

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO- TEMPORAL DE LA EROSIÓN EN UNA LADERA MEDIANTE MODELOS NUMÉRICOS DEL TERRENO

*Cacheiro Pose, M. (1), Taboada Castro, M^a. T. (1), Valcárcel Armesto, M. (2)
Taboada Castro, M^a. M. (1) y Paz González, A. (1)*

*(1) Facultad de Ciencias. Universidad de A Coruña. Campus de A Zapateira s/n.
15.071. A Coruña.*

*(2) E.P.S. de Lugo. Universidad de Santiago de Compostela. Campus
Universitario. 27.002. Lugo.*

SUMMARY

Using Digital Terrain Models for spatial and temporal variability analysis of erosion in an agricultural hillslope

The aim of this work was to integrate in a DTM the characteristics of the concentrated erosion system developed on a hillslope together with topographical information, from which a DEM was previously elaborated. The topographical data obtained with an Abney level were analysed through geostatistical techniques, from which the pattern of relief spatial dependence by means of a very continuous gaussian semivariogram was established. This information was integrated into a Geographic Information System (GIS) to elaborate a Digital Elevation Model (DEM) by block kriging. In addition, on the studied hillslope, the kinetics of soil surface crust formation was evaluated by frequent observation and simultaneously the presence of runoff was assessed. Moreover, significant field uses and field limit changes within the hillslope were also taken into account. Concentrated erosion rates were recorded after main rainfall events, by measuring rill and ephemeral gully cross-sections and length. The erosion channel system was also several times located.

Two sequences of soil surface evolution from the initial tilled condition to a sedimentary crust were observed, in autumn 1997 and early spring 1998. In the winter season, soil losses were higher than soil tolerance levels. The spatial distribution of rill and gully erosion was merged into the DEM to develop a DTM. This distributed information together with rainfall data, soil cover, tillage direction, etc, was used to analyse conditions for concentrated erosion generation. Using GIS for DTM elaboration allowed a more clear analysis of previously defined relationships between topographical and agronomic factors and concentrated soil erosion. It was concluded that analysis of concentrate erosion systems by means of DTM's contributes to a better interpretation of the results, and may reflect relationships between main factor affecting erosion, which are not revealed by single raw survey data.

Key words: Runoff, erosion, rotation, tillage, cartography, DEM, DTM.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo consiste en integrar en un modelo numérico del terreno (MNT) las características más conspicuas del sistema de erosión concentrado formado en una ladera, mediante la superposición del mismo sobre un modelo de elevación digital (MED) elaborado a partir de datos topográficos. Los datos topográficos se obtuvieron mediante una estación total y se analizaron por medio de técnicas geoestadísticas para establecer su modelo de dependencia espacial, mediante un semivariograma teórico de tipo gaussiano, que, por tanto, presentaba una notable continuidad. La información contenida en dicho modelo se utilizó, integrándola en un sistema de información geográfico (SIG), para elaborar un MED por krigeado en bloques. Además, se evaluó la cinética de formación de costra superficial en la ladera mediante observaciones frecuentes, al tiempo que se tenía en cuenta la presencia o ausencia de escorrentía. Se calculó la intensidad de la erosión concentrada después de los eventos más importantes de lluvia, midiendo la longitud y la sección de los regueros y cárcavas efímeras. Se situó espacialmente el sistema de erosión concentrado en diferentes épocas. Además, se tuvieron en cuenta cambios significativos en el uso del suelo, en los límites de las parcelas en que se dividía la ladera. Se observaron dos secuencias de evolución de la superficie del suelo, en otoño de 1997 y a comienzos de la primavera de 1998, desde el estado inicial, inmediatamente después del laboreo, hasta la formación de una costra sedimentaria. Las pérdidas de suelo en invierno fueron superiores al nivel de tolerancia. La distribución espacial del sistema de erosión en surcos y cárcavas se representó sobre el MED para elaborar un MNT. Se utilizaron las distintas capas de información distribuida espacialmente, junto con datos de precipitación, cobertura vegetal y dirección de laboreo para analizar las condiciones de formación de escorrentía. El uso de sistemas de información geográfica (SIG) para la elaboración de modelos numéricos del terreno (MNT) permitió un análisis más detallado de la dependencia entre factores topográficos y agronómicos e intensidad de la erosión concentrada. Se puso de manifiesto que la representación de los sistemas de erosión concentrada mediante MNT puede contribuir a una mejor interpretación de los resultados, y permite reflejar relaciones entre algunos de los factores de la erosión que no pueden ser revelados por el simple inventario de los datos de campo.

Palabras clave: Escorrentía, erosión, rotación, laboreo, cartografía, MED, MNT.

INTRODUCCIÓN

La estructura de las capas superficiales de los suelos de cultivo se ve sometida repetidas veces y en breves periodos de tiempo a modificaciones drásticas como consecuencia del laboreo (TABOADA CASTRO, 1998). En un suelo labrado, la degradación de la superficie se inicia con el impacto directo de las gotas de lluvia que, en ausencia de vegetación, y, en particular en los lechos de siembra de los cultivos establecidos mediante técnicas convencionales, disgregan los agregados, formando partículas más finas que contribuyen a reducir la porosidad. Este proceso puede llegar a originar el encostrado de la superficie y en todo caso, se constata una reducción drástica de la permeabilidad (TABOADA CASTRO *et al.*, 1999). Como consecuencia, incluso con intensidades de precipitación moderada, se forma un excedente de agua en la superficie de las parcelas que arrastra ladera abajo los materiales finos previamente desprendidos.

A escala de parcela, el laboreo determina con frecuencia la presencia de motivos lineales de origen agrícola que favorecen la incisión y la formación de erosión concentrada en surcos y cárcavas efímeras. La formación de un excedente de agua supone no solo pérdidas de suelo, sino también el arrastre de abonos y pesticidas a las aguas superficiales, con el consiguiente riesgo de degradación de la calidad de las mismas. En consecuencia, los procesos erosivos constituyen un doble impacto negativo, por cuanto determinan la degradación progresiva de un recurso no renovable como es el suelo, al tiempo que pueden contribuir a la eutrofización y disminución de calidad de las aguas.

Entre los principales tipos de erosión en zona templado-húmeda, se considera que las pérdidas de suelo por erosión concentrada, en regueros y cárcavas efímeras, son mucho más importantes que la erosión de tipo laminar (BOARDMAN, 1990; GOVERS, 1991; AUZET *et al.*, 1993; VANDAELE, 1993; LUDWIG *et al.*, 1995; POESEN *et al.*, 1996; CASALÍ *et al.*, 1999). Trabajos de campo a escala de ladera y pequeña cuenca agrícola permitieron comprobar que en diferentes áreas de cultivo de la CCAA de Galicia, la erosión por flujo concentrado en surcos y cárcavas efímeras también constituye el principal componente de las pérdidas totales de suelo (CACHEIRO *et al.*, 1998; PAZ GONZÁLEZ *et al.*, 1998; VALCÁRCEL

ARMESTO, 1999). En cuanto a la variabilidad temporal, se constató que el riesgo de erosión de las parcelas de cultivo es más importante en determinados períodos, en los que la cobertura vegetal esta ausente o poco desarrollada, como ocurre durante las labores de preparación del terreno para la siembra, durante la siembra y en la fase de implantación posterior a la misma. Así, tanto la siembra de pratenses en el otoño, como de maíz a finales de primavera pueden estar asociados a fenómenos erosivos importantes. El riesgo se acrecienta, cuando por algún motivo el suelo no se siembra después de efectuar las labores previas tradicionales (VALCÁRCEL ARMESTO, 1999).

