione e dallo smantellamento delle Bighorn Mountains, catena formatasi per sollevamento tettonico in seguito all'orogenesi Laramidiana. L'orogenesi Laramidiana si è sviluppata tra 70 e 40 milioni di anni fa in seguito alla subduzione della crosta oceanica atlantica sotto la Placca Nord Americana. L'angolo di subduzione è stato ipotizzato piuttosto basso e questo ha permesso l'innalzamento di una catena montuosa, le Rocky Mountains appunto, in posizione molto arretrata, distante migliaia di chilometri dalla zona di subduzione. Associati ai rilievi montuosi si sono formati anche dei bacini strutturali pedemontani come il Powder River Basin. (*Meade and Moody, 2013*).

Il bacino attualmente è drenato principalmente dal Powder River, da cui prende il nome, e da altri corsi d'acqua minori tra cui Cheyenne River, il Tongue River, il Bighorn River e il Little Missouri River (*Fig.3.1.A*). Il Bacino del Powder River, durante l'Era Cenozoica, è stato dapprima interessato da regime di sedimentazione per poi passare gradualmente in regime erosivo. Tali processi erosivi, prevalentemente fluviali, sono ancora in corso. Le rocce che formano il Powder River Basin sono formate soprattutto da strati tabulari di arenarie intercalate da rocce a granulometria più fine come siltiti e argilliti. A livello regionale, le principali formazioni geologiche sono rappresentate dalla "Fort Union Formation" e dalla "Wasatch Formation" formate rispettivamente durante il Paleocene e dal Paleocene fino all'Eocene (*Meade and Moody, 2013*). L'area è inoltre caratterizzata dalla presenza di filoni carboniferi di origine cenozoica. Per decine di milioni di anni il bacino del Powder River è stato infatti caratterizzato

da ambienti subtropicali con accumulo di potenti strati di torba. Successivamente la torba è stata ricoperta e compressa da sedimenti fino a trasformarsi in carbone (Flores, 1985). L'area copre infatti il 40% del fabbisogno di carbone di tutti gli Stati Uniti.

Studiando la storia geologica più recente del Powder River Basin si osserva come la maggior parte dei sedimenti che sono stati erosi e depositati dal Powder River nell'ultimo milione di anni, derivano principalmente dall'erosione delle rocce paleoceniche appartenenti alle Fort Union Formation e, in modo minore, da arenarie e argilliti mesozoiche fornite dagli affluenti provenienti dalla zona del Wyoming Centrale (Hembree et al., 1952). Considerando una scala temporale annuale e centenaria, invece, la maggior parte dei sedimenti deriva dall'erosione e smantellamento di alcune serie di terrazzi fluviali, situati tra 2 e 20 metri sopra il livello attuale del letto del fiume, generati dal Powder River stesso nel corso degli ultimi 4 000 anni (Leopold and Miller, 1954). In particolare i due terrazzi più bassi, e quindi più recenti, sono stati maggiormente interessati da erosione e rideposizione durante l'evento di piena del maggio 1978 (Meade and Moody, 2013).

3.2 Il Powder River

Il Powder River nasce dalle Bighorn Mountains nello stato del Wyoming (USA) e scorre prevalentemente verso NORD entrando nel Montana (USA) fino a confluire nello Yellowstone River, principale affluente dell'Upper Missouri River, affluente a sua volta del Mississippi River (Fig. 3.1.D). Il Powder River ha una lunghezza complessiva di 604 km, una portata media di $13 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e trasporta circa $2\text{-}3 \cdot 10^6$ ton di sedimenti in sospensione all'anno. Il suo bacino di drenaggio si sviluppa su una superficie di circa 34.700 km^2 a una quota sul livello del mare che va dai 1500 ai 700 metri. Il Powder River è caratterizzato da un gradiente di inclinazione medio di circa 1 m/km. (Meade and Moody, 2013).

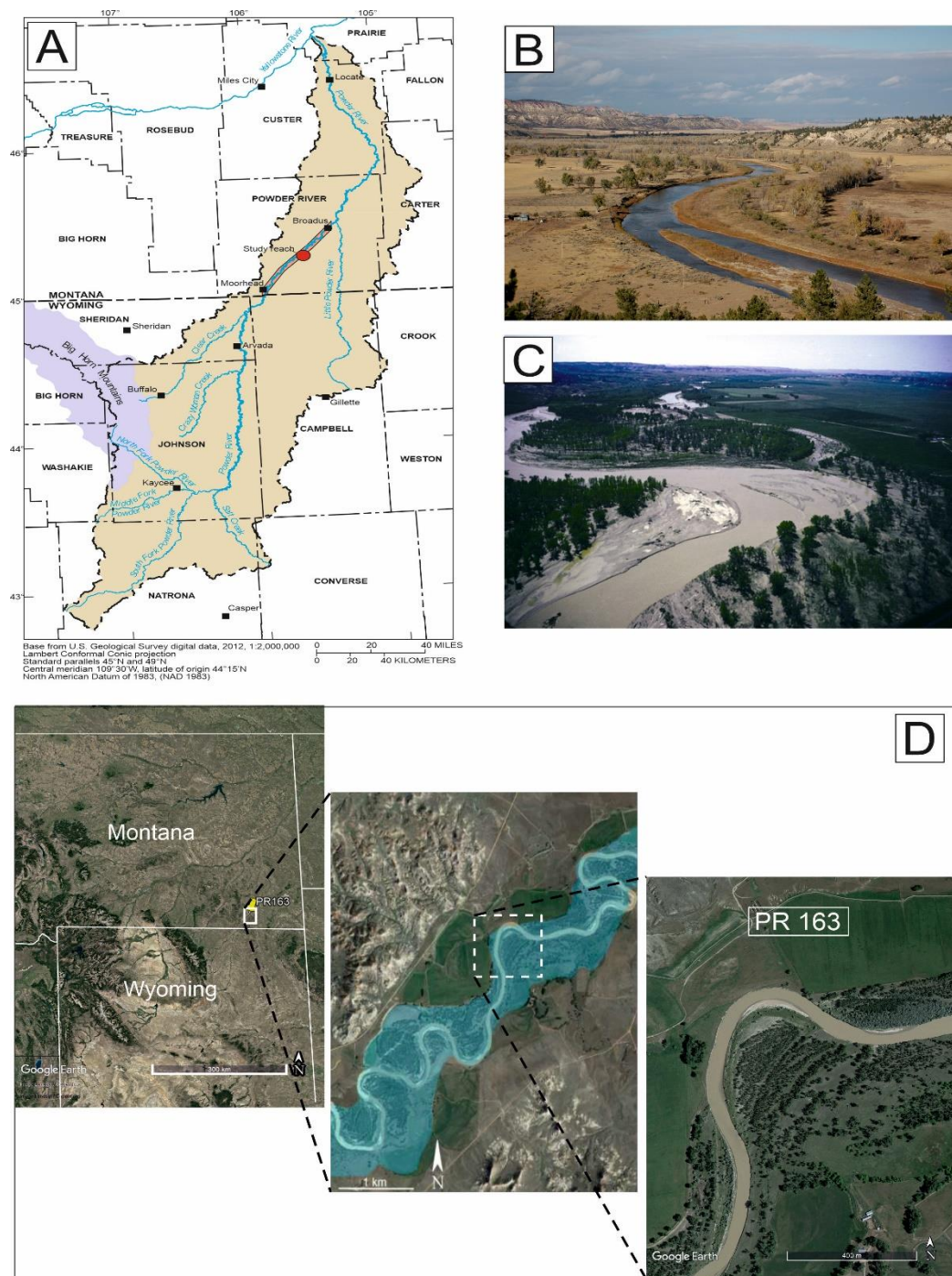


Fig. 3.1 A) Mappa del bacino di drenaggio del Powder River che mostra i principali centri urbani, gli affluenti e la posizione della barra PR163 oggetto di studio, indicata con un cerchio rosso (modificato da Meade and Moody, 2013). B) Fotografia di un meandro del Powder River (modificato da Moody and Meade, 2014). C) Fotografia del Powder River alla sezione PR175 durante la fase calante della piena del 1978 (modificato da Meade and Moody, 2013). D) Vista da satellite del Bacino del Powder River con ingrandimento sull'area di studio (Google Earth). Nel riquadro centrale è segnata in azzurro l'area inondata durante l'evento di piena estrema del 1978.

3.3 Tipologie di eventi di piena

L'area del bacino del Powder River è caratterizzata da un clima di tipo semi-arido con precipitazioni nell'ordine dei 300-400 mm annui costituite prevalentemente da rari ma violenti fenomeni concentrati in specifiche stagioni dell'anno come la primavera e l'autunno. Si registrano in media quasi 6 piene ordinarie annuali, eventi cioè dove la portata supera la portata media annuale, che possono essere di varia natura (Moody, 2018):

- *Snowmelt floods*: piene che si sviluppano per intenso scioglimento nivale. Si verificano tipicamente alla fine della primavera, quando il tasso di scioglimento nivale è massimo. Sono fenomeni piuttosto pervasivi, possono infatti interessare porzioni molto ampie del corso d'acqua.
- *Ice-jam floods*: piene caratterizzate dalla presenza di grossi blocchi di ghiaccio che vengono trascinati dal flusso e tendono ad accumularsi nei meandri. Si verificano tipicamente durante la primavera e generalmente interessano un tratto del corso d'acqua limitato a qualche km.
- *Flash floods*: precipitazioni intense in un ristretto arco temporale. Si formano generalmente nei periodi caldi estivi.
- *Fall floods*: eventi di precipitazioni intense che si sviluppano tipicamente in autunno.
- *Extreme floods*: eventi di eccezionale intensità causati da condizioni atmosferiche anomale e, spesso, combinazioni di più fattori.

L'evento di piena del maggio 1978, descritto in dettaglio al Cap. 4, si può definire come una *extreme flood* poiché caratterizzato da circolazione atmosferica anomala. Gli effetti poi sono paragonabili a fenomeni come *flash floods* e *snowmelt floods*. Si è verificato infatti un fenomeno caratterizzato da piogge di intensità estrema. Inoltre parte delle precipitazioni si sono abbattute direttamente su zone innevate innescando un rapido scioglimento nivale che ha aumentato notevolmente la portata della piena.

I sedimenti trasportati e depositati dal Powder River presentano un ampio spettro sia di granulometrie, da granuli della taglia dei ciottoli (64-128 mm) fino a argilla (< 0,004 mm), sia di litotipi, si trovano infatti sia sedimenti da terrigeni a carbonatici, da clasti granitici a frammenti di carbone (*Moody, 2018*).

4. L'EVENTO ALLUVIONALE DEL MAGGIO 1978

L'alluvione che ha interessato il Powder River Basin nel Maggio del 1978, considerata nella scala geologica, non è altro che uno dei migliaia di eventi alluvionali susseguitesi nel periodo Post-Laramidiano. Ma, come per tutti gli eventi geologici, è necessario considerare la giusta scala temporale di osservazione. Infatti l'alluvione del '78, osservata su scala centenaria, rappresenta un evento di estrema intensità. È stato infatti l'evento alluvionale di maggiore intensità dopo l'enorme alluvione che ha colpito l'area nel 1923 (*Meade and Moody, 2013*).

4.1 Cause della piena

Nel Maggio del 1978 si è verificata una circolazione anomala delle correnti d'aria che hanno formato un fronte stazionario alimentato da una flusso caldo e umido proveniente dalla zona del Golfo del Messico (*Parret et al.,1984. Hirschboeck, 1988*) . Questa circolazione anomala portò un periodo prolungato di abbondanti precipitazioni, anche direttamente sul manto nevoso, causando scioglimento nivale anche alle quote più elevate. Tra il 16 e il 19 Maggio del 1978 il Powder River Basin è stato interessato dalla caduta di 128 mm di acqua sul terreno già saturo dalle piogge precedenti (*Parret et al.,1984*). Nel mese di Maggio, a Broadus, località limitrofa alla Contea di Powder River, sono precipitati al suolo oltre 180 mm di acqua, contro una media stagionale di 60 mm (*Moody and Meade, 2008*).

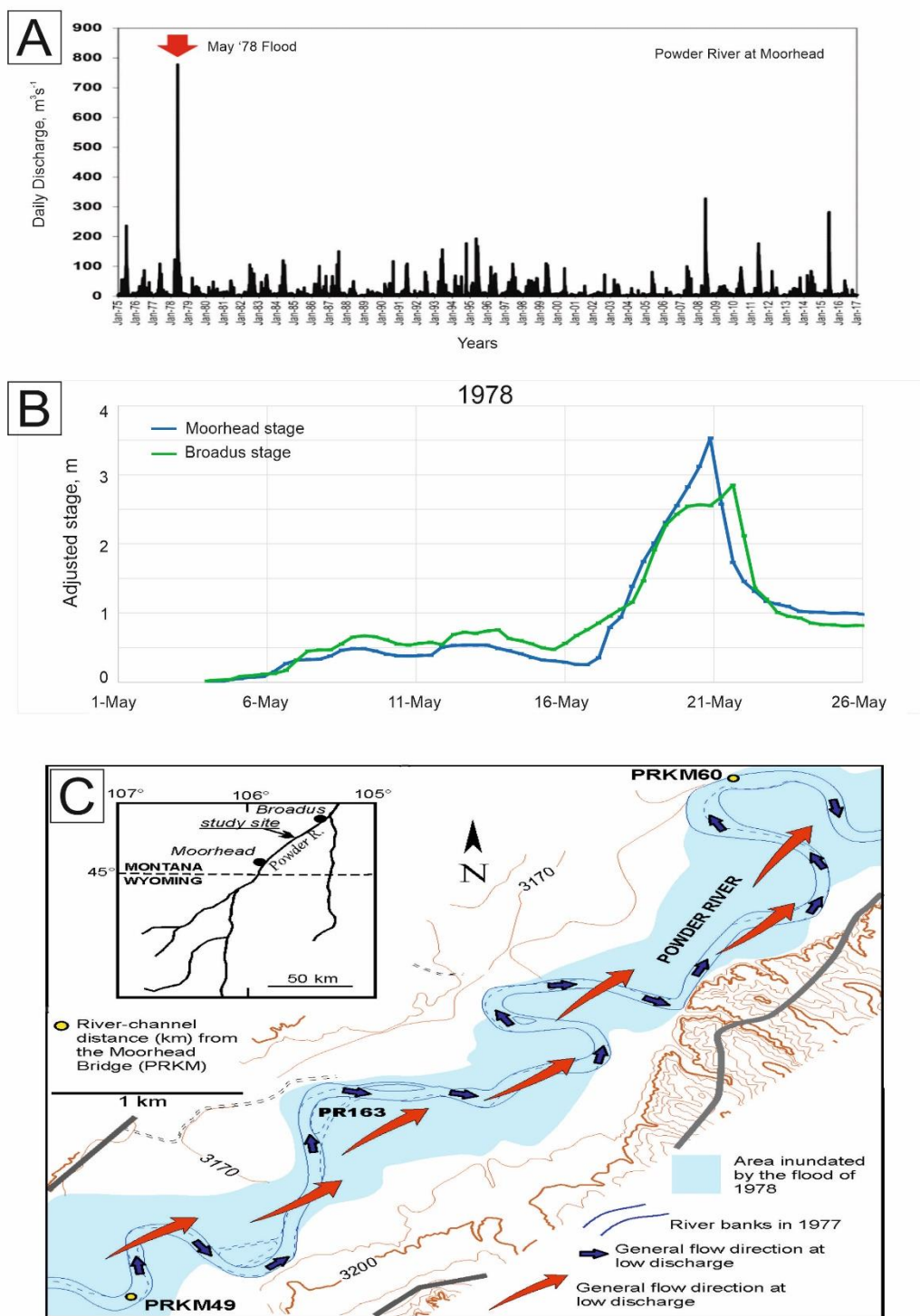


Fig. 4.1 A) Idrogramma degli ultimi 50 anni. Si nota l'eccezionalità della portata dell'evento del 1978 (modificato da Ghinassi et al., 2019). B) Idrogramma in dettaglio per l'evento di piena del 1978. C) Area inondata durante la piena del 1978 (modificato da Ghinassi et al., 2019).

