

Transporte de Sedimentos:

Dinámica de los Fluídos

Los agentes de transporte

Olas, mareas y corrientes oceánicas



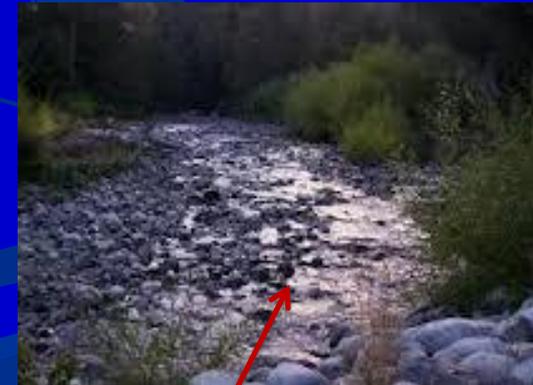
Hielo (glaciar)



Viento



Gravedad



Rios y arroyos

FUNDAMENTOS DEL FLUJO DE FLUIDOS

Objetivo final = partiendo de las propiedades de una roca sedimentaria/sedimento, inferir las condiciones de flujo en la cual esa roca se formó, es decir en las condiciones que el sedimento fue transportado y acumulado.

- ◆ Fluidos = líquidos y gases, no tienen resistencia interna (strength) al esfuerzo de cizalla (shear stress) y se deforman rápida y completamente.
- ◆ Las fuerzas que actúan en sólidos y líquidos pueden representarse como vectores que tienen componentes normal y paralela a la superficie del cuerpo. La componente de fuerza perpendicular a la superficie del cuerpo, por unidad de área es la presión (P). La componente de fuerza paralela a la superficie del cuerpo es el esfuerzo de cizalla (Γ).

Presión y Cizalla

- Cizalla (τ) - se refiere a la fuerza o esfuerzo ejercido paralelo a la superficie

$$\text{Cizalla } (\tau) = F/A$$

- Presión (P) – se refiere a la fuerza o esfuerzo ejercido perpendicular a la superficie

$$\text{Presión} = F/A$$

TRANSPORTE Y ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS

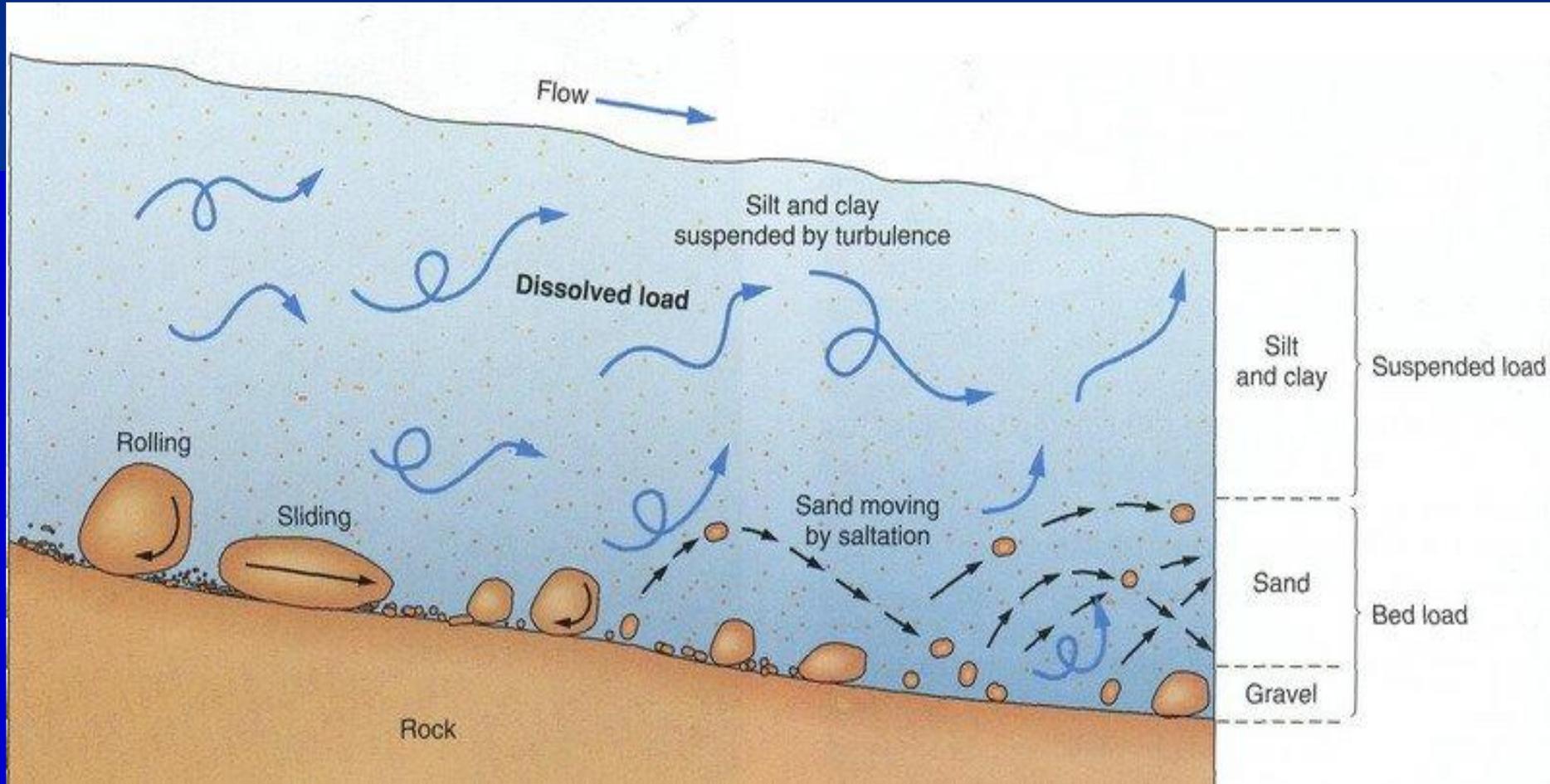
- **FLUJOS FLUIDOS**

- **Acuosos**
- **Aéreos**

- **FLUJOS DENSOS**

- **GRAVEDAD**

Modos de transporte de las partículas: rolido, saltación, suspensión



Fluídos

- Sustancias que no transmiten esfuerzos
- Se deforman cuando se les aplica una fuerza, incluso bajo su propio peso
- Incluye, agua y gases
- Fuerzas – actúan en todo el fluido

Agua, aire y mezclas conteniendo diferentes proporciones de agua son los fluídos que interesan en el transporte de sedimentos

Propiedades de los Fluidos

Los dos parámetros principales son: densidad y viscosidad.

Densidad es una medida de la masa por unidad de volumen (g/cm^3). El agua es hasta 700 veces más densa que el aire. Menor densidad menor competencia.

