

# Procesos de Transporte

## Medios de transporte

- **GRAVEDAD,**
- **AGUA,**
- **HIELO,**
- **FLUJOS DE DENSIDAD VARIABLE**

**Todos son flujos, definidos por la dinámica de fluidos (hidrodinámica, hidráulica)**

- **Tipo de medio (densidad/viscosidad) y su velocidad**
- **Partículas inmersas, su tamaño y cantidad**

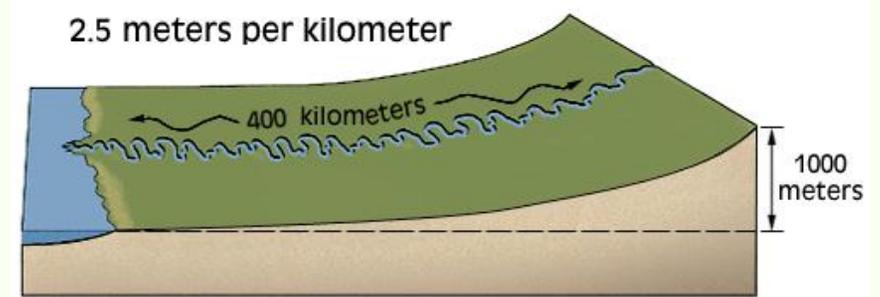
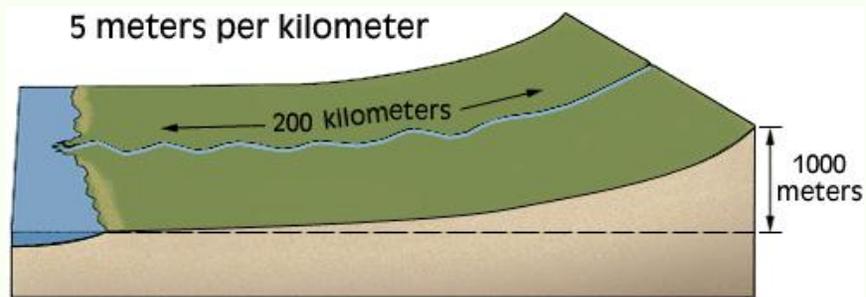
Prof. Cecilia I. Caballero M.

# Velocidad

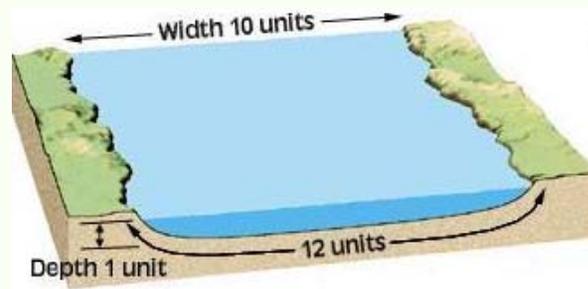
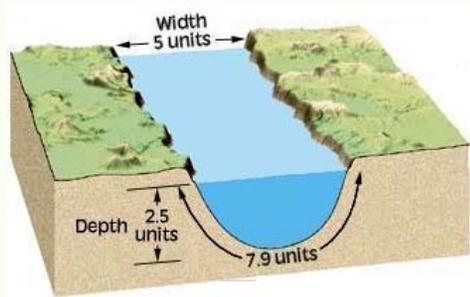
Ej. en una corriente fluvial (el agua líquida corriente es el principal agente de erosión y modelador de las formas del relieve en el continente)

**Depende de:**

El gradiente ó pendiente del cauce  $G = DV / DH$  ( $DV =$  dist vertical en m;  $DH =$  dist hzta en km). Para ríos rectilíneos es mayor corriente arriba (cabeceras).  $A > \text{pendiente} > \text{velocidad}$



La forma, rugosidad y dimensiones del canal la velocidad es mayor lejos del fondo del canal (donde hay > fricción), varía en cada lugar del canal



gradiente y rugosidad  
decrecen corriente abajo

anchura y profundidad se  
incrementan corriente  
abajo

$A < \text{perímetro} < \text{fricción} > \text{velocidad}$

Para una misma cantidad de agua que pasa por un punto dado

# Descarga o caudal

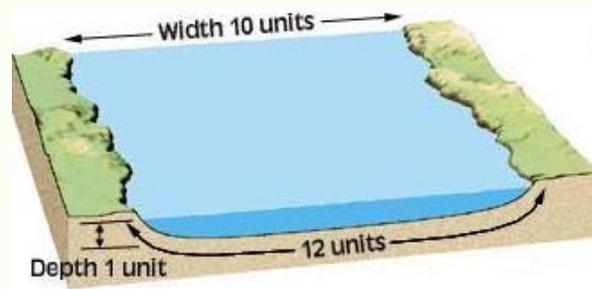
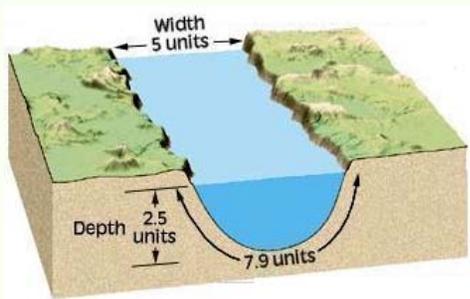
Cantidad de agua que pasa por un punto por una unidad de tiempo

Está en relación directa con: **velocidad de la corriente** y **dimensiones del canal**

$$\text{Veloc (m/seg)} \times \text{anchura (m)} \times \text{prof. cauce (m)} = \text{CAUDAL m}^3/\text{seg}$$

gradiente y rugosidad  
decrecen corriente abajo

anchura, profundidad y  
se incrementan corriente  
abajo

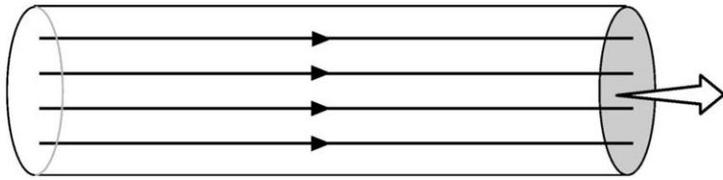


La descarga y velocidad se  
incrementa corriente abajo

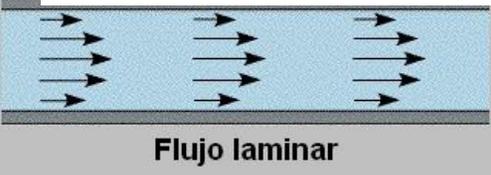
$A < \text{perímetro} < \text{fricción} > \text{velocidad}$

# Tipos de flujo: laminar y turbulento

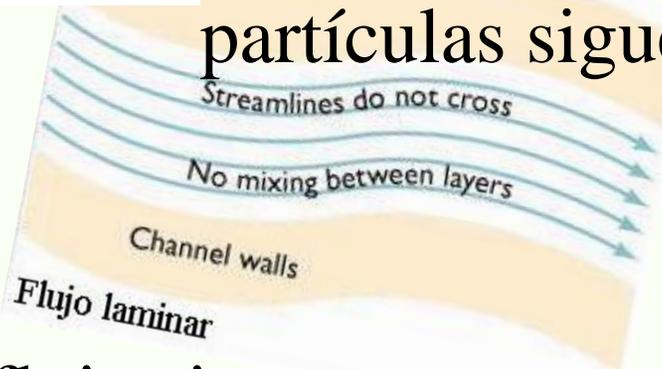
Laminar flow



At all points in flow all molecules are moving downstream



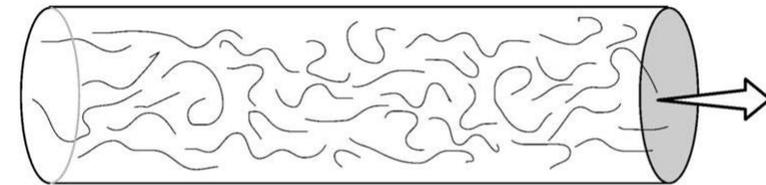
Flujo laminar



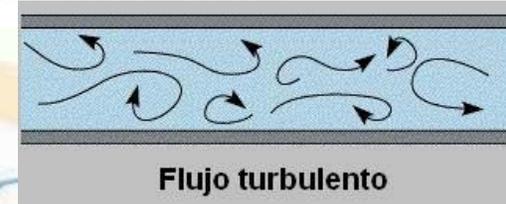
**Laminar.**- el flujo tiene movimiento continuo y uniforme, en él las partículas siguen trayectorias paralelas entre sí corriente abajo

**Turbulento.**- el flujo sigue trayectorias con cambios marcados de dirección, las líneas de corriente de las partículas se desorganizan formándose remolinos o turbulencias, pero el flujo neto va corriente abajo

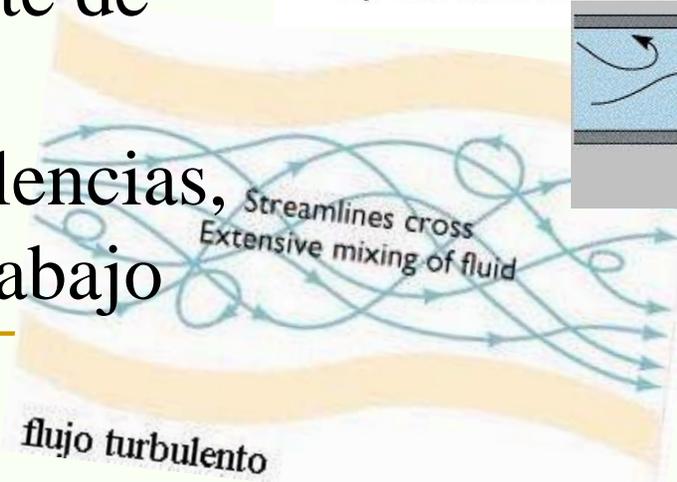
Turbulent flow



At any point in the flow a molecule may be moving in any direction, but the net flow is downstream



Flujo turbulento



# Número de Reynolds $Re$

Parámetro adimensional para caracterizar e identificar los diferentes tipos de flujo (O. Reynolds, 1883).

$Re$  pequeños (<500) son laminares;

$Re$  altos (>2000) son turbulentos, al incrementar la velocidad los flujos tienden a ser turbulentos

Velocidad de flujo ( $v_e$ )

Densidad ( $\rho$ ) y Viscosidad del fluido ( $\mu$ );

Diámetro de la tubería en la que se mueve el fluido ( $d$ )

$$Re = \frac{\rho v_e d}{\mu}$$

$$\frac{\mu}{\rho} = \nu$$

$\nu$  = viscosidad  
cinemática del fluido

$$Re = \frac{v_e d}{\nu}$$

# Laminar y turbulento

$$V_{\text{aire}} < V_{\text{agua}}$$

El flujo laminar ocurre en flujos de **altas** viscosidades cinemáticas, los que tienen cierta resistencia a moverse -alta  $\mu$  y baja  $\rho$ - y por tanto no alcanzan altas velocidades; *pero si velocidad aumenta pueden ser turbulentos*:

+ flujos de hielo,

+ *de agua cargada con detritos y flujos de detritos,*

+ *de agua a baja velocidad y en parte superficial,*

+ flujos de lava [basáltica y en la parte inferior, donde la  $^{\circ}T$  es mayor].

$$\frac{\mu}{\rho} = \nu$$

Flujos de **bajas** viscosidades cinemáticas, los que se mueven fácilmente - $\mu$  igual o más baja que  $\rho$ - y por tanto pueden alcanzar altas velocidades, tienden a ser turbulentos (aun a más bajas velocidades que los de alta  $\nu$ ):

+ Flujos de agua a “gran” velocidad y en zonas profundas,

+ La mayoría de los flujos de densidad (con carga de partículas) ya sean de aire o agua (tienen alta  $\rho$  y relativamente baja  $\mu$ ).

