

Dinámica de las vertientes en la ladera occidental de la sierra Chica de Córdoba

Carlos A. BELTRAMONE¹

¹ CIRSA- CONICET, Ambrosio Olmos 1142 Córdoba. E-mail: beltramone@punillanet.com.ar

RESUMEN. La evolución de vertientes durante el Cuaternario en la ladera occidental de la sierra Chica de Córdoba ha estado condicionada a dos tipos de procesos; los vinculados a los movimientos de remoción en masa y los asociados a la escorrentía superficial. Los tipos de las formas resultantes, tanto de erosión como de acumulación, están dadas por la naturaleza litológica del sustrato y de la cobertura superficial, la pendiente y por las características climáticas. Los escarpes del basamento cristalino evolucionan mediante procesos de deslizamientos y caídas de rocas, donde existe una cobertura superficial con cierta continuidad en la vegetación aparecen evidencias de reptación superficial, mientras que donde predominan alternancias de rocas detríticas mesozoicas sin cobertura de vegetación continua evolucionan principalmente por caídas de rocas. En los depósitos pedemontanos predominan los procesos de arroyada superficial. Las precipitaciones son el principal desencadenante de las inestabilidades en la región relacionadas a lluvias extremas.

Palabras clave: *Laderas, Cuaternario, Movimiento en masa, Sierra Chica, Córdoba*

ABSTRACT. *Dynamics of the slopes in the western hillside of the Sierra Chica de Córdoba.* The Quaternary evolution of the western hillside of the Sierra Chica de Córdoba has been conditioned by two types of processes: ones associated with mass movements and others related to the surface stream. The resulting types are conditioned by the erosion as well as the accumulation, and by the lithological behavior of the substratum and of the superficial cover, the presence or absence of vegetation, and by the climatic characteristics. The crystalline basement scarps evolve by slip and rockfall processes, while when a certain continuity of the superficial cover exists with vegetation, evidence of superficial creep appears. On the other hand where Mesozoic rocks without cover alternate with areas of continuous vegetation they evolve mainly to rockfalls. In the foothills deposits prevail the surface stream processes. The precipitations are the main hazard y in the region related to extreme rains.

Keywords: *Hillsides, Quaternary, Mass movement, Sierra Chica, Córdoba*

Introducción

El propósito de este trabajo es interpretar los procesos implicados en el modelado actual de las vertientes en la sierra Chica de Córdoba. La inestabilidad de vertiente raramente puede atribuirse a una causa definida -en la mayoría de los casos más de un factor contribuye al desequilibrio de vertiente de todo macizo rocoso- de todos estos factores los más importantes y frecuentes son los relacionados con los procesos de remoción en masa y la escorrentía superficial, dependiendo fundamentalmente de la naturaleza de la roca, pendiente y dinámica geomorfológica.

Los incendios forestales, la construcción de caminos y el uso del suelo, entre otros factores, han contribuido a una modificación de la dinámica geomorfológica e hidrológica de la región, por lo que ante eventos como el ocurrido en la localidad de La Falda en 1995, amplificaron la intensidad y velocidad de los procesos geomorfológicos. Estos dieron origen a caídas, deslizamientos y flujos de suelo y roca, así como los relacionados con la escorrentía superficial que produjeron inundaciones y represamiento de ríos, fenómenos que inciden directamente en la inestabilidad de las vertientes. Estos eventos provocan la aparición de constantes situaciones de ries-

go geológicos con la consiguientes pérdidas económicas y humanas.

Marco fisiográfico y geológico del área de estudio

El área de estudio se ubica en la porción central de la sierra Chica de Córdoba entre los meridianos de 64°30' y 64°40' de longitud oeste y los paralelos de 30° 00' y 30° 30' de latitud sur (Fig.1).

