

LA SECUENCIA DE TERRAZAS CUATERNARIAS DEL RÍO ALCANADRE (PROVINCIA DE HUESCA): CARACTERIZACIÓN Y CONSIDERACIONES PALEOAMBIENTALES

M. CALLE¹, C. SANCHO^{1*}, J.L. PEÑA²,
P. CUNHA³, B. OLIVA-URCIA⁴, E. PUEYO⁵

¹Dpto. de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza.

²Dpto. de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza,
Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza.

³Ciencias da Terra, Universidade de Coimbra, Largo Marques de Pombal, 3049 Coimbra, Portugal.

⁴Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC, Campus Aula Dei, Av. Montañana 1005, 50059 Zaragoza.

⁵Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Manuel Lasala 44, 50006 Zaragoza.

RESUMEN. *En la cuenca del río Alcanadre (Depresión del Ebro, provincia de Huesca) se desarrolla una extensa secuencia de terrazas cuaternarias encajadas de tipo strath compuesta por nueve niveles (de Qt1 a Qt9). Se aportan nuevos datos cartográficos, altimétricos, estratigráficos, pedogenéticos y cronológicos. El ambiente sedimentario está formado por sistemas fluviales entrelazados que incrementan el nivel de confinamiento conforme se encaja el drenaje. La morfología del carbonato edáfico alcanza estadios de máximo desarrollo (VI) con la edad. A partir de datos paleomagnéticos, y de manera tentativa, el nivel más antiguo Qt1 podría situarse cerca de los 1000 ka y el nivel Qt3 estaría en el entorno de los 780 ka. Mediante dataciones numéricas de Luminiscencia Ópticamente Estimulada (OSL) se han obtenido edades de 44 ± 2 ka, 19 ± 2 ka y 10 ± 1 ka para los niveles Qt5, Qt6 y Qt7. Estas terrazas presentan una buena correlación con registros fluviales regionales localizados en cuencas hidrológicas con cabeceras no glaciadas. Su formación se relaciona a escala global con los períodos MIS3, LGM y YD, respectivamente, de características frías. El escenario paleoambiental estaría dominado por condiciones periglaciares, de manera que la alta disponibilidad de sedimentos en las laderas y el régimen estacional de las precipitaciones conducirían a la agradación fluvial.*

The sequence of Quaternary fluvial terraces of the Alcanadre River (Huesca): characterization and paleoenvironmental aspects

ABSTRACT. *A very extensive sequence of Quaternary fluvial terraces composed of nine strath levels (from Qt1 to Qt9) has been recognized in the Alcanadre River valley (Ebro basin, Huesca province). New mapping, altimetric, stratigraphic,*

pedogenic and chronological data have been supplied. A braided fluvial sedimentary environment is deduced. The confinement of the fluvial system increases as a response to drainage incision. Pedogenic carbonate morphology reaches highest development (stage VI) with the age. Palaeomagnetic data indicate that, tentatively, the age of Qt1 is near 1000 ky and the age of Qt2 is around 780 ky. In addition, numerical ages of Qt5, Qt6 and Qt7 are 44 ± 2 ky, 19 ± 2 ky and 10 ± 1 ky respectively by using Optically Stimulated Luminescence (OSL). This Upper Pleistocene chronology matches well with the regional fluvial chronostratigraphy recorded in non-glaciated river valleys. It is correlated to cold periods MIS3, LGM and YD at global scale. In a palaeoenvironmental scenario dominated by periglacial conditions, fluvial aggradation is enhanced by high sediment supply from slopes and a seasonal behaviour of rainfalls.

Palabras clave: terrazas fluviales, cambio climático, Pleistoceno, Sierras Exteriores-Cuenca del Ebro.

Key words: fluvial terraces, climatic change, Pleistocene, External Ranges-Ebro basin.

Enviado el 10 de diciembre de 2012

Aceptado el 22 de enero de 2013

* Correspondencia: Dpto. de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza. E-mail: csancho@unizar.es

1. Introducción

Los sistemas de terrazas fluviales constituyen interesantes archivos de la evolución del modelado y el clima durante el Cuaternario (Bridgland y Westaway, 2008; Westaway *et al.*, 2009; Maklin *et al.*, 2012). Registran cambios climáticos de baja frecuencia forzados astronómicamente (ciclos de Milankovitch), pero también fluctuaciones climáticas correlacionables con la estratigrafía isotópica marina global (Bridgland, 2000). De un modo simplificado se considera que la agradación fluvial tiene lugar durante períodos fríos glaciares y/o periglaciares, mientras que el encajamiento se produce en condiciones interglaciares (Chorley *et al.*, 1984). Sin embargo, la respuesta compleja de los sistemas fluviales a los cambios climáticos, en términos de agradación e incisión, y las características morfoclimáticas de los escenarios regionales contemplados (posición latitudinal, áreas afectadas por glaciario...) requiere de estudios específicos (Stokes *et al.*, 2012). En este trabajo, se caracteriza el sistema de terrazas del río Alcanadre localizado en latitudes mediterráneas y con una cabecera no glaciada.

El río Alcanadre tiene su origen en las Sierras Exteriores pirenaicas y desarrolla una excelente secuencia de terrazas erosivas (*strah terraces* o *cut-in-bedrock terraces*) en la depresión del Ebro. Este tipo de terrazas se genera por la erosión del sustrato rocoso, dejando una superficie aplanada que se recubre de una fina lámina de depósitos aluviales. Cuando se restablece la incisión, los depósitos quedan aislados del río, que discurre

a una cota inferior (Easterbrook, 1999). La formación de terrazas erosivas requiere un sustrato rocoso no resistente, cambios en la descarga de agua y sedimentos, una tasa moderada de levantamiento regional y un tamaño adecuado de la cuenca de drenaje (Wegmann y Pazzaglia, 2009).

Las terrazas del río Alcanadre apenas han sido objeto de estudio, por lo que la información disponible es más bien escasa. Hasta el momento solo existen intentos previos de cartografía (Mensua e Ibáñez, 1977; Rodríguez-Vidal, 1983; Sancho, 1991). No obstante, estos trabajos o no cubren la totalidad de la cuenca o lo hacen a distintas escalas. En este contexto, este trabajo aporta datos cartográficos, altimétricos, estratigráficos, pedogenéticos y cronológicos de la secuencia de terrazas del río Alcanadre basados en el estudio realizado por Calle (2012). La información paleoambiental derivada presenta alto interés, de cara a avanzar en la propuesta de un escenario paleoclimático regional para el sector nororiental de la Península Ibérica durante el Cuaternario.

A escala regional, la información paleoclimática disponible basada en registros fluviales cuaternarios es escasa pero significativa. Hace referencia fundamentalmente al Pleistoceno superior. Por un lado, existen datos paleoambientales cronoreferenciados relevantes de los sistemas de terrazas de los ríos Cinca y Gállego y su relación con registros glaciares (Sancho *et al.*, 2003, 2004, 2007; Peña *et al.*, 2004; Lewis *et al.*, 2009; Benito *et al.*, 2010; Peña y Sancho, 2011). Se localizan al este y al oeste respectivamente del valle del río Alcanadre y su formación está ligada a la actividad glacial en cabeceras. Más al oeste en la depresión del Ebro, los sistemas aluviales pleistocenos de Bardenas Reales de Navarra han sido cronoreferenciados por Sancho *et al.* (2008). Las terrazas del río Ebro, en el sector central de la Depresión, han sido objeto de estudios sedimentológicos, si bien existe menos información cronológica precisa (Luzón *et al.*, 2008). Por último, Fuller *et al.* (1998) estudian la secuencia del río Guadalupe y su red de afluentes, con origen en la Cordillera Ibérica, y analizan la respuesta fluvial a las oscilaciones climáticas de los últimos 200 000 años, a partir de una amplia base de datos cronológicos obtenidos mediante OSL.

2. Área de estudio

La cuenca del río Alcanadre se sitúa en la provincia de Huesca, en el noreste de la Península Ibérica (Fig. 1). Este río constituye el drenaje principal de la Sierra de Guara, incluida en las Sierras Exteriores pirenaicas, y se adentra en la depresión del Ebro hasta confluir con el río Cinca, en las inmediaciones de la localidad de Ballobar.