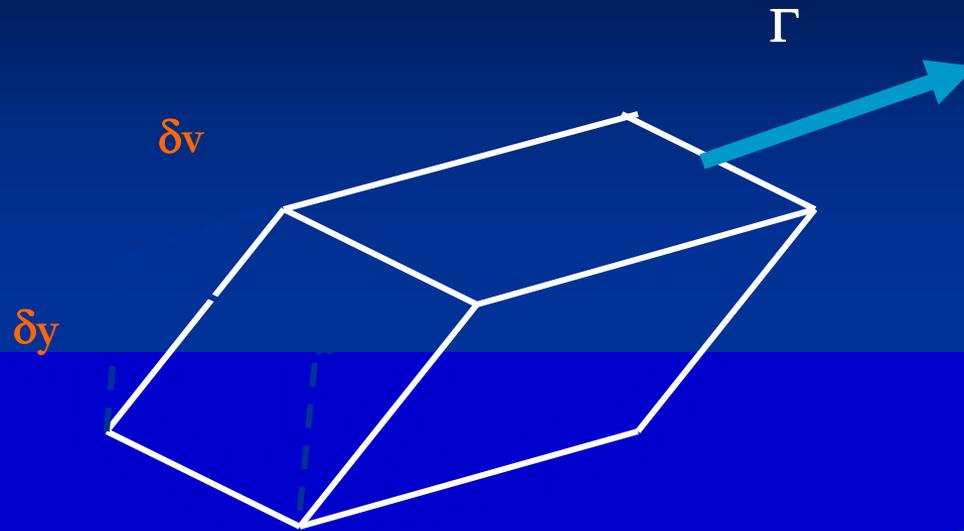
Viscosidad es una magnitud relacionada con la resistencia del fluido a la cizalla, es decir a fluir, y se mide en Poise (g/cm/sec). El agua es hasta 55 veces más viscosa que el aire. Mayor viscosidad implica menor turbulencia y menor poder erosivo.

Un factor importante que afecta tanto a la densidad como a la viscosidad es la temperatura (en general ambas disminuyen con el aumento de la temperatura).

Viscosidad

- Medida de la fricción interna entre las partículas de un fluido
 - Cohesión molecular
 - Resistencia del fluido a deformarse (o fluir)
- Viscosidad dinámica o molecular = μ (mu) = esfuerzo de cizalla/ritmo de cambio por unidad de tiempo

Ley de Newton de la Viscosidad



$$\Gamma = \mu \cdot \delta v / \delta y$$

v = velocidad

y = distancia a la base (puede ser la profundidad)

μ = viscosidad dinámica

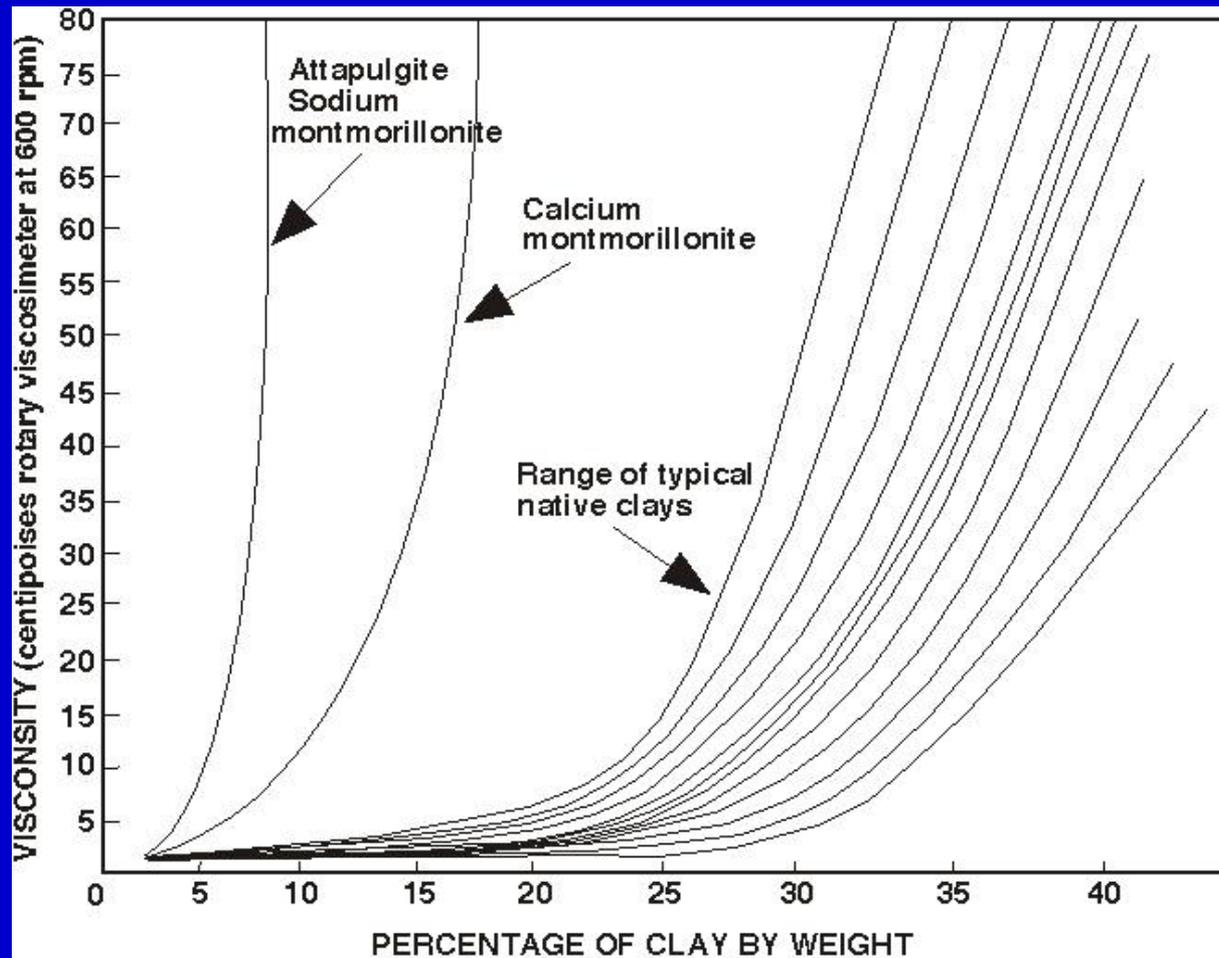
Γ = esfuerzo de ciza

μ es constante a $T^\circ = \text{constante}$

- **La viscosidad de un fluido es una medida de su resistencia a fluir, o sea al esfuerzo de ciza; *este es un concepto fundamental para la mecánica del transporte de los sedimentos.***

- Si tengo un fluido acuoso y le agrego partículas de arcilla en suspensión modifico su densidad y viscosidad, y también cambia su comportamiento dinámico. El fluido se vuelve no-Newtoniano (o sea que no obedece a las leyes de Newton), como ocurre con los torrentes de barro.

