

# ESTUDIO DE LOS FLUJOS OCURRIDOS EN EL 2007 EN CHALALA Y COQUENA, PURMAMARCA, PROVINCIA DE JUJUY

Maria Alejandra GONZALEZ<sup>1</sup>, Valérie BAUMANN<sup>1</sup> y Lionel E. JACKSON Jr.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> DGAA. IGRM. SEGEMAR. CABA, Buenos Aires. Email: marigo@mecon.gov.ar, vbauma@mecon.gov.ar

<sup>2</sup> Division, Geological Survey of Canada, Vancouver. Email: lijackso@nrcan.gc.ca

## RESUMEN

En este trabajo se presentan los estudios realizados sobre los flujos de barro ocurridos en la quebrada de Coquena el 7 de marzo de 2007 y en la quebrada de Chalala, el 29 de marzo del mismo año. Estas desembocan en la quebrada de Purmamarca ubicada en la Cordillera Oriental, provincia de Jujuy. Los estudios se focalizaron en la clasificación del tipo de flujo y la cuantificación y calificación de la magnitud de los eventos. La velocidad del movimiento se calculó usando dos métodos cuyos resultados fueron coincidentes. El volumen fue medido directamente en el campo, y la relación entre la descarga total (V) y el caudal pico ( $Q_p$ ), estimada a través de ecuaciones para flujos similares, tomadas de la literatura geotécnica. La máxima producción de material se estimó utilizando el método modificado de la JICA. Según los registros históricos y prehistóricos de los eventos, los abanicos aluviales de las quebradas se ubican en un rango de probabilidad muy alta ( $>1/20$ ) de que se produzcan flujos. Con respecto a la magnitud del flujo de detrito sobre el abanico de Coquena, este pertenece a la clase 5, que corresponde a un volumen mayor que  $10^5$  m<sup>3</sup>. Los datos de velocidad, volumen y frecuencia calculados en este trabajo, son indispensables para el mapeo de peligrosidad, la realización de obras de infraestructura y la planificación territorial.

Palabras clave: *Cálculo de volumen, cálculo de velocidad, Flujo de barro, Flujo de detritos.*

**ABSTRACT:** *Investigation of the 2007 flows from Chalala and Coquena, Purmamarca, Jujuy Province.* This work presents the results of the investigation of mudflows from Quebrada de Coquena of 7 March, 2007 and from Quebrada de Chalala of 29 March of the same year. These stream basins are tributary to the Quebrada de Purmamarca located in the Cordillera Oriental, Jujuy Province, Argentina. The studies focussed on the classification of the type of mass flow type and quantification of the magnitude of these events. Flow velocity was calculated using two different equations. Both methods produced similar results. Flow volume was measured directly in the field. The relationship between the total discharge (V) and the peak flow ( $Q_p$ ) was estimated by using equations for similar flows from the geotechnical literature. Maximum erosional yield was estimated using the JICA method. The probability of large destructive mudflows inundating the fans of these streams is very high ( $>1/20$ ) and their magnitude is class 5: a volume greater than  $10^5$  m<sup>3</sup>. The flow velocity, volume and frequency calculated in this study are valuable for hazard mapping, the creation and placement of infrastructure, and land use planning.

Keywords: *Volume calculation, Velocity calculation, Mud flow, Debris flow.*

## INTRODUCCIÓN

Este trabajo se realizó en el marco del Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas (PMA: GCA) para el proyecto piloto "Estudio de los procesos geológicos aplicados al ordenamiento territorial de las quebradas de Coquena y Chalala". La elección del área de estudio se hizo luego de un proceso de trabajo con las Comisiones de Sitio de los nueve pueblos de la quebrada de Humahuaca a través de la Unidad de Gestión de la Quebrada de Humahuaca, de la Secretaría de Turismo Provincial. Los pobladores presentaron sus inquietudes, las cua-

les se analizaron desde la óptica de los aportes de las geociencias a fin de obtener mejores soluciones a las mismas. La región presenta una dinámica geológica muy activa que responde al comportamiento actual de la cuenca del río Grande. Los flujos son procesos característicos en las subcuencas de diferentes órdenes, desencadenados por las intensas lluvias estivales.

Para el estudio de caso se eligieron las quebradas de Coquena y Chalala, ya que sobre el abanico aluvial de la quebrada de esta última se instaló en el 2003, un barrio de 50 casas. Los habitantes de la comunidad aborígen Chalala tenían inconvenientes en conseguir la tenencia de las tierras,

así como los servicios de agua y electricidad por ocupar un terreno con probabilidad de daños por flujos, y la preocupación de convivir con el peligro. En este caso, para tomar medidas de mitigación de daños, y para realizar una planificación territorial, era indispensable conocer la composición, el volumen, la velocidad de los flujos densos que ocurren en las mencionadas quebradas. En esta primera etapa de estudio se realizaron mediciones directas de dos flujos ocurridos en marzo de 2007. Conjuntamente se realizaron observaciones estratigráficas y morfológicas, que complementadas con dataciones aportaron al estudio integral de los flujos

densos. Este conocimiento será aplicado al plan de ordenamiento territorial y la generación de un plan de emergencias.

## GEOLOGÍA REGIONAL

Las quebradas de Chalala y Coquena son tributarias de la cuenca hidrográfica de la quebrada del río Purmamarca, que a su vez desemboca en la del río Grande, integrando la quebrada de Humahuaca (Fig. 1). En su conjunto, este es un relieve controlado por la estructura que corresponde a la faja plegada y corrida de la Cordillera Oriental, en el centro de la provincia de Jujuy. La cuenca hidrográfica de Purmamarca está ubicada en la lámina cuyo frente de cabalgamiento se sitúa aproximadamente en el actual curso del río Grande (Rodríguez *et al.* 1998).

En las quebradas afloran rocas sedimentarias de diferentes edades. La sucesión estratigráfica comienza con grauvacas y pelitas leptometamórficas intercaladas con pizarras neoproterozoicas de la Formación Puncoviscana. Están afectadas por pliegues apretados con clivaje de plano axial producto de la fase tildárica ocurrida en el Cámbrico inferior (Rodríguez *et al.* 1998). Estas secuencias afloran en el sector distal y en la cabecera de las subcuencas. Allí, en discordancia angular se apoyan cuarcitas y areniscas silíceas de tonos rosados dispuestas en bancos potentes, intercalados por pequeños bancos de pelitas verdes y moradas. En conjunto corresponden a sedimentos marinos del Grupo Mesón de edad cámbrica.

En el sector medio de las quebradas en contacto erosivo con estos depósitos, afloran rocas ordovícicas. Al este se encuentran en contacto tectónico con las rocas de la Formación Puncoviscana, producto de la tectónica paleozoica. Presentan gran variedad litológica y están representadas por las Formaciones Padrioc, Lampazar, Cardonal, Saladillo, Acoite y Sepultura (Malanca 1973). Las rocas preponderantes son areniscas y cuarcitas blanquecinas, pelitas gris verdosas oscuras intercaladas con areniscas grisáceas, areniscas micáceas intercaladas con pelitas negras y bancos

calcáreos y sucesiones de areniscas amarillento-verdosas con lutitas oscuras y claras. En sucesión cronológica afloran en la desembocadura de la quebrada de Chalala, areniscas blanco amarillentas de la Formación Lecho juntamente a calizas de la Formación Yacoraite. Estos depósitos sellan las estructuras extensionales del rift cretácico. En contacto tectónico por sobre la Formación Puncoviscana se observan areniscas y arcilitas rojas con venas de yeso, que representan las Formaciones Lumbrera y Casa Grande (Seggiaro en preparación). Estos depósitos fluviales del Paleógeno corresponden a la compresión orogénica andina.

En discordancia sobre distintas unidades apoyan sedimentos neógenos pertenecientes a la Formación Purmamarca constituido por un conglomerado de clastos mayoritariamente de rocas neoproterozoicas y cretácicas (Martín-Serrano y Tchilinguirian 1998). Estos, representan antiguos relleños de valle por coalescencia de abanicos aluviales producto de flujos densos y caídas por regularización de las pendientes. Los sedimentos actuales está representados por depósitos coluviales o taludes de detritos conformados por bloques de diferentes tamaños, clastos angulosos y arenas gruesas, que se observan sobre las laderas; depósitos fluviales constituidos por cantos rodados y arenas, en las planicies de los arroyos y depósitos aluviales constituidos por clastos angulosos en una matriz fina, provenientes de los diferentes flujos y depositados en las desembocaduras de los tributarios y sobre los grandes abanicos.

## MORFOMETRÍA DE LA SUBCUENCAS DE COQUENA Y CHALALA

Las cabeceras de las quebradas están ubicadas en la sierra de la Cárcel y desembocan en la margen derecha de la quebrada del río Purmamarca (Fig. 2). Presentan un drenaje dendrítico con cursos de régimen efímero.

En el cuadro 1 se encuentran resumidos los parámetros morfométricos medidos en las

cuenas sobre el modelo digital de terreno, los cuales se utilizaron para realizar estimaciones y correlaciones.

Las pendientes de ambas cuencas decrecen progresivamente desde las cabeceras hasta su desembocadura, lo que le confiere al perfil una curva cóncava. Este rasgo indica un perfil cercano al equilibrio (Fig. 3). La respuesta hidrológica de las cuencas es similar ya que sus formas son semejantes. Para caracterizarlas se calculó el índice de Gravelius ( $K_g$ ) o coeficiente de compacidad y el factor de forma ( $K_f$ ) y la Relación de elongación ( $Re_{long}$ ) (Cuadro 1). Estos indican que ambas cuencas son alargadas, que el caudal máximo disminuye en su recorrido.

