

GEOMETRIA Y DEPOSITOS DE LAS CUBETAS GLACIOLACUSTRES DEL PIRINEO

J. Bordonau*, J. Pous*, P. Queralt* y J. M. Vilaplana*

RESUMEN

Mediante la combinación de métodos geomorfológicos y sondeos eléctricos, se han estudiado 6 cubetas lacustres cuaternarias de origen glacial en el Pirineo. Esterrí d'Aneu, Benasque y Bono son unos claros ejemplos de cubetas de sobreexcavación glacial. El Seminari de Vilaller constituye un ambiente lacustre proglacial debido a un cierre morrénico. El lago de Taüll como ejemplo de un ambiente lacustre yuxtaglacial debido también a una obturación morrénica y la laguna de Les Basses d'Ules, en el valle de Arán, formada a partir de procesos de fracturación del substrato rocoso después de la retirada del glaciar del Garona. Debido al elevado contraste entre la resistividad de los diferentes materiales cuaternarios de recubrimiento y el substrato rocoso, se ha podido determinar mediante sondeos eléctricos el espesor del cuaternario y diferenciar las diversas formaciones que lo constituyen. En general, aparecen 3 formaciones cuaternarias sobre el substrato rocoso paleozoico: una unidad glaciolacustre que es relativamente conductora, una unidad fluviodeltaica de resistividad variable pero con valores más elevados que la anterior, y una unidad superior de resistividades muy variables según la cubeta y que, en general, es más resistente. La potencia del relleno cuaternario es muy variable según la cubeta. Así encontramos espesores de más de 300 metros de media en la cubeta de Esterrí d'Aneu y de tan solo unos pocos metros en Les Basses d'Ules.

Palabras clave: *Sobreexcavación glacial, Cubetas glaciolacustres, Cuaternario, Pirineos, Sondeos eléctricos.*

ABSTRACT

Six lacustrine Quaternary basins of glacial origin from the Pyrenees have been studied by using both geomorphological methods and electric soundings. The localities studied are glacial overdeepened basins (Esterrí d'Aneu, Noguera Pallaresa valley; Benasque, Esera valley and Bono, Noguera Ribagorçana valley), proglacial lacustrine basins formed by a morainic-ridge obstruction (Seminari de Vilaller, Noguera Ribagorçana valley), juxtaglacial lacustrine basins formed also by a morainic obstruction (Taüll, Noguera de Tor valley) and lacustrine basins formed by bedrock faulting of the slopes after glacial wastage (Basses d'Ules, Garona valley). The high contrast between the resistivities from the bedrock and the Quaternary deposits allows us to determine not only the thickness of the Quaternary deposits but also the several Quaternary units by using electric soundings. Generally three Quaternary units are present over the paleozoic bedrock: a basal glaciolacustrine unit with a low resistivity, a middle fluviodeltaic unit of variable resistivity though higher than the resistivity from the glaciolacustrine unit, and an upper alluvial and/or fluviororrential unit with high resistivities. The thickness of the Quaternary deposits is very variable, ranging from more than 300 meters in the Esterrí d'Aneu overdeepened basin to a few meters in the Basses d'Ules basin.

Key words: *Glacial overdeepening, Glaciolacustrine basins, Quaternary, Pyrenees, Electrical soundings.*

Introducción

El estudio de las cubetas lacustres relacionadas con el glaciarrismo cuaternario en el Pirineo se está abor-

dando mediante métodos geomorfológicos y sedimentológicos en aquellos lugares donde las formas del relieve se encuentran bien conservadas y los sedimentos presentan buenos afloramientos. Cuando éste no es el

* Departament de Geologia Dinàmica, Geofísica i Paleontologia. Universitat de Barcelona. Zona Universitària de Pedralbes, 08028 Barcelona.

caso, el estudio es más limitado y está sujeto al establecimiento de determinadas hipótesis. Desde hace pocos años se han empezado a utilizar métodos geofísicos para determinar la potencia de estas formaciones cuaternarias y diferenciar los distintos cuerpos sedimentarios que rellenan estas cubetas lacustres. De esta manera se puede constatar o refutar aquellas hipótesis.

