

DETERMINACIÓN DEL FACTOR TOPOGRÁFICO LS EN LOS MODELOS RUSLE Y RUSLE3D MEDIANTE EL SIG SEXTANTE.

José L. García Rodríguez¹ y Martín C. Giménez Suárez²

Universidad Politécnica de Madrid.

Ciudad Universitaria s/n – cp. (28040). Madrid.

¹ Dr. Ing. de Montes. Profesor Titular. Laboratorio de Hidráulica e Hidrología.

Dpto. de Ingeniería Forestal. e-mail: josel.garcia@upm.es

² Ing. Forestal. Dpto. de Proyectos y Planificación Rural. ETSI Montes.

e-mail: mcgs@alumnos.upm.es

RESUMEN

El reciente lanzamiento del SIG SEXTANTE®, planteó la generación de este trabajo, el cuál determina y compara el factor LS de los modelos RUSLE y RUSLE 3D. Las ventajas que presenta SEXTANTE® con respecto al habitual ArcGis®, están fundamentalmente asociadas al cálculo de las direcciones de flujo. El efecto de reemplazar el factor L por el área de contribución aguas arriba Asp, refleja mejor el impacto del flujo concentrado. RUSLE 3D calcula un valor más alto del factor LS sobre los cauces y por ende, se soluciona, cuando se calcula de la manera tradicional (RUSLE), el problema de una sobrestimación del poder erosivo en las zonas más elevadas o al comienzo de las laderas.

Palabras clave: RUSLE; RUSLE ·3·D; SIG

ABSTRACT

The recent launch of SIG SEXTANT® raised the generation of this work, which identifies and compares the LS factor for RUSLE and RUSLE 3D models. SEXTANT® benefits with respect to the usual ArcGis® are mainly associated with the calculation of flow directions. The effect of replacing the L factor contributing to the area upstream Asp, better reflects the impact of concentrated flow. 3D RUSLE calculates a higher value of the LS factor on the channels and hence are solutions, when calculated in the traditional way (RUSLE), the problem of an overestimation of the erosive power in the higher elevations or at the beginning of slopes.

Key words: RUSLE; RUSLE 3·D; SIG

INTRODUCCIÓN

Los procesos de erosión de suelo, es decir, la erosión en sí misma, el transporte y la sedimentación final, constituyen uno de los mayores problemas ambientales en diversas zonas del mundo debido a la seria amenaza que estos representan a la agricultura, las estructuras de conservación de agua y suelo y al paisaje natural en general.

Los problemas de erosión de suelos no solo están limitados a las zonas en las cuáles la erosión tiene lugar, sino también a zonas aguas abajo, donde los sedimentos movilizados por medio del escurrimiento pueden también, causar daños a las infraestructuras hidráulicas, canales de riego, además de la sedimentación de embalses y contaminación asociada a los sedimentos, resultando en una disminución en la calidad del agua (Saavedra y Mannaerts, 2003).

Existe por tanto una gran necesidad de estimar la erosión de suelos y sedimentación en grandes extensiones y a una escala regional (por ejemplo, comarcas, provincias, departamentos, distritos, etc.). Recientes avances en tecnología de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten la implementación de complejas funciones espaciales junto con una conveniente unión con datos de sensores remotos (Schoorl, 2002).

Estos últimos avances han estimulado el desplazamiento de modelos empíricos semidistribuidos hacia modelos físicamente basados y/o modelos distribuidos en espacio y tiempo. El gran incremento en la disponibilidad de imágenes satelitales, fuente de información sin sesgo a precios muy bajos y a través de Internet, hoy en día al alcance de muchos, permite un uso ventajoso de estas herramientas especialmente en la evaluación de extensas zonas a escala regional o aún mayores (Saavedra y Mannaerts, 2003).

En la actualidad, la introducción de técnicas digitales de representación cartográfica (Desmet y Govers, 1996) exige una readaptación de los métodos tradicionales, complicándose enormemente el cálculo de los factores implicados en los modelos; de todos ellos, el factor topográfico o factor LS (del conocido modelo USLE) posiblemente sea uno de los más cuestionados puesto que su determinación exige tener previo conocimiento de la distribución en el espacio de los diferentes flujos erosivos cuyas consecuencias se quieren evaluar (Gisbert Blanquer et al., 2001).

