

EVOLUCIÓN DE UN SISTEMA DE CÁRCAVAS ACTIVAS EN EL SURESTE ESPAÑOL

Elena de Luna Armenteros¹, Ana M^a Laguna Luna², Poesen Jean³ y Juan Vicente Giráldez Cervera⁴

Resumen:

Se han medido los cambios temporales producidos en la cabecera y en el área de cinco sistemas de cárcavas en la zona de Guadix usando series de fotografías aéreas de 1956 y 1994. Para estimar el avance y la expansión de las mismas se han utilizado Sistemas de Información Geográfica (SIG) (ER-Mapper, ARC/INFO y ARC/View). Algunas de las cárcavas estudiadas no han tenido avance por cabecera en estos 38 años y las que han modificado su longitud lo han hecho entre 0.21 y 1.71 m/año.

En estos ambientes mediterráneos los procesos naturales asociados a fluctuaciones climáticas son probablemente causas insuficientes para iniciar una cárcava pero sí pueden contribuir a su expansión.

Palabras clave: Erosión, cárcavas, sistemas de información geográfica, fotos aéreas.

INTRODUCCIÓN

La erosión es un proceso natural que ocurre con diferentes intensidades en todos los ambientes. Los cambios climáticos, la actividad geológica e incluso la influencia humana pueden acelerar o retardar el proceso. Entre otras características de la erosión, la formación y desarrollo de cárcavas son procesos importantes en la modificación del paisaje que también afectan a la actividad humana. Así, en zonas donde hay cárcavas activas, frecuentemente es necesario reparar líneas eléctricas y construcciones agrícolas. Al mismo tiempo, las cantidades de suelo perdidas en cárcavas, a pesar de que pueden llegar a ser muy importantes, no se tienen en cuenta en métodos de estimación de pérdida de suelo como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, utilizados frecuentemente, con lo que se subestima la cantidad real de suelo perdido (Thomas y Welch, 1988).

Poesen (1993) define una cárcava como aquel canal resultante de la erosión causada por un flujo intermitente de agua durante o inmediatamente después de fuertes lluvias. Estos canales son lo suficientemente profundos como para no poder ser tapados por el agricultor e interfieren a menudo en las operaciones de labranza. En el caso en que puedan rellenarse aparecen intermitentemente, siendo entonces conocidas como cárcavas efímeras (Casalí y col., 1999). Las cárcavas permanentes aparecen generalmente en redes de desagüe claramente definidas, pueden erosionar todo el perfil del suelo, alcanzar la roca e incluso adentrarse en ella (Foster, 1986, citado por Thomas y Welch, 1988). El crecimiento de la cárcava se produce al circular agua por ella, lo que provoca la eliminación de materiales en su base originando una profundización del lecho.

¹ Dpto. Suelos y Riegos. Centro de Investigación y Formación Agraria. Alameda del Obispo s/n. Apdo. 3092. 14080 Córdoba. España. Tfno.: 957 016011. e-mail: elena.luna.ext@juntadeandalucia.es

² Dpto. de Física Aplicada. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y Montes. Universidad de Córdoba. Avda. Menéndez Pidal s/n. Córdoba. España. Tfno.: 957 21 85 54. e-mail: falalua@uco.es

³ Fund for Scientific Research, Flanders, Belgium. Laboratory for Experimental Geomorphology, K.U. Leuven, Redingestraat 16, B-3000 Leuven, Bélgica. Tfno.: +3216326425. e-mail: jean.poesen@geo.kuleuven.ac.be

⁴ Dpto. de Agronomía. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y Montes. Universidad de Córdoba. Avda. Menéndez Pidal s/n. Córdoba. España. Tfno.: 957 21 85 14. e-mail: aglgicej@uco.es

Artículo recibido el 5 de marzo de 2003, recibido en forma revisada el 11 de junio de 2003 y aceptado para su publicación el 25 de junio de 2003. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

En algún momento de su desarrollo se alcanza una altura crítica a partir de la cual las paredes se hacen inestables y se colapsan (Casalí, 1997) produciéndose también un ensanchamiento de la misma. Oostwoud y col. (1999), en un estudio donde hacen una tipología de cárcavas en el SE español, sugieren que las cárcavas con una cabecera profunda o abrupta fueron formadas desde cabeceras secundarias que fueron desplazándose hacia arriba por la propia erosión. Kirkby y Bull (2000), en un trabajo realizado en la cuenca del Guadalentín, indican que en zonas de esquistos el material grueso limita la capacidad de transporte, produciéndose una transición suave en la cabecera de la cárcava, mientras que si se trata de margas el proceso está limitado por el arranque, la capacidad de transporte es mayor y las cabeceras son más abruptas.

Para analizar la evolución geológica e histórica de las cárcavas Piest y col. (1975) recomiendan el estudio de los cambios en el régimen de escorrentía. Según estos autores el trazado de las cárcavas de gran tamaño se fija bien por cambios climáticos o bien por el régimen hidráulico del pasado.

