

# Erosión hídrica en la cuenca del río Guadalfeo (Granada); estudio comparativo de las metodologías de la U.S.L.E y Fournier

*Water erosion in the Guadalfeo river basin (Granada): comparative study of the U.S.L.E. and Fournier methods*

A. Castillo (\*), W. Martín-Rosales (\*\*), y R. Osorio

(\*) Insto. Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC-Univ. Granada). Avda. Fuentenueva, s/n. 18071. Granada

(\*\*) Departamento de Geodinámica, Univ. Granada. Avda. Fuentenueva, s/n. 18071. Granada

## ABSTRACT

The average value of soil losses obtained according to the methods of Fournier and the U.S.L.E (Universal Soil Losses Equation) for the studied area was of 40 t/ha/year. However the application of both methods on the level of the subbasins showed very high deviations. These were so much bigger as bigger was the average height of the different subbasins. Both methods offered a close correlation ( $r=0.9$ ) of values in subbasins of an average height between 450 and 800 m.

**Key words:** water erosion; Betic chains, estimation methods.

Geogaceta, 19 (1996), 142-145  
ISSN: 0213683X

## Introducción

En los estudios de erosión hídrica se han utilizado numerosos modelos para la evaluación cuantitativa y la predicción espacio-temporal de las pérdidas de suelo. Dos de las metodologías más extendidas y utilizadas son la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (U.S.L.E.) y el modelo de Fournier (1960). Ambos métodos se aplicaron sobre la cuenca del río Guadalfeo, vertiente a la presa de Rules, en la vertiente meridional de Sierra Nevada (Granada). El área estudiada ocupa una superficie de 720 km<sup>2</sup>, siendo sus cotas extremas de 3.482 y 170 m s.n.m. En ella concurren muy diversos procesos geomorfológicos y climáticos, dando lugar a una gran variabilidad espacial de formas del modelado. La precipitación media en las cotas más bajas está próxima a 500 mm, mientras que se superan los 1.000 mm en la parte superior de la cuenca, donde son mayoritarias las precipitaciones en forma de nieve.

Toda el área se ubica en la Zona Interna de las Cordilleras Béticas, estando especialmente representados los complejos Nevado-Filábride y Alpujarride. Desde un punto de vista estrictamente litológico, el 57 % de la cuenca está ocupada por micaesquistos nevado-filábrides, un 15 % por

carbonatos alpujarrides, un 14 % por esquistos y filitas alpujarrides, y el 14 % restante por materiales postorogénicos de las depresiones de Cádiar y Orgiva (neógenos y cuaternarios), así como por depósitos aluviales asociados a cauces y ríos.

Debido a las heterogeneidades

climática, geomorfológica e hidrológica existentes, la cuenca se subdividió en 20 subcuencas o unidades hidrológicas suficientemente homogéneas (Fig. 1), condición indispensable para la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo. En la tabla 1 se exponen algunos valores e índices

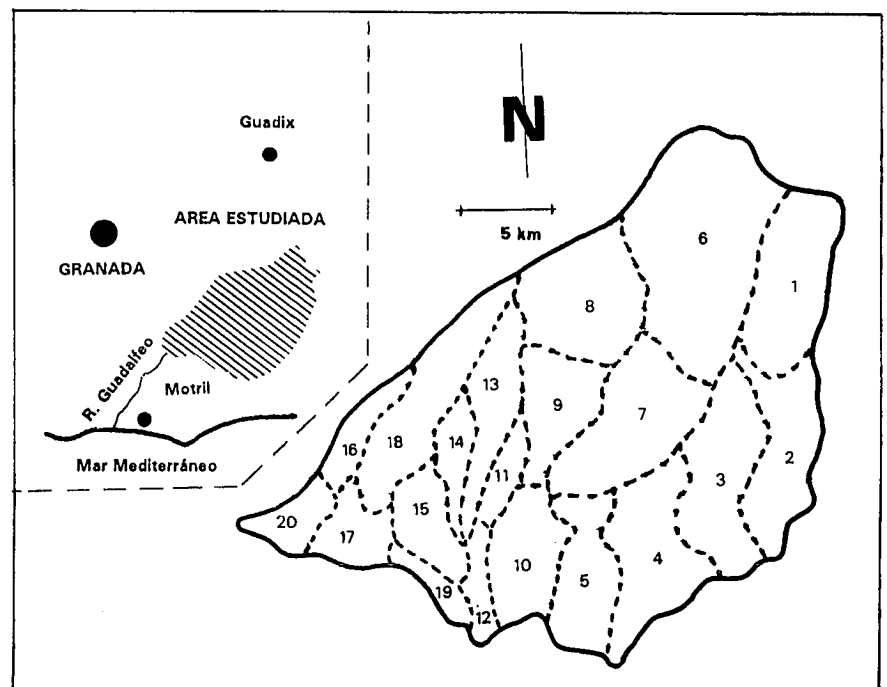


Fig. 1.- Localización geográfica del área de estudio, con detalle de las subcuencas consideradas.

