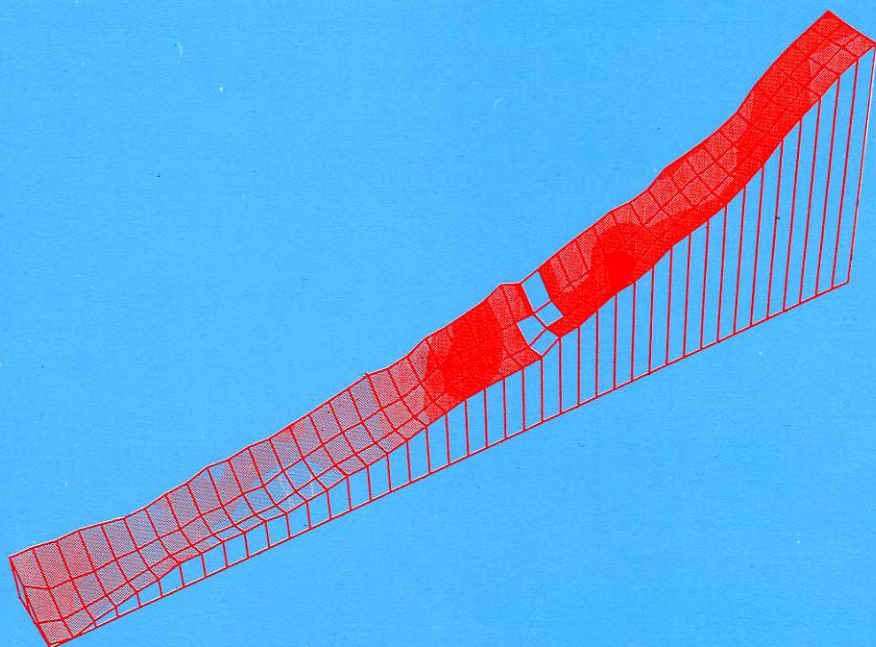


Cuantificación de la erosión mediante el radioisótopo cesio 137

Ana Navas

CUADERNOS TÉCNICOS DE LA S.E.G. N.º 8



SOCIEDAD ESPAÑOLA DE GEOMORFOLOGIA
GEOFORMA EDICIONES
1995

CUADERNOS TECNICOS DE LA S.E.G.
N.º 8

CUANTIFICACION DE LA EROSION
MEDIANTE EL RADIOISOTOPO CESIO 137

Ana Navas

1995
Sociedad Española de Geomorfología
Geoforma Ediciones
Logroño

1.ª Edición, junio de 1995

Reservados todos los derechos.

Ninguna parte de este libro puede ser reproducida, almacenada en un sistema de informática o transmitida de cualquier forma o por cualquier medio electrónico, mecánico, fotocopia, grabación y otros medios sin previo y expreso permiso del propietario del copyright.

© Sociedad Española de Geomorfología
© Geofoma Ediciones
Apartado de Correos, 1293
26080 Logroño

I.S.B.N.: 84-87779-20-4
Depósito legal: Z-2230-1995

Imprime:

Coop. de Artes Gráficas
LIBRERIA GENERAL
Pedro Cerbuna, 23
50009 Zaragoza

F. Salvador Franch
BIBLIOTECA

CUANTIFICACION DE LA EROSION MEDIANTE EL RADIOISOTOPO CESIO 137

Ana NAVAS

Departamento de Edafología. EE de Aula Dei, CSIC, Apartado 202. 50080 Zaragoza

El problema medioambiental y de disminución de productividad que representa la pérdida de suelo afecta con especial gravedad a los agrosistemas de la Europa mediterránea. En algunas regiones de la España semiárida, entre las que se incluye Aragón, la superficie con un estado grave de erosión alcanza el 40%.

La conservación del suelo requiere la utilización de un método fiable y de aplicación general para evaluar si la velocidad con la que el suelo se erosiona equilibra su velocidad de formación.

Los procesos más relevantes de la erosión hídrica son la erosión por salpicadura, laminar en regueros o surcos y la erosión en cárcavas y barrancos. La contraposición de pautas y caracteres de estos procesos plantea problemas a la hora de diseñar un método efectivo para medir la erosión del suelo.

Las dificultades asociadas con las técnicas clásicas de medida de la erosión han conducido a la investigación de nuevos métodos, entre los que se incluyen los de

isótopos trazadores. En las dos últimas décadas, el cesio 137 ha suministrado datos de erosión en ambientes muy diversos y actualmente este radioisótopo es reconocido como un trazador efectivo del movimiento del suelo (Ritchie & McHenry, 1990).

La potencialidad de uso de las medidas de cesio 137 para estimar las velocidades de erosión ha sido demostrada en la actualidad en varias áreas del mundo: en USA (Ritchie et al., 1974; McHenry & Ritchie, 1977), en Canadá (De Jong et al. 1983), en Australia (Longmore et al., 1983; Campbell, 1983; Campbell et al., 1986) y en Gran Bretaña (Walling et al., 1986; Loughran et al., 1987).

