

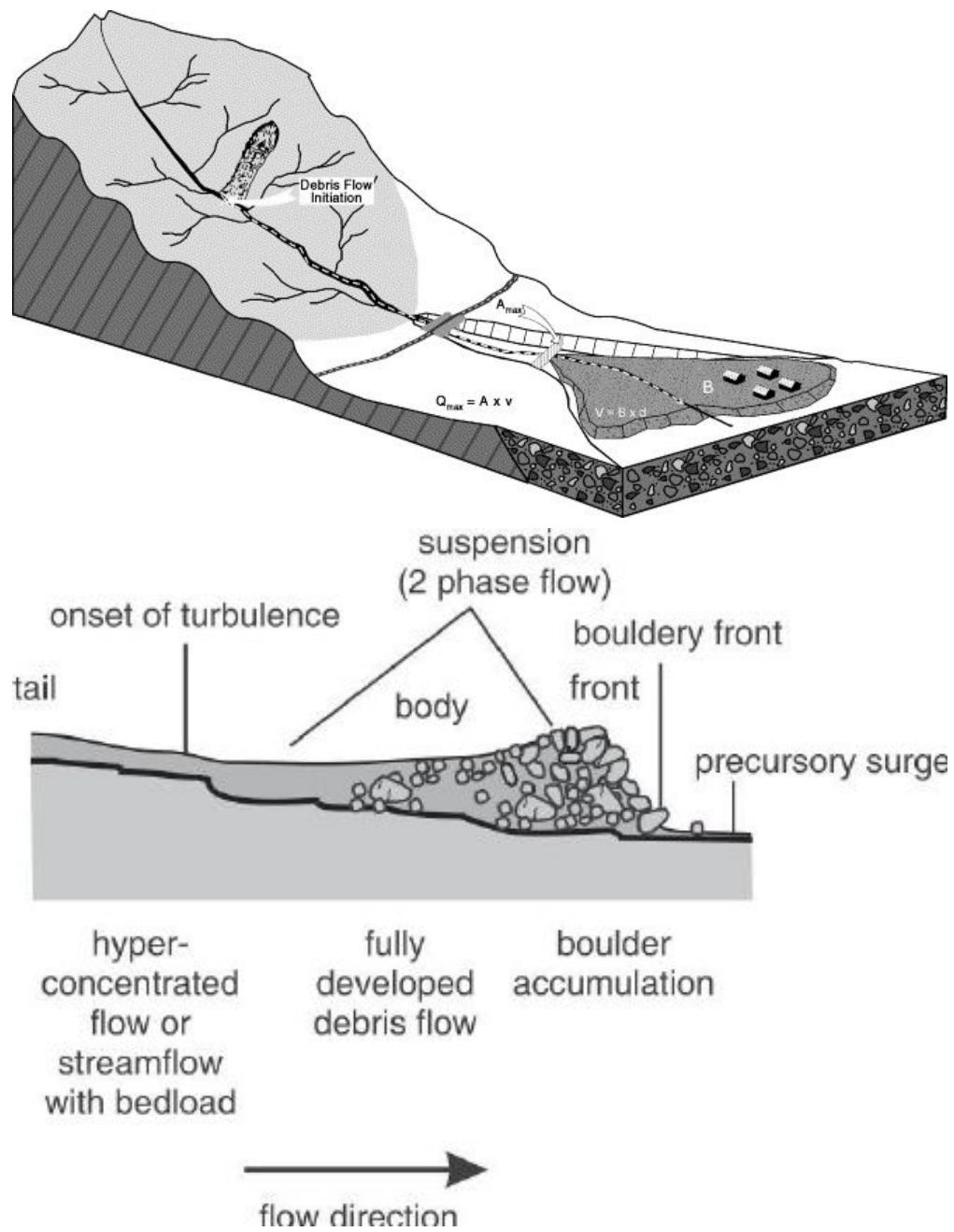
Ambientes Torrenciales

Este documento explora los fenómenos conocidos como avenidas torrenciales o flujos de escombros desde una perspectiva geomorfológica, con énfasis en su definición, procesos y las fuerzas que los gobiernan.

1. Definiciones

El término "**avenida torrencial**" es amplio y su definición ha sido objeto de debate.

