

EROSIÓN POR CÁRCAVAS EFÍMERAS EN EL SUR DE NAVARRA (ESPAÑA): DESCRIPCIÓN Y CUANTIFICACIÓN

J. Casali¹, J.J. López¹, J.V. Giráldez²

RESUMEN: La erosión por cárcavas efímeras es un fenómeno muy frecuente en los suelos francos o franco-limosos formados sobre las Margas Miocenas del sur de Navarra. Se han identificado tres tipos de acuerdo con sus orígenes: las formadas dentro de la misma parcela en la que se origina la escorrentía; formadas por flujos provenientes de aguas arriba de la parcela; cárcavas efímeras asociadas a discontinuidades, relacionadas con cambios abruptos de pendiente. Al cabo de una campaña agrícola poco lluviosa, la erosión por cárcavas efímeras ha sido responsable de grandes pérdidas de suelo, superándose localmente los $2.66 \text{ kg m}^{-2} \text{ año}^{-1}$, lo que contribuye a unas pérdidas totales por encima de niveles tolerables. La práctica totalidad de la erosión se ha producido por una única lluvia de invierno intensa y breve, sobre un suelo muy húmedo y sin apenas protección vegetal. La mayor parte de las pérdidas por cárcavas efímeras se han debido a la ausencia de redes de desagüe capaces de evacuar el exceso de agua.

INTRODUCCIÓN

Se denominan cárcavas efímeras a los pequeños canales que aparecen en los terrenos de cultivo formados por la acción de flujos erosivos durante acontecimientos de lluvia. Son frecuentemente eliminadas o enmascaradas por el laboreo, de donde se deriva su denominación de efímeras, y tienden a aparecer repetidamente en las mismas posiciones año tras año. Mientras que los surcos aparecen en las laderas, las cárcavas efímeras tienden a formarse en la depresión que constituyen dos laderas opuestas. Elementos lineales del paisaje, como bordes de parcelas, caminos, huellas de tractor o surcos de laboreo, facilitan la aparición de este tipo de cárcavas. La forma, tamaño y evolución de las cárcavas efímeras están influidas por factores ligados al suelo, como erodibilidad, presencia o ausencia de horizontes resistentes o contenido de humedad (Moore *et al.*, 1988); por factores topográficos como tamaño de la cuenca de aportación (Poesen y Govers, 1990), pendiente del cauce y de las laderas (Foster, 1986; Poesen y Govers, 1990; Poesen, 1993); por el tipo de precipitaciones que afecten a la zona (intensidad y duración), y por las prácticas de cultivo de cada explotación.

Al igual que la erosión laminar y en surcos, las cárcavas efímeras causan contaminación por la movilización de sedimentos y pérdida de productividad del suelo afectado. Dificultan el paso de la maquinaria y tienden a incrementar la erosión laminar y en surcos en las laderas

adyacentes a la cárcava, debido a que la pendiente de las mismas se va incrementando tras sucesivos episodios de erosión y rellenado. Hay que tener en cuenta que la erosión por cárcavas efímeras puede ser mayor que la medida en una cárcava determinada en un momento dado. En efecto: depósito y erosión, acrecimiento y degradación, pueden ocurrir simultáneamente en diferentes tramos de una red de cárcavas, dando lugar a varios ciclos de vaciado y rellenado del sistema. Por tanto, es posible que la medición en algunas secciones se realice sobre un cauce rellenado de sedimento pero que en realidad ha sido *previamente erosionado*. Las cárcavas efímeras son capaces de transportar materiales gruesos, incluyendo agregados de suelo, más eficientemente que los surcos (Foster, 1986).

La erosión por cárcavas efímeras ha sido tenida en consideración sólo recientemente. Existen diversos estudios, la mayoría muy puntuales, que muestran su importancia como fuentes de sedimentos, aunque el conocimiento actual sobre la transcendencia y la naturaleza de este tipo de erosión es todavía muy limitado. Los datos disponibles se refieren casi exclusivamente a Europa Occidental y Norteamérica. El porcentaje sobre las pérdidas totales excede el 10% en la mayoría de los estudios (Poesen *et al.*, 1996). En la *Tabla 1* se recogen diferentes referencias que contienen datos de pérdidas de suelo debidas a cárcavas efímeras publicadas hasta el momento.

¹ Dpto. de Proyectos e Ingeniería Rural. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Pública de Navarra. Campus de Arrosadia s/n 31006 Pamplona (Navarra). España. Tel.: (948) 169160. e-mail: jcs@upna.es; e-mail:jjlr@upna.es

² Dpto. de Agronomía. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes. Universidad de Córdoba. Avda. Menéndez Pidal s/n 14080. Córdoba. España. Tel.: (957) 293333. E-mail: ag1gicej@uco.es

Artículo publicado en *Ingeniería del Agua*. Vol.6 Num.3 (septiembre 1999), páginas 251-258, recibido el 7 de octubre de 1998 y aceptado para su publicación el 10 de mayo de 1999. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado.

