

FLUJO DE BARRO DEL ARROYO DEL COMEDERO, JUJUY: CARACTERIZACIÓN, CAUSAS Y EFECTOS

Maria A. GONZÁLEZ¹, Diego FRACCHIA², Natalia G. SOLÍS³ y Eduardo BARBER⁴

¹SEGEMAR – IGRM - DGAA – Dirección de Geología Ambiental y Aplicada. CABA. marigo@minplan.gov.ar

²CNEA – Comisión Nacional de Energía Atómica.

Libertador 8250. CABA. fracchia@cnea.gov.ar

³IdGyM – Instituto de Geología y Minería de Jujuy. UNJu. nsolis@idgym.unju.edu.ar San Salvador de Jujuy

⁴SEGEMAR – Delegación Jujuy.

RESUMEN

El 12 de Enero de 2010 un flujo de barro afectó un predio de esparcimiento con piletas de aguas termales en la localidad de Termas de Reyes, provincia de Jujuy. Este evento dejó 87 heridos y produjo grandes daños materiales. Las lluvias fueron las desencadenantes del movimiento del material a través de la quebrada del arroyo del Comedero. El depósito del flujo estuvo constituido por casi el 70% de grava, 20% de arena y 10% de limo arcilla y transportó trozos de materia orgánica y bloques mayores a 1 m³. Debido a la plasticidad del material, se lo clasificó como flujo de barro. La velocidad del movimiento se calculó usando un método empírico, coincidiendo su resultado con otros obtenidos en eventos cercanos. El volumen fue medido directamente en el campo, y calculado a través de ecuaciones enunciadas para flujos similares. Según los registros históricos de los depósitos de diferentes eventos ocurridos en la quebrada del arroyo del Comedero, esta se ubica en un rango de probabilidad muy alta de que se produzcan flujos. Con respecto a la clasificación de la magnitud del flujo de barro sobre el río Reyes, este pertenece a la clase con consecuencias potenciales de destrucción parcial de poblados, infraestructura de rutas y puentes, y bloqueo de quebradas. Los datos de velocidad, volumen y frecuencia calculados en este trabajo, que forman parte de la Carta de Peligrosidad Geológica Salta del SEGEMAR, son necesarios para el mapeo de peligrosidad, la programación de obras de infraestructura y la planificación territorial.

Palabras clave. *Movimientos en masa, Cordillera Oriental, magnitud.*

ABSTRACT

The mudflow of the Comedero stream, Jujuy: Characterization, causes and effects.

The January 12th 2010 mudflow in the Comedero stream, Termas de Reyes, province of Jujuy, affected a hot springs recreational area causing 87 wounded people and severe material damage. This mass movement was triggered by sudden rainfall in the high sectors of the creek in Comedero stream. The resulting deposit was made up by approximately 70 % gravel, 20 % sand and 10 % lime-clay, and included transported wood trunks and blocks of more than 1 m³. According to the plasticity of this material, the flow was classified as a mudflow. The velocity of the flow was calculated through an empirical method, the result of which is coincident with other obtained for events in nearby places in the region. The volume of the flow was directly measured in the field and then calculated with equations previously used for the study of similar flows. According to the stratigraphical and historical record of several previous events in the place, we consider the Comedero creek has a very high probability of being affected by debris flows. According to the consequences upon the Reyes river the studied mudflow is enclosed in the class with potentiality to partially destroy towns and road and bridge infrastructure, and to produce creek damming. The velocity, volume and frequency data calculated in this work, which is part of SEGEMAR's Carta de Peligrosidad Geológica de Salta, are essential items for geologic hazards mapping, infrastructures design, and territorial planning.

Keywords: *Mass movement, Cordillera Oriental, magnitude.*

INTRODUCCIÓN

La Cordillera Oriental presenta las caracte-

terísticas litológicas, topográficas, geomorfológicas, estructurales y climáticas indispensables para la generación de procesos

de movimientos en masa. Las lluvias estivales desencadenan frecuentes movimientos de ladera que provocan cortes en las

rutas, daños en la infraestructura, pérdidas de cultivos y obstrucciones en los cauces fluviales.

El flujo que se estudia en este trabajo ocurrió en una pequeña subcuenca tributaria de la cuenca del río Reyes, en la provincia de Jujuy (Fig. 1), que debido a su mag-

nitud y localización, generó importantes daños.

El material del flujo desembocó en el río Reyes y avanzó hacia su margen sur contra la terraza fluvial donde se ubica el predio afectado. El material invadió el sector, colmató dos piscinas de agua termal, destruyó viviendas, y arrastró personas y automóviles, hasta llegar a cubrir una cancha de fútbol. El resto del material que desembocó en el río Reyes siguió fluyendo por la planicie dirigiéndose hacia el Este siguiendo la pendiente. Así, el lóbulo del flujo modificó el cauce principal del río Reyes el cual se encauzó contra su margen meridional y erosionó su propia terraza fluvial.

En esta contribución se exponen los resultados de los análisis realizados sobre el flujo, con el objetivo de clasificar el tipo de movimiento, y la cuantificación y calificación de la magnitud del evento. También se analizan los factores condicionantes y desencadenantes del mismo. La posibilidad de cuantificar y calificar estos procesos provee información de importancia a la hora de diseñar la infraestructura y el ordenamiento territorial.

MARCO GEOLÓGICO

Las características estratigráficas, estructurales y geomorfológicas del área son propias de la Cordillera Oriental. En el sector estudiado afloran en primer lugar pizarras y cuarcitas de la Formación Puncoviscana, de edad neoproterozoica – cámbrica inferior. Siguen sobre ella cuarcitas cámbricas pertenecientes al Grupo Mesón. La columna estratigráfica continúa con sedimentos marinos ordovícicos del Grupo Santa Victoria y sedimentos continentales paleógenos del Grupo Orán. Finalmente se encuentran los depósitos cuaternarios que forman parte de los depósitos de talud, cauce, y terrazas del sistema fluvial actual.

La estructura tiene como rasgo característico el plegamiento y el fallamiento. Los cabalgamientos producidos en la orogenia andina muestran la concurrencia de fajas meridionales que repiten la estratigrafía. Los procesos de remoción en masa son muy característicos de la dinámica actual de la cuenca. Es frecuente observar cicatri-

ces de deslizamiento y depósitos de flujos antiguos.

MORFOMETRÍA DE LA CUENCA

La cuenca del arroyo del Comedero es una subcuenca que aporta sus aguas a la margen izquierda del río Reyes. Su régimen es permanente y se alimenta fundamentalmente de las precipitaciones estivales. Su dirección de drenaje es principalmente N-S, no obstante, para su mejor descripción podemos separarlo en tres sectores: cuenca alta, desde sus nacientes hasta su unión con un arroyo que viene del norte, presenta dirección E-O, fuerte pendiente, encajonado y con saltos; cuenca media, con dirección N-S, pendiente pronunciada pero sin saltos y en algunos sectores playas estrechas y; cuenca baja, con dirección aproximada NO-SE, pendiente moderada, con anchas playas (Fig. 1).