En España, las investigaciones realizadas hasta el momento en el centro del valle del Ebro confirman la utilidad de esta técnica para el estudio de la erosión en ambientes semiáridos (Navas & Machín, 1991; Navas & Walling, 1992, Quine et al., 1994).

1. Fundamentos de la técnica de las medidas con cesio 137

El cesio 137 es un radioisótopo de 30 años de vida media, que fue producido como un subproducto de las bombas termonucleares en los ensayos atmosféricos realizados entre los años 1950-1970. Se distribuyó globalmente en la estratosfera y fue depositado por la lluvia. Conforme a los datos suministrados por las autoridades de Energía Atómica de Gran Bretaña, el depósito de cesio 137 comenzó en 1954, finalizó en 1983 y los picos máximos de depósito se alcanzaron entre 1955 y 1966.

Su distribución a gran escala muestra una variación relacionada con la precipitación anual (Cawse & Horrill, 1986); sin embargo, su depósito a nivel de campo parece haber sido relativamente uniforme. En general, estas pautas se mantienen a nivel global ya que la cantidad de cesio depositado está en relación con su concentración en la atmósfera.

El uso de esta técnica asume que la incorporación del cesio 137 en el sedimento es rápida y que la migración postdepósito es insignificante. En la mayoría de los ambientes, el cesio 137 está fuertemente ligado a los minerales de la arcilla y a la materia orgánica del suelo. La evidencia empírica disponible sugiere que su redistribución ocurre en asociación con las partículas del suelo por procesos físicos de erosión o depósito, o por el laboreo.

Limitaciones al uso del cesio 137 como trazador del movimiento del suelo se

producen en suelos orgánicos de pH ácido (Mitchel et al., 1992) y en áreas fuertemente afectadas por el accidente de Chernobyl (De Roo, 1991; Higgitt et al., 1992).

2. Aplicación de la técnica

2.1. Muestreo

Se pueden considerar dos tipos de muestras: del perfil del suelo e individuales. Para determinar la distribución del perfil de cesio 137 en profundidad, las muestras se recogen utilizando un plato rascador (Campbell et al., 1988), mientras que las determinaciones individuales de carga se realizan sobre muestras de "cilindro" de suelo que se pueden tomar con muestreadores manuales, aunque se recomienda la utilización de un martillo tomamuestras percutor para obtener la muestra inalterada.

La profundidad de muestreo debe retener el perfil completo de cesio 137, para así poder comparar muestras de emplazamientos diferentes. En nuestro ambiente, y conforme a los datos que se presentan en el Cuadro 1, esta profundidad debe alcanzar al menos 30 cm. para emplazamientos estables o erosionados y hasta 60 cm. o más en áreas de depósito de sedimentos. Para comprobar que se ha obtenido el perfil completo, se recogen por separado los 2 cm. basales del cilindro, en los cuales la carga de cesio 137 debe ser 0.

Para analizar procesos en vertientes, el muestreo se debe realizar en transectos,

mientras que para el estudio de cuencas o campos de cultivo se recomienda el muestreo en malla. El registro de la altitud para cada punto de muestreo suministra

las bases necesarias para la posterior comparación de las cargas de cesio 137 con la topografía.

Tabla 1
Distribución de cesio-137 en el perfil del suelo

Zona de bosque estable		Vertiente Erosionada		Campo de depósito	
Profundidad cm.	Actividad mBqcm ⁻²	Profundidad cm.	Actividad mBqcm ⁻²	Profundidad cm.	Actividad mBqcm ⁻²
0-15	69.7	0-5	70.7	0-10	89.0
5-10	33.3	5-10	34.0	10-20	34.4
10-15	35.8	10-15	24.7	20-30	86.8
15-20	16.3	15-20	15.7	30-40	86.6
20-25	5.8	20-25	42.8	40-50	32.0
25-30	1.6	25-30	6.0	50-60	12.0
30-35	0.0	30-35	1.7	60-70	0.0
35-40	0.0	35-40	0.0		
		40-45	0.0		

2.2. *Análisis de muestras y expresión de resultados*

El ¹³⁷Cs emite rayos gamma en el nivel energético 662 keV, que pueden ser fácilmente medidos con un espectrómetro de rayos gamma.

La preparación de muestras es sencilla. Se parte de muestra seca que se muele y tamiza (malla de 2 mm). Una submuestra representativa y de peso conocido se coloca en un "Marinelli" y se introduce en contenedor de plomo. Se utilizan analizadores multicanal conectados a detectores de germanio alojados en contenedores de plomo. Los tiempos medios de conteo oscilan entre 4 y 8 horas, lo que supone una precisión analítica de +- 6%.

A partir de los análisis de laboratorio se obtienen dos medidas del contenido de cesio 137 para cada muestra, la actividad total (mBq) y la actividad por unidad de masa (mBq/g).