Desde el punto de vista de la conservación del suelo, se considera que el principal objetivo de una explotación agrícola racional debe de consistir en mantener o aumentar el rendimiento de los cultivos sin causar la degradación del suelo ni provocar efectos perjudiciales sobre el medio ambiente. Medidas agronómicas de conservación del suelo como la elección de especies, su densidad y morfología, así como la forma de combinarlas en una rotación, pueden determinar una importante disminución del riesgo de erosión y de la degradación de las condiciones físicas del suelo, manteniendo una buenas condiciones estructurales. En consecuencia, para una planificación correcta del uso sostenible del suelo y para limitar las intensidades de erosión por debajo del umbral de tolerancia, es necesario disponer de métodos de estudio que permitan superponer varios niveles o estratos de información, espacialmente distribuida, acerca del suelo, los cultivos y los sistemas de laboreo (MORGAN, 1997).

Los sistemas de información geográfica (SIG), son un tipo especializado de bases de datos que permiten manejar variables geográficas, de acuerdo con BRACKEN y WEBSTER (1990). Mediante los SIG ha sido posible la introducción de componentes espaciales de variables del suelo y los cultivos en bases de datos, superponiéndolos sobre cartografías convencionales. Pueden integrar información procedente de fuentes muy variadas. El nivel de información básico contiene las características del relieve, que son representadas habitualmente mediante el modelo de elevación digital (MED). A partir del MED se superponen nuevos estratos de información, con lo que se obtienen modelos numéricos del terreno (MNT), lo que permite optimizar la representación gráfica de variables distribuidas espacialmente.

Los modelos de elevación digital (MEDs) facilitan, en primer lugar, la descripción y cuantificación de las características morfológicas del terreno. Por ello, los campos más adecuados para la aplicación de los MED son aquellos en donde la topografía juega un papel determinante. En segundo lugar, un MED constituye el punto de partida para la elaboración de MNT, que encuentran su aplicación en el análisis de riesgos naturales y de estudios ambientales. A partir de los MEDs y modelos numéricos (MNTs) derivados es posible también realizar clasificaciones. Se trata de un proceso de síntesis, en el que se puede perder mucha información, pero que facilita el análisis de factores relacionados entre sí (MARTÍNEZ PACHECO, 1995). Se admite que la capacidad de integración de datos de los SIG, en particular la elaboración mediante MNT de mapas temáticos que sintetizan y permiten relacionar la distribución espacial de distintas variables, puede ser de gran utilidad para el manejo de las tierras agrícolas, analizando los usos y prácticas más convenientes para reducir el riesgo de erosión. A escala de ladera o cuenca, los MED son necesarios para el uso de modelos distribuidos que simulan la escorrentía y los riesgos de erosión. Además un MED, permite delimitar automáticamente cuencas hidrográficas, modelizar caudales máximos o efectuar un análisis temporal de los mismos a partir de las definiciones de línea de flujo y área tributaria.

En este trabajo se presentan los resultados de un trabajo de campo que se llevó a cabo en una ladera agrícola situada en Mabegondo (A Coruña), entre octubre de 1997 y mayo de 1998. La mayor parte de la superficie de esta ladera fue labrada al comenzar el otoño, pero en una elevada proporción de la misma no se efectuó la siembra hasta comienzos de la primavera en 1998, con lo que se registraron sucesivos episodios de erosión concentrada en surcos y cárcavas efímeras. La erosión continuó después de la siembra a comienzos de la primavera.

El principal objetivo del trabajo es integrar en un Sistema de Información Geográfico (SIG), junto a la información agronómica y edáfica, y el modelo de elevación digital (MED) obtenido a partir de datos topográficos, las características espaciales del sistema de erosión concentrada y obtener modelos numéricos del terreno (MNT). La información sintetizada en los MNTs se utiliza para analizar las condiciones de formación de escorrentía y erosión concentrada en la ladera objeto de estudio.

MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en una ladera de 5.7 ha, denominada Igrexa Vella, localizada en el Centro de Investigaciones Agrarias de San Tirso de Mabegondo (Abegondo, A Coruña). El suelo de la zona experimental presenta textura franco-arenosa. El uso del suelo en la zona estudiada (fig. 1) se resume a continuación:

- 0.70 ha, dedicadas a ensayos con variedades de pratenses, en una parcela sembrada el 10 de octubre de 1997.
- 3.98 ha, permanecieron a barbecho durante el otoño y el invierno de 1997-1998. Posteriormente, el 13 de marzo de 1998, esta zona se sembró con veza (*Vicia sativa*).
- 1.04 ha, dedicadas a pradera ya establecida al iniciarse las experiencias.

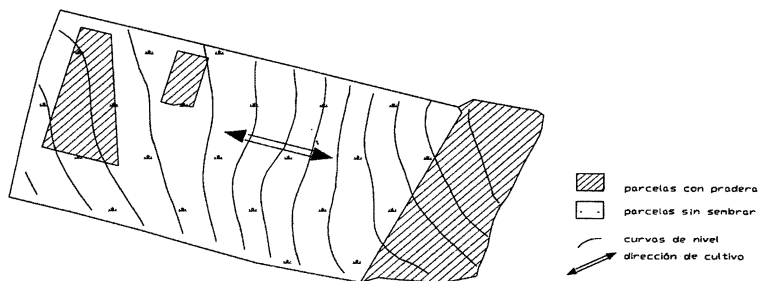


Figura 1. Usos del suelo durante el otoño de 1997 en la ladera de Igrexa Vella.

Para efectuar este estudio se recogieron dos tipos de datos de campo en diferentes etapas: datos topográficos, y datos relacionados con la evolución de la superficie y la erosión. La topografía se midió mediante una estación total (Sokkia SET5A). Los datos puntuales de altura, se analizaron mediante técnicas geoestadísticas, para establecer el modelo de dependencia espacial (CACHEIRO *et al.*, 1998a, 1998b; VALCÁRCEL ARMESTO, 1999). Posteriormente, se elaboró el Modelo de Elevación Digital, mediante el uso de un SIG de tipo matricial conocido como PCRaster (Van DEURSEN and WESSELING, 1992; KARSSENBERG, 1996).

La degradación de la superficie, consecuencia del impacto de las gotas de lluvia en los lechos de siembra, se describió sobre la base de criterios semicuantitativos. La metodología usada supone efectuar frecuentes observaciones de campo para evaluar variables tales como el tipo de facies (inicial, estructural o sedimentaria) y porcentaje que ocupa cada tipo de facies, diámetro mínimo de los agregados, rugosidad, medida según las direcciones paralela y perpendicular a la de laboreo, densidad de macroporos y grietas, humedad de la superficie y distancia máxima que alcanza la escorrentía (TABOADA CASTRO, 1998; TABOADA CASTRO *et al.*, 1999).