La precipitación media anual estimada a partir de la estación del centro de la región semiárida de Villa Carlos Paz oscilan entre los 750 y 900 mm de promedio anual, mientras que la temperatura media varía entre los 9,8° de mínima media y los 21,5° de máxima media. Ello favorece la presencia de una cubierta vegetal continua salvo en las áreas de mayor pendiente donde el suelo fue arrasado. La vegetación está caracterizada por componentes típicos del monte xerófilo, tales como: algarrobo, tala, molle y garabato. Los suelos en la región montañosa son suelos con un precario horizonte húmico. En los valles intermontanos, adquieren un carácter definido por la participación de rodados, arenas, limos y arcillas, tratándose de suelos arenosos, arenillosos sueltos y muy permeables.

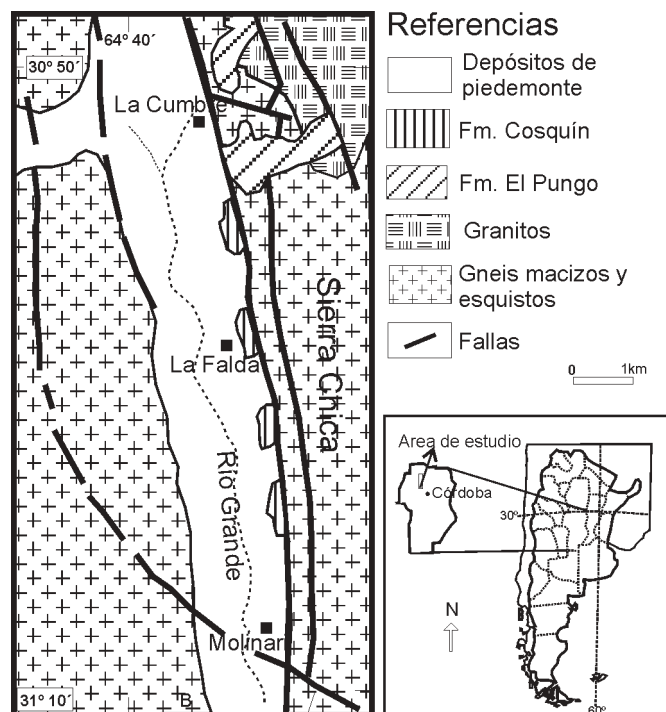


Figura 1: Esquema de ubicación geográfica y mapa geológico del área de estudio (basado en Lucero *et al.* 1995, parcialmente modificado).

Desde el punto de vista geológico el área está representada por afloramientos paleozoicos, intrusiones graníticas, y terrenos meso-cenozoicos (Fig.1). El zócalo paleozoico está compuesto según Lencinas (1971) esencialmente por gneises, esquistos tonalíticos-biotíticos, cuarcitas micáceas, anfíbolitas, mármoles y filitas. El estilo tectónico del basamento es predominantemente homoclinal con buzamientos de mediano a alto ángulo de 40° a 80° hacia el este. La cubierta meso-cenozoica está constituida por conglomerados y areniscas continentales, pertenecientes a las Formaciones El Pungo, Cosquín y Casa Grande; sus mayores espesores están situados en las proximidades de la localidad de La Cumbre. El Cuaternario se halla representado por los fanglomerados de piedemonte correspondientes al Pleistoceno superior y al Holoceno respectivamente. La estructura se manifiesta por fallas inversas de alto ángulo de rumbo N a NO y fallas transversales u oblicuas que cortan a las anteriores con dirección ONO.

El área presenta una morfología de tipo montañosa y escarpada, con cerros de hasta 1.700 m y un sector pedemontano marginal; ambas unidades se hallan orientadas en posición submeridional. El sector montañoso tiene pendientes muy pronunciadas donde las fuerzas gravitacionales tienen marcada influencia en su estabilidad afectando tanto al sustrato rocoso como a la cobertura superficial. En el sector pedemontano se manifiestan formas tales como abanicos aluviales, terrazas fluviales, *glacis* de acumulación y planicie aluviales, donde el proceso de erosión por escorrentía tiene una significativa participación en la evolución de las vertientes.