Las Sierras Exteriores representan la manifestación estructural más meridional de la orogenia pirenaica (Puigdefábregas y Souquet, 1986; Millán *et al.*, 2000). La Cuenca del Ebro, constituye la cuenca de antepaís Sur de los Pirineos y alcanzó condiciones endorreicas hace 36 millones de años (Plaziat, 1981; Costa *et al.*, 2009). Posteriormente, la apertura del Surco de Valencia favoreció la erosión remontante del drenaje mediterráneo (Lewis *et al.*, 2000), que capturó la Cuenca del Ebro en torno a los 13 o 12 millones de años (Arche *et al.*, 2010; Urgeles *et al.*, 2010). La apertura

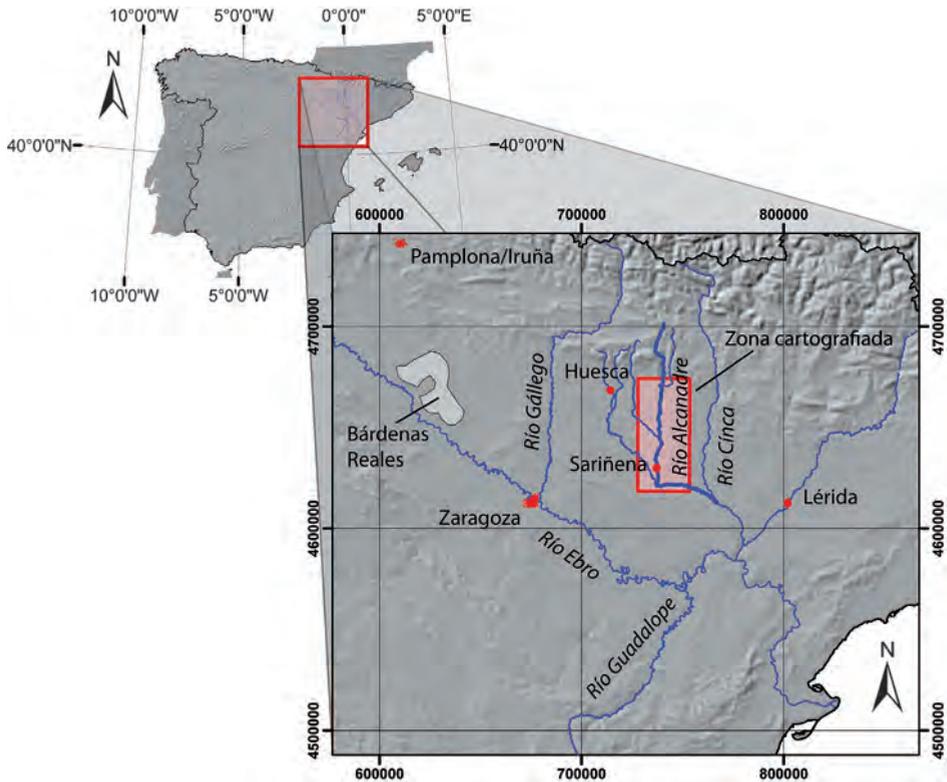


Figura 1. Situación del área de estudio en el noreste peninsular.

de la Cuenca del Ebro al mar Mediterráneo condicionó en gran medida la dinámica geomorfológica regional, pasando de una sedimentación generalizada a una intensa erosión, encajamiento de la red fluvial y evacuación de una enorme cantidad de sedimentos.

Desde su nacimiento en la Sierra de Galardón (Sierras Exteriores), el río Alcanadre discurre durante casi 45 km sobre materiales pre- y sinorogénicos pirenaicos de naturaleza mayoritariamente calcárea (Millán, 2006), lo que propicia que el río discorra casi en su totalidad encajado en cañones fluvioikársticos. La apertura del valle y la formación de terrazas significativas se producen cuando el río comienza a incidir depósitos terciarios (aluviales, fluviales y lacustres) de la Cuenca del Ebro. Estos materiales, salvo en las cercanías del anticlinal de Barbastro, se disponen prácticamente horizontales y dan lugar a un modelado dominado por morfologías estructurales. En este sector de la cuenca del Ebro, el río Alcanadre discurre de norte a sur durante 60 km, con un trazado casi rectilíneo. Cuando se encuentra con los relieves calcáreos más resistentes de la Sierra de Alcubierre, experimenta un giro de 90° hacia el este. En toda esta zona, los niveles de terraza se desarrollan en toda su plenitud y, por tanto, constituye un área propicia para su estudio.

3. Metodología

El análisis del sistema de terrazas del río Alcanadre se inicia con la elaboración de una cartografía de los diferentes niveles. Para ello se han utilizado fotografías aéreas correspondientes a los vuelos nacionales a escala 1:30 000 de los años 1981 y 1984. Paralelamente se ha realizado una revisión de trabajos anteriores. Tras una valoración y reconocimiento de campo se elaboró una cartografía analógica sobre mapas topográficos a escala 1:25 000, que posteriormente fue procesada mediante ArcGIS.

La altimetría de las terrazas se ha realizado a partir del modelo digital de elevaciones proporcionado por el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), denominado MDT05/MDT05-LIDAR, con paso de malla a 5 metros. Se han obtenido las alturas respecto al nivel del mar y en relación con el cauce actual del río.

El trabajo de campo ha servido también para generar un inventario de puntos que incluye diferentes aspectos descriptivos: localización (GPS), potencia del depósito, facies sedimentarias (Miall, 1977), tamaño máximo representativo y mediana del eje mayor de los cantos y morfologías del carbonato edáfico, según los criterios expuestos en Gile *et al.* (1965, 1981) y Machette (1985).

La identificación de cuerpos lutíticos/arcillosos y arenosos ha servido para diseñar una estrategia de muestreo de cara a aplicar técnicas de paleomagnetismo y Luminiscencia Ópticamente Estimulada (OSL), encaminadas a determinaciones cronológicas. Las muestras lutíticas para paleomagnetismo fueron obtenidas con un extractor de materiales blandos. Las muestras fueron consolidadas mediante inmersión en una solución de silicato de sodio al 50% y cemento de aluminio, siguiendo las directrices indicadas por Pueyo *et al.* (2001). Los vectores paleomagnéticos se determinaron, a través de desmagnetización térmica progresiva de la remanencia natural, en el Laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad de Burgos, utilizando un magnetómetro criogénico 2G y un horno TD48 (ASC). El cálculo del vector paleomagnético se ha realizado a través del programa Remasoft (Chadima y Hroudá, 2006) que utiliza el cálculo de componentes principales de Kirschvink (1980).

El proceso de tratamiento y separación previos de las muestras de arena destinadas a análisis de luminiscencia fueron realizados en el Laboratorio de Sedimentología la Universidad de Coimbra (Portugal). Las determinaciones de dosis, tasas de dosis y edad se practicaron sobre la fracción de cuarzo de tamaño 180-250 μm de la muestra en el Nordic Laboratory for Luminiscense Dating (NLL) de la University of Denmark (Aarhus), siguiendo el protocolo establecido por Murray y Wintle (2000).

4. La secuencia de terrazas

La secuencia de terrazas del río Alcanadre comprende nueve niveles escalonados que corresponden a otras tantas etapas de agradación fluvial durante el Cuaternario (Fig. 2). Estos niveles se han nombrado de más antiguo (Qt1) a más moderno (Qt9), indicando el orden cronológico de los eventos.