Los tres sectores descriptos tienen características estructurales y/o litológicas distintivas: la cuenca alta corta en forma perpendicular una lámina de rocas paleozoicas corrida sobre el Terciario; la cuenca media es paralela a la estructura homoclinal de la región y siempre corre sobre rocas paleozoicas y; la cuenca baja corta con ángulo bajo a la estructura homoclinal y/o a los corrimientos, y también corre sobre rocas paleozoicas y neoproterozoicas.

La cuenca hidrográfica es muy pequeña (<25 km²; Campos 1999), y sus parámetros morfométricos se expresan en el cuadro 1. De acuerdo con la cuantificación realizada se deduce que la cuenca es alargada ($Re < 1$ y $Kf < 1$), oval redonda a oval oblonga (Kg 1,25 – 1,5; Campos 1999), característica que favorece el aumento de la onda de crecida. La densidad de drenaje (Dd) revela el estado erosivo de la red hidrográfica y está relacionada con las características litológicas, cobertura vegetal y clima. Según la interpretación de Strahler (1957) valores inferiores a 5 indican baja densidad y una textura gruesa, lo que suele darse en zonas de gran masividad litológica y espesa cobertura vegetal, así como en materiales muy permeables y con alta infiltración. En el caso de estudio la cobertura vegetal no es tan espesa, pero confirma las características resistentes de las rocas y



Figura 1. a) y b) Ubicación geográfica del arroyo del Comedero, donde se señala la zona de arranque del movimiento, el área donde se generaron los mayores daños, los alcances de la cuenca alta (de las nacientes al punto A), cuenca media (de A hasta B), y cuenca baja (de B a la desembocadura). c) Gráfico de la pendiente del cauce principal.

la alta infiltración por fracturación. Esto supone una alta tasa de infiltración y alimentación del flujo superficial, lo cual trae un incremento en el tiempo de concentración y una disminución del caudal pico.

La jerarquización de la red de drenaje se realizó con el método de Strahler, a partir del análisis del modelo digital del terreno con Hydrology ArcGIS 9. La cuenca tiene un orden 3 que muestra un grado de desarrollo fluvial bajo que es coherente con el tamaño de la misma.

La rugosidad de cuenca (Rd) vincula la densidad de drenaje con el relieve y confirma la jerarquización anterior, pero estas calificaciones bajas se compensan con el alto relieve. Para corresponder algunos de los parámetros medidos con el tipo de transporte de la cuenca se utilizó la relación del índice de Melton con la pendiente del cono de deyección, según lo ilustrado por D'Agostino (1996). Según el ploteo de los datos, el arroyo del Comedero corresponde a una cuenca en la que prevalece el transporte de flujo de detritos por encima del transporte fluvial

FACTORES CONDICIONANTES Y DESENCADENANTES

Los factores condicionantes preponderantes de la ocurrencia de flujos en esta área son el relieve (pendiente, orientación, entre otros), la litología y el clima; y el factor desencadenante es la lluvia torrencial.

El relieve de la cuenca en estudio presenta pendientes abruptas en un paisaje preponderadamente homoclinal, con desniveles de hasta 940 metros (2730 m en el tope y 1790 m en la desembocadura). Estas características, propias de la Cordillera Oriental, provienen de una génesis predominantemente tectónica de compresión y erosiva fluvial. Este último proceso está siendo fuertemente influenciado por un cambio antrópico de nivel de base particularmente en la cuenca del río Reyes y en general del río Grande. La colmatación del embalse del dique Los Molinos que se encuentra emplazado sobre el río Grande aguas abajo de la desembocadura del río Reyes, modificó la pendiente y la altura de su cauce afectando a todos sus tributarios, entre ellos al arroyo Comedero.

La litología que aflora en la cuenca del arroyo del Comedero, por sus características geomecánicas es muy susceptible a ser erodada y transportada fundamentalmente por la acumulación del agua de lluvia. Las pizarras y filitas, por su foliación a lo largo de la esquistosidad y clivaje se desintegran fácilmente; las cuarcitas constituyen macizos rocosos resistentes y presentan bancos de espesores cercanos al metro, sin embargo su estabilidad disminuye por la intercalación de sedimentos más finos y por brechamiento cercana a las fallas; por último las areniscas limolíticas son muy friables y permeables. Los bancos tienen un rumbo aproximadamente N-S y buzanan hacia el oeste, y en la zona de arranque del flujo, el cauce los corta transversalmente. Las diaclasas son probablemente el factor condicionante de inestabilidad de mayor importancia. Gran parte de los macizos rocosos muestran distintos sistemas de diaclasas con diferentes orientaciones y espaciamientos. La mayoría favorecen el desplazamiento a lo largo de un plano, o a través de la cuña formada por la intersección de dos familias de diaclasas distintas. Los espaciamientos son también desfavorables, ya que al ser próximos a bastante próximos, el macizo se describe como de tipo en bloques o fracturado. Estas discontinuidades permiten una gran infiltración de agua, que provoca junto a la porosidad primaria un aumento de la presión de poros que puede ser la causa del arranque del material. Otra acción del agua entre las discontinuidades es la lubricación, lo cual también favorece el movimiento.

El clima de la región es subtropical serrano. Las precipitaciones son del tipo orográficas y en menor escala convectivas y por avances de frentes fríos (Bianchi y Yañez 1992). Esta área presenta entre los meses de enero a marzo exceso de agua en el terreno (suelo o roca) por el aumento de las lluvias.

Análisis de las precipitaciones en la región

Para caracterizar el régimen de lluvias de la zona hemos utilizado información de dos estaciones pluviométricas situadas en la región: Usina hidroeléctrica de Termas de Reyes (DRH y EJESA inédito), y Villa María (Lagunas de Yala) (DRH inédito). Se consideraron los datos de Termas de Reyes como

CUADRO 1: Parámetros que caracterizan morfométricamente la cuenca del arroyo del Comedero.

Parámetros	Medición / Método	Resultados
Superficie (A)	ArcGis 9	3,91 km ²
Perímetro (P)	ArcGis 9	9,4 km
Cota mínima (alt _{min})	ArcGis 9	1820m
Cota máxima (alt _{max})	ArcGis 9	2942m
Pendiente media	ArcGis 9	28°
Exposición media	ArcGis 9	S-E
Longitud total de todos los cauces de agua (L ₁)	ArcGis 9	16,45km
Longitud total del cauce principal (L ₂)	ArcGis 9	3962m
Largo de la cuenca (L ₃)	ArcGis 9	3,5km
Relación de elongación (R _{elong})	$R_{elong} = \frac{2L_3}{A/\pi}$	0,45
Factor de Forma de Horton (K _f)	$K_f = A/L_2^2$	0,35
Índice de Gravelius (K _g)	$K_g = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	1,34
Densidad de red de drenaje (Dd)	$Dd = L_1/A$	4,2km /km ²
Rugosidad de la cuenca (Rd)	$Rd = Dd (alt_{max} - alt_{min})$	4,71
Índice de Melton (D _s)	$D_s = \frac{alt_{max} - alt_{min}}{\sqrt{A}}$	0,56

los más adecuados para la descripción, pero sumamos los de Villa María para fortalecer las conclusiones del análisis, ya que ambas localidades tienen similar clima y altitud con escasos 5 km de distancia.

