

UNA PROPUESTA DE UMBRALES PARA VALORAR LA EROSIÓN EN TALUDES DE OBRAS LINEALES

David Hernando Arroba

Manuel G. Romana

Contenido

1	<u>INTRODUCCIÓN</u>	2
1.1	PRESENTACIÓN	3
1.2	OBJETIVOS	3
2	<u>ESTADO DEL ARTE</u>	4
2.1	ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELO	4
2.2	SENSIBILIDAD A LOS PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN	7
3	<u>METODOLOGÍA</u>	9
4	<u>MEJORAS EN LA ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN</u>	10
4.1	PARÁMETROS ESPECÍFICOS DEL ESTUDIO DE TALUDES	10
4.2	ESTUDIO DE TALUDES COMPUESTOS	11
4.3	ESTABLECIMIENTO DE UMBRALES DE GRAVEDAD DE LA EROSIÓN PARA TALUDES DE OBRAS LINEALES	15
4.4	MEDIDAS A ADOPTAR	19
5	<u>EJEMPLO DE ESTUDIO DE UN TALUD COMPUESTO</u>	23
6	<u>CONCLUSIONES</u>	24
7	<u>REFERENCIAS</u>	25

METODOLOGÍA PARA VALORAR LA EROSIÓN EN TALUDES DE OBRAS LINEALES

El interés por la estimación de la erosión en los taludes de las obras lineales surge como consecuencia de la pérdida de la capa edáfica, desprendimientos de material, eventuales invasiones de la calzada, formación de cárcavas, deslizamientos de piel y aterramiento de los elementos de desagüe y drenaje, que aumentan el coste de conservación de las infraestructuras y que pueden convertir un mal menor en un problema de importancia superior.

Tradicionalmente, la erosión ha sido estudiada a través de la ecuación universal de pérdida de suelo (*Universal Soil Loss Equation*, USLE) publicada inicialmente en 1961 por el Servicio de Investigación de Agricultura de los Estados Unidos (*US Agricultural Research Service*). En el caso particular de los taludes de obras lineales, se emplea la ecuación adaptada por Israelsen et al. en 1980, ecuación simplificada y extendida para pendientes de hasta el 100% (1H:1V).

Para valorar cualitativamente la pérdida de suelo determinada de acuerdo con la ecuación adaptada de Israelsen et al (1980) es normal recurrir a los umbrales de erosión para suelos agronómicos establecidos por las organizaciones FAO-PNUMA-UNESCO en 1980. Sin embargo, estos valores resultan inadecuados en el caso de los taludes de obras lineales, donde las elevadas pendientes originan pérdidas de suelo muy superiores a los límites admisibles para un suelo agronómico.

Por esta razón, es necesario establecer una nueva clasificación cualitativa de la erosión que proporcione límites admisibles dentro del orden de magnitud usual en taludes de obras lineales.

A partir de los valores propuestos por FAO-PNUMA-UNESCO, el documento presenta una propuesta que permite superar la visión agronómica que se ha dado tradicionalmente a la erosión, para disponer de una herramienta que permita valorar la gravedad de la pérdida de suelo de un talud en una obra lineal.

1 *Introducción*

1.1 *Presentación*

El interés por la estimación de la pérdida de suelo aparece inicialmente en agronomía como consecuencia de la disminución de la capacidad productiva causada por la erosión. En el caso de los taludes de obras lineales, esa visión agronómica del problema se transforma, y el interés por cuantificar la erosión surge como consecuencia de la pérdida de la capa edáfica, desprendimientos de material, eventuales invasiones de la calzada, formación de cárcavas, deslizamientos de piel y aterramiento de los elementos de desagüe y drenaje, que aumentan el coste de conservación de las infraestructuras y que pueden convertir un mal menor en un problema de importancia superior.

Romana (1997) define la erosión en taludes de obras lineales como un fenómeno que abarca áreas reducidas y de elevada pendiente tratándose, generalmente, de superficies desnudas que presentan una forma de fallo superficial y progresiva (en contraposición al fallo masivo y súbito).

En los últimos años se han desarrollado principalmente dos tendencias en el estudio de la erosión. En primer lugar, son numerosos los estudios orientados hacia la elaboración de mapas de estados erosivos basados en sistemas de información geográfica (GIS) que permiten visualizar fácilmente aquéllas zonas potencialmente más sensibles a la erosión. Una segunda tendencia está basada en el estudio de las variables climáticas a nivel regional con el propósito de desarrollar índices de erosión que resulten fácilmente obtenibles y correlacionables con el índice de erosión pluvial desarrollado por Wischmeier en 1959, sin necesidad de recurrir a registros continuados de pluviógrafos, lo que supone un importante avance en la aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelo. En el caso de España, ambos estudios se han desarrollado principalmente en el este y el sur del territorio (Jordán y Bellifante, 2000; Pascual et al. 2001; Gallego et al, 2002; Rodríguez et al., 2004; Rodríguez, 2007).

Además, el estudio de la erosión debe tener en cuenta tanto cambios como hiperciclos climáticos, de tal forma que permita estimar la pérdida de suelo para un determinado período de años venideros.

1.2 *Objetivos*

Los objetivos que se pretenden alcanzar con el presente documento son los siguientes:

- Desarrollar una metodología que permita estudiar la pérdida de suelo en una zona puntual como es el talud de una obra lineal, a través de la adaptación que Israelsen et al. (1980) hicieron de la ecuación universal de pérdida de suelo.

- Proponer una clasificación que permita valorar cuantitativa y cualitativamente la pérdida de suelo en un talud de una obra lineal.

2 Estado del arte

2.1 Estimación de la pérdida de suelo

La ecuación universal de pérdida de suelo (*Universal Soil Loss Equation*, USLE) es fruto de más de veinte años de investigación durante los cuales se fueron añadiendo parámetros progresivamente, hasta que a finales de la década de 1950 el Servicio de Investigación de Agricultura de los Estados Unidos (*US Agricultural Research Service*) desarrolla la versión modificada definitiva, publicada inicialmente en 1961 (Wischmeier, W.H. y Smith, D.D. (1961). "A universal equation for predicting rainfall-erosion losses – An aid to conservation farming in humid regions"; citado por Laflen y Moldenhauer, 2003) y posteriormente en 1965 (Wischmeier y Smith, 1965) y 1978 (Wischmeier y Smith, 1978).

El objetivo que se pretendía lograr con dicha ecuación era estimar la pérdida de suelo originada en las grandes llanuras de los cinturones de trigo y maíz norteamericanos situadas al este de las Montañas Rocosas. Por lo tanto, se trataba de una visión agronómica del problema y, por extensión, del estudio de grandes áreas de terreno de baja pendiente (20% ó 5H:1V) y alta erosionabilidad, al menos durante un cierto período del año durante el cual el terreno quedaba desnudo.

La ecuación universal de pérdida de suelo presenta la siguiente estructura:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

Donde cada uno de los parámetros de la ecuación representa lo siguiente:

- A, tasa de pérdida de suelo por unidad de superficie ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$).
- R, índice de erosión pluvial ($hJ \cdot cm \cdot m^{-2} \cdot h^{-1} \cdot año^{-1}$ ó $MJ \cdot cm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot año^{-1}$).
- K, parámetro de erosionabilidad del suelo o erodabilidad ($t \cdot m^2 \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot hJ^{-1} \cdot cm^{-1}$ ó $t \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot cm^{-1}$).
- L, parámetro de longitud potencial de reguero (adimensional).
- S, parámetro de pendiente del reguero (adimensional).
- C, parámetro de naturaleza de la superficie cultivada (adimensional).
- P, parámetro de prácticas de conservación (adimensional).

