



Movimientos de ladera: clasificación, descripción y evolución espacial y temporal

Landslides: classification, description and temporal and spatial evolution

Chacón, José ✉

Recibido: 14 de Marzo de 2012 • Aceptado: 19 de Abril 2012

Resumen

La clasificación de movimientos de ladera, su identificación y el análisis de su progresión desde la fase preparatoria hasta el agotamiento del movimiento requiere del empleo de conceptos relativos al tipo de movimiento, su tamaño y velocidad, la morfología de la vertiente inestable y de la masa movilizada definidos por parámetros geomórficos relativos al despliegue espacial del movimiento, así como los relativos a la evolución espacial o temporal como la intensidad, capacidad destructiva, actividad y la diacronía. Se presenta un procedimiento integrado para la aplicación de tales conceptos, sea a partir de las propuestas de la Comisión del Inventario Mundial de Movimientos de Ladera organizada por la UNESCO, o bien por contribuciones de diferentes autores internacionales y aportaciones del autor. Se definen y describen tales conceptos, y se muestra un ejemplo de aplicación práctica a un caso de estudio, así como se ofrecen resultados obtenidos en las investigaciones sobre movimientos de ladera en la Cordillera Bética del sur de España.

Palabras clave: *movimientos de ladera, clasificación, identificación, parámetros morfológicos, tamaño, velocidad, grado de desarrollo, intensidad, capacidad destructiva, actividad y diacronía.*

Abstract

The classification, identification and analysis of the progressive development of landslides, from the preliminary to the final stage, requires the use of concepts concerning the type of slope movement, the size and velocity of the mass, the morphology of the unstable slope and mobilized mass relative to the spatial landslide distribution as defined by geomorphic concepts of spatial and temporal evolution as the landslide degree of development, intensity, destructive capacity, activity and diachroneity. In this paper an integrated procedure is presented for the application of such concepts, either resulting from the UNESCO Worldwide Landslide Inventory, from international contributions of different authors and results from the author's researches. Such concepts are here introduced and described, with an example of practical application to a study case and related comments about results obtained from researches on landslides in the Betic Cordillera in the South of Spain.

Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Granada, España

✉ jchacon@ugr.es

Keywords: *landslides: classification, identification, morphological parameters, size, velocity, degree of development, intensity, destructive capacity, activity and diachroneity.*

INTRODUCCIÓN

El relieve físico de la Tierra, desde el punto de vista de su justificación mecánica, expresa un determinado momento del balance continuo y cambiante entre las fuerzas impulsadas por acciones gravitatorias que conducen al arrasamiento del paisaje, y la resistencia que los suelos y macizos rocosos oponen a ser movilizadas. La movilización se produce mediante procesos de meteorización física y química, bajo la acción de los cambios térmicos, lluvia y el viento, todo ello alimentando un proceso erosivo que afecta a volúmenes enormes de partículas y produce el modelado del relieve.

Aquí nos interesaremos, sin embargo por el modelado en masa del relieve mediante los movimientos gravitatorios que se engloban dentro de los términos *movimientos o deslizamientos de laderas y taludes*, en función de que afecten a superficies inclinadas naturales (laderas) o artificiales (taludes). El término *deslizamiento de tierras*, traducción literal del muy extendido en inglés "landslide", es un término general que comprende los diferentes tipos de movimientos de ladera y no debe confundirse con el término *deslizamiento*, que define uno de los tipos particulares de movimiento, por lo que, en su lugar, emplea el término *movimiento de ladera*.

Desde el punto de vista mecánico los tres tipos básicos de movimientos (Figuras 1 y 2), *caídas, deslizamientos y flujos*, se diferencian entre sí al estar los dos primeros relacionados con roturas del terreno dentro del dominio de comportamiento frágil, mientras que el tercero, los flujos, se asocia a deformaciones desarrolladas preferentemente en el dominio plástico o viscoso. Las caídas y deslizamientos se diferencian entre sí porque en los primeros hay una rotura, frágil generalmente, que delimita un bloque de cualquier tamaño seguida después una trayectoria libre

desde el origen hasta el punto de reposo, mientras que en los segundos el desplazamiento se produce sobre una superficie plana o cilíndrica.

La clasificación de los tipos de movimientos de ladera, ha sido objeto de numerosos trabajos, aunque destacan los de *Varnes, (1978); Hutchinson (1988), Cruden y Varnes, (1996)*; y en España las de *Corominas y García Yagüe, (1997)* o *Chacón (2003a, b; 2008)*. Los criterios relativos a la geometría y dinámica de los movimientos se exponen de acuerdo con *Chacón (2003 a,b), Chacón et al, (1996), y WP/WLI. (1990, 1993a, 1993b)* a partir de una experiencia de 30 años de investigaciones sobre movimientos de ladera en la Cordillera Bética del Sur de España. Se emplearán los términos *movimientos de masa, ladera o talud o deslizamientos de tierras* (landslide) para referirse, en general, a todos los tipos de movimientos.

Tipos de movimientos de ladera

La Figura 2 resume la clasificación de las principales tipologías de movimientos de masa (*Chacón, 2008*). La Figura 3 ofrece la terminología del Glosario Internacional de Deslizamientos de Tierras (*WP/WLI, 1993b*)

Los movimientos básicos presentes en las diferentes tipologías son:

Caída: movimiento de descenso vertical desde una posición inicial que incluye el choque y el rebote a lo largo del mismo, hasta alcanzar una posición de reposo. El término "avalancha" se suele emplear para indicar caídas o desprendimientos masivos y simultáneos de grandes volúmenes de fragmentos de rocas o suelos compactos; igualmente se emplea para otros movimientos rápidos de carácter masivo, como algunos casos de flujos de derrubios o deslizamientos planares en fuertes pendientes.

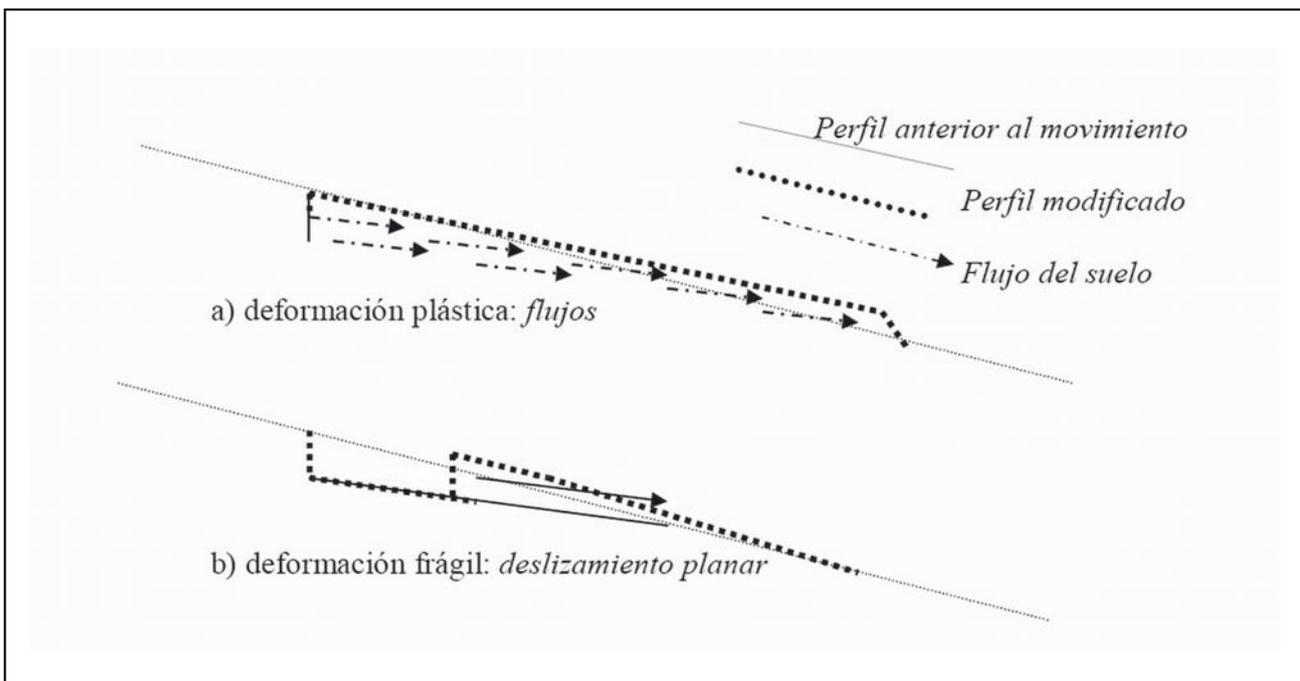


Figura 1. a) Rotura plástica progresiva hacia arriba al aumentar la plasticidad. Cada punto de la masa se desplaza más que el situado inicialmente por debajo. La deformación es íntima en la masa que cambia de forma; b) Rotura frágil de un bloque de suelo cohesivo o roca. Cada punto se desplaza igual cantidad que todos los contenidos en el bloque. La deformación se produce en el plano de rotura y no afecta al interior de la masa que no cambia de forma.

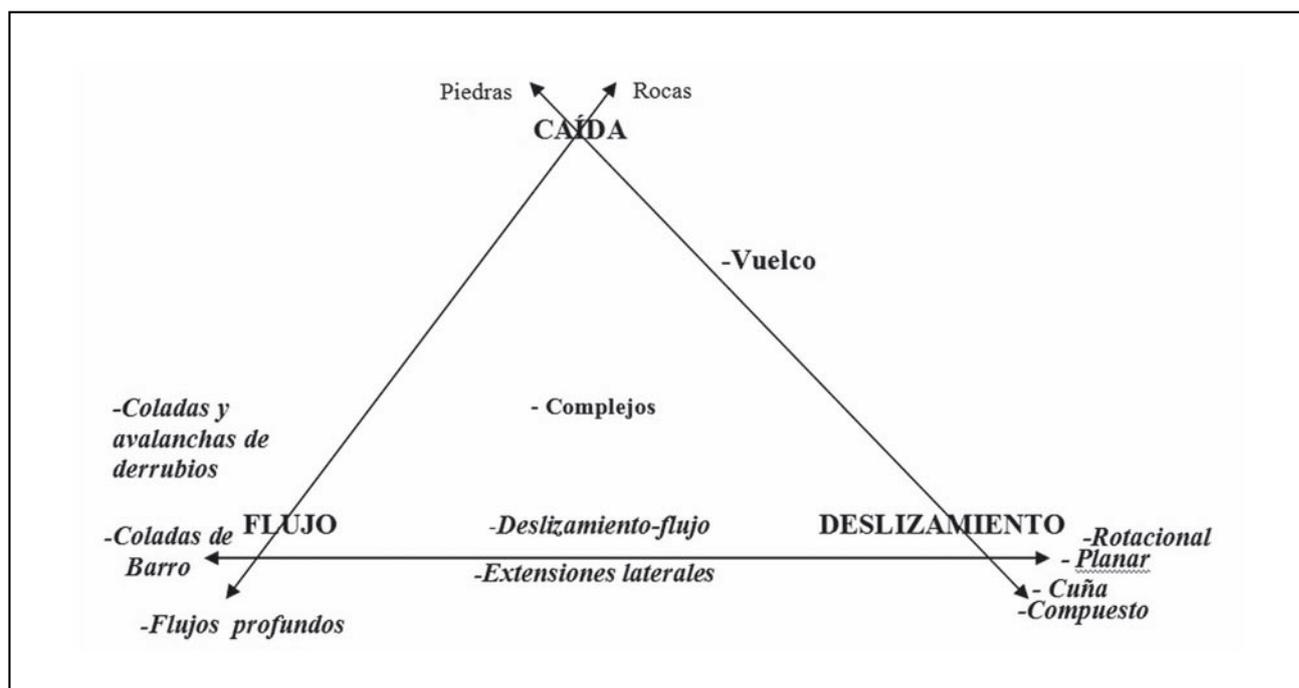


Figura 2. Esquema de clasificación de movimientos de ladera (Chacón, 2008). Los tres tipos básicos en mayúscula y los movimientos resultantes según el material (suelo granular, cohesivo o macizo rocoso) y sus combinaciones.

