

**XXII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
CIUDAD GUAYANA, VENEZUELA, OCTUBRE 2006**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE  
FLUJOS GRANULARES HIPERCONCENTRADOS.**

***Bateman, A.; Medina, M.; Steiner, F.; Velasco, D.***

*Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña. España  
allen.bateman@upc.edu*

**RESUMEN**

Los flujos hiperconcentrados tienen varios atractivos para ser estudiados, el primero de ellos es que su ocurrencia tiene mayores impactos sobre la población cada vez mas extendida en el territorio y segundo es un flujo de material mezclado con agua lo que le da un carácter especialmente complejo e interesante de ser estudiado. Este tipo de flujos han sido estudiados desde hace ya bastante tiempo por autores Bagnold (1954), Takahashi (1991), Iverson (1997), (2001) (2003), Rickenmann (1997), (1999), entre otros. Como se puede comprobar los autores habitualmente provienen de regiones donde los eventos de flujos hiperconcentrados son habituales y han provocado grandes pérdidas económicas y desafortunadamente de pérdidas en vidas humanas. Más cerca de este congreso, el grupo de Venezolanos liderados por los profesores López y Falcón o bien en Colombia por el grupo liderado por el profesor García López, que también han tenido que trabajar en este tema por el mismo motivo recordemos el evento de Vargas y el evento de volcán Nevado del Ruiz, respectivamente.

En este trabajo presentamos los primeros pasos en este tipo de fenómenos del Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos (GITS) de la UPC. Se trata de la caracterización de los flujos hiperconcentrados de tipo granular mediante la realización de experimentos en un canal de alta pendiente. Esto se logró a partir de medidas realizadas sobre un flujo de detritos mediante el uso de una cámara digital de alta velocidad. Se ha tenido que desarrollar software que permite determinar el perfil de velocidad del flujo y la altura del mismo a lo largo de un evento tipo avalancha de agua y material granular. Estos perfiles se caracterizaron con una reología tipo Voellmy que es una combinación entre la reología Coulomb y turbulenta, que es la más adecuada para los flujos obtenidos en los ensayos realizados.

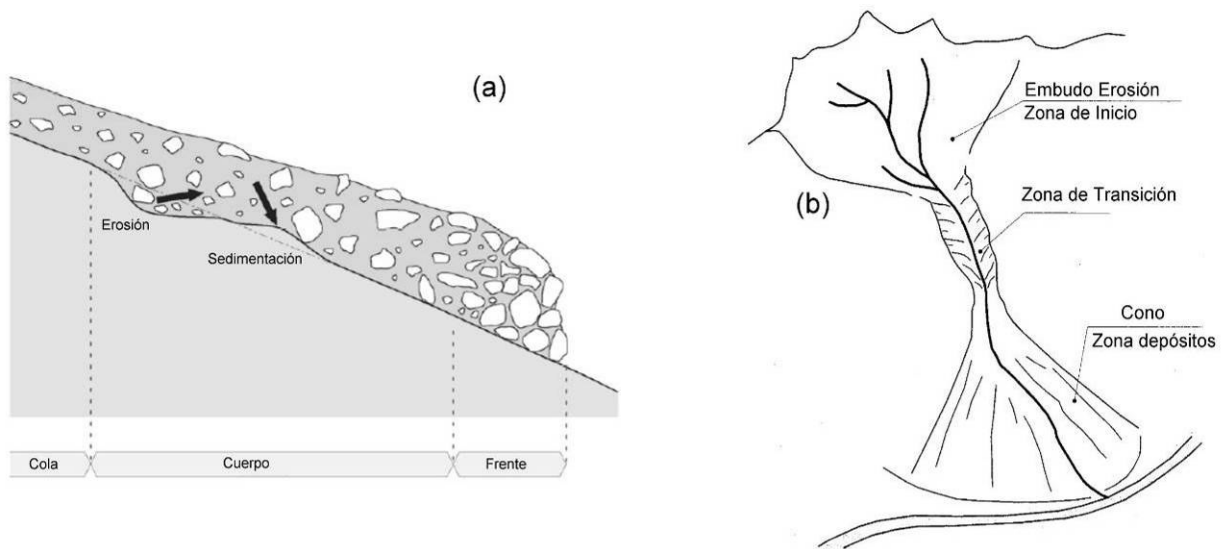
## INTRODUCCIÓN

Es bien conocido que los flujos detríticos son una mezcla de agua y sedimentos con alta concentración que se mueven por su propio peso rápidamente por los cañones en regiones de altas montañas. Se le suele denominar en inglés "*Debris Flow*". Sus causas son diversas; movimientos de tierra, lluvias intensas, deslizamientos de tierra por presión de poros, erupciones volcánicas, pero las consecuencias son de la misma naturaleza, cantidades enormes de material que se deslizan por los cauces con profundidades de varios metros de altura a velocidades altas (15 m/s y más) cuya cantidad de movimiento tiene una fuerza devastadora capaz de destruir todas las infraestructuras que se encuentren a su paso. En Colombia en el año 1985 un evento de estas características destruyó toda una población, Armero (García López, 1988), en Venezuela en 1999 (García et al., 2003) destruyó todo el litoral del estado de Vargas incluyendo casi todas sus poblaciones costeras, en los Alpes Europeos 1 o 2 personas al año mueren por este suceso, en Japón se suceden más de 300 flujos detríticos cada año, más de 2000 personas perdieron su vida a todo lo largo del mundo debido a este fenómeno en el año 2003. La evaluación de la peligrosidad de este tipo eventos es de gran importancia, igualmente importante la comprensión del comportamiento físico de los flujos detríticos como un flujo heterogéneo, no permanente y de comportamiento reológico complejo.