Hay que mencionar también, que las técnicas cartográficas digitales optimizan los trabajos de estimación sobre grandes extensiones al permitir tanto la automatización de las operaciones de cálculo y de representación cartográfica, como la reducción de la superficie mínima de asignación de valores (Gisbert Blanquer et al., 2001).

OBJETIVO

El objetivo planteado al realizar este trabajo, ha sido estimar y comparar el valor del factor topográfico, denominado factor LS, a partir de las ecuaciones propuestas por los modelos RUSLE y RUSLE 3D, con el SIG SEXTANTE®.

MATERIALES Y MÉTODOS

Modelo USLE/RUSLE

El modelo USLE surge en base a una gran cantidad de datos reunidos por W. H. Wischmeier, D. D. Smith y otros investigadores del Servicio de Investigación Agrícola (ARS, Agricultural Research Service) del USDA, el SCS y el Centro Nacional de Datos de Escorrentía y Pérdida de Suelo de la Universidad de Purdue, los cuáles presentaron la revisión a la ecuación factorial de Musgrave que precedía la erosión del suelo, y desarrollaron otra ecuación paramétrica simple que se volvió conocida como USLE (Presbistero, 2003), Universal Soil Loss Equation (Wischmeier y Smith, 1965). Wischmeier y Smith (1965), combinaron la longitud de pendiente (expresada como función de λ) e inclinación de pendiente (expresada como función de s) en una sola ecuación. El factor LS del USLE se desarrolló originalmente a partir de parcelas de erosión de menos de 122 m de longitud sobre un suelo agrícola, sin disturbios, de textura media, con pendientes que variaban de 3% a 18% bajo condiciones de campo y precipitación natural (McCool et al., 1987).

Después de varias mejoras en los parámetros del USLE, el USDA publicó en el Agricultural Handbook 703 la llamada Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE).

RUSLE (Renard et al., 1996) estima la pérdida de suelo por erosión superficial en laderas, por medio del impacto de la gota de lluvia y el flujo superficial (interrill y rill), pero no así la que se produce en barrancos, ni en cauces.

RUSLE utiliza las ecuaciones de McCool et al. (1987), para el cálculo del factor de pendiente S, quien derivó dos relaciones para pendientes moderadas ($s < 9\%$) y de mayor inclinación ($s \geq 9\%$) es decir

$$S = 10.8\text{sen}\theta + 0.03 \quad \text{para } s < 9\% \quad (1)$$

$$S = 16.8\text{sen}\theta - 0.5 \quad \text{para } s \geq 9\% \quad (2)$$

Donde θ , es la pendiente en grados.

El factor de longitud de pendiente L se expresa como:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad (3)$$

Donde λ , es la longitud de pendiente.

En el modelo RUSLE, "m, se define como una función continua" que se incrementa con el ángulo de pendiente θ (en grados) y "la relación esperada de

erosión en regueros a interregueros"(Renard et al., 1996), y es de la forma:

$$m = \left(\frac{\kappa}{1 + \kappa} \right) \quad (4)$$

donde, κ , es la relación de erosión en surcos a erosión en entresurcos calculada a partir de:

$$\kappa = \frac{\left(\frac{\text{sen}\theta}{\text{sen}5.143^\circ} \right)}{3.\text{sen}^{0.8}\theta + 0.56} \quad (5)$$

Esta ecuación asume para, κ , una relación surcos / entresurcos moderada e igual a, 0, cuando hay deposición (McCool et al., 1987).

Modelado espacial con RUSLE3D

Para incorporar el impacto de la convergencia del flujo, el factor de longitud de pendiente fue reemplazado por el área de contribución aguas arriba Asp (Moore y Burch 1986, Mitasova et al., 1996, Desmet y Govers 1996), tal como se muestra en la Figura 1.