- Una descripción general los define como una **mezcla de agua y sedimentos en diferentes proporciones**, que se desplazan velozmente a lo largo de cauces en cuencas de montaña.
- Dada la falta de consenso en Colombia, Aristizábal et al. (2020) proponen usar el término **avenida torrencial** para describir flujos formados por una mezcla de sedimentos y agua que se mueven a gran velocidad por cauces de montaña, y que son detonados por uno o varios de los siguientes eventos:
 1. Lluvias concentradas intensas o lluvias antecedentes.
 2. Enjambres de movimientos en masa.
 3. Sismos.
 4. Rotura de presas (naturales o artificiales).
 5. Aporte de grandes volúmenes de agua por fusión de glaciares.
- Estos autores proponen clasificar las avenidas torrenciales en tres tipos principales, que representan un continuo de procesos:
 - **Creciente Súbita** (o Inundación Súbita)
 - **Inundación de Escombros**
 - **Flujo de Escombros**

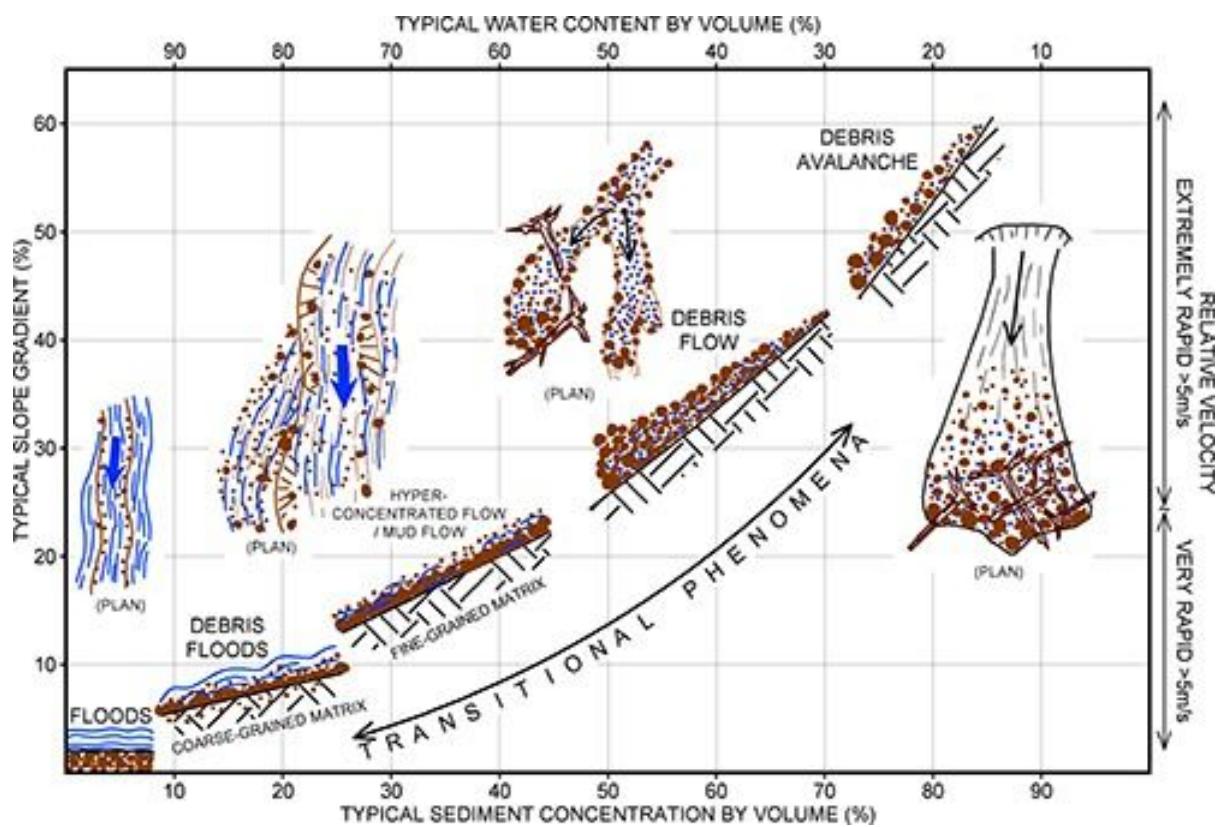


2. Diferencias de Percepción: Geólogos vs. Hidrólogos

La falta de consenso sobre el término se debe, en parte, a las diferentes perspectivas disciplinares:

- **Geólogos:** Tienden a entender las avenidas torrenciales como fenómenos gravitacionales, asociándolos a **movimientos en masa**. Por ejemplo, Ingeominas (2001) las definió como "fenómenos de remoción en masa".
- **Hidrólogos:** Las interpretan como fenómenos hidrológicos, asociándolas a **crecientes súbitas**. Por ejemplo, los POMCA (Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas) las definen como "inundaciones de tipo fluvial rápidas" o "crecientes súbitas".

Esta dicotomía ha llevado a metodologías de evaluación de amenaza muy diferentes: los geólogos se centran en la estabilidad de laderas y el aporte de sedimentos, mientras que los hidrólogos se centran en la respuesta hidrológica de la cuenca.