La erosión concentrada, en regueros y cárcavas efímeras, se midió durante campañas efectuadas después de los eventos más importantes de precipitación, los días 27 de noviembre de 1997, 29 de enero de 1998 (con la parcela de mayores dimensiones dedicada a barbecho) y 5 de mayo de 1998 (después de la implantación del cultivo de veza). En cada visita al campo, se localizaron los surcos de erosión sobre el MED con la estación total y se midió su longitud y su sección en posiciones sucesivas, cada pocos metros, datos que permitieron determinar cuantitativamente las pérdidas de suelo en su expresión volumétrica. Esta información junto con datos de lluvia, textura del suelo, evolución de la superficie, tipos de cultivo, dirección del laboreo, etc, se utilizó para analizar las condiciones de génesis de la escorrentía. El método empleado permitió relacionar la intensidad de la erosión con los factores topográficos y agronómicos que intervienen en la formación de una red de drenaje efímera.

En la etapa final se elaboró un MNT, a partir del MED de la vertiente estudiada al que se le añadió la distribución de los surcos de erosión y también el área ocupada por los diferentes cultivos, lo que permitió analizar la distribución espacial de la erosión y relacionarla con los factores que intervienen en la misma.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características topográficas de la ladera

Al analizar los datos topográficos, se puso de manifiesto una importante autocorrelación entre pares de puntos vecinos. El procedimiento usado durante el análisis geoestadístico y el método de elaboración del MED, a partir de medidas directas de topografía, han sido descritos en trabajos previos (CACHEIRO *et al.*, 1998a, b, CACHEIRO *et al.*, 2000). Debido al relieve de la parcela, previo al cálculo del semivariograma muestral, se llevó a cabo una retirada de la tendencia de las cotas, mediante tres funciones diferentes: lineal, parabólica y cúbica. Se apreció que la retirada de tendencia mediante una función lineal era suficiente para estabilizar el valor de la varianza muestral, como se aprecia en la figura 2. Se pudo comprobar que el mejor ajuste a los residuos de los datos topográficos experimentales se obtenía mediante un modelo gaussiano, con un alcance efectivo del orden de 150 m y una discontinuidad en el origen prácticamente nula.

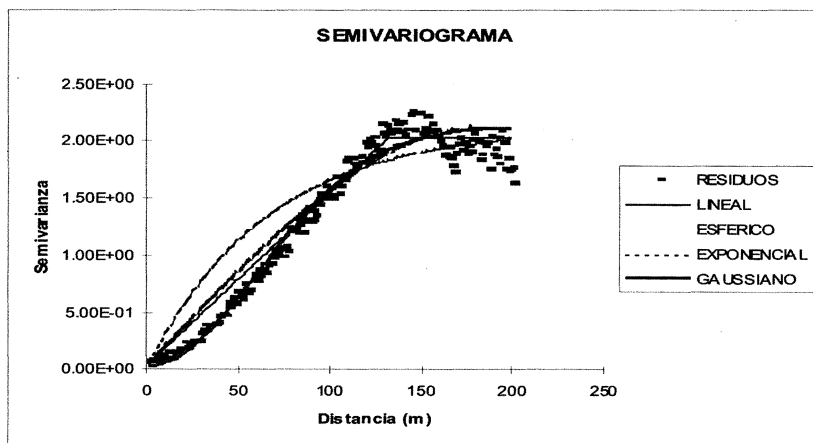


Figura 2. Semivariograma experimental y ajuste de diferentes modelos teóricos

Una vez comprobado que el modelo gaussiano presentaba el mejor ajuste se utilizó la técnica del Jack-knifing, para determinar el número de vecinos más adecuado para reducir los errores de krigado, empleándose como criterio para ello los siguientes parámetros: media y varianza de los errores absolutos,

media y varianza de los errores relativos y coeficiente de correlación (VIEIRA *et al.*, 1983; VIEIRA *et al.*, 1997). De acuerdo con ello, el número de vecinos más adecuado para construir el MED mediante el modelo gaussiano, se cifró en 12. Por último, una vez estimados los valores de relieve entre los puntos topográficos medidos por krigeado, se usaron para elaborar el mapa de curvas de nivel, que se incorporó al SIG PCRaster.

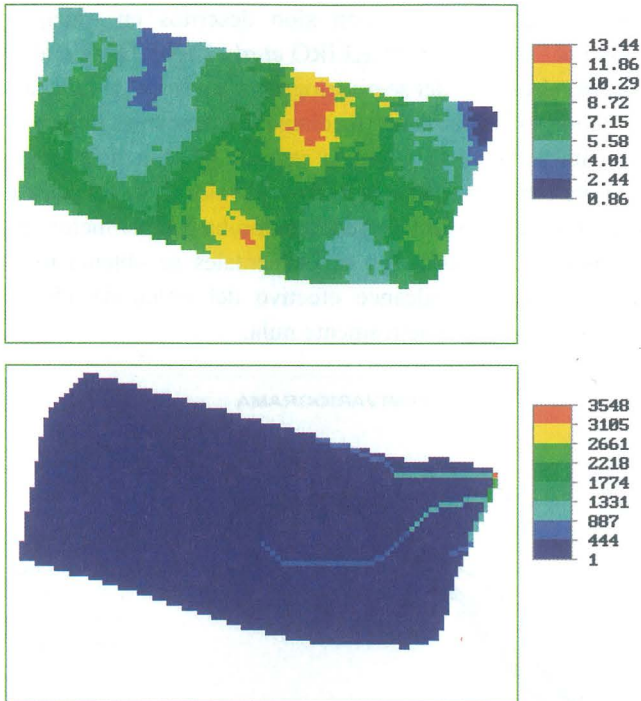


Figura 3. Superior: mapa de pendientes de la ladera de Igrexa Vella. Inferior: mapa de drenaje aguas arriba.

El mapa de pendiente de la vertiente estudiada y el mapa de drenaje aguas arriba, formado por la confluencia de las direcciones locales de drenaje de las celdas individuales se presentan en la figura 3. Se comprueba que la pendiente oscila entre 0,8 y 13,4 %, aproximadamente. En la parte alta de la vertiente y en la desembocadura de la misma se localizan las áreas más llanas, mientras que las pendientes más acusadas, con valores superiores al 10% se sitúan al iniciarse la mitad inferior del área estudiada.

Teniendo en cuenta exclusivamente la topografía de la cuenca, el mapa de drenaje aguas arriba (fig. 3) pone en evidencia que si se generase un excedente hídrico en la superficie, cabría esperar que se formasen dos cauces efímeros, siguiendo las direcciones de drenaje en donde confluye un mayor número de celdas. Uno de estos colectores de origen topográfico está localizado en el borde de la ladera estudiada, al lado del camino, y el segundo aproximadamente en el centro de la misma.