Flujo: respuesta plástica o semiviscosa de suelos geotécnicos o macizos rocosos por desplazamientos relativos entre partículas en ausencia de esfuerzos, con un gradiente de velocidad generalmente decreciente en profundidad hasta desaparecer. Puede producirse en macizos rocosos montañosos y afectar espesores importantes a velocidades lentas o muy lentas. Más frecuentemente afecta a suelos en condiciones muy superficiales y en relación con cambios en la presión de poros y en la consistencia de la fracción fina. La viscosidad de la masa decrece desde los *flujos de tierra a las coladas de barro*, lo que se expresa en la consistencia de la masa y en la morfología que adoptan en el relieve. Las *coladas de derrubios* pueden incluir una proporción muy elevada de agua lo que permite que alcancen velocidades rápidas en su propagación por barrancos o cauces en la forma de masas de bloques de rocas, piedras, barro, troncos de árboles y masas de vegetación en un frente que inunda y arrasa el territorio a su paso.

Deslizamiento: deformación frágil de masas coherentes de suelos geotécnicos o macizos rocosos por el desplazamiento de la masa sobre una superficie plana, cilíndrica o compuesta, sin que se involucre necesariamente ninguna deformación íntima de la masa. Da lugar a deslizamientos planares, rotacionales y compuestos. Las cuñas de roca son deslizamientos planares entre discontinuidades convergentes. Los vuelcos involucran deslizamiento de capas y rotación hacia la cara libre del talud.

En cualquier caso la rotura circular que subyace a un deslizamiento rotacional viene determinada por la deformación de formaciones homogéneas desde el punto de vista mecánico. Cuando las propiedades resistentes son invariables con la dirección del esfuerzo considerado, la solución de rotura es igualmente isotropa y por lo tanto se dispone en la forma cilíndrica característica de los deslizamientos rotacionales. Sin embargo cuando la unidad litológica presenta alternancias de tramos con resistencia variable o discontinuidades, en el caso de los

macizos rocosos, es más frecuente la rotura plana a través de las superficies menos resistentes de la unidad. Dado que en la naturaleza abundan menos las unidades litológicas netamente isotropas en sus propiedades resistentes, en general, son más abundantes los deslizamientos planares que los rotacionales, si bien también se producen combinaciones entre ambos tipos de movimientos.

Colapsos: deformaciones que afectan a taludes y laderas en macizos rocosos y suelos cohesivos por las que se combinan el inicio de un deslizamiento y un desplazamiento súbito o muy rápido de caída hasta una posición de reposo, sin que necesariamente esté determinado por la presencia de discontinuidades desfavorables.

Vuelcos: deformaciones en macizos rocosos afectados por discontinuidades muy inclinadas hacia el interior del talud por las que las capas deslizan entre sí y rotan hacia la cara libre provocando caídas o desprendimientos de bloques.

Complejos: deformación del talud o la ladera producida por la combinación simultánea y/o sucesiva de algunos de los diferentes tipos de los movimientos básicos anteriores a lo largo del período activo del movimiento. Generalmente asociado a movimientos de magnitud considerable del tipo de los deslizamientos menos superficiales y mayor volumen de masa. Combinaciones entre deslizamiento planar y flujo, e incluso entre una fase inicial de deslizamiento rotacional y una propagación de la masa por deslizamiento planar y fluencia de la masa son frecuentes en formaciones geológicas compuestas por tramos con plasticidad variable. Se han observado también desprendimientos de rocas que dan lugar a la movilización de las formaciones sobre las que se acumula la masa de rocas desprendidas mediante fluencia dando lugar a coladas de derrubios. Este tipo de movimientos complejos son activados por terremotos y/o lluvias.

La **extensión lateral** consiste en el lento desplazamiento de una masa más o menos rígida de terreno sobre un sustrato plástico paralelamente a las fracturas que delimitan bloques de la masa rígida. Durante los desplazamientos los bloques pueden experimentar hundimientos o vuelcos relativos respecto a la posición inicial.

Los movimientos de laderas y taludes, con frecuencia, son difíciles de clasificar correctamente, es fácil por ejemplo confundir un deslizamiento planar y rotacional, o bien un flujo de tierras con un deslizamiento planar, sin una observación muy detallada de sus características.

Magnitudes, formas del relieve, velocidad, actividad y grado de desarrollo

Las **magnitudes** de las masas movilizadas son muy variables y las clasificaciones propuestas dependen de su finalidad. Así una propuesta para movimientos asociados a trazados viarios se presenta en la Tabla 1, mientras que la Tabla 2 ofrece otra aplicable a movimientos de ladera identificados en relieves naturales. Obsérvese que la clase "Excepcionalmente grande" en Tabla 1, corresponde a la magnitud 4 (Mediana) en la clasificación de *Fell (1994)* de la Tabla 2.

Tabla 1. Clasificación de tamaños de masas movilizadas según Rodríguez Ortiz et al. (1978).

Tamaño	Volumen (m ³)
Pequeña	1 -50
Moderada	50 - 5x10 ²
Grande	5x10 ² - 5x10 ³
Muy grande	5x10 ³ - 5x10 ⁴
Excepcionalmente grande	>5x10 ⁴

Tabla 2. Clasificación de magnitudes de los movimientos de ladera según Fell (1994).

Magnitud	Descripción	Volumen (m ³)
7	Extremadamente grande	> 5 x 10 ⁶
6	Muy grande	1x10 ⁶ - 5x10 ⁶
5	Grande	25x10 ⁴ - 1x10 ⁶
4	Mediana	5x10 ⁴ - 25x10 ⁴
3	Pequeño	5x10 ³ - 5x10 ⁴
2	Muy pequeño	5x10 ² - 5x10 ³
1	Extremadamente pequeño	<5x10 ²

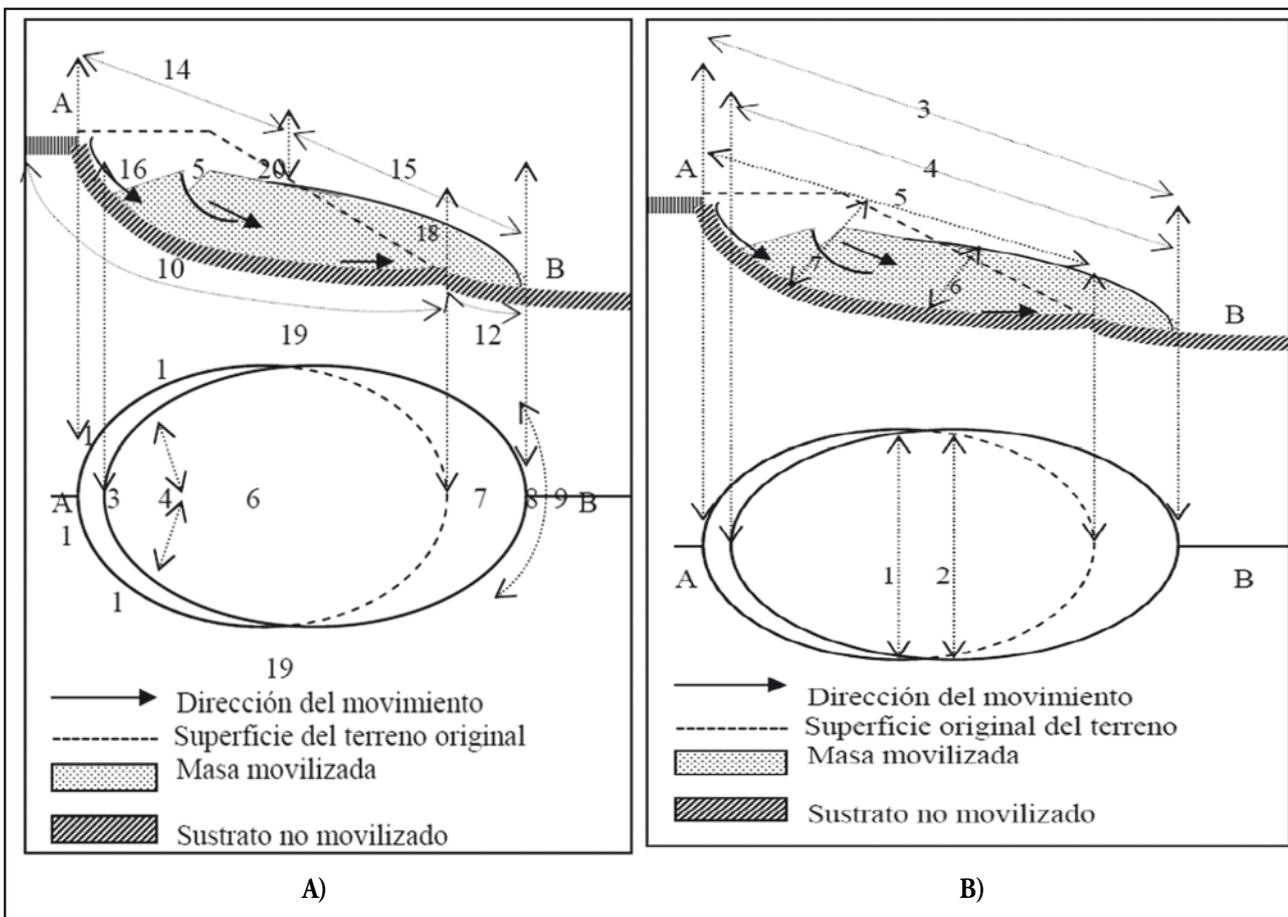


Figura 3. Terminología descriptiva general de los movimientos de ladera, a) terminología del Glosario multilingüe, modificada a partir de WP/WLI (1993a, b); b) terminología de las dimensiones recomendadas en el Glosario multilingüe modificada a partir de WP/WLI (1993a, b) y Cruden and Lefevre (1994).