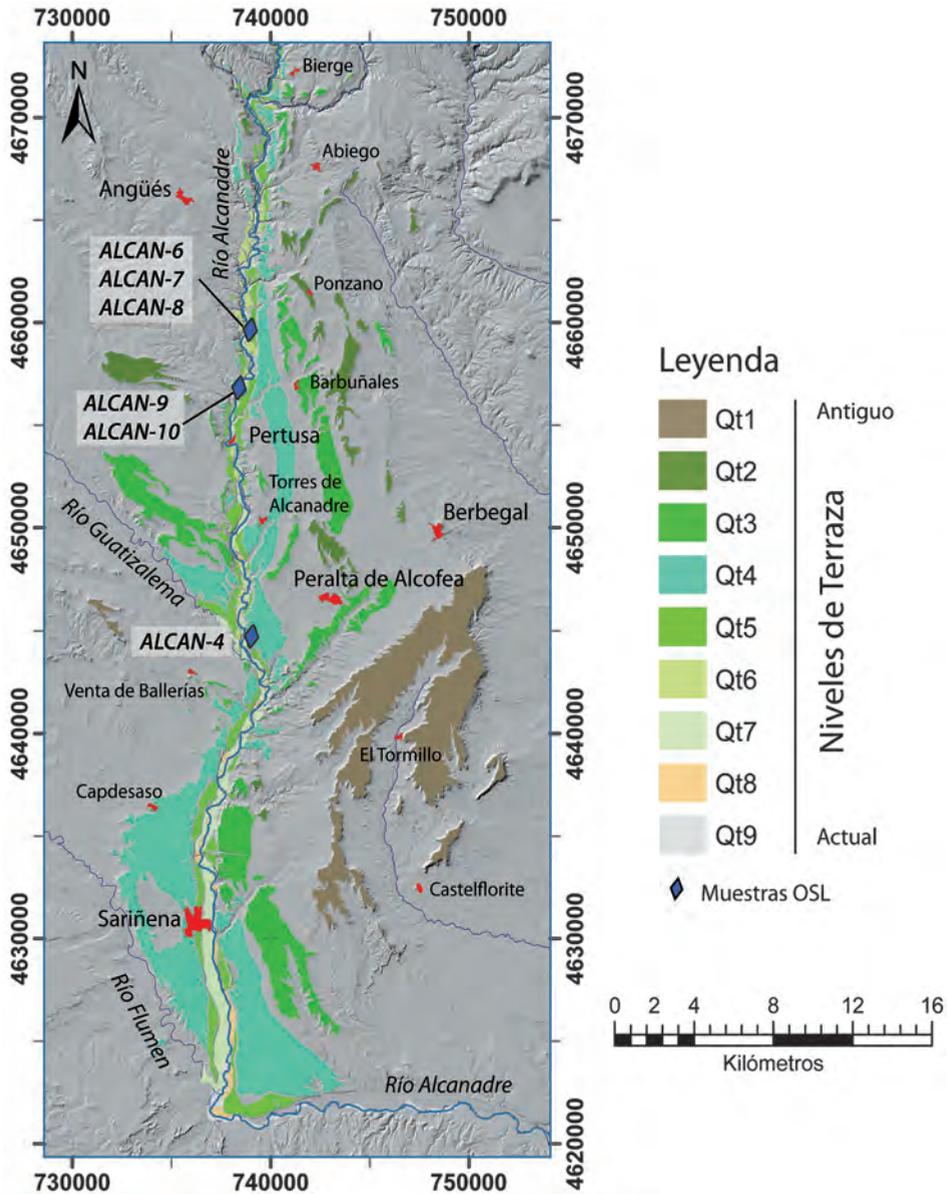


Figura 2. Cartografía de las terrazas del río Alcanadre.

Además de la diferenciación altimétrica y, por tanto cronológica, el análisis individual de las terrazas que componen la secuencia del río Alcanadre evidencia características diferenciales atendiendo a su distribución, extensión, estratigrafía del depósito y morfología del carbonato edáfico (SCM).

4.1. Terraza Qt1

Distribución: El nivel de terraza Qt1 es el nivel más alto, y por tanto más antiguo, que aparece en la cuenca del Alcanadre. Constituye en la actualidad la divisoria de aguas con el río Cinca (Sancho y Meléndez, 1992). Todos los materiales asociados a este nivel aparecen en el margen oriental de la cuenca y se distribuyen en un área de unos 20 km de largo y 10 km de ancho (Figs. 2 y 3A).

Altimetría: Los depósitos de este nivel se encuentran a unos 530 m de altura en el municipio de Berbegal, elevándose 200 metros sobre el nivel actual del río. Al Sur de Castellflorite este nivel desciende a una cota de 410 metros, elevándose 160 m sobre el nivel actual del Alcanadre (Tabla 1). La pendiente media del resto de terraza preservado es de 5.1‰.

Tabla 1. Resumen de las medidas altimétricas de los niveles de terraza obtenidos del modelo digital del terreno (MDT).

SITUACIÓN	Qt1	Qt2	Qt3	Qt4	Qt5	Qt6	Qt7	Qt8	Qt9
Sur de Bierge	–	600	570	510	490	480	–	450	430
Angüés	–	555	525	480	455	445	420	–	395
Ponzano	–	520	495	450	425	420	395	–	370
Pertusa	–	480	450	410	385	375	360	–	350
Torres de Alcanadre	510	450	410	390	365	–	340	–	330
Venta de Ballerías	495	–	390	360	340	330	320	315	310
El Tormillo	470	–	370	330	310	–	300	295	290
Capdesaso	440	–	340	315	290	–	280	275	270
Sariñena	420	–	325	300	270	–	260	255	250

Depósito-estratigrafía: El espesor de este nivel oscila entre los 6 y 11 m de gravas masivas (Gm) y en ocasiones ligeramente estratificadas (Gh), que componen cuerpos con gran extensión lateral limitados por superficies erosivas (Fig. 3B). Los cantos dentro de los depósitos están imbricados y se rodean por una matriz de arenas y limos. En ocasiones aparecen granosoportados. A veces se encuentran cuerpos aislados de gravas con estratificación cruzada planar (Gp) y en surco (Gt) cuyas bases canaliformes erosivas son de gran anchura. La potencia de los sets es bastante homogénea, en torno a 1.5 m, y su estratificación interna de bajo ángulo. Ocasionalmente, asociadas a estos depósitos, se observan facies de tamaño de grano más fino: microconglomerado, arenas masivas (Sm), con laminación de bajo ángulo o prácticamente horizontal (Sh), y excepcionalmente intercalaciones de lutitas/arcillas, con laminación paralela (Fl). Estos cuerpos no superan los 0.2-0.3 m de espesor y aparecen limitadas en su parte superior por una superficie erosiva que da paso a otro cuerpo de gravas masivas. Características sedimentológicas similares han sido observadas por Alberto *et al.* (1983).

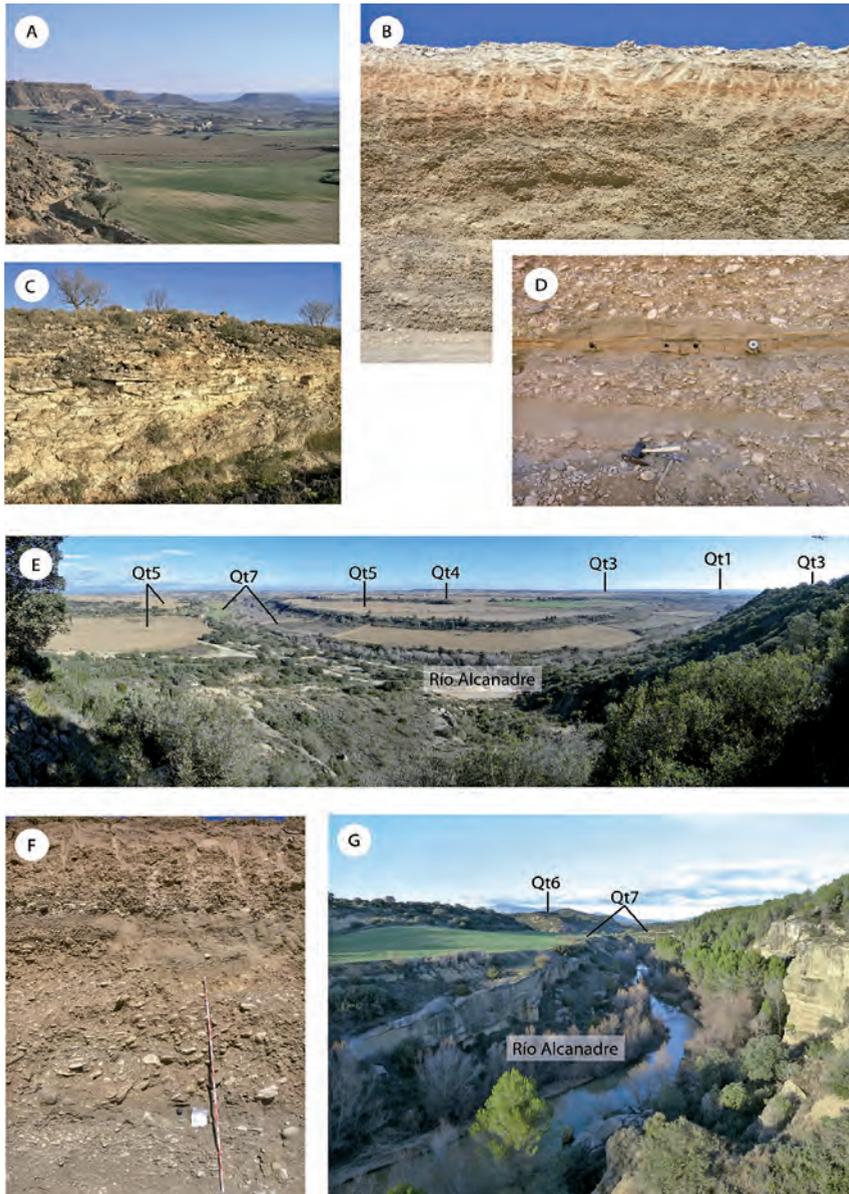


Figura 3. Algunos aspectos de campo del sistema de terrazas del río Alcanadre. A) Modelados tabulares de la terraza $Qt1$ en El Tormillo. B) Depósito de la terraza $Qt1$ cerca de Lagunarrota. C) Máximo estadio de desarrollo morfológico del carbonato edáfico (VI) a techo de la terraza $Qt1$ en El Tormillo. D) Nivel lutítico muestreado para determinaciones paleomagnéticas en la base de la terraza $Qt1$ en Lagunarrota. E) Sucesión de terrazas del río Alcanadre al suroeste de Torres de Alcanadre. F) Nivel de arena muestreado de la terraza $Qt6$ cerca de Ponzano para análisis cronológico mediante Luminiscencia Ópticamente Estimulada. G) El río Alcanadre al noreste de Las Cellas.