No obstante, factores de tipo agronómico imponen importantes modificaciones a los colectores de origen topográfico. Así, en el borde de la vertiente estudiada, a la depresión de origen topográfico se superpone un canal lineal de origen agrario, constituido por el último surco formado durante la labranza, de modo que se dan las condiciones para la formación de un canal de origen mixto, topográfico y agrario, que drene el excedente de agua. Aunque el laboreo en la zona de barbecho se llevó a cabo siguiendo la dirección de máxima pendiente, ladera abajo, la presencia de rodadas de tractor en dirección perpendicular a la pendiente en la mitad superior de la vertiente, determinó que el área total que aportaba agua al último surco fuese más importante de lo que cabría inferir del mapa de drenaje aguas arriba presentado en la figura 3.

Por el contrario, la importancia de la superficie que aportaba agua al colector situado en la posición central de la ladera disminuyó por el efecto combinado de dos factores: la acción de las rodadas antes mencionadas que desviaban el excedente de agua de determinadas celdas, en dirección lateral, hacia el último surco, así como por la existencia de un límite neto, consecuencia de la división de la ladera en dos parcelas, entre la parcela dedicada a barbecho/veza y la pradera establecida en parte inferior de la vertiente, que impedía la continuidad de la red de drenaje siguiendo la vaguada central entre ambas.

Evolución de la superficie del suelo

En las frecuentes observaciones llevadas a cabo, se comprobó, en primer lugar, que la escorrentía se generaba exclusivamente en el interior del área estudiada, sin que ésta recibiese aportes externos de agua. Atendiendo a las características de la superficie del suelo, se pone de manifiesto la existencia de dos zonas diferenciadas en cuanto a la génesis de excedentes de agua:

- Una superficie poco rugosa, compactada o apelmazada, y por ello con permeabilidad inicial baja o media, en la zona dedicada a ensayos de pratenses. En esta zona no ocurre erosión, por estar protegida por una cobertera vegetal, pero durante los episodios más intensos de precipitación contribuye a la génesis de escorrentía. La pradera ya implantada situada en la zona inferior de la vertiente, en parte compartía estas características.

- Una superficie con una rugosidad inicial más importante a comienzos del otoño, en la zona que corresponde a la parcela dedicada a barbecho, con depresiones de hasta 10 cm de profundidad, y, por lo tanto, con un volumen mayor para almacenar temporalmente una parte de la precipitación. Inicialmente esta superficie presentaba una elevada permeabilidad y no contribuía a la escorrentía. Bajo la acción de la lluvia evoluciona hasta formar una costra sedimentaria. Las observaciones sobre el terreno pusieron de manifiesto que, una vez alcanzado este estadio, la mayor parte de los eventos originan flujo de tipo hortoniano.

En la tabla 1 se presentan las características morfológicas generales durante los principales estadios de evolución de esta superficie entre octubre de 1997 y mayo de 1998, dedicada primero a barbecho y posteriormente sembrada con veza. En la figura 4 se presenta la evolución del porcentaje de superficie del suelo ocupada por una costra de tipo sedimentario, junto con la precipitación acumulativa, durante las dos etapas principales de formación de una red de cauces efímeros para evacuar el excedente de agua.

A comienzos de octubre de 1997, después del encalado, se efectuaron las labores agrícolas que preceden habitualmente a la siembra de un cereal de otoño, que nunca fue sembrado. El día 10 de octubre, la superficie resultante, permeable y porosa, presentaba una rugosidad media con una profundidad de las depresiones del relieve del orden de 10 cm. La evolución de esta superficie inicial fue rápida, de modo que el 29 de octubre de 1997, tras una precipitación acumulada de 94.4 mm más del 50% de la zona a barbecho de la vertiente presentaba una costra sedimentaria. En esta fecha la rugosidad media y la permeabilidad habían disminuido sustancialmente en relación con los valores iniciales y la incisión era ya generalizada.

Fecha	Estado superficie	Precipitación acumulada (mm)	D. mínimo agregados (mm)	Rugosidad (cm)	Porosidad (n° poros/m ³)	Escorrentía (m)
<i>Arado y encalado</i>						
01-10-97	F0	0		>20	>100	0
<i>Gradeado</i>						
10-10-97	F0	0	0	<10	>100	0
20-10-97	F1	50.6	4-5	<10	>100	0.1
29-10-97	F2-	94.4	6-8	<5	100-50	10-100
27-11-97	F2+	286.4	16	<5	50-10	10-100
29-01-98	F2+	528.1	>20	<3	<10	10-100
27-02-98	F2+	554.7	<20	<3	<10	10-100
<i>Gradeado</i>						
06-03-98	F0	0	0	<10	>100	0
12-03-98	F1-	5.1	1.5	<10	>100	0
<i>Siembra de veza</i>						
13-03-98	F0	0	0	<10	>100	0
30-03-98	F1-	8	2	<8	>100	0
06-04-98	F1	78.3	5	<8	>100	0.01
13-04-98	F2-	182.7	12	<8	50-10	0.1
30-04-98	F2+	313.1	>20	<5	<10	10-100
19-05-98	F2+	347.2	<20	<3	<10	10-100

Tabla 1. Características morfológicas durante las principales etapas de evolución de la superficie de Igrexá Vella entre octubre de 1997 y mayo de 1998.

Por lo que respecta a la escorrentía, el 29 de octubre es decir 19 días después del laboreo de la superficie, había transportado partículas a distancias decamétricas, en toda la vertiente, pero además a favor de pequeños surcos de labor y otras estructuras lineales de origen agrario, incluso se apreciaban desplazamientos hectométricos. Posteriormente, con nuevos aportes de precipitación, continuó la tendencia al aumento de la proporción de superficie encostrada, y, simultáneamente a la disminución de la rugosidad y la porosidad, a pesar de la cobertura parcial del suelo por acción de las malas hierbas. En la figura 5 se puede apreciar el aspecto de la superficie del suelo a finales de noviembre de 1997, así como la importancia que alcanzó el canal de drenaje principal, formado a favor del último surco, en diciembre de 1997 y enero de 1998.

El gradeado de la zona dedicada a barbecho a finales de febrero de 1998 y la siembra de veza a comienzos de marzo, motivó que se iniciase una nueva secuencia de evolución de la superficie. Los datos de la tabla 1 ponen de manifiesto como entre el 13 de marzo y el 19 de mayo de 1999, nuevamente se desarrolla una costra sedimentaria que cada vez ocupa una mayor proporción de la superficie.

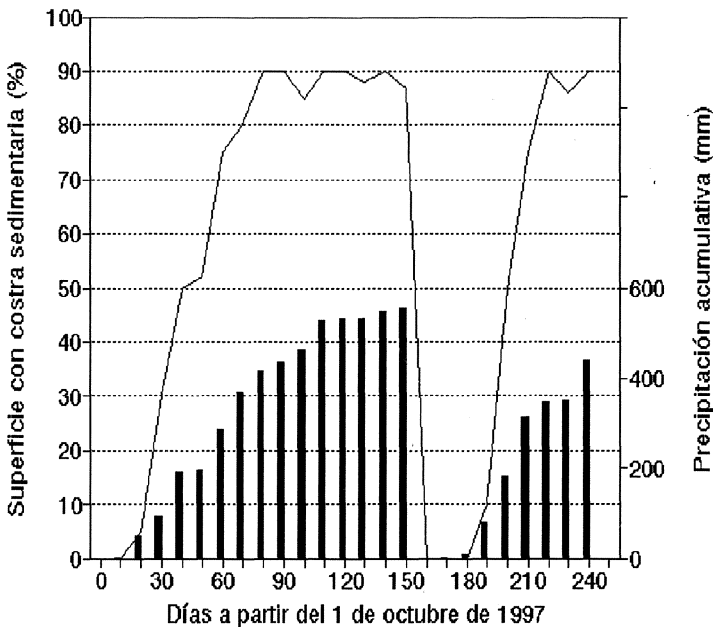


Figura 4. Evolución de la superficie encostrada después del laboreo en octubre de 1997 y marzo de 1998 y precipitación acumulativa en cada secuencia.