En la zona de Guadix, en las proximidades de Sierra Nevada, hay una importante zona de cárcavas que según Wise y col. (1982) se formaron 2000 años a. C. Estos autores afirman que no solo los cambios climáticos o la actividad humana son los responsables de la erosión producida, sino más bien, un largo periodo de inestabilidad denudacional.

Según Martín-Penela (1994) el desarrollo de las cárcavas depende fundamentalmente de la estructura y propiedades físicas del suelo. Su inicio y más tarde su evolución puede ser debida sólo al proceso de erosión en superficie o puede estar estrechamente unida a la acción simultánea de los túneles de erosión. La influencia de los canales de erosión en el origen y desarrollo de cárcavas ha sido reconocida en diferentes climas, pero parece que este fenómeno es más significativo en regiones áridas y semiáridas como es la zona de estudio.

Las cárcavas estudiadas en este trabajo están en zonas de montaña (Guadix, Granada). Probablemente se originaron hace cientos de años y la mayoría permanecen activas hoy día; por ejemplo Arroyo Belerda tiene varios kilómetros de longitud. Pudieron tener su inicio bien con el proceso de deforestación que hubo en la zona,

bien como consecuencia de la actividad tectónica o, como se hace referencia anteriormente, a un largo periodo histórico de denudación causando continuas incisiones a lo largo de las líneas de drenaje.

Los objetivos de este trabajo son:

1. Elaborar una metodología usando Sistemas de Información Geográfica (SIG) para estimar el avance por cabecera de cárcavas activas.
2. Determinar el avance en cabecera y modificación del área de las cárcavas estudiadas en esta zona, estimando la pérdida de suelo generada.
3. Relacionar los cambios producidos en las cárcavas con factores medioambientales como la litología del terreno y el uso del suelo.

MATERIAL Y MÉTODOS

Descripción de la zona de estudio

El área de estudio elegida, de 685 km², comprende Guadix (Granada) y sus alrededores (Figura 1). Se trata de una altiplanicie próxima a los 1000 metros de altura con clima continental, incluso extremado, con tendencia a desértico. El paisaje viene marcado por el clima, y en particular por la sequedad. Sierra Nevada produce un efecto de sombra de lluvia ocultando la zona al efecto de los vientos del oeste que traen las nubes de lluvia a la mayor parte de la mitad sur de la península ibérica. La precipitación media anual oscila entre 300 y 450 mm/año (Tabla1). Estos valores se han calculado como media ponderada de las estaciones más cercanas que rodean la cárcava e interpolando con kriging teniendo en cuenta la altitud. En las estribaciones de Sierra Nevada (Figura 1) llegan a alcanzar los 1000 y 1200 mm/año siendo irregulares y con una anárquica distribución estacional. También hay tormentas de verano de carácter convectivo con un alto índice de erosividad. Todo ello conlleva al desarrollo, en algunos casos desmesurado, de los fenómenos de erosión hídrica y a la continua degradación del suelo. Las temperaturas medias mensuales oscilan entre 6.3 °C en diciembre y 25.8 °C en julio con una media anual de 14.7 °C, pudiéndose alcanzar los 40 °C en la época estival.

La vegetación espontánea de toda la comarca queda reducida y relegada a zonas montañosas y en general a aquellas tierras en las que las condiciones edáficas e hídricas del suelo no permiten un cultivo rentable.

Las zonas cultivadas representan entre un 65 y 70% de la superficie de la comarca ocupando el primer lugar por extensión los cultivos de regadío (huerta, frutales y plantas forrajeras). El resto y en menor cantidad almendros, olivos, cerezos y asociación de almendros y olivos. Hay que destacar la existencia de amplias zonas de repoblación forestal con pinos, principalmente *Pinus halepensis*, *Pinus nigra* y en menor cantidad *Pinus pinaster*, (ICONA, 1988). En la Tabla 1 se indican los aprovechamientos del terreno en las zonas cercanas a las cabeceras de cada cárcava en los años 1956 y 1994. Estos datos se obtuvieron del trabajo de campo y se contrastaron con las fotografías aéreas y con las entrevistas realizadas a los agricultores.

El relieve está vinculado tan estrechamente con la geología que sus grandes unidades litoestratigráficas se corresponden con tres conjuntos topográficos distintos (Figura 2, ICONA (1988)). Al NE y N la Sierra de Baza formada por calizas, dolomías, esquistos y filitas. Al sur está ocupado por las estribaciones septentrionales de Sierra Nevada constituida fundamentalmente por esquistos junto con algunas calizas y dolomías. La parte central de materiales terciarios y cuaternarios ocupan la mayor parte de la superficie y presenta una topografía suave, festoneada por arroyos, siendo su característica principal la presencia de formaciones tabulares recubiertas en gran parte por glaciares de erosión.