Formas del relieve asociadas a los movimientos de ladera

La morfología de los movimientos de ladera tiene como principal referencia la terminología descriptiva del "Landslide multilingual glossary" (WP/WLI, 1993b; Cruden and Lefevre, 1994). Los elementos morfológicos fundamentales para la descripción de los movimientos de ladera, de acuerdo con la Figura 3 A y B, se relacionan a continuación.

En la Figura 3A (WP/WLI, 1993a, b y Cruden and Lefevre, 1994) se distinguen los siguientes elementos del movimiento de ladera:

1. Coronación; 2. Escarpe principal; 3. Techo; 4. Cabeza; 5. Escarpe menor; 6. Masa principal; 7. Pie; 8. Punta; 9. Dedo; 10. Superficie de rotura; 11. Dedo de la superficie de rotura; 12. Superficie de separación; 13. Material desplazado; 14. Zona de remonte o agotamiento; 15. Zona de acumulación; 16. Desmonte; 17. Masa desmontada o desplazada; 18. Acumulación; 19. Flanco; 20. Superficie original del terreno.

En la Figura 3B (WP/WLI, 1993a, b; Cruden and Lefevre 1994), se muestran los parámetros o dimensiones más relevantes:

1. Anchura de la masa desplazada W_d . 2. Anchura de la Superficie de Rotura W_r . 3. Longitud total L; 4. Longitud de la masa desplazada L_d ; 5. Longitud de la Superficie de Rotura L_r . 6. Profundidad de la masa desplazada. D_d ; 7. Profundidad de la superficie de rotura D_r .

La velocidad de los movimientos de ladera.

Los tres tipos de rotura antes descritos (Figuras 2 y 3) involucran mecanismos de desplazamiento o propagación de la masa movilizada que permiten rangos variables de velocidades como las que se describen en la Tabla 3. La clasificación de la

Tabla 4 relaciona la velocidad con los tipos de daños que se pueden esperar en los elementos del territorio afectados.

Se ha de entender que estructuras construidas sobre movimientos extremadamente lentos pueden experimentar daños a medio plazo, por lo que se debe controlar su emplazamiento, así como la actividad del movimiento de ladera. En general, las mayores velocidades se alcanzan en avalanchas de hielo, nieve y rocas en alta montaña en masas moderadas o superiores. Las más lentas en suelos, conocidas como velocidades de reptación, se asocian a pequeñas deformaciones en suelos, inducidas por la infiltración del agua y el reajuste volumétrico de las partículas del suelo durante ciclos de helada y deshielo. Suelen ir acompañadas por ciertas formas características como el desarrollo de "terracitas" o laderas escalonadas, además de texturas propias.

Actividad, grado desarrollo, capacidad destructiva y diacronía de los movimientos de ladera.

Desde el punto de vista espacial y temporal el desarrollo de un movimiento de ladera, en las diferentes tipologías, desde su inicio a la finalización, suele producirse en diferentes etapas que pueden ser distinguidas particularmente cuando alcanzan cierta magnitud. Resulta conveniente disponer de criterios que permitan el seguimiento del proceso, tanto en lo referente al desarrollo de la masa movilizada y formas asociadas (grado de desarrollo) como a su actividad (régimen y secuencia de velocidades).

La actividad de los movimientos de ladera

Describe la evolución de la inestabilidad o las etapas de evolución del movimiento desde la aparición precoz de deformaciones en el terreno, la delimitación del escarpe principal y de los escarpes menores, la delimitación de la masa movilizada y su propagación, hasta que se alcanza la estabilización o el agotamiento del proceso (Chacón, 2008).

Tabla 3. Velocidad de los movimientos, modificado a partir de Hansen (1989).

Clases	Velocidad (cm/seg)	otras unidades
Extremadamente rápida	> 300	>10 km/hora
Muy rápida	0.5 - 300	18 m/hora - 10 km/hora
Rápida	0.0017 - 0.5	1.5 m/día - 18 m/hora
Moderada	0.00006 - 0.0017	1.5 m/mes - 1.5 m/día
Lenta	0.000005 - 0.00006	1.5 m/año - 1.5 m/mes
Muy lenta	0.0000001 - 0.000005	0.03 - 1.5 m/año
Extremadamente lenta	< 0.0000001	< 0.03 m/año

Tabla 4. Clasificación de velocidades, ligeramente modificada a partir de la propuesta por la Comisión del inventario mundial de movimientos de ladera de la UNESCO (WP/WLI, 1995) para incluir intervalos de velocidades en varias unidades de medida.

Clase	Descripción	Intervalos (mm/seg)	Otras unidades	Tipos de daños (resumido)
1	Extremadamente rápida	> 5x10 ³	> 5 m/s	Destrucción total de vidas y bienes
2	Muy rápida	50 - 5x10 ³	3 m/min - 5 m/s	Evacuación difícil. Daños irreparables
3	Rápida	0.5 - 50	1.8 m/h - 3 m/min	Evacuación posible. Daños irreparables
4	Moderada	5x10 ⁻³ - 0.5	13 m/mes - 1.8 m/h	Daños intensos a estructuras en la masa
5	Lenta	50x10 ⁻⁶ - 5x10 ⁻³	1.6 m/año - 13 m/mes	Frecuentes daños, reparación costosa
6	Muy lenta	0.5x10 ⁻⁶ - 50x10 ⁻⁶	16 mm/año - 1.6 m/año	Daños escasos y/o reparables
7	Extremadamente lenta	<0.5x10 ⁻⁶	<16 mm/año	Sin daños a estructuras adecuadas

Para la descripción de la actividad de los movimientos de ladera se tienen en cuenta tres tipos de conceptos independientes que permiten analizar la evolución como son los de estado, distribución y estilo (Tablas 5a,b y c, *WP/WLI, 1993a,b*).

El “estado de la actividad” indica si el movimiento es “activo” actualmente, o bien está “suspendido”, cuando ha sido activo en el último o últimos ciclos hidrológicos, pero no actualmente, o “dormido” tras la inexistencia prolongada de movimiento y “abandonado”, cuando desaparece la causa del movimiento, por ejemplo la erosión del pie remite por cambio del cauce del río. El movimiento queda “estabilizado” mediante tratamientos adecuados, o “relicto” si la inactividad se asocia a cambios de condiciones climáticas o geomorfológicas. Un movimiento es “reactivado”, cuando partes de la masa, del escarpe o de la vertiente, se movilizan después de un largo periodo de tiempo de inactividad.

La evolución del estado de actividad se describe proyectando el desplazamiento en unidades de longitud, frente al tiempo transcurrido, durante los diversos estados (*WP/WLI, 1993 a, b*). También se emplea el término “fósil” para referirse a movimientos antiguos recubiertos por sedimentos no deformados.

La “distribución de la actividad”, describe la zona o zonas de la masa, del escarpe, o de la vertiente, en movimiento, “en avance” o “en retroceso”, según se observe el crecimiento de la masa por el pie, o bien el retroceso o remonte del escarpe. El movimiento “se ensancha” cuando se aprecia el aumento lateral de la masa, por uno o ambos escarpes laterales, y cuando se forma un escarpe principal, sin superficie de rotura por el pie, la distribución es “confinada”. Incluye el término “creciente” para

movimientos que aumentan en dos o más direcciones, e indica que la masa puede mostrar “disminución” o simplemente mantenerse “en movimiento” sin patrón especial de distribución (*WP/WLI, 1993 a, b*).

El “estilo de la actividad” indica la contribución de diferentes tipos de movimientos a la evolución del conjunto de masa y escarpes. Es “complejo” cuando sucesivamente actúan al menos dos tipos, y será además “compuesto” si lo hacen simultáneamente. “Múltiple” si se aprecia la acumulación y repetición sucesiva y compartida de escarpes y masas de un determinado tipo de movimiento, o bien “sucesivo” cuando las masas de cada movimiento se desarrollan de manera independiente. Finalmente el estilo es “simple o único”, si masa y escarpe están bien delimitados (*WP/WLI, 1993 a, b*).

La capacidad destructiva o intensidad, de los movimientos de ladera.

Se define como relación entre masa movilizada y velocidad alcanzada, combina dimensiones espaciales y temporales (*Chacón, 2005; Chacón et al., 2006*). La Tabla 6 (*Chacón, 2008*) muestra 15 niveles de intensidad o capacidad destructiva a partir de la propuesta de intensidades de *Cardinali et al., (2002)*. La finalidad de la clasificación es meramente orientativa ya que, evidentemente, los daños que finalmente resultan de la actividad de un movimiento de ladera dependerá de la presencia de elementos del territorio en su curso, aunque la escala indica el incremento de la capacidad destructiva en función del volumen (podría establecerse igualmente en torno a valores de masa) y la velocidad.

Tabla 5. Descripción de la actividad de los movimientos de ladera a) Estado, b) Distribución y c) Estilo. (WP/WLI, 1993a,b)

a) Estado	b) Distribución	c) Estilo
Activo	En avance	Complejo
Reactivado	En ensanche	Compuesto
Suspendido	En retroceso	Múltiple
Inactivo: Dormido	Confinada	Sucesivo
Abandonado	Creciente	Simple o único
Estabilizado	En disminución	
Relicto	En movimiento	

Tabla 6. Clasificación de intensidades de los movimientos de ladera de Cardinali et al., (2002) modificada por Chacón (2008).

M = f(volumen, velocidad)	VELOCIDAD (estimada)		
	Movimiento rápido		Lento
	Caída de rocas	Flujo de derrubios	Deslizamiento
<0,001	DÉBIL (1)		
<0,5	MODERADA (2)		
>0,5-500	ALTA (5)	MODERADA (2)	MODERADA (2)
500-10,000	ALTA (6)	MODERADA (4)	MODERADA (3)
10,000-500,000	MUY ALTA (10)	ALTA (9)	ALTA (7)
>500,000	MUY ALTA (12)	MUY ALTA (11)	ALTA (8)
>>500,000	MUY ALTA (15)	MUY ALTA (14)	MUY ALTA (13)

Tabla 7. Evolución de los movimientos de ladera (Chacón et al, 1996).