Il risultato è stata un'alluvione di tipologia ibrida tra snowmelt e flashflood, con un tempo di ricorrenza calcolato in circa 50 anni (Fig. 4.1A). Il picco massimo di portata del Powder River è stato raggiunto il 20 Maggio 1978 con un valore calcolato presso Moorhead, località a monte dell'area di studio, di $779 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Fig. 4.1B) quando la portata media annua è di circa $13 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (USGS, 1979). L'onda di piena si è dispersa e attenuata, propagandosi verso valle alla velocità di circa 3-4 km/h, principalmente a causa dell'inondazione della piana alluvionale circostante (Parret et al., 1984) (Fig. 3.1D e 4.1C) Si è calcolato che, durante la piena, sono stati inondati circa 50 km^2 di terreno nelle vicinanze del fiume (Meade and Moody, 2013).

4.2 Risultati dell'evento alluvionale

Considerando l'area di studio, ovvero il tratto del Powder River tra Moorhead (località a monte) e Broadus (località a valle), si osserva come la quantità di sedimenti trasportati dal corso d'acqua durante l'evento di piena del 1978 sia maggiore a Moorhead. Quindi, sebbene il fiume eroda alcuni terrazzi fluviali, barre di meandro e i canali stessi, deposita poco più a valle un maggiore carico di sedimenti e quindi complessivamente la portata solida nella zona di input risulta maggiore di quella di output (Meade and Moody, 2013).

L'alluvione ha portato a importanti modifiche morfologiche dell'alveo stesso. Si è verificata una notevole erosione nella zona di outer bank di ogni meandro, il canale principale si è allargato, alcuni meandri sono stati tagliati mentre altri hanno subito notevoli modifiche morfologiche (Furbish, 1988). La lunghezza complessiva del Powder River nell'area di studio, situata tra Moorhead (località a monte) e Broadus (località a valle), è diminuita di circa 2 km sui 100 km considerati. Ciò significa che l'effetto del cut-off dei meandri è stato maggiore rispetto a quello dell'espansione laterale, comportamento tipico di eventi di estrema intensità (Meade and Moody, 2013).

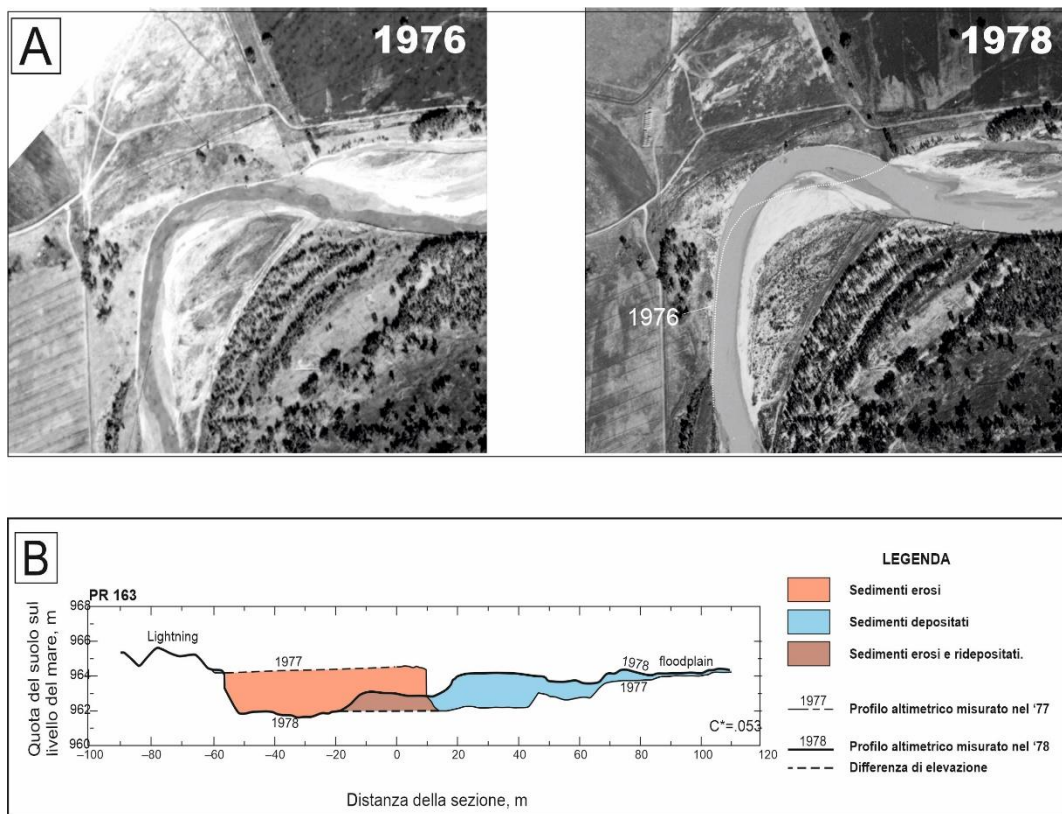


Fig. 4.2 A) Confronto tra la vista da satellite dell'area di studio nel 1976, precedente la piena, e 1978, successiva la piena (modificato da Ghinassi, 2019). B) Sezione che mostra erosione e deposizione in seguito alla piena del '78 alla barra PR163. La scala verticale è stata aumentata di 5 volte rispetto a quella verticale (modificato da Meade and Moody, 2013).

Considerando alcuni meandri del Powder River nell'area di studio, tra Moorhead e Broadus, in seguito all'evento del '78 è possibile individuare un rapporto allargamento/approfondimento del canale positivo. Questo aspetto è facilmente visibile osservando la sezione PR163 che, pur essendo esagerata verticalmente di 5 volte, mostra un allargamento del canale maggiore rispetto all'approfondimento (Fig. 4.2A). La percezione degli abitanti locali si è invece rivelata opposta probabilmente a causa del diverso punto di osservazione. Gli agricoltori locali infatti osservarono l'evolversi del canale dalle sponde soggette a intensa sedimentazione durante la piena. Conseguentemente notarono un abbassamento

del canale relativo, dovuto più che altro all'innalzamento delle sponde e degli argini per deposizione di sedimenti (*Meade and Moody, 2013*).

Considerando invece il singolo meandro, durante un evento alluvionale, solitamente viene eroso l'outer bank con conseguente deposizione nella zona di inner bank. Durante l'alluvione del '78 la quantità di sedimenti depositati ha grossomodo eguagliato quella dei sedimenti erosi, soprattutto nei meandri caratterizzati da maggiore curvatura. Il meandro di studio, tagliato dalla sezione PR163, è stato uno dei meandri interessato dai maggiori effetti della piena. L'outer bank è stato infatti eroso per 65 m depositando sedimenti nella zona di inner bank per 25 m formando una point bar spessa più di un metro (*Meade and Moody, 2013*).

Confrontando le foto aeree, pre e post alluvione (*Fig. 4.2B*), si può osservare come il meandro in corrispondenza della sezione di studio PR163 abbia aumentato notevolmente il suo indice di sinuosità in seguito all'evento di piena del 1978 passando da 1,18 pre-alluvione a 1,30 post-alluvione. Nei successivi 40 anni circa, il meandro ha poi aumentato la sinuosità fino a raggiungere il valore attuale di 1,50. L'evento di piena ha inoltre eroso una superficie di outer bank pari a 19.000 m². La superficie erosa invece negli ultimi 40 è stata stimata in 14.000 m² circa (*Ghinassi et al., 2019*). In altre parole, durante l'alluvione del 1978, l'aumento dell'indice di sinuosità del meandro e la quantità di superficie erosa sono paragonabili a quelli registrati durante i successivi 40 anni.

A causa dell'alluvione sono stati inoltre tagliati svariati meandri tra cui due di grosse dimensioni (*Gay et al., 1998*). Sebbene i due meandri fossero simili in dimensioni e curvatura hanno subito differenti troncature. Il meandro alla sezione PR141 è stato tagliato nella fase iniziale della piena mentre il meandro alla sezione PR122 è stato tagliato solamente nella fase finale calante (*Meade and Moody, 2013*).

5. METODI E MATERIALI

5.1 Campionamento e attività in campagna

L'attività di campagna è stata svolta dal 1 al 9 Settembre 2018 nel territorio della Contea del Powder River (Montana, USA). Per lo studio dei depositi formati dall'evento di piena estremo che ha colpito l'area nel 1978 è stato scelto un meandro del Powder River situato tra le località di Moorhead e Broadus e distante 163 km dal luogo dove il torrente Crazy Woman, uno dei principali affluenti, si immette nel Powder River stesso. Nel 2016, durante l'annuale campagna di ricerca condotta dal USGS, è stata scavata una trincea, denominata PR163, lungo l'asse del meandro e orientata Nord-Ovest/Sud-Est (*Fig. 5.1A*). Lo scopo principale dei ricercatori dell'USGS era quello di osservare e misurare lo spessore dei depositi relativi all'evento del 1978.

Nel Settembre 2018, per questo lavoro, è stata scavata, tramite l'utilizzo di un escavatore, una trincea lunga, alta e larga rispettivamente 75, 2, e 2 metri (*Fig. 5.1.B*). La nuova trincea PR163 è stata scavata nella medesima posizione della precedente grazie all'ausilio di alcune aste di acciaio geolocalizzate lasciate infisse nel terreno. Questo ha infatti permesso di utilizzare i dati e le informazioni già raccolte dai ricercatori del USGS durante la campagna del 2016. La trincea scavata, come la precedente, è orientata Nord-Ovest/Sud-Est e taglia perpendicolarmente la point bar lungo l'asse del meandro con lo scopo di osservare il deposito e le strutture sedimentarie in sezione. La trincea PR163 è stata scavata in modo da essere osservata rivolgendosi verso est. Ponendosi di fronte alla sezione si osserva il canale a destra e l'inner bank a sinistra (*Fig. 5.1A*).

Una volta ultimato lo scavo, è stato posizionato sul bordo della trincea un cavo di acciaio ben teso dotato di un segnalatore sferico posizionato ogni metro, un

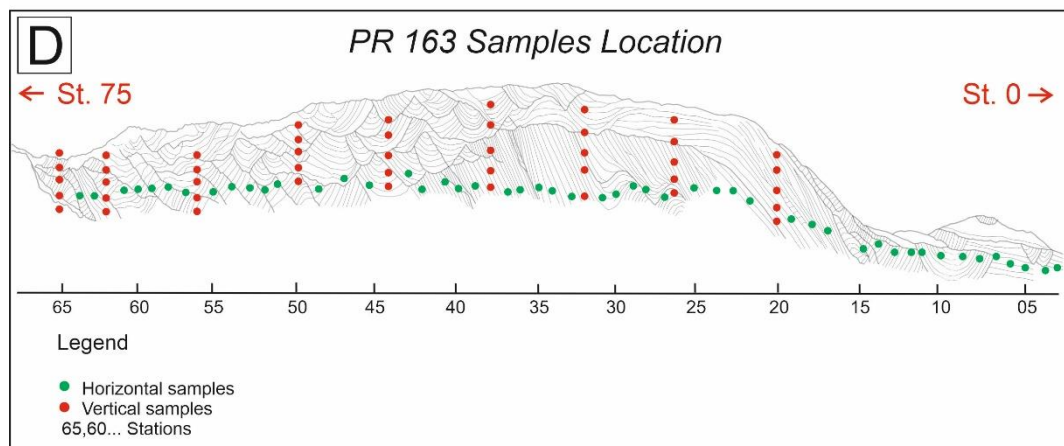
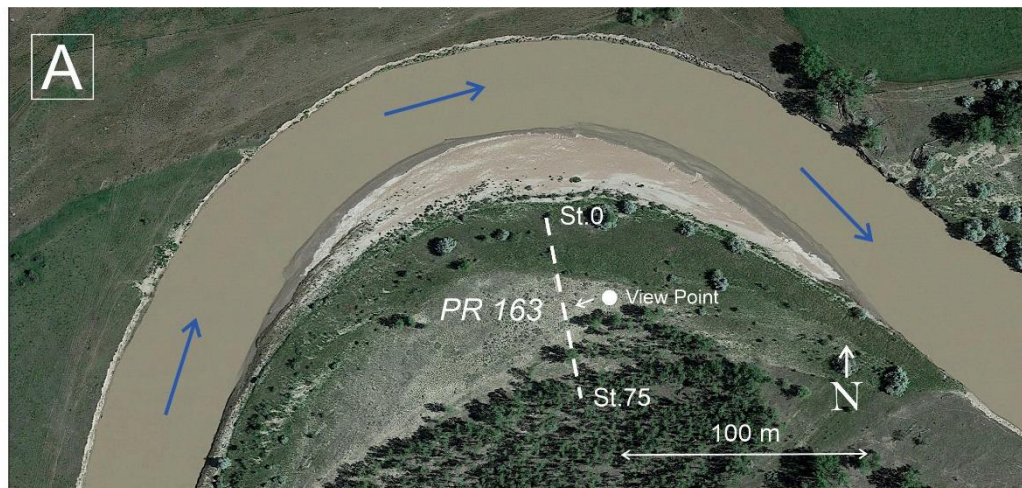


Fig. 5.1 A) Scavo della sezione che taglia trasversalmente la barra PR163. B) Scatto di circa 400 fotografie lungo tutta la sezione per ricostruire l'ortofoto. C) Analisi granulometriche effettuate tramite vagliatura meccanica condotte presso il centro «USGS» di Boulder, CO. D) Serie di setacci utilizzati per la analisi granulometriche caratterizzati da maglie di diametro da 0,063 fino a 64 mm.

segnalatore di differente forma ogni 5 metri e un segnalatore di forma ancora diversa ogni 10 metri. Il cavo d'acciaio è stato quindi fissato a una quota sul livello del mare nota pari a 965,885 m s.l.m. In questo modo è stato possibile, sia confrontare le misure degli spessori dei depositi rilevate dai ricercatori dell'USGS nel 2016, sia ottenere una misura altimetrica precisa su qualsiasi punto dell'area lungo tutta la sezione. Quest'ultimo accorgimento si è rivelato indispensabile per localizzare con precisione la posizione dei campionamenti lungo tutta la sezione.