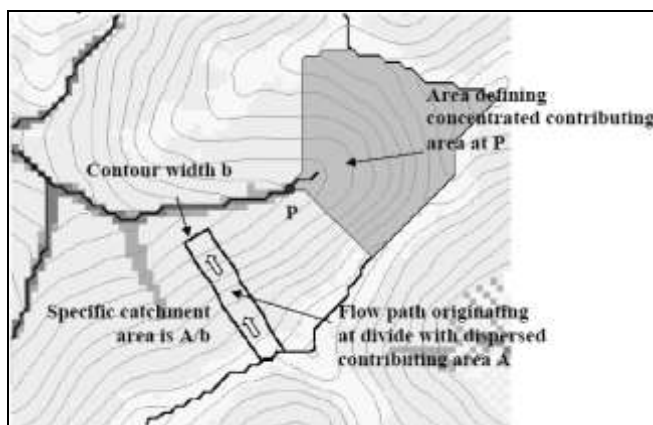


Figura 1. En sombreado se muestra gráficamente el concepto de área de contribución aguas arriba (Tarboton y Ames, 2001).

Moore y Burch (1986) afirmaron que la unidad de fuerza de corriente basado en el factor LS del USLE es actualmente una medida de la capacidad de transporte de sedimentos del flujo superficial; y "qué puede ser usado para trazar los efectos de la hidrología, y de aquí modelar el terreno en 3-D, sobre la erosión del suelo en paisajes naturales (Presbitero, 2003). Sin embargo, el término Asp, puede caracterizar el efecto de convergencia y divergencia del terreno sobre la erosión del suelo, a diferencia del término λ , en el USLE y RUSLE que sólo es aplicable a una superficie en 2-D, es decir, sin considerar

la convergencia y divergencia de las laderas" (Presbitero, 2003). Mitášová (2006), basándose en los estudios de Desmet y Goovers (1996), derivó una ecuación de forma continua para calcular el factor LS en un punto $r = (x,y)$ sobre una pendiente:

$$LS(r) = (m + 1) \left[\frac{A_{sp}(r)}{22.13} \right]^m \left[\frac{\text{sen}b(r)}{\text{sen}5.143^\circ} \right]^n \quad (6)$$

Donde, A_{sp} , es el área de contribución aguas arriba por unidad de ancho de contorno, b , es el ángulo de

la pendiente en grados y, m y n, son parámetros. Los valores típicos para el parámetro m, contemplan un intervalo entre 0.4 a 0.6; mientras que para n, son entre 1.0 a 1.4. Valores bajos de estos parámetros serían susceptibles de utilizar en zonas en que el flujo fuera de tipo laminar, con buena cobertura vegetal, y con poca probabilidad de escorrentía concentrada en regueros o surcos. Los valores más altos de los parámetros se emplean en zonas con flujo turbulento, con facilidad de aparición de pequeñas cárcavas y regueros (Onrubia, 2001).

Con la denominación de RUSLE 3D (Mitášová et al., 1996), se hace referencia a la aplicación del modelo USLE/RUSLE (Onrubia, 2001), con la salvedad que el factor LS es reemplazado por el área de

aporte aguas arriba del punto en el que se quiere evaluar la erosión (Moore y Butch, 1986; Desmet y Goovers, 1996; Mitášová et al., 1996).

Descripción General de la Cuenca

La cuenca elegida para la obtención de los datos fue la de Arroyo Blanco perteneciente al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) – Trevelin, Provincia del Chubut, ubicada en la Región Andino Patagónica, República Argentina. El área en estudio se localiza entre los 71° 32' y 71° 40' de longitud Oeste y desde los 43° 3' a los 43° 11' de latitud Sur. Cuenta con una superficie aproximada de 3640 ha. En la figura 2 se muestra la delimitación de la cuenca.

