

La avalancha de rocas del "Potrero de Leyes", Sierras Pampeanas australes, sierra Grande de San Luis, Argentina (32° 30' lat. S)

Emilio F. GONZALEZ DIAZ¹, L. FAUQUE¹, C. COSTA², A. GIACCARDI²,
P. A. de PALOMERA¹ y F. PEREYRA¹.

¹*Departamento de Ciencias. Geológicas, Facultad de Ciencias. Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Ciudad Universitaria, Pabellón 2, 1428 Buenos Aires.*

²*Departamento Geología y Minería, Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas y Naturales, Universidad Nacional de San Luis, Chacabuco y Pedernera, 5700 San Luis.*

ABSTRACT. *Rock avalanche of "Potrero de Leyes" southern Sierras Pampeanas, Sierra Grande of San Luis, Argentina (32° 30' S lat.).* The first rock avalanche to be identified in the southern Sierras Pampeanas is described here and its origin analysed. It is located in the northern sector (Cordón El Realito) of the San Luis fault scarp, which marks the western slope of the Sierra Grande de San Luis. It is suggested that the avalanche was triggered by seismic shock, a hypothesis supported by the seismotectonic and geologic conditions of the region as well as by the records of historical seismicity and by the recognition of modern fractures, scarplets and springwater spots in the piedmont area. Several other geological factors also support this suggestion, such as joint density, main shear zone location, attitude of the internal structure of granitoids and other nearby gravitational movements. The primary landforms of the avalanche landscape strongly suggest that the event was a recent one. The estimated speed is about 190 km/hour.

Introducción

Entre los movimientos gravitacionales inducidos por sismos, las avalanchas de rocas se cuentan entre los más peligrosos y perjudiciales. Para ello, enormes volúmenes de masas rocosas, carentes inicialmente de mayor desagregación, caen o se deslizan a lo largo de las abruptas y elevadas pendientes de montañas o serranías, desagregándose al pie de ellas, para movilizarse como verdaderos "ríos de fragmentos rocosos".

La energía cinética necesaria para su traslado por largas distancias es alcanzada por medio de esa fase previa de la caída vertical, ocurrida en una zona de "arranque". Su alto poder destructivo está sustancialmente vinculado con el enorme volumen detrítico involucrado ($> 0,5 \times 10^6 \text{ m}^3$; Keefer 1984a) y su capacidad de desplazarse a velocidades del orden de los cientos de kilómetros por hora.

En nuestro país, recién en la década de 1980 se ha reconocido la importancia de los fenómenos del proceso de la remoción en masa. Existen escasos antecedentes sobre éstos aspectos de la geología catastrófica. Entre los más significativos vale señalar aquellos de Groeber (1916), Harrington (1946), Polanski (1961, 1966). Más recientemente, Fauque (1987) y Fauque y Strecker (1988), se refieren particularmente a avalanchas de

rocas en las Sierras Pampeanas septentrionales; Pereyra y González Díaz (1993), relacionan el diamictón de Punta de Vacas, Mendoza ("Morena de los Horcones"), con un deslizamiento que por su magnitud es comparado con una avalancha de rocas. González Díaz y Mon (1996), interpretan que el origen de las lagunas de Yala (Jujuy) está vinculado al relieve resultante de acumulaciones de una avalancha de rocas, descartando así un previo e informal consenso -no probado- de su génesis glaciaria.

En esta presentación se analizan y describen las características morfológicas, la morfometría, la dinámica del movimiento y el promotor de una avalancha de rocas ocurrida sobre la dilatada y escabrosa escarpa de falla que compone la pendiente occidental de la sierra Grande de San Luis, a la latitud de su tramo medio. Es el primer rasgo morfológico de ésta índole que ha sido concretamente identificado en las Sierras Pampeanas australes. Los antecedentes previos (Pastore y González 1954; González 1957) no mencionan su presencia, a pesar de su volumen y la forma anómala en que interrumpe la continuidad de la citada escarpa de falla a la latitud del Potrero de Leyes.

Se estima que los resultados expuestos serán de sumo interés para un mejor entendimiento de la distri-

bución e importancia alcanzada por la neotectónica en la región. También facilitarán una adecuada interpretación de la dinámica del movimiento y de sus causales, las que se consideran asociadas a la sismicidad del área y contribuirán al conocimiento sísmotectónico regional. Pese a la escasa densidad demográfica de su zona de influencia, se define esta parte del territorio puntano como proclive a "riesgos naturales", vinculados a la remoción en masa. El reciente hallazgo algo al norte de la avalancha del Potrero de Leyes de otra avalancha de rocas más antigua -dado su mayor grado de degradación- ratificaría la recurrencia local del fenómeno a través de los tiempos geológicos recientes.

Ubicación del área de estudio

En la Fig. 1 se expone su situación aproximada. Se ubica a unos 15 kilómetros al noreste de la localidad de San Francisco, en el norte de la provincia de San Luis. La población de Leandro N. Alem (ex Los Corrales), se halla unos 5 kilómetros inmediatamente al oeste. Al sur y más cercano a la avalancha, se halla el pequeño poblado de La Majada. El paraje donde ocurrió el movimiento es conocido como "Potrero de Leyes". El acceso se realiza por caminos locales mejorados, lo que facilita la aproximación a la parte distal de la avalancha. Las únicas sendas que pudieron ser aprovechadas fueron aquellas que llevan al Agua del Bañado y a las Cuevas Chicas; ésta última permitió el acceso a la parte superior de la escarpa de arranque del movimiento.

Regionalmente se ubica en los 32° 30' de lat. S y los 66° 00' de long. O, prácticamente sobre los límites norte y sur -respectivamente- de las Hojas Geológicas (1:200.000) 23g (San Francisco) y 22g (Quines) de la ex Dirección Nacional de Minería.

Metodología

Se analizaron fotogramas a escala aproximada 1:22.000 del área y mediante su fotointerpretación (complementada por el examen de imágenes satelitales), se confeccionó un mapa geomórfico básico; ésta tarea fue objeto de un control de campo en dos campañas. Para determinar en detalle aquellas diferencias altimétricas locales consideradas de interés, se utilizó un altímetro en lapsos no mayores a una hora, para evitar errores derivados de los cambios de presión. Los mapas topográficos a escala 1:20.000 editados por el Catastro Provincial de San Luis fueron útiles para definir ciertos parámetros morfométricos de la avalancha de rocas y las citadas Hojas Geológicas, para el entendimiento de las fundamentales características geológicas regionales.

Las tareas de campo, que comprendieron dos campañas (abril-mayo y noviembre de 1995), permitieron el análisis estructural local y regional de la zona. El muestreo y los exámenes macro y microscópicos de las litologías representativas de las formaciones involucradas en el movimiento gravitacional, complementaron el conocimiento del condicionamiento estructural preexistente. Para el cálculo de los volúmenes, las superficies y el perímetro de la "zona de arranque" y de "acumulación", luego de la digitalización de las cartas topográficas y trazado de poligonales, se utilizó el sistema SIG ILWS 1.4.

Marco geológico-geomorfológico

Las principales entidades geológicas y morfológicas

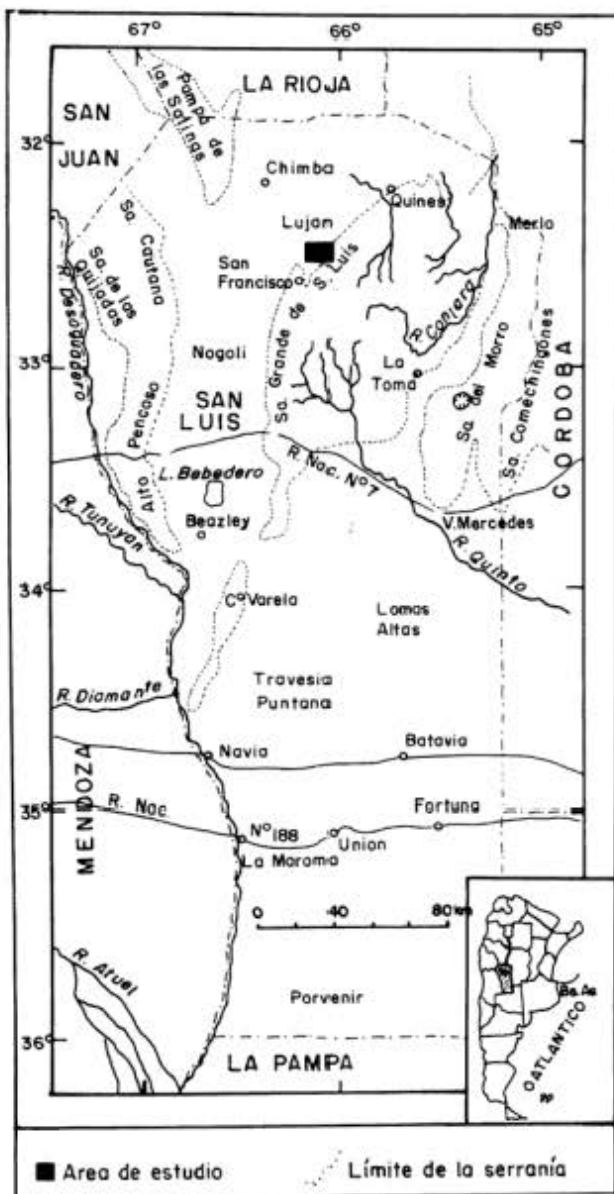


Figura 1: Ubicación del área de estudio.

