

# VARIACIÓN GRANULOMÉTRICA Y MINERALÓGICA EN PROFUNDIDAD DE LOS SEDIMENTOS RETENIDOS POR DIQUES. ESTUDIO EN CAUCES TORRENCIALES SEMIÁRIDOS DEL SURESTE PENINSULAR\*

Carmelo Conesa García\*\*, Rafael Arana Castillo\*\*\* y  
Rafael García Lorenzo\*\*\*\*  
*Universidad de Murcia*

## RESUMEN

Los diques de retención de sedimentos constituyen hoy día una práctica habitualmente contemplada en los planes y programas de restauración hidrológico-forestal de sistemas fluviales torrenciales dentro del ámbito mediterráneo semiárido. Asociados a ellos se producen importantes cambios geomorfológicos, entre los que los texturales son especialmente relevantes. El presente artículo muestra la variación granulométrica y mineralógica en profundidad de las cuñas sedimentarias originadas aguas arriba de varios diques de retención. Los sondeos han sido realizados en cuñas de diques construidos en dos cursos de agua torrenciales del Sureste peninsular: rambla del Cárcavo (Cieza) y rambla de la Torrecilla (Lorca). Se trata de cuencas sometidas a proyectos de corrección hidrológico-forestal similares, pero con características ambientales diferentes, cuya influencia condiciona sensiblemente los efectos estructurales.

**Palabras clave:** Variación granulométrica vertical, análisis mineralógico, diques de retención, cuña sedimentaria, rambla, Sureste peninsular.

## ABSTRACT

The check dams constitute today a practice habitually contemplated in the projects and programs of hydrological - forest restoration of fluvial torrential systems in the Mediterranean semiarid area. Important geomorphological adjustments have taken place in relation to these structures, among which the textural changes are specially relevant. This paper shows the vertical granulometric and mineralogical variation of the sedimentary wedges originated upstream from several check dams. Perforations have been carried out in wedges of check dams constructed along two torrential streams in the peninsular South-east: Cárcavo *rambla* (Cieza) and Torrecilla *rambla* (Lorca). The catchments of both ephemeral channels were submitted to similar projects of hydrological - forest restoration, but have environmental different characteristics, which influence determines sensitively the structural effects.

**Key words:** Vertical granulometric variation, mineralogical analysis, check dams, sedimentary wedge, ephemeral channel, South-east Spain.

\* Fecha de recepción: 4 de septiembre de 2009.

Fecha de aceptación: 30 de octubre de 2009.

\*\* Departamento de Geografía, Universidad de Murcia. Campus de la Merced, s/n, 30001 Murcia.

\*\*\* Departamento de Química Agrícola y Edafología, Universidad de Murcia. Campus de Espinardo, Murcia.

\*\*\*\* Servicio de Información e Integración Ambiental. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. C/ Cate-drático Eugenio Ubeda, s/n. Murcia.

## 1. INTRODUCCIÓN

La dinámica sedimentaria inducida por los diques de retención aguas arriba de éstos es un tema poco estudiado en España. Existen varios trabajos pioneros que abordan esta cuestión (García Ruiz y Puigdefábregas, 1984; Martínez Castroviejo, 1990); pero incluso en ellos se alude más a cambios en la distribución de tamaños de las partículas del lecho que a variaciones texturales en profundidad. Dichos autores describen las variaciones granulométricas superficiales en función de la pendiente del cauce y la distancia al dique, desarrollando un modelo de sedimentación en los tramos de influencia de las estructuras. En el caso del Sureste peninsular se aprecia desde principios de los noventa una especial preocupación por este tipo de estudios, aunque todavía son insuficientes los resultados obtenidos. Desde que en 1992 Pulido Bosch analizara el efecto sobre el medio ambiente de los diques de retención en la vertiente sur de Sierra de Gádor (Almería), han aparecido diversos trabajos, publicados o presentados en congresos nacionales e internacionales, sobre las funciones de los diques transversales y su impacto ambiental dentro de este ámbito (Romero Díaz *et al.* 2003; Alonso Sarría, 2001; Martínez Lloris *et al.*, 2005; Castillo *et al.*, 2002, 2005; Conesa García, 2005; Conesa García y García Lorenzo, 2008, 2009; Conesa García *et al.*, 2004, 2007); pero tampoco en ellos se abordan los cambios texturales de los sedimentos de acuerdo con la profundidad de relleno, quizá por la aparente banalidad de este dato para los objetivos funcionales que aquéllos persiguen o por la propia dificultad inherente al tipo de muestreo granulométrico.

Los efectos geomorfológicos de la construcción de diques son muy desiguales en los tramos situados aguas arriba y abajo de las mismas. Es bien conocido que aguas arriba se produce una acumulación gradual en el lecho, debido a un incremento del nivel de base local (García Ruiz y Puigdefábregas, 1985). Como consecuencia, los diques se rellenan rápidamente de sedimentos, especialmente en medios semiáridos, donde la producción y liberación de sedimentos es extremadamente alta (Poesen y Hooke, 1997). La aparente uniformidad de las cuñas sedimentarias de los diques encierra aquí, no obstante, una cierta complejidad morfosedimentaria, puesta de manifiesto por sucesivos cambios verticales de litofacies. Dada la multitud de factores que intervienen (carácter irregular y discontinuo de la corriente, particularidades litológicas del lecho, nivel de relleno de los diques, modalidad de transporte dominante, variaciones locales de la pendiente, geometría del vaso del dique, naturaleza de los materiales de construcción y diseño de la estructura,...) el régimen hidromorfológico de estos cauces es muy inestable. Aunque predomina un ambiente sedimentario de decantación por estancamiento de las aguas de avenida, la carga de fondo tiene especial relevancia en la primera fase de relleno, y la transición de subambientes de canal e inundación resulta siempre muy brusca. Las observaciones de campo y análisis granulométricos realizados durante el período 2002–2005 en las cuencas de estudio demuestran que los diques instalados en ellas han tenido importantes, aunque desiguales, efectos sobre la distribución de tamaños y características morfológicas de los materiales de lecho. El relleno de los diques aguas arriba y el intenso lavado superficial iniciado inmediatamente aguas abajo constituyen los factores principales de tales cambios texturales. Así se desprende del detallado estudio granulométrico de las cuñas sedimentarias, realizado a continuación, y del grado de acorazamiento alcanzado aguas abajo. Unido al análisis granulométrico, el estudio mineralógico vertical de estas cuñas ha permitido además identificar posibles áreas fuente relacionadas con las fases de relleno de los diques y sugerir, para ambas cuencas en estudio, un mismo modelo sedimentario basado en dos unidades principales de deposición.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO

Las áreas elegidas para el presente estudio son dos cuencas vertientes sobre las que se ha actuado desde los años setenta con medidas estructurales similares, bajo proyectos de restauración hidrológico-forestales de directrices básicas también análogas: cuencas de las ramblas del Cárcavo (Cieza) y de la Torrecilla (Lorca) (figura 1). Dichas cuencas representan las condiciones ambientales de dos sistemas fluvio-torrenciales bastante característicos en el Sureste peninsular. Ambas tienen un régimen pluvial e hidrológico muy parecido, dominado por una clara tendencia a la aridificación (precipitación media anual inferior a 300 mm, evapotranspiración potencial anual superior a 840 mm, prolongados períodos de sequía como el de 2005 (más de 9 meses secos) que contrastan con lluvias torrenciales de más de 100 mm en unas pocas horas o incluso en varias decenas de minuto, concentradas en otoño y finales de verano, ... La nota diferenciadora viene impuesta por la presencia de litofacies y suelos bien distintos, pero representativos de dos grandes unidades geomorfológicas de la región: las depresiones neógeno-cuaternarias interiores (cuenca de la rambla del Cárcavo) y los relieves metamórficos del Bético Interno (cuenca de la rambla de la Torrecilla).

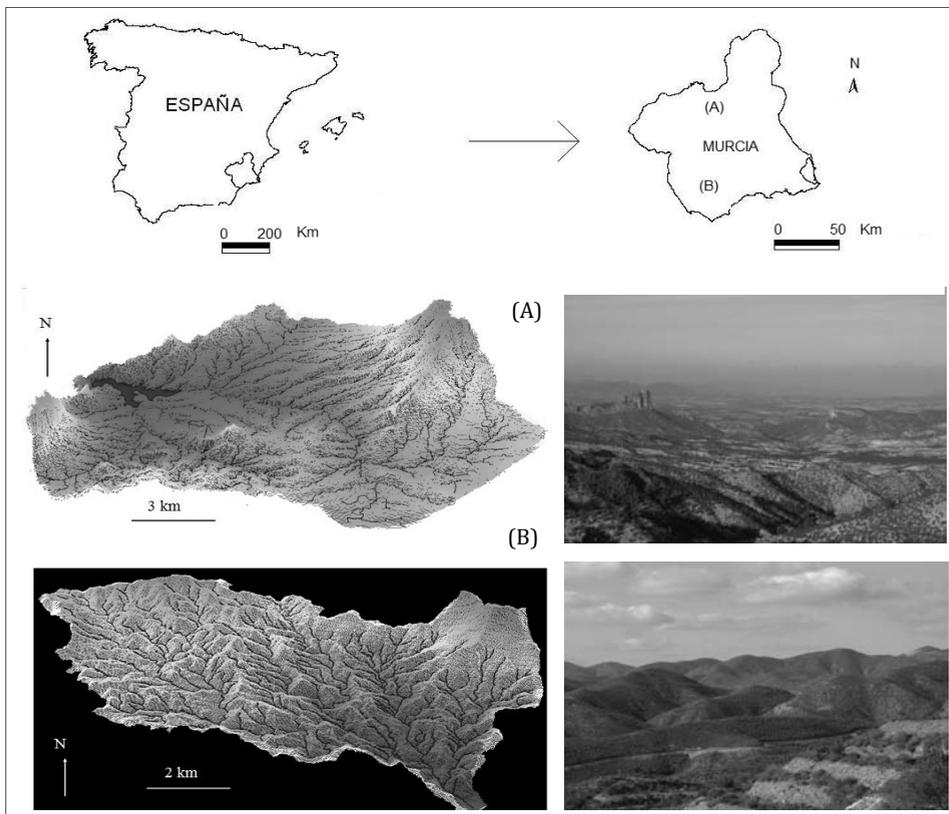


Figura 1. Panorámica general y modelo digital de elevación de las cuencas de las ramblas del Cárcavo (A) y de la Torrecilla (B).

La cuenca del Cárcavo (34,9 km<sup>2</sup>) es básicamente una depresión de margas rodeada por crestones calizos al norte, este y oeste, y afloramientos yesíferos locales en el sur. Los relieves del este y oeste alcanzan altitudes de 750-900 m, y son especialmente abruptos. La rambla del Cárcavo drena al embalse de su mismo nombre, desde donde conecta directamente con el río Segura, el principal sistema fluvial del Sureste peninsular. El resultado es un relieve profundamente disectado por la erosión lineal y la presencia de suelos poco desarrollados que reflejan especialmente las condiciones litológicas (litosoles cálcicos sobre las sierras calizas, Xerosoles cálcicos sobre los terrenos coluviales, Regosoles margálicos sobre las margas, y Xerosoles gípsicos sobre los materiales yesíferos del Keuper).