La concentracion y mineralogia de las arcillas en suspension dentro de un fluido tiene una influencia importante sobre la densidad y la viscosidad



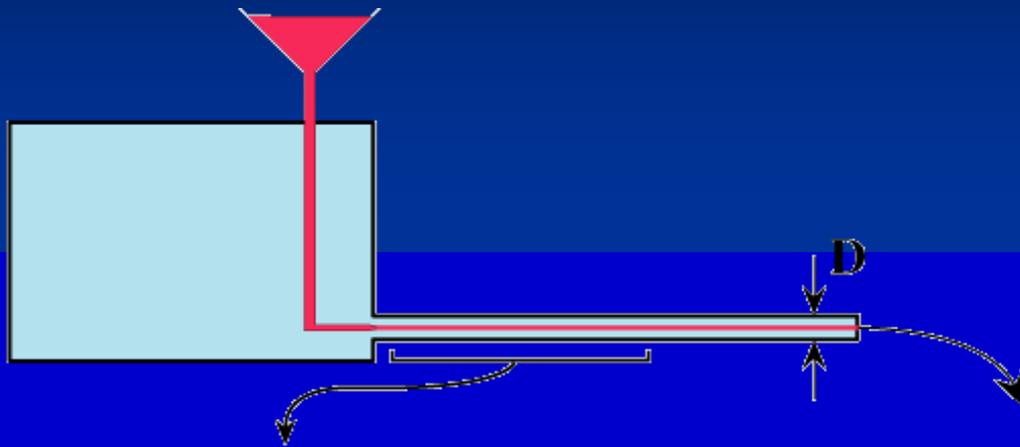
Viscosidad Cinemática (ν)

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

μ = viscosidad
 ρ = densidad

- Viscosidad constante a T constante; ρ no depende del esfuerzo de cizalla o de la duración del esfuerzo – Fluido Newtoniano
- $T \uparrow$ $\mu \downarrow$
- Viscosidad cinemática determina cuando un flujo desarrolla turbulencia

El experimento de O. Reynolds



El marcador sigue un camino recto



El marcador sigue un camino ondulado pero sin mezclarse



Inmediata mezcla

Tipos de Flujos Fluídos

- Flujo laminar – el flujo persiste como un movimiento unidireccional
 - Moléculas fluyen paralelamente
 - No hay movimientos hacia arriba y hacia abajo por difusión
- Flujo turbulento– flujo altamente distorsionado
 - Flujos perpendiculares a la dirección principal del movimiento
 - Transferencia de movimiento hacia arriba y abajo por procesos de macroescala
- Turbulencia = componente irregular y aleatorio del movimiento del fluido
- Remolinos = parte del fluido altamente turbulento

Flujo Laminar vs Turbulento

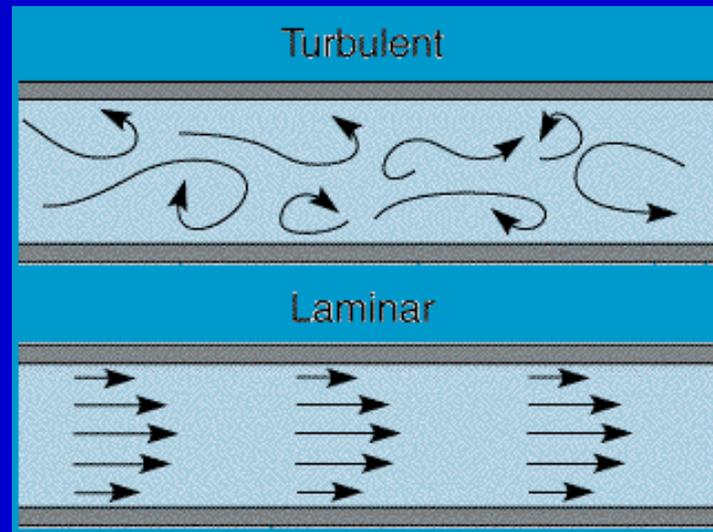
- Flujo Laminar – velocidad constante en un punto a través del tiempo
- Turbulencia
 - Mayoría de los flujos son turbulentos
 - Lenta velocidad de decantación – movimientos hacia arriba de la moléculas de agua
 - Incremento en la capacidad del fluido para erodar y capturar partículas del lecho pero menos eficiente en transportarlas
 - La velocidad medida en un punto varía de un momento a otro pero tiende a un valor promedio a lo largo del tiempo

Flujos Fluídos

Laminares versus Turbulentos.

Los números de **Reynolds** y **Froude** proveen un modo de expresar la naturaleza del flujo en términos de su comportamiento dinámico.

Número de Reynolds. Expresa la relación entre las fuerzas inerciales y viscosas dentro de un fluido y entonces el grado de turbulencia.



Número de Reynolds

$$R_e = UR\rho/\mu = UR/\nu$$

U = velocidad media del flujo

R = radio hidráulico (A/P)

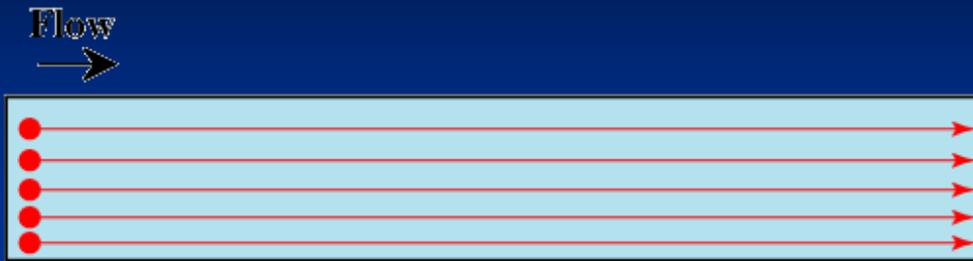
ν = viscosidad cinemática (μ/ρ)

ρ = densidad

μ = viscosidad

- Balance entre fuerzas inerciales (que causan turbulencia) y viscosas (suprimen turbulencia)
- Flujo Laminar: $Re < 500$ – domina viscosidad; poca profundidad o baja velocidad
- Flujo Turbulento: $Re > 2000$ – domina inercia; flujo profundo o rápido

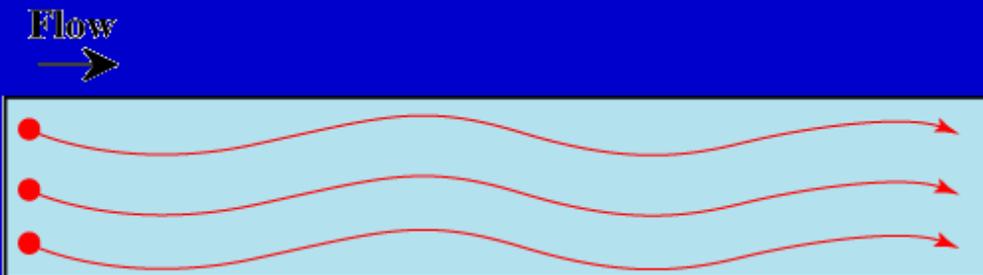
Resultados del experimento de Reynolds



Low discharge

Flujo Laminar: cada molécula sigue un camino recto y paralelo a los márgenes.

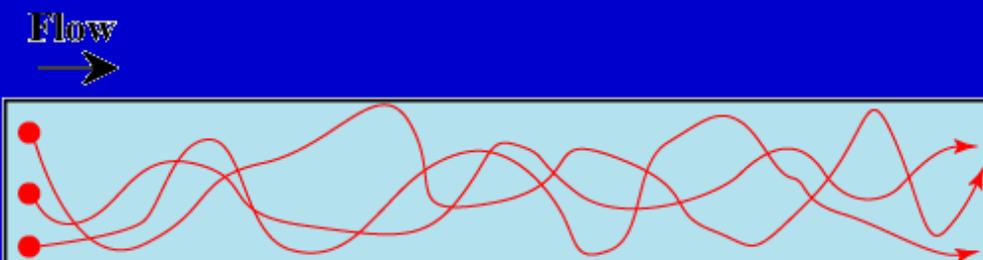
$$R < 500$$



Medium discharge

Flujo transicional: cada molécula sigue un camino ondulado y no paralelo a los márgenes.

