



**TRANSPORTE DE MATERIALES. Conceptos básicos.**

**Granulometría de los materiales. Coeficientes representativos. Características principales que diferencian los materiales. Tamaños. Diámetros. Estudios de los acarreos. Análisis del sólido aislado**

$$E = D + T$$

**¿Cuándo ocurre el transporte?**

**Cuando se producen circulación de flujos en cauces de evacuación**

**¿Esto es así en la naturaleza?**

**Siempre hay relaciones entre los tres procesos de erosión, transporte y sedimentación**

**Torrente > 6%**

**Ribera torrencial 1,5 % – 6 %**

**Rio < 1,5 %**

**Meunier**

**Rio Cinca**



**TORRENTES ALPINOS**

**TORRENTES  
RAMBLAS**

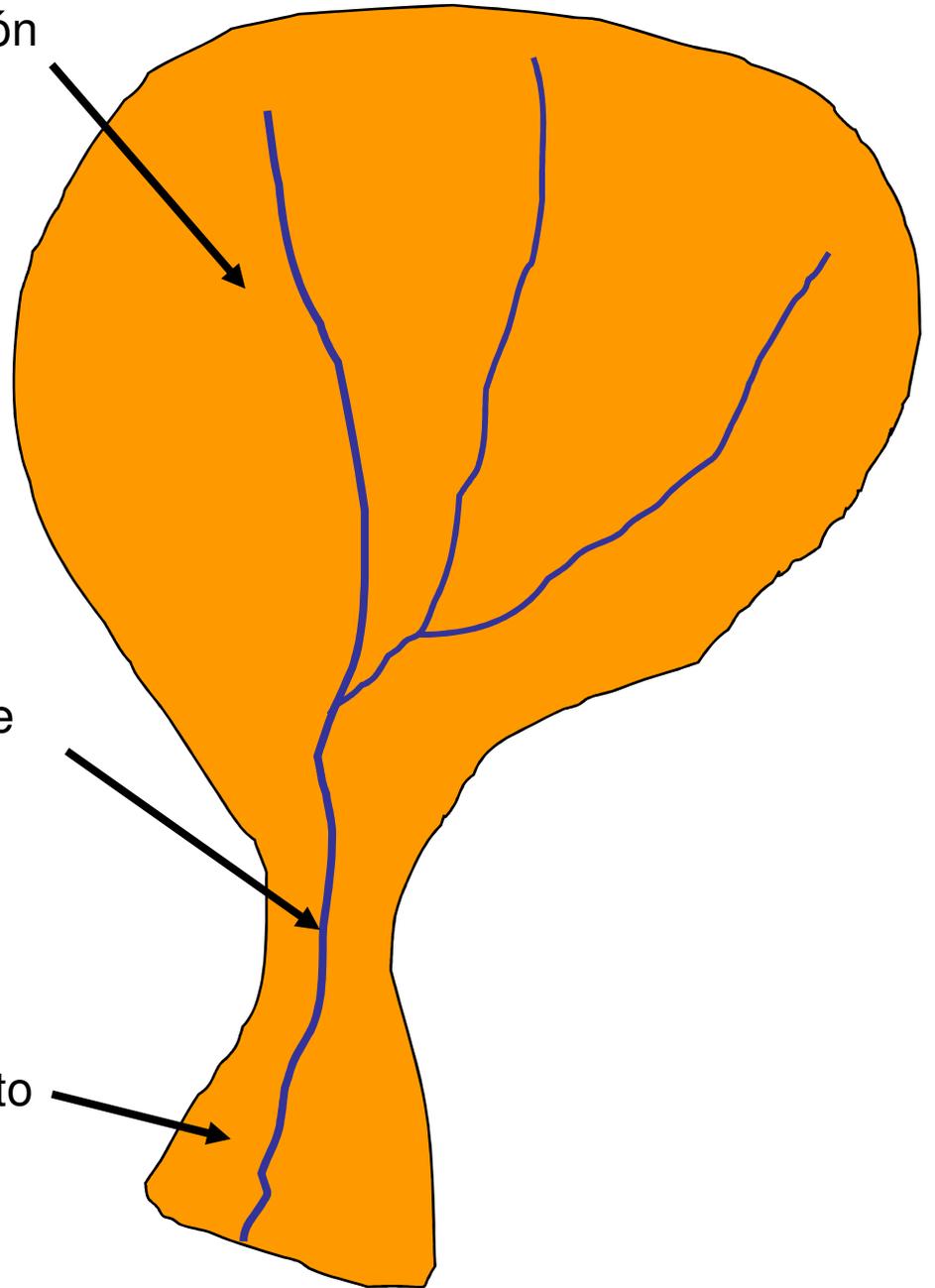
**RAMBLAS**

**O**

Producción

Transporte

Depósito



## Preguntas fundamentales.

1<sup>a</sup>) ¿De qué formas se realiza el transporte de materiales?

2<sup>a</sup>) ¿Cuándo y cómo comienza y/o cesa la presencia de materiales en la corriente?