Fig. 1. Geographic location of the studied area with details of the considered subbasins.

SUBCUENCA	S	P	Am	D	J	Ic	Ia
1	52,68	31,64	915	1630	37	1,22	109,3
2	46,50	43,43	470	1804	41	1,78	76,0
3	53,82	37,96	586	1670	41	1,45	75,9
4	52,86	41,50	532	1066	47	1,60	69,8
5	35,76	31,50	511	1156	44	1,47	66,1
6	89,30	41,25	1123	2162	42	1,22	117,1
7	60,40	36,76	1063	2235	43	1,32	87,3
8	54,61	29,52	945	1942	45	1,12	118,6
9	35,86	29,65	1137	2140	51	1,39	89,9
10	34,52	29,00	506	1550	41	1,38	63,3
11	12,52	20,39	583	1730	43	1,61	65,9
12	12,09	22,15	778	1545	53	1,78	72,0
13	31,40	34,26	1515	2801	38	1,71	95,7
14	13,89	23,21	874	2048	34	1,74	74,4
15	23,61	28,08	362	1160	30	1,62	54,2
16	17,53	24,73	707	2120	41	1,65	71,6
17	16,31	20,21	592	1111	45	1,40	66,5
18	50,81	43,90	1494	2922	44	1,72	93,3
19	7,21	16,02	809	1490	43	1,67	68,7
20	18,42	25,60	332	675	35	1,67	52,9

Tabla 1.- Algunos valores e índices morfométricos de las subcuencas consideradas. S: superficie, en km<sup>2</sup>; P: perímetro, en km; Am: altura media, en m; D: desnivel máximo, en m; J: pendiente media de la cuenca, en %; Ic: índice de compacidad o de Gravelius; Ia: índice de agresividad climática de Fournier.

Table 1.- Some morphometric variables of the considered subbasins. S: drainage area (km<sup>2</sup>); average height (m); maximum unlevel (m); J: average slope basin (%); Ic: Gravelius index; Ia: index of climatic aggressiveness of Fournier.

orientativos de la geomorfología y morfometría de las 20 subcuencas consideradas.

### Metodología empleada

a) Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (Modelo U.S.L.E.)

Se trata de un modelo paramétrico basado en el estudio de más de 10.000 parcelas experimentales con dimensiones específicas y sometidas a prácticas de conservación muy concretas (Wischmeier y Smith, 1958; Taylor, 1970). Dicho modelo evalúa la erosión hídrica a partir de la expresión:

$$A = R K (LS) C P$$

donde A representa la pérdida de suelo por unidad de superficie, expresada en t/ha/año; R es el índice de erosión pluvial; K representa el factor de erosionabilidad del suelo; L y S son los denominados factores de pendiente; y, por último, los factores C y P son ponderadores de la influencia de los cultivos y de las prácticas de conservación de suelos, respectivamente. Como se ha comentado, esta metodología se desarrolló en pequeñas parcelas experimentales, por lo que su extrapolación a grandes áreas debe hacerse con ciertas reservas. El modelo es especialmente útil cuando se pretende evaluar la pérdida media anual

de suelo en parcelas concretas, con un uso y ordenación determinados. Asimismo, es útil para seleccionar las prácticas de conservación más idóneas. No obstante, hay que tener presente que esta metodología solo cuantifica la erosión laminar y en regeros, no considerando otros tipos de erosión hídrica, como la producida en barrancos, retrogresión de cauces, erosiones de márgenes y movimientos en masa. Para la estimación de las pérdidas de suelo provocadas por dichos procesos habría que aplicar metodologías adicionales, como la M.U.S.L.E. o el modelo de transporte de Williams (1975).