Localización de las cárcavas activas.

Siguiendo a Piest y col. (1975) entendemos que una cárcava está activa cuando presenta una exagerada pendiente, paredes escarpadas, normalmente varios metros de profundidad y ausencia de vegetación. Oostwoud y col. (2000) siguen un criterio de clasificación de cárcavas activas muy similar. Estos autores consideran que una cárcava está activa cuando tiene bordes afilados o angulosos, grietas cercanas a los bordes, depresión en cabecera, sedimentos depositados recientemente y túneles de erosión.

En la zona coexisten grandes sistemas de cárcavas dentro de sistemas litológicos diferentes, con distintos tipos de vegetación, usos del suelo y pendientes, en definitiva diversos ambientes.

Con el trabajo de campo realizado y apoyándonos en mapas topográficos (escala 1:25000) y fotografías aéreas (escala 1:33000 para el año 1956 y escala 1:20000 para 1994) se seleccionaron cinco sistemas de cárcavas activas atendiendo a tipos de suelo, morfología de la cárcava, y tamaño de la misma. Para visualizarlas en las fotografías aéreas era indispensable que fueran de gran tamaño.

Los cinco sistemas de cárcavas seleccionados son: Arroyo Belerda, Barranco Largo, Rambla Santiago, Rambla Fiñana y Rambla Verde-Acequia del Pintado. Su localización se indica en las Figuras 2 y 3. En la Figura 4 puede verse una panorámica de la cabecera de Arroyo Belerda, Ba2 donde puede observarse el arranque de una de las nuevas ramas laterales, Ba3. En la Figura 5 observamos el aspecto de la cabecera de Rambla Santiago, Sa, con material desplomado en el lecho de la cárcava. En cada sistema se analizaron entre tres y seis ramas, excepto en Barranco Largo donde sólo se estudió la cabecera



Figura 1. Localización de la zona de estudio.

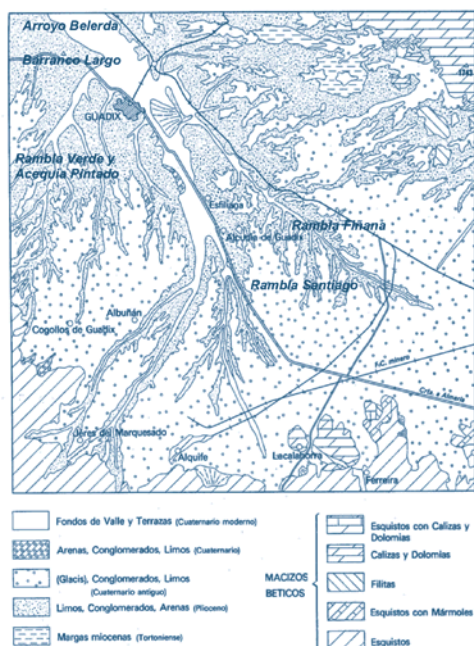


Figura 2. Litología del área de estudio que se corresponde con la zona del marco de la Figura 1. ICONA (1988).

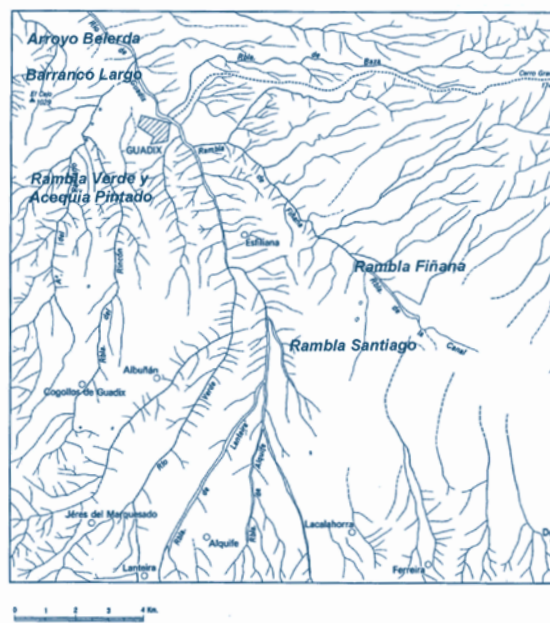


Figura 3. Red fluvial de la zona de Guadix y localización de las cárcavas seleccionadas. ICONA (1988).

Determinación de las dimensiones de las cárcavas y pérdida de suelo.

El trabajo está enfocado fundamentalmente a analizar la evolución de las cárcavas activas de la zona de estudio desde 1956 hasta 1994 midiendo su avance en cabecera, la expansión de su área y estimando el incremento de volumen de suelo excavado en el canal durante este periodo de tiempo. Asimismo se han visualizado y localizado el nacimiento de nuevas ramas en Arroyo Belerda.

