

Primeros datos sobre la erosión hídrica real en las obras viarias del entorno de Palencia



Foto 1. Deslizamiento de un desmonte en la autovía Valladolid-Palencia.

JOAQUÍN NAVARRO HEVIA⁽¹⁾
Y ROBERTO SAN MARTÍN
FERNÁNDEZ⁽²⁾

1.- Introducción

La transformación del terreno por el hombre conlleva una serie de efectos perjudiciales para el medio. Uno sobre los que más se ha escrito es la erosión hídrica, ya que es la causa principal en la pérdida de productividad de las tierras agrarias. La pérdida de suelo fértil constituye uno de los problemas más graves en los

países en desarrollo, por sus crecientes necesidades alimentarias; sin embargo, las obras de infraestructura también generan procesos erosivos importantes que afectan al mantenimiento, seguridad y explotación de múltiples proyectos exigiendo un gran esfuerzo en capitales y tiempo para evitar los daños que provocan. Como sucede con otros problemas ambientales, la prevención, la adecuada planificación y un cuidadoso manejo del terreno conforman los métodos principales para minimizar los impactos de la erosión hídrica.

Este artículo corresponde al trabajo presentado en la I Reu-

nión del Grupo de Trabajo Hidrología de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, en la E.T.S. de Ingenieros de Montes de Madrid, el 3 de diciembre de 1999.

2.- La erosión y las obras de infraestructura

La erosión hídrica es un proceso natural que contribuye al

⁽¹⁾ U. D. de Hidráulica e Hidrología, E.T.S.I.A. Universidad de Valladolid.

⁽²⁾ U. D. de Estadística e I.O. E.T.S.I.A. Universidad de Valladolid.

modelado de la superficie terrestre. Los valores atribuidos a la erosión natural son variables en función de la zona; así Kirby (1980) señala rebajamientos de 1 mm en regiones semiáridas sin perturbar. Si se aceptan estos resultados para nuestro país, un rebajamiento de 1 mm implica, para una densidad edáfica de $1,3 \text{ t/m}^3$, una pérdida de suelo equivalente a $13 \text{ t/ha} \times \text{año}$.

El hombre a lo largo de su historia ha transformado su entorno y ha originado una aceleración de la erosión natural que ha provocado graves efectos socioeconómicos. El declive de diferentes civilizaciones, como el reino sumerio en Mesopotamia y el reino de Saba, se debe, entre otras cosas, al haberse cegado los canales y presas de riego por los sedimentos originados por unas prácticas agroforestales inadecuadas, así como a la imposibilidad de realizar un mantenimiento adecuado mediante medios manuales. Hoy en día, según Morgan (1995), muchos proyectos hidroeléctricos y de irrigación en diferentes países han fracasado como consecuencia de la erosión.

En España existen múltiples ejemplos de los efectos de la erosión en nuestras obras. Algunos embalses han visto reducida su capacidad: Águeda (30%), Alfonso XIII (48%), Puentes (56%), Talave (38%) y Valdeinfierno (43%) (Centro de Estudios Hidrográficos, 1987); en el de Joaquín Costa, los sedimentos aportados por la cuenca inutilizaron los aliviaderos de fondo, teniéndose que desarrollar un costoso programa de recuperación y desembalse (Confederación Hidrográfica del Ebro, 1997). Por otro lado, no resultan extraños los cortes de tráfico bien por el efecto de las aguas pluviales torrenciales, que se encuentran con cunetas y pasos de agua aterrados, o bien por el arrastre de materiales y los deslizamientos causados por

una deficiente protección de los taludes (foto 1).

Cabe señalar que la erosión en las vías de transporte terrestre no ha sido tan estudiada como en el campo agroforestal; sin embargo, los valores que alcanza son significativos y los daños generados son suficientes como para prestarle la debida atención. En los EE.UU. se han evaluado los costes asociados al mantenimiento de las carreteras derivados de la erosión y de los deslizamientos. En 1973, la U.S. Environmental Protection Agency indicaba tasas entre $126 \text{ t/ha} \times \text{año}$ y $525 \text{ t/ha} \times \text{año}$, debidas a la erosión durante la construcción de autopistas. Según Gray y Sotir (1995) "el coste económico de la erosión y la sedimentación es sustancial. (...) Únicamente el coste de retirada de sedimentos puede oscilar entre 9 y $89 \text{ \$/m}^3$ (dólares de 1973). Los costes indirectos y los daños por erosión y sedimenta-

ción probablemente exceden los costes directos, pero son mucho más difíciles de evaluar". Respecto a los deslizamientos en los EE.UU., Schuster (1978) estimó que los costes, por los daños que originaban, sobrepasaban los mil millones de dólares (Gray y Sotir, 1995).

3.- La erosión en las vías de transporte terrestre

Los primeros trabajos que intentan cuantificar la erosión en las carreteras se inician en EE.UU. por el SWCRD¹ en Georgia, durante 1956 (Disecker y Richardson, 1962). En ellos y en

¹ Soil and Water Conservation Research Division (Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture)

La erosión en las vías de transporte terrestre no ha sido tan estudiada como en el campo agroforestal



Foto 2. Aspecto de los desmontes de ferrocarril estudiados, después de diez años de su construcción.



Foto 3. Parcela de clavos de erosión antes de la gran tormenta del 15/7/97.

otros posteriores se cuantifican pérdidas entre 230 y 500 t/ha x año. En 1973, Younkin elabora un modelo para situar las carreteras en función de los sedimentos esperados en los cursos de agua próximos; Megahan, en 1978, obtiene en Idaho tasas de 3,4 t/km² x día en parcelas desprovistas de vegetación. En 1985, Haigh determina tasas entre 373 y 426 t/ha x año en desmontes de autopista en Oklahoma. Megahan y otros (1992) continúan sus estudios sobre la erosión y relacionan los resultados de diversas técnicas de control con sus costes y con el beneficio alcanzado. En sus experiencias se redujo la producción de sedimentos entre el 52 % y el 95 % respecto de las parcelas sin vegetación. Más recientemente, Grace y otros (1998) comparan métodos de control de erosión en carreteras forestales de Alabama, alcanzando una reducción de pérdidas de suelo del 88 % en los terraplenes y más del 98% en desmontes.