La cuenca de la rambla de la Torrecilla (15,5 km<sup>2</sup>) participa de las peculiares características geológicas del dominio bético *sensu estricto*: complejas estructuras desgastadas por la ablación y materiales metamórficos (pizarras, filitas, esquistos, cuarcitas), mezclados localmente con areniscas y conglomerados ricos en argilitas.

La densa red de drenaje instalada sobre estos terrenos ha originado un relieve apalanchense de interfluvios redondeados y cauces en general poco encajados. El alto grado de bifurcación de esta red, la erosionabilidad de los materiales esquisto pizarrosos y la elevada pendiente media de la cuenca (32 %) le confiere un fuerte potencial erosivo.

Para combatir la erosión de ambas áreas la Dirección General de Montes, Caza y Pesca del Ministerio de Agricultura aprobó en 1972 y revisó en 1976 un proyecto de restauración hidrológico-forestal, que incluía la repoblación de 2.579 ha (1.342 ha en el Cárcavo y 1.237 ha en la Torrecilla) con pino (*Pinus halepensis*) y la construcción de 73 diques de retención (40 diques en la cuenca del Cárcavo y 33 en la de Torrecilla).

### 3. METODOLOGÍA

El estudio de los sedimentos a diferentes profundidades, dentro de las cuñas, ha sido realizado a partir de las series verticales obtenidas por sondeos y las secuencias preservadas tras la rotura de diques. El total de muestras analizadas corresponden a la parte baja de la cuenca, en concreto a sectores de vertiente próximos al cauce (V), cuñas sedimentarias de los diques (C) y lechos de rambla (L) (figura 2 y 3).

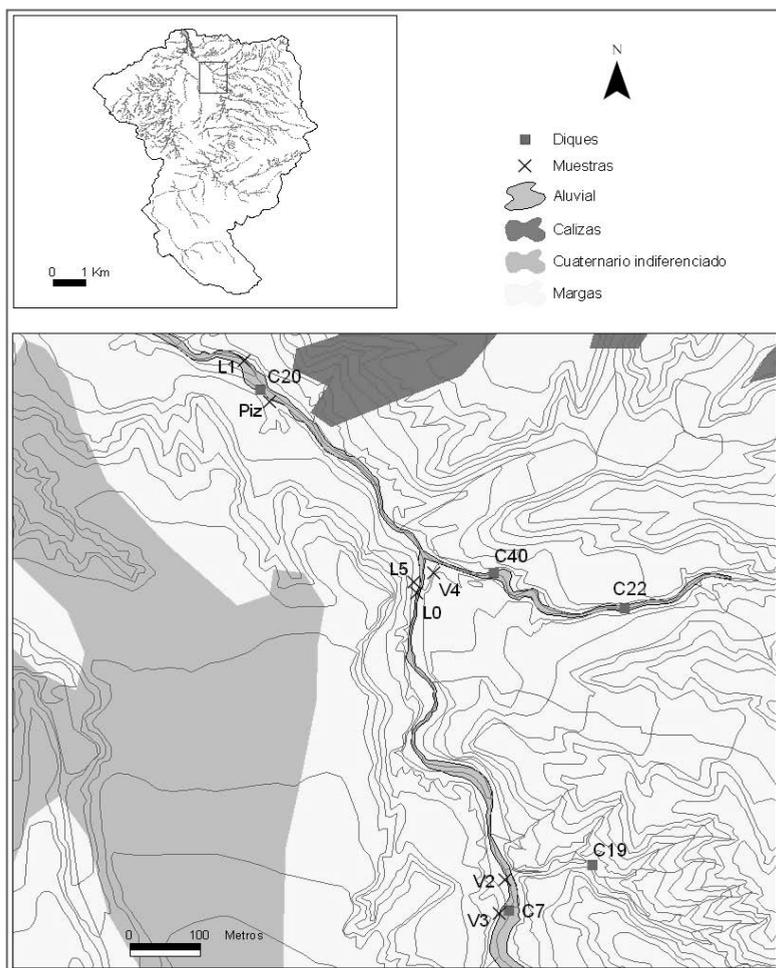


Figura 2. Localización de las muestras analizadas. Rambla del Cárcavo.

En el caso de la rambla del Cárcavo se cuenta con excelentes ejemplos de columnas estratigráficas representativas de las cuñas sedimentarias en su tramo bajo, como son las secuencias verticales conservadas en los márgenes del cauce tras la destrucción del dique C20 (figura 2). En concreto, una de ellas, la correspondiente a la formación  $P_{iz}$ , dominada por las facies  $F_l$  y  $F_m$  (según nomenclatura de Miall, 1995), ha sido objeto de un detallado análisis granulométrico y mineralógico.

Para el tramo bajo de la rambla de la Torrecilla se han efectuado, por medio de pequeñas perforaciones, tres muestreos en profundidad próximos a los diques T4 y T5: uno aguas arriba del dique T4 ( $P_{\cdot}$ ) y dos tras el dique T5 ( $P_{c1}$  y  $P_{c2}$ ) (figura 3). P se refiere a su proximidad al dique, c a su posición central dentro del cauce y el subíndice 1 ó 2 el número de sondeo en orden creciente aguas arriba; entre paréntesis figura la referencia del dique.

Los testigos se obtuvieron utilizando una perforadora Cobra Combi a la que se acoplaron tubos de muestreo de 5 cm de diámetro. La longitud de los testigos extraídos dependió de la dureza y compactación del material de lecho, alcanzándose una penetración máxima de 2,25 m.

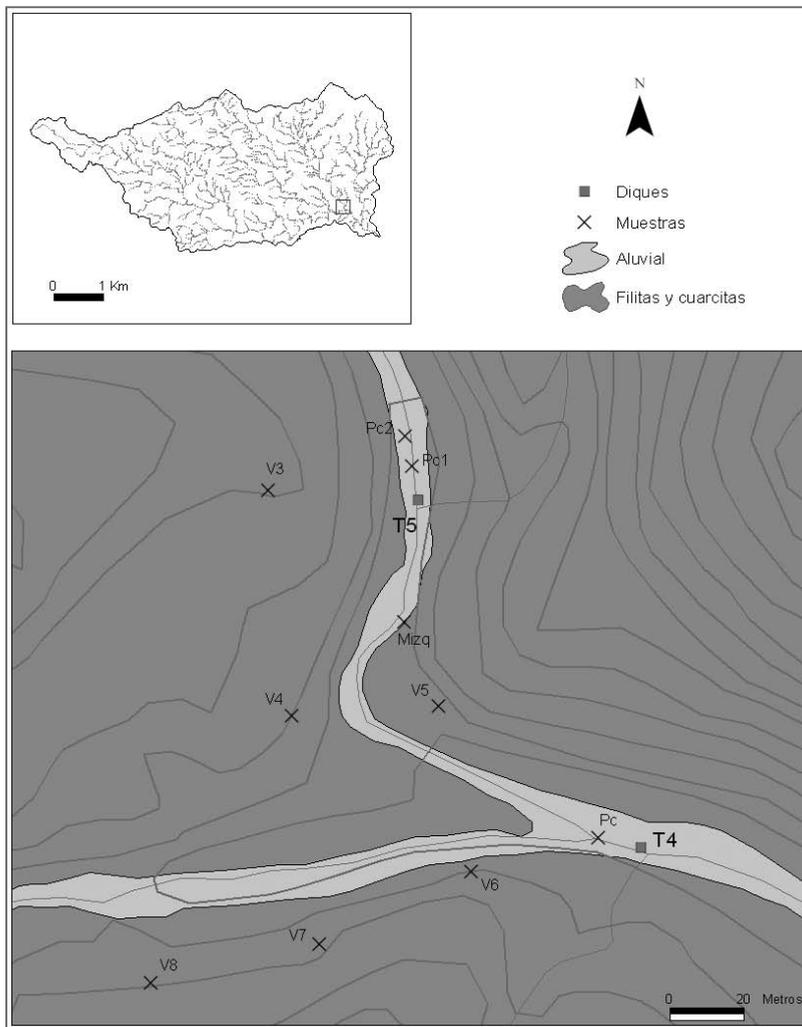


Figura 3. Localización de las muestras analizadas. Rambla de la Torrecilla.

Las muestras extraídas de niveles compactados fueron disgregadas con una solución de HCl al 10 % y agitadora sónica. El análisis textural se ha efectuado según la metodología estándar reseñada por Folk (1974), utilizando tamices para tamaños de partícula mayores de 1/16 de mm y el método de pipeta para tamaños menores. Previamente a las determinaciones analíticas fueron preparadas las muestras mediante secado natural y posterior tamizado a

través de un tamiz de luz de malla de 2 mm para separar las fracciones de grava y material fino. Cada muestra (200-500 gr) se trató con agua oxigenada para destruir la materia orgánica y a continuación con ácido clorhídrico, en el caso de las muestras calizas, para la eliminación del carbonato de calcio. Los datos fueron procesados estadísticamente (Folk y Word, 1957) por medio de un programa de computación, caracterizando a las muestras según la clasificación de Wentworth (1922) (en Hobson, 1979) y Shepard (1954). El cuadro 1 recoge las principales fórmulas empleadas en la obtención de dichos parámetros estadísticos.

Tabla 1. Parámetros estadísticos, fórmulas y límites utilizados (Folk y Word, 1957).

Parámetros y fórmula	Límites
Tamaño promedio gráfico $M_z = \frac{\varphi_{16} + \varphi_{50} + \varphi_{84}}{3}$	Grava: mayor de -1,0 $\varphi$ (2 mm) Arena: -1,0 $\varphi$ a 4,0 $\varphi$ (2 a 1/16 mm) Limo: 4,0 $\varphi$ a 8,0 $\varphi$ (1/16 a 1/256 mm) Arcilla: < 8,0 $\varphi$ (1/256 mm)
Desviación estándar gráfica inclusiva $\varphi I = \frac{\varphi_{84} - \varphi_{16}}{4} + \frac{\varphi_{95} - \varphi_5}{6,6}$	Muy bien clasificado: < 0,35 $\varphi$ Bien clasificado: < 0,35 $\varphi$ a 0,50 $\varphi$ Moderadamente bien clasificado: 0,50 $\varphi$ a 0,71 $\varphi$ Moderadamente clasificado: 0,71 $\varphi$ a 1,00 $\varphi$ Mal clasificado: 1,00 $\varphi$ a 2,00 $\varphi$ Muy mal clasificado: 2,00 $\varphi$ a 4,00 $\varphi$ Extremadamente mal clasificado: > 4,00 $\varphi$
Grado de asimetría gráfica inclusiva $Ski = \frac{\varphi_{16} + \varphi_{84} - 2\varphi_{50}}{2(\varphi_{84} - \varphi_{16})} + \frac{\varphi_5 + \varphi_{95} - 2\varphi_{50}}{2(\varphi_{95} - \varphi_5)}$	Muy asimétrico hacia finos: +1,0 a +0,3 Asimétrico hacia finos: +0,3 a +0,1 Casi asimétrico: +0,1 a -0,1 Asimétrico hacia gruesos: -0,1 a -0,3 Muy asimétrico hacia gruesos: -0,3 a -1,0
Medida de curtosis gráfica $k_G = \frac{\varphi_{95} - \varphi_5}{2,44(\varphi_{75} \varphi_{25})}$	Muy platicúrtico: < 0,67 Platicúrtico: 0,67 a 0,90 Mesocúrtico: 0,90 a 1,11 Leptocúrtico: 1,11 a 1,50 Muy leptocúrtico: 1,50 a 3,00 Extremadamente leptocúrtico: > 3,00

A partir de las curvas de distribución granulométrica se han obtenido los tamaños correspondientes a los percentiles 5, 16, 25, 50, 75, 84 y 95. Como tamaños característicos se adoptan dos comúnmente recogidos en la bibliografía existente (Emery, 1938; Gibbs *et al.*, 1971; Seward-Thomson y Hails, 1973; Carranza-Edwards, 1980): i) la mediana de los tamaños de la partículas o diámetro correspondiente al 50 % en peso de la muestra ( $D_{50}$ ) ( $\varphi_{50}$ ) y ii) un tamaño representativo de la fracción gruesa superficial del lecho, por lo general  $D_{84}$ .