La rugosidad de la cuenca ( $R_d$ ) vincula la densidad de drenaje con el relieve. Cuenas muy disectadas con bajo relieve presentan un índice de rugosidad similar a cuencas moderadamente disectadas y con alto relieve (Patton 1988).

A partir de datos morfométricos, algunos investigadores analizaron los procesos actuantes en las cuencas. D'Agostino (1996) en los Alpes Italianos, Marchi y Brochot (2000) en los Alpes franceses y De Scally y Owens (2004) en Nueva Zelanda, analizaron la relación entre las diferencias de alturas (número de Melton) con las pendientes de los abanicos y discriminaron entre abanicos producto de inundación de detritos y abanicos productos flujos densos. Sobre estos gráficos, se plotearon los valores de las dos cuencas de estudio y se observó que a pesar de las diferencias regionales, las quebradas integran el rango de los conos de flujos y conos mixtos.

## FLUJOS DEL 7 Y DEL 29 DE MARZO DEL 2007

El 7 de marzo a las 5 de la mañana se produjo un flujo de detritos que alcanzó la parte distal del abanico aluvial de la quebrada de Coquena y siguió hasta su desembocadura en el río Purmamarca. El mismo se desencadenó en una subcuenca ubicada en el sector norte (Fig. 2) como consecuencia de una tormenta de lluvia y granizo que había empezado una hora an-

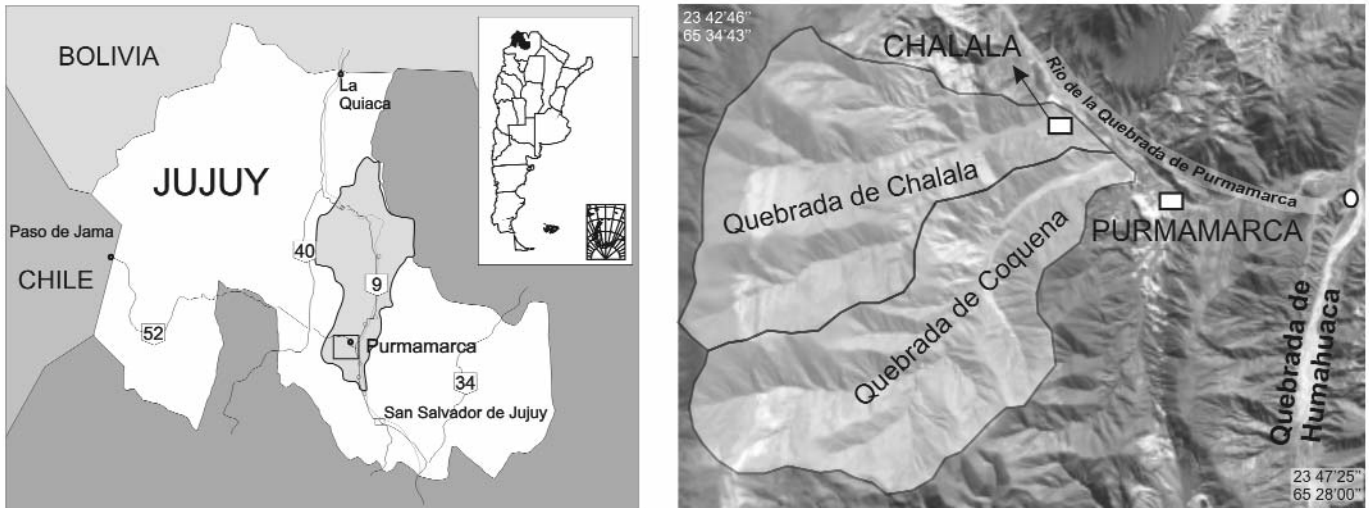


Figura 1: Ubicación del área de estudio.



Figura 2: Vista en tres dimensiones de las cuencas de Chalala y Coquena. Las flechas blancas indican los puntos desde donde comenzaron los flujos.

tes en las cabeceras de la quebrada. El flujo que llegó hasta el río Purmamarca, cruzó por debajo del puente de la ruta nacional 56 y tapó casi por completo la luz del mismo (Fig. 16b). Un habitante de la quebrada se encontraba saliendo de su casa, ubicada en la parte baja del abanico a 150 m del puente cuando pasó el flujo. Según su testimonio el flujo tenía una velocidad como la de una bicicleta (al menos 5 o 6 m/s) y tardó 10 minutos en pasar, por lo que se puede estimar una velocidad entre 4 a

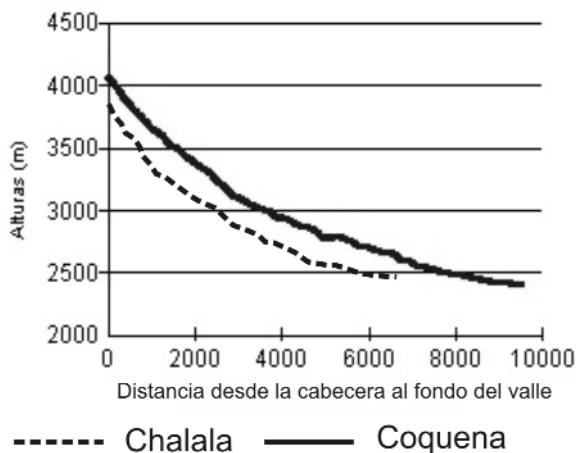
7 m/s.

El flujo de detritos del 29 de marzo provino de la parte alta de dos subcuencas de la quebrada de Chalala (Fig. 2) y llegó a la parte baja del abanico en frente al pueblo de Chalala, a las 20:30 horas (com. pers.). Según datos aportados por un poblador que vive en un puesto cerca de la cabecera de la quebrada de Chalala, la tormenta empezó con la caída de granizo y luego llovió fuertemente durante aproximadamente 40 minutos (20:00 a 20:40 horas).

El flujo provino principalmente de las quebradas de Agualandre y Lajayaco (Fig. 3) y al llegar al ápice del abanico, en la desembocadura de las tres quebradas, depositó parte del material y luego se encauzó sobre la margen sur de la quebrada. En su trayecto erosionó y cortó el camino vecinal que lleva a los puestos ubicados en el ápice del abanico. Al llegar a su parte media cerca del pueblo, corrió por el canal ocupando todo su ancho (20 m) y su altura era de 2 metros (com. pers.). Luego

**CUADRO 1:** Parámetros que definen las características morfométricas de las cuencas.

Parámetros	Medición	CHALALA	COQUENA
Superficie = A	ArcGis 9	19,6 km <sup>2</sup>	19,4 km <sup>2</sup>
Perímetro = P	ArcGis 9	21,57 km	22,20 km
Cota mínima = alt <sub>min</sub>	ArcGis 9	1721m	1621m
Cota máxima = alt <sub>max</sub>	ArcGis 9	4178m	4087m
Cota media	ArcGis 9	2901m	2901m
Pendiente media	Benson 1959	21°	19,5°
Exposición media	ArcGis 9	N-S	N-S
Longitud total de todos los cauces de agua = L <sub>1</sub>	ArcGis 9	54,8 km	64,02 km
Longitud total del cauce principal = L <sub>2</sub>	ArcGis 9	8244 m	10035 m
Largo de la cuenca = L <sub>3</sub>	ArcGis 9	6,514 km	8,353 km
Densidad de red de drenaje = Dd	Dd = L <sub>1</sub> /A	2,8 km /km <sup>2</sup>	3,3 km/km <sup>2</sup>
Índice de Melton = D <sub>s</sub>	$D_s = \frac{alt_{max} - alt_{min}}{\sqrt{A}}$	0,555	0,559
Índice de Gravelius = K <sub>g</sub>	$K_g = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	1,5	1,32
Factor de Forma de Horton = K <sub>f</sub>	$K_f = A/L_2^2$	0,35	0,26
Relacion de elongación = R <sub>elong</sub>	$R_{elong} = \frac{2 / L_3}{A / \pi}$	0,20	0,16
Rugosidad de la cuenca = Rd	Rd = Dd (alt <sub>max</sub> - alt <sub>min</sub> )	6,88	8,14

**Figura 3:** Perfil longitudinal de las quebradas de Coquena y Chalala realizado a partir del modelo de elevación digital con el programa ArcGis9.

cruzó la ruta y llegó hasta el río Purmarca donde chocó contra la orilla sin llegar a represar el cauce.

Posteriormente siguió lloviendo con menor intensidad hasta las 2 de la mañana y corrió agua que se llevó parte del depósito que había dejado el flujo.

## FACTORES CONDICIONANTES Y DESENCADENANTES

Los flujos densos son los procesos geológicos de mayor magnitud en el ámbito de la quebrada de Humahuaca (Chayle y Agüero 1987, Solís *et al.* 2004, González *et al.* 2008). Los factores condicionantes preponderantes son el relieve, la litología

y el clima, y el factor desencadenante es la lluvia torrencial.

El relieve, producto principalmente de la compresión tectónica andina, presenta elevaciones cercanas a los 4.000 m, con desniveles de 2.400 metros en pocos kilómetros (Cuadro 1).