En España se han realizado algunos estudios sobre revegetación en taludes de carreteras desde hace algún tiempo (Ramos, 1983). Sin embargo, en ellos no se contempla el control alcanza-

do sobre la erosión, cuestión que repercute notablemente en la conservación y seguridad de las carreteras. Recientemente, Navarro Quercop (1997) en Murcia, ha estudiado el efecto de diferentes tratamientos en terraplenes; en Andalucía, Contreras (1998) está estudiando los efectos de las mantas de fibra vegetal en la recuperación de taludes, y en Castilla y León, desde 1995, Navarro y otros (1998) estudian la erosión a través de modelos y en campo, e instalan un conjunto de parcelas para el análisis de diferentes técnicas de control de la erosión. Otros trabajos recientes que analizan el valor ambiental de las carreteras se han realizado por el Departamento de Construcción y Vías Rurales de la Universidad Politécnica de Madrid (Otero y Muñoz, 1998), pero en ellos el estudio de la erosión es meramente descriptivo.

4.- Objeto y localización

La Unidad de Hidráulica e Hidrología de la Escuela de Ingenieros Agrónomos de Palencia, al observar los fenómenos erosivos en los taludes de las carreteras y del ferrocarril en torno a la

ciudad de Palencia, se propuso en 1995 estimar su magnitud, gravedad, así como evaluar las mejores opciones para su control (Navarro y Jonte, 1996). Para ello, se han estudiado los tramos: carreteras nacionales N-610, Palencia-León (p.k. 0,000-2,000), y N-611 Palencia-Santander (p.k. 7,000-11,500); línea ferroviaria: "by-pass" Palencia-Magaz (p.k. 2,400 - 2,500). Estos tramos atraviesan terrenos de carácter fluvial y lacustre del Terciario (Astaraciense), compuestos por arcillas, limos y arenas y conocidos como *Facies Tierra de Campos*, otros evaporíticos (margas calizas y yesos), originados por los procesos propios de amplias zonas lacustres-palustres del Terciario (Astaraciense inferior), y ciertos conos de deyección del Cuaternario, procedentes de los materiales erosionados en algunos barrancos o arroyos de tamaño reducido, donde coexisten cantos y bloques de caliza angulosos embutidos en una matriz limo-arcillosa.

El clima, de marcados rasgos continentales, registra una precipitación media en torno a 400 mm y una temperatura media anual próxima a 12°C. Se trata de inviernos largos e intensa sequía estival, primavera corta, revuelta y con fuertes vientos, y un otoño con temperaturas más suaves y vientos débiles.

Los desmontes analizados se caracterizan (tabla 1, de la página siguiente) por tener pendientes del 60% al 90%, y longitudes entre 6,3 m y 20,2 m; se encuentran prácticamente desprovistos de cubierta vegetal y presentan graves procesos erosivos (foto 2).

5.- Material y métodos

Se ha evaluado la erosión potencial de los distintos taludes mediante el modelo paramétrico USLE² (Wischmeier y Smith, 1978). Posteriormente, en el le-

rocarril se ha estimado la erosión registrada en cuatro parcelas provistas con clavos de erosión (foto 3). Con los clavos se pretende medir la erosión real en los taludes y compararla con la estimada con el modelo USLE. Si los resultados fueran similares al modelo USLE, éste constituiría una herramienta útil para prever la evolución erosiva de los taludes y de las técnicas de control más efectivas a corto, medio y largo plazo. Varios intentos se han realizado en este sentido por diversos investigadores en los EE.UU. obteniéndose diferentes conclusiones, aunque Wischmeier (1976), Haigh (1987) e Israelsen y otros (1980, 1982) indican la conveniencia de utilizar la USLE para la estimación de las pérdidas de terreno en taludes constructivos: para estos autores los resultados son concordantes con los observados en la realidad o son las mejores aproximaciones posibles (Wischmeier, 1976).

En nuestra opinión, validar el modelo USLE en España para aplicarlo en la restauración de taludes generados por una obra civil es un objetivo interesante, ya que, aunque otros modelos para la evaluación de la erosión

Tabla 1: Características principales de los desmontes analizados

Parcela	Localización (p.k.)	Orientación	Pendiente (%)	Longitud (m)	Cubierta vegetal (%)	Textura (USDA) ¹
C1	N - 610 1,750	Sur	68	14,50	< 10	Franca algo arenoso-arcillosa
C2	N - 610 1,750	Norte	69,4	12	10 - 20	Franca bastante limoso-arcillosa
C3	N - 610 0,500	Suroeste	70	14,20	0	Franca
C4	N - 610 0,500	Noreste	67,45	17,20	20	Franca bastante limoso - arcillosa
C5	N - 611 11,200	Este	62	8,50	< 10	Franca bastante limosa
C6	N - 611 11,200	Oeste	65	8,70	10 - 20	Franca algo arcillosa
C7	N - 611 7,000	Este	77	13,50	20	Limoso - arcillosa
C8	N - 611 7,000	Oeste	69	20,4	0 - 5	Muy arcillosa
F1	F.C. Pal.-Mag. 2,505	Noreste	75	6,40	0 - 5	Franca algo arcillosa
F2	F.C. Pal.-Mag. 2,480	Suroeste	90	6,30	0	Franca algo arcillosa
F3	F.C. Pal.-Mag. 2,430	Noreste	75	8,60	0	Franca algo arcillosa
F4	F.C. Pal.-Mag. 2,450	Suroeste	80	8,50	0 - 10	Franca algo arcillosa

hidrica pueden ser más precisos, por el momento no se revelan, por su complejidad o su excesiva regionalización, con capacidad para desplazar a nivel práctico a la USLE, y su origen agrícola dificulta aún más su aplicación a terrenos afectados por obras de construcción.