Metodología de trabajo

Para la realización del trabajo se ha realizado una cartografía detallada de la zona de los principales procesos que inciden en la dinámica de las vertientes, reconociendo tanto las formas erosivas como de acumulación. La base topográfica utilizada corresponde a la cartografía del Instituto Geográfico Militar a escala 1: 20.000. El análisis de las formas se llevó a cabo mediante la interpretación fotogeológica de fotografías aéreas a escala 1: 20.000 e imágenes satelitales Landsat a escala 1: 250.000. La leyenda utilizada en la confección del mapa geomorfológico (Fig. 2a), se apoya en una leyenda francesa la cual fue traducida por Serrat (1976). El mapa litológico (Fig. 2b) se ha obtenido a partir del mapa geológico de Lucero *et al.* (1995) mediante la asignación de una clase litológica predominante a cada unidad formacional. El mapa de pendiente (Fig. 2c) fue preparado a escala 1: 20.000, en el que se representaron cuatro áreas según las pendientes comprendidas entre los siguientes intervalos a las que se les asignaron un valor relativo: 1) 0° a 10°, 2) 10° a 20°, 3) 20° a 30° y 4) mayor de 30°.

Por último el mapa de inestabilidad de vertiente (Fig. 3) ha sido preparado mediante combinación de la cartografía temática (geomorfología, litología y pendiente), la que fue digitalizada en formato vectorial y superpuesta en capas. Para la elaboración de este documento se ha asignado un grado de riesgo estableciéndose cuatro categorías de inestabilidad: muy baja, baja, moderada y alta.

Para esto se ha cruzado la información litológica y de pendiente mediante la aplicación de una matriz de cuantificación con espaciado constante entre cada celda de 500 m -para la elaboración y análisis de matrices de confrontación se utilizó el conocimiento deductivo a nivel personal del área- obteniéndose de esta superposición una nueva relación topológica. Finalmente se efectuó la confrontación entre esta nueva relación topológica y las evidencias de inestabilidad superficial (movimientos de remoción en masa y escorrentía) obtenidas del mapa geomorfológico, obteniéndose el mapa de inestabilidad de vertientes. Estos datos cuantitativos dan en forma general la idea de funcionalidad sobre la evolución de las vertientes.

Resultados y discusión

Del mapa geomorfológico surge que en el modelado de las vertientes tienen especial intervención los procesos de remoción en masa y fluviales. Sobre esta base, sus formas resultantes se han podido agrupar en dos espacios morfotopográficos a saber:

1) En el sector morfo-topográfico inferior localizado entre los 480 y 550 m, predomina la acción de la escorrentía superficial manifestada por la presencia de áreas con incisiones activas (cárcavas). Este fenómeno es habitual en los escarpes de erosión existentes entre los *glacis* de acumulación y las terrazas fluviales; por lo general esta acción tiene un mínimo porcentaje en la modificación de las vertientes. Se suele observar algunos deslizamientos de derrubios de escasas dimensiones asociados a áreas con la presencia de cárcavas.

