

EL DESLIZAMIENTO DE ROCAS Y DETRITOS SOBRE EL RÍO SANTA CRUZ Y EL ALUVIÓN RESULTANTE POR EL COLAPSO DEL DIQUE NATURAL, ANDES CENTRALES DE SAN JUAN

Laura PERUCCA y Yanina ESPER

CONICET, Gabinete de Neotectónica. INGENIO-FCEfyN-Universidad Nacional de San Juan.
E-mails: lperucca@unsj-cuim.edu.ar, yaninaesper@gmail.com

RESUMEN

Durante el verano de 2005 un gran deslizamiento de rocas y detritos ubicado en la ladera occidental de la Cordillera de Santa Cruz obturó el valle del río Santa Cruz, en el sudeste de la provincia de San Juan (31°40'12"S; 70°16'18"O). Este deslizamiento originó una presa natural en la quebrada del río y formó un lago de volumen considerable. El 12 de noviembre de 2005, probablemente por la enorme presión generada por la masa de agua contra la presa, se produjo el colapso parcial del dique natural, originándose un inesperado aluvión que provocó numerosas pérdidas económicas en las principales localidades del departamento Calingasta y daños considerables en uno de los proyectos más relevantes de la provincia de San Juan, el dique Caracoles sobre el río San Juan. Debido a los costos elevados que implicaría la toma de medidas de mitigación en esta zona montañosa alejada y casi inaccesible, las principales medidas que se pueden tomar se refieren a sistemas de alerta temprana de aluviones agua abajo, el monitoreo hidrológico en la presa y un seguimiento satelital anual para conocer la evolución del deslizamiento.

Palabras clave: *Aluvión, Deslizamiento de rocas y detritos, Río Santa Cruz, Argentina*

ABSTRACT: *Rock-debris landslide on Santa Cruz river and resulting flash flood by collapse of the natural dam, Central Andes of San Juan.* During summer of 2005, a large debris-rock slide occluded the Santa Cruz river valley, from the west slope of the Cordillera de Santa Cruz in southeast of San Juan province (S31°40'12"; W70°16'18"). The landslide originated a natural dam in Santa Cruz river and formed a lake of considerable volume. The 12th of November of 2005, probably by effect of the pressure generated by the same mass of water against the dam, the partial collapse of this natural dam took place, causing a violent and unexpected flash flood and generating several economic losses in the main localities of Calingasta department and considerable damages in one of the most relevant projects of the San Juan province, Caracoles dam, developed in the San Juan river. Because of the high costs of taking physical remediation measures to the natural dam in this very forest and almost inaccessible mountain area, the main protective measures that must be undertaken are the installation of a flood early warning system downstream, the hydrological monitoring at the dam and an annual satellital monitoring to see the evolution of the mass movement.

Keywords: *Flash flood, Debris-rock slide, Santa Cruz river, Argentina*

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se efectuó un estudio preliminar del deslizamiento de rocas y detritos ubicado en la ladera occidental de la Cordillera de Santa Cruz con el objetivo de contribuir al conocimiento de la susceptibilidad a la ocurrencia de los procesos de remoción en masa en la región, a fines de implementar en el futuro propuestas de monitoreo en regiones de la Alta Cordillera sanjuanina que puedan reducir el impacto de estos procesos naturales y las pérdidas económicas asociadas. Se reconocieron numerosos depósitos de

remoción en masa ubicados en el flanco occidental de la cordillera de Santa Cruz. Este cordón montañoso se caracteriza por poseer elevadas pendientes, principalmente en su ladera oeste, generadas principalmente por el modelado glaciar, ausencia de vegetación, intenso crioclastismo y control tectónico. Estos procesos de remoción en masa, tales como conos de detritos, avalanchas y deslizamientos de rocas y detritos de gran volumen se ubican en algunos sectores por encima de las terrazas glacifluviales, producto del retroceso de la última glaciación holocena.

Mediante el uso de fotografías aéreas e imágenes satelitales Landsat (TM y ETM+) y Spot de diferentes años se determinó en forma aproximada la evolución de un deslizamiento de rocas y detritos en un sector del río Santa Cruz (31°40'S - 70°17'O), que produjo la oclusión del cauce en el año 2005 (Perucca y Esper 2009) por el colapso de la ladera. Este dique natural originó una laguna que fue parcial y violentamente desagotada el 12 de noviembre de 2005, originando un aluvión (*flash flood*) que fluyó por los principales tributarios del río San Juan y finalmente por este último hasta el embalse de Ullum

(Perucca y Esper 2006). Los deslizamientos de rocas y detritos corresponden al término *debris-rock slide* de Varnes (1978), caracterizado por la remoción de material inconsolidado que se desliza pendiente abajo sobre un plano de debilidad relativamente superficial. Suelen ubicarse en zonas carentes de vegetación, en afloramientos rocosos bien estratificados y fuertemente afectados por tectonismo, en pendientes que superan el 65%. Los aluviones (*flash floods*) son algunos de los peligros geológicos más frecuentes en la Argentina. Son considerados un tipo de flujo que consiste espacialmente en el movimiento continuo de una masa de detritos y limos saturada, principalmente controlada por la gravedad y cuya mecánica de movimiento semeja a un líquido viscoso (Cruden y Varnes 1996).

De acuerdo a Riggs (1974), los aluviones (*flash flood*) se definen como corrientes repentinas, con elevados picos de descarga, producidos por fuertes y torrenciales lluvias, generalmente limitadas a un área de escasos kilómetros cuadrados. Éstos pueden ocurrir escasos minutos o hasta horas luego de fuertes precipitaciones torrenciales, por la rotura de una presa o albardón, o una descarga repentina de agua desde un dique de hielo. Estos flujos pueden arrastrar bloques, troncos, vehículos y hasta maquinaria pesada (retroexcavadoras), tal como ocurrió durante el aluvión del 12 de noviembre de 2005, destruir puentes y edificaciones y excavar nuevos canales (NWS 2006). Constituyen generalmente un elevado peligro, particularmente debido a su gran velocidad y recorrido (numerosos km) y su capacidad para transportar elementos de gran porte, lo que implica un poder destructivo significativo (Sepúlveda 2000).

Perucca y Esper (2006) describieron la obturación del río Santa Cruz por un proceso de remoción en masa en la ladera occidental de la cordillera homónima. Este deslizamiento generó una laguna que fue desagotada en noviembre de 2005. Descartaron un origen sísmico para este evento.

D'Odorico *et al.* (2008) estudiaron el re-

presamiento y rotura del embalse en río Santa Cruz, y concluyeron que ambos eventos ocurrieron en el año 2005, en enero y noviembre respectivamente. Comunicaciones verbales de baqueanos, geólogos y andinistas que recorrieron la región, coincidieron en que la laguna no se habría formado hasta diciembre de 2004, por lo que su inicio se ubicaría en enero de 2005, cuando el deslizamiento obturó la quebrada del río Santa Cruz.

Garcés (2008) efectuó el análisis y cuantificación de la laguna sobre el río Santa Cruz a través del uso de imágenes Astery, Landsat entre otros sensores.

Otros antecedentes en el mundo de ruptura de diques naturales y posterior generación de aluviones son mencionados por Hermanns *et al.* (2006), quienes describieron en el norte de la Patagonia la formación de un dique natural originado por un deslizamiento que obturó el río Barrancas y que colapsó durante el mes de diciembre de 1914. Un volumen de agua de 1,55 km³ fue desagotado del lago, originando un gran flujo que destruyó localidades ubicadas aguas abajo hasta el océano Atlántico.

Kimio *et al.* (2005) describieron en Japón dos deslizamientos gatillados por fuertes lluvias durante un tifón el 25 de julio de 1892. Estos deslizamientos bloquearon ríos y formaron presas naturales, una de ellas de 71 m de altura. La presa colapsó luego de 52 hs. de llenado del embalse, originando un aluvión que arrasó el valle del río Naka, destruyendo más de 300 viviendas y provocando numerosas víctimas.

Ubicación del área de estudio

La quebrada del río Santa Cruz se ubica en el suroeste de la Provincia de San Juan, Departamento Calingasta, en el límite de Cordillera Frontal y Principal y al noroeste del cerro Mercedario (6.770 m s.n.m.). Se accede al área por las rutas provinciales 400 y 402, huellas mineras de difícil acceso (Fig. 1).

Según la clasificación de Köppen (1931) basada en las temperaturas medias y precipitaciones mensuales, el clima en la región es de altura (E), la temperatura me-

dia del mes de enero corresponde a valores inferiores a 10° C, la amplitud térmica es muy grande -tanto a nivel diario como anual - y las precipitaciones están representadas en la alta cordillera por nevadas, principalmente entre los meses de mayo a agosto.