Otros parámetros y fórmulas adoptadas son los coeficientes de selección o clasificación de Trask (So) (“*sorting index*”) ( $So = D_{75}/D_{25}$ ), desviación típica de Inman ( $\sigma$ ) ( $\sigma = (D_{84} - D_{16})/2$ ) (en mm y unidades *phi*) y desviación *phi* del cuartil (QD $\phi$ ) ( $QD\phi = (\phi_{75} - \phi_{25})/2$ ), así como los parámetros de asimetría Skewness (Sk) (Trask) ( $Sk = (D_{25} - D_{75})/D_{50}^2$ ), Skewness del cuartil *phi* ( $Sk_{\phi}$ ) ( $Sk_{\phi} = (\phi_{25} + \phi_{75} - 2\phi_{50})/2$ ), coeficiente de curtosis (K) ( $K = (0,5 (\phi_{95} - \phi_5) - \sigma)/\sigma$ ), coeficientes  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  de Inman ( $\alpha_1 = (\phi_m - \phi_{50})/\sigma$ ); ( $\alpha_2 = (0,5 (\phi_5 - \phi_{95}) - \phi_{50})/\sigma$ ).  $D_x$  significa el tamaño del percentil x % y sigma es la desviación típica granulométrica. Sobre la escala de tamaño de las partículas y la caracterización estadística de los datos granulométricos existe una amplia bibliografía, gran parte de la cual aparece recogida en los trabajos de Hobson (1979), Friedman (1967 y 1992) y King y Galvin (2002).

*Métodos empleados en el análisis mineralógico.* Como complemento al estudio granulométrico llevado a cabo en las cuencas de la Torrecilla y del Cárcavo, ha parecido oportuno efectuar un estudio mineralógico de los materiales recolectados en superficie y en distintos sondeos para establecer posibles variaciones en la mineralogía de las muestras y su tendencia a incrementar o disminuir su proporción con la profundidad. En cada muestra se ha obtenido la fracción de tamaño inferior a 50 micras para el estudio difractométrico y la comprendida entre 100 y 150 micras para caracterizar los minerales pesados de cada muestra. En esta última fracción la separación de la fracción pesada se ha llevado a cabo con bromoformo de densidad 2,89 g/cm<sup>3</sup>. Posteriormente se han montado con bálsamo de Canadá en un portaobjetos para su caracterización por microscopía de luz transmitida.

El estudio por rayos X se ha realizado con un difractor Philips completamente automatizado, empleando el programa de Martín Ramos (2005) para el control del equipo, realización de diagramas y tratamiento de datos. Se ha empleado radiación primaria de cobre con monocromador y las muestras se han explorado entre 3 y 80 °/2 $\theta$  a 40 kV y 30 mA.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Variabilidad granulométrica y mineralógica vertical de las cuñas sedimentarias en el tramo bajo del Cárcavo.

Los materiales retenidos por los diques del bajo Cárcavo presentan una variación de tamaños con la profundidad bastante uniforme en los tramos con predominio de finos, propios de subambientes de deposición por decantación. No obstante, el relleno de los diques conlleva, a lo largo de todo el tramo afectado, una rápida variabilidad espacial de subambientes sedimentarios, ya constatada por la descripción de litofacies. Este hecho determina la existencia de marcados cambios texturales en profundidad, que obedecen a ciertos patrones de sedimentación asociados al régimen hidráulico de las avenidas y a la dinámica configuración morfológica del lecho, ambos condicionados por la geometría y tipo de obra de los diques. A modo de ejemplo, se ha estudiado la distribución vertical de tamaños en la formación proximal de la cuña sedimentaria C20 ( $P_{iz}$ ).

De acuerdo con la clasificación de tamaños de Wentworth, aproximadamente el 60 % de la serie que integra el espesor máximo de dicha cuña, aparece constituido por limos de color pardo amarillento claro, con valores de mediana entre 0,035 y 0,058 mm (4,84 a 4,11  $\phi$ ). Éstos tienen especial representación en la unidad inferior de la serie, de carácter

claramente biepisódico. Con los niveles limosos alternan capas de materiales más gruesos, pertenecientes a las clases arenas y gravillas, y sólo a techo se observan gravas muy gruesas y algunos cantos englobados en una matriz limoarenosa (litofacies Gmm). Las arenas apenas ocupan un espesor de 35 cm repartidos en dos capas, una que corona la formación (1a) y otra sobre la unidad inferior (3b). La primera capa contiene arenas muy finas ( $D_{50} = 0,1 \text{ mm}$ ;  $3,33 \phi$ ) y forman parte de la matriz limo-arenosa del nivel superior; en cambio, las arenas del nivel 3b son muy gruesas ( $D_{50} > 1 \text{ mm}$ ;  $0 \phi$ ), y denotan un cambio neto con los limos infrayacentes. Por el contrario, la facies Gt incluida en la unidad superior se compone principalmente de gravas finas con tendencia granodecreciente:  $D_{50} (2c) = 4,9 \text{ mm}$ ;  $D_{50} (2b) = 2,53 \text{ mm}$ , limitando a techo por una delgada capa limo-arcillosa.

Ambos sets (1 y 3) constituyen depósitos de tipo turbidítico, originados por corrientes de gran densidad que transportan una importante carga en suspensión. En el set 3 la base marca la irrupción de gravas finas sobre una superficie limosa previamente erosionada, configurando así un claro cambio en las condiciones de sedimentación de ese momento. Dicho nivel detrítico aparece granoclasificado, tipo horizonte A de Bouma (1962), y enlaza hacia arriba con una delgada capa limosa de estructura laminar (horizonte D de Bouma). El set 1 tiene igualmente un carácter de turbidita, hallándose representado por los horizontes B, C y D de Bouma. Los dos depósitos turbidíticos forman parte de la unidad superior de la cuña sedimentaria, y, aunque no presentan el desarrollo, ni el apilamiento y estructura amalgamada de las turbiditas originadas en medios lacustres o submarinos (Stow, 1986; Gabaldón, 1991; Mutti *et al.*, 1996; Soták y Starek, 2000; Mutti *et al.* 2001), sí está claro que se deben a la acción de tormentas fuertes, capaces de generar avenidas con un régimen altamente turbulento en áreas vertientes pequeñas y ambientalmente frágiles como la del estudio. Cabe recordar que, como consecuencia de la construcción de nuevos diques en 1980, el área vertiente al dique C20 durante la etapa de relleno que originó la unidad superior de la cuña fue reducida considerablemente.

Los altos porcentajes de limos sugieren un régimen dominante de decantación, sin duda provocado por el efecto barrera del dique y el carácter de lecho marginal confinado por la estructura. El resultado es una secuencia dispuesta en capas de textura fina homogénea interrumpida por litofacies de arenas y gravas que marcan cambios relativamente bruscos en el régimen de deposición. La ausencia de límites graduales y de microformas de régimen lento entre las capas es también testimonio de una brusca disminución de la energía de las corrientes efímeras. De hecho, en toda la serie apenas quedan registros de estructuras producidas en régimen de corriente baja (p.e. *ripples*).

El cuadro 2 muestra los valores de los parámetros e índices granulométricos calculados para los principales niveles que componen la serie  $P_{iz}$ . De este cuadro se infiere diversas consideraciones que corroboran la alternancia de procesos de deposición en aguas remansadas con otros menos frecuentes de régimen turbulento. Por lo general, la mediana y el diámetro promedio de las partículas son muy similares en el caso de los sedimentos finos, pero difieren bastante (entre 2 y 4,6 mm) cuando se trata de texturas más gruesas (arenas y gravas). Sólo la muestra 1c, perteneciente al nivel superior (tipo Gmm), presenta valores similares de  $D_{50}$  y  $M_z$ .

En general, la dispersión intercuartilar alcanza unos valores bajos, sobre todo en los depósitos de la unidad inferior. En todos ellos existe una excelente clasificación de las

partículas, con valores del índice de Trask ( $S_o$ ) muy próximos entre sí (0,72 a 0,76) y de  $Q_d\phi$  inferiores a 0,47. Contrastados en detalle los resultados obtenidos para las distintas muestras de esta unidad se observa que las denominadas 4a y 4c, correspondientes a los horizontes superiores de sus respectivos sets, presentan una ligera mejor clasificación que las de posición inferior (4b y 4d). Este hecho confirma la hipótesis inicial de una formación bipisódica originada durante la primera etapa de relleno del dique.

Cuadro 2. Parámetros e índices granulométricos estimados para la serie proximal de la cuña C20. Tramo inferior del Cárcavo.