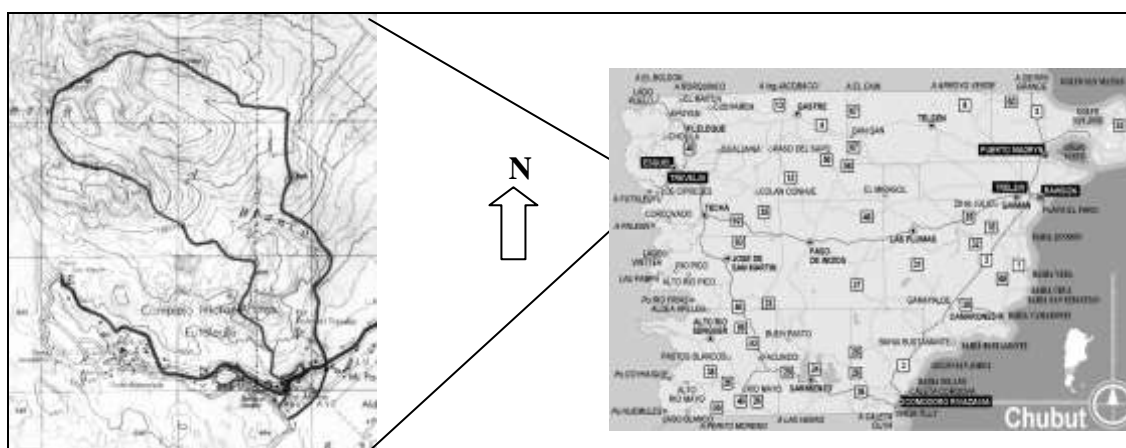


Figura 2. Delimitación de la cuenca y su ubicación geográfica en la provincia del Chubut dentro de la República Argentina.

Uso del SIG SEXTANTE®

La aparición en el presente año del SIG SEXTANTE® (Olaya, 2006), realizado para la Junta de Extremadura (España), dio lugar al presente trabajo y a probar sus funcionalidades, debido a las ventajas que presenta con respecto al habitual ArcGis®, ventajas fundamentalmente asociadas al cálculo de las direcciones de flujo.

El primero y más simple método para especificar las direcciones de flujo sobre una malla de 3x3 celdas de un modelo de elevación digital (DEM), es asignar flujo a partir de cada celda a uno de sus ocho vecinos, ya sea adyacente o diagonal, en la dirección de la pendiente cuesta abajo más inclinada. Este método, denominado D8 (8 direcciones de flujo) o SFD (Single Direction Flow), fue presentado por O'Callaghan y Mark (1984) y es el método que utiliza ArcGis®. La aproximación D8 tiene desventajas que surgen de la asignación del flujo dentro de

una de las ocho posibles direcciones, separadas por 45° (Quinn et al., 1991).

Los métodos de dirección múltiple del flujo, MFD, (Multiple Flow Direction methods) (Quinn et al., 1991) surgieron como un intento de resolver las limitaciones del D8. Estos destinan el flujo fraccionalmente a cada vecino de menor elevación en proporción a la pendiente hacia este vecino. SEXTANTE® nos permite elegir que algoritmo de flujo es el más conveniente, de acuerdo a las condiciones particulares del terreno. Esto es una ventaja muy importante porque de esta manera la estimación de la distribución del flujo es más cercana a la realidad.

Procedimiento

A partir del mapa de curvas de nivel, realizadas por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, República Argentina (INTA) y cedidas por la Dirección General de Bosques y Parques. Prov. del Chu-

but. República Argentina (DGByP), con una equidistancia de 50 m se procedió con SEXTANTE® a transformarlas a formato raster, con un tamaño de celda de 25 m, para lo que posteriormente se utilizó el módulo rellenar datos para generar el modelo digital (DEM), módulo que repetidamente va buscando valores intermedios a las curvas hasta completar el DEM. Debido a que este es un DEM sin procesar, es decir, que presenta sinks o depresiones que no corresponden a la superficie, si no que son celdas o píxeles generados en el proceso de interpolación, estos deben ser eliminados o rellenados, para lo cual se recurrió a otro módulo que lleva a cabo este proceso bajo el procedimiento diseñado por Planchon y Darboux (2001). Posteriormente se aplicó un filtro gaussiano para suavizar la superficie (Figura 3).

Con el DEM ya corregido o procesado, se realizaron los cálculos necesarios para utilizar las ecuaciones correspondientes a los modelos, para lo cual se de-

terminaron la longitud de pendiente (λ) y la inclinación de pendiente (θ) ajustada a polinomio de 2º grado. Para determinar el factor LS del RUSLE, se introdujeron las ecuaciones en SEXTANTE® con lo cual se obtuvo el mapa correspondiente (Figura 5). Para el caso del RUSLE 3D, SEXTANTE® posee un módulo que permite la determinación del mapa de LS directamente (Figura 5).