La litología presente es muy susceptible a ser erodada y transportada fundamentalmente por el agua de lluvia. Los macizos rocosos con matriz rocosa más resistente como las cuarcitas cámbricas u ordovícicas presentan discontinuidades tectónicas y sedimentarias separadas a moderadamente juntas (ISRM 1978), que dividen bloques heterométricos. Algunas de las discontinuidades además presentan orienta-

ciones semejantes a las laderas, favoreciendo el desprendimiento de los bloques. Estos macizos además presentan intercalaciones de macizos rocosos blandos como las pelitas verdes y moradas intercaladas en las areniscas cámbricas, o las pelitas y bancos calcáreos intercalados en las areniscas ordovícicas. Esta variable favorece la erosión diferencial y la desestabilización de los bloques resistentes. Sobre algunos tramos donde los cursos atraviesan los bancos más resistentes se forman saltos o cascadas que pueden actuar como retardadores del flujo (Fig. 4). Afloran también otros macizos rocosos de alta resistencia, afectados por gran número de familias de discontinuidades con espaciado junto a extremadamente junto (ISRM 1978) que dan lugar a bloques tabulares pequeños. Estos macizos están representados generalmente por areniscas, pelitas y pizarras y generan el material detrítico de los taludes y abanicos aluviales, muy susceptibles a ser transportados. Las unidades superficiales son poco consolidadas y están constituidas principalmente por niveles de clastos angulosos heterométricos con o sin matriz arenosa o arena limosa, intercalados con niveles arenosos. En su conjunto son deleznable y permeables favoreciendo el aumento de la presión de poros que es generalmente

la causa del arranque del material que se moviliza como flujo.

El clima de la región es árido subtropical modificado por la altura. Presenta una gran amplitud térmica estacional y diaria que favorece la disgregación mecánica de las rocas. Los veranos registran precipitaciones inferiores a 200 mm anuales y los inviernos son muy secos. Esta condición es muy importante ya que generalmente luego de meses muy secos, las lluvias torrenciales estivales arrancan el detrito suelto de los taludes con gran facilidad. El viento participa en la movilización de material fino, sobre todo en los meses de otoño invierno cuando ocurre el llamado "viento norte". Es seco, cálido y, al provenir de grandes alturas, pierde su humedad por condensación y al descender adiabáticamente, se calienta y adquiere velocidad arrastrando partículas finas.

Las precipitaciones torrenciales estivales son las desencadenantes principales de los flujos de las quebradas. De acuerdo a registros históricos (González *et al.* 2008), los eventos de mayor magnitud en la región se generaron luego de lluvias torrenciales nocturnas fundamentalmente en las cabeceras de las cuencas, las que frecuentemente comienzan con tormenta de granizo.

## MÉTODOS UTILIZADOS

Para el estudio de los flujos se realizaron dos campañas posteriores a los eventos, en las que se efectuaron mediciones directas y toma de muestras.

Los parámetros morfométricos de las cuencas fueron obtenidos a partir del modelo digital de terreno realizado sobre una imagen satelital de alta resolución IKONOS (junio 2006).

Las muestras de los depósitos de flujos fueron analizadas en el laboratorio del INTEMIN de Córdoba, donde se obtuvieron los parámetros geomecánicos y la granulometría hasta tamaño arena y en el INTEMIN de Migueletes, donde se realizó la granulometría de la fracción limo arcilla con sedigraph. Además, la Dirección Provincial de Vialidad analizó dos muestras para determinar el índice de plasticidad.



**Figura 4:** Saltos o cascadas que podrían actuar como retardadores de los flujos. Obsérvese la dimensión de la altura y el angostamiento de los saltos comparada con la estatura de una persona señalada con el óvalo.

dad. Las dataciones de radiocarbono se analizaron en *Beta Analytic Radiocarbon Dating Laboratory* (Florida, Estados Unidos), en el marco del proyecto PMA:GCA.

Las mediciones de campo se realizaron a partir de la subdivisión de la longitud del área de acumulación en estaciones de entre 50 y 100 metros de largo, desde el lóbulo distal del flujo en la planicie de inundación de la quebrada del río Purmamarca. Se midieron en cada estación, el espesor, el ancho, la longitud y la inclinación de cada tramo.

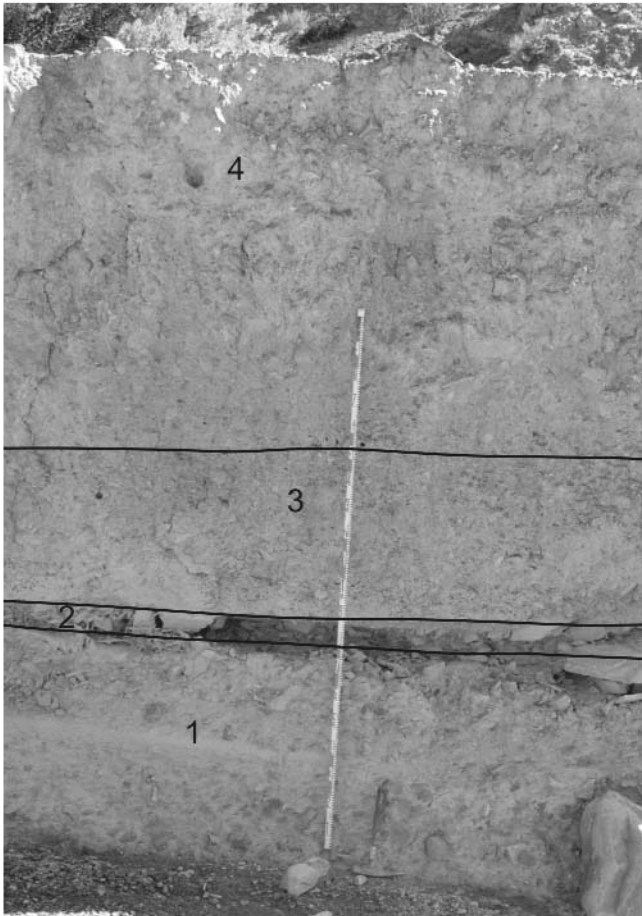
## CARACTERÍSTICA GEOME-CÁNICA Y REOLÓGICA DEL DEPÓSITO DE LOS FLUJOS DENSOS ANALIZADOS

La caracterización del depósito de los flujos se realizó a través de descripciones de campo y análisis sobre muestras de los depósitos recientes, así como de los cuaternarios más antiguos. En la parte apical del abanico aluvial de Chalala se descri-

bió un perfil sedimentario que ha sido expuesto por la profundización del cauce (Fig. 5). De base a techo de la secuencia comienza con 80 centímetros de un depósito de flujo de detritos, conformado por bloques caóticos inmersos en una matriz arenosa (1). Luego, continúan 10 centímetros de depósitos fluviales (2) seguidos de 70 centímetros de material de un nuevo flujo de detritos con matriz morada que denota mayor participación de rocas cámbricas (3). Finalmente sobre una discontinuidad se depositaron 140 centímetros de un gran evento de flujo con matriz amarillenta que muestra un mayor aporte de rocas ordovícicas.

La muestra de la matriz (M36, Cuadro 2) tomada en el perfil a los 230 cm medidos desde la base, corresponde a una arena arcillosa (SC) con un límite líquido de 21,9%, un límite plástico de 14,5% y un índice de plasticidad de 7,4%.

Se estima que este depósito corresponde al flujo de 1957. Según testimonios de pobladores, el material de ese flujo provino



**Figura 5:** Perfil del depósito de un flujo histórico sobre el abanico de Chalala.

**CUADRO 2:** Resumen de los datos de textura clasificadas por el SUCS y de los límites de Atterberg de las muestras de los flujos. (LL: Límite Líquido; LP: Límite Plástico; IP: Índice de Plasticidad).

Muestra	Abanico	Evento	USC	LL (%)	LP (%)	IP (%)
36	Chalala	1957 ?	SC	21.9	14.5	7.4
38	Coquena	Marzo 2007	SM-SC	23.7	18.8	4.9
39	Chalala	Marzo 2007	GP-GM	26.3	21.5	5.2
40	Chalala	Marzo 2007	Sin dato	24.5	16.4	8.1

de las quebradas de Agualandre y Chalala y, en la intersección de las tres quebradas alcanzó hasta 4 ó 5 metros de altura.

En la superficie del depósito se encuentran grandes bloques como el de la Fig. 6 que es una ortocuarcita de 4,5 m<sup>3</sup>. Para que se puedan transportar bloques de estas dimensiones, el flujo debe ser potente y con granulometría fina.

En el caso del evento ocurrido el 07/03/07 en la quebrada de Coquena, se tomó una muestra (M38, cuadro 2) cuatro días después. El material al ser removido conservaba aún gran cantidad de agua. Meses después, cuando la Dirección de Vialidad

estaba limpiando la luz del puente que cruza la ruta nacional 56 sobre la salida del arroyo Coquena, se pudo observar el perfil del depósito que quedó atrapado bajo el mismo. Presenta en la base un conglomerado clasto sostén, aumentando la cantidad de matriz hacia el techo (Fig. 7). En la quebrada de Chalala para el evento del 29/03/07, se tomaron dos muestras de gravas pobremente gradadas y gravas limosas (Cuadro 2).

La textura del material entre otras dimensiones, da idea del comportamiento de otras variables como el esfuerzo cortante, la tensión de fluencia y la viscosidad.

Estudios en laboratorio realizados por Aguirre-Pe *et al.* (2005) con diferentes mezclas de arena y arcilla saturadas en agua, concluyen que el esfuerzo cortante varía considerablemente con el contenido de arena (>contenido de arena, <esfuerzo cortante), y la tensión de fluencia es inversamente proporcional al contenido de arena. También observaron que la viscosidad es una función decreciente del contenido de arena. Considerando estas observaciones modelizadas en laboratorio, para el material de los flujos de estudio donde el material es más arenoso, tendríamos una disminución del esfuerzo cortante y de la tensión de fluencia, que son los parámetros a vencer para que el material se ponga en movimiento y fluya.