En la revisión llevada a cabo en 1978 (Wischmeier y Smith, 1978), los autores indican que la ecuación de pérdida de suelo es un modelo de erosión empírico diseñado para estimar la pérdida de

suelo a largo plazo debida a la erosión laminar y en regueros poco desarrollados, aplicable a zonas de obras y otras condiciones diferentes a las de la agricultura pero que no calcula la aportación de la erosión en regueros desarrollados, barrancos, zonas inundables y cauces o vaguadas.

La adaptación llevada a cabo por Israelsen et al. (1980) se basa en la ecuación universal de pérdida de suelo pero simplificada y extendida a taludes de obras lineales para pendientes de hasta el 100% (1H:1V):

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot VM$$

Siendo:

- A, pérdida de suelo por unidad de superficie ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$).
- R, índice de erosión pluvial ($hJ \cdot cm \cdot m^{-2} \cdot h^{-1} \cdot año^{-1}$ ó $MJ \cdot cm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot año^{-1}$).
- K, parámetro de erosionabilidad del suelo o erodabilidad ($t \cdot m^2 \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot hJ^{-1} \cdot cm^{-1}$ ó $t \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot cm^{-1}$).
- LS, parámetro de geometría del talud (adimensional), el cual engloba los parámetros de longitud potencial y pendiente del reguero.
- VM, parámetro de control de la erosión (adimensional).

El índice de erosión pluvial representa una medida de la capacidad erosiva de la tormenta tipo y se determina a partir de la fórmula propuesta por Wischmeier (1959) como el producto de la energía cinética de la tormenta por la máxima intensidad en treinta minutos, oscilando su valor para España entre 30 y 550 (ICONA, 1988):

$$R = \sum_{i=1}^N \left[\frac{E \cdot I_{30}}{100} \right]_i$$

Donde E representa la energía cinética del aguacero, I_{30} representa la máxima intensidad de precipitación durante un intervalo de 30 minutos de tormenta y N el número de tormentas erosivas.

El parámetro de erosionabilidad representa la capacidad del suelo para resistir el poder erosivo de la lluvia, variando su valor entre 0,02 y 1 aproximadamente. Este parámetro se determina por medio de nomogramas, cartas de isoerosionabilidad, tablas estimativas o mediante la siguiente ecuación de regresión estadística (Wischmeier y Smith, 1978):

$$100 \cdot K = 10^{-4} \cdot 2,71 \cdot M^{1,14} \cdot (12 - a) + 4,20 \cdot (b - 2) + 3,23 \cdot (c - 3)$$

Donde M es un factor representativo de la textura (producto del porcentaje de partículas comprendidas entre 0,1-0,002 mm, limos y arenas muy finas, por el porcentaje de partículas

comprendidas entre 2-0,002 mm); a es el porcentaje de materia orgánica (cuanto mayor es la presencia de raíces, menor es la erosión sobre la superficie); b el parámetro de estructura del suelo y c el parámetro de permeabilidad del suelo (a mayor permeabilidad, mayor infiltración, menor escorrentía y, por tanto, menor erosión), todos ellos parámetros determinados para los 15-20 cm más superficiales del suelo.

El parámetro de geometría representa las diferentes combinaciones de longitud potencial de reguero (distancia entre el origen del flujo superficial y el lugar donde se produce el depósito) y pendiente de un talud que, añadidas a unos valores dados de índice de erosión pluvial y parámetro de erosionabilidad, permiten obtener el valor de la tasa de pérdida de suelo si no se actuara sobre la superficie (valor del parámetro de control de la erosión igual a la unidad).

Aunque existen diferentes ecuaciones que permiten determinar este parámetro, teniendo en cuenta que la erosión en los taludes de obras lineales presenta habitualmente la forma de regueros poco desarrollados y que la ecuación propuesta por Wischmeier y Smith en 1978 ha sido comprobada por Israelsen et al. (1980) en parcelas experimentales para las pendientes más elevadas, del orden de las existentes en los taludes de las obras lineales, esta fórmula es la que resulta aconsejable para el estudio de la pérdida de suelo en taludes de obras lineales:

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22,1} \right)^m \cdot (65,41 \cdot \sin^2(\theta) + 4,56 \cdot \sin(\theta) + 0,065)$$

Donde λ representa la longitud potencial de reguero, θ el ángulo del talud ($^\circ$) y m un factor que depende de la pendiente ($m=0,5$ para $s>5\%$).

El parámetro de control de la erosión presenta mayor incertidumbre y, al mismo tiempo, mayor influencia en la pérdida de suelo que va a experimentar un talud, siendo necesario generalmente recurrir a valores de tablas o gráficos obtenidos por medio de ensayos empíricos.

Entre las principales limitaciones de la ecuación adaptada de Israelsen et al. destacan su rango de validez para pendientes iguales o inferiores al 100% (1H:1V ó 45 $^\circ$), la obtención de valores medios a largo plazo de la pérdida de suelo sin entrar en el detalle de las tormentas inusuales, la consideración de la lluvia como único factor erosivo, no teniendo en cuenta otros factores como el viento o los ciclos hielo/deshielo, la consideración únicamente de erosión laminar y en regueros poco desarrollados, la incertidumbre sobre el parámetro de control de la erosión y la complejidad que entraña el cálculo del índice de erosión pluvial.

En relación a los límites admisibles de pérdida de suelo, las organizaciones FAO-PNUMA-UNESCO (1980) establecieron los umbrales de erosión para suelos agronómicos que se presentan en la tabla 1. Sin embargo, estos límites resultan inadecuados en el caso de los taludes de obras lineales, donde las elevadas pendientes originan pérdidas de suelo muy superiores. Como orden de

magnitud, Navarro (2002) indica que la pérdida de suelo en actividades constructivas puede variar desde las 125 t h⁻¹ año⁻¹ hasta las 600 t h⁻¹ año⁻¹.

Tabla 1. Umbrales de erosión para suelos agronómicos (FAO-PNUMA-UNESCO, 1980)

Pérdida de suelo (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	Grado de erosión hídrica
<10	ninguna o ligera
10-50	moderada
50-200	alta
>200	muy alta

Por su parte, el Inventario Nacional de Suelos de España califica los umbrales de erosión como se establece en la tabla 2.

Tabla 2. Calificación de la erosión en el Inventario Nacional de Suelos (2001)

Calificación de la erosión	Nivel erosivo	Erosión (t / Ha / año)
Nula	1	0-5
Ligera	2	5-10
Baja	3	10-25
Moderada-baja	4	25-50
Moderada-alta	5	50-100
Alta	6	100-200
Muy alta	7	>200

NOTA: se califican superficies naturales. En el plan se consideran otras superficies no erosionables, que son "Láminas de agua superficiales y humedales" y "Superficies artificiales".

Fuente: INES, Ministerio de Medio Ambiente, Gobierno de España (2001)

2.2 Sensibilidad a los parámetros de la ecuación

El estudio particularizado de los parámetros constituyentes de la ecuación, ha permitido determinar su rango de variación más frecuente para el caso de taludes de obras lineales en España, así como su influencia en el valor final de pérdida de suelo, tal y como se muestra en la tabla 3 y en la figura 5.