En esta segunda secuencia de evolución de la superficie, nuevamente se forma flujo de tipo hortoniano sobre la superficie de la vertiente, lo que determina nuevos episodios de incisión que generan una red de drenaje capaz de evacuar el excedente de agua de la superficie del terreno. Al mismo tiempo, la tabla 1 ilustra como disminuyen en esta segunda secuencia evolutiva la rugosidad y la porosidad iniciales.



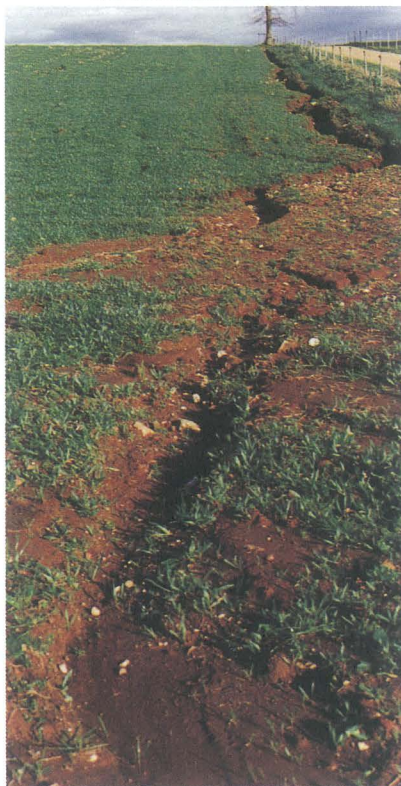
23 de noviembre de 1997



27 de noviembre de 1997



15 de diciembre de 1997



10 de enero de 1998

Figura 5. 23 de noviembre de 1997: parte media e inferior de la vertiente con el surco principal en el borde del camino y otros surcos de dimensiones métricas. 27 de noviembre de 1997: parte superior de la vertiente, en el lugar en donde se inicia la erosión concentrada. 15 de diciembre y 10 de enero de 1998: surco principal en el borde del camino.



16 de marzo de 1998



16 de marzo de 1998



30 de abril de 1998



7 de mayo de 1998



7 de mayo de 1998

Figura 6. 16 de marzo de 1998: a la izquierda, aspecto de la superficie en la parte media e inferior de la vertiente tras la siembra de veza (*Vicia sativa*) y a la derecha, detalle de la zona con mínimo laboreo. 30 de abril y 7 de mayo de 1998: superficie encostrada con cobertura parcial de veza (*Vicia sativa*). 7 de mayo de 1998: surco principal en el borde de la parcela próximo al camino.

Los datos anteriores ponen de manifiesto que la rugosidad, la porosidad, el porcentaje de la superficie ocupado por la costra sedimentaria y la distancia a que son desplazadas las partículas desprendidas de la superficie evolucionaron de modo concomitante. La proporción de superficie evolucionada es mínima después de las labores llevadas a cabo en octubre y en marzo, pero evoluciona en función de la precipitación acumulativa, de modo que cuando esta es del orden de 100 mm, parte de la superficie ya puede originar escorrentía. En realidad, con precipitaciones acumulativas de esta magnitud, la mayor parte de la superficie presenta una costra estructural, y la costra sedimentaria esta ausente o tiene todavía un desarrollo muy limitado; sin embargo la capacidad de infiltración de una costra de tipo estructural ya esta notablemente reducida en relación con la de la superficie original permeable y porosa (TABOADA CASTRO, 1998), y cantidades adicionales de lluvia tienden a originar fenómenos de escorrentía generalizada que, si se concentran, terminan motivando la incisión y las pérdidas de suelo por erosión en surcos.

Distribución espacio-temporal de la erosión

En la tabla 2 se presentan los datos de erosión obtenidos en la ladera estudiada, Igrexa Vella, durante las campañas de medida efectuadas en tres fechas diferentes, entre el otoño de 1997 y finales de primavera de 1998. En dicha tabla se consignan los resultados obtenidos para el volumen total y la intensidad de erosión concentrada, así como la proporción de pérdidas de suelo atribuidas a la formación de cárcavas efímeras.

Fecha	Erosión en surcos (m ³)	Erosión en cárcavas (m ³)	Canal principal (m ³)	Canal principal/Total	Total (t/ha)	Cárcavas (t/ha)	Cárcavas (%)
27-11-1997	11.62	22.53	32.54	95.29	7.30	3.94	65.97
29-01-1998	9.47	30.17	36.14	91.17	8.48	5.28	76.11
07-05-1999	4.34	0.98	5.21	97.97	1.14	0.17	18.42

Tabla 2. Erosión concentrada medida durante tres campañas en la ladera de Igrexa Vella.

Trabajos previos (VALCÁRCEL ARMESTO, 1999) han puesto de manifiesto que en la zona del Complejo de Órdenes se aprecian analogías importantes en cuanto a los principales factores que intervienen en la erosión cuando se comparan con las regiones loesicas de clima atlántico en Europa Occidental, (VANDAELE, 1993;; AUZET et al, 1995; LUDWIG et al, 1996; POESEN et al., 1996). Las principales analogías se refieren a: intensidades de

precipitación moderada, topografía suave o medianamente ondulada y textura de los horizontes superficiales franca a franco-limosa. Por contra, tanto el material de partida (loess versus esquisto) como los sistemas de explotación agraria son diferentes. Asimismo, las intensidades de erosión medidas a escala de ladera y pequeña cuenca en la zona de los esquistos de Órdenes entre 1977 y 1999 (VALCÁRCEL ARMESTO, 1999) son del mismo orden de magnitud que las obtenidas por CASALÍ et al. (1999), en suelos de textura franca desarrollados sobre la facies Ujué en el Mioceno de Navarra y FIGUEIREDO et al., (2000), en suelos de textura media desarrollados sobre esquistos en el área de Bragança (Portugal).