FASE	DESARROLLO	ACTIVIDAD	CONSECUENCIAS
Preparatoria o Incipiente	Poco apreciable. Cambios en manantiales, Fuentes, abombamientos Locales, grietas de tracción en cabecera. Duración imprevisible	Activo, velocidad lenta a rápida. Intermitente o permanente. Puede ser inactivo largo tiempo antes de reactivarse	Daños lineales por las grietas en estructuras afectadas. Roturas de estructuras, tuberías e infraestructuras afectadas por grietas de tracción. Alto potencial según magnitud de la masa y distancia a zona de reposo.
Inicio	Apreciable: ruidos, abombamientos, extensión lateral de las grietas que delimitan desde coronación al pie. Hundimientos locales. Escarpe perimetral, destacado en cabecera y escarpes menores en la masa. Inicio del frente de acumulación de depósitos. Duración, progresión y continuidad variables	Activo, velocidad muy variable y no siempre continua. Puede detenerse y permanecer inactivo largo tiempo antes de la reactivación o permanecer dormido indefinidamente.	Daños mayores en zonas del borde de la masa y algunos sobre el interior a lo largo de escarpes menores, frente y grietas transversales o longitudinales. Potencial de daños muy alto según magnitud de la masa y distancia a zona de reposo
Desarrollo	Despliegue del escarpe de cabecera y avance de la masa ladera abajo. Basculamiento hacia adentro del talud visible (rotacional) o no (traslacional) en cabecera de la masa y elevación hacia el pie. Duración, progresión, continuidad, variables.	Activo, velocidad muy variable y no siempre continua. Puede detenerse y permanecer inactivo largo tiempo antes de la reactivación o permanecer dormido indefinidamente.	Se extienden a toda la masa movilizada y a las zonas situadas bajo el frente y en la trayectoria de la masa. Potencial destructivo limitado a la trayectoria posible hasta la zona de reposo y la posible extensión ladera arriba por remonte de la cabecera.
Avanzado	Desarrollo del escarpe principal y despliegue de escarpes menores y de la masa ladera abajo. Posible remonte del escarpe principal ladera arriba. Duración, progresión y continuidad variables	Activo, velocidad muy variable y no siempre continua. Puede detenerse y permanecer inactivo largo tiempo antes de la reactivación o permanecer dormido indefinidamente.	Se agravan en toda la masa movilizada y en las zonas situadas bajo el frente y en la trayectoria de la masa. Potencial destructivo limitado a la trayectoria posible hasta la zona de reposos y la posible extensión ladera arriba por remonte de la cabecera.
Agotamiento	Masa acumulada en zona de reposo y reducción de la pendiente media. Derrumbe de bloques en escarpes menores y cabecera.	Poco activo. Reactivación posible por obras civiles o por erosión o excavación de ríos, terremotos o explosiones.	Peligrosidad para transeúntes por derrumbes en toda la masa, depósitos y escarpes. Potencial menor salvo reactivaciones parciales por obras, terremotos, erosión, inundaciones o explosiones. Reajustes parciales en los bloques y movimientos verticales asociados.

El grado de desarrollo de los movimientos de ladera

El concepto describe las diferentes fases que se suceden desde el planteamiento de la condición inestable y su manifestación en la vertiente hasta la concreción del movimiento y el proceso de movilización hasta el agotamiento final o su estabilización (Tabla 7, *Chacón et al., 1996*).

Aunque en la práctica la mayor parte de los movimientos de ladera solamente alcanzan un determinado grado de desarrollo y quedan detenidos sin avanzar más, algunos, de cierta magnitud, permiten distinguir todas las fases que se describen en la Tabla 7. En ella se incluyen también los daños potenciales asociables a cada fase, así como el cortejo de forma o cambios que los caracteriza.

En cuanto al nivel de daños producido por los movimientos de ladera, se materializa desde la fase preparatoria con las primeras deformaciones o grietas de tracción cuando elementos rígidos tales como estructuras de edificación, obra civil o infraestructuras se disponen sobre el terreno incurso en el proceso de inestabilidad. En el caso de las zonas urbanizadas los daños sobre las viviendas pueden ser graves ya desde la fase inicial.

Son frecuentes los procesos de inestabilidad que se detienen en una fase preparatoria o apenas inicial sin delimitación de la masa, y sin que se aprecie progreso posterior.

Diacronía de los movimientos de ladera.

El término “*diacronía*”, formado por el prefijo griego *dia-* a través de- y la palabra griega *Khrónos* -tiempo-, significa “el desarrollo o sucesión de hechos a través del tiempo”. El término opuesto es *sincronía*, referido a la observación de cualquier fenómeno -cultural o lingüístico- “tal como sucede en un momento dado de su evolución”. Se emplea en lingüística, historiografía o antropología, con el sentido indicado, para estudiar la evolución de las formas de comunicación verbal, los procesos históricos o la evolución antropológica a través del tiempo (*Chacón, 2008*).

Para las ciencias de la tierra, el término *diacronía* está vinculado al de transgresión estratigráfica o sedimentaria.

De hecho se define como “*diacrona*” a cualquier formación estratigráfica o unidad rocosa que varía en edad para áreas diferentes, o que corta las isócronas o zonas biostratigráficas, es decir son “*diacronas*” las formaciones transgresivas en el tiempo.

Los movimientos de ladera, por su propia naturaleza, inducen *diacronía* cuando cambian la posición de una masa de terreno en el espacio y el tiempo durante la etapa de propagación. Con frecuencia son casi instantáneos, monocrónicos, pero también se propagan durante horas, años o siglos y así alcanzan un desarrollo diacrónico. La identificación en el tiempo de la edad de inicio, en una escala temporal de cuatro intervalos, y de la duración, de su propagación o grado, en doce intervalos, entre los casi instantáneos y los que duran más de 5000 años, se presenta en la Tabla 8, (*Chacón, 2008*). Aunque, desde el punto de vista espacial y temporal, la *diacronía* de los movimientos de ladera es variable, se identifican dos grandes grupos: *movimientos monocrónicos* y *movimientos diacrónicos* (*Chacón, 2008*).

Movimientos monocrónicos son los desarrollados en un intervalo temporal y espacial discreto y definido, interrumpiendo después la movilidad con carácter definitivo. Corresponden a movimientos de todos los tamaños, especialmente los de volumen pequeño y moderado, disminuyendo la frecuencia con el aumento de volumen. Una vez producido el movimiento, la masa no está en disposición de mantener desplazamientos posteriores generalmente porque lo impide la posición topográfica alcanzada en la base de la vertiente.

Movimientos diacrónicos son los que se desarrollan con una sucesión de intervalos temporales que se prolongan en el tiempo, con duración entre semanas y miles de años, alternando periodos de actividad variable, sin que, frecuentemente, sea posible establecer si la movilidad ha finalizado con carácter definitivo. Implican la persistencia de la inestabilidad gravitatoria a lo largo de un considerable intervalo de tiempo, sin que sean desmontados por la erosión o fijados por la vegetación, por lo que incluyen movimientos de tamaños “grande” a “excepcionalmente grande”, en los que las masas pueden propagarse a lo largo de vertientes con suficiente longitud disponible para la propagación antes de alcanzar la base del valle o el cauce fluvial.

Tabla 8. Edad y Grado de Diacronía de los movimientos de ladera (Chacón, 2008; Chacón et al., 2010).

Escala de Edad:

Contemporánea (1900-actualidad); Histórica (0- 1900); Hiperhistórica (< 0 AC).

Grado de Diacronía:

Grado	Diacronía(años)	Equivalencia	Ejemplos
I	0 - 10 ⁻⁷	0 - 3 s	Caídas y desprendimientos de rocas o suelos
II	10 ⁻⁷ - 10 ⁻⁶	3s - 3m	Deslizamiento de rocas de Frank (Canadá, 1903)
III	10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁴	3 - 53m	Avalancha de Huascarán (Perú, 1970)
IV	10 ⁻⁴ - 10 ⁻²	53m-4d	Flujos de barro de Monachil (España, 1924)
V	10 ⁻² - 10 ⁻¹	4 - 36 d	Flujo de Olivares (España, 1986)
VI	10 ⁻¹ - 10 ⁰	36d - 1 año	Flujo de Riogordo (España, 1971)
VII	10 ⁰ - 10 ¹	1 - 10 años	Deslizamiento de Torvizcón (España, 1996)
VIII	10 ¹ - 10 ²	10 - 100 años	Deslizamiento de Almegíjar (España, 1996)
IX	10 ² - 10 ³	100 - 1000 años	La Grieta de Benamejí (España, 1730-2001)
X	10 ³ - 2x10 ³	1000 - 2000 años	Deslizamiento-flujo de Slumgullion (USA)
XI	2x10 ³ - 5x10 ³	2000 - 5000 años	Deslizamiento-flujo de Man Tor (UK)
XII	> 5x10 ³	> 5000 años	Rincon Mountain Landslide (USA)

Los movimientos *monocrónicos* engloban a la mayor parte de los movimientos de ladera y recorren un determinado itinerario entre el escarpe de salida y la posición de reposo, en un plazo temporal limitado entre segundos y días, sin que se aprecie o, frecuentemente, no sea posible esperar un movimiento posterior de la masa, independientemente de que otras nuevas masas sean suministradas por el remonte de la inestabilidad sobre el escarpe de salida. No aparecen encajados en el relieve como elementos dinámicos permanentes, sino que modifican el relieve inicialmente para ser sometidos después, como elementos pasivos, a los procesos del modelado característicos de la región.

El tiempo de desarrollo de los movimientos *monocrónicos*, su magnitud o tamaño son variables, si bien se desencadenan en un determinado intervalo temporal, entre segundos y excepcionalmente meses, antes de interrumpir definitivamente su evolución dinámica. Se asocian a los valores inferiores de la escala de tamaños observable y, entre ellos predominan los movimientos superficiales, es decir con espesores que no superan los diez metros. Sin embargo sus consecuencias pueden ser muy elevadas, especialmente cuando afectan a zonas urbanas densamente pobladas en climas lluviosos.

Los movimientos *diacrónicos* determinan en el relieve condiciones de inestabilidad que se prolongan durante centenares o miles de años, al involucrar masas de tamaño “grande” a “excepcionalmente grande”, de materiales suficientemente coherentes para no disgregarse a corto plazo por efecto de la erosión, no ser fijadas en su posición topográfica por el crecimiento de la vegetación y, en consecuencia, mantener la búsqueda del equilibrio a lo largo del tiempo mediante formas sucesivas del relieve en periodos activos continuos, discontinuos y con velocidades igualmente variables. Generalmente, por lo tanto, se trata de movimientos muy lentos en macizos rocosos o en masas de suelos en volúmenes excepcionalmente grandes, que se mantienen bajo condiciones de humedad que permiten la persistencia en el tiempo de la consistencia plástica de la masa.

A menudo la dinámica de un *movimiento diacrónico* evoluciona dentro del rango de velocidades lentas a extremadamente lentas, por lo que la observación directa en plazos temporales de años puede no reflejar con claridad el movimiento en curso. Sin embargo, el empleo de técnicas actuales de teledetección mediante interferometría diferencial de imágenes radar (*DInSAR*, Fernández et al., 2009) permite medir la velocidad del movimiento en términos de hundimiento subvertical (en el sentido de la incidencia de las emisiones del sensor de radar) en magnitudes de milímetros por año.