Tabla 3: Rango de variación de cada parámetro e influencia en la pérdida de suelo

Parámetro	Denom	Rango de variación	Variación A
Índice de erosión pluvial	R	30-550	1-18
Parámetro de erosionabilidad del suelo	K	0,02-1	1-50
Parámetro de geometría del talud	LS	5-40	1-8
Parámetro de control de erosión	VM	0,01-1	1-100
Parámetro de pérdida de suelo	A	0,03-22.000	1-720.000

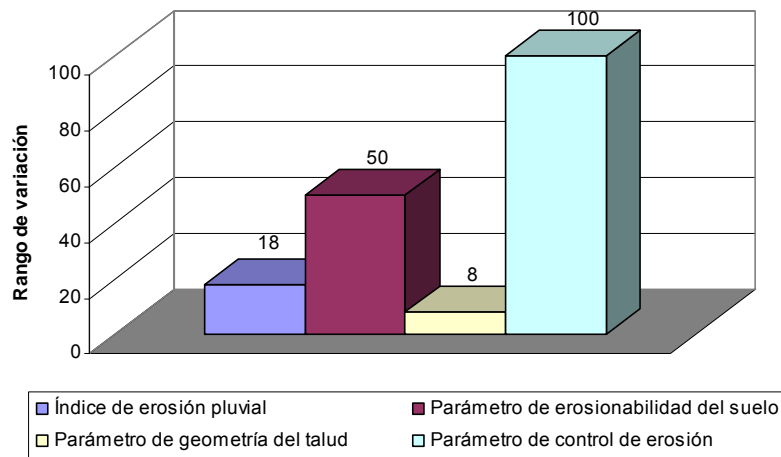


Fig. 5: Influencia de cada parámetro en la pérdida de suelo

Como puede observarse en la figura 5, el índice de erosión pluvial y el parámetro de geometría resultan los factores de menor influencia en el cálculo de la pérdida de suelo; por el contrario, el parámetro de erosionabilidad del suelo sí tiene una importancia relevante. Sin embargo, se da la circunstancia de que una vez definida la traza de la obra, tanto el índice de erosión pluvial como el parámetro de erosionabilidad del suelo se encuentran fijados de cara al estudio, por lo que no admiten variación alguna.

En cuanto al parámetro de geometría del talud, si bien es cierto que la altura viene fijada por el desnivel respecto a la rasante, la pendiente sí admite variaciones que van a producir modificaciones sustanciales en la pérdida de suelo.

El parámetro de control de la erosión resulta el que ejerce una mayor influencia en la pérdida de suelo que va a experimentar un talud, aunque también es el parámetro de la ecuación que presenta mayor incertidumbre.

3 Metodología

Para mejorar el estudio de la pérdida de suelo en un talud de una obra lineal son necesarios una serie de pasos previos que permitan estudiar el caso de una zona puntual con fines distintos a los agronómicos:

- Desarrollar parámetros específicos, adicionales a la tasa de pérdida de suelo, que reflejen con mayor claridad la erosión en el caso particular de un talud de una obra lineal.
- Desarrollar una metodología basada en el estudio individualizado de cada uno de los estratos que constituyen el talud.
- Determinar cuáles son los elementos de la ecuación propuesta por Israelsen et al (1980), a partir de su rango de variación en España, que tienen mayor influencia en la pérdida de suelo en un talud, de cara a minimizar la erosión sufrida.
- Determinar una relación entre las pérdidas de suelo obtenidas en suelos agronómicos y en taludes, valorada principalmente a través del parámetro de geometría, que permita aplicar los umbrales de erosión fijados por FAO-PNUMA-UNESCO (1980) a los taludes de obras lineales.

4 Mejoras en la estimación de la erosión

4.1 Parámetros específicos del estudio de taludes

La adaptación de la ecuación universal de pérdida de suelo llevada a cabo por Israelsen et al. (1980) permite obtener fácilmente un valor medio de la tasa de pérdida de suelo en el caso de taludes constituidos por un único material con pendiente constante. Sin embargo, no resulta de aplicación directa para el estudio de la erosión en aquellos taludes, denominados en este documento como **taludes compuestos**, que cumplen una o más de las condiciones siguientes:

- Están formados por diferentes estratos, con materiales de diferente naturaleza (distinto parámetro de erosionabilidad).
- Existen pendientes diferentes dentro del mismo talud (distinto parámetro de geometría).
- Existen zonas con diferentes tratamientos de la superficie (distinto parámetro de control de la erosión).

El concepto de talud compuesto es equivalente al de pendiente irregular definido por Foster y Wischmeier (Foster, G.R. y Wischmeier, W.H. (1974). "Evaluating irregular slopes for soil loss prediction"; citado por Israelsen et al., 1980) pero considerando además la posibilidad de disponer distintos tratamientos de la superficie a lo largo del talud.

En estos casos, la ecuación permite obtener una tasa de pérdida de suelo potencial independiente para cada estrato, expresada en unidades de masa por unidad de superficie. Sin embargo, tal y como indican los propios autores, en taludes compuestos no tiene sentido hablar de tasa de pérdida de suelo potencial, por resultar ésta una magnitud no aditiva.

Al expresar la pérdida de suelo como una unidad de masa dividida entre una unidad de superficie, sería necesario disponer de la misma superficie de cada capa dentro del mismo talud para poder sumar dichos valores, afirmación que generalmente no se cumple. Sin embargo, multiplicando la tasa de pérdida de suelo por la longitud de cada capa, todos los valores quedan referidos a la misma unidad de longitud (un metro de traza), resultando en este caso una magnitud aditiva.

Por esta razón, para el estudio de taludes compuestos (caso frecuente en obras lineales), es preciso definir magnitudes adicionales a la tasa de pérdida de suelo (A) que representen, de una manera clara, la magnitud del problema y que se definen a continuación:

- A' , pérdida de suelo efectiva ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$). Representa la pérdida de material expresada en unidades de masa por metro lineal de talud en la dirección de la traza. Se obtiene como el producto de la tasa de erosión de cada material por su longitud potencial de reguero. El

cambio de unidad de masa se debe a un mejor ajuste al orden de magnitud de los valores obtenidos:

$$A' = 0,1 \cdot A \cdot l$$

- A_v , pérdida de suelo volumétrica ($m^3 \cdot m^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$). Representa la pérdida de material expresada en unidades de volumen por metro lineal de talud en la dirección de la traza. Se obtiene al dividir la pérdida de suelo efectiva por la densidad del material expresada en kg/m^3 :

$$A_v = \frac{A'}{\gamma} = 0,1 \cdot \frac{A \cdot l}{\gamma}$$

La definición de este parámetro está íntimamente ligada a la necesidad de conservación del talud puesto que ofrece una valoración de la cantidad de material que va a ser necesario retirar de los elementos del drenaje longitudinal por metro de traza.