La precipitación media anual en la estación Termas de Reyes entre los años 1972 y 1988 fue de 1446 mm, mientras que en la estación Villa María entre los años 1970 y 2009 fue de 1471 mm. Los valores extremos para Villa María han sido de 1018 mm en 1995, y 2006 mm en 1984.

Con estos datos se han confeccionado gráficos para caracterizar la distribución anual de las precipitaciones, y para observar la evolución de las mismas a través del tiempo (Figs. 2a y 2b). De acuerdo a lo observado, el régimen de lluvias de la zona se describe

como monzónico, con fuerte concentración entre los meses de diciembre y marzo. El mes con mayores precipitaciones es enero, con un promedio de 322,5 mm (Termas de Reyes) y 319,6 mm (Villa María). Un análisis más detallado de los datos permite afirmar que el total de lluvia caída en verano equivale aproximadamente al 59 a 83 % del total del año hidrológico (septiembre-agosto).

Las mayores precipitaciones (total diario acumulado) históricas registradas en Termas de Reyes han sido de casi 151 mm, el 3 de febrero de 1975. El día 12 de enero de 2010, fecha en que ocurrió el flujo estudiado, se registraron 50 mm en la estación Termas de Reyes (desde las 8 hs. del día 12 hasta las 8 hs del día 13), y 75 mm

en Villa María (desde las 14 hs. del día 12 hasta las 19 hs. del día 13; DRH y EJESA inédito).

Desde un punto de vista histórico, y teniendo en cuenta las variaciones de año en año, el régimen de lluvias en la zona de estudio aparenta ser muy variable. Para minimizar estas variaciones hemos realizado un promedio móvil (calculado en base a 5 años), para así poder describir la tendencia de las precipitaciones a través del tiempo. La curva obtenida (Fig. 2b), si bien modesta con respecto a su duración en el tiempo, permite inferir una aparente ciclicidad de 20 a 25 años. De esta forma es posible afirmar que el período de mayores precipitaciones en la zona habría sido la segunda mitad de la década del '80, mientras que el más seco correspondería a mediados de la década del '90. La tendencia actual sugiere que se estaría entrando nuevamente en un período de grandes precipitaciones.

FLUJO DEL 12 DE ENERO, OBSERVACIONES E INTERPRETACIÓN

A partir de las observaciones de campo y del comentario de la gente que presencié el evento, se pudo reconstruir el recorrido y la dinámica del mismo. Estas observaciones y conclusiones son de utilidad para comparar el comportamiento del material respecto de otros flujos ocurridos en el área.

El arranque del movimiento en masa se generó en la cuenca alta del arroyo del Comedero (Fig. 3). Allí se han observado distintas cicatrices y superficies de deslizamiento a gran altura sobre el nivel del arroyo.

Debido a las fuertes lluvias y al aumento de la presión de poros del material, las laderas rompieron su equilibrio estable y se generaron superficies de rotura por donde se deslizó material hacia el cauce. El arranque del material se produjo desde un deslizamiento principal o mayor sobre la ladera izquierda y de dos deslizamientos menores contiguos sobre las dos laderas (Fig. 4).

La gran pendiente de la cuenca alta, antes de la zona de confluencia del tributario de la margen izquierda, favoreció el movimiento en forma de flujo rápido. Las

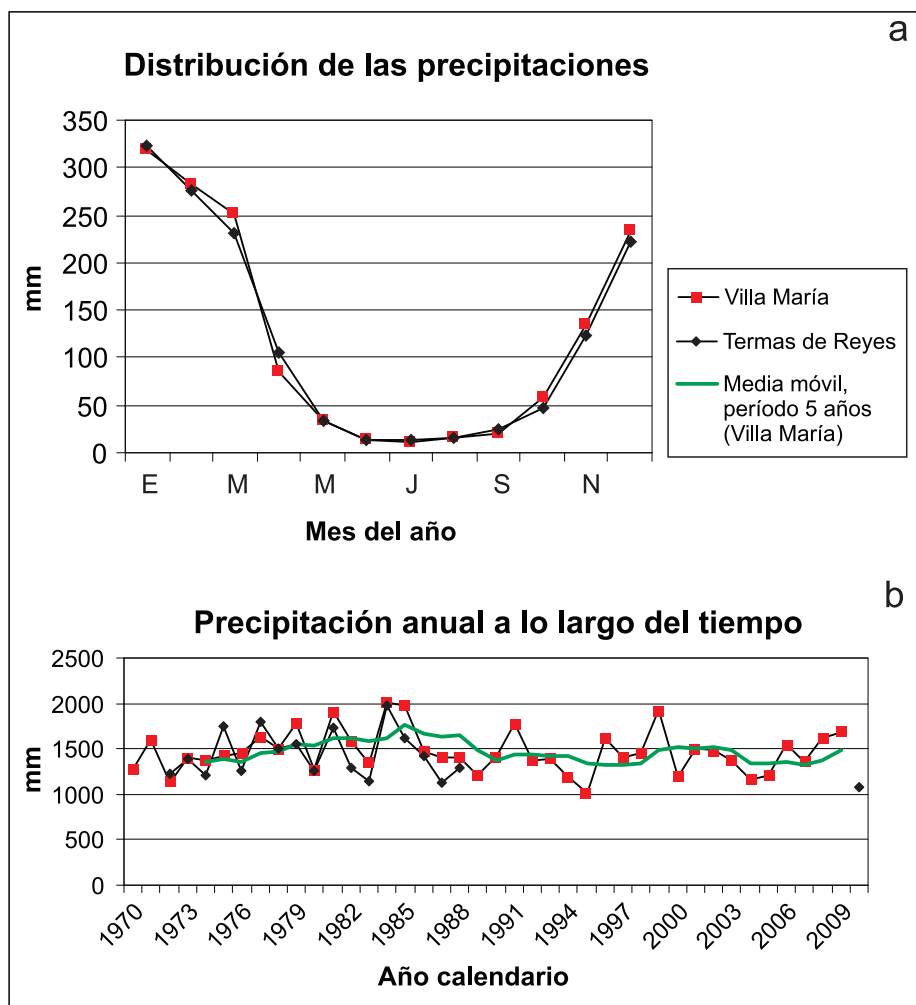


Figura 2: a) Distribución anual de las precipitaciones en la zona de estudio, tomadas de las estaciones Villa María (datos de DRH, inédito) y Termas de Reyes (datos de DRH y EJESA, inédito); b) Datos históricos de precipitaciones en la zona de estudio. La línea gruesa corresponde al promedio móvil para la estación Villa María.