Vilaplana y Casas (1983) publicaron un primer trabajo en el que se estudiaban las cubetas de sobreexcavación glacial de Bono y de Barruera, en los valles del Noguera Ribagorçana y del Noguera de Tor, respectivamente. En dicho artículo se proporcionaban los primeros datos sobre la geometría de estas cubetas de fondo de valle en el Pirineo. También se indicaba la utilidad de los métodos geofísicos eléctricos para caracterizar los sedimentos de relleno, fundamentalmente lacustres (espesor, diferenciación de grandes unidades, etc.). Los importantes espesores de sedimentos detectados en el trabajo antes citado (entre 150 y 200 metros), así como su indudable valor estratigráfico en la reconstrucción del Cuaternario, han hecho que, recientemente, siguiéramos y ampliáramos esta línea de estudio a otros valles pirenaicos (Pous *et al.*, 1988). En este trabajo queremos dar a conocer el estado actual de estos estudios a través de la discusión de los últimos resultados obtenidos en 6 de estas cubetas del Pirineo relacionadas con el glaciario cuaternario. El objetivo principal ha sido el estudio propiamente dicho de estas cubetas glaciolacustres. Para ello se ha integrado el reconocimiento geomorfológico y estratigráfico con la información aportada por los sondeos eléctricos. Todo ello ha conducido a un mejor entendimiento de la constitución (geometría, sedimentología y estratigrafía) de estas cubetas, del Pirineo, a la vez que se ha ratificado la validez, utilidad y limitaciones de este método geofísico en el estudio de este tipo de formaciones cuaternarias.

El marco geológico

Las seis localidades del Pirineo (figura 1) que hemos estudiado pueden agruparse en dos grandes categorías: grandes cubetas de sobreexcavación glacial (Esterrí d'Aneu, Benasque y Bono) y localidades puntuales con un interés geomorfológico específico (Seminari de Vilaller, Taüll y Basses d'Ules). Los rasgos generales y los tipos de formaciones glaciolacustres cuaternarias en las que se centra nuestro estudio responden a alguno de los cuatro tipos de ambientes lacustres de edad cuaternaria siguientes:

1. *Ambientes lacustres ligados a cubetas de sobreexcavación glacial.* La acción erosiva de los glaciares cuaternarios modeló importantes cubetas de sobreexcavación que actuaron como ambientes glaciolacustres después del retroceso de los glaciares cuaternarios

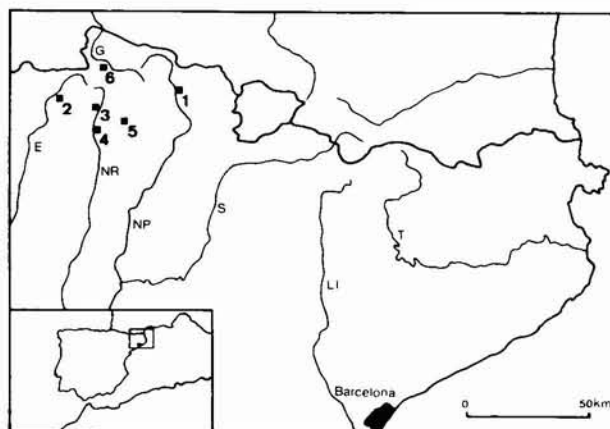


Fig. 1.—Mapa de situación de las cubetas lacustres estudiadas. Leyenda: E, Esera; NR, Noguera Ribagorçana; NP, Noguera Pallaresa; S, Segre; LI, Llobregat; T, Tor; G, Garona; 1, Esterrí d'Aneu; 2, Benasque; 3, Bono; 4, Seminari de Vilaller; 5, Taüll; 6, Basses d'Ules.

hasta la total colmatación de las cubetas. Este es el caso de las cubetas de Bono y Barruera, ya estudiadas por Vilaplana y Casas (1983), de Esterrí d'Aneu (valle del Noguera Pallaresa) y Benasque (valle del Esera).

2. *Ambientes lacustres proglaciales debidos a un cierre morrénico.* Los complejos morrénicos terminales de los diferentes aparatos glaciares cuaternarios pirenaicos constituyeron unas presas naturales y determinaron la existencia de lagos proglaciales después del retroceso aguas arriba de las lenguas glaciales. Como ejemplo puede citarse el lago asociado al complejo terminal del Seminari de Vilaller (valle del Noguera Ribagorçana).