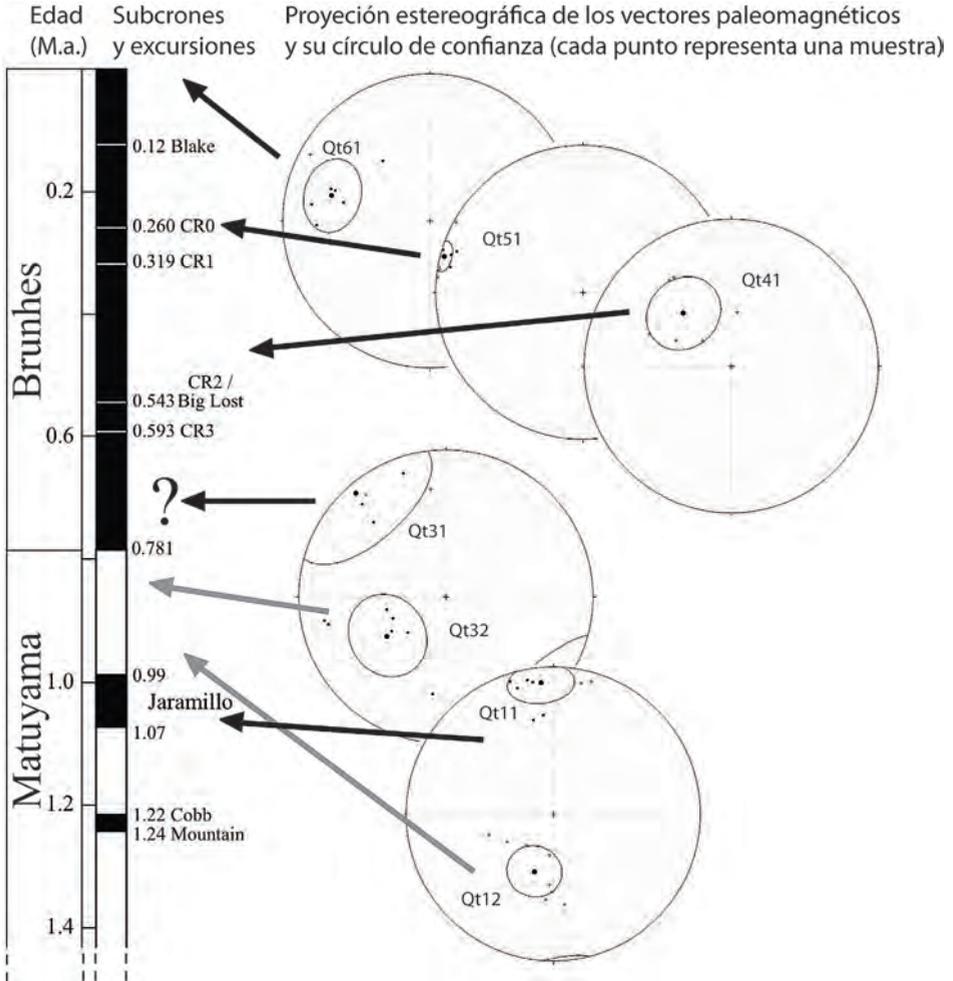


Figura 4. Representación de los vectores paleomagnéticos de cada una de las estaciones y su correlación con el registro paleomagnético.

SCM: En la parte superior de este nivel se desarrolla un suelo carbonatado que llega a los 3 metros de espesor. Este suelo presenta un estadio del carbonato muy evolucionado (VI) (Fig. 3C). Se trata de perfiles de costras calizas y calcretas muy evolucionados (Sancho y Meléndez, 1992) en los que se identifican recurrencias fluviales durante el período de edafogénesis (Meléndez *et al.*, 2011).

Dataciones: En este nivel se han tomado muestras para determinar la polaridad magnética en dos estaciones. La primera (Qt11) presenta polaridad normal y se encuentra en una posición estratigráfica próxima a la base con unos 10 m de gravas por encima (Fig. 3D). La segunda (Qt12) presenta polaridad inversa (Fig. 4). En estas circunstancias, pare-

ce que la terraza Qt1 del río Alcanadre se sitúa en el cron Matuyama de polaridad inversa, probablemente cerca de algún subcron de polaridad normal.

4.2. Terraza Qt2

Distribución: El denominado Qt2 es el segundo nivel de terraza más antiguo de la cuenca del Alcanadre. No presenta tanta continuidad como el nivel anterior y aparece más asiduamente en la parte NE de la cuenca (Fig. 2). No obstante se han identificado restos de este nivel a lo largo de 30 kilómetros, siendo su anchura máxima de 2.3 km.

Altimetría: Cerca del municipio de Bierge, al Norte de la zona de estudio, la superficie de esta terraza se encuentra a una cota absoluta de 600 m y a una altura relativa de 190 m sobre el nivel actual del río. En la localidad de Lastanosa este mismo nivel se encuentra a una altura de 370 m, situándose 100 m más alto que el cauce actual. Su pendiente media es de 7.7‰.

Depósito-estratigrafía: El espesor observado de los depósitos relacionados con este nivel de terraza varía desde 2.1 m hasta 5 m y se compone principalmente de gravas (Gm y Gh). Los cuerpos de gravas presentan con cierta frecuencia sets de incluso 2 m con estratificaciones cruzadas (Gp). Entre los paquetes de gravas o a techo de la terraza aparecen cuerpos arenosos y lutíticos masivos (Sm, Fm) de hasta 1.5 m de potencia.

SCM: El suelo del depósito presenta horizontes de hasta 2 m de espesor con un desarrollo de las morfologías del carbonato correspondiente al estadio V.

Dataciones: En este nivel se realizaron estudios paleomagnéticos en dos estaciones no obteniendo resultados concluyentes.

4.3. Terraza Qt3

Distribución: La terraza Qt3 presenta una elevada continuidad longitudinal. Se distribuye a lo largo de 45 kilómetros y lo hace de manera preferente en la parte oriental del curso del río Alcanadre (Fig. 2). La anchura aumenta hacia el Sur, llegando a los 2.5 km en el entorno de Sariñena.

Altimetría: Hacia el Norte, en el municipio de Bierge, la superficie de la terraza Qt3 se encuentra a una altura de 575 m, elevada 130 metros sobre el nivel actual del río Alcanadre. Hacia el Sur, cerca de Albalatillo se encuentra en torno a los 300 m, elevándose 55 m respecto al cauce actual (Tabla 1). La pendiente media de este nivel es 6.7‰.

Depósito-estratigrafía: Los depósitos de este nivel presentan potencias de entre 2 y 4 metros de gravas masivas (Gm) o con estratificación horizontal (Gh). Aparecen estratificaciones cruzadas en cuerpos que no superan 0.5 m de espesor de gravas finas (Gp) o arenas (Sp). Hacia techo en ocasiones se encuentran limos masivos (Fm) de llanura de inundación.

SCM: El horizonte edáfico carbonatado varía entre 0.5 y 1.5 m y presenta un estadio IV de desarrollo de las morfologías del carbonato.