Para muestras de cilindro, la actividad total es la medida más útil ya que puede ser sencillamente convertida en una medida de carga por unidad de área o inventario de cesio 137 (mBq cm⁻²), dividiendo la actividad total por el área de la sección interna del tomamuestras.

Para perfiles, la actividad por unidad de masa (mBq g⁻¹) suministra una medida más útil de cesio 137, ya que su variación a través de la secuencia del perfil suministra una valiosa evidencia de la distribución en profundidad del radioisótopo.

3. Uso de las medidas de cesio 137 para determinar la distribución del movimiento del suelo

La distinción entre lugares erosionados y no erosionados se determina por la desviación respecto a un valor de referencia de los valores medidos del inventario de cesio 137. Por lo tanto, en primer lugar se ha de establecer la carga de referencia del cesio 137 en el área a estudiar. Esta, se puede obtener muestreando un lugar estable, es decir, no erosionado y horizontal, lo más cercano posible al lugar de estudio.

La desviación en la carga de una muestra respecto a la de referencia puede reflejar erosión o depósito. Las desviaciones negativas indican que se ha producido una pérdida de cesio 137 y que el suelo se ha erosionado, mientras que las positivas reflejan la ganancia de cesio 137 y el depósito. En consecuencia, la magnitud y dirección de estas desviaciones suministra una estimación cualitativa de la redistribución del sedimento.

3.1. *Perfiles tipo y significado geomorfológico*

Para determinar el potencial de uso de esta técnica en condiciones fisiográficas y climáticas de semiaridez, se seleccionó una cuenca de 0.25 km² localizada en las Bardenas (NE de Zaragoza). Sus bordes están bien definidos por vertientes escarpadas con un promedio de 18° de pendiente. Estas vertientes presentan una

cobertera vegetal arbustiva no muy densa. En algunas zonas los procesos de erosión son muy intensos con regueros y surcos, y en ellas, el suelo está totalmente desprovisto de vegetación. La cuenca está surcada por un barranco central que delimita la extensión de la superficie cultivada, ubicada en la base de la vertiente Este.

En esta vertiente se establecieron dos transectos, uno en cabecera y otro en la parte baja de la cuenca. Las muestras se recogieron desde la cabecera a la base de la vertiente, en un transecto-malla con un espaciado de 10 x 10 m.

Hasta la inflexión de la vertiente, la profundidad de muestreo fue de 30 cm., y las muestras se tomaron seccionadas a incrementos de 5 cm. A partir de la inflexión, cuando se consideró que se podían depositar sedimentos, la profundidad de muestreo se prolongó hasta 60 cm. y se realizó a intervalos de 10 cm. En el transecto de cabecera se tomaron 42 muestras y en el de base 66.

El muestreo detallado en incrementos de profundidad permite el análisis de la distribución de los perfiles de ¹³⁷Cs, su relación con la posición fisiográfica y su significado geomorfológico.

En las partes no cultivadas de ambos transectos se encontraron fundamentalmente perfiles de ¹³⁷Cs estables. En éstos, la acumulación de ¹³⁷Cs es máxima en el horizonte superficial, y su concentración disminuye exponencialmente con la profundidad (Figura 1a), mientras que la erosión (Figura 1b) o depósito (Figura 1c) se identifican respectivamente por la significativa disminución o aumento de

la concentración de ^{137}Cs en los primeros centímetros de suelo.

En suelos cultivados se produce una mezcla del suelo arado y la distribución de ^{137}Cs se homogeniza en todo el perfil. La agradación se identifica por perfiles alargados de ^{137}Cs que llegan hasta 50-60 cm. de profundidad (Figura 1c') y también por la alta carga, que refleja la entra-

da en el perfil del ^{137}Cs que lleva el suelo y que se adiciona al que fue depositado por la lluvia en el lugar. La erosión, por el contrario, viene señalada por una baja carga y por una concentración de ^{137}Cs significativamente menor en los incrementos sucesivos de profundidad (Figura 1d).