La sezione è stata analizzata seguendo un classico approccio sedimentologico. Innanzitutto sono state scattate circa 400 foto lungo tutta la sezione osservando ogni zona da diverse angolazioni (*Fig. 5.1.C*). Le immagini sono state quindi analizzate e sovrapposte mediante l'utilizzo di "AgisoftTM PhotoScan", un software d'analisi d'immagine che permette di sviluppare un'ortofoto. Quest'ultima è un'immagine ad alta risoluzione che, mantenendo il punto di vista dell'osservatore sempre perfettamente ortogonale rispetto alla sezione, permette di osservarla interamente e senza distorsioni. Grazie alle sue caratteristiche infatti, l'ortofoto si rivela indispensabile quando occorre osservare un deposito sedimentario in sezione dovendo cogliere le diverse angolazioni degli strati. Successivamente in campagna, osservando la sezione scavata, sono state evidenziate le principali strutture sedimentarie, che sono state riportate sull'ortofoto al fine di ricostruire le geometrie del deposito e l'evoluzione temporale della point bar durante l'evento di piena estremo del maggio 1978.

La sezione PR163 è stata misurata ponendo la Stazione 0 all'estremità verso l'outer bank (Nord/Ovest) e la Stazione 75 all'estremità opposta, verso l'inner bank (Sud/Est) (*Fig. 5.1A*). Successivamente sono stati raccolti 120 campioni distribuiti lungo la sezione con il principale scopo di ottenere dei campioni di sedimento rappresentativi al fine di effettuare delle analisi granulometriche in laboratorio. Conoscendo la granulometria di ogni singola zona del deposito è infatti possibile calcolare, come illustrato al Cap. 7, parametri indispensabili per la ricostruzione dell'evento di piena come lo shear stress critico e la profondità di flusso.

È stato effettuato un campionamento orizzontale di 74 metri, dal campione 73 al campione 0, utilizzando un passo di campionamento pari a un campione ogni metro mantenendo costante la distanza verticale in relazione al livello del terreno. In corrispondenza dei metri 72, 65, 62, 56, 50, 44, 38, 32, 26 e 20 sono stati inoltre eseguiti dei campionamenti verticali formati da 5 campioni, compreso quello del campionamento orizzontale, prelevati in modo da coprire l'intero spessore del deposito di circa 2 metri (*Fig. 5.1D*). È stata infine scavata a mano una piccola fossa in corrispondenza del metro 80 da cui sono stati raccolti 5 campioni verticali con lo scopo di controllare che il deposito del '78 non fosse più largo del previsto. Il volume di materiale campionato varia in funzione della granulometria del sedimento per essere sempre sicuri di ottenere un campione rappresentativo. Per granulometrie fini, come limi e sabbie fini, sono state campionate alcune decine di grammi di sedimento mentre, per granulometrie più grossolane, come ghiaie e ciottoli, sono stati campionati fino a 8 kg di sedimento.

5.2 Analisi granulometriche

Terminata la fase di descrizione e analisi dei depositi in campagna sono state effettuate le analisi granulometriche in laboratorio dei campioni di sedimento raccolti. Le analisi granulometriche sono state effettuate dall'11 al 21 settembre 2018 presso il laboratorio di sedimentologia del centro "US Geological Survey" presso Boulder (Colorado, USA).

Le analisi granulometriche della barra PR163 sono state eseguite tramite vagliatura meccanica utilizzando setacci caratterizzati da un diametro di 20 cm. La vagliatura meccanica è stata preferita a tecniche quali analisi per via umida o analisi al granulometro laser, poiché ritenuta il metodo più efficace per analisi granulometriche su campioni caratterizzati da granulometrie mediamente elevate. Tramite la vagliatura meccanica non è però possibile separare frazioni $< 0,063$ mm, ovvero più fini della taglia del silt.

Tutti i campioni sono stati messi in contenitori precedentemente pesati per essere poi seccati in un forno a 105°C per 24 ore. Una volta eliminata l'umidità, i campioni essiccati sono stati pesati ottenendo così il peso effettivo del campione. Per separare le frazioni granulometriche sono stati utilizzati dei set formati da 11 setacci caratterizzati da maglie da 64 mm fino a 0.063 mm (*Fig. 5.2B*).

Setacci utilizzati per le analisi:

- D₆₄ mm, -6 φ
- D₃₂ mm, -5 φ
- D₁₆ mm, -4 φ
- D₈ mm, -3 φ
- D₄ mm, -2 φ
- D₂ mm, -1 φ
- D₁ mm, 0 φ
- D_{0,5} mm, 1 φ
- D_{0,250} mm, 2 φ
- D_{0,125} mm, 3 φ
- D_{0,063} mm, 4 φ

Sono stati utilizzati due metodi differenti a seconda della granulometria e, conseguentemente, del peso del campione.

Metodo 1: usato per campioni < 1500 g.

- I campioni sono stati messi nei setacci.
- I 7 setacci (da 0,063 a 4 mm) sono stati inseriti nella Rotap Sieve Shaker (W.S Tyler, Model RX-29) per 15 minuti.
- Terminata l'operazione di vagliatura sono state pesate le singole frazioni rimaste nei vari setacci (*Fig. 5.2A*).

Metodo 2: usato per campioni > 1500 g.

- Prima di essere posizionati della Rotap Sieve Shaker i campioni sono stati separati della componente più grossolana tramite l'utilizzo di quattro setacci aventi maglie pari a 8, 16, 32 e 64 mm, ovvero quelli troppo grandi per essere messi nella Rotap sieve shaker.
- La frazione < 8 mm è stata quindi divisa in due porzioni trattate separatamente per la limitata capacità della Rotap Sieve Shaker. Le

singole porzioni sono state analizzate con il medesimo procedimento impiegato nel metodo 1.

- terminate le operazioni di vagliatura sono state pesate tutte le singole frazioni rimaste nei setacci, comprese quelle grossolane nei setacci di 8, 16, 32 e 64 mm.

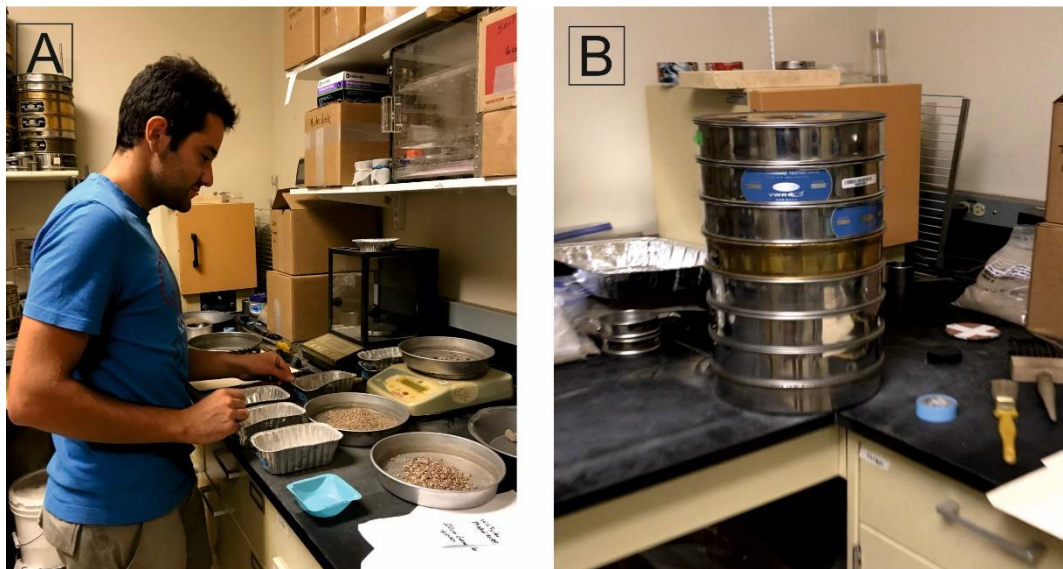


Fig. 5.2 A) Foto raffigurante le operazioni di pesatura delle frazioni di sedimenti separate tramite vagliatura meccanica presso il laboratorio di sedimentologia del centro USGS a Boulder. B) Set di setacci utilizzati per la vagliatura meccanica.

6. POINT BAR PR163

Il deposito dell'alluvione del 1978, a causa della elevata variabilità delle condizioni deposizionali durante l'evento di piena, mostra un'accentuata eterogeneità sia nella granulometria che nelle strutture sedimentarie. Il deposito, tendenzialmente grossolano, è delimitato al tetto da una superficie che lo separa dai depositi sabbiosi più fini formati durante le piene annuali successive evidentemente caratterizzate da una minore energia ambientale (*Fig.6A*). Alla base sono invece presenti i depositi lasciati dalle piene precedenti tra cui l'evento estremo del 1923 risultato addirittura più intenso dell'evento del 1978 preso in esame (*Ghinassi et al.,2019*).

Il deposito, trattandosi del risultato di un evento estremo, è mediamente caratterizzato da clasti di dimensioni elevate come ghiaia e ciottoli (*Ghinassi et al.,2019*). Come già detto, non mancano comunque sedimenti di taglia minore come sabbia, limo e argilla. Dalle analisi granulometriche è risultato infatti che il deposito varia da granulometrie tipiche di argille e limi ($< 0,063$ mm) fino a valori tipici di ghiaie e ciottoli (> 5 cm). I sedimenti sono quindi caratterizzati da un basso livello di sorting, tipico delle point bar fluviali. Il grado di arrotondamento dei singoli granuli è variabile, da moderato a buono, indice di un buon livello di trasporto. La zona sorgente di questi sedimenti, ovvero il Powder River Basin, comprende infatti un'area piuttosto ampia, dalle Big Horn Mountains del Wyoming ai territori più a nord del Montana.

Il deposito è caratterizzato da strutture sedimentarie tipiche di moti trattivi unidirezionali fluviali (*Fig.6B*). Si possono individuare strutture diverse a seconda della zona della barra che consideriamo. Le più comuni sono rappresentate da stratificazioni incrociate e stratificazioni piano-parallele. È possibile inoltre individuare alcune laminazioni scure, formate in prevalenza da frammenti di carbone che, grazie al basso peso specifico, sono caratterizzati da una

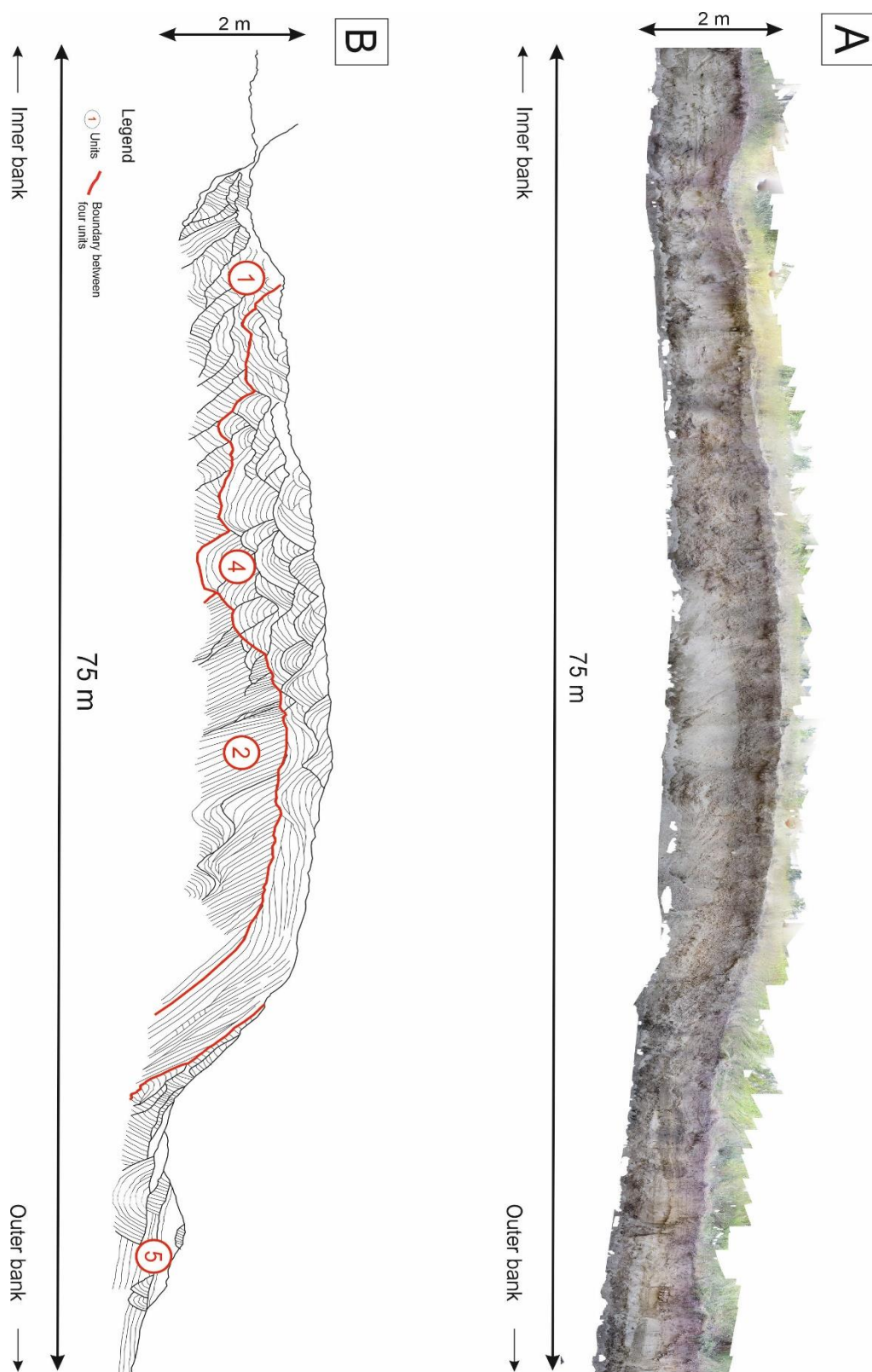


Fig. 6 A) Ortofoto della sezione che taglia la barra di studio PR163. La scala verticale è stata esagerata di 5 volte. B) Ricostruzione grafica delle strutture sedimentarie sia principali che secondarie. Sono segnati in rosso i limiti tra le quattro Unità Sedimentarie (1, 2, 4, 5) che compongono la barra. . La scala verticale è stata esagerata di 5 volte.

granulometria superiore alla media. Sono inoltre abbondanti gli esempi di ciottoli embricati situati nelle zone della barra a maggiore granulometria.

