

| | | | | |
|-------------------------|-------|----------|---------|---------|
| Cuadernos I. Geográfica | 22-23 | pp. 7-31 | Logroño | 1996-97 |
|-------------------------|-------|----------|---------|---------|

**UNA APROXIMACIÓN SEDIMENTOLÓGICA AL ATERRAMIEN-
TO DE EMBALSES Y LA EROSIÓN EN CUENCAS DE MONTAÑA:
El Embalse de Barasona y la cuenca del Ésera - Isábena
(Pirineos Centrales, Huesca).**

**BLAS L. VALERO GARCÉS¹
ANA NAVAS²
JAVIER MACHÍN²**

RESUMEN: El estudio sedimentológico del embalse de Barasona (Pirineos Centrales, Huesca) y su cuenca de drenaje ilustra la variabilidad espacial y temporal de los procesos de erosión, transporte y sedimentación en cuencas de montaña. El análisis de 20 sondeos y tres perfiles ha permitido caracterizar el sedimento, reconstruir tridimensionalmente el relleno del vaso y proponer un modelo deposicional dominado por las fluctuaciones en el régimen de aporte de los ríos. Las variaciones en la composición mineralógica aportan información sobre áreas fuente y procesos de erosión y transporte en la cuenca. Correlacionando los niveles de limos arenosos con los episodios de avenidas, se ha construido una cronología tentativa que permite evaluar variaciones en la dinámica del sistema embalse-cuenca durante las últimas cuatro décadas. Los parámetros físicos como topografía, litología y red de drenaje se revelan esenciales en la erosión del suelo. Sin embargo, nuestro estudio sugiere que el impacto humano a través de los usos del suelo puede amplificar los efectos causados por dichos factores. Un mejor conocimiento de la dinámica sedimentaria en los embalses ayudará a elaborar estrategias eficaces de gestión de recursos limitados como agua y suelo.

ABSTRACT: A sedimentologic study of the Barasona reservoir (Central Pyrenees, Huesca province) and its catchment basin illustrates the spatial and temporal evolution of depositional processes in mountain basins. We analyze the sediment composition, identify sedimentary facies, and reconstruct the tri-dimensional geometry of the reservoir based on 20 cores and 3 profiles. Most of the sediment load to the

1. Instituto Pirenaico de Ecología- EEAD, CSIC, Zaragoza.

2. Estación Experimental de Aula Dei, CSIC, Zaragoza.

Barasona reservoir is transported during flood events, which underlines the importance of the hydrologic regime of the rivers. Changes in mineral composition inform of sediment provenance and transport processes in the catchment area. A preliminary chronology based on the identification of floods in the sedimentary record (sandy silt layers) allow to investigate the interacciones reservoir-catchment and changes in sedimentation rates through the last four decades. Physical factors as topography, lithology and drainage patterns appear to be major controllers on soil erodibility. However, our study stresses the importance of human activity through changes in the use of the land. A better understanding of these processes is needed for suitable management of limited resources of soil and water and to alleviate reservoir sedimentation problems

Palabras clave: erosión, embalses, aterramiento, cuencas de montaña, Pirineos
Key words: erosion, reservoirs, siltation, mountain basins, Pyrenees

1. Introducción

La sedimentación en los embalses constituye un grave problema en la gestión eficiente de un recurso limitado como el agua al reducir drásticamente la capacidad de almacenamiento para la que fueron construidos. Los sedimentos acumulados son el producto final de procesos de erosión, transporte y sedimentación en las cuencas hidrológicas controlados por numerosos factores geológicos (litología, erodibilidad de materiales, estructura geológica), hidrológicos (régimen hídrico de los ríos), climáticos y antrópicos (cambios en los usos del suelo). Los registros sedimentarios en los embalses pueden, por tanto, utilizarse para reconstruir los procesos de las cuencas hidrológicas (DEARING & FOSTER, 1993). Por otra parte, la cuantificación del volumen de sedimentos depositados permite estimar las tasas de erosión media en las cuencas (SANZ MONTERO et al., 1996; COBO RAYÁN et al., 1996). Más de la mitad de los sesenta embalses españoles estudiados por SANZ MONTERO et al. (1996) tienen valores de degradación específica superiores a 150 t/km².año y el valor medio es de 429 t/km².año. El conocimiento de la historia sedimentológica de un embalse es un requisito previo para paliar los problemas de gestión derivados del aterramiento. En esta línea de aplicación del análisis sedimentológico a los depósitos de los embalses se han realizado estudios en el embalse de Puentes (Murcia) (COBO RAYAN et al., 1996). Este embalse ejemplifica como el propio régimen de explotación tiene una gran influencia en las variaciones de la tasa de sedimentación.

En este artículo presentamos los resultados de un estudio del relleno sedimentario del embalse de Barasona, uno de los más antiguos de España, y de su cuenca de drenaje de los ríos Esera e Isábena (Pirineo Aragonés, provincia de

Huesca) (Figura 1). La capacidad inicial del embalse, según datos de la Confederación Hidrográfica del Ebro, era de 71 Hm³ (cota de 442.67 m.s.n.m.) y se ha reducido en más de un tercio desde su construcción en 1932 (Figura 2).

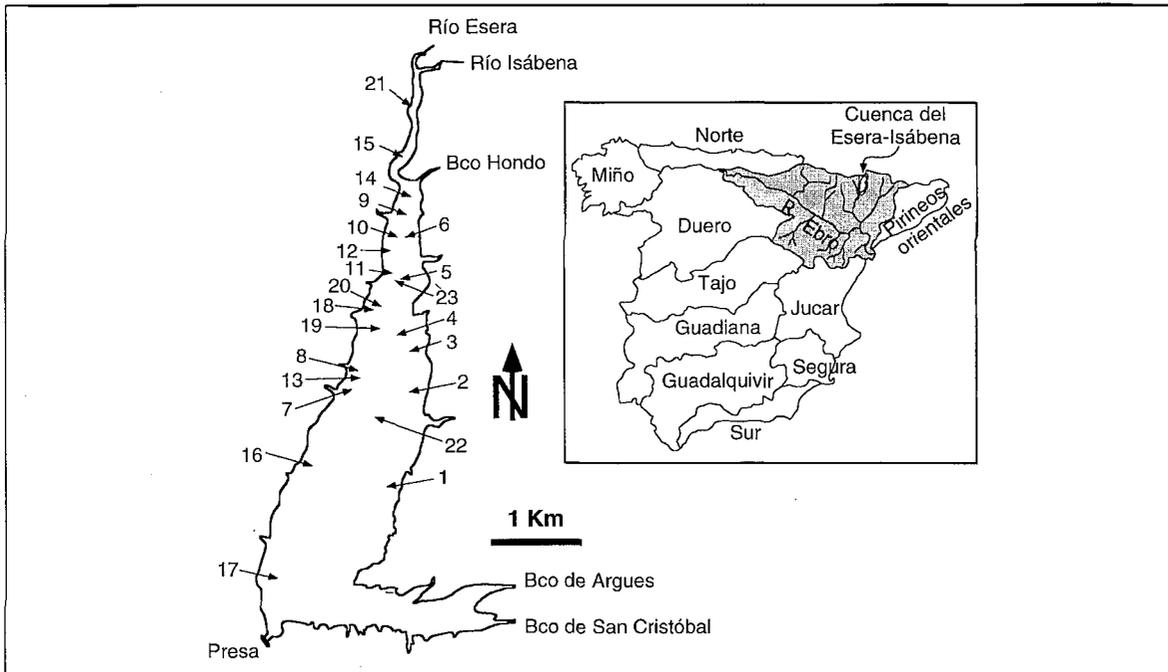
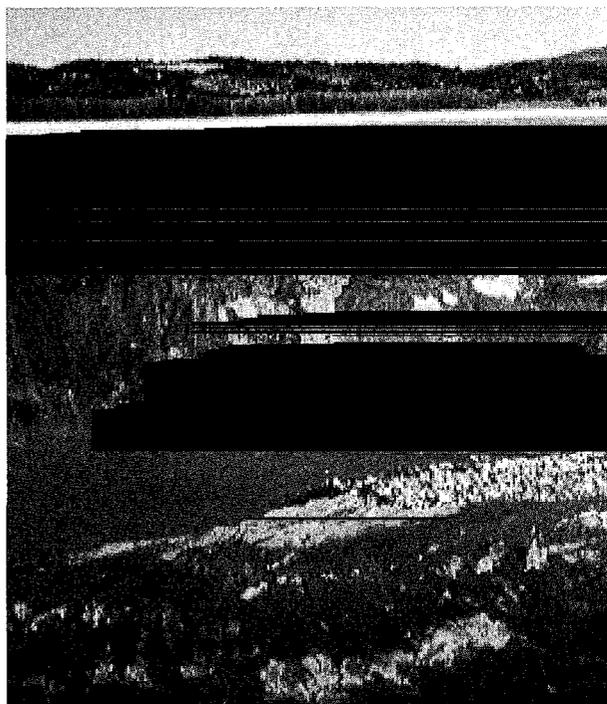


Figura 1. Localización de la cuenca del Esera - Isábena dentro de las cuencas hidrológicas de la Península Ibérica y mapa del embalse de Barasona con los sondeos de sedimentos utilizados en este trabajo.

Figura 2.
 Relleno sedimentario en la zona media del embalse de Barasona en septiembre de 1996. En la parte inferior afloran limos y gravas rojizas fluviales del Esera y en la parte superior los limos grises depositados en el embalse desde su construcción (potencia aproximada: 7 metros).



