

# EVENTOS DE REMOCIÓN EN MASA EN LA PROVINCIA DE TUCUMÁN: TIPOS, CARACTERÍSTICAS Y DISTRIBUCIÓN

Diego S. FERNÁNDEZ

Servicio Geológico Minero Argentino, Delegación Tucumán y Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Tucumán.  
Email: diego72es@yahoo.es

## RESUMEN

La provincia de Tucumán tiene una superficie de 22.524 km<sup>2</sup>, de los cuales el 25 % aproximadamente corresponde a un relieve montañoso. Este hecho, sumado a la presencia de climas de carácter monzónico con precipitaciones intensas (> 100 mm/24 h), configura un panorama propicio para el desarrollo de movimientos en masa en las laderas de las principales cadenas montañosas de la provincia. En este trabajo se describen 279 eventos de movimientos en masa. Para su identificación se utilizaron fotografías aéreas, imágenes satelitales multitemporales y controles de campo. El análisis de los factores de control (precipitaciones, inclinación y orientación de las pendientes, litología) se realizó bajo un entorno SIG. Los tipos de movimientos descritos corresponden a deslizamientos poco profundos, flujos y avalanchas de detritos, caídas de rocas y movimientos complejos. La distribución espacial de estos movimientos se halla controlada fundamentalmente por las precipitaciones, como factor desencadenante, y por la pendiente y el grado de meteorización de los materiales, como factores de control.

Palabras clave: *Remoción en masa, inventario, factores de control, Tucumán.*

**ABSTRACT:** *Mass wasting events in Tucumán province: Types, characteristics and distribution.* The province of Tucumán has an area of 22,524 km<sup>2</sup>, where almost 25% is covered by a mountainous relief. This fact, plus the presence of monsoon climate type with intense precipitations (> 100 mm/24 h) configure a favourable scenario for the development of mass movements over the main mountain slopes of the province. In this paper 279 mass movement events are described. The identification was carried out by the use of aerial photographs, multitemporal satellite images and field controls. The analysis of the control factors (precipitations, slope angle and orientation, lithology) was made under a SIG environment. The types of movements described are shallow landslides, debris flows, debris avalanches, rock falls and complex movements. The spatial distribution of these movements is controlled mainly by the rainfalls, as triggering mechanisms, and slope angle and weathering of rocks as causal factors.

Keywords: *Mass wasting, Inventory, Control factors, Tucumán.*

## INTRODUCCIÓN

Los movimientos en masa constituyen los procesos geomorfológicos más importantes del sector montañoso de la provincia de Tucumán. La percepción de estos eventos ha ido en aumento en los últimos años, a medida que fueron multiplicándose los casos registrados en las principales rutas que unen el sector de llanura con los destinos turísticos ubicados al oeste de la provincia.

Aproximadamente el 25 % del territorio provincial se encuentra conformado por un relieve montañoso. Este hecho, sumado a la presencia de climas de carácter monzónico con precipitaciones intensas (> 100 mm/día), configura un panorama propicio para el desarrollo de movimientos en masa en las laderas de las principa-

les cadenas montañosas de la provincia. Estos procesos varían en cuanto a la tipología, magnitud y frecuencia dependiendo de los factores de control de los mismos (clima, pendiente, litología, estructura, vegetación, etc.). También se observan algunas diferencias en la magnitud y características generales entre los procesos antiguos y los procesos que se manifiestan actualmente. Evidencias de grandes cantidades de sedimentos desplazados en el pasado por procesos de remoción en masa en la provincia de Tucumán han sido descritas en varios trabajos (Hermanns y Strecker 1999, Collantes 2003, Fernández 2005). En cuanto a los procesos actuales, sus características y factores de control fueron analizados solo en algunos sectores de la provincia (Collantes 1994, Pereyra *et al.* 2002, Fernández y Lutz 2003,

Fernández y Lutz 2006).

El presente trabajo tiene como objetivos la evaluación regional de los principales procesos de remoción en masa que tienen lugar en la provincia de Tucumán, su distribución espacial y su relación con los factores que controlan la ocurrencia de estos fenómenos.

## CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA

El relieve de la provincia se caracteriza por la presencia de grandes cordones montañosos que se emplazan al oeste y noreste y que presentan un rumbo general nort-sur. Esta disposición genera un marcado gradiente altitudinal en sentido este-oeste, con valores extremos de 300 metros en las zonas más bajas de la llanura (límite

con la provincia de Santiago del Estero) hasta más de 5000 m s.n.m. en los sectores cumbres de la sierra del Aconquija. Las principales unidades orográficas citadas de norte a sur, son: sierra de Quilmes, cumbres Calchaquíes, sierras del Noreste (sierra de Medina, El Nogalito, La Ramada y del Campo), sierra de San Javier, sierra del Aconquija y sierras del Sudoeste (cumbres de Santa Ana, sierra de Chavarría, cerro Quico y cumbres de Los Llanos) (Fig. 1). El clima de la región es de tipo subtropical con estación seca en donde las máximas precipitaciones tienen lugar entre los meses de diciembre a marzo. Los cordones montañosos del oeste tucumano actúan como barrera orográfica de los vientos húmedos provenientes principalmente del sector sudeste, por lo que tienen gran injerencia en la distribución de las precipitaciones. Estas varían de 500 mm en el sector sudeste de la provincia hasta más de 2000 mm en la ladera oriental de la sierra del Aconquija. Al oeste de las sierras principales, en el valle de Santa María, las precipitaciones disminuyen drásticamente alcanzando valores del orden de los 200 mm anuales.

La vegetación se encuentra fuertemente influenciada por las precipitaciones. Sobre las laderas orientales de cumbres Calchaquíes, sierra del Aconquija y sierras del Sudeste se desarrolla la selva montana de las Yungas, mientras que del lado oeste predomina la vegetación de tipo xerófila. En el caso de las sierras del Noreste, donde las precipitaciones máximas alcanzan los 1000 mm anuales tiene lugar el bosque chaqueño serrano.

El ambiente geológico del sector montañoso se caracteriza por la presencia de un basamento cristalino constituido por metamorfitas de grado metamórfico variable que son intruidas por numerosos cuerpos ígneos. De esta manera, se observan metamorfitas de bajo grado en la sierra de San Javier, constituidas por pizarras y filitas, mientras que hacia el sudoeste cobran importancia las metamorfitas de alto grado caracterizadas por gneises y migmatitas. Entre ambos extremos es posible diferenciar una zona de metamorfismo in-

termedio constituido por esquistos bandeados. Estas metamorfitas fueron asignadas al Grupo Puncoviscana por González *et al.* (2000) de edad precámbrica superior-cámbrica inferior, mientras que los granitoides que las intruyen presentan edades ordovícico-silúricas. Estas rocas se encuentran altamente deformadas con numerosas discontinuidades que permiten la penetración del agua facilitando los procesos de meteorización química (Mon *et al.* 2003). Sobre los bordes del basamento cristalino se dispone una cubierta sedimentaria caracterizada por dos sucesiones sedimentarias principales. La primer sucesión de edad cretácica-paleógena, representada por las Formaciones El Cadillal (Bossi 1969), Río Loro (Bossi 1969) y Río Nío (Mon y Suayter 1973) y la segunda, de edad neógena, correspondiente a los grupos Choromoro (Porto y Danieli 1974), en el valle de Tapia-Trancas, Santa María (Ruiz Huidobro 1972), en el valle homónimo y Formación Aconquija (Dal Molin *et al.* 2003) en el sudoeste de la provincia. Las secuencias cretácico-paleógenas presentan una litología caracterizada principalmente por areniscas medias a gruesas con intercalaciones de capas conglomerádicas de variado espesor. Las secuencias del Neógeno se hallan conformadas principalmente por limolitas y areniscas finas a medias con intercalaciones de bancos de yeso y calizas y la presencia de niveles de tobas. Rocas volcánicas y volcanoclasticas tienen lugar en sectores restringidos de la sierra del Aconquija y las sierras del noreste de la provincia.

Por último, se observan niveles cuaternarios que se hallan cubriendo en parte a las secuencias terciarias y conformando el sector de pedemonte de las principales sierras. Están compuestos por conglomerados gruesos que son cubiertos en parte por una delgada capa de material fino loésico. Este material loésico adquiere mayor espesor en el valle de Tafí.

## METODOLOGÍA

Para la identificación de los procesos se utilizaron fotografías aéreas a distintas

escalas: 1:50.000 (años 1969 y 1971) que cubren toda la provincia y 1:20.000 (año 2001) en sectores restringidos. También se utilizaron imágenes satelitales Landsat TM (años 1996 y 2000) y Aster (2001) cuando la resolución lo permitió.