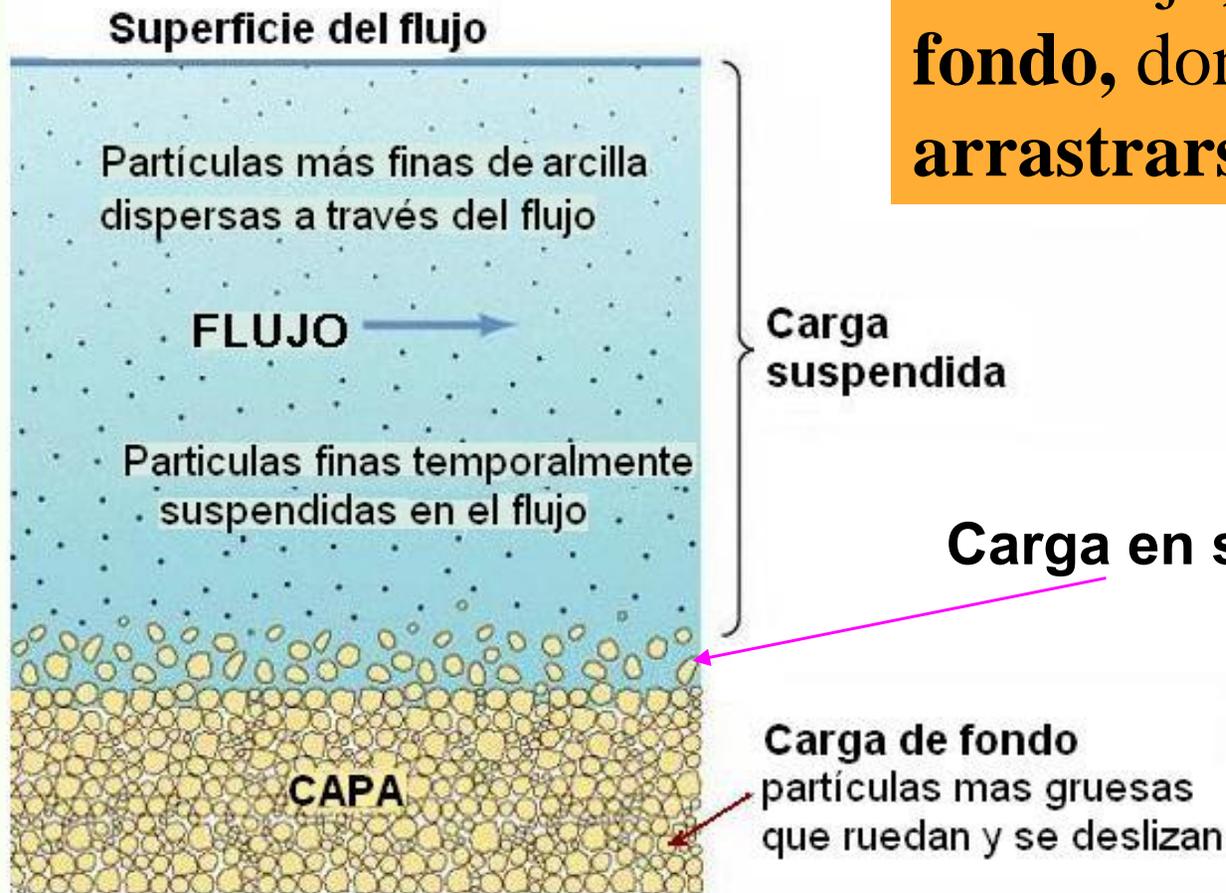
---

+ Flujo de aire a baja velocidad,

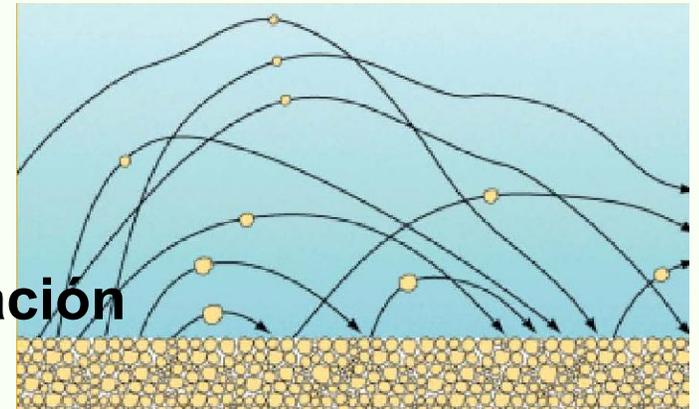
# El transporte de las partículas en los fluidos

Los sedimentos son transportados como la “**carga**” del flujo de agua (ó aire):

La carga puede viajar: **suspendida** en el flujo, en la parte de abajo ó **fondo**, donde puede **saltar**, **arrastrarse** y **rodar**



Carga en saltación



**Abrasión:** es el desgaste provocado por la erosión de la carga de los ríos

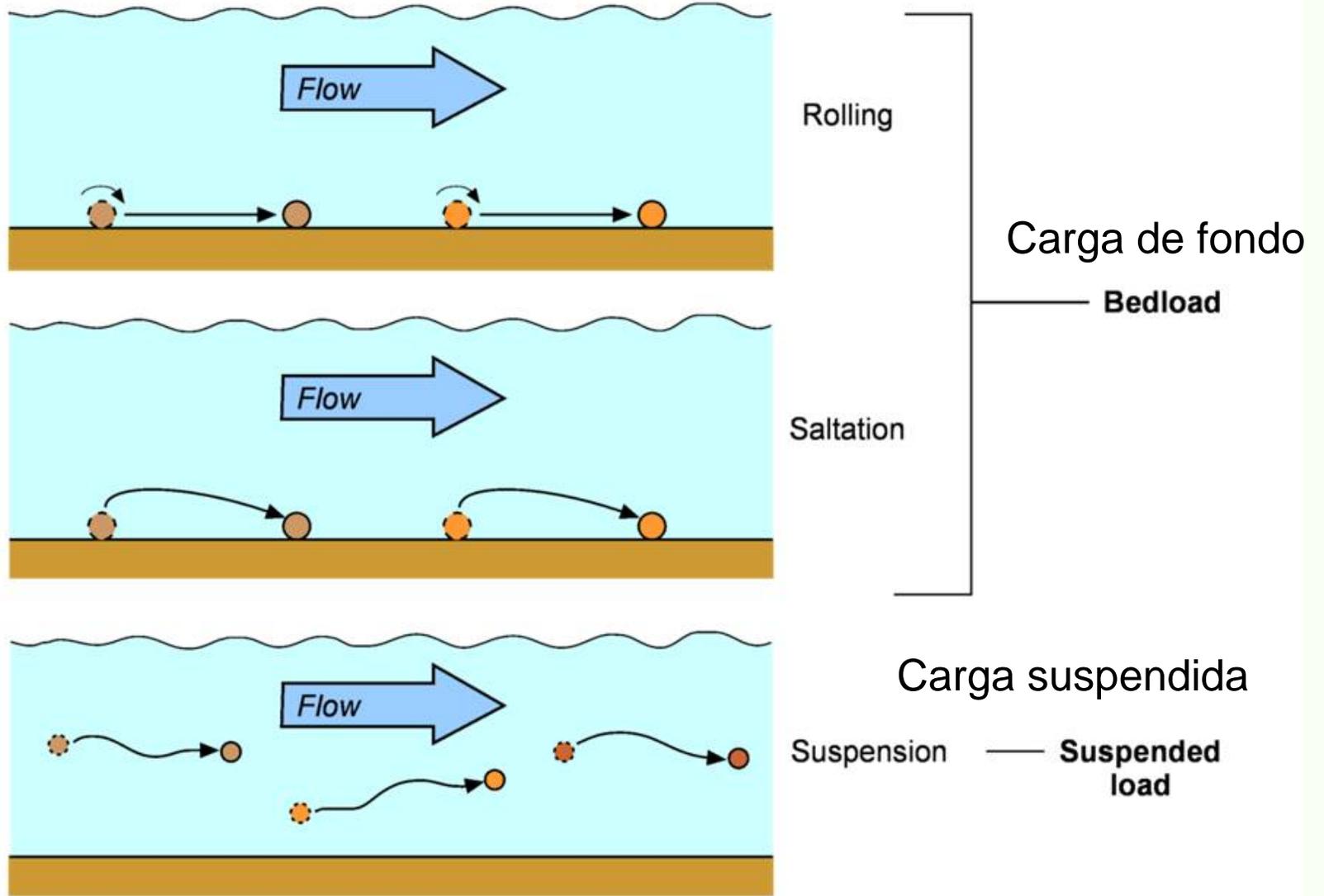
# Movement of particles in a flow



Gary Nichols  
Sedimentology  
& Stratigraphy



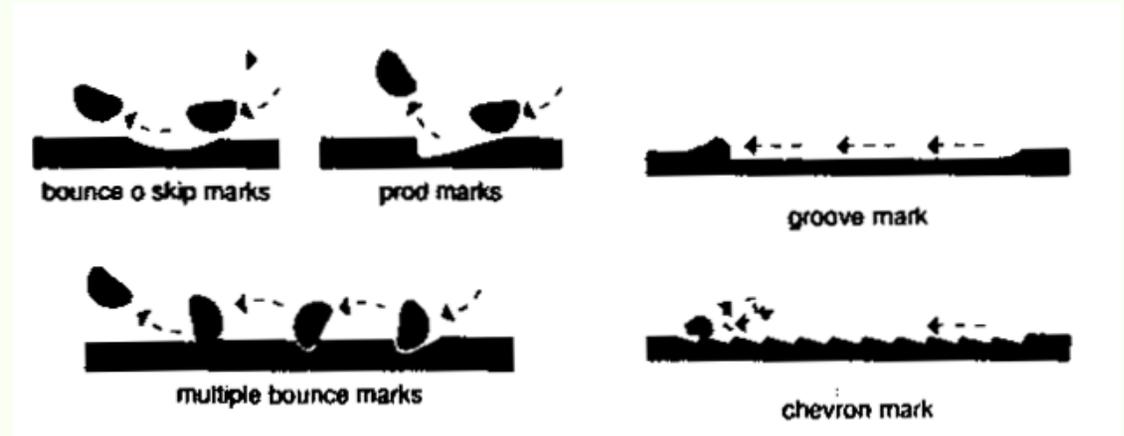
WILEY-  
BLACKWELL



# La carga de sedimentos y la propia energía del flujo del agua dan lugar a marcas en los sedimentos: **estructuras sedimentarias**

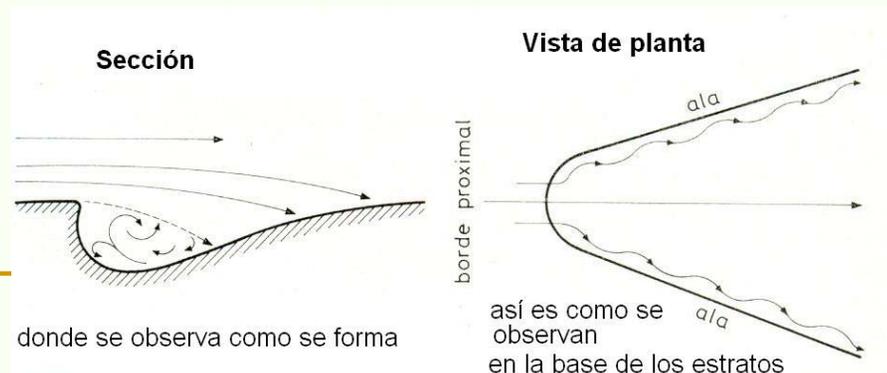
La carga de arrastre y en saltación

Produce “tool marks”  
(marcas de objetos):



La erosión del flujo

Produce  
“scour marks”  
(marcas de corriente)

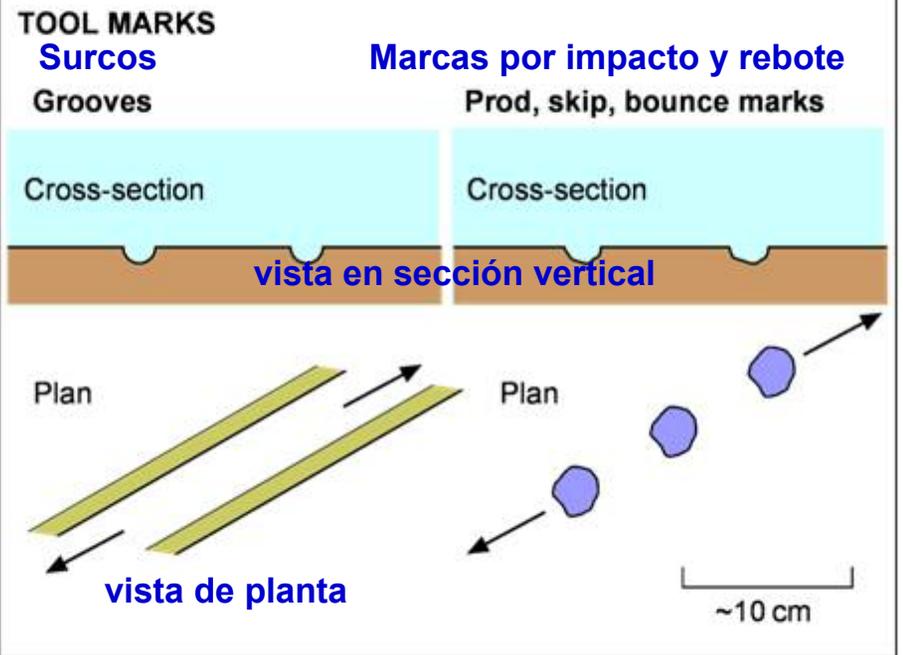
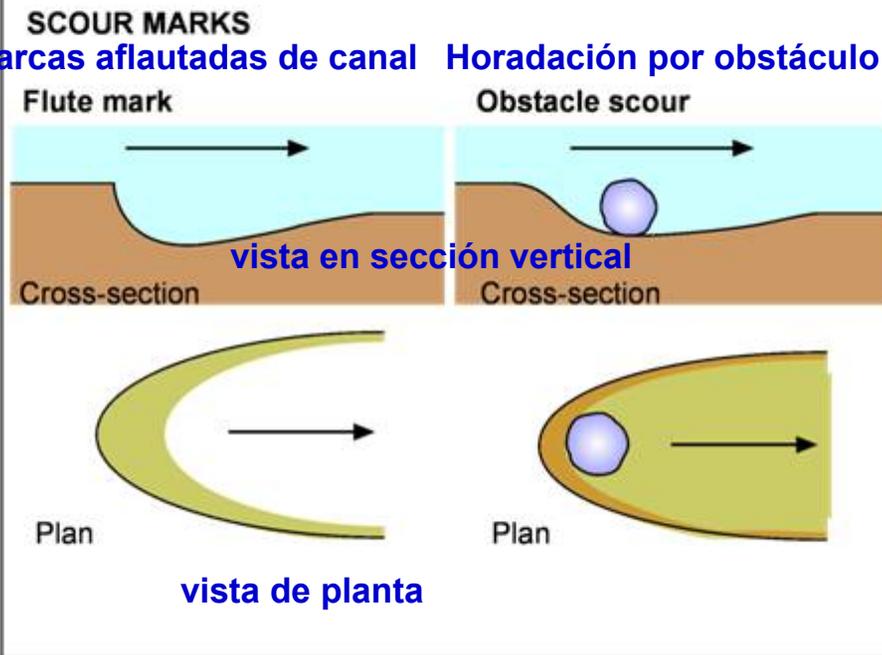


# Sole marks found on the bottoms of beds

## HORADACIONES POR LA CORRIENTE

## MARCAS DE OBJETOS

Marcas aflautadas de canal    Horadación por obstáculo



# Efecto Bernoulli o ¿por qué se levantan los clastos?

El movimiento de los granos en un fluido es resultado de la fuerza de fricción entre el flujo y los clastos, pero, ¿Por qué saltan?

lo que empuja a los clastos para saltar y moverse hacia arriba es un efecto del Principio de Bernoulli:

Este principio explica que en un fluido en movimiento, la suma de la presión y la velocidad en un punto cualquiera permanece constante:  $P + V = k$ .