Mediante estudios batimétricos, se ha podido calcular el volumen total de sedimentos acumulados y se ha estimado el aporte medio de sedimentos al pantano en 350 t/km².año (SANZ MONTERO et al., 1996). El análisis de la cuenca del Esera - Isábena con técnicas de Sistemas de Información Geográfica y la aplicación de ecuaciones generales de erosión del suelo incluyendo factores de red de drenaje y litología sugiere diferencias en la tasa de aporte en distintas áreas dentro de la cuenca (FARGAS et al., 1996). Nuestra metodología pretende integrar la historia sedimentaria del embalse (VALERO GARCÉS et al., 1996) y la de la cuenca de drenaje (VALERO GARCÉS et al., 1997) e investigar las variaciones temporales en la tasa de aporte de sedimentos al pantano y la heterogeneidad espacial de las áreas fuente de sedimentos en la cuenca.

2. La cuenca del Esera- Isábena y el embalse de Barasona.

Geología. La cuenca de drenaje del embalse de Barasona se extiende desde las altas cumbres del Pirineo al Norte hasta la sierras pre-pirenaicas al Sur (Figura 3) y comprende cuatro unidades morfoestructurales pirenaicas con una orientación Este - Oeste (MENSUA, 1981): Zona Axial, con las máximas alturas de la Cordillera (Aneto, 3408 m); Sierras Interiores (Turbón, 2492 m), Depresión Intermedia (Depresión de Campo) y Sierras Exteriores (Sierra de Carrodilla, 1049 m). En la zona axial afloran materiales ígneos en batolitos graníticos y granodioríticos rodeados por una orla de rocas metamórficas y materiales sedimentarios paleozoicos (MEY, 1967; RIBA, 1972). Las Sierras Interiores están constituidas por materiales carbonatados mesozoicos y terciarios. La Depresión Intermedia, al contrario que en el Pirineo Occidental, no existe como gran unidad estructural y en el Sobrarbe y la Ribagorza se sustituye por pequeñas depresiones resultado del afloramiento de materiales más fácilmente erosionables: la de Las Paúles sobre materiales pérmicos y triásicos y la de Viu-Campo-Torre de la Ribera sobre margas del Cretácico medio. Las Sierras Exteriores que limitan al sur la cuenca se componen mayoritariamente de materiales carbonatados y clásticos del Terciario.

Clima y vegetación. El clima es de montaña, húmedo y frío, con influencias atlánticas y mediterráneas continentales (ASCASO & CUADRAT, 1981). Las precipitaciones varían desde más de 2000 mm/año en cabecera del río Esera hasta menos de 500 mm en los alrededores del embalse (488 mm/año en la Puebla de Castro). Debido a la influencia mixta tanto atlántica como mediterránea, los máximos pluviométricos de otoño e invierno típicos de los valles pirenaicos occidentales y el máximo estival del Pirineo catalán no están tan marcados. Las temperaturas medias dependen de la altitud y varían entre los 4 °C de las cumbres pirenaicas, los 10-12°C en las depresiones intermedias y los 10°C en las Sierras Interiores.

UNA APROXIMACIÓN SEDIMENTOLÓGICA AL ATERRAMIEN TO DE EMBALSES

Las zonas fitoclimáticas (MENSUA, 1981b) comprenden pisos alpinos (prados y roquedo), subalpinos (pino negro y matorral) y pinares subpirenaicos en el Pirineo axial y sierras interiores, y el piso submediterráneo (quejigo) en las depresiones intermedias y las sierras exteriores. De acuerdo con los datos elaborados por la Confederación Hidrográfica del Ebro (Directrices del Plan hidrológico de la cuenca del Ebro, 1993), más del 50 % de la superficie de la cuenca del río Esera está cubierta de bosque, el 12 % corresponde a cultivos, el 9 % a pastizal y el 11% a prado natural. MANRIQUE et al. (1987) a partir de las estadísticas municipales confeccionan mapas de usos del suelo en la comarca de la

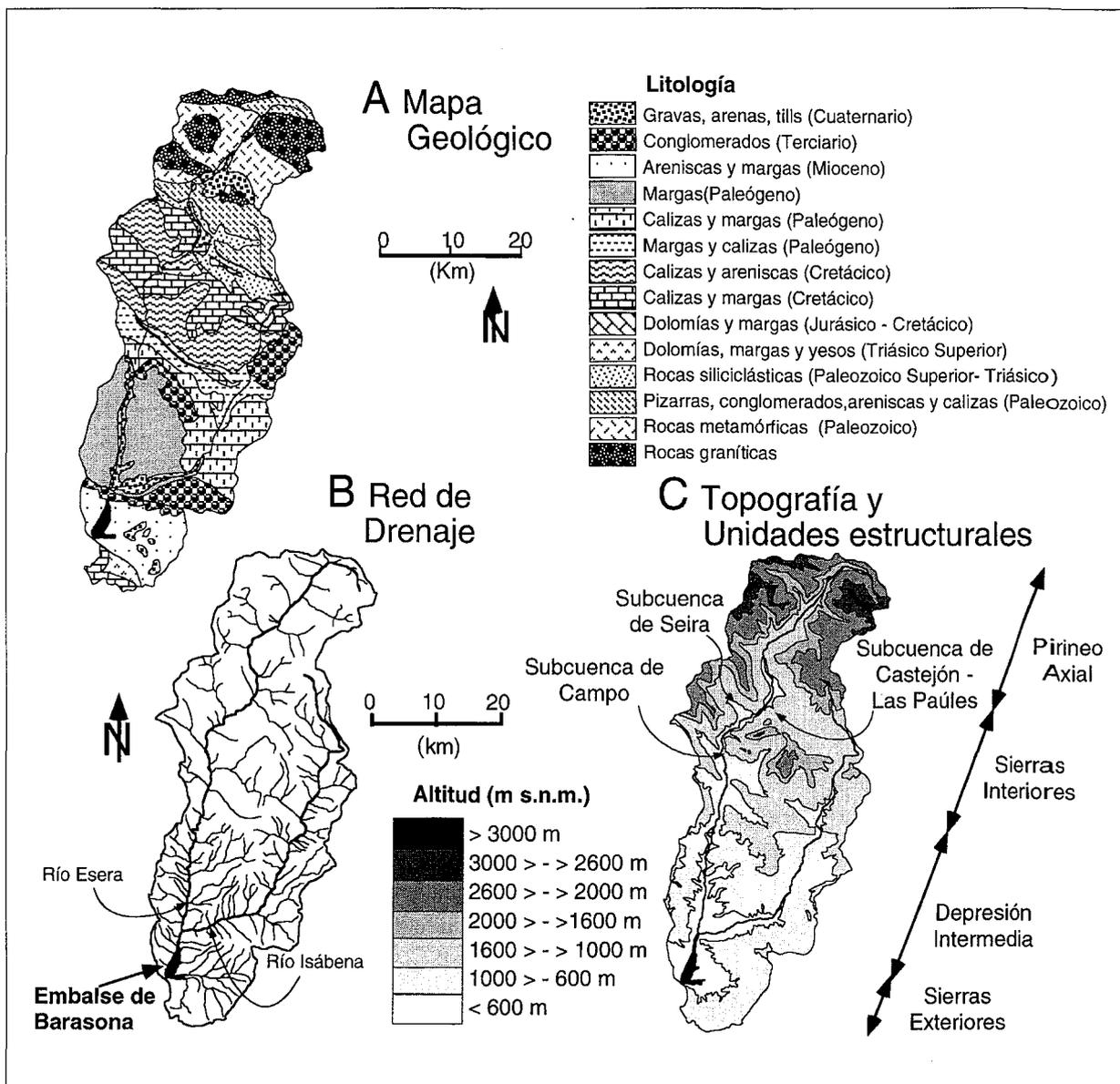


Figura 3. La cuenca del Esera - Isábena: geología, red de drenaje, topografía y unidades estructurales.

Ribagorza que muestran la heterogeneidad de la vegetación y el impacto humano en la cuenca del Esera - Isábena (Figura 4).

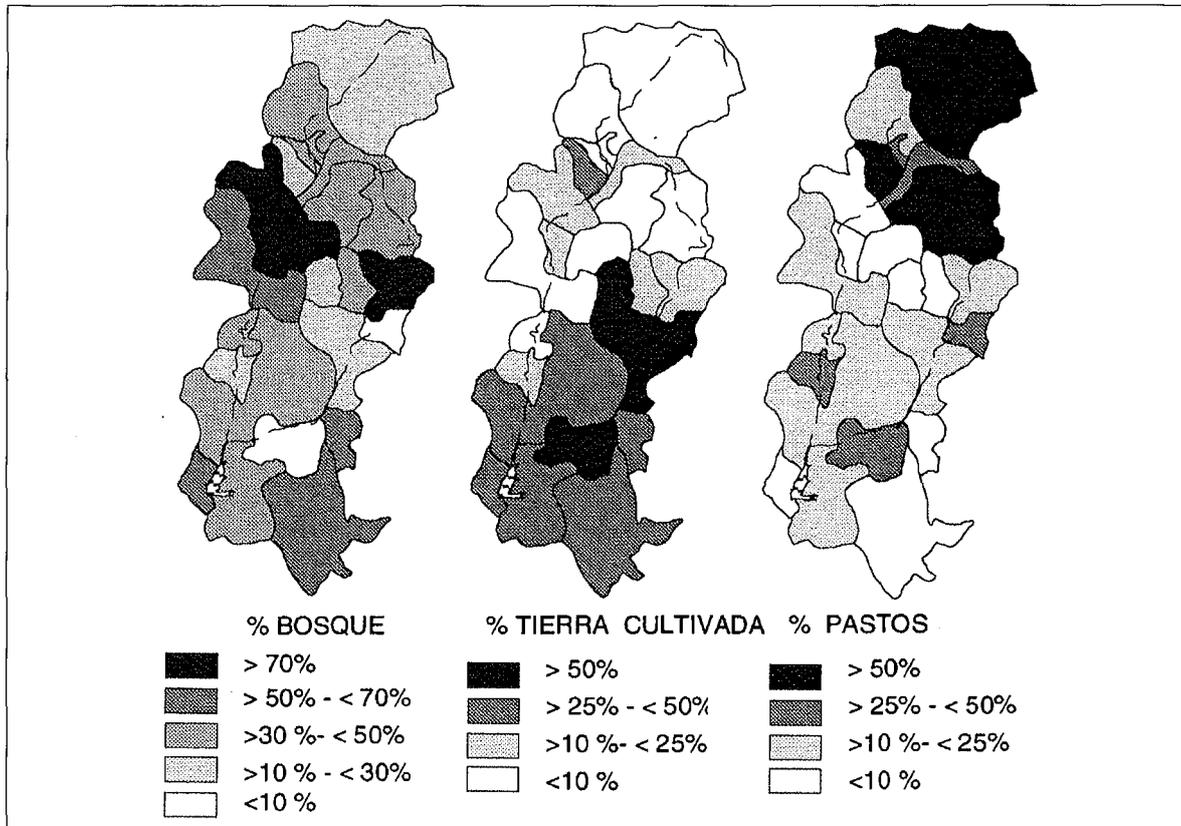


Figura 4. Mapa de usos del suelo en la cuenca del Esera - Isábena basado en datos de MANRIQUE et al. (1987).