Los parámetros del modelo USLE para la estimación de pérdidas de suelo $[A \text{ (t/ha x año)} = R \times K \times L \times S \times C \times P]$ se han obtenido del siguiente modo: el factor de erosividad de la lluvia (R) del ICONA (1988); para el factor de erosionabilidad del suelo (K) se han tomado muestras de los 20-30 cm superficiales del terreno y se han analizado en el Laboratorio Agrario de Palencia; para el factor topográfico (LxS) se midieron las longitudes del talud, según la línea de máxima pendiente, con cinta métrica; y las pendientes mediante un hipsómetro; el factor de vegetación (C) se dedujo visualmente; y el factor de prácticas de conservación de suelos (P), al no realizarse ninguna, vale 1.

Tras un análisis exhaustivo de los posibles métodos aplicables para estimar la erosión real (Navarro y otros, 1998), se optó

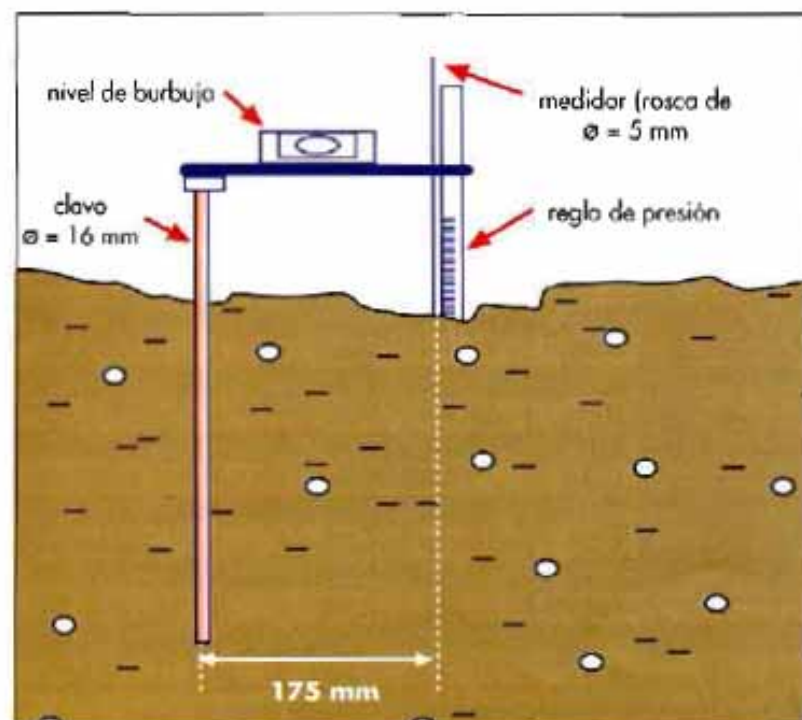


Figura 1: Medidor de erosión de Navarro y Fernández de Villarán (1995).

¹ Universal Soil Loss Equation. Ecuación universal de pérdidas de suelo.

² U. S. Department of Agriculture. Departamento de Agricultura de los EE.UU.

por clavos de erosión, y el rebajamiento se obtuvo mediante el *medidor de erosión* diseñado para este caso (figura 1) (Navarro y otros, 1999). Los clavos se emplazaron en cuatro parcelas, dos de solana y dos de umbría, en los desmontes del enlace ferroviario Palencia-Magaz, con una disposición en retícula y una separación entre clavos de 1,5 m en horizontal y 1 m, según la línea de máxima pendiente. Se realizaron dos lecturas por clavo, según la curva de nivel, y se obtuvieron un total de 132 registros. Los resultados que se presentan corresponden a un periodo de casi nueve meses, durante el cual se registró una de las tormentas más importantes de este siglo sobre la ciudad de Palencia, y que influyó de forma notable en la dinámica erosiva de los taludes (foto 4). Para transformar las medidas volumétricas del rebajamiento a peso de terreno se obtuvo la densidad aparente a partir de 10 muestras de terreno (Navarro y otros, 1999).

6.- Resultados

Los valores de la erosión potencial estimada mediante el modelo USLE para los desmontes se adjuntan en la *tabla 2* y se representan en la *figura 1*. Con objeto de caracterizar la importancia de las pérdidas de suelo la F.A.O., P.N.U.M.A. y U.N.E.S.C.O. establecieron en 1981 el cuadro de los rangos que se detallan en la parte superior de esta página.

Atendiendo a esta clasificación, se puede comprobar cómo los taludes de la circunvalación C2, C4, C6 y C7 están comprendidos en el rango de erosión alta, y los restantes (C1, C3, C5, C8, F1, F2, F3 y F4) en el de muy alta (*tabla 2*).

Para contrastar la validez de los datos recogidos con clavos de erosión para medir la erosión

Foto 4. La tormenta del 15/7/97 erosionó gravemente los taludes, transformando su dinámica erosiva.



Pérdidas de suelo en t/ha x año	Grado de la erosión hídrica
< 10	Ninguna o ligera
10-50	Moderada
50-200	Alta
> 200	Muy Alta

real en las parcelas del ferrocarril y establecer sus niveles de confianza y rango de variabilidad, se ha realizado un estudio mediante el paquete estadístico SAS, basándose en un análisis de la varianza para un "modelo lineal":

$$A_{\text{ajustada}} = \mu + O_i + P_{\text{sol}} + C_{\text{col},j} + F_{\text{fil},j} + L_m + OL_m + PL_{m,j} + HL_{m,j} + \zeta_{\text{residual}}$$

donde:

- A_{ajustada} = rebajamiento del terreno en cm.
- μ = media global.
- O_i = factor orientación (solana-umbría).
- P_{sol} = factor parcela (dos parcelas en solana y dos en umbría).
- $C_{\text{col},j}$ = factor columna (tres columnas de clavos por parcela).