El estudio de este tipo de movimientos es complejo debido a la gran cantidad de materiales que pueden ser utilizados, desde mezclas con diferentes saturaciones de agua y sedimento como diferentes granulometrías del material granular, así como también la energía impulsora disponible. Todos estos factores unidos resultan ser una abanico de ensayos tan grande que es difícil tomar una decisión. Así lo más adecuado para empezar es utilizar un tamaño de grano medio (ni grande, ni pequeño) y bastante uniforme. Se decidió de esta manera utilizar un material tipo ojo de perdiz que está sobre un diámetro medio del orden de 5 mm. Se realizaron tres ensayos que permitieron desarrollar una serie de software de tratamiento de imágenes y una metodología de trabajo que es de gran importancia para el desarrollo de los futuros experimentos que se desarrollaran. Los ensayos se desarrollaron en el nuevo laboratorio de Morfodinámica Fluvial sito en los laboratorios del Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Se consiguieron los perfiles de velocidad de prácticamente todo el evento cuya duración no es mayor de una decena de segundos. Mediante estos perfiles se caracterizó la reología de los flujos que al final resultó ser una reología tipo Voellmy debido a la composición granular de la mezcla y la falta de sedimento fino.

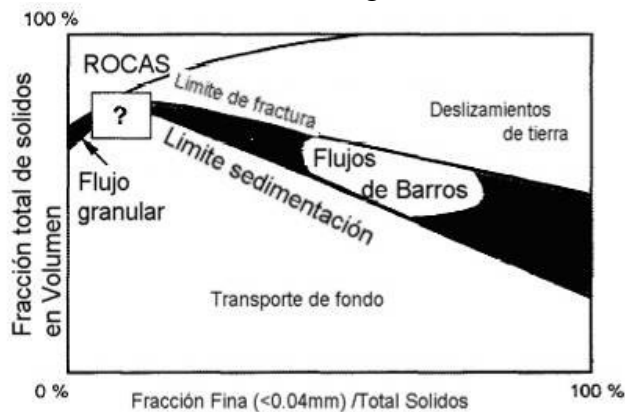
## CONCEPTOS BÁSICOS Y ASPECTOS GENERALES EN FLUJOS DETRÍTICOS

En la figura 1a se muestra el perfil de un flujo típico de detritos, es un material de granulometría extendida con una cierta clasificación de los granos en su interior. Se divide básicamente en tres partes, el frente donde se acumulan los granos más gruesos, el cuerpo y la cola donde se acumula parte del agua libre de sedimentos y mezcla de agua con sedimentos finos. En la figura 1b se presenta la morfología en planta de una zona que ha sufrido un deslizamiento de tierras que se convierte al final en flujo detrítico, se distinguen tres zonas, la zona de embudo o zona de iniciación, la zona de transición o zona de tránsito del flujo, normalmente conducida a lo largo de un cañón y la zona de depósito que sucede cuando el terreno mismo pierde pendiente y se expone es una zona de frenado y por tanto de creación de los conos de deyección. El flujo pasa de tener altas pendientes, más de 40° en la zona de iniciación a pasar a no más de 3° en la zona de depósito (Hutter et al. 1996). Adicionalmente a las cantidades enormes de material que se transportan y depositan en este tipo de flujos (de centenares a millones de m<sup>3</sup>) los flujos detríticos presentan una concentración de energía enorme capaz de erosionar el lecho provocando la incorporación de más material al propio flujo, es un flujo que se retroalimenta y eso lo hace dinámicamente creciente. El cambio de pendiente brusco que sufren los cañones al salir hacia los valles y el fin de la potencia de los lechos hasta la roca, son los que al final ponen fin a este tipo de fenómenos retroalimentados. El primero por que la producción de energía disminuye drásticamente y el segundo por limitación física.

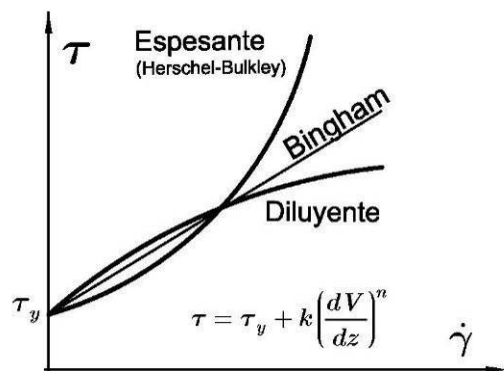


**Figura 1.** a) Perfil de un frente de detritos (extraído de Schatzmann (2005)). b) Morfología de la huella de los flujos detriticos. (Extraído de Bezzola (2005)).

Se describen en la literatura dos grandes maneras de clasificar el flujo detritico, aquellos autores que los clasifican por el tipo de flujo que se desarrolla (Iverson 1997) o aquellos que lo clasifican por la concentración de material que se involucra en el proceso. Coussot & Meunier (1996) analizan el movimiento de la masa y lo clasifican por su la concentración de material. De acuerdo con esto una simple clasificación conceptual muy sencilla queda determinada por sólo dos parámetros: la concentración total de sólidos en el flujo y la proporción de finos (arcillas y limos) en la muestra sólida, como se observa en la figura 2.



**Figura 2.** Relación entre la fracción total de sólidos en el volumen y la correspondiente fracción fina en la mezcla sólida. Extraído de Coussot & Meunier (1996).



**Figura 3.** Relaciones reológicas para fluidos de diferentes clases. El comportamiento espesante fue estudiado propuesto por Herschel-Bulkley en el año 1926.