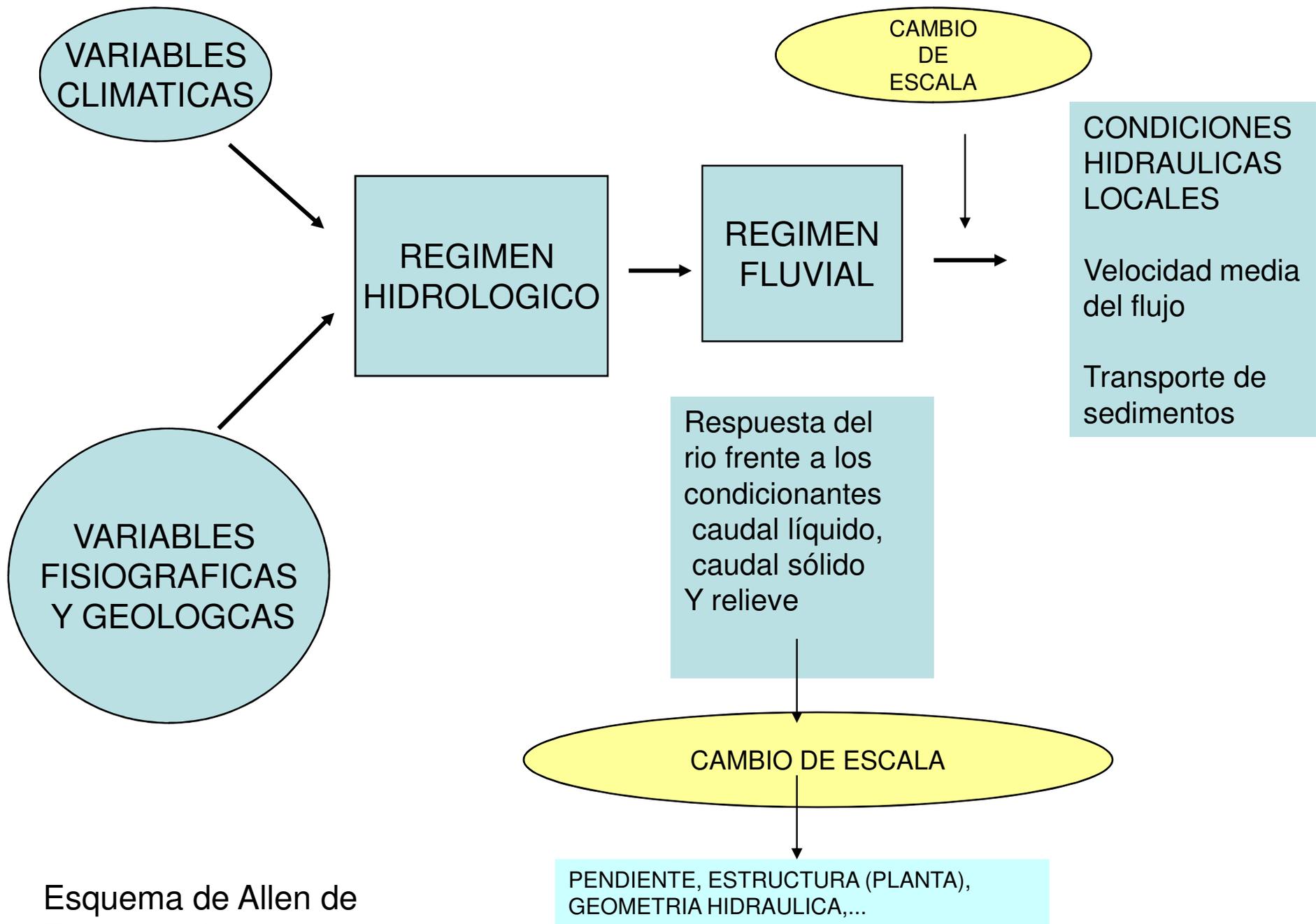
3<sup>a</sup>) ¿Qué significa y cómo se puede definir el fenómeno torrencial?

**Las respuestas a estas preguntas tratan de resolver dos problemas básicos**

**1) CUANTIFICACION DEL VOLUMEN DE MATERIALES TRANSPORTADOS**

**2) DEFINICION DE LA NUEVA PENDIENTE DEL LECHO DEL CAUCE O PENDIENTE DE EQUILIBRIO**

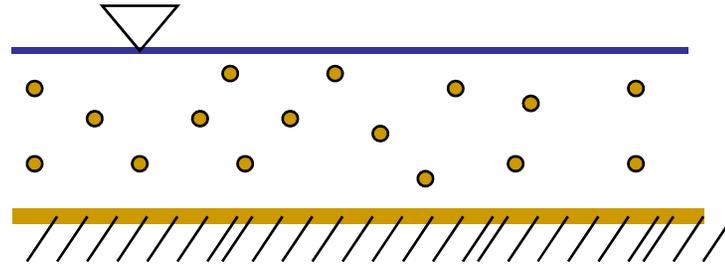
**El transporte de sedimentos se engloba dentro de la **HIDRAULICA FLUVIAL**, un campo de la Hidráulica mucho más amplio, cuyo objetivo es el estudio de los fenómenos a que da lugar el flujo de agua sobre un lecho que tiene la posibilidad de modificar sus características en respuesta a las sollicitaciones que el flujo induce, lo que a su vez comporta sustantivas alteraciones cualitativas y cuantitativas en los parámetros del referido flujo**