El avance de cabecera de las cárcavas se midió comparando las fotografías aéreas de los años 1956 y 1994 (escala 1:20000). Para las dos fotografías hubo que hacer un procesado de las imágenes que se resume en lo siguiente:

Se escanearon las fotografías aéreas en un scanner AGFA Horizon.

Se obtuvieron las coordenadas reales geo-referenciando la foto tomando puntos de control como cortijos, cruces de caminos, canales de riego, etc, es decir, puntos fijos que pudieran ser identificados fácilmente en las fotografías de los dos años tratados. Para ello se manejó ER-Mapper (1995)

Se dibujó el contorno de las cárcavas tanto para el año 1956 como para el 1994 utilizando ARC/INFO.

Con ARC/View se realizó la superposición de mapas y se pudo visualizar y medir el avance por cabecera de las cárcavas.

Las medidas de longitud y anchura tanto de la cárcava como desde la cabecera hasta ramas laterales fueron también determinadas con Arc/view una vez obtenido el contorno de las cárcavas. La precisión de estas medidas depende de lo nítido que aparezcan, en la foto, los bordes de la cárcava. El error en la determinación de anchura se estimó en ± 1.5 m como máximo, mientras que en la longitud puede cometerse un error mayor, hasta ± 3 m, debido a la dificultad en algunos casos, de determinar el punto exacto del comienzo de la cárcava. Estas medidas fueron contrastadas con las tomadas en campo no encontrándose diferencias significativas.

Para la determinación del incremento de volumen de suelo excavado en cabecera, se han realizado medidas en campo de secciones transversales, donde la accesibilidad de la cárcava lo permitía, y medidas de anchura, longitud y profundidad en los demás casos.

El área de la cuenca que alimenta cada cárcava por cabecera se ha delimitado trazando las líneas divisorias en los mapas topográficos 1:10000. En el mismo mapa se han medido las pendientes medias de dichas cuencas.



Figura 4. Panorámica de la cabecera de Arroyo Belerda Ba2 y de una de sus nuevas ramas laterales, Ba3



Figura 5. Cabecera de Rambla Santiago, Sa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las características morfométricas de las cárcavas objeto de este estudio se dan en la Tabla 1. Como se ha mencionado, las profundidades fueron medidas en campo aunque en las ramas de Arroyo Belerda denominadas Bc y Bd no fue posible el acceso y por lo tanto no se dispone de este dato.

Las pendientes de las cuencas de drenaje son en general suaves, excepto las nuevas ramas del sistema Arroyo Belerda.

Una vez realizada la composición de mapas con Arc/view (ver Figuras 6 a 10), se midió el avance de crecimiento por cabecera para cada cárcava en los 38 años que separan las dos fotografías. En el periodo de tiempo transcurrido la morfología de las cárcavas se ha transformado debido a movimientos laterales de las paredes, excavación en cabecera, relleno natural o artificial por parte de los agricultores e incluso al cegado de la misma en cabecera. Esto ha producido en algunos casos estabilización de la cárcava y en otros ensanchamientos laterales o nacimientos de nuevas ramas.

Tabla 1. Características morfométricas de las cárcavas en la actualidad.

Sistema	Rama	A / P en zona de avance, m	Cuenca de drenaje en cabecera.		Precipitación mm/año	Litología	Aprovechamiento del terreno	
			Área ha	Pendiente %			1956	1994
Arroyo Belerda	*Ba1	11/7.4	6	20	410	Margas	Cereal	Cereal
	Ba2	18/7.5	1518	2.5			Cereal	Cereal
	*Ba3	5/4	7	11			Cereal	Olivar
	Bb	(1)	57	3			Cereal	Cereal
	Bc	6.4/-	103	3			Cereal	Almendros
	Bd	5.3/-	72	3.5			Cereal	Almendro y Cereal
Barranco Largo	La	5/3	2	4.5	424	Margas	Cereal	Cereal
Rambla Santiago	Sa	20/12	88	1	339	Conglomerados	Matorral	Matorral
	Sb	(1)	4	1			Matorral	Matorral
	Sc	(1)	8	1			Matorral	Matorral
Rambla Fiñana	Fa	2.8/4	34	1	354	Conglomerados	Matorral	Almendros
	Fb	2.8/2	26	1			Matorral	Matorral
	Fc	4.5/6.5	5	1			Matorral	Matorral
Rambla Verde Acequia Pintado	Va	19.5/1	63	3.5	339	Conglomerados	Cereal	Cereal
	Vb	4.4/1.2	39	3			Matorral	Matorral
	Pc	(1)	3	1			Cereal	Cereal
	Pd	(1)	4	1			Cereal	Cereal
	Pe	(1)	5	1			Cereal	Cereal

*.Estas ramas no existían en 1956.

(1). La cárcava no ha tenido avance en cabecera.

(-).Datos no disponibles.

A/P Ancho /profundidad en la zona de avance.