Los cordones montañosos de la región poseen un rumbo meridional, con cotas que alcanzan los 5.000 m s.n.m. Los ríos son en su mayoría de carácter permanente, alimentados por la fusión de la masa névea que precipita durante la estación invernal. El relieve de la región es el resultado de las extensas glaciaciones pleistocenas, aunque los derrumbes y la intensa producción de derrubios durante el Holoceno han producido importantes cambios en el paisaje. La cordillera de Santa Cruz es un cordón elongado de rumbo norte-sur disectado por profundos valles controlados por las estructuras de fallamiento. En sus flancos, principalmente el occidental, son abundantes los fenómenos de remoción en masa tales como reptación de laderas, solifluxión, coladas de barro, taludes de derrubio, etc.

El río Santa Cruz, con un caudal medio de 1,44m³/s, corre de sur a norte y desemboca en el río Blanco, de dirección noroeste-sureste, ambos controlados por megafracturas.

Geológicamente el área forma parte de la Cordillera Principal y Cordillera Frontal y se localiza en el extremo sur del segmento de subducción subhorizontal (ubicado entre los 28 y 32°LS) (Cahill e Isacks 1992). D'Odorico *et al.* (2008) describieron en el área de estudio un basamento constituido por coladas riolíticas y flujos ignimbríticos correspondientes al Grupo Choiyoi, intruido por granitoides de posible edad triásica (Ramos *et al.* 1993), sobre el que sobreyacen en discordancia angular conglomerados clasto sostén mal seleccionados y coladas riolíticas de edad triásica superior a jurásica inferior de la Formación Rancho de La Lata (Álvarez 1996). La secuencia continúa también en discordancia angular con areniscas calcáreas oolíticas marinas de la Formación Los Patillos, de edad jurásica media (Álvarez 1996).

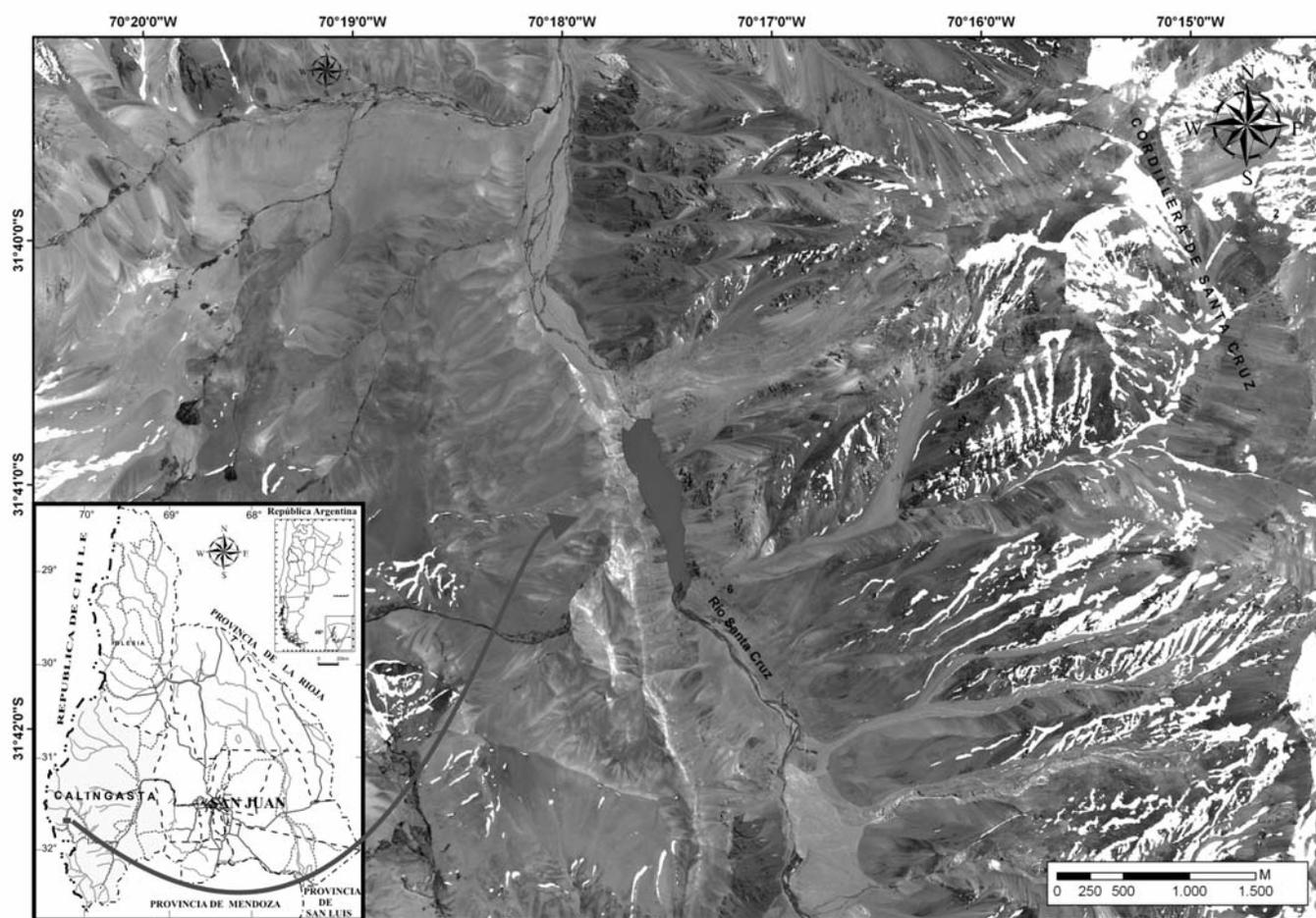


Figura 1: Ubicación del área de estudio.

En paraconcordancia se ubica la Formación La Manga, de edad jurásica media a tardía, formada por brechas calcáreas y margas oolíticas mientras que sin relación de concordancia se encuentran en el área del río La Carnicería los yesos de la Formación Auquilco del Jurásico Superior. Sobreyacen en discordancia angular a la Formación La Manga, conglomerados polimícticos y sabulitas de la Formación Tordillo (Jurásico Superior). Por encima se ubican unidades volcánicas y volcánicas de la Formación Cristo Redentor de edad cretácica.

Finalmente, se reconocen depósitos glaciales, fluvio-glaciales de edad cuaternaria (Fig. 2) y sobre la margen oriental del río Santa Cruz procesos de remoción en masa, principalmente avalanchas de roca, conos de detritos y deslizamientos de roca y detritos. Aguas arriba de la cuenca también se encuentran numerosos glaciares de

escombros, principalmente de talud.

El área de estudio presenta dos estilos estructurales; uno pre-ándico de piel fina (*thin skinned*) y otro ándico de piel fina (*thin skinned*) y piel gruesa (*thick skinned*) (D'Odorico *et al.* 2006). La estructura es compleja, definida por una deformación compresiva cenozoica que enmascara rasgos extensionales triásicos y caracterizada por la presencia de fallas y pliegues discontinuos que afectan a rocas jurásicas y en los que la tectónica andina juega un papel fundamental (Pérez 1995). La falla Santa Cruz (Lencinas 1982) es una falla inversa de alto ángulo que inclina al oeste y afecta el flanco oriental de la cordillera de Santa Cruz siendo responsable del levantamiento en bloque de la misma. También el flanco occidental de la sierra se encuentra afectado por una falla submeridional que inclina al este.

METODOLOGÍA

La porción mejor analizada del deslizamiento, dadas algunas dificultades en el acceso a los sectores más elevados, se ubicó en su parte distal, donde se efectuó el control de campo a principios del año 2009. Por ello, las consideraciones aquí expuestas, fueron determinadas exclusivamente por medio del análisis e interpretación de fotografías e imágenes satelitales. Así, la metodología aplicada en este trabajo para efectuar el análisis de la evolución de deslizamiento de rocas y detritos y posterior ocurrencia del aluvión, se basa en la recopilación de informes periodísticos locales, interpretación y análisis digital de fotografías aéreas e imágenes satelitales de diferentes años, desde la década del 60' hasta abril de 2008.