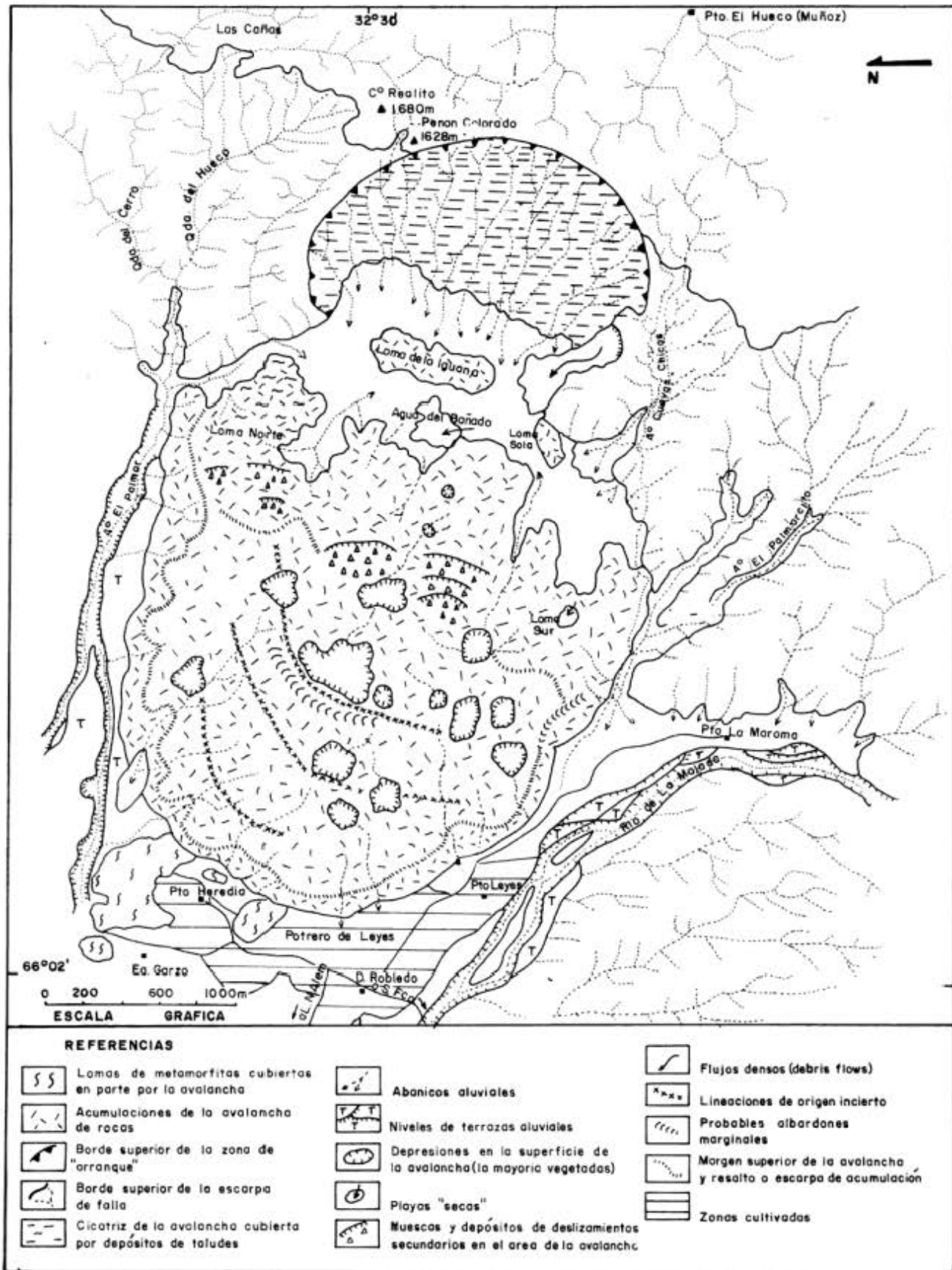


Figura 2: Mapa geomorfológico de la avalancha de rocas del Potrero de Leyes.

se hallan gráficamente expresadas en la Fig. 2. El examen abarcó una porción del tramo austral del cordón El Realito, que hacia el norte se prolonga hasta las cercanías de la ciudad de Luján.

1) Marco geológico

La entidad más antigua la componen metamorfitas, rocas-huéspedes de los posteriores intrusivos granitoides. Según Pastore y González (1954) y González (1957), integran un "Basamento Cristalino" al que le asignaron una incierta edad que oscilaba entre el "Proterozoico inferior y el medio". Sus rocas más representativas, de acuerdo a estos autores son micacitas, esquistos finos sericíticos, filitas y micacitas cuarzosas, con orientaciones en sus rumbos que tienen variaciones locales entre N-S y los 20°-30° al NO, e inclinación dominante al E. Las asomos de estas metamorfitas (unas aisladas y bajas lomadas cuya altura no supera los 30 metros), aparecen cubiertas en parte por las acumulaciones de la avalancha en su porción distal. Se sitúan al norte y al sur del puesto Heredia y las integran, respectivamente, esquistos cuarzo- micáceos (N-S, 55° E) y una asociación de estas metamorfitas y esquistos biotíticos con diversos grados de inyección cuarzo-feldespática (N 55° O, 70° O).

Otros asomos menores aparecen cercanos al camino entre la casa de Dámaso Robledo y el acceso a la antigua ruta nacional n° 146; sus afloramientos individualizados al sur del río de La Majada son de gran continuidad y extensión, con marcada lineación hacia el norte y nornoreste y una disposición estructural que se hace más notoria por el carácter concordante de cuerpos filonianos, graníticos y pegmatíticos, cuya mayor resistencia a la erosión los hace sobresalir como *devil's walls* en el paisaje. Inmediatamente al sur del puesto La Maroma, se encuentran esquistos cuarzo-micáceos, profusamente invadidos por masas pegmatíticas (con núcleos de muscovita). La inyección es del tipo *lit-par-lit*. Hay dos sistemas de diaclasas principales: N 45° O, 70° SO y N-S, 7° O.

Los granitoides fueron inicialmente clasificados como "granitos" con su correspondiente séquito de rocas filonianas. Si bien se carece de suficientes dataciones radimétricas de las rocas graníticas de San Luis, Killmurray y Dalla Salda (1977) y Criado Roque *et al.* (1981), concuerdan en vincularlas a ciclos magmáticos paleozoicos. Recientemente, Brogioni *et al.* (1994), asignan a las dominantes tonalitas y a las granodioritas asociadas que componen el cordón de El Realito, una edad carbónica.

Los reconocimientos de campo y los posteriores exámenes microscópicos de seleccionadas muestras colectadas, han establecido que localmente hay un predominio de granodioritas biotíticas.

Existe un consenso general sobre la estructura regional de la sierra, la que habría adquirido las condiciones de una estructura de bloques rígidos a fines del Paleozoico, la que se vio elevada y desmembrada al final del Terciario, mediante un fallamiento inverso, de rumbo predominante norte-sur.

El principal ascenso de la sierra Grande de San Luis, que se expresa morfológicamente por medio de la escarpa estructural occidental, habría tenido lugar durante la denominada "Fase III", referida al límite Plio-Pleistoceno (Costa 1992). Otros bloques han sido basculados hacia el E, lo que determina en ellos una marcada asimetría morfológica transversal. Este aspecto se hace más notorio por la disposición inclinada que suele observarse en algunos remanentes de la superficie de erosión regional (peneplanicie) preterciaria.

Se han diferenciado dos facies en el complejo granítico según su grado de deformación soportado, la que fuera inducida por el tectonismo ándico cenozoico. Así se han diferenciado provisoriamente una facies "foliada" de apariencia milonítica, de otra considerada "normal". La primera predomina regularmente en los niveles inferior y medio de las estribaciones de la escarpa de falla; exhibe una marcada foliación y evidencias ópticas de haber sido sometida a fuerte deformación. En ocasiones su aspecto macroscópico suele remedar las características texturales de una migmatita. Tales particularidades ya fueron comprobadas por Pastore y González (1954) y por González (1957). Sobre el faldeo norte de la quebrada de El Palmar se identificaron granitoides con texturas cataclásticas típicas del dominio de la deformación frágil o semifrágil. Allí suelen hallarse en el granitoide "foliado" delgados niveles compuestos por "harina de falla", mientras que en otros sólo se advierte una fuerte pérdida de consistencia, que hace que la roca se desague ante la presión de los dedos.