- e , pérdida de espesor de suelo ($mm \cdot m^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$). Representa la pérdida de espesor de material por metro lineal de talud en la dirección de la traza. Se obtiene al dividir la pérdida de suelo volumétrica entre la longitud de reguero y una anchura unitaria, con el correspondiente ajuste de unidades, lo que es equivalente a dividir la tasa de pérdida de suelo entre la densidad del material:

$$e = 1000 \cdot \frac{A_v}{l} = 1000 \cdot \frac{A'}{\gamma \cdot l} = 1000 \cdot 0,1 \cdot \frac{A \cdot l}{\gamma \cdot l} = 100 \cdot \frac{A}{\gamma}$$

4.2 Estudio de taludes compuestos

El caso frecuente de taludes de obras lineales compuestos por varios estratos requiere proceder de una manera más compleja que el caso de un único material con inclinación constante, para el cual resulta de aplicación directa la ecuación de Israelsen et al. En el primero de los casos, el estudio puede enfocarse desde dos ópticas diferentes.

En primer lugar, puede plantearse el estudio individual de zonas homogéneas, entendiendo por zona homogénea aquella que tiene la misma naturaleza de material, misma pendiente y mismo tratamiento de su superficie. En segundo lugar, puede acometerse el estudio del talud en su conjunto, ignorando las especificidades de cada capa constituyente del talud.

En el apéndice 1 se incluye un ejemplo comparativo empleando las dos metodologías que se describen a continuación.

4.2.1 Estudio individual de zonas homogéneas

El estudio pormenorizado de cada zona homogénea que constituye el talud tiene por objetivo determinar la pérdida de suelo efectiva de cada capa, de tal manera que sea posible identificar aquellos horizontes que resultan más susceptibles a la erosión.

A continuación se propone una metodología válida para el estudio de cualquier talud compuesto:

1. Dividir el talud en n zonas homogéneas, tal y como se definieron previamente.
2. Determinar los parámetros de erosionabilidad del suelo, geometría del talud y control de la erosión para cada zona (el índice de erosión será el mismo ya que se trata de obras localizadas).

En el caso general de un talud compuesto por n capas con materiales de diferente naturaleza, distinta geometría del talud y distinto tratamiento de la superficie, el parámetro de geometría del talud de cada horizonte se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$LS_j = \frac{LS_{2j}(\lambda_{2j}, s_j) \cdot \lambda_{2j} - LS_{1j}(\lambda_{1j}, s_j) \cdot \lambda_{1j}}{l_j}$$

siendo:

LS_j , el valor del parámetro de geometría para el estrato j.

$LS_{2j}(\lambda_{2j}, s_j)$, el valor del parámetro LS tomando $l = \lambda_{2j}$ y $s = s_j$.

$LS_{1j}(\lambda_{1j}, s_j)$, el valor del parámetro LS tomando $l = \lambda_{1j}$ y $s = s_j$.

λ_{2j} la distancia entre el origen de la escorrentía y el punto más bajo del tramo j.

λ_{1j} la distancia entre el origen de la escorrentía y el punto más alto del tramo j.

s_j , la pendiente de la capa j.

l_j , la longitud de la capa j.

3. Valorar la pérdida de suelo en base a los siguientes parámetros definidos anteriormente:
 - a) A_j , tasa de pérdida de suelo. Una vez determinada la tasa de pérdida de suelo de cada horizonte (A_j), la tasa de pérdida del talud en su conjunto (\bar{A}) no resulta la suma de las tasas individuales por no ser ésta una magnitud aditiva, por lo que es necesario proceder a efectuar una suma ponderada por la longitud de cada capa:

$$A_j = R \cdot K_j \cdot LS_j \cdot VM_j$$

$$\bar{A} = \frac{1}{L} \cdot \sum_{j=1}^n A_j \cdot l_j = \frac{1}{L} \cdot \sum_{j=1}^n R \cdot K_j \cdot LS_j \cdot VM_j \cdot l_j$$

- b) A' , pérdida de suelo efectiva. En este caso sí se trata de una magnitud aditiva, por lo que la pérdida total del talud será la suma de cada capa:

$$A' = \sum_{j=1}^n A'_j \quad A'_j = 0,1 \cdot R \cdot K_j \cdot LS_j \cdot VM_j \cdot l_j$$

- c) A_v , pérdida de suelo volumétrica. Al igual que el caso anterior, se trata de una magnitud aditiva, determinada de la siguiente forma:

$$A_v = \sum_{j=1}^n A_{vj} \quad A_{vj} = \frac{A'_j}{\gamma_j}$$

- d) e , pérdida de espesor de suelo. No se trata de una magnitud aditiva, aunque sí es posible determinar un valor conjunto, mediante la suma ponderada por la longitud de cada capa:

$$e_j = 1000 \cdot \frac{A_{vj}}{l_j} = 100 \cdot \frac{A'_j}{\gamma_j}$$

$$\bar{e} = \frac{1}{L} \cdot \sum_{j=1}^n e_j \cdot l_j$$

4.2.2 Estudio del talud conjunto

El estudio de la pérdida de suelo del talud en su conjunto, ofrece una visión general del comportamiento de la obra de tierra frente a la erosión, sin profundizar en el comportamiento individual de cada material.

En primer lugar, es necesario determinar el parámetro de geometría de cada capa a partir de la fórmula expuesta en el caso anterior:

$$LS_j = \frac{LS_{2j}(\lambda_{2j}, s_j) \cdot \lambda_{2j} - LS_{1j}(\lambda_{1j}, s_j) \cdot \lambda_{1j}}{l_j}$$

La pérdida de suelo del talud en su conjunto se obtiene de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\bar{A} = \frac{1}{L} \cdot \sum_{j=1}^n R \cdot K_j \cdot \frac{LS_{2j} \cdot \lambda_{2j} - LS_{1j} \cdot \lambda_{1j}}{l_j} \cdot VM_j \cdot l_j$$

Existe otra formulación para determinar la tasa de pérdida de suelo del talud en su conjunto, consistente en sustituir en el parámetro de geometría del talud, el factor correspondiente a la longitud potencial de reguero (Foster, G.R. y Wischmeier, W.H. (1974). "Evaluating irregular slopes for soil loss prediction"; citado por Israelsen et al., 1980).

Sustituyendo $LS = L \cdot S = \left[\frac{\lambda}{22,13} \right]^m \cdot S$ y eliminando l_j en la expresión anterior, quedaría:

$$\bar{A} = \frac{1}{L} \cdot \sum_{j=1}^n R \cdot K_j \cdot \left[\left(\frac{\lambda_{2j}}{22,13} \right)^m \cdot S_j \cdot \lambda_{2j} - \left(\frac{\lambda_{1j}}{22,13} \right)^m \cdot S_j \cdot \lambda_{1j} \right] \cdot VM_j$$

$$\bar{A} = \frac{R}{(22,13)^m \cdot L} \cdot \sum_{j=1}^n K_j \cdot S_j \cdot VM_j \cdot [\lambda_{2j}^{m+1} - \lambda_{1j}^{m+1}]$$

En el caso particular de un talud compuesto por n capas del mismo material, es decir, con el mismo parámetro de erosionabilidad, e igual tratamiento de la superficie pero inclinaciones de talud diferentes, se puede calcular un parámetro de geometría del talud compuesto o equivalente de la siguiente forma (Wischmeier y Smith, 1978):

$$\overline{LS} = \sum_{j=1}^n \frac{LS_{2j}(\lambda_{2j}, s_j) \cdot \lambda_{2j} - LS_{1j}(\lambda_{1j}, s_j) \cdot \lambda_{1j}}{\lambda_{2j}}$$

Obteniendo la tasa de pérdida de suelo para el talud en su conjunto de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\bar{A} = R \cdot K \cdot \overline{LS} \cdot VM$$

Una vez determinada la tasa de pérdida de suelo, se calculan el resto de parámetros para el talud conjunto, a partir de las siguientes expresiones:

$$A' = 0,1 \cdot \bar{A} \cdot L$$

$$A_v = \frac{A'}{\gamma} = 0,1 \cdot \frac{\bar{A} \cdot L}{\gamma}$$

$$\bar{e} = 1000 \cdot \frac{A_v}{l} = 100 \cdot \frac{\bar{A}}{\gamma}$$

Como recomendación, desde este documento se insta a estudiar cualquier talud distinto a un único material con la misma inclinación y tratamiento de la superficie en toda su longitud, como un talud compuesto, de tal manera que pueda determinarse la pérdida de suelo debida a cada horizonte así como aquéllas zonas que resultan críticas de cara a optimizar los tratamientos que disminuyan la erosión del talud.