Hidrología. La cuenca de drenaje del embalse de Barasona es de 1224 km² y está articulada en torno a los ríos Esera e Isábena. El río Esera presenta un régimen nival de transición caracterizado por dos máximos y dos mínimos (MARÍN, 1981). Los caudales máximos ocurren a finales de la primavera y comienzos del verano, siendo junio el mes con mayores caudales debido a la fusión de las nieves. Un máximo secundario aparece a mitad del otoño (noviembre) coincidiendo con la mayor abundancia de precipitaciones en climas de influencia mediterránea. Es en invierno cuando hay un mayor déficit de esorrentía debida a la acumulación nival. En verano se registra un mínimo secundario debido a la menor precipitación. El río Isábena tiene un régimen pluvio-nival con dos máximos: uno en el centro de la primavera (abril - mayo) en el que coincide la máxima precipitación con la fusión de las nieves y otro en los meses de otoño coincidiendo con la pluviometría más abundante. El mínimo se produce en los meses estivales.

Las crecidas muestran una distribución irregular debido al carácter transicional del régimen pluviométrico. En el Esera las crecidas son de comienzos y fina-

les de primavera y otoñales. En el mes de marzo en el Cinca, Gállego y Noguera es cuando se da el mayor porcentaje de fenómenos de crecida debido a las abundantes precipitaciones y a la fusión de las nieves. Las crecidas en junio corresponden a fenómenos tormentosos que pueden fundir nieve en las altas montañas; finalmente un tercer periodo de crecidas ocurre con las lluvias mediterráneas de octubre y noviembre.

En el río Esera, la abundancia de pendientes altas y los numerosos estrechos originan una rápida acumulación del agua escurrida que favorece la creación de intensas crecidas en cortos intervalos de tiempo. De acuerdo con el informe del río Esera elaborado para el Plan Hidrológico Nacional por la CHE (1993), en la cuenca del río Esera existen ocho avenidas registradas desde 1892. Los fenómenos extremos (inundaciones) se producen asociados a lluvias de comienzos de verano (1925, 1960), tormentas estivales (1963), o mayoritariamente a las lluvias torrenciales otoñales asociadas al fenómeno de la gota fría (1960, 1965, 1976, 1982, 1984).

3. Métodos

En el embalse se han muestreado 20 sondeos y 3 perfiles sedimentarios durante varias campañas de campo en el verano de 1995 cuando el embalse estaba prácticamente seco. Se utilizó un sistema dotado de un martillo percutor y una pala retroexcavadora que permite extraer testigos continuos de unos 60 cm de longitud. Los sondeos fueron descritos litológicamente en el campo y muestreados a intervalos de 5 cm. En el caso de los sondeos B-18 y B-22 se procedió a su extrusión en el campo y traslado al laboratorio para su posterior descripción y muestreo. Además se describieron y muestrearon tres perfiles en afloramientos a lo largo del curso del río Esera (B-20, B-21 y B-23) (Figura 1).

Después de las intensas lluvias del invierno de 1996 se procedió a un muestreo de aguas y sedimentos de la cuenca de drenaje del embalse (Esera - Isábena). Muestras de un litro de agua se tomaron el 28 de Febrero de 1996 a unos 10 cm del fondo de los ríos, y fueron filtradas y pesadas para calcular la concentración de sedimento en suspensión.

Las técnicas de laboratorio utilizadas en el estudio sedimentológico de los sondeos son las siguientes: 1) Descripción de visu de los sondeos. 2) Análisis del contenido en carbonatos (calcimetrías con ácido clorhídrico y valoración con hidróxido sódico) y materia orgánica (calcinación a 550 °C). 3) Análisis mineralógico de los sedimentos realizado mediante un difractómetro Siemens D-500, provisto de monocromador de grafito, detector de centelleo y tubo de cobre, trabajando a 40 Kv y 30 mA. Las muestras no sufrieron preparación previa, solamente molienda en mortero de ágata hasta conseguir un polvo homogéneo. A partir de las intensidades de los picos principales, y aplicando los factores de reflectantes característicos de cada mineral se calcularon los porcentajes de los

distintos minerales presentes. Los resultados son semicuantitativos y la precisión es aproximadamente del 5% (TUCKER, 1988). 4) Granulometría por analizador láser de partículas. Sesenta muestras del sondeo B-18 fueron seleccionados para determinar su tamaño de grano con un analizador de partículas Malvern. Las muestras fueron desagregadas con pirofosfato sódico y después sometidas a un ataque con agua oxigenada a 50 ° C para eliminar la materia orgánica y un tratamiento con ultrasonidos para conseguir su total desagregación.

4. Resultados y Discusión

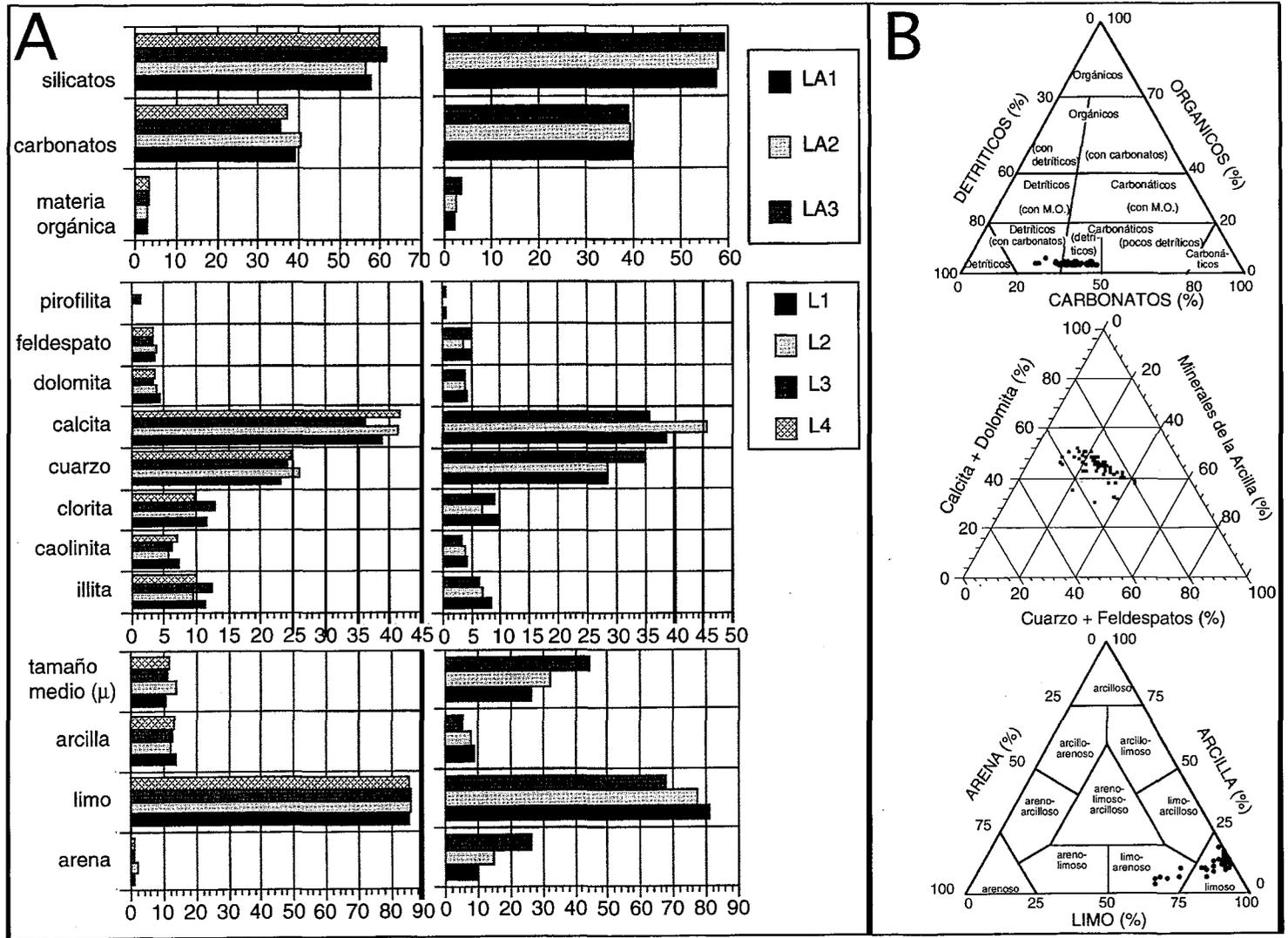
4.1. El registro sedimentario del embalse de Barasona.

