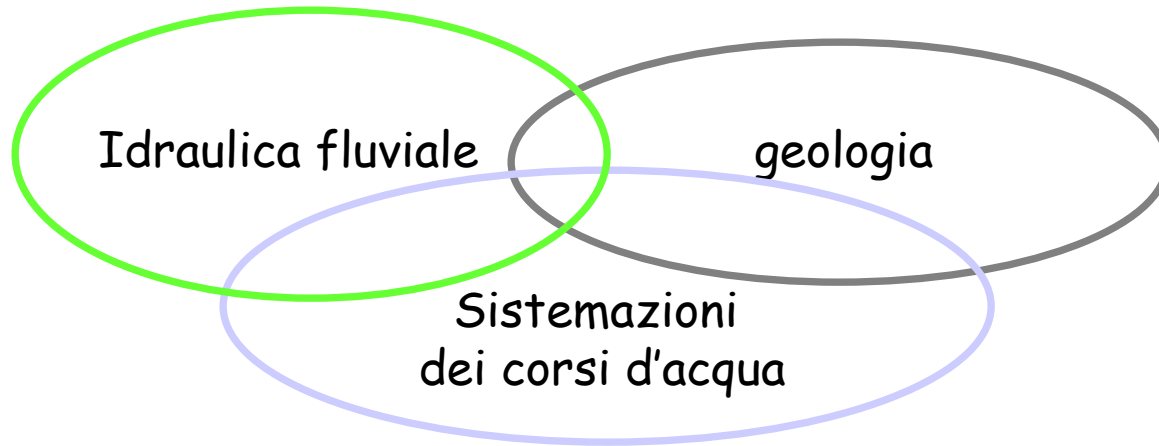


CORSO DI LAUREA TRIENNALE RTTP
Curriculum in TUTELA e RIASSETTO DEL TERRITORIO

**Corso di Tutela del paesaggio agricolo-forestale e riassetto
idraulico del territorio**

Titolare: Prof. Mario A. Lenzi

Introduzione alla morfologia fluviale



Perché si studia la fluviomorfologia ?

- Problemi di rischio idraulico (presenti e futuri)
- Problemi di approvvigionamento idrico
- Studio degli ecosistemi fluviali
- Valorizzazione della risorse ittiche

I corsi d'acqua sono gli elementi del paesaggio più dinamici che modificano le loro caratteristiche in seguito a:

- Cause naturali

 - Attività tettonica e vulcanica

 - Modificazioni del regime climatico di un bacino idrografico

 - Glaciazioni

 - Variazioni del livello medio del mare

 - Eventi meteorologici estremi

- Cause antropiche

 - Dighe e traverse (a scopi idroelettrici, potabili, irrigui)

 - Opere di mitigazione del rischio idraulico (briglie, argini, ecc..)

 - Estrazione di materiale in alveo (cave di ghiaia e sabbia)

La scala temporale dei cambiamenti può variare da tempi geologici (10^3 - 10^6 anni) a poche ore, a seconda del processo in atto !!

Anche la scala spaziale studiata dalla geomorfologia fluviale è molto ampia, passando dalle **migliaia di km** (migrazione degli alvei) ad un ordine **inferiore al metro** (variazione del profilo longitudinale e delle sezioni trasversali, migrazione delle barre)

Le due scale relative alle modifiche morfologiche (spaziale e temporale) sono generalmente strettamente interconnesse

Si possono distinguere due grandi categorie di modificazioni:

- A livello planimetrico
- A livello altimetrico



Lo spostamento planimetrico di un corso d'acqua lascia dietro di sé evidenze di paleoalvei riscontrabili per migliaia di anni e più





Una variazione verticale del profilo longitudinale porta alla formazione di terrazzi fluviali nel caso di prevalente erosione...



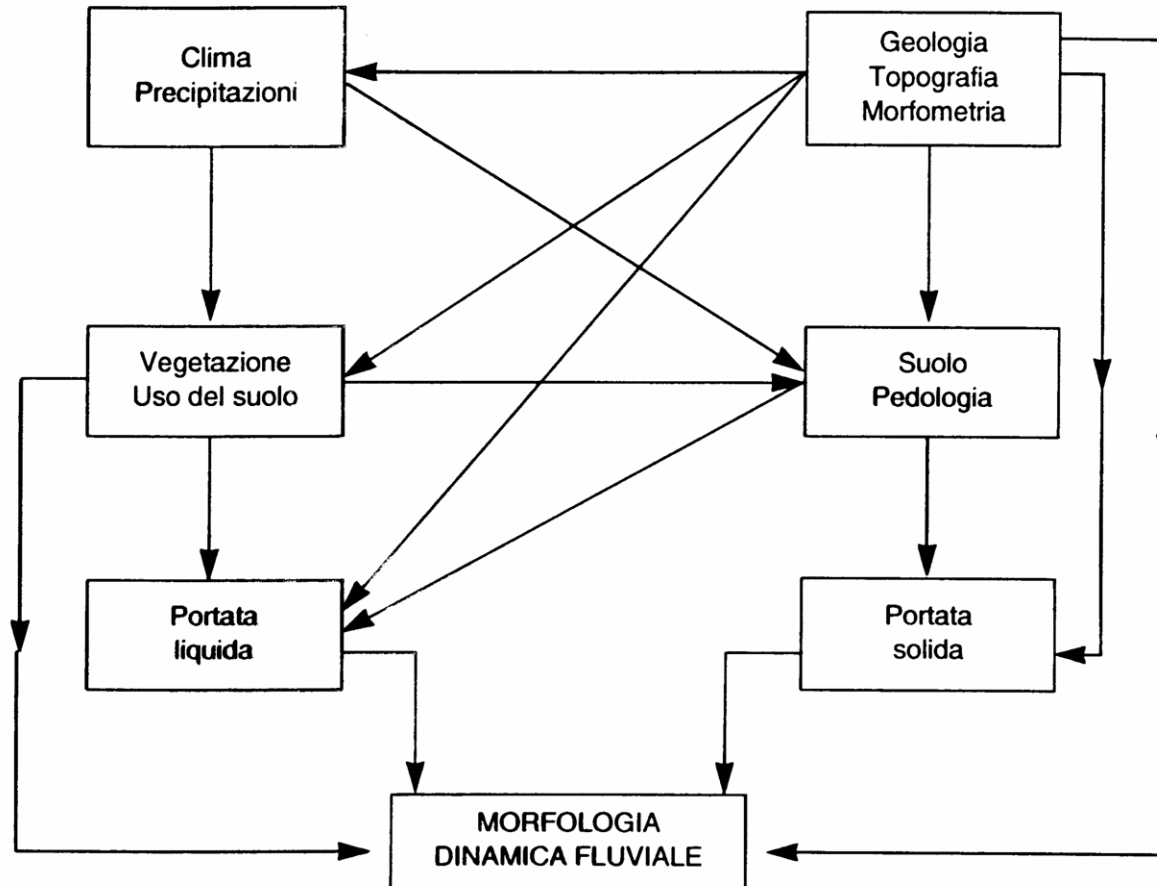


...od alla formazione
di piane e conoidi alluvionali
se prevale l'innalzamento
dovuto alla sedimentazione

In ogni caso, le modificazioni del sistema fluviale si scontrano con la presenza antropica...



Da cosa è determinata la morfologia di un tronco fluviale ?



Come si descrive un corso d'acqua ?

Parametri geometrici

- Pendenza
- Grado di intrecciamento (larghezza canale di piena/larghezza canali di magra)
- Grado di confinamento (larghezza zona di esondazione/larghezza "a piene rive")
- Rapporto larghezza/profondità
- Sinuosità (lunghezza corso d'acqua/lunghezza asse vallivo)

Parametri idraulico-sedimentologici

- Portata "a piene rive"
- Trasporto solido totale
- Trasporto solido di fondo/ trasporto solido totale
- Granulometria

Configurazione di un corso d'acqua

- Profilo longitudinale
- Sezione trasversale
- Planimetria

Portata formativa, dominante e a "piene rive"

La **portata formativa** Q_f è quella che, nell'ampio intervallo di variabilità delle portate fluviali, è responsabile della formazione della geometria della sezione trasversale.

La portata di magra, la cui durata è piuttosto prolungata, ma la cui entità è modesta, è responsabile della geometria del letto di magra negli alvei a sezione definita, tipo quelli a meandri, o dei molteplici temporanei letti di magra degli alvei intrecciati.

La portata formativa della sezione fluviale deve essere una portata relativamente elevata, ma di frequenza sufficiente (e quindi di basso tempo di ritorno) ad esplicare pienamente la sua azione formativa.

E' stato poi introdotto il concetto di **portata dominante**, ovvero quella rappresentativa di tutto l'insieme dei deflussi nei confronti di un particolare effetto di dinamica fluviale. Si definiscono così portate rappresentative per quanto riguarda il trasporto solido, per la forma dell'alveo, per la geometria delle forme planimetriche.