3. Características Fundamentales

Independientemente de la definición, toda avenida torrencial comparte tres componentes esenciales que deben estar presentes:

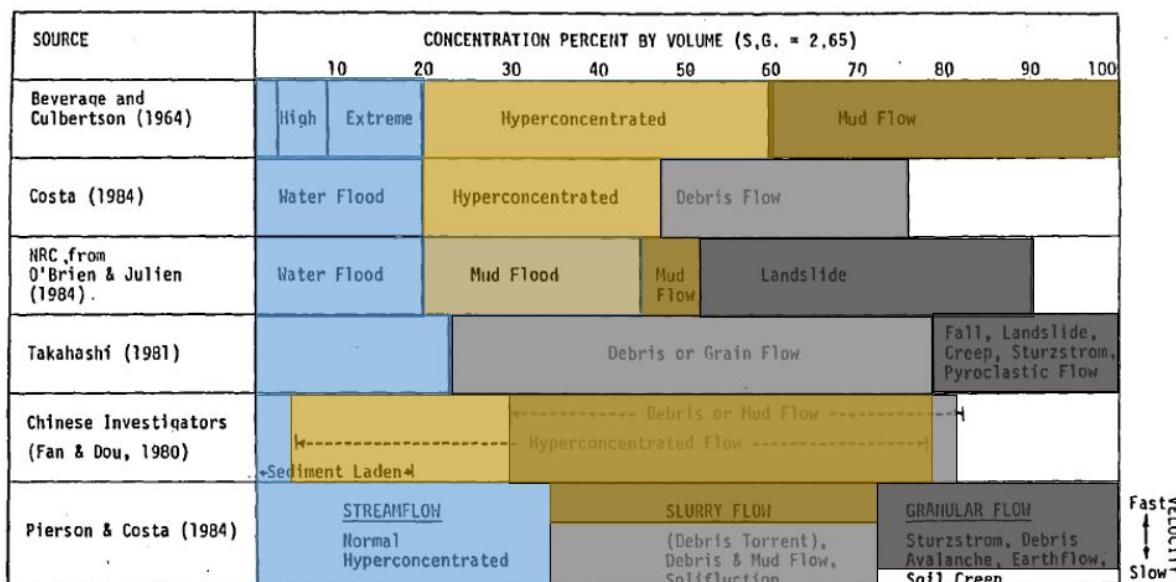
- Agua:** El agente de transporte, usualmente aportado por lluvias intensas, deshielo o rotura de presas.
- Sedimentos:** Una alta carga de material sólido (desde arcillas hasta bloques métricos) aportado por la erosión del cauce o por erosión pluvial o movimientos en masa.
- Canales de Fuerte Pendiente:** El escenario donde ocurren. La alta pendiente es necesaria para proveer la energía gravitacional que moviliza la mezcla a gran velocidad.

SOURCE	CONCENTRATION PERCENT BY VOLUME ($S.G. = 2.65$)												
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100			
Beverage and Culbertson (1964)	High	Extreme	Hyperconcentrated				Mud Flow						
Costa (1984)	Water Flood	Hyperconcentrated			Debris Flow								
NRC, from O'Brien & Julien (1984)	Water Flood	Mud Flood		Mud Flow	Landslide								
Takahashi (1981)			Debris or Grain Flow				Fall, Landslide, Creep, Sturzstrom, Pyroclastic Flow						
Chinese Investigators (Fan & Dou, 1980)	Sediment Laden			Debris or Mud Flow			Hyperconcentrated Flow						
Pierson & Costa (1984)	STREAMFLOW Normal Hyperconcentrated			SLURRY FLOW (Debris Torrent), Debris & Mud Flow, Solifluction			GRAINULAR FLOW Sturzstrom, Debris Avalanche, Earthflow, Soil Creep						
	Fast Velocity ↓ Slow												

4. Causas y Eventos Concatenados (En Cascada)

Las avenidas torrenciales raramente tienen una sola causa; son el resultado de un **fenómeno en cascada**.

Los **detonantes** principales (lluvia, sismos, etc.) no siempre causan el flujo directamente. A menudo, un evento primario (lluvia intensa) genera eventos secundarios (enjambres de movimientos en masa en las laderas), los cuales suministran una cantidad masiva de sedimentos al canal. Este aporte súbito de material transforma un flujo de agua normal (creciente súbita) en una mezcla densa (inundación o flujo de escombros).