$$500 < R < 2000$$



High discharge

Flujo turbulento: cada molécula sigue un camino complejo que lleva al desarrollo de remolinos y mezcla.

$$R > 2000$$

Esfuerzos:

Flujos Laminares vs Turbulentos

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

Flujo Laminar

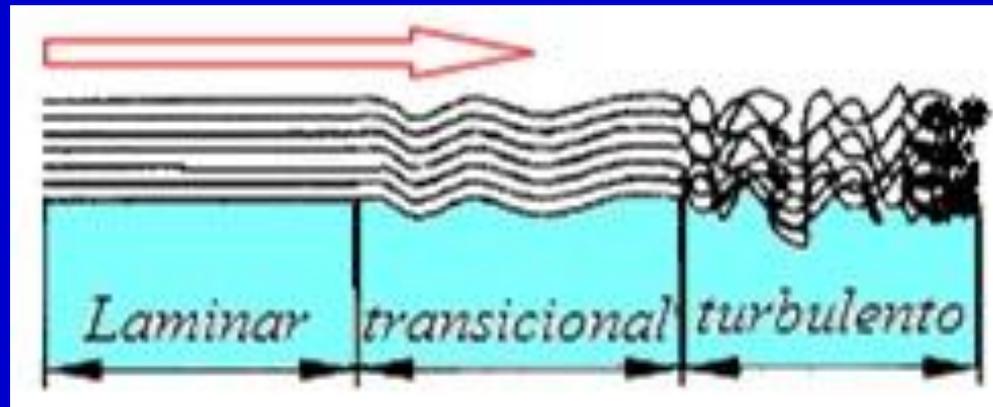
$$\tau = (\mu + \eta) \frac{du}{dy}$$

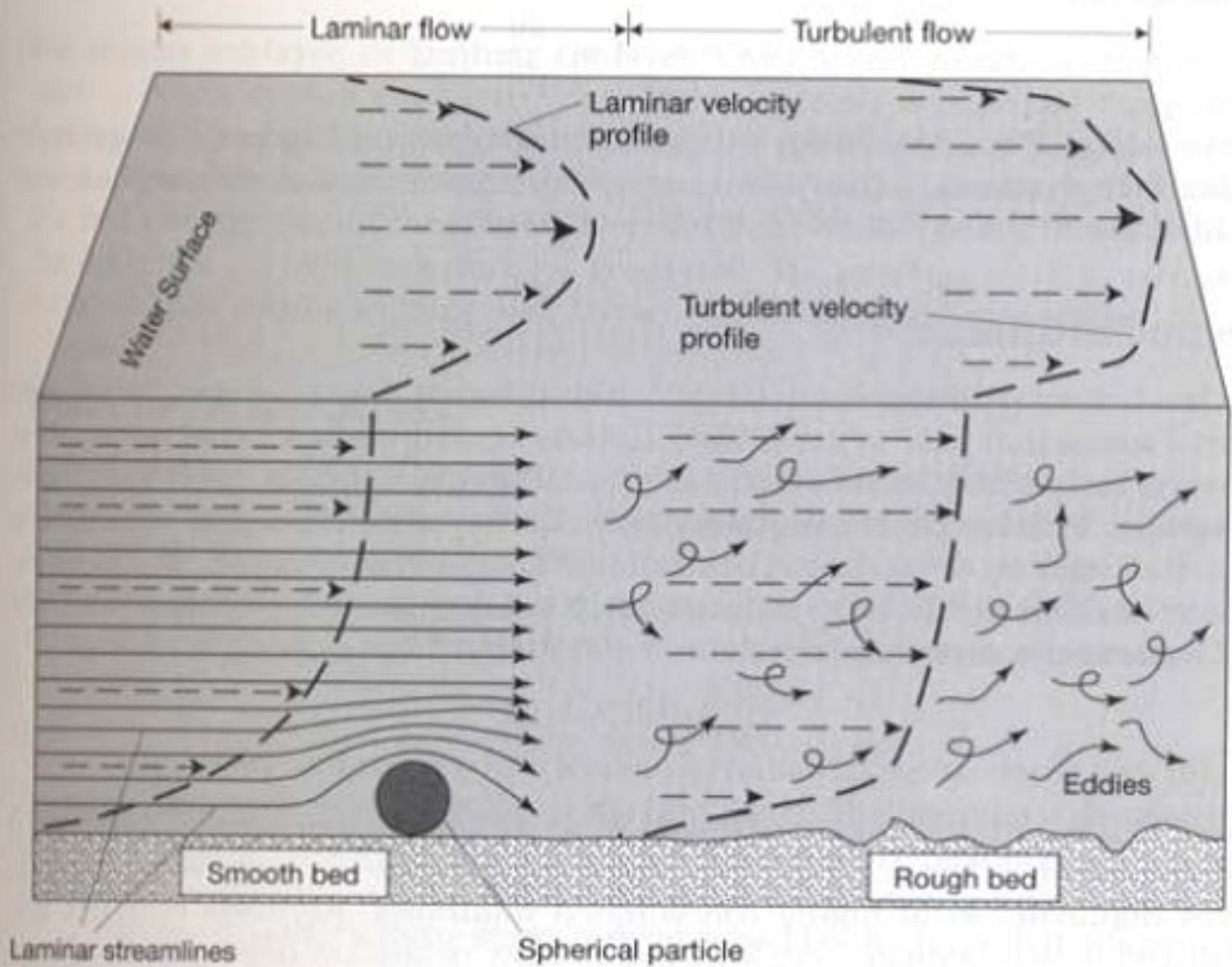
Flujo Turbulento

- Se le agrega una viscosidad aparente (viscosidad de remolino) (η o eta) a la ecuación para flujos turbulentos
- La turbulencia genera esfuerzos mayores sobre los flúidos adyacentes que en los flujos laminares

El flujo en canales abiertos donde hay una superficie libre y las fuerzas gravitacionales son importantes se describen utilizando el Número de Froude, que representa la relación entre las fuerzas inerciales y gravitatorias

Para flujos turbulentos la profundidad (L) es inversamente proporcional a la velocidad (U); en flujos laminares ambas son proporcionales.





Laminar streamlines

Spherical particle

Número de Froude

$$F_r = \frac{U}{\sqrt{gL}}$$

F_r = Número de Froude

U = velocidad media

\sqrt{gL} = velocidad del movimiento
de la onda superficial

g = aceleración de la gravedad

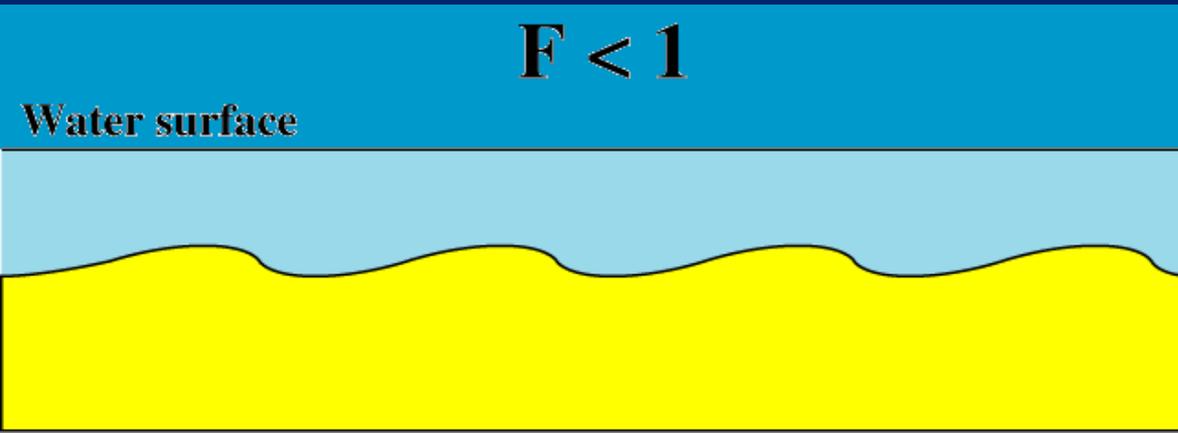
L = profundidad del agua

- Relación entre fuerzas inerciales y gravitacionales
- Gravedad influencia el modo en que el fluido trasmite ondas superficiales
- Valor adimensional (igual que Re)