Los suelos friccionantes (gravas y arenas) que cubren a

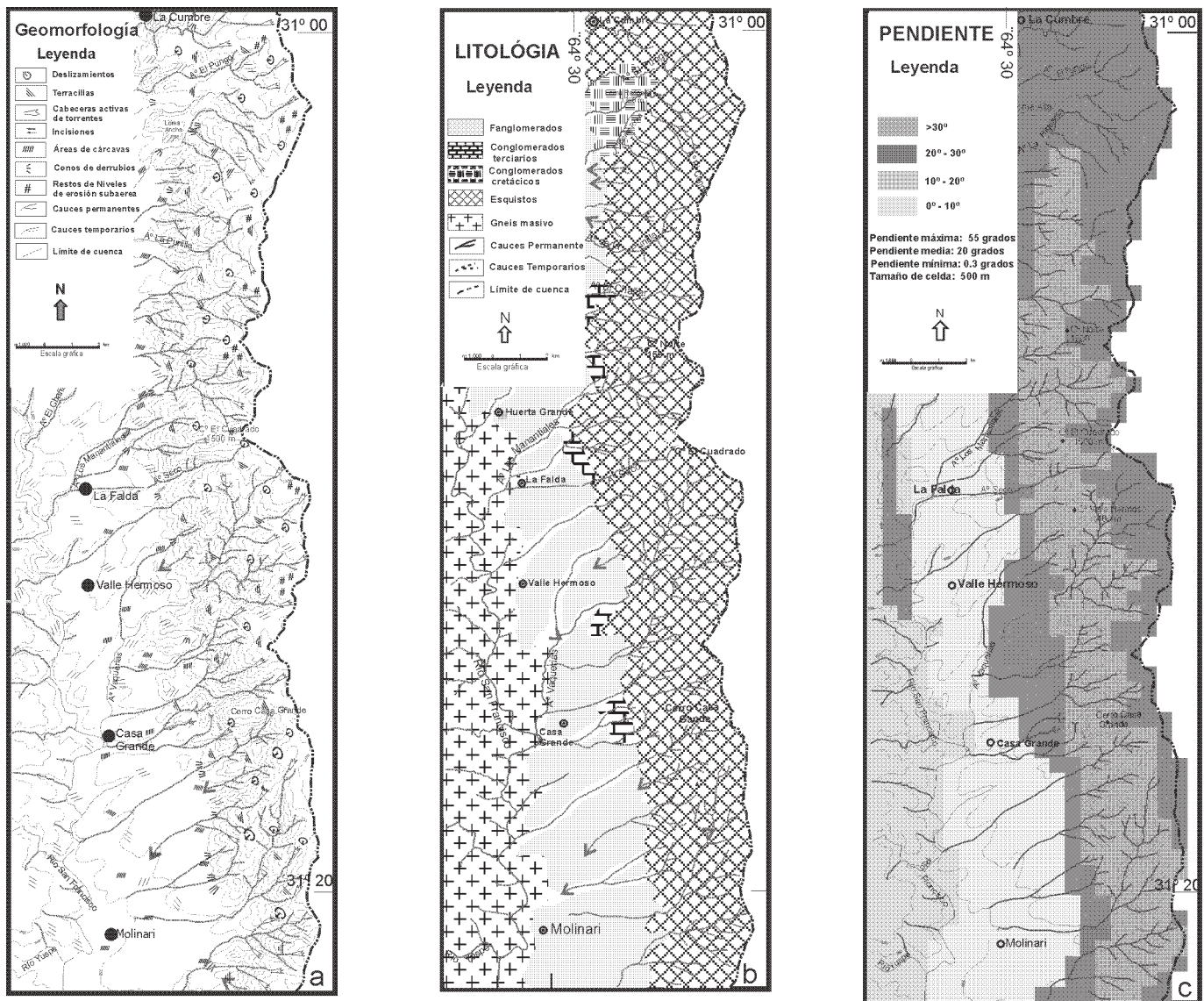


Figura 2: Mapas temáticos: a) geomorfología b) litología c) pendiente.

rocas del sustrato, son inestables cuando la inclinación de la pendiente es mayor al ángulo de fricción interna; además son susceptibles a la erosión hídrica por escorrentía superficial en surcos.

2) El sector morfo-topográfico ubicado entre los 550 y 1.400 m coincide con el escarpe de la falla de Punilla que dio lugar al levantamiento de la sierra Chica, donde el ambiente geomorfológico y el topográfico cambian notablemente y con ellos las condiciones morfodinámicas. Dentro de este sector tienen incidencia dos conjuntos de procesos relacionados directamente con la dinámica de las vertientes: a) los relacionados a movimientos de remoción en masa y b) los vinculados con la acción de la escorrentía superficial.