Muestra	Prof. (cm)	$M_z$ (mm)	$M_z\phi$	$\sigma$ (mm)	$\sigma\phi$	$\phi I$	$Q_d\phi$	$S_o$
1a	0-17	0,17	3,47	0,19	-2,02	-2,06	0,66	0,63
1b	17-25	6,50	-1,92	6,64	-2,02	-2,17	-0,96	1,95
1c	25-50	26,06	-4,32	18,95	-1,37	-1,48	-0,29	1,22
2a	50-55	0,10	4,52	0,12	-2,48	-2,06	0,57	0,67
2b	55-65	4,60	-1,49	4,78	-1,81	-1,93	-1,79	3,46
2c	65-80	9,57	-2,39	10,60	-2,05	-2,20	-1,02	2,02
3a	80-100	0,09	4,89	0,11	-2,73	-2,37	0,78	0,58
3b	100-117	1,93	-0,18	2,03	-1,95	-1,94	-0,64	1,55
4a	117-127	0,13	3,89	0,15	-2,09	-1,91	0,40	0,76
4b	127-136	0,07	4,69	0,08	-2,16	-2,10	0,44	0,74
4c	136-145	0,07	4,78	0,08	-2,41	-2,28	0,41	0,75
4d	145-167	0,08	4,50	0,09	-2,20	-2,05	0,47	0,72
Muestra	Prof. (cm)	Ak	Sk	Ski	$\alpha_1$	$\alpha_2$	K	$K_G$
1a	0-17	3,38	0,57	0,19	0,244	0,22	0,71	1,036
1b	17-25	1,77	0,61	-0,27	-0,182	-0,67	0,90	1,295
1c	25-50	1,05	0,84	-0,56	-0,462	-1,26	0,93	1,218
2a	50-55	2,98	0,87	0,09	0,050	0,14	0,09	0,637
2b	55-65	2,31	0,37	-0,01	0,128	-0,27	0,87	1,075
2c	65-80	2,90	0,75	-0,11	0,070	-0,55	0,89	1,046
3a	80-100	5,06	0,75	0,01	-0,028	0,06	0,21	0,574
3b	100-117	2,06	-1,46	-0,02	-0,007	-0,07	0,63	1,018
4a	117-127	1,66	0,95	0,04	0,155	-0,10	0,36	1,045
4b	127-136	2,02	0,96	-0,16	-0,153	-0,25	0,56	1,007
4c	136-145	2,00	0,88	-0,18	-0,231	-0,18	0,46	1,206
4d	145-167	2,04	0,97	-0,15	-0,138	-0,24	0,43	0,908

También la desviación gráfica inclusiva es bastante baja en todos los casos, inferior a  $-1 \phi$ . Este parámetro tiene en cuenta los valores extremos de la distribución (percentiles  $\phi_5$  y  $\phi_{94}$ ), además de los incluidos en el cálculo de la desviación típica de Inman ( $\sigma$ ). Los valores obtenidos a partir de este indicador de selección ( $\phi I$ ) están comprendidos entre  $-1,48$  y  $-2,37 \phi$ , mientras que los de Inman ( $\sigma\phi$ ) se reparten dentro de un rango algo mayor

(-1,37 y -2,73  $\phi$ ). En ambos casos, los valores de dispersión más bajos corresponden a los horizontes limosos y limo-arenosos y los más altos a los niveles detríticos de arenas y gravas de la unidad superior. En particular, la muestra del nivel 2b, ubicada en un depósito de facies Gt, es la peor clasificada, con un valor de Trask (So) de 3,46, que la sitúa dentro de la categoría “selección moderada-mala”.

Respecto a la oblicuidad o asimetría de las distribuciones de frecuencias, el índice Skewness (Sk) adopta valores positivos prácticamente en la totalidad de las muestras, poniendo de manifiesto una proximidad de la media a los tamaños finos mayor que la mediana y una variación de la energía cinética media desplazada hacia valores más bajos de lo normal. El sesgo positivo es normal en este tipo de sedimentos fluvio-torrenciales, ya que muchos granos de tamaño fino (limo y arcilla) son atrapados entre las partículas mayores y no llegan a sufrir la remoción directa de la corriente. Por otra parte, la asimetría gráfica inclusiva (Ski) incorpora un sesgo negativo en determinados casos y da valores algo menores que Sk. Según este parámetro indican asimetría fina (Ski > 0,1) los niveles representados por las muestras 1a, 2a y 4a; es decir, los horizontes D de Bouma, característicos de las facies turbidíticas. Únicamente dos muestras en toda la serie presentan simetría (2b y 3a) con valores de - 0,1 y + 0,1, respectivamente, que reflejan la falta de oblicuidad. El resto de distribuciones tienen asimetría gruesa con valores Ski por debajo de -0,1, pero sin rebasar en ningún caso -0,6.

La medida de la curtosis ofrece un buen indicador del grado de normalidad de la distribución, ya que permite relacionar la selección entre la porción central de la curva y sus extremos. De acuerdo con la medida de curtosis gráfica ( $K_G$ ) las distribuciones de los sedimentos que rellenan la parte inferior del dique son predominantemente mesocúrticas ( $0,9 < K_G < 1,1$ ). Y también merecen dicho calificativo los horizontes 1a, 2b y 2c. Por encima de 1,1 (distribuciones leptocúrticas) se hallan 1b y 1c. En todos estos casos donde  $K_G$  es mayor que 1 la curva es puntiaguda, lo que implica una mejor selección en el centro. De nuevo aquí, las muestras que representan el nivel superior de la secuencia de Bouma, dentro de la unidad superior de relleno (2a y 3a) presentan un rasgo diferente respecto a las demás. Ambos horizontes tienen una distribución granulométrica muy platicúrtica, con valores de  $K_G$  inferiores a 0,67 que sugieren una curva achatada y una mejor selección en los extremos.

*Estudio mineralógico de sedimentos retenidos por diques.* La serie expuesta en el cuadro 3 recoge los resultados de las muestras pertenecientes a la formación proximal de la cuña sedimentaria C20 ( $P_{iz}$ ). Dicha serie,  $P_{iz}$ (C20) está formada por 12 muestras, que contienen calcita, cuarzo, moscovita, dolomita, plagioclasa, clorita y yeso, si bien la moscovita, plagioclasa, clorita y yeso no están representados en todas ellas. El conjunto de la serie se halla mayoritariamente compuesto por calcita, cuarzo y dolomita con cantidades menores de las otras fases minerales. Los materiales originarios deben ser margas que han experimentado un enriquecimiento muy importante en carbonatos. El yeso es un mineral aquí de origen tardío y solamente aparece en las muestras 2c, 3b y 4a.

Cuadro3. Análisis mineralógico semicuantitativo (resultados en %). Serie P<sub>iz</sub> (C20), tramo inferior de la rambla del Cárcavo.

Muestra	Calcita	Cuarzo	Moscovita	Dolomita	Plagioclasa	Clorita	Yeso
1a	45	34	5	16	0	0	0
1b	43	38	0	9	10	0	0
1c	46	32	8	7	3	4	0
2a	49	40	0	11	0	0	0
2b	63	28	3	6	0	0	0
2c	59	27	0	12	0	0	2
3a	68	22	3	7	0	0	0
3b	59	33	0	3	3	0	2
4a	74	14	0	4	3	0	5
4b	68	22	0	6	4	0	0
4c	54	30	5	9	2	0	0
4d	67	24	0	6	3	0	0

Por su parte, las *muestras superficiales de lecho (L) y vertiente (V)* se caracterizan por un elevado contenido en carbonatos, con un marcado predominio de calcita sobre dolomita. Los restantes minerales (moscovita, plagioclasa, clorita y yeso) sólo aparecen representados en algunas muestras, que en conjunto son muy heterogéneas en su composición (cuadro 4 y figura 4). Comparando dichas muestras con las del relleno de los diques en el tramo bajo se infieren las siguientes consideraciones:

Cuadro 4. Análisis mineralógico semicuantitativo. Muestras superficiales de lecho (L) y vertiente (V). Tramo bajo de la rambla del Cárcavo.

Muestra	Calcita	Cuarzo	Moscovita	Dolomita	Plagioclasa	Clorita	Yeso
L0	55	17	8	16	0	0	4
L1	53	34	0	10	0	3	0
V2	65	27	0	4	4	0	0
V3	61	23	0	10	0	0	6
V4	58	21	6	15	0	0	0
L5	54	30	5	8	3	0	0

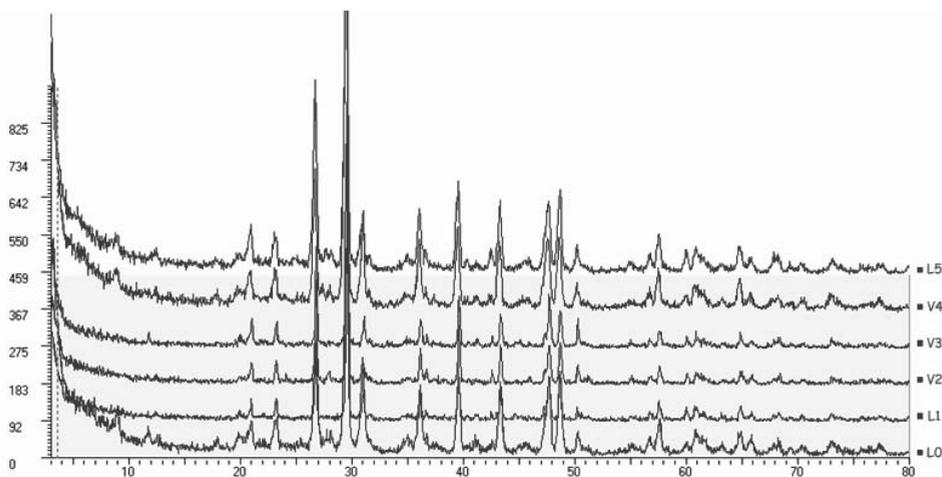


Figura 4. Difractogramas apilados de varias muestras superficiales de lecho (L) y vertiente (V). Tramo bajo de la rambla del Cárcavo. Se observan variaciones muy significativas tanto en la ausencia de varias fases minerales como en la intensidad relativa de las distintas reflexiones.

La presencia de yeso en las muestras 2c, 3b y 4a atribuye a estos sedimentos una procedencia de la cabecera de los barrancos de la Morera y del Rey. La mayor parte de las muestras de la unidad inferior (4a, 4b y 4d), catalogadas como litofacies Fm, tienen características mineralógicas similares a la muestra V2 (figura 187), que representa las margas azules aflorantes en amplias zonas de ladera y taludes próximos a los cauces. También las muestras intermedias de facies Fm (2b y 3a) tienen un elevado porcentaje de calcita (63-68 %), menor proporción de cuarzo (22-28 %) y un contenido de dolomita en torno a 7 %, ofreciendo gran similitud con la composición de las muestras V2 y V3 (figura 4), correspondientes a margo-calizas miocenas y material cuaternario indiferenciado, respectivamente. Ambos tipos de materiales forman parte de terrenos profundamente abarrancados y constituyen una importante fuente de sedimentos para los aportes que llegan al tramo bajo del cauce principal.

En cambio, los niveles de la unidad superior de la serie presentan porcentajes más altos de cuarzo (32-40 %), en detrimento del contenido de calcita que se sitúa entre 43 y 49 %. Dicha composición refleja la de áreas fuentes de sedimentos detríticos asociados a terrenos de areniscas de la cuenca. Sin embargo, la cuña sedimentaria del dique C20, a la que pertenecen las muestras analizadas, no ha podido recibir tales aportes dado que fue desmantelada antes de ser colmatado el dique inmediato aguas arriba (C7). Esta estructura aparece, desde 1980, interpuesta entre la serie  $P_{iz}$  (C20), que aquí se analiza, y los sectores de areniscas principalmente ubicados en cabeceras de barrancos afluentes al cauce principal. De este modo, se explica que la mayor proporción de cuarzo en los depósitos superiores retenidos por el citado dique tenga como fuente de suministro principal la fracción arenosa de los depósitos de lecho situados aguas abajo del dique precedente. Así, por ejemplo, durante el relleno del dique C7, la caída del agua de avenida, desprovista de sedimentos gruesos,

provocó erosión local aguas abajo y una remoción de partículas más gruesas (arenas y gravas) que las habitualmente transportadas en condiciones naturales a lo largo del tramo. Tal material constituye probablemente una parte muy significativa de los sedimentos que coronan la cuña sedimentaria del dique C20, situado aguas abajo. De hecho, la fase final de colmatación de este dique coincide con la primera fase de relleno del dique C7.

### **Variabilidad granulométrica y mineralógica vertical de las cuñas sedimentarias en el tramo bajo de la rambla de Torrecilla.**

En la figura 2 se indican los puntos de muestreo superficial (sectores de vertiente -V-) y en profundidad (perforaciones en cuñas sedimentarias -Pc-), junto con los puntos de ubicación de los diques T5 y T4 (tramo bajo de la rambla).