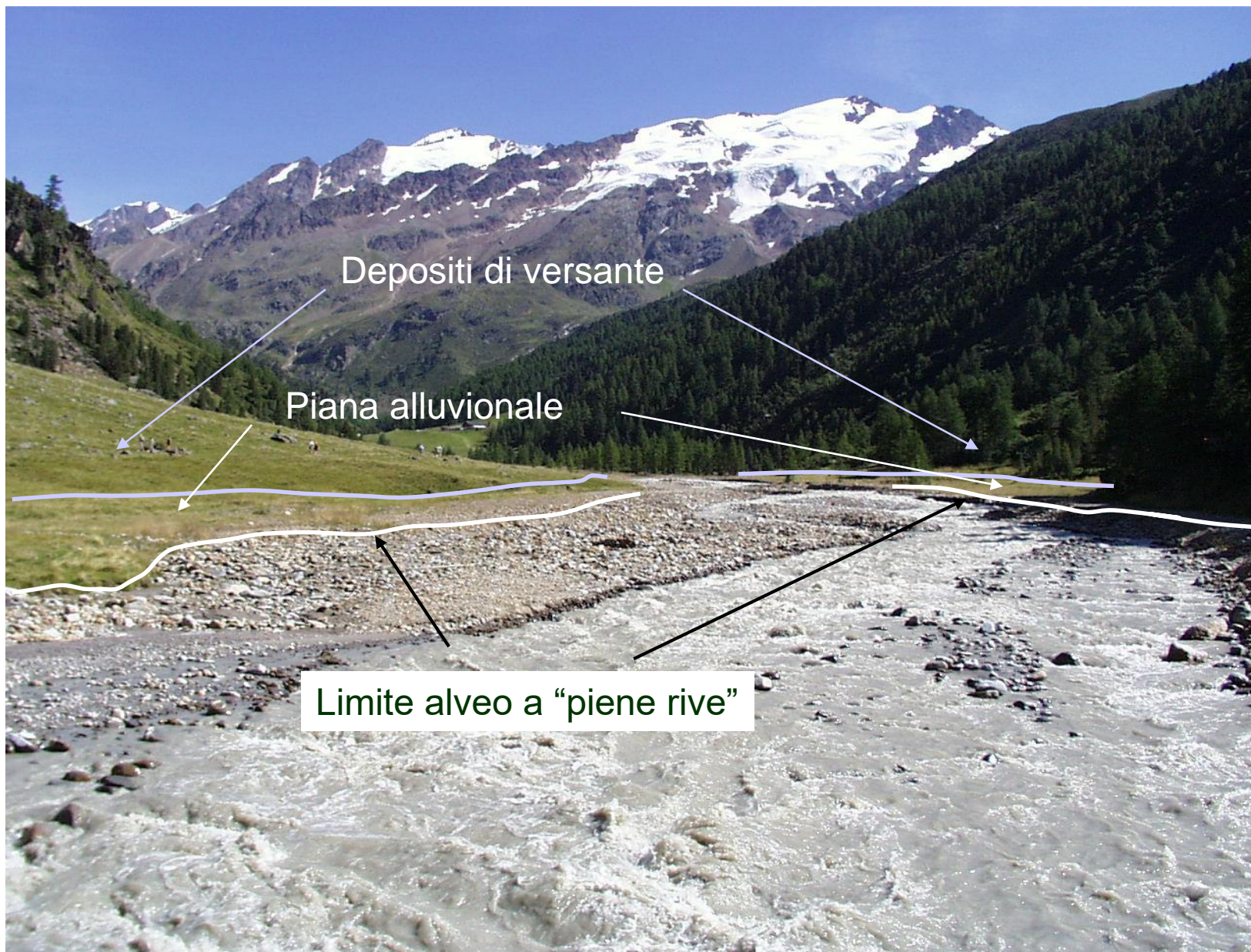
La portata "**a piene rive**" (*bankfull discharge* in letteratura anglosassone, Q_b) è quella che "riempie" l'alveo, appunto, da riva a riva.

E' stato determinato - per fiumi a bassa pendenza - che tale portata corrisponde all'incirca a quella avente un tempo di ritorno di 1-2 anni, in media 1.5 (piene ordinarie)

La portata a piene rive è una variabile molto rappresentativa per un alveo - soprattutto nei corsi d'acqua a bassa pendenza - perché i processi di erosione, trasporto e sedimentazione sono molto attivi, di poco inferiori a quelli verificantisi per livelli idrometrici superiori, quando l'incremento di portata si distribuisce su un' area maggiore (la zona di esondazione) incrementando in misura quindi minore l'energia all'interno del canale principale.

La determinazione in campo della condizione a piene rive è spesso difficoltosa. Ci si deve basare sui seguenti elementi per dedurre il livello Idrometrico corrispondente a tale condizione:

- Zona attiva di esondazione adiacente all'alveo
(indicatore più importante, ma spesso mancante nei torrenti montani !!)
- Livello di corpi sedimentari (barre). Forniscono un livello minimo.
- Cambio di vegetazione, quale il limite inferiore delle piante perenni
- Rapida variazione di pendenza delle sponde
- Cambiamento della granulometria delle sponde
(passaggio tra ciottoli-ghiaia e sabbia-limo)
- Sottoerosioni di sponda, di solito sottostanti leggermente il livello delle piene rive
- Cambiamento di colore e limite dei licheni su rocce e massi.
Spesso derivano da livelli idrometrici minori, cosicchè il livello delle piene rive è posto sopra il più alto di questi indicatori.

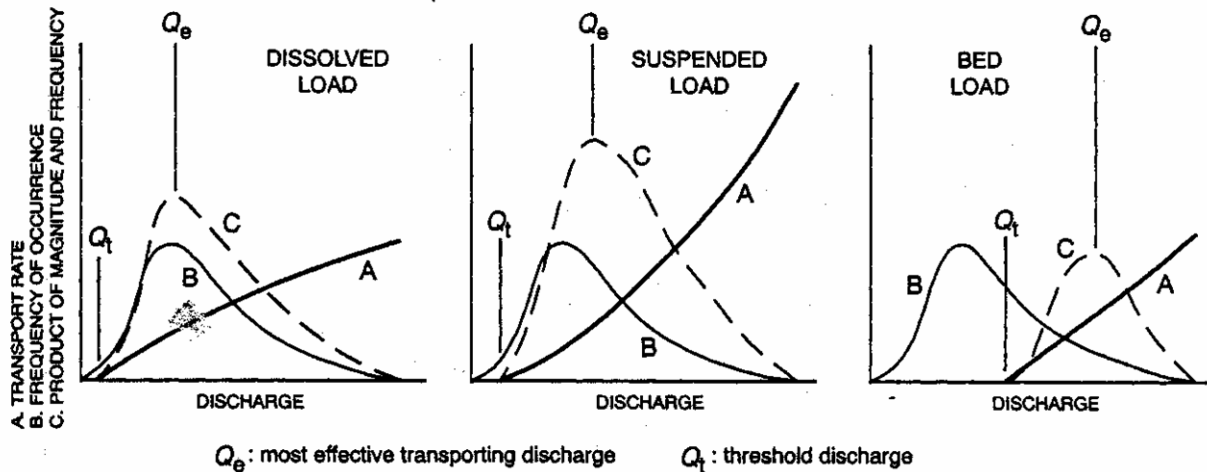


Depositi di versante

Piana alluvionale

Limite alveo a "piene rive"

Esiste poi la **portata efficace** Q_e (*effective discharge*), definita come quella che comporta il massimo trasporto solido in un lungo periodo di tempo, derivante dal prodotto tra la curva di frequenza delle portate liquide e la relazione $Q - Q_s$. Essendo i cambiamenti morfologici dipendenti dal fenomeno del trasporto solido, la portata efficace assume una rilevanza di carattere formativo.



In mancanza di dati sul trasporto solido, la portata formativa o dominante viene spesso assunta corrispondente alla portata a piene rive. Ciò implica che quest'ultima rappresenta anche la condizione per cui si ha la massima efficacia di trasporto solido.

In definitiva, spesso si assume che $Q_b = Q_f = Q_e$

Elementi del tracciato fluviale

Origine erosiva

- canale/i di deflusso
- pozze (*pools*)

Origine deposizionale

- barre
- piane alluvionali
- raschi (*riffles*)
- salti (*steps*)

Origine mista

- meandri
- forme di fondo

Una tale classificazione va intesa nel senso di processi prevalenti, in quanto tutti gli elementi sono passibili sia di erosione che deposizione a seconda del tirante idrico e dell'entità e tipologia dell'alimentazione solida

L'insieme di questi elementi determina la fisionomia e l'idraulica dei corsi d'acqua.