Movimientos de remoción en masa

De acuerdo al sustrato rocoso y siguiendo la clasificación de Carson y Kirkby (1972) y Varnes (1978) los procesos iden-

tificados incluyen deslizamientos, caídas y flujos lentos, los que pueden ser agrupados en: a) inestabilidades en escarpes rocosos con fuerte pendiente y con escasa o nula cobertura superficial y b) inestabilidades en sustrato rocoso con presencia de cobertura superficial (suelo o detritos).

a) Inestabilidades en escarpes rocosos, con fuerte pendiente y con escasa o nula cobertura superficial

1) *Caídas de rocas:* Las caídas de rocas aparecen agrupadas en la escarpa de falla de la sierra Chica en pendientes superiores al 35° y donde afloran rocas del sustrato rocoso (gneis masivo y esquistos) tal lo observado en el la vertiente sur del arroyo Vaquerías. Se trata una caída localizada en los 900 m de altitud, y se caracteriza por el desarrollo de bloques angulosos y sin matriz, la que pudo ser lavada por acción del agua de escorrentía. Sus depósitos dan una topografía caótica en el fondo de la ladera de bloques y fragmentos de rocas esparcidos de hasta 40 cm de longitud según su eje mayor, con

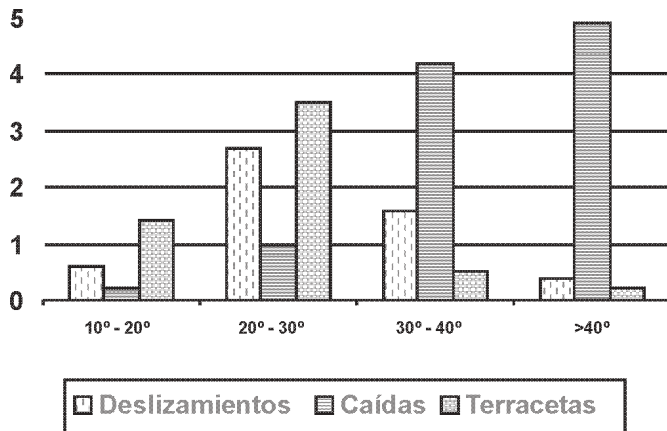


Figura 4: Distribución de los movimientos en masa según la pendiente.

lóbulo en su porción distal, el que puede no estar presente debido a la erosión por escorrentía en la base del talud; su volumen es variable dependiendo de la magnitud del arranque.

En la ladera del cerro El Cuadrado, se presentan numerosas cicatrices de arranque, pertenecientes a deslizamientos antiguos del orden de los 30 m y un desplazamiento del material ladera abajo de algunas decenas de metros terminando distalmente en forma lobulada. Estos movimientos en masa constituyen los fenómenos más dinámicos en la evolución de laderas

2) *Deslizamientos de suelos*: Este tipo de movimiento en masa se desarrolla donde existe una cobertura superficial que cubre al sustrato rocoso asociado a pendientes superiores a 30%, cuando las aguas de lluvias se infiltran y saturan los suelos aumentando su peso por unidad de volumen, provocando movimientos con superficies planas o circular debida a las fuerzas gravitacionales, según Van Asch (1980) las pendientes superiores a 30° tienen riesgo de deslizamiento incluso con suelo seco, mientras que las inferiores a 15° son estables aunque el suelo se halle saturado. En la ladera norte del cerro Valle Hermoso donde se desarrollan suelos cohesivos arcillosos y limosos mezclados con suelos gravosos y arenosos se observaron deslizamientos de este tipo. Estos tienen una cicatriz de arranque del orden de los 20 m y un desplazamiento de una decenas de metros, terminando en un pie lobulado por acumulación del material arrancado. En la actualidad estos lóbulos se hallan fijados por la recolonización de la vegetación, siendo estas áreas lobuladas las más propensas a sufrir una nueva desestabilización, a partir de las lluvias torrenciales y de los incendios forestales.