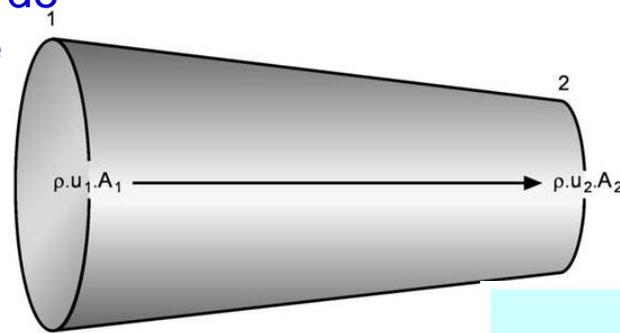
$$\text{energía cinética} \leftarrow \frac{V^2 \rho}{2} + \overset{\text{energía de Presión}}{P} + \overset{\text{energía potencial}}{\rho g z} = \boxed{\text{constante}} \rightarrow \text{energía total}$$

$V$  = velocidad del fluido;  $\rho$  = densidad del fluido       $z$  = altura

$P$  = presión a lo largo de la línea de corriente;     $g$  = aceleración gravitatoria

Esto implica que la presión interna de un fluido decrece en la medida que la velocidad del fluido se incrementa (para mantener la constante) ó al revés, que aumenta si la velocidad disminuye.

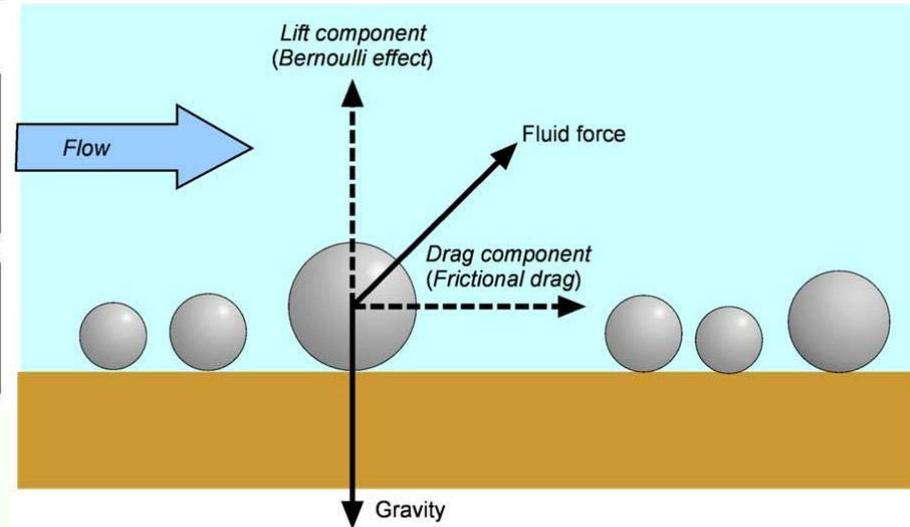
El flujo de un fluido a lo largo de una tubería que disminuye de diámetro



La disminución de la sección de área por donde atraviesa el fluido de  $A_1$  a  $A_2$ , ocasiona el aumento de la velocidad del fluido y esto a su vez tiene el efecto de disminuir la presión para conservar balanceada la ecuación de Bernoulli

Mass of fluid at '1' = mass at '2'  
 $\rho \cdot u_1 \cdot A_1 = \rho \cdot u_2 \cdot A_2$   
 $u_1 \cdot A_1 = u_2 \cdot A_2$   
 Area  $A_1$  has decreased to  $A_2$   
 Velocity  $u_1$  must increase to  $u_2$

**Bernoulli's equation**  
 Total energy =  $0.5\rho u^2 + \rho gh + P$   
 If  $u$  increases  $P$  must decrease  
 = Pressure drop



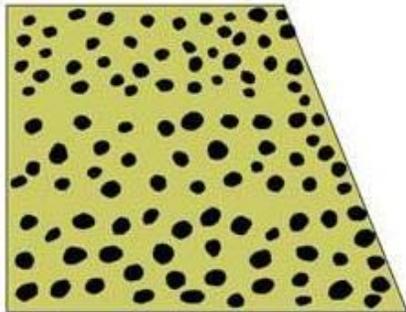
Si aplicamos esto a un canal, entonces un(os) clasto(s) en el fondo causará(n) una obstrucción, esto es hace que se reduzca el tamaño de la sección que atraviesa el flujo.

La velocidad ( $V$ ) sobre este clasto será entonces mayor que corriente arriba o corriente abajo, así que para balancear la ecuación y mantener la constante, debe haber una reducción de la presión ( $P$ ) sobre el clasto.

Esta reducción de la presión ( $P$ ) tiene el efecto de proveer una fuerza temporal de levantamiento que mueve el clasto del fondo y lo eleva

# Variaciones en el tamaño de grano y Ley de Stokes

El tamaño de grano en una capa generalmente es variable.



Normal grading  
in a bed

Esta variación puede seguir un patrón de decremento en tamaño de base a cima: **estratificación gradada (normalmente gradada)**.

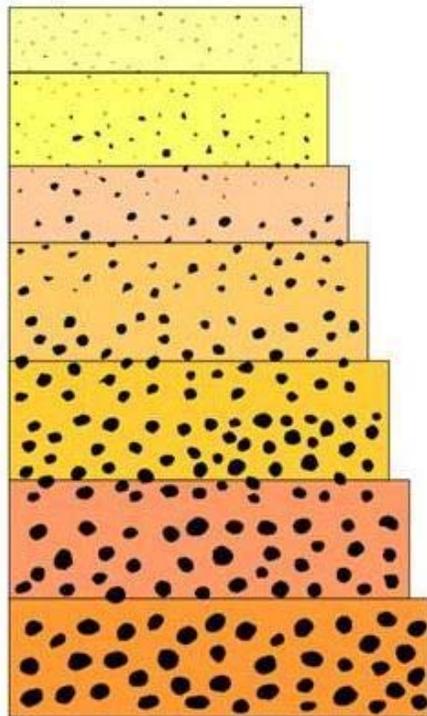
O bien un patrón de incremento en tamaño de base a cima: **estratificación gradada inversa (inversamente gradada)**

La **estratificación gradada es la más común** pues resulta del asentamiento de partículas en suspensión debido al decremento de la fuerza del flujo

Este asentamiento sigue la **ley de Stokes** que describe la velocidad ( $V$ ) en la cuál las partículas se asientan considerando su densidad y tamaño ( $D$ ) y la densidad y viscosidad del fluido

$$V = g D^2 (\rho_s - \rho_f) / 18 \mu$$

$g$  = gravedad;  $D$  = diámetro del grano;  $\rho_s$  = densidad partícula;  
 $\rho_f$  = densidad fluido;  $\mu$  = viscosidad del fluido



Fining-up of a series  
of beds

---

Una implicación de esta ley es que los clastos de mayor diámetro son los que requieren más altas velocidades para ser levantados y los primeros en asentarse cuando se encuentran en suspensión.

La ley de Stokes predice entonces la velocidad y el orden de asentamiento, su mayor precisión es en clastos tamaños de arena, pues en algunos casos no siempre lo hace con precisión:

El asentamiento de los clastos de mayor tamaño crea **turbulencias** en el fluido disminuyendo su velocidad.

La **forma** de las **partículas** es un factor que afecta, ya que las partículas oblongas de cualquier tamaño, pero más las pequeñas, pueden tardarse más en caer (ej. las micas, algunas arcillas) que otras de igual tamaño.

En algunos granos de menor tamaño se crea una **atracción electrostática** que hace se aglutinen y se comporten como granos de mayor tamaño (esto particularmente sucede en partículas tamaño limo transportadas por aire)

Partículas **grandes** pero **poco densas** o **pequeñas y pesadas** se asentarán en el orden que les corresponde a su densidad no a su tamaño.

Un decremento en velocidad producirá gradación normal

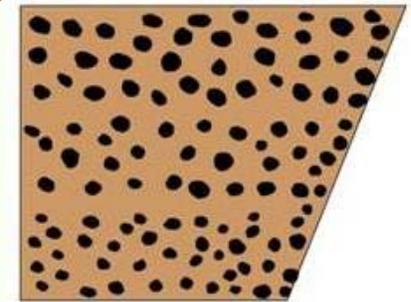
---

Un incremento en velocidad producirá gradación inversa

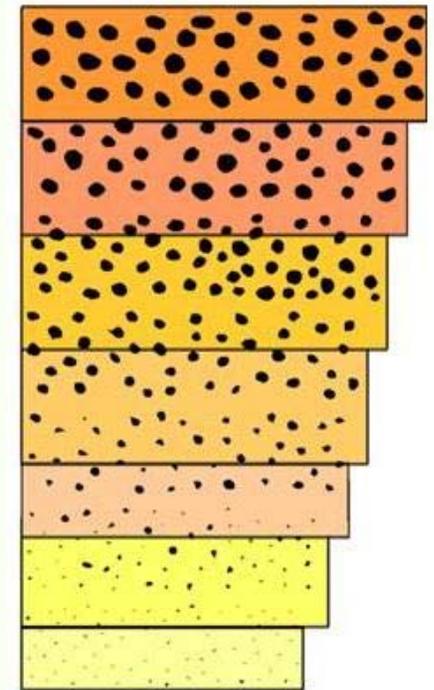
La gradación inversa también se puede tener con flujos piro o volcáni-clásticos de velocidad **decreciente** que contienen fragmentos de piedra pómez de gran tamaño (quedan arriba por su baja densidad) y líticos de menor tamaño (que quedan abajo pues son más densos)

Granos de oro, uranio, nódulos de manganeso, hematita u otros materiales pesados se encontrarán en partes inferiores pese a que su tamaño no sea muy grande debido a su alta densidad

Cuando la estratificación normal ó la inversa se presenta en una serie contigua de capas, indica que los eventos que formaron cada una de ellas fueron progresivamente de decremento o incremento de la velocidad de transporte de los sedimentos



Reverse grading  
in a bed



Coarsening-up of a  
series of beds

---

## Otras implicaciones de la ley de Stokes:

Granos finos transportados por aire (ej cenizas), permanecerán más tiempo en el flujo y viajarán más lejos que granos del mismo tamaño transportados por agua. Esto debido al contraste de densidades entre grano y fluido que es mayor y la viscosidad del fluido más baja.

El aire no es capaz, pese a tener alta velocidad, de mover guijarros y bloques, pero el agua si puede, debido a su mayor densidad.

De la misma manera el hielo es capaz de mover bloques más grandes que las corrientes fluviales, sin importar que su velocidad de movimiento es menor.