Sono per la maggior parte interconnessi, nel senso che uno determina la formazione di altri e ne è a sua volta influenzato

Barre

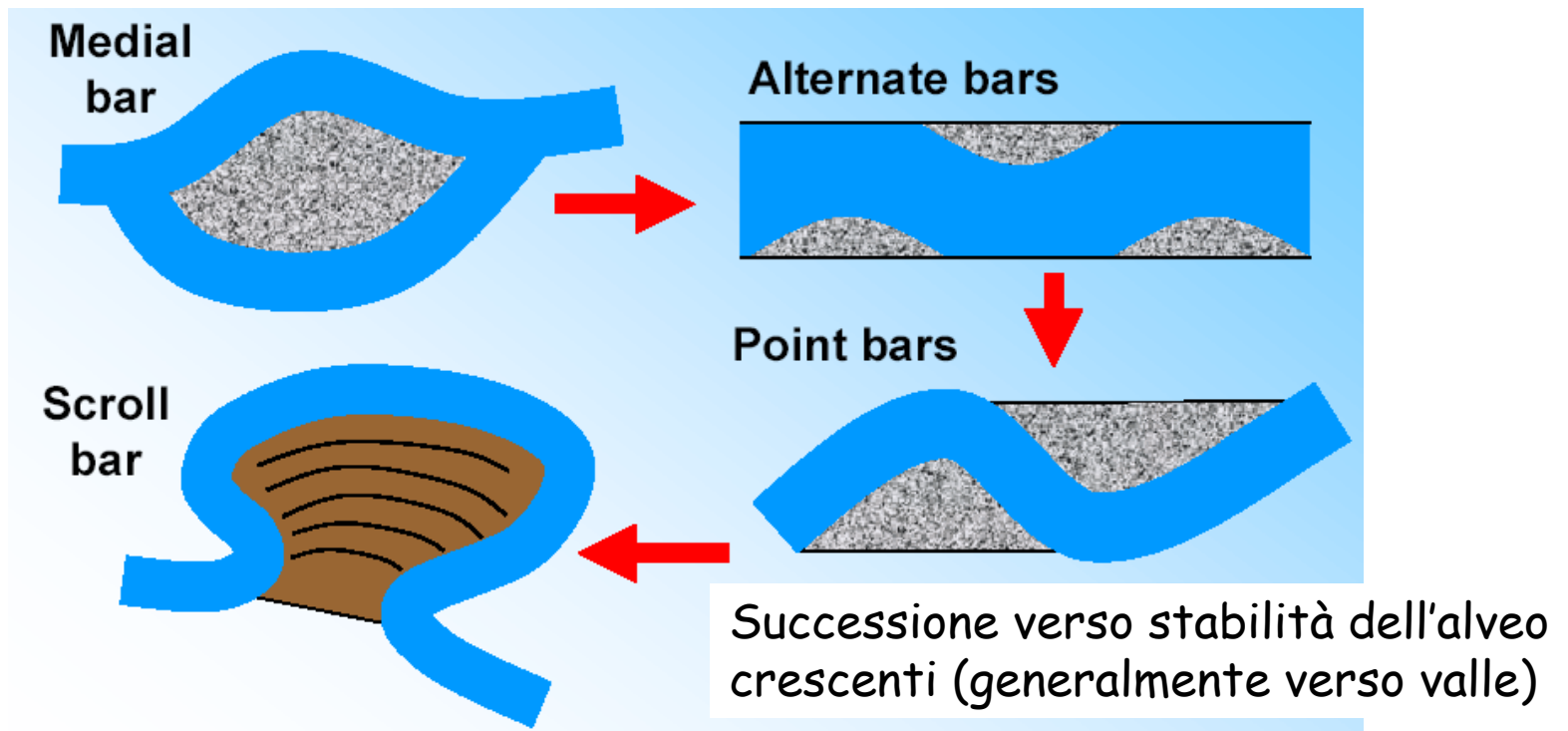
corpi sedimentari presenti all'interno dell'alveo, nel complesso privi di vegetazione perenne. Risultano completamente emersi durante i deflussi di magra.

Esistono diverse tipologie di barre, presenti a seconda dell'entità del trasporto solido ed alla pendenza del canale, classificate in base alla loro disposizione:

- longitudinali
- trasversali
- diagonali
- linguoidi
- laterali
- alternate
- mediana (isole se si presentano stabilizzate da vegetazione pluriennale)
- barre di meandro (*point bars*)
- *scroll bars* (sovraimposte sulle barre di meandro)

Sono accomunate dalla loro origine deposizionale, ovvero dal fatto che i sedimenti che le compongono, in un primo tempo mobilizzati a monte dalla corrente, sono stati successivamente depositati in seguito a condizioni idrodinamiche meno "energetiche", cioè in zone a minor velocità.





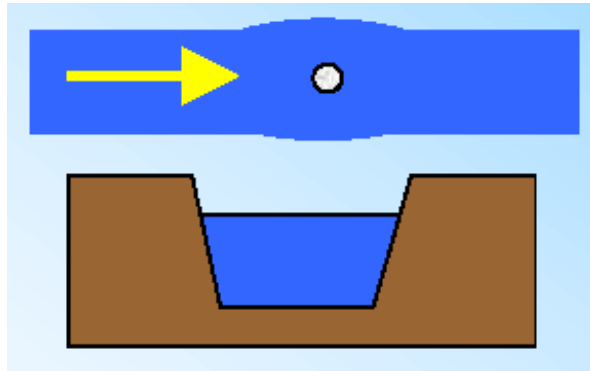
Una barra può accrescersi sia verticalmente che longitudinalmente. In entrambi i casi la granulometria del sedimento tende a decrescere, visto che il tirante capace di sommergerla sarà sempre più ridotto, con conseguenti minori velocità medie.

Le barre rappresentano dei siti di "immagazzinamento" di sedimento facilmente (cioè frequentemente) movimentabile, essendo in alveo e non consolidati dalla vegetazione, a differenza di altre forme di origine deposizionale

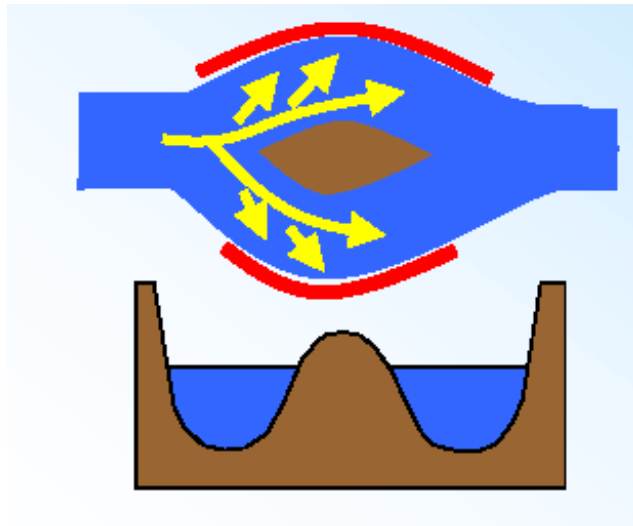
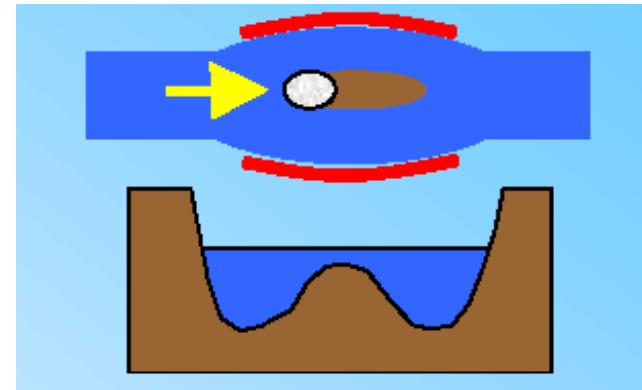
In genere le barre (tranne quelle di meandro o quelle determinate da fattori esterni non mobili) tendono a migrare verso valle durante un evento di piena, sia attraverso progressivi arretramenti dei margini di monte e valle, che tramite una sostituzione parziale o totale del loro sedimento

Sviluppo ed evoluzione di una barra mediana

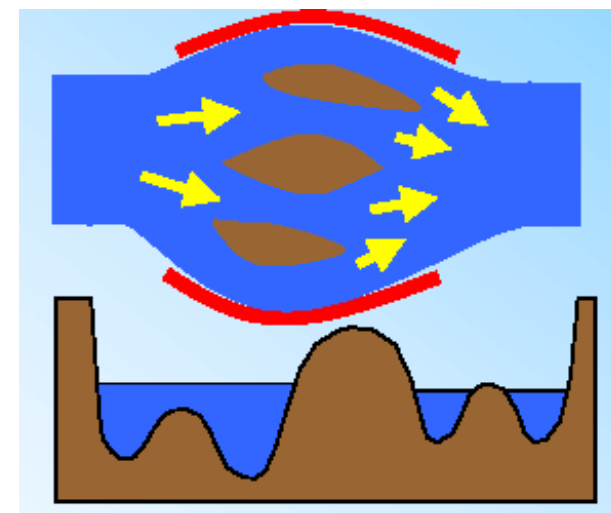
A) Una locale riduzione di velocità determina il deposito di uno o più clasti grossolani