4.3 Establecimiento de umbrales de gravedad de la erosión para taludes de obras lineales

En el caso del estudio de la erosión en taludes, es preciso realizar un enfoque que amplíe los rangos de erosión admisible. Debido a la falta de información a este respecto, en este apartado se desarrolla una metodología que permite fijar unos umbrales de gravedad de la erosión que puede sufrir un talud, junto con una clasificación cualitativa. En todo caso, cabe mencionar precedentes publicados de cuantificación de la erosión, en las tablas siguientes (tablas 4 a 6), tomadas de Salsa (1996), Cerdá (2001) y de elaboración propia.

Tabla 4. Erosión en superficies naturales vegetadas. Salas (1996)

Cubierta vegetal o uso del suelo	Tasa de erosión (Ton ha-1 año-1)
Encinar	0,05
Hayedo	0,03
Pinar con gramíneas	0,01
Matorral	0,00
Encinar	0,00
Parcelas quemadas	0,36
Parcelas taladas	0,04
Bosque	0,02

Nota: Tasas de erosión medidas por Sala (1996) en Cataluña bajo distintas cubiertas vegetales. El suelo puede recuperarse de estas pérdidas. Los datos referentes a las parcelas taladas y quemadas informan de la acción del hombre sobre las tasas de erosión.

Tabla 5. Erosión en superficies vegetadas con acción antrópica. Cerdá (2001)

Autor	Año	Comunidad Autónoma	Tasas de erosión Ton ha-1 año-1	Uso del suelo
Edeso <i>et al.</i> ,	1998	País Vasco	13,98	Tala convencional
Edeso <i>et al.</i> ,	1998	País Vasco	34,95	Tala con extacción
Edeso <i>et al.</i> ,	1998	País Vasco	59,54	Tala con laboreo
Marqués	1991	Cataluña	24,00	Campos de cultivo
García-Ruiz	1996	Aragón	10,00	Artica
García-Ruiz	1996	Aragón	5,20	Cereal fertilizado
García-Ruiz	1996	Aragón	15,50	Barbecho
García-Ruiz	1996	Aragón	1,10	Matorral denso
Rodríguez. Mart.-Conde	1996	Galicia	13,42	Cultivo

Nota: Tasas de erosión medidas en distintas comunidades autónomas y por distintos autores con usos del suelo que favorecen la erosión antrópica o acelerada. Los datos de García Ruiz (1996) sobre las tasas de erosión en matorral denso respecto a otros usos del suelo ilustran el efecto negativo de algunos usos del suelo.

Tabla 6. Erosión estimada o medida en taludes de obras lineales mediante la USLE.

Autores	Año	Comunidad Autónoma	Tasas de erosión Ton/ha/año
Navarro y San Martín (2000)	2000	Palencia	Min 79,24 Máx 464,70
Navarro y Vélez (2005)	2004	Asturias	USLE: 455,5
Navarro <i>et al.</i> (2006)	2006	Asturias	Medición: 586,5 16% erosión laminar 84% erosión en regueros

Fuente: Elaboración propia

Como puede verse, los valores propuestos para umbrales por FAO-PNUMA y el INES son inapropiados para las erosiones en taludes, ya que los resultados de estas superficies resultan muy superiores al umbral máximo de ambos criterios. De hecho, los umbrales del INES resultan de una gradación dentro de los rangos de FAO, y lo que es preciso es un umbral superior. Se concluye que las tablas mencionadas son apropiadas para cultivos y procesos naturales graduales, excluyendo

fenómenos como volcanes, tornados, tormentas torrenciales y terremotos, pero, para taludes, es preciso ampliar esta tabla por encima.

Para fijar los umbrales de la tasa de pérdida de suelo, se han tomado como base los valores propuestos por las organizaciones FAO-PNUMA-UNESCO (1980) para suelos agronómicos, multiplicándolos por un coeficiente que tenga en cuenta la relación entre los parámetros de geometría de un talud (con pendientes frecuentes entre 50-100%) y de un suelo con fines agrícolas (con pendientes máximas entre 5-10%). De acuerdo con la tabla 3, esta relación se encuentra en torno a 11; sin embargo, se ha decidido emplear el valor 10 con el propósito de obtener rangos lo más simplificados posibles, al tiempo que este valor permite una rápida correspondencia con los valores sobradamente conocidos que fueron establecidos por FAO-PNUMA-UNESCO.

Para determinar los umbrales del parámetro de pérdida de suelo efectiva, se han tomado como base los valores de la tasa de pérdida de suelo, expresados en $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$, se ha efectuado el cambio de unidades a $kg \cdot m^{-2} \cdot año^{-1}$ mediante el correspondiente factor de 0,1 y se ha multiplicado por una longitud media. Esta longitud media debe resultar representativa de la longitudes usuales en los taludes de obras lineales, por lo que ha sido estimada como la media entre los valores obtenidos para un rango de alturas de talud entre 5 y 10 m, con una inclinación variable entre 2H:1V y 1H:1,5V, resultando un valor de 13 m de acuerdo con la tabla 7.

Tabla 6. Relación entre el parámetro de geometría de suelos agronómicos y de taludes

H (m)	s (%)	LS	Relación
5	5,0	0,97	11,1
	50,0	10,79	
	6,7	1,21	12,0
	66,7	14,50	
	10,0	1,76	11,6
	100,0	20,35	
10	5,0	1,37	11,1
	50,0	15,27	
	6,7	1,71	12,0
	66,7	20,51	
	10,0	2,49	11,6
	100,0	28,78	
15	5,0	1,68	11,1
	50,0	18,70	
	6,7	2,10	12,0
	66,7	25,11	
	10,0	3,04	11,6
	100,0	35,24	

Tabla 7. Determinación de la longitud media en taludes de obras lineales

Talud (H:V)	Pendiente	Altura de talud (m)					
		5	6	7	8	9	10
2:1	50,0%	11,2	13,4	15,7	17,9	20,1	22,4
1,75:1	57,1%	10,1	12,1	14,1	16,1	18,1	20,2
1,5:1	66,7%	9,0	10,8	12,6	14,4	16,2	18,0
1,25:1	80,0%	8,0	9,6	11,2	12,8	14,4	16,0
1:1	100,0%	7,1	8,5	9,9	11,3	12,7	14,1
1:1,5	150,0%	6,0	7,2	8,4	9,6	10,8	12,0

En cuanto a la pérdida de espesor, se ha tomado como base la tasa de pérdida de suelo, expresada en $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ y se ha dividido de una densidad media, estimada en 1700 kg/m^3 , con el correspondiente factor de ajuste de unidades 10^2 .