En base a la fotointerpretación y análisis de imágenes se confeccionó un mapa preliminar de distribución de los eventos de remoción en masa a nivel provincial y se procedió al control de campo a partir de campañas realizadas en las principales unidades orográficas de la provincia. Estas campañas se llevaron a cabo entre los años 2001 a 2006, en donde los distintos tipos de procesos fueron posicionados y descritos.

Con la información obtenida de los pasos previos se desarrolló una base de datos geográfica con la ubicación de los puntos y sus características para la posterior creación del mapa final de distribución de los movimientos de ladera bajo un entorno SIG.

Se realizó el análisis de la distribución de los movimientos con respecto a los distintos factores de control tenidos en cuenta mediante la superposición de los eventos sobre los mapas temáticos correspondientes. Para la elaboración del mapa de unidades litológicas de la provincia se utilizaron los mapas litológicos de las cartas de peligrosidad geológica 2766-II San Miguel de Tucumán y 2766-IV Concepción a escala 1:250.000 publicadas por el Servicio Geológico Minero Argentino. Además se confeccionó un modelo digital de terreno de la provincia utilizando datos SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) con una cobertura espacial cada 90 metros. A partir de este modelo se obtuvieron los mapas de pendientes y de orientaciones de las laderas donde tuvieron lugar los movimientos.

Para el análisis de los datos climáticos se analizaron parámetros como: variación de la precipitación media anual, precipitaciones máximas absolutas diarias y cantidad de meses con suelos saturados al año para una serie temporal de más de 50 años con información proveniente de las estaciones meteorológicas Concepción y Potrero del

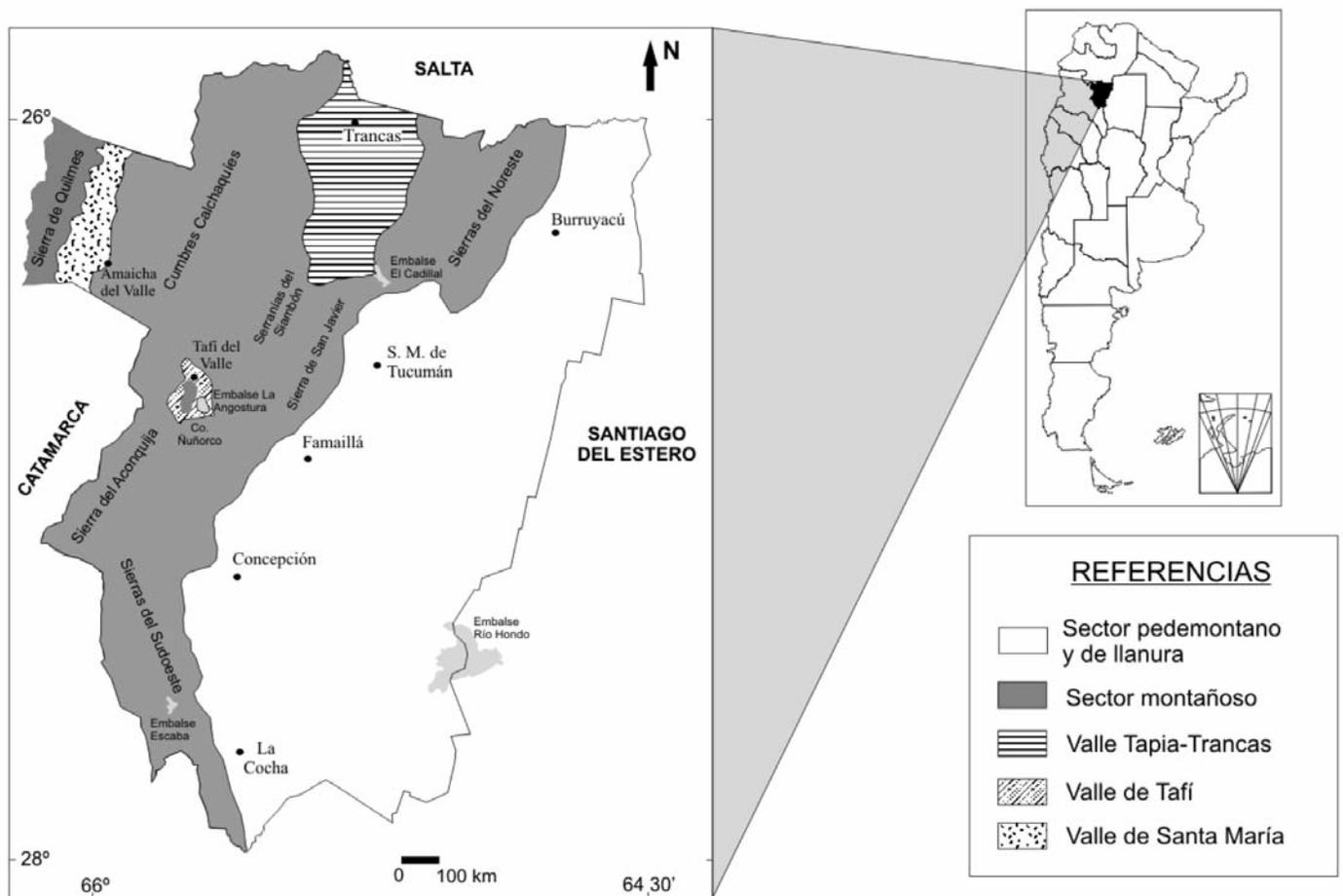


Figura 1: Mapa de ubicación del área de estudio.

Clavillo. Luego fueron incorporadas al análisis otras 5 estaciones (El Guayal, Los Pizarro, Escaba, Las Mesadas y Tafi del Valle) para observar la relación entre la generación de eventos, la intensidad de las precipitaciones y la acumulación de lluvia en días previos. En este último caso fueron incorporados al análisis eventos que tuvieron lugar en la provincia durante el período 1992 -2008.

## TIPOS DE MOVIMIENTOS IDENTIFICADOS

Los distintos tipos de movimientos de laderas reconocidos en la zona fueron agrupados en cuatro clases principales: deslizamientos, flujos, caídas y movimientos complejos (cuadro 1). Para su descripción se utilizaron las clasificaciones de Varnes (1978) y de Pierson y Costa (1987). Los deslizamientos traslacionales de tierra y

de detritos constituyen movimientos poco profundos (1 a 3 metros) y que tienen esencialmente un plano de deslizamiento recto. Son los procesos más comunes en las laderas orientales de las sierras de la provincia. Constituyen movimientos que se desplazan pendiente abajo principalmente sobre la interfase suelo-roca meteorizada o en menor medida siguiendo planos de foliación o diaclasamiento en las rocas fracturadas del basamento metamórfico. Los materiales deslizados constituyen mezclas heterogéneas con contenidos variables de fragmentos líticos angulosos, suelo orgánico y restos de vegetación.

En el caso de los deslizamientos rotacionales, éstos involucran el despegue y la rotación de la masa desplazada, y suelen originarse en litologías de granulometría fina como consecuencia del aumento de peso por absorción de agua o en metamorfitas de bajo grado asociados a juegos

de diaclasas. La profundidad del plano de falla puede alcanzar varios metros. Este tipo de deslizamientos fue observado en materiales loésicos cohesivos ubicados en el valle del río Singuil, en limolitas ubicadas en Villa Padre Monti (sierras del noreste), en areniscas cretácicas ubicadas en los altos de Yerba Huasi (camino a Potrero de Las Tablas) y en metamorfitas de bajo grado sobre la ruta 338 (camino a San Javier y Villa Nougues).

En cuanto a los flujos, han sido reconocidos tres tipos principales: flujos de detritos, flujos hiperconcentrados y avalanchas de detritos.

Los flujos de detritos constituyen flujos densos de granulometría gruesa que involucran gran cantidad de material. Los depósitos dejados por este tipo de proceso se caracterizaron en general por ser matriz portante en donde los bloques de mayor tamaño se encuentran inmersos aleatoria-

**CUADRO 1:** Tipos de movimientos, litología predominante y unidades fisiográficas afectadas.

Tipo de Movimiento	Proceso Identificado	Litología Predominante	Unidad Fisiográfica
Deslizamientos	deslizamiento traslacional de tierra	suelos	Sierra del Aconquija Cumbres Calchaquíes
		granitoides metamorfitas	Sierra del Aconquija Cumbres Calchaquíes
	traslacional	areniscas y limolitas	Sierras del Noreste Serranías del Siambón
	deslizamiento de detritos	loess	Sierra de San Javier
	rotacional	metamorfitas de bajo grado	Cumbres Las Higueras
		areniscas y limolitas	Altos de Yerba Huasi, Sierras del NE
	Flujos	flujo de detritos	metamorfitas de grado medio
flujo hiperconcentrado		metamorfitas de grado medio, granitoides	Sierra de Quilmes Cumbres Calchaquíes
avalancha de detritos		metamorfitas de grado medio	Sierra del Aconquija Qda. del río Los Sosa
Caídas	caídas de rocas	Metamorfitas, areniscas y conglomerados	Sierra del Aconquija Embalse Escaba
Movimientos Complejos	combinación de deslizamientos y flujos	metamorfitas y granitoides	Sierra del Aconquija Cumbres Calchaquíes

mente. Evidencias de estos procesos han sido observadas en Tañi del Valle, El Mollar, en las cercanías del abra del Infiernillo y en los cursos fluviales provenientes del flanco oriental de las cumbres Calchaquíes y sierra del Aconquija.