Como paso previo a su aplicación, fue necesario elaborar los mapas de isolíneas de erosión pluvial, litológico, de pendientes, y el mapa de vegetación y usos del suelo. El factor de erosión pluvial, o erosividad de la lluvia (R), se obtuvo para cada subcuenca a partir de los datos pluviométricos, y tras la aplicación de la ecuación específica recomendada para el área de estudio (Mintegui, 1985). Para obtener el valor promedio de erosionabilidad del suelo (K) de cada subcuenca, fue necesario asignar a cada grupo litológico un valor de K, en atención a su diferente vulnerabilidad a la erosión; posteriormente, se ponderó el valor promedio de cada subcuenca a partir de las diferentes superficies litológicas aflorantes. El factor LS se obtuvo a

partir de la cartografía de la red de drenaje del área estudiada. Por último, los restantes factores de la ecuación, C y P, se obtuvieron a partir de las cartografías específicas, disponibles a escala 1:10.000 y 1:20.000, complementadas con fotografía aérea y con observaciones de campo.

### b) Modelo de Fournier

Fournier (1960) estableció un modelo de estimación de la producción de sedimentos basado en el análisis de 96 grandes cuencas fluviales. Realmente constituye un método de estimación directa de la degradación específica, entendiéndose ésta como la cantidad de sedimentos emitidos por una cuenca en su sección de salida, por unidad de superficie y de tiempo. Este modelo sólo tiene en cuenta el clima y el relieve. Por otro lado, y a diferencia de la U.S.L.E., este modelo considera todo tipo de sedimentos (elementos en suspensión y acarreos), no teniendo en cuenta la relación causa-efecto, sino simplemente la correlación existente entre las características de la cuenca y los sedimentos emitidos por ésta mediante un análisis de sistemas tipo caja negra (De Simón *et al.*, 1993). Como parámetro representativo del factor climático utiliza el índice de agresividad climática, definido como la relación  $p^2/P$ , siendo p la precipitación del mes más húmedo del año y P la precipitación anual, ambas expresadas en mm. Esta cuantificación del efecto de la precipitación en el proceso erosivo se ve complementada con la consideración del tipo de clima de la cuenca, utilizando para ello la clasificación de Turc, en función del módulo pluviométrico y la temperatura media anual. El factor relativo al relieve está representado por el denominado coeficiente orográfico, dependiente de la altura media del relieve de la cuenca y del coeficiente de masividad de Martonne. A partir de los factores aludidos, el modelo establece cuatro agrupaciones de cuencas, correspondientes a otras tantas ecuaciones de regresión obtenidas a partir del muestreo estadístico llevado a cabo sobre numerosas áreas.

Si bien inicialmente el modelo fue aplicado sobre cuencas con más de 2.000 km<sup>2</sup>, en la práctica puede utilizarse en cuencas más pequeñas, siempre que éstas sean lo suficientemente homogéneas y representativas del contexto regional en el que se encuentran (López y Blanco, 1968).

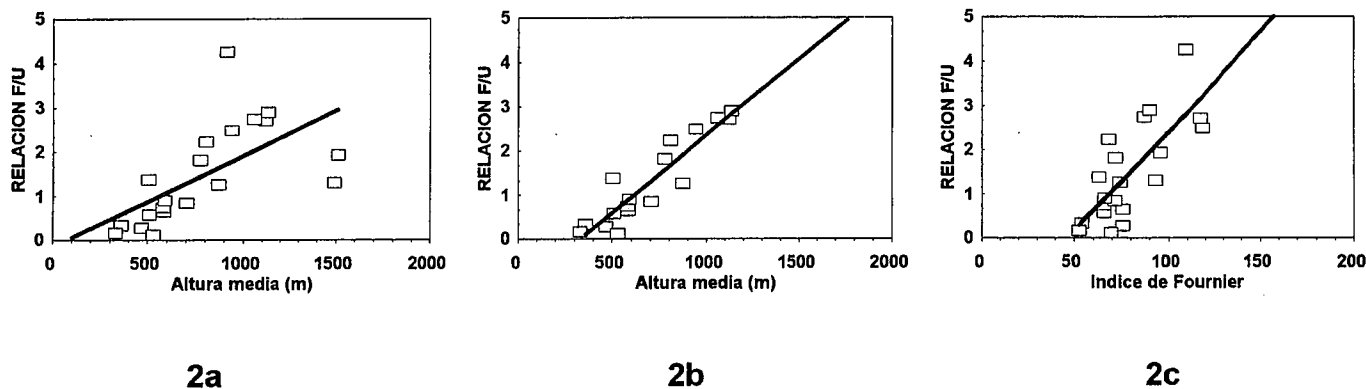


Fig. 2.- a) Relación entre F/U (F= degradación específica hallada por el método de Fournier; U= pérdidas de suelo obtenidas mediante la U.S.L.E.) y altura media para todas las subcuencas consideradas; b) sin considerar a las tres subcuencas más desviadas. c) Relación F/U e índice de agresividad climática de Fournier.