3) *Reptaje de la cobertura superficial*: Este proceso se manifiesta morfológicamente en forma de terracillas en laderas donde existe una cobertura superficial de rocas no compactas y compresibles, el movimiento se descompone en pequeños deslizamientos escalonados expresado por pequeños peldaños discontinuos de algunos decímetros, separados por rellanos con un ancho del mismo orden, que alcanzan un estado de estabilidad precaria. Así también en laderas de fuerte pendiente puede desarrollarse un proceso de *creep* (Terzaghi

1960, Carson y Kirkby 1972). Otro factor a tener presente para el desarrollo de este tipo de movimiento es la presencia de humedad en el suelo, en esta zona la humedad del suelo puede alcanzar en términos de índice de liquidez valores de entre 0,4 y 0,5 según Amaya (com. pers.) indicando la susceptibilidad a la reptación.

Estas laderas pierden su estabilidad súbitamente una vez que el suelo se satura y se comporta como un material viscoso. Ésto pudo observarse en la ladera norte del arroyo Seco, que a consecuencia de la intensa precipitación del día 15 de enero de 1995, originó una pérdida de la estabilidad precaria que con estas terracillas produciendo los deslizamientos ocurridos en el cerro El Cuadrado. Este fenómeno se desarrolló con una cobertura superficial permeable donde se canalizó la escorrentía subsuperficial dando un aumento de la presión hidrostática del suelo favoreciendo las condiciones de deslizamiento.

c) Acción de la escorrentía superficial

En laderas con fuerte pendiente y sustrato impermeable que no pueden sustentar la cubierta superficial predominan los efectos de la escorrentía superficial capaz de arrastrar gran cantidad de material a los fondos de los cauces formando conos aluviales en la confluencia entre una quebrada y un colector principal. Su presencia está relacionada con un cambio del nivel de base local por profundización del cauce del río principal, o por un aumento de la carga debido a un régimen estacional más lluvioso.

En las cabeceras de los torrentes se manifiestan líneas de drenaje (carcavamiento) en los cursos de primer orden que desde el punto de vista de la dinámica de vertientes tienen interés porque producen un fenómeno de erosión retrogradante y alimentan a la red de materiales en suspensión y cantos rodados.

d) Sector de cumbres

La presencia de flujos lentos (*creep*) estaría dado por mayor humedad de la zona la que favorecería cambios volumétricos en la cobertura superficial produciendo un desplazamiento de partículas ladera abajo descrito por Brunsdén (1979) como reptación de tipo estacional.

En el cerro La Antena al nordeste de la localidad de La Cumbre se observó el único deslizamiento de tipo rotacional el que afecta a sedimentitas cretácicas, sobre elevadas por la tectónica cuaternaria, y caracterizadas por conglomerados, areniscas y arcillas. Este se evidencia por una fractura semicircular en su cabecera de aproximadamente 35 m; el material desplazado tiene desmembrado en la base del talud.

Sobre el camino que une la localidad La Falda con la de Río Ceballos en los niveles altos correspondiente a restos de una antigua superficie de erosión o peneplanicie, tiene material desplazado por un deslizamiento que afectó el camino. La cabeza o corona del deslizamiento no ha sido individualizada por encontrarse totalmente vegetada. Según pobladores de la zona este movimiento se produjo en el año 1975 como consecuencia de las lluvias torrenciales acaecidas en el área.

En cuanto a la dinámica fluvial se han individualizadas nu-

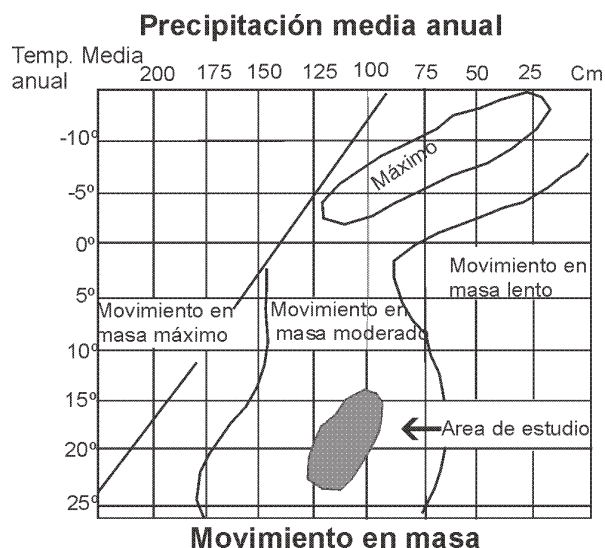


Figura 5: Distribución de los movimientos de remoción en masa según las condiciones morfoclimáticas (Peltier 1950).

merosas líneas de drenaje paralelas (*rills*) de poca profundidad que se conectan directamente con la red fluvial.

