

Aplicaciones del cálculo de las alturas críticas para un diagnóstico preliminar de la inestabilidad de taludes y laderas

Applications of the Calculation of Critical Heights for a Preliminary Diagnosis of Slopes and Hillsides Instability

Ignacio Pérez-Soba Diez del Corral *¹

Resumen

El artículo propone dos aplicaciones prácticas de las alturas críticas de laderas que se obtienen de las fórmulas basadas en los métodos de equilibrio límite bidimensional, que permitan detectar de manera rápida (sin recurrir a métodos más exactos pero más costosos) situaciones de riesgo para tres tipos de inestabilidad del terreno: deslizamientos, desprendimientos de bloques, y derrumbamientos o fallas rotacionales. En primer lugar, dado que tales fórmulas establecen una relación con fundamento físico entre las características mecánicas de los suelos y las características geométricas de la ladera, el uso de las características medias de cada clase de suelo (por ejemplo, en el sistema de clasificación unificada USCS) permite identificar en la cartografía las zonas con pendiente y desnivel tales que provocan susceptibilidad a la inestabilidad del terreno. Adicionalmente, se propone un índice, basado en la relación entre las alturas críticas respectivas de los suelos seco y saturado, que detecta aquellos terrenos más susceptibles de deslizamiento súbito a causa de precipitaciones considerables.

Palabras clave: Taludes, Laderas, Mecánica de suelos, Estabilidad, Cartografía de susceptibilidad de riesgos, Deslizamientos, Desprendimientos de bloques, Derrumbamientos o fallas rotacionales

Abstract

The paper proposes two practical applications of the critical hillside heights obtained through the formulas based on the two-dimensional limit equilibrium methods, which could allow the detection in a fast way (without resorting to more accurate but more expensive methods) situations of risk for three kinds of instability of the terrain: landslides, falls of blocks, and collapses or rotational faults. First, since such formulas establish a relationship with a physical basis between the mechanical characteristics of the soils and the geometric characteristics of the slope, the use of the average characteristics of each soil class (for example, in the unified classification system USCS) allows to identify in the cartography the areas whose height and slope cause susceptibility to the instability of the land. Additionally, an index is proposed, based on the relationship between the respective critical heights of dry and saturated soils, which detects those lands that are most susceptible to sudden landslides because of heavy rainfall.

Keywords: Slopes, Hillsides, Soil mechanics, Stability slope, Cartography of risk susceptibility, Landslides, Falls of blocks, Collapses or rotational faults

1. INTRODUCCIÓN

La inestabilidad de las laderas naturales es uno de los principales mecanismos erosivos en áreas de montaña y, al mismo tiempo, uno de los riesgos de mayor impacto tanto sobre la seguridad de bienes y personas (en particular cuando la inestabilidad se produce súbitamente) como sobre la economía (Ayala y Elizaga, 1988; Ayala y Ferrer, 1989; Ferrer, 1995). Por ello, el análisis de dicha inestabilidad es de extrema importancia en la ordenación del territorio para (entre otras cosas) prohibir la instalación de personas y bienes en las zonas de riesgo, asignar a las laderas inestables el régimen jurídico de uso del suelo que respete o refuerce su estabilidad, o establecer medidas preventivas para la realización de distintas actividades humanas que

pudieran afectar a la estabilidad de las laderas. Es por ello un campo de estudio que ha tenido en la última década un gran desarrollo tanto internacional como en España (donde se realizan periódicos Simposios nacionales sobre taludes y laderas inestables), y un ámbito tradicional de trabajo para la Ingeniería de Montes (Figura n.º 1).

El análisis de la inestabilidad tiene como principal objetivo la formación de los llamados “mapas de susceptibilidad”, la cual se define como la potencialidad del terreno para producir la rotura o deslizamiento de ladera. López Cadenas de Llano (1998: 272) propone un esquema formal para la elaboración de un mapa de susceptibilidad (Figura n.º 2), en el que figura como base un mapa de factores litológicos, formado por el análisis conjunto de las clases litológicas y de las pendientes.

La elaboración de estos mapas de susceptibilidad, y los de factores litológicos y estructurales que les darían base, se ha simplificado mucho gracias a la generalización de los sistemas de información geográfica (SIG) con apoyo de la teledetección, que permiten manejar numerosas variantes y extraer parámetros cuya obtención sería complicada y

* Autor de contacto: iperezs@aragon.es

¹ Doctor Ingeniero de Montes. Gobierno de Aragón. Servicio Provincial de Desarrollo Rural y Sostenibilidad de Zaragoza. Paseo de María Agustín, 36. 50071 Zaragoza (España).



Figura 1. Vista del monte de utilidad pública número 4 de los de la provincia de Zaragoza, denominado “La Muela”, sito en el término municipal de Alhama de Aragón. La inestabilidad de las laderas causa problemas de inseguridad al casco urbano de Alhama de Aragón (Zaragoza), sito al pie del monte, lo que motivó una exitosa repoblación forestal arbórea realizada por el Patrimonio Forestal del Estado en los años 1951-1952 (Foto: S. Gregorio).