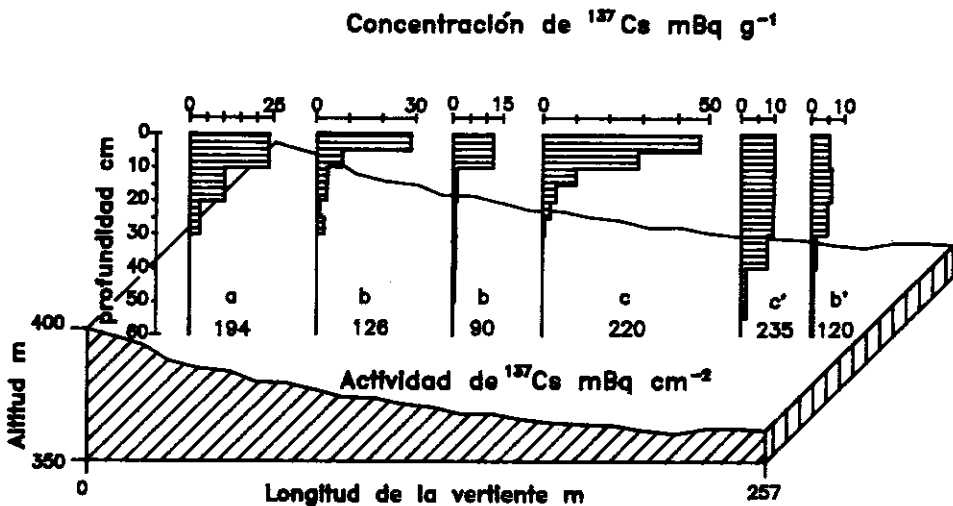


Figura 1.- Perfiles tipo de la distribución de ^{137}Cs en profundidad a lo largo de la vertiente: a) estable, b) y b') erosión, c) y c') agradación.

Esta secuencia de perfiles refleja la significación geomorfológica de la forma de la vertiente y su efecto sobre la movilización del sedimento. Sobre esta base se confirma que a través del análisis del perfil de cesio 137 se pueden identificar las pautas del movimiento del suelo y diferenciar sitios erosionados, no erosionados y de depósito. También es posible realizar esta diferenciación comparando la carga total de cesio 137

(por unidad de área) en cada punto de interés, con respecto a la carga de referencia.

3.2. Actividades de cesio 137

La carga de referencia medida para este área de las Bardenas se sitúa en torno a los 200 mBq cm⁻². Otros muestreos que se realizaron para establecer inventarios

de referencia en el centro del valle del Ebro, en un radio de unos 150 km, presentaron una importante variabilidad espacial (Cuadro 2). Este hecho subraya la importancia de establecer el inventario

de referencia en un lugar lo más cercano posible al de estudio para eliminar como factor de variación, el originado por la distribución de las precipitaciones.

Tabla 2
Actividades de referencia de cesio-137 en las plataformas terciarias del centro del valle del Ebro.

Situación	Actividad de ^{137}Cs mBqcm^{-2}
Castelar 1	343.3
Castelar 2	263.6
La Muela	117.4
Loma Negra 1	192.9
Loma Negra 2	164.9
Loma Negra 3	212.2
Loma Negra 4	210.7
La Plana	201.3
Santa Quiteria	231.2

La distribución espacial de las actividades de cesio 137 para ambos transectos se determinó mediante un programa de interpolación geoestadística (GINO-SURF) que traza isolíneas a partir de datos de puntos individuales.

En el transecto de cabecera (Figura 2a), la distribución de los inventarios de cesio 137 se corresponde con la morfología de la vertiente. La mayor parte del suelo en pendiente presenta actividades de cesio 137 similares o ligeramente por debajo de la de referencia. La erosión no es aquí muy importante y parece que la cobertera vegetal presente sería suficiente para proteger el suelo. Ya en la inflexión de la vertiente, se observa una zona con altas actividades de cesio 137 entre 200 y 300 mBq cm^{-2} , lo que es consistente con la redistribución del

radioisótopo asociada al depósito de sedimentos.

Finalmente, en la base de la vertiente, y contrario a lo que cabría esperar, se registran altas pérdidas de cesio 137 (con actividades inferiores a 100 mBq cm^{-2}) y por implicación de pérdida de suelo debida al laboreo.

En la Figura 2b se puede apreciar la redistribución del cesio 137 en el transecto de la base de la cuenca. El rasgo dominante de la distribución de las actividades de cesio 137 es la gran proporción del área con valores entre 100 y 150 mBq cm^{-2} , que reflejan una erosión generalizada a lo largo de todo el transecto. Localmente, se observan pequeñas áreas de acumulación de sedimentos, con actividades entre 200 y 250 mBq cm^{-2} . Además, toda la