Para la aplicación del RUSLE 3D, previamente es obligatorio determinar la acumulación de flujo (Figura 4) aguas arriba de cada celda o píxel del DEM, ya que es un parámetro necesario, además de ser la diferencia fundamental con RUSLE. Como se comentó previamente, SEXTANTE® nos permite elegir con que algoritmo determinar las direcciones de flujo, por lo que se seleccionó el algoritmo de flujo de direcciones múltiples (MFD), por ser a nuestra consideración, el que más se acerca a la realidad.

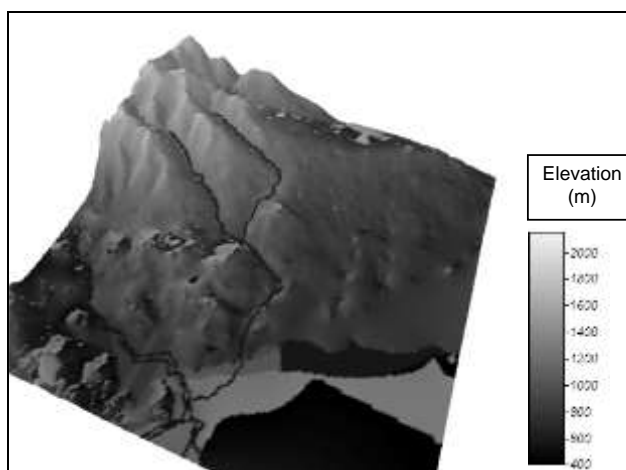


Figura 3. DEM de la cuenca junto con la red hidrográfica principal

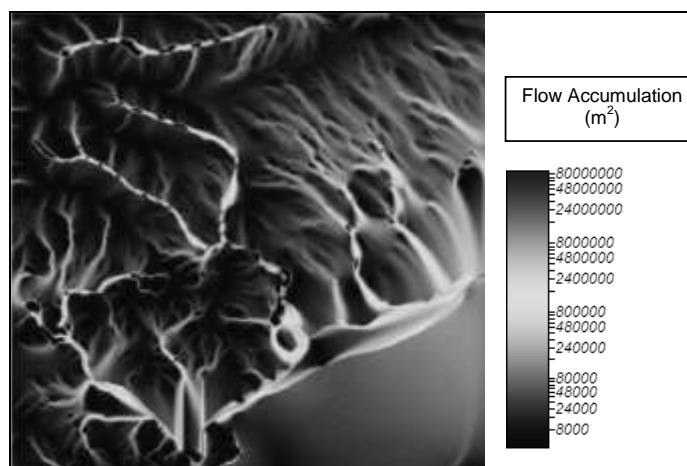


Figura 4. Mapa de área de contribución aguas arriba

RESULTADOS

Como se puede observar en la tabla 1, si bien el valor de la media en uno y otro modelo es similar, los valores máximos son considerablemente inferiores para el RUSLE 3D, es decir en más del 60 %, al igual que en el caso de la desviación típica.

El efecto de reemplazar el largo de pendiente por el área aguas arriba, se ilustra en las figuras 5 y 6, las cuáles muestran que el factor basado en el área aguas arriba (Flujo acumulado), refleja mejor el impacto del flujo concentrado (Mitášová, 2006). Se puede ver como RUSLE 3D calcula un valor más alto del factor LS sobre los cauces y por ende, como se soluciona el problema de una sobrestimación del poder erosivo en las zonas más elevadas o al comienzo de las laderas, cuando lo calculamos de la manera tradicional (RUSLE).

La Figura 6, representa el mapa de diferencia de valores del factor LS calculado con RUSLE menos el calculado con RUSLE 3D. Los valores negativos indican RUSLE 3D estima un valor de LS en ese lugar, mayor que el estimado por RUSLE. Podemos ver que esa diferencia, como ya mencionamos, es notoria sobre los cauces.

Tabla 1. Valores estadísticos del factor LS para los modelos RUSLE y RUSLE 3D.