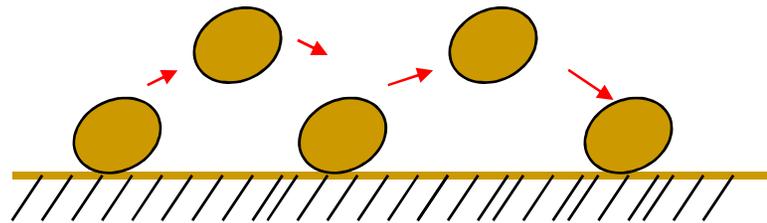
Esquema de Allen de Esquema fluvial

# ¿De qué formas y qué diferencias tienen?

Suspensión



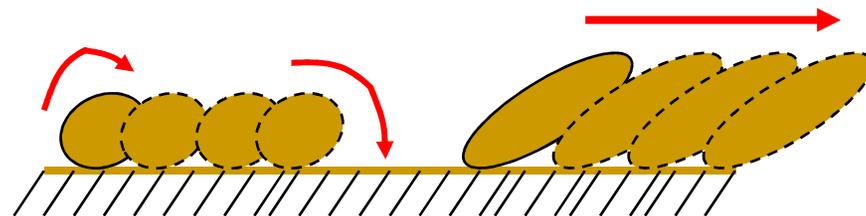
Saltación

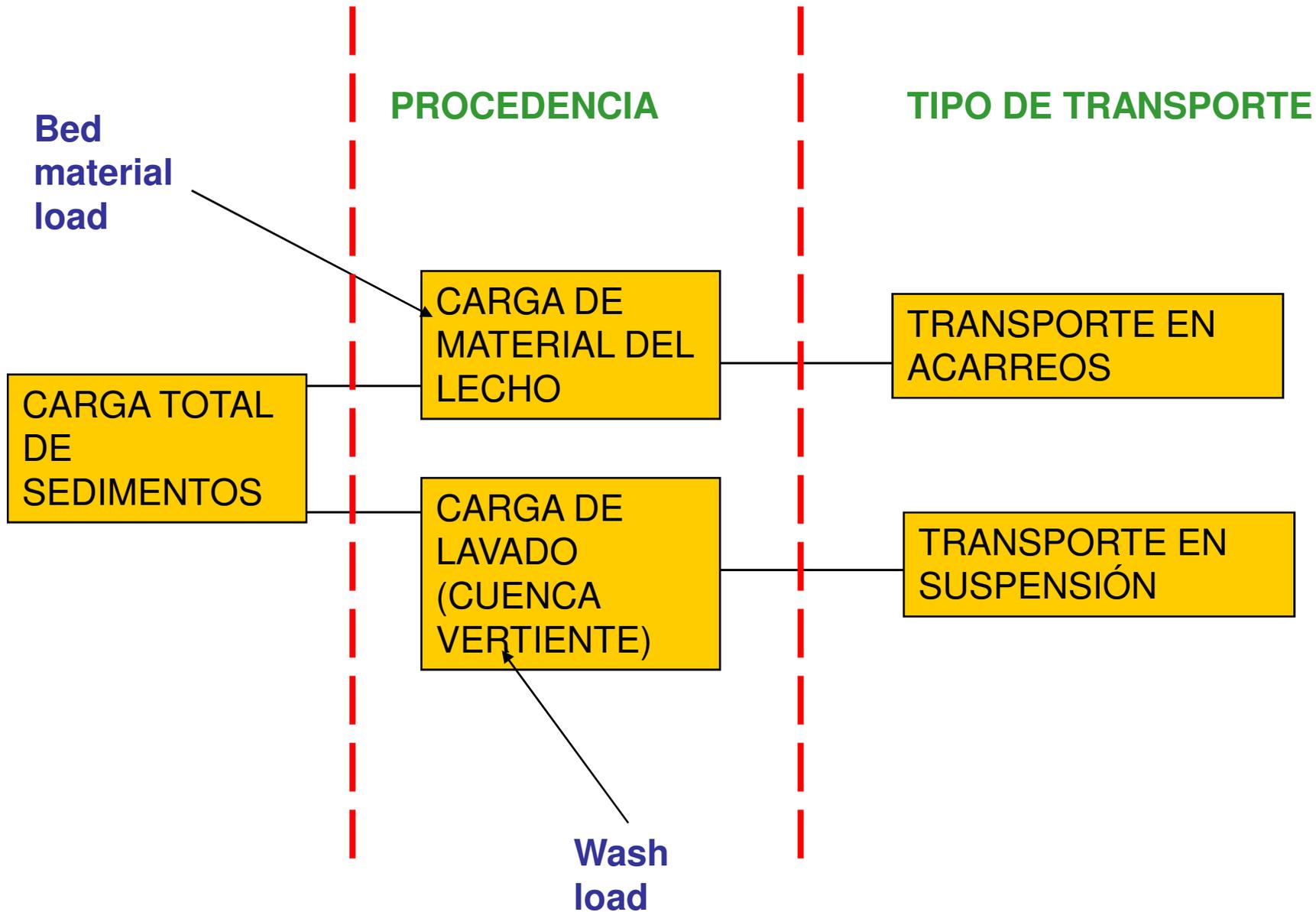


Rodadura

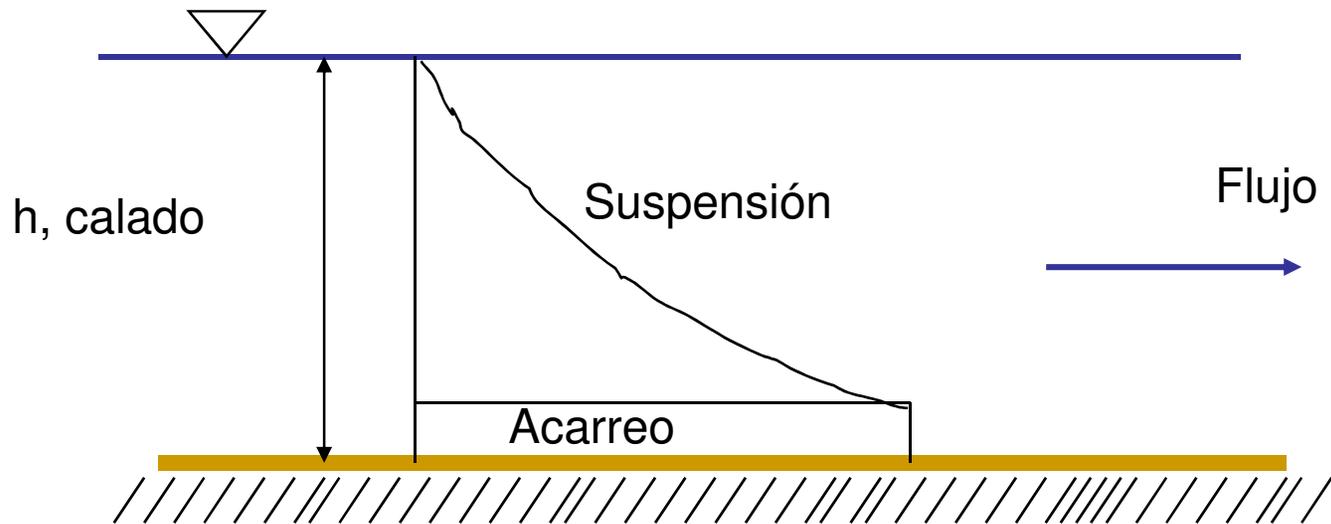
Deslizamiento

Acarreo





## Distribución de la concentración de sedimentos



		Clasificación	
		Basada en el modo T. dominante	Basada en el origen de las partículas
<b>Carga Total de sedimentos</b>	Carga de lavado	Suspensión	Carga de lavado
	Carga en suspensión		
	Carga del lecho	Acarreo	Carga de material del lecho

## DIFERENCIAS ENTRE ACARREO Y SUSPENSIÓN (Quesnel, 1963).

- **Acarreos** son de mayor tamaño que la suspensión. El diámetro máximo en suspensión depende del grado de turbulencia, varía desde una micra en régimen laminar hasta gravas de 2 a 30 mm en régimen de gran turbulencia.
- **El acarreo** es esencialmente discontinuo en el espacio y en el tiempo.
- **Para un mismo caudal líquido** se pueden dar varios tipos de concentraciones sólidas en suspensión, pero un solo caudal de acarreo compatible con la estabilidad del lecho.
- **El acarreo** se hace próximo al lecho en cambio **la suspensión** afecta a toda la altura de la masa de agua.