4.1.1. Descripción general del sedimento.

Para la descripción sedimentológica de los materiales se seleccionó el sondeo B-18 tanto por su localización en la zona media del embalse como por tratarse de un sondeo continuo que se trasladó al laboratorio sin alterar. Los valores medios de la distribución granulométrica de los sedimentos del sondeo B-18 (limo, 83.5 %; arcilla, 11.5 %; arena, 5%) muestran un dominio de la fracción limo (90 % del sedimento es menor de 39 μ y el 50 % es menor de 15 μ). El tamaño medio oscila entre 8 y 50 μ (media 17 μ) (Figura 5). La mayoría de los sedimentos se clasifican como limos (> 75 % fracción limo; media 83 %) y sólo algunas intercalaciones corresponden a limos arenosos (25-40% fracción arena). El contenido medio en fracción arcilla es del 12 %, aunque aumenta en algunos niveles hasta el 20 % (media 12 %).

Los sedimentos están compuestos por carbonatos (38%), silicatos (59%) y materia orgánica (3%). El contenido en carbonatos, que oscila entre el 25 y el 50 %, puede llegar a ser mayoritario en algunos niveles (Figura 5). Los máximos corresponden tanto a facies de limos arenosos como de limos, lo que sugiere que las partículas carbonatadas tienen similar distribución en todas las clases granulométricas. El contenido en materia orgánica de los limos es en torno al 3-4 %. Son las facies de limos arenosos las que contienen los valores extremos: menos del 2 % y más del 5 %. Estos valores máximos se deben a la presencia de fragmentos vegetales transportados por el río en épocas de avenida, lo que sugiere que el componente alóctono de materia orgánica en los sedimentos es muy importante. La mayoría de los sedimentos se clasifican como limos carbonáticos con detríticos y sólo algunas muestras de limos arenosos corresponden por su composición a limos detríticos con carbonatos.

Los minerales detectados por difracción de rayos X son: cuarzo, feldspatos, illita, caolinita, clorita, calcita, dolomita, yeso y pirofilita. Los minerales del grupo de los carbonatos (calcita y dolomita) suponen del 30 al 50 % del total; los mine-



UNA APROXIMACIÓN SEDIMENTOLÓGICA AL ATRRAMIENTO DE EMBALSES

Figura 5. A. Composición mineralógica y granulometría de las distintas facies sedimentarias definidas en el sondeo B-18.
B. Diagramas ternarios de composición media de los sedimentos del embalse de Barasona.

rales de la arcilla (cloritas, caolinitas, illitas, pirofilita) entre un 10 y un 40 % y cuarzo y feldespatos entre un 20 y un 40 %. La calcita es el mineral mayoritario (39 % media), siempre presente al menos en un 25 % (Figura 5). Este amplio rango (24-46 %) y su distribución similar en todas las facies confirma que es un mineral alóctono, transportado en granos minerales por los ríos Esera e Isábena al embalse. La dolomita está en valores generalmente inferiores al 5%, lo que está de acuerdo con la escasa proporción de dolomías en la cuenca de drenaje. El cuarzo es el siguiente componente mayoritario (25 % media; rango: 15-38 %), y aunque aparece en mayor proporción en las facies de limos arenosos, está presente en todas las fracciones granulométricas. Los filosilicatos del grupo de los minerales de la arcilla (illita, clorita y caolinita) tienen amplios rangos debido a su menor presencia en las facies de granulometría más gruesa (< 5 %) y a su mayor acumulación en los limos finos (> 15% en illita y clorita). La caolinita no supera nunca el 10 %. No hay procesos de neoformación de arcillas en el embalse y todos los minerales de la arcilla son igualmente transportados.

Una mención aparte merece la presencia de pirofilita (3 - 6 %) en varios niveles en el sondeo B-18 y también en los B-19, 20 y 21. La pirofilita es un mineral con una distribución muy restringida, ya que se trata de un filosilicato índice de metamorfismo de la anquizona o epizona, comunmente en pizarras metamorfiadas de bajo grado. No se han realizado estudios en detalle de la composición mineral de los sedimentos paleozoicos en el valle del Esera, sin embargo, trabajos en el Pirineo aragonés occidental (SUBIAS PÉREZ et al., 1990) identifican el Devónico Inferior como única área fuente. En la cabecera del río Gállego, de toda la serie devónica y carbonífera, sólo un tramo pizarroso a techo del Devónico inferior contiene abundante pirofilita (hasta un 25 % del total de los minerales de la arcilla). Facies similares a este nivel guía del Pirineo Occidental, aparecen también en la cabecera de los ríos Esera e Isábena (MEY, 1967). Las series pérmicas y triásicas de la cuenca de Las Paúles no contienen pirofilita (VALERO GARCÉS, 1992), con lo que la posible área fuente se restringe a las cabeceras del Esera e Isábena donde aflora el Devónico Inferior. Esta restricción geográfica confiere a la pirofilita un carácter de trazador del origen de los sedimentos dentro de la cuenca, confirmada por los resultados preliminares del estudio de los sedimentos presentes en los cauces de los ríos (véase más adelante).

El yeso aparece exclusivamente en los niveles superiores del relleno del embalse en el sondeo B-18. Debido a su elevada solubilidad, el transporte de partículas de yeso desde suelos salinos o afloramientos de formaciones geológicas con yesos (facies Keuper, y facies del Terciario continental) es poco probable. Consideramos que este yeso es autigénico, formado en las pequeñas balsas que quedan en el embalse durante el verano y que son sometidas a una intensa evaporación hasta que desaparecen. En estas condiciones, las aguas se concentran y pueden alcanzar la saturación en sulfato cálcico, con la consiguiente precipi-

tación de yeso. El yeso puede formarse también en los sedimentos superiores del embalse por procesos de bombeo evaporítico en la zona capilar. Debido al carácter lábil de este mineral y a su escasa presencia, es disuelto cuando el embalse se llena de agua y no se conserva en el registro sedimentario.

4.1.2. Facies sedimentarias y modelo sedimentológico.

Facies sedimentarias. En el embalse de Barasona se han definido facies sedimentarias utilizando como criterios el tamaño de grano, contenido en carbonatos y materia orgánica, composición mineralógica, color y estructuras sedimentarias (Figura 6). En los 20 sondeos y 3 perfiles estudiados se han definido cinco macrofacies: 1. gravas, arenas y limos rojos; 2. limos rojos con cantos dispersos; 3. conglomerados de cantos blandos limosos; 4. limos grises arenosos y 5. limos grises.

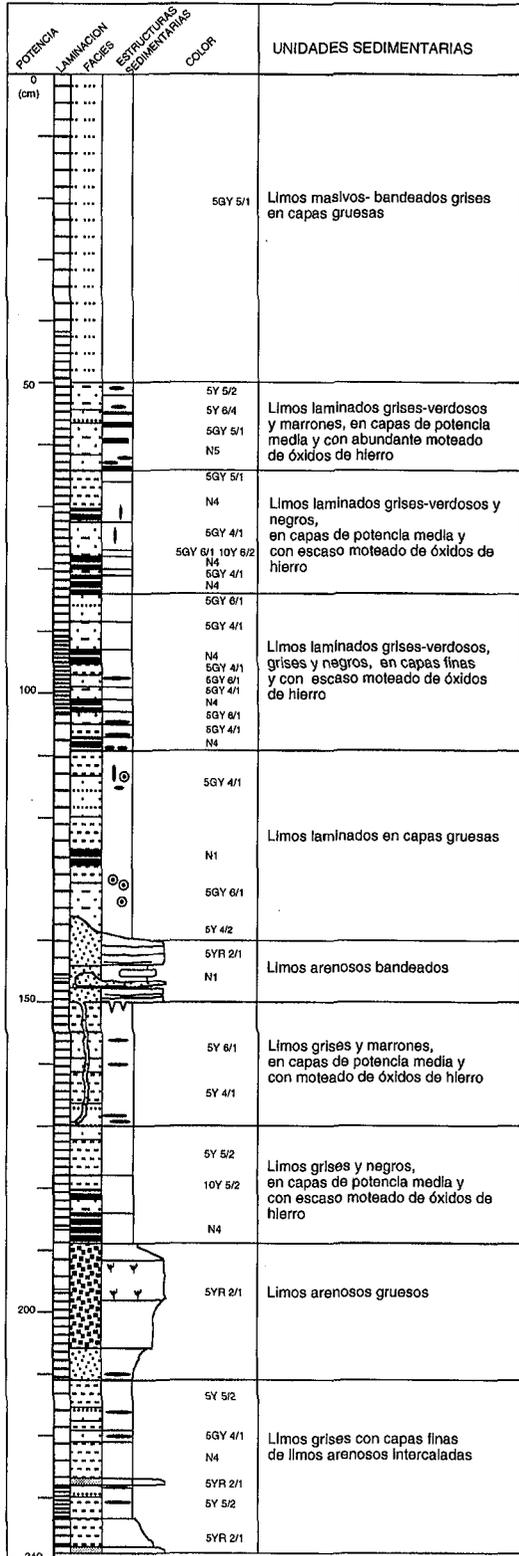
Las facies de gravas, arenas y limos rojos aparecen en las zonas más litorales del vaso del embalse (sondeos B-8, 13, 1) y en la base de algunos sondeos de la zona media (B-7, 11, 15, 16). La composición mineralógica de la fracción arena de estas gravas es similar a la de las arenas que constituyen el relleno del embalse. Estas facies corresponden a depósitos fluviales (terrazas, barras) del río Esera, anteriores a la construcción del embalse.

Las facies de limos rojos con cantos dispersos se han encontrado en los sondeos B-7, 16 y 17 y se han interpretado como depósitos coluviales provenientes de los materiales detríticos terciarios que limitan el embalse por el oeste. Al igual que las facies de gravas, constituyen el sustrato sobre el que se depositaron los sedimentos limosos propios de la nueva dinámica sedimentaria inaugurada con la construcción del embalse.

