

EVALUACIÓN DE LA EROSIÓN POTENCIAL Y REAL EN DESMONTES DE INFRAESTRUCTURA VIARIA DE PALENCIA

J. Navarro⁽¹⁾, R. San Martín⁽²⁾, M. A. Jonte ⁽¹⁾, R. Fernández Villarán⁽¹⁾ y J. L. Bengoa⁽³⁾

⁽¹⁾U. de Hidráulica e Hidrología. ⁽²⁾U. de Estadística e I.O. ⁽³⁾U. de Ecología. E.T.S. Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid. Avda. de Madrid, 44. 34004 PALENCIA

1.- INTRODUCCIÓN

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. 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 y 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.

Cabe señalar que la erosión en las obras constructivas y 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 debida atención. CARR y BALLARD (1980) registran una producción de 345 m³/km de sedimento en carreteras que no han sido hidrosembreadas. En 1985, Haigh determina tasas entre 373 y 426 t/ha/año en desmontes de autopista en

Oklahoma (HAIGH, 1987). Más recientemente, GRACE *et al.* (1998) comparan métodos de control de erosión en carreteras forestales de Alabama, alcanzando una reducción de pérdidas de suelo del 85% en los terraplenes y más del 98% en desmontes.

2.- OBJETO Y LOCALIZACIÓN

La Unidad de Hidráulica e Hidrología de la Escuela de Ingenierías Agrarias 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 (pk. 0,000-2,000) y N-611 Palencia-Santander (pk. 7,000-11,500); línea ferroviaria: "by-pass" Palencia-Magaz (pk. 2,400 - 2,500). Estos tramos atraviesan terrenos de carácter fluvial y lacustre del Terciario conocidos como *Facies Tierra de Campos*, otros evaporíticos (margas calizas y yesos), originados por los procesos propios de amplias zonas lacustres-palustres del Terciario, y ciertos conos de deyección del Cuaternario donde coexisten cantos y blo-

ques 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.

Los desmontes analizados se caracterizan 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. Una explicación mucho más detallada del estudio se puede encontrar en NAVARRO y SAN MARTÍN (en prensa).

3.- MATERIAL Y MÉTODOS

Se ha evaluado la erosión potencial de los distintos taludes mediante el modelo paramétrico USLE (WISCHMEIER y SMITH, 1978). Posteriormente, en el ferrocarril se ha estimado la erosión registrada en cuatro parcelas provistas con clavos de erosión. Con los clavos se pretende medir la erosión real en los taludes y compararla con la estimada con el modelo USLE. Varios intentos se han realizado en este sentido por diversos investigadores obteniéndose diferentes conclusiones; aunque WISCHMEIER (1976), HAIGH (1987) e Israelsen et al. (1980) indican la conveniencia de utilizar la USLE para la estimación de las pérdidas de terreno en taludes constructivos ya que los resultados son concordantes con los observados en la realidad o son las mejores aproximaciones posibles (WISCHMEIER, 1976).

Los parámetros del modelo USLE 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; para el factor topográfico (LxS) se midieron las longitudes del talud según 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) vale la unidad en este caso.

El rebajamiento se obtuvo mediante clavos de erosión y el *medidor de erosión* diseñado para este caso (Navarro et al., 1998). 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 (NAVARRO y SAN MARTÍN, en prensa)

4.- RESULTADOS

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. Los valores de la erosión potencial estimada mediante el modelo USLE para los desmontes se representan en la figura 1. Con objeto de caracterizar la importancia de las pérdidas de suelo se siguieron las categorías establecidas por la F.A.O., P.N.U.M.A. y U.N.E.S.C.O. en 1981 (ICONA, 1994). Atendiendo a dicha clasificación, los taludes de la circunvalación C2, C4, C6 y C7 están comprendidos en el rango de erosión alta ($A > 200$ t/haxaño) y los restantes en el de muy alta (> 50 t/haxaño).

Para contrastar la validez de los datos recogidos de erosión real en las parcelas del ferrocarril y establecer sus niveles de confianza y rango de variabilidad, se ha realizado un estudio estadístico basándose en un análisis de la varianza para un "modelo lineal". Todos los resultados se han obtenido con un 95% de confianza ($\alpha = 0,05$). Cabe destacar que 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. Se obtiene un buen coeficiente de determinación (R^2) igual a 0,82. **La erosión media** en todo el terreno de estudio **es de 3,1 cm** en los casi 9 meses. Observando las sumas de cuadrados parciales se comprueba que sólo tres de los factores del modelo resultan significativos: orientación, parcela y fila. Se comprueba como cabía esperar que la erosión es diferente entre solana y umbría, entre parcelas dentro de cada orientación, y entre filas dentro de cada parcela y dentro de cada orientación. En la tabla 1 se encuentran las erosiones medias, estimadas por el modelo lineal. De ella se desprende que existe un rebajamiento significativo del terreno duran-