Tabla 2: Valores de los parámetros y de la erosión según la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE).						
TALUD	R(*)	K	L x S	C	P	A (t/ha x año)
C1	43	0,82	13,18	1,00	1	464,70
C2	43	0,44	12,10	0,45	1	103,20
C3	43	0,66	13,55	1,00	1	384,55
C4	43	0,54	14,43	0,45	1	150,78
C5	43	1,00	8,40	1,00	1	361,20
C6	43	0,45	9,10	0,45	1	79,24
C7	43	0,36	15,02	0,45	1	104,63
C8	43	0,31	16,50	1,00	1	219,95
F1	58	0,499	9,25	1,00	1	240,89
F2	58	0,499	11,82	1,00	1	307,81
F3	58	0,499	11,05	1,00	1	287,76
F4	58	0,499	12,01	1,00	1	312,76

(*) El factor R crece según se alejan las parcelas de Palencia capital.

• $F_{(l,p)}$ = factor fila (5 ó 6 filas de clavos según longitud de talud).

• L_m = factor lado (dos medidas por clavo según curva de nivel).

• OL_{lm} = Interacción entre los factores orientación y lado.

• $PL_{lm(n)}$ = Interacción de los factores parcela y lado dentro de cada orientación.

• $FL_{lm(l,p)}$ = Interacción de los factores fila y lado dentro de cada parcela y orientación.

• $\zeta_{(p)(lm)(n)}$ = error experimental.

Todos los resultados se han obtenido con un 95% de confianza ($\alpha = 0,05$). Se ha realizado un análisis de los residuos donde se puede comprobar satisfactoriamente la veracidad de las hipótesis de su normalidad, independencia, media cero y variabilidad constante. De acuerdo con los resultados, cabe destacar:

1. El modelo planteado resulta altamente significativo ($Pr > F = 0,0001$), lo que refleja la existencia de diferencias significativas de las erosiones medias debidas a los distintos factores que intervienen en dicho modelo.

2. Se obtiene un coeficiente de determinación (R^2) igual a 0,8155, es decir, el modelo explica un 81,55% de la variabilidad de la erosión. Así mismo, la variabilidad experimental viene reflejada por un coeficiente de variación del 78,35% y la erosión media en todo el terreno de estudio es de 3,1 cm en los casi 9 meses.

1. Observando las sumas de cuadrados parciales (Type III SS) se comprueba que sólo tres de los factores del modelo resultan significativos: orientación, parcela y fila; y, por tanto, existen diferencias significativas entre las erosiones medias de los distintos niveles de estos factores. Se comprueba, como cabía esperar, que la erosión es diferente entre solana y umbra, entre parcelas dentro de cada orientación, y entre filas dentro de cada parcela y dentro de cada orientación.

En la *tabla 3* se encuentran las erosiones medias, estimadas por el modelo lineal, para cada una de las orientaciones, junto con un intervalo de confianza al 95% y los *p-valor*s. Igualmente se adjunta la diferencia entre las erosiones medias junto con sus intervalos de confianza y el *p-valor* para el contraste de la hipótesis nula de igualdad de erosiones medias en ambas orientaciones. En la *figura 2* se puede observar la comparativa de las distribuciones de la erosión en las dos orientaciones. De la *tabla 3* y de la *figura 2* se desprende que existe un rebajamiento significativo del terreno durante el periodo observado y que las erosiones medias entre solana y umbra son significativamente distintas entre sí ($Pr > T = 0,0001$). El rebajamiento medio en la solana es de 0,81 cm, mientras que en la umbra es muy superior, 5,7 cm.

Al expresar los rebajamientos en peso de suelo por superficie y año, se califica la erosión como alta, ya que las pérdidas de suelo son de 158,86 t/ha x año en solana, mientras que en um-

bra se obtiene una tasa seis veces superior, 1 092,83 t/ha x año, valor muy alto. Si se acude a la erosión media entre orientaciones, la pérdida se estima en 594,34 t/ha x año. Los resultados se han calculado a partir de una densidad media aparente de 1,39 g/cm.

7- Discusión de los resultados

Se ha estimado la erosión potencial en doce desmontes en los alrededores de la ciudad de Palencia mediante el modelo paramétrico de evaluación de las pérdidas de suelo USLE, obteniéndose para ocho de ellos un grado de erosión muy alto ($A > 200$ t/ha x año) y para cuatro un grado de erosión alto (> 50 t/ha x año). Esto se debe principalmente a la alta erosionabilidad de los terrenos, al relieve de los taludes y a que los terrenos se hallan prácticamente desnudos. El hecho de que no existan prácticas de control de erosión agrava el proceso. La pérdida de suelo potencial media estimada me-

Tabla 3: Resultados de las orientaciones de solana y umbra.

Orientación	L.I.C. (95%) (cm)	Erosión media (cm)	L.S.C. (95%) (cm)	H.: Media=0 Pr> T
Solana	0,175	0,814	1,453	0,0133*
Umbra	5,012	5,672	6,331	0,0001**
	L.I.C. (95%) (cm)	Diferencia media	L.S.C. (95%) (cm)	H.: Umbr=Sol Pr> T
Umbra-Solana	3,940	4,858	5,776	0,0001**

* Significativo a un nivel $\alpha = 0,05$, ** Significativo a un nivel $\alpha < 0,01$

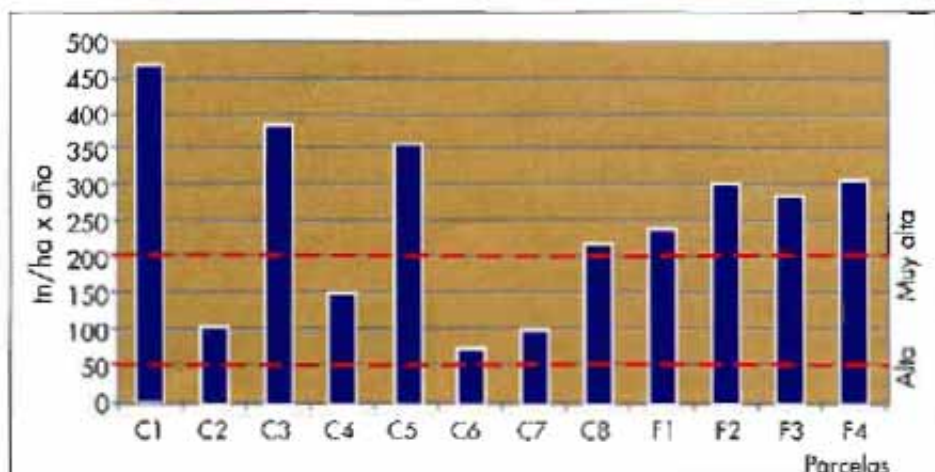


Figura 2: Tasas de erosión según modelo USLE.

diente la USLE para el conjunto de taludes se califica como muy alta y es de 251,43 t/ha x año.