Autor y año	Localización	Período de estudio (años)	Pérdidas de suelo por cárcavas efímeras (kg·m ⁻² ·año ⁻¹)	Pérdidas de suelo por cárcavas efímeras (%)
Lafflen(1958)	Cinturón del maíz (EE UU)			al menos el 25**
Thomas et al. (1986)	Georgia (EE UU)			30*
Spomer y Hjelmfelt (1986)	EEUU			35*
Grissinger y Murphee (1989)	Norte del Mississippi	2	2.1	60*
Lentz et al (1993)	Tres cuencas de Minnesota	3	0.08-1.6	
Smith (1993)	Tres áreas de Mississippi	3	1.21-1.99	
USDA-NRCS (1997)	19 estados de EE UU		0.27-2.87	21-275**
Vandaele (1993), Poesen et al. (1996)	Región Central de Bélgica		0.5	40-60*
Vandaele (1993)	Cuenca al sur de Portugal		0.1-0.68	82-96*

* Sobre las pérdidas de suelo totales

** Sobre las pérdidas de suelo debidas a erosión laminar y en surcos

Tabla 1. Referencias con datos publicados sobre erosión en cárcavas efímeras

Se conoce muy poco sobre las técnicas específicas más adecuadas para controlar la erosión por cárcavas efímeras y sobre su coste e incidencia. La siembra directa o laboreo nulo se apunta como una de las medidas más prometedoras (Lafflen, 1985; Spomer y Hjelmfelt, 1986; De Ploey, 1988), aunque en los casos más severos son necesarias acciones de mayor envergadura, como la construcción de estructuras de contención (Foster, 1986). Dabney *et al.* (1997), comprobaron como la combinación de siembra directa con la instalación de barreras vegetales colocadas transversalmente a los cauces de cárcavas efímeras evitó la progresión de cabeceras de cárcavas o de surcos en cuencas cultivadas del norte de Mississippi.

En este trabajo se analizan los factores que condicionan la erosión por cárcavas efímeras en el sur de Navarra ilustrando su importancia con algunos ejemplos.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El estudio fue llevado a cabo dentro del término municipal de Pitillas, Navarra (Figura 1), a unos 50 km al sur de Pamplona. En esta zona los fenómenos erosivos se desarrollan con rapidez e intensidad, lo que las hace muy interesantes desde el punto de vista de la gestión ambiental. Las observaciones y mediciones se realizaron en 86 ha cultivadas, con pendientes que oscilan entre el 1 y el 14% enclavadas en la zona superior de dos cuencas diferentes que en total ocupan 210 ha. El cultivo, sembrado generalmente a principios de octubre, es cereal de invierno, trigo y cebada. El laboreo se practica de modo tradicional con vertedera o arado cincel. Los rendimientos anuales de estos cultivos son bajos, alrededor de los 3,000 kg ha⁻¹, con importantes fluctuaciones interanuales.

El clima es mediterráneo continental, con una temperatura media anual aproximada de 13.4 °C, mientras la precipitación media anual se encuentra en el entorno de los 500 mm (Elias y Ruiz, 1986). Las precipitaciones medias mensuales oscilan entre los 60 mm de mayo y

los 20 mm de julio. El material geológico sobre el que se han formado los suelos es una mezcla de arcillas y limos parduscos y amarillentos, con intercalamientos de paleocanales de arenisca, materiales pertenecientes a la Facies Ujué (Mioceno Continental Medio y Posterior). Una propiedad importante de estos materiales es su elevado contenido en sales sódicas, que se incorporan al suelo a través de procesos de meteorización, causando problemas estructurales en las zonas bajas debido a la dispersión de partículas de arcilla.

Las texturas de los suelos son predominantemente francas, aunque en las localizaciones más bajas se dan texturas franco-limosas. En consecuencia, el limo es abundante, oscilando entre el 42 y el 62% en el horizonte superficial de donde se deduce su susceptibilidad a la erosión. El RAS y la conductividad eléctrica del extracto de saturación medidos en el horizonte superficial alcanzaron respectivamente valores de hasta 32.5 mol^{1/2} m^{-3/2} y 53.9 dS m⁻¹ en las zonas más deprimidas.



Figura 1. Localización general del área de estudio

La estructura es en muchos casos laminar, bajas velocidades de infiltración, siendo también frecuente la formación de costra. La densidad aparente oscila entre 1,470 y 1,610 kg m⁻³. De acuerdo con estas observaciones, el suelo, con problemas de salinidad y alcalinidad, se considera altamente erosionable (Donézar *et al.*, 1990a,b), como se constata además tras una simple observación visual de la zona. En Navarra, territorio que ocupa aproximadamente 1.05·10⁶ ha, pueden esperarse suelos similares al descrito en las aproximadamente 62,000 ha ocupadas por la Facies de Ujué (Gobierno de Navarra, 1997). La gravedad de los problemas de alcalinidad y salinidad y la magnitud de la erosión en estos suelos se acentúa con la pluviometría y el uso de la tierra, variables en las distintas zonas de Navarra ocupadas por estos materiales.