Para Brogioni *et al.* (1994), el grado alcanzado por el granitoide durante su recristalización metamórfica corresponde a la facies de esquistos verdes, "con posterior deformación al estado sólido" por el desarrollo de una zona de cizalla. Un rasgo estructural sobresaliente para ambas facies es el fuerte fracturamiento y la alta densidad de diaclasas.

La facies granodiorítica "normal" se localiza principalmente en los tramos superiores de la escarpa estructural occidental de la sierra de San Luis. Aparentemente, los esfuerzos deformativos alcanzaron allí menor significación. Un buen lugar para observar las diferencias puntualizadas aparece en la quebrada de El Palmar, unos 2500 metros aguas arriba de la antigua represa (hoy destruida) que retenía las aguas para el regadío de los campos de la ex estancia Garzo. Hacia la afluencia de los arroyos El Hueco y del Cerro -un lugar a partir del cual tiene su origen el arroyo El Palmar- la facies "foliada" es reemplazada hacia los

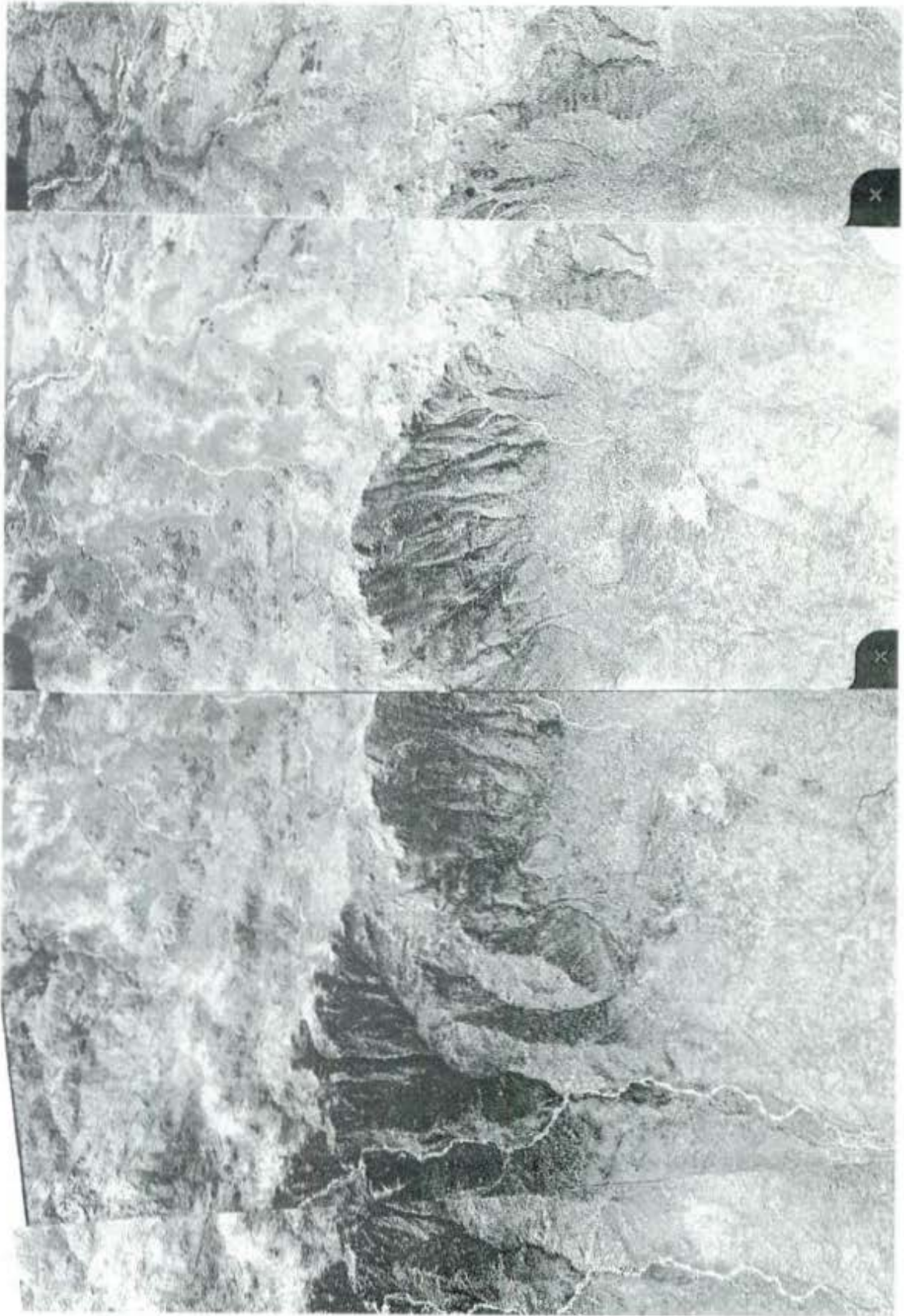


Figura 3: Armado estereoscópico de la zona de "arranque" de la avalancha.

niveles superiores por un granitoide macizo, de textura granosa. El valor asignado al ángulo de la falla inversa que desplazó el bloque serrano sobre el adyacente piedemonte, es generalmente estimado entre 35° E y hasta 50°. Los diques de pegmatitas y aplitas que alojan los granitoides son similares a los que intruyen las metamorfitas.

Las acumulaciones cuaternarias, de carácter clástico, corresponden a abanicos aluviales, en los que se diferencian dos generaciones temporales, una "antigua" y otra "moderna"; grandes bloques, rodados y arenas gruesas caracterizan su granulometría, derivada en gran parte de flujos densos (*debris-flows*), cuya procedencia corresponde a las cuencas del río de La Majada, de los Baños y del arroyo El Palmar, las que contribuyeron a la agradación que dio lugar a la amplia planicie aluvial pedemontana (bajada) occidental. Otra entidad, que cubre parcialmente a los abanicos "antiguos", está compuesta por sedimentos limo-arcillosos -parecidos a un loess- entre los que se intercalan arenas. Se supone que su origen es eólico-fluvial. Buenos perfiles se hallan en las escarpas de erosión del cercano río San Francisco.

2) Contexto tectónico

La escarpa occidental de la sierra de San Luis (falla de San Luis), donde se localiza la avalancha de rocas estudiada, constituye el frente de levantamiento andino de la sierra. Pese a que este frente ha sido tradicionalmente asociado con fallas inversas de alto ángulo (Pastore y González 1954; Flores 1969; Flores y Criado Roque 1972), las observaciones de campo más detalladas muestran que la inclinación en superficie de las principales zonas de cizalla andinas fluctúan entre 20° E y 50° E (Costa 1992, 1994). En la zona de trabajo se han medurado planos de fallamiento con actitud 35° E.

A lo largo de la falla San Luis, se han reconocido secciones con actividad cuaternaria (Costa 1992), testificadas por cabalgamientos del "Basamento Cristalino" sobre depósitos aluviales y coluviales cuaternarios. Algo al norte de la zona de la avalancha del Potrero de Leyes, en las cercanías del puesto Piedras Blancas, puede reconocerse una moderna escarpa de falla que afecta a material aluvial reciente (Caviedes Vidal 1990), cuya geometría de movimiento es desconocida. La avalancha de rocas aquí descrita está ubicada en un escalón que se observa en la geometría del frente montañoso, determinado por un *step-over* en la traza del mismo. Se desconoce la influencia de este rasgo en la ubicación del fenómeno. Tanto al norte como al sur de la avalancha de rocas del Potrero de Leyes, el piedemonte muestra alteraciones propias de recientes movimientos, bajo la forma de resaltos en los perfiles longitudinales de sus abanicos

aluviales, aquí diferenciados como "antiguos". Hay lineamientos estructurales, los que si bien no han sido definidos en el campo, son discernibles en la fotointerpretación. En ocasiones, la presencia de un alineamiento de la vegetación y su mayor densidad o la asociación de estos lineamientos con vertientes, permiten su propuesta. Algunas vertientes son de reciente data, como la de La Huertita, relacionada con el terremoto de Caucete (San Juan) de fines de noviembre de 1977. Se interpreta que estos rasgos están vinculados con la reactivación de antiguas líneas de debilidad estructural del "Basamento", hoy cubierto por las acumulaciones pedemontanas. Si bien se acepta que estos aspectos estructurales son muy modernos en tiempos geológicos, la actual falta de argumentos para una asignación temporal concreta a la avalancha de rocas del Potrero de Leyes, hace que impere la incertidumbre al respecto. Sus rasgos morfológicos primarios y su excelente estado de conservación, abogan por lo reciente del movimiento.