Dataciones: Los datos paleomagnéticos obtenidos indican que la estación Qt31, de mayor dispersión, presenta polaridad normal, mientras que la estación Qt32 indica polaridad inversa (Fig. 4). Estimamos que la terraza Qt3 del río Alcanadre se situaría en el cron Matuyama de polaridad inversa, probablemente próxima al límite con el cron Brunhes de polaridad normal.

4.4. Terraza Qt4

Distribución: La terraza Qt4 es el nivel más importante de la cuenca en cuanto a distribución, extensión y continuidad (Fig. 2). Es posible considerarlo como un nivel de referencia para identificar y ordenar el resto de terrazas, tanto superiores como inferiores. Los depósitos relacionados con este nivel se encuentran a lo largo de 50 km y se preservan preferentemente en la parte oriental del río, exceptuando la zona de Sariñena, donde aparecen en ambos lados. Es en esta zona final donde se encuentra su mayor anchura, llegando hasta los 4 km.

Altimetría: Este nivel tiene su representación más septentrional cerca del municipio de Bierge, donde su superficie se encuentra a una altura absoluta de 540 m y a 65 m respecto al nivel actual del río. En la zona sur de Sariñena, el nivel se encuentra a 260 m de altura sobre el nivel del mar, elevándose 30 m respecto al cauce actual (Tabla 1). La pendiente media de la terraza es de 6.6‰.

Depósito-estratigrafía: La potencia de los depósitos varía entre 2.5 y 7 m. Se componen de gravas masivas (Gm), gravas con estratificaciones cruzadas planares (Gp) y, en ocasiones, en surco (Gt). A veces aparecen bases canaliformes. Se identifican intercalaciones de arenas con estratificación cruzada en surco (St) y en algunos puntos se preservan depósitos de llanura de inundación (Fm), de hasta 1.8 m de espesor, a techo de del depósito.

SCM: La morfología del carbonato del horizonte de acumulación carbonatada corresponde a un estadio de desarrollo III.

Dataciones: Los datos paleomagnéticos indican una polaridad normal (estación Qt41) de manera que la edad de esta terraza tiene que ser inferior al límite Matuyama-Brunhes (Fig. 4).

4.5. Terraza Qt5

Distribución: La terraza Qt5 es el primer nivel que presenta una distribución paralela al curso actual con distribución en ambos márgenes (Figs. 2 y 3E). Sus depósitos aparecen a lo largo de más de 50 km del río y con una anchura máxima de 650 m.

Altimetría: La superficie de este nivel se encuentra en torno a los 510 de altura cerca del municipio de Torres de Alcanadre (al Norte de la zona de estudio), elevándose respecto al cauce actual cerca de 55 m. Al Sur de la localidad de Sariñena el nivel Qt5 se encuentran a 250 m de altura y a 20-25 m respecto al cauce actual del Alcanadre (Tabla 1). La pendiente media es de 5.4‰.

Depósito-estratigrafía: La potencia de los depósitos oscila entre 2 y 5 metros de gravas masivas (Gm) con lentejones intercalados de arena. Estos cuerpos de gravas presentan bases canaliformes erosivas con estratificaciones cruzadas planar (Gp) y en surco (Gt). Suelen aparecer intercalaciones arenosas con estratificaciones cruzadas (St y Sp). A techo del depósito es común encontrar sedimentos finos de llanura de inundación (Fm) de hasta 1 m de espesor.

SCM: El horizonte carbonatado presenta en torno a 1 m de espesor y las morfologías del carbonato indican un estadio de desarrollo entre II y III.

Dataciones: Una muestra (ALCAN-4) datada mediante OSL correspondiente a esta terraza ha ofrecido una edad de 44 ± 2 ka (Tabla 2). Además la estación Qt51 presenta polaridad normal (Fig. 4).

Tabla 2. Edades obtenidas mediante Luminiscencia Ópticamente Estimulada (OSL).

MUESTRA	NIVEL	DOSIS (Gy)	TASA DE DOSIS (Gy/ka)	EDAD (ka)
ALCAN-4	Qt5	58 ± 2	1.34 ± 0.05	44 ± 2
ALCAN-6	Qt6	41 ± 2	2.36 ± 0.09	17.4 ± 1.2
ALCAN-7	Qt6	39 ± 2	1.48 ± 0.06	26.4 ± 1.6
ALCAN-8	Qt6	29.8 ± 1.4	1.83 ± 0.07	16.3 ± 1.0
ALCAN-9	Qt7	21.3 ± 0.9	2.30 ± 0.09	9.3 ± 0.6
ALCAN-10	Qt7	18.9 ± 0.5	1.82 ± 0.07	10.4 ± 0.5

4.6. Terraza Qt6

Distribución: La terraza Qt6 (Fig. 3G) presenta una distribución diferente al resto de niveles, ya que sus restos se aparecen desde la cabecera hasta la confluencia del río Guatizalema. Aguas abajo, o bien no se manifiesta o la diferencia altimétrica entre los niveles Qt5 y Qt6 es inapreciable. Los restos de este nivel se presentan indistintamente a ambos lados del río y aparecen a lo largo de 20 km. Se distribuyen ocupando una banda paralela al río cuya máxima anchura alcanza los 300 m (Fig. 2).

Altimetría: En el sector septentrional, cerca del municipio de Bierge, la superficie de este nivel Qt6 se encuentra a una cota de 480 m, siendo 40 m la altura respecto al cauce actual del río. En las proximidades de la confluencia del río Guatizalema, su cota

es de 335 m y se encuentra en una posición elevada 25 m respecto al cauce actual (Tabla 1). La pendiente media de este nivel es de 5.9‰.

Depósito-estratigrafía: La potencia de los depósitos asociados a este nivel varía entre 1.5 y 4.5 metros (Fig. 3F). Se trata de gravas con estratificación cruzada en surco (Gt) y planar (Gp). Aparecen las mismas estructuras en intercalaciones de gravas finas o arenas (St y Sp). En ocasiones el nivel aparece culminado con depósitos masivos de llanura de inundación (Fm).

SCM: El horizonte edáfico enriquecido en carbonato presenta 30-40 cm de espesor. Su estadio de desarrollo morfológico está entre II y III.

Dataciones: Se dispone de tres edades absolutas (muestras ALCAN-6 (Fig. 3F), ALCAN-7 y ALCAN-8) obtenidas mediante OSL: 17.4 ± 1.2 ka, 26.4 ± 1.6 ka y 16.3 ± 1.0 ka (Tabla 2). Su edad ponderada es de 19 ± 2 ka. Tal y como cabría esperar, la estación de paleomagnetismo Qt61 presenta polaridad normal (Fig. 4).

4.7. Terraza Qt7

Distribución: Los depósitos de esta terraza son frecuentes a lo largo de todo el valle con una distribución paralela al río. Se concentran en el tamo inferior de la cuenca, apareciendo a lo largo de unos 45 km de cauce. Aguas arriba apenas ocupan 200 metros de anchura, pero en la zona meridional llegan a formar una banda lateral al río de 730 metros (Fig. 2).

Altimetría: En las cercanías del municipio de Abiego se encuentran los restos más septentrionales correspondientes a este nivel. Se disponen a una altura de 440 metros de cota absoluta y a unos 30-35 metros sobre el cauce actual del río. En la parte meridional, los depósitos correspondientes a este nivel se encuentran a 230 m de altura y a 10 m sobre el cauce actual del río Alcanadre (Tabla 1 y Figs. 3E y 3G). La pendiente media de este nivel es del 4.6‰.

Depósito-estratigrafía: La potencia de los depósitos de este nivel varía entre 1 y 3 m de gravas con estratificaciones cruzadas frecuentes (Gt y Gp). También aparecen arenas intercaladas con estratificación cruzada (St y Sp). A techo del nivel aparecen limos de llanura de inundación (Fm) en ocasiones constituyendo la mitad del espesor total.

SCM: No es raro encontrar cierto desarrollo (estadio I-II) en las morfologías del horizonte edáfico carbonatado.

Dataciones: Las edades obtenidas (muestras ALCAN-9 y ALCAN-10) mediante OSL son respectivamente 9.3 ± 0.6 ka y 10.4 ± 0.5 ka (Tabla 2). La edad ponderada de las dos muestras es 10 ± 1 ka.

4.8. Terraza Qt8

Distribución: La terraza Qt8 es el nivel más cercano a la llanura de inundación y cauce actual. Los restos de este nivel se preservan a lo largo de 50 km, incrementando

su aparición y continuidad en el sector inferior del valle. Su máximo desarrollo se observa en la parte meridional de la cuenca donde alcanza los 300 m de ancho (Fig. 2).