Zonificación de la estabilidad de vertiente

Esta zonificación fue realizada desde el punto de vista geológico, geomorfológico y de pendiente, la que permitió dividir la zona en cuatro categorías propensas a la inestabilidad de vertiente (Cuadro 1)

Factores que contribuyen a la inestabilidad de las vertientes

Litología: La litología del sustrato rocoso como la presencia o no de la cobertura superficial es uno de los principales factores que inciden sobre el tipo de movimiento en masas. Así, sobre litología masiva sin cobertura superficial se desa-

rollan vertientes que evolucionan mediante procesos de caídas de rocas, en esquistos predominan los deslizamientos. Donde la cobertura superficial tiene un espesor considerable la evolución de las vertientes involucra movimientos de flujo y deslizamiento. La susceptibilidad de las litologías detríticas frente a los movimientos en masa están directamente relacionados al valor de la pendiente.

Clima: Se observa una relación directa entre las precipitaciones torrenciales y la acción de este tipo de mecanismo en la evolución de las vertientes, de acuerdo con Caamaño Nelly y García (1994) estos eventos extraordinarios tienen una recurrencia anual. Por otra parte, la variación de las precipitaciones muestra un marcado incremento durante las últimas décadas (Lucero 1995) y podría ser el desencadenante de algunos movimientos en masa y de la mayor incidencia que tiene la escorrentía superficial. Si se consideran las condiciones morfo-climáticas del área según factores de temperatura media anual y precipitación media anual, se la puede considerar según Peltier (1950), como un área de movimientos en masa moderados (Fig.4).

Vegetación: La vegetación ligada a las características climáticas es un factor fundamental en la evolución de las vertientes (Selby 1982), observándose una relación directa entre los deslizamientos presentes por lo general donde existe una cobertura vegetal con cierto grado de continuidad, mientras que las laderas deforestadas se desestabilizan pronto por acción de la escorrentía superficial concentrada.

Pendiente: Tiene marcada influencia en la inestabilidad de vertientes condicionando los tipos de movimientos en masa. En el histograma de frecuencia (Fig. 5) se muestra la distribución del movimiento de remoción en masa en relación a la pendiente para el cerro El Cuadrado, en el cual se observa que en pendiente superiores a 30° predominan las caídas de rocas, mientras que en pendiente inferiores existe un predominio de los deslizamientos y flujos. La menor falta de deslizamientos en pendientes empinadas se debe a la falta de la cobertura superficial, la que ha sido erosionada.

Cuadro 1: Descripción de las características de inestabilidad de vertiente.

Categoría	Pendiente (%)	Litología	Inestabilidad	Geomorfología	Comentarios
1	0 -10	Sedimentos fluviales	Muy Baja	Terrazas fluviales Planicies aluviales Glacis terrazas	Signos de inestabilidad en márgenes de ríos, bordes de caminos, bordes de terrazas. Puede estar relacionada a la depositación de flujos de las áreas serranas.
2	10 -20	Conglomerados, areniscas y arcillas	Baja	Sector pedemontano proximal al frente serrano	Áreas donde alternan rocas del sustrato rocoso con la cobertura superficial susceptibles a caídas y deslizamiento de poca magnitud.
3	20 -30	Gneis esquistoso y masivos Conglomerados y areniscas	Moderada	Laderas y superficies de aplanamiento de la Sierra Chica	Deslizamientos y flujos.
4	> 30	Gneis esquistoso y masivos Conglomerados y areniscas	Alta	Escarpa de falla de la Sierra Chica	Caídas en laderas de litología masivas, con escarpes de mas de 50° de inclinación. En esquistos presencia de deslizamientos terracillas.