Los modelos reológicos son de gran interés para dimensionar el comportamiento de los flujos. La ausencia de datos básicos necesarios más la dificultad de definirlos, complica el uso de estas herramientas en la mayoría de los casos, por lo que debe recurrirse al empirismo (Brea *et al.* 2005). Por lo tanto, el comportamiento reológico de los flujos estudiados se analizó a través de la correlación con la granulometría (Bonnet-Staud 1998, Bardou 2002) y con la forma del depósito (Ancey 1999).

Una herramienta simple y muy útil para el diagnóstico de los flujos es el estudio de la fracción fina a partir de 20 mm, ya que el comportamiento reológico está condicionado por la matriz que lubrica los clastos más grandes (Ancey 2001). Para la zona de estudio se plotearon los porcentajes acumulados de las granulometrías de tamaño sábulo (20 mm) a arcillas y se obtuvieron las curvas para cada muestra. En la Fig. 8 se observa la relación de la granulometría con el umbral propuesto por Bonnet-Staub (1998) para discriminar el comportamiento reológico en flujos de los Alpes y la ubicación en las zonas definidas por Bardou (2002), en la misma región. Se puede observar que dos muestras están en el área del comportamiento viscoplástico (M36) y viscoplástico y friccional viscoso (M38), mientras que la muestra M39 tendría un comportamiento friccional colisional correspondiente al transpor-

te fluvial. Una de las explicaciones por las cuales esta última muestra (M39) no es representativa de los depósitos de flujo es que tiene escaso material fino. Probablemente este haya sido removido por el posterior paso del agua que corrió por el cauce, sitio donde fue tomada la muestra. Ancey (1999) realizó una clasificación de flujos relacionando la forma y la pendiente de los depósitos con el modelo reológico al que responden y una aproximación a la granulometría de la matriz preponderante. En esa clasificación (Cuadro 3) los flujos de Coqueta y Chalala corresponden a flujos friccional viscoso (Fig. 9).

## CÁLCULO DE LA VELOCIDAD

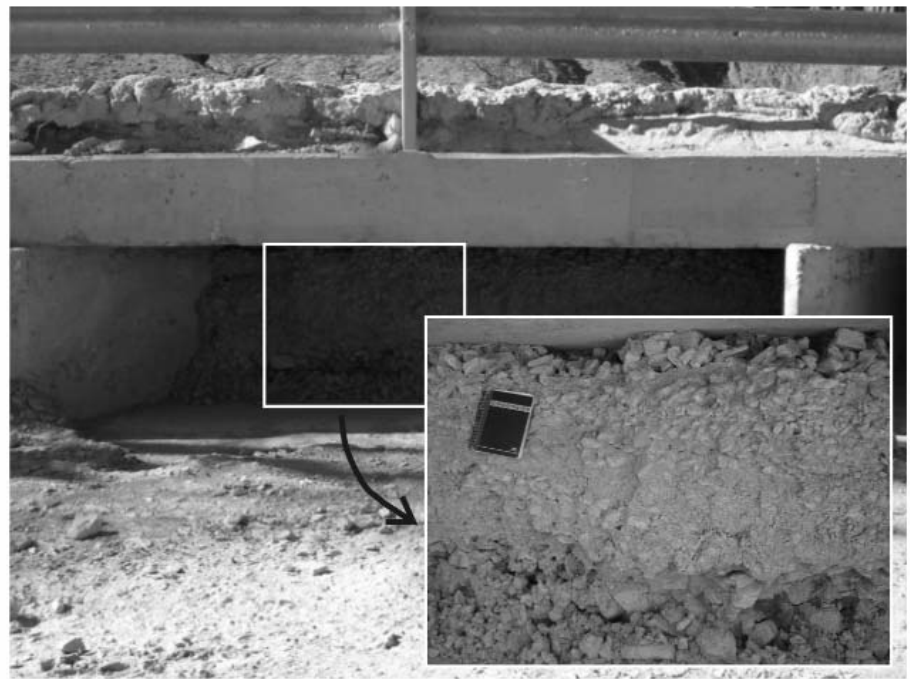
La velocidad es una de las variables necesarias para caracterizar el flujo y calcular esfuerzos de impactos. La falta de instrumental de medición directa de la velocidad (en el momento de la ocurrencia del movimiento) motiva la utilización de ecuaciones que relacionan magnitudes fácilmente medibles en el campo, que responden a estimaciones empíricas. Estos cálculos se realizaron en determinados puntos del cauce de la quebrada de Coqueta, y se utilizaron para la representación general. La ecuación de Hungr (1984), que realizó a partir de la ecuación de Chow (1959), se aplicó en los tramos donde el cauce presenta curvas cerradas en las cuales el material del flujo se sobrelevó sobre la margen externa y los albardones (*levée*) están bien conservados. Para ello se midieron, en esos puntos, las secciones transversales del canal, diferencias de alturas, anchos del depósito y radios de curvatura (Fig. 10).

Otro cálculo se realizó en los sectores del cauce donde el material del flujo sobrepasó alguna elevación del terreno (Fig. 11). En estos, la velocidad se calculó a partir de la ecuación de Chow (1959).

En la estación 50 donde la curva del cauce es muy cerrada, el área de la sección se midió 10 m aguas arriba. Se asumió una sección rectangular de 20 m de ancho y profundidad de 2 m (estación 50-1 y 50-3) y 3,1 m (estación 50-2 y 50-4). La dife-



**Figura 6:** Bloque de 1,2 m x 3 m x 1,3 m, transportado probablemente por el flujo de 1957.



**Figura 7:** Perfil debajo del puente de la ruta nacional 56 sobre la quebrada de Coqueta. Foto tomada en junio de 2007.




rencia de profundidad corresponde a diferentes propuestas de escenarios con diferentes valores de espesor del flujo. El límite inferior (2m) corresponde al espesor del relleno suficiente para cubrir el lecho rocoso y señaladas con marcas de barro. El relleno de un depósito antiguo observado en exposición lateral fue estimado con 1,5 m de espesor y 1,6 m por encima de éste se observó el límite del evento del 7 de Marzo, por lo que se consideró

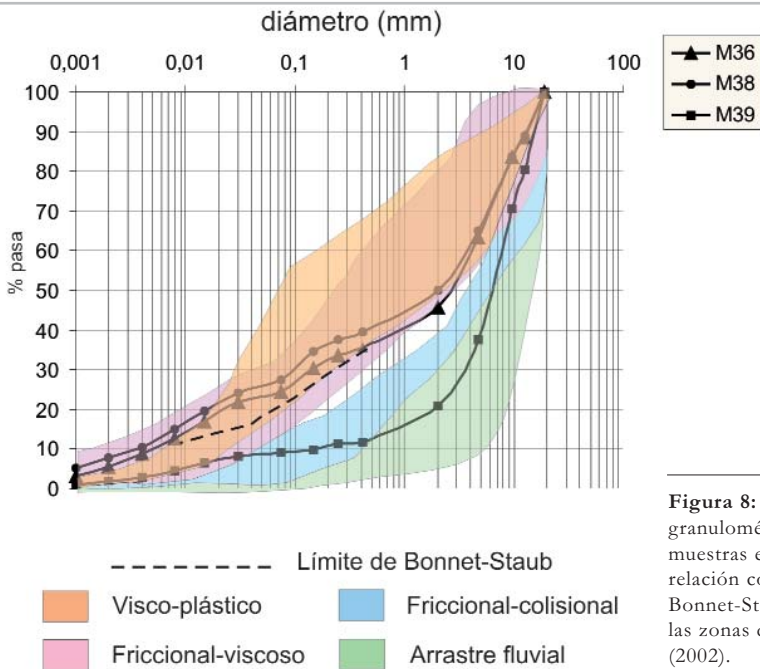
un espesor máximo de 3,1 metros. Además se asumieron dos  $\Delta h$  para un escenario de máxima (4,1 m) y uno de mínima (3,4 m) de acuerdo a diferentes marcas de barro medidas.

## CÁLCULO DEL VOLUMEN

Para la estimación de los volúmenes de materiales movilizados se realizaron mediciones directas y estimaciones del volu-

**CUADRO 3:** Clasificación reológica de los flujos en Bardou (2002), adaptada de Ancey (1999).

Nombre común	barrosa	granular	fluida
Nombre científico	Viscoplástico	Friccional colisional	Friccional viscoso
Formas de depósitos (Observaciones de campo)	Regulares con límites bien definidos, muy cohesivos cuando están secos.	Caóticos sin límites definidos, poco cohesivos cuando están secos.	Terrazas de aluvio, muy cohesivos cuando están secos.
			