RESULTADOS

El periodo de estudio cubre una campaña de producción cerealista, desde octubre de 1995 a septiembre de 1996, ambos inclusive. Se detectó la aparición y crecimiento de cárcavas efímeras, midiendo la erosión causada por ellas. La precipitación se registró a intervalos de un minuto mediante un pluviógrafo colocado el 15 de enero de 1996 en la zona de estudio. Los datos de precipitación desde el 1 de octubre de 1995 hasta el 15 de enero de 1996 se obtuvieron de la estación automatizada de Carcastillo (La Oliva), distante 10 km. La forma de las secciones transversales de todas las cárcavas estudiadas se midió mediante un perfilador de 1 m de anchura, siguiendo el método que Sancho *et al.* (1991) utilizan para la medición de surcos naturales.

La precipitación durante el periodo considerado es de 450 mm. La Figura 2 muestra la precipitación diaria recogida en la zona durante el periodo de estudio, que puede calificarse como ligeramente más seco de lo habitual, no habiéndose dado tampoco lluvias diarias excepcionales. Sólo la lluvia del 22 de enero de 1996 (Figura 3), que alcanzó una intensidad máxima de 54 mm h⁻¹ y una precipitación total de 17 mm, con una duración de 204 min, fue capaz de originar erosión por cárcavas efímeras en la zona desde octubre de 1995 a septiembre de 1996. Los factores que contribuyeron a que esta lluvia fuese la única en causar erosión, a pesar

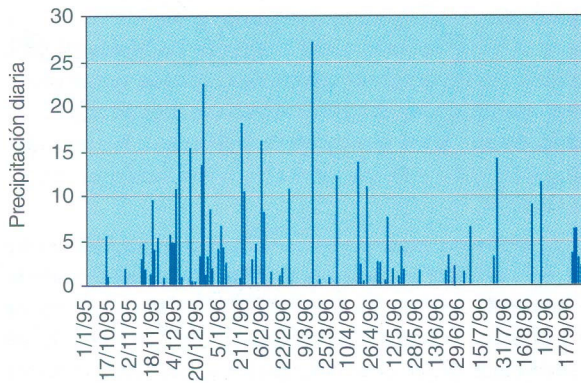


Figura 2. Precipitaciones diarias en el área de estudio en el periodo octubre de 1995 a septiembre de 1996 (ambos inclusive)

hubo otras más abundantes e intensas, fueron la *alta humedad* del suelo tras lluvias continuadas al comienzo del invierno (Figura 2) y la *escasa cubierta vegetal* al estar el cultivo recién germinado.

Se encontraron en la zona de estudio tres tipos de cárcavas efímeras netamente diferenciados de acuerdo con su origen. En primer lugar, se distinguieron *cárcavas originadas por aportes de agua provenientes de la propia cuenca que constituye la parcela*. Se corresponden con la acepción más tradicional de cárcava efímera. La acción del agua fluyendo promueve la aparición de cortes o discontinuidades, dando lugar a cabeceras o *knickpoints* que probablemente migrarán con posterioridad aguas arriba, alargando y profundizando la cárcava. Este mecanismo ha sido observado en campo por Smith (1993) en el desarrollo de cárcavas efímeras en el centro del estado de Mississippi. Este autor explica cómo la cabecera de las cárcavas, su extremo aguas arriba, se encontraba a una distancia del extremo superior de la cuenca de aproximadamente un tercio de la longitud total del fondo de la cuenca. En segundo lugar, se identificaron *cárcavas originadas por aportes provenientes del desagüe natural de cuencas situadas aguas arriba de la parcela, y que irrumpen en la parcela cultivada*. La cárcava generalmente aparece en el primer punto de contacto del flujo con la parcela. Finalmente, se distinguieron *cárcavas que aparecen en los bordes de algunas parcelas, junto a los caminos o lugares en los que la pendiente cambia bruscamente, y se han denominado asociadas a discontinuidades*. Los bordes de caminos en los que se ha detectado la presencia de este tipo de cárcavas presentan taludes pequeños, con desniveles del orden de 0.5 m. La formación de cabeceras se ve probablemente facilitada por estas discontinuidades que, una vez generada la escorrentía, se desplazarían aguas arriba. La primera aparición de estas cabeceras puede estar determinada por puntos más susceptibles en el talud, como pequeños tubos de sifonamiento, muy frecuentes en los suelos de la zona de estudio (Gutiérrez *et al.*, 1988; Del Valle de Lersundi y Del Val, 1990). En años posteriores, la hondonada que aparece tras el labrado de la cárcava probablemente facilitara la concentración de escorrentía y la aparición de la cárcava en la misma posición.