Se ha determinado también el incremento de área producido por las cárcavas en este periodo de tiempo. Este incremento tiene en cuenta tanto el movimiento lateral de tierra como el avance por cabecera. En la Tabla 2 se recogen estos resultados junto con el volumen anual de suelo desplazado correspondiente al canal excavado.

Las cárcavas del sistema Arroyo Belerda (Figura 6) muestran el mayor ritmo de crecimiento de entre los sistemas estudiados (los valores van de 0.86 m/año a 1.71 m/año). Incluso se ha producido el nacimiento de dos nuevas ramas laterales, las denominadas Ba1 y Ba3. La rama Ba1 está afectada por la desembocadura de una acequia que en los últimos años ha sido canalizada (Figura 4). Ostwoud y col. (2000) opinan que cuando una cárcava tiene grietas en la parte del canal va a crecer más a lo ancho que por la cabecera. Sin embargo, cuando hay una gran concentración de flujo el avance debido a las grietas es relativamente lento comparado con el avance que se produce en cabecera. Esto ocurre claramente en la cárcava Arroyo Belerda Ba1 que a pesar de tener grietas, ha tenido un avance más acelerado en cabecera.

En esta zona sólo se ha conseguido detener el avance de Bb donde el agricultor ha conseguido estabilizarla poniendo piedras en la cabecera de la misma.

El volumen de suelo perdido en cabecera no ha sido posible determinarlo en Bc y Bd debido a que no se dispone de medidas de profundidad tomadas en campo. A pesar del crecimiento evidente que ha tenido la cárcava Bd por cabecera, ésta no ha aumentado su área sino que la ha disminuido debido al movimiento de tierras producido en la construcción del camino cercano a sus bordes. El agricultor ha labrado la zona consiguiendo disminuir la sección de la cárcava en algunos puntos.

Barranco Largo, como se ve en la Figura 7, ha sido rellenada en estos años, en una de sus ramas, por las tareas de laboreo realizadas por el agricultor. Esto da lugar, a pesar del avance por cabecera, a un incremento de área negativo, (Tabla 2).

Atendiendo a la composición de mapas de Rambla Santiago (Figura 8) podemos observar que se ha producido el avance por cabecera en una sola de las cárcavas presentes en la zona, la denominada Sa. Coincide con este hecho que en su cabecera se produce el desagüe de un canal de riego que explica su rápido crecimiento, como ocurría en Belerda Ba1. Esto corrobora lo expuesto por Piest y col. (1975) quienes encontraron que todas las cárcavas que tenían avance por cabecera se correspondían con un sistema de canales cercano a ellas. Estos flujos de agua que llegan tanto a Arroyo Belerda como a Rambla Santiago no sólo

Tabla 2. Avance (ΔL), volumen de suelo excavado en cabecera (V) e incremento de área (ΔS) medios anuales entre 1956 y 1994.

Sistema	Rama	(ΔL), m/año	(V)m ³ /año	(ΔS)m ³ /año
Arroyo Belerda	*Ba1	1.53	175	13.42
	Ba2	0.87	125	6.31
	*Ba3	0.86	20	4.86
	Bb	0	0	11.10
	Bc	1.46	-	15.65
	Bd	1.71	-	-10.42
Barranco Largo	La	0.21	3	-6.74
Rambla Santiago	Sa	0.84	210	53.36
	Sb	0	0	11.15
	Sc	0	0	1.05
Rambla Fiñana	Fa	0.84	9	6.39
	Fb	0.32	2	2.81
	Fc	0.53	15	31.7
Rambla Verde	Va	0.63	12	22.63
	Vb	0.54	3	4.63
Arroyo Pintado	Pc	0	0	16.13
	Pd	0	0	10.52
	Pe	0	0	13.52
Media		0.57	36	14.89

*.Estas ramas no existían en 1956.

(-) Datos no disponibles.

son capaces de producir un gran crecimiento sino que tienen la fuerza suficiente para producir en ellas el desplazamiento de los sedimentos. Sin embargo, cuando las cárcavas compiten con otras por el drenaje de la cuenca tienen un crecimiento más lento en el tiempo (Faulkner, 1995). Esto lo podemos observar en el resto de las cárcavas estudiadas dentro de un mismo sistema, véase Rambla Fiñana y Arroyo Verde, (Figuras 9 y 10).