**Flujo monofásico**  
(agua limpia)

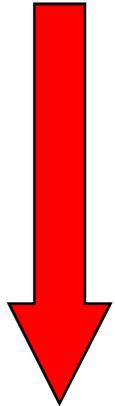
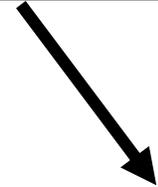


**VALORES CRÍTICOS**



**Flujo bifásico**  
(agua + sedimento)

**¿En qué condiciones de flujo se inicia el movimiento de las partículas sólidas del contorno?**



**1ª Solución.**  
Perspectiva científica  
Modelos de transporte de sedimentos

**Gran complejidad del problema**

**2ª Solución.**  
Perspectiva tecnológica  
Diseño de cauces  
Protección de márgenes

## **CARGA DE SEDIMENTOS DE LAVADO**

- **Ecuaciones empíricas**
- **Tasas de emisión de sedimentos. SDR's**
- **Ecuaciones predictivas. Modelo MUSLE**

## **CARGA DE SEDIMENTOS DEL LECHO**

**a) Modelos de transporte y cálculo de caudales sólidos**

**b) Flujos hiperconcentrados y lavas torrenciales**

# **CARGA DE SEDIMENTOS DEL LECHO**

## **A) MODELOS DE TRANSPORTE Y CALCULO DE CAUDALES SOLIDOS**

**•FASE LIQUIDA: CONCEPTOS DEL FLUJO MONOFASICO CON SUPERFICIE LIBRE**

**•FASE SOLIDA: CARACTERISTICAS DEL MATERIAL CONSTITUTIVO DEL CONTORNO**

- CLASIFICACION DE SEDIMENTOS**
- UMBRALES DE COMIENZO DE ARRASTRE**
- METODOS DE CALCULO DEL TRANSPORTE POR ACARREO**

## **B) FUJOS HIPERCONCENTRADOS Y LAVAS TORRENCIALES**

**CARACTERISTICAS DIFERENCIALES DEL DOMINIO TORRENCIAL**

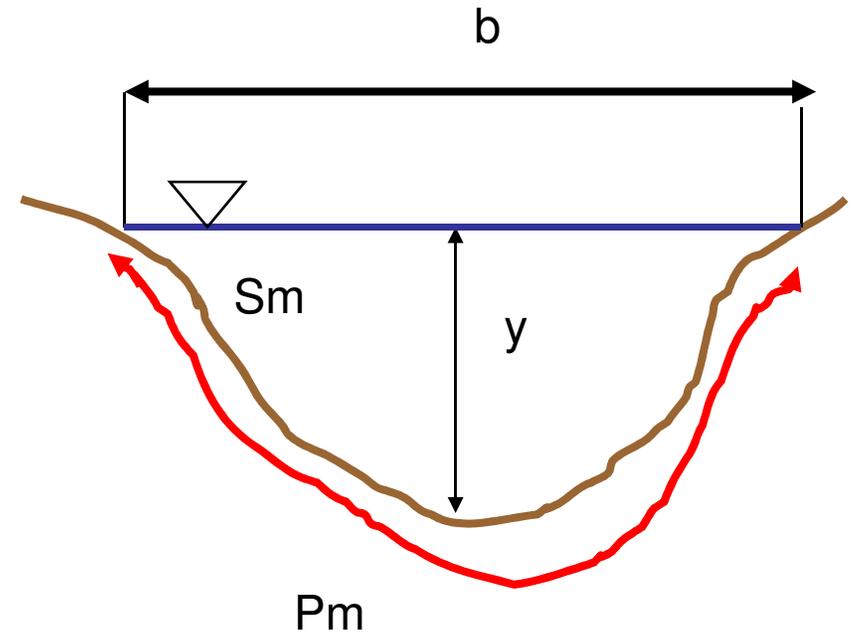
**•DELIMITACION Y CLASIFICACION DE LOS FLUJOS TORRENCIALES**

**•FORMULAS PARA FLUJOS HIPERCONCENTRADOS DE APLICACIÓN PRACTICA EN INGENIERIA**

# **FASE LIQUIDA: CONCEPTOS HIDRAULICOS DEL FLUJO MONOFASICO CON SUPERFICIE LIBRE**

**EN LA HIDRAULICA CLASICA SE ESTUDIAN DE FORMA AISLADA  
LA FASE LIQUIDA (AGUA) Y LA FASE SOLIDA (SEDIMENTO)**

## FLUJO MONOFASICO (FASE LIQUIDA)



### HIPOTESIS GENERALES:

- CONTORNO RIGIDO

- FLUIDO NEWTONIANO

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

- ACCION GRAVITATORIA

# PARAMETROS QUE CARACTERIZAN LA CONDUCCION

PERFIL LONGITUDINAL (PENDIENTE)

TRAZADO EN PLANTA

SECCION TRANSVERSAL

Sección transversal

Perímetro mojado

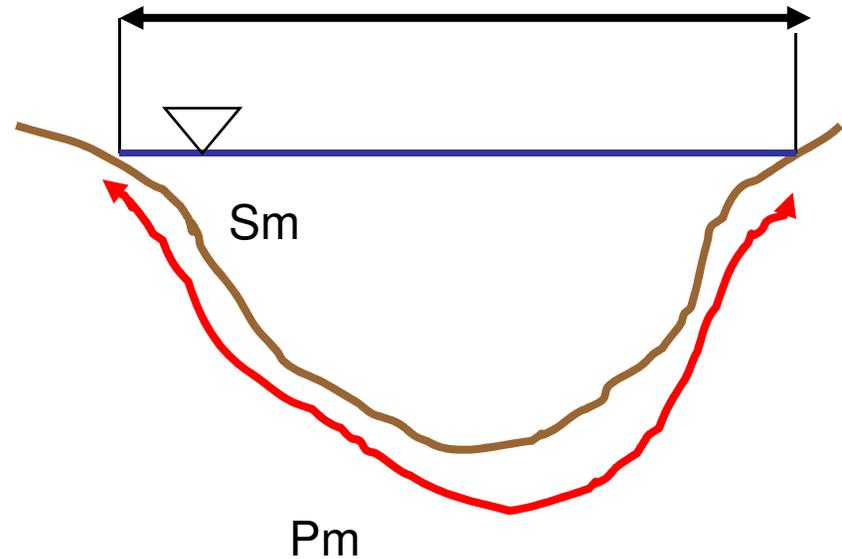
Radio hidráulico

Calado

Ancho en superficie libre

Calado medio

RUGOSIDAD (taludes y lecho mediante Manning)



## Características del flujo.

Las isotacas.

El caudal  $Q$ .

La velocidad media  $v$ .