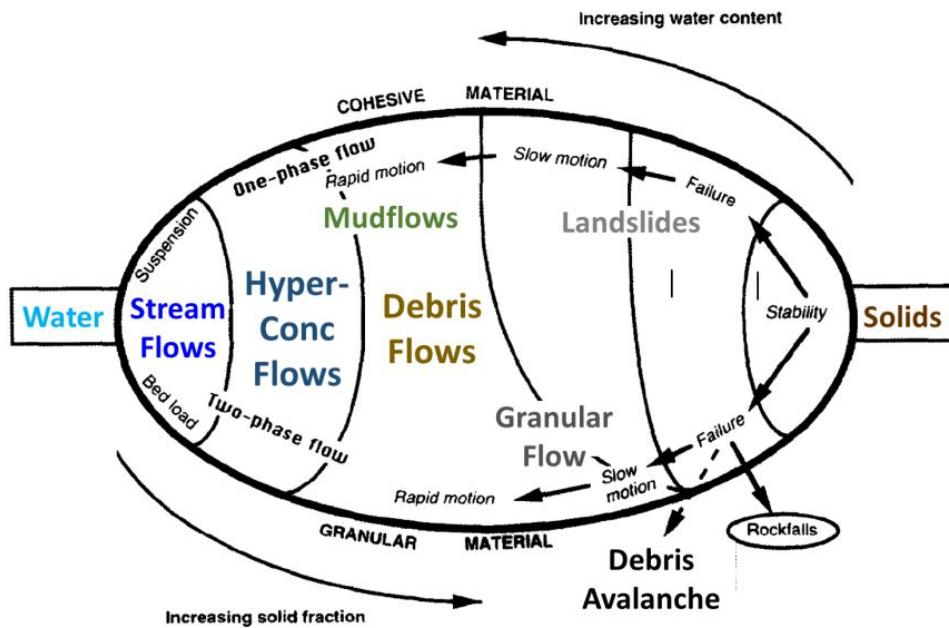


5. Tipos de Avenidas Torrenciales y Pérdida de Energía

Aristizábal et al. (2020) proponen la clasificación de **creciente súbita, inundación de escombros y flujo de escombros**. Estos tipos representan un continuo basado en la concentración y tamaño del sedimento.

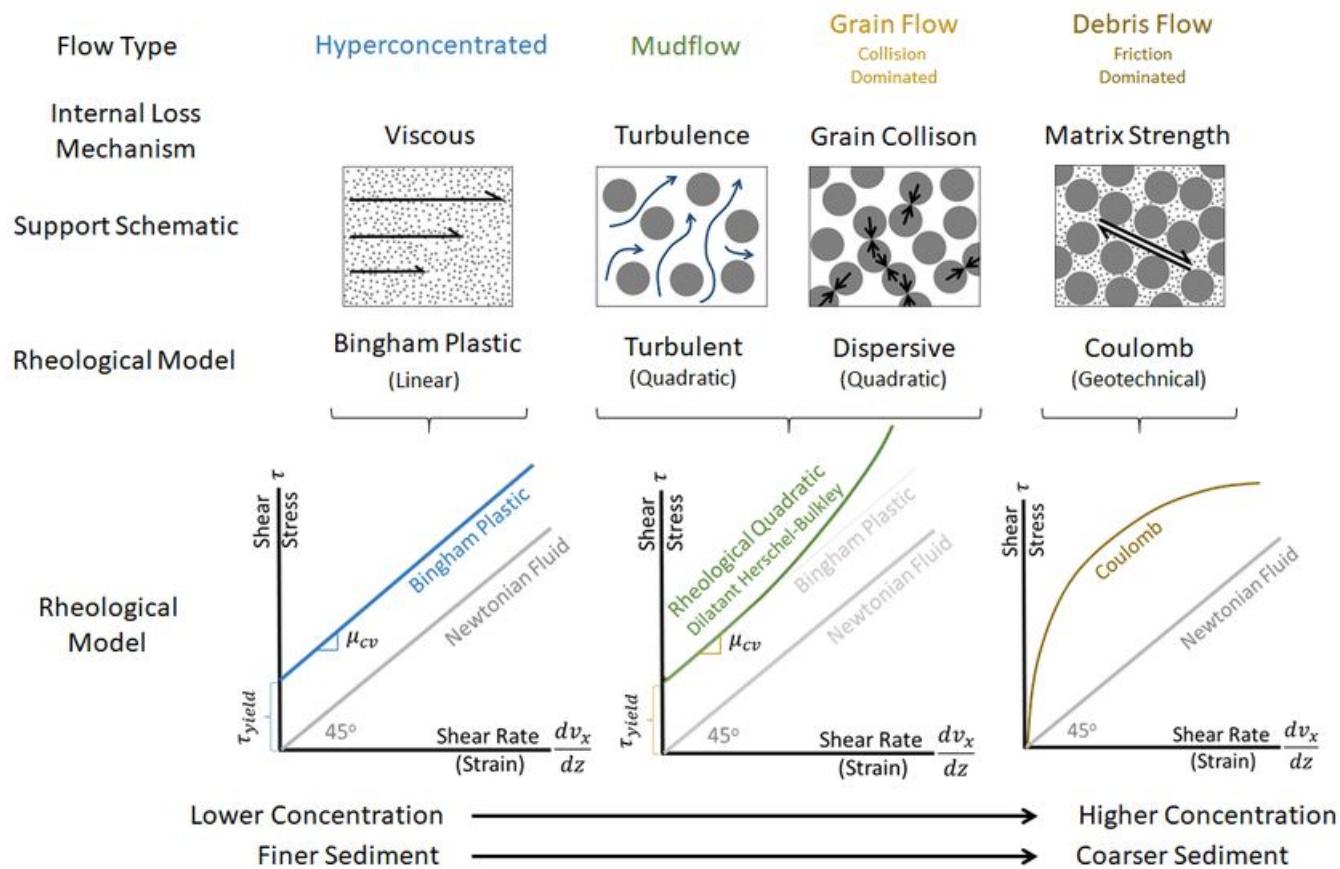
Un flujo torrencial pierde energía y se detiene principalmente por:

- **Disminución de la Pendiente:** Es el factor principal. Al llegar a zonas de menor gradiente (abanicos aluviales, valles principales), la gravedad ya no puede sostener el movimiento.
- **Pérdida de Confinamiento:** El flujo sale de un canal estrecho y se expande lateralmente, disipando su energía sobre un área mayor.
- **Pérdida de Agua (Infiltración):** El agua se infiltra en el lecho, aumentando la fricción interna y "congelando" el flujo.
- **Aumento de Carga (Bulking):** La erosión de más sedimento puede, hasta cierto punto, aumentar la fricción interna y la viscosidad, frenando el flujo.



6. Reología y Fuerzas Dominantes

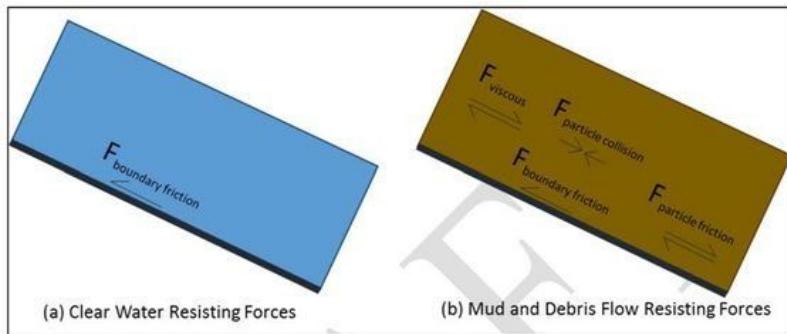
La **reología** (el estudio de cómo fluyen los materiales) es clave para diferenciar los tipos de flujos. Un flujo de agua (Newtoniano) se comporta muy diferente a un flujo de escombros (No-Newtoniano).



La Tabla del artículo de Aristizábal et al. (2020) resume las diferencias clave:

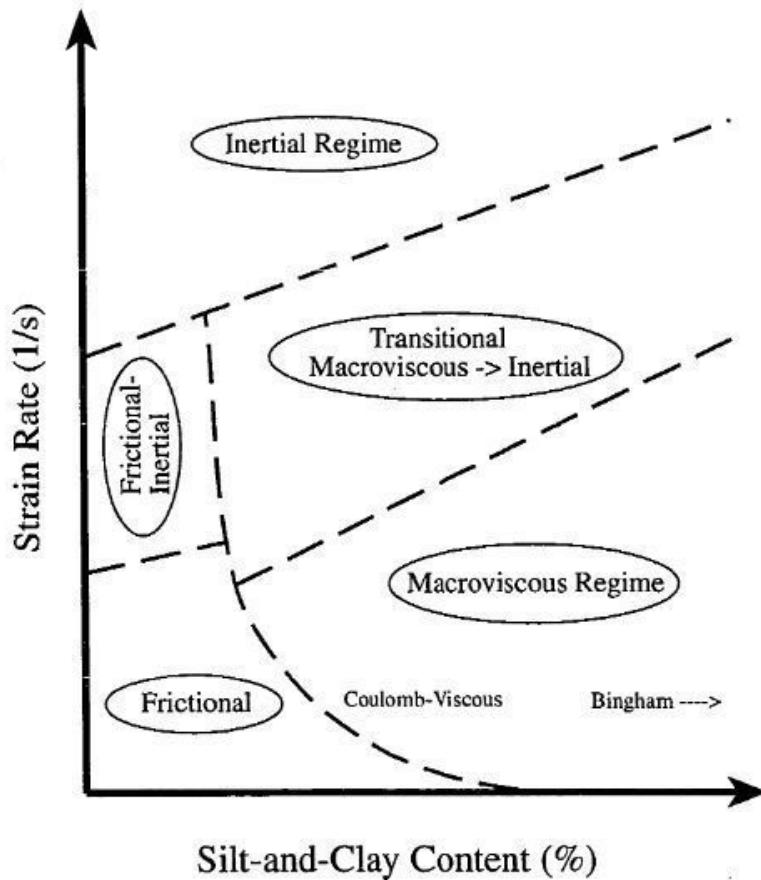
Tabla 3. Análisis comparativo entre flujos denominados como avenidas torrenciales