Número de Froude

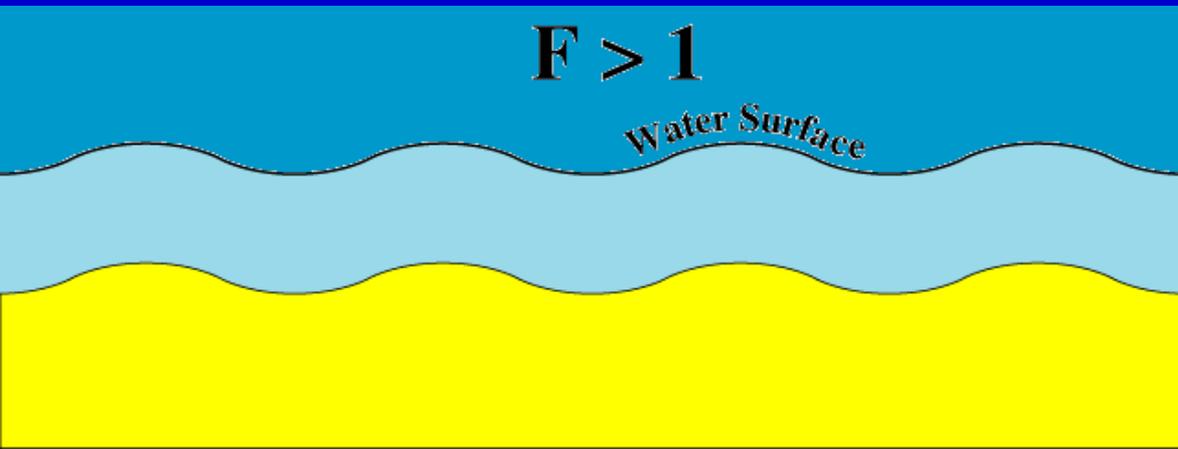
- $Fr < 1$ Tranquilo, Subcrítico
 - Velocidad de la onda $>$ velocidad del flujo
- $Fr > 1$ Rápido, Supercrítico
 - Ondas no pueden propagarse corriente arriba
- Fr tiene relación con el régimen de flujo
 - Define formas de lecho características que se desarrollan por un flujo sobre un lecho granular

$F < 1$, $U <$ las ondas de la superficie del agua se pueden propagar aguas arriba porque su velocidad es MAYOR a la del fluido. Flujo subcrítico o tranquilo (BAJO REGIMEN).



Las formas del lecho NO están en fase con las de la superficie del fluido.

$F > 1$, $U >$ las ondas de la superficie del agua NO se pueden propagar aguas arriba porque su velocidad es MENOR a la del fluido. Flujo supercrítico (ALTO REGIMEN).



Las formas del lecho están en fase con las de la superficie del fluido.

El agua no presenta ondulaciones

El lecho sí

El Regimen de flujo es bajo

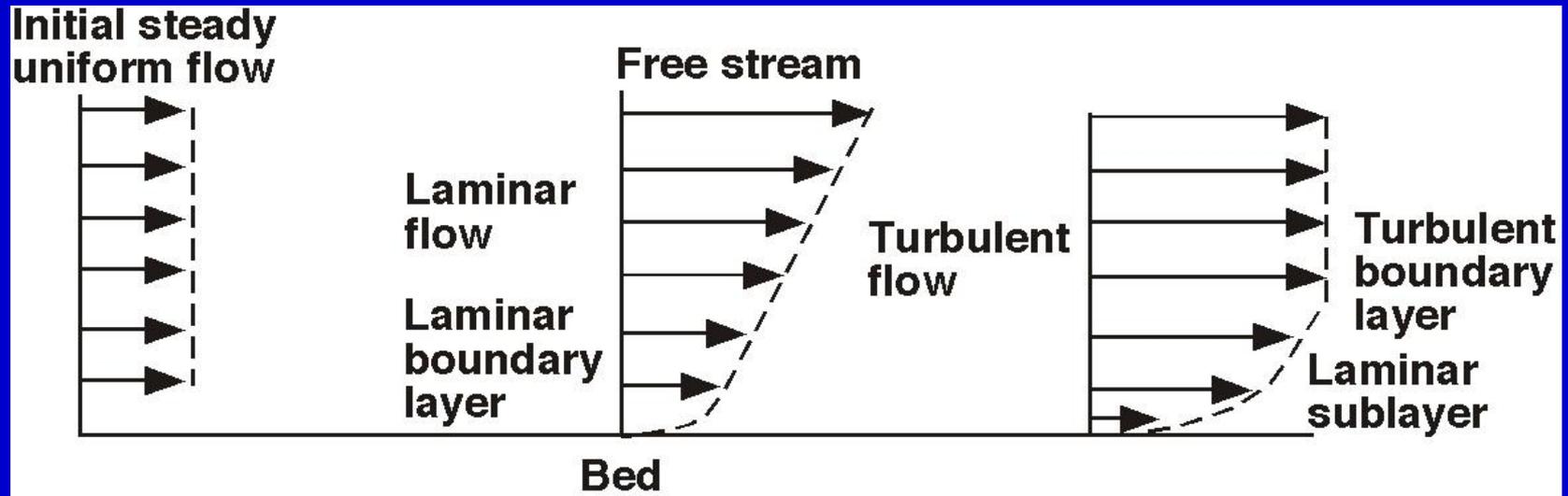


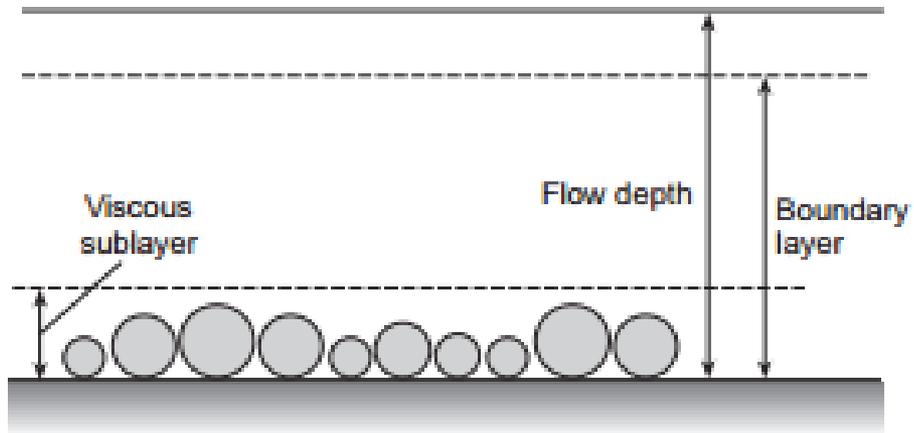
La superficie del agua
presenta ondulaciones