## MODELOS REOLÓGICOS DE LOS FLUJOS HIPERCONCENTRADOS

Los materiales se distinguen por su relación esfuerzo-deformación, así la ley más conocida en fluidos es la de Newton para la viscosidad, que relaciona la velocidad de deformación  $\dot{\gamma}$  con la tensión  $\tau$  a través de la denominada viscosidad  $\mu$ . Así, se pueden distinguir dos grupos; aquellos que cumplen con dicha relación y los no Newtonianos que pueden ser de corte diluyente o de corte espesante, tal y como se aprecia en la Figura 3; este último fue estudiado para mezclas granulares por *Herschel-Bulkley* en 1926. Por otro lado, la necesidad de vencer una tensión inicial  $\tau_y$  para fluir es una característica de materiales tipo Bingham, los materiales granulares exhiben este mismo comportamiento aunque el resultado es diferente como se expresará adelante. Existe un

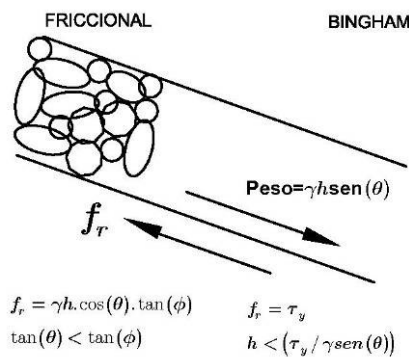
comportamiento hidrodinámico que diferencia a los flujos en laminar y turbulento, diferenciados sólo por el número de Reynolds. Pero en este último caso cuando la energía disponible es muy elevada y el grano del material domina (Bagnold, 1954) una reología de tipo granular es lo más adecuado para modelar el flujo. Una expresión general que puede modelar los fluidos esta condensada en la ecuación [1].

$$\tau = \tau_y + k \left( \frac{dv}{dz} \right)^n + \zeta \left( \frac{dv}{dz} \right)^2 \quad [1]$$

En donde  $k$  es la consistencia y  $n$  el índice de fluido. Bagnold (1954), pionero en las investigaciones sobre la influencia en el impacto de partículas de sedimentos en el flujo, define la tensión dispersiva como aquella que inducen la colisión entre las partículas como:

$$\tau_d = C_{bd} \rho_s \left[ (0.615/C_v)^{(1/3)} - 1 \right]^{-2} d_s^2 \left( \frac{dv}{dz} \right)^2 \quad [2]$$

Obsérvese en este caso particular que el coeficiente  $\zeta$  de la ecuación [2] es función de la densidad del sedimento, la concentración de material en volumen  $C_v$  y del diámetro medio del sedimento  $d_s$ . Es fácil distinguir el modelo de Herschel-Buckley anulando el término turbulento, que se distingue por que es proporcional al cuadrado de la velocidad de deformación (Modelo Karman). El término  $\tau_y$  es la tensión inicial que se ha de vencer para que comience a fluir el material, se distinguen dos casos que se representan en la figura 4. Como se puede ver, los dos modelos friccional y Bingham definen un esfuerzo inicial para el inicio de la deformación, pero para llegar a este el primero depende del ángulo del talud del material y el segundo fluye cuando se presente en el fluido un espesor mínimo. Esta diferencia cambia por completo la morfología de los depósitos y de los desprendimientos de los procesos.



**Figura 4.** Modelo friccional y Bingham para definir el corte umbral. En la figura  $h$  es la profundidad de flujo,  $\theta$  el ángulo del talud  $\tau$  la tensión cortante.

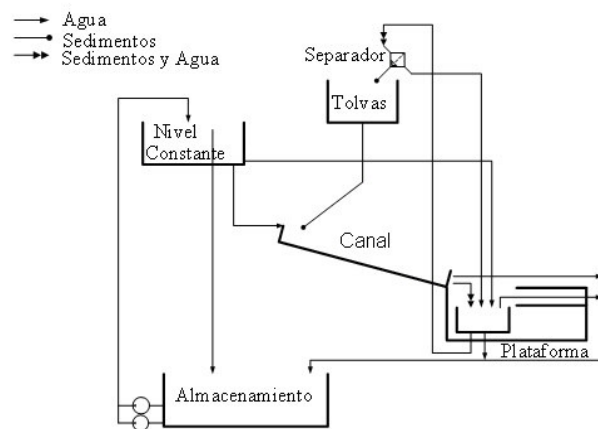
A continuación se definen los modelos más comunes utilizados en la literatura:

**Modelo Newtoniano turbulento.** Este modelo se basa en considerar que el flujo que se presenta es turbulento, así las tensiones existentes son debidas a las transferencias de momentum transversal es decir su comportamiento se puede definir de manera sencilla con un modelo Chezy, así:

$$U = C \cdot \sqrt{h \cdot \sin(\theta)} \quad [3]$$

En donde  $U$  es la velocidad media del flujo,  $C$  el coeficiente de Chezy,  $h$  la profundidad de agua o también radio hidráulico y  $\theta$  la inclinación del fondo. La tensión de fondo se puede evaluar como:

$$\tau_0 = \gamma \cdot \frac{1}{C^2} \cdot U^2 \quad [4]$$



**Figura 5.** Esquema de recirculación de agua y de sedimentos.

En donde  $\tau_0$  es la tensión de fondo y  $\gamma$  el peso específico de la mezcla. Rickenmann & Koch (1997) han obtenido resultados muy satisfactorios, utilizando un solo parámetro, sin embargo no da idea del depósito.

Modelo de Bingham Es el modelo de un fluido de características aparentes de corte diluyente, es el modelo más simple para un fluido viscoplastico. El modelo se representa por la ecuación [1] en donde  $n = 0$  y  $\zeta = 0$ . Esto es:  $\tau = \tau_y + \mu_B \cdot \dot{\gamma}$

Se ha definido como tensión umbral a  $\tau_y$  y la viscosidad  $\mu_B$  para de el modelo de Bingham. La expresión para la velocidad media de flujo es:

$$U = \frac{\rho \cdot g \cdot h^2 \cdot \sin \theta}{3 \cdot \mu_B} \cdot \left[ 1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{\tau_y}{\tau_b} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\tau_y^3}{\tau_b^3} \right] \quad [5]$$

En donde se ha identificado a  $\tau_b$  como la tensión basal o actuante en el contacto fluido terreno.