## Ecuaciones

•Conservación de la energía ( Ecuación de Bernoulli en canales abiertos).

•Continuidad.  $\left( \frac{\partial Q}{\partial x} + b \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \right)$

•La de equilibrio dinámico.(Ecuación de Saint Venant).

$$j_f = j - \left( \frac{\partial d}{\partial x} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v \cdot v}{gy} \right)$$

$j$ , es la pendiente del cauce y  $j_f$ , es la pendiente de fricción o energía

$$\mathbf{j}_f = \mathbf{j} - \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\mathbf{v}}{\mathbf{g}} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{x}} + \frac{1}{\mathbf{g}} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{t}} + \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}}{\mathbf{g} \mathbf{y}} \right)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{0}$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{t}} = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{j}_f = \mathbf{j}$$

Si el régimen es permanente y uniformes: ( $dy/dt = 0$ ;  $dy/dx = 0$ ).

**Régimen permanente** es aquel que el caudal es constante  $dQ = 0$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{t}} = \mathbf{0}$$

y **uniforme** es cuando además de permanente el flujo tiene el mismo caudal en el tramo de estudio, velocidad constante

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{0}$$

En este caso  $j\mathbf{f} = j$

**La pendiente de fricción mide la disipación de energía por rozamiento.  
Se evalúa por la ecuación de Manning.**

$$v = 1/n * R^{2/3} * S^{1/2}$$

$$Q = v \cdot A$$

$$Q = 1/n * R^{2/3} * S^{1/2} A$$

**La tensión tractiva.**

$$\tau = \gamma R j$$

**Esta expresión se deduce:**

$$\tau dx = dP \operatorname{sen} \alpha = \gamma (h-y) \operatorname{sen} \alpha dx; \quad \text{por lo tanto eliminando } dx$$

$$\tau = \gamma (h-y) \operatorname{sen} \alpha$$

**Cuando  $\alpha$  es pequeño, entonces  $\operatorname{sen} \alpha = \operatorname{tag} \alpha = j$**

$$\tau = \gamma (h-y) j$$

**En el fondo  $y = 0$  entonces:**

$$\tau = \gamma R_h j$$

## VELOCIDAD DE FRICCIÓN DE CORTE

Sobre el contorno. 
$$v^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = \sqrt{gR_h j}$$

En un punto del lecho 
$$v^* = \sqrt{ghj}$$

En un punto a una altura “y” sobre el lecho 
$$v^* = \sqrt{g(h-y)j}$$

## Números de Reynolds y de Froude.

El número de Reynolds  $R$ , cuantifica la relación las fuerzas de viscosidad y las fuerzas de inercia.

Siendo  $v$  la velocidad del flujo,  $h$  es un parámetro que mida una longitud y  $\nu$  es la viscosidad cinemática.

Existe una capa límite próxima al contorno que soporta la parte esencial de la disipación de energía por rozamiento. El espesor de esta capa depende de la rugosidad absoluta del contorno

$K_s$

Así si  $R^* < 5$  es un movimiento turbulento liso.

Si  $R^* < 70$  es un movimiento de transición.

Si  $R^* > 70$  es un movimiento turbulento rugoso

$$R = \frac{vh}{\nu}$$

$$R^* = \frac{v^* k_s}{\nu}$$

$$F = \frac{v}{\sqrt{gy_m}}$$

**El número de Froude relaciona la influencia de la acción gravitatoria del flujo.**

**Si  $F < 1$  Régimen lento (normalmente fluvial).**

**Si  $F = 1$  Régimen crítico.**

**Si  $F > 1$  Régimen rápido (normalmente torrencial)**

## **FASE SÓLIDA: CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL CONSTITUTIVO DEL CONTORNO.**

**El contorno del lecho puede estar formado por:**

- Roca (contorno fijo).**
- Suelo cohesivo (arcillas limos).**
- Suelo incoherente (arenas y gravas).**

**Los materiales pueden ser cohesivos y no cohesivos**

**Materiales cohesivos**. En los materiales cohesivos la fuerza que evita su movimiento es la cohesión desarrollada entre partículas vecinas (el tamaño no se tiene en cuenta). Se debe de estudiar el comportamiento en conjunto

- Las arcillas y su composición química
- Los enlaces moleculares
- Los límites plásticos

## **Propiedades de los materiales no cohesivos**

- Tamaño
- Forma
- Densidad/Peso específico
- Velocidad de sedimentación

## Tamaño de la partícula

**Diámetro nominal.** Diámetro de una esfera cuyo volumen sea igual al de la partícula. **Se emplea normalmente para tamaños grandes (superiores a las arenas).**

**Diámetro equivalente.** Longitud de la malla más pequeña por el que pasa la partícula. En las arenas

**Diámetro de sedimentación.** Diámetro de una esfera del mismo material (igual peso específico) cuya velocidad de sedimentación sea idéntica a la de la partícula. **Para tamiz inferior a 1/16mm (límite entre arenas, limos y arcillas)**

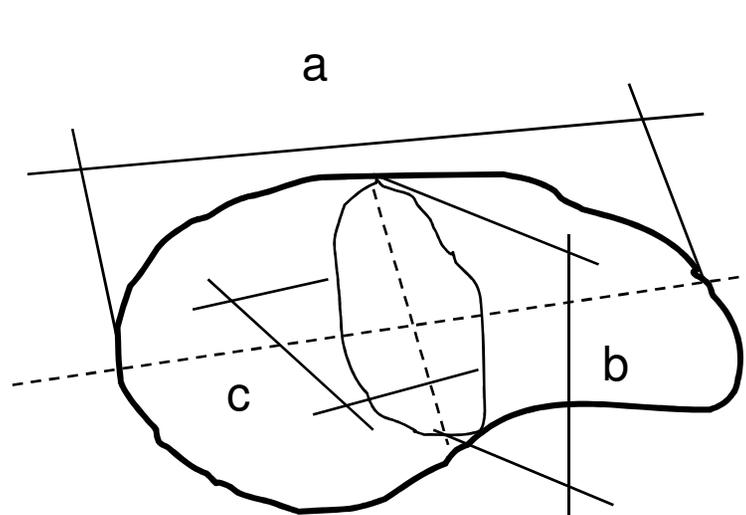
## Forma de la partícula.

**Esfericidad.** Es la relación entre la superficie de una esfera de la misma densidad y volumen que el de la partícula y la superficie de la propia partícula.