Pendiente de reposo	>2°	>10°	¿1°
Modelo reológico	Herschel - Bulkeley Bingham	Coulomb	Coulomb a V - Newtoniano a V++
Granulometría	Arena++ Matriz fina ++ Arcilla-	Arena++ Matriz fina- Arcilla +	Arena-/+ Matriz fina++ Arcilla--



**Figura 8:** Distribución granulométrica de las muestras estudiadas en relación con el límite Bonnet-Staub (1998) y las zonas de Bardou (2002).

men máximo probable. Estas últimas se obtuvieron por medio de la relación entre la descarga total (V) y el caudal pico (Qp) y la relación de producción de material por unidad de área de cuenca. Las mediciones directas de campo arrojaron, para el flujo del 07/03/07 en Coquena un volumen mínimo de  $1,1 \times 10^5 \text{ m}^3$  y un máximo de  $1,5 \times 10^5 \text{ m}^3$  y de,  $1,6 \times 10^4 \text{ m}^3$  para el flujo del 29/03/07 en Chalala. Este cálculo se comparó con el volumen máximo probable obtenido a partir de dos métodos diferentes. El primer método utilizado se basa en la relación entre el

volumen o la descarga total (V) y el caudal pico (Qp). El Qp es aquel que atraviesa el área máxima de la sección transversal del canal ( $\text{m}^2$ ) con la velocidad máxima. Rickenmann (1999) y Jakob (2005) realizaron una compilación de esta relación para flujos de detritos no cohesivos y flujos de barro muy viscosos, en diferentes regiones geográficas, lo que permitió obtener una relación empírica que se expresa en la ecuación  $V = c Q_p^n$ , donde V= volumen, Qp = caudal pico y,

c y n son constantes. En el cuadro 5, se comparan los valores calculados de volumen total proveniente de la quebrada de Coquena, con las estimaciones realizadas a partir de dos ecuaciones utilizadas para flujos de detrito muy fluidos en Columbia Británica (Bovis y Jakob 1999) y en Japón (Mizuyama *et al.* 1992). Los valores estimados a partir de Bovis y Jakob (1999) son más cercanos a los obtenidos por las mediciones directas de campo. Esta relación, que responde mejor a nuestras condiciones, se volvió a aplicar con otras estimaciones de Qp para las dos quebradas. Se consideraron las áreas de la sección transversal determinadas por los albardones de los mayores depósitos de flujos y se asumió una velocidad media de 8,35 m/s, obtenida en la estación 50 (Coquena). La pendiente y las dimensiones del canal son semejantes a la subcuenca de Lajayaco por lo que se consideró la misma velocidad (Cuadro 6). Para la quebrada de Coquena, el área de la sección transversal se midió en la estación 50. Para la quebrada de Chalala se midió para la subcuenca de Lajayaco que es desde la cual provino parte del material que formó el flujo en esa oportunidad. La descarga pico fue calculada multiplicando la velocidad por el área de la sección transversal del canal ubicada inmediatamente aguas arriba de la curva del canal donde fue medida la superelevación. Cuando el flujo se sobreeleva a través de la curva, la concavidad se hace más pronunciada. Consecuentemente el área de la sección del canal reconstruida en la curva del canal es imprecisa (Jakob 2005, com. pers. 2007). Para la cuenca de Chalala se realizó una estimación proporcional al área de las otras dos subcuencas (Agualandre y Chalala), para arribar a un volumen total en el caso de que el material del flujo fuera aportado por todas las subcuencas. El segundo método (Fidel *et al.* 2006) es una modificación realizada al método de la JICA (1988). Consiste en estimar el volumen total a partir de la producción de material por unidad de área de la cuenca





**Figura 9:** Forma del depósito del flujo donde se observan los límites bien definidos y la cohesión firme en seco, en el tramo de depositación sobre el abanico.

(Cuadro 7). En el método de la JICA, los valores obtenidos fueron multiplicados por un coeficiente de corrección que no se usó y que depende de la cobertura vegetal y un factor de incertidumbre de 1,2. La subcuenca superior norte de Coquena tiene una superficie de 5,6 km<sup>2</sup>. Dividiendo este área por el máximo y el mínimo volumen total (1,5 m<sup>3</sup> y 1,1m<sup>3</sup>) estimado para el evento del 7 de marzo, se obtuvo el máximo (2,7 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>) y el mínimo (2,0 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>) volumen por unidad de cuenca. En el cuadro 7 se expresan los valores obtenidos para la cuenca total.

### CRONOLOGÍA DE LOS FLUJOS EN EL ÁREA

Para el análisis de la recurrencia de los eventos de flujos en la zona de estudio se realizaron observaciones estratigráficas, morfológicas, dataciones y recopilación de información de los pobladores y los periódicos locales.

Los eventos prehistóricos en la quebrada de Chalala se analizaron en las quebradas tributarias de Agualandre y Lajayaco a partir del estudio de los albardones (*levee*). Estos depósitos de antiguos flujos se conservan en algunos de los laterales de los cauces. Sobre estos materiales crecieron cardones (*Echinopsis atacamensis*) que adquieren hasta 5 metros de altura (Fig. 12 a). Considerando la tasa de crecimiento de esta especie entre 2 y 3 centímetros por año (Lucy Vilte, cultivadora lugareña, com. pers.), la edad de los depósitos superaría los 200 a 300 años vida de las plantas. En la quebrada tributaria de Chalala, además del

**CUADRO 4:** Velocidades estimadas según las ecuaciones de Hungr (1984) y de Chow (1959) y caudales máximos a partir de datos tomados en la quebrada de Coquena. Donde v = velocidad del flujo; Δh = diferencia de altura del depósito entre dentro y fuera del canal; g = aceleración de la gravedad; r = radio del círculo de curvatura aproximada a la curva del canal; b = ancho del flujo de detritos a través de la superelevación (derrame) y j = constante que se asumió como 1.

Estación	Δh (m)	b (m)	r (m)	v (m/s)	Área de la sección (m <sup>2</sup> )	MaxQ (m <sup>3</sup> /s)
Ecuación de Hungr (1984)						
$v = ((\Delta h \cdot r \cdot g \cdot j) / b)^{0.5}$						
50-1	3.4	14	25	7.7	62	477
50-2	3.4	14	25	7.7	40	308
50-3	4.1	14	25	8.5	62	527
50-4	4.1	14	25	8.5	40	340
Ecuación de Chow (1959)						
$v = (2 g \Delta h)^{0.5}$						
50-5	3.4			8.2	62	508
50-6	3.4			8.2	40	328
50-7	4.1			9	62	588
50-8	4.1			9	40	360
37-1	1			4.4	-	-
17-1	0,66			3.6	-	-
17-2	1			4.2		
Observaciones de pobladores						
Promedio de velocidad a lo largo del abanico				4.6-7	-	-

**CUADRO 5:** Comparación de las estimaciones de los volúmenes obtenidos con las ecuaciones de Bovis and Jakob (1999) y Mizujama *et al.* (1992) utilizando el Q<sub>p</sub> obtenido con las ecuaciones de Hungr (1984) y de Chow (1959) en el cuadro 4. En la última columna se comparan con los valores medidos en el campo en la quebrada de Coquena.

Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s) en la estación 50 (Cuadro 4)	V (m <sup>3</sup> ) V=338Q <sub>p</sub> <sup>0.99</sup> (Bovis y Jakob 1999)	V (m <sup>3</sup> ) V=795Q <sub>p</sub> <sup>0.85</sup> (Mizujama et al. 1992)	Cálculo por mediciones
Promedio 430	1.4x10 <sup>5</sup>	1.7 x10 <sup>5</sup>	--
Min. 328	1.1x10 <sup>5</sup>	1.4 x10 <sup>5</sup>	1.1x10 <sup>5</sup>
Max. 588	1.9x10 <sup>5</sup>	2.3 x10 <sup>5</sup>	1.5x10 <sup>5</sup>

crecimiento de la vegetación, se halló uno arbusto que presenta en su tronco incrustaciones de clastos e impacto de flujos ocurridos durante su crecimiento (Fig. 13b), y en el depósito del albardón de un flujo, se encontró un trozo de madera in-

merso. La determinación con <sup>14</sup>C (Beta 231191), dio una edad de 620 ± 80 años, la que se considera como edad máxima. En la quebrada de Coquena también se realizó una asociación con el crecimiento de la vegetación y los depósitos de flujos.

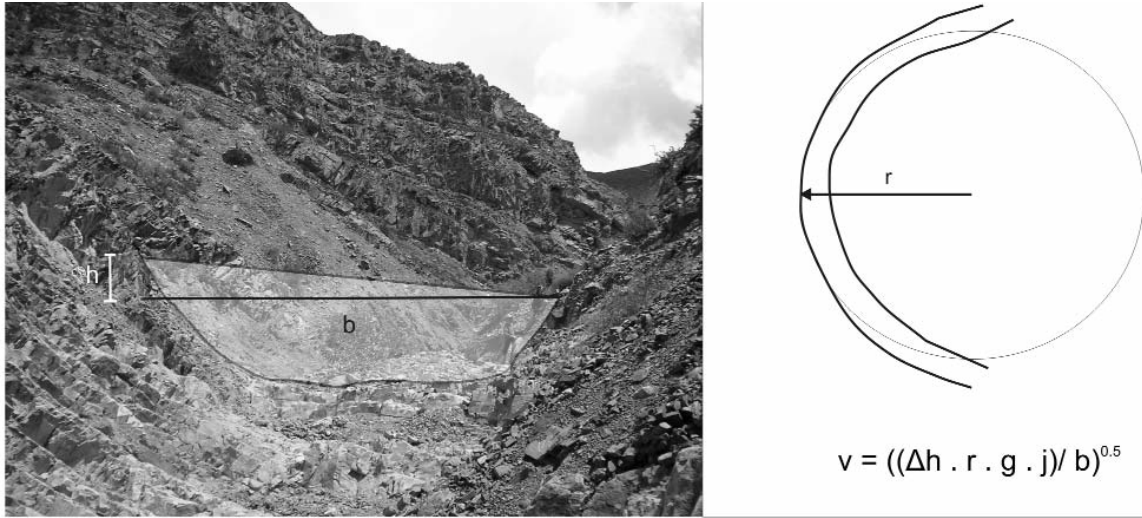


Figura 10: Mediciones para el cálculo de la velocidad según la ecuación de forced-vortex.



Figura 11: Mediciones para el cálculo de la velocidad según la ecuación de Chow (1959).