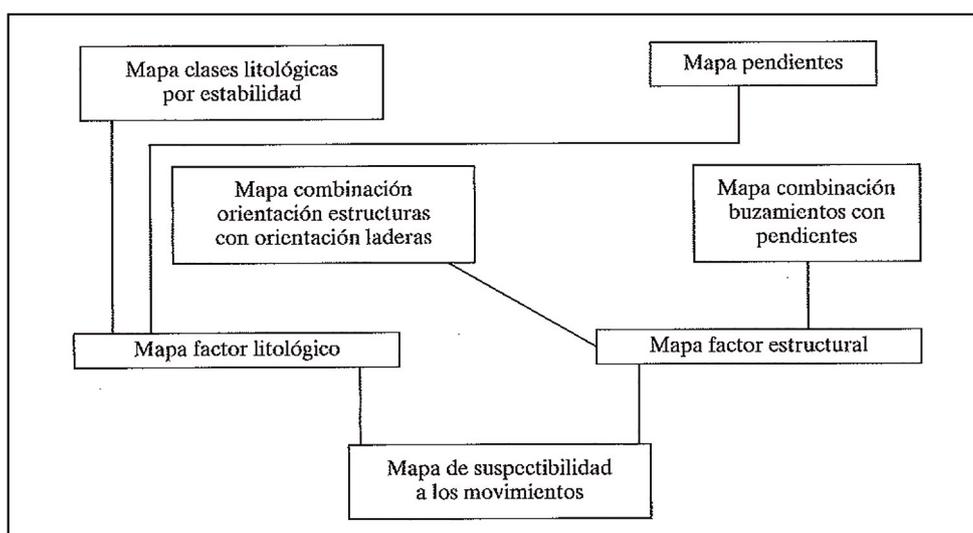


Figura 2. Esquema para confección de un mapa de susceptibilidad de inestabilidad de laderas (López Cadenas de Llano, 1998: 272).

trabajosa mediante métodos tradicionales (Santacana *et al.*, 2002). Se han propuesto variados métodos y técnicas para la generación de mapas de susceptibilidad: a partir de la superposición de capas de atributos geológico-geomorfológicos a un mapa de inventario de roturas; aplicando un factor de contribución o peso a los diferentes factores de inestabilidad que definen las diferentes capas; usando análisis multivariante; o mediante métodos determinísticos basados en la obtención del factor de seguridad de la ladera (Santacana *et al.*, 2002; Ayala y Corominas, 2002; Van Westen *et al.*, 1999; Carrara *et al.*, 1999; Remondo, 2001). Pero es mucho lo que queda por hacer en España en cuanto a cartografía de riesgos geológicos, y en concreto en lo referido a la inestabilidad de las laderas, sobre la cual no existe siquiera un registro, ya que muchos de estos fenómenos ocurren en zonas deshabitadas o son pequeños y superficiales, por lo que ni siquiera se identifican (Corominas, 1989). Por ello, las obras y

actuaciones pequeñas y medianas (como la gran mayoría de las obras forestales) no cuentan a menudo con una cartografía de referencia, y su escaso presupuesto no permite asumir el coste de un estudio detallado “ad hoc”.

En ese sentido, procede recordar que durante décadas, hasta la generalización de los métodos modernos basados en SIG y teledetección, los métodos determinísticos basados en la obtención del factor de seguridad de la ladera han ofrecido buenos resultados. Dentro de ellos se hallan los métodos de análisis del equilibrio, sistemas clásicos de análisis de estabilidad del suelo que, basándose en las leyes de la estática, determinan las condiciones de equilibrio de una masa potencialmente inestable mediante un análisis bidimensional. Por eso, nuestra hipótesis de partida es que los métodos de análisis del equilibrio son útiles para un diagnóstico preliminar rápido y barato de la posible inestabilidad de laderas.

2. OBJETIVO

El objetivo de este artículo es proponer dos aplicaciones sencillas de las alturas críticas de laderas que se obtienen mediante los métodos de equilibrio límite bidimensional para hacer un diagnóstico preliminar de la estabilidad de laderas, que nos permita detectar riesgos que pudieran aconsejar estudios de detalle. En primer lugar, usando expresiones de cálculo de dichas alturas que establezcan una relación con sentido físico entre las características mecánicas de los suelos y algunas magnitudes del terreno fácilmente medibles mediante SIG o sobre el terreno (en concreto, la pendiente y el desnivel), que permitan detectar zonas cuya topografía las hace cercanas a la situación crítica, para tres casos de inestabilidad de laderas: deslizamientos, desprendimientos de bloques desde un talud vertical o subvertical, y derrumbamientos o fallas rotacionales. Y en segundo lugar, proponiendo un índice, basado en dichas alturas críticas, que advierta del riesgo de inestabilidad de los suelos por deslizamiento a causa de lluvias y nevadas abundantes.

3. METODOLOGÍA

3.1. Hipótesis generales de aplicabilidad de las fórmulas empleadas

Se considera que el macizo está formado por un suelo de características mecánicas homogéneas, y en estado de saturación total, sometido por tanto al principio de Arquímedes, pero con el agua en reposo, sin flujos de corrientes subsuperficiales dentro de la zona de rotura. No se consideran más cargas sobre la sección de rotura que las propias del macizo.