De esta forma, a partir de los valores obtenidos para la tasa de pérdida de suelo, la pérdida de suelo efectiva y la pérdida de espesor, en la tabla 5 se propone una clasificación tanto cuantitativa como cualitativa de la erosión que puede experimentar un talud de una obra lineal. Junto con esta tabla, la figura 6 permite calificar fácilmente el grado de erosión hídrica de acuerdo con los valores obtenidos para la pérdida de suelo efectiva y la pérdida de espesor.

Hay que destacar que, puesto que en la clasificación propuesta en la tabla 8 y figura 6, la pérdida de suelo efectiva se ha definido para un talud tipo de 13 m de longitud, cuando la longitud del talud o estrato considerado sea menor de 13 m, el factor determinante será la pérdida de espesor, mientras que en caso contrario, el factor determinante será la pérdida de suelo efectiva.

Tabla 8. Umbrales de erosión para el estudio de taludes de obras lineales

Tasa pérdida de suelo	Pérdida de suelo efectiva	Pérdida de espesor	Grado de erosión hídrica
A ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)	A' ($kg \cdot m^{-1} \cdot año^{-1}$)	e ($mm \cdot m^{-1} \cdot año^{-1}$)	
<50	<65	<3	Ninguno o leve
50-200	65-260	3-12	Ligero
200-500	260-650	12-30	Moderado
500-1000	650-1300	30-60	Alto
1000-2000	1300-2600	60-120	Muy alto
>2000	>2600	>120	Excesivo

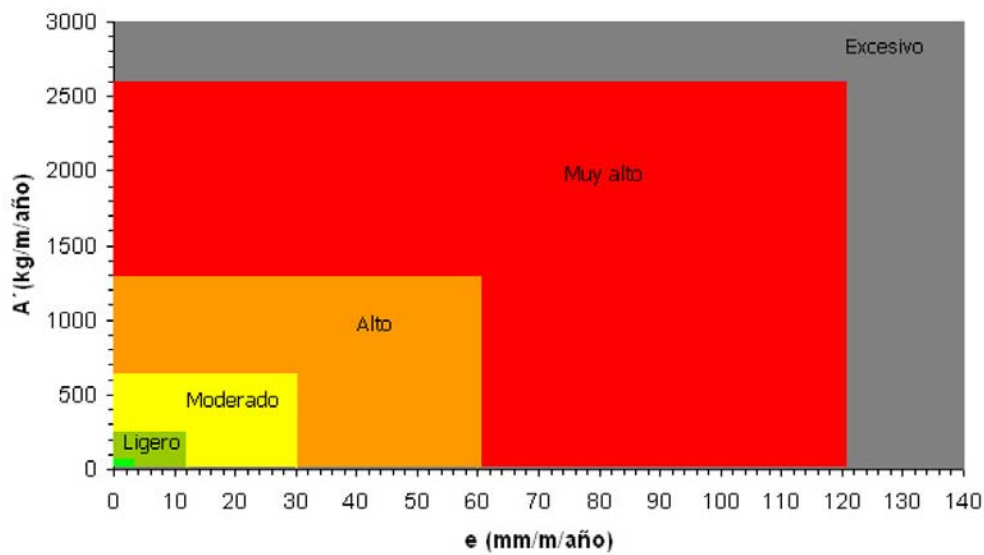


Fig. 6: Determinación del grado de erosión hídrica en taludes de obras lineales

De acuerdo con los valores recogidos en la tabla 5 y en la figura 6, se propone que en ninguna de las capas que constituyen un talud el grado de erosión exceda de ligero, de tal manera que el grado de erosión del talud considerado en su conjunto no exceda de moderado.

En todo caso, esta clasificación constituye una propuesta que deberá validarse en base a la gravedad de los deterioros observados en taludes de obras lineales, en los cuales se determinen los valores de las magnitudes que definen la pérdida de suelo, principalmente pérdida de suelo efectiva y pérdida de espesor.

4.4 Medidas a adoptar

Una forma de elegir el tipo de tratamiento más adecuado es determinar la relación existente entre el poder erosivo del clima, valorado a través del índice de erosión pluvial, y la resistencia del material, valorada a través del parámetro de erosionabilidad del suelo, que son los parámetros fijados por la determinación de la traza. Los parámetros de geometría y control de erosión no se han considerado debido a que son las variables que quedan libres para actuar sobre la pérdida de suelo. De esta manera, es posible representar un gráfico con los valores más usuales de R y K en el cual se dan unas pinceladas sobre cuáles deben ser las actuaciones a considerar en función de la combinación de los mencionados parámetros:

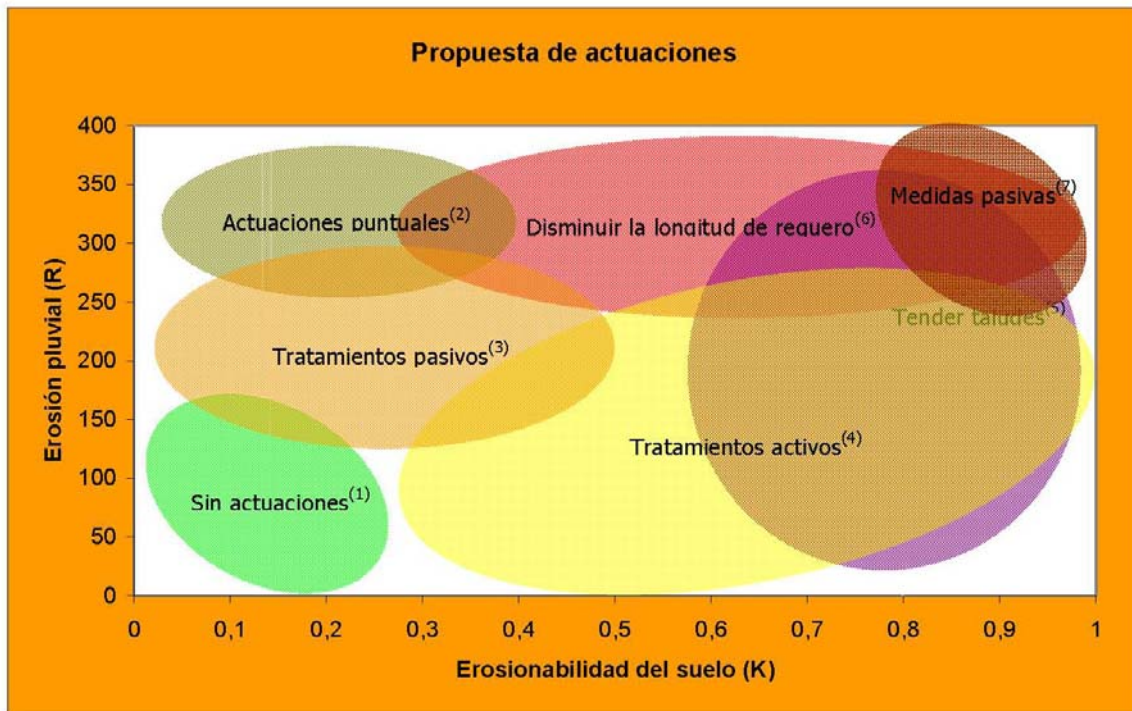


Fig. 7: Propuesta de actuaciones en función de la erosión pluvial y la erosionabilidad del suelo.
Fuente: Elaboración propia

⁽¹⁾ Para una altura y una pendiente del talud usuales, el grado de erosión de esta zona es moderada como máximo, por lo que puede no ser necesario actuar.