	LS RUSLE	LS-RUSLE3D	Reducción (%)
Min.	0	0	0
Max.	2616.15	1004.38	62
Media	14.74	14.32	3
Desv. St.	52.35	22.91	56

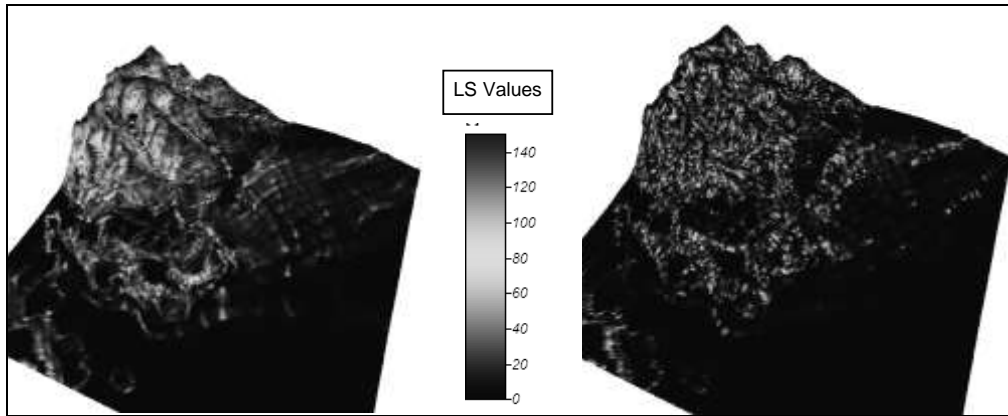


Figura 5. Resultados de la comparación sobre el DEM, de la estimación del factor LS calculado a la derecha, mediante la forma tradicional, es decir el producto del valor de S por el de L y a la izquierda mediante el uso del área aguas arriba, en cada punto en particular (Moore y Burch, 1986). Se puede observar una sobrestimación en los valores del factor LS, cuando se calcula de la forma tradicional (gráfica derecha).

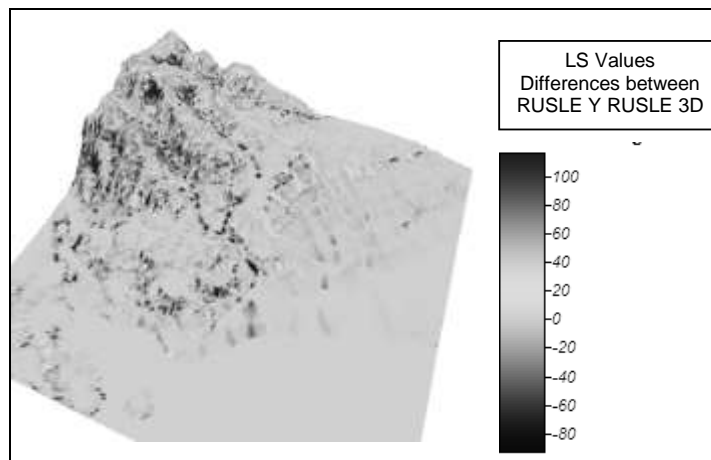


Figura 6. Sobre el DEM se pueden observar el resultado de la diferencia entre los valores calculados con RUSLE menos los de RUSLE 3D. Los valores negativos indican un LS de cálculo mayor para RUSLE 3D, los cuáles se hallan principalmente en los cauces.

CONCLUSIONES

La estimación del cálculo de LS, teniendo en cuenta el área de acumulación aguas arriba, refleja mejor, como ya se ha mencionado, el impacto del flujo concentrado, pero sobretodo reduce los valores de estimación de erosión cuando se los combina con el resto de factores que intervienen, es decir, vegetación, suelos, precipitación, etc.

Otra cuestión muy importante es el avance en el acercamiento a la realidad en cuanto a la distribución del flujo sobre el terreno en lo que se refiere a poder utilizar un algoritmo de cálculo que se adecue a la superficie de estudio y no solo tener que limitarse al algoritmo D8.

En cuanto a la aplicación del modelo RUSLE 3D, se puede agregar que Mitášová comenta que se debe tener cuidado a la hora de interpretar los resultados, ya que es un modelo que supone que el agua posee una capacidad ilimitada para el transporte de materiales, debido a que no tiene en cuenta la deposición dentro de la cuenca. Las pérdidas de suelo están limitadas únicamente por la capacidad del agua para erosionar, por eso recomienda excluir las áreas con deposición en el análisis y solo tener en cuenta donde ocurre erosión neta.