La validez del modelo USLE en las obras de infraestructura está confirmada por algunos trabajos. Meyer y otros sugerían en 1975 que este modelo predecía valores "dentro de límites razonables"; Israelsen y otros (1982) demostraron que la expresión es válida hasta segmentos o pendientes uniformes del 100%; y las experiencias de Haigh (1987) en los taludes de algunas autopistas de Oklahoma indican que la USLE puede proporcionar tasas similares a las reales.

Para comparar los resultados de la USLE con los reales se analizaron los datos de los clavos de erosión en la zona del ferrocarril. Tras el análisis estadístico se ha encontrado que el modelo planteado por los clavos explica el 81,55% de la variabilidad de la erosión, y que esta variabilidad se debe al distinto comportamiento de la solana frente a la umbría, al de las parcelas entre sí y al de las filas de clavos en las que se ha medido, todo ello como cabría esperar. El rebajamiento medio en los taludes es de 3.1 cm en casi 9 meses, lo que supone unas pérdidas de suelo medias de 594.34 t/ha x año y equivale a unas pérdidas muy altas según la clasificación de la FAO, 2,5 veces el valor predicho por la USLE como media en esta zona.

Esta diferencia tan significativa se debe fundamentalmente a que la USLE computa los valores medios anuales de pérdida de suelo originada por erosión laminar y en regueros para unas condiciones específicas fisiográficas, de vegetación y de manejo (Wischmeier, 1976; Wischmeier y Smith, 1978), donde no se produzca sedimentación y para un largo periodo suficientemente representativo. Las cifras del modelo USLE son los valores medios esperados del comportamiento climático normal en la

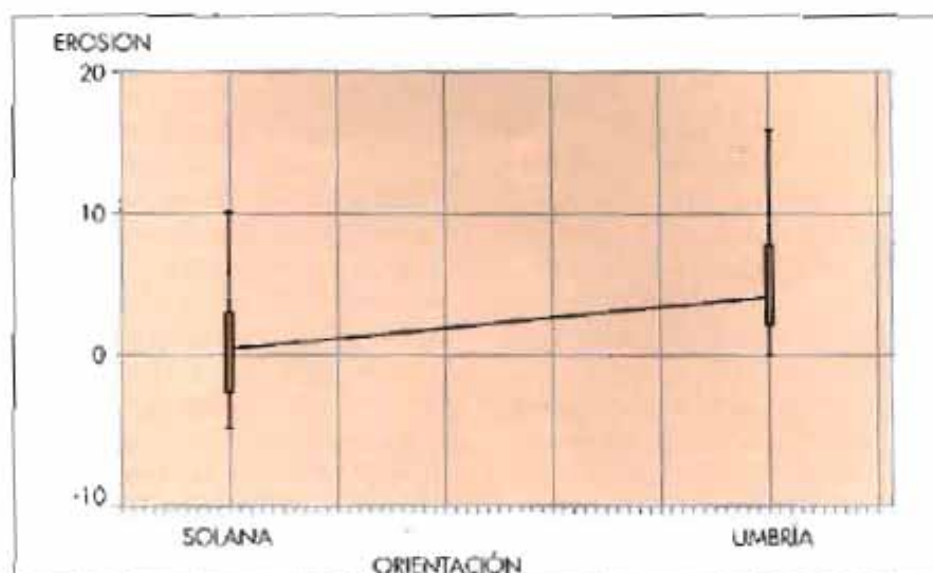


FIGURA 3. Erosión media ± 2 errores estándar en solana y umbría.

Para comparar los resultados de la USLE con los reales se analizaron los datos de los clavos de erosión en la zona del ferrocarril

zona. Los resultados de los clavos corresponden a un periodo inferior a un año, y dependen de la irregularidad climática del periodo con respecto al comportamiento medio. Además se ha registrado una tormenta de carácter excepcional (15/7/1997), que fue acompañada de granizo, y que movilizó gran parte del regolito acumulado durante los diez años de antigüedad de los taludes. Analizada la tormenta mediante su incorporación a la serie temporal de precipitaciones máximas diarias, basada en ajuste de Gumbel, corresponde a un periodo de retorno muy superior a los 100 años. Esto significa que las pérdidas de suelo estimadas por los clavos no son las que corresponderían a un año medio en la zona, ya que la agresividad de la lluvia fue excepcional, y el efecto del granizo no se evalúa por la USLE. La precipitación recogida durante el 15/7/1997 en las parcelas fue de 80 mm en 1,4 h, y la agresividad del aguacero, calculada según los datos de nuestro pluviógrafo y de

acuerdo con Wischmeier y Smith (1978), es $R = 141 \text{ hJxcm/hxm}^2$ (Navarro y otros, 1998). Este valor supera en casi 2,5 veces el valor medio en la zona ($R = 58$), lo que coincide con las veces que la erosión medida supera a la erosión media estimada por la USLE.