El lecho también, y están
en fase con la superficie

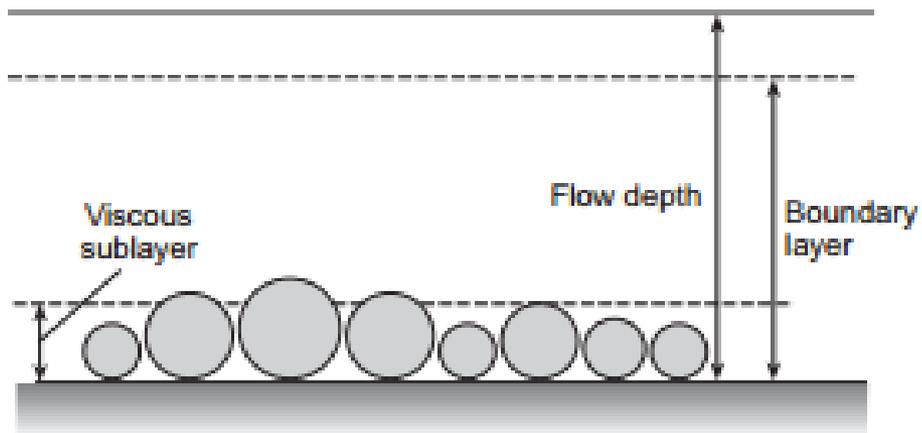
El Régimen de flujo es alto

Efectos de capa límite: Cuando una corriente fluye a lo largo de las paredes de un canal o sobre el lecho es afectada por los esfuerzos retardantes (rozamiento) producidos por la superficie limitante. La capa en contacto con la superficie rígida se denomina capa límite.





Smooth boundary:
 Thick viscous sublayer (low velocities)
 and/or small grain diameters



Rough boundary:
 Thin viscous sublayer (high velocities)
 and/or large grain diameters

Lecho hidráulicamente plano o suave

Lecho hidráulicamente rugoso

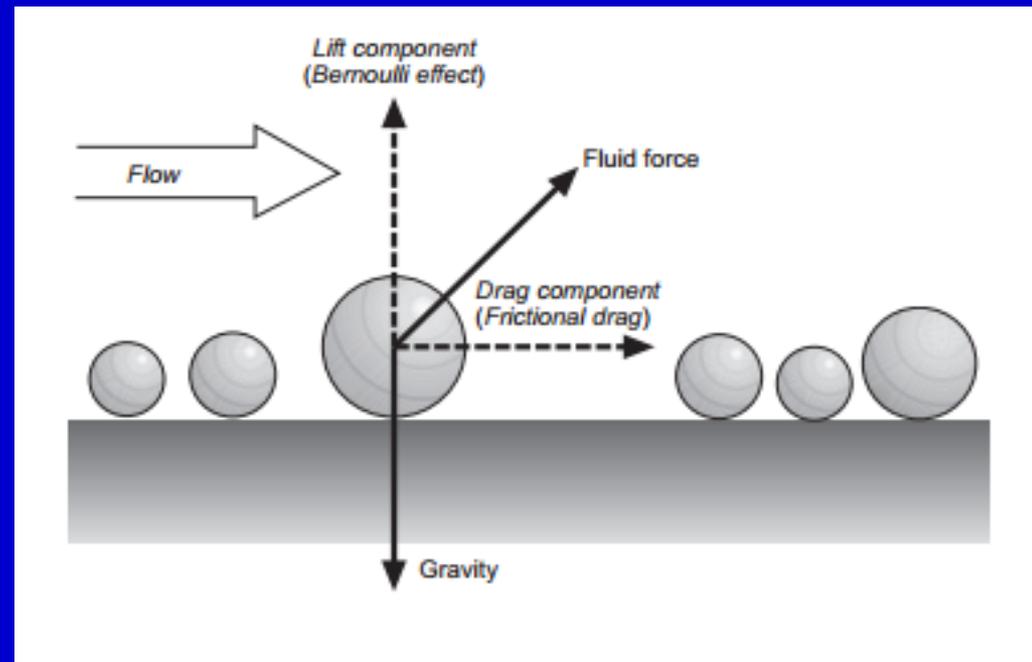
Perfiles de velocidad y rugosidad del lecho

En **flujos turbulentos** – el flujo es laminar/casi laminar sólo cerca del lecho

- Lechos suaves – fuerzas moleculares viscosas dominan en láminas delgadas cerca del lecho
 - Subcapas viscosas / subcapas laminares
- Lechos Rugosos/Irregulares
 - Gravas o arena gruesa
 - Subcapas viscosas destruidas por las partículas del lecho
 - Obstáculos generan remolinos en la interfase
- Presencia/ausencia de subcapas laminares – factores importantes en el inicio del movimiento de las partículas

Flujos y transporte de sedimentos

- La habilidad de un río de erosionar y transportar sedimentos representa un balance entre fuerzas y resistencias
- Las ecuaciones que involucran fuerzas (esfuerzos) y resistencias son el núcleo del transporte por flujos fluídos



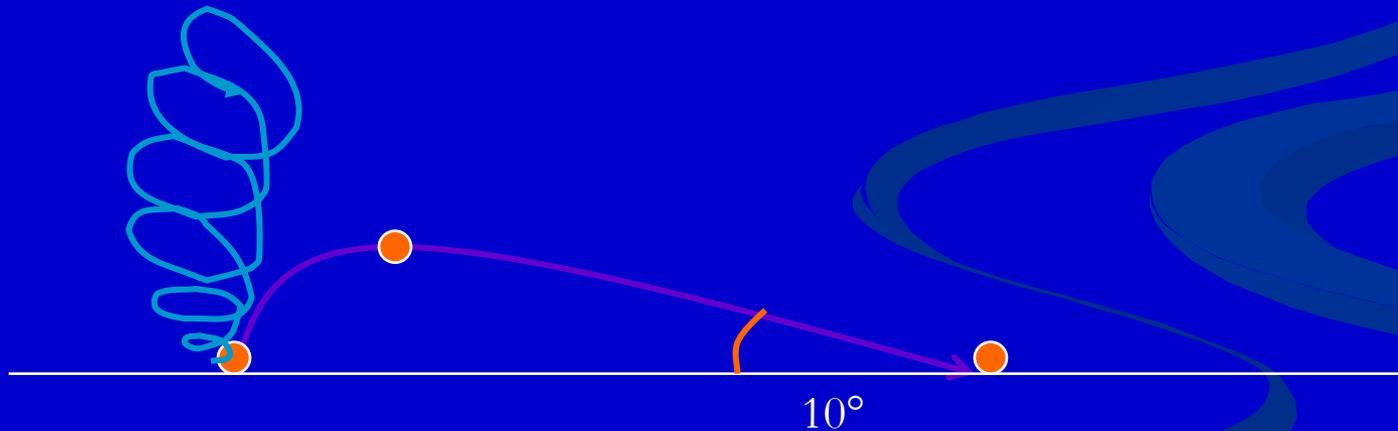
Flujos y transporte de sedimentos

- Relaciones de conservación
 - Masa (continuidad del fluido)
 - Momento (2nd Ley de Newton – $F=M*A$)
 - Energía (1^{ra} Ley de la Termodinámica)
- Relaciones constitutivas
 - Resistencia (Ecuación de Manning)
 - Transporte de sedimentos (Hjulstrom, Bagnold)
 - Presión dinámica (Bernoulli)

Movimiento de las partículas en un fluido

Rolido y deslizamiento sobre el lecho (**tracción**) dando lugar a la **carga tractiva**.