3) Bosquejo geomorfológico

Lo componen las siguientes unidades geomórficas:

a) *Escarpa estructural*. Constituye el abrupto resalto que margina la Sierra Grande de San Luis por el oeste; está muy modificada por la erosión, (estado maduro según el esquema davisiano). Tiene en la zona una altura promedio entre 600 y 580 metros. Extensos espolones, con agudas terminaciones inferiores y en forma de "filos", descienden desde el irregular borde superior serrano. La amplia bahía de la muesca de la avalancha de rocas interrumpe bruscamente la regularidad norte-sur de la escarpa.

b) *Avalancha de rocas*. Será analizada en detalle en párrafos posteriores.

c) *Abanicos aluviales (bajada)*. Constituyen el ambiente pedemontano al oeste de la avalancha de rocas. En ellos y sobretodo en sus zonas apicales predominan (85-90%) grandes bloques y rodados de granitoides, sobre los de metamorfitas (10-15%). En su construcción, los flujos densos (*debris flows*) han tenido importante participación.

d) *Terrazas fluviales*. Los valles del arroyo El Palmar y del río de la Majada, exponen evidencias del rejuvenecimiento del paisaje (influencia de la neotectónica?), que son expresadas por diversos niveles de estas geformas.

e) *Planicie loessoide*. Compone un manto de irregular espesor, generalmente delgado, de material limo-arcilloso, el que si bien cubre parcialmente la superficie de los abanicos aluviales, no llega a ocultar su morfología.

f) *Acumulaciones arenosas*. Carecen de morfología



Figura 4: Armado estereoscópico de la zona de acumulación de la avalancha.

definida; sus mayores espesores se observan en las cercanías de las planicies aluviales, en especial sobre las márgenes de barlovento, donde llegan a sepultar las escarpas de erosión de las terrazas fluviales.

g) *Antigua superficie de erosión regional ("Peniplanicie de San Luis")*. Es reconocible en la parte superior de la sierra. Se individualizan allí tramos de ella gracias a la comprobada concordancia de sus cumbres, a pesar de que la posterior degradación y el tectonismo han destruido su previa homogeneidad altimétrica y física. Sus remanentes tienen localmente una marcada coincidencia con la curva de nivel de los 1600 m s.n.m. Su diseño de drenaje varía entre rectangular-angular y rectangular, siempre condicionado estructuralmente (diaclasas, fracturas).

La avalancha de rocas del Potrero de Leyes

Sus acumulaciones componen un diamictón que cubre un área aproximada de 7,97 km²; una longitud este-oeste estimada para sus principales acumulaciones de 3,1 km y un ancho máximo de 2,6 km. Es fácilmente reconocible en los fotogramas e imágenes satelitales por su configuración lobulada y el engolfamiento producido por su escarpa de "arranque", la que interrumpe localmente la rectilínea regularidad de la escarpa de falla occidental de la sierra Grande de San Luis. No se observa en esta avalancha una zona media, de tránsito encauzado.

La descripción tratará primero a su sector de "arranque" del movimiento y posteriormente al de su acumulación en el piedemonte. Ambos se hallan separados por una depresión intermedia elongada, dispuesta transversalmente.

a) *"Sector de arranque"*. Sus principales rasgos se exponen estereoscópicamente en la Fig. 3. Su muesca o cicatriz se extiende prácticamente desde la quebrada del arroyo El Palmar (norte), hasta la del arroyo El Palmarcito (sur), un afluente del río de la Majada. Es excelente el grado de conservación de su morfología primaria. La cicatriz tiene una configuración cóncava hacia el oeste, en forma de un único y extenso

anfiteatro, limitado por dos largos espolones serranos marginales.

Su parte superior, compuesta por afloramientos rocosos de los granitoides, muy fracturados y con buenas superficies de planos estructurales (diaclasas), remata aproximadamente en la curva de nivel de los 1580 m s.n.m., en tanto que su pie, se halla situado en la de los 1000 m s.n.m. La altura de la escarpa de erosión producida por el deslizamiento alcanza en su parte media unos 580 metros de desnivel. La corona, irregularmente cóncava, tiene un perímetro calculado en unos 3000 metros. Por encima de ella aparece el paisaje disectado de la "Peniplanicie de San Luis".

Los perfiles longitudinales de los citados espolones serranos marginales son considerados como los exponentes de la pendiente original de la escarpa de falla en el punto donde ocurrió el desprendimiento de la masa rocosa. A diferencia de la regularidad que muestra la pendiente actual en la zona de la cicatriz, presentan dos marcados resaltos entre las curvas de nivel de los 1200-1100 m s.n.m. y también a la altura de la de 1400 m s.n.m. Tales irregularidades son adjudicadas a una erosión diferencial en ciertos sectores de la escarpa de falla que se supone coincidentes con líneas de debilidad estructural (fallas), originadas durante el movimiento del límite Terciario-Cuaternario. El valor promedio estimado para la pendiente del espolón norte es de 33°, en tanto que la del austral es de 36°. La inclinación media de la escarpa en la zona de "arranque" alcanza unos 52° y muestra variaciones en su valor a lo largo de su pendiente: por encima de los 1400 m s.n.m. tiene casi 60°; en su extensa porción media es de 45° y en la parte baja, ya cubierta por abanicos aluviales, alcanza los 20°-25°. El diseño de la red de drenaje que la recorre es paralelo, una consecuencia de la influencia de la fuerte pendiente allí existente. En los mencionados espolones es dendrítico, con cierto control estructural. El análisis de los sistemas de diaclasas de los granitoides allí aflorantes, permitió establecer la importancia de los mismos en el desarrollo del fenómeno, particularmente por el carácter de *dipping out* evidenciado por algunos (véase Fig. 7).

La parte media de la escarpa, aparece enmascarada por acumulaciones de taludes entre las que suelen sobresalir asomos rocosos dispersos. En cambio, la porción inferior desaparece bajo espesos depósitos de pequeños abanicos aluviales, de fuertes pendientes, en cuya génesis es clara la participación de *debris flows*, con sobresalientes albardones laterales. En el tramo central y más bajo de la escarpa, las acumulaciones de esos abanicos aluviales locales progradan hacia el oeste, sepultando parcialmente al aislado depósito de la avalancha que integra la loma de la Iguana. En el ámbito del espolón austral se hallan los abanicos aluviales más extensos en consonancia con la magnitud de sus respectivas cuencas de drenaje.

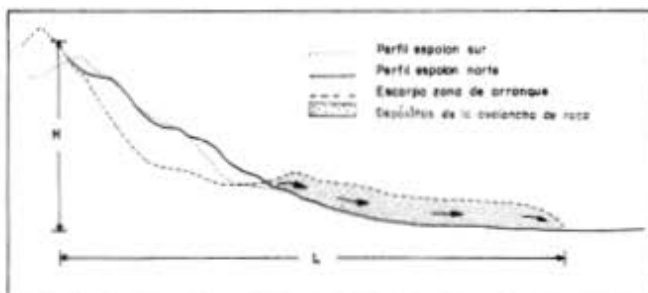


Figura 5: Perfil esquemático longitudinal de una avalancha y componentes H y L en la mecánica del movimiento.

b) *Zona intermedia.* Una alargada y amplia depresión, orientada norte-sur, separa el sector de "arranque" de aquel de la acumulación de la avalancha. Allí se halla el paraje conocido como Agua del Bañado, donde se localiza una pequeña playa "seca", la que en ocasión de las estacionales lluvias suele albergar una pequeña laguna efímera. El ámbito de la playa muestra un piso duro, compuesto por sedimentos finos limo-arcillosos (loess?), el que muestra cierta plasticidad al ser humedecido. Exhibe superficialmente un limitado sistema de pequeñas grietas resultantes de la desecación. Una vegetación arbórea (quebracho, algarrobo), muy raleada por la acción antrópica (deforestación para combustible), se halla concentrada en ese lugar.

c) *Sector de la acumulación de la avalancha:* (ver su estereoscopia en Fig. 4). En planta configura un lóbulo regular con forma de lengua. Es algo más extenso (3100 m) en el sentido del movimiento que en su ancho (2600 m). Su espesor aflorante ha sido promediado en unos 75 metros, un dato que resulta de numerosas mediciones de su altura en sus márgenes. A diferencia de otras avalanchas de rocas no sólo carece de un tramo de trayecto encauzado, sino también de los comunes albardones laterales.