Los datos aportados en este trabajo, permiten profundizar en el análisis de la variabilidad temporal de la erosión en una sola vertiente. La mayor intensidad de producción de sedimentos (7.30 t/ha) ocurrió antes del 27 de noviembre de 1997. Entre la fecha de siembra en octubre de 1997 y la primera medida de erosión la precipitación acumulada fue de 285, 4 mm y la precipitación con intensidad superior a 10 mm/h se cifró en 11, 2 mm. Una vez que se desarrolló costra sedimentaria en la superficie de la zona dedicada a barbecho, ocurrieron diversos eventos que generaron escorrentía. Las lluvias con mayor poder erosivo se registraron los días 27 y 28 de octubre de 1997, con una altura total de 17,8 y 20,6 mm y después de las mismas ya se observó la incisión del surco principal, lo que concuerda con desplazamientos generalizados de partículas desprendidas, a escala decamétrica y hectométrica (tabla 1). La elevada intensidad de erosión acumulada entre el 10 de octubre y el 27 de noviembre de 1997, refleja la rápida evolución del estado de la superficie y la distribución de las precipitaciones durante el primer período de observación en el otoño de 1999.

La precipitación total acumulada entre el 27 de noviembre de 1997 y el 29 de enero de 1998 fue de 272,2 mm, por tanto similar a la de la campaña anterior; sin embargo, la intensidad media de la erosión durante este segundo período asciende a 1,18 t/ha. Esta cifra contrasta con las 7,30 t/ha previas y pone en evidencia que la distribución espacio-temporal de la erosión no sólo depende de la precipitación acumulativa. En la vertiente de Igrexa Vella, durante el segundo período de observación de la estación otoño-invierno, la costra sedimentaria estaba ya totalmente desarrollada y del estado de la superficie se infiere que los valores de infiltración eran al menos tan bajos

como en el período anterior. Por ello la menor intensidad de erosión concentrada, pudo estar motivada por la conjunción de una serie de factores como por ejemplo: a) el de desarrollo previo de la red de colectores de escorrentía que facilitaban el drenaje del excedente de agua, b) la menor intensidad de la precipitación, ya que la cantidad de lluvia con intensidades superiores a 10 mm/h fue inferior a la de la época anterior y sólo ascendió a 1,7 mm, y c) el desarrollo de una cobertura parcial del suelo debido al crecimiento de malas hierbas.

En la primavera de 1998, la cantidad acumulada de precipitación desde la siembra de la veza el 13 de marzo hasta la nueva medida de erosión concentrada el 7 de mayo ascendió a 347,2 mm. La cantidad de lluvia con una intensidad superior a 10 mm/h para este período fue de 9,7 mm. La intensidad total de pérdidas de suelo alcanzó 1,14 t/ha, cifra más próxima a la registrada en el período diciembre 1997-enero 1998 que durante octubre y noviembre de 1997.

Por tanto, los datos de evolución de la superficie y erosión concentrada ponen en evidencia una notable variabilidad temporal. La velocidad de desarrollo de las superficies aptas para producir escorrentía fue relativamente próxima en la etapa otoño-invierno y durante la primavera, sin embargo, la intensidad media de erosión concentrada medida en las tres campañas efectuadas fue muy diferente. Diferencias en el porcentaje de cobertura vegetal o de intensidad de precipitación no parecen suficientes para explicar la variabilidad entre las distintas estaciones del año, aunque el efecto conjunto de ambos puede tener consecuencias importantes. Una vez iniciada la evolución de la superficie, secuencias de días con tiempo seco podrían favorecer el incremento de la resistencia de los agregados y reducir la sensibilidad de la superficie a la degradación (Le BISSONNAIS *et al.*, 1995; LUDWIG *et al.*, 1996).

Independientemente de la magnitud de la tasa media de erosión en cada una de las campañas, el sistema de erosión concentrado presenta importantes similitudes. En particular conviene reseñar las referidas a la formación de una cárcava efímera que tiende a presentarse sucesivamente en la misma posición y a la importancia de las pérdidas de suelo asociadas al canal principal de drenaje, desarrollado a favor del último surco.

La formación de cárcavas efímeras se considera que esta asociada a una erosión acelerada, y, por tanto, a paisajes inestables. La aparición de estas cárcavas puede ser un indicio de que la erosión hídrica no está controlada a escala de parcela y de que la degradación del suelo como recurso no renovable ha entrado en una fase crítica que puede ser irreversible (MORGAN, 1997). La parte terminal del surco desarrollado en el linde de la parcela con el camino (figuras 5 y 6) constituía una cárcava, considerando como tal el tramo cuya sección superaba 929 cm² (1 pie²), criterio adoptado por diversos autores, entre ellos VALCÁRCEL ARMESTO (1999) para delimitar entre regueros y cárcavas. Los datos consignados en la tabla 2 permiten comprobar la importancia de la cantidad de suelo removida para la formación de la cárcava efímera. Particularmente durante la estación otoño-invierno la contribución a la producción de sedimentos de dicha cárcava era muy importante y aumentaba a lo largo del tiempo, cifrándose en aproximadamente un 66% a finales de noviembre de 1997 y un 76% en febrero de 1998. También es importante tener en cuenta que la formación de esta cárcava es un fenómeno repetitivo, de modo que una vez recuperado el terreno durante las labores de siembra de veza, se originó nuevamente en el mismo lugar que ocupaba anteriormente.

Los datos de la tabla 2 ponen también de manifiesto que durante las tres fechas de medida, e independientemente de la intensidad total de erosión concentrada, el volumen de pérdidas de suelo atribuido al canal principal formado a favor de un motivo lineal de origen mixto, agrario y topográfico, como es el último surco supuso más del 90% del total de las pérdidas de suelo. La importancia de este canal se debe a que en su tramo inferior forma una cárcava efímera.

Para analizar las importantes cantidades de suelo removidas de este surco y compararlas con los surcos formados en otros lugares de la ladera se elaboró un MNT que se presenta en la figura 7. En este MNT se integra información procedente de la figura 1 y las tablas 1 y 2, lo que permite observar superpuestos la distribución de los surcos de erosión y los cultivos existentes en la misma, durante la campaña del 27 de noviembre de 1997. Con ello se integra en el mismo MNT diversas capas de información facilitando el análisis de los factores que desencadenaron la erosión concentrada y la formación del surco principal.

En la figura 7 se pone de manifiesto la existencia de dos zonas diferenciadas en cuanto a la intensidad de la erosión:

- El surco principal continuo que recoge la escorrentía aportada por la zona de ensayos de la parte superior de la ladera y hacia el que se canaliza también buena parte de la generada en la zona dedicada a barbecho. Se trata de una estructura continua con más de 90 metros de longitud de la que habían sido removidos aproximadamente 32.5 m^3 de suelo el 27 de noviembre de 1997.

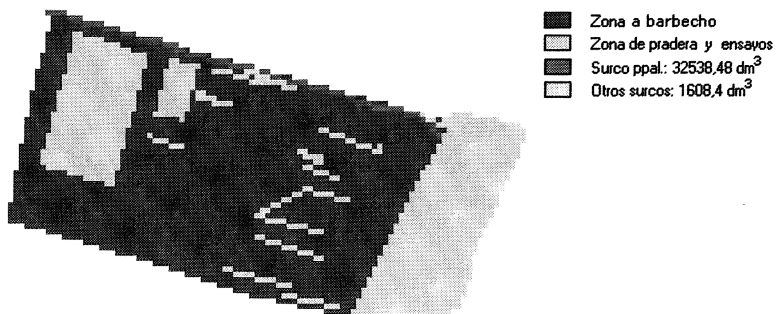


Figura 7. Modelo numérico del terreno con los usos del suelo y la posición de los surcos de erosión el día 27 de noviembre de 1997.