3. *Ambientes lacustres yuxtáglicas debidos a una obturación morrénica.* Los cordones morrénicos laterales de los glaciares de los valles principales obturaron el drenaje de los valles tributarios y determinaron la existencia de lagos de obturación yuxtáglica. Estos ambientes son muy abundantes en los Pirineos, pudiendo destacarse los de Cerler en el valle del Esera (Bordonau, 1989 en preparación); Taüll en el valle del río Noguera de Tor (Vilaplana, 1983); Linás de Broto en la cuenca del río Ara, Llestui en el valle de Llauset y Arinsal y Segudet en Andorra (Serrat *et al.*, 1983).

4. *Otros ambientes lacustres.* Este es el caso de diversas lagunas situadas detrás de pequeños escarpes rocosos a contrapendiente en relación a la pendiente general de la ladera, debidos a procesos de fracturación del substrato rocoso después de la desaparición de los glaciares cuaternarios (Bordonau, 1985; Bordonau y Vilaplana, 1986). Como ejemplo pueden citarse Les Basses d'Ules, en el valle de Arán.

Actualmente todos estos ambientes lacustres no son funcionales y las diferentes cubetas se encuentran totalmente colmatadas, aflorando en superficie únicamente sedimentos aluviales y pequeñas turberas, estas últimas únicamente en Les Basses d'Ules. Por este motivo se presentaba con especial interés la utilización de métodos geofísicos que permitieran determinar la existencia en profundidad de depósitos lacustres y caracterizar los ambientes sedimentarios cuaternarios.

Metodología

El método geofísico utilizado ha sido el de los sondeos eléctricos verticales con dispositivo Schlumberger (Orellana, 1972). Los métodos eléctricos parecen adecuados dado el importante contraste de resistividad que cabe esperar entre los materiales cuaternarios y el substrato rocoso paleozoico. La distribución de sondeos en cada cubeta se ha efectuado consensuando por una parte una distribución estratégica para obtener la máxima información sobre la geometría de la misma y por otra las disponibilidades topográficas y de acceso de cada una de ellas. La densidad de puntos medidos en cada sondeo ha sido variable y, en promedio, ha sido de unos 8 puntos por década de la escala logarítmica, aumentando esta densidad en los tramos de curva más delicados. La distancia máxima entre electrodos de corriente ha sido muy variable, lógicamente en función del tamaño de las distintas cubetas estudiadas. Los sondeos eléctricos más largos se han realizado en la cubeta de Esterrí d'Aneu donde se han alcanzado distancias máximas de hasta 930 metros entre electrodos de corriente.

En la figura 2 se presentan algunas de las curvas de resistividad aparente obtenidas en la cubeta de Esterrí d'Aneu que son representativas de la respuesta general del método en este tipo de cubetas. El contacto entre los materiales cuaternarios basales conductores y el substrato paleozoico resistente queda perfectamente caracterizado por el tramo final de tipo H de las curvas. El inicio de las mismas (AB/2 pequeños) es más irregular pero, en general, suele ser de tipo K o Q y determina los niveles superiores resistentes. Así pues, las curvas de resistividad aparente son globalmente del tipo KH o QH (Orellana, 1972).

La interpretación de los sondeos se ha realizado mediante el algoritmo de inversión de Pous *et al.* (1987), a la vez que se ha evaluado el margen de equivalencia de cada solución con el objeto de hallar la más compatible con todo el conjunto de sondeos de una misma cubeta. Ello se ha realizado con un algoritmo de generación de modelos equivalentes (Pous, 1983).

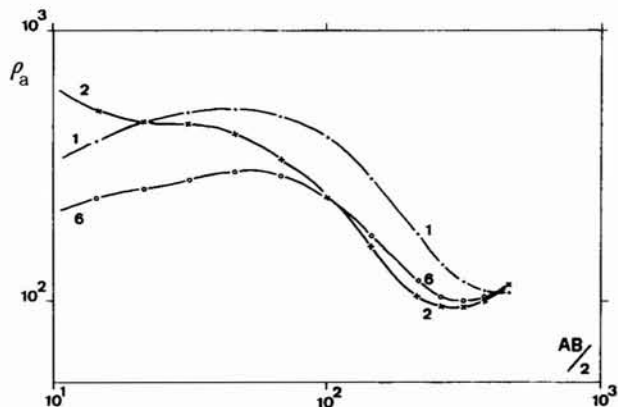


Fig. 2.—Curvas de resistividad aparente en la cubeta de Esterrí d'Aneu, con indicación de los puntos medidos.