B) Tale ostacolo innesca ulteriore deposizione a valle e fenomeni di erosione spondale



C) La barra si accresce verticalmente e longitudinalmente, fino ad emergere anche in conseguenza dell'allargamento della sezione



D) La barra emersa può venir stabilizzata dalla vegetazione e diventare isola; il processo si ripete negli altri canali

Piana alluvionale

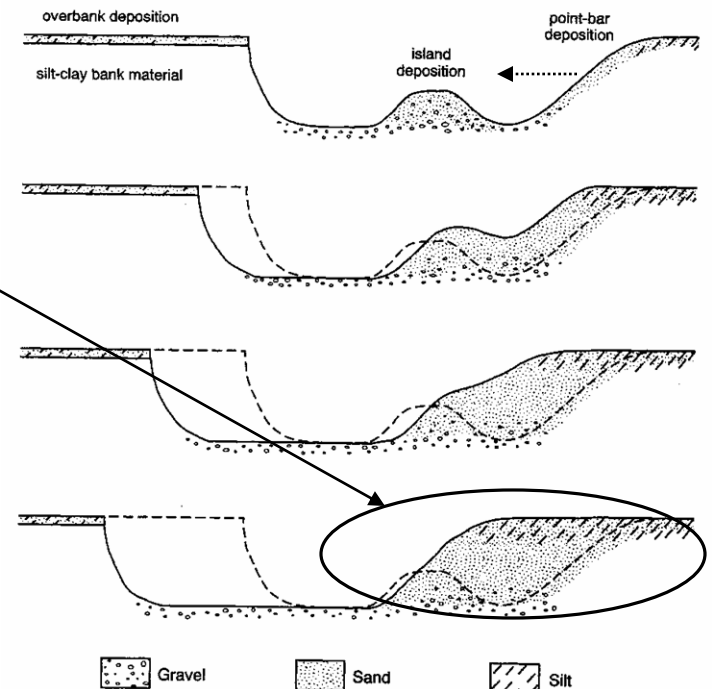
Elemento di origine deposizionale, adiacente al corso d'acqua, formato dalla progressiva sedimentazione sia all'interno che all'esterno dell'alveo.

Le sue caratteristiche ed evoluzione dipendono da:

- intensità e granulometria dell'alimentazione solida
- disponibilità di spazi per l'accumulo dei sedimenti
- condizioni energetiche della corrente

In sintesi, per la sua formazione si deve avere almeno una delle due condizioni:

- Migrazione laterale del corso d'acqua
- Deposizione durante le esondazioni



Le pianure alluvionali sono un elemento molto importanti per diversi motivi:

- Preservano la registrazione della storia climatica, idrologica ed antropica di un bacino idrografico, tramite i sedimenti in esse contenute
- Accumulano inquinanti trasportati assieme al sedimento fine (p.e. fosfati), conducendo a inquinamento del suolo e delle falde sotterranee
- Rappresentano l'area più densamente popolata della parte inferiore dei bacini idrografici

Tassi di crescita verticale dovuti alla deposizione

- Molto variabili, in media tra 0 e 10 mm a⁻¹
- Dipende dalla topografia locale
- Tassi estremi di 6000 mm a⁻¹ (6m per anno!, in Amazzonia Centrale)
- In caso di eventi di piena con poco trasporto solido, si può anche avere erosione invece di deposizione

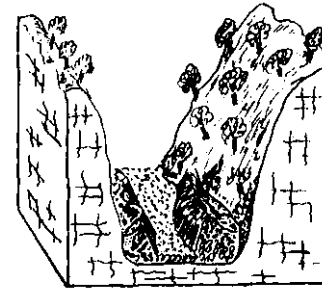
Classificazione delle pianure alluvionali (Nanson & Croke, 1992)

“Alta energia”

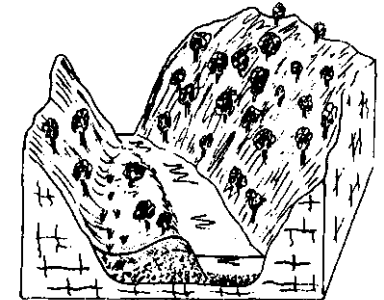
Formate da sedimenti non coesivi, ghiaia e sabbia; tipiche dei corsi d'acqua montani. Il confinamento di affioramento rocciosi o grandi massi inibisce la migrazione laterale

HIGH ENERGY

Confined coarse-textured floodplain
 $\omega > 1000 \text{ W m}^{-2}$



Confined vertical-accretion sandy floodplain
 $\omega = 300 - 1000 \text{ W m}^{-2}$

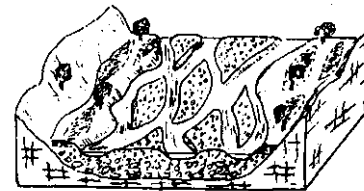


“Media energia”

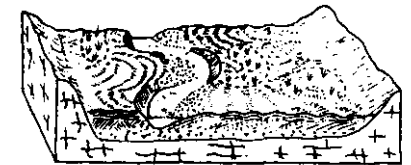
Formate da sedimenti non coesivi; tipiche dei corsi d'acqua pedemontani. Il meccanismo principale è l'accrescimento laterale da barre di meandro o da barre dei canali intrecciati.

MEDIUM ENERGY

Braided river floodplain
 $\omega = 50 - 300 \text{ W m}^{-2}$



Lateral migration, scrolled floodplain
 $\omega = 10 - 60 \text{ W m}^{-2}$

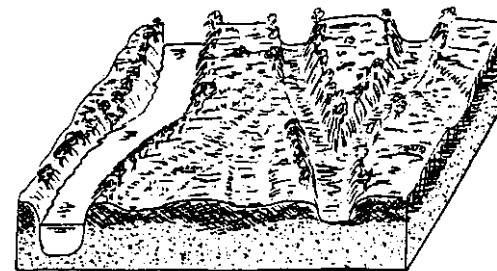


“Bassa energia”

Formate da sedimenti coesivi; tipiche dei corsi d'acqua a bassa e bassissima pendenza (meandriiformi e anastomizzati). I meccanismi principali sono l'accrescimento verticale ed occasionali avulsioni, dato che le sponde coesive rendono difficile la migrazione laterale

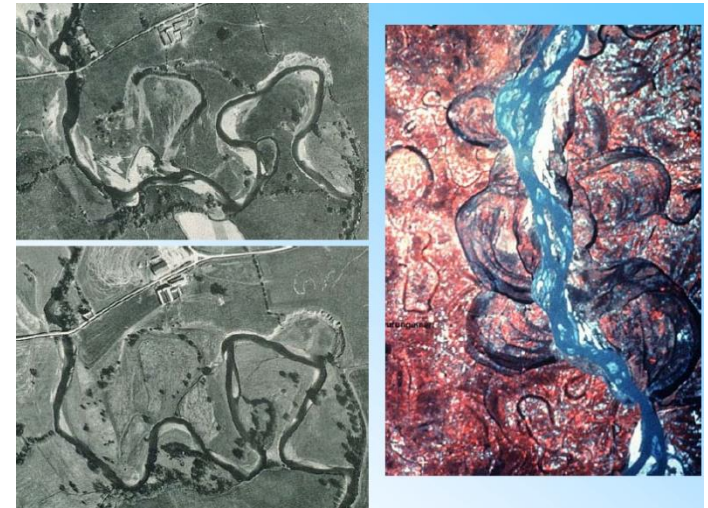
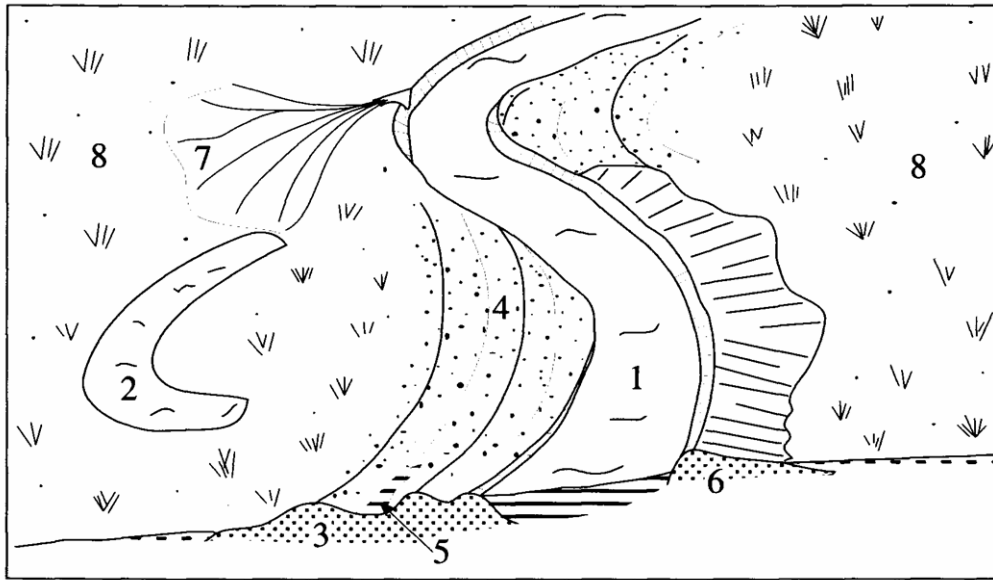
LOW ENERGY