En cualquier caso, el *grado de diacronía* o duración de los movimientos de ladera es muy variable. La Tabla 8 (Chacón, 2008; Chacón et al., 2010) propone un sistema de clasificación de la evolución temporal de los movimientos de ladera basada en la definición de la *escala de edad* y el *grado de diacronía* de los procesos de movilización de vertientes.

La *escala de edad* del inicio de los movimientos, se refiere a la fecha precisa o aproximada, entorno temporal, en que se inició el movimiento.

La *escala contemporánea* incluye a los que, de acuerdo con la documentación disponible, se desencadenaron en los siglos XX y XXI. Son los movimientos que suceden en la actualidad, así como todos los que han sucedido o han mantenido actividad en los últimos cien años. En general son los movimientos mejor documentados estudios, informes gráficos o descriptivos,

o memorias de diverso género. La información suele referirse a las fases del inicio y comienzo de la propagación o desarrollo del movimiento, ya que generalmente las fases previas, de preparación precursoras del inicio, pasan desapercibidas en la mayoría de los casos.

La *escala histórica* incluye los movimientos que pueden ser documentados a partir de técnicas historiográficas convencionales, dentro del periodo de los últimos 2.000 años, a través de documentos, evidencias directas o informes, dataciones radiométricas, estudio de líquenes o dendrocronología.

La *escala hiper-histórica* engloba el periodo anterior, con edades superiores a 2.000 años, establecidas a partir de evidencias geológicas o geomorfológicas, arqueológicas o dataciones radiométricas.

Con frecuencia no es posible disponer de un dato geocronológico o histórico real que muestre claramente la fecha o edad de inicio de un movimiento de ladera dado. Sin embargo sí puede ser posible determinar una edad aproximada o la época en la cual se debió producir a partir de datos referentes al desarrollo urbano o a la edad de las construcciones del entorno, o a informaciones procedentes de los propietarios o cronistas de la zona. En estos casos, aunque no se pueda concretar la edad del movimiento, si será posible atribuir el movimiento a uno de los periodos de edad propuestos en la Tabla 8.

El *grado de diacronía* indica la duración del movimiento de ladera, desde la fase preparatoria o inicio a su estado final o la actualidad.

Los movimientos *monocrónicos* tienen una duración de segundos o minutos, antes de alcanzar una configuración definitiva, y se asocian a los grados I a II, y eventualmente III.

Los movimientos *diacrónicos* corresponden a los grados III a XII y requieren un análisis de actividad y grado de desarrollo a lo largo del tiempo para detallar la diacronía del proceso.

El método propuesto admite la aplicación prospectiva, basada en el conocimiento de los procesos característicos de cada región y de los mecanismos de rotura y propagación que involucran. Así, por ejemplo, los movimientos de ladera de volumen grande a excepcional del tipo deslizamientos-flujo de margas y arcillas, característicos de la Cordillera Bética en la *escala temporal histórica o contemporánea*, se asocian al grado de *diacronía IV o V*, según la plasticidad del material y la condición de humedad y pendiente. Los que sucedan con características similares en el futuro inmediato, se consideran asimilables a tales casos y presentarán similares comportamientos.

El flujo de Olivares (Chacón, 1988; Chacón y López Galindo, 1988; Chacón, 2008)

En 1986 una masa de margas del Cretácico fluyó en el barranco del Hundidero de Olivares (Granada, España) tras un episodio inicial de deslizamiento (Figura 4A). La masa incorporó margas beige claras con pasadas de margas verdes a negras en las que entre el 60 y el 80% del agregado mineral son esmectitas expansivas muy ricas en Fe y Mg, así como coluviones de ladera, en la parte superior, y restos de áridos de dolomía acumulados por una cantera existente en un borde lateral (Figura 4A).

La fase activa del movimiento perduró 15 días, como se muestra en la Figura 5 A y B, gracias a las intervenciones para drenar la masa mediante catas directas excavadas en los flancos de la lengua en su parte inferior por encima del Río Velillos que

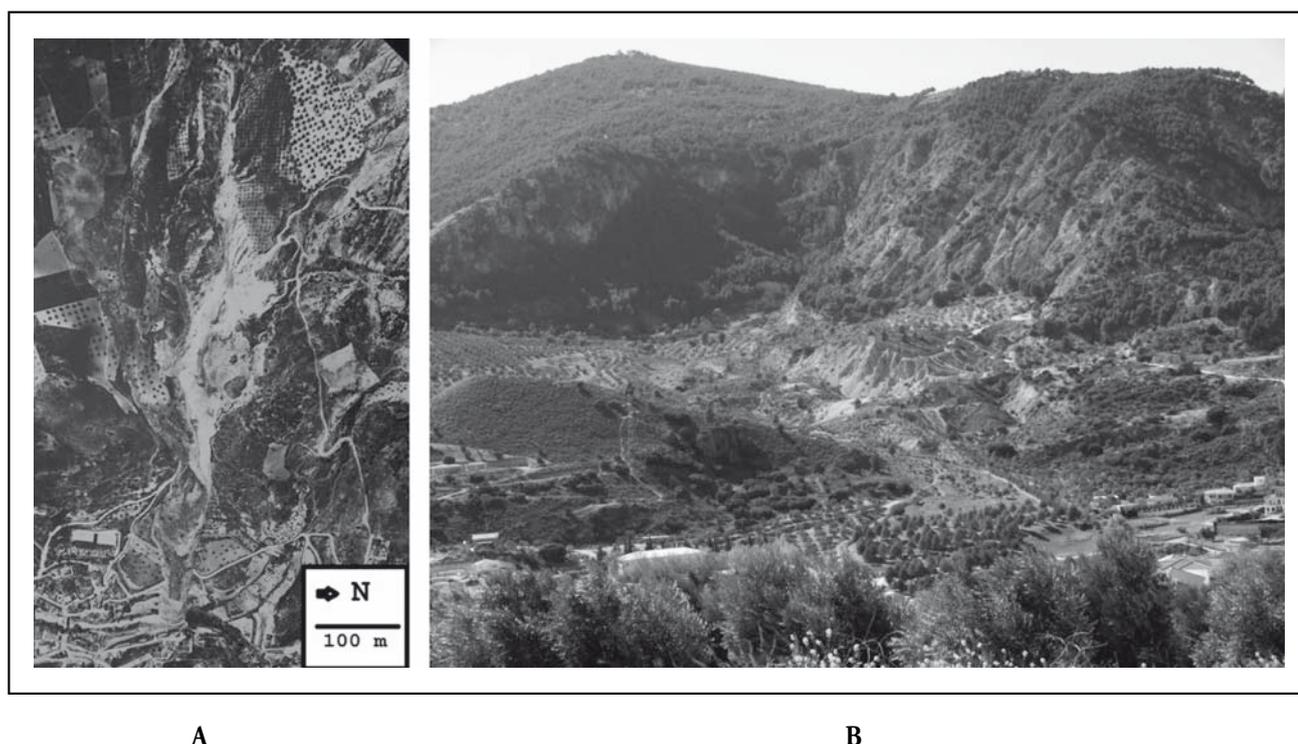


Figura 4 A). Vista aérea vertical del flujo de Olivares en Junio de 1986. Se aprecia el estado final del movimiento de ladera al finalizar su actividad. Se distinguen bien la lengua principal orientada al Río Velillos, los lóbulos laterales, las líneas de fluencia de la masa, todo ello al pie del estrechamiento del barranco del Hundidero. Además se aprecia el escarpe principal desde el sector de Los Bujeos, a la izquierda cubierto de olivar, hasta el pie de la Sierra de Moclín, y también el escarpe lateral ceñido por la cantera de áridos de dolomías triásicas. La masa del flujo, margosa con pasadas ricas en esmectitas expansivas, de edad Cretácica, se distingue cubierta por el olivar. La masa se aproximó a las viviendas y colegio público de Los Olivares, un anejo de Moclín (Granada). **B) Vista actual del Barranco del Hundidero bajo la Sierra de Moclín y el anejo de Los Olivares de dicha localidad.** Se aprecia la lengua sobre el Río Velillos ahora recubierta de pinar para fijar los pequeños movimientos de la masa, derivados de la expansividad de las margas, y los escarpes laterales erosionados de la antigua cantera de áridos así como las cicatrices de los escarpes al pie de la Sierra y en Los Bujeos.

permitieron la salida de importantes caudales de agua retenidos por la masa. Después declinó la velocidad de propagación de la lengua de tierra y cinco días después se detuvo el movimiento cuando ocupó el lecho del río. Como resultado del flujo de Olivares el perfil del barranco del Hundidero se modificó sensiblemente (Figura 5C). Posteriormente se practicó un movimiento de tierras general mediante excavadoras y se eliminó un volumen importante de la masa que fue transportado para rellenar depresiones en zonas próximas. Además se instaló una escollera de bloques en el lecho del río una vez retirada parte de la masa que ocupaba el lecho, para facilitar el drenaje y la circulación del agua. El aspecto actual del sector se muestra en la Figura 4B.

La descripción integrada de la actividad y el desarrollo diacrónico del flujo de Olivares, aplicando los conceptos antes expuestos, y reuniendo la información morfológica, se resume en los siguientes parámetros (Tabla 9; Figura 4A, Figura 5 A,B):

- Edad contemporánea.** Se inició el 12 de Abril de 1986 y finalizó el día 27 del mismo mes;
- Diacronía Grado V:** 15 días de actividad (entre 4 y 36 días);
- Volumen:** Según Fell (1994) Muy grande: alrededor de 3.000.000 m³;
- Superficie afectada:** 172.260 m²;

- Desnivel de la zona movilizada:** 635 m;
- Desnivel de la masa:** 145 m;
- Anchura del escarpe principal:** 700 m;
- Longitud de la zona movilizada:** 810 m;
- Perímetro de la zona movilizada:** 3.000 m;
- Espesor medio de la masa:** 45 m;
- Espesor medio de la lengua de flujo:** 8 m;
- Velocidad:** Moderada a extremadamente lenta (Figura 5B);
- Capacidad destructiva máxima Alta (7);**
- Actividad:** descrita en la Tabla 9 y Figura 5A;
- Grado de desarrollo:** Desde incipiente hasta avanzado (Tabla 9, Figura 5A).

Factores determinantes y factores activadores

Las condiciones de estabilidad de los terrenos, en el análisis espacial que se realiza en la identificación de zonas inestables, se suelen expresar en términos de factores determinantes o condicionantes de la estabilidad. Tales factores incluyen a todos los aspectos del medio físico que tienen que ver con la configuración integral de los terrenos y pueden ser analizados en un Sistema de Información Geográfica.