Il deposito della piena è caratterizzato in prevalenza da sedimenti di natura silico-clastica a causa dell'area sorgente del Powder River formata principalmente dalla "Fort Union Formation", importante unità stratigrafica paleocenica costituita in prevalenza da arenarie, argilliti e carbone.

L'intero deposito di barra, formato durante l'evento del 1978, è costituito da quattro diverse unità sedimentarie caratterizzate da granulometria e strutture differenti. È inoltre possibile osservare una marcata superficie erosiva che taglia longitudinalmente due delle quattro unità sedimentarie. Mentre le quattro unità sedimentarie testimoniano altrettante fasi deposizionali, la superficie erosiva rappresenta invece una fase erosiva intercorsa durante lo sviluppo della barra (*Fig.6B*).

6.1 Unità Sedimentaria 1

L'Unità Sedimentaria 1 è caratterizzata da una granulometria che va da sabbia fine a sabbia media, $D_{50} = 0,4 - 1$ mm. Il deposito è caratterizzato da un generale trend fining upward; si osserva infatti silt e sabbia fine nella parte basale dell'unità mentre sabbia più grossolana verso il tetto del deposito. La distribuzione fining upward è una caratteristica tipica dei depositi di meandro ed è causata principalmente dalla migrazione della point bar verso il centro del canale. Generalmente infatti, come spiegato al Cap. 2, il flusso in un meandro tende a erodere la sponda di outer bank. Il sedimento eroso viene quindi deposto nella sponda di inner bank accrescendo così la barra.

Nell'Unità 1 si osserva inoltre un leggero trend coarsening riverward. Infatti i sedimenti prossimi all'inner bank sono formati in prevalenza da sabbia fine ($D_{50} = 0,5$ mm) mentre nella zona verso l'outer bank aumenta la quantità di sabbia grossolana ($D_{50} = 1,60$ mm). Questa particolare distribuzione granulometrica si forma a causa dell'incremento energetico della piena simultaneamente alla

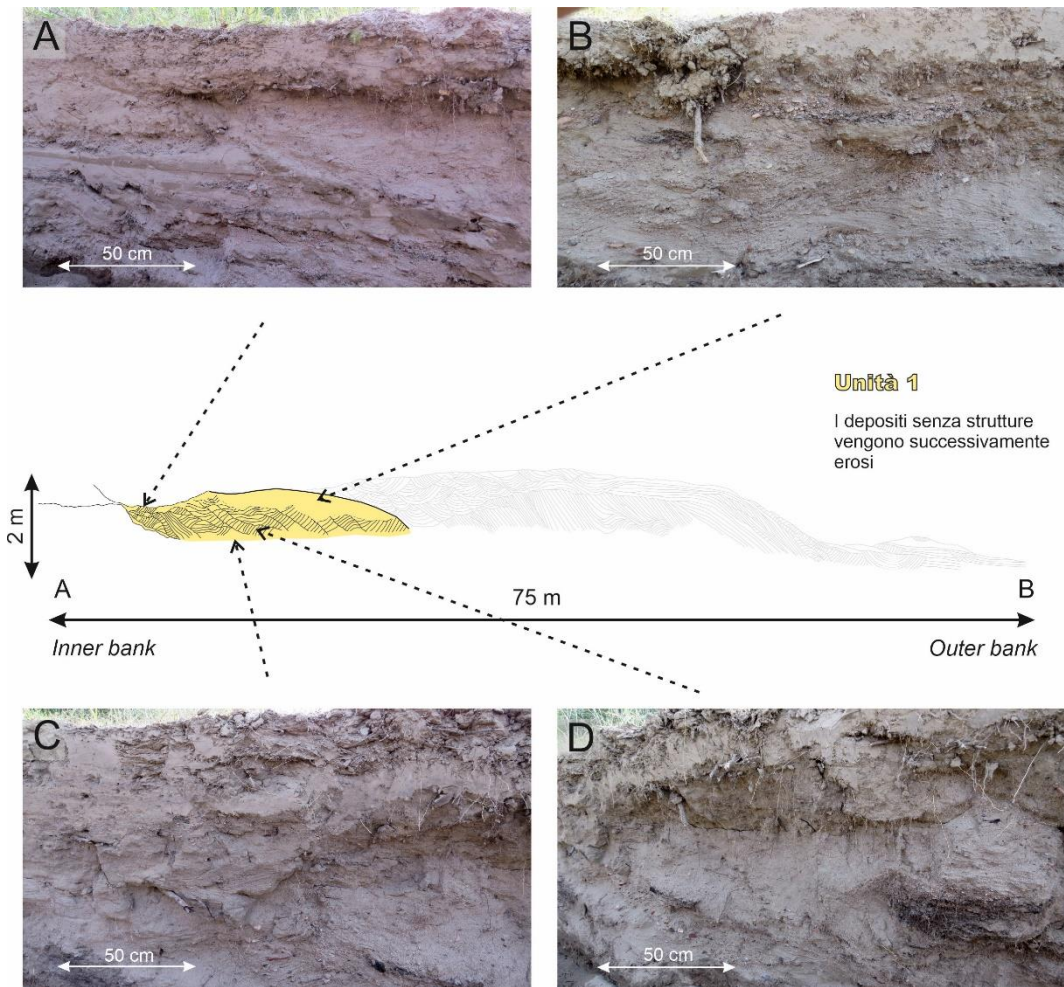


Fig. 6.1 *Unità 1. A) Base della barra generata dall'evento di piena. B – C – D) Dune 3D migranti verso l'inner bank caratterizzate da geometria trough cross stratification (TCS).*

formazione del deposito. A causa dell'espansione del meandro infatti, la parte del deposito prossimale all'outer bank si è deposta successivamente, in condizioni ambientali di maggiore energia.

L'Unità 1 è caratterizzata da forme di fondo come dune e, diminuendo la scala di osservazione, *ripples* che indicano una direzione di flusso sub-parallelo alla sezione con direzione verso Sud-Est. Al momento della deposizione dell'Unità 1 il flusso tendeva quindi a risalire lungo l'asse della point bar formando set di strati centimetrici. Conseguentemente, come strutture sedimentarie, si osservano

abbondanti le stratificazioni incrociate inclinate di circa 20° rispetto al terreno (*Fig.6.1B – C – D*).

È inoltre possibile osservare, nella zona della sezione più prossima all'inner bank, in corrispondenza della stazione 70, la base del deposito della piena in evidenza rispetto ai depositi delle precedenti alluvioni tra cui quelli dell'evento estremo del 1923 (*Fig.6.1A*).

6.2 Unità Sedimentaria 2

L'Unità Sedimentaria 2 è caratterizzata da uno spessore e una taglia granulometria media maggiori rispetto a quelli dell'Unità 1. Si osserva infatti sabbia da fine a grossolana e, in alcune zone, i sedimenti raggiungono la taglia della ghiaia ($D_{50} = 6$ mm). Il sorting dei granuli, a causa dell'incremento energetico della piena, risulta essere maggiore; i sedimenti più fini vengono infatti eliminati. Analogamente all'Unità 1, anche nell'Unità 2 si osserva un generale trend fining upward e coarsening riverward.

Generalmente, con granulometrie così elevate, come forme di fondo si formano prevalentemente dune. Le ripples, infatti, per loro natura si generano esclusivamente in sedimenti fini. L'unità 2 è infatti caratterizzata da un'unica grossa duna che, in alcune zone, arriva anche a un metro di altezza (*Fig.6.2A – B – C - D*). Analogamente all'Unità 1, le strutture sedimentarie osservate nell'Unità 2 indicano un flusso sub-parallelo alla sezione con direzione verso Sud-Est. Diversamente dall'unità 1 invece, nella direzione di flusso si può individuare una leggera componente uscente rispetto alla sezione. Questa leggera differenza nella direzione di flusso può essere interpretata, come vedremo nel Cap. 8, come l'aumento della portata verso il picco massimo della piena.

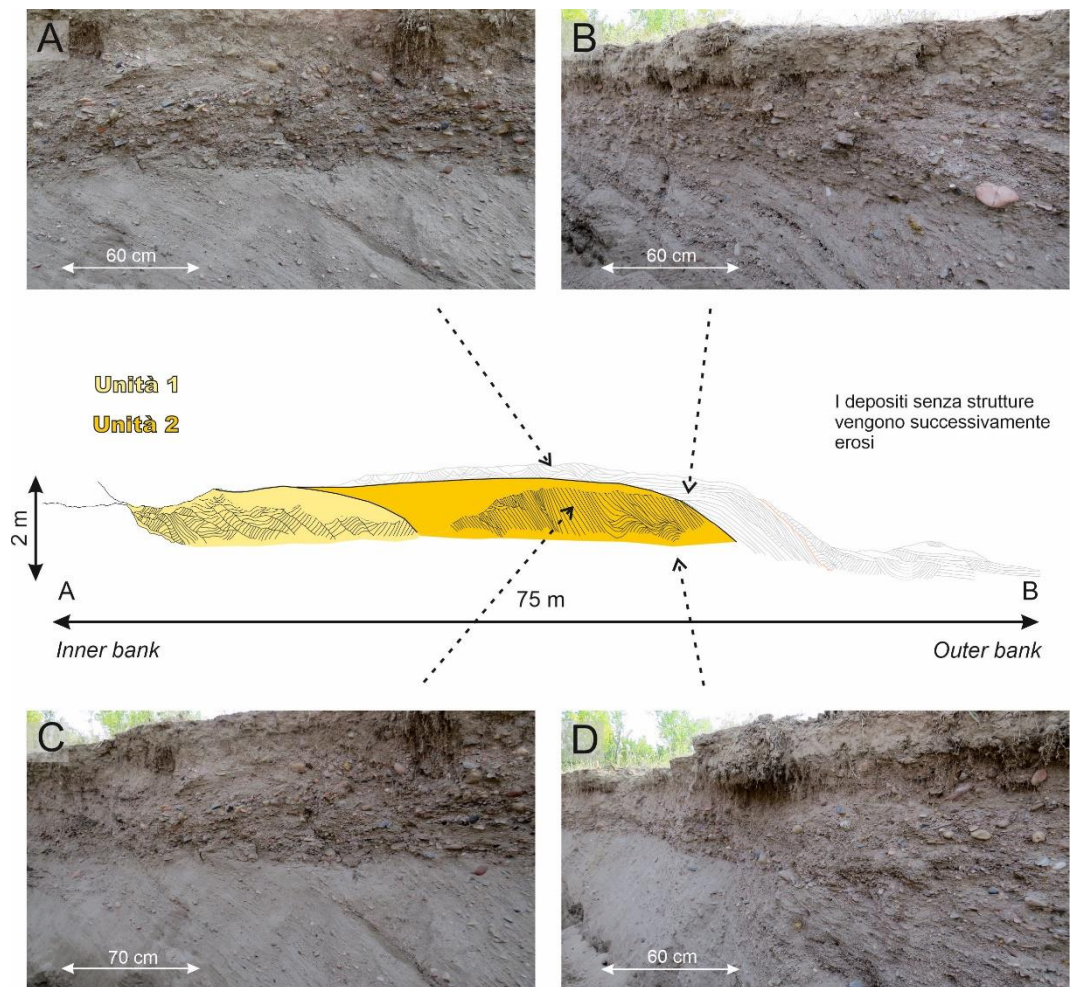


Fig. 6.2 *Unità 2. Si osserva un'unica grossa duna con un angolo di circa 45° che migra verso l'inner bank e forma strutture planar-cross stratification. Il deposito si espande invece verso l'outer bank. Si osserva il netto contrasto con i depositi dell'Unità 4.*

6.3 *Transizione tra Unità 2 e Unità 4*

La transizione tra la precedente Unità 2 e la successiva Unità 4 nel record geologico non è testimoniata da corpo sedimentario ma bensì da un'evidente superficie erosiva che taglia parzialmente i depositi delle Unità 1 e 2. L'azione erosiva risulta più intensa nella zona centrale della point bar dove i depositi formati precedentemente vengono erosi quasi completamente lasciando una depressione ben visibile in sezione.

La troncatura erosiva risulta chiara dove si crea un evidente contrasto tra le dune che formano stratificazioni incrociate nell'unità 2 e le stratificazioni piano-parallele che invece, come trattato al paragrafo successivo, caratterizzano i depositi dell'unità 4 (Fig. 6.3A). Nella zona della sezione prossima all'inner bank la superficie erosiva risulta meno visibile ma è comunque seguibile osservando la diversa orientazione delle strutture sedimentarie che caratterizzano l'Unità 1 e quelle della soprastante Unità 4 (Fig. 6.3B).