Figura 6. Fotografía aérea de 1994 superpuesta con la topología de las cárcavas del sistema Arroyo Belerda en 1956 y 1994

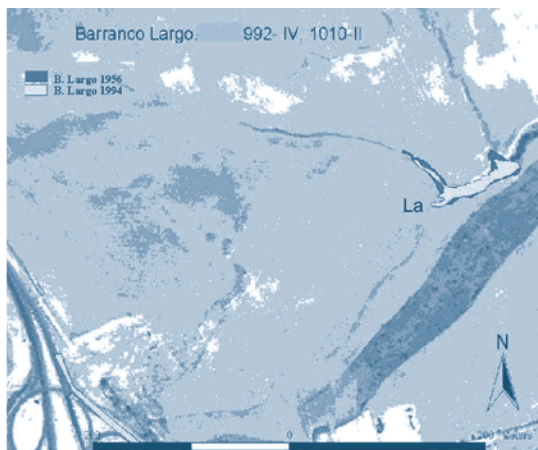


Figura 7. Fotografía aérea de 1994 superpuesta con la topología de la cárcava Barranco Largo en 1956 y en 1994.

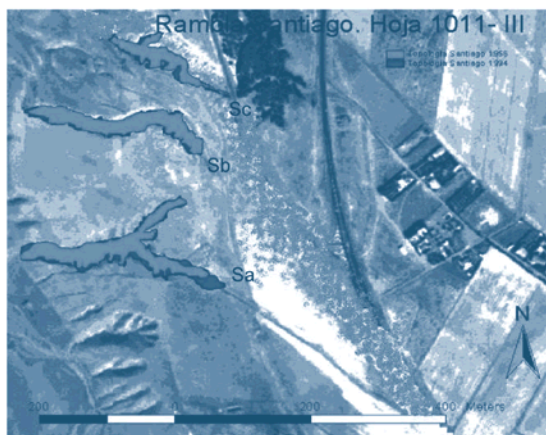


Figura 8. Fotografía aérea de 1994 superpuesta con la topología de la cárcava de Rambla Santiago en 1956 y 1994

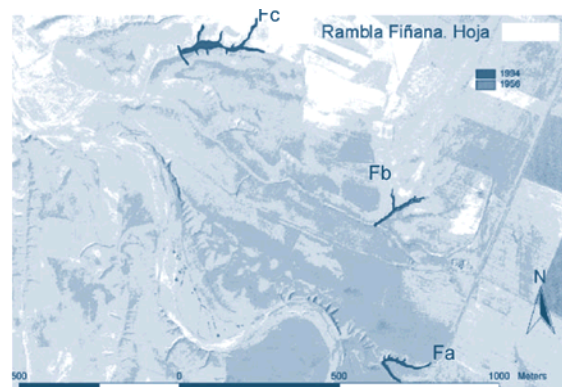


Figura 9. Fotografía aérea de 1994 superpuesta con la topología de las cárcavas del sistema Rambla Fiñana en 1956 y 1994.

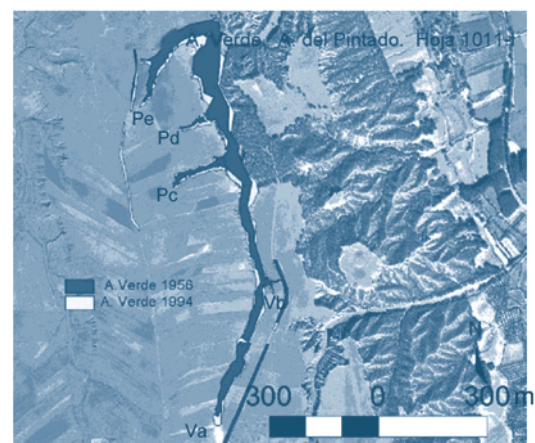


Figura 10. Fotografía aérea de 1994 superpuesta con la topología de las cárcavas de Rambla Verde y Acequia Pintado en 1956 y 1994.

En aquellas cárcavas que no se ha producido crecimiento se ha debido o bien a que el agricultor de la zona se ha encargado de mantenerlas y estabilizarlas con grandes piedras en cabecera o bien como demuestran Radoane y col. (1995) estas cárcavas crecen como proceso natural de erosión, pero cuando alcanzan una longitud de equilibrio su actividad se reduce o incluso cesa.

Las pérdidas de suelo en cabecera reflejadas en la Tabla 2 llegan hasta 210 m³/año. Los valores máximos se corresponden con cárcavas a las que desaguan canales de riego.

Estudios de erosión en cárcavas realizados en distintos puntos de España nos ofrecen datos de pérdida de suelo. Poesen y col. (1996) realizaron un estudio en Cabo de Gata y ofrecen valores de pérdida de suelo por concentración de escorrentía en cárcavas efímeras. Casalí (1997) realizó un estudio sobre cárcavas efímeras en el norte de España. Oostwoud y col. (2000) por su parte obtuvieron valores de pérdida de suelo en 46 cárcavas estudiadas en Rambla Salada, en el SE de España.