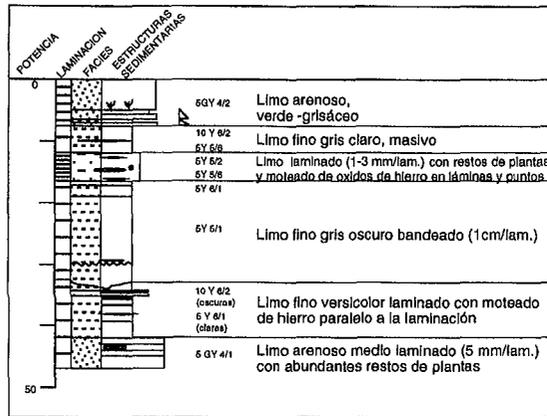
Los conglomerados de cantos blandos son una facies de distribución restringida (perfil B-23) pero de gran interés para comprender la dinámica sedimentaria del relleno del embalse. Aparecen en lentejones de hasta 1 m de potencia en las cercanías del cauce del Esera y están compuestos por cantos subredondeados y redondeados de 10 - 15 cm de diámetro y una matriz de limo arenoso o limo. La textura es clasto-soportada y los cantos son de limo consolidado procedente del propio embalse. Estas facies se interpretan como resultado de la erosión de los sedimentos del embalse durante periodos de aguas bajas. La incisión del río Esera en los sedimentos provoca un talud de varios metros de altura, muy inestable que va desplomándose sobre el cauce del río y proporcionando los fragmentos de limo que son retrabajados. Las partículas más finas serán movilizadas en suspensión hacia áreas cercanas a la presa, mientras que los clastos son arrastrados por el río y forman lentejones conglomeráticos.

Las facies de limos arenosos y limos rellenan el vaso del embalse. Los limos arenosos tienen un tamaño medio de 35 μ frente a las 12 μ de los limos y el por-

SONDEO: B-18



SONDEO: B-22



MACROFACIES SEDIMENTARIAS

- Limos finos
- Limos **EMBALSE**
- Limos arenosos
- Conglomerados de cantos blandos
- Gravas, arenas y limos **FLUVIALES**
- Arenas y limos **GLACIS, COLUVIALES**

FACIES SEDIMENTARIAS (Perfil B-18)

- L: Limos masivos- bandeados grises
- L1: Limos laminados grises-verdosos
- L2: Limos laminados grises
- L3: Limos laminados negros
- L4: Limos laminados marrones
- LA1: limos arenosos bandeados
- LA2: Limos arenosos masivos
- LA3: Limos arenosos gruesos bandeados

ESTRUCTURAS SEDIMENTARIAS

- Fragmentos vegetales
- Moteados de óxidos de hierro
- Decoloraciones grises-verdes
- Grietas de desecación
- Superficies erosivas

LAMINACION:

- Masivo
- Bandeado (>1cm)
- Finamente laminado (< 1cm)

Figura 6. Descripción sedimentológica de los sondeos B-18 (zona septentrional del embalse) y B-22 (centro del embalse).

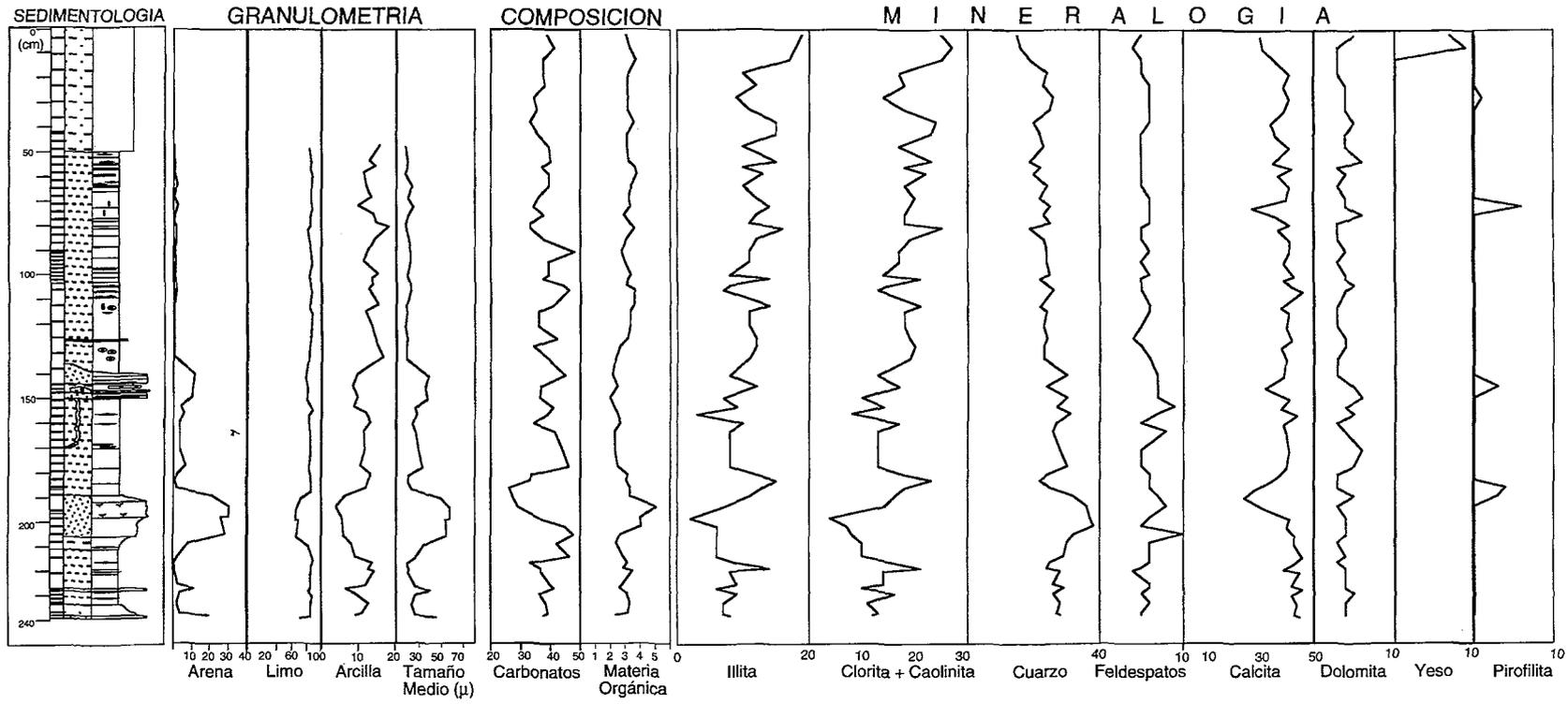


Figura 7. Caracterización sedimentológica, granulométrica, composicional y mineralógica del sondeo B-18.

centaje de fracción arena es del 17 % y <2% respectivamente. En general, las dos macrofacies son similares en cuanto a componentes mayoritarios, aunque los limos arenosos tienen menos materia orgánica y más carbonatos que los limos (Figura 5). Respecto a la mineralogía, los limos arenosos tienen contenidos ligeramente mayores en feldespatos, dolomita y calcita y claramente superiores en cuarzo. Los minerales de la arcilla siempre están en proporciones mayores en los limos. La composición mineral está, por lo tanto, íntimamente ligada a la granulometría: en los limos predomina el transporte en suspensión y el depósito por decantación, con el consiguiente incremento en materiales finos y filosilicatos; en los limos arenosos, el transporte por arrastre de carga de fondo es más importante y de ahí que predominen partículas minerales más gruesas o de menor flotabilidad por sus características hidrodinámicas, como granos subredondeados de cuarzo y carbonatos.

Hemos distinguido tres facies de limos arenosos de acuerdo con el tamaño de grano y con las estructuras sedimentarias: limos arenosos finos (LA1), limos arenosos intermedios (LA2) y limos arenosos gruesos (LA3) (Figura 5). Las intercalaciones de varios decímetros de potencia agrupan varias de estas facies y fueron depositados por flujos complejos con variaciones temporales en sus parámetros hidrodinámicos (Figura 6). Estas facies se interpretan como depósito de avenidas de larga duración (varios días a semanas) en el embalse. El incremento de materia orgánica está claramente ligado a la presencia de restos vegetales (plantas, fragmentos de ramas de hasta varios cm) transportados. Las intercalaciones de menor potencia (< 1 cm) corresponden a limos arenosos intermedios (LA2) y presentan límites inferiores netos, erosivos y límites superiores graduales a las facies de limos grises. La estructura interna es granodecreciente. Tanto la reducida potencia como el carácter granodecreciente indican que estos limos se depositaron como resultado de la pérdida paulatina de capacidad de transporte de un único episodio de flujo.

En el sondeo B-18 hemos definido cuatro subfacies dentro del grupo de los limos que identificamos por el color dominante (Figuras 6 y 7): limos verdes (L1), grises (L2), negros (L3) y marrones (L4) y cuyas propiedades quedan resumidas en la Figura 5A.