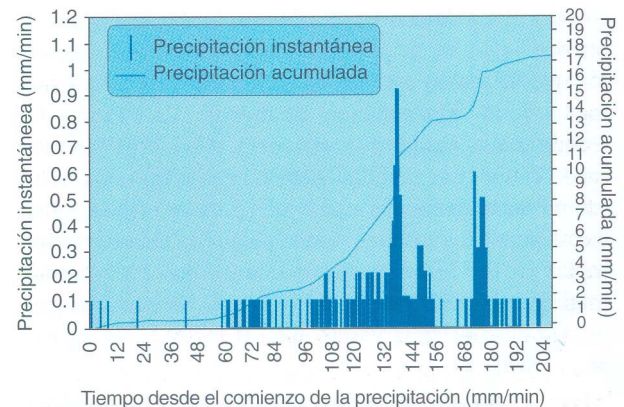


Figura 3. Hietogramas de la lluvia del 22 de enero de 1996

		Pendiente (%)	Longitud (m)	Volumen (m ³)	Pérdida de suelo (kg m ² año ⁻¹)	Área sección transversal (m ²)			Relación anchura-profundidad (RAP)		
						Media	CV	n	Media	CV	n
Cárcavas efímeras tipo 1	La Abejera	3.0	18	0.83	0.156	0.040	0.69	6	5.86	0.33	6
	Cobaza I	4.7	80	3.85	0.920	0.050	0.58	14	3.41	0.48	14
	La Matea I	9.5	38	3.00	1.774	0.044	0.49	23	4.78	0.52	24
	La Matea II	9.5	29	2.73	0.974	0.050	0.66	19	1.97	0.54	16
				total: 10.41							
Cárcavas efímeras tipo 2	Cobaza II*	5.0	240	14.73	2.660	0.069	0.58	40	4.88	0.73	37
	Camino II	3.9	68	6.80	<2.600	0.161	0.64	11	4.05	0.52	10
Cárcavas efímeras tipo 3	La Matea III	2.9	66	6.26		0.065	0.47	13	5.38	0.38	13
	La Matea IV		29	2.43		0.048	0.57	11	6.15	0.43	11
				total: 30.22							
	Camino I*	1.5	15	1.06		0.066	0.44	7	6.05	0.37	5
Cárcavas efímeras tipo 3	Camino III	5.1	24	1.58		0.088	0.46	11	3.74	0.46	10
	Camino IV	0.5	11	1.13		0.144	0.25	6	3.1	0.24	6
	Camino V	9.5	5	0.66		0.129	0.16	4	2.76	0.27	4
	Cobaza III*	2.0	43	7.89		0.182	0.36	17	2.17	0.28	16
				total: 12.32							

* Cárcava ramificada: áreas de la sección transversal y pendientes son valores medios; longitudes y volúmenes son la suma de las diferentes ramas; CV: coeficiente de variación; n: número de datos

Tabla 2. Principales características de la erosión por cárcavas efímeras, periodo octubre 1995-septiembre 1996

En septiembre de 1996, finalizado un ciclo de cultivo, se identificaron las cárcavas efímeras presentes en el área de estudio. Se realizaron en todas ellas mediciones de la erosión producida y levantamientos topográficos minuciosos de las pequeñas cuencas en las que aparecieron cárcavas efímeras propiamente dichas. En la *Tabla 2* se indican los principales resultados obtenidos, donde los tipos de cárcava (1, 2 y 3) se corresponden con los descritos en el párrafo anterior. Se detallan a continuación los resultados correspondientes a cada uno de los tres tipos de cárcavas efímeras.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las cuencas en las que se localizan las cárcavas efímeras propiamente dichas tienen por nombre La Abejera, Cobaza I, La Matea I y La Matea II. En la *Figura 4* pueden verse los mapas de cada una de las cuencas, en los que se indica además su superficie y la pendiente media de la línea principal de drenaje. La cuenca de Cobaza I fue labrada con vertedera, y las otras tres con arado cincel. Las pérdidas debidas a este tipo de cárcava en la zona ascienden a 10.4 m³. El área afectada, suma de las superficies de las cuatro pequeñas cuencas mostradas en la *Figura 4*, asciende a 2.2 ha. La longitud total de estas cárcavas es de 165 m, y las pérdidas por unidad de superficie varían entre 0.156 y 1.774 kg m⁻² año⁻¹ (*Tabla 2*).