Característica \ Tipo de Evento	Creciente súbita	Flujo de escombros	Inundación de escombros
Velocidad	Alta	Muy alta	Alta
Descarga pico	Alta	Muy alta	Alta
% sedimentos vol.	0%-30%	>70%	30%-70%
Aporte de sedimentos	Cauce	Laderas y cauce	Cauce y laderas
Tamaño de sedimento	Hasta tamaños centimétricos	Muy heterogéneo en tamaños hasta bloques métricos	Hasta bloque métricos
Reología del flujo	Flujo newtoniano de dos fases	Flujo de una fase no newtoniano	Flujo de dos fases
Tipo de transporte	Turbulencia	Fuerzas dispersivas, matriz cohesiva y boyancia	Fuerzas dispersivas y boyancia
Alcance espacial	Mayor	Menor	Medio
Orden drenaje	>2	1 y 2	>2
Morfología de cuenca	Cuenca más grandes y de menores pendientes	Cuenca pequeña, laderas de mayores pendientes y cauces confinados	Cuenca más grandes y de menores pendientes
Capacidad de destrucción	Medio	Muy alto	Alto



7. Definición de Tipos de Flujo Reológico

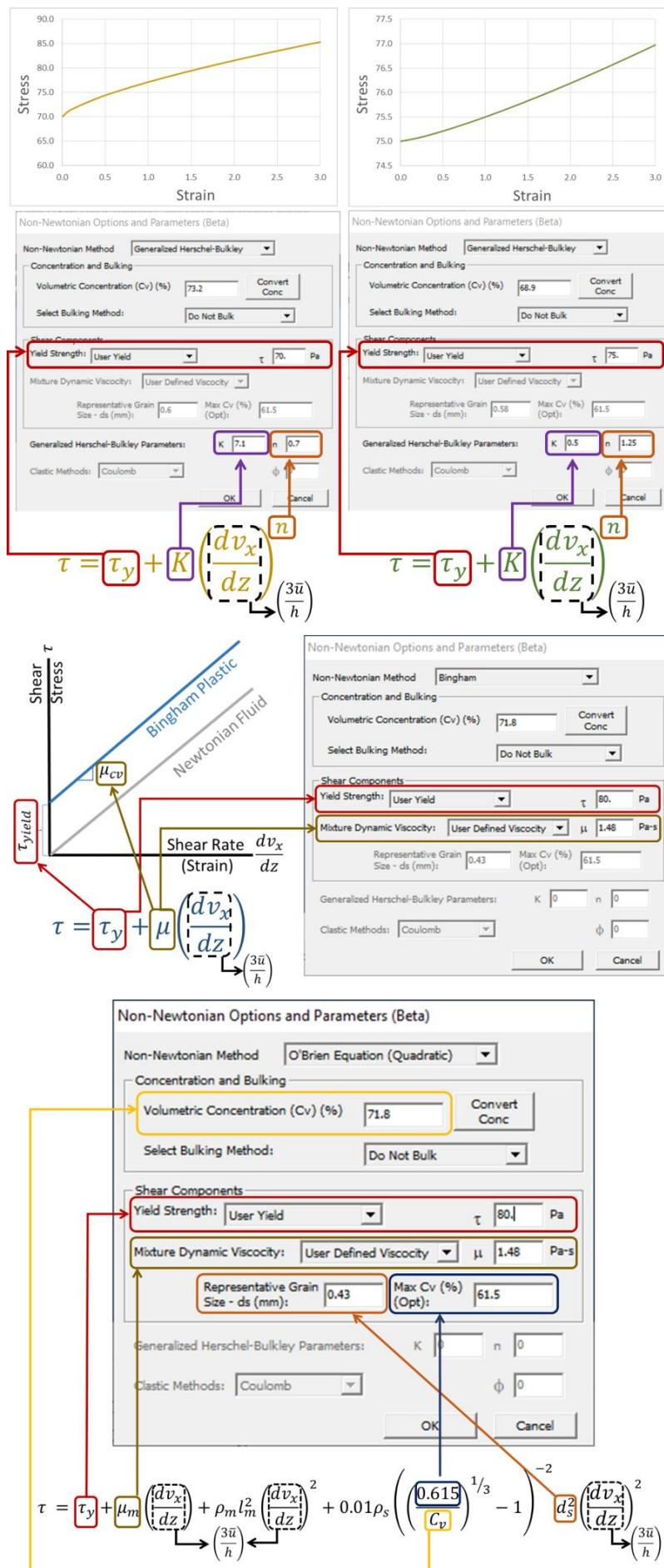
- Flujo Turbulento (Newtoniano):** Comportamiento del agua. La resistencia al flujo (esfuerzo cortante) es proporcional a la velocidad (viscosidad). Es un flujo diluido donde las partículas son transportadas por la turbulencia del fluido. Corresponde a las **crecientes súbitas**.
- Flujo Viscoso (Cohesivo):** Flujo dominado por una alta concentración de sedimentos finos (arcillas, limos) que forman una "matriz" cohesiva. La resistencia proviene de la viscosidad de este lodo.
- Flujo Friccional / Dilatante (No-Newtoniano):** Flujo dominado por la colisión y fricción entre los granos gruesos. El material debe expandirse (dilatarse) para poder moverse, generando alta resistencia interna.
- Flujo Hipercconcentrado:** Término intermedio entre un flujo de agua turbulento y un flujo de escombros. Es lo suficientemente denso para que los sedimentos afecten la reología, pero no tanto como para ser un flujo cohesivo o granular. Corresponde a la **inundación de escombros**.