⁽²⁾ Cuando el material presenta buena resistencia a la erosión pero el clima es muy agresivo, resulta útil actuar de manera puntual sobre los regueros que aparezcan en el talud. Como tratamientos puntuales pueden disponerse fajinas o rellenar los regueros con material granular.

⁽³⁾ En taludes formados por materiales resistentes a la erosión en climas de erosionabilidad media, las medidas pasivas permiten reducir la erosión a un bajo coste y, en general, con un menor coste de conservación. Dentro de estas medidas de incluyen:

- Colocar cunetas o bordillos que recogen el agua en la coronación del talud.
- Disponer bermas intermedias.
- Disponer bermas exteriores.
- Barreras de recepción de sedimentos.
- Pantallas dinámicas, evitan la caída de bloques de piedra a la calzada pero no reducen la pérdida de suelo.
- Sobredimensionar los elementos del drenaje longitudinal.
- Sobredimensionar los elementos del desagüe transversal

⁽⁴⁾ Cuando aparecen materiales poco resistentes a la erosión, o con pérdidas de suelo elevadas, los tratamientos activos ofrecen mayores reducciones de la pérdida de suelo. Dentro de estos tratamientos destacan:

- Hidrosiembras.
- Plantaciones.
- Geotextiles no resistentes.
- Riegos de estabilización físico-química.
- Mulches.
- Suavizar el talud en cabeza.
- Mallas de cable.
- Enrejados de hormigón.
- Geotextiles tridimensionales.
- Mallas de triple torsión.

⁽⁵⁾ En materiales muy erosionables conviene reducir la pendiente ya que, a pesar de aumentar la longitud potencial de reguero, el parámetro de geometría disminuye.

⁽⁶⁾ Cuando existen materiales muy erosionables en climas agresivos, la prioridad debe ser reducir la longitud potencial de reguero.

⁽⁷⁾ En un caso extremo, ante la imposibilidad de obtener una mayor reducción de la erosión tras adoptar una serie de medidas activas, hay que recurrir a medidas pasivas tendentes a contener los materiales erosionados.

Tasa pérdida de suelo A (t/ha año)	Pérdida de suelo efectiva A' (kg/m² año)	Pérdida de espesor e (mm/m año)	Grado de erosión hídrica	Medidas a adoptar	Aplicación
<50	<90	<3	Ninguno o leve	Hidrosiembra	R,S
				Sobredimensionar los elementos de drenaje longitudinal	R,S
50-200	90-360	3-12	Ligero	Hidrosiembra	R,S
				Sobredimensionar los elementos de drenaje longitudinal	R,S
				Plantaciones arbustivas	R,S
				Fajinas	S
				Geotextiles no resistentes	R,S
				Riegos para estabilización físico-química	S
				Mulches	S
200-500	360-900	12-30	Moderado	Hidrosiembra	R,S
				Sobredimensionar los elementos de drenaje longitudinal	R,S
				Plantaciones arbustivas	R,S
				Fajinas	S
				Geotextiles no resistentes	R,S
				Riegos para estabilización físico-química	S
				Mulches	S
				Suavizar el talud en cabeza	R,S
				Cuneta en cabeza de desmonte/Bordillo en cabeza relleno	R,S
				Berma exterior en borde de calzada	R,S
				Mallas de cable	R
Enrejados de hormigón	R,S				
500-1000	900-1800	30-60	Alto	Hidrosiembra	R,S
				Sobredimensionar los elementos de drenaje longitudinal	R,S
				Plantaciones arbustivas	R,S
				Fajinas	S
				Geotextiles no resistentes	R,S
				Riegos para estabilización físico-química	S
				Mulches	S
				Suavizar el talud en cabeza	R,S
				Cuneta en cabeza de desmonte/Bordillo en cabeza relleno	R,S
				Berma exterior en borde de calzada	R,S
				Mallas de cable	R
				Enrejados de hormigón	S
				Geotextiles tridimensionales	R,S
				Cuneta en talud	R,S
Sobredimensionar las obras de desagüe transversal	R,S				
1000-2000	1800-3600	60-120	Muy alto	Hidrosiembra	R,S
				Sobredimensionar los elementos de drenaje longitudinal	R,S
				Plantaciones arbustivas	R,S
				Fajinas	S
				Geotextiles no resistentes	R,S
				Riegos para estabilización físico-química	S
				Mulches	S

Tasa pérdida de suelo A (t/ha año)	Pérdida de suelo efectiva A' (kg/m ² año)	Pérdida de espesor e (mm/m año)	Grado de erosión hídrica	Medidas a adoptar	Aplicación
				Suavizar el talud en cabeza	R,S
				Cuneta en cabeza de desmonte/Bordillo en cabeza relleno	R,S
				Disponer berma exterior	R,S
				Mallas de cable	R
				Enrejados de hormigón	S
				Geotextiles tridimensionales	R,S
				Cuneta en talud	R,S
				Sobredimensionar las obras de desagüe transversal	R,S
				Hormigón proyectado (gunita)	R,S
				Malla de triple torsión	R
				Pantallas dinámicas	R
				Colocar barreras de recepción de sedimentos	R,S
				Colocar muros (gaviones, jardinera, suelo reforzado, tierra armada)	R,S
>2000	>3600	>120	Excesivo	Rediseñar la tipología del talud: - Geometría (altura y pendiente) - Naturaleza del material	R,S

Tabla 9. Umbrales de erosión y tratamientos. Fuente: Elaboración propia.

Nota: R, representa roca, mientras que S representa suelo.

5 Ejemplo de estudio de un talud compuesto

Con el objetivo de poner de manifiesto las diferencias entre el estudio de un talud en su conjunto o de sus zonas homogéneas, se considera el caso de un talud de 8 m de altura en una zona caracterizada por un índice de erosión pluvial igual a 100, en el cual en los 5 m más superficiales aparece un material caracterizado por un parámetro de erosionabilidad de 0,5 y un talud 1,5H:1V y en los 3 m más profundos aparece un material caracterizado por un parámetro de erosionabilidad de 0,4 y un talud 2H:1V.

El estudio del talud en su conjunto proporciona los resultados presentados en la tabla 10.

Tabla 10. Resultados del estudio del talud en conjunto

Capa	R	K	LS	VM	A (t/ha/año)	l (m)	A' (kg/m ² año)	A _v (m ³ /m/año)	e (mm/m/año)
Compuesto	100	0,453	15,56	1,0	705	15,72	1.109	0,65	41

A la vista de los valores obtenidos, se puede decir que la tasa de pérdida de suelo media es de 705 t ha⁻¹año⁻¹, la pérdida de suelo efectiva es de 1.109 kg m⁻²año⁻¹ y la pérdida de espesor media de 41 mm. Sin embargo, los resultados obtenidos no permiten valorar si la erosión experimentada por

ambos materiales es la misma o si, por el contrario, uno de los materiales es responsable de la mayor parte de la erosión.

En base a los parámetros que constituyen el talud, se podría pensar que la capa crítica va a ser la inferior por su condición de base del talud; por otra parte, la capa superior podría resultar crítica por estar constituida por un material más erosionable y un talud más vertical.