En el reconocimiento efectuado en el verano de 1995, los sedimentos superficiales del delta de cola estaban dominados por arenas y limos arenosos, contrastando con el carácter limoso del resto de la superficie del embalse. La potencia del relleno varía desde más de 4 metros en la zona media, pasada la desembocadura del Isábena (perfil B-21) hasta menos de 2 metros en la margen derecha del meandro del cementerio (sondeo B-15). Aguas abajo, (sondeos B-14 y B-9) la potencia vuelve a aumentar (> 2.5 metros, Figura 1). Todas estas características sedimentológicas indican un ambiente dominado por los procesos tractivos fluviales en el que los episodios de alta energía (crecidas) quedan marcados

UNA APROXIMACIÓN SEDIMENTOLÓGICA AL ATERRAMIENTO DE EMBALSES

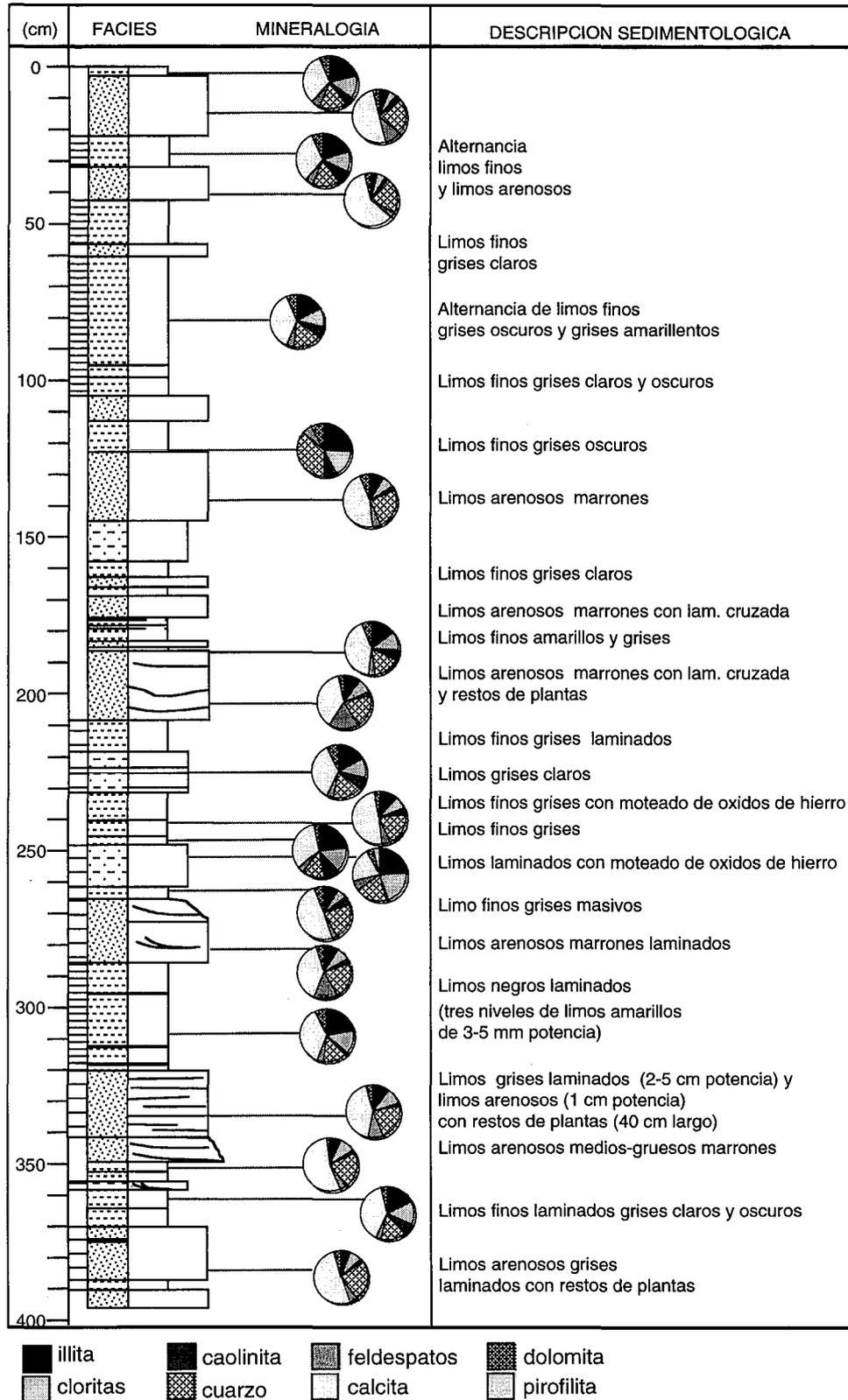


Figura 8. Descripción sedimentológica y composición mineral de afloramiento B-21 en la cola del embalse de Barasona.

por secuencias granodecrecientes complejas. La mayor potencia en este tramo de la cola del embalse sería debida a la rápida pérdida de energía experimentada por los flujos fluviales al alcanzar el embalse, con la consiguiente disminución de la capacidad de carga y el depósito del material transportado por arraste y carga de fondo.

Los torrentes laterales que desembocan en el embalse de Barasona son escasos y de régimen esporádico. Su contribución al relleno del embalse no está determinada, aunque puede ser significativa localmente. Durante los periodos de aguas bajas pueden reconocerse lóbulos de sedimentación de pequeños deltas de potencia decimétrica compuestos por limos finos rojizos.

Existe una marcada asimetría entre el depósito sedimentario en la margen derecha (oriental) e izquierda (occidental) del vaso del embalse y también entre la zona septentrional y meridional controlado por el carácter más o menos escarpado de las paredes del vaso y la amplitud del valle del Esera. Esta asimetría de la zona litoral y la mayor acumulación de sedimentos siguiendo el eje del curso sumergido del Esera sugiere que el cauce fluvial no es inactivo durante las épocas de aguas altas y que contribuye a canalizar y redistribuir los sedimentos más gruesos. También es un subambiente sedimentario muy activo durante los periodos de aguas bajas canalizando hacia áreas interiores del embalse antiguos sedimentos erosionados por la incisión del cauce.

La llanura de fondo del valle del río Esera es el ambiente sedimentario volumétricamente más importante del embalse. La presencia de capas de limos arenosos en el área central (B-22, Figuras 1 y 6) muestra la elevada capacidad de transporte de las avenidas dentro del embalse e indica que el transporte por tracción sigue siendo prioritario en la zona media del embalse cercano al cauce del Esera. Cuando el embalse se encuentra con una elevada lámina de agua, las arenas y limos arenosos son retenidos en la cola del embalse. Sin embargo, durante los periodos de baja lámina del agua (fines de verano), las avenidas provocadas por tormentas pueden arrastrar sedimentos más gruesos hasta zonas más interiores del pantano. Finalmente, el arrastre de materiales por el cauce del río Esera es el responsable de la acumulación de varias decenas de metros de sedimentos finos en la boca del embalse.

Modelo sedimentológico. El embalse de Barasona constituye un ambiente sedimentario en el que predominan los procesos físicos. Los sedimentos son aportados al embalse fundamentalmente en periodos de crecidas o avenidas y redistribuidos con posterioridad. En el delta de cola, más de la mitad de los sedimentos son limos arenosos depositados durante avenidas (Figura 8). El limo que se deposita por decantación en áreas más internas, también ha sido removilizado durante épocas de avenidas. La práctica totalidad del sedimento acumulado es alóctona. La productividad orgánica en el embalse no es conocida, pero una elevada proporción de la materia orgánica acumulada en los sedimentos es de ori-

gen alóctono. La dinámica sedimentaria está controlada por las variaciones en las propiedades hidrodinámicas del flujo de ambos ríos a la entrada del embalse. Dos son los parámetros esenciales: 1.- las características del flujo antes de desembocar en el embalse, determinado esencialmente por el caudal que depende a su vez del régimen hídrico estacional de los ríos y 2.- las variaciones en el flujo inducidas por la pérdida de energía al entrar en el embalse con la consiguiente disminución en capacidad de carga. Debido a la morfología elongada Norte-Sur del embalse de Barasona siguiendo el curso sumergido del río Esera, y a la ausencia de otros cursos de agua significantes que desemboquen en el embalse, la redistribución interna de sedimentos se realiza siguiendo el eje mayor del embalse.

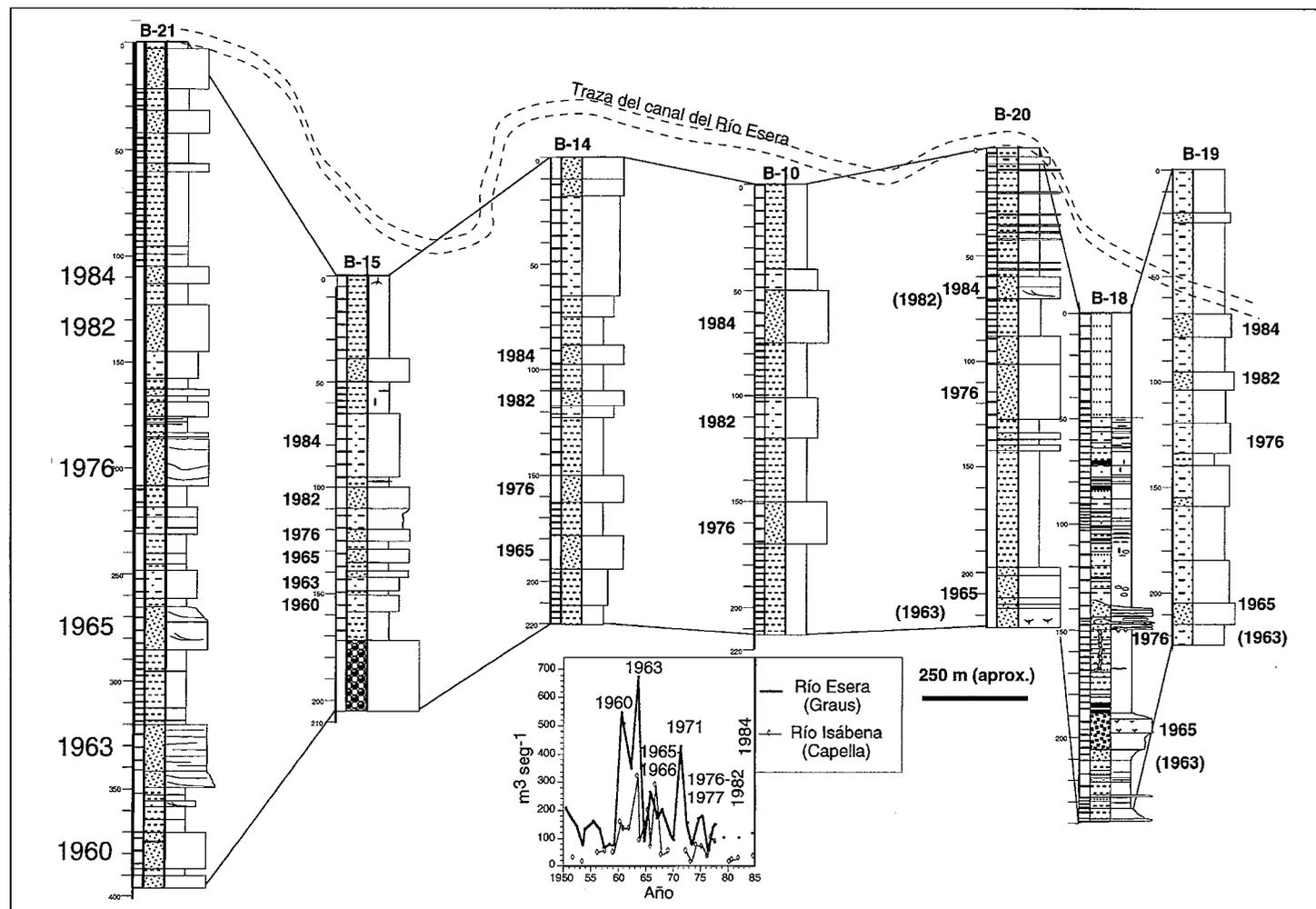
Las crecidas de los ríos Esera e Isábena son por lo tanto los principales agentes sedimentarios en el embalse. Durante las crecidas de los ríos Esera e Isábena los procesos predominantes son: 1) transporte por tracción (carga de fondo, saltación) de arenas y limos y por suspensión de las partículas finas; 2) depósito de capas de arenas y limos arenosos. En los periodos de aguas altas predomina el transporte por suspensión y el depósito de las partículas finas por decantación. La precipitación de carbonato en el embalse no ha sido cuantificada, pero no parece una fuente significativa en el caso de Barasona, al contrario de lo que ocurre en otros embalses como el de Puentes donde hasta el 50 % de los carbonatos de las facies de margas han precipitado dentro del embalse (COBO RAYAN et al., 1996).