Anastomosing river, inorganic floodplain
 $\omega < 10 \text{ W m}^{-2}$



Le pianie alluvionali in realtà non sono piatte. Presentano infatti diversi elementi derivanti da processi fluviali:

- Argini naturali
- Dossi
- Canali e meandri abbandonati, totalmente o parzialmente riempiti
- Ventagli di rotta



1) canale, 2) meandro abbandonato, 3) barra di meandro, 4) depressioni e barre sulle sponde convesse dei meandri (scroll bars) 5) area di acqua morta 6) Argine naturale, 7) ventaglio di rotta, 8) piania di sedimentazione fine

Raschi (*riffles*)

Rappresentano "alti" topografici nel profilo longitudinale di un alveo, generati da processi prevalentemente deposizionali, e possono essere considerati anche come delle macro-forme di fondo

Sono formati da clasti piuttosto grossolani (piccoli massi e ciottoli) con struttura imbricata. Il sedimento fine (sabbia) è poco o assente del tutto.

Sono presenti in moltissime tipologie di corsi d'acqua, specialmente ghiaiosi, eccetto in quelli a pendenza molto elevata (>3-5%), dove si formano veri e propri gradini (*steps*).

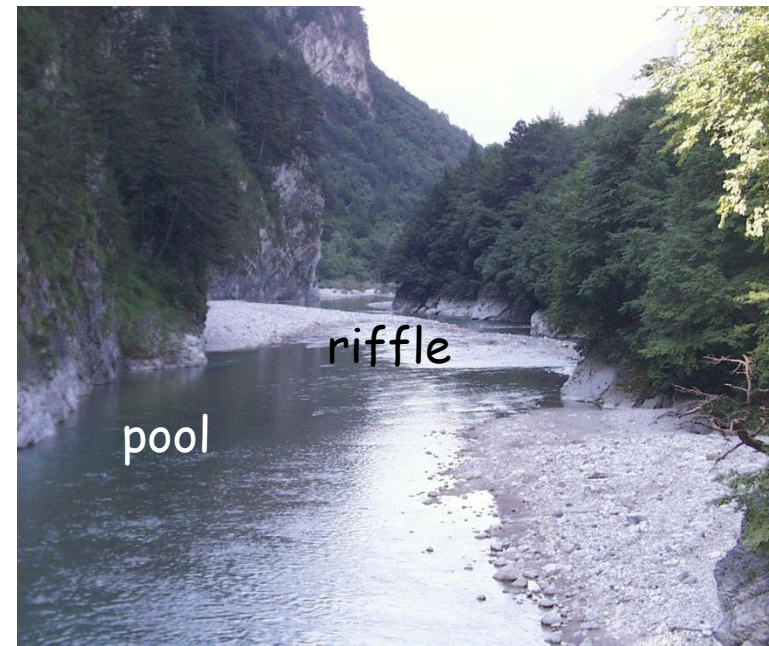
Durante le fasi di morbida e magra, in virtù del locale incremento di pendenza del fondo, sono caratterizzati da tiranti minori e velocità maggiori rispetto agli elementi fluviali adiacenti (p.e. *pools*), con condizioni di moto critico o lievemente supercritico (regime rapido). Durante fasi di piena anche ordinarie, il profilo del pelo libero diviene più uniforme, e minori sono le differenze di velocità.



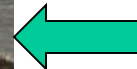
In molti casi, sono strettamente legati alla presenza di barre alternate, formandosi alla testa di esse dove la sezione presenta un restringimento.



Il filone principale della corrente in condizioni di magra appare di conseguenza oscillare da una sponda all'altra



Alcuni *riffle* possono essere visti invece come barre sommerse trasversali, che quindi non provocano sbandamenti della corrente in senso laterale.



Salti (steps)

Si deve distinguere tra *step* formati dalla corrente stessa, i quali rappresentano una struttura deposizionale per alcuni versi analoga ai *riffle*, e quelli determinati da fattori non alterabili dalla corrente, almeno in tempi brevi, quali affioramenti rocciosi (*rock step*) o tronchi d'albero (*log step*). Quindi una cascata può essere vista come un grande *rock step*.

Tutte le tipologie di salti si trovano in corsi d'acqua montani, dove la granulometria dell'alveo presenta elementi di grandi dimensioni che possono andare a formare gli *step*, così come sono frequenti gli affioramenti del substrato roccioso e la presenza materiale legnoso di grosse dimensioni





Rock steps

Log step



Canali di deflusso

Si parla di canale di magra, di morbida, di piena, a seconda dell'entità della corrente idrica. Infatti le portate riferite a tali condizioni idrauliche determinano differenti sezioni all'interno dell'alveo riferibili a ciascun livello idrometrico ad esse associato.

Negli alvei più facilmente modellabili (sabbia e ghiaia) si possono effettivamente individuare topograficamente i canali formati dalle condizioni di magra e di morbida.

Un canale è delimitato da sponde la cui inclinazione e stabilità è determinata dalla loro granulometria: esiste una netta differenza tra sponde coesive (limo-argilla) e non coesive (ghiaia-sabbia). L'effetto stabilizzante della vegetazione è anche fondamentale.



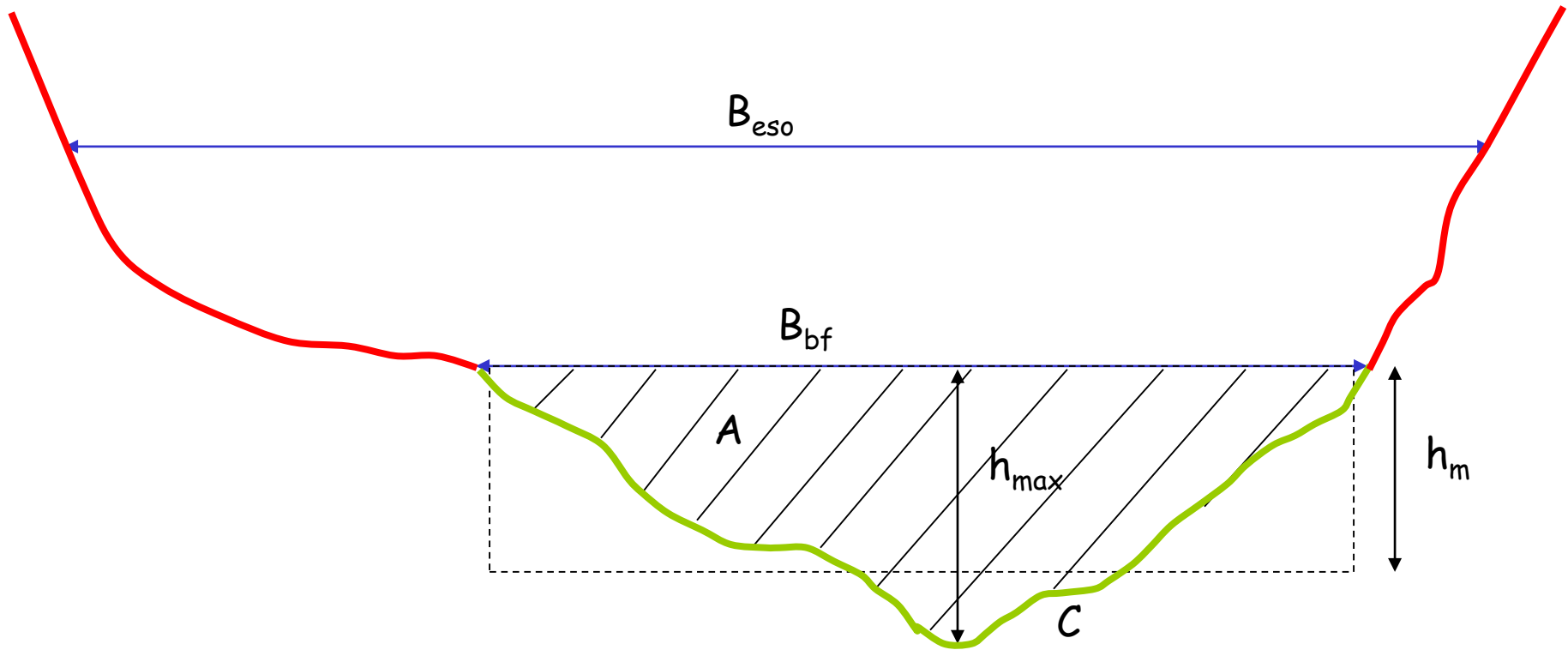
Come detto in precedenza, la condizione idrometrica che arriva a riempire il canale principale da sponda a sponda viene detta di piene rive o *bankfull* si è visto come gli eventi di piena determinanti la *bankfull* siano frequenti e di modesta intensità (generalmente tempi di ritorno fra 1 e 2 anni).