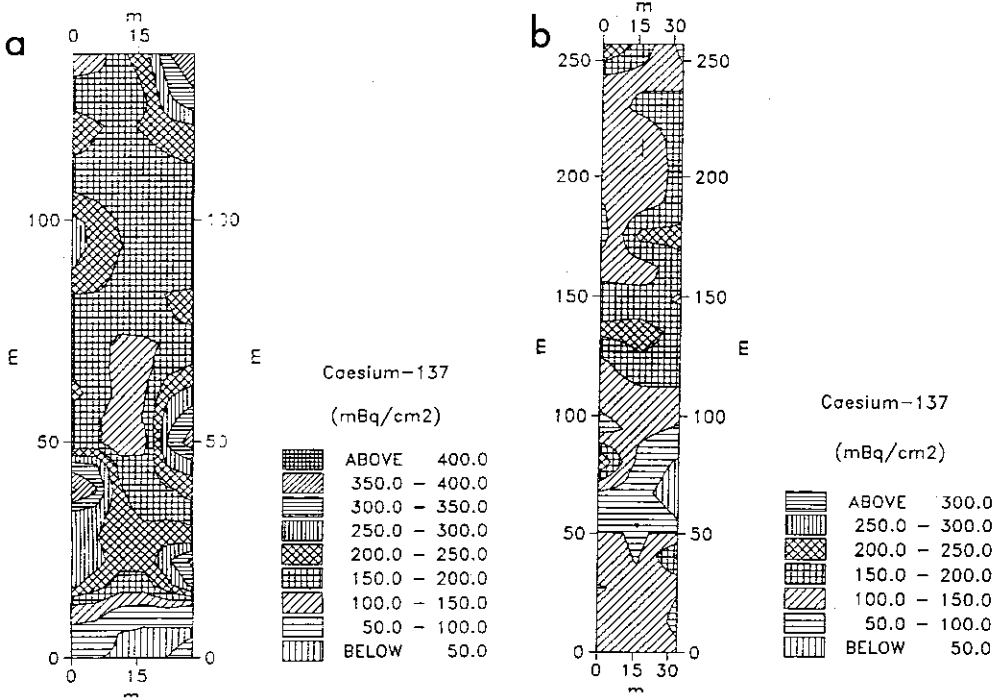


Figura 2.- Distribución de las actividades de cesio 137 en los transectos de cabecera (a) y base (b) de una cuenca de las Bardenas.

base de la vertiente donde se realiza la actividad agrícola está fuertemente afectada por la erosión.

4. Relación entre la carga de cesio 137 y las velocidades de erosión y depósito

Las velocidades de erosión y depósito en un área y la proporción de suelo erosionado transportado fuera de ella se pueden determinar si se establece una relación cuantitativa entre la pérdida y la ganancia de ¹³⁷Cs y la cantidad de erosión y depósito (Kachanoski & De Jong, 1984;

Walling & Quine, 1990). Para cuantificar la erosión se deben, por tanto, calibrar los datos de ¹³⁷Cs.

Existen varios métodos para relacionar las pérdidas de ¹³⁷Cs en el perfil del suelo con las velocidades de erosión (Cuadro 3, Walling & Quine, 1990). Estos se pueden agrupar en dos categorías: las relaciones empíricas (Ritchie et al., 1974; Campbell et al., 1986; Loughran et al., 1988; Wilkin & Hebel, 1982) y los modelos teóricos entre los que destacan: el método proporcional (De Jong et al., 1983; Kachanoski, 1987), el gravimétrico (Brown et al., 1981), los modelos de distribución del perfil (Zhang et al., 1990)

ANA NAVAS

Tabla 3

Relaciones empíricas y modelos teóricos para calcular velocidades de erosión y depósito a partir de las medidas de cesio-137.

RELACIONES EMPIRICAS

Ritchie et al. (1974)

$$X = 1.6y^{0.68}$$

X = % pérdida del radionucleido

Y = pérdida del suelo ($t\ ha^{-1}\ año^{-1}$)

Wilkin y Hebel (1982)

$$Z = CDB$$

Z = inventario de ^{137}Cs ($Bq\ m^{-2}$)

C = concentración media de ^{137}Cs en el suelo ($Bq\ kg^{-1}$)

D = profundidad del arado (m)

B = densidad aparente ($kg\ m^{-3}$)

MODELOS TEORICOS

METODO PROPORCIONAL

Jong et al. (1983, 1986)

$$Y = 10 (DBX/100) T$$

Y = pérdida media anual de suelo ($t\ ha^{-1}\ año^{-1}$)

D = profundidad del arado (m)

B = densidad aparente ($kg\ m^{-3}$)

X = porcentaje de reducción en el contenido total de ^{137}Cs

Y = tiempo desde la acumulación inicial de ^{137}Cs (años)

APROXIMACION GRAVIMETRICA

Brown et al. (1981)

$$Y = 10 \frac{(Z-Se)}{Cet}$$

Cet

Y = pérdida media anual de suelo ($t\ ha^{-1}\ año^{-1}$)

Z = inventario de ^{137}Cs ($Bq\ m^{-2}$)

Se = inventario medio del área erosionada ($Bq\ m^{-2}$)

Ce = concentración media de ^{137}Cs en el área erosionada ($Bq\ Kg^{-1}$)

T = tiempo desde el inicio del depósito de ^{137}Cs (1954)

MODELOS DE BALANCE DE MASAS

Kachanoski y De Jong (1984)

$$St = (St-1 + Ft - Et) Ct K$$

St = inventario de ^{137}Cs en la profundidad del arado al final del año t

Ft = depósito de ^{137}Cs en el año t

Et = pérdida anual de suelo

Ct = concentración de ^{137}Cs en la profundidad del arado

K = desintegración radioactiva constante del ^{137}Cs (0.997)

CUANTIFICACION DE LA EROSION MEDIANTE EL RADIOISOTOPO CESIO 137

y los de balance de masas (Kachanoski & De Jong, 1984; Quine, 1989; Walling & Quine, 1990, 1991).