Los procesos sedimentarios más importantes que suceden en el embalse durante los periodos de exposición subaérea son los siguientes: 1) formación autigénica de yesos; 2) agrietamiento de la superficie de los limos y relleno parcial de las grietas de desecación; 3) transporte eólico en superficie de limos y arenas; 4) incisión del cauce del Esera, caída de bloques en el talud; 5) erosión, transporte y depósito de materiales del embalse por el río Esera (removilización de limos, conglomerados de cantos blandos).

Los procesos químicos autigénicos son de escasa entidad. Sólomente se ha detectado la formación de yeso durante épocas de exposición subaérea en muy pequeñas cantidades (sondeo B-18) y que posteriormente son redisueltos. Los procesos diagenéticos más significativos son la compactación física de los sedimentos y la removilización del hierro debido al cambio en las condiciones redox del sedimento.

4.1.3. Evolución temporal del relleno sedimentario.

De acuerdo con nuestro modelo sedimentológico, las avenidas son las responsables del depósito de capas de arenas y limos arenosos en las zonas del delta de cola y en la parte más septentrional del embalse. La identificación de las capas de arenas más importantes en los sondeos permite una ordenación



BIAS I. VALERO GARCÉS - ANA NAVAS - JAVIER MACHÍN

Figura 9. Correlación entre los principales sondeos e intento de cronología del relleno del embalse del Barasona. Los caudales máximos instantáneos en los ríos Esera e Isábena en las estaciones de aforo más cercanas al embalse definen las principales avenidas. La capa de limos arenosos más gruesa de la cola del pantano se asigna a la mayor avenida (1960) y las capas suprayacentes correlativamente a las sucesivas avenidas.

temporal relativa de los episodios de avenidas. A partir de los registros de las avenidas en la cuenca del Esera-Isábena desde la construcción del embalse hemos intentado correlacionar los intervalos de arenas con avenidas.

Los datos de caudales instantáneos máximos del río Esera en Villanova, Eriste y Graus y el río Isábena en Capella, permiten identificar las siguientes avenidas principales en la cuenca: Julio y Octubre de 1960; Agosto de 1963; Noviembre de 1965; Octubre y Mayo de 1976; Noviembre de 1982; Noviembre de 1984. La avenida más importante fue la de 1960 que alcanzó un caudal 1600 m³/s. en Barasona. De todas las capas de arenas identificadas en el relleno del embalse, destaca por potencia, granulometría más gruesa, mayor contenido en cuarzo y presencia de fragmentos vegetales decimétricos la situada entre 370-395 cm en B-21 (Figura 8). Por lo tanto, tentativamente consideramos que esta capa de arena fue depositada por la avenida de 1960. Las restantes capas de limos arenosos se han adscrito a las sucesivas avenidas (Figura 9). Estas capas pueden correlacionarse entre los sondeos del delta de cola y la parte central del embalse. Aguas abajo, la pérdida de energía de los flujos y el acuñaamiento de los cuerpos sedimentarios dificulta la correlación. De acuerdo con esta propuesta de cronología, y teniendo en cuenta su carácter preliminar, la mayor frecuencia de avenidas en la década de los sesenta sería responsable de una elevada tasa de aporte al delta de cola del embalse (más de 1.5 m de sedimentos en menos de 10 años); durante los años setenta se produjo una disminución del aporte considerable (menos de 1 m en una década) y las últimas décadas se aprecia un aumento sin alcanzar los valores iniciales (unos 1.5 m en 15 años). Estos valores, sin embargo, no pueden traducirse directamente a cantidades de materiales finos transportados al embalse, pues desconocemos la cantidad de material en suspensión aportado por las avenidas.

La propuesta de la Figura 9 ha de considerarse una hipótesis de trabajo a contrastar con otras cronologías absolutas obtenidas mediante técnicas radiométricas (¹³⁷Cs, ²¹⁰Pb), actualmente en proceso.

4.2. Los sedimentos en la cuenca del Esera-Isábena.

Las avenidas del invierno de 1995-96 fueron provocadas por un prolongado periodo de lluvias desde Diciembre de 1995 hasta Febrero de 1996. Nuestro muestreo del sedimento acarreado en suspensión no forma parte de una campaña sistemática y los valores obtenidos son meramente indicativos, pero confirman claramente que la mayoría del sedimento en suspensión es aportado al embalse por el río Esera (Figura 10): los valores a la entrada del embalse son 50 veces mayores en el Esera (224 mg l⁻¹) que en el Isábena (3.9 mg l⁻¹). La mineralogía de los sedimentos muestreados en el cauce de ambos ríos refleja tanto la granulometría como la heterogeneidad litológica de la cuenca. Los minerales de

la arcilla dominan en los sedimentos en suspensión (frecuentemente > 50%) en ambos ríos, aunque son relativamente más abundantes en el Isábena debido al menor caudal de este río. En el Esera el cuarzo generalmente predomina sobre la calcita y, en general, sucede lo contrario en el Isábena; los feldespatos son más abundantes en el Esera, como respuesta a la mayor presencia de rocas graníticas en cabecera.

La concentración de sedimento en suspensión, la mineralogía de los sedimentos y las características geológicas sugiere una heterogeneidad geográfica que permite diferenciar subáreas de producción de sedimentos en ambos ríos.

La cuenca del Esera. Hemos diferenciado cuatro áreas: la cabecera, las depresiones de Castejón de Sos y Campo-Seira y la depresión intermedia al sur. La carga en suspensión en la cabecera del Esera estaba por debajo de los límites de detección y se incrementaba hasta 6 mg^l⁻¹ aguas abajo. Los minerales de la arcilla (illita y clorita) predominan (> 80%); la pirofilita aparece en las muestras aguas abajo de los barrancos que drenan los afloramientos del Devónico Inferior. Este área queda identificada como única área fuente de este mineral. La muestra con valores anómalamente altos de sedimento en suspensión (2468 mg^l⁻¹) y composición similar a los sedimentos acarreados por el río (mayores cantidades de cuarzo y carbonatos) corresponde a un tramo poco profundo del río en el que pudo producirse contaminación de la fracción en suspensión por la carga de fondo. Los bajos valores de sedimento en suspensión en la cabecera del Esera se interpretan como resultado de menores tasas de erosión, propias de un paisaje cubierto por la nieve durante el invierno. Por otra parte, más del 50 % del área está cubierta por pastos, que previenen la erosión del suelo a lo largo de todo el año (RUIZ FLAÑO, 1993), y el porcentaje de tierra cultivada es muy pequeño (< 10%) (MANRIQUE et al., 1987) (Figura 4).

En la depresión de Castejón de Sos, los valores del sedimento en suspensión aumentan grandemente (1276 mg^l⁻¹) y su composición mineralógica cambia: el cuarzo y la calcita alcanzan hasta un 20 % cada uno. El incremento en superficie cultivada (hasta 50 %) parece ser el factor desencadenante de este aumento en la tasa de emisión de sedimentos. En las cuencas intramontañas de Seira y Campo la composición del sedimento es similar a la de Castejón, pero los valores decrecen (650 - 750 mg^l⁻¹). El predominio de los materiales carbonatados en la Sierras Interiores es responsable del incremento de calcita en los ríos tributarios del Esera y en el Esera mismo. Debido a la topografía, el bosque domina el paisaje, alcanzando los valores más altos de toda la cuenca (> 70 %) y tanto la tierra cultivada (hasta el 25%) y los pastos (< 10%) disminuyen (Figura 4). El bosque podría también proteger efectivamente el suelo y contribuir a descender los valores de erosión. En el área meridional de la cuenca del Esera los valores decrecen relativamente (< 500 mg^l⁻¹). En el sedimen-

to acarreado por el río domina la calcita y los minerales de la arcilla debido a la litología que atraviesan. Aunque el porcentaje de tierra cultivada es el mayor de toda la cuenca (hasta el 50 %), el elevado porcentaje de bosque podría también atenuar la erosión.