- Una serie de surcos discontinuos que aportan en la misma fecha una cantidad mucho menor de sedimentos, del orden de $1,6 \text{ m}^3$. La mayor parte de estos surcos de dimensiones más reducidas se formaron en la zona de máxima pendiente en la mitad inferior de la vertiente estudiada. Este subsistema pone de manifiesto que, aunque la cantidad de agua de escorrentía fue suficiente para iniciar en diversos puntos la incisión del terreno, no llegó a desarrollarse un sistema efímero continuo en el centro de la parcela a barbecho, como ocurrió en el borde de la misma.

Los resultados anteriores ponen de manifiesto la importancia de las prácticas agrícolas modificando las condiciones topográficas previas a las operaciones de laboreo, no solo mediante la formación de motivos lineales que canalizan la escorrentía, sino también modificando las dimensiones del área productora de un excedente de agua que puede confluir y acumularse en una depresión de origen agrario o topográfico.

En un contexto más amplio, la vertiente estudiada presenta, si se compara con pequeñas cuencas agrícolas elementales estudiadas en otras zonas templado-húmedas de Europa y España en donde predomina la producción cerealística, (AUZET *et al.*, 1993; LUDWIG *et al.*, 1996; CASALÍ *et al.*, 1999), una escasa diversidad de tipos de cultivo en las secuencias de rotación. Por contra, las pequeñas dimensiones de las parcelas en la CC.AA. de Galicia, tiende a originar una amplia variabilidad espacial de direcciones y sistemas de laboreo en el interior de cuencas elementales de pequeñas dimensiones, lo que tiene consecuencias sobre las características de la red de drenaje efímera y la génesis de escorrentía, en cuyo estudio es necesario profundizar.

Comparación con otros sistemas para almacenar la información

La gran cantidad de datos semicuantitativos obtenidos en campañas realizadas para analizar la evolución de la superficie del suelo motivó la elaboración de un procedimiento para almacenar dicha información en CD-ROM (VIVAS MIRANDA *et al.*, 2001). Una de las principales ventajas reconocidas a este sistema es la posibilidad de organizar y relacionar entre sí diversos índices de evolución como el diámetro mínimo de los agregados no integrados en la costra, la rugosidad, porosidad, etc. Este procedimiento presenta ventajas a la hora de recopilar información sobre la evolución de la superficie en distintas zonas de una cuenca o de una misma parcela para su posterior integración en un modelo numérico del terreno. El tratamiento previo de observaciones de campo y su recopilación en CD-ROM, también debe de facilitar la sobreposición de dos o más estratos de información, para elaborar nuevos mapas, lo que constituye la principal función de los modelos numéricos del terreno.

La información proporcionada por los datos recogidos en el SIG también se puede integrar en un sistema experto que permitiría definir aquellos escenarios con mayor riesgo de erosión a escala de parcela o cuenca agrícola. Con ello resulta factible seleccionar aquellas prácticas agrícolas que minimicen las pérdidas de suelo por erosión. Para analizar la interdependencia entre variables medidas en una cuenca agrícola, BLIJENBERG (1999) puso a punto una base de datos relacionada; este autor también desarrolló un programa que permite utilizar la información contenida en dicha base de datos para elaborar automáticamente mapas de PCRaster. Las variables se pueden

describir mediante tres tipos de operaciones: lógicas, numéricas y mixtas lógicas y numéricas. Los mapas resultantes, que también se pueden usar para el análisis de la distribución espacial de la erosión, están concebidos originalmente para facilitar la definición de diversos escenarios de manejo en los que simular, mediante el uso de modelos distributivos como LISEM, la escorrentía y la erosión.

Las principales variables consideradas en esta base de datos, con las que se pueden elaborar modelos numéricos del terreno se refieren a la dedicación, la cobertura de la vegetación, el manejo en las parcelas de la cuenca y las propiedades del suelo:

- *La dedicación*, debe de incluir no solo tipos de cultivo y rotaciones habituales, sino también parcelas retiradas de la producción, áreas dedicadas a monte y edificios agrícolas.

- *La cobertura de la vegetación*, es descrita por la evolución de parámetros como la altura del cultivo, el índice de área foliar o el porcentaje de superficie del suelo cubierta.

- *El manejo de la explotación agrícola*, se refiere a cada una de las parcelas del interior de la cuenca, en particular, a los datos sobre rotaciones y operaciones de laboreo. En el laboreo condicional se debe de incluir la amplia gama de operaciones habituales, como laboreo primario y sus tipos, fresado, gradeado, fertilización, preparación del lecho de siembra, siembra, aplicación de rodillo, recolección, etc. Conviene destacar, en particular, la importancia de analizar el efecto de las rodadas y en general los motivos lineales de origen agrario sobre la concentración de la escorrentía y la génesis de la erosión. Al definir escenarios teóricos existe también la opción de evaluar el efecto de diversas medidas de conservación tales como las bandas verdes o de la eliminación de las huellas de labor después de la preparación del lecho de siembra.

- *Las propiedades del suelo*, de cuya evaluación depende en gran medida la precisión de las predicciones. Estas propiedades pueden ser descritas mediante métodos semicuantitativos o cuantitativos. Muchos de los modelos físicos para estimar la erosión requieren datos de conductividad hidráulica del suelo; aunque actualmente existen métodos de medida de este parámetro en una superficie total o parcialmente encostrada, es necesario considerar que,

con frecuencia, las propiedades de la superficie y por lo tanto la conductividad está evolucionando a lo largo de los eventos erosivos. Para caracterizar la influencia del suelo en la erosión, al menos cualitativamente, conviene conocer al menos la textura y la evolución de la superficie en base a criterios de tipo semicuantitativo o cuantitativo.

Las cuencas agrícolas elementales de la zona estudiada presentan, en comparación con las comarcas cerealísticas de otras regiones templado-húmedas europeas y españolas una escasa diversidad de tipos de cultivo en parcelas contiguas y, en consecuencia, de los sistemas y secuencias de rotación. Por contra las pequeñas dimensiones de las parcelas originan una amplia variabilidad espacial de direcciones y sistemas de laboreo en el interior de la misma cuenca. Todo ello tiene consecuencias sobre la red de drenaje efímera y la génesis de escorrentía.

En una etapa ulterior, la información proporcionada por los datos recogidos en el SIG, se podría integrar en un sistema experto que permitiría definir aquellos escenarios con mayor riesgo de erosión. Con ello sería posible analizar aquellas prácticas agrícolas que minimizan las pérdidas de suelo por erosión y establecer por ejemplo la dirección idónea de las líneas de cultivo.

CONCLUSIONES

En la ladera agrícola estudiada se puso de manifiesto una notable variabilidad temporal de la intensidad de erosión medida en tres campañas sucesivas diferentes, y ello con independencia de numerosas similitudes en cuanto a la evolución y velocidad de desarrollo de las superficies aptas para producir escorrentía. El desarrollo repetido de una cárcava efímera en la misma posición puso de manifiesto que la erosión hídrica no estaba controlada a escala de esta vertiente.