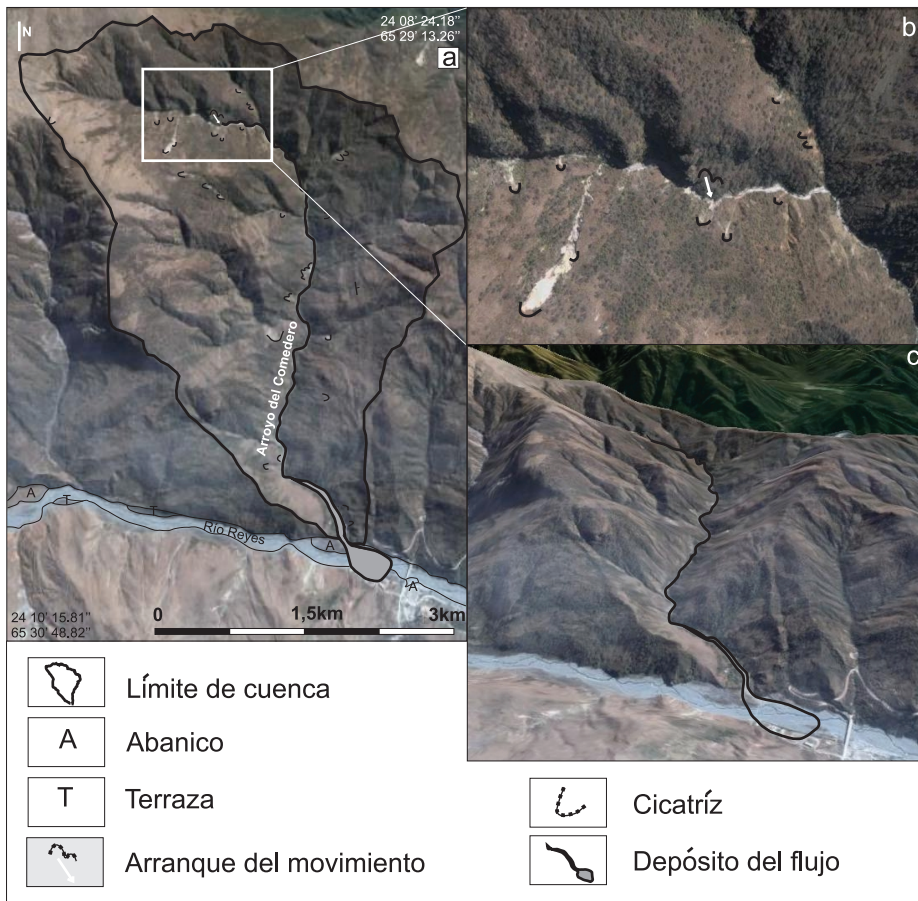


Figura 3: a) Ubicación de las cicatrices de distintos movimientos en masa de diferentes edades en la cuenca del arroyo del Comedero. b) Imagen ampliada señalando el arranque del flujo en estudio. c) Vista en 3D del recorrido total del flujo hasta la depositación en la planicie del río Reyes y sobre el paraje El Hacha. La imagen satelital fue tomada del Google earth y corresponde al 25 de agosto de 2002.

precipitaciones, además de humedecer el material, aumentaron el caudal del arroyo. Todo esto contribuyó a que el material adquiriera la fluidez y plasticidad necesarias para movilizarse por la quebrada del arroyo aguas abajo.

En su trayectoria el flujo erosionó el pie de las laderas generando varios deslizamientos que aportaron mayor cantidad de material de diferente granulometría al flujo (Fig. 5).

Al momento de la llegada del flujo a la desembocadura en el cauce del río Reyes, éste corría aproximadamente por el centro de su planicie de inundación y, presentaba una terraza fluvial adosada a la defensa de hormigón de la margen derecha. Esta geoforma natural se encontraba vegetada, tenía cerca de 1 m de altura, y se hallaba a 1 m por debajo del borde

superior de la defensa (Figs. 6a, 6b y 7b). El flujo provino de la quebrada del arroyo del Comedero en dirección aproximada N-S, y al llegar al río Reyes cambió de dirección hacia el Este siguiendo la pendiente. El material transportado por el flujo ocupó el centro de la planicie de inundación del río Reyes, obligando al cauce del mismo a volcarse hacia el margen sur (Fig. 7a). La fuerza centrífuga del movimiento generó un desplazamiento de la masa hacia “afuera”, produciendo un aumento del volumen hacia el sur expresado en un aumento de espesor del depósito. Este hecho facilitó que el material sobrepasara en forma de “ola” a la terraza y a la defensa, invadiendo el predio El Hacha. Esta ola, según testimonios, se elevó más de 2 metros de altura por sobre la defensa. El material, constituido por una mezcla de barro y bloques medianos, transportaba por sobre su superficie bloques de mayor tamaño. Estos últimos también sobrepasaron hacia el área afectada, al igual que trozos de ramas de árboles de gran tamaño que también fueron acarreados hasta este lugar.

El flujo desbordó la defensa de hormigón a lo largo de 49 metros, tal como se observa sobre su arista externa. Allí se observa sobre su superficie bloques de mayor tamaño. Estos últimos también sobrepasaron hacia el área afectada, al igual que trozos de ramas de árboles de gran tamaño que también fueron acarreados hasta este lugar.

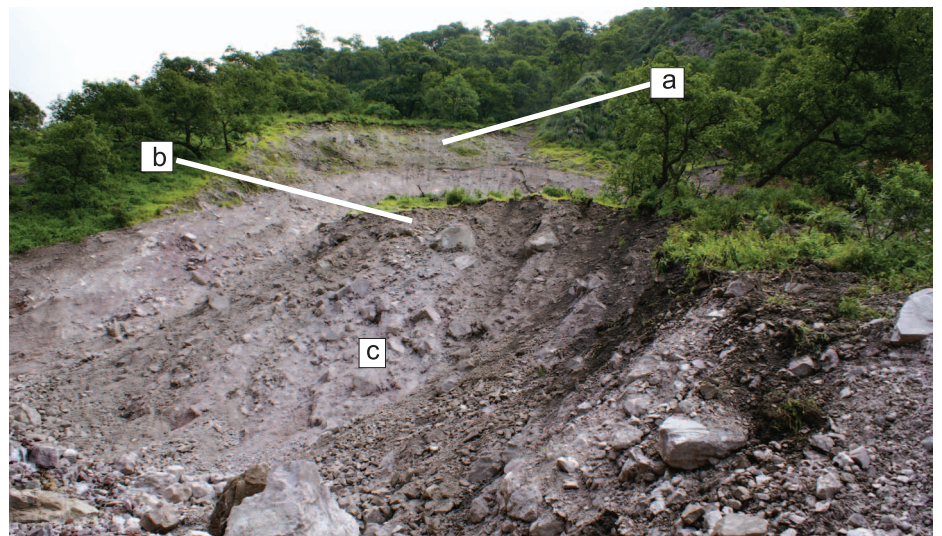


Figura 4: Cabecera del deslizamiento de la margen izquierda del arroyo donde se generó el movimiento. Arriba se observa el escarpe principal (a), un macizo desplazado (b) y un escarpe secundario que denota la falta de material que se movilizó hacia el cauce (c).

que se atribuyen en este trabajo al choque de los bloques transportados por el flujo. Traspasada la defensa, la “ola” colisionó en principio con algunos árboles (Fig. 8), y luego una vez alcanzado el sector de construcciones, el flujo se dividió en dos al chocar con el vértice de una de las casas (Fig. 7d).