Fig. 2.- a) Relation between F/U (F= specific degradation obtained by Fournier method; U= soil losses calculated by U.S.L.E.) and average height of all the considered subbasins; b) without taking into account the three anomalous subbasins; c) relation F/U and index of climatic aggressiveness of Fournier.

**Resultados obtenidos**

Los modelos descritos fueron aplicados a las 20 subcuencas en que se dividió el área estudiada, correspondiente a la cuenca del río Guadalfeo vertiente a la presa de Rules (Fig. 1). Los resultados de pérdida de suelo obtenidos pueden observarse en la tabla 2. A nivel de cuenca completa (720 km<sup>2</sup>) ambas metodologías aportan un valor medio extraordinariamente semejante, si bien a nivel de las diferentes subcuencas consideradas (7-60 km<sup>2</sup>) las diferencias obtenidas llegan a ser muy notables. Con ambas metodologías se obtiene una pérdida media de suelo de cerca de 40 t/ha/año, lo cual permite definir el grado de erosión como moderado (pérdida de suelo comprendida entre 10 y 50 t/ha/año). Este valor está en consonancia con los obtenidos para cuencas mediterráneas próximas, como la cuenca del río Adra y la vertiente meridional de la sierra de Gádor (De Simón, 1978), o la sierra de Filabres (De Simón *et al.*, 1993), todas ellas en Almería.

En una primera aproximación, y con el objetivo de determinar qué factor o factores eran responsables de la disparidad de los valores obtenidos a nivel de subcuencas, se definió la relación F/U, siendo F la degradación específica obtenida mediante Fournier y U la erosión hídrica a partir de la U.S.L.E. En la figura 2a se representa dicha relación en función de la altura media (Am) para las 20 subcuencas consideradas; es evidente una cierta proporcionalidad entre ambas variables,

que presentan un coeficiente de correlación de 0.6, que, sin embargo, llega a 0.9 si se prescinde de las subcuencas 1, 13 y 18, que son las de mayor altura media (Fig. 2b). Esta segunda representación, altamente significativa, refleja, para el estudio realizado, que el método de Fournier sobrevalora el efecto del relieve cuando las subcuencas poseen una altura media (Am) superior a 800 m; al contrario de lo que ocurre en aquéllas con topografía deprimida y relieve poco acentuado.

Para valores de Am comprendidas entre 450 y 800 m los resultados obtenidos por ambos métodos son muy similares, en cuyo caso es preferible la utilización del método de Fournier por su mayor sencillez. La relación entre la degradación específica obtenida por Fournier (F) y las pérdidas de suelo cuantificadas a través de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (U) viene dada en este caso por la expresión:

$$U=(1/F). (0,004. Am-1,189)$$

También existe una estrecha relación entre F/U y el índice de agresividad climática de Fournier (Ia), aunque con menor grado de correlación (r=0.76), tal y como se puede apreciar en la figura 2c. Para valores de la comprendidos entre 60 y 80 los resultados entre ambos métodos serían también comparables, pero con menor garantía que en el caso anterior.

En el 55 % de las subcuencas consideradas, las estimaciones realizadas por el modelo Fournier superaron a las obtenidas mediante la Ecuación Universal

de Pérdidas de Suelo. La disparidad de resultados entre ambos modelos fue particularmente notable en las subcuencas 20, 4, 15 y 2, donde los valores de la U.S.L.E. llegaron a ser hasta nueve veces superiores a los obtenidos por Fournier, así como en las subcuencas 1, 6 y 9, donde ocurrió el caso opuesto.

Las subcuencas citadas en primer lugar fueron poseedoras de los valores más elevados de los factores K, C y LS de la Ecuación, reflejo de subcuencas muy vulnerables a la erosión, debido a las litologías aflorantes y/o a los cultivos y prácticas de conservación existentes, factores éstos que, como se dijo anteriormente, no son tenidos en cuenta en el modelo de Fournier. En el segundo caso, las subcuencas 1, 6 y 9 dispusieron de índices de erosionabilidad (K) muy bajos, y de una buena cobertura vegetal, lo que dió lugar a estimaciones de erosión hídrica muy bajas según la U.S.L.E.. Sin embargo, todas ellas presentaron relieves acentuados (subcuencas de alta montaña), característica a la que Fournier atribuye un peso notable en los procesos erosivos.