Dentro de los modelos de balance de masas, el desarrollado por Quine (1989) predice la carga resultante de cesio 137 para los lugares sometidos a diferentes velocidades de erosión y depósito. El modelo considera, para los perfiles de erosión o de agradación del suelo, un ciclo de 4 estadios: 1) el depósito de cesio 137, 2) la erosión y agradación, 3) el labrado y 4) la desintegración de la radiactividad. Los cálculos del contenido de cesio 137 en cada estadio se realizan secuencialmente.

Los parámetros utilizados por el modelo son: 1) el depósito anual de cesio 137, 2) la velocidad de erosión, 3) la de agradación, 4) la profundidad del arado, que controla el volumen de suelo en el que se produce la mezcla de cesio 137 y 5) la profundidad inicial de penetración de cesio 137 de la que no se tienen datos empíricos, aunque el modelo asume de 1 cm.

Para los lugares en que no se disponen de datos de depósito anual de cesio 137,

éste se puede estimar estableciendo el depósito total en el lugar, utilizando las distribuciones de depósito disponibles, y reconstruyendo la distribución anual mediante una sencilla ecuación.

Para estimar los valores de velocidad de erosión y de agradación se asigna a estos dos parámetros unos valores iniciales y se realizan una serie de interacciones hasta obtener el valor de la carga de cesio 137 medida en el perfil. A continuación, y a partir de ese valor, se invierte el proceso hasta obtener las predicciones de velocidad de erosión y agradación.

Con los datos suministrados por el modelo se pueden producir relaciones de calibración que permiten estimar las velocidades de erosión y depósito a partir del porcentaje de pérdida o ganancia de cesio 137.

La calibración de los datos de cesio 137 se ha realizado en la cuenca de las Bardenas, las primeras estimaciones de pérdida de suelo en emplazamientos erosionados se han realizado utilizando dos modelos teóricos: el método proporcional (Cuadro 4) y el modelo de Quine

Tabla 4

Valores medios de actividad de ^{137}Cs , masa del suelo y velocidad de erosión en el talud y base de la vertiente en la cabecera y parte baja de la cuenca de las Bardenas.

	actividad mBqcm ⁻²	masa t	erosión t/ha año
cabecera			
talud	155.3	3140	19.5
base	90.5	2540	38.6
parte baja			
talud	117.2	3240	37.2
base	76.5	2880	49.4

(1989) para campos cultivados y una versión modificada del mismo (Quine et al., 1994) para suelos en condiciones naturales. La redistribución del suelo calculada mediante este último modelo se puede observar en la Figura 3.

Los resultados obtenidos por ambos métodos son similares en la parte cultivada o base de la vertiente tanto en la cabecera como en la parte baja de la cuenca, donde predominan las velocidades de erosión comprendidas entre 20 y 40 t/ha año. Las mayores pérdidas de

suelo se registran, según ambos métodos en la zona cultivada, lo que confirma la degradación que sufren nuestros agrosistemas, enmarcados en unas desfavorables condiciones edafoclimáticas.

En el talud de la vertiente, donde los suelos mantienen su vegetación natural, las diferencias en el cálculo de las velocidades de erosión por el método proporcional y por el de balance de masas son notables, lo que sugiere la necesidad de una mayor profundización en la calibración de los datos de cesio 137 en suelos no cultivados.

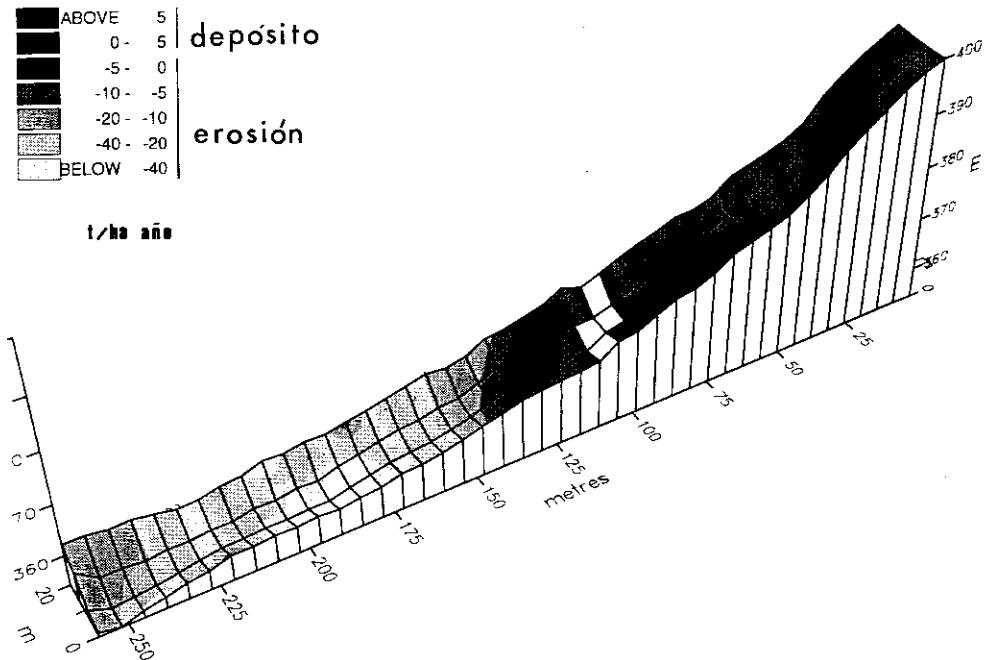


Figura 3.- Distribución espacial del movimiento del suelo en una vertiente de las Bardenas. Isolíneas de velocidad de erosión y agradación en t/ha y año sobre la topografía del transecto.