En solana, si atendemos al rebajamiento del terreno, no se aprecia una gran exportación de material ($\approx 1 \text{ cm}$), debido a que los taludes han ido desarrollando en unos diez años un perfil de acumulación del regolito importante a pie del talud. La acumulación en algunos puntos alcanzaba los dos tercios del talud. Este hecho se puede explicar por el agrietamiento superficial de la roca madre que causan las diferencias térmicas noche-día, las heladas y la variación de humedad, procesos que implican una meteorización superior a la umbría, una capacidad de infiltración mayor, por la menor densidad aparente del regolito ($0,7 \text{ g/cm}^3$), y, en consecuencia, que la escorrentía superficial y la ca-

pacidad de transporte sean menores que en la umbria. El mayor grado de insolación provoca una intensa meteorización superficial de la roca madre, generando fragmentos que se desprenden por gravedad y por las vibraciones del ferrocarril. En definitiva, la mayor capacidad de infiltración de los desmontes de solana y el predominio del transporte en seco por gravedad frente al hídrico han provocado la acumulación del regolito en la base del talud, compensándose la erosión de las filas superiores de clavos con la ganancia de las inferiores. Sin embargo, al expresar el rebajamiento en peso se observa una erosión alta: las pérdidas netas de suelo son 158,86 t/ha x año. En la umbria, la erosión es muy superior a la de solana (1 092,83 t/ha x año). Esto puede ser debido a una menor producción de regolito (menor variabilidad de temperatura y humedad), una menor capacidad de infiltración y, en consecuencia, un predominio del transporte hídrico frente al seco.

Si se transforma el rebajamiento a unidades de peso por superficie y año, se puede intentar comparar los valores reales en la solana y en la umbria con los predichos por el modelo USLE. Los resultados se adjuntan en las tablas 4 y 5. De la tabla 4 se desprende que los valores de solana son la mitad que los estimados por la USLE, mientras que en la umbria están multiplicados por cuatro. Las cifras de la tabla 5 reflejan, para las parcelas 1 y 3 (umbria), alrededor de 3 a 5 veces más pérdidas de suelo que las calculadas por la USLE, mientras que en las parcelas 2 y 4 (solana) son alrededor de la mitad. Estas diferencias se deben a lo atribuido al discutir los resultados globales de cada orientación. Las diferencias entre las parcelas de umbria 1 y 3 se deben específicamente a la longitud del talud (mayor en la 3). Esta característica hace que la escorrentía generada durante una tormenta pueda adquirir un mayor calado y, por lo tanto, una mayor capacidad erosiva.

Las diferencias entre las parcelas 2 y 4 (solana) no son estadísticamente significativas.

Que en las parcelas de umbria los resultados en campo sean más altos a los estimados por el modelo USLE puede atribuirse al efecto de la granizada que acompañó a la tormenta. Este efecto, unido a una menor capacidad de infiltración de estos desmontes, ya que la acumulación del regolito afectaba a menos del tercio inferior del talud y a una mayor generación de escorrentía, hacen que el rebajamiento sea tan elevado. Conviene recordar que el modelo USLE no incorpora en el factor R el efecto del granizo, por lo que los resultados se deben únicamente a la erosión hídrica por causa de los aguaceros, lo que conlleva el incremento de las diferencias.

Por otro lado, sin aplicar la condición $130 < 63,5 \text{ mm/h}^{(6)}$ (Wischmeier y Smith, 1978) para el cálculo de la agresividad (R) del aguacero del día 15/7/97, el valor de R pasa de 141,5 a 209,84 de modo que las pérdidas de suelo estimadas por el modelo USLE para el aguacero se aproximan en mayor medida a las de campo (tabla 6) sobre todo en los valores medios de la umbria. De todos modos este resultado puede ser aleatorio ya que la USLE no está concebida en origen para definir las pérdidas causadas por un aguacero individualizado.

En cualquier caso, tanto los valores obtenidos mediante la USLE como los registrados en campo indican globalmente una erosión muy importante: en ambos casos, las cifras se encuadran en la categoría de erosión alta a muy alta dada por la FAO, de lo que se deduce la necesidad de actuar en el control de la erosión y que la USLE sirve para reflejar la gravedad del proceso erosivo de acuerdo con los grados establecidos.

En los EE.UU., a raíz del "National Cooperative Highway

Tabla 4

Orientac.	Periodo (meses)	Rebajamiento medio (cm)	Densidad aparente (g/cm ³)	Tasa de erosión (kg/m ²) ^(a)	Erosión medida (t/ha/año) (1)	Erosión prevista (USLE) (t/ha/año) (2)	(1)/(2)
Solana	8,4	0,8	1,39	11,12	158,86	310,29	0,5
Umbria	8,7	5,7	1,39	79,23	1092,83	264,33	4,1

Tabla 5

Parcela n°	Periodo (meses)	Rebajamiento medio (cm)	Densidad aparente (g/cm ³)	Tasa de erosión (kg/m ²) ^(a)	Erosión medida (t/ha/año) (1)	Erosión prevista (USLE) (t/ha/año) (2)	(1)/(2)
F1	8,7	3,6	1,39	50,04	690,21	240,89	2,9
F2	8,4	0,9	1,39	12,51	172,65	307,81	0,6
F3	8,7	7,8	1,39	108,4	1495,17	287,76	5,2
F4	8,4	0,7	1,39	9,73	144,15	312,76	0,5

Tabla 6: Pérdidas de suelo estimadas por el modelo USLE para el aguacero del 15/7/97.

PARCELA	R	K	LxS	C	P	A _{med} (t/ha x año)	A _{USLE} (t/ha x año)
F1	209,84	0,499	9,25	1	1	690,21	968,57
F3	209,84	0,499	11,05	1	1	1495,17	1157,04
Media	209,84					1092,83	1062,81

Research Program" (Israelsen y otros, 1980) se adoptó la USLE para estimar la erosión en los taludes de las carreteras mediante la sustitución de los factores C y P por el factor de control de la erosión, VM. Con este factor, se puede observar el efecto que producen diversas técnicas de protección en taludes sobre las pérdidas de suelo (Navarro y Jonte, 1996). Si se realizaran sobre estos taludes medidas de control de la erosión, aplicando los coeficientes VM correspondientes a una siembra anual (S1) o plurianual (S>1), así como para el matorral (M) y para el estado actual de los taludes (A), tendríamos los valores de pérdidas de suelo (tabla 7 y figura 3). De la tabla 7 se desprende que con una siembra permanente (duración > 1 año) se consigue en todos los taludes un grado de erosión < 10 t/ha x año, lo que significa erosión ninguna o ligera, y que se reduce la tasa de producción de sedimentos a menos del 2,5 % de la originada en los taludes desnudos.