**Redondez.** Es la relación entre el valor medio de irregularidad de la superficie (entrantes y salientes) de la partícula y el radio máximo de la esfera que puede inscribirse en ella.

## Factores de forma

**Factor de Corey.** El más utilizado


$$S_p = \frac{c}{\sqrt{a \cdot b}} \leq 1 \quad a \leq b \leq c$$

$S_p < 0,6$  esquistos, pizarras (materiala lajoso)  
 $S_p = 0,6 - 0,8$  valores habituales  
 $S_p > 0,8$  material muy redondeado

## **Densidad.**

La densidad de los sedimentos es función de su composición; generalmente éstos están formados por cuarzos y feldespatos, por lo que tienen habitualmente una densidad del orden de  $2,65\text{t/m}^3$

En ríos y torrentes vamos a considerar  $1200\text{ k/m}^3$  al agua con sedimentos. Pero cuando un río tiene partículas en suspensión, su peso específico varia y se puede calcular.

Si consideramos:

**$V_m$ , al volumen de mezcla;  $V_a$ , al volumen de agua;  $V_s$ , al volumen del sólido**

**$\gamma_m$ , peso específico de la mezcla;  $\gamma_s$ , peso específico de sólidos y  $\gamma_a$ , peso específico del agua**

# Densidad

Función de su composición  $\mathbf{V}_m \gamma_m = \mathbf{V}_a \gamma_a + \mathbf{V}_s \gamma_s$

El balance de volumen  $\mathbf{V}_m = \mathbf{V}_a + \mathbf{V}_s$

Definiendo la concentración en peso,  $\mathbf{C}_s$ , como:  $\mathbf{C}_s = \frac{\mathbf{V}_s \gamma_s}{\mathbf{V}_m \gamma_m}$

Sustituyendo  $\mathbf{V}_s \gamma_s$  queda

$$\mathbf{V}_m \gamma_m = (\mathbf{V}_m - \mathbf{V}_s) \gamma_a + \mathbf{C}_s \mathbf{V}_m \gamma_m$$

Y sustituyendo  $\mathbf{V}_s \frac{\mathbf{C}_s \mathbf{V}_m \gamma_m}{\gamma_s}$

Y agrupando términos se tiene:

$$\gamma_m = \frac{\gamma_a}{1 - \mathbf{C}_s \left(1 - \frac{\gamma_a}{\gamma_s}\right)}$$

## Velocidad de sedimentación

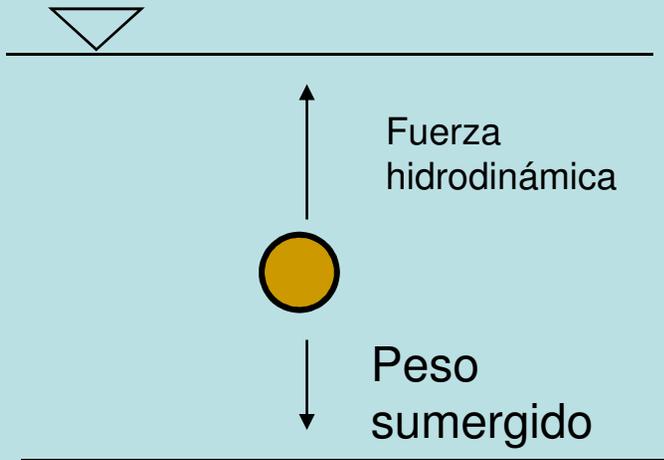
Es el parámetro mas importante de todos, pues afecta a la capacidad de arrastre del rio y condiciona la forma del lecho

Se puede definir como la velocidad de caída ya estabilizada de una partícula de fluido

Cuando ocurre esto se tiene:

$$\text{Peso sumergido} = \text{Fuerza hidrodinámica}$$

$$(\gamma_s - \gamma_a) K_2 D_s^3 = C_D \rho K_1 D_s^2 \left( \frac{W}{2} \right)^2$$



En el caso de una esfera se tiene:

$$K_2 = \frac{\pi}{6}$$

$$K_1 = \frac{\pi}{4}$$

Sustituyendo y operando queda:

$$W = \sqrt{\frac{4 g (\gamma_s - \gamma_a) D_s}{3 C_D \gamma_a}}$$

Si el régimen es laminar se tienen los valores

$$C_D = \frac{24}{R_e}$$

$$R_e = \frac{W D_s}{\nu}$$

Tomando la velocidad de sedimentación la forma:

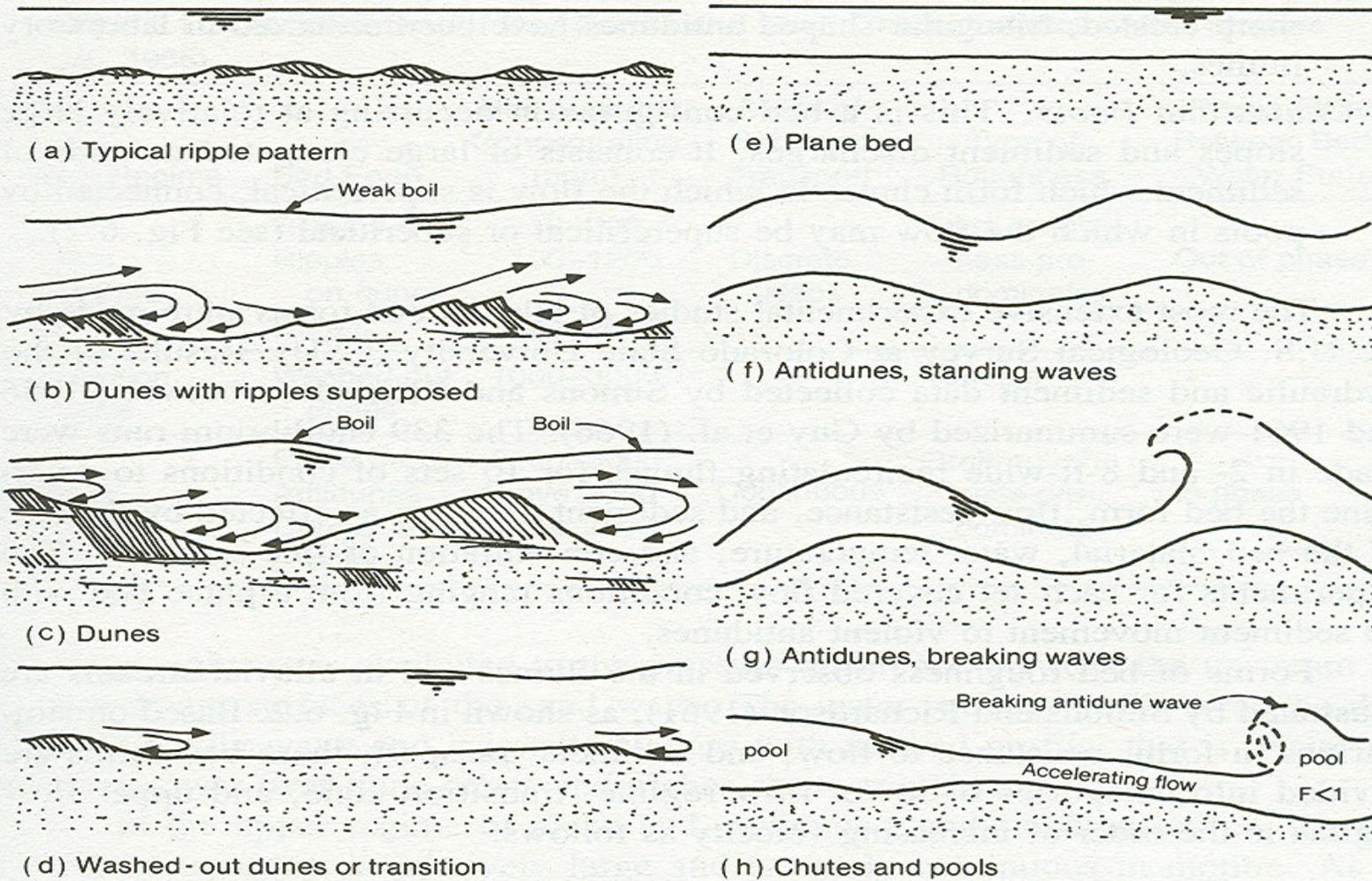
$$\mathbf{W} = \frac{\mathbf{g}}{18\nu} \frac{\gamma_s - \gamma_a}{\gamma_a} \mathbf{D}_s^2$$

