

## ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DEL TERRENO Y SU APLICACIÓN EN UNA REGIÓN SEMIÁRIDA

\*Irasema Alcántara-Ayala

### RESUMEN

Las interacciones ambientales entre factores como el clima, la topografía y la geología juegan un papel muy importante como mecanismos desencadenantes de procesos de remoción; con la finalidad de aumentar el conocimiento de este tipo de procesos es necesario considerar esas relaciones, y no sólo las propiedades geotécnicas de los materiales en movimiento. El presente estudio tiene como objetivo determinar la susceptibilidad a procesos de remoción en masa o movimientos del terreno, bajo condiciones semiáridas; está basado en observaciones y análisis estructurales a nivel local y regional, así como también en la interacción entre elementos como la geología, la topografía y el clima, los cuales desempeñan un papel muy importante en la ocurrencia de estos procesos. La estrategia ha sido aplicada a la zona de las Alpujarras, en el sur de Sierra Nevada en la Provincia de Granada (sureste de España), donde filitas y micaesquistos afloran en ambientes geológicos de tipo metamórfico. Diferentes datos y observaciones de campo fueron integrados en un simple indicador de susceptibilidad de deslizamientos (de derrubios o detritos y/o de suelos), el cual se basó en la combinación de un índice topográfico de humedad (elaborado a partir del TOPMODEL), una reconstrucción litológica y geológica, rasgos estructurales y atributos de las laderas. Observaciones de campo indicaron que los resultados presentados a través del mapa o indicador de susceptibilidad realizado ofrece una buena representación espacial de los deslizamientos.

Palabras clave: Remoción en masa, susceptibilidad a movimientos del terreno, semiaridez, factores de control.

### ABSTRACT

Environmental interactions play a very important role as triggering factors of mass failure. In order to understand mass movement processes it is necessary to consider the relationships among all these elements, and not only on the geotechnical properties of the materials involved. The goal of this study was the determination of landslide susceptibility under semi-arid conditions. It is based on regional and local observations and analysis of structures, as well as on the environmental interactions between elements such as geology, topography and climate, which play a crucial role in the occurrence of failures. The strategy has been applied to the Alpujarras zone, on the south side of the Sierra Nevada in Granada Province (Southeastern Spain) where mica-schists and phyllites outcrop in geological complex metamorphic environments. Data and field observations were integrated on a simple shallow failure susceptibility indicator, based on the combination of a wetness index approach (TOPMODEL), a geological and lithological reconstruction, structural features and slope attributes. Field observations indicated that the produced map is a good spatial representation of the shallow landslides.

Keywords: Mass movement, landslide susceptibility, semi-aridity, controlling factors.

### INTRODUCCIÓN

#### Procesos de remoción en masa

Los procesos de remoción en masa son aquellos que involucran el movimiento de los materiales formadores de las

laderas bajo la influencia de la gravedad (por la cual también se les conoce como procesos gravitacionales) y sin la asistencia primordial de algún agente de transporte fluido (Brunsden, 1979). El término procesos de remoción en masa agrupa los diferentes tipos de movimiento de material (llámese rocas, detritos o derrubios, tierra o suelo) que ocurren en las laderas sin importar el mecanismo involucrado. De tal forma que incluye la caída o desprendimiento de materiales, los vuelcos, deslizamientos, expansiones laterales, flujos y los

---

\* Department of Geography, King's College London, Strand, London WC2R 2LS, UK

movimientos complejos, estos últimos resultado de la combinación de dos o más de los anteriores tipos.

Los términos procesos gravitacionales, procesos de ladera y movimientos de ladera son sinónimos del término procesos de remoción en masa. En español el término “deslizamiento” o “deslizamiento de tierra”, se ha utilizado indistintamente para englobar los procesos de remoción en masa, ocasionando una confusión en la terminología. En un sentido estricto, el significado del término deslizamiento implica el movimiento de material sobre un plano o superficie, lo cual indica que es un tipo de proceso de remoción en masa con un mecanismo de movimiento específico. La confusión se desprende de la traducción errónea que se ha hecho de la palabra landslide (empleada en inglés también como sinónimo de procesos de remoción en masa), lo que en español se ha denominado como “deslizamiento”, y no como movimiento del terreno, su significado real. En este sentido es recomendable tratar de extender el uso de los términos adecuados para cada tipo de proceso (información más detallada puede encontrarse en Dikau y colaboradores (1996).

De acuerdo con Terzaghi (1960) y Selby (1993) las causas de la ocurrencia de los procesos de remoción en masa se pueden dividir en dos: 1) Causas externas que producen un cambio en el campo de esfuerzos, pero no en la resistencia de los materiales y 2) Causas internas que disminuyen la resistencia de los materiales sin cambiar el campo de esfuerzos. Este artículo se centra en los cambios externos debido a las variaciones en el régimen pluvial y, por ende, en las condiciones de humedad del suelo, así como también considera la topografía local, los rasgos estructurales y litológicos como factores de control de los deslizamientos que ocurren en la zona de estudio.

## TRABAJOS PREVIOS

Existen muchos problemas de inestabilidad en la zona de las Alpujarras (sureste de España), los cuales son desencadenados tanto por factores naturales como de índole antrópica. A partir de la construcción de nuevas carreteras y túneles en zonas de filitas, el número de deslizamientos se ha incrementado considerablemente. También cabe mencionar que las intensas lluvias de los últimos años han contribuido en gran medida a que los procesos de ladera ocurran con mayor frecuencia. En respuesta a estos eventos se han publicado varios artículos que analizan este tipo de procesos. Algunos trabajos han incluido la elaboración de una metodología para mapear a gran escala peligros por deslizamientos a partir del empleo de Sistemas de Información Geográfica (Chacón et al., 1993), y la elaboración de inventarios para localidades específicas (e.g., Catena et al., 1996; Fernández et al., 1996a, Fernández et al., 1996b). Estas investigaciones enriquecen el conocimiento existente de los procesos localizados en esta área en particular. Sin embargo, no se han abocado de manera más objetiva a estudiar las interacciones ambientales presentes, y

por ende a la mejor comprensión de tales procesos. Por esta razón, es importante llevar a cabo un estudio en el que se consideren todos los factores que controlan los procesos de remoción, lo cual permitiría un mejor entendimiento de sus causas y efectos.

## OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es la elaboración de un índice de susceptibilidad a movimientos del terreno del tipo de los deslizamientos, basado en las interacciones que se llevan a cabo entre los diferentes factores ambientales que controlan este tipo de procesos en un ámbito climático semiárido. En este artículo se presentan algunos resultados e ideas del desarrollo de estos procesos gravitacionales en una región montañosa semiárida (las Alpujarras, España), donde los deslizamientos parecen ser dominados por eventos de precipitación extraordinaria, ya sea por generación de alta humedad en el suelo o por flujos que actúan sobre morfologías controladas estructuralmente. El área de estudio está localizada en un contexto donde la combinación de la geología regional, la topografía y el clima son los principales factores condicionantes de los riesgos naturales que ocurren en la zona, lo cual enfatiza la importancia de los factores ambientales en el entendimiento de este tipo de procesos.

## MOVIMIENTOS DEL TERRENO

### El Complejo Alpujárride

La zona de las Alpujarras (Figura 1) está constituida por una serie de grandes cuencas paralelas al principal lineamiento de Sierra Nevada, las cuales son drenadas por los ríos Guadalfeo, el Chico y el Andarax de oeste a este, respectivamente. El trabajo aquí presentado se concentra en la parte media del río Guadalfeo entre Orgiva y Cadiar, en los alrededores del pueblo de Torvizcón. El régimen climático de esta región es de tipo Mediterráneo con un intenso período estival que se extiende de junio a octubre, con una precipitación de 300 mm en los valles fluviales, la cual llega a 1,000 mm en la cima de las montañas en gran medida a manera de nieve (Thornes, 1976).

Observaciones de campo y mapeo indican que los principales movimientos del terreno son deslizamientos superficiales de debris y de suelos (Figura 2), y asentados a profundidad con un componente rotacional (Figura 3), los cuales están controlados por la estructura geológica y la litología. Sin embargo, existen otros factores que tienen influencia en el desarrollo de este tipo de procesos, tales como la acción de los ríos (que afecta las propiedades de resistencia), la intemperización de los materiales, el clima y la topografía, mismos que controlan las presiones de agua en los poros. Los deslizamientos asentados a profundidad con componente rotacional han sido previamente analizados (Alcántara-Ayala,

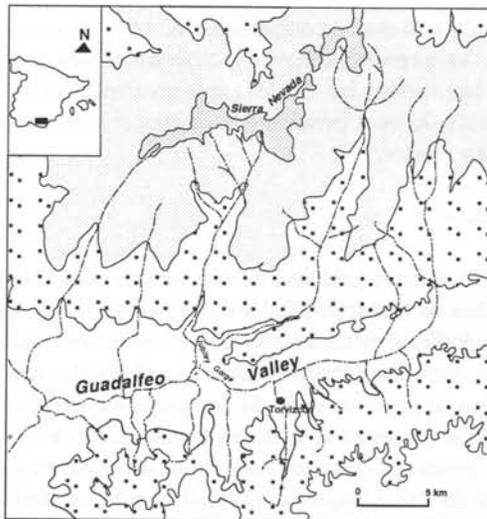


Figura 1. Localización del área de estudio.

1999), razón por la cual en el presente artículo se hace referencia sólo a los deslizamientos de tipo superficial (de derrubios y de suelos).

#### CONTROLES GEOLÓGICOS DE LOS DESLIZAMIENTOS

El complejo Alpujarride es un cinturón alargado con dirección E-W de aproximadamente 85 km de largo y entre 2 y 6 km de ancho (Sáenz de Galdeano *et al.*, 1986), el cual pertenece a la Cordillera Bética. La Cordillera Bética se divide en dos unidades principales (Tubía *et al.*, 1992):

1. Las zonas externas (Fallot, 1948) o Dominio Sur-Ibérico (García-Dueñas y Balanyá, 1986), formado por las zonas Pre-béticas y Sub-béticas, las cuales están constituidas por rocas sedimentarias de edad Mesozoica y Terciaria, deformadas por fallas y cabalgaduras de orientación NE-SW (Jabaloy *et al.*, 1993).

2. El dominio Alborán (García-Dueñas y Balanyá, 1986), o zona interna o Bética (Fallot, 1948). Está formado por rocas metamórficas de edad paleozoica y mesozoica (Egeler y Simon, 1969), las cuales son a su vez clasificadas en tres complejos:

- El Complejo Nevado-Filábride, formado por eclogitas y esquistos azulosos, originados por metamorfismo de alta presión hace 146 Ma (De Roever y Nijhuis, 1963; Hebeda *et al.*, 1980; Morten *et al.*, 1987).

- El Complejo Alpujarride, caracterizado por un metamorfismo Alpino de presión intermedia.

- El Complejo Maláguide, formado por rocas Paleozoicas con un bajo grado de metamorfismo de edad Herciniana.

El área en estudio está comprendida dentro de la zona interna o dominio Alborán de la Cordillera Bética. Esta región, conocida también como el Complejo Alpujarride, se divide de acuerdo a la intensidad del metamorfismo y a sus



Figura 2. Deslizamiento superficial en filitas, localizado en las cercanías de Torvizcón.

características litológicas de la siguiente manera (Tubía *et al.*, 1992):

1. Las unidades bajas, con muy bajo y bajo grado de metamorfismo, están integradas por una formación carbonatada bien desarrollada, datada paleontológicamente como Triásico Medio y Superior.

2. Las unidades medias, con una secuencia metapelítica que alcanza un mediano y alto grado de metamorfismo.

3. Las unidades altas, un grupo de mantos que ocupa la posición tectónica más alta y cuya formación metapelítica tiene el grado más alto de metamorfismo.