Modelo de Herschlel Buckley. Este modelo es más general que el de Bingham y fue planteado en 1926 por Herschlel Buckley. Se puede obtener haciendo  $\zeta = 0$  en la ecuación [1]. En este flujo aparecen dos capas bien diferenciadas la capa que se deforma en contacto con la superficie del terreno donde  $\tau > \tau_y$  y una capa que se mueve en forma de sólido rígido en la parte superior donde  $\tau < \tau_y$ .

El modelo Voellmy. Este modelo complementa la acción de la fricción del grano o fricción interparticular con el movimiento turbulento de la mezcla, menor energía en el flujo más influye sobre el movimiento la fricción interparticular y por el contrario más energía en el movimiento menos influencia tienen estas fuerzas interiores. Así el modelo queda así:

$$\tau_b = \underbrace{\rho \cdot g \cdot h \cdot \mu \cdot \cos \theta}_{\text{Friccional}} + \underbrace{\rho \cdot g \cdot \frac{U^2}{\xi}}_{\text{Turbulento}} \quad [6]$$

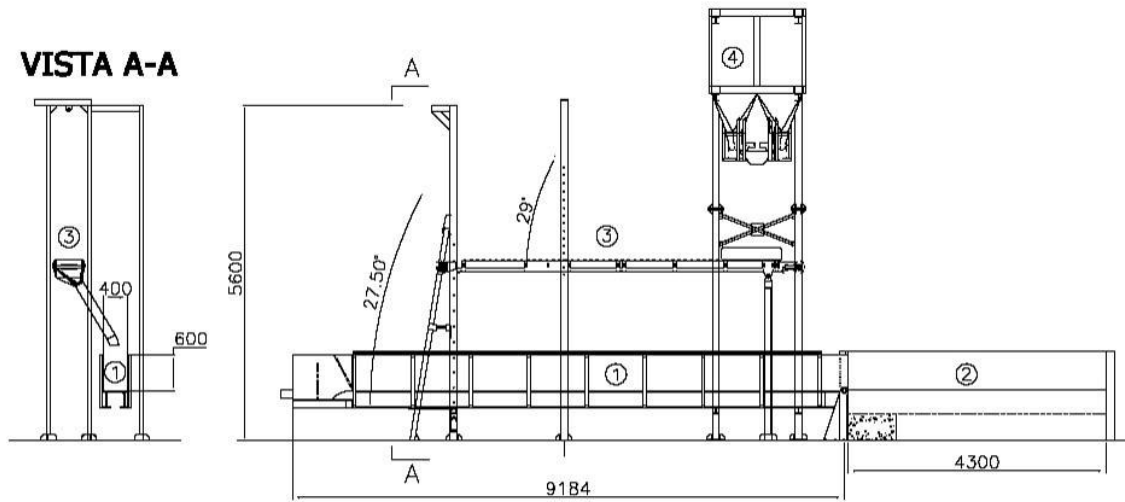
En donde se ha cambiado la  $C$  de Chezy por la  $\xi$  como parámetro turbulento. Este cambio simplemente es para respetar el valor usual del coeficiente de Chezy. El modelo incorpora en la ecuación el término de fricción de Mohr Coulomb. Rickenmann & Koch (1997) muestran que el modelo de Voellmy da muy buenos resultados en canales torrenciales.

## INSTALACIÓN EXPERIMENTAL UTILIZADA

Laboratorio Los experimentos fueron realizados en el laboratorio de Morfodinámica Fluvial situados en los laboratorios de Hidráulica del Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña.

El equipo consiste en un canal, una plataforma y un sistema autónomo de recirculación de agua y sedimentos (ver figura 5). El canal tiene una longitud total de 9.2 m de sección rectangular de 40 cm de ancho por 60 cm de altura. El extremo aguas arriba del canal, por donde entra tanto el material sólido como el agua, es posible levantarlo con un puente grúa para obtener ángulos de inclinación desde  $0^\circ$  hasta  $27.5^\circ$ . El extremo aguas abajo finaliza en una plataforma de 4.3 m de longitud y 2.5 m de ancho. Tanto las paredes del canal como de la plataforma son de cristal. Una condición de contorno intermedia fue integrada al canal y consiste en un recipiente de casi  $1 \text{ m}^3$  de volumen que intercepta el flujo de agua y sedimentos que van por el canal; este recipiente es susceptible de ser sellado herméticamente con una compuerta de manera que el flujo finaliza en la plataforma en donde se pueden estudiar depósitos y flujos bidimensionales.

El sistema de recirculación de agua consiste en dos depósitos uno que hace de almacenamiento y el otro elevado sobre la cresta del canal de depósito de carga a nivel constante. El sistema de bombeo eleva hasta 170 l/s. El canal está diseñado para variar el caudal desde  $200 \text{ cm}^3/\text{s}$  hasta  $50 \text{ l/s}$  de forma automática y controlada por medio de ordenador. El sistema de recirculación de arena está diseñado para transportar y clasificar en cuatro husos y en tiempo real hasta  $1 \text{ kg/s}$  de material granular cuyos diámetros van desde  $3 \text{ mm}$  hasta los  $35 \text{ mm}$ . Ambos sistemas líquidos y sólidos se controlan mediante el ordenador con conexiones de 4-20 mA.



**Figura 6 .** El canal del laboratorio de morfología fluvial. Más información sobre el canal lo encontrará en la página web del Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos GITS ([www.gits.ws](http://www.gits.ws)). 1. Canal. 2. Plataforma. 3. cinta transportadora. 4. tolvas y criba de clasificación de sedimentos.