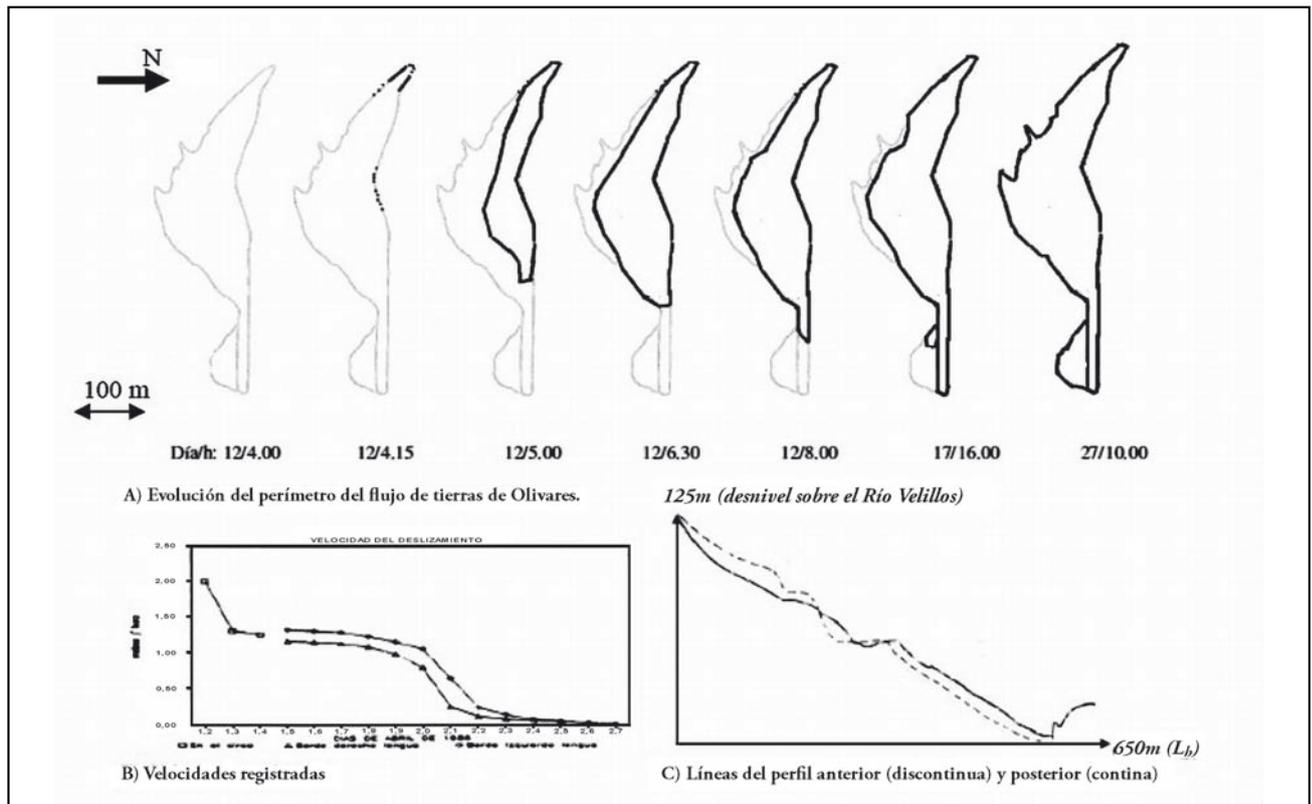


Figura 5. En línea negra desarrollo progresivo del perímetro de la zona movilizada desde el inicio al final y en línea gris traza del perímetro final como referencia. **A) Evolución del flujo desde su inicio**, hacia las 4 de la madrugada del día 12 de Abril de 1986 a su detención final, en la mañana del 27 de Abril. **B) Velocidades registradas en el movimiento de la lengua de flujo**, partes derecha e izquierda. **C) Cambio del perfil longitudinal de la vertiente** desde la posición inicial a la final. (Chacón, 1988; Chacón y López Galindo, 1988; Chacón y Rodríguez, 1988).

Tabla 9. Actividad y desarrollo del flujo de Olivares (Moclin, 1986) (WP/WLI, 1993; Chacón 198); Chacón y López Galindo, 1988; Chacón y Rodríguez, 1988).

ACTIVIDAD	12/4 4.15h	12/4 6.00h	12/4 6.30h	12/4 8.00h	17/4 16.00h	27/4 10.00h
Estado	Activo moderado	Activo moderado	Activo moderado	Activo moderado	Activo lento	Activo lento: suspendido
Distribución	Avance y ensanche creciente	Avance y ensanche creciente	Avance y ensanche creciente con lengua de flujo	Avance y ensanche creciente con lengua de flujo	Avance y ensanche menos creciente con lenguas de flujo	Avance y ensanche con lenguas de flujo
Estilo	Complejo	múltiple	múltiple	múltiple	múltiple	múltiple
Desarrollo	Inicio del escarpe y rotación puntual. Se inicia la fluencia de la masa	Se extiende la fluencia de la masa al Bco Hundidero y sector Bujeos	Se acumula en base del barranco. Inicio lengua desde la base del barranco al río Velillos	Avance lengua hacia el río Velillos	Obstrucción río Velillos e inicio de otras lenguas laterales menores y oblicuas	Avance lenguas laterales menores hasta la detención del flujo.

Como en la escala de los estudios regionales, 1:200.000 a 1:10.000, las propiedades geotécnicas no pueden ser consideradas como variables significativas, ya que su variabilidad exige el uso de escalas muy detalladas o incluso de obra, a través de factores del terreno como las unidades litológicas, la disposición geométrica de las discontinuidades o las isoyetas de precipitaciones, de manera indirecta, se incorporan aspectos relativos a la resistencia de los terrenos. Sin embargo la utilidad de los factores determinantes se comprueba al observar el grado estadístico de ajuste entre los movimientos de ladera y los mapas temáticos que representan los diferentes factores. En cualquier caso, los factores determinantes de las condiciones de estabilidad son característicos de cada dominio geológico en cualquier región de la corteza y, a modo de ejemplos, se describirán algunos casos típicos de la Cordillera Bética del Sur de España.

Si una vertiente presenta condiciones de inestabilidad expresada por una significativa asociación espacial entre una determinada combinación de factores determinantes y el inventario de movimientos, sin embargo el inicio de movimientos de ladera en las zonas consideradas inestables requiere de un factor activador o desencadenante del movimiento. Se trata de factores que ejercen una acción sobre el terreno que tiende bien a disminuir la resistencia (papel del agua) o bien a aumentar las cargas (terremotos, agua de saturación, sobrecargas por rellenos, etc..) o bien a modificar las relaciones entre cargas y resistencia alterando la geometría de la vertiente, como son las excavaciones rápidas de las vertientes por la acción de las aguas de los ríos o del oleaje (descalce en el pie de la ladera), excavaciones durante obras, o el alcance de situaciones límite en el balance entre elevación continental y la excavación de los ríos. En general, por lo tanto, los factores activadores de la inestabilidad se pueden agrupar en:

- 1) aquellos que producen incrementos de esfuerzos: aumento de la densidad del terreno con el incremento de humedad, cargas externas añadidas por edificios, aumento de la pendiente sea por erosión natural o por excavaciones y la aplicación de cargas cíclicas por explosiones o terremotos
- 2) los que producen la reducción de la resistencia del terreno: aumento de la condición de humedad, aumento de la presión de poros, cargas cíclicas sísmicas o de

explosiones, acción del hielo y el deshielo, pérdida de material cementante, procesos de meteorización, remoldeo de arcillas tixotrópicas o extrasensitivas, etc..

La acción de la lluvia constituye el agente activador más regular en la región. En el valle del Monachil (Granada), donde los deslizamientos afectan a las series neógenas de la Depresión de Granada, cerca del contacto tectónico con las series metamórficas del Dominio Bético, los dos principales eventos de movimientos de ladera históricos ocurridos en 1924 y 1962 sucedieron bajo lluvias medias anuales superiores a 700 mm mientras que la media anual es de 400 mm (Sánchez-Navarro, 1924; Mateos y Ferrer, 1994; Chacón et al., 2007). Durante las lluvias del invierno de 1996 y la primavera de 1997 se alcanzaron máximos históricos en buena parte de la Alpujarra de Granada, Málaga y Almería y se produjeron cuantiosos daños en la red viaria por los movimientos de ladera que, en general, se asociaron más a la susceptibilidad de los terrenos que a la categoría de la calzada, ya que fueron dañadas carreteras locales, regionales y nacionales. Se establecieron nuevos máximos históricos en tormentas de hasta 400 mm/día que superaron los umbrales de estabilidad de vertientes en las que recubrimientos coluviales y macizos rocosos de esquistos y filitas alteradas, unidades muy susceptibles, se vieron afectados ampliamente por deslizamientos, coladas de barro y derrubios, desprendimientos, colapsos y movimientos complejos combinados. Sin embargo no se produjo ningún movimiento de ladera de magnitud mediana o superior. Se puso de manifiesto, en todo caso, que la susceptibilidad de los terrenos no se ve sustancialmente corregida por la propia obra de la red viaria, de modo que los riesgos sobre carreteras se mantienen en función de la susceptibilidad de los terrenos subyacentes (Lamas et al., 1997; Irigaray et al., 2000; Chacón et al., 2007).

La actividad sísmica de la región constituye el otro factor activador fundamental. Las deformaciones dinámicas generadas por las ondas sísmicas pueden conducir a la licuefacción de suelos limosos saturados y poco compactos, al remoldeo de arcillas sensitivas y al colapso de arenas, y pueden, igualmente, reducir el factor de seguridad de vertientes que, en condiciones estáticas, tendrían un coeficiente superior. En consecuencia las zonas de mayor susceptibilidad son las que potencialmente podrían también experimentar movilizaciones abundantes en condiciones dinámicas.



Figura 6. Vista actual del flujo de Güevéjar (Granada). En el borde derecho de la imagen, inmediatamente después de las últimas viviendas de Güevéjar (875 m) y a una altura ligeramente superior, se aprecia el escarpe de los flujos sucedidos en 1755 y 1884, durante dos terremotos mayores del S de España; se extiende unos 1.200 metros en dirección norte hacia la localidad de Cogollos de la Vega (1.009 m) situada bajo el Peñón de la Mata (1.670 m), uno de los picos de la Sierra Arana (2.027 m), que se extiende hacia el NE desde estas localidades, compuesta por materiales del Dominio Subbético interno, con calizas y dolomías de edad jurásica y margas de edad cretácica.