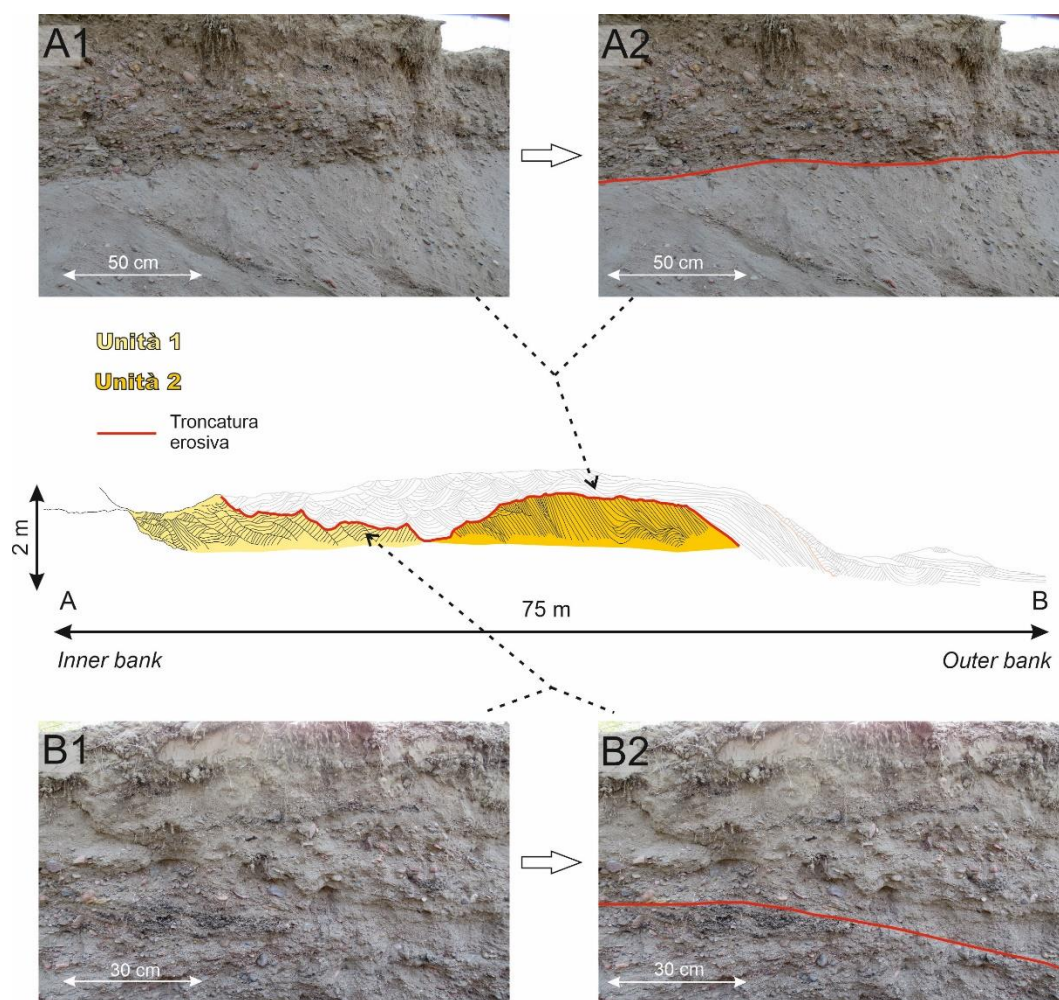


Fig. 6.3 *Transizione tra Unità 2 e Unità 4. A1 – A2) Netta troncatura erosiva che separa l'Unità 2 dall'Unità 4. B1- B2) Troncatura erosiva che separa i depositi dell'Unità 1 da quelli dell'Unità 4 caratterizzati da diversa direzione e intensità di flusso.*

6.4 Unità Sedimentaria 4

Il deposito che forma l'Unità Sedimentaria 4, come quello che forma l'Unità 2, è caratterizzato da un notevole spessore e una granulometria media piuttosto elevata. Le strutture sedimentarie che si osservano in sezione evidenziano però una direzione di flusso diversa da quella delle Unità 1 e 2. Mentre nelle Unità 1 e 2 gli indicatori di flusso sono sub-paralleli alla sezione e diretti verso Sud-Est nell'Unità 4 si osservano invece delle strutture che indicano un flusso perpendicolare rispetto alla sezione e diretto verso Nord-Est. Il record sedimentario di questa unità è infatti caratterizzato da dune che, in sezione, formano la classica geometria concava verso l'alto, tipico indicatore di flusso perpendicolare alla sezione.

L'Unità 4 è piuttosto complessa e può essere suddivisa in 3 sotto-unità:

- a) Inizialmente si formano dune di notevole dimensione che vanno a riempire le depressioni formate dalla precedente fase erosiva (*Fig. 6.4A*). In corrispondenza delle depressioni più profonde infatti si ha il maggiore spessore di sedimenti di questa unità.
- b) Successivamente si formano delle dune che si depositano sopra quelle appena formate (*Fig. 6.4B*). Nella parte della sezione più prossima all'inner bank, tra la stazione 30 e la stazione 20 circa, si formano invece delle strutture piano-parallele (*lower plane beds*) che si depositano sopra le dune dell'Unità 2 (*Fig. 6.4C*). Le strutture *lower plane beds* si formano generalmente quando il flusso non è sufficientemente veloce per formare le dune ma i sedimenti trasportati sono troppo grossolani per formare *ripples*.
- c) Infine si possono osservare nella zona più prossima all'outer bank degli strati caratterizzati da elevata inclinazione, circa tra 45° e 60° (*Fig. 6.4D*).

La granulometria dell'Unità 4 è decisamente grossolana ($D_{50} = 1,50 - 2 \text{ mm}$) con i singoli clasti che variano da dimensioni della sabbia grossolana (2 mm) fino a ciottoli centimetrici. Anche il sorting risulta essere piuttosto elevato a causa della

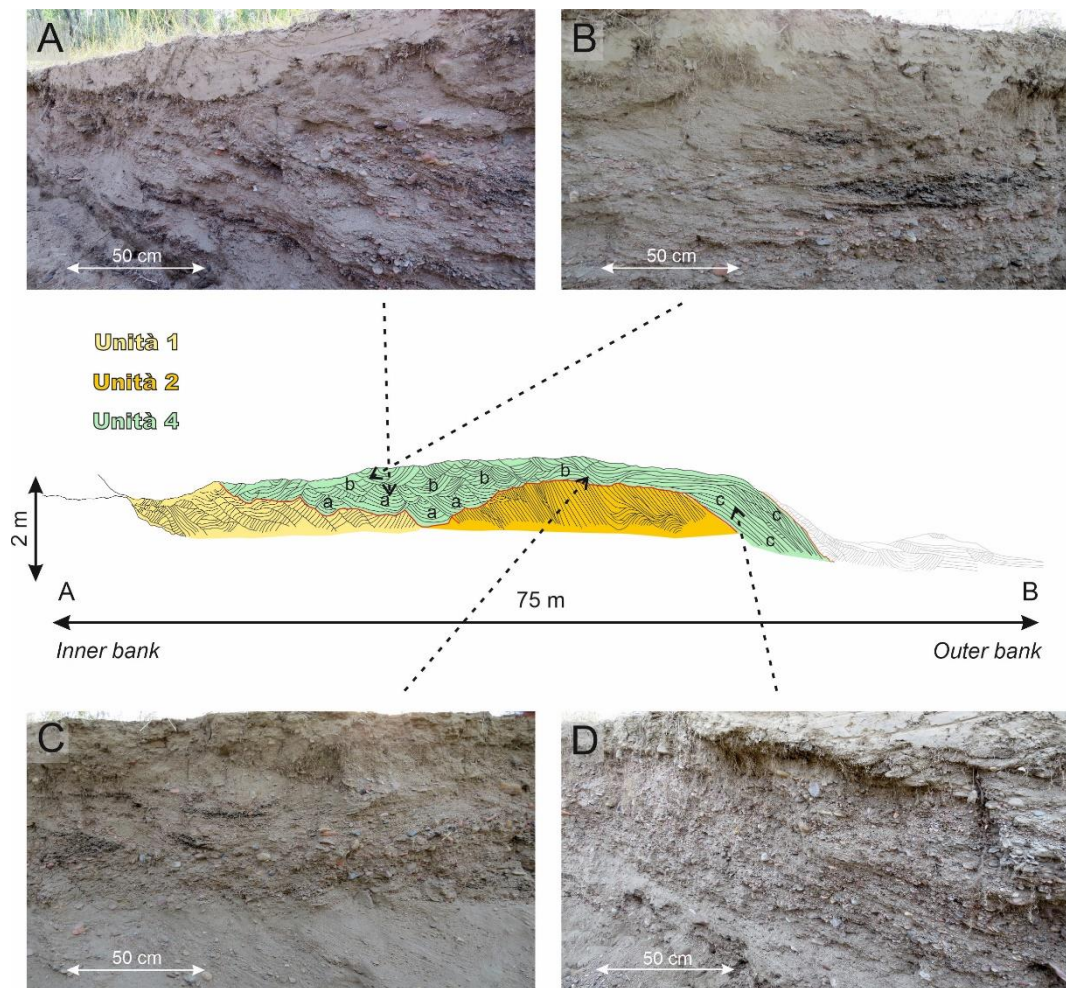


Fig. 6.4 Unità 4. Questa Unità è possibile dividerla in 3 sotto-unità: dapprima (a, foto A) vengono riempite le cavità lasciate dalla fase erosiva da parte di dune di grosse dimensioni, successivamente (b, foto B e C) si sviluppano un insieme di dune sulla parte sommitale che fanno crescere la barra in altezza e infine (c, foto D) si depositano strati inclinati verso l'outer bank.

scarsa presenza di limo e sabbia fine. Il deposito, a differenza di quelli formati precedentemente, è caratterizzato da un trend di coarsening upward. Si osservano alcuni ciottoli centimetrici, verso la zone superiore. Un trend di coarsening upward è una caratteristica piuttosto insolita per una point bar che solitamente, come osservato nelle Unità 1 e 2, tendono ad avere il tipico trend fining upward. Trend coarsening upward sono invece più tipici di una side bar, deposito fluviale che si accumula in un tratto rettilineo del canale. In questa Unità, a causa della

granulometria media elevata, sono inoltre osservabili numerosi clasti embricati orientati con l'asse lungo perpendicolare alla direzione di flusso.

6.5 Unità Sedimentaria 5

L'unità 5 è caratterizzata da un deposito di sedimenti più fini, $D_{50} = 1 - 1,60$ mm, che mostrano un maggior grado di omogeneità. La taglia più comune è quella della sabbia, scarsi sono i sedimenti ghiaiosi mentre sono praticamente assenti ciottoli di dimensioni elevate. Analogamente alle Unità 1 e 2, si osserva un generale trend fining upward. La parte più superiore dell'Unità è infatti formata da sabbia fine mentre la base è caratterizzata da sedimenti più grossolani. Inoltre si osserva un leggero trend fining riverward che indica, contrariamente per il trend coarsening riverward osservato nelle Unità 1 e 2, una diminuzione di energia dell'evento contemporaneamente alla deposizione dell'Unità 5.

Il deposito dell'Unità 5 è caratterizzato principalmente da dune che formano stratificazioni incrociate e indicano una direzione di flusso sub-parallelo alla sezione con direzione verso Sud-Est. In sezione sono inoltre visibili diversi riempimenti di scour, depressioni generate dall'erosione del flusso turbato da un ostacolo.

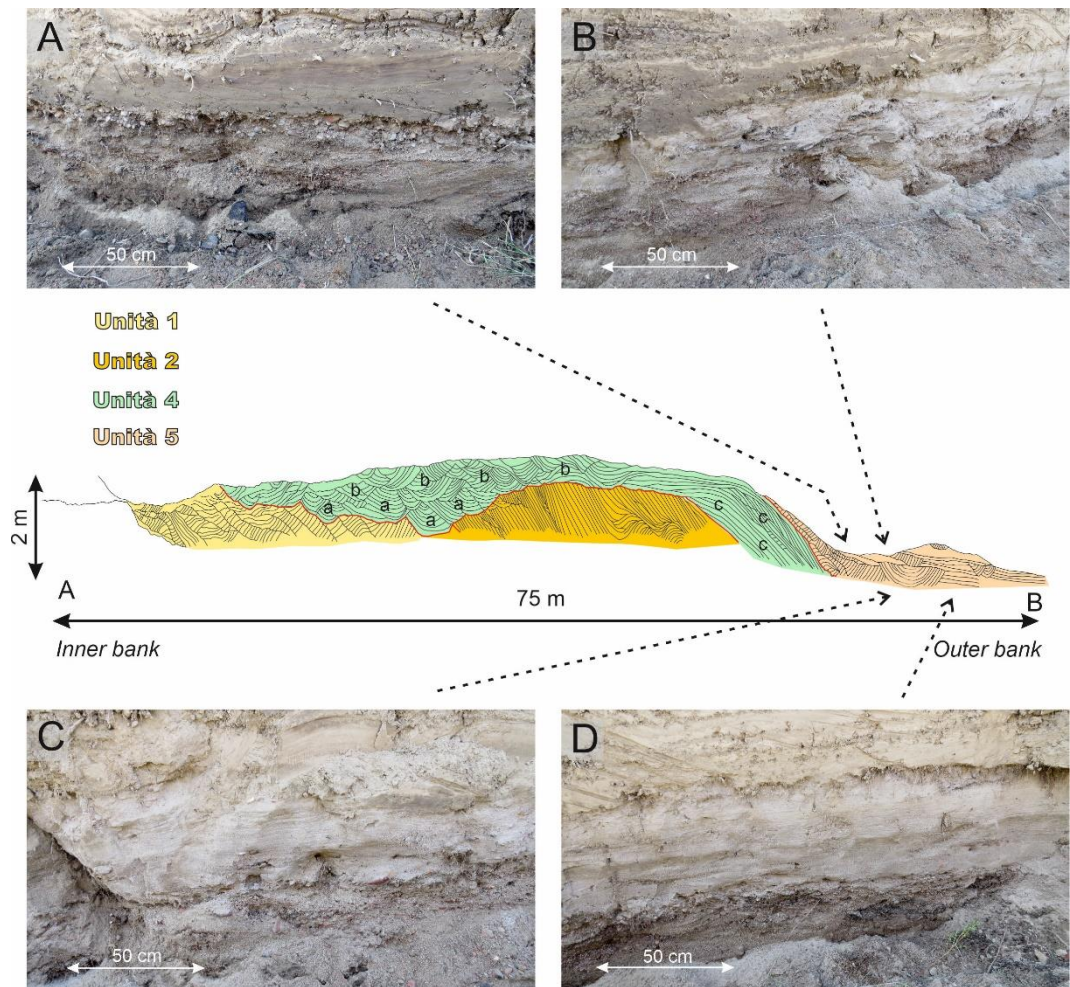


Fig. 6.5 *Unità 5. Quest'unità presenta caratteristiche e strutture simili all'Unità 1. A – B –D) Sedimenti a granulometria fine come sabbia fine e silt. C) Riempimenti di scour.*

7. CALCOLI E RISULTATI

Generalmente, più aumenta la profondità del canale, maggiore è la capacità del flusso di trasportare sedimenti di dimensioni maggiori. Le particelle in sospensione tendono a fermarsi cadendo sul fondo quando lo shear stress esercitato dal flusso su di esse diventa inferiore dello shear stress critico. Lo shear stress critico τ_c [$N m^{-2}$] può essere definito sia come il valore minimo di shear stress che è necessario affinché le particelle si mettano in movimento sia come il valore di shear stress alla quale le particelle vengono deposte. Conoscendo la granulometria media dei sedimenti depositati in un certo intervallo temporale è quindi possibile calcolare la profondità dell'acqua in quello specifico tempo deposizionale. Tramite analisi granulometriche, si riesce così non solo a calcolare la massima portata corrispondente al picco di piena (Baker, 2008. Hall et al., 2014) ma anche a ricostruire l'idrologia dell'evento di piena.