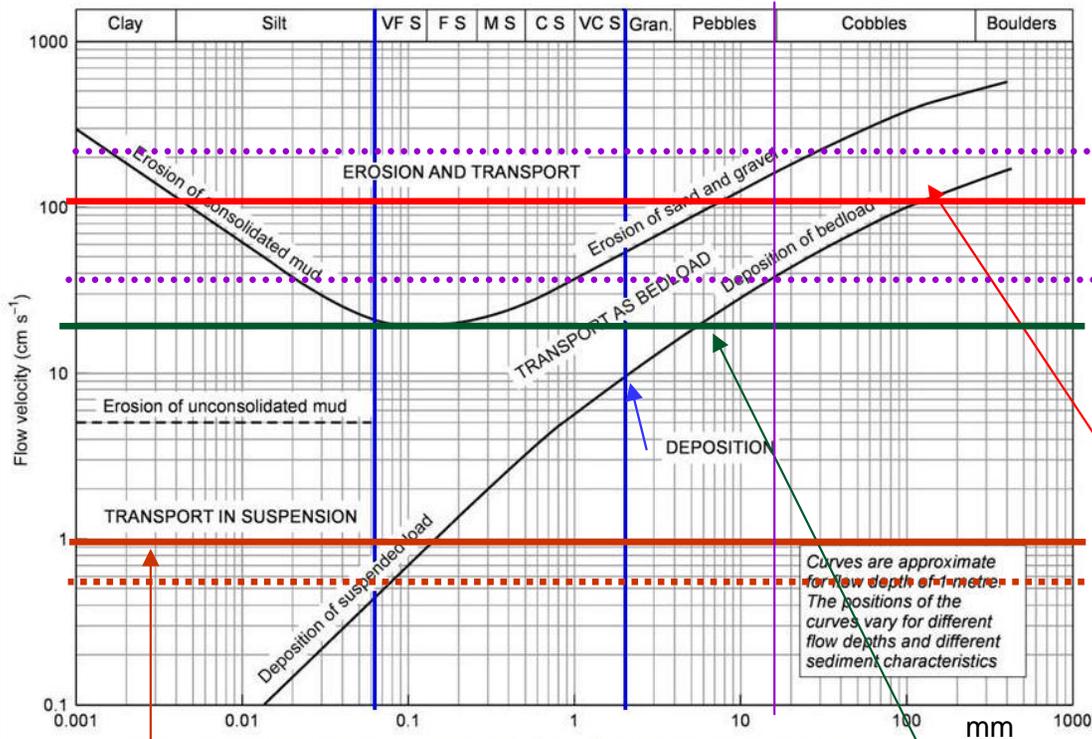
Lo mismo sucede con los flujos de lodos ó detritos (ej. lahares) y las corrientes de turbidez, las cuáles alcanzan velocidades relativamente altas

---

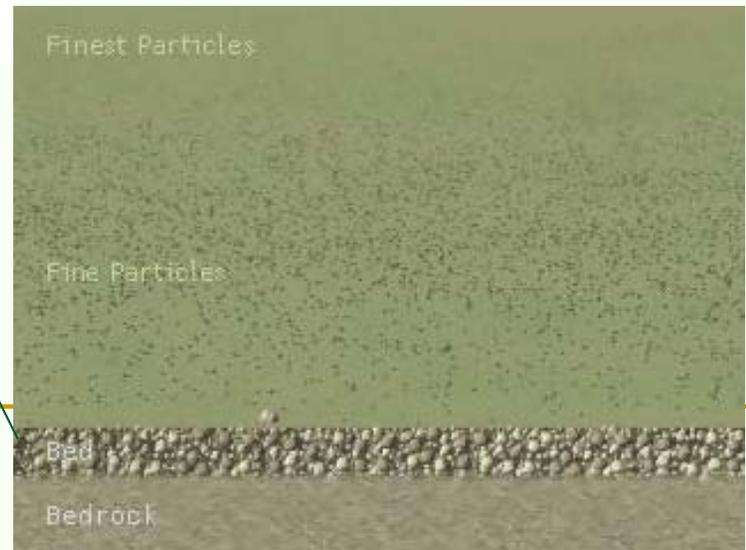
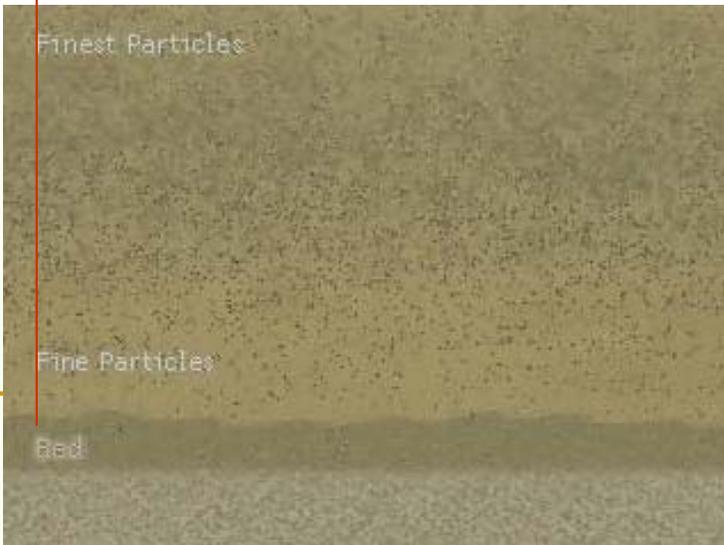
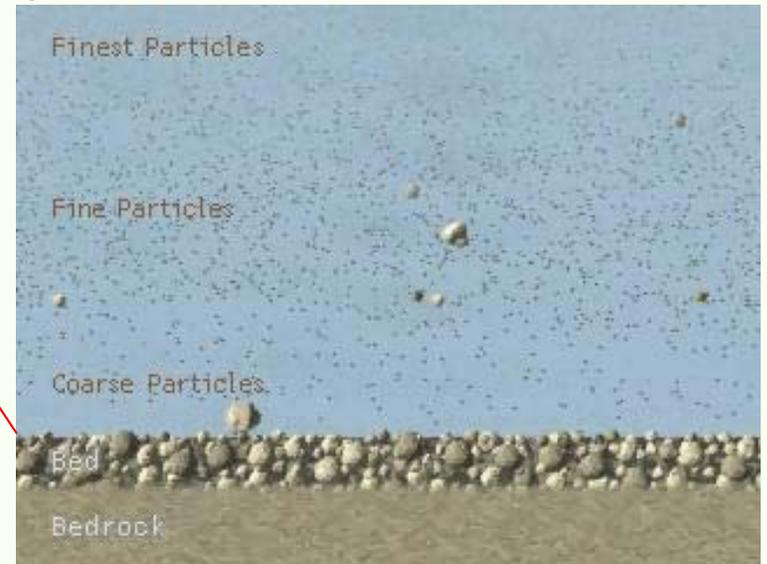
# Tamaño de grano y velocidad de flujo

## The Hjulstrom diagram

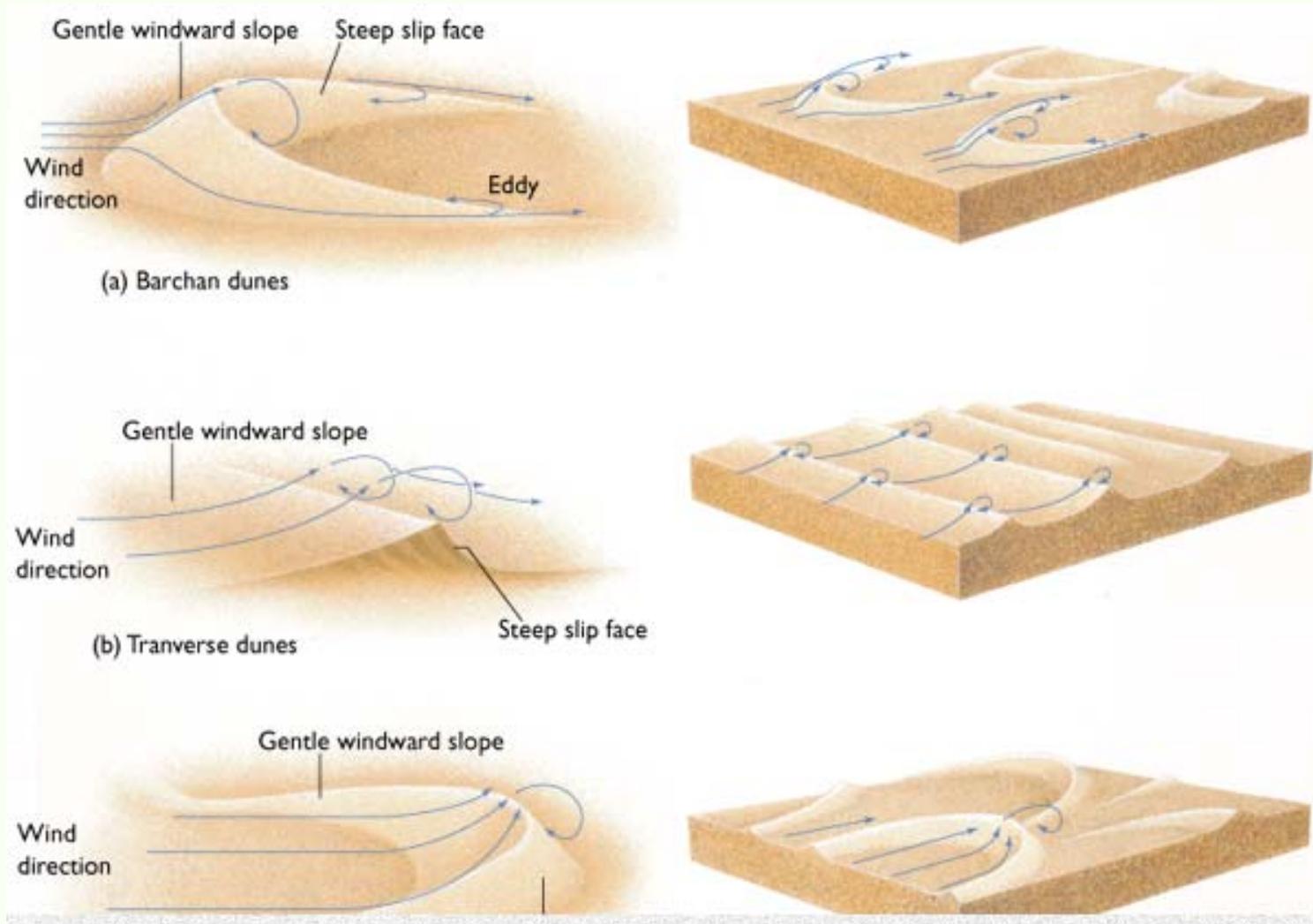
The relationship between water flow velocity and transport of loose grains



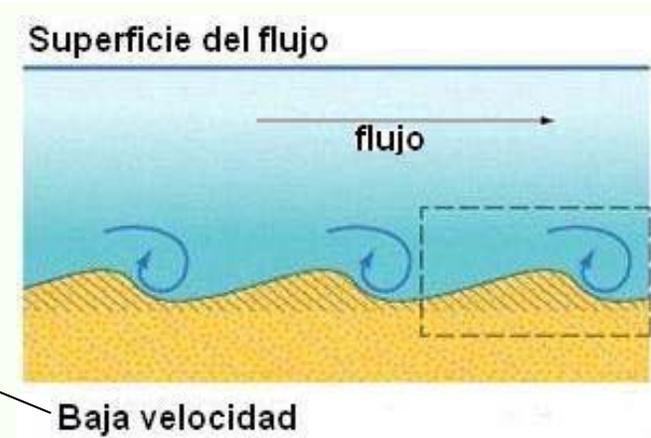
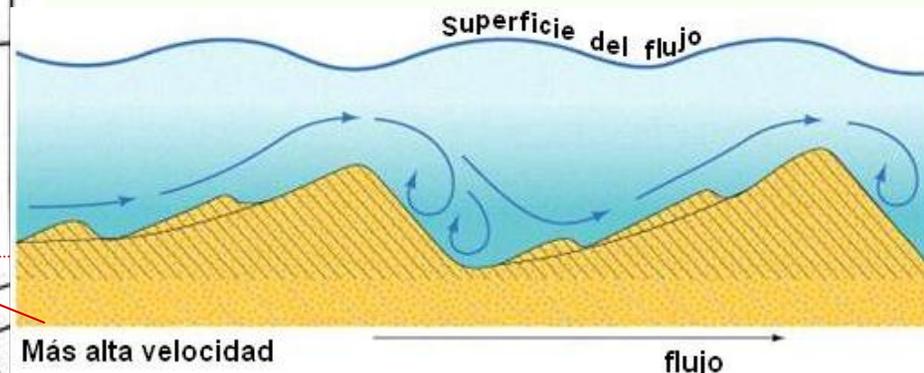
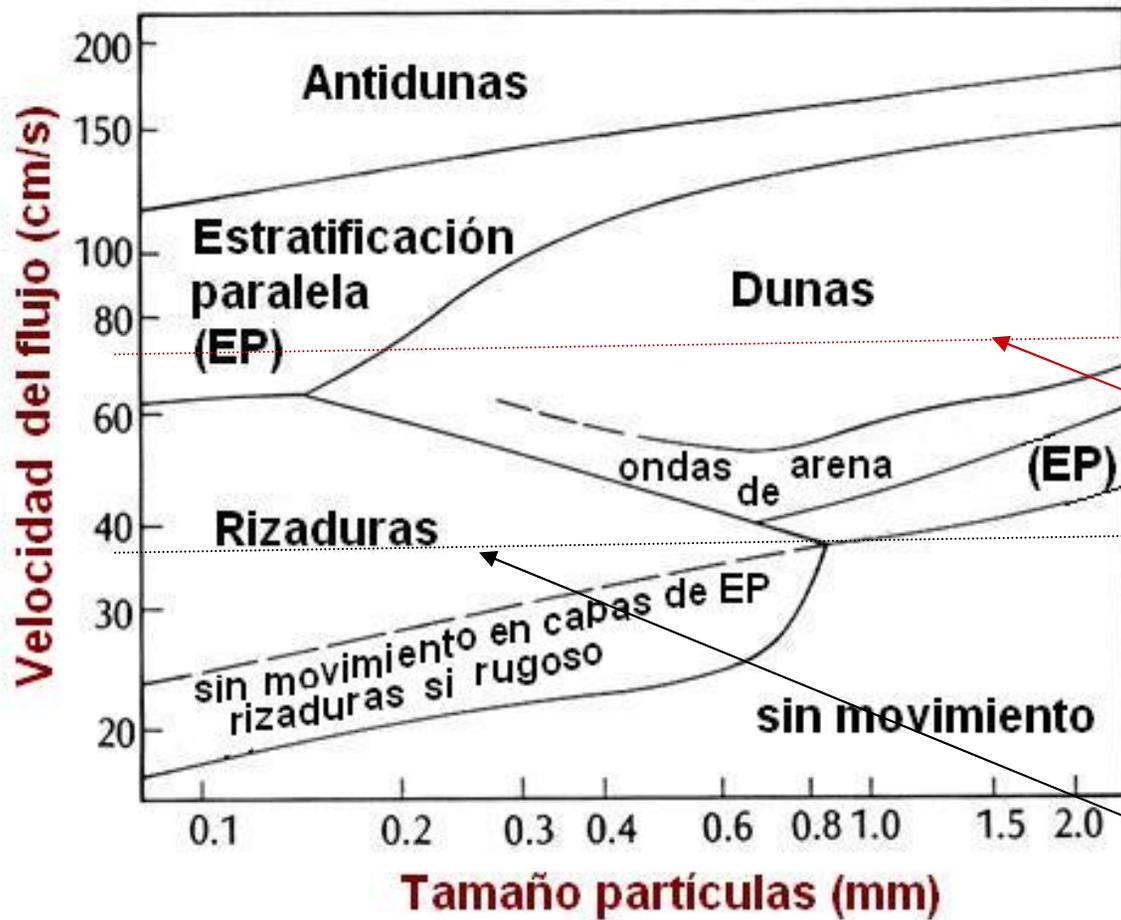
Solo a una velocidad crítica los clastos de cada rango de tamaño pueden ser incluidos en el flujo para  $vel < a$  ella los clastos son depositados