Los sondeos se han realizado de manera que la dirección de las líneas de electrodos fuesen paralelas a la pared rocosa y estuvieran a distancia suficiente de la misma para que el efecto del borde de cuenca fuese mínimo. En aquellos casos en los que había indicios de la presencia de efectos laterales debidos a una variación lateral de la resistividad, se ha realizado una modelización bidimensional según el modelo previsto desde la superficie. Esta modelización se ha realizado mediante el algoritmo publicado por Queralt *et al.* (1988), basado en el método de los elementos finitos. Este efecto sólo ha sido necesario considerarlo en la cubeta de Benasque donde aparece un umbral importante del substrato paleozoico (curva 5 de la figura 3). En estos casos se hace imprescindible la modelización para poder controlar la bondad de las interpretaciones realizadas. De lo contrario se puede caer en un error considerable de interpretación.

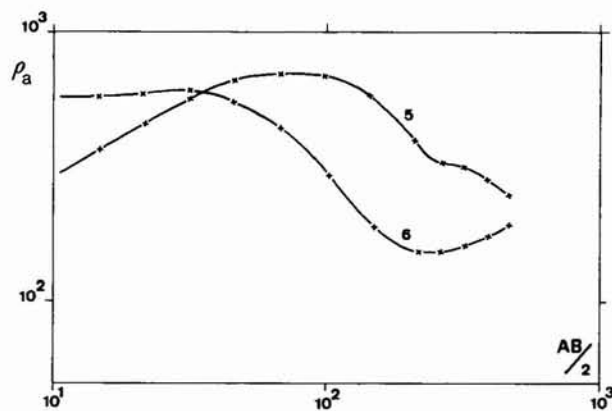


Fig. 3.—Ejemplos de curvas de resistividad aparente en la cubeta de Benasque. La curva 5 muestra el efecto del umbral del substrato rocoso.

En la figura 4 se presenta una gráfica ilustrativa de este fenómeno. Se trata del modelo utilizado en la cubeta de Benasque, constituido por 3 capas con un umbral del substrato en la segunda. Queremos hacer notar que es la primera vez que se publican los resultados de un modelo de estas características. El centro del dispositivo eléctrico se sitúa a distancia $d=50$ m del umbral y el sondeo eléctrico se realiza perpendicularmente al mismo. Los resultados que se obtienen son muy significativos (véase figura 4). Entre los dos modelos estratificados ($a=0$) aparece todo el rango de posibilidades del ancho del umbral. Para un ancho de 200 y 300 metros la curva de resistividad aparente presenta una morfología compatible con un medio estratificado y, si se interpreta como tal, se cometerá un error. Para un ancho de 400 y 500 metros observamos que aparece una nueva inflexión en la curva, indicativa de que el modelo se aparta de una estratificación horizontal. Cuando el ancho es infinito, es importante notar que la curva presenta de nuevo una morfología propia de un modelo estratificado al cual le correspondería una disminución importante del espesor de la segunda capa. Este fenómeno es consecuencia del recubrimiento superficial (primera capa), pues si no existiera éste y, por tanto, el contacto vertical estuviera en superficie, aparecería la clásica discontinuidad que caracteriza la presencia de una falla (contacto vertical) en la curva de resistividad aparente.

Concluimos, pues, que incluso en el caso de que la morfología de las curvas de resistividad aparente no manifieste la presencia de discontinuidades laterales del subsuelo, no es óbice que éstas no existan. Por tanto, se hace necesaria una modelización sistemática en dos dimensiones para controlar el efecto real de estos modelos sobre las curvas de sondeos eléctricos verticales.