Los flujos hiperconcentrados se originaron en sectores vinculados a la red de drenaje, en las cercanías de fuertes pendientes, donde la concentración de sedimentos va aumentando como consecuencia del aporte de material de las laderas. Constituyen una mezcla de sedimentos y agua lo suficientemente densa como para evitar su transporte en forma turbulenta. Este tipo de movimiento se halla a mitad de camino entre la carga sólida transportada normalmente por los cursos de agua y los flujos densos. Según Costa (1984), la carga de sedimento expresada en porcentaje de peso para estos flujos varía entre el 40% y el 70%. Sus depósitos se hallan pobremente seleccionados y presentan estratificación débil, habiendo sido observados en la quebrada del río Los Sosa y en cercanías de la localidad de El Pichao, en la sierra de Quilmes.

Las avalanchas de detritos observadas en la provincia se habrían originado durante

las intensas precipitaciones a partir de deslizamientos que tuvieron lugar en los sectores más altos de las laderas. A medida que la masa de pequeños bloques y detritos se deslizó ladera abajo fue adquiriendo mayor deformación y ganando en contenido de agua y aire hasta transformarse en un deslizamiento fluente compuesto por detritos y sedimentos finos, agua y aire; esto responde a lo que Sharpe (1938) originalmente definió como avalancha de detritos (*debris avalanche*) y que Pierson y Costa (1987) clasifican dentro de la categoría de flujos granulares masivos.

Las caídas de rocas se hallan vinculadas principalmente a los taludes subverticales de las rutas montañosas de la provincia. Sin embargo se observó también en la quebrada del río Pueblo Viejo afectando a lomadas bajas constituidas por conglomerados cuaternarios y en la quebrada del río Los Sosa en un sector donde afloran granitoides.

Movimientos de tipo complejo se han reconocido en la quebrada del río Los Sosa y del río Marapa. Por lo general son el resultado de tres o más deslizamientos superficiales que confluyen en un mismo canal, depositando gran cantidad de material que

se mezcla con el agua proveniente de las laderas y de los cauces menores hasta convertirse en flujos.

### Movimientos en taludes de camino

Los eventos de remoción en masa relacionados a taludes de camino responden a dos tipos: deslizamientos traslacionales y caídas de rocas. En el primer caso fueron observados en la ruta provincial N° 338, camino a la localidad de San Javier, en donde los deslizamientos afectan principalmente a la cubierta aluvial que se encuentra por sobre los afloramientos metamórficos. En el camino entre las localidades de San Javier y Villa Nougés, situado sobre la zona cumbral de la sierra de San Javier, fueron identificados algunos deslizamientos traslacionales de escasa magnitud afectando a los afloramientos metamórficos de bajo grado que se hallan fuertemente fracturados.

El otro sector en donde se evidenciaron movimientos vinculados a cortes de camino lo constituye la ruta provincial N° 307. La traza de esta ruta, que comunica a las poblaciones de la llanura tucumana con los valles intermontanos de altura, divaga por la quebrada del río Los Sosa. Los taludes de la misma se hallan labrados principalmente sobre rocas metamórficas de grado medio y granitoides que se hallan fuertemente alterados. Si bien en general los cortes de caminos excavados en estas rocas son estables se observaron procesos de caídas de rocas vinculadas a nuevas obras realizadas sobre su trazado. Evidencias de este proceso fueron citadas por Fernández y Lutz (2003) para los sectores conocidos como Angosto del Naranjal y Kilómetro 32 de la quebrada del río Los Sosa, donde personal de Vialidad Provincial realizó voladuras con el objetivo de ensanchar la ruta. Deslizamientos traslacionales aislados fueron observados afectando a la tonalita El Indio que se halla profundamente alterada, en sectores cercanos al paraje conocido como Fin del Mundo, los cuales depositaron importantes cantidades de arena sobre la ruta.

Otro escenario de generación de caídas de rocas lo constituye la traza de los ca-

minos con taludes formados por depósitos conglomerádicos pertenecientes a antiguos flujos de detritos. Este es el caso de la ruta 308, en el tramo entre Escaba y Balcosna (provincia de Catamarca), que corta numerosos afloramientos de flujos antiguos con presencia de grandes bloques de granitoides y metamorfitas que tienden a desprenderse y caer de las paredes casi verticales durante las lluvias.

## FACTORES DE CONTROL

Los factores de control de los procesos antes descritos fueron divididos en factores condicionantes y factores desencadenantes. Los primeros se vinculan con las características intrínsecas del terreno como la litología, estructura y forma de terreno, mientras que los desencadenantes son aquellos que actúan en forma externa en un momento preciso originando el aumento de las tensiones desestabilizadoras o reduciendo la resistencia del terreno.

### Factores condicionantes

**Litología:** Analizando la variación de los movimientos en masa con respecto a las unidades litológicas se pudieron establecer algunas relaciones entre los mismos. Los deslizamientos de detritos traslacionales tuvieron lugar en casi todas las litologías presentes dentro del área de estudio, mientras que los de tipo rotacional fueron identificados en metamorfitas de bajo grado, areniscas, limolitas y loess (Fig. 2). Los flujos de detritos y las avalanchas de detritos fueron observados principalmente en metamorfitas de grado medio a alto y en granitoides. Los procesos de caída de rocas tuvieron lugar en conglomerados y en menor medida en granitoides y metamorfitas. Por último, los movimientos complejos se asociaron a metamorfitas de grado medio a alto. El porcentaje acumulado del número de eventos individuales que se registraron en las distintas litologías se puede apreciar en la figura 3.

Al analizar los deslizamientos en forma conjunta (Fig. 4) se pudo apreciar que los sectores donde afloran las metamorfitas fueron afectados por el 64% de los movi-

mientos registrados (179 eventos), seguido de las áreas donde afloran granitoides con el 18% (50 eventos). Esto resulta lógico ya que ambas litologías abarcan grandes áreas en la zona de estudio. Al calcular la densidad de eventos por unidad de área para cada litología, resulta que las regiones donde afloran los granitoides presentan la mayor densidad con 0,1 evento/km<sup>2</sup>, seguido de las regiones con metamorfitas (0,04 eventos/km<sup>2</sup>), los depósitos cretácicos-paleógenos (0,02 eventos/km<sup>2</sup>) y las sedimentitas del Neógeno (0,01 evento/km<sup>2</sup>).

**Topografía:** A partir del modelo digital del terreno se determinó la pendiente de las zonas de arranque de los movimientos y la orientación de las laderas donde se originaron. Para este análisis fueron excluidos aquellos movimientos que fueron relacionados a cortes de caminos.

Las pendientes generales del área montañosa varían de 2°, en los sectores pedemontanos, a más de 40° en las partes más empinadas. Dentro de este amplio rango los procesos estudiados acontecieron en pendientes superiores a los 5°, ubicándose principalmente en un rango que oscila entre 12° y 25° (con una media de 20°), excepto en el caso de las avalanchas de detritos que fueron observadas en pendientes superiores a 25° (Figs. 5a y b). Las pendientes más bajas donde se registraron movimientos en masa fueron de 6,78° (deslizamiento rotacional) y 6,91° (flujo hiperconcentrado).