# Dirección de flujo y sitio depósito / forma de la estratificación/laminación

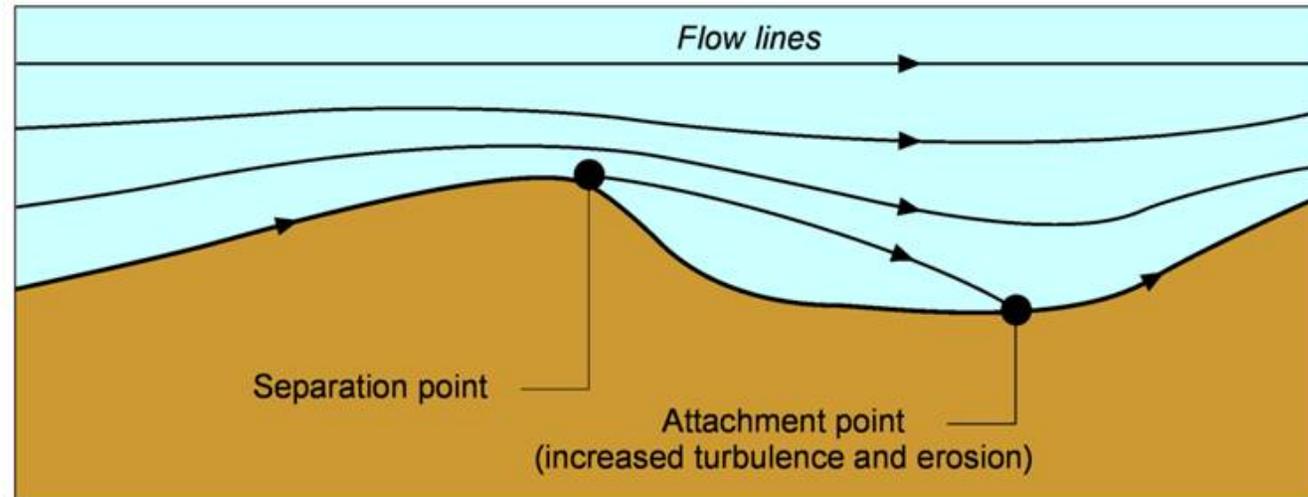


# Velocidad y forma de la estratificación/laminación

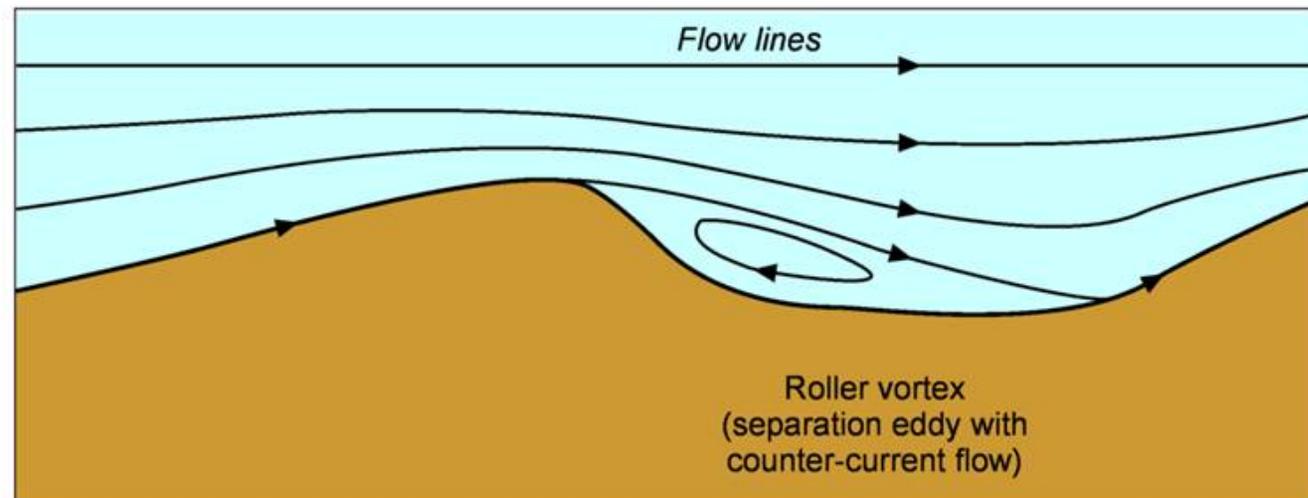


# Flow over a bedform

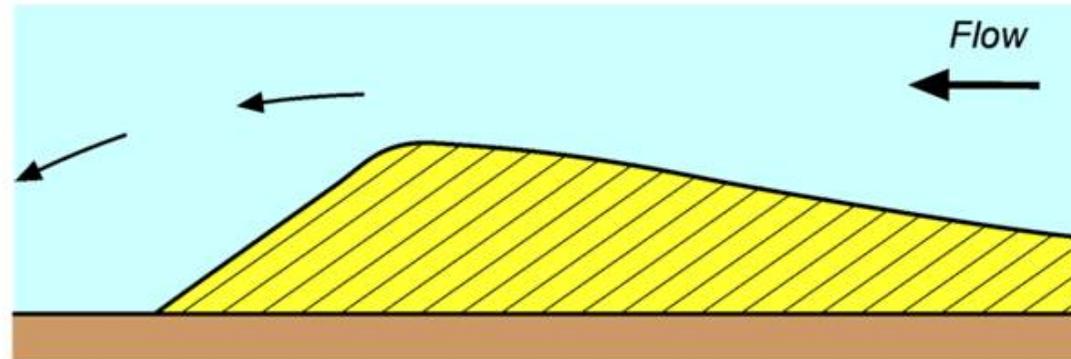
## 1. Erosion in the trough of a bedform



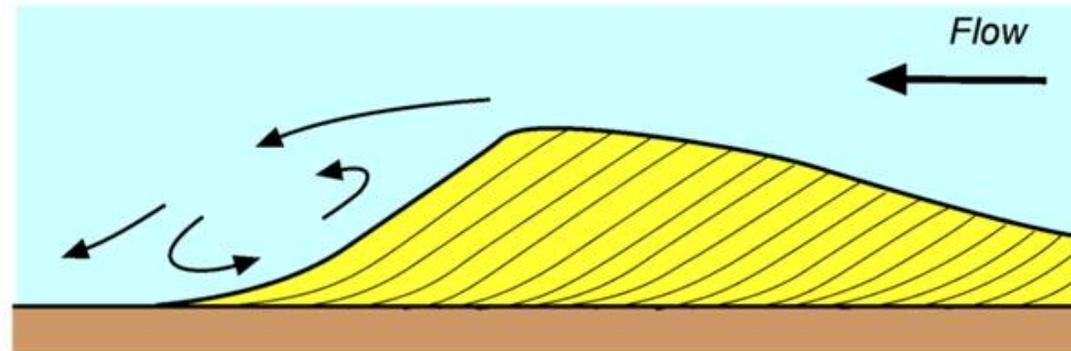
## 2. Development of counter-currents in lee of bedform



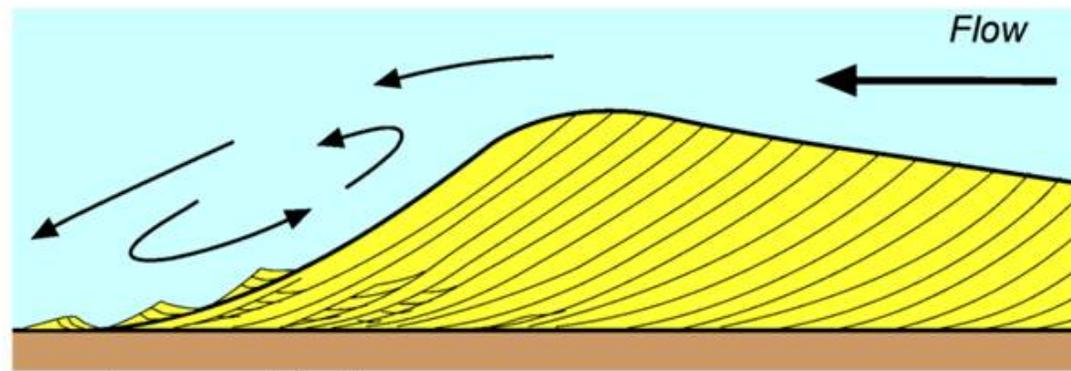
# The patterns of cross-beds under different flow conditions