Altimetría: La superficie de este nivel se encuentra a una altura de 15 m sobre el nivel actual del río en su parte norte y de tan solo 3-5 m en su parte sur (Tabla 1). Su pendiente media es de 4.4‰.

Depósito-estratigrafía: El depósito está compuesto de 1 a 3.5 m de gravas que presentan imbricaciones y estratificación cruzadas planar (Gp) y en surco (Gt). Se han observado algunas intercalaciones de arena (St y Sp) de poca continuidad. En ocasiones aparece una parte superior con limos de inundación masivos de hasta 1 m de espesor (Fm).

SCI: No se ha reconocido ninguna morfología de carbonato edáfico a techo de los depósitos de este nivel.

Daticiones: No se han practicado técnicas de datación absoluta.

4.9. Terraza Qt9

Este nivel corresponde a la actual llanura de inundación. Su anchura es irregular a lo largo del río Alcanadre. Su presencia es casi inexistente en los estrechos del río al paso por los materiales de las Sierras Exteriores. Después, está limitada de 15 a 50 m por los relieves estructurales del tramo medio. Finalmente, presenta una anchura de 100-300 m tras la confluencia del río Guatizalema.

5. Consideraciones paleoambientales y conclusiones

En el sector del valle del río Alcanadre excavado en la depresión del Ebro se conserva un extenso sistema de terrazas erosivas cuaternarias. Las observaciones cartográficas indican la existencia de nueve pulsaciones sedimentarias que se disponen en un sistema encajado (Fig. 5), desde Qt1 (la terraza más antigua) hasta Qt9 (la terraza más moderna). Estos niveles de terraza están formados por cubiertas de gravas que se apoyan sobre litologías areniscosas y lutíticas terciarias con disposición horizontal.

Por el momento, la propuesta cronológica para esta secuencia de terrazas (Fig. 5) incluye datos para los niveles más antiguos, basados en técnicas paleomagnéticas, y para niveles más modernos utilizando Luminiscencia Ópticamente Estimulada (OSL).

Los datos de paleomagnetismo indican que las terrazas Qt1 y Qt3 (y por interpolación el nivel Qt2) pertenecen al cron Matuyama de polaridad inversa. De manera tentativa, considerando además la diferencia altimétrica relativa entre niveles, por un lado, y la correlación con los niveles superiores de terrazas del río Cinca (Sancho *et al.*, 2007), por otro, se plantea como hipótesis cronológica la posibilidad de situar la terraza Qt1 en el entorno del subcrón Jaramillo (1000 ka) y la terraza Qt3 cerca del límite entre los cron Brunhes y Matuyama (780 ka). La terraza Qt2 presentaría una edad intermedia.

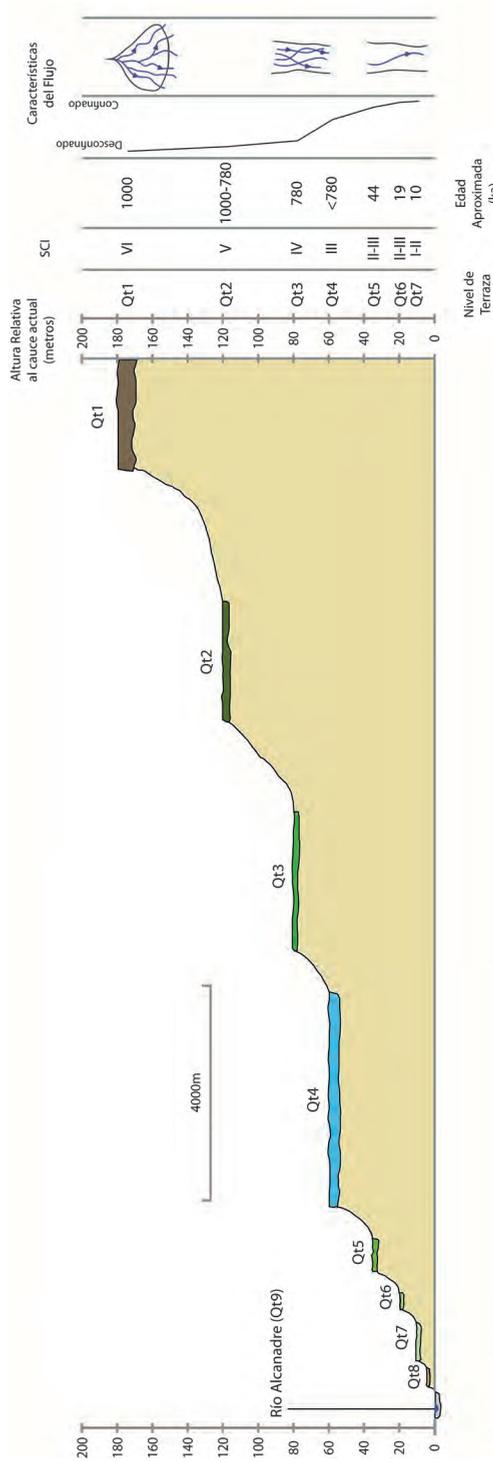


Figura 5. Perfil altimétrico del sistema de terrazas del río Alcanadre y síntesis de datos altimétricos, estado de desarrollo morfológico del carbonato edáfico, propuesta cronológica y ambiente sedimentario.

Por otro lado, la luminiscencia permite proponer edades de 44 ± 2 ka, 19 ± 2 ka y 10 ± 1 ka para los niveles Qt5, Qt6 y Qt7, respectivamente.

La distribución espacial de las terrazas y las características sedimentológicas de sus depósitos indican que las primeras etapas de agradación se producen en un sistema fluvial de canales entrelazados con gran capacidad de migración lateral. Progresivamente, se incrementa el grado de confinamiento a medida que progresa el encajamiento, especialmente a partir de la terraza Qt4, que constituye el principal marcador geomorfológico de referencia en todo el valle (Fig. 5).

Además de la deriva observada en el ambiente sedimentario, el grado de desarrollo de los suelos presenta también una clara dependencia respecto al tiempo (Fig. 5). Las calcetas pedogenéticas asociadas con ambientes de tendencia árida (Alonso-Zarza y Wright, 2010) alcanzan el estadio VI de desarrollo morfológico del carbonato en el nivel de terraza más antiguo (Qt1), mientras que la terraza Qt7 presenta un estadio II-I. Una dependencia similar del grado de desarrollo del suelo respecto a la edad han sido realizadas en terrazas de los ríos Cinca y Gállego (Sancho *et al.*, 2004; Lewis *et al.*, 2009). Estos autores establecen una relación directa entre la evolución del suelo y la edad absoluta de la terraza soporte. En la secuencia de terrazas del río Alcanadre, el estadio VI de desarrollo morfológico del carbonato (terraceza Qt1) requeriría al menos 1000 ka para su aparición, mientras el estadio IV necesitaría 780 ka. Por otro lado, los estadios II y III (terracezas Qt5 y Qt6) aparecerían a partir de 20 ka y los primeros indicios de enriquecimiento carbonatado se detectarían con claridad en la terraza Qt7 (10 ka).

Desde el punto de vista paleoambiental, y teniendo en cuenta las edades precisas obtenidas para las terrazas Qt5, Qt6 y Qt7, es posible realizar una serie de consideraciones relativas a los mecanismos formadores de las terrazas y a las variaciones climáticas requeridas. En efecto, la terraza Qt5 ofrece una edad de 44 ± 2 ka. Hacia el este, en el río Cinca, se han encontrado depósitos de terraza datados en 47 ± 4 ka y que corresponden al nivel denominado en esa cuenca como Qt8 (Lewis *et al.*, 2009). Hacia el oeste, en el río Gállego, los depósitos de edad similar (45 ± 3 ka) corresponden al nivel inferior (QtLow) (Lewis *et al.*, 2009). En Bardenas Reales de Navarra, se registra un periodo de agradación denominado Qt2 en torno a los 52 ka (Sancho *et al.*, 2008). Por otra parte, en el río Guadalope (sector centromeridional de la cuenca del Ebro), Fuller *et al.* (1998) localizan una fase de agradación fluvial a 49 ka. A escala global, la formación de la terraza Qt5 estaría próxima al evento frío Heinrich H5 (Bond *et al.*, 1992), que tiene lugar durante el periodo MIS3 (Marine Isotope Stage) (Martinson *et al.*, 1987), que aunque se define como un estadio interglaciar, presenta en este rango, temperaturas similares al MIS 4, de características glaciares.