Las series verticales de las cuñas sedimentarias en el tramo inferior de la rambla de Torrecilla presentan una distribución de tamaños desigual según las fases de relleno de los diques y las características morfodinámicas de los sistemas fluvio-torrenciales implicados. La serie P<sub>c</sub> (T4) corresponde al sector proximal central de la cuña T4, situada aguas abajo de la confluencia entre las ramblas del Cocón y de la Torrecilla s.s. (figura 188), por lo que sólo recoge aguas y sedimentos de la rambla de la Torrecilla s.s.

Al contrario que sucede en el tramo inferior del Cárcavo la carga tractiva es dominante en todas las series, dependiendo las variaciones texturales más de los acarreo de fondo que del transporte en suspensión.

Al igual que en el Cárcavo, se aprecia una unidad inferior de relleno, con predominio de material más fino, fruto de los procesos de decantación en aguas estancadas tras el dique. Sin embargo, la presencia superficial de finos es mucho menos importante, y ello por dos motivos esenciales: la textura gruesa de los materiales detríticos que alimentan el transporte, asociada a áreas fuentes metamórficas de intensa meteorización y fragmentación (pizarras, esquistos y filitas), y la macroporosidad del lecho granular que permite mezclar finos con gruesos en el proceso de sedimentación.

La alternancia de texturas distintas, dentro de un rango amplio, refleja el afecto pantalla de los diques pero también, y probablemente en mayor medida, obedece a la diferente energía desarrollada por las avenidas responsables del relleno. El carácter abarrancado de estos cursos, con la consiguiente constricción de subambientes sedimentarios, y la continua remoción del lecho granular conlleva una gran homogeneización del material atrapado en los diques. Así lo revelan los resultados obtenidos a partir del análisis e interpretación de tres columnas estratigráficas extraídas mediante perforadora.

La serie P<sub>c</sub> (T4) está integrada en su totalidad por arenas y gravas, con valores de mediana entre 0,5 y 5,56 mm (1 a 2,48  $\phi$ ) y de percentil D<sub>84</sub> frecuentemente comprendido entre 7 y 15 mm (cuadro 82). Las arenas y gravas finas son dominantes en la unidad inferior de la serie (1,1-2,25 m de profundidad), mientras que las gravas medias y gruesas abundan en los niveles superiores (profundidad < 1 m). La primera fase de relleno supuso la acción combinada de flujos de alta energía, algo amortiguada por los diques precedentes, y descensos del nivel del agua relativamente rápidos, donde debieron concursar tanto cargas tractivas como de decantación. De hecho los sets que parecen formar la unidad inferior muestran una capa arenosa a techo y una capa de material más grueso infrayacente, lo que hace pensar

en un modelo de sedimentación rápida simple, en parte comparable al cuerpo inferior de la secuencia tipo de Bouma (horizontes A y B). Estos depósitos denotan una organización granodecreciente. Las capas b y c contienen arenas muy gruesas y gravillas ( $D_{50} = 1-2$  mm;  $D_{84} = 7-9$  mm), mientras que en la de techo (a) predominan las arenas medias y gruesas (entre 0,25 y 1 mm). Dicho esquema cambia en la mitad superior de la serie, donde el material grueso se hace más homogéneo [ $(D_{84} = -3,6$  a  $-4,3 \phi)$ , ( $20 \text{ mm} < D_{95} < 28 \text{ mm}$ )].

La figura 5 representa las curvas de frecuencias acumulativas de tamaños correspondientes a las muestras de esta serie. En ella se observa una clara diferencia entre las dos unidades de depósito descritas. Todas las muestras de la unidad superior tienen una distribución extendida, con un ligero aumento de pendiente en el extremo final, coincidiendo con tamaños mayores de 5 mm.

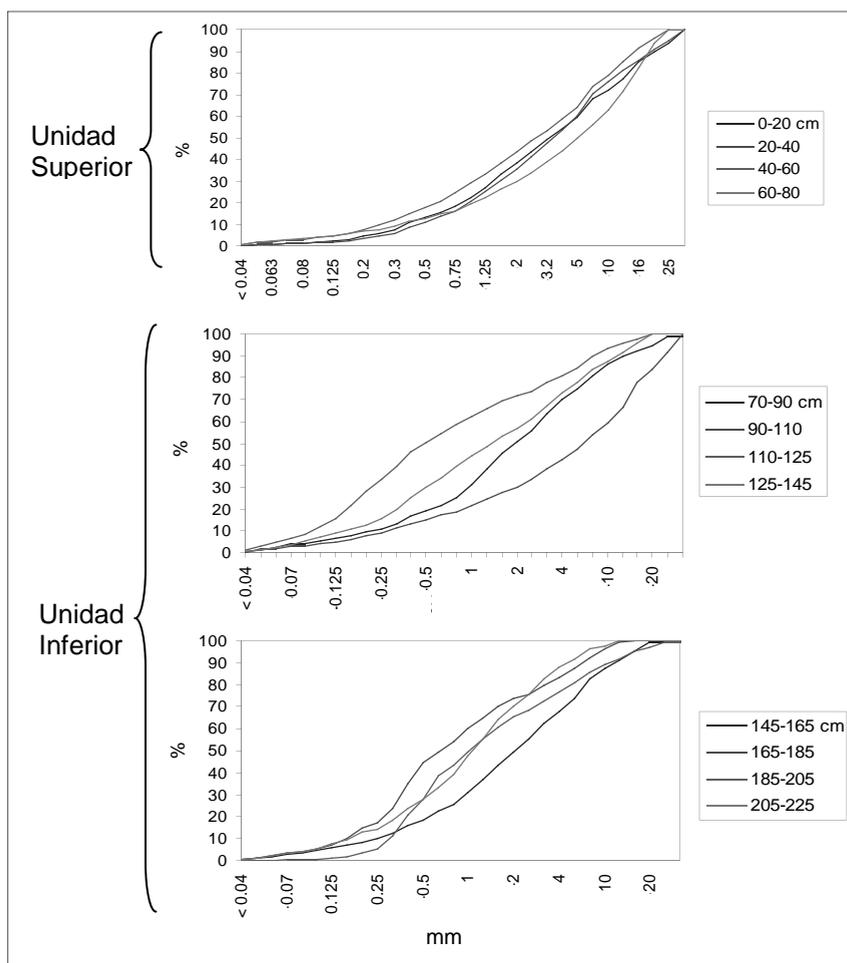


Figura 5. Curvas granulométricas del muestreo vertical  $P_c$  (sector proximal de la cuña sedimentaria del dique T4). Tramo inferior de la rambla de la Torrecilla.

En cambio, las curvas granulométricas del tramo inferior, a pesar de mostrar una forma también distendida, se caracterizan por una gran variedad de facies, desde curvas en las que se intuye una única moda (5c y 7a) hasta curvas con distribución bimodal o polimodal (6b); desde curvas con trazo convexo (5a y 6a), que traducen un pico frecuencial en torno a los tamaños más finos, hasta otras de aspecto cóncavo (4b y 5c) que suponen un desplazamiento de la mediana hacia los intervalos de mayor tamaño. Todo ello implica una mala selección general del material, producto de las condiciones cambiantes en que se efectúa el relleno de los diques.

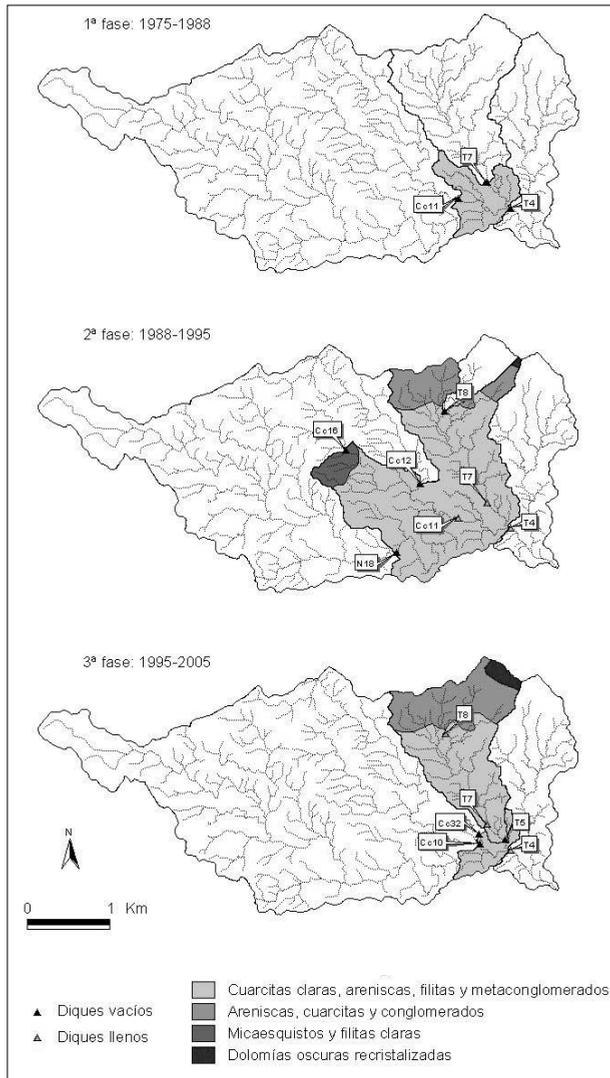


Figura 6. Evolución del área vertiente al dique T4. Tramo bajo de la rambla de la Torrecilla.

No obstante, por debajo de 1,4 m las curvas presentan un aspecto muy similar, lo que constata un mismo régimen de sedimentación en las primeras etapas de relleno del dique T4, en general algo amortiguado por la influencia de los diques situados aguas arriba. Estos diques tienen una fecha idéntica de construcción (1975), por lo que el área vertiente al dique T4 durante las avenidas que sobrevinieron inmediatamente después era bastante reducida (figura 6). La energía y carga de transporte de estas primeras corrientes debieron ser considerablemente menores que en etapas posteriores, una vez colmatados los diques más próximos aguas arriba (T7, Cc11 y N17) (figura 6).

Los parámetros estadísticos ponen también de manifiesto las diferencias hidrodinámicas que controlaron la deposición durante las distintas fases de relleno del dique. El índice de Trask ( $S_o$ ), por ejemplo, ha permitido distinguir entre los depósitos moderada y pobremente clasificados de la unidad superior, con valores  $S_o$  superiores a 2,5, y los mejor seleccionados de la unidad inferior ( $1,26 < S_o < 1,63$ ), excepción hecha del nivel 5c ( $S_o = 2,54$ ), que denota un régimen más turbulento (cuadro 5).

Cuadro 5. Parámetros e índices granulométricos estimados para la serie proximal  $P_c$  de la cuña T4. Tramo inferior de la rambla de la Torrecilla.