sharp, angular contact

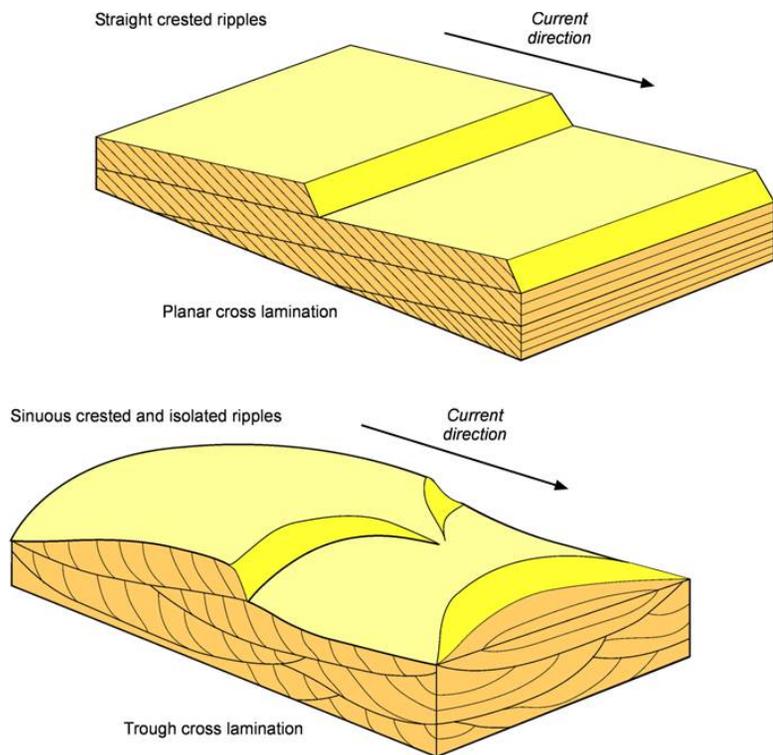


curved, asymptotic contact

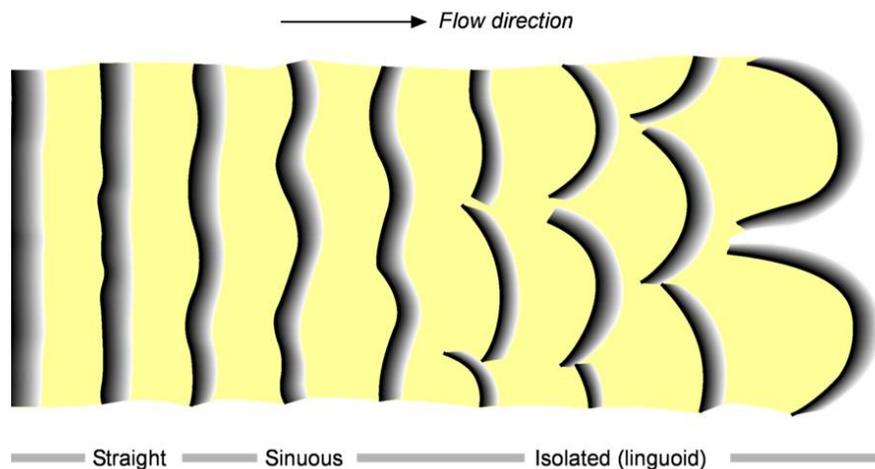


counter-current ripples

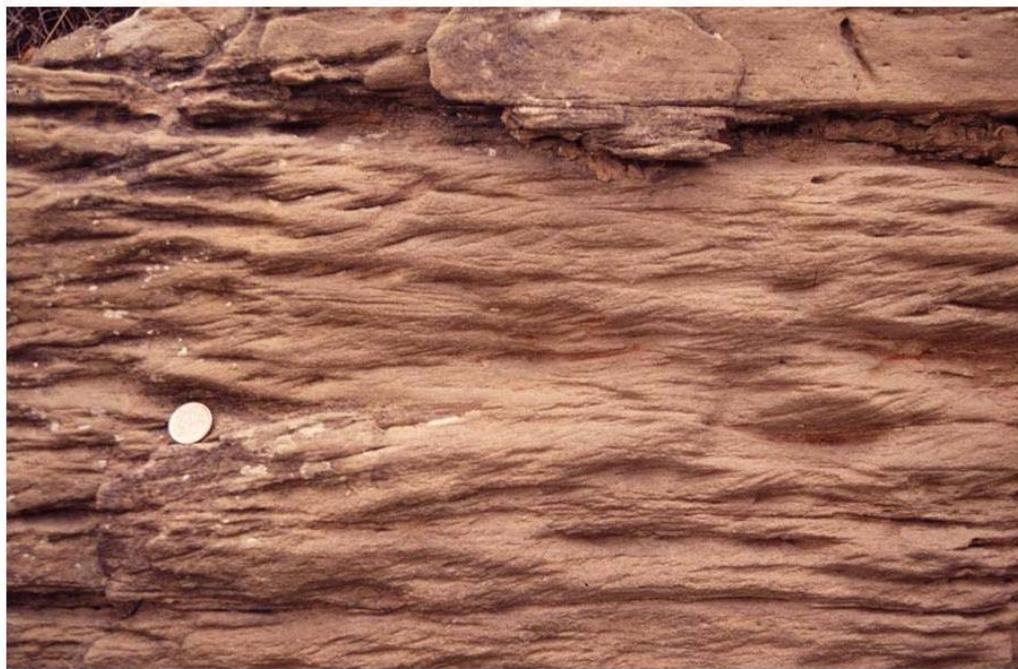
# Migrating ripples and cross lamination



# Current ripples in plan view



# Current ripple cross lamination in fine sandstone

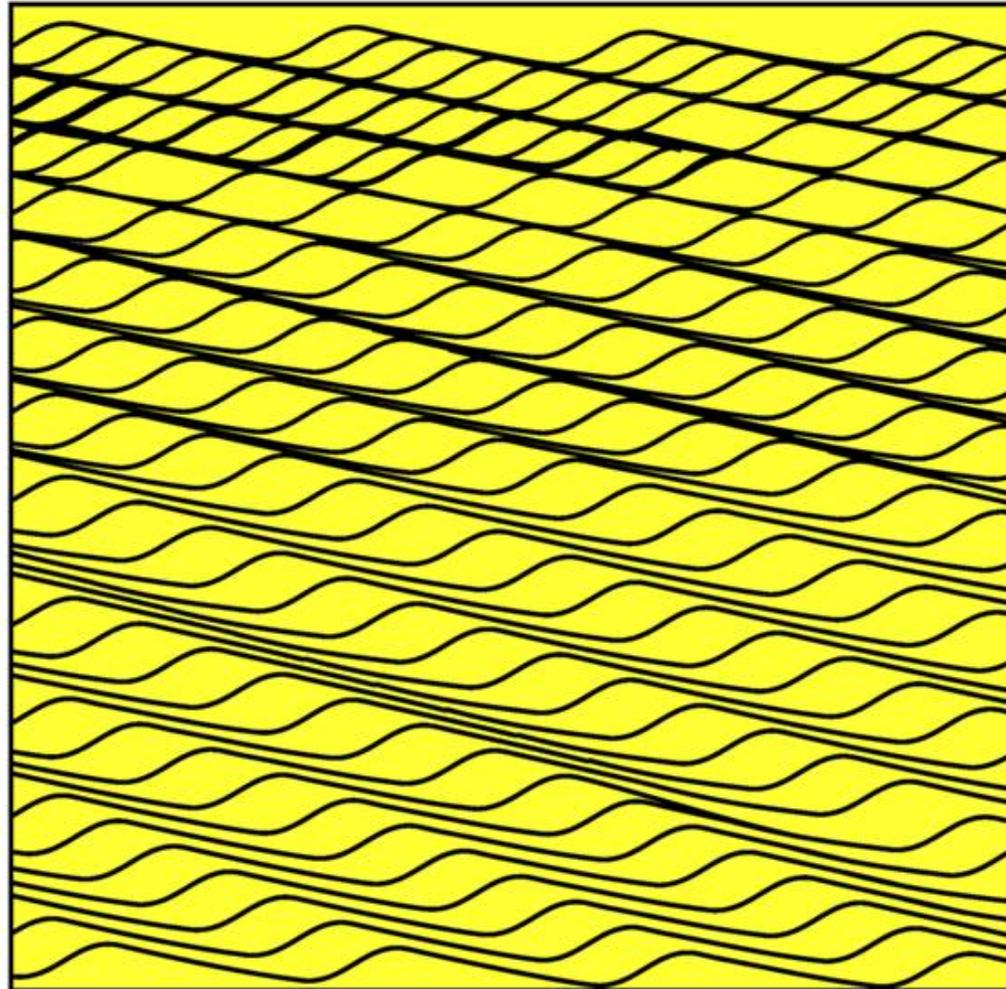


¿Para donde iba el flujo aquí?

Cross bedding with asymptotic bases to the cross-beds



# Climbing ripples



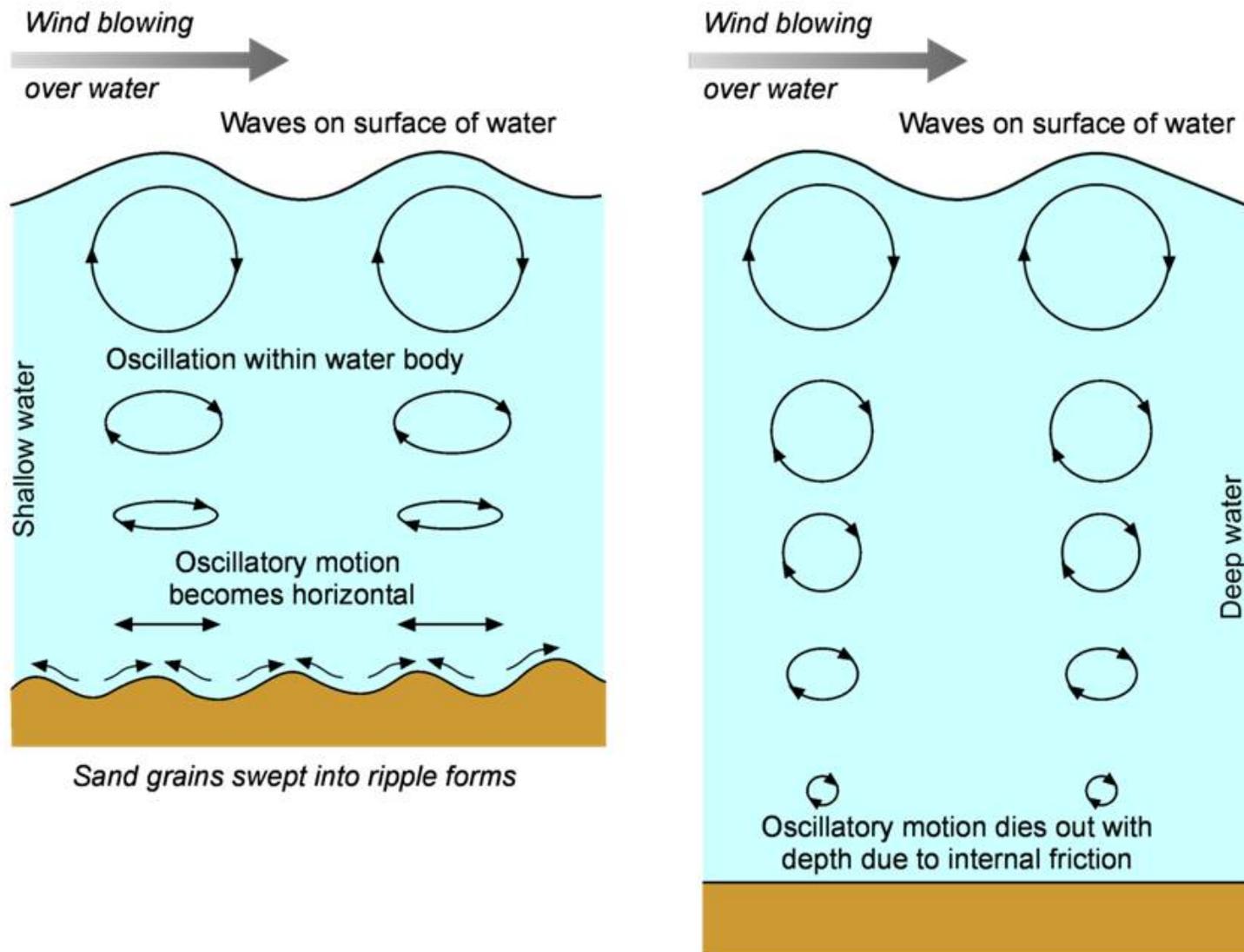
low angle of climb

moderate rate of  
deposition

steep angle of climb

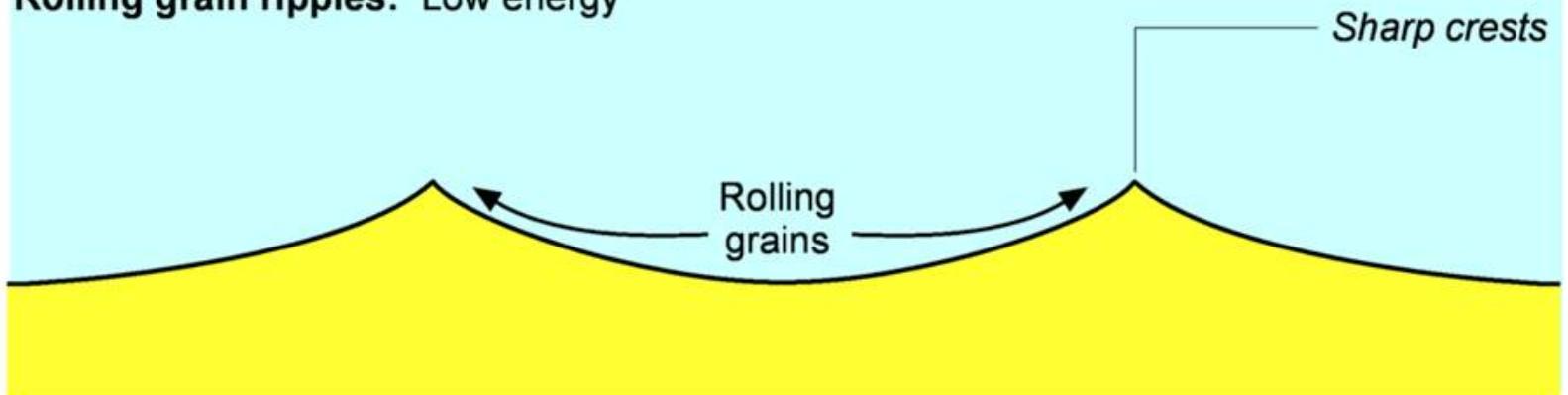
high rate of  
deposition

## The formation of wave ripples in sediment

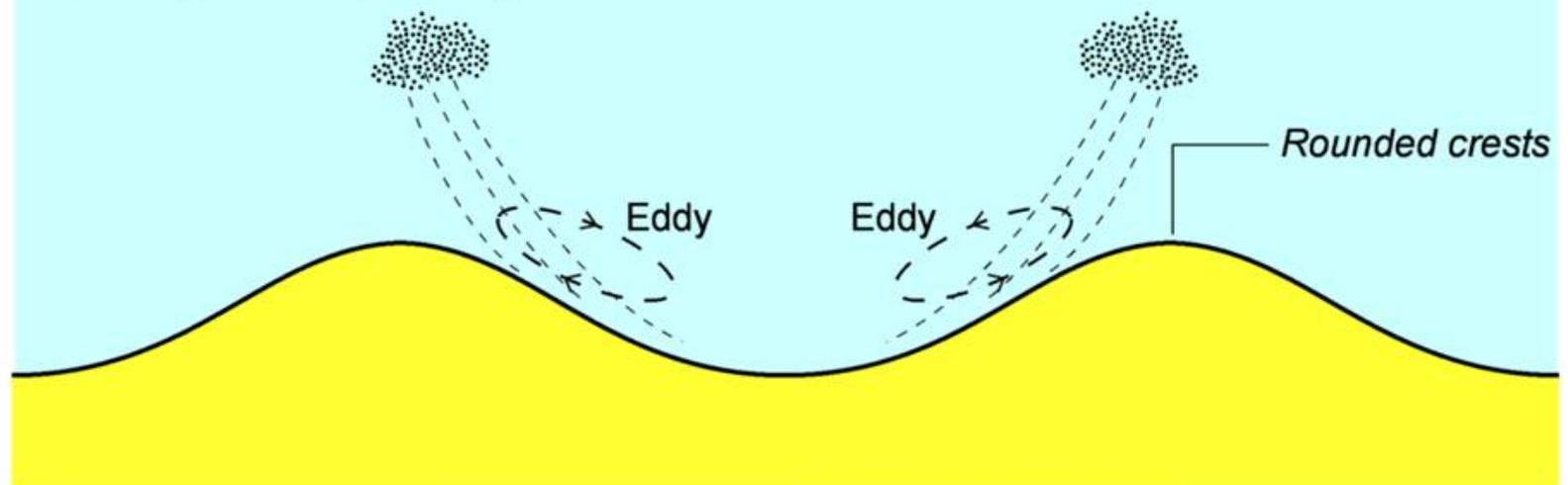


## Forms of wave ripple

**Rolling grain ripples: Low energy**



**Vortex ripples: High energy**



# Flujos de masas

- **Flujos de gravedad.**- flujos de lodos o de detritos.