El cauce del río Reyes logró atravesar el material del flujo debido a su gran poder erosivo. La erosión eliminó la terraza en su tramo oeste dejando la defensa libre de sedimentos en su totalidad. Una fotografía tomada pocas horas luego del evento (Figs. 7e y f), deja ver que a pesar del gran volumen de material que atravesó el cauce del Reyes éste no llegó a formar un embalse y prontamente logró cortarlo para continuar su recorrido, aunque más al sur.

En el predio, el mayor volumen de rocas se depositó entre las casas y las piletas, mientras que el barro quedó en los laterales (casa del oeste) y en el frente que ocupó la cancha de fútbol. El resto del material fluyó por el cauce del río Reyes, y terminó de depositar su carga sólida antes de llegar al puente.

Finalmente, con maquinaria, la Dirección de Recursos Hídricos rectificó el cauce del río Reyes para evitar que el río descalce la defensa. Con las mismas máquinas acumularon el material y formaron albardones que encauzaron también las aguas del arroyo del Comedero (Figs. 7g y h).

DESARROLLO DEL TRABAJO

El trabajo de campo consistió en la medición y toma de muestras del depósito del flujo para poder estimar su volumen, velocidad, recurrencia y su clasificación. Además se realizaron observaciones tendientes a analizar su mecanismo y la ubicación del área de arranque del movimiento. Los testimonios de personas que se hallaban en el lugar afectado también brindaron datos útiles que sirvieron a los fines del trabajo.

En gabinete se digitalizó una imagen ASTER y se procesó el MED SRTM de 90 m de resolución espacial para la caracterización morfológica de la cuenca.

CARACTERÍSTICAS DEL DEPÓSITO

En el recorrido a lo largo de la quebrada se observó un volumen significativo de material inconsolidado dejado por el flujo en forma de terrazas o albardones. Asimismo se notó la presencia de depósitos similares infrayacentes, los cuales se han asociado con fenómenos similares previos. Tanto en las curvas de relleno como en tramos con menor pendiente, se midieron espesores variables de entre 20 cm y 180 cm de depósito. Los bloques de mayor tamaño encontrados ($>1 \text{ m}^3$ y de hasta 12 m^3) se ubicaban en tramos anchos de la quebrada, o atrapados entre los arbustos (Fig. 9). El estudio de los perfiles sedimentarios del material depositado sobre el abanico mostró

que los espesores hacia la parte distal disminuían, correspondiéndose perfectamente con los perfiles longitudinales típicos de los flujos. La medición de los espesores en los perfiles transversales a los depósitos del lóbulo indicó un aumento considerable en el lateral sur. Estos espesores, además de la configuración en planta del depósito, ayudaron a construir la hipótesis de trabajo que plantea que, al cambiar de dirección de movimiento el material se desplazó por fuerza centrífuga, generando un perfil transversal asimétrico.

Cuando se realizaron las observaciones, 4 días después de ocurrido el evento, se midieron espesores variables (0,22 m a 2,76 m) de una masa de detritos medianos a pequeños inmersos en una matriz de material fino y húmedo. Por encima de este depósito se encontró un manto de hasta 30 cm de espesor de bloques medianos a grandes sin matriz. Esta es otra evidencia característica de los flujos que en su mecanismo de movimiento selecciona el material y parte de él se transporta por sobre el resto de la masa.

Se tomaron tres muestras que fueron analizadas en el laboratorio de la Dirección Provincial de Vialidad de Jujuy. Los datos arrojaron valores de índice de plasticidad mayores a 10 (Cuadro 2).

CÁLCULO DE LA VELOCIDAD

La velocidad es una de las variables necesarias para caracterizar un flujo y calcu-



Figura 5: Vistas de deslizamientos a lo largo de la quebrada del arroyo. Estos movimientos aumentaron el caudal sólido del flujo, aportando grandes bloques de cuarcita, bloques medianos de areniscas, material poco consolidado de las unidades superficiales, y materia orgánica de diferente porte.



Figura 6: a) Se observa la terraza fluvial del río Reyes adosada a lo largo de toda la defensa, dos días antes del evento. b) Vista panorámica de la terraza luego del evento. A la izquierda de la fotografía se observa la terraza fluvial vegetada, mientras que a la derecha está erosionada. Se distingue además el cambio del curso del río recostado hacia el sur, contra la defensa. (Fotos del Ing. Pablo Agüero)

lar esfuerzos de impactos. Para estimarla se utilizaron ecuaciones que relacionan magnitudes medibles en el campo, que responden a estimaciones empíricas. Estos cálculos se realizaron en determinados puntos del cauce de la quebrada del arroyo del Comedero y, se utilizaron para la representación general. La velocidad fue calculada en cuatro estaciones diferentes (Cuadro 3) sobre la quebrada del arroyo a partir de la ecuación de Hungr *et al.* (1984), siendo

$$v = ((\Delta h \cdot r \cdot g) / j \cdot b)^{0.5}$$

Donde *v* = velocidad del flujo; Δh = diferencia de altura del depósito entre puntos 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 súper elevación (derrame) y *j* = coeficiente de corrección (que se asumió 1 con el fin de obtener un resultado conservador).

Estos parámetros se midieron cuando en el trayecto del flujo había curvas lo suficientemente cerradas como para producir súper elevación del flujo en la parte externa de la curva en relación a la parte interna. La velocidad promedio obtenida del flujo se acerca a 6,2 m/s. Regionalmente coincide con las velocidades medidas en otros eventos de la cuencas del río Grande (Gonzalez *et al.* 2008).

CÁLCULO DEL VOLUMEN

El volumen de material considerado está conformado por los depósitos que el flujo dejó a lo largo de la quebrada, el material que constituyó el lóbulo distal sobre la planicie del río Reyes, y el depositado en el paraje El Hacha.

Para la estimación se realizaron mediciones directas y estimaciones del volumen máximo probable. Estas últimas se obtuvieron por medio de la relación entre la descarga

total (*V*) y el caudal pico (*Q_p*) y la relación de producción de material por unidad de área de cuenca. El *Q_p* es aquel que atraviesa el área máxima de la sección transversal del canal (*m²*) con la velocidad máxima.

Las mediciones directas de campo arrojaron un volumen de $6,8 \times 10^4 \text{ m}^3$, que lleva a una estimación de producción de detritos por área de $1,8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$. Este cálculo se comparó con el volumen máximo probable obtenido a partir de las ecuaciones de Mizujama *et al.* (1992) y de Bovis y Jakob (1999) que se basan en la relación entre el volumen o la descarga total (*V*) y el caudal pico (*Q_p*) (Cuadro 4).