Sus materiales aparecen dispuestos en dos áreas. La menor, está ubicada al pie de la escarpa de "arranque" y compone la loma de la Iguana, una aislada y baja elevación, elongada norte-sur, de unos 700 m de largo, 200 m de ancho y unos 60 metros de altura máxima, situada aproximadamente en la curva de nivel de los 900 m s.n.m. Su borde este prácticamente ha desaparecido bajo las acumulaciones distales de los abanicos aluviales locales del pie de la escarpa. Sobrepassando los extremos de la loma, éstos últimos

"derraman" sus materiales sobre la zona de la depresión intermedia, agradándola.

El área mayor y más elevada (alturas máximas en cota de 980 m s.n.m.), muestra su margen posterior u oriental precisamente limitada en el mapa topográfico a escala 1: 20.000, por la curva de nivel de los 920 m s.n.m. Su relieve exhibe la típica irregularidad superficial (*hummocky topography*) de las avalanchas de rocas. Numerosas son las depresiones individualizadas en este ambiente.

Se reconoce superficialmente la característica estructura de megabloques, entre los que se han observado medidas de 7 x 4 x 6 y volúmenes entre 150-200 m³. Los bloques son de formas irregulares, con caras o planos que responden a un control estructural previo (fracturas); sus bordes son agudos, aunque por efecto de la meteorización suele observarse una atenuación en sus aristas; también se hacen presentes cavidades u hoyos (bateas). La totalidad de los bloques corresponde a granitoides. No se pudo comprobar una gradación inversa en la acumulación, tan característica para este tipo de depósitos

La margen oriental o "contrafuerte" de esta parte de la avalancha exhibe pendientes abruptas (unos 40°), con un perfil convexo que alcanza casi la verticalidad en ocasiones. En los bordes norte y sur se tienen inclinaciones entre 50° y 45°.

En este área de la avalancha se pueden diferenciar dos sectores: uno oriental y el occidental. Un límite aproximado entre ambos está señalado por una brusca modificación de la altura absoluta de sus acumulaciones, lo que ocurre a partir de la curva de nivel de los 900 m s.n.m.; este hecho corresponde morfológicamente con una áspera e irregular escarpa de acumulación. Las lomas Norte y Sur (máxima cota de 980 m s.n.m.), se hallan al E de ella, la que ha visto degradada su morfología primaria a consecuencia de pequeños deslizamientos ocurridos en su frente. En esta área oriental son muy pocas las depresiones; se destaca una pequeña playa "seca", que se sitúa inmediatamente al sur de la Loma Sur. Al este de la loma Norte se individualizó una particular estructura de "corrugamiento", cuyo origen no ha sido interpretado.

El área occidental -que comprende esencialmente la zona distal de la avalancha- duplica la superficie de la anterior; se extiende entre las curvas de nivel de los 880 m s.n.m. y 800 m s.n.m. En ella la *hummocky topography* alcanza su más característica expresión morfológica, con una marcada concentración de las depresiones; si bien algunas muestran drenaje integrado, predomina el tipo centripeto, siendo corriente hallar en ellas una densa cubierta vegetal.

El análisis de los fotogramas ha permitido interpretar en dos parajes aislados, unos probables *levées* o albardones laterales (Fig. 2). Uno de ellos se hallaría sobre el lateral sur de la avalancha, a la altura

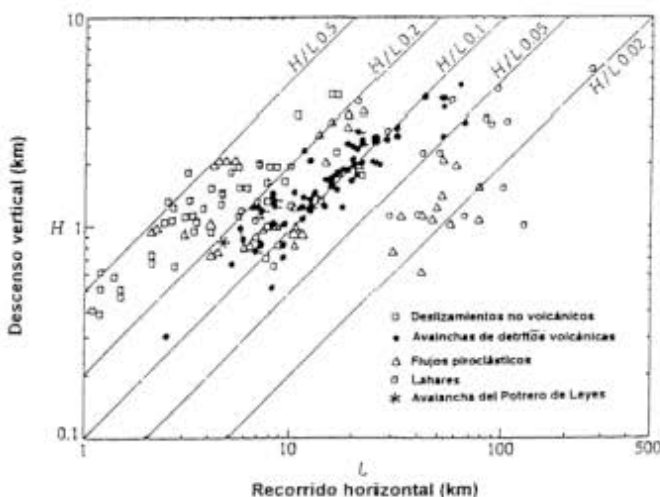


Figura 6: Relación H/L ("coeficiente de fricción aparente") entre distintos flujos (Francis 1993). Se señala la posición de la avalancha de rocas del Potrero de Leyes.

del puesto abandonado de La Maroma. El otro, de mayor longitud y mejor definición, se encuentra al lado de la mayor depresión observada. Forma allí un terraplén o albardón transversal suavemente curvado, con leve concavidad hacia el este y cierta asimetría transversal. En sus cercanías se distinguen tres lineaciones, dispuestas concéntricamente, de origen desconocido, siendo la mejor definida y de mayor extensión la marginada por el borde interno del citado terraplén. Las otras dos son más externas, muy reducidas y de pobre definición. La influencia de estas lineaciones, aparece reflejada en la adaptación de algunos tramos fluviales a su disposición espacial.

La presencia en el depósito de estos rasgos elongados dispuestos transversalmente a la dirección del movimiento, sugiere que con posterioridad a la detención del tramo distal del movimiento, pudieron ocurrir "cabalgamientos" en la masa.

La altura en los bordes de la avalancha es variada, oscilando entre un valor máximo estimado en 90 metros (en el primer tramo de la huella a Cuevas Chicas), hasta 65 metros frente al puesto Heredia. En su zona basal se encuentran reducidos abanicos aluviales correspondientes a pequeñas cuencas de drenaje del área occidental.

Al pie de la avalancha, en las cercanías del puesto Heredia, hay unas bajas lomititas -compuestas por metamorfitas- que han sido parcialmente cubiertas por los depósitos de la avalancha y cuya altura ha sido estimada entre 25 y 30 metros. Este hecho es interpretado como un fenómeno de *run-up* o "trepada" de la avalancha de rocas sobre un obstáculo del relieve preexistente.

Mecánica y movilidad de la avalancha de rocas

La mecánica de movimiento propuesta para

avalanchas de roca como la del Potrero de Leyes, incluye dos componentes: una con predominio de movimientos verticales, que implica una caída o desprendimiento de un gran volumen de roca que arranca del frente montañoso; la otra componente con predominio de movimientos horizontales, corresponde al posterior flujo de la masa movilizada sobre el piedemonte (Fig. 5).

Estos desplazamientos verticales (H) y horizontales (L), se relacionan a través del "coeficiente de fricción aparente" (H/L), definido por Ui (1983). En la Fig. 6, tomada de Francis (1993), se puede observar la relación entre estos parámetros para un gran número de movimientos correspondientes a distintos tipos de flujos. Incluye la situación de la avalancha del Potrero de Leyes.

Para pequeños deslizamientos el coeficiente de fricción aparente es de 0,6. Esto implica que la masa movilizada puede viajar 166 m horizontalmente, por cada 100 m que desciende verticalmente.

Las grandes avalanchas tienen mayor movilidad y esto queda bien ejemplificado en el movimiento del Potrero de Leyes, cuyo coeficiente equivalente de fricción es de 0,18, resultado de una altura de caída de 850 m y de una distancia de recorrido (*traveled distance*) de 4600 m.

Esto significa que la masa ha recorrido aproximadamente 555 m por cada 100 m de descenso vertical. Esta gran movilidad de las avalanchas, aparentemente anómala, requiere algún tipo de fluidización que disminuya la fricción y favorezca el movimiento.

La fluidización de la masa movilizada ha suscitado muchas reflexiones y discusiones. Algunos de los primeros que trabajaron sobre el tema, tales como Shreve (1968) y Kent (1969) propusieron una "fluidalización atmosférica", por el aire atrapado durante la primera etapa de caída, el que actuaría como un "colchón de aire" o fluido interpuesto en la



Figura 7: Vista del área de la escarpa de "arranque" desde el espolón sur. Se pueden observar sistemas de diaclasas y fracturas con carácter de *dipping-out*.

masa (*cushion fluid*). Se reduciría así el coeficiente de fricción, permitiendo a la masa rocosa recorrer largas distancias. Ambas teorías han sido minimizadas por la presencia de avalanchas de roca en la Luna y en Marte, la primera sin atmósfera y la segunda con una atmósfera delgada y parcial.

Eliminado el argumento de la fluidización atmosférica, se recurre a la alta energía de las avalanchas de roca. Heim (1932) proponía que la energía cinética de la caída de la masa rocosa, se conserva en "colisiones de alta energía" entre los fragmentos pulverizados por el desprendimiento inicial. La energía transformaría a la masa en una corriente de bloques que colisionando entre sí, se desplazarían a gran velocidad "flotando" en un mar de fragmentos de roca y polvo de roca secos, dotados de una alta energía cinética.