La media ponderada de la terraza Qt6 es 19 ± 2 ka. En el sector superior de cuenca del río Cinca aparecen depósitos fluviales arenosos con edades de 22.1 ± 0.2 ka y 15.2 ± 0.1 ka (Lewis *et al.*, 2009). Por otro lado, en el sector bajo de este valle se ha localizado un nivel eólico de loess cuya edad es 20 ± 3 ka (Lewis *et al.*, 2009). También en la cuenca baja del río Gállego se ha identificado una terraza de gravas (T12) poco desarrollada de edad 16.8 ± 1.3 ka superpuesta a registros aluviales anteriores (Benito *et al.*,

2010). Más al oeste en Bardenas Reales de Navarra Sancho *et al.* (2008) detectan un pulso sedimentario comprendido entre 21 y 15 ka. Finalmente, en diferentes sectores del valle del río Guadalupe identifican un episodio de aluvionamiento entre 19 y 16 ka (Fuller *et al.*, 1998). A escala global, esta edad se corresponde con el estadio MIS 2, de carácter frío (Martinson *et al.*, 1987) y se correlacionaría con el último máximo glaciario (LGM) (por ej., Mix *et al.*, 2001).

La mejor edad obtenida para la terraza Qt7 del río Alcanadre es 10 ± 1 ka. En la cuenca del Cinca, la terraza Qt9 tiene una edad media ponderada de 11 ± 1 ka (Lewis *et al.*, 2009). Esta fase de actividad fluvial se corresponde con el periodo frío global denominado Younger Dryas (YD) (Broecker *et al.*, 2010).

El repaso de la cronología de estos registros fluviales a escala regional evidencia una clara diferencia entre las secuencias de los ríos Cinca y Gállego y del Alcanadre. Mientras que en el valle del río Alcanadre aparece claramente una terraza relacionada con el LGM, en las cuencas de los ríos Cinca y Gállego no se preserva un nivel destacado correlacionable con esta fase fría global, si bien aparecen algunos indicadores de actividad fluvial limitada. A pesar de ocupar una posición geográfica intermedia, el hecho diferencial parece encontrarse en la falta de actividad glaciario en la cabecera de la cuenca del río Alcanadre, localizada en la parte norte de la Sierra de Guara (Sierras Exteriores pirenaicas).

En las cuencas de los ríos Cinca y Gállego (dos de los principales afluentes pirenaicos del río Ebro), además de no registrarse terrazas durante el período LGM, tampoco aparecen registros glaciares asociados con una fase de estabilización glaciario en la Cordillera Pirenaica para este momento (García-Ruiz *et al.*, 2003, 2012; Peña *et al.*, 2004; Lewis *et al.*, 2009). La formación de las terrazas en estos ríos está directamente relacionada con grandes descargas de agua de fusión y sedimentos procedentes de los aparatos glaciares de cabecera (Lewis *et al.*, 2009; Benito *et al.*, 2010). Mientras que la agradación glaciario requiere un incremento en las precipitaciones nivales, que dependería de la circulación atmosférica y oceánica en el Atlántico Norte, la fusión en el frente glaciario coincide con períodos de máxima insolación (Lewis *et al.*, 2009). Por tanto, en la Cordillera Pirenaica durante la fase LGM, las precipitaciones nivales no fueron importantes y, como consecuencia, el efecto de la insolación resultó secundario.

La presencia de una terraza asociada con el Last Glacial Maximum en la cuenca del Alcanadre requiere plantear un contexto morfodinámico diferente, en el que la cabecera del río no se encuentra afectada por el desarrollo glaciario, al igual que sucede en otros sectores de la Cuenca del Ebro, como Bardenas Reales de Navarra y el valle del río Guadalupe. En este sentido, la agradación fluvial necesaria para la formación de las terrazas del río Alcanadre estaría asociada con condiciones frías periglaciares (Chorley *et al.*, 1984). En este escenario, y gracias a una cobertera vegetal esteparia, la mayor eficacia de los procesos de meteorización mecánica y una distribución estacional de las precipitaciones (Fuller *et al.*, 1998), incrementarían la disponibilidad de sedimentos y su arrastre por la escorrentía superficial de las laderas hasta los fondos de los valles.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Grupo Paleoambientes del Cuaternario (Gobierno de Aragón-Universidad de Zaragoza) y por el proyecto CGL2009-10455/BTE (Ministerio de Ciencia e Innovación y fondos FEDER).

Referencias bibliográficas

- Alberto, F., Gutiérrez, M., Ibáñez, M.J., Machín, J., Meléndez, A., Peña, J.L., Pocoví, A., Rodríguez, J. 1983. El piedemonte plicocuaternal en el sector central pirenaico (Huesca y Lérida). *Geographicalia* 18, 109-126.
- Alonso-Zarza, A., Wright, V.P. 2010. Calcretes. En *Carbonates in continental settings*, A. Alonso-Zarza, L.H. Tanner, (eds.), *Developments in Sedimentology* 61, 225-267.
- Arche, A., Evans, G., Clavell, E. 2010. Some considerations on the initiation of the present SE Ebro river drainage system: Post- or pre-Messinian? *Journal of Iberian Geology* 36, 73-85.
- Benito, G., Sancho, C., Peña, J.L., Machado, M.J., Rhodes, E.J. 2010. Large-scale karst subsidence and accelerated fluvial aggradation during MIS6 in NE Spain: climatic and paleohydrological implications. *Quaternary Science Reviews* 29, 2694-2704.
- Bond, G., Heinrich, H., Broecker, W., Labeyrie, L., McManua, J., Andrews, J., Huon, S. Jantschick, R., Clausen, S., Simet, C., Tedesco, K., Klas, M., Bonani, G., Ivy, S. 1992. Evidence for massive discharges of icebergs into the North Atlantic Ocean during the last glacial period. *Nature* 360, 245-249.
- Bridgland, D.R. 2000. River terrace systems in north-west Europe: an archive of environmental change, uplift and early human occupation. *Quaternary Science Reviews* 19, 1293-1303.
- Bridgland, D., Westaway, R. 2008. Climatically controlled river terrace staircases: A worldwide Quaternary phenomenon. *Geomorphology* 98, 285-315.
- Broecker, W.S., Denton, G.H., Edwards, R.L., Cheng, H., Aalley, R.B., Putnam, A.E. 2010. Putting the Younger Dryas cold event into context. *Quaternary Science Reviews* 29, 1078-1081.
- Calle, M. 2012. *Distribución espacio-temporal de las terrazas del río Alcanadre (Provincia de Huesca): controles climáticos y/o tectónicos*. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 58 pp.
- Chadima, M., Hrouda, F. 2006. Remasoft 3.0 a user-friendly paleomagnetic data browser and analyzer. *Travaux Géophysiques* 27, 20-21.
- Chorley, R.J., Schumm, S.A., Sugden, D.E. 1984. *Geomorphology*. Methuen & Co. Ltd, London, 605 pp.
- Costa, E., Garcés, M., López-Blanco, M., Beamud, E., Gómez-Paccard, M., Larrasoana, J.C. 2009. Closing and continentalization of the South Pyrenean foreland basin (NE Spain): magnetochronological constraints. *Basin Research* 22, 904-917. Doi.10.1111/j.1365-2117.2009.00452.x.
- Easterbrook, D.J. 1999. *Surface processes and landforms*. Prentice-Hall International (UK), London, 546 pp.
- Fuller, I., Macklin, M., Lewin, J., Passmore, D., Wintle, A. 1998. River response to high-frequency climate oscillations in southern Europe over the past 200 ky. *Geology* 26, 275-278.
- García-Ruiz, J.M., Valero-Garcés, B.L., Martí-Bono, C., González-Sampériz, P. 2003. Asynchronicity of maximum glacier advances in the central Spanish Pyrenees. *Journal of Quaternary Science* 18, 61-72.
- García-Ruiz, J.M., Martí-Bono, C., Peña-Monné, J.L., Sancho, C., Rhodes, E.J., Valero-Garcés, B., González-Sampériz, P., Moreno, A. 2012. Glacial and fluvial deposits in the Aragón