El complejo Alpujarride está formado por cinco mantos, constituidos por rocas del Triásico y del Pérmico (Figura 4). Éstos son, en orden tectónico ascendente: el Lújar, Cástaras, Alcázar, Murtas y Adra (Aldaya, 1969 y Aldaya *et al.*, 1979), los cuales fueron emplazados durante la orogenia Alpina como resultado del movimiento hacia el norte de la placa africana al empalmarse con la placa europea:

1. El manto de Lújar está constituido por filitas pobremente cristalizadas con niveles de calcoesquistos que alternan con cuarcitas, y por una sucesión de calizas y dolomías.

2. El manto de Cástaras aflora continuamente a lo largo del límite sur de Sierra Nevada, y está formado por calizas, filitas y cuarcitas.

3. El manto de Alcázar está compuesto predominantemente por filitas gris-azules, cuarcitas, algo de yeso y calcoesquistos, dolomías y calizas.

4. El manto de Murtas aflora en la parte suroeste del área y está tectónicamente localizado sobre el manto de Alcázar. Está constituido por cuarcitas y esquistos cuarcíticos con biotita, calizas recristalizadas y mármoles micáceos.

5. El manto de Adra está localizado en la posición más alta y está constituido principalmente por mármoles dolomíticos, esquistos grafiticos y cuarcitas.

La zona de estudio está localizada en el manto de Alcázar. Dado lo anterior, nuestra atención se centrará en el segundo grupo litológico.



Figura 3. Deslizamiento asentado a profundidad (*deep-seated*) en el río Guadalfeo.

La estructura general o evolución tectónica de los mantos Alpujarrides es resultado de una serie de eventos tectónicos que ocurrieron regionalmente (Cuevas *et al.*, 1990). En el período Triásico se producen fracturas que dan lugar a procesos sedimentarios y volcánicos. El fracturamiento contribuyó a la existencia de subsidencias diferenciales, por lo que se dieron fenómenos de slumping, pliegues gravitacionales y brechas. En el Lías-Dogger los depósitos fueron generalmente fragmentarios y poco potentes. En este mismo período se da el proceso de *rifting*, en el cual se produjeron movimientos distensivos y transcurrentes. Durante el Cretácico Superior, el Alpujarride sufrió un metamorfismo de alta presión y baja temperatura asociado a subducción, y en el Paleoceno se produjo enfriamiento, descompresión y exhumación. Finalmente en el Eoceno-Oligoceno Temprano se produjo un proceso de cabalgamientos (Sáenz de Galdeano, 1997).

La mayor parte de los deslizamientos en estos mantos tiene lugar en litologías metamórficas (ya sea en filitas o micaesquistos) y su extensión espacial está probablemente controlada por un sistema conjugado de fallas. Ambos tipos de rocas metamórficas tienen un gran contenido de micas y son de textura esquistosa. Desarrollan suelos que pueden tener bajos o altos valores de infiltración dependiendo, en gran medida, de si los horizontes más bajos han sido o no expuestos por erosión.

El control estructural de los deslizamientos en la región de los mantos Alpujarrides ha sido observado y medido en el campo cerca del pueblo de Torvizcón y a lo largo del río Guadalfeo. En el Complejo Alpujarride existe un sistema principal de fallas y fracturas (Figura 5) con dirección aproximada este-oeste, el cual ha sido definido previamente (Sáenz de Galdeano *et al.*, 1986). Este sistema es el resultado del movimiento hacia el oeste del bloque del *rift* Bético. El movimiento hacia el oeste de la Placa Africana ha originado una serie de fallas conjugadas complejas que rompen las rocas que forman los mantos, lo cual provee una serie de planos

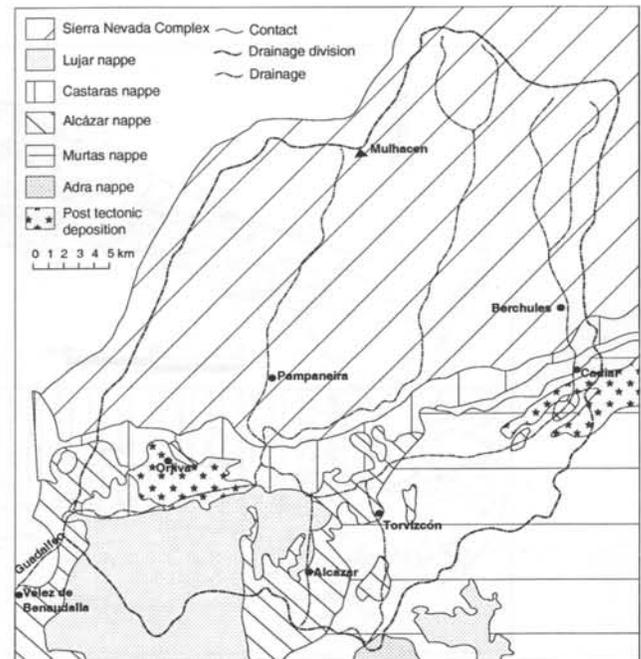


Figura 4. Unidades geológicas que constituyen el Complejo Alpujarride (Aldaya, 1969; Aldaya *et al.*, 1979).

reticulares de debilidad. Estos planos de debilidad son identificados por la dirección de las fallas localizadas en las laderas con exposición sur, lo cual probablemente controla la magnitud de las masas que se están deslizando en dirección del buzamiento de los estratos. Este fenómeno indica que en esta región de las Alpujarras, los deslizamientos están relacionados con variaciones estructurales, donde los estratos rocosos que buzan paralelos o hacia afuera de la ladera son más susceptibles al movimiento que los estratos rocosos cuyo buzamiento es hacia adentro.

El segundo efecto importante, en relación con la geología, es la disponibilidad de materiales como las filitas altamente intemperizadas, las cuales producen suelos ricos en arcilla. En ausencia de vegetación, estos suelos son altamente susceptibles a la erosión (Thornes, 1976; Scoging, 1982), tienen alta capacidad de retención de agua y baja resistencia mecánica, especialmente cuando están intemperizados.