Di conseguenza ogni piena meno frequente (di portata maggiore) comporta esondazioni, ovvero sormonto delle sponde ed allagamento delle aree adiacenti all'alveo, andando così a formare - se esiste spazio disponibile - la piana alluvionale.

Per descrivere la geometria della sezione di un canale naturale si adoperano i seguenti parametri:

- larghezza, B (m)
- area, A (m^2)
- contorno bagnato, C (m)
- raggio idraulico, R_h , dato dal rapporto A/C (m)
- profondità massima - detta anche al *thalweg* - h_{max} (m)
- profondità media h_m data dal rapporto A/B (m)
- rapporto larghezza-profondità, B/h_m (-)
- grado di confinamento, B_{eso}/B_{bf} (-), dove B_{eso} è la larghezza dell'area esondabile da un tirante medio pari al doppio di quello relativo alla condizione di *bankfull*, e B_{bf} è la larghezza relativa al *bankfull*

Schema esemplificativo dei parametri di una sezione
con riferimento alla condizione di piene rive



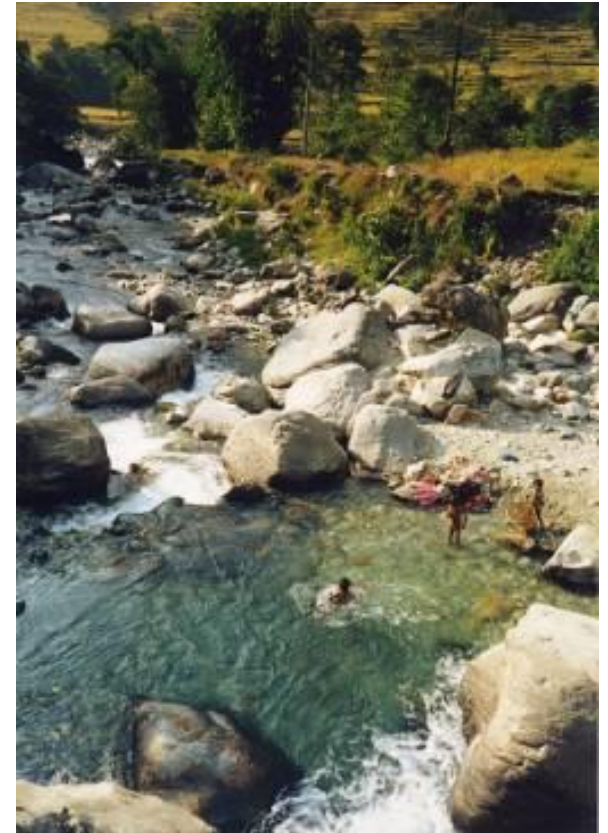
Pozze (pools)

Zone dell'alveo che presentano tiranti idrici maggiori (e quasi sempre velocità medie minori) rispetto alle zone adiacenti, quali *riffle* o *step*. Il flusso è generalmente in regime subcritico ($Fr < 1$).

Derivano dall'azione di erosione localizzata causata da una corrente in eccesso di energia rispetto alle condizioni medie di pendenza.

Ciò avviene quando la corrente accelera per una pendenza locale del fondo maggiore (*riffle*), per la presenza di salti (*step*) o per una restringimento della sezione (barre, massi immobili, affioramenti rocciosi).

L'idrodinamica e la forma dei *pool* sono dominate dall'instaurarsi di correnti secondarie (vortici ad asse verticale ed orizzontale) a seguito dei forti gradienti di velocità presenti, rispettivamente in senso trasversale e verticale. Gli sforzi di taglio derivanti sono causa di forte dissipazione energetica. I *pool* possono essere visti come i "freni" di un corso d'acqua.



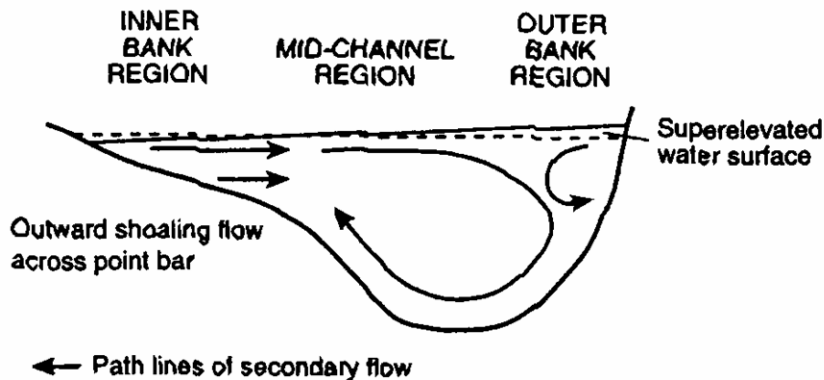
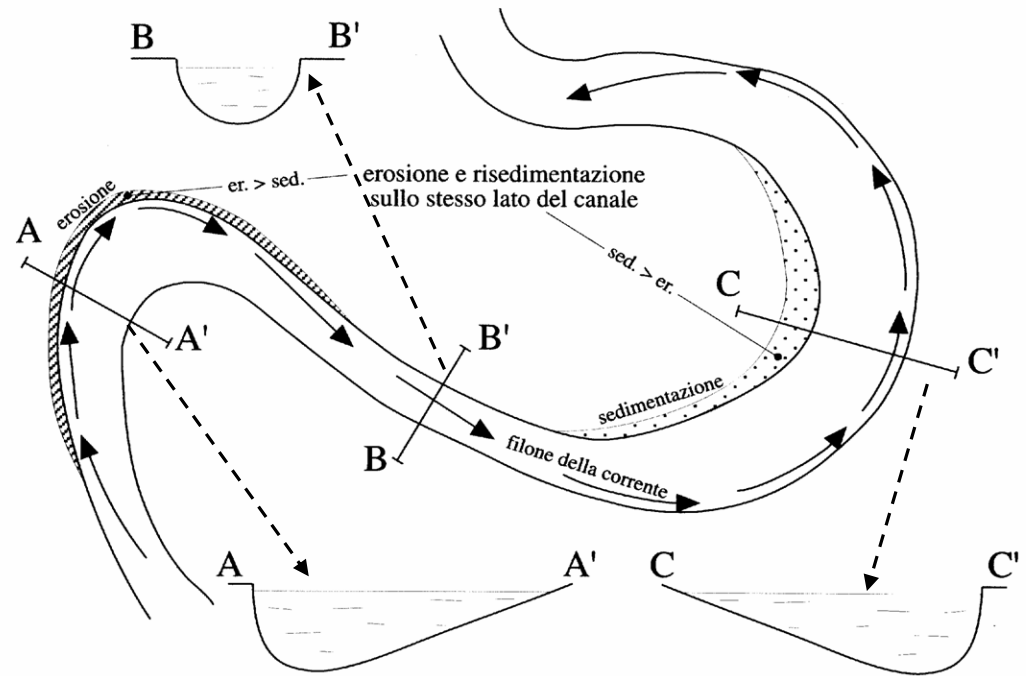
Le pozze vanno sempre viste come derivanti da "qualcosa" immediatamente a monte: la loro origine è cioè successiva alla formazione di un disturbo alla corrente - che ne aumenti la velocità - quale uno scivolo roccioso, uno *step*, una barra o *riffle*.



I *pool* rappresentano un importantissimo elemento di diversità dell'ecosistema fluviale, che si riflette in ultima analisi nella consistenza delle popolazioni di specie ittiche. Di conseguenza molti progetti di riqualificazione fluviale prevedono la creazione di pozze in corsi d'acqua precedentemente "risagomati" ai fini della sicurezza idraulica.