**Ley de Stokes**

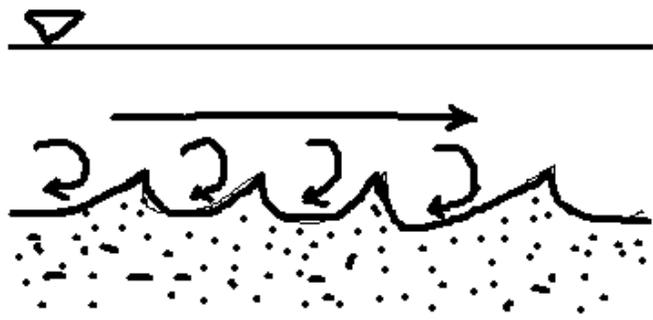
Esta ley es valida para el **movimiento laminar** y aplicable a la partículas que cumplan con:

- $R < 0,1$  (R, número de Reynolds)
- Partículas pseudoesféricas
- Tamaño de partículas del tipo de las arenas finas pero no inferiores, donde aparecen fenómenos de tipo eléctrico.

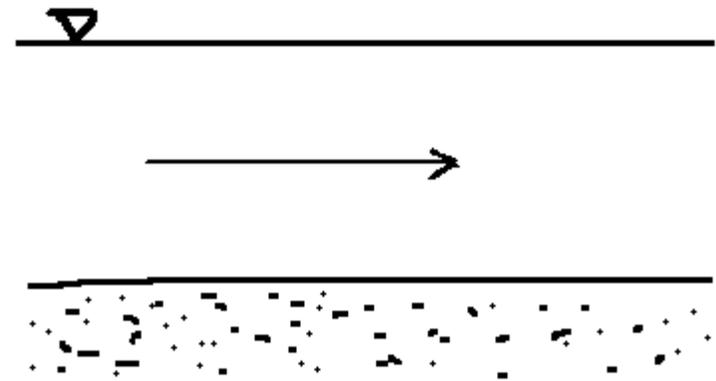
# Formas de lecho



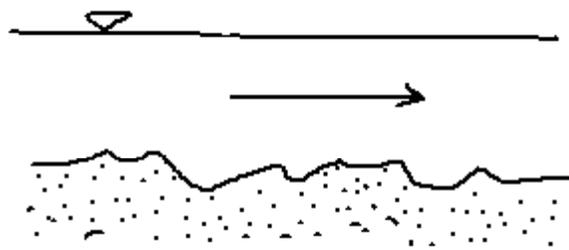
**Figure 6.2** Idealized bed forms in alluvial channels (after Simons et al., 1966).



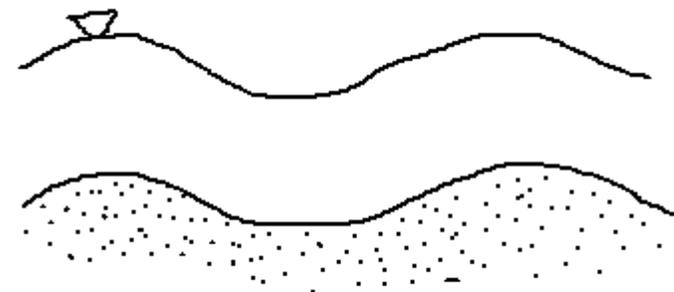
Rizos,  $F \ll 1$



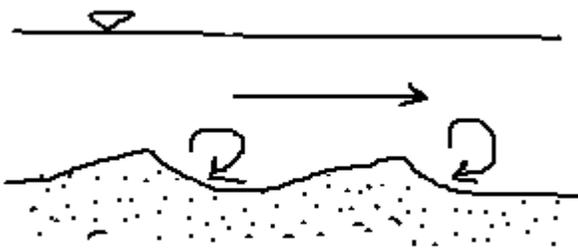
Fondo plano



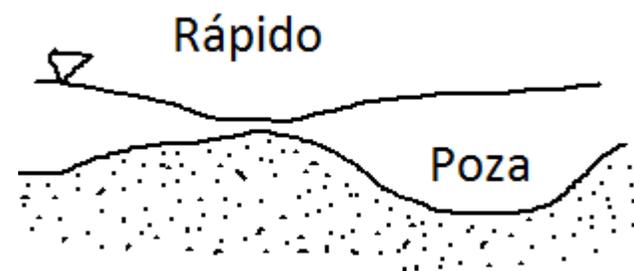
Dunas y rizos



Antidunas,  $F \sim 1$



Dunas,  $F < 1$



Rápidos y pozas,  $F > 1$

## **Resistencia hidráulica.**

La resistencia que un cauce erosionable presenta al movimiento del fluido es función de los parámetros hidráulicos asociados al fenómeno: caudal, calado, rugosidad, densidad del agua, etc