Al analizar la distribución de frecuencia de la figura 5a se observa como el número de eventos comienza a aumentar desde los 5° hasta llegar a los 12°, impulsado principalmente por los deslizamientos rotacionales, flujos de detritos y deslizamientos traslacionales de tierra. A partir de esta última inclinación el número de eventos desciende hasta los 20° en donde comienza el pico de frecuencia de eventos más importante que alcanza su máximo a los 25° impulsado principalmente por los deslizamientos traslacionales de detritos que son los eventos más comunes en las sierras. A partir de los 25° la frecuencia comienza a decaer de forma marcada y

por encima de los 32° de inclinación alcanza los valores de frecuencia más bajos registrándose principalmente avalanchas de detritos. Este decrecimiento en la frecuencia de eventos se puede deber a que las laderas más empinadas tienen suelos de menor espesor, quizás por ello solo el 11% de los deslizamientos traslacionales tuvieron lugar en pendientes superiores a 30°, y a que el porcentaje de áreas con pendientes muy altas es relativamente bajo. La exposición de las laderas es considerada como un elemento de síntesis natural de diferentes condiciones de humedad del suelo y de desarrollo de la vegetación, componentes ambas que generan condiciones diferenciales en cuanto a favorecer o restringir los movimientos en masa. Lo anterior tiene relación con las condiciones de solana, en las laderas ubicadas hacia el norte, y umbría, en laderas orientadas hacia el sur, y sus efectos sobre la temperatura, la evapotranspiración y la acumulación de agua. Al analizar las orientaciones de las laderas llama la atención que la mayor presencia de eventos de remoción en masa no se halla relacionada con la orientación sur, ya que las laderas con esa orientación suelen ser más húmedas. Sobre 267 eventos analizados, una vez removidos aquellos que se constató que se hallan afectados por la orientación de las estructuras o por cortes de camino, el 64% de los eventos identificados tuvieron lugar en laderas orientadas al norte. En el gráfico de rosa de los vientos de la figura 5c, se observa que las máximas frecuencias espaciales corresponden a la orientación noreste, principalmente en las laderas orientadas entre 45° y 90°, y le sigue en importancia la orientación sudeste en el rango ubicado entre 90° y 135°. La ocurrencia de un mayor número de eventos en pendientes orientadas al norte ya fue descrita por otros autores (Salter *et al.* 1981, Crozier *et al.* 1980) en trabajos que involucraron a deslizamientos generados por precipitaciones en Nueva Zelanda. Esto se puede deber a que en las laderas con mayor insolación los ciclos de humedecimiento-desección del suelo son más numerosos, lo que trae aparejado un aumento de los macropo-

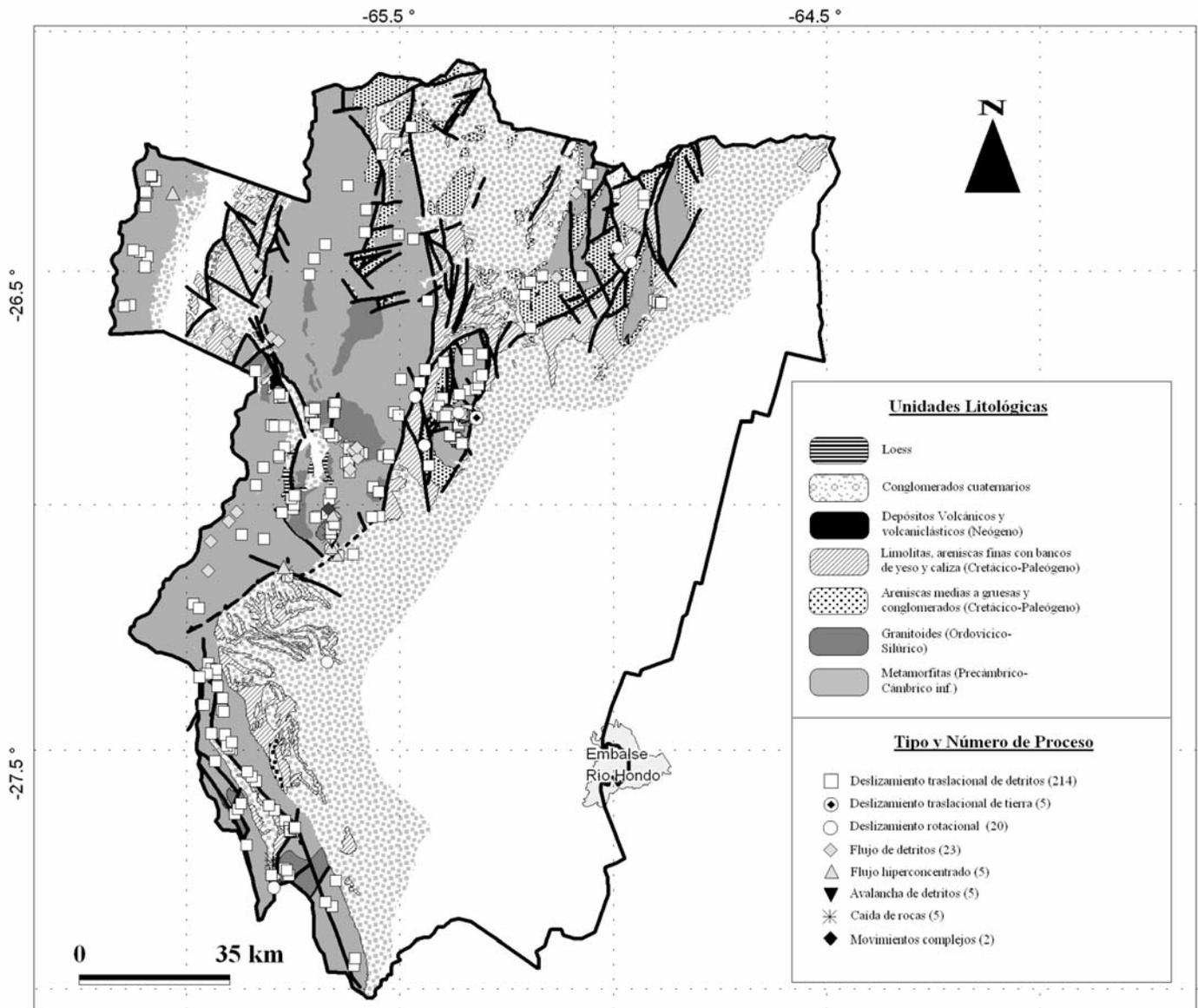


Figura 2: Distribución de los distintos tipos de procesos sobre las unidades litológicas predominantes.

ros por agrietamiento permitiendo una mayor infiltración del agua de lluvia y generando un aumento en la presión de poros de los materiales (Selby 1993). Al graficar las orientaciones por cuadrantes según tipo de movimiento (Fig. 5d) es posible diferenciar que los movimientos que se originaron en laderas de orientación noreste son principalmente los deslizamientos traslacionales y rotacionales, los flujos predominan en laderas de orientación noroeste, las avalanchas de detritos en la dirección sudoeste y los dos eventos de movimientos complejos tuvieron lugar

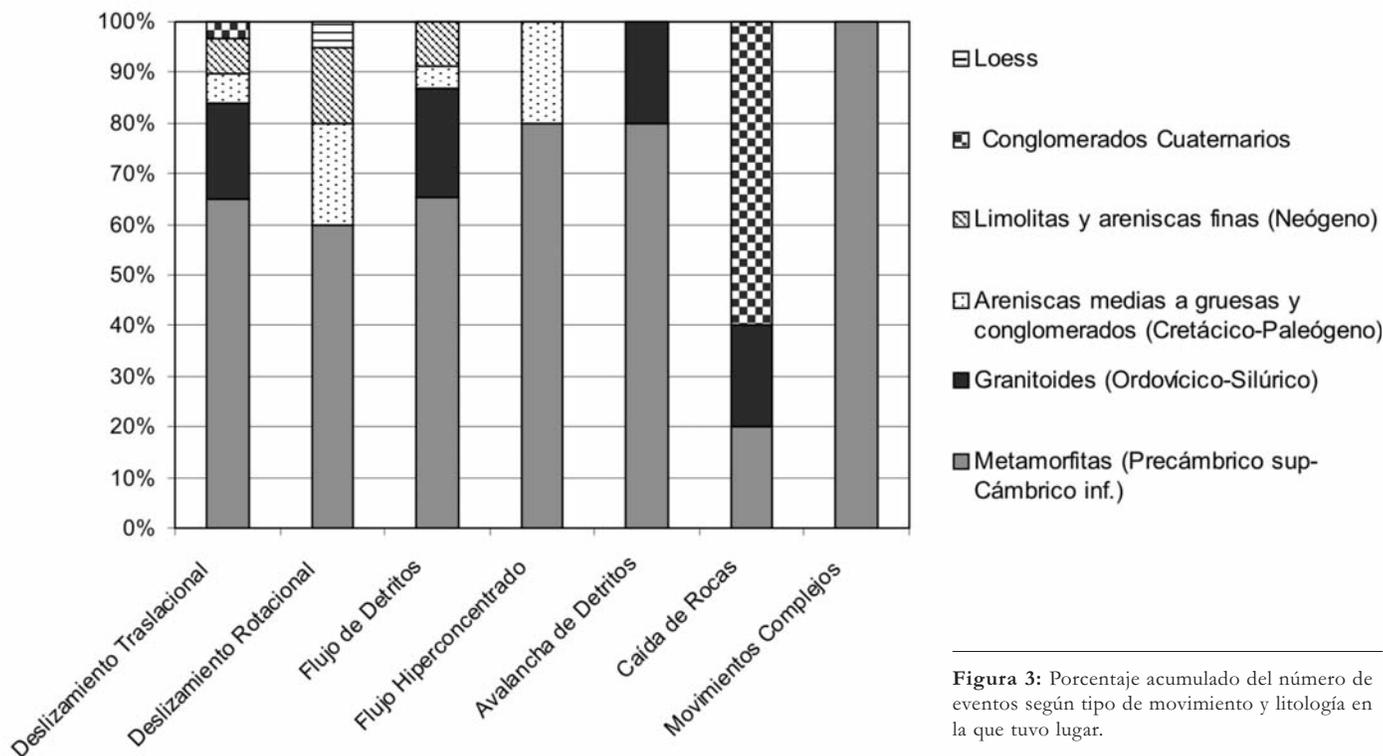
en laderas orientadas al norte.