**Cámara de fotografía.** La cámara utilizada requerida para la medición de los niveles y velocidades del flujo de detritos es la tipo Bassler A504K con una CMOS monocromo con una resolución de 1280x1024 pixels. El tamaño del píxel es de  $12 \times 12 \mu m^2$  con una profundidad de píxel de 8 bits. El rango de exposición puede variar desde los  $10 \mu s$  hasta  $33 ms$ . La velocidad de salida de los datos es de 625 Mbytes/s dando paso a velocidades de 500 fps a máxima resolución, que reduciéndola alcanzará a 16000 fps. Se uso un lente Nikon de 50 mm y luminosidad de 1.8 por la bondad de estos lentes no hay necesidad de ser corregida por deformación. La cámara se conecta a una estructura de recolección de datos tipo Epix PIXCI CL3SD sincronizado con 4GB de memoria DRAM.

En este trabajo se uso la cámara a 1000 fps variando la resolución hasta 1280x430 pixels, el tiempo de exposición llego hasta 0.997ms y la cámara se situó lateralmente al canal a una distancia de aproximadamente 1.30m. La iluminación utilizada consistió en 5 lámparas halógenas; 4 de 500Watt y una de 1000 Watts, para obtener una iluminación uniforme Las 4 lámparas se situaron a una distancia de 20 cm del cristal y la 5 lámpara ilumino por encima para acabar de mejorar la calidad de la iluminación.

**Material utilizado.** Se utilizó una gravilla de color gris redondeada con las siguientes características:  $d_{16}$  5.3mm;  $d_{30}$  7.3mm;  $d_{54}$  14.4mm;  $d_{90}$  20.8 mm y  $d_m$  7.9mm. La desviación típica es de 1.65mm y el peso específico seco es de  $2930 \text{ Kg/m}^3$ .

La densidad  $\rho_m$  de la mezcla de sólidos y fluido se evaluó con las densidades  $\rho_s$  de los sólidos y  $\rho_f$  del fluido como:

$$\rho = \begin{cases} \rho_f \cdot C_{v,f} + \rho_s \cdot C_{v,s} & \text{No saturado} \\ \rho_f \cdot (1 - C_{v,s}) + \rho_s \cdot C_{v,s} = \rho_f \cdot n + \rho_s \cdot (1 - n) & \text{Saturado} \end{cases} \quad [7]$$

En donde  $C_{v,f}$  y  $C_{v,s}$  son la concentración volumétrica de fluido y de sólidos respectivamente; n es la porosidad. El concentración se evalúa así:  $C_{v,s} = V_s / (V_s + V_f)$ , en donde  $V_s$  es el volumen de sólidos y  $V_f$  el volumen de fluido. El ángulo de estabilidad del material en el canal con pendiente  $\theta$  se puede establecer de acuerdo con la siguiente relación:

$$\tan \theta_{cr} = \tan \phi \cdot \frac{h_1 \cdot (\rho_{,sat} - \rho_f) + h_2 \cdot \rho_s \cdot (1 - n)}{h_1 \cdot \rho_{,sat} + h_2 \cdot \rho_s \cdot (1 - n)} \quad [8]$$

En donde  $\theta_{cr}$  es el ángulo crítico de deslizamiento,  $\phi$  el ángulo de fricción interna del material y  $h_1$  La profundidad de la parte saturada y  $h_2$  la profundidad de la parte no saturada. En el caso en que el material este completamente saturado el ángulo crítico resulta ser de  $23.7^\circ$ , indicando un máximo valor de la inclinación del canal (es obvio que el ángulo no es el mismo dado que la fricción del canal (metálico) con el material es diferente al del material con el propio material).

## DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

En la tabla 1 se muestran los ensayos realizados, en el presente trabajo se mostraran el resultado del análisis de dos de ellos, uno de 20° y otro de 15°.

**Tabla 1** Experimentos realizados

	Inclinación del canal [°]	Material	Volumen muestra (l)	Saturación [%]	Volumen depositado (l)	Fecha
1	20	Grava gris	137	100	n/a	01-12-05
2	20	Grava gris	137	64	41.6	01-12-05
3	20	Grava gris	143	100	n/a	20-12-05
4	20	Grava gris	143	100	n/a	20-12-05
5	15	Grava gris	143	100	n/a	20-12-05
6	15	Grava gris	143	100	32.5	22-12-05
7	10	Grava gris	143	100	103.5	22-12-05

Los ensayos se han preparado cuidadosamente y se realizaron siguiendo siempre el mismo patrón que a continuación se detalla.