Muestra	Prof. (cm)	$M_z$ (mm)	$M_z\phi$	$\sigma$	$\sigma\phi$	$\phi I$	$Qd\phi$	$S_o$
1a	0-20	6,50	-1,70	7,28	-2,31	2,18	-2,09	4,26
2a	20-40	5,97	-1,45	7,93	-2,47	2,21	-1,70	3,24
3a	40-60	5,09	-1,28	5,76	-2,27	2,28	-1,59	3,02
3b	60-80	7,43	-1,97	7,89	-2,26	2,22	-1,34	2,54
4a	70-90	3,83	-0,92	4,27	-2,27	2,33	-1,35	2,54
4b	90-110	8,71	-1,98	9,69	-2,63	2,48	-1,71	3,27
5a	110-130	1,87	0,56	2,69	-2,72	2,50	-0,33	1,26
5b	125-145	3,18	-0,48	4,11	-2,53	2,40	-0,61	1,53
5c	145-165	3,67	-0,93	4,10	-2,26	2,20	-1,35	2,54
6a	165-185	1,66	0,28	1,94	-2,18	2,08	-0,38	1,31
6b	185-205	2,77	-0,44	3,32	-2,16	2,00	-0,71	1,63
7a	205-225	1,59	0,00	1,57	-1,83	1,81	-0,56	1,48
Muestra	Prof. (cm)	$A_k$	$S_k$	$S_{ki}$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$K$	$K_G$
1a	0-20	2,98	1,084	-0,07	-0,05	-0,13	0,489	0,847
2a	20-40	3,01	1,487	-0,02	0,00	-0,03	0,339	0,903
3a	40-60	2,26	0,765	-0,16	-0,17	-0,44	0,568	0,941
3b	60-80	2,02	0,564	-0,33	-0,36	-0,80	0,594	0,926
4a	70-90	2,38	1,029	-0,07	0,01	-0,16	0,718	1,113
4b	90-110	3,26	0,850	-0,34	-0,16	-0,46	0,479	0,829
5a	110-130	5,07	1,782	0,24	0,23	0,30	0,427	0,789
5b	125-145	3,11	0,999	-0,02	-0,03	-0,17	0,531	0,900
5c	145-165	2,72	1,064	-0,12	-0,05	-0,32	0,657	0,978
6a	165-185	3,10	1,705	0,21	0,25	0,23	0,546	0,949
6b	185-205	3,03	1,587	0,29	0,29	0,40	0,375	0,831
7a	205-225	1,85	0,859	-0,14	-0,10	-0,31	0,626	0,965

Los valores de oblicuidad de Skewness (Sk) son siempre positivos, situando a la media en una posición relativa más próxima respecto al intervalo de los tamaños menores, lo que supone un desplazamiento de los valores de energía por debajo de lo normal. A pesar de ello, la aplicación del índice de asimetría gráfica inclusiva (Ski) permite establecer ciertos matices diferenciadores, que han de tenerse en cuenta, sobre todo en relación con los parámetros de selección (Dacey y Krumbein, 1979). Así, por ejemplo, casi todas los depósitos (a) de la unidad superior son casi asimétricos (1a, 2a y 4a), en tanto que los restantes se agrupan en tres tipos: i) asimétricos hacia finos (5a, 6a y 6b), ii) asimétricos (3b y 4b) hacia gruesos (3a, 5c, 7a), y iii) muy asimétricos hacia gruesos. Si estos sesgos se interpretan en relación con los índices de selección, está claro que la oblicuidad de los sedimentos es más acusada hacia la fracción de gruesos en los niveles superiores de la serie y hacia las arenas medias y gruesas (fracción más fina) en los depósitos de la unidad inferior. La falta de oblicuidad ( $-0,1 < Ski < +0,1$ ) se hace particularmente patente en los niveles superiores de las secuencias granodecrecientes originadas durante las fases finales del relleno. Respecto al grado de normalidad de la distribución granulométrica, las curvas pueden considerarse platicúrticas y mesocúrticas, no existiendo diferencias apreciables en el conjunto de la serie ( $0,8 < K_G < 1,1$ ).

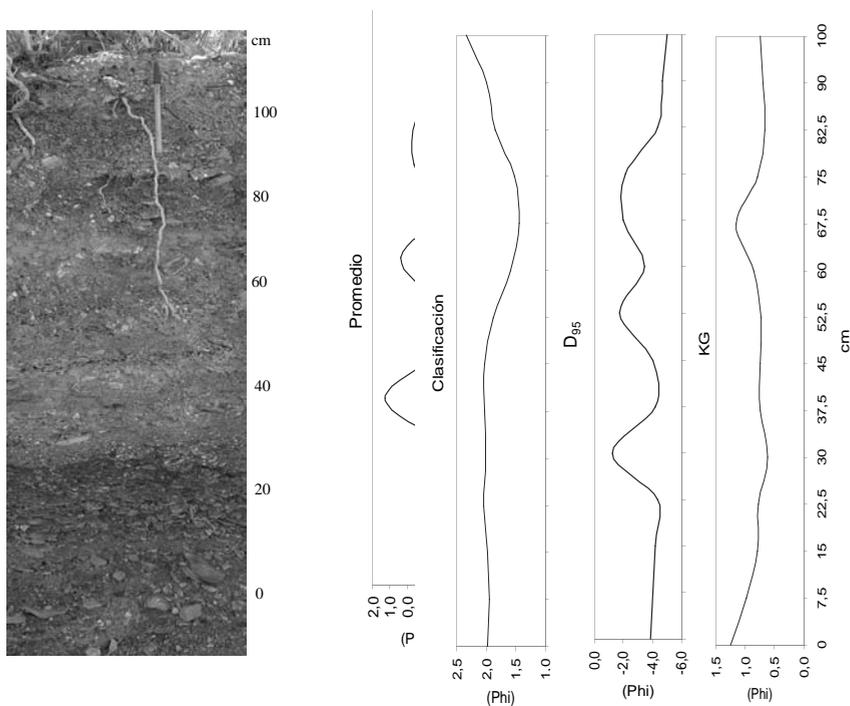


Figura 7. Perfiles de distribución en profundidad de varios parámetros granulométricos [diámetro promedio, clasificación, 95° percentil ( $D_{95}$ ) y medida de curtosis gráfica (KG)]. A la izquierda: serie  $M_{izq}$ , margen expuesto a la erosión aguas arriba de la cuña sedimentaria del dique T4 (tramo inferior de la rambla de Torrecilla).

Un hecho interesante es el grado de vinculación que parecen mantener las secuencias de relleno de los diques con las series verticales de los márgenes erosionados aguas abajo de los diques inmediatamente anteriores. El margen cuya secuencia sedimentaria ( $M_{izq}$ ) es objeto de comparación con la serie de relleno del dique T4 dista 170 m respecto de esta última, tiene una textura granular y fue originado por erosión local (*'scour hole'*) aguas abajo del dique precedente (T5). La altura visible de este margen, expuesto a erosión, es aproximadamente de 1 m, por lo que necesariamente ha sido éste el espesor comparado con la unidad superior de la serie  $P_c$  (T5). La comparación de los perfiles de variación que presentan los parámetros estadísticos básicos (promedio, clasificación,  $D_{95}$  y curtosis gráfica) obtenidos en cada caso (figuras 7 y 8) ofrece varias consideraciones de interés:

- i) El tamaño promedio de las partículas es algo mayor en el margen ( $M_z = -1,73 \phi$ ) que en el muestreo por sondeo ( $M_z = -1,48 \phi$ ).
- ii) La serie de relleno muestra menos cambios texturales en profundidad que la de margen. Esta última alcanza valores mínimos de  $M_z$  (en torno a  $-2 \phi$ ) en cuatro profundidades distintas, a 20, 37, 60 y 80 cm, mientras que el tramo superior de  $P_c$  (T4) lo hace en sólo dos, a 70 y 100 cm. Una tónica muy similar se observa, cuando son enfrentados los perfiles de evolución del percentil  $D_{95}$ , aunque en este caso el contraste es mayor, dada la acusada homogeneización de los tamaños más gruesos en la serie de relleno.

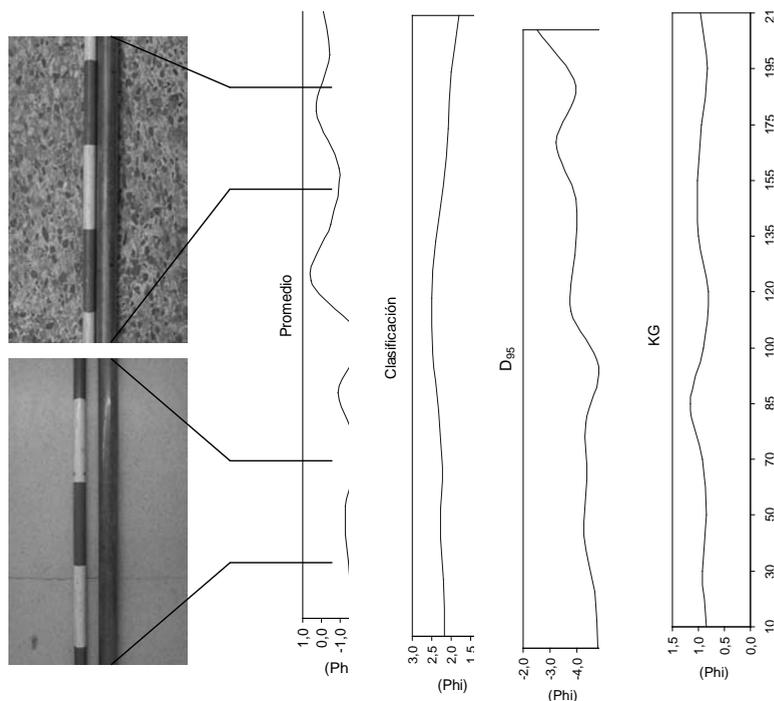


Figura 8. Perfiles de distribución en profundidad de varios parámetros granulométricos [diámetro promedio, clasificación, 95° percentil ( $D_{95}$ ) y medida de curtosis gráfica (KG)]. Perforación inmediatamente aguas arriba del dique T4 (tramo inferior de la rambla de Torrecilla).

iii) La variación del índice de clasificación ( $I\phi$ ) con la profundidad guarda cierta similitud en ambas secuencias. Éste se mantiene estable hasta los 50 cm, punto a partir del cual, y en un espesor de 40 cm, existe una selección ligeramente mejor de los sedimentos.

iv) Los valores de la curtosis gráfica (KG) también reflejan dicho paralelismo. Desde valores próximos a 0,9 en superficie (distribución mesocúrtica) KG disminuye hasta situarse en torno a 0,7 (distribución platicúrtica) a partir de los 20 cm de profundidad en la serie de margen y de los 40 cm en la cuña sedimentaria.

En conclusión, puede considerarse que los materiales que integran los depósitos superiores de la cuña T4 reflejan en buena parte las características morfométricas de los sedimentos erosionados aguas arriba por causa del dique T5. Si la textura es algo menos gruesa en la cuña sedimentaria ello puede deberse a la selección impuesta por el propio transporte de fondo. De hecho, la clasificación del material de relleno varía en profundidad de acuerdo con los aportes liberados por una erosión progresiva producida de arriba abajo en la serie marginal.

Respecto al estudio mineralógico de los sedimentos de dichas cuñas se exponen a continuación los resultados obtenidos mediante el método de polvo de las diferentes muestras tomadas en cada serie (figura 3), indicando su composición según un análisis semicuantitativo basado en los poderes reflectantes de las distintas fases cristalinas representadas.