Para comprobar cuál es la capa crítica, se procede al estudio individual de las zonas homogéneas del talud. Como se observa en la tabla 11, la capa superior experimenta una pérdida de suelo efectiva notablemente mayor que la capa inferior. De esta forma, esta metodología ha permitido evaluar la pérdida de suelo de cada componente del talud de forma independiente e identificar la zona más afectada por la erosión.

Tabla 11. Resultados del estudio individual de las zonas homogéneas del talud

Capa	R	K	LS	VM	A (t/ha/año)	l (m)	A' (kg/m/año)	A _v (m ³ /m/año)	e (mm/m/año)
1	100	0,500	14,50	1	725	9,01	654	0,38	43
2	100	0,400	16,98	1	679	6,71	456	0,27	40
					705	15,72	1.109	0,65	41

6 Conclusiones

El estudio de la erosión en taludes compuestos, caracterizados por la presencia de materiales de naturaleza diferente, pendientes variables y distintos tratamientos de su superficie (caso frecuente en obras lineales), requiere definir magnitudes adicionales a la tasa de pérdida de suelo ($A=R \cdot K \cdot LS \cdot VM$) que representen, de una manera clara, la magnitud del problema y que se han denominado A', pérdida de suelo efectiva ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$); A_v, pérdida de suelo volumétrica ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) y e, pérdida de espesor ($\text{mm} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$).

Aunque el estudio de la erosión puede llevarse a cabo considerando el talud en su conjunto mediante la obtención de valores medios, el estudio de las capas homogéneas que constituyen el talud permite determinar los horizontes críticos y optimizar las actuaciones de conservación necesarias sobre la superficie.

A partir de las magnitudes definidas, se ha propuesto una clasificación cuantitativa y cualitativa basada en los umbrales fijados por las organizaciones FAO-PNUMA-UNESCO, que deberá validarse en base a medidas llevadas a cabo en taludes reales.

7 Referencias

1. Arnoldus, H.M.J. (1980). An Approximation of the Rainfall Factor in the Universal Soil Loss Equation. En Boodt, M.de y Gabriels, D. *Assessment of Erosion*. John Wiley & Sons, Inc, New Cork (USA), pp 127-132.
2. Cerdá, A. (2001). "La erosión del suelo y sus tasas en España". Revista ecosistemas Año X, Nº3 / 2001 Septiembre - Diciembre
3. Colotti, E. (2004). *Aplicabilidad de los datos de lluvia horaria en el cálculo de la erosidad*. Fondo Editorial de Humanidades y Educación. Departamento de Publicaciones. Universidad Central de Venezuela. Caracas (Venezuela).
4. FAO-PNUMA-UNESCO. (1980). *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos*. FAO, Roma.
5. Ferro, V; Porto, P. y Yu, B. (1999). A comparative study of rainfall erosivity estimation for southern Italy and southeastern Australia. *Hydrological Sciences Journal*. Vol. 44-1, pp 3-24.
6. Fournier, F. (1960). *Climat et érosion. La relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques*. Presses Universitaires de France, París.
7. Gallego, F.J; Cobo, M.D; Navarrete, L.J; Valderrama, J.M. y Jiménez, R. (2002). *Determinación de riesgos de erosión en la comarca olivarera de "Sierra Mágina" (Jaén) mediante técnicas SIG y teledetección*. XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica, junio, Santander (España).
8. ICONA. (1988). *Agresividad de la lluvia en España. Valores del factor R de la ecuación universal de pérdidas de suelo*. Servicio de publicaciones del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.
9. Israelsen, C.E.; Clyde, C.G.; Fletcher, J.E.; Israelsen, E.K. Haws, F.W.; Packer, P.E. y Farmer, E.E. (1980). Erosion Control during Highway Construction. Manual on Principles and Practices. *National Cooperative Highway Research Program*. Report 221. Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C.
10. Jordán, A. y Bellifante, N. (2000). Cartografía de la erosividad de la lluvia estimada a partir de datos pluviométricos mensuales en el Campo de Gibraltar (Cádiz). *Edafología*. Vol 7-3, septiembre, pp 83-92.
11. Laflen, J.M. y Moldenhauer, W.C. (2003). *Pioneering Soil Erosion Prediction: The USLE Story*. Special Publication No. 1. World Association of Soil and Water Conservation, Beijing (China).
12. Liu, B.Y; Nearing, M.A. y Risse, L.M. (1994). Slope Gradient Effects on Soil Loss for Steep Slopes. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. Vol 37-6, pp 1835-1840.

13. Moore, I.D. y Burch, G.J. (1986). Physical basis of the length-slope factor in the universal Soil Loss Equation. *Soil Science Society American Journal*. No. 50, pp 1294-1298.
14. Ministerio de Medio Ambiente (2001). Inventario Nacional de Suelos 2002-2012. <http://www.mma.es/portal/secciones/biodiversidad/inventarios/ines/>
15. Navarro, J. (2002). *Control de la erosión en desmontes originados por obras de infraestructura viaria: Aplicación al entorno de Palencia capital*. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid.
16. Nearing, M.A. (1997). A Single, Continuous Function for Slope Steepness Influence on Soil Loss. *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 61, No. 3, May-June.
17. Oliver, J.E. (1980). Monthly Precipitation Distribution: A Comparative Index. *Professional Geographer*. Vol 32-3, pp 300-309.
18. Pascual, J.A; Añó Vidal, C; Sánchez Díaz, J; Masiá Mira, F.J. Y Arnau Rosalén, E. (2001). Valoración de la idoneidad de los índices PCI y MFI para estimar la concentración y agresividad de las precipitaciones en la Comunidad Valenciana. *Revista Cuaternario y Geomorfología (C&G)*. Vol 15 (3-4), pp 77-84.
19. Renard, K.G. y Freimund, J.R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*. Vol. 157, pp 287-306.
20. Rodríguez, M. (2007). Potencialidad de las técnicas SIG para la gestión medioambiental: Aplicación al estudio de la erosión. M+A. *Revista electrónica de Medioambiente*. Universidad Complutense de Madrid. No. 3, pp 76-89.
21. Rodríguez, M.F; Florentino, A; Gallardo, J. y Antonio, R. de. (2004). Sistemas de información geográfica en la evaluación de la erosión hídrica en Badajoz-España aplicando la metodología USLE. *Agronomía Tropical*. Vol 54-4, pp 391-409.
22. Romana, M.G. (1997). *Erosión de taludes en obras lineales*. XIII Curso Internacional de Carreteras. Universidad Politécnica de Madrid, abril-junio, Madrid.
23. TRAGSA. López Cadenas, F. (Coordinador). (1994). *Restauración hidrológico-forestal de cuencas y control de la erosión* (1ª Ed.). TRAGSA, TRAGSATEC, Ministerio de Medio Ambiente de España, Mundi-Prensa, Madrid.
24. Van der Knijff, J.M; Jones, R.J.A. y Montanarella, L. (2000). *Soil Erosion Risk. Assessment in Europe*. Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburgo.
25. Wischmeier, W.H. (1959). A Rainfall Erosion Index for a Universal Soil-Loss Equation. *Soil Science Society of America Proceedings*. No. 23, pp 246-249.
26. Wischmeier, W.H. y Smith, D.D. (1965). Predicting Rainfall Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains. *Agriculture Handbook*. No. 282. U.S. Department of Agriculture,

Washington D.C.

27. Wischmeier, W.H. y Smith, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. *Agriculture Handbook*. No. 537. U.S. Department of Agriculture, Washington D.C.