CRONOLOGÍA DE LOS FLUJOS OCURRIDOS EN LA QUEBRADA

En la quebrada del arroyo del Comedero se hallaron depósitos que se pueden

CUADRO 2: Límites Atterberg (LL: Límite Líquido; LP: Límite Plástico; IP: Índice de Plasticidad), humedad y clasificación de las muestras tomadas en el lóbulo del flujo, en su parte distal (5-6), media (8), y apical (10).

Muestra	LL	LP	IP	Humedad	SUCS	
5-6	27,30	16,13	11,17	6,9%	GP - GC	Grava mal gradada con arcilla
8	27,40	14,58	12,82	7,0%	GP - GC	Grava mal gradada con arcilla y arena
10	26,90	16,49	10,41	9,7%	GP - GC	Grava mal gradada con arcilla y arena

CUADRO 3: Cálculo de la velocidad del flujo en distintas estaciones medidas a lo largo del recorrido según la fórmula de Hungr *et al.* (1984).

$v = ((\Delta h \cdot r \cdot g) / j \cdot b)^{0.5}$				
Estación	Δh (m)	<i>r</i> (m)	<i>b</i> (m)	<i>v</i> (m/s)
E 6a	5	19,3	25	6,15
E 6b	1,6	19,3	25	3,48
E 12	1,5	108,9	26	7,85
E 14	4	32,2	23,52	7,32

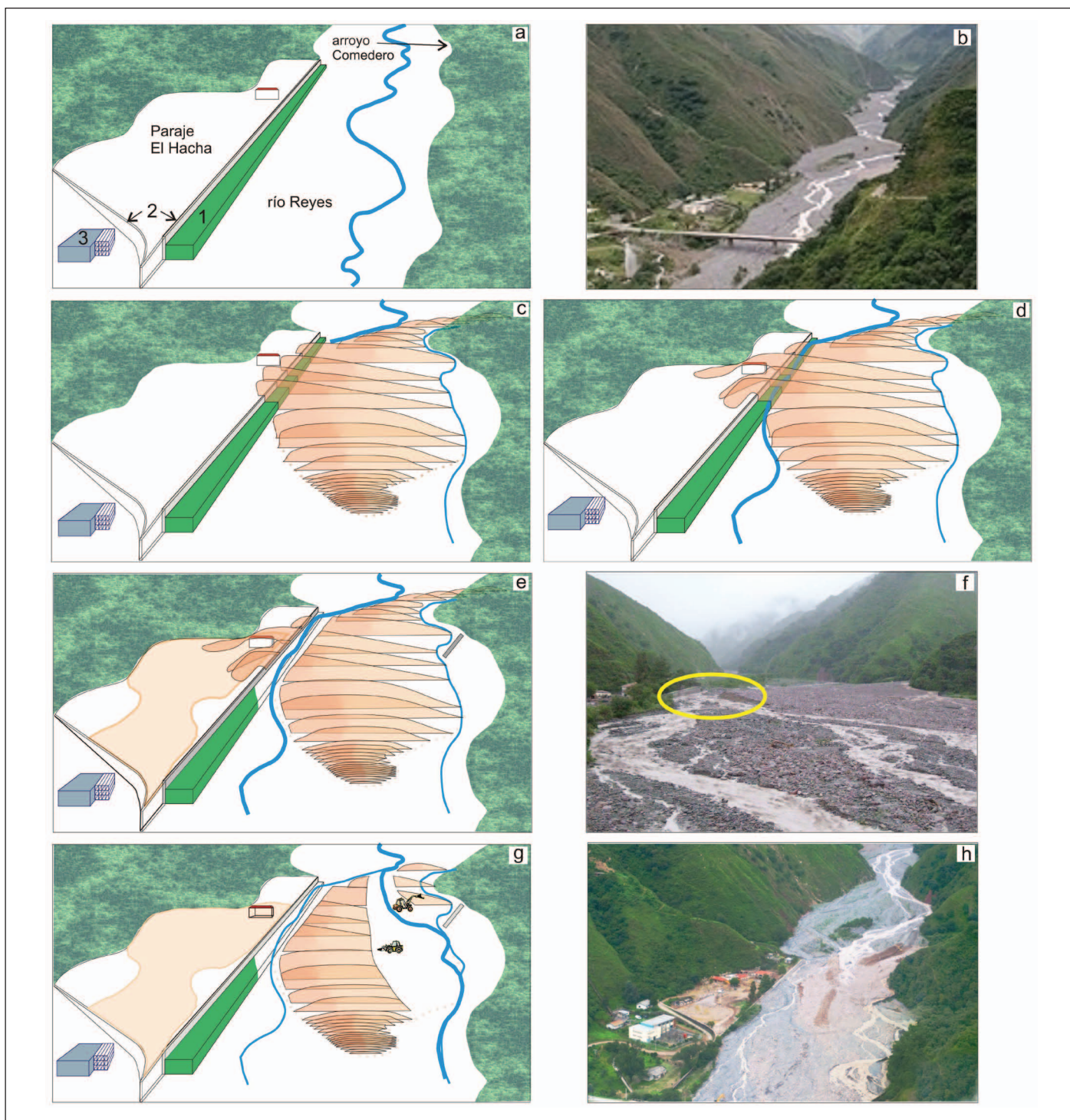


Figura 7: a) Situación 1 o previa. Esquema de la situación previa a la llegada del flujo, al cauce del río Reyes. Se señala la ubicación de: la terraza adosada a la defensa marginal que se extendía a lo largo de la misma (1), el Paraje El Hacha rodeado de defensas de mampostería (2); la usina (3); y la desembocadura del arroyo del Comedero. b) Obsérvese el curso del río Reyes sobre el centro de su planicie y la extensión de la terraza fluvial. c) Situación 2. El flujo cambia de dirección hacia el Este y la fuerza centrífuga desplaza el material hacia el sur. Nótese los perfiles de las secciones del lóbulo frontal. El depósito además fuerza a cambiar el curso del río Reyes y el cauce del arroyo del Comedero aumenta considerablemente su caudal. d) Situación 3. El material sobrepasó la terraza y la defensa. e) Situación 4. El flujo depositó todo su material más grueso y dejó fluir el barro con material más fino hacia la cancha, drenando por el conducto que se encuentra entre la intersección de la defensa marginal del río y la transversal. El barro continuó pendiente abajo por el lateral de la defensa marginal. f) Fotografía tomada aproximadamente cuatro horas después del evento donde se observa cómo el río Reyes erodó el tramo oeste de la terraza y cortó el sur del lóbulo distal. g) Situación 5. El lóbulo siguió movilizándose por la planicie del río Reyes y su depósito no alcanzó el puente. h. Vista aérea capturada luego de ocurrido el evento ya se observan los trabajos realizados con la maquinaria. Esta foto fue tomada por autoridades provinciales y cedidas por Protección Civil.