#### CONTROL TOPOGRÁFICO

La topografía controla las laderas a nivel regional y local. En ambientes con un alto grado de humedad, esta puede incluso determinar el grado de humedad en el suelo por flujo subsuperficial y por infiltración de flujo laminar. A pesar de que la infiltración ocurre en el invierno y el flujo subsuperficial puede ocurrir en años muy húmedos como resultado de una serie de eventos de baja magnitud y alta frecuencia, se cree que el flujo subsuperficial no es un mecanismo importante en la

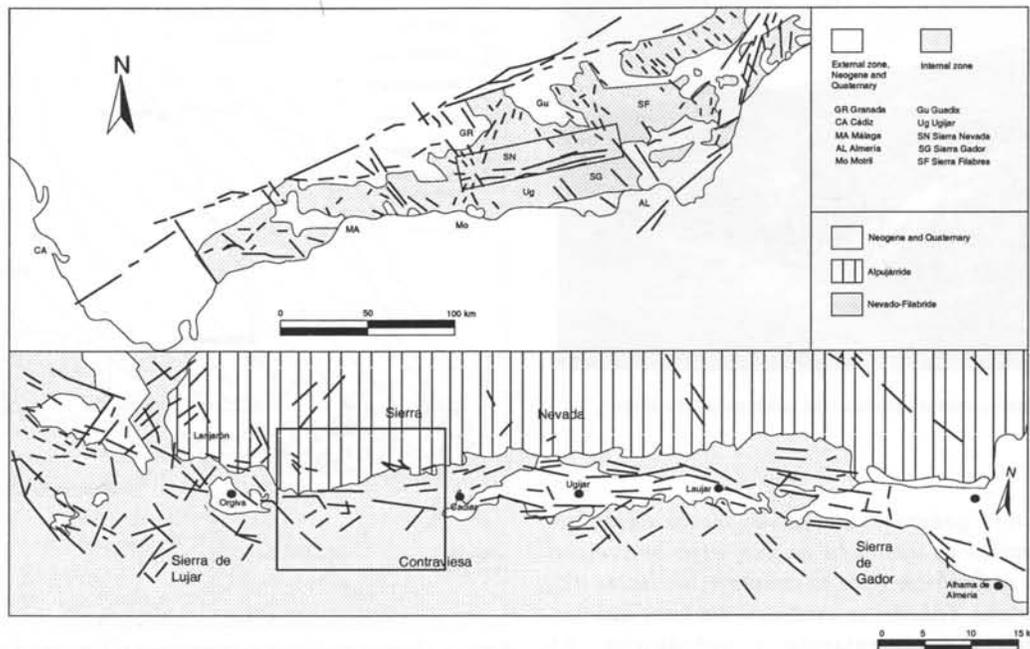


Figura 5. Sistema de fallas y fracturas en el Complejo Alpujarride (Spanz de Galdeano *et al.*, 1986).

España Mediterránea. Por lo tanto, es la reinfiltración del flujo laminar generada en grandes eventos la que contribuye a la recarga de las aguas subterráneas, misma que está intrínsecamente relacionada con los deslizamientos asentados a profundidad. Esta propensión a la humedad se puede calcular usando el índice de humedad desarrollado por Beven y Kirkby (1979), el cual se basa en la acumulación del área de flujo laminar para un evento o una serie de eventos determinados, permitiendo que el flujo laminar se reinfiltre más a medida que la ladera es más suave. El índice empleado es  $\log(a/s)$ , donde  $a$  es el área de contribución en relación con una unidad de medida y  $s$  la inclinación de la ladera ( $\tan$ ).

Por otro lado, la topografía provee el componente de gravedad ladera hacia abajo. Mientras más inclinada sea una ladera, la propensión a los procesos de remoción será mayor. Por lo tanto, y en relación al índice de humedad antes mencionado, se tiene que para determinada humedad se puede esperar un estricto rango de ángulos de inclinación. Esto sugiere que el índice de humedad graficado con el ángulo de la ladera es normalmente una "v" invertida. Únicamente en la cima de la curva, con los ángulos mayores, las condiciones serán lo suficientemente húmedas para producir altas presiones de agua en los poros que puedan ocasionar el deslizamiento, y las laderas tendrán la suficiente inclinación para producir el desplazamiento. Esto es, las laderas situadas en una posición media, se caerán típicamente donde ha habido suficiente acumulación de agua, pero sólo donde hay una ladera suficientemente inclinada. A medida que el ángulo de la ladera disminuye, mayor cantidad de humedad es necesaria para que

un desplazamiento de materiales ocurra y, a medida que la inclinación aumenta, menor cantidad de agua es necesaria para el movimiento. En eventos extraordinarios las laderas más suaves deben ser más propensas a deslizarse y en años secos solamente las laderas más inclinadas se podrán caer. Esto es consistente con las observaciones hechas en el campo. En las Alpujarras, solamente las laderas más inclinadas se caerán en años normales, pero bajo eventos extraordinarios aun las laderas con bajos ángulos de inclinación se caerán. Las laderas tienen gran inclinación en los sitios en que ha existido incisión del río, esto ocurre comúnmente con la presencia de eventos extraordinarios, cuando el río está activo en todo lo ancho del canal.

#### CONTROLES CLIMÁTICOS

El tercer factor de control de estos deslizamientos es la humedad, la cual a través de la percolación crea altas condiciones de presión en los poros del suelo y de las rocas. Una paradoja de estos ambientes de tipo Mediterráneo es que a pesar de la sequía general que los caracteriza, los eventos extraordinarios pueden ocasionar grandes movimientos del terreno, principalmente en el material regolítico. El término de humedad es preferido ya que implica las diferentes interacciones del ciclo hidrológico y no solamente la precipitación. Generalmente, las variaciones de humedad en tiempo están básicamente correlacionadas con la lluvia. En casos extraordinarios estos movimientos ocurren, durante el período de lluvias y como resultado de precipitaciones torrenciales.