Algunas parcelas de la zona se hallan situadas en plena trayectoria de cauces naturales que desaguan cuencas dispuestas aguas arriba de dichas parcelas. Se identifi-

caron y se midieron estas cárcavas, llamadas Cobaza II, Camino II, La Matea III y La Matea IV (*Tabla 2*). Cobaza II fue labrada con vertedera, y las otras tres con arado cincel. El volumen de suelo movilizado por estas cárcavas asciende a 30.2 m³, y la longitud total excavada es de 426 m. En este tipo de cárcavas, la manera correcta de referir las pérdidas de suelo con la superficie que lo aporta es relacionando dichas pérdidas con la superficie de la porción de la cuenca hidrológica que se encuentra en la parcela, pues es la que realmente aportará los sedimentos que la cárcava evacúa. Se dispone de datos topográficos para calcular las pérdidas unitarias en la cárcava de Cobaza II, siendo dicha superficie de 8,500 m². Dado que el volumen movilizado en esta cárcava es de 14.73 m³, y considerando que la densidad aparente del suelo es 1,540 kg m⁻³, la masa de suelo erosionada es de 2.66 kg m⁻² año⁻¹. En Camino II, La Matea III y La Matea IV, las áreas son pequeñas, aunque no se conocen con suficiente detalle, y los volúmenes de suelo erosionado son altos o muy altos, por lo que las pérdidas unitarias deben de ser similares o mayores que las de Cobaza II.

Las cárcavas efímeras asociadas a discontinuidades que se encontraron en la zona de estudio se denominaron Camino I, Camino III, Camino IV, Camino V y Cobaza III (*Tabla 2*). Todas las parcelas en las que aparecieron fueron labradas con arado cincel. Las pérdidas causadas por estas cárcavas ascienden a 12.3 m³, similares a las producidas por cárcavas efímeras propiamente dichas, con una longitud total de 98 m.

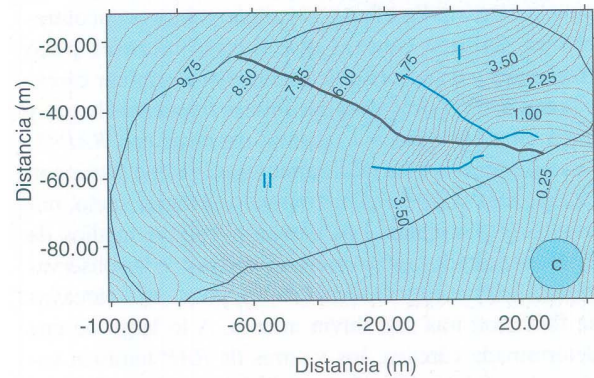
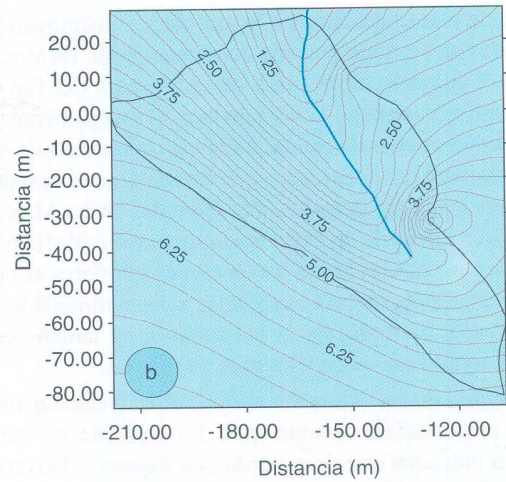
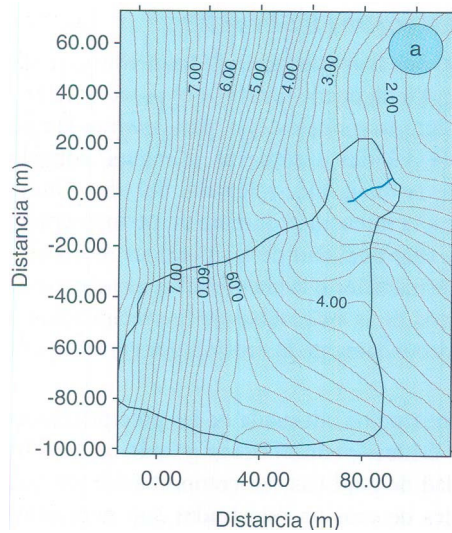


Figura 4. Mapas de las cuencas de La Abejera (a), Cobaza I (b), La Matea I y La Matea II (c), mostrando la posición de la divisoria y de las cárcavas. A, área de cada cuenca; S, pendiente media de la línea principal de drenaje de cada cuenca. Las líneas discontinuas indican la divisoria, a menudo condicionada por la presencia de colectores que rodean a las parcelas. Las líneas gruesas de trazo continuo indican la posición ocupada por las cárcavas.

- a. La Abejera: A= 0.96 ha; S= 4.4%
- b. Cobaza I: A= 0.55 ha; S= 5.2%
- c. La Matea I: A= 0.26 ha; S= 9.2%
- La Matea II: A= 0.43 ha; S= 9.1%

DISCUSIÓN

De acuerdo con los datos aportados en la Tabla 2, el coeficiente de variación del área de las secciones transversales y de la relación anchura-profundidad en las cárcavas efímeras asociadas a discontinuidades es menor que en los otros tipos, sugiriendo una mayor uniformidad. Además, estas cárcavas presentan cabeceras mucho más nítidas. Por otro lado (Tabla 2), las mayores secciones transversales medias se dan en estas cárcavas, cuando no se corresponden ni con las mayores pendientes ni con las mayores cuencas. Todas estas peculiaridades pondrían de manifiesto un efecto iniciador y acelerador de la discontinuidad, en un proceso similar al estudiado por Bennett (1997), así como la distinta naturaleza de estas cárcavas.