Mezclas densas y viscosas de sedimento y agua (sedimento >> agua). Tienen bajo no. de **Re**, de tal forma que son laminares, por lo que carecen de gradación. Producen paraconglomerados poco seleccionados, soportados por matriz, que pueden variar lateralmente a grauvacas (conforme se alejan de fuente).

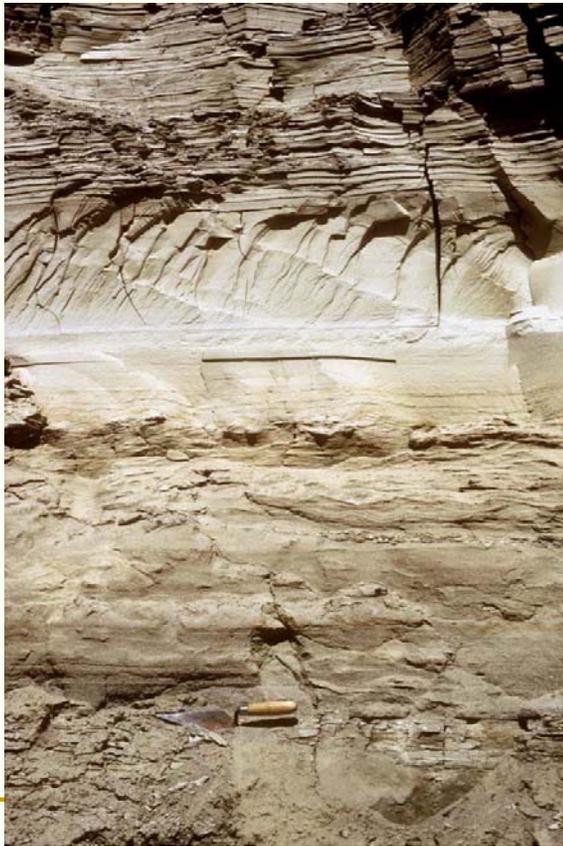
Si entran a un cuerpo de agua se diluyen y pueden formar una corriente de turbidez con estratificación gradada

- **Corrientes de densidad o turbidez.**- mezclas menos densas de grava, arena y lodo transportadas por agua que fluyen sobre pendientes fuertes a suaves de lagos, plataformas continentales y al pie del talud continental. Con alto no de **Re**, por lo que suelen ser de flujo turbulento y por tanto presentan gradación. El espesor del flujo es mayor corriente arriba; pueden tener grandes volúmenes. Se depositan ampliamente con espesores muy variables.

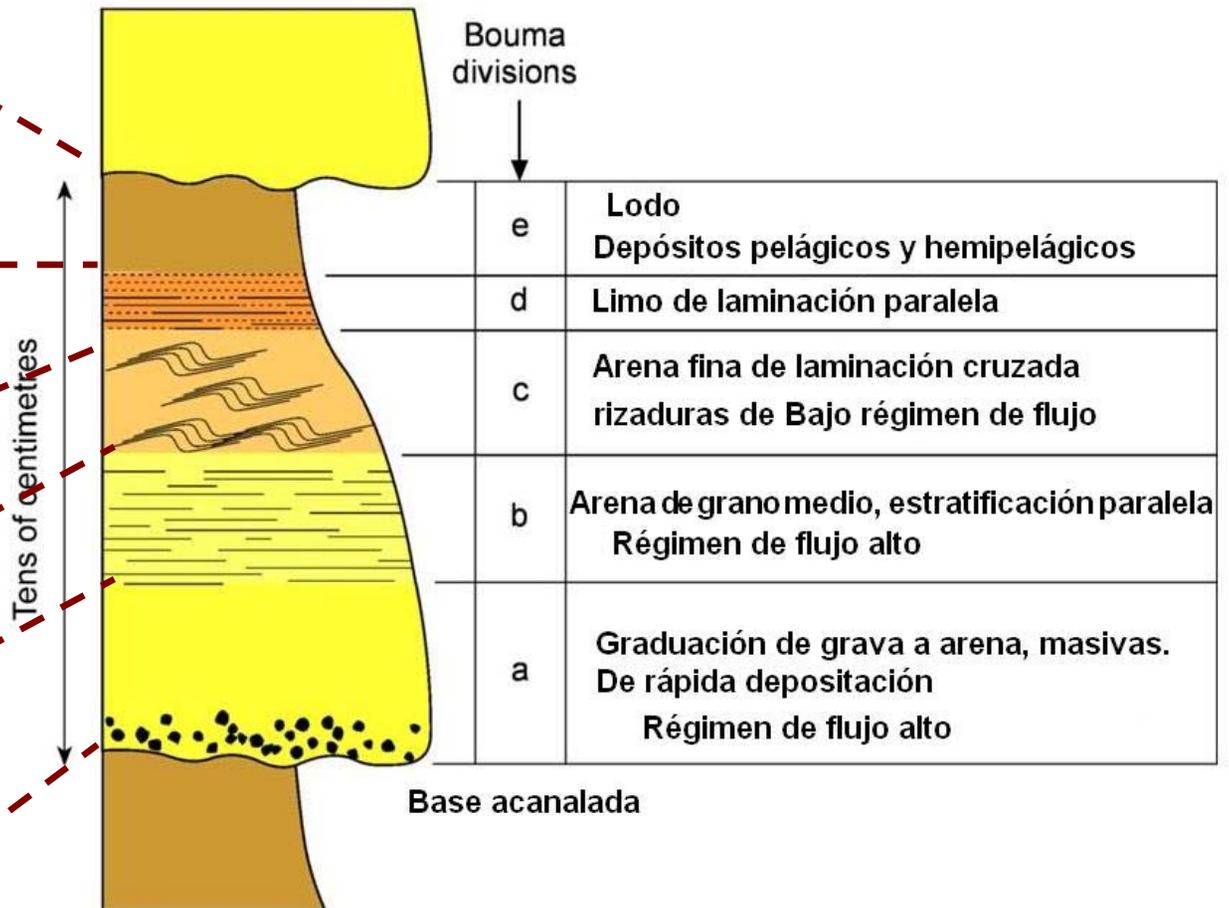
Se identifican dos tipos: • **Baja - moderada densidad** y • **Alta densidad**

# Flujos de masas.- Corrientes Turbidez

1. De baja a moderada densidad.- Se caracterizan por presentar ciclos de depósitos rápidos de velocidad decreciente (corriente de turbidez) cubiertos por depósitos de aguas tranquilas: “secuencia Bouma”