**Conclusiones**

Los valores de pérdidas de suelo obtenidos por Fournier y por la U.S.L.E. para la cuenca del río Guadalfeo vertiente a la presa de Rules (720 km<sup>2</sup>) fueron extremadamente similares, arrojando un valor de degradación próximo a las 40 t/ha/año. Dicho valor es propio de procesos erosivos de intensidad moderada, según la clasificación establecida al respecto por la FAO. Sin embargo, la

UBCUENCA	SUPERFICIE	U.S.L.E.	FOURNIE
1	52,68	12,30	52,2
2	46,50	59,90	15,8
3	53,82	63,70	41,0
4	52,86	133,30	13,6
5	35,76	72,00	40,9
6	89,30	20,80	56,3
7	60,40	15,40	42,0
8	54,61	23,00	57,0
9	35,86	15,10	43,6
10	34,52	31,10	42,8
11	12,52	55,50	40,7
12	12,09	23,60	42,6
13	31,40	26,20	50,4
14	13,89	31,60	39,9
15	23,61	31,20	9,9
16	17,53	48,90	41,0
17	16,31	55,00	49,5
18	50,81	37,40	48,6
19	7,21	18,50	41,3
20	18,42	62,90	9,5
<b>TOTAL</b>	<b>720,10</b>	<b>41,75</b>	<b>40,9</b>

Tabla 2.- Valores de pérdidas de suelo y de degradación específica obtenidos mediante los modelos U.S.L.E. y Fournier, respectivamente (valores en t/ha/año; superficie en km<sup>2</sup>).

Table 2.- Soil losses and specific degradation obtained according to the methods of Fournier and the U.S.L.E., in t/ha/year (drainage area, in km<sup>2</sup>).

aplicación de ambas metodologías a nivel de subcuencas (de 7 a 60 km<sup>2</sup>) dió lugar a desviaciones muy elevadas. Dichas desviaciones fueron tanto mayores cuanto más alta fue la altura media de las diferentes subcuencas, debido a la sobreestimación del factor relieve por el modelo de Fournier. Para las subcuencas con valores de altura media comprendidos entre 450 y 800 m los resultados obtenidos por ambos métodos estuvieron estrechamente correlacionados ( $r=0.9$ ).

Para las subcuencas de alta montaña y relieve más acentuado, con más de 1.300 m de altura media, Fournier aportó valores inaceptables por la excesiva sobrevaloración de las estimaciones

realizadas. Los resultados obtenidos confirman que para la correcta aplicación de la metodología de Fournier en cuencas de pequeña extensión, es condición indispensable, además, la existencia de una gran homogeneidad en lo que a procesos erosivos se refiere. Bajo estas condiciones, el modelo de Fournier sería relativamente equiparable al de la U.S.L.E., con la ventaja de ser de aplicación mucho más rápida y sencilla.

La metodología basada en la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (U.S.L.E.) es bastante más compleja, pero, debido a ello, considera un mayor número de variables con influencia en la erosión hídrica (litología, geomorfo-logía, cubierta

vegetal, clima, cultivos y prácticas de conservación), lo que garantiza una mayor precisión de los resultados obtenidos.

#### Agradecimientos

Este trabajo se realizó al amparo de un Contrato de Asistencia Técnica sobre la «Hidrología forestal de la cuenca del embalse de Rules sobre el río Guadalfeo (Granada)», concertado a través de la Fundación Empresa-Universidad de Granada.

#### Referencias

- De Simón, E. (1978): *Proyecto de restauración hidrológico-forestal de la vertiente sur de Sierra de Gádor, Almería*. ICONA, 11 vol., inédito.
- De Simón, E.; Mintegui, J.A.; García, J.L. y Robredo, J.C. (1993): *La restauración hidrológico-forestal en las cuencas hidrográficas de la vertiente mediterránea*. Junta de Andalucía, Sevilla, 325 p.
- FAO, PNUMA y UNESCO (1980): *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de suelos*. Roma, 86 p.
- Fournier, F. (1960): *Climat et erosion*, Ed. Pres. Univ. de France, Paris, 201 p.
- López Cadenas, F. y Blanco, M. (1968): *Aspectos cualitativos y cuantitativos de la erosión hídrica y del transporte y depósito de los materiales*. I.F.I.E. Ministerio de Agricultura, Madrid, 185 p.
- Taylor, J.C. (1970): *Master Thesis*, Iowa State Univ.
- Meyer, L.D. and Weischmeier, W.H. (1969): *Transactions of the A.S.A.E.*, 754-758, Michigan.
- Mintegui, J.A. (1985): *Metodología para la evaluación de la erosión hídrica*, D.G.M.A., Madrid, 150 p.
- Williams, J.R. (1975): *Water Resour. Bull.*, vol. 11, n° 5.
- Wischmeier, W.H. y Smith, D.D. (1958): *Trans. Amer. Geophysical Union*, 39:285-291.