Una posibilidad de conocer la importancia real de las pérdidas encontradas es contrastarlas con las tolerancias de pérdidas de suelo para la zona, definidas de acuerdo con la ecuación universal de Wischmeier y Smith (1978). No existen datos de tolerancia específicos para la zona de estudio, de modo que, con las debidas precauciones, podrían usarse los elaborados por el Soil Conservation Service del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA-SCS). Este organismo propuso un valor de pérdidas de 1.12 kg m⁻² año⁻¹ como un valor máximo que en ningún caso debería rebasarse (USDA-SCS, 1973), cifra orientativa sigue siendo hoy tenida en consideración. En la Tabla 2 se comprueba cómo en las cuencas de La Matea I, Cobaza II y Camino II se rebasa incluso el

límite máximo, mientras que en Cobaza I y La Matea II las intensidades medidas están muy próximas a la intensidad máxima propuesta. Puede decirse que las pérdidas que se han producido en la zona debidas solo a cárcavas efímeras son de mucha importancia, habiendo evidencia de que ocurre además erosión laminar y en surcos, sin olvidar que el periodo de tiempo estudiado no ha sido particularmente lluvioso.

La mayor parte de las áreas medias de las secciones transversales oscilan entre 0.040 y 0.090 m², aunque dos secciones superan los 0.160 m² (Tabla 2). En las cárcavas efímeras propiamente dichas las mayores secciones se dan en las posiciones centrales, decreciendo hacia los extremos. Ello se explica porque en el extremo aguas arriba los caudales son pequeños y porque, aguas abajo, aunque el caudal sea mayor, el flujo tiene mermada su capacidad de erosionar al encontrarse más cargado de sedimentos. Además, suele presentarse un descenso importante de la pendiente aguas abajo (Figura 4), lo que a su vez se traduce en un descenso de la capacidad de transporte. Por ejemplo, en la cuenca de Cobaza I, el área media de las secciones del extremo superior es de 0.035 m², la de las secciones intermedias es de 0.060 m² y la de las inferiores es de 0.040 m². En La Abejera, estos valores, referidos a las secciones superiores, intermedias e inferiores son, respectivamente, de 0.021 m², 0.077 m² y 0.022 m². En las cárcavas formadas por interposición de parcelas en los cauces de desagüe, las mayores secciones suelen encontrarse en el tramo superior, debido a la

irrupción brusca del flujo en la parcela. La disminución posterior se produce por una combinación de factores, como el aumento de la carga de sedimentos del flujo, creciente aguas abajo, la disminución de la pendiente y el escaso aumento de caudal dado que la porción de la cuenca situada en la parcela y que alimenta a este tipo de cárcavas suele ser pequeña. Por ejemplo, en La Matea IV, el área media de las secciones superiores es de 0.068 m², mientras que en las de las secciones inferiores es de 0.025 m². En las cárcavas asociadas a discontinuidades, como ya se ha indicado, la variación en el tamaño es menor, tratándose de canales más uniformes.

La mayoría de los valores medios de *RAP* (relación anchura-profundidad) se sitúa entre 3 y 6 (Tabla 2). Son valores elevados que de acuerdo con Poesen y Govers (1990) pueden relacionarse con el tipo de lluvia que origina la cárcava. En efecto, los citados autores encontraron en Bélgica Central que lluvias intensas poco frecuentes y de corta duración tienden a originar cárcavas con $RAP > 1$, mientras que lluvias frecuentes largas y poco intensas tienden a originar cárcavas con $RAP < 1$. Las primeras son las más perniciosas, ya que erosionan la capa más superficial, arrastrando el mejor suelo, nutrientes y pesticidas. Los elevados valores medios de *RAP* encontrados están en consonancia con las observaciones de Poesen y Govers (1990), pues estas cárcavas se formaron tras una lluvia intensa. A lo largo de una determinada cárcava, los valores de *RAP* también varían, de modo similar a como lo hace el área. Así, los valores mínimos de *RAP* se encuentran siempre en las posiciones centrales para el caso de cárcavas efímeras propiamente dichas, y cerca del extremo aguas arriba en las cárcavas formadas por interposición. La erosión en esas posiciones es máxima, y también lo es la erosión del lecho, lo que causa que el flujo erosione preferentemente el lecho y se concentre, disminuyendo la *RAP*. Se citan a continuación algunos ejemplos. Para la cárcava de Cobaza I, de 80 m de longitud, el valor mínimo de *RAP*, que es 0.97, se alcanza a unos 30 m del extremo aguas arriba. El valor medio de *RAP* correspondiente a las secciones superiores es de 2.60, mientras que en el extremo aguas abajo este valor es de 5.75. En La Abejera, el valor mínimo, 3.30, corresponde con la posición central, mientras que los valores medios de las secciones del extremo aguas arriba y aguas abajo son, respectivamente, de 7.25 y 6.39. En La Matea IV, el *RAP* medio de las secciones superiores es de 4.66, mientras que el de las cinco inferiores es de 8.16.