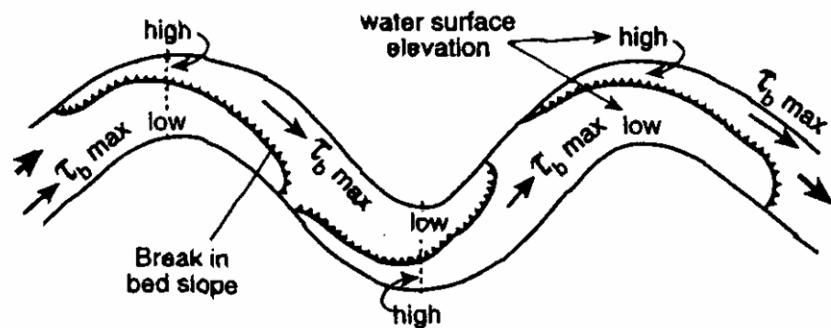
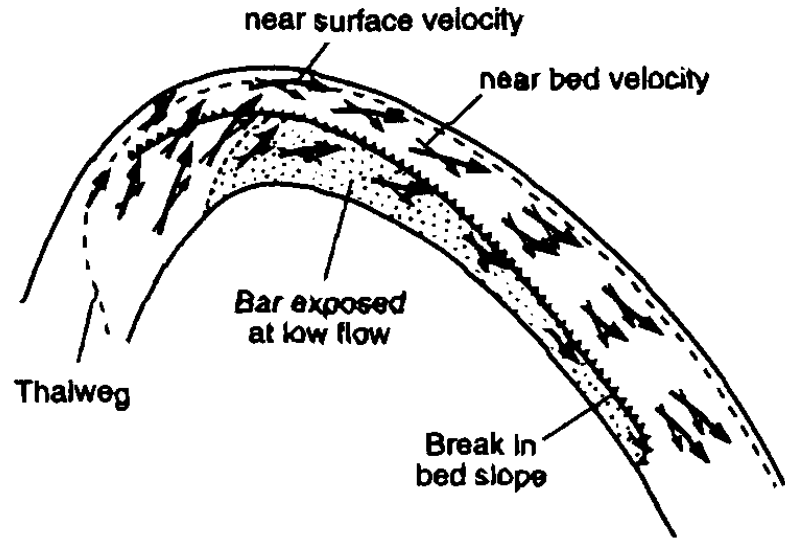
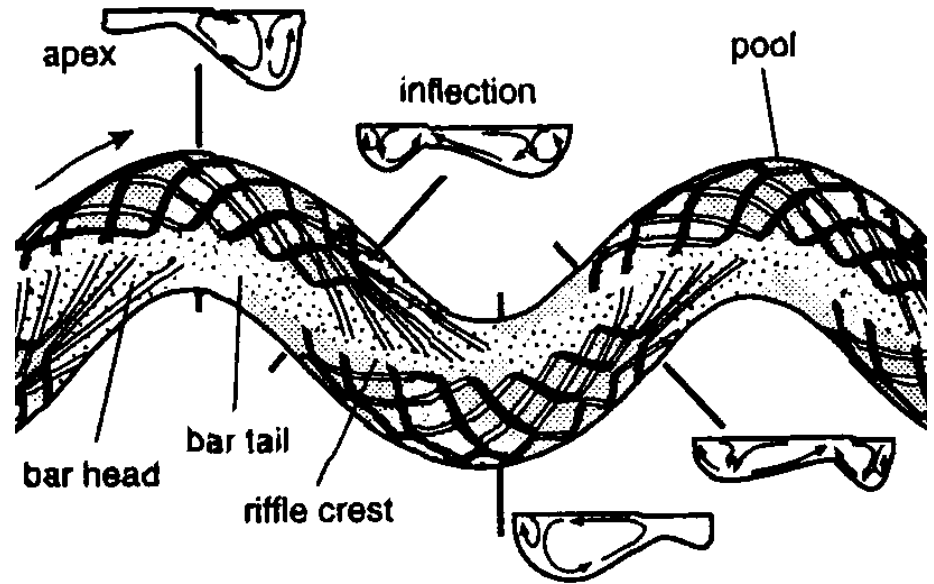
Meandri

Molti corsi d'acqua manifestano una naturale tendenza - se le sponde sono erodibili - ad assumere un andamento planimetrico sinuoso, costituito da una più o meno regolare successione di anse, i meandri appunto. Tra meandro a meandro si ha la presenza di *riffle*, dove il flusso è approssimativamente lineare.

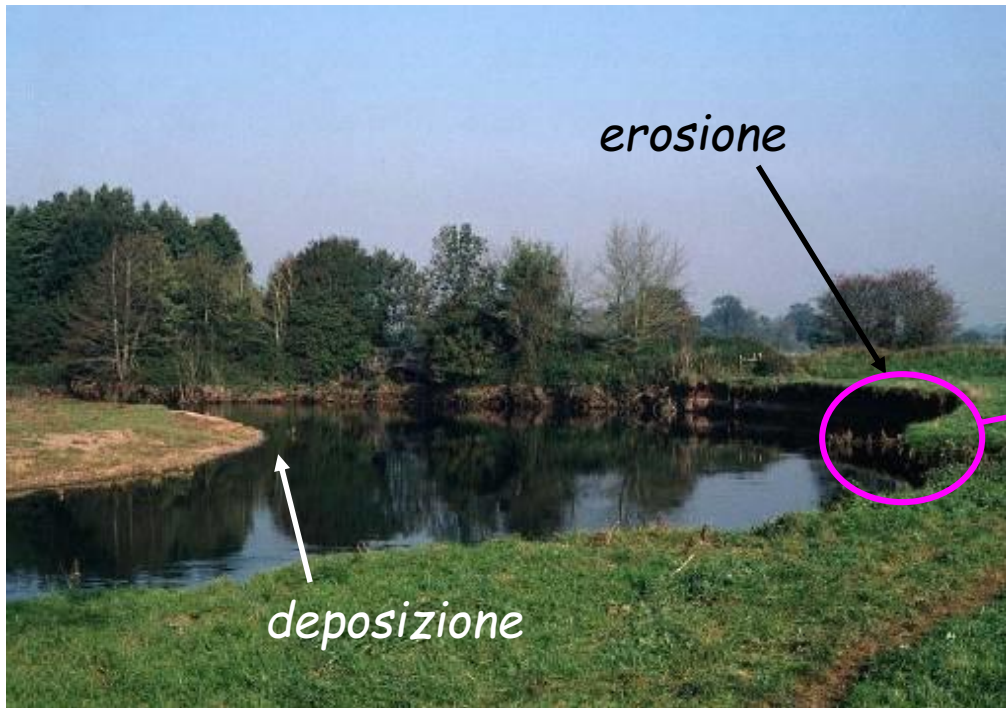


La forza centrifuga - proporzionale al raggio di curvatura - agisce sulla corrente causando la formazione di una sovrالعlevazione del pelo libero verso la sponda esterna (concava). La differenza di pressione idrostatica tra le due sponde genera una corrente trasversale diretta verso la sponda esterna in superficie e verso quella interna al fondo.

La sovrapposizione delle correnti trasversali sul moto verso valle genera un flusso elicoidale molto complesso.



Le correnti secondarie trasversali inducono erosione sulla sponda esterna e deposizione su quella interna (convessa). Si formano così all'interno *point bar* (barre di meandro) e *pool* all'esterno, con una sezione fortemente asimmetrica. Tale morfologia rispecchia la distribuzione degli sforzi tangenziali complessivi.



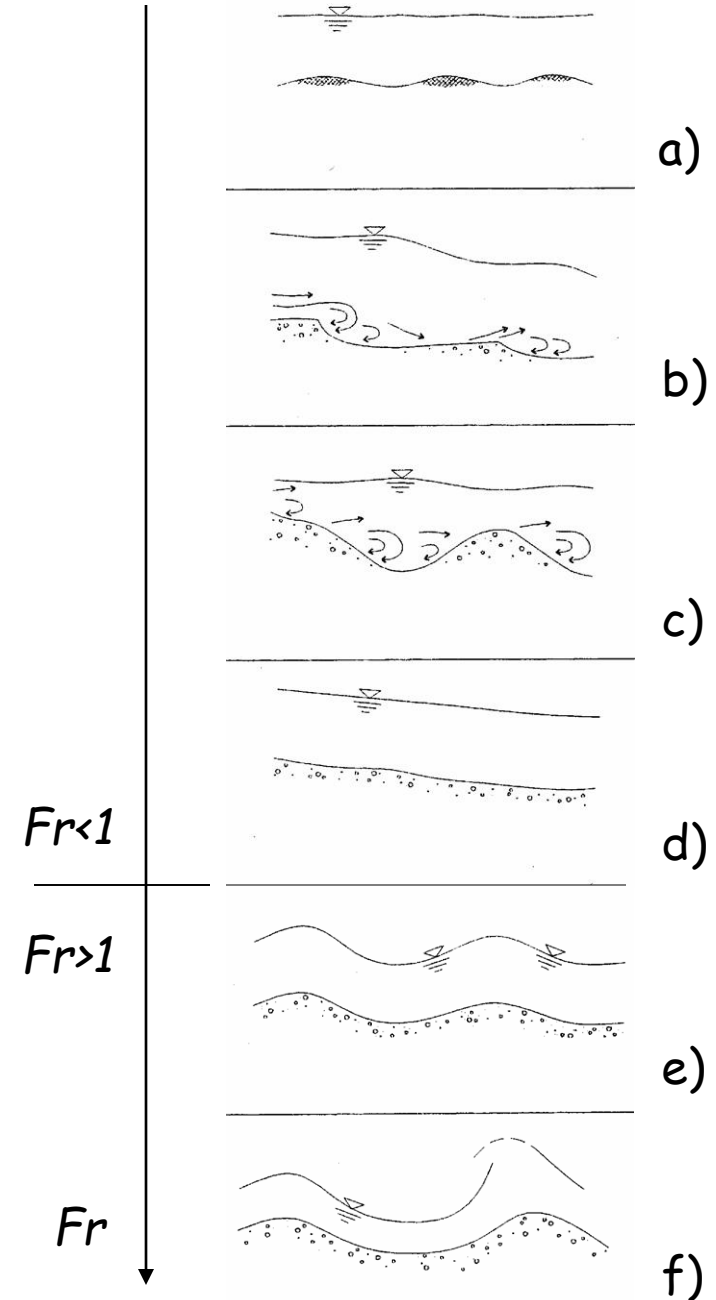
Fessurazioni da cedimento per
erosione al piede in sponda
molto coesiva