7.1 Shear stress critico (τ^*) e diagramma di Shield

Lo shear stress critico, solitamente, viene ricavato tramite un metodo grafico utilizzando il Diagramma di Shield (Fig. 7.1.A). Questo metodo si basa nel ricavare il valore adimensionale di shear stress critico $(\tau_*)_{cr}$ e il numero di Reynold (Re):

$$(\tau_*)_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{(\rho_s - \rho)gD} \quad Re = \frac{\mu^*D}{\nu} \quad \text{con } \mu^* = gdS$$

dove ρ_s = densità dei sedimenti [$2,65 \text{ g/cm}^3$], ρ = densità dell'acqua [$1,00 \text{ g/cm}^3$], g = accelerazione di gravità [$9,8 \text{ m/s}^2$], D = diametro delle particelle, ν = viscosità dinamica [$1.31 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$], μ^* = velocità di shear, d = profondità del flusso e S = slope.

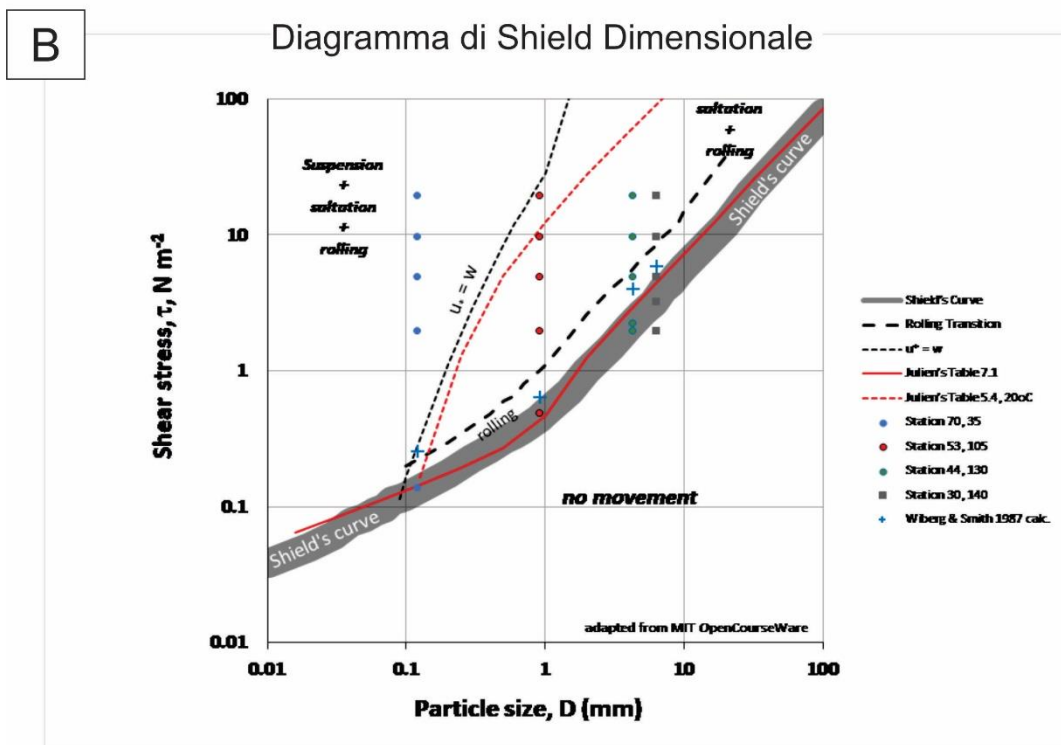
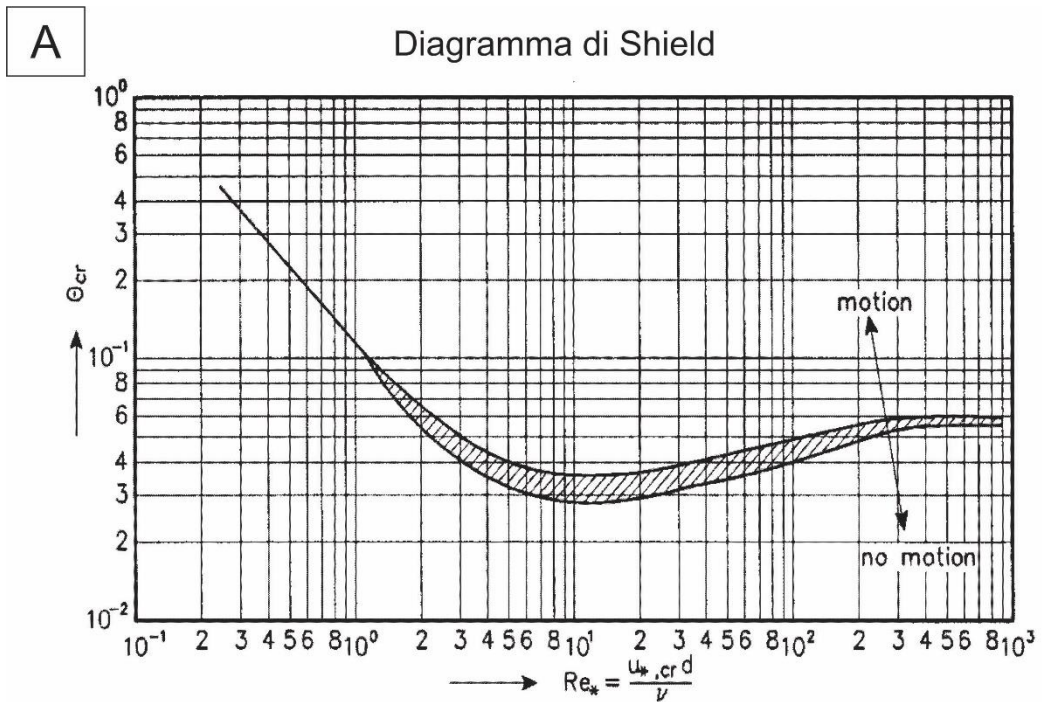


Fig. 7.1 A) Diagramma di Shield (modificato da Middleton and Southward, 1984). B) Diagramma di Shield dimensionale per sedimenti omogenei. I dati riferiti a PR163 sono plottati per differenti valori di h (profondità del flusso) = 2.0, 1.0, 0.5, 0.2 m. E' stato plottato poi un quinto valore di profondità del flusso che corrisponde a un valore di shear stress tale per cui interseca la curva di Shield rappresentando la profondità di flusso critica (Station 70 – 0,0014 m; Station 53 – 0,05 m; Station 44 – 0,23 m; Station 30 – 0,33 m).

Grazie alle analisi granulometriche effettuate sui campioni raccolti lungo tutta la sezione *PR163* è possibile ricavare il valore di D_{50} e determinare così lo shear stress critico (τ^*) e la profondità del flusso (d) assumendo un certo valore di inclinazione del substrato (S). Il valore di profondità del flusso alla quale si raggiunge lo shear stress critico viene definito come valore di profondità critica del flusso (*critical water depth*) h_{cr} [m].

Per stimare $\tau_c \rightarrow u^*$ e ricavare la profondità del flusso (d) è necessario però utilizzare un diagramma di Shield dimensionale (*Fig. 7.1.B*).

Il limite del metodo del Diagramma di Shield è che si basa sulla condizione ideale che la taglia granulometrica delle particelle trasportate, D [cm], sia la stessa di quelle che compongono il substrato sottostante k_s [cm]. Questa assunzione purtroppo non corrisponde quasi mai alla realtà. Se le particelle del substrato sono più grosse di quelle trasportate ($D/k_s < 1$) quest'ultime possono rimanere incastrate e aumentare così notevolmente lo shear stress minimo per metterle in movimento. Viceversa, se la particelle che compongono il substrato presentano una granulometria minore di quelle trasportate ($D/k_s > 1$) queste tendono a scivolare più facilmente sul fondo abbassando così il valore di shear stress critico.

Nella realtà, durante un evento alluvionale, vengono trasportati dal flusso un mix eterogeneo di sedimenti, sia in sospensione che sul fondo, sopra a un substrato caratterizzato anch'esso da una granulometria eterogenea. Man mano che la profondità del flusso cala, diminuisce anche lo shear stress esercitato sulle particelle che vengono trasportate. Le particelle caratterizzate da maggiore granulometria tendono a decantare sul fondo più rapidamente di quelle fini poiché presentano un valore di shear stress critico maggiore. Il valore di profondità del flusso alla quale si raggiunge lo shear stress critico viene definito come valore di profondità del flusso critica h_{cr} [m].

7.2 Profondità critica di flusso

In questo lavoro, per ottenere risultati più realistici rispetto al quelli calcolati col diagramma di Shield, è stata utilizzata l'equazione di Wiberg and Smith (Wiberg and Smith, 1987) considerando il diametro delle particelle trasportate (D) equivalente al diametro delle particelle che compongono il substrato (ks) e un angolo di riposo ϕ_0 costante:

$$(\tau_*)_{cr} = \frac{2}{(C_D)_{cr}} \frac{1}{\langle f^2(z/z_0) \rangle} \frac{(\tan\phi_0 \cos\beta - \sin\beta)}{[1 + (F_L/F_D)_{cr} \tan\phi_0]} \quad (1)$$

Dove C_D rappresenta il coefficiente di resistenza di una particella di diametro D ($D = ks$); $\langle f^2(z/z_0) \rangle$ è la media del quadrato del profilo di velocità sulla sezione trasversale delle particelle; F_L è la forza di sollevamento che agisce sulle particelle (*lift force*); F_D è la resistenza sulle particelle (*drag force*); β rappresenta l'inclinazione del substrato e ϕ_0 rappresenta l'angolo di riposo delle particelle sul substrato che è stato approssimato a $61,5^\circ$. Come valore β di inclinazione del substrato è stato utilizzato quello dell'alluvione del 1978 nel tratto tra Moorhead e Broadus, distanti 58 km in linea d'aria e 89 km lungo fiume. Dall'equazione (1) si ricava un valore di profondità del flusso critica data da:

$$h_{cr} = (\rho_s - \rho) g D \frac{(\tau_*)_{cr}}{\rho g \beta} \quad (2)$$

Questa profondità critica è stata calcolata utilizzando il massimo valore granulometrico (D_{95}) in modo da calcolare la profondità del flusso quando le particelle di maggiore granulometria si sono depositate in ciascuna stazione di campionamento lungo la sezione PR163.

Successivamente è stata ricalcolata la profondità del flusso utilizzando nuovamente l'equazione di Wiberg and Smith (1) considerando però un valore granulometrico delle particelle trasportate (D_{95}) su un substrato avente una granulometria D_{84} . In questo caso l'angolo di riposo delle particelle è variabile e dipende dal rapporto D/ks tramite l'equazione:

$$\phi_0 = 61.5^\circ (D/k_s)^{-0.3} \quad (3)$$

Confrontando la profondità di flusso calcolata ($D = D_{95}$ con $k_s = D_{84}$) e l'idrogramma di piena registrato a Moorhead e a Broadus si nota una notevole somiglianza (Fig. 7.2).

Grazie allo studio e all'interpretazione delle quattro unità sedimentarie che compongono il deposito, argomento trattato in dettaglio nel capitolo successivo (Cap. 8), è stato possibile suddividere l'evento di piena in 39 momenti deposizionali per i quali sono stati scelti e analizzati altrettanti campioni prelevati lungo tutta la sezione PR163.

Le profondità di flusso calcolate sulla base dei valori di shear stress ottenuti sui 39 campioni, sia considerando $D = D_{95}$ e $D = k_s$ sia considerando $D = D_{95}$ e $k_s = D_{84}$, vengono plottate nei grafici (Fig. 7.3) in funzione degli intervalli temporali corrispondenti a ciascun momento deposizionale. Le due profondità di flusso calcolate risultano infatti comparabili. Per interpolare con la massima precisione i valori di shear stress è stato utilizzato un polinomio di grado 6.

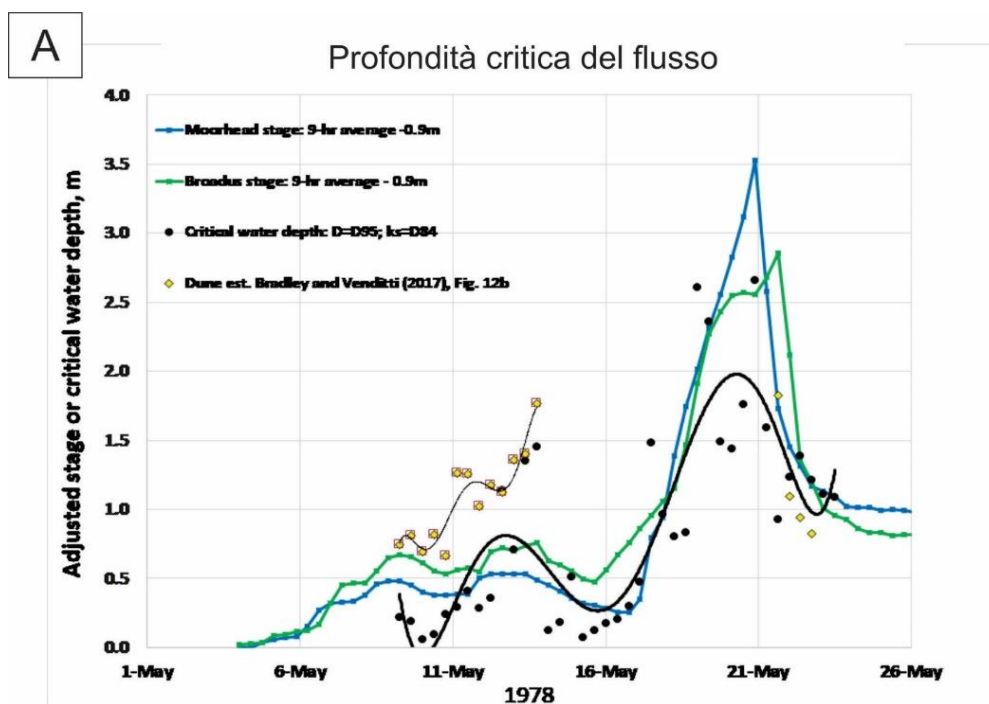


Fig. 7.2 Profondità critica di flusso alla sezione PR163 calcolata in base al valore di shear stress critico, considerando dei sedimenti trasportati (D_{95}) che si muovono su un substrato (D_{84}), comparata rispetto all'idrogramma di piena ottenuto a Moorhead e Broadus.