Un caso histórico es el movimiento de ladera de Güevéjar (Granada) que destruyó el segundo emplazamiento de esa localidad durante el terremoto de Andalucía de 25 de Diciembre de 1884 (Intensidad IX), ya que el primero había sido destruido anteriormente también por otro movimiento de ladera sobre la misma vertiente, durante el terremoto de 1 de Noviembre de 1755, también conocido como el terremoto de Lisboa, con epicentro al SW de la Península, en la dorsal atlántica (Arango *et al.*, 1995; Sanz, 1992; Chacón *et al.*, 1988). El movimiento de flujo se produjo en la serie del Neógeno de la Depresión de Granada que culminan los travertinos del Tortoniense, cuyos

bloques fueron transportados sobre la masa de flujo de la vertiente. El escarpe, visible inmediatamente junto a Güevéjar, se excava en sedimentos de la Depresión Neógena de Granada, una serie de margas y limos coronados por travertinos que fueron desmontados por los movimientos de ladera, restando un pequeño promontorio (Cerro del Castillejo de Nívar) sobre el escarpe en la parte central derecha del mismo. La masa de los flujos se muestra cubierta de cultivos de olivar y se extiende hasta los escarpes del río Bermejo excavado en la masa después de ser recubierto por la misma, y visible en el extremo inferior izquierdo de la panorámica. (Figura 6).

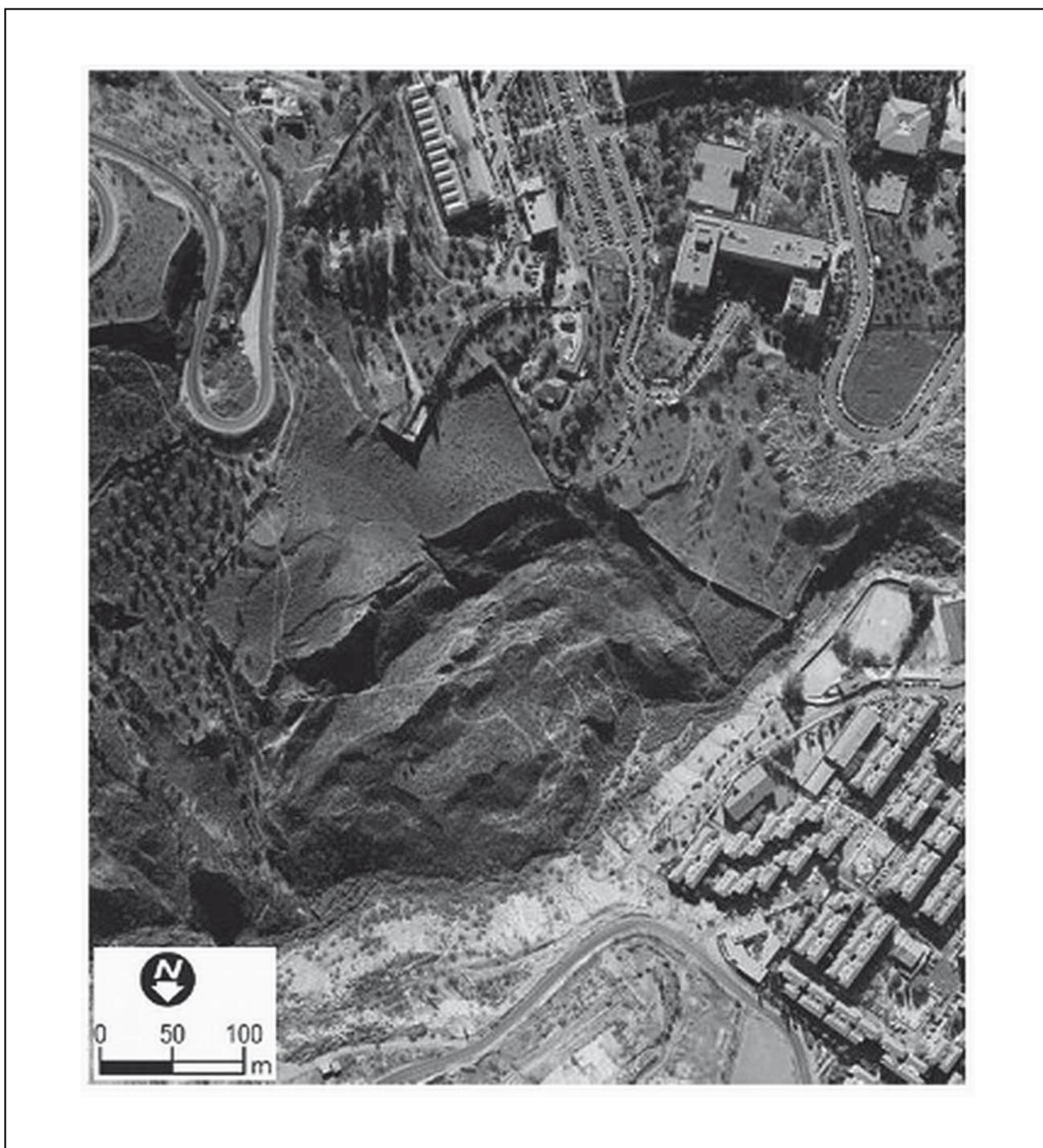


Figura 7. Imagen LiDAR del borde Norte de la ciudad de Granada (arriba izquierda), vista aérea del sector (arriba derecha) entre el Campus de Cartuja y el barrio de Casería de Montijo. (Chacón *et al.*, 2012; Constanzo *et al.*, 2012).

Otro caso conocido, de movimiento de ladera activado por la acción sísmica y las abundantes lluvias, es el deslizamiento planar del Río Beiro en el borde Norte del Campus de Cartuja, en la ciudad de Granada (Figura 7). Después de haber causado varios muertos al destruir una vivienda construida bajo la masa durante las lluvias de 1940, (Fuente Instituto Andaluz de Geofísica), el jueves 19 de Abril de 1956, volvió a causar nuevas víctimas que se asocian también al terremoto de Atarfe-Albolote, un seísmo local de consecuencias destructivas especialmente en la zona epicentral situado inmediatamente al norte de la ciudad de Granada. El seísmo tuvo sus coordenadas epicentrales a 37°26' N, 3°73' W, profundidad 6±3 km, magnitud 5,0 e intensidad VIII en una zona coincidente con ambas localidades (Fuente Instituto Andaluz de Geofísica), y fue seguido por intensas lluvias durante el viernes y sábado siguientes. Ha sido el último terremoto destructivo registrado en la ciudad de Granada.

El terremoto produjo la apertura de grietas de tracción en la margen izquierda del río Beiro, a escasos kilómetros de distancia y en el borde Norte de la ciudad de Granada, por encima de algunas de las cuevas existentes en la zona y las lluvias que se registraron durante las fechas inmediatamente posteriores al terremoto, se ocuparon de extender las grietas y movilizar una enorme masa que afectaría trágicamente a una de las cuevas en las que murieron sepultados un matrimonio y tres de sus hijos. Otras cuevas vecinas sufrieron igualmente daños y fueron desalojadas por lo que unos 40 vecinos quedaron sin viviendas. Indicó la prensa local *“una gran grieta de unos 50 metros de altura junto a las tapias de Cartuja, unos 600 metros cauce arriba del puente del mismo nombre sobre el camino de Alfácar. La lluvia hizo lo demás.”* En la actualidad el deslizamiento se identifica con claridad en el relieve del sector (Figura 7).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La identificación y descripción de los movimientos de ladera es la base esencial para una adecuada corrección o estabilización de los terrenos colindantes o afectados, así como para la previsión de la evolución y de las consecuencias para los elementos del territorio, bienes y personas. Los errores en la identificación y la descripción conducen, cuando menos, al diseño de obras de contención o corrección inútiles, cuando no se comprende bien el mecanismo de rotura y propagación, la magnitud, la velocidad y la evolución diacrónica que el proceso de inestabilidad va a desarrollar.

Ocurre así cuando se pretende contener un movimiento de ladera mediante elementos rígidos que no están dimensionados para las cargas o esfuerzos que la masa en movimiento va a desarrollar o bien, cuando no se considera el carácter plástico de la masa y las presiones que puede desarrollar sobre los sistemas de drenaje ni son adecuados para soportar las deformaciones correspondientes o bien cuando no se tienen en cuenta las condiciones de humedad de la masa y las necesidades que ello plantea para el drenaje posterior.

Por otra parte, un porcentaje mayoritario de los movimientos de ladera que se aprecian en el relieve son superficiales y se producen asociados a periodos de lluvias o a eventos sísmicos, e independientemente de los daños que produzcan, que pueden ser muy elevados, finalizan su actividad en grados de diacronía muy limitados, por lo que no se constituyen como anomalías gravitatorias a largo plazo como los grandes movimientos de ladera, menos frecuentes que los anteriores, y que se asocian a relieves pronunciados, y mantienen la actividad en grados de diacronía muy prolongados en el tiempo.

Mientras que los movimientos de carácter monocrónico se repiten en cada crisis de lluvias o evento sísmico en las zonas inestables de las vertientes de la región, los movimientos diacrónicos se mantienen activos, con fluctuaciones en la velocidad registrada a lo largo del tiempo, por lo que deben ser identificados e incorporados a los mapas que identifican las zonas geotécnicas más desfavorables de la región, junto con los terrenos inestables. De ese modo, los terrenos inestables, en los que se repiten movimientos superficiales monocrónicos con frecuencia, pueden ser tratados mediante obras de ingeniería para garantizar la estabilidad de zonas de actuación concretas, mientras que los movimientos diacrónicos son mucho más difíciles de estabilizar, frecuentemente su magnitud no permite abordar dicha tarea, por lo que su conocimiento es fundamental para monitorizar la masa y los escarpes y obtener la información necesaria para el seguimiento y la previsión de sus consecuencias.

Desde el punto de vista geomorfológico, la generación y distribución de los movimientos monocrónicos y diacrónicos, son característicos de cada cordillera y ambiente geológico, de manera que su conocimiento detallado ofrece pautas de gran interés para comprender la evolución del relieve y su progresión posterior.

Las técnicas de teledetección actuales, DInSAR, SAR, Laser escáner, etc, permiten el monitoreo detallado y el seguimiento de la evolución de los movimientos de ladera, lo que se puede contrastar con datos procedentes de la instrumentación directa en sondeos o en escarpes, para el seguimiento detallado del proceso de inestabilidad.

La disponibilidad de metodologías adecuadas para la elaboración de mapas previsores de movimientos de ladera: mapas de susceptibilidad, peligrosidad y riesgo (Chacón et al., 2006; Fell et al, 2008) y los métodos, conceptos y técnicas disponibles para describir, clasificar y medir los diferentes parámetros de los movimientos de ladera y de su actividad y diacronía, constituyen avances que se han materializado en la última década. Lamentablemente, con frecuencia, no se incorporan adecuadamente al planeamiento urbanístico o a los estudios previos de las grandes obras civiles o de edificación, con las costosas y dolorosas consecuencias que ponen de manifiesto numerosos desastres que suceden en el mundo actual. Ello, a pesar de que las regulaciones oficiales en buena parte de los países afectados permitiría la exigencia de que los estudios de condiciones de estabilidad y exposición a riesgos por movimientos de ladera, y otros fenómenos naturales, se tuvieran en cuenta para minimizar sus consecuencias.