Se ha observado un mayor volumen de pérdidas en las cárcavas causadas por flujos provenientes de aguas arriba: 30.2 m³ frente a los aproximadamente 10.4 m³ de las cárcavas propiamente dichas y a los 12.3 m³ de las cárcavas asociadas a discontinuidades. En consecuencia, la inexistencia de desagües revestidos o protegidos ha sido la causa principal de las pérdidas. Conviene alertar del riesgo de cometer en el futuro errores similares en zonas próximas. Se han producido en el área de estudio pérdidas puntualmente muy importantes, sin lluvias excepcionales, y únicamente por cárcavas efímeras.

CONSIDERACIONES FINALES

El hecho de que la mayor parte de las pérdidas se deban a una única lluvia puede justificar el procedimiento seguido en algunos modelos que, para estimar las pérdidas anuales debidas a cárcavas efímeras, consideran únicamente la lluvia más relevante del año. Un breve periodo de alta intensidad durante un periodo crítico ha causado la casi totalidad de las pérdidas de un año, lo que pone de manifiesto la necesidad de contar con datos muy precisos de la intensidad de la precipitación para estudiar adecuadamente la erosión por cárcavas efímeras.

Una caracterización adecuada de las precipitaciones en las épocas críticas podría ilustrar grandemente sobre la probabilidad de pérdidas. La comprobación de que las intensidades de erosión registradas son puntualmente muy elevadas en el seno de un área de estudio relativamente pequeña es de por sí importante. Sin embargo, sería de gran interés conocer la incidencia espacial de los fenómenos estudiados. Parece pues conveniente examinar el uso de estas tierras marginales, en las que la baja productividad de los cultivos hace de difícil viabilidad la puesta en marcha de medidas de control. Todo parece indicar que en zonas con cierta pendiente el cultivo debe de ser abandonado si se desea mantener el suelo a medio o incluso corto plazo.

CONCLUSIONES

En un periodo no particularmente lluvioso, se han detectado pérdidas de suelo causadas por cárcavas efímeras puntualmente muy importantes (hasta 2.66 kg⁻² año⁻¹), que por sí solas superan frecuentemente las tolerancias a pérdidas de suelo generalmente admitidas. A estas pérdidas hay que añadir las causadas por erosión laminar y en surcos, cuya presencia es evidente en la zona.

El comienzo del invierno se ha revelado como una circunstancia crítica, debido a la alta humedad del suelo y a la casi nula cubierta vegetal en la mayoría de las parcelas. La práctica totalidad de la erosión se ha producido por una única lluvia intensa, por lo que puede decirse que la gran mayoría de las pérdidas anuales se han debido a muy breves periodos de alta intensidad.

La incorrecta disposición de las parcelas, colocadas frecuentemente en cauces naturales de desagüe, junto con la ausencia de medidas de control, han causado la mayor parte de las pérdidas por cárcavas efímeras. Se hace necesario alertar sobre el peligro de cometer errores similares en la estructuración parcelaria de zonas similares.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Dr. Miguel Donézar y a D. Joaquín del Valle de Lersundi su colaboración en la toma de datos en campo. La beca predoctoral concedida al primer autor por el Departamento de Educación y Cultura del Gobierno de Navarra permitió en parte la financiación de este trabajo.