Una vez identificado el deslizamiento en imágenes y fotografías aéreas, se analizó

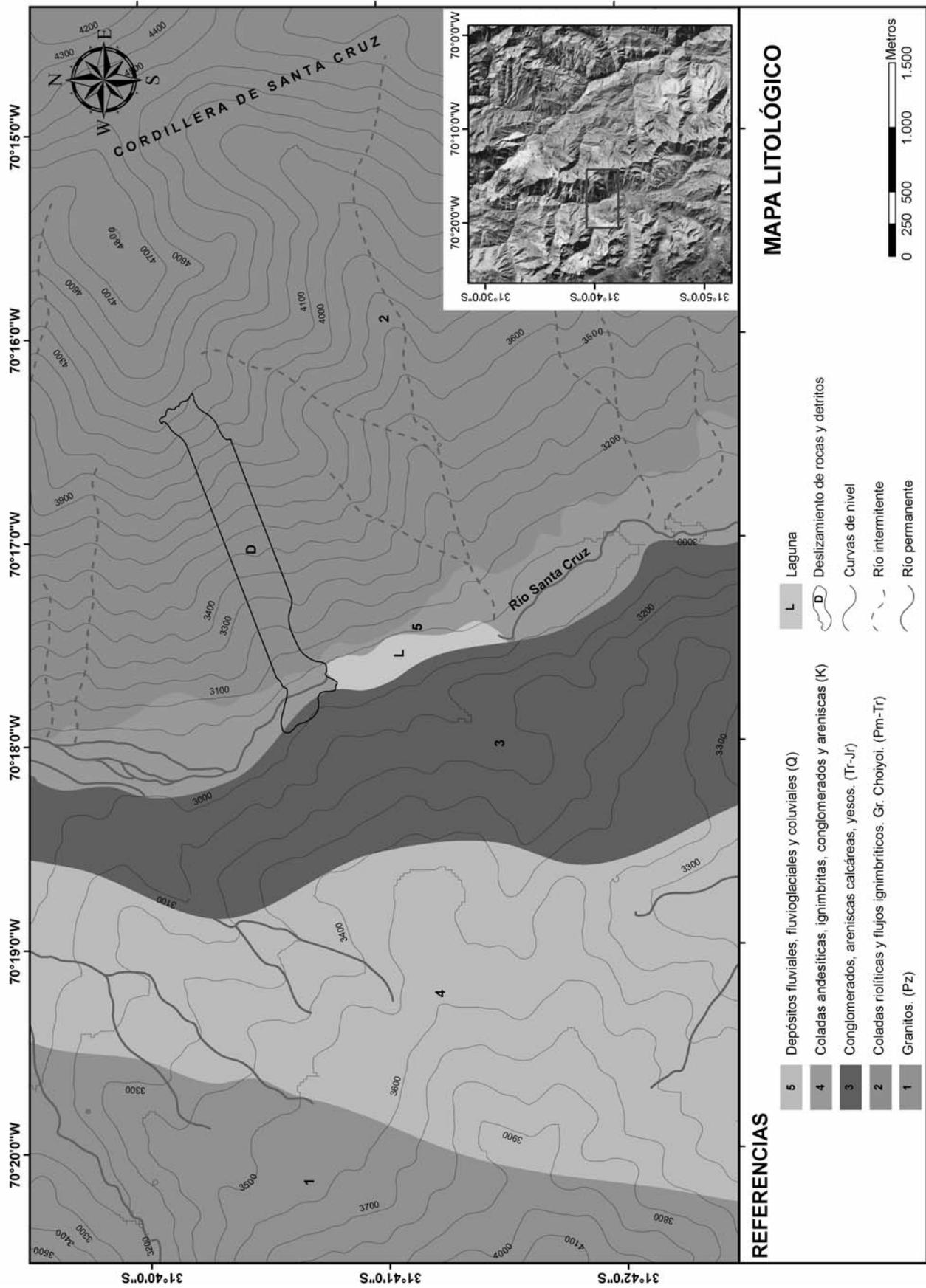


Figura 2: Mapa litológico del área del río Santa Cruz (Modificado de D'Odorico *et al.* 2006).

su evolución desde el año 62 hasta abril del año 2009 además de su geometría, a partir de cálculos de áreas y longitudes.

Para el análisis de pendientes se confeccionó un mapa en ambiente GIS a partir de la creación de un modelo digital de elevaciones terreno (MDE). La función pendiente calcula el máximo rango de cambio en elevación por distancia entre cada celda y sus vecinas. Mientras más bajo el valor de pendiente más plano es el terreno, este valor es calculado en grados (0-90°). Las altitudes fueron obtenidas como resultado de la digitalización de curvas de nivel de las cartas topográficas del Instituto Geográfico Militar a escala 1:100.000 y de información topográfica obtenida de la Misión Topográfica Radar Shuttle (USGS 2000).

Para la caracterización geométrica del deslizamiento de rocas y detritos (Cuadro 1), se utilizaron los siguientes parámetros (modificado de Dikau *et al.* 1996):

- Altitud (H): cota altimétrica máxima ($H_{m\acute{a}x}$), mínima ($H_{m\acute{i}n}$) y media (H_m).
- Pendiente (S): gradiente máximo ($S_{m\acute{a}x}$) y medio (S_m).
- Coordenadas del punto central: representadas por valores de latitud y longitud.
- Superficie de ruptura: tipo de escarpa (plana, curva, etc.).
- Longitud total (L): distancia mínima comprendida entre la punta y la corona del deslizamiento.
- Longitud del material desplazado (L_d): Distancia mínima comprendida entre la punta y la cima del deslizamiento.
- Longitud de la superficie de ruptura (L_r): Es la mínima distancia comprendida entre el extremo inferior de la superficie de ruptura y la corona.
- Profundidad del material desplazado (D_d): Es el máximo espesor de la masa desplazada medida en la dirección perpendicular al plano constituido por W_d y L_d .
- Ancho de la superficie de ruptura (W_r): Es el ancho máximo de la superficie de ruptura medido perpendicularmente a la dirección L_r .
- Ancho de la masa desplazada (W_d): Es el ancho máximo de la masa desplazada medido perpendicularmente a la direc-

CUADRO 1: Parámetros para la caracterización geométrica del deslizamiento de rocas y detritos*.

Parámetros	Valor	
Altitud (H)	máxima ($H_{m\acute{a}x}$)	4481 m snm.
	mínima ($H_{m\acute{i}n}$)	2.950 m s.n.m.
	media (H_m)	37,5,5 m s.n.m.
Pendiente (S)	máxima ($S_{m\acute{a}x}$)	42°
	mínima ($S_{m\acute{i}n}$)	5°
	media (S_m)	23°
Coordenadas del punto central	Latitud	31° 40' 27"
	Longitud	70° 16' 51"
Superficie de ruptura	plana	
Longitud total (L)	2633,95 m	
Longitud de la masa desplazada (L_d)	812,01 m	
Longitud de la superficie de ruptura (L_r)	962,32 m	
Profundidad de la masa desplazada (D_d)	50 m	
Ancho de la superficie de ruptura (W_r)	283,35 m	
Ancho de la masa desplazada (W_d)	355,3 m	
Longitud perimetral del material desplazado (P)	2711,09 m	
Área (A)	total (A_t)	0,84 km ²
	masa desplazada (A_d)	0,24 km ²
Volumen estimado (V)	12x106 m ³	

* Modificado de Dikau *et al.* (1996).

ción L_d .

- Altura de la superficie de ruptura (H_r): Distancia vertical entre la corona y el pie de la superficie de ruptura.

- Longitud perimetral del material desplazado (P): perímetro del material desplazado.

- Área (A): área total incluida en la superficie de ruptura (A_t) y área de la masa desplazada (A_d)

- Volumen estimado (V): volumen probable del depósito de detritos y rocas.

Finalmente se elaboró un modelo digital de elevaciones en vista 3D, el cual permite observar la real morfología del deslizamiento de detritos y rocas (Fig. 3).

El deslizamiento de rocas y detritos del río Santa Cruz

El deslizamiento del río Santa Cruz se caracteriza por la presencia de rocas y detritos inconsolidados que se movieron ladera abajo en forma sucesiva a lo largo de un plano de ruptura relativamente superficial y con una morfología escalonada que señalaría un avance por sectores. Este tipo de deslizamientos involucra un movimiento paralelo a la superficie, el cual está en gran medida controlado por superficies de debilidad de los materiales formadores (volcanitas pertenecientes al Grupo Choiyoi).

El deslizamiento ya se aprecia en las fotografías aéreas de la década del 60', y fue moviéndose ladera abajo en sucesivas etapas. A fines del año 2004 y principios de 2005 se habría activado nuevamente obstruyendo la quebrada del río Santa Cruz para originar un dique natural que acumuló el caudal del río y formó una laguna que alcanzó más de 3 km de longitud y que actualmente posee 1,5 km de extensión (Figs. 4a, b y c).

El deslizamiento posee una morfología ligeramente elíptica, con su eje mayor orientado más o menos en dirección E-O, alcanzando un área de 0,84 km², una longitud total (L) estimada en 2.634 m y un ancho de 283 m. En sección tiene una forma semicircular que define el área de despegue y el área actual del depósito desplazado abarca unos 0,24 km². La longitud de la masa desplazada es de 812 m (Cuadro 1).