En cuanto a los criterios de rotura, se escogen del tipo Coulomb, que describen las condiciones del vector de tensiones sobre un plano de rotura determinado. Según las Leyes de Coulomb, en el caso de un suelo (una superficie plana de rotura con un campo paralelo de tensiones), o sobre un elemento diferencial de la superficie de rotura, la resistencia al corte está dada por la siguiente expresión (López Cadenas de Llano, 1998: 254; Melentijevic, 2005: 27):

$$\tau = C_0 + \sigma \operatorname{tg} \varphi$$

siendo C_0 (en T/m^2) la cohesión efectiva del suelo no saturado (se supone, por tanto, en condiciones estándar de humedad), τ la tensión crítica de resistencia al corte que deseamos definir, σ la tensión normal efectiva sobre la sección, y φ el ángulo de rozamiento interno efectivo. En el caso de que la ladera se halle sometida al empuje de Arquímedes, la fórmula es:

$$\tau_s = C_s + (\sigma - \mu) \operatorname{tg} \varphi$$

siendo C_s la cohesión efectiva del suelo saturado de agua, μ la tensión hidráulica total ejercida sobre la superficie y σ la tensión total (incluida la presión intersticial). Según esto, frente a una carga R inclinada un ángulo α sobre la normal a la superficie de rotura de área S , la condición de equilibrio vendría dada por la expresión:

$$R \cdot \operatorname{sen} \alpha = C_s + (R \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi)$$

estado al que corresponde un coeficiente unidad (para ir por el lado de la seguridad), de modo que para valores de $R \cdot \operatorname{sen} \alpha$ mayores que el esfuerzo resistente el macizo está en equilibrio inestable, y por tanto peligroso.

3.2. Fórmulas para cálculo de alturas críticas relacionadas con las características del terreno

Todas las hipótesis expuestas las cumplen las fórmulas propuestas por Graux (1975: 43-57), que permiten el cálculo de alturas críticas a partir de datos topográficos y de la naturaleza del suelo, para cada uno de los tres casos más comunes de inestabilidad de laderas: 1) deslizamientos; 2) desprendimientos de bloques; y 3) derrumbamientos o fallas rotacionales. Estas fórmulas, su fundamento físico y sus hipótesis de aplicación se resumen a continuación.

a) Deslizamiento

En el caso de deslizamiento, la superficie de rotura se considera plana, de longitud indefinida y de dirección paralela a la ladera, de la cual la separa una distancia vertical Z (Figura n.º 3).

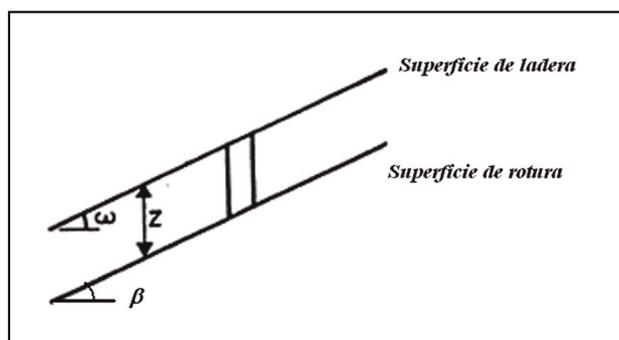


Figura 3. Principales parámetros definidores de los deslizamientos (adaptado a partir de Graux, 1975: 45).

Por tanto, sobre una superficie unidad, la profundidad de suelo crítica (Z_{cr}) será tal que se cumplan las condiciones generales de estabilidad del macizo con coeficiente unidad. Es decir:

$$R = Z_{cr} \cdot \gamma'; \alpha = \omega; C = C_s; S = 1,$$

siendo γ' el peso específico del suelo cuando está saturado y sometido al principio de Arquímedes, cuyo valor es por tanto $\gamma' = (1-n) \cdot (\gamma_s - \gamma_w)$, siendo, a su vez, n la porosidad media en condiciones estándar, γ_s el peso específico del material que constituye las partículas sólidas (como valor medio, puede tomarse el de 2,4-2,7) y γ_w el peso específico del agua, que se supone la unidad. Por tanto, $\gamma' = 1,7 (1-n)$, como valor aproximado. De ahí,

$$Z_{cr} \cdot \gamma' \cdot \operatorname{sen} \omega = C_s + Z_{cr} \cdot \gamma' \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi, \text{ y por tanto}$$

$$Z_{cr} = \frac{C_s}{\gamma' \cdot \cos \omega \cdot (\operatorname{tg} \omega - \operatorname{tg} \varphi)}$$

Para profundidades de suelo mayores que este valor, ha de considerarse que existe en el terreno un riesgo de deslizamiento.

b) Desprendimientos de bloques

En este caso, se considera un talud vertical o subvertical de altura H, una superficie de rotura plana y con una inclinación sobre la horizontal tal que $\beta = \pi/4 + \varphi/2$ en la parte inferior del talud, y una fisura de tracción vertical de profundidad Zc en la parte superior, cuyo valor en el caso crítico será igual a la mitad de la altura del talud sobre la sección crítica ($Z_{cr}=H/2$) (Figura n.º 4).

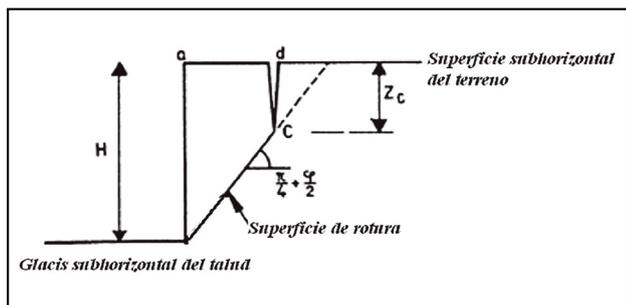


Figura 4. Principales parámetros definidores de la caída de bloques en un talud subvertical (adaptado a partir de Graux, 1975: 49).