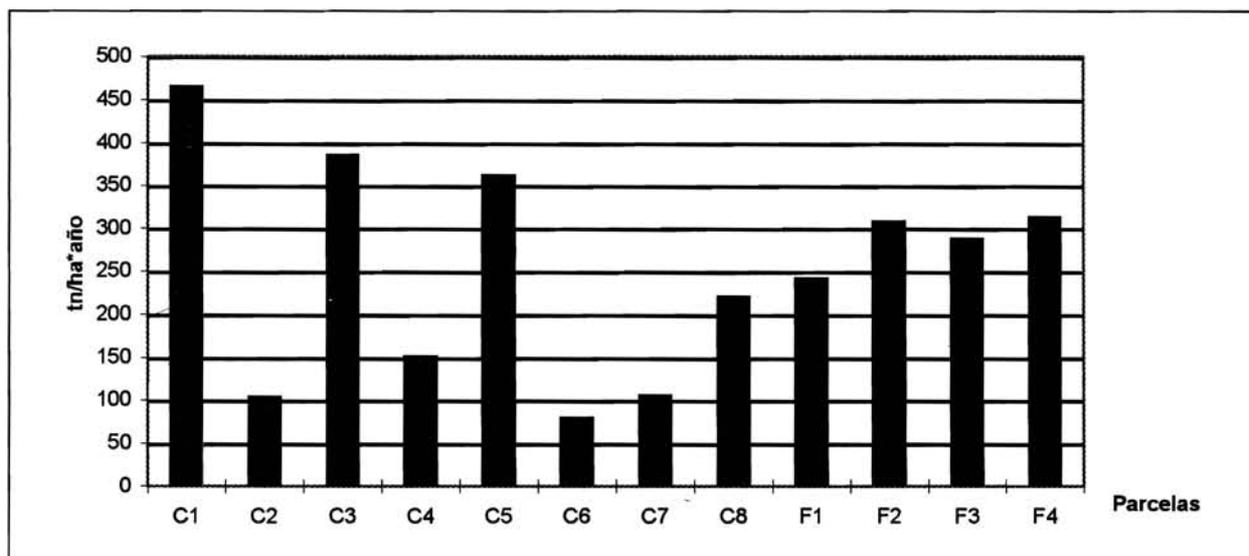


Figura 1. Tasas de erosión según modelo USLE

te el periodo observado y que las erosiones medias entre solana y umbría son significativamente distintas entre sí. El rebajamiento medio en la solana es de 0,81 cm mientras que en la umbría es muy superior, 5,7 cm.

Al expresar los rebajamientos en peso de suelo y año se califica la erosión como alta, ya que las pérdidas de suelo son 158,86 t/haxaño en solana, mientras que en umbría se obtiene una tasa seis veces superior, 1.092,83 t/haxaño, valor muy alto. Si se acude a la erosión media entre orientaciones, la pérdida se estima en 594,34 t/haxaño.

5.- DISCUSIÓN

Se ha estimado la erosión potencial en doce desmontes mediante el modelo USLE, obteniéndose para ocho de ellos un grado de erosión muy alto y para cuatro un grado de alto.

Esto se debe principalmente a la alta erosionabilidad de los suelos, al relieve de los taludes, y a que los terrenos se hallan desnudos. El hecho de que no existan prácticas de control de erosión agrava el proceso. La pérdida de suelo potencial media estimada mediante la USLE para los taludes se califica como muy alta (251,43 t/haxaño).

La validez del modelo USLE en las obras de infraestructura está sugerida por algunos trabajos (MEYER *et al.*, 1975; ISRAELSEN *et al.*, 1980; HAIGH, 1987). 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 la variabilidad de la erosión 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

Tabla 1. Resultados de las orientaciones de solana y umbría

Orientación	L.I.C. (95%) (cm)	Erosión media (cm)	L.S.C. (95%) (cm)	H ₀ : Media=0 Pr>/T/
Solana	0,175	0,814	1,453	0,0133*
Umbría	5,012	5,672	6,331	0,0001**

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

Tabla 2

Orientac.	Periodo (meses)	Rebajamiento medio (cm)	Densidad aparente (g/cm ³)	Tasa de erosión (kg/m ²) ²	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	1.092,83	264,33	4,1

Tabla 3

Parcela n°	Periodo (meses)	Rebajamiento medio (cm)	Densidad aparente (g/cm ³)	Tasa de erosión (kg/m ²) ³	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	1.495,17	287,76	5,2
F4	8,4	0,7	1,39	9,73	144,15	312,76	0,5

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/haxaño y equivale a unas pérdidas muy altas, 2,5 veces el valor predicho por la USLE como media en esta zona. Esta diferencia se debe fundamentalmente a que la USLE computa los valores medios anuales de pérdida de suelo (Wischmeier, 1976; Wischmeier y Smith, 1978) para un largo periodo suficientemente representativo. 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 que movilizó gran parte del regolito acumulado durante los diez años de antigüedad de los taludes. Esto significa que las pérdidas de suelo estimadas por los clavos no son las que corresponderían a un año medio en la zona. La agresividad del aguacero (factor R), calculada según los datos del pluviógrafo de la E.T.S.I.A. y de acuerdo con WISCHMEIER y SMITH (1978) es 141 hJxcm/hxm² (NAVARRO et al., 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 de la USLE.