El desnivel entre la corona (4.481 m s.n.m.) y el pie (2.950 m s.n.m.) es de 1.531 m en una longitud muy corta, con pendiente pronunciada. Esto, sumado a la espesa cubierta de detritos y material suelto existente en las laderas, producto del clima periglacial de la zona habrían sido los principales factores condicionantes del movimiento en masa.

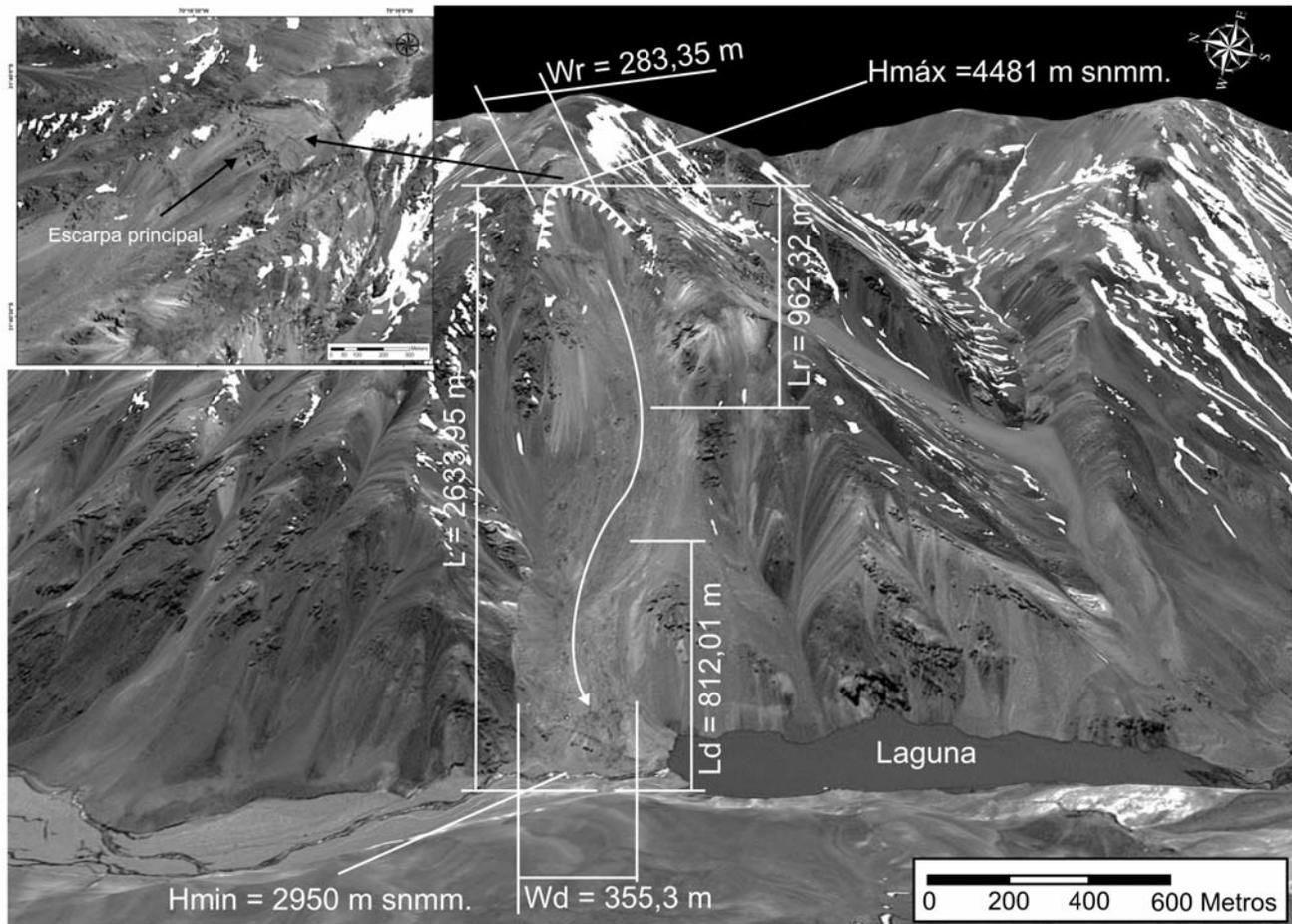


Figura 3: Vista en 3D y análisis geométrico del deslizamiento de rocas y detritos ubicado en el flanco occidental de la Cordillera de Santa Cruz. Recuadro superior izquierdo: Cicatrices activas en la parte superior del deslizamiento en una imagen obtenida en el año 2008.

El depósito cubre un área de aproximadamente $0,24 \text{ km}^2$ con un volumen estimado en $12 \times 10^6 \text{ m}^3$. Se trata de un depósito caótico pobremente soportado, constituido mayormente por bloques y detritos angulosos y subangulosos, de tamaños variados e inmersos en una matriz fina. La composición es heterogénea con brechas volcánicas, predominantemente riolíticas, tobas, areniscas y conglomerados (Fig. 4b).

Además del escarpe principal, se ubican múltiples grietas recientes de bordes agudos que constituyen potenciales superficies de ruptura, por lo que la probabilidad de ocurrencia de nuevos deslizamientos de roca y detritos en el sector es muy elevada (procesos de remoción en masa activos) (Fig. 3). Tanto la escarpa principal como estas aberturas múltiples tendrían por delante un *gap* que habilitaría nuevos futuros movimientos. Algunas

nuevas grietas han sido reconocidas en imágenes del año 2008, no registrándose en imágenes de años anteriores.

El mapa de pendientes obtenido permitió distinguir las categorías de inclinación a través de tonalidades diferentes (Fig. 5a). Al analizar este mapa de pendientes y el bloque diagrama en ambas márgenes del río Santa Cruz, se observó que la quebrada de este río muestra un perfil asimétrico con una ladera oriental abrupta y una ladera occidental mucho más tendida (Fig. 5b). Esta asimetría del valle del río es el resultado del control estructural ejercido por la falla de rumbo submeridiana que bordea el flanco occidental de la Cordillera de Santa Cruz, acentuada por la acción predominante de los vientos de dirección oeste a noroeste y la acumulación de la nieve en su margen occidental.

Evolución del deslizamiento

La evolución del proceso de remoción en masa ubicado en el flanco occidental del valle del río Santa Cruz, pudo analizarse por medio de un estudio multitemporal a través de la observación de fotografías aéreas e imágenes satelitales Landsat y SPOT, desde el año 1962 hasta abril de 2009.

En las fotografías del año 1962 se observa un deslizamiento de pequeño tamaño que es erosionado en su pie por el río Santa Cruz. La longitud de la escarpa principal es de 322 m (Fig. 6a).

En la imagen Landsat TM del 13 de abril de 1990 la escarpa principal aumentó su longitud a 437,98 m. No es apreciable un aumento del volumen del deslizamiento (Fig. 6b).

En la imagen Landsat ETM+ del 28 de febrero de 2000 el depósito cubre un área mayor pero aún no endica la quebrada.