Saltación (la partícula se levanta y cae sucesivamente, impacta a otras partículas en el lecho y en el flujo, y produce eyección, impacto-proyección y reptaje, especialmente en el aire)

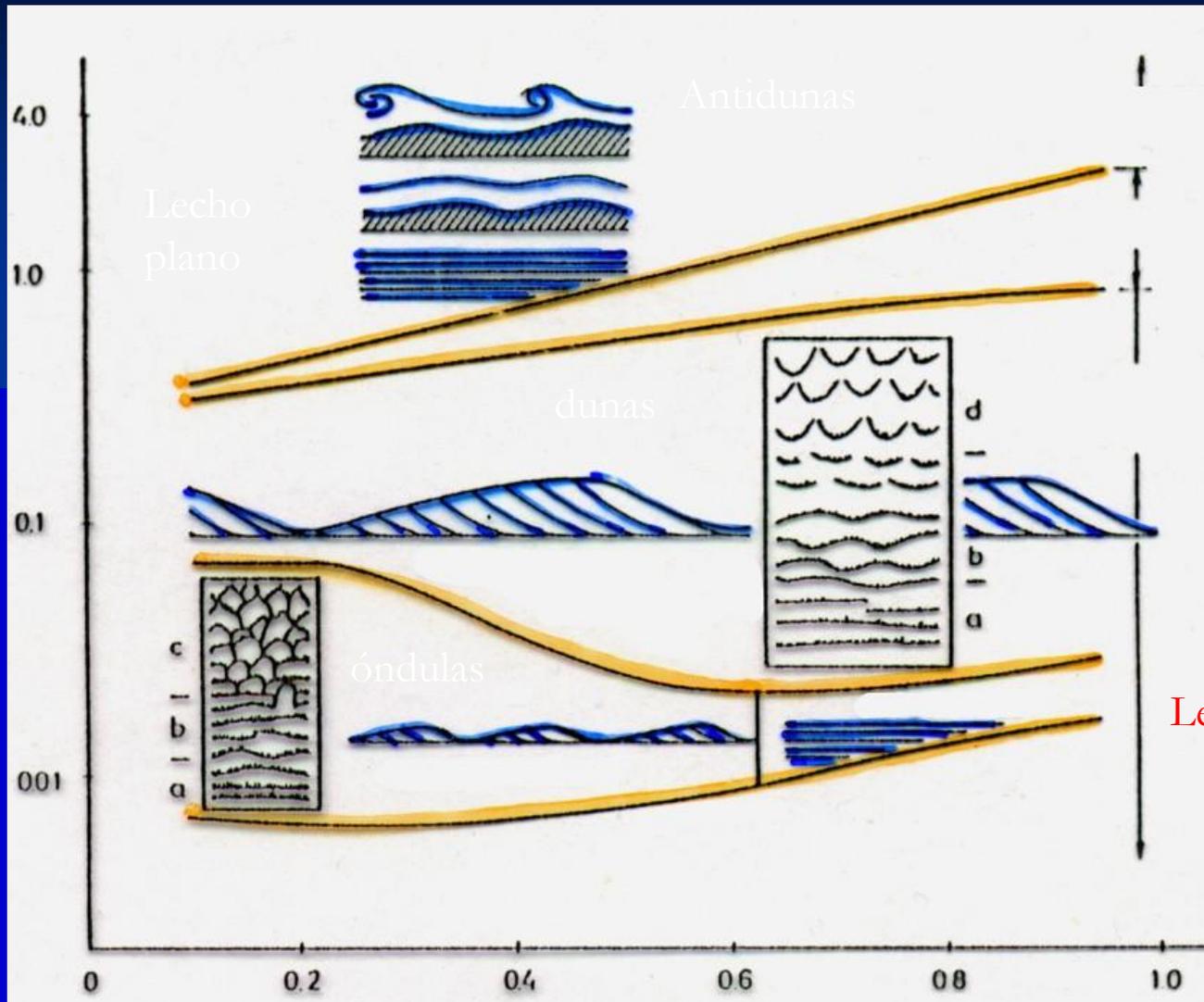


- **Suspensión** (la partícula no toca el lecho)

- **Carga de lecho** = es el material que se mueve cerca del lecho por tracción y saltación
- **Carga en suspensión** = el material permanece suspendido por la turbulencia (el diámetro depende del régimen de flujo)
 - Carga de lavado = suspendida siempre
- **Capacidad:** cantidad de sedimento que puede transportar un flujo
- **Competencia:** diámetro máximo de partículas que puede transportar un flujo

FORMAS DE LECHO, TAMAÑO DE GRANO Y FLUJO

$\Gamma_0 V$



Alto regimen de flujo

Bajo regimen de flujo

Lecho plano

Díámetro medio de caída

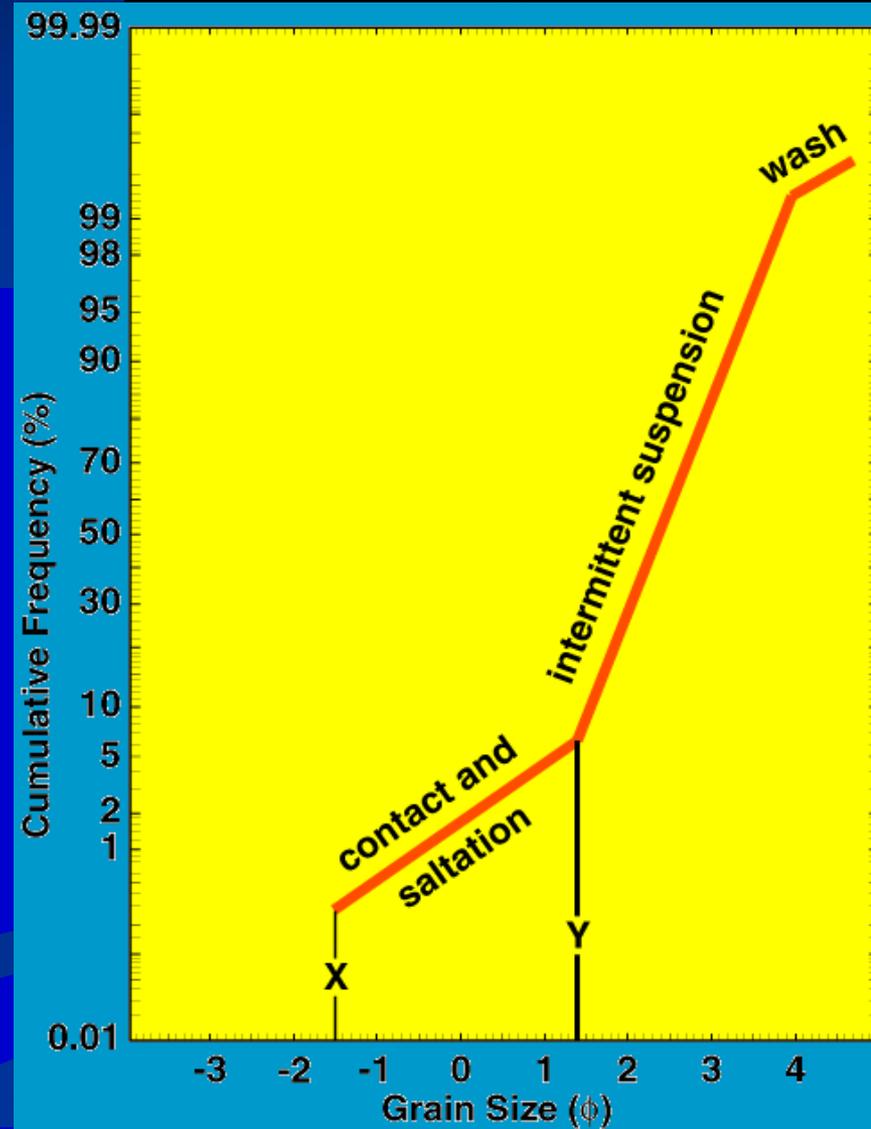
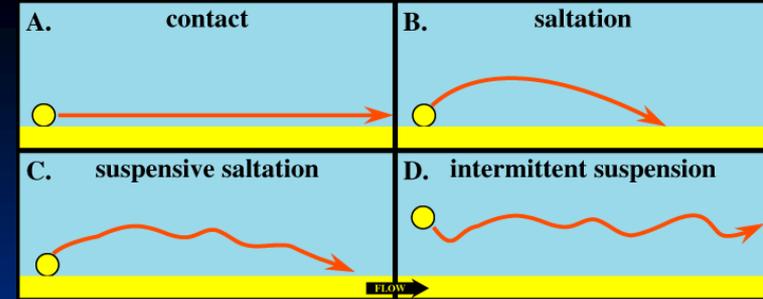
Interpretación dinámica de la distribución de poblaciones granulométricas