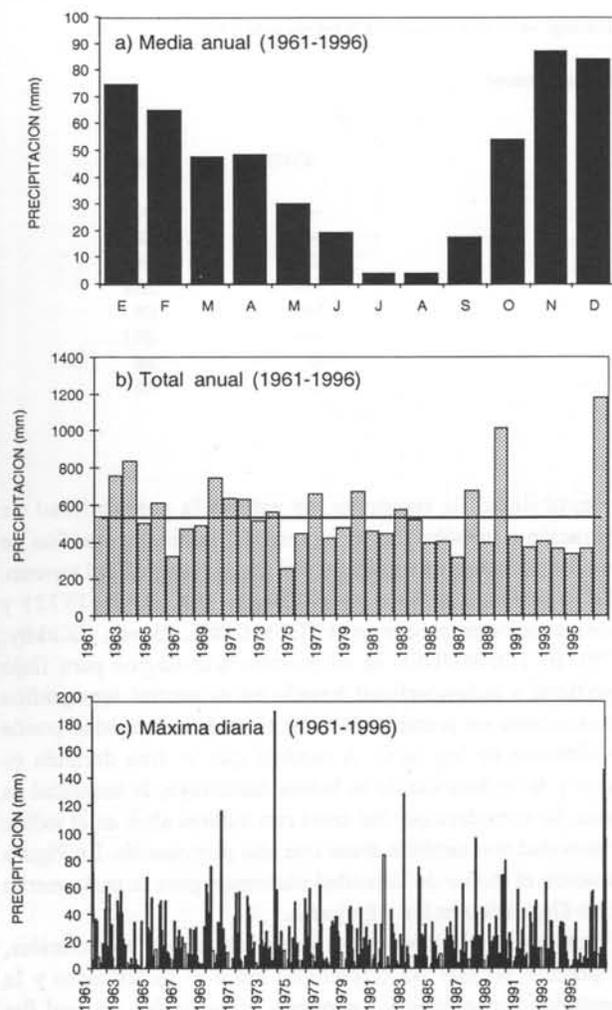


Figura 6. Gráfica de precipitación para la estación meteorológica Torvizcón. a. Precipitación media anual (1961-1996); b. Precipitación total anual (1961-1996); y c. Precipitación máxima diaria a nivel mensual (1961-1996).

En la zona de las Alpujarras la intensidad de la lluvia varía enormemente. A lo largo del año, la lluvia se concentra principalmente en el otoño y en el invierno (Figura 6a), siendo noviembre y diciembre los meses con mayor precipitación. La variación interanual (Figura 6b) se refleja en la diferencia que hay entre la precipitación media anual (539 mm en la estación Torvizcón) y la registrada año con año, de tal manera que se han registrado años con precipitaciones de 259.8 mm (1974) y de 1,381 mm (1996). Las lluvias torrenciales ocurridas en la zona pueden ser identificadas a través de la gráfica de precipitación máxima diaria de cada mes (Figura 6c), la cual indica que aún en años en los que la precipitación total anual es comparable con la precipitación media anual, pueden existir eventos de tipo torrencial como en el caso de los años 1973 y 1982, en los cuales los niveles de precipitación fueron mayores que 120 mm en tan sólo 24 horas.

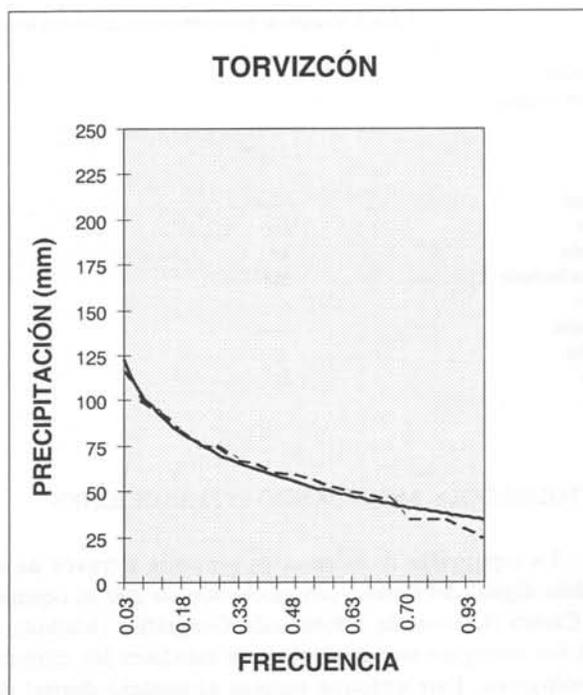


Figura 7. Curva de recurrencia de eventos extraordinarios para la estación meteorológica de Torvizcón (Heras, 1973).

Las series de precipitaciones en el sureste español muestran generalmente una disminución de la lluvia de 1890 a 1934 de hasta aproximadamente 300 mm. Después de este periodo existe una contrastante periodicidad constituida por la alternancia de años húmedos y años secos (Thornes, 1992). Por ejemplo, mientras la década de los ochenta fue de sequía relativa, en los setenta, en especial al principio de esta década, los años fueron húmedos. Los eventos extraordinarios, en contraste, ocurren aleatoriamente o por lo menos con un bajo orden de persistencia. La curva de recurrencia para tales eventos se muestra en la Figura 7 (Heras, 1973). El tiempo más probable para que ocurran estos movimientos del terreno en estos ambientes secos mediterráneos es cuando hay una alternancia de años húmedos con una superposición de eventos extraordinarios. Estos últimos, como las lluvias torrenciales, proveen también los flujos más grandes en los ríos, por lo cual la probabilidad de incisión es máxima bajo estas circunstancias.