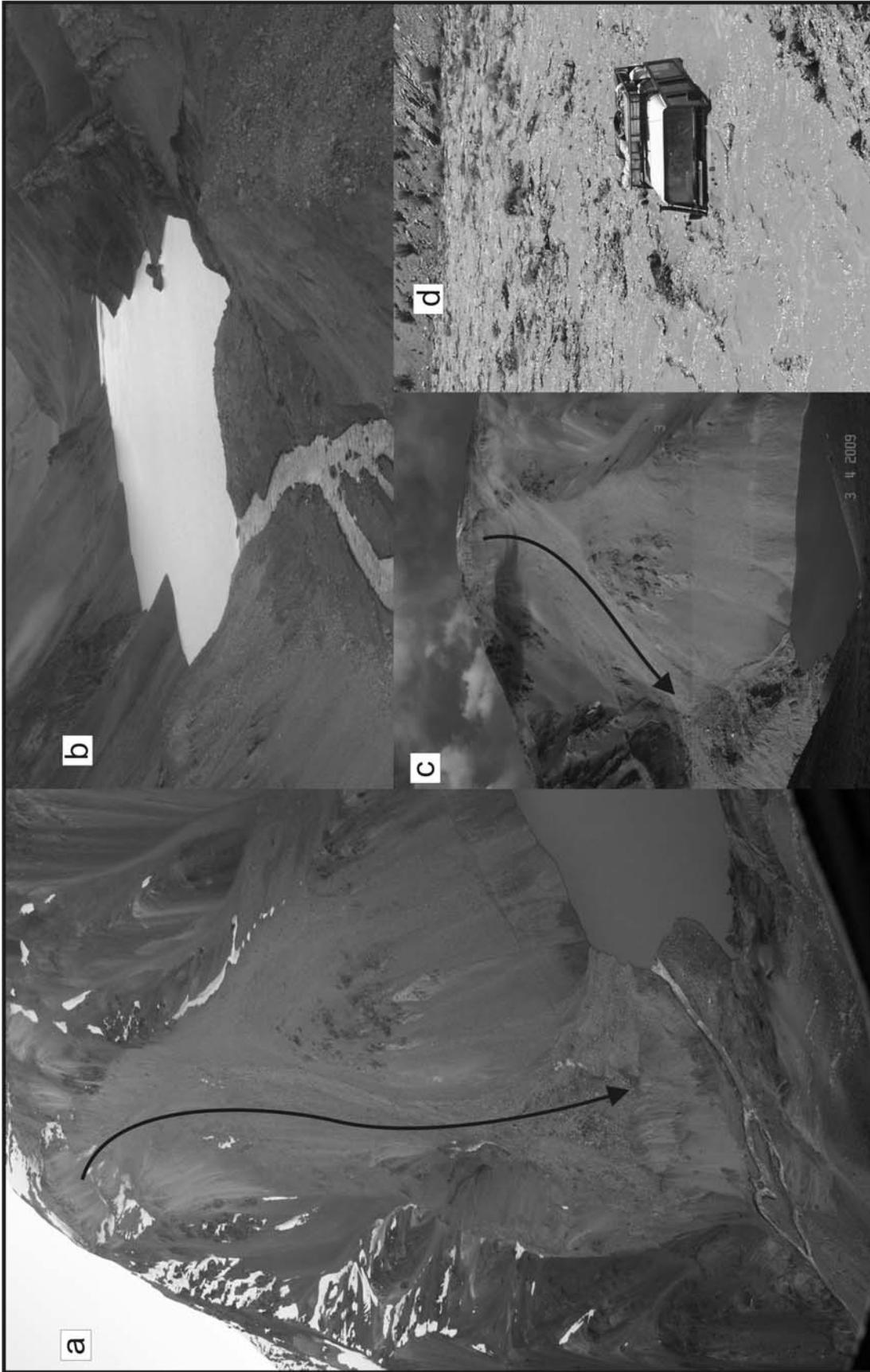


Figura 4: a) Deslizamiento de rocas y detritos en el flanco occidental de las Cordillera de Santa Cruz, b) Laguna formada por la obturación de la quebrada, c) Fotografía del deslizamiento y la laguna en el mes de abril de 2009 d) El aluvión provocó numerosas pérdidas de vehículos y maquinarias a las empresas mineras que exploran la región.

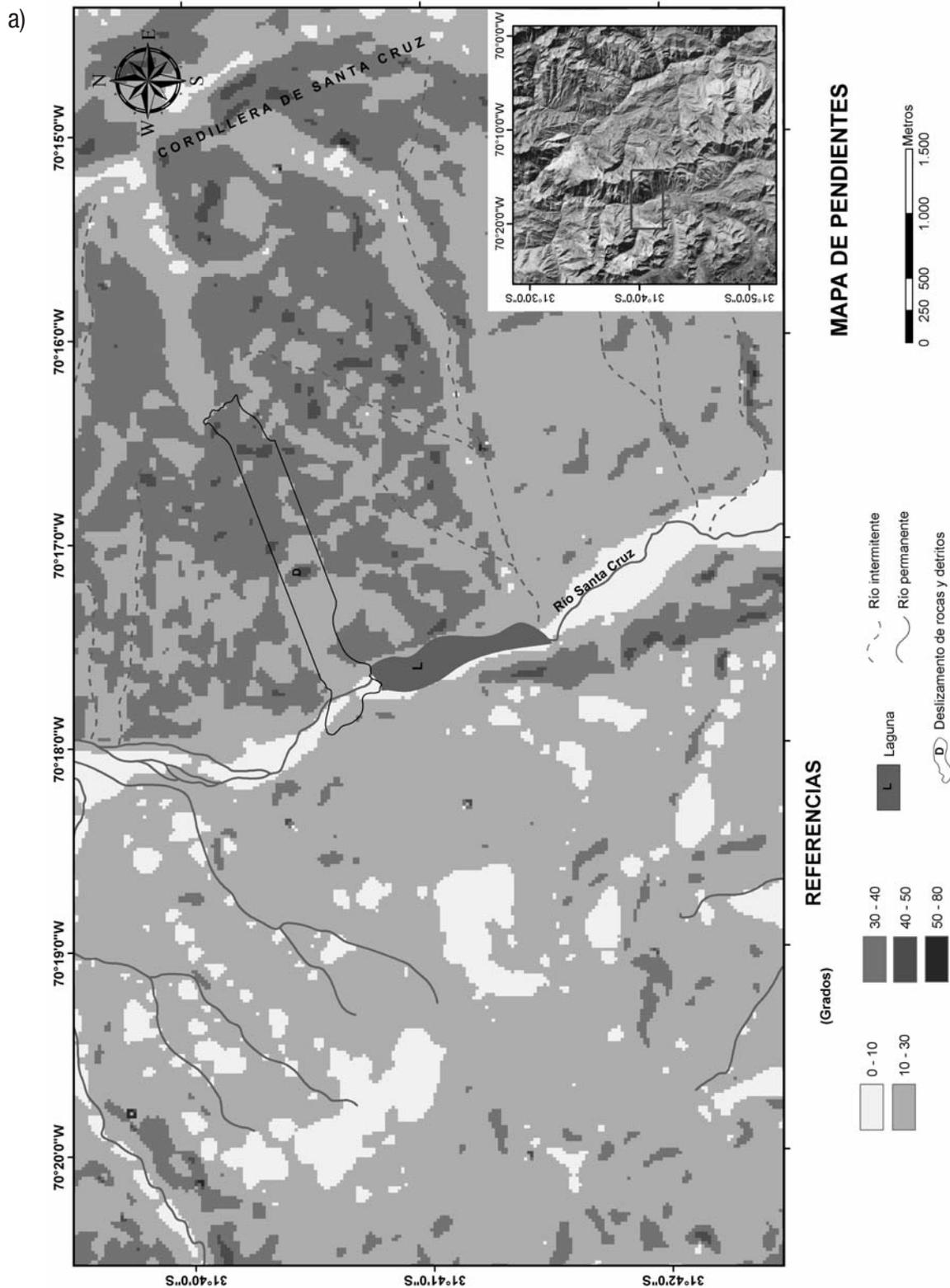


Figura 5: a) Mapa de pendientes.

La longitud de la escarpa principal es de 562 m (Fig. 6c). Tampoco se observa una laguna en las imágenes Landsat TM obtenidas en marzo de 2002 ni en la imagen

de enero de 2003 (CONAE 2008). La laguna se habría formado a principios de 2005 y el 12 de noviembre del mismo año se produjo el desagote parcial de la

misma. En la imagen Spot del mes de julio de 2008 es posible reconocer nuevas zonas de probable ruptura en el sector de la co-