- *Serie P<sub>c</sub> (T4)*. Está formada por 12 muestras correspondientes a los tramos 0 a 205 cm de profundidad. Las muestras parecen muy homogéneas en su composición con una tendencia a incrementarse la fracción más fina a medida proceden de mayor profundidad. El análisis mineralógico semicuantitativo indica la presencia sistemática de cuarzo, clorita, moscovita, calcita, dolomita y plagioclasa. En el cuadro 6 se recogen los resultados obtenidos.

Cuadro 6. Análisis mineralógico semicuantitativo (resultados en %). Serie P<sub>c</sub> (T4).

Profundidad (cm)	Cuarzo	Clorita	Moscovita	Calcita	Dolomita	Plagioclasa
0-20	51	10	18	4	9	8
20-40	60	8	13	6	5	8
40-60	59	10	13	5	5	8
60-80	46	12	18	7	8	9
70-90	60	8	13	6	5	8
90-110	59	9	14	6	6	6
110-130	73	5	8	4	4	6
125-145	59	10	16	4	4	7
145-165	58	7	15	5	5	10
165-185	61	10	14	3	4	8
185-205	57	7	13	7	6	10
205-225	59	4	4	11	17	5

De los minerales identificados, cuarzo, clorita, moscovita y plagioclasa son los principales componentes de las filitas, las rocas dominantes en esta serie. Los carbonatos calcita y dolomita son fases minoritarias. No se observa una tendencia definida en la variación del porcentaje de estos minerales con la profundidad.

*Serie  $P_{c_2}$  (T5)*. La serie está formada por 11 muestras correspondientes a las profundidades 0-200 cm como se recoge en el cuadro 7.

Cuadro 7. Análisis mineralógico semicuantitativo. Serie  $P_{c_2}$  (T5).

Profundidad (cm)	Cuarzo	Clorita	Moscovita	Calcita	Dolomita	Plagioclasa
0-20	50	11	19	5	3	12
20-40	55	12	11	3	8	11
40-60	57	9	13	8	8	5
60-80	61	8	12	6	5	8
80-100	60	6	15	6	7	6
100-115	59	8	20	0	5	8
115-135	57	8	21	0	5	9
135-150	38	14	15	15	6	12
150-160	60	7	10	9	7	7
160-170	50	6	11	21	4	8
170-200	43	8	16	22	4	7

Estos resultados son similares a los de la serie  $P_c$  (T4) en cuanto a las fases minerales representadas. El cuarzo es también el mineral más abundante, aunque con porcentajes inferiores a los de la serie  $P_c$  (T4) (entre el 43 y el 61 %). Clorita, moscovita y plagioclasa son minerales esenciales en la filitas mientras que los carbonatos, calcita y dolomita (más abundantes aquí que en la serie anterior citada), son fases minoritarias. Se observa que el contenido en calcita se incrementa con la profundidad mientras que el de dolomita, menos abundante, se mantiene entre el 3 y el 8 %. En la figura 196 se recogen en forma apilada los difractogramas de estas 11 muestras.

*Serie  $P_{cl}$  (T5)*. Comprende 5 muestras correspondientes a las profundidades 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm. De nuevo, la composición mineralógica encontrada por difracción de rayos X es muy similar en todas las muestras, como se puede apreciar en el cuadro 8, aunque varían las proporciones relativas de algunas fases. Mientras que el contenido en cuarzo disminuye con la profundidad, moscovita aumenta ligeramente y los carbonatos, tanto calcita como dolomita, son fases minoritarias, lo mismo que clorita. La plagioclasa alcanza valores significativos y alcanza su mayor valor en la muestra más profunda.

Cuadro 8. Análisis mineralógico semicuantitativo. Serie P<sub>cl</sub> (T5).

Prof. (cm)	Cuarzo	Clorita	Moscovita	Calcita	Dolomita	Plagioclasa
0-20	62	5	15	3	8	7
20-40	60	5	13	5	7	10
40-60	41	6	25	11	8	9
60-80	48	6	24	6	7	9
80-100	37	8	32	5	4	14

Muestras superficiales de vertiente (V1 a V8) (figura 3). Comprende 8 muestras recogidas entre 0 y 20 cm de profundidad en sectores de ladera representativos del área vertiente del dique T5 (cuadro 9).

Cuadro 9. Análisis mineralógico semicuantitativo. Muestras superficiales de las áreas vertientes del dique T5.

Muestra	Calcita	Cuarzo	Moscovita	Dolomita	Clorita
V1	11	42	9	35	3
V2	5	81	5	6	3
V3	23	43	11	14	9
V4	12	47	19	13	9
V5	8	54	18	13	7
V6	9	55	17	11	8
V7	5	49	24	10	12
V8	12	53	22	4	9

Las muestras son esencialmente silíceas, con porcentajes elevados en cuarzo (la muestra V2 es una cuarcita) y moscovita, con valores muy variables de carbonatos (dolomita y calcita) y clorita. La figura 9 recoge los difractogramas apilados de estas muestras.

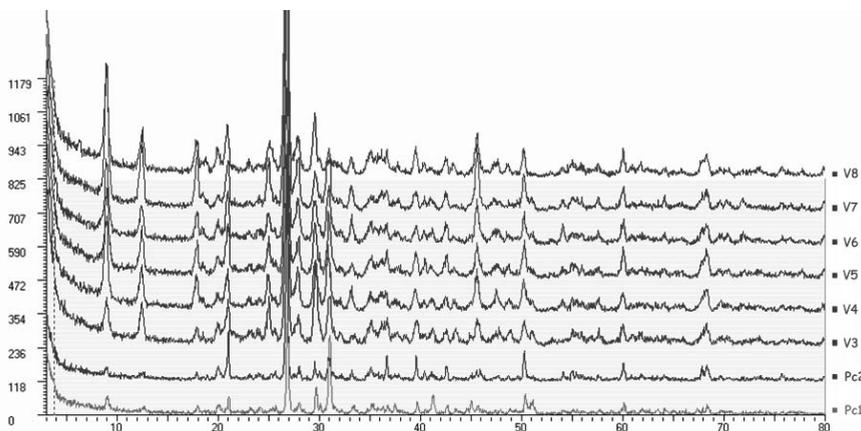


Figura 9. Difractogramas de polvo de las 8 muestras superficiales de ladera seleccionadas en el área vertiente del dique T5 de la rambla de Torrecilla. Se puede apreciar la variación relativa en la intensidad de las reflexiones de las distintas fases minerales.

*Minerales pesados.* Se ha encontrado una gran homogeneidad en el estudio de la fracción pesada de las distintas muestras analizadas. Los minerales más abundantes son hematites, turmalina, apatito y eventualmente goethita y circón. Estas fases minerales constituyen los principales accesorios que presentan las filitas de estas muestras.

Tras el estudio difractométrico realizado en las muestras de las cuencas de la Torrecilla y Cárcavo se pueden avanzar algunas conclusiones generales:

1. El estudio mineralógico de los sedimentos acumulados permite establecer una relación entre la composición de estos materiales y las rocas de las que derivan.
2. No se observan cambios mineralógicos significativos en la composición de los sedimentos obtenida en las distintas columnas de sondeos, quizá porque la probable evolución se ha producido a una escala mucho mayor que la profundidad de cada sondeo.
3. No aparecen fases de alteración de los minerales esenciales de las rocas de partida, generalmente filitas. El yeso encontrado es claramente de origen secundario.
4. Los minerales pesados acumulados en los sedimentos coinciden con los que se encuentran en las rocas de partida (filitas). No se han desarrollado procesos tardíos de alteración.
5. La comparación de los datos mineralógicos entre las muestras de la última fase de relleno de los diques [niveles superiores de la serie  $P_c$  (T4), e incluso de las series  $P_{c1}$  (T5) y  $P_{c2}$  (T5)] y las muestras superficiales de ladera recogidas dentro del área vertiente del dique T4 demuestra que aquéllas mantienen mayor relación con los materiales del cauce aguas arriba que con los terrenos de vertiente.

Las muestras aluviales de relleno de los diques presentan, en relación con las coluviales, porcentajes de cuarzo ligeramente mayores, una menor proporción de calcita y dolomita, y la presencia de plagioclasa, mineral del que parecen carecer los materiales de laderas próximas. Este hecho corrobora la hipótesis, ya sugerida a partir de criterios estadístico-granulométricos y geomorfológicos, de que el relleno de los diques se nutre más de los propios materiales de acarreo fluvio-torrencial que del lavado superficial de las laderas. De hecho, la construcción de diques en serie conlleva una intensa erosión inmediatamente aguas abajo de cada estructura, lo que implica una gran remoción del material de lecho, parte del cual (el más fino) termina siendo retenido por el siguiente dique aguas abajo. Al margen del posible impacto producido por este tipo de obras, el perímetro de los cauces en condiciones hidrológicas naturales de régimen semiárido constituye a menudo una importante fuente de sedimentos. La contribución de los márgenes del cauce al transporte y sedimentación de los cursos efímeros ha sido hasta el momento poco estudiada, si bien existen ya algunos trabajos que destacan su grado de incidencia. López Bermúdez (1999) señala, por ejemplo, que en años con fuertes avenidas la erosión de los márgenes de ramblas y barrancos en la cuenca del Guadalentín puede doblar la producción total de sedimentos. Otros autores resaltan la relación entre los procesos de erosión marginal en cauces efímeros y su influencia aguas abajo, tanto en el suministro de sedimentos como en su propia dinámica morfológica (Street y Quinton, 2001; Wheeler y Al-Weshah, 2002; Dunjé Denti, 2004).

## CONCLUSIONES

La textura de los materiales del lecho es especialmente sensible a los cambios de régimen hidráulico y transporte provocados por los diques. El grado de sensibilidad a dichas modificaciones puede verse incrementado por el régimen torrencial de la corriente, de modo que en las áreas de estudio y muy probablemente bajo condiciones similares en todo el Sureste peninsular, resulta conveniente abordar en detalle el estudio de las características granulométricas de este tipo de cauces antes de acometer cualquier obra de corrección hidrológica. El relleno de los diques conlleva, a lo largo de los tramos afectados, una rápida variabilidad espacial de litofacies y marcados cambios texturales en profundidad, fruto de una morfología del lecho cambiante, asociada al efecto de las variaciones geométricas del vaso receptor sobre el régimen hidráulico de las avenidas. A pesar de sus diferencias ambientales, el análisis granulométrico vertical realizado en las cuñas sedimentarias de ambas cuencas ha permitido identificar dos unidades principales de deposición: (1) una unidad inferior de relleno, con predominio de material más fino, fruto de los procesos de decantación en aguas estancadas tras el dique; y (2) una unidad superior, formada por partículas más gruesas, procedentes del barrido selectivo en el tramo inmediato aguas abajo del dique anterior. Este hecho se hace particularmente notorio en los diques de la rambla de Torrecilla, donde la textura gruesa de los sedimentos que integran la citada unidad se explica por la presencia de áreas fuentes de material detrítico intensamente reactivadas dentro del mismo sistema fluvial. Incluso, la clasificación del material de relleno varía en profundidad de acuerdo con los aportes liberados por una erosión progresiva producida de arriba abajo en las series marginales al pie del dique precedente. Por otra parte, la composición mineralógica de los sedimentos retenidos por los diques en sus últimas fases de relleno guarda mayor similitud con la naturaleza de los materiales aluviales del antiguo lecho erosionado que con la observada en los depósitos de ladera. Sin duda, estas conclusiones abren nuevos interrogantes en relación con la contribución de los márgenes del cauce al transporte y sedimentación de los cursos efímeros intervenidos por el hombre.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido llevado a cabo en el marco del proyecto de investigación PI/13 “Respuesta hidrológica y geomorfológica de los sistemas fluvio-torrenciales afectados por obras de restauración hidrológico-forestal en cuencas semiáridas del Sureste Peninsular”, financiado por la Fundación Instituto Euromediterráneo de Hidrotecnia, Consejo de Europa.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALONSO SARRÍA, F.; MARTÍNEZ LLORIS, M. y ROMERO DÍAZ, A. (2001). Respuesta erosiva de cuencas, corregidas mediante diques de retención de sedimentos, ante lluvias de alta densidad. cuenca del río Quípar, Sureste de España. *Papeles de Geografía*, N° 34, pp. 191-204.