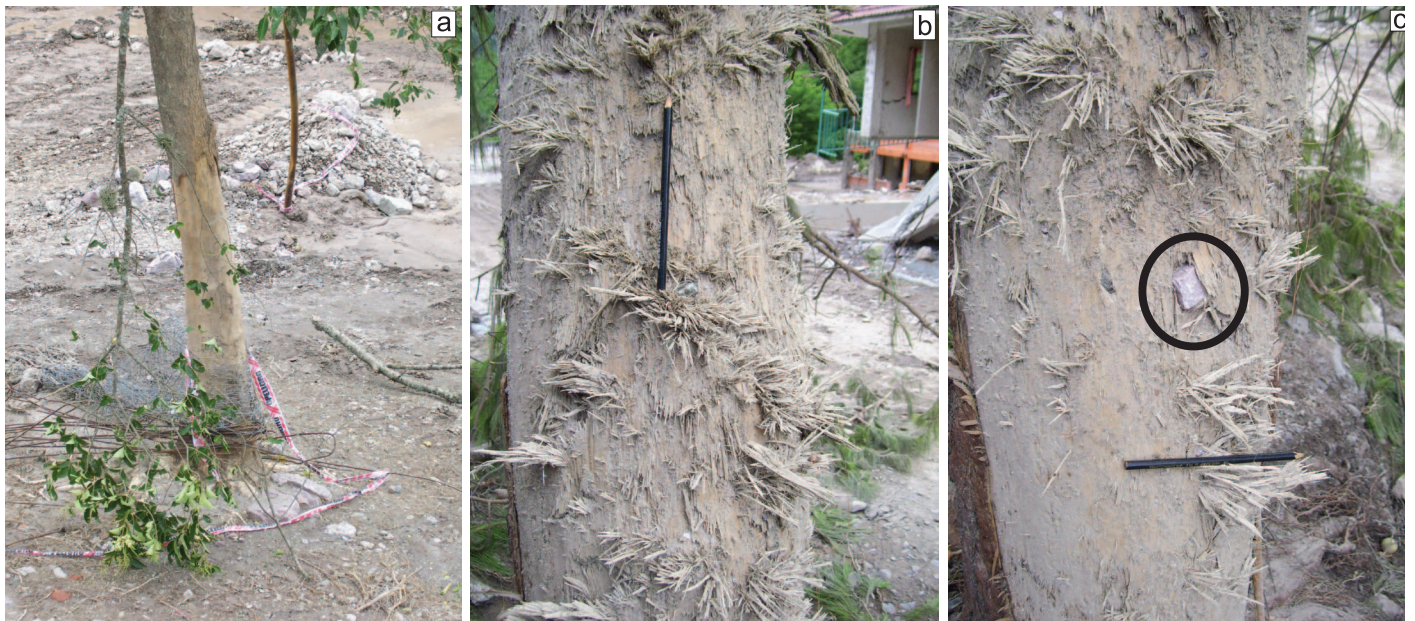


Figura 8: Imágenes de los efectos sobre los troncos de los árboles por el choque del flujo. a) Árbol que se encuentra alejado de la defensa al cual el paso del flujo, además de quitarle la corteza de su base, dejó “abrazado” un alambre tejido que rodeaba la casa que se encuentra más al oeste del predio. b) Muestra un árbol que está ubicado al lado de la defensa. A este no solo lo descortezó, sino que le generó astillas y le dejó incrustados clastos (c).

asociar con varios eventos previos, probablemente de características de similares al actual. Esto sugiere la recurrencia de este tipo de flujos en la quebrada.

La cronología de los flujos más antiguos se basa, en este caso, fundamentalmente en la estratigrafía. En algunos sectores del cauce se encuentran secuencias de distintos depósitos de flujos. Algunos de ellos presentan la particularidad de preservar restos de la vegetación que creció sobre su superficie cuando estaban expuestos. Esto nos da idea del tiempo que transcurrió entre uno y otro evento (que generalmente son eventos de gran magnitud para quedar preservados). Tal como se observa en la figura 10, sobre el nivel 1 (más antiguo) crecieron por lo menos tres árboles de los cuales hoy se observan los restos de sus raíces y la base de sus troncos. Algunos de ellos, como el que se observa en la fotografía inferior, sufrieron embates de flujos posteriores que incrustaron sus bloques en ellos.

Considerando el período de crecimiento que tienen estos árboles (aún en investigación), se puede estimar el tiempo transcurrido hasta la depositación del otro gran depósito de flujo que llegó al nivel 2. Este período podría oscilar en 5

años aproximadamente. Por encima de este nivel, hoy crecen árboles semejantes, con respecto al porte de sus troncos. Estos también hoy sufren los golpes de los bloques como puede observarse en la fotografía superior de la figura 23; allí una parte del flujo se sobreelevó al nivel 2 dejando su depósito con bloques acumulados entre los troncos. El resto del flujo corrió por el cauce y relleno depresiones como se observa en la fotografía central. La recurrencia de los eventos es necesaria para cualificar la magnitud de los mismos. Según la escala de probabilidades semicuantitativa de Hungr (1997), los registros dan un rango de probabilidad de producirse y de lo que ello significa. Regionalmente en la Cordillera Oriental

la probabilidad es alta ya que ocurren entre 1/20 y 1/100 (1 evento cada 20 a 100 años). Particularmente, en muchos lugares (como podría ser este) el rango anual es > 1/20 por lo que la probabilidad de ocurrencia es muy alta.

No se encontraron registros históricos documentados de anteriores flujos en esta quebrada, pero sí hemos recibido comentarios de pobladores. La diferencia de los flujos anteriores con respecto a este radica en la distancia de recorrido. Los anteriores apenas llegaban a la playa del río Reyes, y a los alrededores de las plantaciones que se encuentran en las inmediaciones.

De acuerdo con testimonios de antiguos trabajadores de la Usina sería factible

CUADRO 4: Comparación de las estimaciones de los volúmenes obtenidos con las ecuaciones de Bovis y Jakob (1999) y Mizujama et al. (1992) utilizando el Qp. En la última columna se comparan con los valores medidos en el campo.

Qp (m3/s) Entre todas las estaciones medidas	V (m3) V=338Qp0.99 (Bovis y Jakob 1999)	V (m3) V=795Qp0.85 (Mizujama et al. 1992)	Cálculo por mediciones directas de campo
Promedio=165,9	5,3x104	6,1x104	6,8x104 m3
Máx=326,5	1,0x105	1,1 x105	
Min=139,2	4,4x104	5,3x104	



Figura 9: Vistas de diferentes tipos de depósitos del flujo, según su posición y tamaño. a) Depósitos en las curvas del tramo medio del arroyo donde se observan bloques medianos por encima de los levees producto de la súper elevación. b) Depósito caótico con mega bloques en el tramo inferior del arroyo donde debido al ensanchamiento de la playa y la disminución de la pendiente, la energía de transporte es muy baja. c) Bloques atrapados entre los arbustos en el tramo inferior del arroyo.

considerar una mayor recurrencia de flujos densos a lo largo del río Reyes. Por ejemplo, durante la construcción de la Usina (1958 aproximadamente), ocurrió un flujo que cubrió parte de la obra, y luego de su puesta en funcionamiento (1963 aproximadamente) volvió a suceder. Esto motivó que la empresa construyera la defensa lateral sobre la margen sur del río Reyes para preservar la Usina. Esta defensa, luego del aumento del nivel de base por efecto de la colmatación del dique los Molinos, fue elevada hasta la altura actual. Otros comentarios indican que en enero del 2005, se perdieron 200 corderos por un flujo del río Reyes.