5. Consideraciones finales

De la investigación realizada hasta el momento en ambientes semiáridos, donde entre otros factores, la escasez de cobertura vegetal y la pedregosidad de los suelos contribuyen a una mayor variabilidad espacial en la distribución del cesio 137 en el suelo, se desprende la necesidad de utilizar un número apropiado y suficiente de muestras en base a las que poder establecer un inventario de referencia fiable. En función de la escala del estudio y del coeficiente de variación encontrado el número de muestras puede variar, pero para una zona como la aquí descrita serían necesarias unas doce muestras.

El potencial de utilización de la técnica del ^{137}Cs en estos ambientes queda

probado y entre otras, esta técnica ofrece las siguientes ventajas:

—La velocidad de erosión estimada es la suma de todos los procesos erosivos y representa un promedio de los últimos 30-35 años.

—Suministra una medida cuantitativa tanto de la distribución como de la velocidad de la erosión del suelo, y de la proporción de suelo erosionado que es transportado fuera del área estudiada.

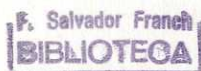
—El área de investigación es estudiada sin alterar el ambiente y sólo se requiere una visita al lugar de estudio.

—Puede ser utilizada para la validación y formulación de modelos de erosión.

Referencias

- Brown, R. B.; Kling, G. F. & Cutshall, N. H. (1981). Agricultural erosion indicated by ^{137}Cs redistribution: II Estimates of erosion rates. *Soil Science Society of America Journal*, 45: 1191-1197.
- Campbell, B. L. (1983). Applications of environmental caesium-137 for the determination of sedimentation rates in reservoirs and lakes and related catchment studies in developing countries. In: *Radioisotopes in Sediment Studies*. International Atomic Energy Technical Document, 298: 7-30.
- Campbell, B. L.; Loughran R. J.; Elliott, G. L. & Shelly, D. (1986). Mapping drainage basin sources using caesium-137. In: *Drainage Basin Sediment Delivery* (R. F. Hadley, Ed). IAHS Publication n° 159: 437-446.
- Campbell, B. L.; Loughran, R. J. & Elliott, G. L. (1988). A method for determining sediment budgets using caesium-137. In: *Sediment Budgets* (M. P. Borda & D. E. Walling, Eds.) IAHS Publication n° 174: 171-179.
- Cawse, P. A. & Horrill, A. D. (1986). A survey of caesium-137 and plutonium in British soils in 1977. *AERE Harwell report R-10155*, HMSO, London.
- De Jong, E.; Begg, C. B. M. & Kachanoski, R. G. (1983). Estimates of soil erosion and deposition for some Saskatchewan soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 63: 607-617.
- De Roo, A. P. J. 1991. The use of ^{137}Cs as a tracer in an erosion study in south Limburg (The Netherlands) and the influence of Chernobyl fallout. *Hydrological Processes*, 5:215-227.
- Higgitt, D. L., Froehlich, W. & Walling, D. E. 1992. Applications and limitations of Chernobyl radiocaesium measurements in a Carpathian erosion investigation, Poland. *Land Degradation and Rehabilitation*, 3:15-26.
- Kachanoski, R. G. & De Jong, E. (1984). Predicting the temporal relationships between soil caesium-137 and erosion rate. *Journal Environ. Qual.*, 13: 301-304.