La componente del rozamiento del esfuerzo resistente de la sección estará inclinada sobre la horizontal un ángulo $\pi/4 - \varphi/2$, mientras que la componente de cohesión que sigue la superficie de rotura seguirá un ángulo $\pi/4 + \varphi/2$, formando ambas con la carga vertical del peso del macizo un triángulo rectángulo isósceles, y siendo por tanto iguales las dos componentes del esfuerzo resistente, de lo que se concluye que:

$$W = 2 \cdot C_s \cdot S \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)$$

siendo S la superficie de rotura comprendida entre la grieta de tracción y el talud del macizo, con ancho unitario. Es decir,

$$S = \frac{H_{cr}}{2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)}$$

Por otra parte, $W = C_s \cdot H_{cr}$. Para esta rebanada unitaria en estado de saturación, el peso sería:

$$W = \gamma' \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(H_{cr} + \frac{H_{cr}}{2}\right) \cdot \frac{H_{cr}}{2} \cdot \frac{1}{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)} = \frac{3}{8} \cdot H_{cr}^2 \cdot \frac{\gamma'}{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)}$$

De este modo, la condición de equilibrio sería:

$$\frac{3 \cdot \gamma' \cdot H_{cr}^2}{8 \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)} = C_s \cdot H_{cr}$$

Y la altura crítica del talud (a partir de la cual puede considerarse que el terreno está sometido al riesgo de desprendimiento de bloques) será:

$$H_{cr} = \frac{8 \cdot C_s \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)}{3 \cdot \gamma'}$$

c) Derrumbamientos de ladera

En este caso, la superficie de rotura es limitada y curva, asimilándose a una circunferencia de acuerdo con el método clásico de Fellenius (Rico y Castillo, 2005: 316 y ss.) que se desarrollaría entre el talud -o incluso el pie del talud- y la superficie subhorizontal del terreno que domina el talud (caso conocido como “rotura de talud”), o bien entre el glacis del talud y esa misma superficie dominante (caso conocido como “rotura profunda”) (Figuras n.º 5 y n.º 6). A la hora de esperar un tipo de rotura u otro, debe tenerse en cuenta la naturaleza del sustrato y los datos que podamos tener de sucesos anteriores.

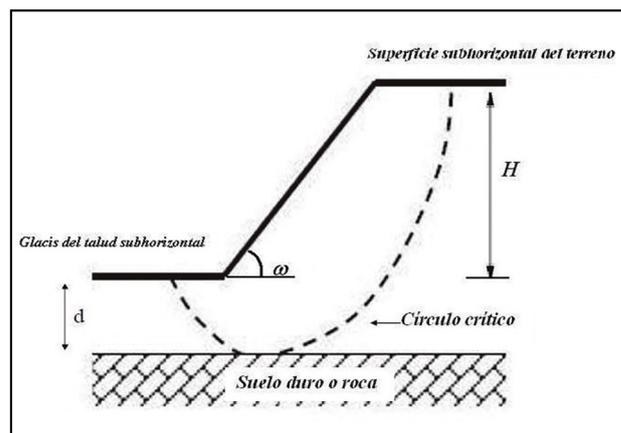


Figura 5. Principales parámetros definidores de los derrumbamientos de ladera (adaptado a partir de Rico y Castillo, 2005: 319).

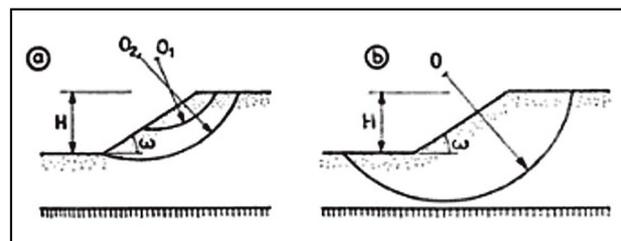


Figura 6. Esquemas de rotura de talud o superficiales (a) y de rotura profunda (b), según Graux (1975: 58).

Graux (1975: 79-82) usa en estos casos las gráficas de Taylor, que permiten determinar la altura crítica o de equilibrio límite del talud distinguiendo dos casos según el rozamiento interno del terreno y el ángulo de la ladera con la horizontal:

- Roturas de talud, en las que se considera caso más desfavorable el de macizos con suelos con rozamiento interno ($\varphi > 0$), o suelos puramente cohesivos ($\varphi = 0$), cuando $\omega > 53^\circ$. En este caso, la altura crítica se determina, según Taylor, por la relación $H_{cr} = C_s \cdot N_s / \gamma'$, siendo N_s un coeficiente adimensional que viene dado por el diagrama de la Figura n.º 7 en función de los valores de φ y de ω .
- Roturas profundas, en las que se considera caso más desfavorable el de suelos puramente cohesivos y $\omega > 53^\circ$. Este caso es poco frecuente, y en él se hace necesario introducir el factor de profundidad $n_d = (H+D)/H$, en el que H es la altura del macizo y D es la profundidad