CUADRO 6: Estimaciones de volumen con la ecuación de Bovis y Jakob (1999)

Cuencas o subcuencas	Área max. (m <sup>2</sup> )	Estimación del Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s) asumiendo V=8.35 m/s	Predicción de V (m <sup>3</sup> ) asumiendo V=388Q <sub>p</sub> <sup>0.99</sup>
Qda. Coquena (estación 50)	98	820	2,5 x10 <sup>5</sup>
Qda. Chalala (Lajayaco)	63	530	1,6 x10 <sup>5</sup>
Estimaciones de las otras subcuencas de Coquena proporcional al área			
Qda. Chalala (Chalala)			1,3 x10 <sup>5</sup>
Qda. Chalala (Agualandre)			0,9 x10 <sup>5</sup>
Total Cuenca de Chalala			3,8 x10 <sup>5</sup>

En la estación 50 se encontraron sauces que además de presentar formas curiosas como troncos "abrazando" grandes bloques o troncos totalmente doblados (Fig.

13a). La mayoría presenta daños de impactos de bloques y se encuentran manchados de barro del último evento. En relación a la edad de los sauces, se estima

la edad del depósito entre 100 y 200 años como mínimo.

En el depósito de un flujo proveniente de un tributario de la margen izquierda del arroyo Coquena, se tomaron muestras de trozos de tronco (detrito de materia orgánica) inmersos en él (Fig. 13b). La determinación con <sup>14</sup>C (Beta 231191) resultó una edad de 170±50 años, como edad máxima. Desafortunadamente, durante los últimos 400 años, el contenido de radiocarbono atmosférico ha cambiado mucho y por eso, sólo podemos decir que esta edad corresponde al rango entre los años 1650 y 1950 del calendario.

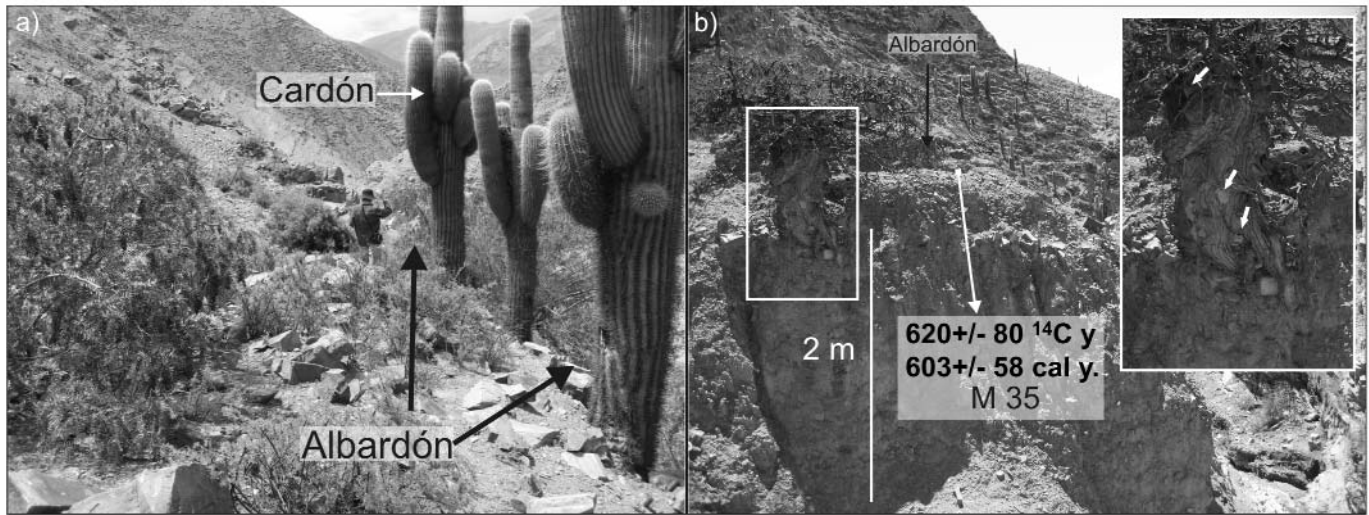
La información histórica más antigua transmitida por los pobladores, cuenta que:

- En 1949 un torrente de barro que nació en la quebrada de Lipán, tributaria de la quebrada de Purmamarca, "se llevó todo" en el pueblo de Purmamarca.

- A fines de diciembre de 1957 se formó un "volcán" (denominación local de los flujos) de 4 a 5 metros de alto en la quebrada de Chalala. En esa época en la confluencia de los arroyos que dan origen al arroyo Chalala, existía un barranco profundo por donde corría el arroyo.

- En una tarde de febrero de 1960, un flujo de barro proveniente de la quebrada de Purmamarca, llenó las casas del pueblo de Purmamarca hasta un metro de espesor de barro.

- Un domingo de carnaval de 1970, un



**Figura 12:** a) Cardones crecidos sobre depósitos de un albardón de un antiguo flujo de detritos en la quebrada de Chalala; b) Albardón del cual se obtuvo la muestra de trozo de madera datado y arbusto en cuyo tronco se encontraron impactos y clastos incrustados.

flujo del arroyo Tumbaya se llevó las construcciones del cementerio de Purmamarca hasta la plaza del pueblo. El depósito tardó varios días en secarse.

- A fines de los años 70 hubo un flujo por la quebrada de Chalala. La pobladora Ester Alabar bajaba de su puesto por la quebrada de Lajayaco con sus burros, cuando a las 17:00 horas escucha un "silbido". Así describió el sonido del flujo. Luego comentó que al pasar el material de repente "sube como un árbol negro" y después se desparrama, y cuando llega al próximo angosto vuelve a "silbar" y luego vuelve a "explotar". La expresión más gráfica que comenta es que "cuando está bajando sale vapor, como cuando se tira el anchi a la fuente" (anchi: postre preparado con harina de maíz dulce y trozos de fruta), "es como barro caliente". A las 20:00 horas "por la quebrada sólo corría agua y la lluvia había parado hacía rato".

- El flujo más trágico del área, fue el 11 de Febrero de 1984 que fluyó por la quebrada de Purmamarca. En el pueblo de Purmamarca llevó animales y tapó casas. Al llegar al río Grande cubrió la estación de ferrocarril donde murieron empleados del Ferrocarril General Belgrano (Fig. 14a).

- El 15 de noviembre de 1986, un flujo en la quebrada de Chalala arrasó con cientos de cabras. La experiencia de Ester Alabar

**CUADRO 7:** Estimaciones de volúmenes según el método de la JICA (1988) aplicado por Fidel *et al.* (2006).

subcuencas	Area (km <sup>2</sup> )	V (m <sup>3</sup> )		
		Asumiendo 2,7x10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup>	Asumiendo 2,0x10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup>	
CHALALA	Norte	3,8	1,0x10 <sup>5</sup>	0,76x10 <sup>5</sup>
	Media	6,0	1,4x10 <sup>5</sup>	1,2x10 <sup>5</sup>
	Sur	7,0	1,9x10 <sup>5</sup>	1,4x10 <sup>5</sup>
	Total	16,8	4,3x10 <sup>5</sup>	3,3x10 <sup>5</sup>
COQUENA	Superior (N)	5,6	1,5x10 <sup>5</sup>	1,1x10 <sup>5</sup>
	Superior (S)	3,1	0,8x10 <sup>5</sup>	0,6x10 <sup>5</sup>
	Inferior	6,9	1,9x10 <sup>5</sup>	1,4x10 <sup>5</sup>
	Total	15,6	4,2x10 <sup>5</sup>	3,1x10 <sup>5</sup>

cuenta que primero granizó y se acumuló 20 a 30 cm. Luego se largó "el agua a baldazos". Sus cabras estaban en el cerro, se asustaron y se metieron debajo del barranco. Primero el agua corrió sucia y le cubría hasta la rodilla y luego escuchó el "silbido". Subió y pudo observar el flujo que era "muy denso y lento, y 5 metros antes de la punta la tierra se mueve y se pierde".

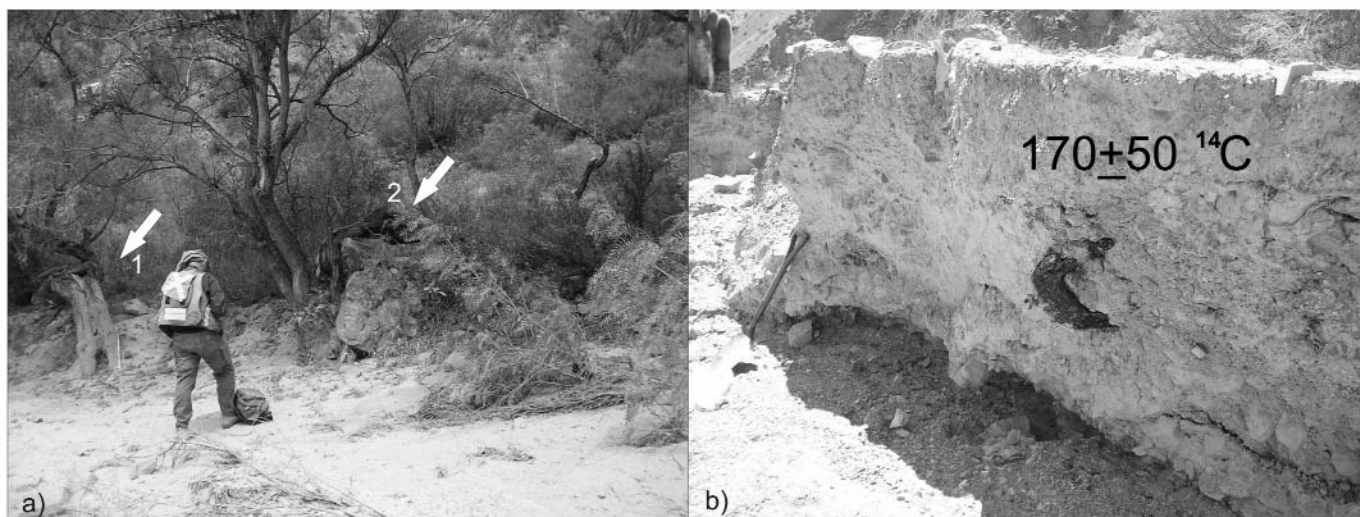
- En la quebrada de Coquena el 7 de marzo de 2007 a la madrugada, un flujo colmató la luz del puente carretero de la ruta nacional 56. (Fig. 14b)

- Finalmente el 29 de Marzo de 2007 se registró un flujo de la quebrada de Chalala (Fig. 14c).