La descripción de los movimientos de ladera dispone en la actualidad de criterios y parámetros, como los descritos en los apartados anteriores, que permiten una definición precisa de sus características más significativas para los informes geotécnicos, la evaluación de riesgos y las investigaciones especializadas.

AGRADECIMIENTOS

Los resultados de investigación citados con participación del autor fueron desarrollados, desde los años 90, en el Grupo de Investigaciones Medioambientales: Riesgos Geológicos e Ingeniería del Terreno, RMN 121 financiado por el Plan Andaluz de Investigación, Junta de Andalucía, España. El autor agradece vivamente la invitación del Director de la revista D. Norberto Jorge Bejerman a contribuir con el presente artículo.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ARANGO, J.R.; BLÁZQUEZ, R.; CHACÓN, J. AND LÓPEZ CASADO, C. (1995).
Soil Liquefaction Potential Induced by the Andalusian Earthquake of 25 December 1884.
Natural Hazards, 12: 1-17. Kluwer Academic Publishers. Netherlands
- CARDINALI, M.; REICHENBACH, P.; GUZZETTI, F.; ARDIZZONE, F.; ANTONINI, G.; GALLI, M.;
CACCIANO, M.; CASTELLANI, M. AND SALVATI, P. (2002).
A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy.
Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2:57-72. EGS.
- CHACÓN, J. (1988).
Riesgos geológicos en el sector de Olivares (Moclín, Granada).
II Simposio Nacional Taludes y Laderas Inestables. Eds. E.Alonso y J.Corominas. pp.705-722. Barcelona.
- CHACÓN, J. (2003 a)
"Riesgos de origen geológico y geomorfológico: deslizamientos de tierras, identificación, análisis y prevención de sus consecuencias" Áreas: Revista de Ciencias Sociales.
Volumen especial : Los procesos de riesgo con origen natural: una constante en la relación entre hombre y medio.
Nº 23, pp 33-64. Universidad de Murcia- Fundación CajaMurcia.
- CHACÓN, J. (2003b).
Geología aplicada a las obras civiles.
En I Curso Geotecnia para las Infraestructuras. Editor. J.Bauzá. Colegio Oficial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Málaga. 32 pp.
- CHACÓN, J. (2005).
Mapas de Zonas Inestables y Sistemas de Información Geográfica (SIG).
VI Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Valencia, 21-24 de Junio de 2005. Conferencia Invitada. 76 pp.
- CHACÓN, J. (2008).
Los conceptos actuales de susceptibilidad, peligrosidad y riesgo, en la prevención de movimientos de ladera, con ejemplos de aplicaciones prácticas.
In Lima, R.E. y Leite, J.C. (Eds) 44º Congresso Brasileiro de Geologia. Publicação Especial. 2008.
Desastres e riscos geológicos em Curitiba e litoral. Roteiro de Excursão Técnica. 43 p. CENACID. UFP
- CHACÓN, J. Y LÓPEZ. A. (1988).
El deslizamiento de Olivares.(Moclín,Granada.): Geología, composición mineralógica y evolución dinámica durante los 15 primeros días.
II Simposio Nacional Taludes y Laderas Inestables. Eds. E.Alonso y J.Corominas. pp.723-31. Barcelona
- CHACÓN, J. Y RODRÍGUEZ, I. (1988).
Diferenciación de movimientos de ladera en el sector de Olivares (Moclín, Granada).
II Congreso Geológico de España. Comunicaciones, vol.2, pp.325-329. Universidad de Granada.
- CHACÓN, J.; IRIGARAY, C.; LÓPEZ, A.; RODRÍGUEZ, I., Y ROMERO, E. (1988).
Deslizamientos de ladera en el Dominio Subbético.
II Congreso Geológico de España, Guía de Excursión B5. 34 pp. Universidad de Granada.
- CHACÓN, J.; IRIGARAY, C. ; EL HAMDOUNI, R. Y FERNÁNDEZ, T.(1996).
Consideraciones sobre los riesgos derivados de los movimientos del terreno, su variada naturaleza y las dificultades de su evaluación. In Chacón & C. Irigaray, J. (eds.)
VI Congreso Nacional y Conferencia Internacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio, I, 407-418. Granada, España.
- CHACÓN, J.; IRIGARAY, C. EL HAMDOUNI, R. AND FERNÁNDEZ, T. (2006).
Engineering geology maps: Landslides and GIS.
Bulletin of Engineering Geology and Environment 65:341-411. Springer Verlag. Berlin- Heidelberg.
- CHACÓN, J.; IRIGARAY, C. AND FERNÁNDEZ, T. (2007).
Movimientos de Ladera,
pp 45-82 in Ferrer, M. (Coord) *Atlas de Riesgos Naturales en la Provincia de Granada*.
Diputación de Granada-Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 190 pp.
- CHACÓN, J.; IRIGARAY, C.; EL HAMDOUNI, R.; AND JIMÉNEZ-PERÁLVAREZ, J.D. (2010).
Diachroneity of landslides.
In: Geologically Active - Williams et al. (eds) © 2010 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-60034-7.
Páginas 999-1006.
- CHACÓN, J.; IRIGARAY, C.; EL HAMDOUNI, R.; VALVERDE-PALACIOS, I.; VALVERDE-ESPINOSA, I.; CHACÓN, E.;
CALVO, F.J.; JIMÉNEZ-PERÁLVAREZ, J.; FERNÁNDEZ, P.; GARRIDO, J. AND LAMAS, F. (2012).
Engineering and Environmental Geology of Granada and its Metropolitan Area (Spain).
Engineering & Environmental Geosciences, 44 pp., 17 tables, 25 figures. August issue.

- COSTANZO, D.; ROTIGLIANO, E; IRIGARAY, C.; JIMÉNEZ-PERÁLVAREZ, J., AND CHACÓN, J. (2012).
Factors selection in landslide susceptibility modelling on large scale following the gis matrix method: application to the river Beiro basin (Spain).
Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12, 327-340. EGS.
- COROMINAS, J. Y GARCÍA-YAGÜE, A. (1997).
Terminología de los movimientos de ladera.
In E.Alonso, J.Corominas, J.Chacón et al., editores. IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Vol 3, pp. 1051-1072. Granada. Barcelona.
- CRUDEN, D.M AND LEFEVRE, G. (1994).
Glossary of Landslides.
<http://www.landslides.gl.ulaval.ca/tcl/glossary.html> 19 pp.
- CRUDEN, D.M. AND VARNES, D.J. (1996).
Landslides types and Processes. In "Turner, A.K. and Schuster, R.L". (1996).
Landslides: investigation and mitigation. Special Report 247. USA Transportation Research Board. National Research Council. National Academic Press. 673 pp. Washington D.C.pp, 35-76.
- FELL, R. (1994)
Landslide risk assessment and acceptable risk.
Can Geotech J 31:261-272.
- FELL, R.; COROMINAS, J.; BONNARD, CH.; CASCINI, L.; LEROI, E.; SAVAGE, W.V. (2008).
Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning.
Engineering Geology 102 (2008) 99-111. Elsevier
- FERNÁNDEZ, P.; IRIGARAY, C.; JIMÉNEZ, J.; EL HAMDOUNI, R.; CROSETTO, M.; MONSERRAT, O. AND CHACÓN, J. (2009)
First delimitation of areas affected by ground deformations in the Guadalfeo River Valley and Granada metropolitan area (Spain) using the DInSAR technique.
Engineering Geology, vol 105: 1-2, 23, pp 84-101. Elsevier
- HANSEN, A. 1989.
Landslide Hazard Analysis.
In "Slope Instability (S. Brunsden and D.B. Prior, eds.) " John Wiley & Sons, New York, pp. 523-595.
- HUTCHINSON J.N. (1988).
Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology.
proc. VTH. I.S.L. Lausanne, 1,3-35. Balkema Pub. Holland.
- IRIGARAY, C.; LAMAS, F.; EL HAMDOUNI, R.; FERNÁNDEZ, T., AND CHACÓN, J.(2000),
The Importance of Precipitation and the Susceptibility of the Slopes for the Triggering of Landslides Along the Roads.
Natural Hazards, 21(1): 65-81. (2000). Springer.
- LAMAS, F.; IRIGARAY, C.; FERNÁNDEZ, T.; EL HAMDOUNI, R, Y CHACÓN, J. (1997).
Lluvias y movimientos de ladera durante el invierno 1996-97 en Andalucía Oriental.
I Congreso Andaluz de Carreteras. Granada. Vol. 5, pp. 654-667.
- MATEOS, R.M. AND FERRER, M. (1994).
Methodology for landslides hazard map 1:10.000 in the area of Monachil (Granada, Spain).
7th. I.C.I.A.E.G. Lisbon, III, pp. 2059-2064.
- RODRÍGUEZ ORTIZ, J.M.; PRIETO, C., E HINOJOSA, J.A. (1978).
Regional studies on mass movements in Spain.
III International Congress of the I.A.E.G. Asociación Española de Geología Aplicada a la Ingeniería. Sección I, vol 1. Madrid., pp. 267-277.
- SÁNCHEZ-NAVARRO NEUMANN, M.M. (1924).
Los fenómenos geológicos de Monachil (Granada).
Ibérica. XI, 1º, vol XXI nº 529, pp. I-VII.
- SANZ, E. (1992).
El deslizamiento de Güevéjar durante los terremotos de Lisboa (1755) y Andalucía (1884).
III Simposio Laderas y Taludes Inestables. E.Alonso y J.Corominas edit. Vol 1, pp. 195-204.
- VARNES, D.J. (1978).
"Slope movement types and processes,"
in Landslides: Analysis and Control, Transportation Research Board Special Report 176, National Academy of Sciences, Washington, D.C., pp. 12-33.
- WP/WLI (1990).
A Suggested Method for Reporting a Landslide.
Bulletin of the International Association of Engineering Geology, No. 41, pp. 5-12.

WP/WLI. 1993a.

A Suggested Method for Describing the Activity of a Landslide.
Bulletin of the International Association of Engineering Geology, No.47, pp.53-57.

WP/WLI. 1993b.

Multilingual Landslide Glossary.
BiTech Publishers, Richmond, British Columbia, Canada, 59 pp.

WP/WLI (1995).

International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party on World Landslide Inventory,
*Working Group on Rate of Movement (Chairman: Ch Bonnard) (1995) A suggested method
for describing the rate of movement of a landslide. Bulletin of the International Association of Engineering
Geology*,52: 75-78.