8- Conclusiones

Este estudio ha permitido estimar la gravedad de los proce-

Tabla 7 Pérdidas de suelo según USLE tras sustituir C y P por el factor de control de la erosión VM (t/ha x año)

Talud	Sin tratamiento (A)	Siembra 1 año (S1)	Siembra permanente > 1 año (S>1)	Matorral (M)
C1	464,70	23,24	4,68	162,65
C2	103,20	11,45	2,29	80,13
C3	384,55	19,23	3,85	134,59
C4	150,78	16,75	3,35	117,27
C5	361,20	18,06	3,61	126,42
C6	79,24	8,80	1,76	61,63
C7	104,63	11,63	2,33	81,38
C8	219,95	11,00	2,20	76,98
F1	240,89	12,04	2,41	84,31
F2	307,81	15,39	3,08	107,73
F3	287,76	14,39	2,88	100,72
F4	312,76	15,64	3,13	109,47

sos erosivos en los taludes analizados mediante la aplicación del modelo USLE, y confirmar este hecho cuantificando la erosión real registrada durante un periodo de nueve meses mediante el empleo de clavos de erosión.

La tasa de erosión real media en la zona ha sido 2,5 veces superior a la estimada por el modelo USLE; sin embargo, ésta es la proporción en que la agresividad del aguacero del 15/7/97 supera a la agresividad media de la lluvia en la zona.

El modelo deducido con los clavos para explicar la variabilidad de la erosión real presenta un buen coeficiente de determi-

nación ($R^2 = 0,8155$). Las diferencias de la erosión respecto a la orientación son significativas a un nivel de confianza del 95%. También existen diferencias significativas entre las parcelas de umbria, atribuibles en parte a la distinta longitud del talud; no sucede así en la solana donde la gran acumulación de sedimento a pie de talud ha podido disminuir considerablemente el proceso erosivo.

El lapso transcurrido para determinar la validez de la USLE en la estimación de la erosión en taludes de infraestructura vial no parece ser suficiente para obtener una conclusión clara. Se han registrado valores en campo de la mitad (solana) a cuatro veces superiores (umbria) respecto a las medias anuales predichas por la USLE, y esta variabilidad aumenta a nivel de parcela, aunque esta variabilidad se explica por la gran precipitación acontecida y porque en solana la acumulación de regolito alteró el comportamiento hídrico de la ladera (mayor infiltra-

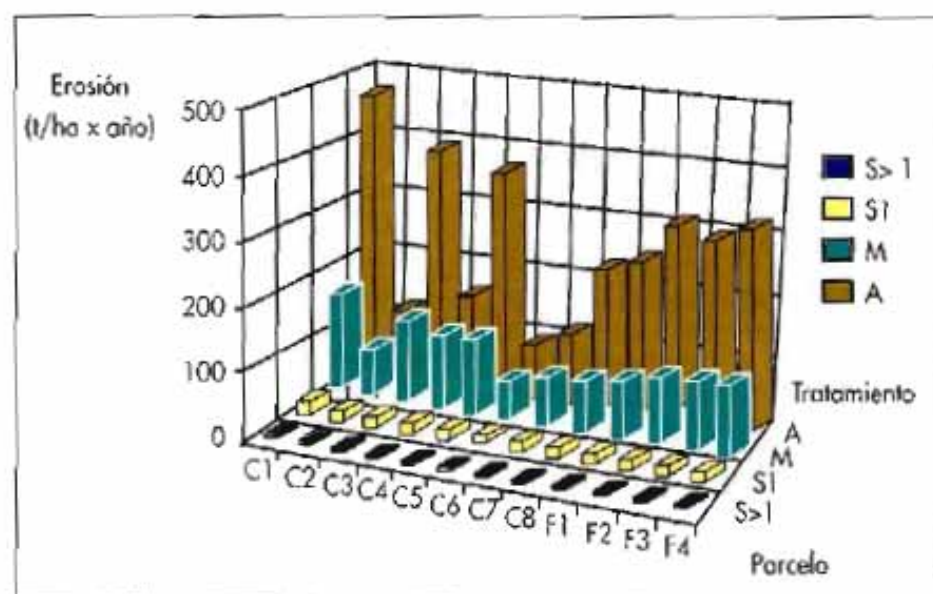


FIGURA 4: Pérdidas de suelo (USLE) con diferentes tratamientos de revegetación y sin revegetar.

⁴ Intensidad máxima en 30 minutos de aguacero. Este límite fue aplicado por Wischmeier y Smith (1978) para la lluvia en los EE. UU., pero en España aguaceros significativos superan con creces este umbral, por lo que cabría discutir su validez para la península.

⁵ Este dato está referido al periodo de estudio (8,4 y 8,7 meses).

⁶ Este dato está referido al periodo de estudio (8,4 y 8,7 meses).

ción, menor escorrentía, y por lo tanto menor producción de sedimentos).

El registro de una tormenta excepcional, con periodo de retorno superior al siglo durante el tiempo considerado, dificulta la obtención de conclusiones sobre la validez de la USLE, aunque los valores que predice este modelo y los clavos se encuadran en las mismas categorías establecidas por la FAO. Este hecho, a falta de nuevos resultados, permite afirmar que en este caso la USLE aplicada a la tormenta del 15/7/97 ha proporcionado resultados dentro de un rango aceptable y equiparable a lo observado en campo.

Posteriormente, se ha podido realizar una estimación teórica del control de la erosión alcanzado con diversos tratamientos del terreno en base a la adaptación de la USLE a obras de infraestructura. Con esta simulación, se deduce que para reducir la erosión a los niveles admisibles debe conseguirse una cubierta herbácea permanente sobre el terreno.

Del estudio se desprende que es necesario continuar con el registro del rebajamiento del terreno para comprobar si los valores obtenidos a largo plazo pueden ser predichos por algún modelo como la USLE, o por otros que terminen de desarrollarse convenientemente en los próximos años, o que reduzcan la complejidad, para poder ser empleados por los planificadores e ingenieros en el análisis del impacto generado por los procesos erosivos procedentes de las obras de infraestructura viaria, y en el análisis y el diseño de las medidas correctoras aplicadas para el control de erosión.