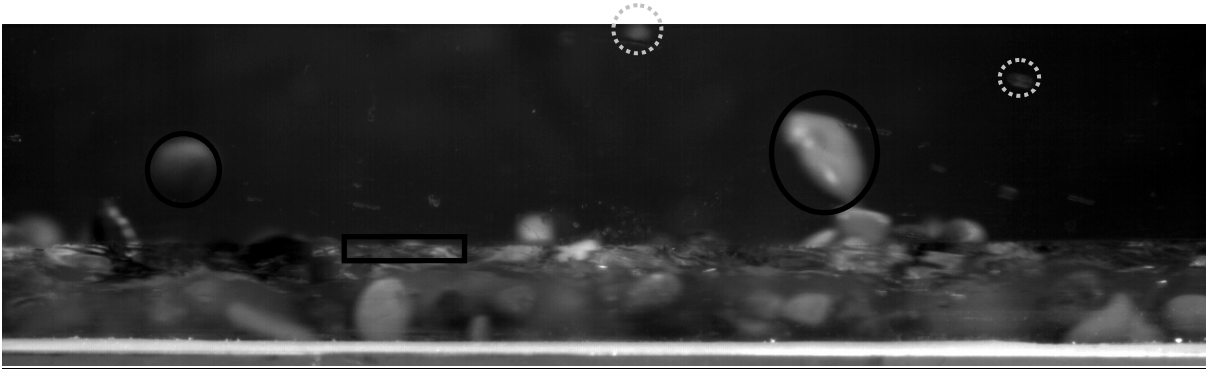
- 1) La compuerta se sitúa en una ranura del canal y las uniones se impermeabilizan. La distancia desde la compuerta hasta el final del canal es de 6.22m. 2) El material seco se coloca detrás de la compuerta y se enrasa hasta obtener una superficie con el ángulo de inclinación del ensayo. De forma que cuando se coloque el canal en posición esta superficie este horizontal. 3) Se sitúa la cámara en su posición final aproximada en la parte de aguas abajo del canal, comenzando a realizar los primeros procesos de toma y calibrado. 4) El canal se eleva con el puente grúa hasta la posición deseada, se asegura y verifica la pendiente. 5) Se limpia la superficie del cristal, se sitúa la cámara paralela la canal y a la altura adecuada, se encienden los focos y se toman las fotos de calibración de la cámara. Se ajusta el foco de la cámara y se mide la posición de la cámara respecto al canal. Se toma nota del centro de la cámara o foco, no debe confundirse con el centro de la foto que se ajusta mediante el software de la cámara. 6) Se satura suavemente el material con agua, justo hasta la proporción deseada, en los casos estudiados siempre saturado, el agua quedo a ras de la superficie del material. 7) La mezcla se libera rápidamente abriendo la compuerta de forma manual. 8) La grabación se activa justo antes de que el frente de material llegue al cuadro de toma de la cámara. Al no haber suficiente memoria RAM es necesario ajustar bien los tiempos de grabación. Se revisa la toma capturada y se guarda en disco duro. Una grabación de 5 a 6 segundos de duración puede ocupar cerca de 4GBytes de memoria.

Los ensayos presentan una gran velocidad que disminuye con la disminución del ángulo del canal. Se aprecia un valor límite de 15° en el que el material queda depositado en la parte alta donde originalmente esta se sitúa el material. Esto indica que este valor esta cerca del valor de fricción entre el material y el fondo de metal. Muy por debajo de los 27.5° evaluados con la ecuación (9) pero esperable pues la ecuación (9) se tiene en cuenta la fricción como si la base fuese el mismo material. Aunque parece que los ensayos de grava sobre metal no son muy reales, existen muchos flujos de material sobre roca limpia. En el que la resistencia por fricción disminuye por debajo del valor del ángulo crítico del contacto material-material. Esta realidad se dio en los flujos detríticos ocurridos en el evento del 10-06-2000 en el monte de Montserrat al sur-este de Barcelona. El primer aspecto de este tipo de flujos es una masa de agua casi limpia que viaja por delante de la mezcla. A medida que pasa el tiempo el flujo incrementa su espesor y su concentración. La dinámica de las partículas de material es intensa, las partículas que viajan en superficie lo hacen más rápidamente que las del fondo, lo que implica la existencia de vorticidad y por tanto de deformación interna del material. Esto sólo ya indica que es un flujo y no un deslizamiento o por lo menos una combinación de ambos. Las partículas rotan, es decir están sometidas a un gradiente de tensiones no nulo en vertical, pero además el choque entre ellas es muy energético tanto que presentan un fenómeno de catapulta, siendo expulsadas del flujo, elevándose varios centímetros por

encima del flujo. Este mecanismo energético hace que el material tienda a comportarse tal como lo describió Bagnold (1954). Que existan fluctuaciones de velocidad, que exista ese intercambio intenso de momentum entre las partículas y por último la presencia de expulsiones por choque indican que el modelo debe ser turbulento y con presencia del fenómeno de dispersión granular. Estos aspectos están bien representados en la ecuación [6] o modelo Voellmy.

## TRATAMIENTO DE LA IMAGEN

La evaluación de los niveles de agua y la distribución de velocidades es lo imprescindible para conocer las características del flujo, suponiendo un flujo en condiciones típicas de flujo unidimensional. Para conseguirlo se utilizaron diferentes técnicas unas desarrolladas dentro del grupo y otras tomadas de paquetes informáticos. Aquí sólo destacaremos las que han dado un resultado más fiable.



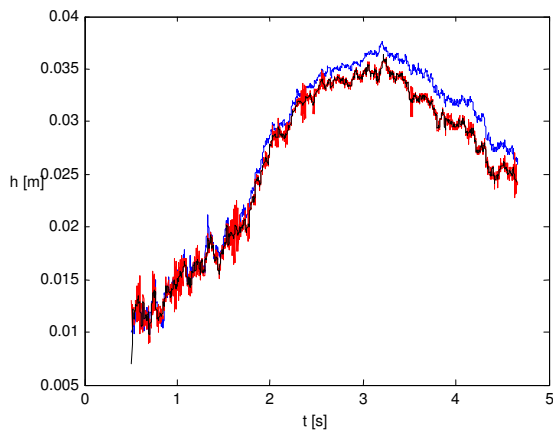
**Figura 7.** Imagen de una toma donde se han encerrado en círculos y cuadrados las partes que deben ser eliminadas mediante un programa informático para poder medir con acierto los niveles de agua. En círculos negros las expulsiones de material fuera del cuerpo del flujo. En círculos grises se indican las gotas de agua adheridas al cristal y por último en la región rectangular la visión proyectada de toda la superficie de agua en el mismo plano que el de la profundidad distorsiona el valor real del nivel.