Desde 1258 han existido por lo menos 65 tormentas importantes en el sureste español. Uno de los más grandes eventos tuvo lugar del 17 al 19 de octubre de 1973. La mayor parte de la lluvia cayó el día 18 durante un periodo de 10 h; la cifra oficial más alta fue de 350 mm y se registró en Totana, cerca de Murcia (Thornes, 1976), un equivalente mayor a la precipitación media anual de la misma estación. El evento produjo caudales récord, alta sedimentación y grandes deslizamientos en el Guadalfeo. Los valores de precipitación en varias estaciones meteorológicas son presentados en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de precipitación de diferentes estaciones meteorológicas correspondientes a la tormenta de 1973.

| Estación<br>Meteorológica | Precipitación (mm) |          |          |       |
|---------------------------|--------------------|----------|----------|-------|
|                           | 7/10/73            | 18/10/73 | 19/10/73 | Total |
| Bayarcal                  | —                  | 196      | —        | 196   |
| Cadiz                     | 11.6               | 222      | —        | 233.6 |
| Lanjarón                  | 4.7                | 146.3    | 17.6     | 168.6 |
| Mecina Bombarón           | 15.4               | 222      | —        | 233.6 |
| Orgiva                    | 8                  | 125.5    | 5.5      | 139   |
| Torvizcón                 | —                  | 189.5    | —        | 189.5 |
| Trevélez                  | 10                 | 218      | 32       | 250   |
| Ugijar                    | 21                 | 175      | 2        | 198   |

### METODOLOGÍA: MODELANDO INTERACCIONES

La topografía de la zona se presenta a través de un modelo digital del terreno con resolución de 200 m obtenida del Centro Nacional de Información Geográfica (Madrid), el cual fue corregido manualmente para satisfacer los atributos hidrológicos. Este enfoque emplea el modelo digital del terreno para analizar los factores que controlan los deslizamientos. La topografía generada por este modelo digital del área de estudio muestra el canal principal (estructuralmente controlado) del río Guadalfeo con su orientación dominante ENE-WSW, normal al rumbo principal de los planos estructurales, la ladera con orientación sur que desciende de la Sierra Nevada con su relativa y poca disección, así como también la ladera con orientación norte, misma que tiene un grado de disección mayor (Figura 8).

Como una primera aproximación a las variaciones espaciales en los controles hidrológicos, en relación con la

susceptibilidad de remoción, se estimó la probabilidad de infiltración e incisión fluvial a partir del índice topográfico de humedad, mismo que se obtuvo del modelo digital del terreno. Este índice fue definido por Carson y Kirkby (1972) y posteriormente empleado en el TOPMODEL (Beven y Kirkby, 1979). El TOPMODEL es un modelo hidrológico para flujo superficial y subsuperficial basado en el control topográfico del excedente de precipitación, en el cual, la humedad puede ser obtenida de  $\log(a/s)$ . A medida que el área drenada es mayor y la inclinación de la ladera disminuye, la humedad es mayor. Se considera que las áreas con valores altos en el índice de humedad son también áreas con alta percolación. La Figura 9 muestra el índice de humedad elaborado para la parte media del río Guadalfeo en las Alpujarras.

A partir del mapeo en el campo de rasgos estructurales, fue posible estimar las diferencias entre el buzamiento y la orientación topográfica y los planos estructurales, lo cual fue incluido en el modelo digital. Los valores resultantes fueron

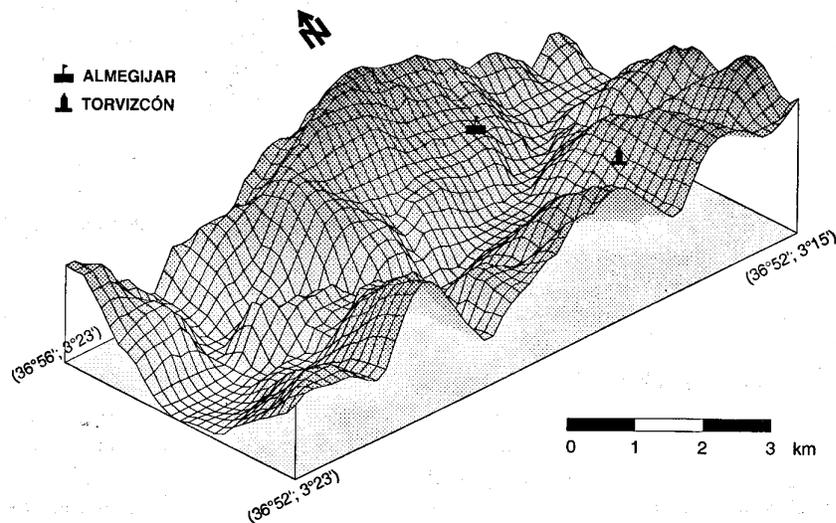


Figura 8. Topografía generada por el modelo digital de elevación del área de estudio.

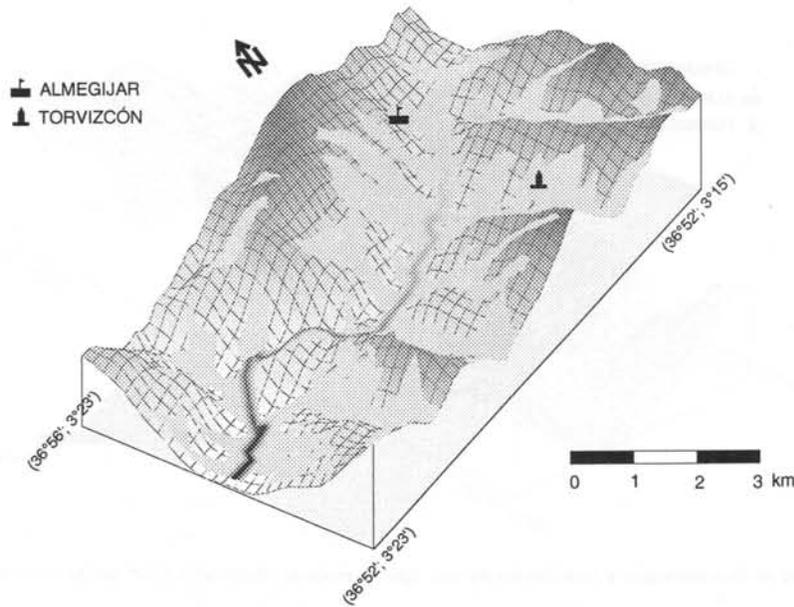


Figura 9. Índice de humedad de la parte media del río Guadalfeo en Las Alpujarras.

utilizados para obtener un “peso” o valor para cada celda como medida de la propensión al movimiento de remoción. De esta manera, las áreas con unidades litológicas cuyo buzamiento es paralelo a la ladera tienen gran probabilidad de deslizarse – y por ende un peso o valor mayor –, por el contrario, las áreas en donde los estratos rocosos buzan hacia adentro de la ladera la probabilidad de deslizamiento es extremadamente baja, por lo cual tienen un peso negligible. Dado lo anterior, todas las áreas con inclinación menor que 5°, fueron excluidas de los diferentes pesos, ya que no pueden ocurrir deslizamientos en

sitios con tan baja inclinación, razón por la cual el principal canal del río Guadalfeo ha quedado excluido.

#### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de las observaciones de campo y de un modelo digital de terreno se ha elaborado un índice de susceptibilidad de deslizamientos (de detritos o derrubios y/o de suelos) para la zona de las Alpujarras, el cual es presentado en la Figura 10. El índice de susceptibilidad presenta distintas zonas que

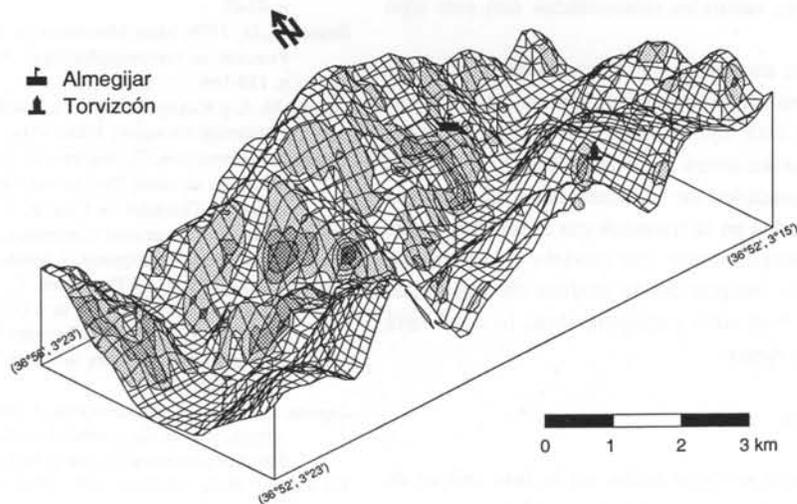


Figura 10. Mapa de susceptibilidad de deslizamientos (zonas oscuras denotan mayor susceptibilidad, pero no están cuantificadas).

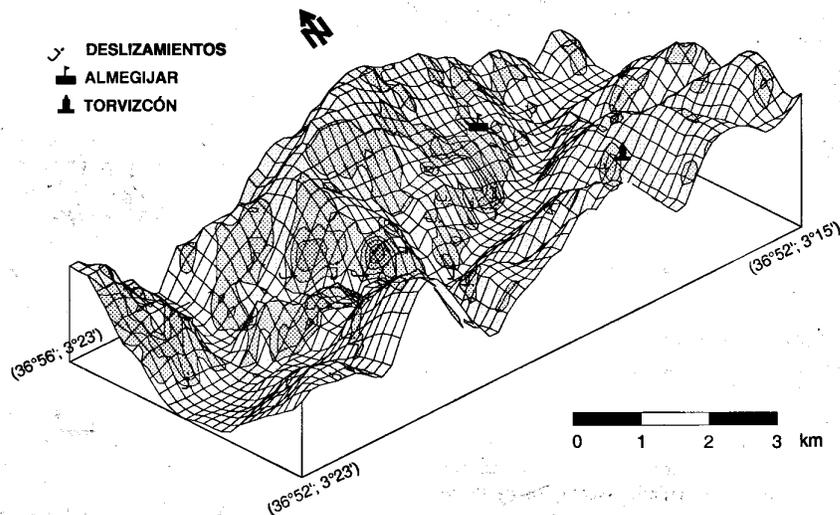


Figura 11. Mapa de susceptibilidad de deslizamientos y localización de este tipo de procesos observados en el campo (los símbolos que representan los deslizamientos no están a escala).

pueden ser afectadas por este tipo de procesos gravitacionales, lo cual ha sido validado en distintas etapas de trabajo de campo a partir de la localización de nuevos deslizamientos en zonas previamente señaladas, como se muestra en la Figura 11.

Los factores ambientales juegan un papel muy importante en el control de los movimientos del terreno. Esto es aplicable a cualquier ambiente y en mayor medida a los ambientes semiáridos, debido a la presencia de eventos extraordinarios, como las lluvias torrenciales, las cuales originan, en la mayoría de los casos, grandes y cuantiosos desastres naturales. El entendimiento de la interacción entre todos estos factores ambientales es fundamental para la identificación de zonas susceptibles a este tipo de procesos, lo cual permite la elaboración de estrategias adecuadas en la prevención de desastres naturales relacionados con este tipo de movimientos.

La distribución en tiempo y espacio de las zonas susceptibles a movimientos de remoción en masa en el complejo Alpujarride está determinado por las condiciones ambientales, las variaciones hidrológicas, los rasgos geológicos y las propiedades de los materiales, parámetros que han sido considerados en la metodología antes propuesta. Con la finalidad de complementar este modelo y mejorar los resultados obtenidos, la integración de análisis de resistencia de los materiales es requisito indispensable, lo cual será abordado en un trabajo futuro.

#### AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se llevo a cabo en la fase inicial de una investigación doctoral en el King's College de la Universidad de Londres, bajo la supervisión del Prof. John Thornes, gracias al apoyo otorgado por el programa de becas