Se pudo comprobar que el análisis de la formación del excedente de agua a escala de ladera agrícola se ve facilitado por la representación espacial mediante modelos numéricos del terreno de la información básica obtenida en campañas de medida de la erosión y evolución del estado de la superficie. La metodología utilizada basada en el análisis de la diversidad de los factores del medio y las prácticas agrícolas, y que ya ha sido aplicada a una amplia diversidad de condiciones edáficas y agronómicas en otras regiones de la zona templado-húmeda también permitió en este estudio efectuar la jerarquización

de los factores de riesgo de génesis de excedente de agua. Por otra parte, en el contexto físico estudiado, se pudo ilustrar la estrecha relación entre el manejo agrícola y el riesgo de escorrentía.

AGRADECIMIENTOS: Este trabajo ha sido realizado en el marco del Proyecto PGIDT99MA10303, financiado por la Xunta de Galicia.

BIBLIOGRAFÍA

AUZET, A.V., BOIFFIN, J., PAPY, F., LUDWIG, B. and OUVRY; J.F. 1993. Rill erosion as a function of the characteristics of cultivated catchments in northern France. *Catena*, 20: 41-62.

BOARDMAN, J. 1990. Soil erosion in the South Downs: a review. In: *Soil Erosion on Agricultural Land*, Edited by Boardman, J., Foster, I.D.L. and Dearing, J. A. Wiley, Chichester. pp 87-106.

BLIJENBERG, H. M. 1999. FAIR, database manual. Version 1.0. Utrecht University. Faculty of Geographical Sciences. 50 pp.

BRACKEN, I. and WEBSTER, C. 1990. Information technology in Geography and planning, including principles of GIS. Routledge. Londres.

CACHEIRO, M., TABOADA, M. T., VALCÁRCCEL, M. y DAFONTE, J. 1998a. Mapping rill erosion within a cultivated field using geostatistic and GIS. *V Int. Symposium on Analytical Methodology in the Environmental Field*, vol. 2. (A Coruña).

CACHEIRO POSE, M., VALCÁRCCEL ARMESTO, M., VIEIRA, S. R. y TABOADA CASTRO, M. T., 1998b. Elaboración de modelos de elevación digital empleando técnicas geoestadísticas y sistemas de información geográfica. *Cadernos Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 23: 137-150.

CACHEIRO POSE, M., PAZ GONZÁLEZ, A. y VALCARCEL ARMESTO, M. 2000. Dependencia espacial de datos topográficos a escala de ladera y pequeña cuenca agrícola. *Cadernos Lab. Xeol. de Laxe*, 26 (en prensa).

CASALÍ, J., LÓPEZ, J. J. and GIRÁLDEZ, J. V., 1999. Ephemeral gully erosion in southern Navarra Spain. *Catena*, 36: 65-84.

GOVERS, G. 1991. Rill erosion on arable land in central Belgium: rates, controls and predictability. *Catena* 18: 133-155.

KARSENBERG, D. 1996. PCRaster version 2 manual. Departamento de Geografía Física. Facultad de Ciencias Espaciales. Universidad de Utrecht. Países Bajos. 368 pp.

Le BISSONNAIS, Y., RENAUX, B. and DELOUCHE, H. 1995. Interactions between soil properties and moisture content in crust formation, runoff and interrill erosion from tilled loess soils. *Catena*, 22: 33-46.

LUDWIG, B., BOIFFIN, J., CHADOEUF, J and AUZET, A.V. 1995. Hydrological Structure and Erosion Damage Caused by Concentrated Flow in Cultivated Catchments. *Catena*, 25: 227-252.

LUDWIG, B., AUZET, A. V., BOIFFIN, J., PAPY, F., KING, D. and CHADOEUF, J., 1996. États de surface, structure hydrographique et érosion en rigole de bassins versants cultivés du Nord de la France. *Études et Gestion des Sols*. 3 (1): 53-70.

MARTÍNEZ PACHECO, J, M., 1995. Sistemas de Información Geográfica. En *Análisis de la variabilidad espacio-temporal y procesos caóticos en Ciencias Medioambientales*. Editado por Ibáñez, J. J. y Machado C. Geoforma Ediciones. pp 95-110.

MORGAN, R.P.C. 1997. Erosión y conservación del suelo. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 343 pp.

PAZ, A., CACHEIRO, M. y VALCÁRCEL, M. 1998. Erosión en pequeñas parcelas de cultivo durante una tormenta de verano. *Resúmenes XIII Bienal de la Real Sociedad Española de Historia Natural*. (Vigo).

POESEN, J. W. A., VANDAELE, K. and Van Wesemael, B.I. 1996. Contribution of gully erosion to sediment production on cultivated lands and rangelands. In: *Erosion and sediment yield: global and regional perspectives*. IAHS Publ. N° 236. pp 251-266.

TABOADA CASTRO, M^a M. 1998. *Dinámica de la formación de costras superficiales en suelos de cultivo*. Tesis de Licenciatura. Universidad de A Coruña. 92 pp.

TABOADA CASTRO, M^a. M., PAZ GONZÁLEZ, A. y VALCÁRCEL ARMESTO, M., 1999. Condiciones de formación de la escorrentía en suelos de cultivo. *En: Avances sobre la erosión hídrica*. Editado por Paz González, A. y Taboada Castro, M. T. Colección Cursos Congresos y Simposios, 52. Universidad de A Coruña. pp 69-99.

VALCÁRCEL ARMESTO, M., PAZ GONZÁLEZ, A. DAFONTE DAFONTE, M^a. T. y TABOADA CASTRO, M^a. T. 1999. Importancia de las prácticas agrícolas en el control de los procesos erosivos y evaluación mediante modelos de la incidencia de las mismas. *En: Avances sobre el estudio de la erosión hídrica*. Editado por Paz González, A. y Taboada Castro, M. T. Colección Cursos Congresos y Simposios, 52. Universidad de A Coruña. pp. 7-43.

VALCÁRCEL ARMESTO, M., 1999. *Variabilidad espacial y temporal de la erosión en suelos de cultivo*. Tesis Doctoral. EPS de Lugo. Universidad de Santiago de Compostela. 266 pp.

VANDAELE, K. 1993. Assessment of factors affecting ephemeral gully erosion in cultivated catchments of the Belgian Loam Belt. In: *Farm Land Erosion in Temperate Plains Environment and Hills* Edited by Wicherek, S. Elsevier, Amsterdam, 125-135 pp.

Van DEURSEN, W.P.A. and WESSELING, C. G. 1992. The PCRaster package. Departamento de Geografía Física. Facultad de Ciencias Espaciales. Universidad de Utrecht. Países Bajos. 192 pp.

VIEIRA, S.R. HATFIELD, J.L., NIELSEN, D.R. and BIGGAR J.W. 1983. Geostatistical theory and applications to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, 51 (3): 1-75.

VIEIRA, S.R., TILLOTSON, P.M., BIGGAR, J. W. and NIELSEN, D. R. 1997. Scaling of semivariograms and the kriging estimation of field-measured properties. *Campinas, R. Bras. Ci. Solo*, 21(4): 525-533.