Conclusiones

En la evolución de laderas en la falda occidental de la sierra Chica, se puede mencionar a gran escala la participación de dos procesos: los vinculados a movimientos en masa y los relacionados con el arroyamiento superficial. Los movimientos en masa se manifiestan por lo general a escala métrica o decamétrica, pudiéndose considerar a estos movimientos como funcionales dado su corta recurrencia, la que está ligada a los periodos de lluvias torrenciales. En la zona serrana donde tienen pendientes muy pronunciadas la acción de la gravedad tiene una marcada influencia en la inestabilidad de la vertiente, afectando a rocas y cobertura superficial.

La inestabilidad de vertiente se debe a varios factores naturales: dinámica geomorfológica, topografía, geología y características de la cobertura superficial y precipitaciones, además de los factores antrópicos que incluyen a incendios forestales, uso del suelo y construcción de obras de ingeniería.

Los materiales que forman la cobertura superficial en estado seco tienen por lo general buena resistencia a los procesos de inestabilidad, pero con el aumento de su contenido en agua pasan del estado sólido a un estado viscoso, que lo hace muy vulnerable a los movimientos de remoción en masa.

Debido que la inestabilidad de vertientes se convierte en un factor de riesgo para las áreas pobladas debe abarcar un estudio geotécnico que abarque el diseño de estructuras de estabilización, como así también deben preverse la reforestación de áreas afectadas por los incendios de los sitios que pueden generar riesgos.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Brunsdon, D., 1979. Mass movements. Process in Geomorphology. En: C. Embleton y J. Thornes (Eds.). E. Arnold, 130-186, Londres.
- Caamaño Nelly, G. y García, C. 1994. El vínculo entre pluviometría máxima y su recurrencia a escala regional. 16° Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Actas: 37-45 Santiago de Chile.
- Carson M.A y Kirkby, M.J., 1972. Hillslope forms and process. Cambridge University Press. 475 p., Londres

- Lencinas, A., 1971. Geología del Valle de Punilla entre Vialet Masse y La Cumbre. Boletín Asociación Geológica de Córdoba, 1(2): 61-71, Córdoba
- Lucero Michaut, H., Gamkosian, A., Jarsun, B., Zamora, E., Sigismondi, M., Miro R. y Caminos, R., 1995. Mapa Geológico de la Provincia de Córdoba. Secretaría de Minería. Dirección Nacional del Servicio Geológico, Buenos Aires.
- Lucero, O. A., 1995. Cambios en el medio ambiente: el factor atmosférico. 1° Congreso Nacional de Gestión del Agua y Saneamiento. Actas: 1-6, La Falda.
- Selby, M.J., 1982. Hillslope Materials and Processes. Oxford University Press, 264 p., Oxford.
- Serrat, D., 1976. Leyenda para el mapa geomorfológico de Francia. Traducción y adaptación del texto original en francés. Instituto Jaime Almera de Investigaciones Geológicas, 69 p., Barcelona.
- Terzaghi, K., 1950. Mechanism of landslide. En Page, S. (Ed), Application of Geology to Engineering Practice. (Berkey volume) Geological Society of America. 83-123, Berkeley.
- Peltier, L., 1950. The geographic cycle in periglacial regions as it related to climate geomorphology. Association Geographers, Annals. 40: 214-236.
- Varnes, D. J., 1978. Slope movement types and processes. Landslides: Analysis and Control. Transportation Research Board, Special Report, 176: 11-33, Washington.
- Van Asch, T., 1980. Water erosion on slopes and landsliding in mediterranean landscape. Utrecht Geographic Studio 20: 1-238, Utrecht.
- Viers, G., 1974. Geomorfología. Ed. Barcelona. 320 p. Barcelona.
- Whalley, W. B., 1974. The mechanics of high mountain low frequency rock failure and its importance in mountainous areas. Reading University Geographic Papers 27: 48.

Recibido: 9/01/03

Aceptado: 6/07/04