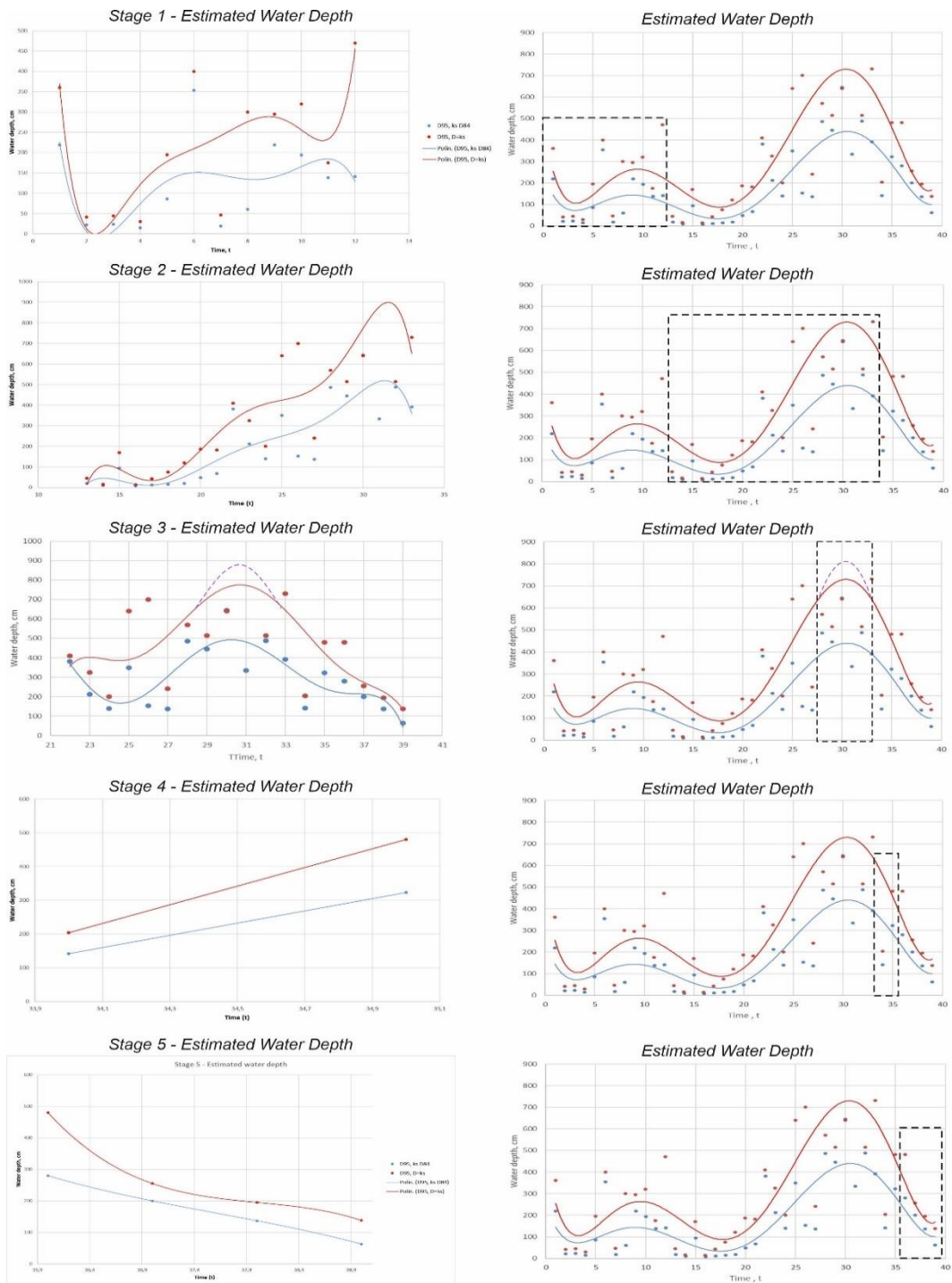


Fig 7.3 Grafici che plottano i valori di profondità del flusso calcolati sulla base delle analisi granulometriche effettuate sui campioni raccolti al variare del tempo calcolato sulla base dell'interpretazione dei depositi (Vedi Cap. 8). In rosso sono plottati i valori di profondità di flusso calcolati utilizzando un diametro delle particelle trasportate pari al D95 con un substrato formato da particelle dello stesso diametro. In blu invece sono plottati i valori di profondità di flusso calcolati utilizzando un diametro delle particelle trasportate pari al D95 con un substrato formato da particelle pari al D84. I valori di profondità di flusso calcolata tramite i due metodi risultano comparabili.

8. INTERPRETAZIONE DEI DEPOSITI E DISCUSSIONE

Grazie all'osservazione e all'analisi dei depositi descritti al Cap. 6, è stato possibile effettuare le seguenti interpretazioni con lo scopo di ricostruire lo sviluppo della point bar e le dinamiche dell'evento di piena del 1978 alla sezione PR163. Per ognuna delle quattro unità sedimentarie individuate nel deposito sono state associate altrettante fasi deposizionali corrispondenti. È stata individuata inoltre una fase erosiva che, come descritto in dettaglio al Cap. 6, è testimoniata da una marcata troncatura erosiva. È stato quindi possibile ricostruire l'intero evento di piena in tutte le sue cinque fasi caratterizzate da intensità e dinamiche di flusso differenti tra loro.

8.1 Fase 1 – Unità Sedimentaria 1

La prima fase dell'evento di piena è testimoniata nel record sedimentario dall'Unità 1. Durante la Fase 1 il Powder River è caratterizzato da una portata moderata anche se in aumento. Il flusso, seguendo il letto del fiume in direzione Nord, impatta contro la sponda esterna del meandro impilando l'acqua a ridosso della zona di outer bank. L'acqua, spinta verso il basso dalla forza di gravità, tende a spostarsi verso la zona di inner bank in direzione Sud-Est. Questo meccanismo, come spiegato al Cap. 2, tende a creare un flusso caratterizzato da una geometria elicoidale. Questo movimento elicoidale erode sedimenti dalla sponda esterna del meandro depositandoli nella parte più interna. Si vanno così a generare delle dune nella zona di inner bank espandendo la point bar verso il centro del canale (*Fig. 8.1A*).

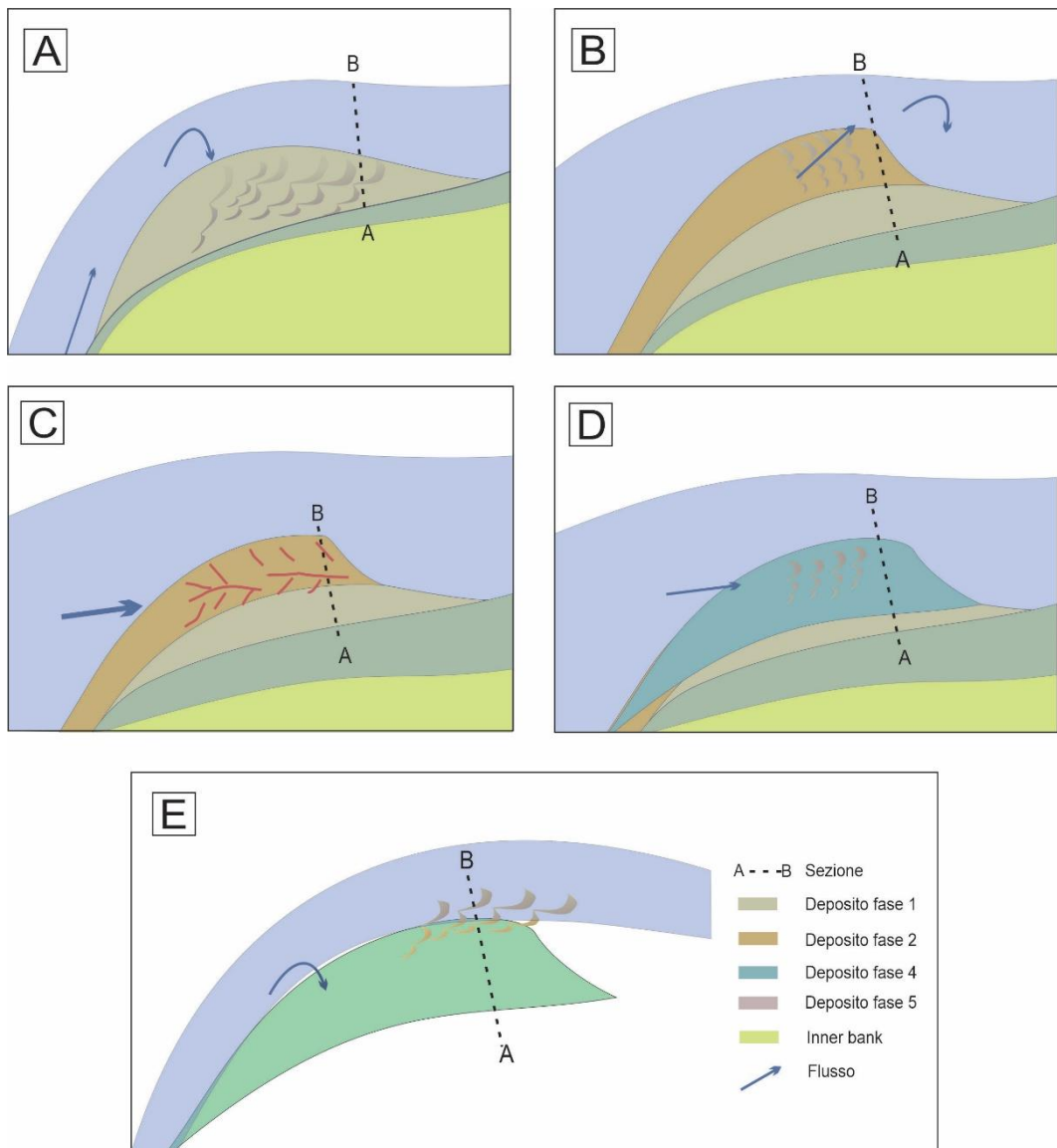


Fig. 8.1 A) *Illustrazione schematica che mostra il flusso, caratterizzato da moderata velocità, in direzione sub-parallela rispetto alla sezione A-B che, impattando contro l'outerbank, assume geometria elicoidale.* B) *Illustrazione schematica che mostra il flusso, caratterizzato da velocità crescente, in direzione simile rispetto alla sezione A-B che, impattando contro l'outerbank, assume geometria elicoidale.* C) *Illustrazione schematica che mostra la situazione di flusso perpendicolare rispetto alla sezione che, a causa dell'elevata velocità, taglia il meandro passando sopra la barra ed erodendola parzialmente.* D) *Illustrazione schematica che mostra la situazione di flusso perpendicolare rispetto alla sezione ma con velocità calante rispetto alla fase 3, permettendo la deposizione di sedimenti.*

Durante questa fase il meandro tende appunto ad espandersi lateralmente. Una delle principali evidenze nel deposito è data dalla formazione di un trend fining upward nell'Unità Sedimentaria 1. Il flusso secondario elicoidale, poiché si sviluppa con una velocità di flusso moderata, è tipico delle piene di portata ordinaria che si verificano con cadenza annuale. Il trend fining upward, come trattato al Cap. 2, è infatti una caratteristica tipica dei depositi di point bar.

Il graduale aumento della velocità del flusso durante la prima fase è testimoniato nel record sedimentario dalla generazione di un trend coarsening riverward dovuto al fatto che man mano che il flusso aumenta di intensità la barra si accresce verso l'outer bank, in direzione del canale appunto. La parte sommitale dell'Unità 1 viene successivamente erosa durante la Fase 3 a più elevata energia.

8.2 Fase 2 – Unità Sedimentaria 2

La seconda fase dell'evento di piena è testimoniata dalla deposizione di un elevato volume di sedimenti formati principalmente da un'unica grossa duna (Unità 2). Questa fase, come si può osservare nella *Fig. 7.3*, è caratterizzata inizialmente da una diminuzione della portata del Powder River per poi, successivamente, raggiungere valori prossimi al picco di piena. Il flusso, pur mantenendo una certa componente elicoidale, man mano che aumenta la velocità della corrente, tende a direzionarsi verso Est disponendosi quasi ortogonale rispetto all'asse del meandro (*Fig. 8.1B*). La componente elicoidale del flusso, come nell'Unità 1, è testimoniata dalla presenza di un trend fining upward nel deposito dell'Unità 2. Analogamente alla Fase 1, l'aumento della velocità di flusso verso il picco di piena consente la deposizione di materiale via via più grossolano mentre, contemporaneamente, la point bar si accresce verso l'outer bank. Come risultato, così come nell'Unità 1, anche nell'Unità 2 si forma un trend di coarsening riverward.

Nella Fase 2 l'intensità del flusso è abbastanza elevata da prendere in carico una grossa quantità di sedimenti. Come già visto nel Cap. 6, si deposita un unico

fronte formato da una duna di notevole spessore che si accresce verso la zona di outer bank espandendo la point bar. Come l'Unità 1 anche la parte sommitale dell'Unità 2 viene parzialmente erosa dalla successiva Fase 3.

8.3 Fase 3 – Transizione tra Unità 2 e Unità 4

Quando la portata del Powder River diventa massima si entra in pieno nel regime erosivo. In questa fase la velocità del flusso diventa talmente elevata da assumere una direzione Nord-Est e tagliare trasversalmente il meandro (*Fig. 8.1C*). La portata è tale da far uscire l'acqua dal letto del fiume inondando un'elevata porzione di piana alluvionale circostante. Il risultato è lo sviluppo di una terza fase non deposizionale che, in corrispondenza del picco di piena, diventa addirittura erosiva. In questa fase vengono infatti asportate parti dei depositi formati nelle fasi precedenti. Per questo motivo alla fase più energetica della piena non corrisponde nessuna unità sedimentaria ma, piuttosto, una netta troncatura erosiva dei depositi precedenti.