#### Estructura y meteorización

Los planos de foliación y los juegos de diaclasas locales tuvieron una importante influencia en procesos observados sobre rocas metamórficas de bajo grado, como las ubicadas sobre la ruta provincial N° 338, que une las localidades de Yerba Buena con Anta Muerta (sierra de San Javier). En este sector es común la presencia de deslizamientos traslacionales que afectan las metamorfitas alteradas y fracturadas ocasionando cortes de rutas durante el

período de lluvias.

La presencia de granitoides muy alterados permitió la generación de deslizamientos múltiples en áreas reducidas. Las áreas típicas donde la alteración meteórica tiene gran injerencia en la generación de movimientos de laderas son las quebradas del río Los Sosa y del Portugués. En la primera cobran importancia los numerosos movimientos observados en el tramo ubicado entre los parajes conocidos como El Indio y La Heladera, donde aflora la tonalita El Indio. Inmediatamente al sur se ubica la quebrada del Portugués



**Figura 3:** Porcentaje acumulado del número de eventos según tipo de movimiento y litología en la que tuvo lugar.

donde tienen lugar deslizamientos traslacionales de importante magnitud que afectan al granito Ñuñorco. El grado de meteorización de este cuerpo fue estudiado por Kirschbaum (2002) quien describió una serie de perfiles sobre el camino de la quebrada, conformados por afloramientos de granito gris de grano medio afectado por una intensa meteorización y cubierto por un suelo desarrollado sobre loess. Según este autor el granito ubicado por debajo del suelo presenta una fuerte argilitización y pérdida de cohesión primaria. Los relictos del protolito, de 1 a 2 metros de diámetro, se hallan inmersos en los productos de meteorización.

#### Factores desencadenantes

**Precipitaciones:** Los procesos de remoción en masa en la provincia de Tucumán ocurren durante el período estival como consecuencia de las lluvias torrenciales que comienzan a mediados de diciembre y se extienden hasta marzo de cada año. Las lluvias presentan un régimen monzónico que generan la saturación estacional de los materiales porosos provocando el incremento de las presiones intersticiales, aumento del peso de la masa del suelo y el

flujo de agua a través del terreno, ocasionando una disminución en la resistencia al corte de los materiales. El desencadenamiento de eventos de remoción en masa por lluvias intensas pudo ser comprobado durante las salidas de campo que tuvieron lugar entre los meses de febrero y marzo para el período 2001-2006.

Los dos parámetros relacionados con las precipitaciones que tienen incidencia directa en la generación de eventos en la provincia son: la progresiva acumulación del agua con lluvias persistentes y la intensidad de las tormentas de verano. En el caso de las laderas orientales húmedas de los principales sistemas montañosos que presentan una vegetación selvática ambos parámetros tienen relevancia. En el caso de los valles intermontanos de altura áridos en donde la vegetación es xerófila con presencia de suelos desnudos y en donde las precipitaciones son aisladas, probablemente la intensidad de las tormentas sea el principal disparador.

En los últimos años se ha observado un aumento tanto en el volumen como en la intensidad de las precipitaciones (Minetti et al. 2006, 2008). En este sentido Fernández y Lutz (2006) mencionan el aumento que se

observa en las precipitaciones medias anuales a partir de la década del 70 en la provincia de Tucumán, cuando comienzan a registrarse valores anómalos positivos, dados por la relación de la media más la desviación estándar, en forma más frecuente. Además realizan una comparación entre las medias anuales obtenidas para períodos de 30 años (1934-1964 y 1966-1996) entre las estaciones Concepción y La Cocha, ubicadas en el sector pedemontano tucumano, donde los incrementos fueron de 267 mm y 292 mm respectivamente. En las figuras 6a y b se comparan los datos de la estación Concepción antes mencionados, con la estación Potrero del Clavillo ubicada al oeste de la primera, sobre la ladera oriental de la sierra del Aconquija a 1.300 m s.n.m. A pesar de tener un período de registro más corto (desde 1952 al 2004), se destaca claramente como las anomalías en la precipitación media anual se hacen presentes a partir de 1975 en adelante. Si bien las precipitaciones medias anuales no son indicativas por sí solas de una mayor actividad de las laderas, lo cierto es que uno de los parámetros que controlan la infiltración del agua en los suelos es su grado de saturación y por lo tanto en los