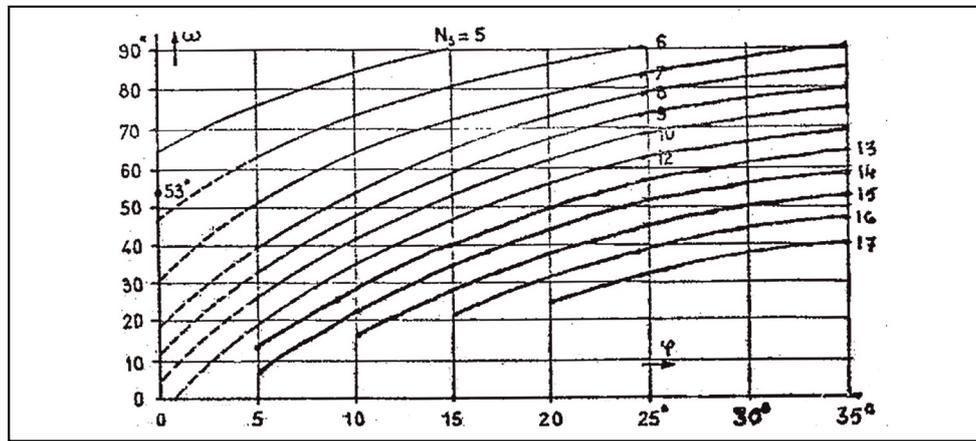


Figura 7. Ábaco para la determinación del factor N_s en función de ϕ y de ω (Graux, 1975: 82, fig. 3-26).

máxima que se supone va a alcanzar el círculo de rotura profunda bajo el nivel del glacis horizontal del macizo, y que viene dado por la cota del nivel indeformable del suelo. Con este factor, la altura crítica se puede obtener mediante una ecuación análoga a la de las roturas de talud en la que el coeficiente N_s viene dado por el diagrama de la Figura n.º 8.

4. APLICACIONES DE LAS ALTURAS CRÍTICAS PARA UN DIAGNÓSTICO PRELIMINAR DE INESTABILIDAD DE LADERAS NATURALES

4.1. Detección de zonas susceptibles de inestabilidad por altura, pendiente y características mecánicas del suelo

Las fórmulas antes expuestas precisan, como se ve, de dos tipos de datos: los parámetros geométricos propios de la zona que se investiga (que se obtienen fácilmente con SIG o sobre el terreno), y una estimación de la profundidad del suelo movilizable, y de las características físicas y mecánicas del suelo (porosidad, peso específico, cohesión y rozamiento interno). Para esto último, teóricamente debe procederse a realizar análisis de laboratorio de muestras representativas del terreno, pero, como señalan Rico y Castillo (2005: 139-140), ello no resulta razonable tanto por razones de índole práctica como por huir de un perfeccionismo

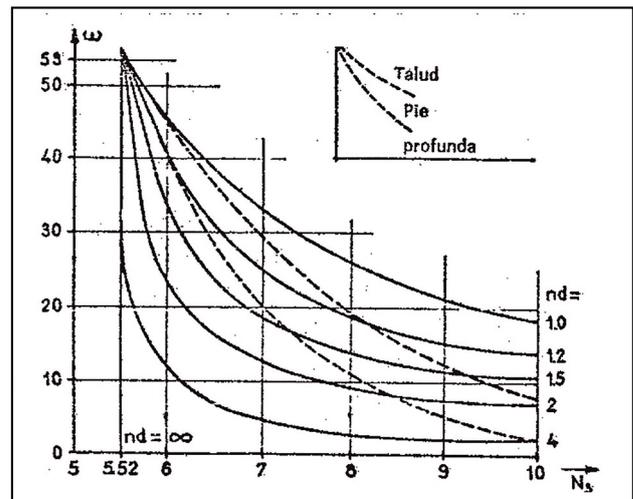


Figura 8. Ábaco para la determinación del tipo de rotura y de la relación entre ω , N_s y n_d (Graux, 1975: 82, fig. 3-27).

teorizante, más aún cuando pretendemos, como se ha dicho, usar los métodos más sencillos. Por ello, se puede usar la clasificación unificada de suelos USCS, ampliamente aceptada (Ayala y Andreu, 2006: 105), y que emplea una base granulométrica de fácil aplicación directa en campo.

En la Tabla n.º 1 se facilitan, siguiendo esta clasificación, los parámetros promedios γ_a (Tm/m^3 , y correspondiente al

Tabla 1. Valores característicos de los terrenos, según granulometría (USCS)

Grupo USCS	γ_a (Tm/m^3)	W (%)	n (%)	ϕ (°)	C_o (Tm/m^2)	C_s (Tm/m^2)
GW	2 (0,25)	5 (3)	30 (6)	40 (5)	0	0
GP	1,9 (0,25)	3 (2)	32 (8)	38 (6)	0	0
GM	2,1 (0,25)	8 (5)	28 (8)	36 (4)	0	0
GC	2,05 (0,2)	11 (6)	32 (8)	34 (4)	0	0
SW	1,95 (0,25)	13 (10)	36 (10)	38 (5)	4 (0,5)	0
SP	1,85 (0,25)	11 (9)	38 (10)	36 (6)	2 (0,5)	0
SM	2 (0,25)	17 (7)	37 (10)	34 (3)	5 (0,5)	2 (0,5)
SM-SC	2,1 (0,2)	15 (8)	32 (10)	31 (3)	5 (2,0)	1,5 (0,5)
SC	1,95 (0,25)	20 (10)	40 (10)	32 (4)	7,5 (1,5)	1 (0,5)
ML	1,9 (0,25)	32 (21)	47 (15)	33 (4)	6,5 (1,0)	1 (1,0)
ML-CL	2,1 (0,15)	19 (7)	35 (8)	30 (4)	6,0 (1,5)	1,5 (1,0)
CL	2 (0,15)	25 (10)	41 (8)	27 (4)	9,0 (1,0)	2 (1,0)
MH	1,55 (0,15)	73 (20)	67 (7)	22 (4)	7,0 (3,0)	1,5 (1,0)
CH	1,75 (0,15)	47 (24)	56 (9)	22 (4)	10,5 (3,5)	2,0 (1,5)