El estudio de Poesen y col. (1996) es un trabajo comparativo entre Bélgica, España y Portugal donde se obtuvieron tasas de erosión de 3.6 m³/ha/año, 9.7 m³/ha/año y 3.2 m³/ha/año respectivamente. Para España esto supone un 83 % de las pérdidas totales en la zona de estudio. Casalí, (1997) encontró pérdidas máximas de suelo entre 1.5 y 2.7 kg/m²/año. Oostwoud y col. (2000) obtuvieron una media anual de suelo excavado en las 46 cárcavas activas al este de la región de Murcia de 4 m³/año. Según estos autores esto supone el 6% de los sedimentos que alcanzaron aguas abajo el embalse de Puentes. Estos datos nos dan una idea de la magnitud del problema de erosión en nuestro país.

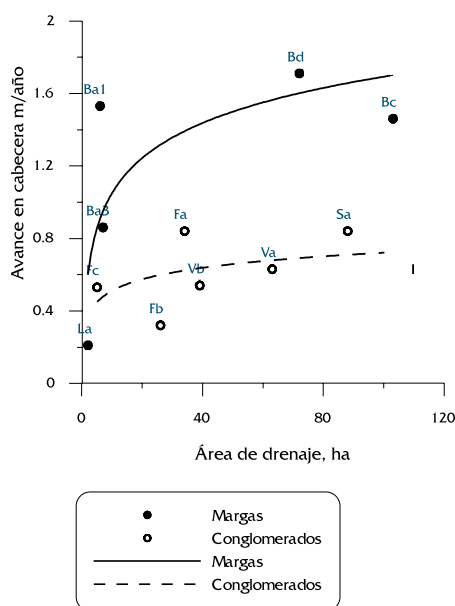


Figura 11. Avance por cabecera frente al área de drenaje y ajustes logarítmicos de los datos.

En la Figura 11 se representa el avance de las cárcavas frente al área de drenaje en cabecera. Observamos que en las zonas donde se ha mantenido el matorral las cárcavas han tenido un menor crecimiento que las que tienen algún aprovechamiento agrícola. En general las cárcavas cercanas a Sierra Nevada con una litología de conglomerados tienen menor crecimiento lineal, a igual área, que las situada más al Norte sobre margas.

El área de drenaje de Fiñana a y c (Fa y Fc en Figura 11) ha presentado incertidumbre en su determinación, debido a que aguas arriba de estas cárcavas existe un camino y una línea de ferrocarril respectivamente. Las cuencas aportadoras consideradas en ambos casos están limitadas por esas vías, sin considerar el posible aporte de agua desde las mismas, por lo que el área de drenaje puede ser mayor que los que aparecen en la Tabla 1 y se representan en la Figura 11.

En la Figura 11 se representa el volumen de suelo perdido en cabecera frente al área de drenaje. Los valores máximos obtenidos son para las cárcavas a las que, como se comenta anteriormente, desaguan canales de riego (Ba1 y Sa). De nuevo se observa que a igual área tienen mayor tasa de pérdida de suelo las que están sobre margas. Oostwoud y col. (2000) indica que la actividad de las cárcavas está fuertemente ligada a la litología. Así, la mayor tasa de erosión o la más alta actividad se encuentra en cárcavas localizadas en depósitos de margas. La menor actividad en cabecera está asociada a la presencia de yeso en las margas, debido a que el calcio forma agregados más estables al agua.

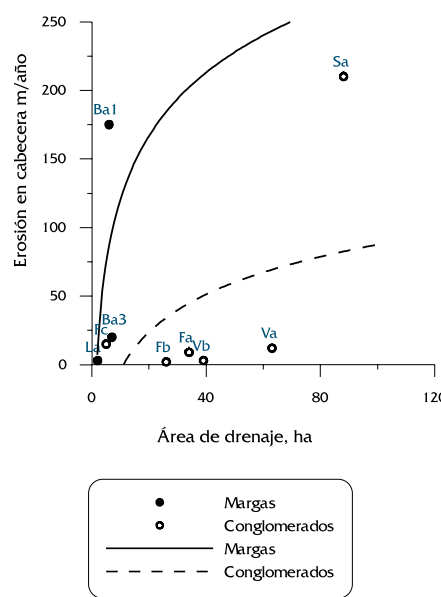


Figura 12. Volumen de suelo perdido en cabecera frente al área de drenaje y ajustes logarítmicos de los datos.

CONCLUSIONES

El procedimiento aquí seguido, usando fotografías aéreas de la zona de distintas fechas y SIG para el procesamiento de dichas fotos, ha demostrado ser un método que permite medir con suficiente precisión el avance lineal por cabecera de las cárcavas en esta zona del sur de España.

Las mayores tasas de pérdida de suelo en cabecera encontradas en esta zona han sido de 210 m³/año en Rambla Santiago (Sa) y de 175 m³/año en Arroyo Belerda (Ba1). Estas dos están afectadas por el desagüe de canales de riego.

Los valores máximos encontrados para el avance de las cárcavas por cabecera corresponden a los suelos sobre margas como es el caso de Arroyo Belerda con valores entre 0.86 y 1.71 m/año.