- Valley, central-western Pyrenees: chronology of the Pyrenean late Pleistocene glaciers. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 95, 15-32.
- Gile, L.H., Peterson, F.F., Grossman, R.B. 1965. The K horizon: a master soil horizon of carbonate accumulation. *Soil Science* 99, 74-82.
- Gile, L.H., Hawlwy, J.W., Grossman, R.B. 1981. *Soils and geomorphology in the Basin and Range area of Southern New Mexico-Guidebook to the Desert Project*. Memoir 39, New Mexico Bureau of Mines & Mineral Resources, Socorro, 222 pp.
- Kirschvink, J.L. 1980. The least-squares line and plane and the analysis of paleomagnetic data. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 62, 699-718.
- Lewis, C.J., Vergés, J., Marzo, M. 2000. High mountains in a zone of extended crust: insights into the Neogene-Quaternary topographic development of northeastern Iberia. *Tectonics* 19, 86-102.
- Lewis, C., McDonald, E., Sancho, C., Peña, J.L., Rhodes, E. 2009. Climatic implications of correlated Upper Pleistocene glacial and fluvial deposits on the Cinca and Gállego Rivers (NE Spain) based on OSL dating and soil stratigraphy. *Global and Planetary Change* 67, 141-152.
- Luzón, A., Pérez, A., Soriano, M.A., Pocoví, A. 2008. Sedimentary record of Pleistocene paleodoline evolution in the Ebro basin (NE Spain). *Sedimentary Geology* 205, 1-13.
- Machette, N.M. 1985. Calcic soils of the southwestern united states. En *Soils and Quaternary Geology of the Southwestern United States*, D.L. Weide (ed.), Geological Society of America, Boulder, pp. 1-22.
- Macklin, M.G., Lewin, J., Woodward, J.C. 2012. The fluvial record of climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 370, 2143-2172.
- Martinson, D.G., Pisias, N., Hays, J.D., Imbrie, J., Moore, T.C., Shackleton, N.J. 1987. Age dating and the orbital theory of the Ice Ages: development of a high resolution 0 to 300,000-year chronostratigraphy. *Quaternary Research* 27, 1-29.
- Meléndez, A., Alonso-Zarza, A.M., Sancho, C. 2011. Multi-storey calcreta profiles developed during the initial stages of the configuration of the Ebro Basin's exorheic fluvial network. *Geomorphology* 134, 232-248.
- Mensua, S., Ibáñez, M.J. 1977. *Terrazas y glaciares del centro de la Depresión del Ebro. III Reunión Nacional del Grupo de Trabajo del Cuaternario*. Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 18 pp.
- Miall, A.D. 1977. A review of the braided-river depositional environment. *Earth-Science Reviews* 13, 1-62.
- Millán, H. 2006. *Estructura y cinemática del frente de cabalgamiento surpirenaico en las Sierras Exteriores aragonesas*. Colección de Estudios Altoaragoneses, 53, Instituto de Estudios Altoaragoneses, Huesca, 398 pp.
- Millán, H., Pueyo, M., Emilio, L., Aurell, M., Luzón, A., Oliva, B., Martínez, M.B., Pocoví, A. 2000. Actividad tectónica registrada en los depósitos terciarios del frente meridional del Pirineo Central. *Revista de la Sociedad Geológica de España* 13, 279-300.
- Mix, A.C., Bard, E., Schneider, R. 2001. Environmental processes of the ice age: land, oceans, glaciers (EPILOG). *Quaternary Science Reviews* 20, 627-657.
- Murray, A.S., Wintle, A.G. 2000. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements* 32, 57-73.
- Peña-Monné, J.L., Sancho-Marcén, C. 2011. Aproximación a las fases frías cuaternarias en las cuencas centrales pirenaicas a partir de la correlación de registros paleoclimáticos. En *El Cuaternario en España y áreas afines. Avances en 2011*, V. Turu, A. Constante (eds.), XIII Reunión Nacional del Cuaternario, Andorra, pp. 37-40.
- Peña, J.L., Sancho, C., Lewis, C., McDonald, E., Rhodes, E. 2004. Datos cronológicos de las morrenas terminales del glaciar del Gállego y su relación con las terrazas fluvio-glaciares (Pirineo de Huesca). En *Geografía Física de Aragón: aspectos generales y temáticos*, J.L.

- Peña, L.A. Longares, M. Sánchez (eds.), Departamento de Geografía, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, pp. 71-84.
- Plaziat, J.C. 1981. Late Cretaceous to late Eocene Palaeogeographic evolution of Southwest Europe. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 36, 263-320.
- Pueyo, E.L., Garcés, M., Mauritsch, H.J., Lewis, C., Scholger, R., Sancho, C., Molina, R., Schnepf, E., Larrasoana, J.C., Parés, J.M., Pocoví, A., Muñoz, A., Valero-Garcés, B., Millán, H., Laplana, C., Oliva, B., González, P. 2001. Sampling, transportation and magnetic-free consolidation of extremely soft sediments for paleomagnetic purposes: A successful "recipe". En *2nd European Archaeomagnetic Meeting -Abstracts*, Leoben, Austria, 81-84.
- Puigdefábregas, C., Souquet, M. 1986. Tectonosedimentary cycles and depositional sequences of the Mesozoic and Tertiary of the Pyrenees. *Tectonophysics* 129, 173-203.
- Rodríguez-Vidal, J. 1983. *Geomorfología de las Sierras Exteriores oscenses y su piedemonte*. Colección de Estudios Altoaragoneses, 4, Instituto de Estudios Altoaragoneses, Huesca, 163 pp.
- Sancho, C. 1991. *Geomorfología de la cuenca baja del río Cinca*. Tesis doctoral no publicada. Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 743 pp.
- Sancho, C., Meléndez, A. 1992. Génesis y significado ambiental de los caliches Pleistocenos de la región del Cinca (Depresión del Ebro). *Revista de la Sociedad Geológica de España* 5, 81-93.
- Sancho, C., Peña, J.L., Lewis, C., McDonald, E., Rhodes, E. 2003. Preliminary dating of glacial and fluvial deposits in the Cinca River Valley (NE Spain): chronological evidences for the Glacial Maximum in the Pyrenees? En *Quaternary climatic changes and environmental crises in the Mediterranean region*, M.B. Ruiz, M. Dorado, A. Valdeolmillos, M.J. Gil, T. Bardají, I. Bustamante e I. Martínez (eds.), Universidad de Alcalá-Ministerio de Ciencia y Tecnología-INQUA, pp. 169-173.
- Sancho, C., Peña, J.L., Lewis, C., McDonald, E., Rhodes, E. 2004. Registros fluviales y glaciares cuaternarios en las cuencas de los ríos Cinca y Gállego (Pirineos y depresión del Ebro). En *Itinerarios Geológicos por Aragón*, F. Colombo, C.L. Liesa, G. Meléndez, A. Pocoví, C. Sancho, A.R. Soria (eds.), Sociedad Geológica de España, Madrid, pp. 181-205.
- Sancho, C., Peña, J.L., Lewis, C., McDonald, E., Rhodes, E., Pueyo, E.L., Gosse, J. 2007. Cronología del sistema de terrazas cuaternarias en la cuenca del río Cinca (Pirineos y depresión del Ebro). En *Contribuciones al Estudio del Periodo Cuaternario*, J. Lario, P.G. Silva (eds.), Asociación Española para el Estudio del Cuaternario, pp. 31-32.
- Sancho, C., Muñoz, A., Rhodes, E., McDonald, E., Peña, J.L., Benito, G., Longares, L.A. 2008. Morfoestratigrafía y cronología de registros fluviales del Pleistoceno superior en Bardenas Reales de Navarra: implicaciones paleoambientales. *Geogaceta* 45, 47-50.
- Stokes, M., Cunha, P.P., Martins, A.A. 2012. Techniques for analysing Late Cenozoic river terrace sequences. *Geomorphology* 165-166, 1-6.
- Urgeles, R., Camerlenghi, A., García-Castellanos, D., De Mol, B., Garcés, M., Vergés, J., Haslam, I., Hardman, M. 2011. New constraints on the Messinian sea level drawdown from 3D seismic data of the Ebro Margin, western Mediterranean. *Basin Research* 23, 123-145.
- Wegmann, K.W., Pazzaglia, F.J. 2009. Late Quaternary fluvial terraces of the Romagna and Marche Apennines, Italy: Climatic, lithologic, and tectonic controls on terrace genesis in an active orogen. *Quaternary Science Reviews* 28, 137-165.
- Westaway, R., Bridgland, D.R., Sinha, R., Demir, T. 2009. Fluvial sequences as evidence for landscape and climatic evolution in the Late Cenozoic: a synthesis of data from IGCP 518. *Global and Planetary Change* 68, 237-253.