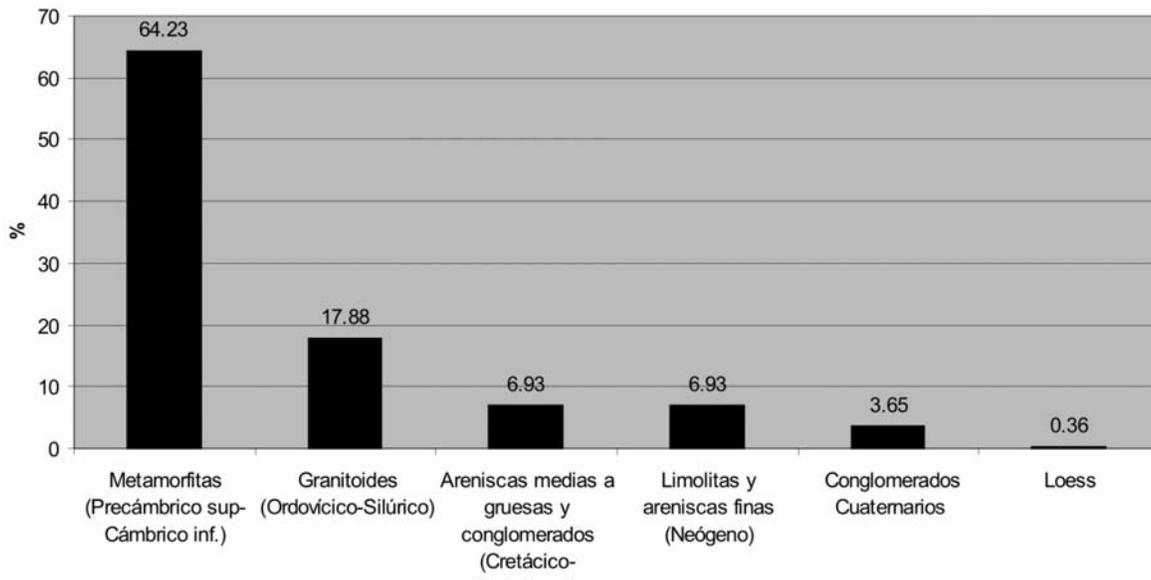


Figura 4: Mapa fisiográfico de la región sur del Perú incluyendo la zona

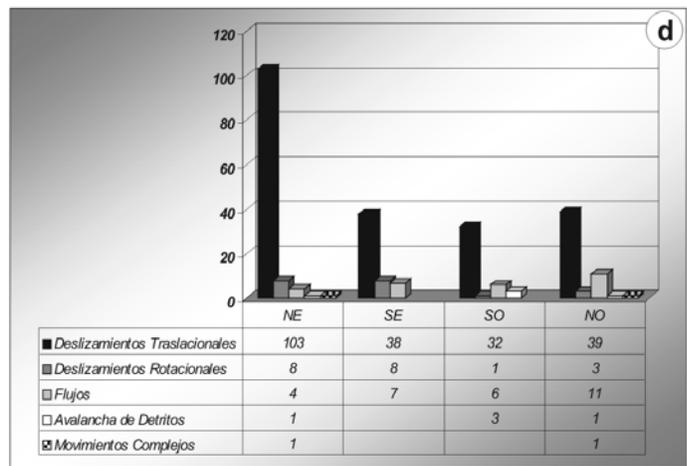
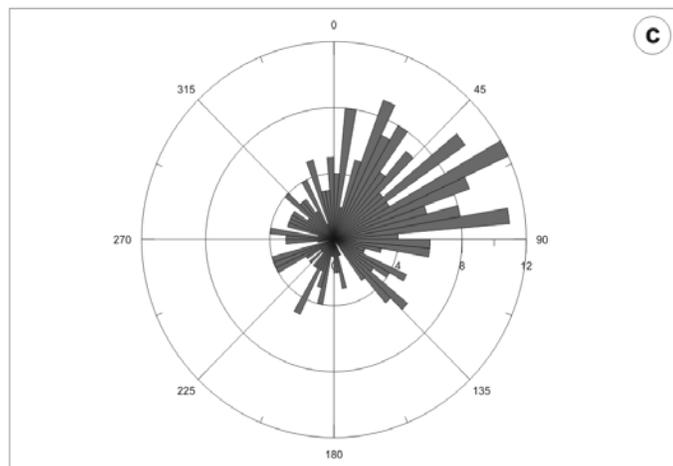
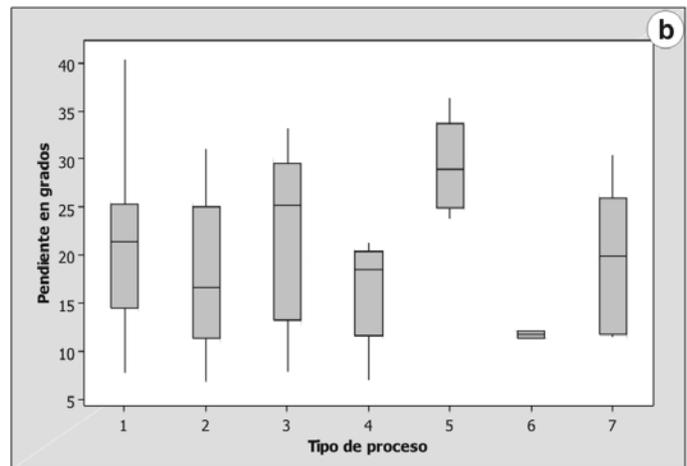
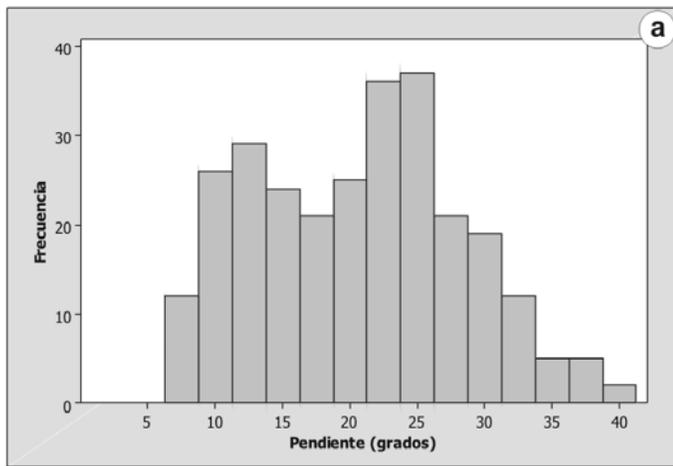
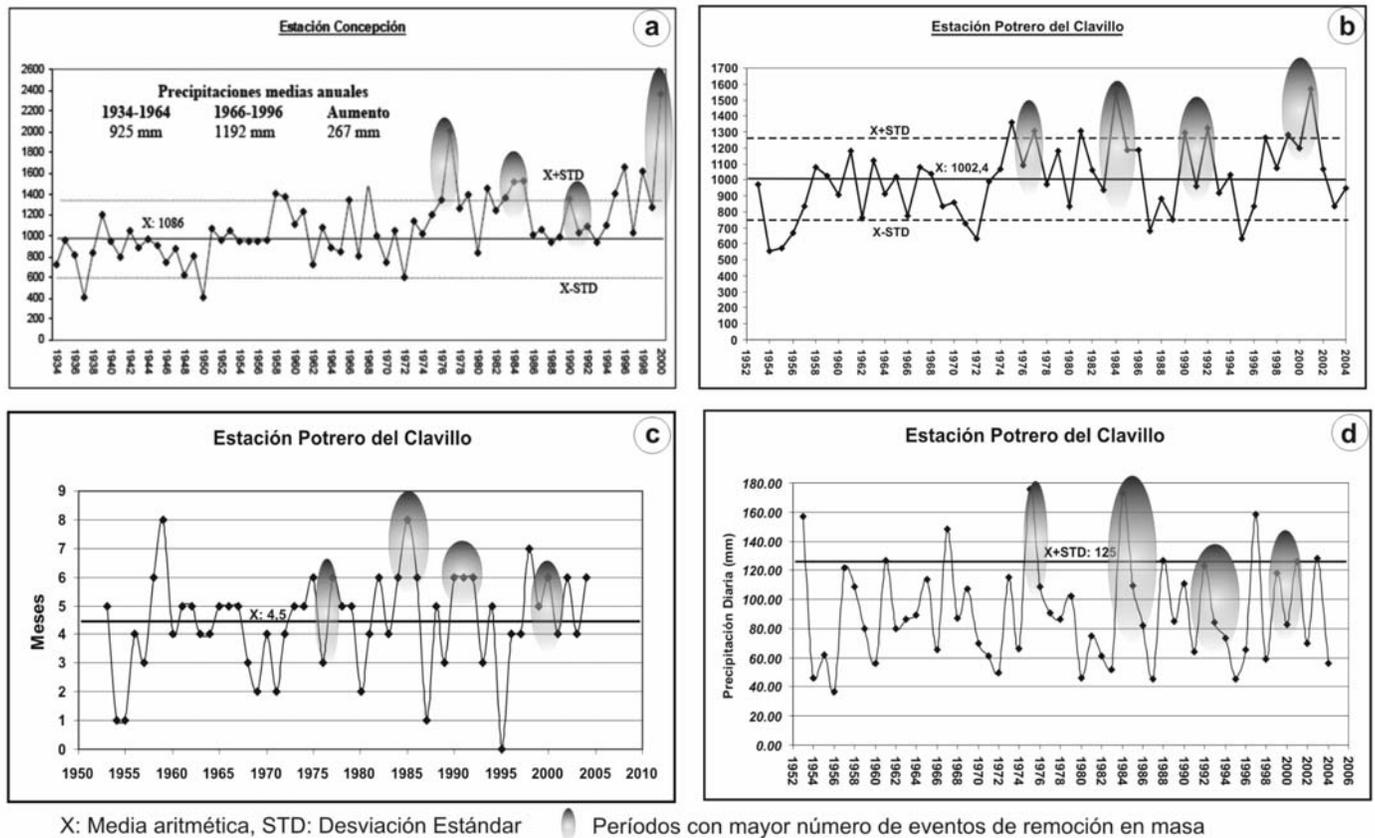


Figura 5: Características las laderas donde fueron identificados los movimientos: a) Histograma de frecuencia de los ángulos de pendientes obtenidos; b) Diagrama de caja de las pendientes según tipo de movimiento; c) Diagrama de rosa de los vientos para las diferentes orientaciones de las pendientes; d) Diagrama de barras de los movimientos por cuadrante.



**Figura 6:** Análisis de los parámetros climáticos que controlan los movimientos en masa: a) Variación de la precipitación media anual para el período de registro 1934-2000 en la estación Concepción; b) Variación de la precipitación media anual para el período de registro 1952-2004 en la estación Potrero del Clavillo; c) Serie temporal de los máximos absolutos diarios para el período 1952-2004 en la estación Potrero del Clavillo; d) Cantidad de meses con suelos saturados para el período 1952-2004 en la estación Potrero del Clavillo.

años con precipitaciones medias anuales anómalas los suelos se van a encontrar bajo condiciones de saturación por mayor tiempo favoreciendo el escurrimiento del agua sobre las laderas y por lo tanto la erosión en las mismas. Un indicador de las condiciones hídricas de los suelos puede ser el número de meses que los suelos se encuentran saturados de agua al año, calculado a partir del balance hídrico mensual de cada sitio. En la figura 6c se observa la variación en el número de meses en que los suelos tuvieron excedentes de agua para la serie 1952-2004 en la estación Potrero del Clavillo en donde fueron identificados numerosos deslizamientos. En este sector de la sierra del Aconquija los suelos de las laderas se hallan saturados durante gran parte del año, siendo comunes registros anómalos de 6 meses y pudiendo llegar hasta 8 meses al año bajo esas condiciones. Al superponer los períodos

en que se produjeron grandes eventos de remoción en masa sobre las figuras 6b y 6c, se puede apreciar que coinciden con años de precipitación media anual anómala y de períodos largos en que los suelos estuvieron saturados.