BIBLIOGRAFÍA

- Desmet, P. J. J. y Govers, G. 1996. A GIS Procedure for Automatically Calculating the USLE LS Factor On Topographically Complex Landscapes Units. *Journal of Soil and Water Conservation* 51:427-433.
- Gisbert Blanquer J.M., Ibáñez Asensio S., Andrés Aznar G., Marqués Mateu A. 2001. Estudio Comparativo de Diferentes Métodos de Cálculo del Factor LS para la Estimación de Pérdidas de Suelo por Erosión Hídrica. *Revista de la sociedad española de la ciencia del suelo. Edafología*, vol 8 - nº 2, Agosto 2001. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Facultad de Biología. Universidad de Santiago de Compostela. España.
- Mccool, D. K.; Brown, L. C.; Foster, G. R.; Mutchler, C. K. Y Meyer, L. D. 1987. Revised Slope Steepness Factor for the USLE. USA.
- Mitášová, H.; Hofierka J.; Zlocha M.; Iverson L.R. 1996. Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *Int. Journal of Geographical Information Science*, 10(5), 629-641.
- Mitášová H. 2006. Using Soil Erosion Modeling for Improved Conservation Planning: A GIS-based Tutorial. U.S. Army Engineering Research and Development Center (ERDC). USA (<http://skagit.meas.ncsu.edu/~helena/gmslab/reports/CerlErosionTutorial/denix/TutorialIntro.html>)
- Moore. I. D. y Burch G. J. 1986. Modelling Erosion and Deposition: Topographic Effects. *Trans. ASAE* 29, 1624-1630, 1640.
- O'callaghan, J. F. y Mark D. M. 1984. The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28:323-344.
- Olaya, V. 2006. Fundamentos de Análisis Geográfico con SEXTANTE. Edición 1.0. UNEX. Extremadura. Es.
- Onrubia E. 2001. Desarrollo de Modelos de Erosión y Aplicaciones con Modelos Digitales del Terreno. Trabajo tutelado de Doctorado. Departamento de Ingeniería Forestal, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Presbitero A. L. 2003. Soil Erosion Studies on Steep Slopes of Humid-Tropic Philippines. School of Environmental Studies, Nathan Campus, Griffith University, Queensland. Australia
- Quinn, P.; Beven K.; Chevallier P. Y Planchon O. 1991. The Prediction of Hillslope Flow Paths for Distributed Hydrological Modeling Using Digital Terrain Models," *Hydrological Processes*, 5: 59-80.
- Renard, K. G.; Foster G. R.; Weesies G. A.; Mccool D. K. Y Yoder D. C. 1996. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With The Revised Universal Soil Loss Equation, US Department of Agriculture, Agricultural Research Services, *Agricultural Handbook* 703. USA
- Saavedra C.P. y Mannaerts C. 2003. Evaluación y Monitoreo de Modelos de Erosión y Sedimentación a Escala Regional Usando Sensores Remotos y SIG. Caso de Estudio en la Región Andina, Cochabamba, Bolivia. Artículo presentado en la 3ra Conferencia Latinoamericana sobre Manejo de cuencas: "Desarrollo Sostenible en Cuencas". Arequipa, Perú.
- Schoorl, J.M. 2002. Addressing the Multi-scale LAPSUS of Landscape. PhD dissertation. Faculty of Geology, Wageningen University. Holanda.

Tarboton, D. G. y Ames D. P. 2001. Advances in the Mapping of Flow Networks from Digital Elevation Data. Utah Water Research Laboratory, Civil and Environmental Engineering Department, Utah State University. USA.

Wischmeier, W. H. Y Smith D. D. 1965. Predicting Rainfall-Erosion Losses From Cropland East Of The Rocky Mountains: A Guide For Selection Of Practices For Soil And Water

Conservation. Agriculture Handbook 282. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC. USA.

Artículo recibido el 03/2006 y aprobado para su publicación el 05/2007.