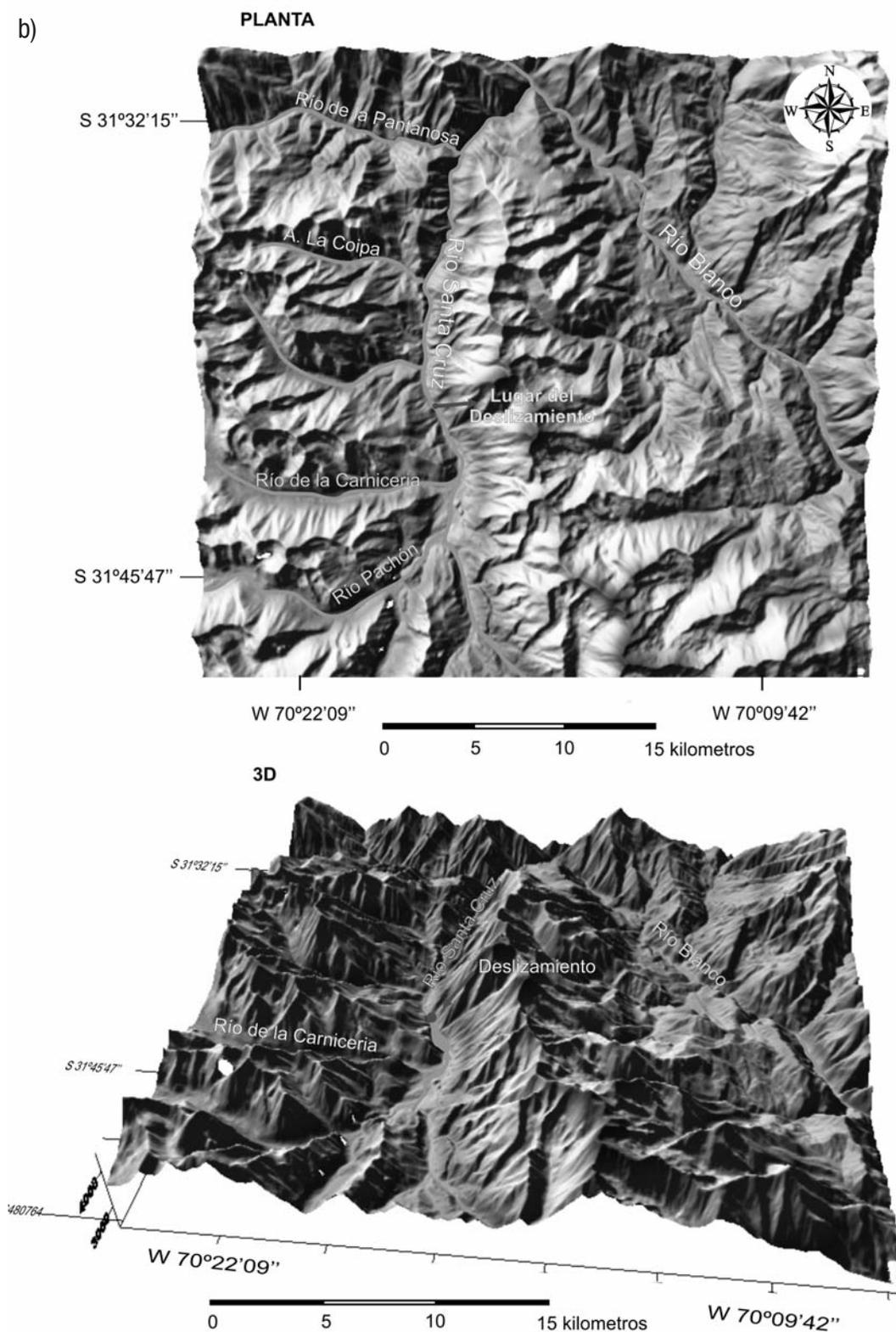


Figura 5: b) Bloque diagrama del área de estudio.

rona. La longitud de la escarpa principal es de unos 709 m y se han generado nuevas grietas (Fig. 6d). La laguna también es visible aunque de menores dimensiones

que la original. Según relatos verbales, la laguna ya es detectada en enero de 2005. Además, al menos cuatro informes de empresas mine-

ras, que exploraban en la región entre el año 1973 y 1998, detectaron en la quebrada del río Santa Cruz casi 50 potenciales puntos con peligro de endicamiento

por procesos de remoción en masa y que afectaban las huellas mineras a los diferentes sitios.

El aluvión del 12 de noviembre de 2005

A principios del año 2005, el deslizamiento de rocas y detritos ubicado en la margen oriental de la quebrada, generó un dique natural sobre el río Santa Cruz, formando una laguna con un volumen del orden de los 41 hm³, una longitud de casi 2,4 km, un ancho promedio de 296 m y una profundidad de 15 m.

A las 16:00 hs del 12 de noviembre de 2005 se produjo la ruptura del dique natural, originando un violento aluvión. Una onda de crecida dinámica recorrió el tramo inferior del río Santa Cruz, se canalizó por el río Blanco, llegó a Las Juntas donde éste se une con el río Los Patos y continuó por el río San Juan hasta el dique de Ullum (Fig. 7). Algunos indicadores que evidenciaron esta descarga súbita fueron la apertura de una brecha en el dique natural, la erosión de los sectores distales de los conos aluviales que corresponden a los pequeños afluentes del río Santa Cruz y los niveles aterrizados generados por la agradación del aluvión de ruptura y posterior erosión por la parte distal del flujo (Fig. 3).

En los registros históricos del río San Juan, sólo en dos ocasiones había ocurrido una crecida de estas características, en enero de 1915 (745 m³/s) y en diciembre de 1919 (774 m³/s).

Según el Departamento de Hidráulica (2005), a causa del aluvión se produjo un cambio repentino de caudal de 130 m³/s a 1000 m³/s (en pocas horas), situación nunca antes registrada.

El aluvión duró 10 horas, al comienzo el agua alcanzó los 40 km/h, desde el Molle-puesto ubicado sobre el río Blanco mas arriba de Las Juntas- hasta Barreal, tras un recorrido de unos 80 kilómetros, la crecida tomó dos horas. De Barreal a Calingasta (40 km), demoró 5 horas, es decir que bajó a una velocidad de 8 km/h y desde Calingasta a Caracoles (70 km), demoró 8 horas. Aquí se aceleró un poco,

llegando casi a 9 km/h (Fig. 7).

Daños producidos

La pasarela de Sorocayense que une Barreal con Calingasta y Tamberías sobre el río Los Patos, quedó destruida, se produjeron daños en cultivos y algunas viviendas en las localidades de Calingasta y Barreal. Las tomas de agua que alimentan los canales para riego y consumo humano en Barreal y Calingasta, quedaron destruidas. Un total de 247 personas debieron ser evacuadas. La corriente también arrastró vehículos (Fig. 4d) y maquinarias pesadas. Sobre el río San Juan, en el tramo en el que actualmente se construye el dique Los Caracoles (a unos 60 km al oeste de la ciudad de San Juan) se produjo la rotura de la ataguía (talud artificial sobre el lecho del río que desvía el agua hacia un túnel cuya función es mantener seca la zona de construcción del paredón) y la masa de agua comenzó a drenar por el túnel construido al margen de la represa. Dicha construcción estaba pensada para desviar un cauce máximo de 700 m³/s, que es la capacidad del túnel. Como la crecida superó los 1.000 m³, el agua la atravesó y llegó a la base misma del paredón, provocando una inundación en la zona de trabajo. Varias casillas rodantes y grúas fijas fueron destruidas (Diario de Cuyo 2005).

Por la mañana del día 13 el aluvión alcanzó el embalse de Ullum con una gran carga de sedimento provocando la suspensión en la generación de energía para el suministro de la ciudad de San Juan. Por el mismo motivo se cerraron las tomas de agua para la planta potabilizadora que distribuye el agua potable en el Gran San Juan, por lo cual el suministro de agua potable disminuyó un 20% durante varias horas.

DISCUSIÓN

Las potenciales roturas de presas pueden producirse entre otros, por eventos sísmicos, rebalses catastróficos por la ocurrencia de deslizamientos de ladera de gran porte y velocidad en los lagos, erosión su-

perficial causada por un rebalse natural al subir el nivel del agua del embalse, inestabilidad causada por la presión del agua contra la presa, o inestabilidad de la ladera en los flancos de la presa.

El aluvión ocurrido el 12 de noviembre de 2005 se habría originado en dos etapas, inicialmente la ocurrencia de un deslizamiento de rocas y detritos que originó un dique natural y la obturación del río Santa Cruz y el posterior colapso de este dique como consecuencia de la presión ejercida por la masa de agua acumulada en el embalse.

La disponibilidad de materiales como tobas, areniscas y conglomerados afectados por un fuerte crioclastismo, más la ausencia de vegetación contribuyeron a la generación del proceso de remoción en masa. Los elevados valores de pendiente obtenidos en el flanco occidental de la cordillera de Santa Cruz, en el tramo del río en el que se produjo el endicamiento favorecieron también la generación de la remoción en masa.

Otro factor condicionante es el contenido de humedad, la cual constituye uno de los principales factores desencadenantes en la generación de fenómenos de remoción en masa. Provoca sobre los materiales un incremento de las presiones intersticiales (presión de poros) y el flujo de agua a través del terreno. Esto genera una disminución en la resistencia al corte de los materiales, además de elevar su peso e influir en sus propiedades resistentes. Las intensas nevadas ocurridas en la región, durante los meses de mayo-agosto de 2005, podrían ser la causa de un incremento de peso en los materiales de la ladera, condicionando la generación del deslizamiento. Por otro lado, en los meses de octubre y noviembre de 2005, se registraron temperaturas anormalmente elevadas (>35°C), que pudieron contribuir al derretimiento de la masa névea acumulada y al rápido llenado del embalse y posterior colapso.