En estudios sobre flujos de arena, Bagnold (1954), también menciona continuas colisiones entre los granos, que crean una fuerza dispersiva, produciendo una "fluidización dinámica". No hay cohesión ni fricción entre los granos, los que sólo momentáneamente están en contacto físico.

Francis (1993), paraleliza las avalanchas con estos flujos, señalando que durante el movimiento, los bloques individuales mantienen su relación espacial entre sí, conservando su energía cinética durante el movimiento, pero tienen sólo un contacto intermitente durante sus colisiones con sus vecinos, existiendo así escasa cohesión o fricción durante el desplazamiento.

Considerando las avalanchas de la Luna y Marte, Melosh (1983), propone la "fluidización acústica", provocada por vibraciones de alta frecuencia capaces de aliviar la presión de sobrecarga estática, permitiendo que ocurra el deslizamiento (*sliding*) en las regiones que han sido aliviadas (*relieved*). Davies (1982), aboga por la "fluidización mecánica" basada en el concepto de que una alta energía impuesta a una masa granular, causa altas presiones de contacto impulsivo entre los granos individuales, de modo que se separan estáticamente y la masa se expande. La resistencia interna al esfuerzo de corte es de esta forma reducida y la masa fluye bajo la acción de la gravedad al dilatarse.

Campbell (1989), merced a consideraciones teóricas, argumenta que casi toda la actividad colisional tiene lugar en una delgada capa basal de partículas altamente excitadas (*shake up*) y de baja concentración, a las cuales él comparó con un gas caliente altamente comprimido, mientras que el cuerpo principal de la avalancha va "montado" o "flotando" de una manera moderadamente pasiva.

Francis (1993), resume que las avalanchas de rocas se movilizan como *plug flows*, patinando o deslizándose sobre bases altamente cizalladas. Su extraordinaria movilidad, es explicada por una forma de fluidización dentro de la capa basal, descrita como fluidización acústica, dinámica o mecánica, que resulta del infinito.

número de colisiones que tienen lugar entre los clastos en la capa basal.

En la avalancha del Potrero de Leyes, la cubierta vegetal y la escasa erosión, no permitió observar las características de la base del depósito. Sin embargo, la gran energía desplegada durante el movimiento, queda reflejada en su bien definido y escarpado margen y en los gigantescos bloques que hoy descansan sobre la superficie del depósito.

Un indicador para la movilidad de las avalanchas fue introducido por Hsü (1975) y denominado "distancia recorrida en exceso" (*excessive travel distance*). Este parámetro (Le) expresa la distancia horizontal recorrida en exceso por la avalancha, superior a la que debería esperarse si el movimiento hubiera correspondido al del deslizamiento no lubricado de una masa rígida, que se movilizara por un plano inclinado con un coeficiente de fricción normal de $\tan. 32$.

$$Le = L - H/0,62$$

La distancia en exceso de recorrido para la avalancha del Potrero de Leyes es de 3,2 km. Esta movilidad mayor que la que hubiera correspondido al deslizamiento no lubricado de un único bloque, es otro de los argumentos que justifica considerar a éstos movimientos como flujos fluidizados y no como deslizamientos.

Parámetros morfométricos

Las avalanchas de roca tienen un gran poder destructivo que deriva del gran volumen de material movilizado, la extensa superficie que cubren los depósitos y su gran velocidad de movimiento. Distintos parámetros morfométricos, entre ellos los que nos permiten tener idea del volumen del material movilizado y estimar tentativamente cual ha sido su velocidad, son presentados en la Tabla 1.

Su volumen ha sido estimado en 598.10^6 m^3 , valor que supera el orden de magnitud correspondiente a los movimientos de Vaiont (Italia): 250.106 m^3 y Blackhawk (USA): 280.106 m^3 , pero es menor que los de Saidmarreh (Irán): 2000.106 m^3 y Fernpass (Austria): 1000.106 m^3 .

Tabla 1: Resumen de los datos morfométricos de la avalancha de rocas del Potrero de Leyes.

| | |
|--|---------------|
| Cota parte superior de la escarpa | 1580 m s.n.m. |
| Cota del pie del depósito | 760 m s.n.m. |
| Altura máxima de la escarpa | 580 m |
| Ancho máximo de la escarpa | 2000 m |
| Longitud del margen superior de la escarpa | 3000 m |
| Desnivel descendido por la avalancha (H) | 820 m |
| Altura máxima del obstáculo superado (h) | 25 m |
| Longitud de los depósitos | 3100 m |
| Ancho máximo de los depósitos | 2600 m |
| Espesor promedio del depósito | 75 m |
| Distancia máxima de recorrido | 4600 m |

| | |
|---|--|
| Superficie que cubre el depósito | 7,97 km ² |
| Volumen del depósito | no menor a los 600. 10 ⁶ m ³ |
| Volumen extraído en la escarpa | 580. 10 ⁶ m ³ |
| Coefficiente de fricción aparente (H/L) | 0,18 |
| Distancia en exceso de recorrido (L _e =L-H/0,62) | 3,2 km |
| Velocidad calculada con [v=(2gh) ^{0,5}] | 80 km/ hora |
| Velocidad calculada con pérdida por fricción | 190 km/hora |

El volumen acumulado por la avalancha debe ser mayor que el extraído de la escarpa debido al "esponjamiento" (fábrica más abierta) del primero. Incorporando el volumen de la loma de la Iguana y el de la pequeña loma Sola, situada al pie del espón sur, su volumen se vería incrementado en unos 13 x 10⁶ m³.

La velocidad mínima que experimentó el movimiento puede ser evaluada tentativamente asumiendo que toda la energía potencial (m.g.h), se transformó en energía cinética (m.v²/2), sin pérdida por rozamiento, de acuerdo con la ecuación:

$$m.g.h = m.v^2/2 \text{ o sea } v = (2.g.h)^{0,5}$$

donde m = masa de material movilizado, g = aceleración de la gravedad, h = altura del obstáculo superado por la avalancha.

De acuerdo con los parámetros observados (Tabla 1), obtendríamos una velocidad de aproximadamente 22 m/seg. ó 80 km/h.

Otra forma de estimar la velocidad sería la propuesta por Francis y Baker (1977), quienes utilizaron un método para calcular la pérdida por fricción, por comparación entre la altura que desciende la masa (H) con respecto a la máxima altura que asciende al superar los obstáculos (h). El porcentaje de pérdida por fricción (F) en el caso de la avalancha del Potrero de Leyes es:

$$F = 100[1 - (h/H)^{0,6}]$$

$$F = 100[1 - (25 \text{ m}/820 \text{ m})^{0,6}]; F = 82,53$$

Usando la expresión

$$v = 10(2.g.h/100-F)^{0,5}$$

donde g es la aceleración de la gravedad, resulta de este modo una velocidad de 53 m/seg. ó 190 km/h.

Estos valores han sido calculados aceptando que la altura (h) del mayor obstáculo superado por la avalancha fue de 25 metros, representado por las lomas de metamorfitas cercanas al puesto Heredia.

La velocidad obtenida es comparable con la velocidad promedio asignada para las avalanchas de: Elm (Suiza) de 160 km/h (Heim 1932), la del Nevado de Huascarán (Perú) de 120 km/h (Plafker y Ericksen 1978) y las de los Nevados del Aconquija (Argentina) de 227 km/h (Fauqué y Strecker 1988).

Inducción sísmica: factores condicionantes favorables previos a la avalancha de rocas del potrero de Leyes

En el Mapa de Zonación Sísmica del INPRES (fig. 6;

1978), la "Zona 2", con coeficiente sísmico zonal de 0,050, cubre el sector estudiado. El grado de las intensidades máximas en 100 años para esa "Zona", varían entre I y VII ó mayor, con moderado nivel de actividad sísmica normal, caracterizada por eventos de mediana magnitud y muy localizados en sus efectos. De acuerdo a esta información, dos terremotos históricos de las Sierras Pampeanas australes alcanzaron efectos destructivos. Uno de ellos, ubicado al sur de la sierra de Comechingones, en la llanura (Sampacho) y el otro en las cercanías de Quines, en el extremo norte y oriental de la sierra Grande de San Luis.

Se tuvo acceso a un listado de los sismos (92) históricos ocurridos entre los años 1924 y 1991 en la provincia de San Luis. Sus magnitudes, que aparecen sólo determinadas en 16 de ellos, varían entre 3.8 y 5.2, con un único valor máximo de 5.9 (diciembre de 1924). Sin embargo hay citas de un sismo de magnitud 6.2, que en mayo de 1936 asoló la ciudad de San Francisco, cercana al Potrero de Leyes. En el mencionado listado, su magnitud no aparece establecida (0.0). Estos antecedentes apuntan al reconocimiento de una relativamente constante actividad sísmica histórica en esta parte de las Sierras Pampeanas. Buena información local y regional tectónica fue obtenida en campaña o extraída de la interpretación de fotogramas y de imágenes satelitales del sector analizado. Se refieren a las condiciones tectónicas y rasgos morfo-tectónicos asociados, que ponen en evidencia la reiterada influencia de la neotectónica, confirmando la condición de la zona como tectónicamente activa, conclusión ésta que se ve ratificada por el exclusivo dominio de formas agradacionales (juventud) en la composición del piedemonte.