Disponer de un modelo efectivo para cuantificar la erosión y el control conseguido con diversas técnicas constituye una mayor garantía para la correcta elaboración y ejecución de los proyectos de restauración del entorno

La tasa de erosión real media en la zona ha sido 2,5 veces superior a la estimada por el modelo USLE

de los terrenos afectados por obras de infraestructura viaria.

Bibliografía

• Confederación Hidrográfica del Ebro 1987, en Aproximación a la medida de la erosión y medios para reducir ésta en la España peninsular. D. Soto. Ecología, Fuera de Serie, nº 1, pp. 169-196.

• Centro de Estudios Hidrográficos 1997. Encuentro científico-técnico sobre el vaciado total y prolongado del embalse de Joaquín Costa. Confederación Hidrográfica del Ebro, Zaragoza, 22-24 de octubre de 1997.

• CONTRERAS, V. 1998. El control de la erosión de suelos con mantas orgánicas: experiencias y aplicaciones prácticas, en Actas del IV Simp. sobre Carreteras y Medio Ambiente. Asociación Técnica de Carreteras. Madrid.

• DISEKER, E. G. y RICHARDSON, E. C. Erosion rates and control methods on highway cuts. Transactions of the ASAE, 5 (2): 153-155.

• GRACE III, J. M., RUMMER, B., STOKES, B. J. y WILHOIT, J. 1998. Evaluation of erosion control techniques on forest roads. Transactions of the ASAE, 41 (2): 383-391.

• GRAY, D. H. y SOTIR, R. B. 1995. Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization. John Wiley and Sons, Inc. New York.

• HAIGH, M. J. 1985. Geomorphic evolution of Oklahoma roadcuts. Zeit. Geomorph. 29 (4): 439-452.

• HAIGH, M. J. 1987. Roadbank sediment yield in Central

Oklahoma. Processus et mesure de l'érosion; ed: du CNRS: 221-227.

• ICONA. 1988. Agresividad de la lluvia en España. Valores del factor R de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo. ICONA, MAPA. Madrid.

• ISRAELSEN, C. E., GLYDE, 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 Research Program Report 221.

• ISRAELSEN, C. E. e ISRAELSEN, E.K. 1982. Controlling erosion surface mining sites. Symp. on Surface Mining Hydrology, Sedimentology and Reclamation. Univ. of Kentucky: 329-337.

• KIRBY, M. J. 1984. El problema, en Erosión de Suelos. M. J. Kirby y Morgan, R.P.C. Limusa, México, pp. 15-34.

• MEGAHAN, W. F. 1978. Erosion processes on steep granitic road fills in Central Idaho. Soil Sci. Soc. Am. J., vol. 42: 350-357.

• MEGAHAN, W. F., MONSEN, S.B., WILSON, M. D., LOZANOS, N., HABER, D. F. y BOOTH, G.D. 1992. Erosion control practices applied to granitic roadfills for forest roads in Idaho: cost effectiveness evaluation. Land Degradation & Rehabilitation, 3: 55-65.

• MEYER, G. J., SCHOENEBERGER, P. J. y HUDDLESTON, J. H. 1975. Sediment yields from roadsides: an application of the Universal Soil Loss Equation. Journal of Soil and Water Conservation, Nov.-Dec. 1975: 289-291.

- MORGAN, R. P. C. 1995. *Soil Erosion & Conservation*. Longman G. L. Essex.
- NAVARRO, J. y JONTE, M. A. 1996. La erosión hídrica en los desmontes de la CN-610 y CN-611 en la circunvalación de la ciudad de Palencia. *Rutas*, Revista de la Asociación Técnica de Carreteras, nº 54, pp. 35-42.
- NAVARRO, J., SAN MARTÍN, R., FERNÁNDEZ VILLARÁN, R. y JONTE, M. A. 1998. Estudio comparativo de métodos de restauración de laderas y taludes altamente degradados. Proyecto de Investigación Ref. VA10/96, Consejería de Educación y Cultura, Junta de Castilla y León (sin publicar).
- NAVARRO, J., SAN MARTÍN, R., JONTE, M. A., FERNÁNDEZ VILLARÁN, R. y BENGIOA, J. L. 1999. Evaluación de la erosión potencial y re-
- al en desmontes de infraestructura viaria: un ejemplo en el entorno de Palencia capital. 1ª Reunión del Grupo Hidrología de la S.E.C.F. Madrid, 3 de diciembre de 1999. ETSIM. (U.P.M.).
- NAVARRO QUERCOP, A. 1997, en Bonterra Ibérica, eficacia contra la erosión. Catálogo de Productos y Experiencias de Bonterra Ibérica. Granada.
- OTERO, I. y MUÑOZ, M. 1999. Estudio ambiental y funcional de las márgenes de las carreteras. *Carreteras*, nº 102, pp. 33-58.
- RAMOS, A. (Idtor.) 1983. *Tratamiento funcional y paisajístico de taludes artificiales*. Trabajos de la Cátedra de Planificación. ETSIM. Universidad Politécnica. Madrid.
- TROEH, F. R., HOBBS, J. A. y DONAHUE, R. L. 1999. *Soil and Water Conservation*. 3ª
- edition. Prentice Hall. New Jersey.
- WISCHMEIER, W. H. 1976. Use and misuse of the Universal Soil Loss Equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, Jan.-Feb. 1976: 5-9.
- WISCHMEIER, W. H. y SMITH, D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook nº 537.
- YOUNKIN, L. M. 1973. Effects of highway construction on sediment loads in streams. *Highway Research Board Sr.*, nº 135: 82-93. ■

Nota: Este estudio forma parte del proyecto de investigación "Estudio comparativo de métodos de restauración de laderas y taludes altamente degradados" financiado parcialmente por RENE (Valladolid), Bonterra Ibérica y la Consejería de Educación y Cultura de la Junta de Castilla y León.