Tabla 2. Aplicación al caso de deslizamiento, clases SM a CH (Z_{cr} en metros)

Grupo USCS	n (%)	γ'	Cs (Tm/m ²)	φ (°)	tg φ	Z _{cr} ($\omega=45$)	Z _{cr} ($\omega=40$)	Z _{cr} ($\omega=35$)	Z _{cr} ($\omega=30$)	Z _{cr} ($\omega=25$)
SM	37	1,07	2,0	34	0,67	8,0	4,4	-	-	-
SM-SC	32	1,16	1,5	31	0,60	4,6	7,1	15,8	-	-
SC	40	1,02	1,0	32	0,62	3,6	5,8	14,9	-	-
ML	47	0,90	1,0	33	0,65	4,5	7,6	27,0	-	-
ML-CL	35	1,11	1,5	30	0,57	4,4	6,6	12,7	-	-
CL	41	1,00	2,0	27	0,51	5,8	7,9	12,8	34,3	-
MH	67	0,56	1,5	22	0,40	6,3	8,0	10,9	17,4	44,6
CH	56	0,75	2,0	22	0,40	6,3	7,9	10,8	17,4	44,4

peso específico aparente del suelo con un porcentaje de humedad W promedio), n, φ , Co y Cs, y que son una síntesis promediada de los publicados por el Laboratorio de Ingeniería del Bureau of Reclamation de los Estados Unidos y por la Asociación Suiza de Normalización (López Cadenas de Llano, 1998: 260). En dicha tabla, las cifras entre paréntesis reflejan, en cantidades absolutas, los márgenes de confianza al 90% de los parámetros respectivos en relación a la media.

A partir de ahí, la aplicación es muy sencilla. Por ejemplo: la obtención de las alturas críticas de ladera para deslizamientos, para los grupos de más riesgo en la clasificación USCS, que son los comprendidos dentro de las clases SM a CH (se utilizan sólo los valores medios de cada una de las características) se presenta en la Tabla n.º 2.

De este modo, haciendo una superposición de una cartografía de suelos y de otra de desniveles y pendientes de las laderas, se detectarían las zonas que presentan alturas cercanas a las críticas, y que poseen por tanto riesgo de inestabilidad para cada uno de los tipos de rotura que se han expuesto.

4.2. Aplicación para la detección de riesgos de inestabilidad súbita del suelo por deslizamiento a causa de precipitaciones

La obtención de estos valores de alturas críticas, a su vez, nos descubre una posibilidad no evidente a simple vista, pero interesante, para determinar un índice, de sencillo cálculo y relacionado de manera fija con cada uno de los tipos de terreno USCS, que advierte del riesgo de inestabilidad por deslizamiento a causa de precipitaciones abundantes de lluvia o nieve. Como se ha dicho, el cálculo de la altura crítica Z_{cr} en relación con los deslizamientos se realiza mediante la fórmula:

$$Z'_{cr} = \frac{Cs}{\gamma' \cdot \cos \omega \cdot (tg \omega - tg \varphi)}$$

Esa altura crítica se ha calculado para suelos húmedos, en estado de saturación. Si lo referimos a un suelo seco, en estado de no saturación, entonces

$$Z_{cr} = \frac{Co}{\gamma \cdot \cos \omega \cdot (tg \omega - tg \varphi)}$$

Parece claro que $Z'_{cr} < Z_{cr}$, ya que un suelo en estado de saturación es, por definición, más inestable que uno seco.

Cuanta mayor diferencia haya entre estos dos valores, más peligroso será el tipo de terreno desde el punto de vista de su posible inestabilidad súbita: un terreno cuya altura crítica es alta si está seco, pero es baja si está saturado, será fácil que deslice hasta una profundidad considerable, poniendo en movimiento grandes volúmenes de tierra saturada de agua.

Ahora bien, evidentemente, no es preciso calcular las alturas críticas en las dos situaciones distintas (suelo seco y saturado) para detectar este riesgo, porque si partimos de la desigualdad entre las alturas críticas del suelo seco y del saturado, es decir:

$$Z'_{cr} = \frac{Cs}{\gamma' \cdot \cos \omega \cdot (tg \omega - tg \varphi)} < Z_{cr} = \frac{Co}{\gamma \cdot \cos \omega \cdot (tg \omega - tg \varphi)}$$

ello a su vez implica lo siguiente:

$$\frac{Cs}{\gamma'} < \frac{Co}{\gamma} \Rightarrow \frac{Cs}{Co} < \frac{\gamma'}{\gamma} \Rightarrow \frac{Co}{Cs} > \frac{\gamma}{\gamma'}$$

Esta relación nos permite definir un factor de riesgo equivalente a la diferencia de Z'_{cr} con Z_{cr} , a la que antes nos referíamos: cuanto mayor sea la relación Co/Cs en relación con el cociente γ / γ' , más riesgo existe. Por tanto, la expresión de dicho factor sería:

$$F = \frac{\left(\frac{Co}{Cs}\right)}{\left(\frac{\gamma}{\gamma'}\right)} = \frac{Co \gamma'}{Cs \gamma}$$

En la Tabla n.º 3 hemos determinado a modo de ejemplo el valor del factor F, de riesgo inestabilidad súbita del suelo, para cada uno de los tipos de suelo USCS, y en especial para los de mayor riesgo, como en el apartado anterior.