El reconocimiento de otra avalancha de rocas, algo al norte del Potrero de Leyes, cercana al puesto conocido como "Las Cañas", aboga por la reincidencia en tiempos geológicos recientes del fenómeno y la focalización de su distribución.

Keefe (1984 a, b), identifica las características geológicas que tienen decisiva importancia como "potenciales factores" que contribuyen eficazmente en la ocurrencia de movimientos gravitacionales inducidos por terremotos históricos. Destaca la importancia del valor de la altura de la pendiente donde ocurrió el desprendimiento y el grado de su inclinación, estableciendo los valores mínimos de esos parámetros. Además analiza la susceptibilidad de los materiales a movimientos gravitacionales promovidos por sismos, cuando muestran un condicionamiento previo geológico, que incluye un denso fracturamiento de las rocas, sobresalientes planos de debilidad estructural (fallas, diaclasas, fracturas, superficies de foliación, etc), que inclinan "hacia afuera" de la pendiente (o *dipping out*), meteorización y evidencias históricas o geológicas de movimientos anteriores.

Para el caso de la avalancha del Potrero de Leyes,

tales requisitos aparecen ampliamente cumplimentados: a) altura de la pendiente superior a los 150 metros (véase Tabla 1); b) inclinación de la pendiente mayor de 25° (véase Fig. 5); c) localización en una extensa y elevada escarpa de falla; d) la marcada foliación que exhibe el granitoide en los tramos medio e inferior de la escarpa de falla, a la que se agregan las fajas de cataclasis (filonitas) y de "molimiento" de las rocas; e) intenso fracturamiento resultante de un denso y variado sistema de diaclasas; f) determinación de *dipping out* en distintos sistemas de diaclasas (véase Fig. 7); g) hay evidencias de grandes movimientos gravitacionales en tiempos geológicos anteriores, representados por la antigua avalancha de rocas de "Las Cañas".

La meteorización, salvo en las zonas de fallamiento, carece de mayores evidencias. Es más notoria en los megabloques de sus acumulaciones, donde es común ver "aletas", "ventanas", "hoyos" y otras formas menores.

Keefer (1984a, b), manifiesta que en los casos que analizara (ambientes de alta montaña, de climas fríos y áridos), exhibieron por lo menos alguno de esos "factores" y en su mayoría dos o tres, lo que incrementa la posibilidad del movimiento por sismicidad. También destaca la común existencia de un previo socavamiento de la base de la pendiente por erosión fluvial o glaciaria, un hecho no comprobado para el caso de la avalancha de rocas del Potrero de Leyes.

Con la exclusión de toda influencia climática (cuya presencia no ha sido determinada y no explicaría como factor regional, la focalización de este tipo de movimiento), se considera como el promotor de la avalancha de rocas del Potrero de Leyes, a un sismo acaecido en tiempos geológicos muy recientes. El enorme volumen movilizado es también un fuerte argumento en favor de ésta propuesta.

Implicancias paleosismológicas sobre el riesgo sísmico en la zona estudiada

La geometría del fallamiento inverso favorece la aparición de gran cantidad de fracturas extensionales en el sector proximal del labio elevado, debido a la falta de una contraparte luego del ascenso de la masa serrana. El exceso de espacio que allí se genera es más significativo cuanto menor es el ángulo de falla. Por esta razón las escarpas inversas son proclives a ser rápidamente modificadas por fenómenos de remoción en masa de diversa índole. Esta situación puede ser observada en diversos sectores de la escarpa occidental de la sierra de San Luis. En algunos casos exponen incluso "falsas" facetas traingulares relacionadas con la exposición de la "cara libre" de escarpas correspondientes a fracturas extensionales secundarias, cuya

actitud y sentido de movimiento (muchas de ellas pueden ser sólo diaclasas), no son coincidentes con el movimiento de la o las fallas responsables del levantamiento serrano.

Esta situación favorece la aparición de escarpas juveniles, con abundante material desagregado mecánicamente por las fallas principales y secundarias asociadas al levantamiento, donde en principio predominan los procesos gravitacionales.

Estos pueden ser eventualmente promovidos a consecuencia de vibraciones bruscas y de amplitud de onda considerable, como las producidas por un sismo.

En los ambientes de intraplaca, las fallas con actividad cuaternaria tienen intervalos de recurrencia muy grandes (10⁴, 10⁵ años o aún más; Crone y Machette 1995). Esto significa que fallas sin sismicidad actual significativa, pudieron haber provocado importantes sismos en el pasado o peor aún, pueden estar a punto de provocarlos. Esta última posibilidad ha sido dramáticamente destacada en los últimos años por los terremotos de Bora Peak (USA, 1983, Ms 6,3), Tennant Creek (Australia, 1988, Ms 6,7) y y recientemente por el desastroso evento en Killari (India, 1993, Ms 6,3), entre otros.

Lo anterior sugiere lo riesgoso que significa catalogar la peligrosidad de una falla o región tomando en cuenta solamente su sismicidad histórica e instrumental. Esto destaca la necesidad de extender el registro sísmico tomando en consideración los datos geológicos prehistóricos, para la mejor comprensión de una estructura neotectónica en este tipo de ambiente. Es decir, el estudio tiende a demostrar que el potencial sismogénico de la región, basado exclusivamente en la frecuencia de sismos contemporáneos, ha sido casi con seguridad subvaluado. En fallas con largos períodos de recurrencia (pero a la vez con mucho tiempo para almacenar energía), es conveniente recurrir a la caracterización paleosísmica.

No obstante, la región de las Sierras Pampeanas australes fue afectada en el presente siglo por algunos sismos de magnitud 6.0, como el de Sampacho (1934, M 6.0) y el de San Francisco-San Martín (1936, M 6.2; Castaño y Bastías 1981). Asimismo son citados varios eventos de magnitud desconocida, pero de intensidad considerable en la región sur de las Sierras Pampeanas (Rocca *et al.* 1991).

Para un ambiente intracontinental como la región *Basin and Range* en el sudoeste de los EE.UU., Smith y Arabasz (1991), indicaron que la magnitud umbral de un sismo para generar rupturas en superficie, se ubica entre 6.0 y 6.5. En las Sierras Pampeanas australes, dos sismos acaecidos en el presente siglo, satisfacen dicho requerimiento.

Se entiende que la geometría y la magnitud del fallamiento Plio-Pleistoceno ofreció condiciones favorables para la generación de una avalancha de rocas de origen sísmico durante el Cuaternario. Su

probabilidad de ocurrencia está demostrada no sólo por la sismicidad actual, sino también por las evidencias de actividad tectónica en otros sectores de la "Falla de San Luis". Las condiciones geomorfológicas y geológicas para producirse una avalancha de rocas, están presentes en la zona.

El origen sísmico de la avalancha de rocas del Potrero de Leyes aporta al análisis del riesgo sísmico regional los siguientes puntos de discusión:

1. Durante el Cuaternario ocurrieron eventos sísmicos, muy probablemente asociados al frente del levantamiento serrano, capaces de movilizar volúmenes de más de $600 \times 10^6 \text{ m}^3$, en forma de avalanchas de rocas.

2. El hecho que sismos recientes de magnitud igual o mayor a 6.0 no hayan generado ningún fenómeno semejante en las laderas serranas, sugiere que la avalancha de rocas del Potrero de Leyes se halla vinculada a un sismo, cuya magnitud fue lo suficientemente considerable como para generarlo.

3. La avalancha pudo haberse desarrollado bajo condiciones climáticas más favorables (por ejemplo, mayor disponibilidad de agua, un factor concurrente que suele facilitar la remoción en masa). Sin embargo al respecto, vale aclarar que no hay elementos de juicio en favor de esta alternativa.

4. Es importante destacar el carácter recurrente que adquiere el fenómeno ante el reciente reconocimiento de otro similar, aunque más antiguo, unas decenas de kilómetros al norte de la avalancha de Potrero de Leyes, en el paraje conocido como Las Cañas. Esto confirmaría la importante actividad tectónica propuesta durante el Cuaternario de la región.