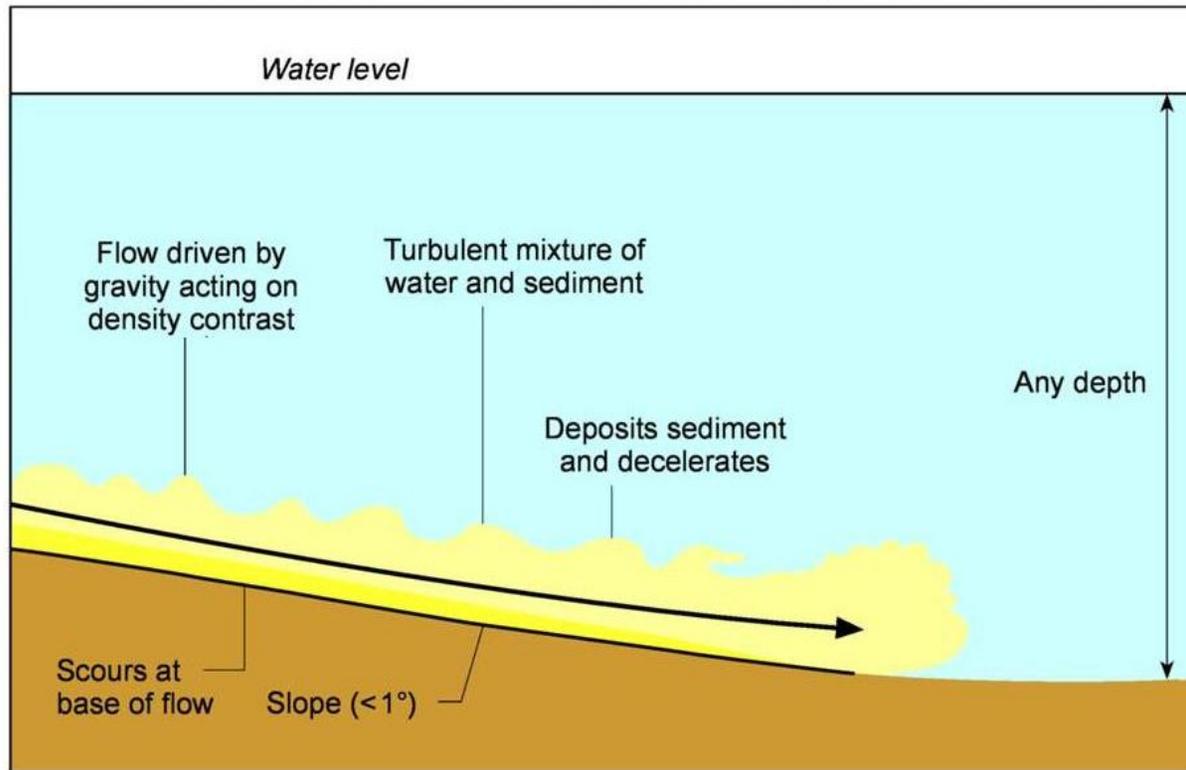


The 'Bouma Sequence' in a turbidite deposit

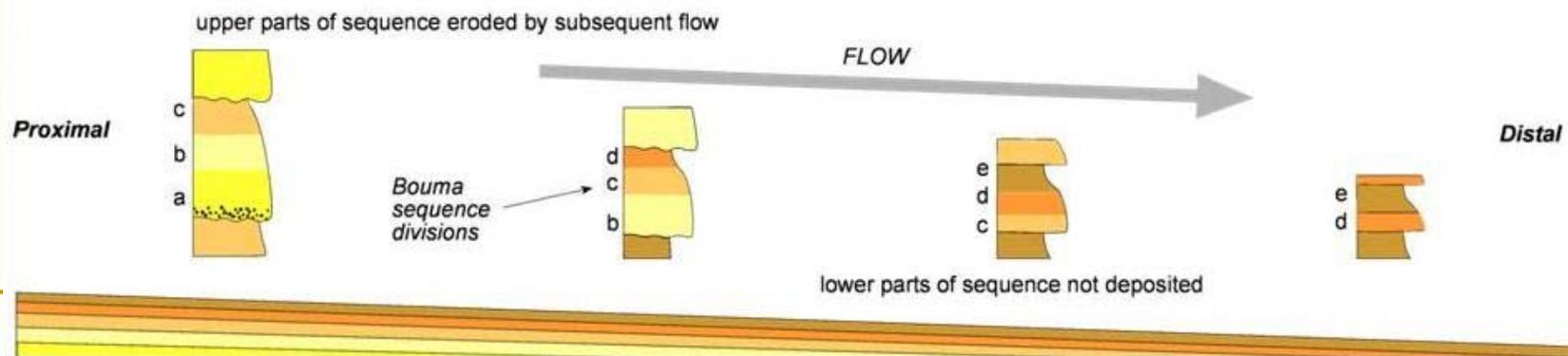


## A turbidity current

A turbulent mixture of sediment and water deposits a graded bed – a turbidite



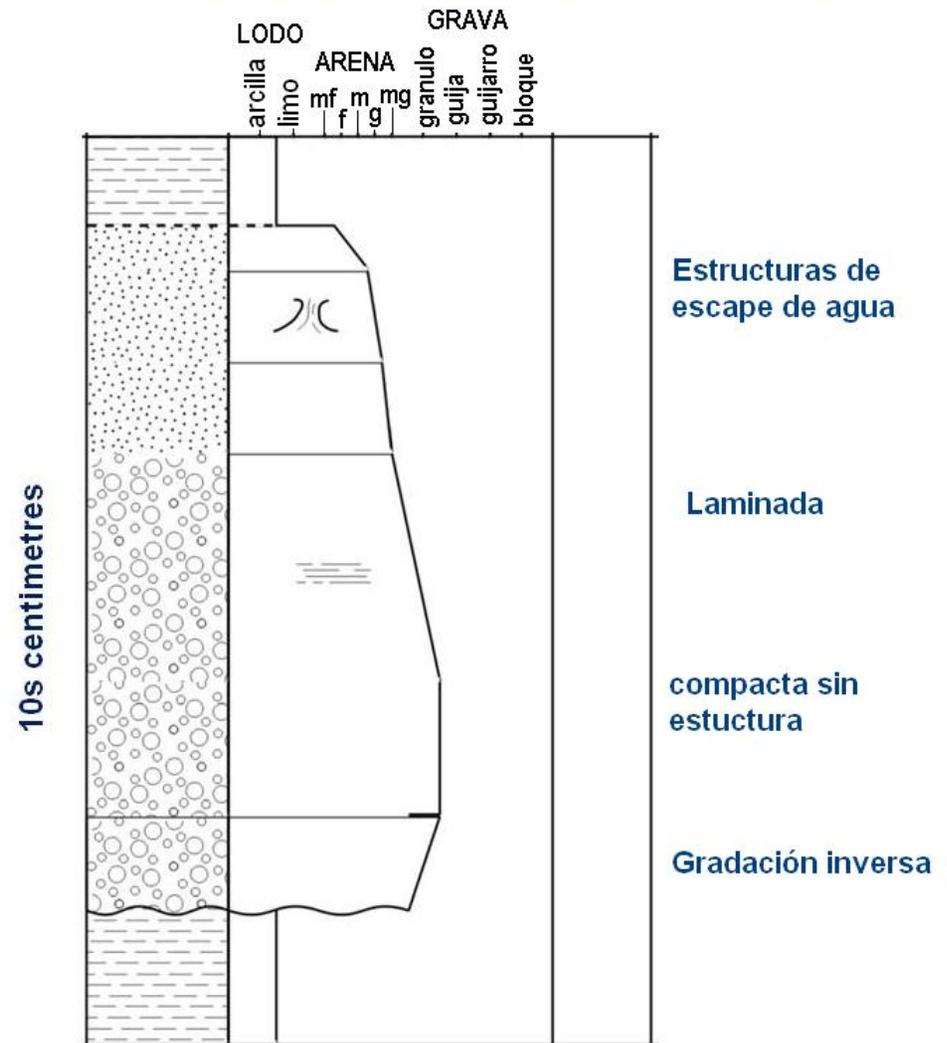
## Proximal to distal changes in turbidity currents deposits



# Flujos de masas.- Corrientes Turbidez

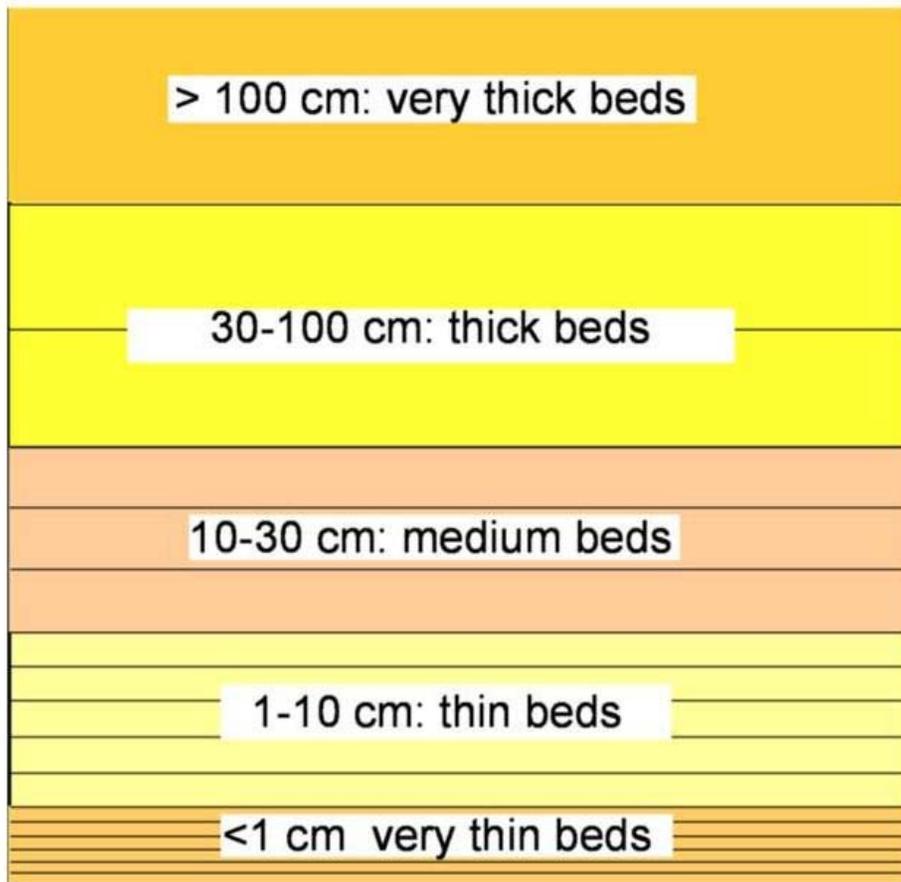
2. De alta densidad.- Se caracterizan por presentar ciclos que tienen una parte inferior de granulometría más gruesa en la que se identifican una parte  $S_1$  y  $S_2$  con material grueso acarreado por tracción cubiertos por una zona  $S_3$  de arena y lodos con estructuras con escape de agua, sugiriendo que el depósito fue muy rápido. Cubren a esta secuencia depósitos finos de aguas tranquilas.

A high-density turbidite deposited from a flow with a high proportion of entrained sediment

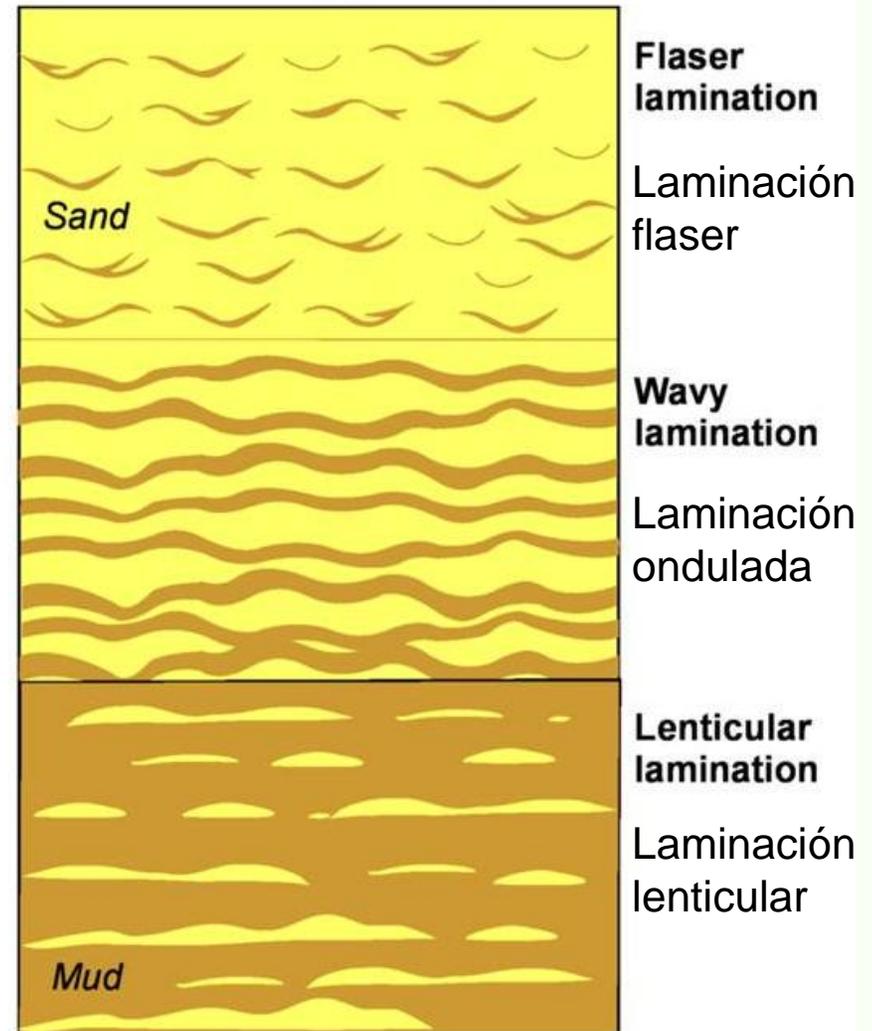


# Terminología para describir estratificación y estructuras sedimentarias

## Bed thickness terminology



## Lenticular, wavy and flaser bedding in deposits



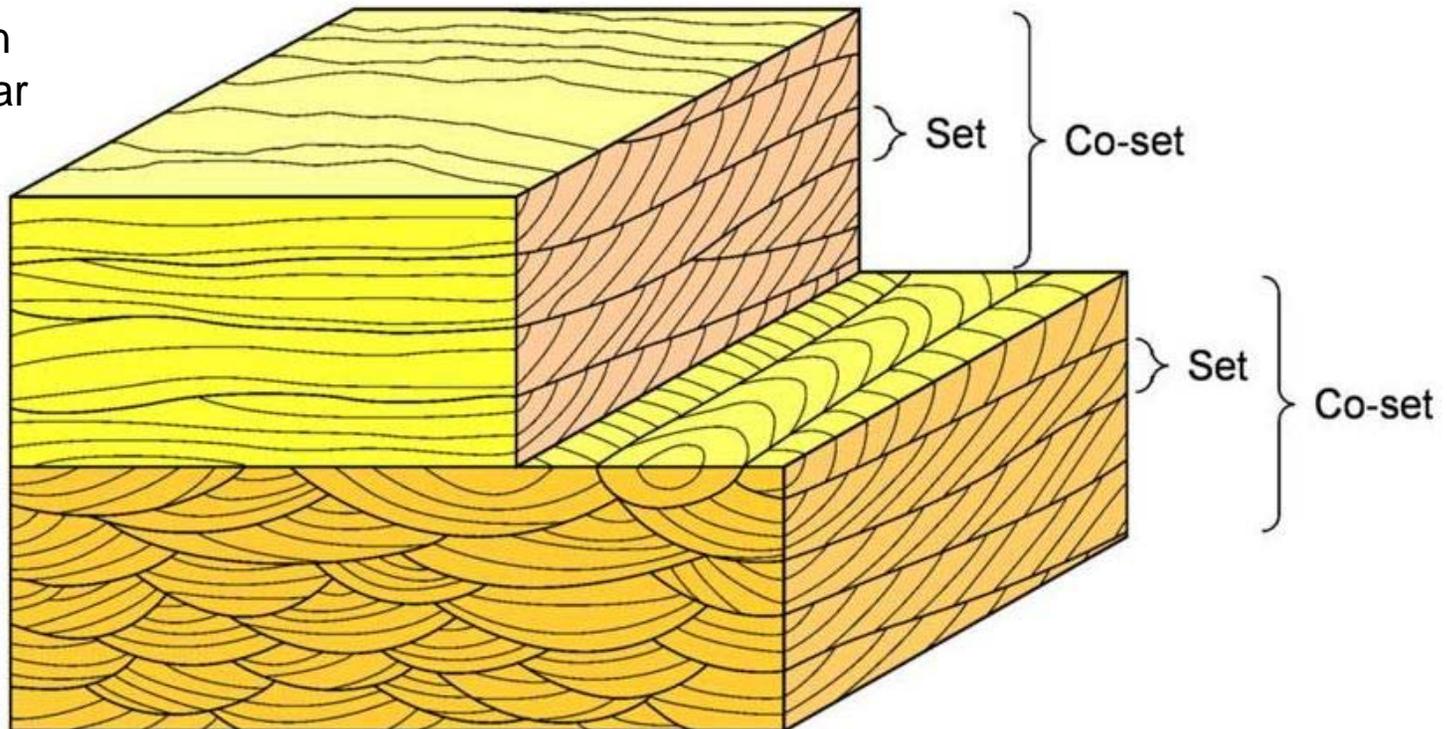
# Terminología para describir estratificación y estructuras sedimentarias

## Terminology used for sets and cosets of cross-stratification

Estratificación  
cruzada planar

Planar  
cross  
beds

Trough  
cross  
beds



Estratificación  
cruzada cóncava