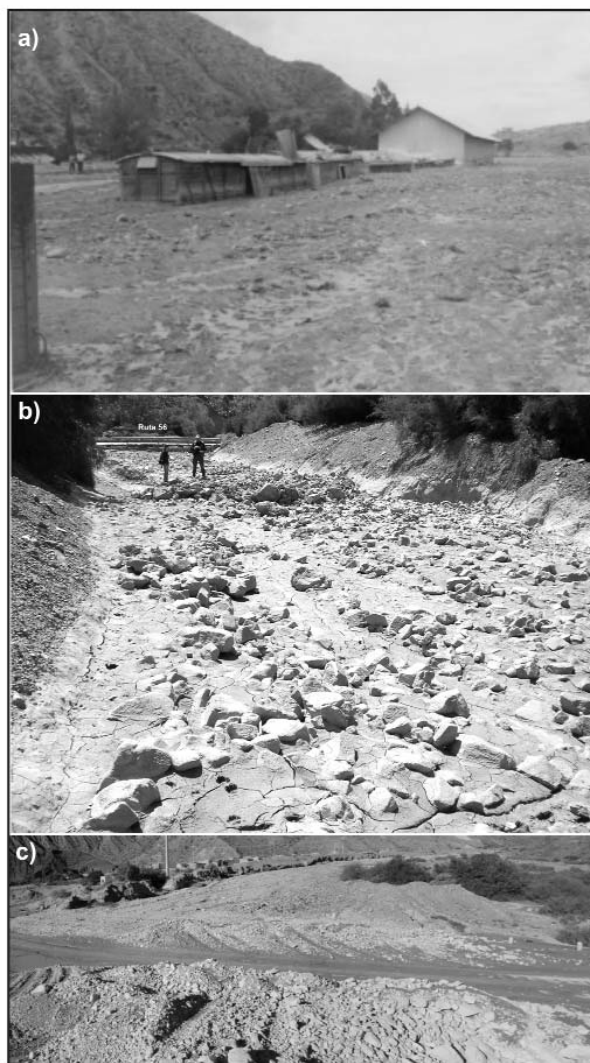
## RESULTADOS

De acuerdo al mecanismo de movimien-

to y la génesis y plasticidad del material, el tipo de proceso de remoción en masa ocurrido en ambas quebradas, se clasifica como flujo de barro. Se considera al movimiento como un arranque del material con deformación interna, muy rápido a extremadamente rápido, que continúa movilizándose sobre una larga trayectoria, involucrando un contenido considerablemente mayor de agua en relación a las condiciones originales del material. Por lo tanto, se lo clasifica como flujo. Dado que el material proviene mayoritariamente de depósitos coluviales con matriz arcillosa o arenas finas, que originalmente está seco y que con agua superficial eleva su contenido de humedad por encima del límite líquido, de acuerdo a la clasificación de Hungr *et al.* (2001), se sugiere definirlo como flujo de barro (o flu-



**Figura 13:** a) Saucos sobre un depósito de albardón que presentan impactos y algunos se encuentran totalmente doblados por los efectos de flujos históricos. Se observan troncos doblados y con marcas de barro (1) y otros totalmente deformados alrededor de un gran bloque (2); b) Detrito de madera inmerso en un depósito de flujo en la quebrada de Coquena.



**Figura 14:** a) Vagones en la estación de ferrocarril de Purmamarca semicubiertos por depósitos del flujo ocurrido en 1984 (Foto: Ing. Pablo Agüero); b) Puente de la ruta nacional 56 sobre la salida de la quebrada de Coquena con su luz completamente cubierta. En primer plano el depósito del flujo; c) Depósito del flujo del 29 de marzo en la intersección de la quebrada de Chalala con la ruta.

jo de lodo, PMA:GCA 2008). Esta clasificación considera que para materiales significativamente plásticos ( $IP > 5$ ), los flujos se comportan como flujos de barro. Se puede observar en el cuadro 2 que el índice de plasticidad ( $IP$ ) en todos los casos es mayor a 5 % o casi igual (4,9 %), por lo que se considera adecuada la terminología propuesta.

Los dos métodos utilizados para la estimación de la velocidad dieron resultados semejantes (máxima 9 m/s y mínima 3,6 m/s); además de coincidir con el rango del evento histórico ocurrido en la localidad de Volcán en 1945, en la quebrada de Humahuaca (7,5 - 6,1 m/s) (Monteverde y Kittl 1949). Estos valores determinan que los flujos estudiados, según diferentes clasificaciones (Varnes 1978, Schuster y Fleming 1982, y WP/WLI 1995), son de muy rápidos a extremadamente rápidos.

De los dos métodos utilizados para la estimación de volumen se obtuvieron datos razonables confrontados con las evidencias estratigráficas y geomorfológicas ( $2,5 \times 10^5 \text{ m}^3$  -  $3,8 \times 10^5 \text{ m}^3$ ) y con ordenes de magnitud semejantes a los calculados directamente en el campo. Los valores del método JICA son más conservadores.

En el esquema de Jakob (2005), un evento de magnitud mayor a  $10^5 \text{ m}^3$  pertenece a la clase 5, y corresponde a aquellos que pueden destruir parte de un pueblo, ente-

**CUADRO 8:** Estimación de la fuerza de empuje (F).

$v$ (m/s)	$\beta$ (°)	F (kN/m <sup>2</sup> )
9,0	90	123.9
3,6	90	19.8
9,0	45	87.5
3,6	45	14.0

rrar rutas y bloquear pequeños ríos. En el lapso de 21 años (1986-2007) ocurrieron dos eventos de magnitud y movilidad tal como para llegar hasta la quebrada del río Purmamarca. Entre tanto hubo eventos menores sobre los abanicos de Coquena y Chalala. Según la escala de probabilidades semicuantitativa de Hungr (1997), estos registros ubican a los abanicos en un rango de probabilidad muy alta (>1/20) de producirse flujos.

Estas dimensiones dan una idea de la magnitud del evento además de brindar la posibilidad de estimar otros valores asociados a efectos secundarios.

Para la proyección de obras cercanas a zonas susceptibles a la ocurrencia de flujos, se utilizan expresiones que permiten estimar acciones (Brea *et al.* 2005), como la fuerza de impacto.

El empuje dinámico del flujo por unidad de superficie puede calcularse con la expresión,

$$F = (\gamma_f / g) v^2 \sin(\beta),$$

donde  $\gamma_f$  es el peso unitario del fluido,  $g$  es la aceleración de la gravedad,

$v$  es la velocidad y

$\beta$  es el ángulo de incidencia.

Algunos ejemplos se muestran en el cuadro 8, en la que se adoptó

$$\gamma_f = 15 \text{ kN/m}^3.$$

Puede verse que las fuerzas que se desarrollan son muy importantes. Como comparación, puede analizarse la altura de flujo que produce el derrumbe de un muro de mampostería sobre el que incide normalmente. La ecuación surge de un equilibrio de momentos respecto del punto de giro del muro sobre su base. El momento resistente  $M_r$  está dado por el peso del muro y es

$$M_r = \frac{1}{2} B^2 H \gamma_{muro}$$

donde  $B$  es el ancho,  $H$  la altura y  $\gamma_{muro}$  el peso unitario del muro.

El momento volcador  $M_v$  depende de la fuerza dinámica y es

$$M_v = \frac{1}{2} (\gamma_f / g) v^2 \sin(\beta) h_f^2$$

donde  $h_f$  es la altura del flujo.

Si se asume que la presión hidrostática actúa en ambos lados del muro y se ignora el efecto de la subpresión, la altura máxima de flujo que soporta el muro surge de la igualdad  $M_v = M_r$ .

$$\text{Queda } h_f = \frac{B}{v} \sqrt{\frac{\gamma_{muro}}{\gamma_f} g H}.$$

Por ejemplo, si  $B=0.30\text{m}$ ,  $H=2.60\text{m}$ ,  $v=3.6\text{m/s}$ ,  $\gamma_{muro}=16\text{kN/m}^3$ , y  $\gamma_f=15\text{kN/m}^3$ ,

$$\text{queda } h_f = \frac{B}{v} \sqrt{\frac{\gamma_{muro}}{\gamma_f} g H} = \frac{0.30\text{m}}{3.6\text{m/s}}$$

$$\sqrt{\frac{16\text{kN/m}^3 \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 2.60\text{m}}{15\text{kN/m}^3}} = 0.44\text{m}$$

O sea, sólo se necesita un flujo de 44 cm de altura a una velocidad de  $v=3.6\text{m/s}$  para derrumbar el muro exterior típico de una vivienda.