De donde resulta que los grupos de más riesgo desde el punto de vista de los deslizamientos son las arenas arcillosas con pocos finos (SC) y, tras ellas, los limos (ML).

Tabla 3. Determinación de factores de riesgo para cada tipo de terreno (USCS)

Grupo USCS	W (%)	N (%)	Co (Tm/m ²)	Cs (Tm/m ²)	Co/Cs (1)	$\gamma / \gamma' (2)$	F= (1)/(2)
SM	17	37	5,0	2,0	2,5	1,75	1,42
SM-SC	15	32	5,0	1,5	3,3	1,72	1,92
SC	20	40	7,5	1,0	7,5	1,78	4,21
ML	32	47	6,5	1,0	6,5	1,94	3,35
ML-CL	19	35	6,0	1,5	4,0	1,76	2,27
CL	25	41	9,0	2,0	4,5	1,84	2,44
MH	73	67	7,0	1,5	4,7	2,89	1,62
CH	47	56	10,5	2,0	5,2	2,21	2,35

5. DISCUSIÓN

La validez del análisis realizado en este artículo depende a su vez, evidentemente, de la validez (para los fines que nos hemos propuesto) de los métodos de equilibrio límite bidimensionales y los criterios de rotura de Coulomb en los que se basa.

En cuanto a los métodos de equilibrio límite bidimensionales, es innegable (como se ha expuesto) que, por su intención de hacer un análisis global del suelo, necesariamente realizan una simplificación muy marcada de éste. Es lo que Krahn (2003) acertadamente llamó “los límites del equilibrio límite”. Esta limitación ha causado que en las últimas décadas, se hayan desarrollado otros métodos más cercanos a la realidad del complejo del suelo, aprovechando el desarrollo de la informática, que ha facilitado mucho el cálculo de la estabilidad de terrenos, e incluso del análisis de sus deformaciones. Así, se han desarrollado métodos de equilibrio límite tridimensionales, que usan columnas en lugar de las rebanadas del cálculo bidimensional. Sin embargo, Cavounidis (1987), Hungr (1987) y Hungr *et al.* (1989), entre otros, han demostrado que la estimación de la inestabilidad de la ladera mediante análisis bidimensionales es más conservadora y prudente que la que se obtiene mediante los tridimensionales. Por ello, y dado que nuestra finalidad es justamente la prevención de fenómenos de inestabilidad, el uso de métodos bidimensionales va por el lado de la seguridad.

También se han desarrollado métodos de equilibrio límite mediante discretización en dovelas de la masa deslizante, que son mucho más parecidos a la realidad física del complejo deslizante. No obstante, el número de variables desconocidas excede el número de ecuaciones disponibles, por lo que el problema es matemáticamente indeterminado, y se deben hacer hipótesis complementarias respecto a las direcciones, o magnitudes, o puntos de aplicaciones de las fuerzas, etc. (Melentijevic, 2005: 97-98). Por último, el uso de programas de cálculo que incluyan factores relacionados con las deformaciones del terreno (como el método de los elementos finitos), presenta el inconveniente de requerir necesariamente un detallado conocimiento previo de la mecánica y la resistencia del terreno, lo que no es fácil ni barato, como ya señalaran de manera pionera Whitman y Bailey (1967).

Por ello, Melentijevic (2005: 82-83) concluye que los métodos de equilibrio límite bidimensional siguen teniendo vigencia para el análisis de estabilidad de laderas, y también para casos concretos en los que se puede predecir con cierta precisión el mecanismo de rotura, contando además

con dos grandes ventajas: su cálculo, muy sencillo (Ayala y Andreu, 2006: 187-188) y las características que se analizan en la ladera, que son muy evidentes y fáciles de medir. Ello justifica que se escojan como base para este trabajo, sin que la simplificación en la que se basan afecte a la validez de nuestro método, siempre que se use para los fines expresados en el objetivo de este artículo: un diagnóstico preliminar de un posible problema de inestabilidad, a falta de una cartografía o unos estudios más fiables.

En cuanto a los criterios de rotura, además de los de tipo Coulomb que usan las fórmulas de Graux, existen los criterios de tipo Mohr (de los cuales el más conocido es el criterio de Hoek-Brown), que describen el tensor de tensiones en la rotura, y los de tipo Mohr-Coulomb, cuando ambos tipos de criterios coinciden y además la función matemática es lineal (Melentijevic, 2005: 42). Nuestra elección parece justificada desde el punto de vista de nuestro objetivo, ya que los criterios de Coulomb presentan las siguientes ventajas: su sencillez (al ser lineal); incluir pocas características, y muy claras, referidas a la morfología del terreno; y basarse en la determinación de alturas críticas a partir de las pendientes y de las características mecánicas del terreno, informaciones fáciles de obtener.