8. Modelos Reológicos Propuestos

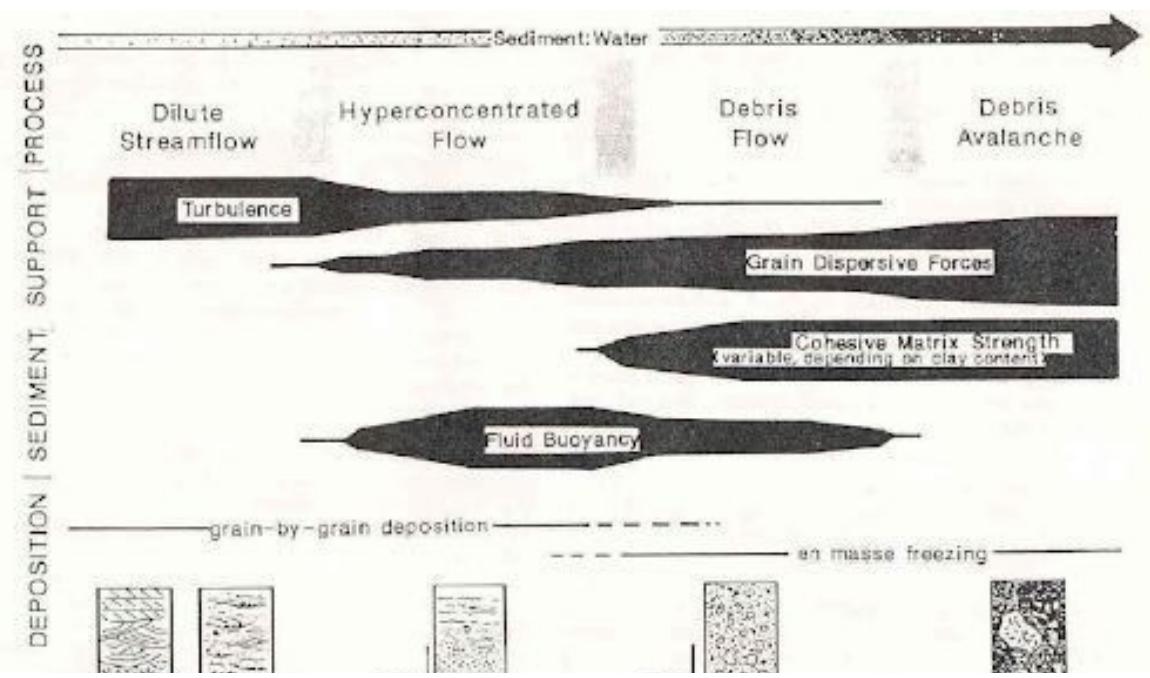
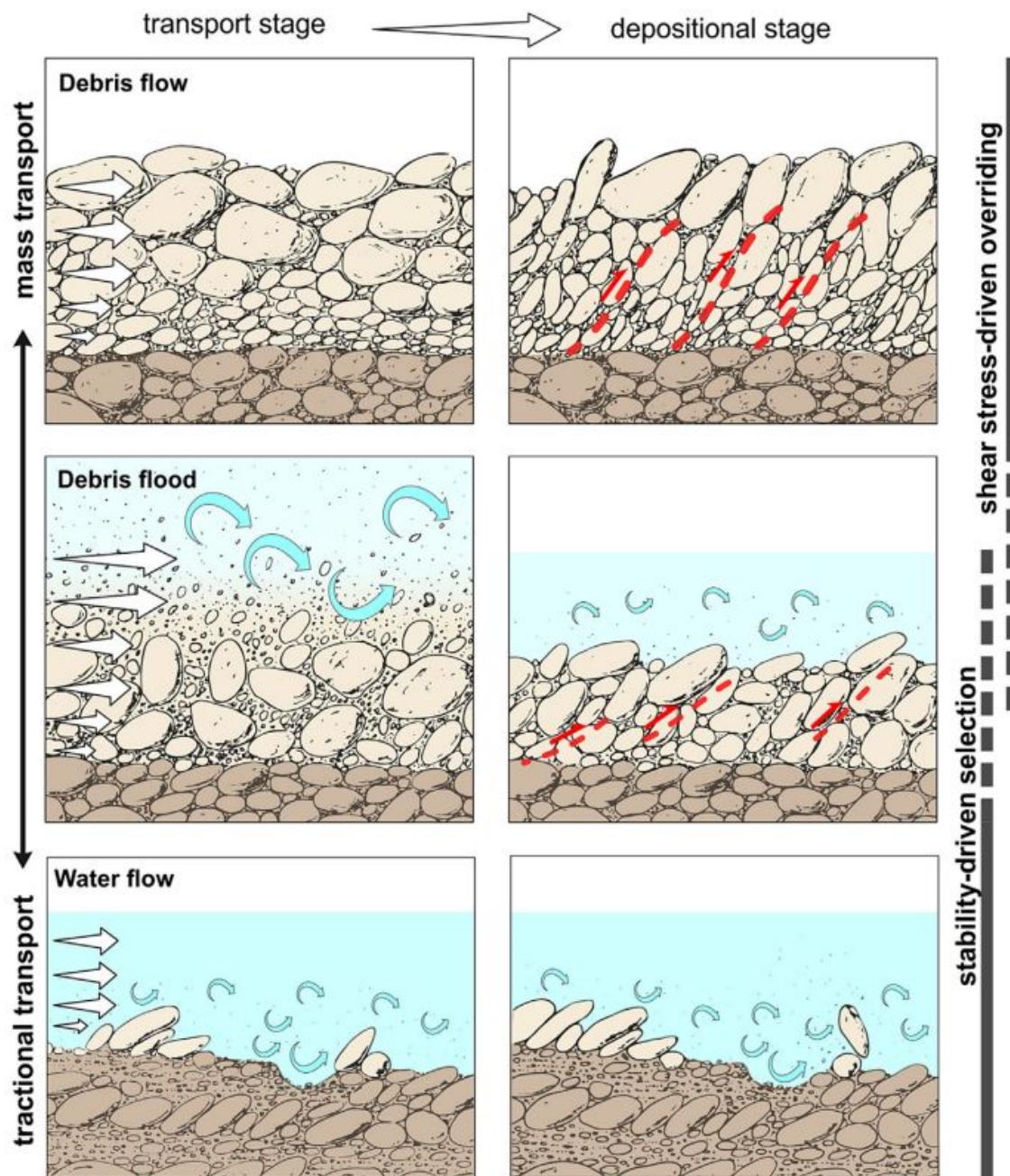
Para describir matemáticamente estos flujos, se usan varios modelos:

- **Bingham (Plástico):** El modelo no-newtoniano más simple. Asume que el material tiene una **resistencia al corte inicial (τ_y)** que debe superarse para que comience a fluir (como la pasta de dientes). Una vez que fluye, se comporta como un fluido viscoso. $\tau = \tau_y + \eta \dot{\gamma}$. Es ideal para flujos cohesivos.
- **O'Brien y Julien (1985):** proponen un modelo (a menudo cuadrático) que incluye componentes de resistencia viscosa, cohesiva, friccional y dispersiva.
- **Voellmy (Friccional-Turbulento):** Usado para avalanchas. Combina un término de fricción seca (tipo Coulomb) y un término de arrastre turbulento (proporcional al cuadrado de la velocidad).
- **Herschel-Bulkley:** Un modelo más general que el de Bingham. Incluye una resistencia inicial (τ_y) pero permite que el fluido sea "pseudo-plástico" (la viscosidad aparente disminuye con la tasa de corte).



9. Mecanismos de Soporte de Sedimentos y Depósitos

La capacidad de un flujo para transportar bloques gigantescos depende de cómo "soporta" los granos. Las fuerzas dominantes explican esto:





Smith and Lowe, 1991

- **1. Turbulencia:** En **crecientes súbitas**, los remolinos del flujo levantan las partículas.
 - *Depósito Resultante:* Típicamente fluvial. **Estratificado**, clasto-soportado (los cantos se tocan entre sí) y con cierto grado de selección.
- **2. Boyancia (Flotabilidad):** En todos los flujos densos, la densidad de la matriz fluida (agua + finos) es alta, lo que reduce el peso aparente de los bloques grandes, ayudando a que "floten".
- **3. Matriz Cohesiva (Fuerza de la Matriz):** En **flujos de escombros** cohesivos, la "pasta" de lodo tiene suficiente resistencia interna para mantener los bloques grandes en suspensión, impidiendo que se decanten.
 - *Depósito Resultante:* **No estratificado (masivo), matriz-soportado** (bloques grandes "flotando" en un lodo fino), muy mala selección, y a menudo con frentes de flujo lobulares y empinados.
- **4. Fuerzas Dispersivas (Presión Dispersiva):** En **flujos de escombros** granulares, las colisiones constantes entre los granos grandes generan una presión que los mantiene separados (similar a agitar un tarro de nueces).
 - *Depósito Resultante:* A menudo presenta **gradación inversa** (los bloques más grandes son empujados hacia el frente y la superficie del flujo). Los depósitos de la **inundación de escombros** se describen como "bloques de tamaños heterogéneos poco redondeados, sin imbricación o estratificación horizontal y gradación normal".