Medida del nivel de agua. En GITS se ha desarrollado un software en Matlab denominado Técnica de Detección de Superficie (TDS). Este software lo primero que hace es suavizar la imagen para después aplicarle un filtro que facilita la consecución de los resultados. Después detecta el píxel de cada columna que esta dentro de un margen adecuado y previamente escogido (según la luminosidad y características de la fotografía, los puntos así detectados son la transición de aire-agua. De estos puntos detectados se realiza la media y su desviación respecto a la media. Se eliminan los valores que estén muy alejados de la desviación. Con los valores no eliminados se rehace la media y este será el valor del calado medio en ese tramo de canal (el de la foto 7). Aunque esto funciona bastante bien las manchas y partículas catapultadas son un pequeño problema que se solventa utilizando el conocimiento de la posición de la profundidad de agua evaluada en el fotograma anterior. Aunque esto funciona bien las primeras imágenes han de tratarse a de forma manual. Otro problema que se debe solventar son las ondas formadas por el agua en el contacto con el cristal como se observa en la figura 7. Para ello se utiliza la información del espectro de color cerca de la profundidad de agua detectada en el fotograma anterior, aunque es un poco más complejo de implementar pero da buen resultado y corrige el valor de la profundidad a valores más realistas. El resultado de la TDS corregida se puede observar en la figura 8.

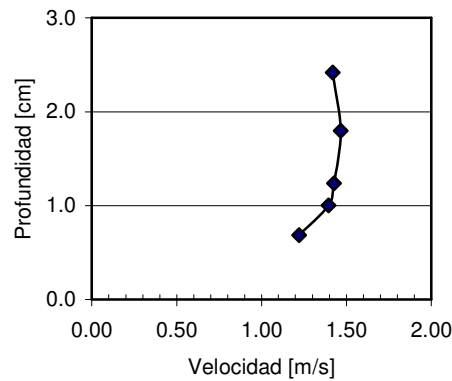
Distribución de velocidad: Para la evaluación de la distribución de velocidad se aplicaron varios métodos hasta encontrar el más adecuado siempre respaldado por todos los resultados obtenidos. 1) se uso un particle tracking o seguimiento de partícula desarrollado dentro de un paquete denominado “Laboratorio Virtual de Difusión y Transporte de Flujos en el Medio Ambiente” desarrollado por GITS, ver resultado de este paquete en la figura 9. Mediante este programa se detectaron de forma manual el nivel de velocidad medio a cada altura en un grupo de imágenes que permitió calibrar modelos más sofisticados. Dentro de GITS igualmente se desarrolló un algoritmo que consiste en la técnica de correlación de un vector (TCV), utilizada también en otros desarrollos informáticos como el Dig Image. . La técnica consiste en realizar la correlación de color de una línea de la imagen y la del siguiente instante. La línea de píxeles de la imagen anterior se traslada 1 píxel cada vez y se calcula la correlación para cada posición. El pico en el vector de correlación indica el desplazamiento más probable que sufre la línea de píxeles. Para ahorrar tiempo, el programa utiliza el resultado de la TDS como entrada de información y evalúa la correlación de todas las líneas que se



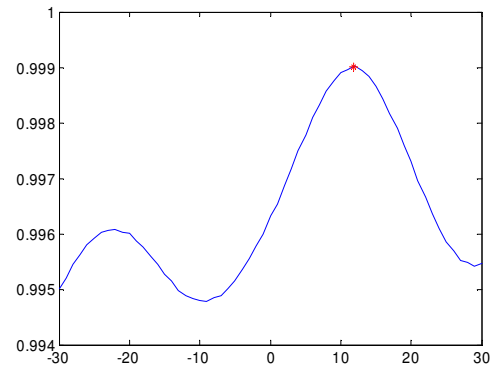
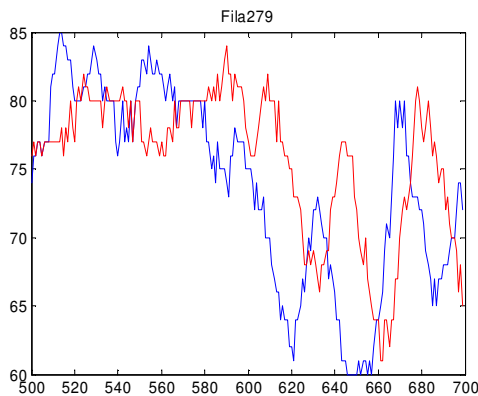
sitúan por debajo de esta línea límite. El proceso de todo un video que consta de cerca 4000 imágenes puede durar del orden de 24 horas, los códigos son en lenguaje Matlab.



**Figura 8.** Limnigrama o niveles del flujo resultado de la aplicación de la TDS a lo largo de un ensayo



**Figura 9.** Resultado de la aplicación del particle tracking a una sección de flujo (promedio de 5 imágenes consecutivas)



**Figura 10.** Resultado de la aplicación del TCV. El máximo de correlación indica el desplazamiento más probable del vector de color de una línea y por tanto el desplazamiento sufrido por la misma en un intervalo de tiempo.

## Resultados

Una vez evaluados los niveles de mezcla y la distribución de velocidades se hace un ajuste por optimización utilizando la formulación de Voellmy, la expresión residual evaluada esta dada por la expresión siguiente [9].