En este trabajo queda también de manifiesto que en las zonas abandonadas el avance de las cárcavas y las pérdidas de suelo son menores que en las zonas que están cultivadas y que las medidas de control realizadas por el agricultor han sido efectivas como las observadas en la cárcava Arroyo Belerda.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias que con la concesión de una beca postdoctoral hizo posible la realización del trabajo de campo. A José Luis Tirado, Esther de Luna y Amparo Zayas así como al personal del Servicio de Información del Territorio de la Universidad de Córdoba por su valiosa colaboración.

LISTA DE SÍMBOLOS

- A/P** Relación ancho/profundidad en la zona de avance, m/m.
- ΔL** Avance de la cabecera de la cárcava en el periodo estudiado, m/año
- V** Volumen de suelo excavado en cabecera de la cárcava m³/año
- ΔS** Incremento de área ocupada por la cárcava m²/año

Símbolos utilizados en la nomenclatura de las cárcavas.

- Ba1** Arroyo Belerda; Rama a, cabecera 1
- Ba2** Arroyo Belerda; Rama a, cabecera 2
- Ba3** Arroyo Belerda; Rama a, cabecera 3
- Bb** Arroyo Belerda; Rama b
- Bc** Arroyo Belerda; Rama c
- Bd** Arroyo Belerda; Rama d

- La** Barranco Largo
- Sa** Rambla Santiago, cabecera a
- Sb** Rambla Santiago, cabecera b
- Sc** Rambla Santiago, cabecera c

- Fa** Rambla Fiñana, cabecera a
- Fb** Rambla Fiñana, cabecera b
- Fc** Rambla Fiñana, cabecera c

- Va** Rambla Verde, cabecera a
- Vb** Rambla Verde, cabecera b

- Pc** Arroyo Pintado cabecera c
- Pd** Arroyo Pintado cabecera d
- Pe** Arroyo Pintado cabecera e

REFERENCIAS

Casalí, J., (1997). Caracterización y control de la erosión por cárcavas. Tesis doctoral. Departamento de proyectos e ingeniería rural. E.T.S.I.A.Universidad Pública de Navarra.

ER- Mapper.5.5. Earth Resources Mapping.Ltd (1995). Blenheim House.Crabtree -Office-Village. Eversley -Way, Egham. Surrey.

Casalí, J., López, J.J.y Giráldez, J.V. (1999). Erosión por cárcavas efímeras en el sur de Navarra. Ingeniería del agua. 6: 251-258.

Faulkner, H., (1995). Gully erosion associated with the expansion of terraced almond cultivation in the coastal Sierra de Lujar, S, Spain. *Land degradation*. 6:179- 200

ICONA, (1988). Proyecto Lucdeme, Mapa de suelos, Guadix. Universidad de Granada. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.

Kirkby, M.J. y L.J. Bull, (2000). Some factors controlling gully growth in fine-grained sediments: a model applied in southeast Spain. *Catena*, 40: 127-146.

Martín- Penela, A. J., (1994). Pipe and gully systems development in the Almanzora Basin (Southeast Spain). *Z.Geomorph N.F.* 38. :207-222

Oostwoud, D.J., J. Poesen, L. Vandekerckhove, Nachtergaele, J. y Baerdemaeker, J, (1999). Gully-head morphology and implications for gully development on abandoned fields in a semi-arid environment, Sierra de Gata. Southeast Spain. Earth surface processes and land forms. 24: 585-603

Oostwoud, D.J., J. Poesen, L. Vandekerckhove y M. Ghesquire, (2000). Spatial distribution of gully head activity and sediment supply along an ephemeral channel in a Mediterranean environment. *Catena*, 39: 147-146.

Piest, R. F., Bradford, J. M. y Wyatt. G., (1975). Soil erosion and sediment transport from gullies. *J. Hydr. Div.*, 101 : 65-80.

Poesen, J. (1993). Gully typology and gully control measure in the european loess belt, en S. Wicherek, ed., *Farm Land Erosion. In temperature plains environment and hills*. 222 - 239.

Poesen, J., Vandaele, K. y Wesemael, B. (1996). Contribution of gully erosion to sediment production on cultivated lands and rangelands. *En Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspective*. D. E. Walling y B. W. Webb (eds.). *IAHS Publ n° 236*. pp 251- 266. Wallingford.

Radoane, M., Ichim, Y., Radoane, N. (1995). Gully distribution and development in Moldavia, Romania. *Catena* 24: 127- 146.

Thomas, A. W., and Welch R., (1988). Measurement of ephemeral gully soil erosion. *Trans. A.S.A.E.* 31: 1723-1728.

Wise, S. M., J. B. Thornes y A.Gilman. (1982). How old are the badlans ? A case study from south-east Spain, en R. Bryan y A. Yair ed.,Badland. *Geomorphology and piping*. Geobooks, Norwich , Cap. 14.