REFERENCIAS

- Bennett, S., C. V. Alonso, S. N. Prasad y M. J. M. Rómkens (1997) *Dynamics of head-cuts in upland concentrated flows*. En Management of Landscapes Disturbed by Channel Incisión: Stabilization. Rehabilitation. Restoration. S. S. Y. Wang, E. J. Langendoen y F. D. Shields (eds.). The University of Mississippi, Oxford, pp. 510-515.
- Dabney, S. M., C. E. Murphree, L. D. Meyer, E. H. Grissinger, W. C. Harmon y G. B. Triplett (1997) *Runoff and sediment yield from conventional and conservation cropping systems*. En Management of Landscapes Disturbed by Channel Incisión: Stabilization. Rehabilitation. Restoration. S. S. Y. Wang, E. J. Langendoen y F. D. Shields (eds.). The University of Mississippi, Oxford, pp. 983-989.
- Del Valle de Lersundi, J. M. and Del Val, J. (1990) *Procesos de erosión y análisis de sus condicionantes en una región semi-árida: la Cuenca de Cornialto (Bardenas, Navarra)*. Cuaternario y Geomorfología. 4: 55-67.
- De Ploey, J. (1988) *No-tillage experiments in the Central Belgian Loess Belt*. Soil Techn Ser., 1: 181-184.
- Donézar, M., M. Illarregui, J. Del Val y J. Del Valle de Lersundi, (1990a) Erosión actual en Navarra. Gobierno de Navarra. Ministerio de Comercio y Turismo.
- Donézar, M., M. Illarregui, J. Del Val, y J. Del Valle de Lersundi, (1990b) Erosión potencial en Navarra. Gobierno de Navarra. Ministerio de Comercio y Turismo.
- Elias, F., y L. Ruiz (1986) Caracterización agroclimática de Navarra. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Dpto. Agricultura, Ganadería y Montes del Gobierno de Navarra. Madrid.
- Foster, G. R. (1986) *Understanding ephemeral gully erosion*. en Soil Conservation. Assesing the National Resources Inventory. Vol 2. Committee on Conservation Needs and Opportunities. Board on Agriculture. National Research Council. National Academy Press, Washington D. C., pp 90-125.
- Gobierno de Navarra, Departamento de Obras Públicas, Transporte y Comunicaciones (1997) Mapa Geológico de Navarra. Fondo de Publicaciones del Gobierno de Navarra. Pamplona.
- Grissinger, E. H. y J. B. Murphey (1989) *Ephemeral gully erosion in the loess uplands, Goodwin Creek Watershed, Northern Mississippi, USA*. en International Training Center on Erosión and Sedimentation (ed.). Proceedings of the Fourth International Symposium on River Sedimentation. Beijing. China. June 5-9. China Ocean Press, Beijing
- Gutiérrez, M., Benito, G. and Rodríguez, J. (1988) *Piping in badianas áreas of the Middle Ebro Basin, Spain*. en Harvey & Sala (Editors), Geomorphic Processes. Environments with strong seasonal contrasts. Vol. II Geomorphic Systems. Elsevier, Amsterdam, pp. 49-60.
- Laflen, J.M. (1985) *Effect of tillage systems on concentrated flow erosion*. Proc. Fourth Int. Conf. on Soil Conservation. Maracay, Venezuela.
- Lentz, R. D., R. H. Dowdy y R. H. Rust (1993) *Soil property patterns and topographic parameters associated with ephemeral gully erosion*. J. Soil Water Conserv., 48: 355-361.
- Moore, I. D., G. J. Burch y D. H. Mackenzie (1988) *Topographic Effects on the Distribution of Surface Soil Water and the location of Ephemeral Gullies*. Trans. ASAE. 31:1098-1107.
- Poesen, J. (1993) *Gully typology and gully control measures in the European loess belt*. En Farm Land Erosión in Températe Plains Environment and Hills. S. Wicherek (ed.). Elsevier, Amsterdam. pp 221-239.
- Poesen, J. y G. Govers (1990) *Gully Erosión in the Loam Belt of Belgium: Typology and Control Measures*. En Soil Erosión on Agricultural Land. J. Boardman, I. D. L. Foster y J. A. Dearing (eds.). John Wiley & Sons, Londres, pp 513-530.
- Poesen, J., K. Vandaele y B. Van Wesemael (1996) *Contribution of gully erosion to sediment production on cultivated lands and rangelands*. En Erosión and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives. D. E. Walling y B. W. Webb (eds.). IAHS Publ. n° 236. pp 251 -266.
- Sancho, C., G. Benito y M. Gutiérrez (1991) Agujas de erosión y perfiladores microtopográficos. Cuadernos Técnicos de la Sociedad Española de Geomorfología. n° 2. Geoforma Ediciones. Logroño.
- Smith, L. M. (1993) *Investigation of ephemeral gullies in loessial soils in Mississippi*. U. S. Army Corps of Engineers. Technical Report GL-93-11, Wicksburg.
- Spomer, R. G. y A. T. Hjelmfelt (1986) *Concentrated flow erosion on conventional and conservation tilled watersheds*. Trans ASAE. 29:124-127.
- Thomas, A. W., R. Welch y T. R. Jordán (1986) *Quantifying concentrated-flow erosion on cropland with aerial photogrammetry*. J. Soil and Water Conserv. 41 (4):249-252
- USDA-NRCS (1997) *America's private land. a geography of hope*. USDA-NRCS. Washington, D.C.
- USDA-SCS (1973) *Advisory notice. Soils-6*. Washington, DC.
- Vandaele, K. (1993) *Assesment offactors affecting ephemeral gully erosion in cultivated catchments of the Belgian Loam Belt*. en Farm Land Erosión in Températe Plains Environment and Hills. S. Wi-

- cherek (ed.). Elsevier, Amsterdam, pp 125-136.
- Vandaele, K., J. Poesen, J. R. Marques da Silva y P. Desmet (1996) *Rates and predictability of ephemeral gully erosion in two contrasting environments*. Geomorphologie: Relief. processus. environment. 2:83-96.
- Whischmeier, W. H. y D. D. Smith (1978) *Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning*. Agr. Handbk. 537. U. S. Dept. Agr., Washington D. C.