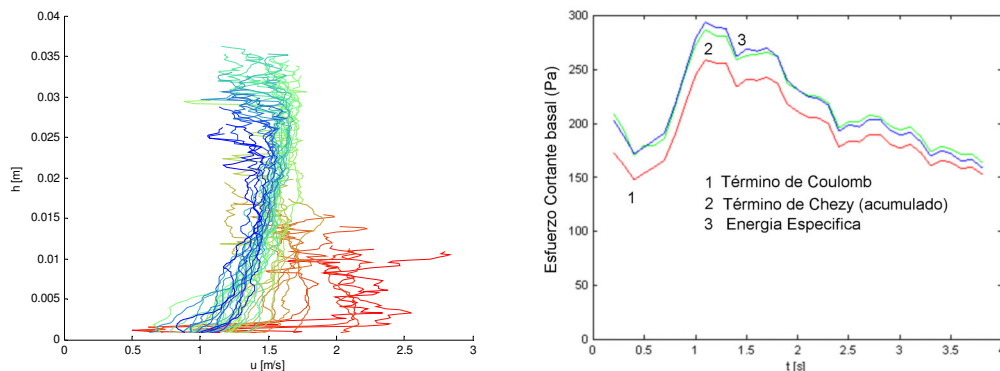
$$r = \tau_b - \rho \cdot g \cdot \cos \theta \cdot \mu \cdot h - \frac{\rho \cdot g}{C^2} \cdot u^2 \quad [9]$$

Donde  $r$  es el residuo entre la tensión medida y la misma evaluada con la formulación de Voellmy. Los valores que deben ser optimizados son  $\mu$  y  $C$ , dados los demás valores. El vector de velocidades en cada instante de tiempo se evalúa mediante la integración de los perfiles de velocidad construidos como se explico en la sección anterior. Las profundidades en cada instante se evalúa mediante el TDS, figura 8. Los demás valores son conocidos. El término más complejo de evaluar es la tensión  $\tau_b$ , para ello se utiliza la expresión  $\tau_b = \rho \cdot g \cdot h \cdot \cos \theta \cdot S_f$ . En dónde  $S_f$  es la pendiente motriz evaluada con la medición de la variación de la energía específica del flujo. La expresión que se debe evaluar es:

$$\frac{dE}{dx} = S_0 - S_f \quad [10]$$

Desde un punto de vista Lagrangiano es posible evaluar la pendiente motriz  $S_f$  dado que se conoce la variación de la energía específica a lo largo del propio cuerpo del flujo en el punto de la fotografía y la pendiente del fondo del canal. Con estos valores se puede determinar la tensión basal

$\tau_b$ . Los valores ajustados del coeficiente de Chezy y Coulomb se muestran en la tabla 2. Donde se comparan los experimentos de 15° y 20°. En la figura 11, se muestran dos de los resultados, el primero el cálculo de las tensión basal y el ajuste de los parámetros de la reología Voellmy y la distribución de velocidades de un fotograma cada 100 ms a lo largo de un de los experimentos. Los primeros instantes presenta velocidades más elevadas y profundidades de flujo bajas.



**Figura 11.** Resultados del experimento 3. A la izquierda se observan las distribuciones de velocidad de todo el cuerpo a distancias de 100 ms., la tensión absorbida por el grano (Coulomb) y la tensión turbulenta. A la derecha las componentes de tensión total basal a lo largo del cuerpo del flujo, visto desde la ventana de la foto.

**Table 2** Comparación de los ensayos por sus características.

Ángulo del canal	$u_m$ [m/s]	$E_{max}$ [m]	$S_{f,m}$ [-]	$\tau_{b,m}$ [Pa]	$\mu$ [-]	$C$ [m <sup>1/2</sup> /s]	$N_{S,m}$ [-]
15°	1.49	0.238	0.257	135	0.25	127	2.12e-5
20°	2.48	0.561	0.333	215	0.30	77	1.64e-5

## CONCLUSIONES.

Los resultados obtenidos han sido satisfactorios. El tratamiento de imagen se presenta como una técnica muy interesante y precisa, sin embargo aún se debe mejorar mucho la técnica experimental para evitar problemáticas inducidas por la propia elaboración de los experimentos. El modelo de Voellmy ha sido bastante coherente con las medidas realizadas, debido a que el fondo del canal es liso prácticamente no hay difusión de momentum hacia el interior del flujo y todas las pérdidas de energía se dan por fricción de grano. El resultado más interesante que arroja las medidas realizadas es que la turbulencia se desarrolló más en el canal a 20° que a 15°, como cabía esperar.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo a sido auspiciado por el proyecto de la CICYT BTE2002-00375.

## REFERENCIAS

- [1] Takahashi, T. (1991): *Debris Flow*. A.A. Balkema, Rotterdam. 165 pp.
- [2] Iverson, R.M. (1997): The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, 35: 245-296.
- [3] Iverson, R.M. & Denlinger, R.P. (2001): Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain: 1. Coulomb mixture theory. *Journal of Geophysical Research*, 106 (B1): 537-552.
- [4] Bagnold, R.A. (1954): Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. *Proceedings of the Royal Society of London*, A 225: 49-63.
- [5] Rickenmann, D. & Koch, T. (1997): Comparison of debris flow modelling approaches. *Proceedings of the 1st International Conference on Debris Flow Hazards Mitigation*, San Francisco. Chen-lung Chen (editors). ASCE, New York: 576-585.
- [6] Rickenmann, D. (1999): Empirical Relationships for Debris Flows. *Natural Hazards*, 19: 47-77.
- [7] García, R., López, J.L., Noya, M., Bello, M.E., Bello, M.T., González, N., Chang, S.Y., Paredes, G., Vivas, M.I., O'Brien, J.S., 2003. Hazard mapping for debris-flow events debris flows and warning road traffic at in the alluvial fans of northern Venezuela bridges susceptible to debris-flow. In: Rickenmann, D., Chen, C. (Editors), 3rd Int. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation. Millpress, Davos, pp. 589-599.
- [8] García Lopéz, Manuel. 1988. Boletín de Vías. Universidad Nacional de Colombia. Sección Manizalez. ISSN 0120-2261. Vol 15 No 65.
- [9] Schatzmann, M. (2005): Rheometry for large particle fluids and debris flows. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*, Nr. 187. ETH Zürich. 192 pp.
- [10] Bezzola, G.R. (2005): Debris flows. *Lecture notes*, Postgraduate studies in hydraulic structures. Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology, ETH Zürich. 30 pp.
- [11] Coussot, P. & Meunier M. (1996): Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Reviews*, 40: 209-227.