In questo lavoro la profondità di flusso è stata calcolata, come illustrato al Cap. 7, in base alle analisi granulometriche eseguite sui campioni che si sono depositi in determinate condizioni di flusso. Per questo motivo, per la Fase 3, non essendo rappresentata da alcun record sedimentario, non è possibile calcolare alcun valore di profondità del flusso. È comunque possibile effettuare alcune ipotesi grazie al confronto con l'idrogramma di piena registrato a Moorhead e a Broadus. Tale ipotesi viene illustrata tramite una curva tratteggiata in *Fig. 7.3*.

8.4 Fase 4 – Unità Sedimentaria 4

La quarta fase dell'evento è testimoniata nel record sedimentario dalla complessa Unità 4. Durante questa fase la velocità di flusso si mantiene molto elevata, anche se leggermente minore rispetto alla precedente fase erosiva. La direzione di flusso rimane Nord-Est continuando a tagliare perpendicolare l'asse del meandro. Il

flusso, essendo leggermente meno intenso, permette l'accumulo di sedimenti caratterizzati da elevata granulometria.

La caratteristica peculiare che si osserva nei depositi relativi alla fase 4 è quindi il netto cambio della direzione di flusso rispetto ai precedenti depositi della fase 1 e 2. Da una direzione di flusso iniziale Sud-Est, dovuta al movimento elicoidale, a causa dell'aumento dell'intensità della piena si passa gradualmente a un flusso diretto Nord-Est. Ciò corrisponde a una diversa direzione di crescita della point bar. Mentre nelle prime due fasi la barra si accresce verso la zona di outer bank, in questa fase si accresce invece downstream, in direzione Nord-Est ovvero perpendicolare rispetto alla sezione osservata. Questa caratteristica è di fondamentale importanza per analizzare in modo corretto l'evoluzione temporale della point bar. Mentre nelle prime due fasi infatti la barra si sviluppa verso l'outer bank, traducendosi in una crescita verso destra nella sezione PR163, nella quarta fase si sviluppa sottocorrente in direzione Nord-Est, ovvero verso l'alto nella sezione osservata (*Fig. 8.1D*). Durante questa fase il meandro non si espande più lateralmente, come avveniva nelle fasi 1 e 2, ma tende a traslare sottocorrente in direzione Nord-Est. Nella fase più intensa della piena la point bar tende quindi a comportarsi in modo analogo a una barra che si imposta in un tratto rettilineo del canale, ovvero una side bar. L'evidenza principale è data proprio dal trend coarsening upward che caratterizza l'Unità 4. Questo aspetto, come vedremo meglio nel paragrafo 8.6, è una delle principali differenze osservate tra i depositi di un evento alluvionale ordinario e uno di un evento estremo.

8.5 Fase 5 – Unità Sedimentaria 5

La Fase 5 è rappresentata nel deposito sedimentario dall'Unità 5. Durante la quinta e ultima fase la velocità di flusso e la portata del canale tendono progressivamente a scemare poiché si va esaurendo l'evento di piena. Il flusso, non essendo più sufficientemente veloce, torna confinato nel letto del fiume. Impattando contro la sponda esterna del meandro torna ad assumere il movimento

elicoidale descritto in precedenza nelle fasi 1 e 2, tipico di flussi a regime più moderati, tornando ad accrescere la point bar verso l'outer bank (*Fig. 8.1E*).

Nel deposito risultano ben visibili in sezione alcuni scour, depressioni formate dall'azione erosiva del flusso che impattando contro un ostacolo che può essere di varia natura, da un clasto di grosse dimensioni a un tronco di un albero, crea un piccolo vortice sottocorrente che erode il terreno formando delle depressioni. Successivamente gli scour possono essere riempiti da sedimenti generando la tipica geometria concava verso l'alto.

8.6 Discussione

Capire e interpretare la corretta evoluzione temporale della barra PR163 è fondamentale per ricostruire il corretto sviluppo dell'evento di piena del 1978. Ciò è possibile solo grazie a una scrupolosa e rigorosa analisi delle strutture sedimentarie e degli indicatori di flusso presenti nel deposito. Come illustrato in *Fig. 8.2B*, la point bar si è accresciuta dapprima verso l'outer bank (Fase 1 e 2) per poi, in seguito al cambio di direzione di flusso dovuto all'aumento della portata della piena, accrescersi maggiormente in direzione downstream (Fase 4). Nella fase calante della piena (Fase 5) la barra è tornata ad espandersi verso l'outer bank.

Lo sviluppo di una point bar durante un evento di piena estremo non avviene con le stesse modalità con cui si sviluppa un deposito di meandro in seguito a un evento di piena di ordinaria portata. La differenza è concentrata unicamente nella fase dell'evento a maggiore energia, identificato nel caso di studio con la Fase 4. La Fase 3, sebbene a più elevata energia, non ha lasciato alcun deposito. Durante la Fase 4 infatti, il flusso non rimane più confinato all'interno dell'alveo ma, tagliando trasversalmente la barra, tende ad accrescerla parallelamente a sé. Il cambio di direzione di crescita della barra comporta un passaggio da sedimenti caratterizzati da un trend di fining upward (Unità 1, 2 e 5), tipico delle point bars, a sedimenti formati da un trend di coarsening upward (Unità 4), tipico delle side

bars (Fig. 8.2A). Il cambio di direzione di crescita della point bar durante la Fase 4 causa inoltre, analogamente a una side bar, la formazione di una sorta di armoring della barra.

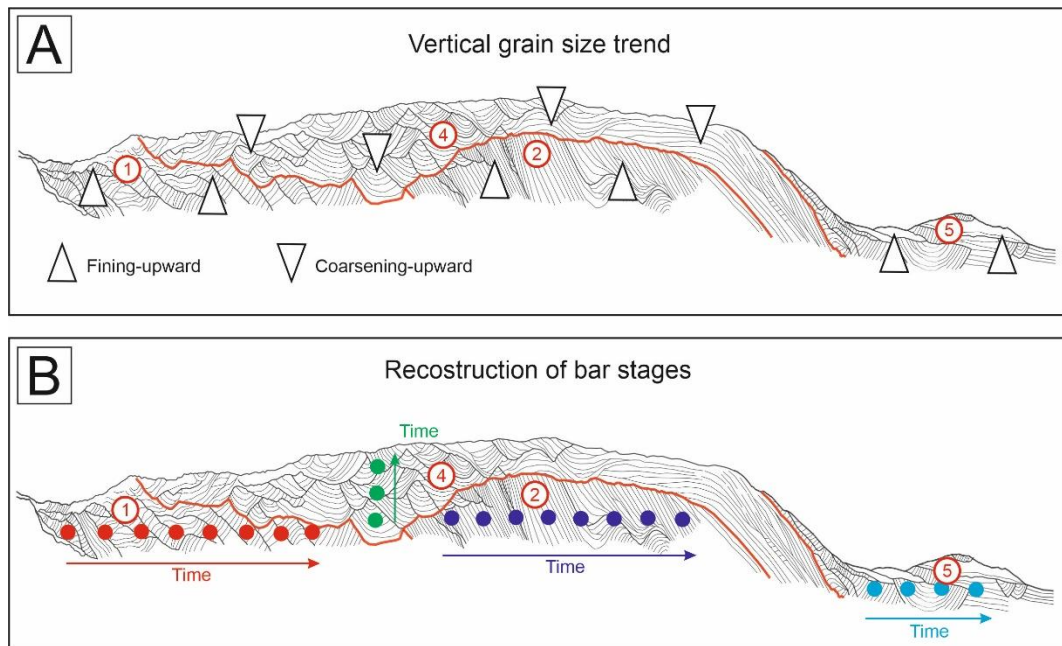


Fig. 8.2 A) Illustrazione schematica della sezione PR163 raffigurante i trend granulometrici verticali osservati in ciascuna unità sedimentaria. B) Illustrazione schematica della sezione PR163 raffigurante la ricostruzione temporale dello sviluppo della barra.

9. CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi, basato sull'analisi sedimentologica di una point bar del Powder River (Montana, US) formata in seguito a un evento di piena estremo avvenuto nel maggio 1978, ha prodotto risultati che possono essere riassunti nei seguenti punti:

1. Le dinamiche di accrescimento di una point bar variano in relazione alle differenti tipologie di flusso che caratterizzano le diverse fasi dell'evento di piena.
2. Da un deposito di point bar è possibile ricostruire l'idrologia dell'evento di piena che l'ha formato.
3. Una point bar formata durante un evento di piena estremo non presenta alcune delle principali caratteristiche diagnostiche delle barre descritte dai modelli classici. Gli attuali modelli di formazione e sviluppo di una point bar non sono quindi validi per descrivere un deposito formato da un evento di piena estremo.
4. Se durante un evento di piena il flusso supera una certa velocità, una point bar tende a sviluppare caratteristiche analoghe a una side bar migrando sottocorrente in direzione parallela al flusso e formando nel deposito un trend di coarsening upward.

BIBLIOGRAFIA

Allen, J. R. L. 1982, Sedimentary Structures: Their Character and Physical Basis, Volume II. *Developments in Sedimentology*, 30, 71009-4.

Baker, V. R. (2008). Paleoflood hydrology: Origin, progress, prospects. *Geomorphology*, 101(1-2), 1-13.

Blott, S. J., & Pye, K. (2001). GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth surface processes and Landforms*, 26(11), 1237-1248.

Bridge, J. S. (2003). Rivers and floodplains: Forms. *Processes and Sedimentary Record: Wiley-Blackwell*.

Church, M. (2006). Bed material transport and the morphology of alluvial river channels. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 34, 325-354.

Cohen, T. J., & Nanson, G. C. (2008). Topographically associated but chronologically disjunct late Quaternary floodplains and terraces in a partly confined valley, south-eastern Australia. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 33(3), 424-443.

Collinson, J. D., & Thompson, D. B. (1982). Sedimentary Structures: London. *George Allen and*.

Flores, R. M., & Ethridge, F. G. (1985). Evolution of intermontane fluvial systems of Tertiary Powder River basin, Montana and Wyoming. Rocky Mountain Section (SEPM).

Furbish, D. J. (1988). River-bend curvature and migration: How are they related?. *Geology*, 16(8), 752-755.

- Gay, G. R., Gay, H. H., Gay, W. H., Martinson, H. A., Meade, R. H., & Moody, J. A. (1998). Evolution of cutoffs across meander necks in Powder River, Montana, USA. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Group*, 23(7), 651-662.
- Ghinassi, M., Ielpi, A., Aldinucci, M., & Fustic, M. (2016). Downstream-migrating fluvial point bars in the rock record. *Sedimentary Geology*, 334, 66-96.
- Ghinassi, M., Moody, J., & Martin, D. (2019). Influence of extreme and annual floods on point-bar sedimentation: Inferences from Powder River, Montana, USA. *GSA Bulletin*, 131(1-2), 71-83.
- Hagstrom, C. A., Leckie, D. A., & Smith, M. G. (2018). Point bar sedimentation and erosion produced by an extreme flood in a sand and gravel-bed meandering river. *Sedimentary geology*, 377, 1-16.
- Hall, J., Arheimer, B., Borga, M., Brázdil, R., Claps, P., Kiss, A., ... & Llasat, M. C. (2014). Understanding flood regime changes in Europe: A state of the art assessment.
- Hembree, C. H. (1952). *Sedimentation and chemical quality of water in the Powder River drainage basin, Wyoming and Montana* (Vol. 170). US Department of the Interior, Geological Survey.
- Wiberg, P. L., & Smith, J. D. (1987). Calculations of the critical shear stress for motion of uniform and heterogeneous sediments. *Water resources research*, 23(8), 1471-1480.
- Leopold, L. B., & Miller, J. P. (1954). *A postglacial chronology for some alluvial valleys in Wyoming* (p. 90). Washington, DC: US Government Printing Office.
- Marchetti, M. (2000). *Geomorfologia fluviale* (pp. 1-247). Pitagora.
- Meade, R. H., & Moody, J. A. (2013). Erosional and depositional changes wrought by the flood of May 1978 in the channels of Powder River, southeastern Montana. US Department of the Interior, US Geological Survey.

- Martinson, H. A. (1984). *Channel changes of Powder River between Moorhead and Broadus, Montana, 1939-1978* (No. 83-4128). US Geological Survey,.
- Moody, J. A. (1990). Channel changes at cross sections of the Powder River between Moorhead and Broadus. *USGS Open-File Report 89-407*.
- Moody, J. A., & Meade, R. H. (2008). Terrace aggradation during the 1978 flood on Powder River, Montana, USA. *Geomorphology*, 99(1-4), 387-403.
- Moody, J. A., & Meade, R. H. (2014). Ontogeny of point bars on a river in a cold semi-arid climate. *GSA Bulletin*, 126(9-10), 1301-1316.
- Moody, J. A., & Meade, R. H. (2018). *Decadal changes in channel morphology of a freely meandering river—Powder River, Montana, 1975–2016* (No. 2018-1012). US Geological Survey.
- Moody, J. A. (2019). Dynamic relations for the deposition of sediment on floodplains and point bars of a freely-meandering river. *Geomorphology*, 327, 585-597.
- Nanson, G. C., Price, D. M., Jones, B. G., Maroulis, J. C., Coleman, M., Bowman, H., ... & Larsen, J. R. (2008). Alluvial evidence for major climate and flow regime changes during the middle and late Quaternary in eastern central Australia. *Geomorphology*, 101(1-2), 109-129.
- Parrett, C., Carlson, D. D., Craig, G. S., & Chin, E. H. (1984). *Floods of May 1978 in southeastern Montana and northeastern Wyoming* (No. 1244). USGPO; For sale by the Distribution Branch, US Geological Survey,.
- Pizzuto, J. E. (1994). Channel adjustments to changing discharges, Powder River, Montana. *Geological Society of America Bulletin*, 106(11), 1494-1501.
- Pizzuto, J. E., Moody, J. A., & Meade, R. H. (2008). Anatomy and dynamics of a floodplain, Powder River, Montana, USA. *Journal of Sedimentary Research*, 78(1), 16-28.

Schumm, S. A. (1981). Evolution and response of the fluvial system, sedimentologic implications.

Surian, N., Rinaldi, M., Pellegrini, L., Audisio, C., Duci, G., Maraga, F., ... & Ziliani, L. (2009, July). Towards a channel evolution model for alluvial rivers in Italy. In *Conference Proceedings, International Association of Sedimentologists, Alghero*.

Surian, N., Rinaldi, M., & Pellegrini, L. (2011). Channel adjustments and implications for river management and restoration. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 34, 145-152.