Partículas finas que viajan siempre en suspensión (wash)

Partículas gruesas que viajan como carga de lecho o en saltación.

X: tamaño máximo que pudo ser transportado (umbral de movimiento)

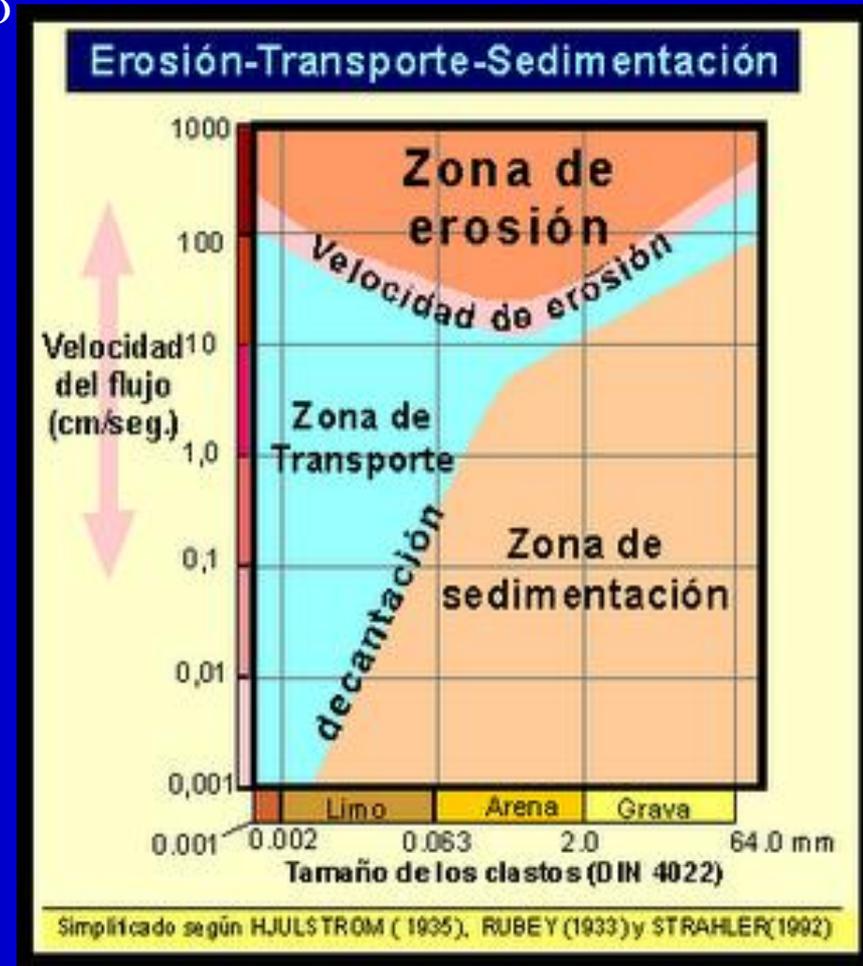
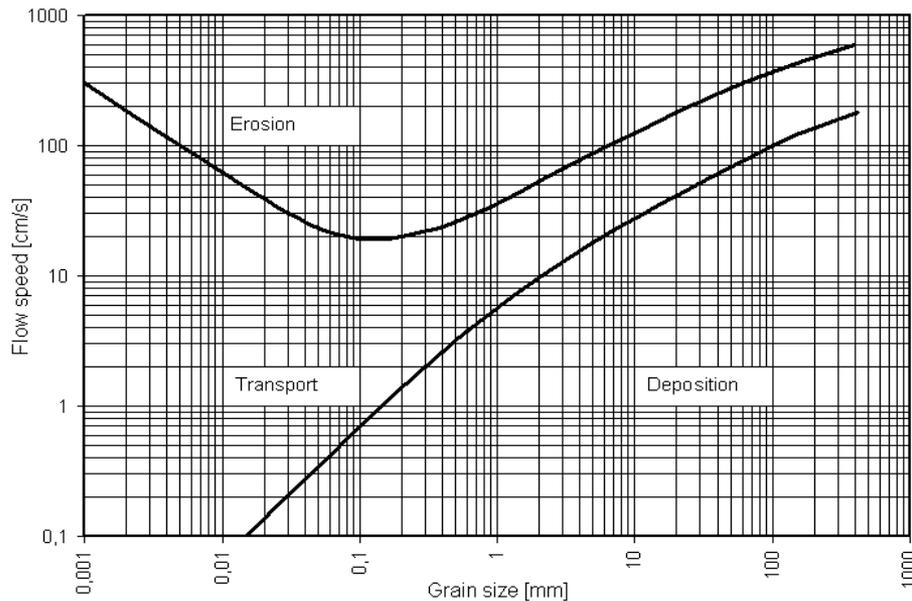
Y: tamaño máximo que pudo ser puesto en suspensión (umbral de suspensión)



Erosión y depositación

La facilidad con la que una corriente erosiona el sustrato y por lo tanto pone en movimiento a las partículas del lecho es influenciada no sólo por el poder de la corriente sino por el tamaño de las partículas y su cohesión.

La cohesión de un sustrato inconsolidado es controlada principalmente por el contenido de arcillas y la fricción entre las partículas



El diagrama de Hjulstrom

Sobre la base de experimentos hechos en un canal de 1 m de profundidad con una corriente unidireccional, el diagrama muestra la velocidad crítica requerida para erosionar partículas de diferentes tamaños (parte superior) o depositarlas (parte inferior)