Conclusiones

Se entiende que la avalancha de rocas del Potrero de Leyes ha sido inducida por un sismo en tiempos geológicos recientes, favorecida por su localización en un área de las Sierras Pampeanas australes tectónicamente activa durante el Cuaternario y la previa existencia de factores geológicos propicios. A ello se suma una reconocida recurrencia del proceso (avalancha de rocas de Las Cañas). La existencia de ambos fenómenos, sugiere la ocurrencia en el pasado reciente de terremotos de magnitud significativa. Esto introduce sin duda, un dato muy importante en el análisis de la amenaza sísmica regional, el que ha sido basado en información sísmica histórica e instrumental. Esa actividad se corresponde con rasgos neotectónicos reconocidos en el adyacente piedemonte y en ciertos aspectos morfológicos asociados observados en éste, a lo que se suma la sismicidad histórica comprobada en esa morfoestructura. En la avalancha

es sobresaliente su estructura de megabloques y la gran altura de sus depósitos que llegan en ciertos tramos los 90 metros de espesor. Su velocidad ha sido estimada en el orden de los 190 km/hora y su volumen en $598 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido realizada gracias a un subsidio (Proyecto Ex-244) de la Secretaría de Ciencia y Técnica (UBACYT) de la Universidad de Buenos Aires. Se agradece a Silvia Miranda del Instituto de Sismología "Ingeniero Volponi", de San Juan, el envío de un listado de los sismos históricos de la provincia de San Luis. A la Universidad Nacional de San Luis el haber facilitado el vehículo necesario para la campaña y al Catastro Provincial de San Luis, el préstamo de las fotos aéreas del sector estudiado y sus adyacencias para su ulterior fotocopiado.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Bagnold, R.A., 1954. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. *Proceedings Royal Society London*, A 225: 49-63.
- Brogioni, H., Parrini, P. y Pechioni, E., 1994. Magmatismo pre- y sin- colisional en el Cordón de El Realito, Sierra de San Luis, Argentina. *Actas 7º Congreso Geológico Chileno*, 2: 962-966. Concepción.
- Campbell, C.S., 1989. Self-lubrication for long run-out landslides. *Journal of Geology*, 97: 653-665.
- Castaño, J. y Bastias, H., 1981. Análisis sismotectónico y su aplicación a la estimación del riesgo sísmico. *INPRES, Publicación Técnica*, 7: 1-42. San Juan.
- Caviedes Vidal, J., 1990. Neotectónica del frente de la Sierra de San Luis entre San Francisco y Luján. Trabajo de Licenciatura, Universidad Nacional de San Luis, 63 p. (Inédito).
- Costa, C., 1992. Neotectónica del sur de la Sierra de San Luis. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de San Luis, 390 p. (Inédita).
- Costa, C., 1994. The Neogene Thrust Front of the Sierra de San Luis, Pampean Ranges, Argentina. *Bulletin INQUA Neotectonics Comm. Short Notes*, 17: 76.
- Costa, C., 1996. Análisis neotectónico en las sierras de San Luis y Comechingones: problemas y métodos. *Actas 13º Congreso Geológico Argentino*, 2: 285-300. Buenos Aires.
- Criado Roque, P.C., Mombro, P.C. y Ramos, V., 1981. Estructura e Interpretación Tectónica. En: Yrigoyen, M. (Ed.): *Geología de la Provincia de San Luis, Relatorio 7º Congreso Geológico Argentino (San Luis)*: 155-192. Buenos Aires.
- Crone, A. y Machette, M., 1995. Paleosismology and earthquakes in stable continental regions: insights into long term behavior of some intraplate seismogenic faults. En: Valensise, G. and Pantosti (Eds.): *Workshop on active faulting studies for seismic hazard assessment, Extended Abstracts*, ING. Roma.
- Davies, T.R.H., 1982. Spreading of rock avalanche debris by mechanical fluidalization. *Rock Mechanics*, 15: 9-24.

- Evans, S. G., 1989. Rock avalanche run-up record. *Nature*, 340 (6231): 271.
- Fauque, L., 1987. Avalanchas de roca en la Quebrada de Segovia y zonas vecinas de la vertiente occidental de las Sierras del Famatina, Provincia de La Rioja, Argentina. *Actas 10º Congreso Geológico Argentino*, 3: 333-336.
- Fauque, L. y Strecker, M.R., 1988. Large rock avalanches deposits (Sturzströme, Sturzströms) at Sierra Aconquija, northern Sierras Pampeanas, Argentina. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 81 (3): 579-592. Basel.
- Flores, M., 1969. El Bolsón de Las Salinas de la Provincia de San Luis. *Actas 4º Jornadas Geológicas Argentinas*, 1: 311-327. Buenos Aires.
- Flores, M. y Criado Roque, P.C., 1972. Cuenca de San Luis. En: Leanza A. (Ed.): 1er. Simposio de Geología Regional Argentina, Academia Nacional de Ciencias de Córdoba: 567-580. Córdoba.
- Francis, P.W., 1993. *Volcanoes. A Planetary perspective*. Oxford University Press Inc., New York.
- Francis, P.W. y Baker, M.C.W., 1977. Mobility of pyroclastic flows. *Nature*, 270: 164-165.
- González, R.R.L., 1957. Descripción Geológica de la Hoja 22g, Quines (Provincia de San Luis). Dirección Nacional de Minería, Boletín 87, 50 p. Buenos Aires.
- González Díaz, E. F. y Mon, R., 1996. El origen de las lagunas de Yala, Provincia de Jujuy, noroeste de la Argentina (24° 05' de latitud sur y 65° 28' de longitud oeste). *Actas 13º Congreso Geológico Argentino*, 4: 209-217. Buenos Aires.
- Groeber, P., 1916. Informe sobre las causas que han producido las crecientes del Río Colorado (Territorios del Neuquén y La Pampa) en 1914. Dirección General de Minas, Geología e Hidrología, Boletín B11: 5-29. Buenos Aires.
- Harrington, H.J., 1946. Las corrientes de barro (mud-flows) de El Volcán, Quebrada de Humahuaca, Jujuy. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 1(2): 149-165. Buenos Aires.
- Heim, A., 1932. Der Bergsturz von Elm. *Deutsch. Geol. Gesell. Zeitschr.* 34: 74-115.
- Hsü, K.J., 1975. Catastrophic debris streams (sturzströms) generated by rockfalls. *Geological Society of America, Bulletin*, 86: 129-140.
- Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES), 1978. *Publicación Técnica*, 6.
- Keefer, D.K., 1984a. Rock avalanches caused by earthquakes: Source characteristics. *Science*, 223: 1288-1290.
- Keefer, D.K., 1984b. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America, Bulletin*, 95: 406-421.
- Kent, P.E., 1969. The transport mechanism in catastrophic rock falls. *Journal of Geology*, 74: 79-83.
- Killmurray y Dalla Salda, L., 1977. Caracteres estructurales y petrológicos de la región central y sur de la Sierra de San Luis. *Revista del Centenario del Museo de La Plata*, 4: 167-178. La Plata.
- Melosh, H.J., 1983. Acoustic fluidalization. *Scientific American*, 71: 158-165.
- Pastore, F. y González, R.R.L., 1954. Descripción Geológica de la Hoja 23g San Francisco (San Luis). Dirección Nacional de Minería, Boletín 80, 61 p. Buenos Aires.
- Pereyra, F.X. y González Díaz, E.F., 1993. Reinterpretación geomórfica de la llamada "morena" de Los Horcones, Puente del Inca, Provincia de Mendoza. *Actas 12º Congreso Geológico Argentino*, 4: 73-79. Mendoza.
- Plafker, G. y Ericksen, G.E., 1978. Nevados Huascaran avalanches, Perú. En: Voight (Ed.): *Rockslides and Avalanches*, Elsevier, pp. 277-314. Amsterdam.
- Polanski, J., 1961. Cenoglomerado del Quemado (Provincia de Mendoza). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 15 (3-4): 157-169. Buenos Aires.
- Polanski, J., 1966. Flujos rápidos de escombros rocosos en zonas áridas y volcánicas. *Manuales de la Editorial Universitaria de Buenos Aires (EUDEBA), Geología*, 67 p. Buenos Aires.
- Rocca, R., Decanini, L. y Prato, C., 1991. Riesgo sísmico en el valle longitudinal de las sierras de Córdoba. *Actas de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería*, 6: 136-153.
- Shreve, R.L., 1968. The Blackhawk Landslide. *Geological Society of America, Special Paper*, 108: 1-47.
- Smith, R. y Arabasz, W., 1991. Seismicity of the intermountain seismic belt. En: Slemons, D., Engdhal, E., Zoback, M. y Blackwell, D. (Eds.): *Neotectonics of North America*. Geological Society of America, *Decade Magazine*, 1: 185-228.
- Ui, T., 1983. Volcanic dry avalanche deposits- identification and comparison with non volcanic debris stream deposits. *Journal Volcanology Geotherm. Research*, 18: 135-150.

Recibido: 9 de mayo, 1996

Aceptado: 11 de febrero, 1997