- Kachanoski, R. G. (1987). Comparison of measured soil 137-caesium losses and erosion rates. *Canadian Journal of Soil Science*, 67: 199-203. Fort Collins, CO. Chapter 9.
- Longmore, M. E.; O'Leary, B. M.; Rose, C. W & Chandica, A. L. (1983). Mapping soil erosion and accumulation with the fallout isotope caesium-137. *Australian Journal of Soil Research*, 21: 373-385.
- Loughran, R. J.; Campbell, B. L. & Walling, D. E. (1987). Soil erosion and sedimentation indicated by caesium-137: Jackmoor Brook catchment, Devon, England. *Catena*, 14: 201-212.
- Loughran, R. J.; Elliott, G. L.; Campbell, B. L. & Shelly, D. J. (1988). Estimation of soil erosion from caesium-137 measurements in a small cultivated catchment in Australia. *Applied Radiation and Isotopes*, 39: 1153-1157.
- McHenry, J. R. & Ritchie, J. C. (1977). Estimating field erosion losses from fallout caesium measurements. In: *Erosion and Sediment Transport in Inland Waters*. IAHS Publication n° 122: 26-33.
- Mitchell, P. I., Schell, W. R., McGarry, A., Ryan, T. P., Sanchezcabeza, J. A. & Vidal-Quadras, A. 1992. Studies of the vertical distribution of ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ²³⁸Pu, ^{239,240}Pu, ²⁴¹Pu, ²⁴¹Am and ²¹⁰Pb in ombrogenous mires at mid-latitudes. *J. Radioanal. Nucl. Chem. Articles*, 156 (2):361-387.
- Navas, A. & Machin, J. (1991). A preliminary research on the use of caesium-137 to investigate soil erosion in the semiarid landscape of the central Ebro river valley. In: *Soil Erosion Studies in Spain*, (M. Sala, J. L. Rubio, J. L. & J. M. Garcia-Ruiz, Eds): 191-202.
- Navas, A. & Walling, D. E. (1992). Using caesium-137 to assess sediment movement on slopes in a semiarid upland environment in Spain. In: *Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions*, IAHS Publication n° 209: 129-138.
- Quine, T. A. (1989). Use of a simple model to estimate rates of soil erosion from caesium-137 data. *Journal of Water Resources*, 8: 54-81.
- Quine, T. A.; Navas, A.; Walling, D. E. & Machin, J. 1994. Soil erosion and redistribution on cultivated and uncultivated land near Las Bardenas in the central Ebro river basin, Spain. *Land Degradation and Rehabilitation*, 5 (1):41-55.
- Ritchie, J. C.; Spraberry, J. A. & McHenry, J. R. (1974). Estimating soil erosion from the redistribution of caesium-137. *Soil Science Society of American Proceedings*, 38: 137-139.
- Ritchie, J. C. & McHenry, J. R. (1990). Application of radioactive fallout Cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: a review. *J. Environ. Qual.*, 19: 215-233.
- Walling, D. E. & Quine, T. A. (1990). Use of caesium-137 to investigate patterns and rates of soil erosion on arable fields. In: *Soil Erosion on Agricultural Land*, (J. Boardman, I.D.L. Foster & J. A. Dearing, Eds.): 33-53, John Wiley & Sons, Chichester.
- Walling, D. E. & Quine, T. A. (1991). The use of caesium-137 measurements to investigate soil erosion on arable fields in the UK: potential applications and limitations. *Journal of Soil Science*, 42: 146-165.
- Walling, D. E.; Bradley, S. B. & Wilkinson, C. J. (1986). A caesium-137 budget approach to the investigation of sediment delivery from a small agricultural drainage basin in Devon, U. K.. In: *Drainage Basin Sediment Delivery* (R. F. Hadley, Ed). IAHS Publication n° 159: 423-435.
- Wilkin, D. C. & Hebel, S. J. (1982). Erosion, deposition and delivery of sediment to Midwestern streams. *Water Resources Research*, 18: 1278-1282.
- Zhang, X; Higgitt, D. L. & Walling, D. E. (1990). A preliminary assesment of the potential for using caesium-137 to estimate rates of soil erosion in the Loess Plateau of China. *Hydrological Sciences Journal*, 35: 267-276.



Otras publicaciones de Geoforma Ediciones:

Serie Cartográfica:

1. Mapa geomorfológico de Sallent (Pirineos).
2. Mapa geomorfológico de Ezcaray (S. Ibérico).
3. Mapa geomorfológico de Munilla (S. Ibérico).
4. Mapa geomorfológico de Benasque. (Pirineos).

Serie Monografías Científicas:

1. Evolución reciente de la agricultura de montaña: el Pirineo aragonés.
2. Las repoblaciones forestales: resultados y efectos geomorfológicos.
3. Els complexos glacio-lacustres relacionats amb el darrer cicle glacial als Pirineus.
4. Procesos de erosión en campos abandonados del Pirineo.
5. Factores y variaciones espacio-temporales de la infiltración en los ecosistemas mediterráneos.

Serie Avances en Geoecología:

1. Geoecología de las áreas de montaña.
2. Soil Erosion Studies in Spain.
3. Soil Erosion and degradation as a consequence of forest fires.
4. El glaciario surpirenaico: nuevas aportaciones.
5. El glaciario surpirenaico. Nuevas aportaciones.

Serie Cuadernos Técnicos de la S.E.G.

1. Métodos para el estudio de la erosión eólica.
2. Agujas de erosión y perfiladores microtopográficos.
3. Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración.
4. Análisis de sedimentos con microscopio electrónico de barrido: exoscopia del cuarzo y sus aplicaciones a la Geomorfología.
5. Palinología.
6. Medidas de flujos de agua y sedimentos en parcelas experimentales.
7. Liquenometría.

La técnica de cesio 137, basada en un método de aplicación física universal, presenta un indudable interés para cuantificar la erosión. En este trabajo se exponen los fundamentos de la técnica y su aplicación. Se describe la distribución en profundidad del radioisótopo y su relación con procesos físicos de movilización del suelo, así como su distribución espacial y relación con elementos geomorfológicos del paisaje.



GEORAMA ediciones