En cuanto a la intensidad de las precipitaciones, éstas suelen variar de acuerdo a la ubicación topográfica siendo en general más elevadas en las laderas orientales húmedas de las sierras que en la parte pedemontana. En la figura 6d se puede apreciar como en los sectores montañosos húmedos la ocurrencia de precipitaciones de intensidad superior a 100 mm/24 horas suelen ser bastante habituales. Incluso el número de eventos anómalos ( $> 125$  mm/24 hs) registrados en la estación Potrero El Clavillo se hicieron más frecuentes a partir de la década del 70 coincidiendo con la información arriba mencionada. Durante este período se registraron varios eventos

de inundaciones y procesos de remoción en masa como ser los de 1976-1977, 1984-1986, 1990-1992 y 1999-2001. Durante este último período, Fernández y Lutz (2003) citan eventos extraordinarios con intensidades de 210 mm/6 horas (14/02/2000) y 200 mm/2,5 horas (12/02/2001) que ocasionaron numerosos movimientos de ladera en el sector de la quebrada del río Los Sosa. La estabilidad de las laderas se halla condicionada por la resistencia del terreno, que varía en función de los factores de control antes descriptos, es por ello que la lluvia crítica para producir rotura varía de una ladera a otra y los umbrales regionales de lluvias capaces de provocar deslizamientos son difíciles de estimar. De todas formas se consideró importante analizar la relación existente entre la ocurrencia de eventos y los datos climáticos clásicos utilizados para su estudio como son la intensidad y la acumulación previa de

las lluvias con el fin de establecer cuales fueron las condiciones meteorológicas bajo las cuales tuvieron lugar.

Lamentablemente la ausencia de datos de precipitaciones confiables en los sectores montañosos, sobre todo en los sectores del oeste de la provincia, hizo imposible lograr relacionar a todos los eventos de la base de datos con la información climática. En el cuadro 2 se detallan los movimientos que pudieron ser relacionados con eventos de lluvias medidos en estaciones cercanas hasta el año 2008. Como se puede apreciar en el cuadro las características climáticas bajo las cuales se produjeron los procesos varían considerablemente, incluso dentro de una misma zona como es el caso del río Cochuna.

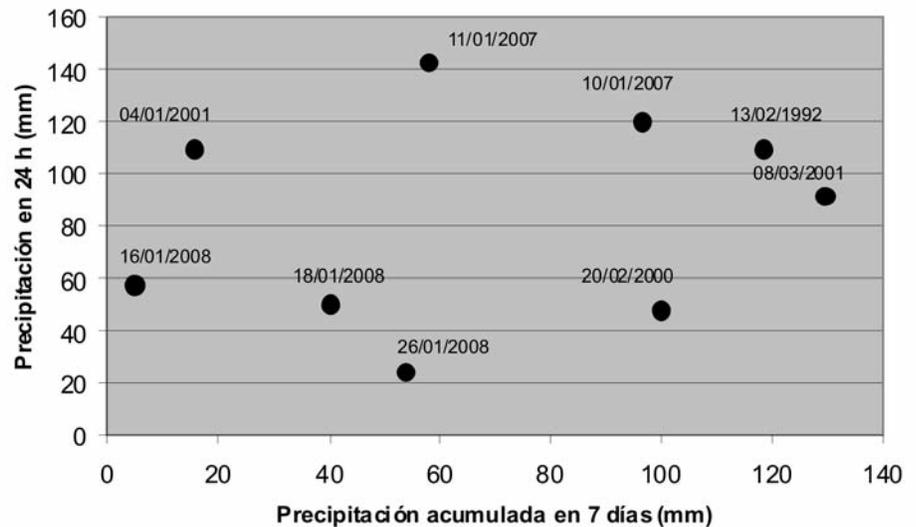
En la figura 7 se relacionaron los procesos de remoción en masa con la lluvia caída el día en que tuvieron lugar y la lluvia acumulada en los días previos. Se pudieron identificar tres situaciones meteorológicas diferentes que dieron lugar a la rotura de laderas: lluvias muy intensas diarias ( $> 90$  mm/24 h) con saturación previa importante ( $> 95$  mm/7 días), lluvias intensas diarias ( $> 55$  mm/24 h) sin saturación previa importante ( $< 60$  mm/7 días) y lluvias diarias moderadas (40 a 50 mm/24 h) con saturación previa  $\geq 40$  mm/7 días. En la gran mayoría de los casos, a excepción del evento del día 26/01/2008, se requirieron lluvias de una intensidad mayor a 45 mm/día para desencadenar los procesos de remoción en masa.

El evento del 26/01/2008 fue la excepción ya que se produjo por una lluvia poco intensa (24 mm/24 h) y con una acumulación de agua previa de 54 mm/7 días. Sin embargo, hay que tener en cuenta que este evento tuvo lugar en un contexto geoambiental diferente al de los demás. En este caso se trata de una zona semiárida con presencia de una vegetación rala (pastizales de altura) y en donde los materiales rocosos fueron sometidos en el pasado a condiciones periglaciares por lo que podrían tener una mayor debilidad frente a las lluvias. Al relacionar las fechas de los eventos con las características de las precipitaciones se puede apreciar que durante los períodos

**CUADRO 2:** Relación entre eventos de remoción en masa, intensidad de lluvias y precipitación acumuladas en los días previos.

Fecha de Eventos	Lugar	Intensidad de lluvia en 24 hs (mm)	Precipitación acumulada en 7 días anteriores (mm)	Estación de medida	Fuente
13/02/1992	Río Cochuna	109	118,6	Potrero del Clavillo	R.P.P.
20/02/2000	Río Cochuna	47,5	100	Potrero del Clavillo	R.P.P.
04/01/2001	Río Cochuna	109,5	15,5	Potrero del Clavillo	R.P.P.
07/03/2001	Río Cochuna	91	129,5	Potrero del Clavillo	R.P.P.
10/01/2007	Río Colorado	120	96,4	El Guayal	S.R.H.
11/01/2007	Los Pizarro	142,5	57,9	Los Pizarro	S.R.H.
16/01/2008	Río Marapa	57	5	Escaba	R.P.P.
18/01/2008	Río Los Sosa	50	40	Las Mesadas	EEOC
26/01/2008	El Infiernillo	24	54	Tafí del Valle	EEOC

R.P.P.: Red Pluviométrica Provincial; S.R.H.: Subsecretaría de Recursos Hídricos; EEOC: Estación Experimental Obispo Colombres.



**Figura 7:** Lluvia en 24 horas y lluvia acumulada en los 7 días previos a casos de procesos de remoción en masa registrados en los últimos años.

anormalmente húmedos, como los ocurridos en 1990-1992, 1999-2001 y enero de 2007, se produjeron deslizamientos bajo lluvias de alta intensidad ( $> 90$  mm/día). Esto provocó la generación de nuevos procesos en lugares donde antes no habían sido observados. En cambio en los eventos recientes del año 2008, que acontecieron con lluvias de intensidades moderadas a bajas, fundamentalmente se produjeron reactivaciones de deslizamientos traslacionales.

#### Factores antrópicos

La intervención humana altera la sensibilidad de los terrenos a la acción del principal agente desencadenante, la lluvia, mediante la modificación de la topografía local o

por la aparición de focos de incendios que disminuyen el grado de cobertura vegetal. Estas alteraciones pueden cambiar la densidad y la frecuencia de los movimientos en masa. Análisis llevados a cabo en la zona de la quebrada del río Los Sosa (Fernández y Lutz 2003) han puesto de manifiesto que la aparición de nuevos tipos de movimientos como las avalanchas de detritos, no mencionados hasta ese momento, y la generación de deslizamientos múltiples en áreas reducidas se correlacionaría con años de lluvias por encima de determinados umbrales sobre zonas modificadas por el hombre. En las rutas de montaña se evidenciaron la mayor densidad de movimientos en masa durante el inventario, al-

canzando valores de hasta 15 eventos/km<sup>2</sup> como en el caso de la ruta 338.

## DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS MOVIMIENTOS

El sector norte de la sierra del Aconquija, sur de cumbres Calchaquies y la sierra de San Javier, concentran el mayor número de eventos registrados durante la elaboración del inventario, debido a la coincidencia de un relieve acusado, la presencia de terrenos susceptibles y un régimen de lluvias torrenciales con períodos de saturación de suelos prolongados. En el sector cumbre de la sierra del Aconquija coexisten dos factores del relieve que favorecen la inestabilidad y que se destacan sobre los demás: las altas pendientes resultantes de la excavación de los glaciares pleistocenos y el encajonamiento de la red fluvial actual. Las zonas de mayor densidad de movimientos por unidad de superficie coincidieron con las regiones que presentaban pendientes máximas del orden de los 30°, precipitaciones medias anuales superiores a los 800 mm y que fueron alteradas por el hombre. Es destacable la influencia que tienen los caminos de montaña sobre la generación de estos eventos, las rutas provinciales 308 (camino al embalse Escaba), 307 (camino a Tafi del valle) y 338 (camino a Anta Muerta y Villa Nougues) fueron los escenarios donde se detectaron el mayor número de eventos por unidad de área.