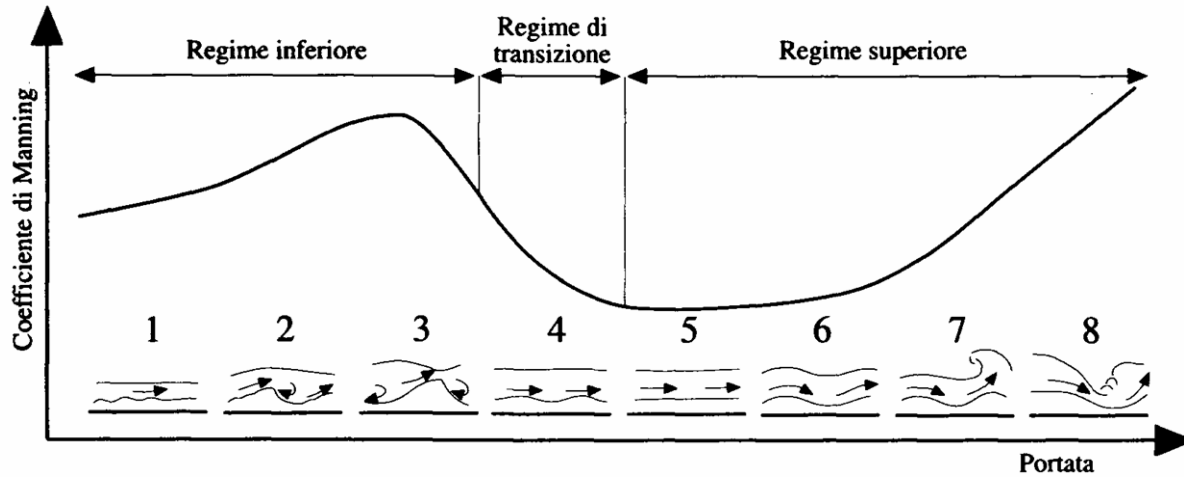
Forme di fondo

Come un corso d'acqua raramente si presenta rettilineo, allo stesso modo è poco comune che esso presenti un fondo piano. Specialmente su granulometrie fini (sabbia), una corrente modella il fondo creando una successione di forme per velocità (o meglio numeri di Froude) crescenti:

- a) Ripples (increspature)
- a) Dune con *ripples* sovrainposti
- a) Dune
- a) Fondo piano
- a) Antidune
- a) Antidune con frangimento d'onda

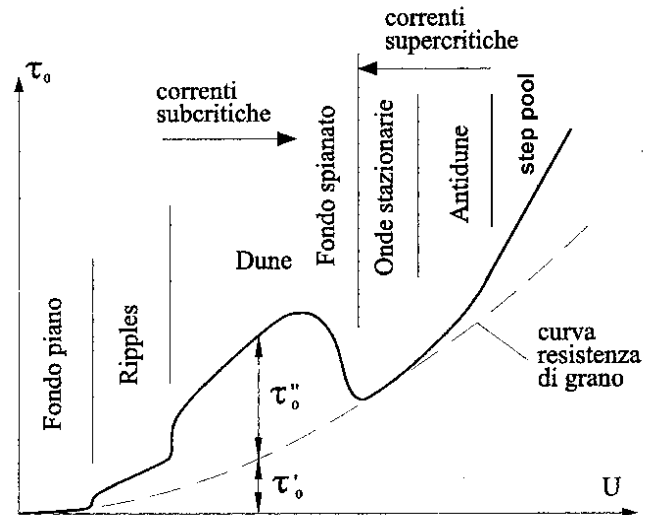


Le forme di fondo hanno importanti conseguenze sulla resistenza al flusso:



La resistenza di forma indotta da esse deriva da sforzi aggiuntivi di natura turbolenta che si sommano a quelli che derivano dalla sola scabrezza di grano.

Le sequenze di raffle-pool e step-pool possono essere viste come forme di fondo su alvei a granulometria grossolana.



Forme di fondo del regime inferiore (subcritico)



ripples
←

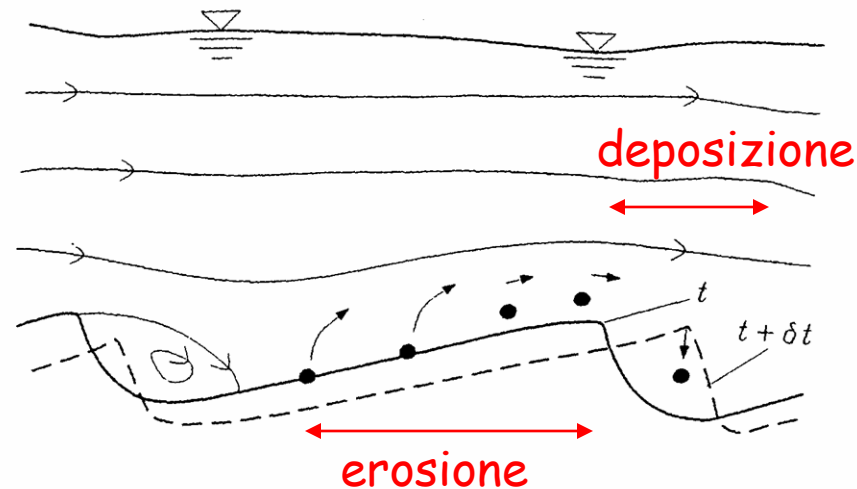


dune
→

I *ripples* sono forme che si osservano in condizioni prossime al moto incipiente di particelle di sabbia fine, ed hanno l'aspetto di piccole onde di forma triangolare, più o meno regolari. Si formano quando il sottostrato viscoso è superiore al diametro dei grani, sono quindi influenzati dalla viscosità del fluido - dal numero di Reynolds del grano. Hanno lunghezze massime di 60 cm e altezze di 6 cm. La lunghezza non dipende dal tirante idrico.

In condizioni di fondo idraulicamente scabro, le forme di fondo diventano più grandi pur mantenendo una forma triangolare, simili alle **dune** dei deserti. In prossimità della cresta si ha distacco dello strato limite e formazione di una zona di separazione a valle, dove si ha minor velocità ma forte turbolenza. La lunghezza d'onda varia da qualche metro a qualche decina, essenzialmente in funzione del tirante.

Poiché la corrente è subcritica, il pelo libero risente poco del disturbo arrecato da queste forme di fondo e le modificazioni del suo profilo sono in opposizione di fase rispetto al fondo (rigonfiamenti in corrispondenza dei truogoli tra cresta e cresta).



Il trasporto solido avviene per erosione sulla parete di monte dove la corrente accelera e deposizione subito a valle della cresta, dove si ha decelerazione. Tramite questi meccanismi si ha una traslazione - migrazione - verso valle delle forme di fondo.

Forme di fondo del regime superiore (critico-supercritico)

Quando il numero di Froude si avvicina all'unità, le dune tendono a spianarsi lasciando un fondo piano. Questo tuttavia si deforma facilmente per ulteriori incrementi di velocità, dando luogo a forme approssimativamente sinusoidali chiamate antidune, in corrispondenza delle quali il pelo libero si presenta alterato da onde stazionarie in fase con il fondo.



Le antidune tendono a divenire più ripide per velocità crescenti, ma data l'instabilità inerente alle correnti supercritiche (formazione di risalti idraulici), per valori di Fr di poco superiori all'unità si ha frangimento delle onde con spianamento delle antidune e successiva loro riformazione, secondo un andamento ciclico.

Le antidune sono così chiamate in contrapposizione alle dune per la loro tendenza a migrare verso monte, anche se spesso tale traslazione non si osserva nella realtà.



Tale dinamica deriva dalla tendenza ad erodere poco a monte del truogolo dove la corrente accelera e depositare sulla parete di monte, fino alla cresta, a causa del suo rallentamento.