La geomorfología de la región es otro parámetro de importancia que condiciona la existencia de fenómenos de remoción en masa. Abele (1974) indicó la impor-

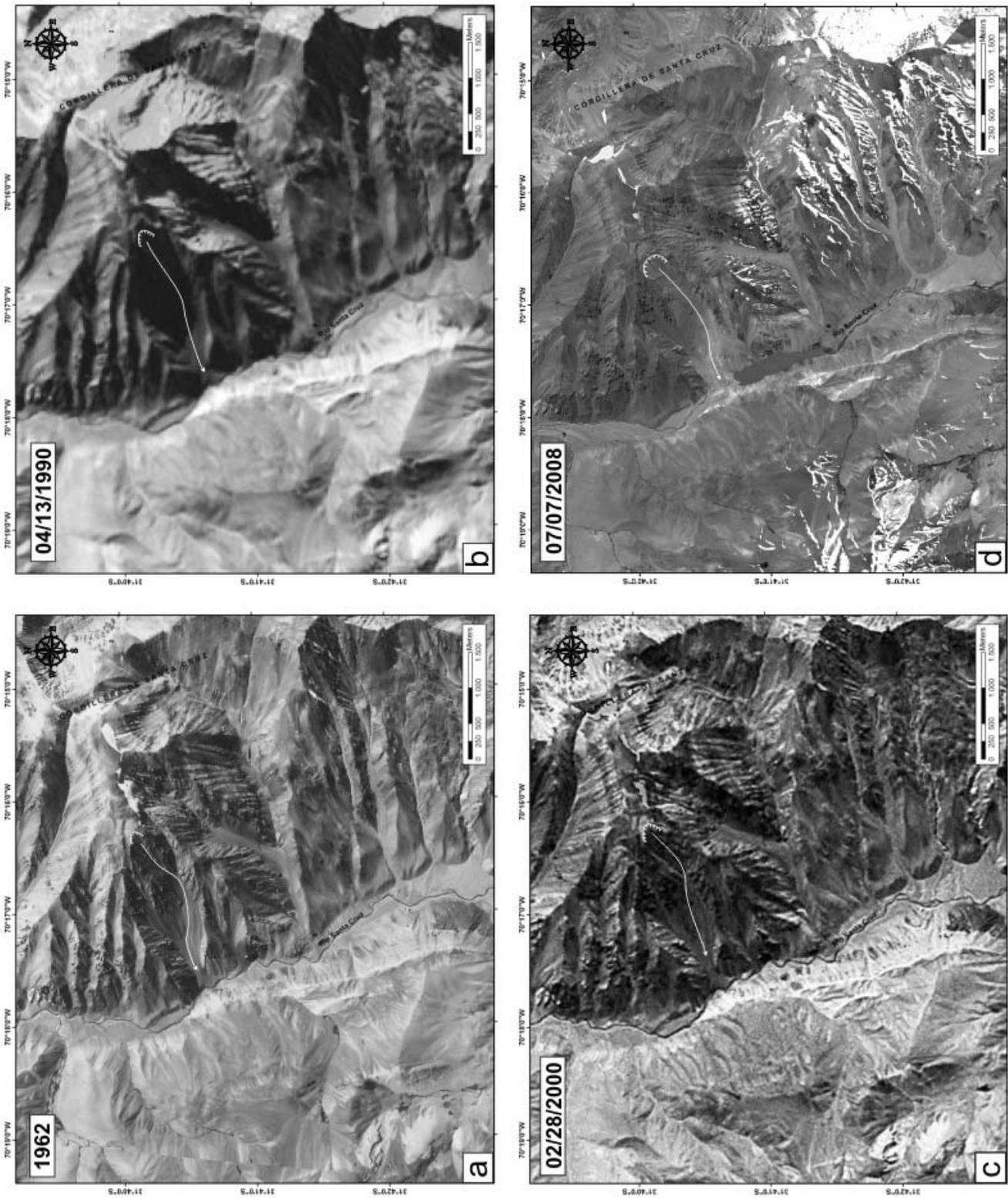


Figura 6: Evolución multitemporal del deslizamiento comparando a) fotografías aéreas del año 1962 e imágenes satelitales de los años b) 1990, c) 2000 y d) 2008.

tancia de los procesos periglaciales en la inestabilidad de las laderas en donde el proceso de congelamiento - descongelamiento facilita la aparición de grietas y por lo tanto de la producción de detritos. En el área de estudio, cuyas alturas superan los 4.400 m s.n.m., predominan los procesos de meteorización mecánica (crioclastismo) que generan la rotura de la roca y la formación de una espesa cubierta de detritos.

El colapso de este dique natural también podría haber sido desencadenado por la caída de un cono de detritos dentro del cuerpo de agua, tal como fue descrito por Hermanns *et al.* (2004, 2008) en las provincias de Neuquén y Salta o por un flujo de detritos tal como lo postularon Penna *et al.* (2007, 2008) al norte de la provincia de Neuquén. Si bien se ubican en la ladera del cerro Santa Cruz numerosos conos de detritos que ingresan a la laguna (Figs. 4a y c), es poco probable que éstos hayan actuado como disparadores del aluvión.

Los movimientos sísmicos son una de las causas principales en la iniciación de los procesos de remoción en masa (Keefer 1984, 2002). Keefer (1984) realizó una clasificación de los deslizamientos, basada en la terminología de Varnes (1978) y estableció que el sismo más pequeño capaz de producir un deslizamiento tiene una magnitud Ms 4. Si bien los eventos sísmicos registrados en la región en la actualidad son escasos, se han podido ubicar en el periodo 2000-2003, 46 eventos de Ms 4 a 5 (Cuadro 2) (USGS/NEIC 2008) y no se han registrado en el área sísmos de Ms > 5 (Fig. 8). Para un sismo de Ms 5.0, la distancia a la que se pueden producir deslizamientos no debe ser superior a 10 km (Papadopoulos y Plessa 2000) y sólo se ubicó un evento de Ms 4 a 5 a una distancia menor (Fig. 8).

Los eventos sísmicos indicados en la figura 8 se localizan bastante alejados del sitio de ocurrencia del deslizamiento, por lo que no tendrían una magnitud lo suficientemente grande como para causar la aceleración del terreno y afectar las laderas de la cordillera de Santa Cruz. Es pro-

bable entonces que el deslizamiento haya sido detonado por la elevada presión de agua en los poros asociada con el rápido derretimiento de una espesa cubierta de nieve acumulada.

CONCLUSIONES

Se ha identificado en la margen oriental de la quebrada del río Santa Cruz un deslizamiento de rocas y detritos, responsable de la obstrucción temporal del curso del río Santa Cruz al originarse un dique natural, que formó una laguna. Este dique natural posteriormente colapsó originando un aluvión (*flash flood*) de características destructivas que desagotó parcialmente el embalse.

El deslizamiento de rocas y detritos ya es reconocido en fotografías aéreas de la década del 60. Las condiciones litológicas, estructurales, morfológicas y climáticas de la región favorecieron la reiteración de movimientos de material en el lugar hasta originar el dique natural, que rompió en noviembre de 2005. La presencia de varias cicatrices, su posición relativa y sus dimensiones, permite deducir que su proceso de formación, se ha llevado a cabo en varias etapas.

La gran acumulación de nieve durante el invierno de 2005 y el rápido deshielo producido en la primavera, luego de varios días con temperaturas anormalmente elevadas produjo el rápido llenado de la laguna y posterior colapso del dique natural.

En el flanco occidental de la cordillera de Santa Cruz se ubicaron numerosos PRM que podrían formar nuevos diques naturales en la quebrada originando lagunas temporarias que, en caso de colapsar, producirían nuevos aluviones.

En el sector del deslizamiento, la presencia de nuevas cicatrices menores señala la inestabilidad de la ladera. Al comparar la imagen satelital del mes de abril de 2007 con la de 2008 fue posible observar un incremento en la cantidad y profundidad de estos escarpes por lo que existiría una elevada probabilidad de generación de nuevos movimientos que obturen la quebrada.

Por otro lado, la laguna originada a prin-

CUADRO 2: Sismicidad instrumental (Ms 4 a 5)*(*)