La existencia o no de movimiento en el lecho separa claramente las fórmulas que podríamos llamar clásicas de **lecho fijo** de las que se desarrollaron desde 1950 (con Einstein) denominadas de **lecho móvil**

## a) Fórmulas de lecho fijo

### a.1) Fórmulas clásicas

- Darcy- Weisbach
- Chezy
- Manning

### a.2) Fórmulas semilogarítmicas

### a.3) Aplicación de las fórmulas semilogarítmicas a las fórmulas clásicas

a.1) Fórmulas clásicas

**Darcy-Weisbach**      $h_f = f \frac{LU^2}{D2g}$

$$\frac{Fr}{\sqrt{S_E}} = \sqrt{\frac{8}{f}}$$

Se puede aplicar a canales

Con,  $S_E = h_f/L$  pérdida de carga por unidad de longitud

**Chezy**

$$U = C\sqrt{RS_E}$$

$$C = C'\sqrt{g}$$

$$U = C'\sqrt{g}\sqrt{RS_E}$$

Se puede relacionar con el factor f de Darcy-Weisbach

$$C' = \frac{C}{\sqrt{g}} = \sqrt{\frac{8}{f}}$$

## b) Fórmulas de lecho móvil

b.1) Fórmula de Einstein (1950)

b.2) Otras fórmulas

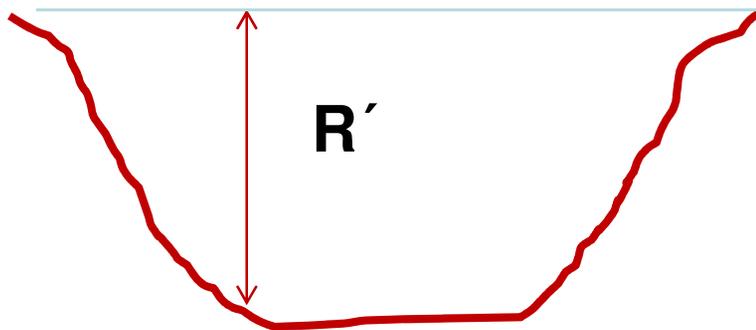
- Vanoni
- Aproximación de Shen
- Engelund
- Alan y Kennedy
- Bajorunas

Einstein (1950)

Permite valorar la componente de la resistencia que presenta un cauce debido al arrastre

Es parte de la formulación de partículas tanto en el fondo como en suspensión

¡Idea Nueva! Separa la resistencia debida al rozamiento con el contorno de la resistencia debida al transporte.



$$R = R' + R''$$

**R' es semejante al calado, h**

**R'' se debe a las formas del lecho**

Aplica fórmulas semilogarítmicas y la velocidad de fricción hidráulica,  $U'_*$

$$\frac{U}{U'_*} = 5,75 \log\left(12,27 \frac{R'}{K_s} X\right)$$

$$U'_* = A = \sqrt{gR's}$$

**Las deformaciones del lecho afectan la resistencia hidráulica:**

*Rugosidad del grano o de superficie*

*Rugosidad de forma*

<b>E. Meyer-Peter y R. Müller (1948)</b>	<b><math>j = j' + j''</math></b>	<b><math>j'</math> (grano) <math>j''</math> (forma)</b>
<b>H. A. Einstein y N. L. Barbarossa (1952)</b>	<b><math>R_h = R_h' + R_h''</math></b>	<b><math>R_h'</math> (grano) <math>R_h''</math> (forma)</b>

## Coeficiente de rugosidad n de Manning para los rios

<p>Strickler (1923), según R. J. Garde y K. G. Raju, (1985):</p>	$n = \frac{D^{1/6}}{K_{ST}}$ <p>D = diámetro de la arena de granos uniformes. [D en (m), <math>K_{ST}=21,1</math>]</p>	<p>Se obtuvo de investigaciones realizadas en canales de laboratorio utilizando arenas de granos de tamaños uniformes, por lo que no se pueden utilizar para los ríos donde se tienen materiales no uniforme.</p>
<p>E. Meyer – Peter y R. Müller (1948):</p>	$n = \frac{D_{90}^{1/6}}{26}$ <p><math>D_{90}</math> = diámetro del sedimento para el cual el 90% del material es más fino, en (m).</p>	<p>Fondo del rio está constituido por arenas no uniformes.</p>

<p><b>H. A. Einstein y N. L. Barbarossa (1952):</b></p>	<p><math>D_{65}</math>= diámetro del sedimento para el cual el 65% del material es más fino, en (m).</p> $n = \frac{(D_{65})^{1/6}}{24}$	<p>Material no uniforme.</p>
<p>Lane y Carlson (1953), seg. <b>R. J. Garde y K. G. Raju, (1985):</b></p>	<p><math>D_{75}</math>= diámetro de sedimento para el cual el 75% del material es más fino, en (pulgada.).</p> $n = \frac{D_{75}^{1/6}}{39}$	<p>Estudios realizados en cauces del “San Luis Valley”</p>
<p><b>J. W. Kamphuis (1974):</b></p>	<p><math>D_{90}</math>= diámetro de sedimento para el cual el 90% del material es más fino, en (m).</p> $n = \frac{1}{24}(2D_{90})^{1/6}$	<p>Investigaciones realizadas en ríos con lechos de gravas</p>
<p>Campbell (1979), seg. <b>R. J. Garde y K. G. Raju, (1985):</b></p>	<p><math>D_{50}</math>= diámetro de sedimento para el cual el 50% del material es más fino, en (m).</p> $n = \frac{(4,5D_{50})^{1/6}}{24}$	
<p><b>R. D. Hey (1979):</b></p>	<p><math>D_{84}</math>= diámetro de sedimento para el cual el 84% del material es más fino, en (m).</p> $n = \frac{(3,5D_{84})^{1/6}}{24}$	<p>Investigaciones realizadas en ríos con lecho de gravas.</p>
<p><b>A. J. A. Maza (1986):</b></p>	<p><math>D_m</math> = diámetro medio del material del lecho en (m).</p> $n = \frac{D_m^{1/8}}{16,27}$	