La cuenca del río Isábena. La carga en suspensión del río Isábena (hasta 11 mg l^{-1}) es mucho menor que la del Esera y la composición mineral muestra el predominio de los minerales de la arcilla y la calcita. La caolinita sólo aparece en los sedimentos del cauce del río y la pirofilita esta ausente excepto en una muestra. Distinguimos tres subáreas. La cabecera del Isábena muestra los menores valores de sedimento en suspensión ($1.4 - 1.7 \text{ mg l}^{-1}$) y una mineralogía con muy escaso porcentaje de carbonatos debido a la naturaleza silíceas de las rocas aflorantes. El aumento de clorita y dolomita en una muestra responde al afloramiento en las cercanías de dolomías del Jurásico y areniscas y limolitas del Cretácico inferior. Los valores elevados de las áreas medias de la cuenca (11 mg l^{-1}) se correlacionan con un alto contenido en calcita en los sedimentos en suspensión (25-25 %) y en la carga de fondo (casi el 50 %). Finalmente, la carga en suspensión en la parte sur de la cuenca disminuye ($3.5 - 3.9 \text{ mg l}^{-1}$) y el contenido en calcita también. En cuanto a los sedimentos en el fondo del cauce, la calcita claramente predomina en las áreas meridionales del Isábena comparadas con las del Esera, aunque las formaciones geológicas que atraviesan son las mismas. Sin embargo, la presencia de un cambio lateral de facies hacia el este (donde los carbonatos lacustres son más abundantes ; RIBA, 1972), explicaría estas diferencias.

La correlación entre valores de sedimento en suspensión y los usos del suelo indican que el impacto antrópico ha de considerarse como un factor significativo en la caracterización de subáreas geográficas respecto a su capacidad de emisión de sedimentos. Los valores menores de sedimento en suspensión se dan en áreas con los menores porcentajes de tierra cultivada (<10%), importantes porcentajes de cubierta boscosa (50-70 % en la subcuenca de Las Paules y > 70 % en las Sierras Interiores) y los más altos porcentajes de pastos (> 50 %; Figura 4). Los valores más altos corresponden a las áreas más cultivadas (> 50%) y con menor cubierta boscosa (10-30 %).

5. Conclusiones

La aplicación de técnicas de análisis sedimentológico de facies a los depósitos del embalse de Barasona y de su cuenca de drenaje ha permitido identificar y caracterizar las facies sedimentarias, correlacionarlas espacialmente, proponer una cronología del relleno y un modelo sedimentológico. La mayor parte del sedimento se transporta al embalse de Barasona durante las avenidas, lo cual subraya la importancia del régimen hídrico de los ríos y ha de tenerse en cuen-

ta a la hora de elaborar posibles estrategias de prevención de aterramiento. De acuerdo con una propuesta preliminar de cronología, la mayor frecuencia de avenidas en la década de los sesenta sería responsable de una elevada tasa de aporte al delta de cola del pantano; durante los años setenta se produjo una disminución del aporte considerable y en las últimas décadas se aprecia un aumento sin alcanzar los valores iniciales.

Los cambios en la composición mineralógica de los sedimentos acumulados en el cauce de los ríos Esera e Isábena proporcionan información sobre áreas fuente de sedimentos. Entre los componentes mayoritarios, cuarzo y feldspatos predominan en el Esera debido a la mayor presencia de afloramientos graníticos y siliciclásticos en cabecera, mientras que la calcita es dominante en todo el curso del Isábena. Incluso el impacto en la producción de sedimentos de cambios laterales de facies en una misma formación geológica pueden rastrearse con metodologías sedimentológicas. Valores anómalos de dolomita en el curso medio del Isábena caracterizan áreas de afloramiento restringido de dolomías. El caso de la pirofilita proporciona un claro ejemplo de las posibilidades del uso de minerales como trazadores de áreas fuente. Su presencia está restringida a afloramientos de pizarras del Devónico inferior en las cabeceras de los valles, especialmente en el Esera. En el embalse de Barasona sólo aparece en sedimentos finos depositados tras una crecida, y por lo tanto, caracteriza las avenidas principales del río Esera.

Los resultados preliminares del estudio de los sedimentos acarreados en suspensión están de acuerdo con las áreas de riesgo de emisión de sedimentos identificadas por FARGAS et al. (1996) utilizando como criterios la densidad del área de drenaje, la topografía y la litología. Las áreas consideradas como de bajo riesgo de emisión de sedimentos (cabeceras del Esera e Isábena) se caracterizan por valores pequeños de concentración de sedimentos en suspensión. Las áreas de riesgo severo (montañas de las Sierras Interiores) proporcionaron los valores más elevados en ambos ríos. Las zonas meridionales, designadas como de riesgo intermedio, tenían valores de concentración intermedios.

Aunque los factores físicos como topografía, litología y redes de drenaje ejercen un control esencial en la erosión del suelo, nuestro estudio subraya la importancia de la actividad humana mediante cambios en los usos del suelo. La heterogeneidad de la cuenca en cuanto a la emisión de sedimentos y la variabilidad de la tasa de sedimentación durante las últimas décadas, ilustra la variabilidad de los procesos sedimentarios en una cuenca mediterránea montañosa. Un mejor conocimiento de la variabilidad temporal y espacial de los procesos sedimentarios de erosión, transporte y depósito permite un manejo más adecuado de recursos limitados como suelo y agua y proporcionará estrategias eficaces para aliviar los problemas de aterramiento de embalses.

6. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por un convenio de colaboración entre el CEDEX - Ministerio de Fomento, la Confederación Hidrográfica del Ebro y la Estación Experimental de Aula Dei del CSIC.

Referencias bibliográficas

- ASCASO A. & CUADRAT, J. M. (1981): El clima. En: *Geografía de Aragón*. Tomo 1. (Higueras, A. ed.) Guara Editorial, Zaragoza, 96-140.
- COBO RAYAN, R., GÓMEZ MONTAÑA, J.L., PLATA BEDMAR, A., SANZ MONTERO, M.E. & AVENDAÑO SALAS, C. (1996). Influencia del régimen de explotación del embalse de Puentes en las tasas de sedimentación durante el periodo 1954-1994. *Actas V Jornadas Españolas de Presas*, Valencia: 155-169.
- DEARING, J.A. & FOSTER, D.L. (1993). Lake sediments and geomorphological processes: some thoughts. In: *Geomorphology and sedimentology of lakes and reservoirs* (J. McManus & R.W. Duck, Eds). Wiley & Sons, Ltd, 5-14.
- FARGAS, D., MARTÍNEZ, J.A. & POCH, R.M. (1996). Identification of critical sediment source areas at regional level. *Annales Geophysicae* Supplement II to volume 14. European Geophysical Society C 314.
- MANRIQUE E., REVILLA, R. & SAEZ, E. (1987). *Características estructurales del sector agroganadero de la comarca de Ribagorza*. Institución Fernando el Católico, Zaragoza.
- MARÍN J.M. (1981): Las aguas. En: *Geografía de Aragón*. Tomo 1. (Higueras, A. ed.) Guara Editorial, Zaragoza, 161-184.
- MENSUA, S. (1981): El Pirineo. En: *Geografía de Aragón*. Tomo 1. (Higueras, A. ed.) Guara Editorial, Zaragoza, 15-43.
- MENSUA, S. (1981b): La vegetación de Aragón. En: *Geografía de Aragón*. Tomo 1. (Higueras, A. ed.) Guara Editorial, Zaragoza, p. 141-160.
- MEY, P.H.W. (1967): Geology of the Upper Ribagorza and Baliera valleys, Central Pyrenees, Spain. *Leidse Geol. Meded.*, 41:153-220.
- MOPTMA y CHE (1993): *Directrices del Plan hidrológico de la cuenca del Ebro. Río Esera. Memoria y Anexos*. Zaragoza.
- RIBA, O. (1972.): Mapa geológico de España E. 1:200.000. Síntesis de la cartografía existente, Hoja de Huesca, IGME. 54 p.
- RUIZ FLAÑO, P. (1993): *Procesos de erosión en campos abandonados del Pirineo*. Geoforma Ediciones, Logroño.
- SANZ, M.E., COBO, R. & GÓMEZ, J.L. (1995): Modelo de facies del embalse de Puentes, Lorca (Murcia). *Comunicaciones XIII Congr. Español de Sedimentología*, 165-166.
- SANZ MONTERO, M.E., COBO RAYAN, R. AVENDAÑO SALAS, C. & GÓMEZ MONTAÑA, J.L., (1996). Influence of the drainage basin area on the sediment

yield to Spanish reservoirs. *First European Conference and Trade Exposition on control erosion*. Lleida. Spain.

- SUBÍAS PÉREZ, I; FERNÁNDEZ-NIETO, C & GONZÁLEZ LÓPEZ, J.M. (1990): Estudio mineralógico de la serie Devónica y Carbonífero Inferior de Sallent de Gállego (Huesca). *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 13: 183-194.
- TUCKER, M. (1988): *Techniques in Sedimentology*. Blackwell Scientific Publications, 394 p.
- VALERO GARCÉS, B.L. (1992). Los sistemas lacustres carbonatados del Stephaniense y Pérmico en el Pirineo Central y Occidental. Instituto de Estudios Altoaragoneses, Huesca, 413 p.
- VALERO GARCÉS, B.L., NAVAS, A. & MACHÍN, J. (1996): Análisis sedimentológico del embalse de Barasona (Huesca). IV Reunion Nacional de Geomorfología. A Coruña, *Cadernos Laboratorio Xeoloxico de Laxe* 21: 483-493.
- VALERO GARCÉS, B.L., NAVAS, A. & MACHÍN, J. (1997): Sediment deposition in the Barasona reservoir (central Pyrenees, Spain): temporal and spatial variability of sediment yield and land use impacts. In: *Human Impact on Erosion and sedimentation*, D.E. Walling & J.L. Probst, (EDs.) International Association of Hydrological Sciences Publ. no. 245: 241- 249.