en el extranjero de la DGAPA de la UNAM. La autora desea expresar su gratitud al Dr. José Lugo Hubp y al Dr. David Palacios Estremera, cuyos comentarios y sugerencias enriquecieron la presentación de este trabajo.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcántara-Ayala, I., 1999, Modelling deep-seated failures in semi-arid Mediterranean environments: *Geofísica Internacional* (en prensa).
- Aldaya, F., 1969, Los mantos Alpujarrides al sur de Sierra Nevada: Universidad de Granada, Tesis Doctoral (inédita), 527 p.
- Aldaya, F., García-Dueñas V., y Navarro-Vilá, F., 1979, Los mantos Alpujarrides del tercio central de las Cordilleras Béticas: *Acta Geológica Hispánica, España*, v. 14, p. 154-166.
- Beven, K. J., y Kirkby, M. J., 1979, A physically based, variable contributing area model of basin hydrology: *Hydrological Sciences Bulletin*, v. 24, p. 43-69.
- Brunsdon, D., 1979, Mass Movement, in Embleton, C. y Thornes, J. B., eds., *Process in Geomorphology*: New York, John Wiley & Sons, p. 130-186.
- Carson, M. A. y Kirkby, M. J., 1972, *Hillslope form and processes*: New York, Cambridge University Press, 475 p.
- Catena, M., Fernández, T., Irigaray, C. y Chacón, J., 1996, Movimientos de ladera en el curso bajo de los ríos Darro y Aguas Blancas (Sector Quintanar-Granada), in Chacón, J. and Rosúa, J.L., eds., *Proceedings of the 1st International Conference on Sierra Nevada: Conservation and Sustainable Development*, 2, Spain, University of Granada, p. 281-296.
- Chacón, J., Irigaray, C., y Fernández, T., 1993, Methodology for large scale landslide hazard mapping in a G.I.S, in Novosad, S. and Wagner, P., eds., *Proceedings of the Seventh International Conference and Field Workshop on landslides in Czech and Slovak Republics*, Rotterdam, Balkema, p. 77-82.
- Cuevas, J., Aldaya, F., Navarro-Vilá, F. and Tubía, J.M., 1990, Structure of the Alpujarrides on the Southern and Eastern border of the Sierra de Lujar: *Estudios Geológicos*, v. 46, p. 209-216.
- De Roever, W.P., y Nijhuis, H.S., 1963, Plurifacial alpine metamorphism in the eastern Betic Cordilleras (SE Spain), with special references to the genesis of the glaucophane: *Geologisches Rundschau*, v. 53, p. 324-336.

- Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L., e Ibsen, M.L., 1996, Landslide recognition—identification, movement and causes: Chichester, John Wiley & Sons, 251 p.
- Egeler, C.G., y Simon, O. J., 1969, Orogenic evolution of the Betic Zone (Betic Cordilleras, Spain) with emphasis on the nappe structures: *Geologie Mijnbouw*, v. 48, p. 296-305.
- Fallot, P., 1948, Les Cordilleres Bétiques: *Estudios Geológicos*, v. 4, p. 259-279.
- Fernández, T., Irigaray, C., y Chacón, J., 1996a, Inventario de movimientos de ladera en la vertiente norte de la Contraviesa (Granada) mediante un S.I.G., in Chacón, J. and Rosúa, J.L., eds., Proceedings of the 1st International Conference on Sierra Nevada, Conservation and Sustainable Development, 2: Granada, Spain, University of Granada, p. 297-317.
- Fernández, T., Irigaray, T., y Chacón, J., 1996b, GIS analysis and mapping of landslides determinant factors in the Contraviesa area (Granada, Southern Spain), in Chacón, J., Irigaray, C. and Fernández, T., eds., Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference and Field Trip on Landslides, Rotterdam, Balkema, p. 141-151.
- García-Dueñas, V., y Balanyá, J.C., 1986, Estructura y naturaleza del Arco de Gibraltar, Maleo: *Boletim da Sociedade Geologica de Portugal*, v. 2, p. 23.
- Hebeda, E.H., Boelrijk, N.A.I.M., Priem, H.N.A., Verdurmen, E.A., y Verschure, R.H., 1980, Excess radiogenic Ar and undisturbed Rb-Sr systems in basic intrusives subjected to alpine metamorphism in southeastern Spain: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 47, p. 81-90.
- Heras, R., 1973, Estudio de máximas crecidas de la zona Alicante-Almería-Málaga y de las lluvias torrenciales de Octubre de 1973: Madrid, España, Centro de Estudios Hidrográficos, 475 p.
- Jabaloy, A., Galindo-Saldivar, J. and González-Lodeiro, F., 1993, The Alpujarride-Nevalo Filábride extensional shear zone, Betic Cordillera, Spain: *Journal of Structural Geology*, v. 15, núms. 3-5, p. 555-569.
- Morten, L., Bargossi, G.M., Martínez-Martínez, J.M., Puga, E., y Díaz de Federico, A., 1987, Metagabbro and associated eclogites in the Lubrín area, Nevado-Filábride Complex, Spain: *Journal of Metamorphic Geology*, v. 5, p. 155-174.
- Sanz de Galdeano, C., Rodríguez Fernández, J. y López Garrido, A. C., 1986, Tectonosedimentary evolution of the Alpujarran corridor: *Giornale di Geologia (Italia)*, v. 48, p. 85-90.
- Sanz de Galdeano, C., 1997, La zona interna Bético-Rifeña—Antecedentes, unidades tectónicas, correlaciones y bosquejo de reconstrucción paleogeográfica: Granada, España, Universidad de Granada, 316 p.
- Scoging, H. M., 1982, Spatial variations in infiltration, runoff and erosion on hillslopes in semi-arid Spain, in Bryan y Yair, eds., *Badland Geomorphology and Piping*: Norwich, Geobooks, p. 89-112.
- Selby, M. J., 1993, *Hillslopes Materials and Processes*: Oxford, UK, Oxford University Press, 451 p.
- Terzaghi, K., 1950, Mechanism of landslides, in Paige, S., *Applications of Geology to Engineering practice*: Boulder, Co., Geological Society of America, Berkeley volume, p. 83-123.
- Thornes, J. B., 1976, Semi-arid erosional systems, case studies from Spain: *Geographical papers: Great Britain*, London School of Economics, v. 7, 104 p.
- Thornes, J. B., 1992, Hydrology and environmental change, in Giraldez, ed., *El agua en Andalucía, III: Córdoba*, España, Universidad de Córdoba, 376 p.
- Tubía, J.M., Cuevas, J., Navarro-Vilá, F. and Alvarez, F., 1992, Tectonic evolution of the Alpujarride Complex (Betic Cordillera, southern Spain): *Journal of Structural Geology*, v. 14, núm. 2, p. 193-203.

Manuscrito recibido: Octubre 1, 1998

Manuscrito revisado recibido: Marzo 23, 1999

Manuscrito aceptado: Marzo 26, 1999