Así, las evidencias estratigráficas junto con los testimonios de pobladores locales nos llevan a considerar que en esta zona la probabilidad de eventos de flujo es alta.

CONCLUSIONES

La génesis, el mecanismo de movimiento y las características del depósito, con una matriz que presenta un $IP > 5$, permitió clasificar el movimiento de acuerdo con Hungr *et al.* (2001) como flujo de barro.

La velocidad promedio obtenida de 6,2 m/s es característica de estos tipos de flujos y, se lo clasifica como movimiento rápido a extremadamente rápido (WP/WLI 1995).

Para cualificar la magnitud, se analizó la recurrencia de los eventos. Según la escala de probabilidades semicuantitativa de Hungr (1997), los registros dan un rango de probabilidad de producirse y de lo que ello significa. Regionalmente en la Cordillera Oriental la probabilidad es Alta ya que ocurren entre 1/20 y 1/100 (1 evento

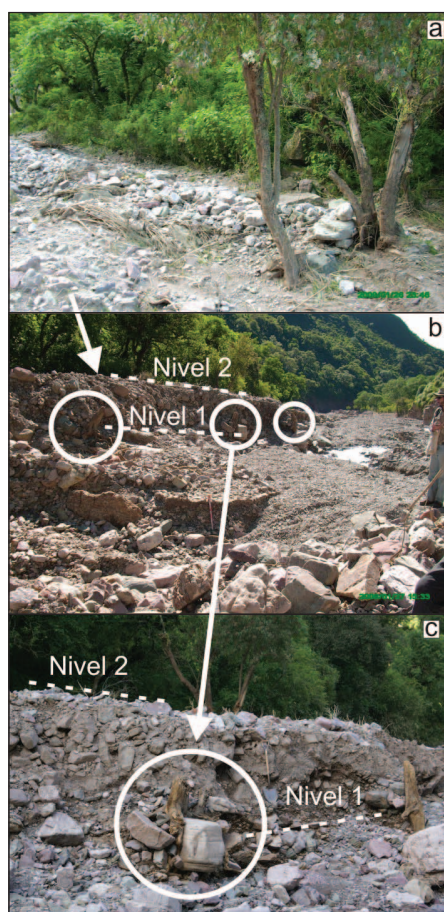


Figura 10: Evidencia de superposición de distintos eventos de flujos. a) Vista de los bloques producto de la súper elevación al nivel 2 atrapados entre los arbustos. b) Imagen de cauce del arroyo donde se observan dos niveles de depósitos de distintos flujos. Sobre el nivel 1, se distinguen 3 ejemplares de arbustos que conservan su raíz y parte de la base de sus troncos. Estos fueron parcialmente sepultados por el flujo del nivel 2 y dan una idea estimada del tiempo transcurrido entre la depositación de los dos niveles. c) Detalle de uno de los ejemplares de arbustos en el que se observan señales de daños por el golpe de los clastos, y el tamaño de los bloques del depósito del nivel 1 sobre el cual se implantaron las raíces.

cada 20 a 100 años). Particularmente, en muchos lugares (como podría ser este) el rango anual es $> 1/20$ por lo que la probabilidad de ocurrencia es muy alta.

Jakob (2005) sugiere una clasificación de la magnitud del flujo en relación al volumen. En nuestro caso, la magnitud del orden de 10^4 m^3 lo ubica dentro de la clase 4, lo cual determina la potencialidad de destrucción parcial de poblados, infraestructura de rutas y puentes y bloqueo quebradas.

Para este tipo de eventos, es de suma importancia contar con datos pluviométricos de la zona para poder correlacionar el factor desencadenante con el proceso y diseñar así un sistema de alerta temprana. En la región, al desactivarse el sistema de toma de datos que se efectuaban en las estaciones ferroviarias, es muy difícil realizar esa tarea.

La cuantificación y calificación de los flujos son una herramienta importante para los ingenieros que realizan obras sobre los cauces de los ríos y diseñan las obras de mitigación.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Ing. Pablo Agüero y a Protección Civil de Jujuy por ceder gentilmente material fotográfico; al Ing. Américo Wills Pedraza (Empresa Jujeña de Energía Sociedad Anónima) por facilitar el acceso a datos pluviométricos y por el préstamo de material fotográfico; a la Lic. Eugenia Wright por proporcionar el modelo digital de terreno y, finalmente, a las personas que brindaron su testimonio del suceso que vivieron.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Bianchi, A.R. y Yañez, C.E. 1992. Las Precipitaciones en el Noroeste Argentino. 2da Ed. INTA EEA, SALTA.
- Bovis, M.J. y Jakob, M. 1999. The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity. *Earth Surface Processes and Landforms* 24: 1039-1054.
- Campos, A. 1999. Proceso de Ciclo Hidrológico. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 2a. ed. San Luis Potosí, México. 117 p.
- 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, Italia.
- Dirección de Recursos Hídricos de la Provincia de Jujuy. Datos pluviométricos de la estación Termas de Reyes. San Salvador de Jujuy. Inédito.
- Dirección de Recursos Hídricos de la Provincia de Jujuy. Datos pluviométricos de la estación Villa María. San Salvador de Jujuy. Inédito.
- Empresa Jujeña de Energía Sociedad Anónima. Datos pluviométricos, usina hidroeléctrica Termas de Reyes. San Salvador de Jujuy. Inédito.
- 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. Relatorio del 17 Congreso Geológico Argentino, Asociación Geológica Argentina*. 4: 443-464, Buenos Aires, Argentina.
- Hungr, O., 1997. Some methods of landslide hazard intensity mapping. En: *Proceedings of Landslide Risk Assessment – International Workshop on landslide risk assessment, Honolulu, 19-21 February 1997*, Fell, R. and Cruden, D.M. Cruden (ed). A.A. Balkema. p. 215-226. Rotterdam.
- Hungr, O., Morgan, G.C. y Kellerhals, R. 1984. Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. *Canadian Geotechnical Journal* 21: 663-677.
- Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M.J. y Hutchinson, J.N. 2001. A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience* 7: 221-238.
- Jakob, M. 2005. Debris-flow hazard and analysis. En: *Debris flow hazards and related phenomena*. Jakob, M. y Hungr, O. (Eds.). Springer-Praxis books in geophysical sciences, p. 411-443, Chichester, United Kingdom.
- Mizuyama, T., Kobashi, S. y Ou, G. 1992. Prediction of debris flow peak discharge, *Proceedings of Symposium Interpraevent*, 4: 99-108, Bern, Switzerland.
- Strahler, A.N. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions of the American Geophysical Union*, 38: 913-920.
- 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: 11 de febrero, 2012

Aceptado: 23 de abril, 2012