Año	Mes -día	Lat	Long	Profundidad [km]	Magnitud
2000	05 19	-31,84	-70,42	114,00	4,00
2000	12 12	-31,22	-70,36	33,00	4,00
2000	08 18	-31,71	-70,35	137,00	4,10
2000	11 20	-31,59	-70,35	141,00	4,10
2000	03 17	-31,95	-69,51	119,00	4,20
2000	07 12	-31,41	-70,00	123,00	4,20
2000	04 11	-31,74	-70,03	118,00	4,40
2000	08 26	-31,52	-69,64	224,00	4,40
2000	03 06	-31,81	-70,44	100,00	4,60
2001	08 10	-31,98	-69,89	132,00	4,00
2001	10 31	-31,35	-69,75	167,00	4,00
2001	11 05	-31,97	-70,18	122,00	4,00
2001	03 02	-31,64	-69,52	131,00	4,10
2001	08 26	-31,49	-69,65	158,00	4,10
2001	12 13	-31,72	-70,09	132,00	4,10
2001	07 26	-31,68	-70,08	144,00	4,20
2001	10 12	-31,89	-69,89	118,00	4,70
2001	08 16	-31,90	-69,80	122,00	4,90
2002	01 03	-31,07	-70,24	124,00	4,00
2002	03 28	-31,68	-69,98	142,00	4,00
2002	05 10	-31,56	-69,74	145,00	4,00
2002	09 28	-31,59	-70,35	134,00	4,10
2002	03 14	-31,49	-69,63	135,00	4,30
2002	05 28	-31,55	-69,85	139,00	4,30
2002	12 01	-31,77	-69,64	119,00	4,30
2002	03 16	-31,65	-69,90	119,00	4,50
2003	04 23	-31,57	-69,88	125,00	4,00
2003	06 08	-31,93	-69,68	136,00	4,00
2003	10 24	-32,00	-69,68	134,00	4,20
2003	10 12	-31,31	-69,53	127,00	4,60
2004	03 16	-31,92	-70,22	129,00	4,00
2004	05 19	-31,99	-69,55	100,00	4,00
2004	04 05	-31,62	-69,62	146,00	4,10
2004	01 04	-31,98	-69,71	121,00	4,20
2004	11 11	-31,46	-69,51	154,00	4,40
2004	06 17	-31,77	-69,97	121,00	4,80
2004	11 18	-31,85	-69,93	105,00	4,80
2005	02 09	-31,63	-70,35	125,00	4,00
2005	03 15	-31,27	-69,64	147,00	4,00
2005	06 27	-31,67	-70,16	126,00	4,10
2005	07 05	-31,77	-70,40	93,00	4,20
2005	07 31	-31,49	-69,72	146,00	4,20
2005	09 01	-31,87	-69,65	140,00	4,20
2005	03 03	-31,30	-70,27	132,00	4,40
2005	04 14	-31,59	-69,57	156,00	4,50
2005	06 04	-31,54	-69,74	150,00	4,50

(*) Periodo 28/02/2000-12/11/2005 (Fuente: USGS/NEIC 2008).

cipios de 2005 sólo fue desagotada parcialmente, por lo que en la actualidad es posible observar que aún posee una longitud superior a 1,5 km y un considerable

- 25, München.
- Álvarez, P., 1996. Los depósitos triásicos y jurásicos de la Alta cordillera de San Juan. En Ramos, V.A., Aguirre Urreta, M., Álvarez, P., Cegarra, M., Cristallini, E., Kay, S., Lo Forte, O., Pereyra, F., Pérez, D. (eds.) Geología de la región del Aconagua, provincias de San Juan y Mendoza. Subsecretaría de Minería de la Nación. Dirección Nacional del Servicio Geológico, Anales 24(5): 59-137, Buenos Aires.
- CONAE 2008. Comisión Nacional de Actividades Espaciales. Catálogo de Imágenes. <http://www.catalogos.conae.gov.ar/catalogo/catalogos.html>
- Cruden, D y Varnes, D. 1996. Landslides types and processes. En Turner, A.K. y Schuster, R.L. (eds.) Landslides. Investigation and Mitigation Transportation Research Board, National Research Council, 36-75, Washington DC.
- Departamento Hidráulica 2005. Aluvión de los días 12 y 13 de noviembre del 2005. Informe inédito, 16 p., San Juan.
- Diario de Cuyo, mes de noviembre de 2005, <http://www.diariodecuyo.com.ar>
- Dikau, R., Brunsden D., Schrott L., Ibsen M. (eds.) 1996. Landslide Recognition. Reporte N°. 1 of the European Commission Environment Programme Contract No. EV5V-CT94-0454. Identification, Movement and Causes, 251p., Chichester
- D'Odorico P., Sequeira N. y Pérez, DJ. 2006. Geología del curso medio del río Santa Cruz, Andes principales (31°45' LS) San Juan, Argentina. 11° Congreso Geológico Chileno, Antofagasta. Actas 2: 193-196.
- D'Odorico, P., Pérez, D. y Sequeira, N. 2008. El represamiento del río Santa Cruz, Cordillera Principal y Frontal (31° 45'LS), Provincia de San Juan, Argentina. 17° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 270-271, Buenos Aires.
- Garcés, G. 2008. Identificación y cuantificación de lagunas en alta cordillera a partir de imágenes Aster y otros sensores remotos. 17° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 401-402, Buenos Aires.
- Hermanns, R.L., Niedermann, S., Ivy-Ochs, S. y Kubik P. 2004. Rock avalanching into a landslide-dammed lake causing multiple dam failure in Las Conchas valley (NW Argentina) - evidence from surface exposure dating and stratigraphic analyses. *Landslides* 1(2): 113-122, Berlin.
- Hermanns, R.L., Folguera, A., Penna, I., Naumann, R. and Niedermann, S. 2006. Morphologic characterization of giant flood deposits downriver landslide dams in the Northern Patagonian Andes. *Geophysical Research Abstracts* 8, 09181.
- Hermanns, R.L., Folguera, A., Penna, I.M., González Díaz, F.E., Fauque, L. y Niedermann, S. 2008. Landslide dams in Central Andes of Argentina (northern Patagonia and the Argentine northwest). En Evans, S.G., Hermanns, R.L., Strom, A. y Scarascia Mugnozza, G. (eds) NATO, Series Publication Security of natural and artificial rock slide dams, Springer, (en prensa), Berlin.
- Keefer, D.K. 1984. Landslides caused by earthquakes. *Bulletin of the Geological Society of America* 95: 406-421.
- Keefer, D.K. 2002. Investigating landslides caused by earthquakes-A historical review. *Surveys in Geophysics* 23: 473-510.
- Kimio, I., Toshio M., Tatsuhci, I. y Yoshihisa, K. 2005. Outbursts and disasters of Takaisoyama and Hose Landslide dams (1892) in East Shikoku. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering* 58(4): 3-12.
- Köppen, W. 1931. *Grundriss der Klimakunde*. Walter de Gruyter Co. 12, 388 p., Berlín.
- Lencinas, A. 1982. Características estructurales del extremo sur de la Cordillera Sanjuanina, Argentina. 5° Congreso Latinoamericano de Geología, Actas 1: 489-498, Buenos Aires.
- NASA Landsat Program, 1990-2000. Landsat ETM+ and TM scene and mosaics, USGS, Sioux Falls, South Dakota.
- NWS (National Weather Service U.S. NOAA's), 2006. Definitions of flash flood www.srh.noaa.gov/mrx/hydro/flooddef.php
- Papadopoulos, G. y Plessa, A. 2000. Magnitude-distance relations for earthquake-induced landslides in Greece. *Engineering Geology* 58 (3-4): 377-386.
- Penna, I.M., Hermanns, R.L. y Folguera, A. 2007. Determinación del área inmediata afectada por el desagote de la Laguna Navarrete, provincia de Neuquén (36°30'S-71°O). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 62(3): 460-466, Buenos Aires.
- Penna, I.M., Hermanns, R., Folguera, A. 2008. Remoción en masa y colapso catastrófico de diques naturales generados en el frente orogénico andino (36°-38°S): Los casos Navarrete y río Barrancas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63(2):172-180, Buenos Aires
- Pérez, D. 1995. Estudio geológico del Cordón del Espinacito y regiones adyacentes, Provincia de San Juan. Tesis Doctoral de la Universidad de Buenos Aires (inédito), 262 p., Buenos Aires.
- Perucca, L. y Esper, Y. 2006. El aluvión del 12 de Noviembre de 2005 en el río Santa Cruz. Departamento Calingasta, Provincia de San Juan. 3° Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, Actas 1: 233-242, Córdoba.
- Perucca, L. y Esper, Y. 2009. Evolution of a debris-rock slide causing a natural dam: the flash flood of Río Santa Cruz, Province of San Juan? November 12, 2005. *Natural Hazards* 50(2): 305-320.
- Ramos, V., Aguirre Urreta, M. y Lencinas, A. 1993. El Toarciano fosilífero de Pachón y su relación con el Jurásico de Cordillera Principal de San Juan. 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 2: 94 - 104, Buenos Aires.
- Riggs, H.C. 1974. Flash flood potential from channel measurements. En *Flash Floods*. Proceedings of the Paris Symposium. IAHS-UNESCO-WMO Ed., Publication 112: 52-56, Paris.
- Sepúlveda, S.A. 2000. Methodology for debris flow hazard evaluation in mountainous environments. *Comunicaciones* 51: 3-18.
- USGS/NEIC 2008. National Earthquake Information Center, World Data Center A for Seismology. Global Earthquake Search. United States Geological Survey, National Earthquake Information Center. http://w.neic.cr.usgs.gov/neis/epic/epic_global.html.
- USGS 2000. Shuttle Radar Topography Mission, 3 Arc Second, Global Land Cover Facility, University of Maryland, College Park, Maryland.
- Varnes, D. 1978. Slope movement. Types and Processes. En Schuster R.L. y Krizek R.J. (eds.) *Landslides: analysis and control*. Transportation Research Board Special Report 176, National Academy of Sciences, Chapter 2:11-33, Washington DC.

Recibido: 5 de junio, 2009

Aceptado: 22 de septiembre, 2009