En solana, si atendemos al rebajamiento del terreno, no se aprecia una gran exportación de material ($\cong 1$ cm) debido a que los taludes han ido desarrollando en unos diez años un perfil de acumulación del regolito importante a pie del talud, compensándose la erosión de las filas superiores de clavos con la ganancia de las inferiores. Al expresar el rebajamiento en peso se observa una erosión alta (158,86 t/haxaño). En la umbria, la erosión es muy superior a la solana (1.092,83 t/haxaño). Puede ser debido a una menor producción de regolito por menor oscilación térmica, menor

¹ Intensidad máxima en 30 minutos del aguacero. Este límite fue aplicado por WISCHMEIER y SMITH (1978) para la lluvia en EE.UU., pero en España aguaceros significativos superan con creces este umbral, por lo que cabría discutir su validez para la península.

² Este dato está referido al periodo de estudio (8,4 y 8,7 meses).

³ Este dato está referido al periodo de estudio (8,4 y 8,7 meses).

Tabla 4. Pérdidas de suelo estimadas por el modelo USLE para el aguacero del 15/7/97

PARCELA	R	K	LxS	C	P	A real (t/haxaño)	A USLE (t/haxaño)
F1	209,84	0,499	9,25	1	1	690,21	968,57
F3	209,84	0,499	11,05	1	1	1.495,17	1.157,04
Media	209,84					1.092,83	1.062,81

Tabla 5. Pérdidas de suelo según modelo USLE tras sustituir el factor C y P por el factor de control de la erosión VM (t/haxaño)

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

capacidad de infiltración y por el predominio del transporte hídrico frente al seco. Si se transforma el rebajamiento a unidades de peso entre superficie y año se puede intentar comparar los valores reales en la solana y en la umbría con los predichos por el modelo USLE. Los resultados se adjuntan en la tabla 2 y 3. Los valores son sumamente variables y dependen fundamentalmente de la orientación y de la longitud del talud. Por otro lado, sin aplicar la condición $I_{30} < 63,5 \text{ mm/h}^1$ (WISCHMEIER y SMITH, 1978) para el cálculo de la R del aguacero del día 15/7/97 el valor 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 5). En cualquier caso, tanto los valores obtenidos mediante la USLE como los registrados en campo indican globalmente una erosión muy importante y 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 su control.

En EE.UU. se adoptó la USLE para estimar la erosión en los taludes de carreteras mediante la sustitución de los factores C y P por el factor de control de la erosión, VM (ISRAELSEN *et al.*, 1980). Con este factor se puede simular el efecto que producen diversas técnicas de protección en taludes. 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 5). De la misma se desprende que con una siembra permanente (duración > 1 año) se consigue en todos los taludes un grado de erosión < 10 t/haxaño, lo que significa erosión ligera.

6.- CONCLUSIONES

Este estudio ha permitido estimar la gravedad de los procesos 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.

El lapso transcurrido para determinar la validez de la USLE en la estimación de la erosión en taludes de infraestructura viaria no parece ser suficiente para obtener una conclusión clara. Se han registrado valores en campo de la mitad (solana) a cuatro veces superiores (umbría) respecto a las medias anuales predichas por la USLE, y esta variabilidad aumenta a nivel de parcela. El registro de una tormenta excepcional con periodo de retorno elevado 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.

Posteriormente, se ha podido realizar una estimación teórica del control de la erosión alcanzado con diversos tratamientos del terreno de la que se deduce que para reducir la erosión a los niveles admisibles debe conseguirse una cubierta herbácea permanente sobre el terreno.

Agradecimientos

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

REFERENCIAS

CARR, W.W. y BALLARD, T.M. 1980. Hydroseeding forest roadsides in British Columbia for erosion control. *Journal of Soil and Water Conservation* 35 (1): 33-35.

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.

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.

ICONA. 1994. Mapa de Estados Erosivos: Islas Baleares. 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.

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.

VILLARÁN, R. 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 Asoc. Téc. De Carreteras*. Madrid, 54, pp. 35-42.

NAVARRO, J. y 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. y SAN MARTÍN, R. Primeros datos sobre la erosión hídrica real en las obras viarias del entorno de Palencia. *Rutas* (en prensa).

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.D.A., Agriculture Handbook nº 537.