6. CONCLUSIONES

Se proponen las siguientes conclusiones:

1. Los métodos de equilibrio límite bidimensional basados en las Leyes de Coulomb de estabilidad de laderas, y en concreto las fórmulas de Graux (1975), proporcionan valores de alturas críticas, para cada rango de pendientes, que permiten identificar de una manera aproximada, pero sencilla y rápida, en la cartografía más usual y para cada clase de suelos, las zonas en las que existe riesgo de deslizamiento, desprendimientos de bloques desde un talud vertical o subvertical, y derrumbamientos o fallas rotacionales.
2. La diferencia entre las alturas críticas en los estados de suelo seco y de suelo en estado de saturación es un factor, fácilmente obtenible mediante el método anterior, que identifica los terrenos más susceptibles de inestabilidad por deslizamiento a causa de lluvias o nevadas considerables. En consecuencia, un índice del riesgo de inestabilidad súbita del suelo a causa de fuertes precipitaciones sería el expresado por la siguiente fórmula:

$$F = \frac{\left(\frac{C_o}{C_s}\right)}{\left(\frac{\gamma}{\gamma'}\right)} = \frac{C_o \cdot \gamma'}{C_s \cdot \gamma}$$

siendo F el factor de riesgo, C_s (Tm/m²) la cohesión efectiva del suelo saturado de agua; C_o (Tm/m²) la cohesión efectiva del suelo seco; γ' (Tm/m³): peso específico del suelo cuando está saturado y sometido al principio de Arquímedes, es decir: $\gamma' = 1,7 \cdot (1-n)$, como valor aproximado, siendo "n" la porosidad media en condiciones estándar del suelo; y γ (Tm/m³): peso específico del suelo seco. Cuanto mayor sea el valor del factor F, más peligroso es el tipo de terreno desde el punto de vista de su inestabilidad súbita por deslizamiento a causa de fuertes precipitaciones o nevadas.

3. La validez del método propuesto está ligada a la aplicabilidad, al caso de que se trate, de los métodos de equilibrio límite bidimensional basados en los criterios de Coulomb para la rotura de laderas, por lo que son útiles fundamentalmente para un diagnóstico preliminar de un posible problema de inestabilidad, que indique la necesidad de una cartografía o unos estudios más precisos.

7. BIBLIOGRAFÍA

Ayala, F.J. y Andreu, F.J. (2006). *Manual de ingeniería de taludes*. (Segunda reimpresión). Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.

Ayala, F.J. y Corominas, J. (Eds.). (2002). *Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG. Fundamentos y aplicaciones en España*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.

Ayala, F.J. y Elizaga, E. (1988). *Impacto económico y social de los riesgos geológicos en España*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.

Ayala, F.J. y Ferrer, M. (1989). Extent and economic significance of landslides in Spain. En: Brabb, E.E., Harrod, B.L. (Eds.), *Landslides: extent and economic significance. Proceedings of the 28th International Geological Congress: Symposium on landslides*. Washington DC: Taylor & Francis, pp. 169-178.

Carrara, A., Guzzetti, F., Cardinali, M. y Reichenbach, P. (1999). Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard. *Natural Hazards*, 20, 117-135.

Cavounidis, S. (1987). On the ratio of factors of safety in slope stability analyses. *Geotechnique*, 37 (2), 207-210.

Corominas, J. (1989). Clasificación y reconocimiento de los movimientos de ladera. En: Corominas, J. (Ed.), *Estabilidad de taludes y laderas naturales*. Zaragoza: Sociedad Española de Geomorfología, pp. 1-30.

Ferrer, M. (1995). Los movimientos de ladera en España, en VV.AA., *Reducción de riesgos geológicos en España*. Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España, pp. 69-82.

Graux, D. (1975). *Fundamentos de mecánica del suelo. Proyecto de muros y cimentaciones*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados.

Hungr, O. (1987). An extension of Bishop's simplified method of slope stability analysis to three dimensions. *Geotechnique*, 37 (1), 113-117.

Hungr, O., Salgado, F.M. y Byrne, P.M. (1989). Evaluation of a Three-Dimensional Method of Slope Stability Analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 26, 679-686.

Krahn, J. (2003). The 2001 R.M. Hardy lecture: The limits of limit equilibrium analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, 643-660.

López Cadenas de Llano, F. (1998). *Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión. Ingeniería medioambiental*. (Segunda edición). Madrid: TRAGSA, TRAGSATEC, Ministerio de Medio Ambiente y Mundi-Prensa.

Melentijevic, S. (2005). *Estabilidad de taludes en macizos rocosos con criterios de rotura no lineales y leyes de fluencia no asociada* (Tesis doctoral disponible en Internet). Universidad Politécnica de Madrid.

Remondo, J. (2001). *Elaboración y validación de mapas de susceptibilidad de deslizamientos mediante técnicas de análisis espacial* (Tesis doctoral disponible en Internet). Universidad de Oviedo.

Rico, A. y Castillo, H. (2005). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres. Carreteras, ferrocarriles y aeropistas*. Ciudad de México: LIMUSA.

Santacana, N., Baeza, C., Corominas, J., Paz, A. de y Marturiá, J. (2002). Análisis de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales mediante el uso de un sistema de información geográfica. Aplicación a la Poble de Lillet. En: Ayala, F.J. y Corominas, J. (Eds.), *Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG. Fundamentos y aplicaciones en España*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, pp. 55-82.

Van Westen, C.J., Seijmonsbergen, A.C. y Mantovani, F. (1999). Comparing landslide hazard maps. *Natural Hazards*, 20, 137-158.

Whitman, R.V. y Bailey, W.A. (1967). Use of computers for slope stability analysis. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93 (4), 475-498.