- BOUMA, A. H. (1962). *Sedimentology of some flysch deposits, a graphic approach to facies interpretation*. Elsevier Company, Ámsterdam, 168 p.
- CARRANZA-EDWARDS, A. (1980). Ambientes sedimentarios recientes de la llanura costera sur del Istmo de Tehuantepec. *VI Congreso Nacional de Oceanografía. Anales del centro de ciencias del mar y limnología*, California, 19 p.
- CASTILLO SÁNCHEZ, V.; GONZÁLEZ BARBERÁ, G.; MOSCH, W.; NAVARRO CANO, J.A.; CONESA GARCÍA, C. y LÓPEZ BERMÚDEZ, F. (2002). Seguimiento y evaluación de los trabajos de restauración hidrológico forestal. En CAAMA (Ed.), *Seguimiento y evaluación de los efectos sobre el medio natural de la sequía y los procesos erosivos en la región de Murcia*. Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente de la Región de Murcia. Murcia. Cap. III, pp. 167-233.
- CASTILLO, V.; MOSCH, W.M.; CONESA GARCÍA, C.; GONZÁLEZ BARBERÁ, G.; NAVARRO, J.A.; LÓPEZ BERMÚDEZ, F. y BOIX FAYOS, C. (2005). Local erosion effects of check dams for soil erosion control in a semiarid catchment on marly lithology, SE Spain. In. *Sixth International Conference on Geomorphology*. The International Association of Geomorphologists & SEG, Zaragoza, September 7-11.
- CONESA GARCÍA, C.; BELMONTE SERRATO, F. y GARCÍA LORENZO, R. (2004). "Efectos de los diques de corrección hidrológico-forestal en la competencia y estabilidad de corrientes efímeras. Aplicación a la cuenca de la rambla de la Torrecilla (Murcia)". En C. Conesa García y J.B. Martínez Guevara (Eds), *Territorio y Medio Ambiente. Métodos Cuantitativos y Técnicas de Información Geográfica*, Asociación de Geógrafos Españoles y Universidad de Murcia, Murcia, pp. 69-83.
- CONESA GARCÍA, C. (2005). Los diques de retención en cuencas de régimen torrencial: diseño, tipos y funciones. *Nimbus. Revista de climatología, meteorología y paisaje*, Nº 13-14, 2004, pp. 125-142.
- CONESA GARCÍA, C.; GARCÍA LORENZO, R. y LÓPEZ BERMÚDEZ, F. (2007). "Bed stability variations after check dam construction in torrential channels (South-East Spain)". *Earth, Processes and Land Forms*, 32: 2165-2184.
- CONESA GARCÍA, C. y GARCÍA LORENZO, R. (2008). "The effectiveness of check dams on the control of general transitory bed scouring in semiarid catchment areas (South East Spain)", *Water and Environment Journal*. DOI:10.1111/j.1747-6593.2007.00099.x.
- CONESA GARCÍA, C. & GARCÍA LORENZO, R. (2009). "Bankfull hydraulic geometry adjustments caused by check dams in ephemeral channels (South-East Spain, Western Mediterranean)". In Hayes, W.P. & Barnes, M.C. (Eds.): *Dams: Impacts, Stability and Design*. Nova Science Publishers, Inc. New York. pp. 52-77.
- DACEY, M.D. y KRUMBEIN, W.C. (1979). Models of breakage and selection for particle size distributions. *Mathematical Geology, Best Paper Awards*, 11(2) 193-222.

- DUNJÓ DENTI, G. (2004). Developing a desertification indicator system for a small mediterranean catchment. a case study from the Serra de Rodes, Alt Empordà, Catalunya, NE Spain, Doctoral Thesis, Universidad de Girona, Unitat de Ciència del Sòl. Girona, 191 p.
- EMERY, K.O. (1938). Rapid method of mechanical analysis of sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, vol. 8, pp. 103-111.
- FOLK, R.L. (1974). *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill Publishing Compañing. Austin, TX, 170 p.
- FOLK, R.L. y WARD, W. (1957). Brazos river bar. a study on the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, vol. 27, pp. 3-26.
- FRIEDMAN, G.M. (1967). Dynamic processes and statistical parameters compared for size frequency distribution of beach and river sands. *Journal of Sedimentary Research*; June 1967; v. 37; no. 2; pp. 327-354
- FRIEDMAN, G.M., SANDERS, J.E., y KOPASKA-MERKEL, D.C. (1992). *Principles of Sedimentary Deposits. Stratigraphy and Sedimentology*. Macmillan Publishing Company, New York, 717 p.
- GABALDÓN, V. (1991). Plataformas siliciclásticas externas. Facies y su distribución areal. (Plataformas dominadas por tormentas). *Boletín Geológico y Minero, Publicaciones Especiales*, 1-93, Madrid.
- GARCÍA RUIZ, J.M. y PUIGDEFÁBREGAS, J., (1984). Efectos de la construcción de pequeñas presas en cauces anastomosados del pirineo central. *Cuadernos de Investigación Geográfica*. Tomo XI, fascículos 1 y 2, Logroño.
- GIBBS, R.J., MATTHEWS, M.D. y LINK, D.A. (1971). The relationship between sphere size and settling velocity. *Journal of Sedimentary Petrology*, vol. 41, No. 1, p. 7-18.
- HOBSON, R.D. (1979). Definition and use of the phi grade scale. Fort Belvoir, Virginia. U.S. Army Corps of Engineers Coastal Engineering Research Center. *Coastal Engineering Technical Aid*, num. 79- 7. 18 p.
- KING, D. y GALVIN, C.J. (2002). Coastal Sediment Properties. In Walton, T. (Ed.), *Coastal engineering manual*, Part III, *coastal sediment processes*, Chapter III-1, engineer manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC.
- LÓPEZ BERMÚDEZ, F. (1999). Summary Module 5, Medalus III Project. Universidad de Murcia.
- MARTÍN RAMOS, J.D. (1999). Programa PLV, versión (1990 y 1999). Fac. de Ciencias. Universidad de Granada.
- MARTÍNEZ CASTROVIEJO, R., INBAR, M., GÓMEZ VILLAR, A. y GARCÍA RUIZ, J.M., (1990). Cambio en el cauce aguas abajo de una presa de retención de sedimentos. *I Reunión nacional de Geomorfología*, 457-468, Teruel.

- MARTÍNEZ LLORIS, M., ROMERO DÍAZ, A., ORTIZ SILLA, R. y MARÍN SAN-LEANDRO, P. (2005). "Caracterización físico-química de los sedimentos retenidos en diques de corrección hidrológica y su relación con la degradación de los suelos. cuenca del río Quípar (sureste de España)". En Álvarez González, A y Jiménez Ballesta, R (ed). *Control de degradación de suelos*, coord., vol 1, pág. 707-711.
- MIALL, A. D. (1995). Description and interpretation of fluvial deposits. A critical perspective, Discussion. *Sedimentology*, v. 42, p. 379-384.
- MUTTI, E., DAVOLI, G., TINTERRI, R. y ZAVALA, C. (1996). The importance of ancient fluvio-deltaic systems dominated by catastrophic flooding in tectonically active basin. *Memorie di Scienze Geologiche*, 48. 233-291, Padua.
- MUTTI, E., TINTERRI, R., DI BIASE, D., FAVA, L. y MAVILLA, N. (2001). Asociaciones de facies de frente deltaico en sistemas fluvio-deltaicos fósiles dominados por avenidas fluviales. *Boletín de Informaciones Petroleras*, 3ª época, 18 (65) 18-44.
- POESEN, J.W.A. y HOOKE, J.M. (1997). Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environments of southern Europe. *Progress in Physical Geography* 21, 2. 157-199.
- PULIDO BOSCH, A.; SIMÓN, E.; MARTÍN ROSALES, W.; VALLEJOS, A.; PADILLA, A.; NAVARRETE, F. y PÉREZ PARRA, J. (1992). 'Efecto sobre el medio ambiente de los diques de retención en la vertiente sur de Sierra de Gádor (Almería)'. *V Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio. Problemática Ambiental y Desarrollo*. I, pp. 119-128. Murcia.
- ROMERO DÍAZ, A.; MARTÍNEZ LLORIS, M.; BELMONTE SERRATO, F. y HERNÁNDEZ LAGUNA, E. (2003). "La cuenca del río Quípar (Región de Murcia), una cuenca modelo para el estudio de utilidad de los diques de retención de sedimentos en el control de la erosión y en la recarga de acuíferos". *Nimbus. Revista de climatología, meteorología y paisaje nº 11-12*, Universidad de Almería pág. 89-106.
- SHEPARD, F.P. (1954). Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 24, p. 151-158.
- SEWARD-THOMPSON, B.L. y HAILS, J.R. (1973). An appraisal of the computation of statistical parameters in grain size analysis. *Sedimentology*, vol. 20, p. 161-169.
- SOTÁK, J. y STAREK, D. (2000). Synorogenic deposition of turbidite fans in the Central Carpathian Paleogene. Basin. evidence for and against sea-level and climatic changes. *Slovak Geological Magazine, Geological Survey of Slovak Republic*, 6 (2-3). 191-193, Bratislava.
- STOW, D.A.V. (1986). Deep Clastic Seas. In. Reading, H.G. (Ed.). *Sedimentary Environments and Facies*. Second edition, Blackwell Scientific Publications, 399-444, Oxford.
- STREET, L. y QUINTON, J.N. (2001). Development of an Ephemeral Gully Erosion Model. The Role of Undercutting in Bank Failure of Small Channels. pp. 338-341 in *Soil Erosion Research for the 21st Century*, Proc. Int. Symp. (3-5 January 2001,

Honolulu, HI, USA). Eds. J.C. Ascough II and D.C. Flanagan. St. Joseph, MI. American Society of Agricultural and Biological Engineers.

WHEATER, H. y AL-WESHAH, R.A. (2002). *Hydrology of wadi systems. IHP regional network on wadi hydrology in the Arab region*. IHP-V Technical Documents in Hydrology N° 55, UNESCO, París, 63 p.