La distribución espacial de los movimientos también se halla influenciada por la presencia de antiguas cicatrices de deslizamientos, debido a que éstas suelen actuar como colectoras del agua de lluvia al contener importantes cantidades de material coluvial de granulometría fina sumamente poroso. Este material suele saturarse rápidamente, aumentando la presión de poros y disminuyendo el ángulo de fricción, generándose deslizamientos someros dentro de antiguas superficies de deslizamiento.

## CONCLUSIONES

Se identificaron en total 279 eventos de remoción en masa distribuidos de mane-

ra no uniforme en la región montañosa. Esta distribución está controlada fundamentalmente por las precipitaciones, como factor desencadenante y por la pendiente y el grado de meteorización de los materiales, como factores de control. Los cortes en la pendiente natural de los terrenos para la construcción de caminos suele aumentar la susceptibilidad de los mismos a deslizarse lo que se traduce en una mayor densidad de eventos por unidad de área.

Del total de movimientos identificados, el 64% correspondió a deslizamientos traslacionales de detritos de tipo somero, seguidos en orden de abundancia por los flujos de detritos.

La mayoría de los movimientos de ladera se registraron en pendientes con inclinaciones que variaron entre 10° y 30°. Al parecer dentro de este rango se generarían las condiciones hidrológicas necesarias para el desencadenamiento de la mayoría de los procesos observados en la región a excepción de las avalanchas de detritos. Al dividir las pendientes medidas cada 10°, se observó que el 43% del total de los movimientos tuvieron lugar en pendientes bajas a medias (entre 10 y 20°) y el 40% en pendientes medias a altas (20 a 30°).

La mayoría de los eventos tuvo lugar en laderas orientadas al noreste, probablemente debido a un aumento de la porosidad de los suelos como consecuencia de un mayor número de ciclos de humedecimiento-desecación.

En cuanto a la litología, la gran mayoría de los procesos (> 83%) afectaron a rocas metamórficas y granitoides con distintos grados de alteración meteórica. Los flujos se produjeron principalmente en las litologías antes mencionadas, mientras que cerca del 40% de los deslizamientos traslacionales y rotacionales descriptos tuvo lugar en otras litologías pertenecientes a sedimentos de edad cretácico-paleógena y neógena. El aumento en las precipitaciones medias anuales y en los máximos diarios registrado a partir de la década de 1970 en adelante para la provincia de Tucumán implicaría que los eventos a desarrollarse en los sectores montañosos aumentarían en número y cantidad de material desplazado.

La gran mayoría de los eventos se produjo por lluvias cuyas intensidades superaron los 45 mm/24h, mientras que la generación de deslizamientos de gran magnitud se relacionó con períodos anormalmente húmedos como los de 1999-2001. La relación entre ocurrencia de eventos con la acumulación de agua en días previos no se reveló de forma clara.

Futuras investigaciones deberían focalizarse en los sitios de mayor densidad de eventos, con el fin de tratar de precisar los umbrales de precipitación y la humedad previa que presentan los terrenos al producirse los deslizamientos.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Bossi, G. 1969. Geología y estratigrafía del sector sur del valle de Choromoro. *Acta Geológica Lilloana* 10: 17-64, Tucumán.
- Collantes, M. 1994. Caracterización de los procesos de remoción en masa en la cuenca del río Tafi, Tucumán, Argentina. 1° Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, Actas: 113-122.
- Collantes, M.M. 2003. Evidencias de movimientos en masa episódicos durante el Pleistoceno tardío-Holoceno, en el piedemonte occidental de Cumbres Calchaquies, Tucumán, Argentina. En Collantes, M., Sayago, J.M. y Neder, L. (eds.) 2° Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, Actas: 55-60, Tucumán.
- Costa, J.E. 1984. Physical geomorphology of debris flows. En Costa, J.E. y Fleischer, P.J. (eds.) *Development and Applications of Geomorphology*, Springer Verlag, 268-317, Berlin.
- Crozier, M.J., Eyles, R.J., Marx, S.L., McConchie, J.A. y Owen, R.C. 1980. Distribution of landslides in the Wairarapa hill country. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 23: 575-586.
- Dal Molin, C., Fernández, D.S., Escosteguy, L. y Villegas, D. 2003. Hoja Geológica N° 2766-IV "Concepción", provincias de Tucumán, Santiago del Estero y Catamarca. Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 341, 41 p., Buenos Aires.
- Fernández, D.S. 2005. The giant paleolandslide deposits of Tafi del Valle, Tucumán Province, Argentina. *Geomorphology* 70: 97-111.
- Fernández, D.S. y Lutz, M.A. 2003. Procesos de remoción en masa y erosión fluvial en la quebrada del río Los Sosa, provincia de Tucumán.

- Revista de la Asociación Geológica Argentina 58(2): 255-266.
- Fernández, D.S. y Lutz, M.A. 2006. Carta de peligrosidad geológica 2766-IV "Concepción", provincias de Tucumán, Catamarca y Santiago del Estero. Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 365, 130p., Buenos Aires.
- González, O., Viruel, M., Mon, R., Tchilinguirian, P. y Barber, E. 2000. Hoja Geológica 2766-II San Miguel de Tucumán. Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 245, 124p., Buenos Aires.
- Hermanns, R.L. y Strecker, M.R. 1999. Structural and lithological controls on large Quaternary rock avalanches (sturzstroms) in arid northwestern Argentina. *Geological Society of America Bulletin* 111(6): 934-948.
- Kirschbaum, A. 2002. La meteorización en la Sierra del Aconquija, Tucumán (Argentina): Un proceso intenso a escala regional. 9 ° Reunión Argentina de Sedimentología, Actas: 94, Córdoba.
- Minetti, J.L. y Figueroa Suárez, F.M. 2008. Aspectos físicos que intervienen en las inundaciones de la provincia de Tucumán. Página web del Laboratorio Climatológico Sudamericano. [www.labclisud.com.ar/Gestion/Inundaciones/Listado\\_art\\_inund.asp](http://www.labclisud.com.ar/Gestion/Inundaciones/Listado_art_inund.asp)
- Minetti, J.L. y González, J.A. 2006. El Cambio Climático en Tucumán. Sus Impactos. Fundación Miguel Lillo, Serie Conservación de la Naturaleza 17: 1-24, Tucumán.
- Mon, R. y Suayter, L. 1973. Geología de la Sierra de San Javier (provincia de Tucumán, República Argentina). *Acta Geológica Lilloana* 12: 155-168, Tucumán.
- Mon, R., Eremchuk, J. y Minetti, J. 2003. Características geológicas y geotécnicas de la vertiente oriental andina en la provincia de Tucumán. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente* 19: 73-88, Buenos Aires.
- Pereyra, F., Lutz, M.A., Valladares, H. y Fernández, D.S. 2002. Carta de peligrosidad geológica 2766-II "San Miguel de Tucumán", provincias de Tucumán, Salta y Santiago del Estero. Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 325, 90p., Buenos Aires.
- Pierson, T.C. y Costa, J.E. 1987. A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. En Costa, J.E. y Wiczorek, G.F. (eds.) *Debris Flows/Avalanches*, Geological Society of America *Reviews in Engineering Geology* 3: 1-12.
- Porto, J. y Danieli, C. 1974. Geología del sector noroeste de Trancas (provincia de Tucumán, República Argentina). *Acta Geológica Lilloana* 12: 189-229.
- Ruíz Huidobro, O. 1972. Descripción geológica de la Hoja 11e, Santa María, provincias de Catamarca y Tucumán. Servicio Nacional Minero Geológico, Boletín 134, 65 p., Buenos Aires.
- Salter, R.T., Grippen, T.F. y Knoble, K.A. 1981. Storm damage assessment of Thames-Te Aroha area following the storm of April 1981: Final Report. Water and Soil Science Centre, Auckland, N. Z. Ministry of Works and Development, Internal Report N° 44: 55p., Auckland.
- Selby, M.J. 1993. *Hillslope materials and processes*. Oxford University Press, 451 p., New York.
- Sharpe, C.F.S. 1938. *Landslides and related phenomena*. Pageant Books Inc., 131 p., New Jersey.
- Varnes, D.J. 1978. Slope movement and types and processes. En *Landslides Analysis and control*, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Special Report 176, 11-33, Washington, D.C.

Recibido: 13 de junio, 2009

Aceptado: 27 de octubre, 2009