## CONCLUSIONES

La aplicación de estudios de movimientos en masa, deben en lo posible, incluir los parámetros necesarios para determinar el comportamiento del proceso y mitigar sus efectos dañinos.

Además de tipificar el proceso es necesario obtener las dimensiones del volumen y la velocidad, así como también las características granulométricas, reológicas y geomecánicas de material, frecuencia de ocurrencia, probables trayectorias, potencial distancia de llegada del flujo y potencial fuerza de impacto, entre otros.

Es importante poder realizar las mediciones de campo y toma de muestras, inmediatamente después de ocurrido un even-

to, para poder comprender mejor el proceso y poder comparar con otros eventos en la misma región. Cada evento representa una oportunidad para entender mejor el comportamiento de los procesos.

Los relatos orales, los estudios litológicos, geomorfológicos y estratigráficos y las relaciones con otros ejemplos del mundo pueden permitir evaluaciones razonables del peligro, en lugares donde hay escasa o ninguna documentación.

Los flujos de barro estudiados son muy rápidos a extremadamente rápidos y tuvieron la capacidad de sobrepasar la ruta nacional y llegar hasta la quebrada del río Purmamarca. En ambos casos, los volúmenes permitieron el desborde de la sección del canal, sin llegar a afectar las viviendas que se encuentran sobre los abanicos.

## AGRADECIMIENTOS

Para la realización de este trabajo fue fundamental la colaboración en el trabajo de campo del Lic. Barber y del Sr. Cabezas. En la recopilación histórica, fue de gran valor el testimonio de la señora Ester Alabar y de los demás pobladores que contaron sus experiencias. Así mismo, se agradece al Ing. Pablo Agüero por la fotografía de su archivo personal. Se desea destacar el productivo asesoramiento del Ing. Alejo Sfriso para los cálculos de empuje. Finalmente, se valoran las sugerencias realizadas por los árbitros, los Dres. Emilio Gonzalez Díaz y Mathias Jakob.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO:

- Ancey C. 1999. Rhéologie des laves torrentielles. Rapport scientifique final PNRN 1998-99, CEMAGREF, 42 p. Grenoble.
- Ancey C. 2001. Role of lubricated contacts in concentrated polydisperse suspensions. *Journal of Rheology* 45(6): 1421-1439.
- Aguirre-Pe, J., Moncada, A. T., Guatarasma, L. y Suarez, A. 2005. Reología y mecánica de barros y lodos. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica* 2(2):39-50.
- Bardou, E. 2002. Méthodologie de diagnostic des laves torrentielles sur un bassin versant alpin. Thèse 2479, EPFL, 304 p., Lausanne.

- Benson, M.A. 1959. En Llamas, J. 1993. Hidrología General, Principios y Aplicaciones. Servicio Editorial Universidad del País Vasco, 635 p.
- Bonnet-Staub, I. 1998. Mécanismes d'initiation des laves torrentielles dans les Alpes françaises. Contribution à la maîtrise du risque. Thèse de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, 1: 237 p., 2: 154 p., Paris.
- Bovis, M. J. y Jakob, M. 1999. The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity. *Earth Surface Processes and Landforms*, British Society for Geomorphology 24: 1039-1054.
- Brea, J.D., Spalletti, L., Hopwood, H.J. y Spalletti, P. 2005. Conceptos y aplicaciones sobre flujos densos en la hidráulica de ríos. *Revista Ingeniería del Agua* 12(3): 1-12.
- Chayle, W. y Agüero, P.N. 1987. Características de remoción en masa en la cuenca del río Grande. *Revista del Instituto de Geología y Minería de Jujuy* 7:107-121, Jujuy.
- Chow, V.T. 1959. *Open channel hydraulics*. McGraw Hill, 680 p., New York.
- D'Agostino, V. 1996. Analisi quantitativa e qualitativa del trasporto solido torrentizio nei bacini montani del trentino orientale, A.I.I.A - A.I.I - Scritti dedicati a Giovanni Tournon, 111-123. Novara.
- De Scally, F.A. y Owens, I.F. 2004. Morphometric controls and geomorphic response on fans in the Southern Alps, New Zealand. *Earth Surface processes and landforms*, British Society for Geomorphology 29(3):311-322.
- Fidel, S., Zegarra, L., Vilchez, M., Franco-Castillo, N. y Jackson, L.E. 2006. Evolution of landslide activity, and the origin of debris flows in the El Niño affected Payhua Creek basin, Matucana area, Huarochiri, Peru. *Engineering geology for tomorrow's cities*, 10th IAEG International Congress, Proceedings 32, 12 p., Nottingham.
- González, M.A., Tello, G., Fracchia D. y Solís, N. 2008. Peligros Geológicos en Jujuy. En Coira, B. y Zappettini, E. (eds.) *Geología y Recursos Naturales de Jujuy*. Argentino. Asociación Geológica Argentina, 17º Congreso Geológico Relatorio 4: 443-464, Buenos Aires.
- Hungri, O., Morgan, G.C., and Kellerhals, R. 1984. Quantative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. *Canadian Geotechnical Journal* 21: 663-677.
- Hungri, O. 1997. Some methods of landslide hazard intensity mapping. En Fell, R. y Cruden, D.M. (eds.) *Landslide Risk Assessment - International Workshop on landslide risk assessment* (Honolulu), A.A. Balkema, Proceedings: 215-226, Rotterdam.
- Hungri, O., Evans, S.G., Bovis, M., y Hutchison, J.N. 2001. Review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and engineering geoscience*, Geological Society of America and the Association of Engineering Geologists 7(3):231-228.
- ISRM (International Society Rock Mechanics) 1978. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science* 15: 319-368.
- Jakob, M. 2005. Debris-flow hazard and analysis. En: *Debris flow hazards and related phenomena*. En Jakob, M. y Hungri, O. (eds.) Springer-Praxis books in geophysical sciences, 411-443, Chichester.
- JICA (Japan International Cooperation Agency) 1988. Final report for the master plan study on the disaster prevention project in the Rimac River basin. Japan International Cooperation agency, 6 volumenes, PAGINAS. Tokyo.
- Malanca, S.H. 1973. Estudio paleontológico del Ordovícico aflorante en el tramo inferior de la Quebrada de Purmamarca (Dpto. Tumbaya, Pcia. de Jujuy). Seminario I, Departamento de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta (inédito) 48 p., Salta.
- Marchi, L. y Brochot, S. 2000. Les cônes de déjection torrentielles dans les Alpes françaises, morphométrie et processus de transport solide torrentiel Italienne. *Revue de Géographie Alpine* 3: 23-38.
- Martín Serrano, A. y Tchilinguirian, P. 1998. Geomorfología. En *Geología Regional y Geomorfología*. Estudio geológico integrado de la quebrada de Humahuaca. Servicio Geológico Minero Argentino, Anales 30: 31-57, Buenos Aires.
- Mizuyama, T., Kobashi, S. y Ou G. 1992. Prediction of debris flow peak discharge, *Symposium Interpraevent* 4: 99-108, Bern.
- Monteverde, A. y Kittl, E. 1949. Torrente "El Volcán". Sus características geológicas, efectos destructivos y las posibilidades de construcción de vías de comunicación por la Quebrada de Humahuaca. 1º Congreso Vial Regional del Norte Argentino, Trabajo 46, 37p., Buenos Aires.
- Patton, P. 1998. Drainage Basin Morphometry and Floods. En Baker, V., Kochel, C. y Patton, P. (eds.) *Flood Geomorphology*, P. John Wiley & Sons, 51-64, New York.
- PMA:GCA (Proyecto Multinacional Andino: Geociencia para las Comunidades Andinas) 2007. *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional 4, 432 p., CD-ROM.
- Rickenmann, D. 1999. Empirical relationships for debris flows. *Kluwer Academic Publishers, Natural hazards* 19:47-77, Rotterdam.
- Rodríguez, R., Heredia, N., Seggiaro, R. y Gonzalez, M.A. 1998. *Geología Estructural*. En *Geología Regional y Geomorfología*. Estudio geológico integrado de la quebrada de Humahuaca, SEGEMAR, Anales 30: 16-29, Buenos Aires.
- Schuster, R.L. y Fleming, R.W. 1982. Geologic aspects of landslide control using walls. ASCE National Convention, Las Vegas. En IGME y EPTISA, 1987, *Manual de Taludes*, 38 p., Madrid.
- Seggiaro, R. en preparación. *Estratigrafía de la cuenca de Purmamarca*. En *Estudio de los procesos geológicos aplicados al ordenamiento territorial de la quebradas de Coquena y Chalala*. PMA:GCA - SEGEMAR.
- Solís, N., Chayle, W. y Ramirez, A. 2004. ¿Qué características tiene la remoción en masa en el noroeste argentino?. Capítulo 6. En Gonzalez, M.A. y Bejerman, N.J. (eds.) *Peligrosidad Geológica en Argentina*. Metodologías de análisis y mapeo. Estudio de casos. Publicación Especial 4. Asociación de Geología Aplicada a la Ingeniería. Edición en CD. ISBN 987-21766-0-4.
- Varnes, D.J. 1978. Slope movements. Types and processes. En Schuster, R.L. y Krizker, R.J. (eds.) *Landslides: analysis and control*, National Academy of Sciences Press, Transportation Research Board, Special Report 176: 9-33, Washington.
- WP/WLI (Working Party on Landslide Inventory) 1995. A suggested method for describing the rate of movement of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 52: 75-78.

Recibido: 2 de junio, 2009

Aceptado: 27 de octubre, 2009