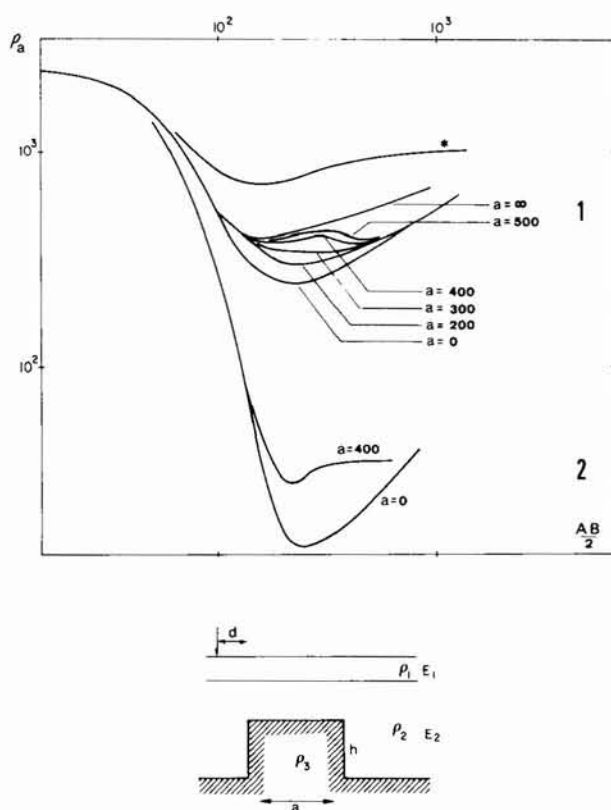


Fig. 4.—Abaco de curvas de resistividad aparente según el modelo que simula el umbral del substrato rocoso y líneas de emisión del sondeo eléctrico perpendiculares al mismo: 1) Modelo $\rho_1=2.400$ (Ωm), $\rho_2=200$, $\rho_3=1.000$, $E_1=30$ (m), $E_2=230$, $h=210$, $d=50$ m. (*: curva correspondiente a un modelo estratificado de 3 capas con $E_2=20$ m). 2) Igual modelo que 1) pero con $\rho_2=10$ (Ωm).

Resultados y discusión

Los sondeos eléctricos han puesto de manifiesto una diferenciación clara en las resistividades de los distintos materiales del subsuelo. El substrato rocoso es muy resistente y aunque sólo se dispone de cotas inferiores de su resistividad (las curvas no han alcanzado su tendencia asintótica horizontal) éstas son suficientemente elevadas para identificarlas con el substrato paleozoico. Estas cotas son generalmente de varios centenares de Ωm y en algunos casos superiores a $1.000 \Omega\text{m}$. Las formaciones cuaternarias de relleno presentan resistividades diversas. Debido a que no existe una relación única entre un tipo de roca y su resistividad, a lo sumo sólo podrá establecerse un cierto intervalo de resistividades para materiales de una misma formación y ubicados en una misma cubeta. Por otra parte, si se comparan materiales idénticos de lugares distintos, el margen de posibles valores de la resistividad es todavía más amplio. Por todo ello la interpretación de las distintas

unidades geoelectricas debe realizarse de forma relativa y debe ser correlacionada con los resultados del estudio geomorfológico.

Seguidamente se expondrán los resultados obtenidos en cada uno de los cuatro tipos de cubetas lacustres cuaternarias estudiadas, así como la discusión de los mismos.

Las cubetas de sobreexcavación glacial

La acción erosiva de los glaciares de valle cuaternarios pirenaicos es evidente en el modelado de los circos y los valles glaciales. En estos últimos, la existencia de cubetas de sobreexcavación demuestra que dicha acción erosiva se incrementa en las zonas de máxima acumulación de hielo: en la zona de confluencia de diversas lenguas glaciales, al pie de las paredes rocosas y en las zonas donde el flujo glacial se encuentra frenado debido, por ejemplo, a la existencia de un umbral rocoso formado por rocas muy competentes. Tal es el caso de las cubetas de Esterri d'Aneu, Benasque y Bono, situadas entre 1.000 - 1.100 metros de altura, en los valles de los ríos Noguera Pallaresa, Esera y Noguera Ribagorçana. Vilaplana y Casas (1983) sitúan este episodio erosivo en el *último máximo glacial cuaternario*.

Durante la retirada de las lenguas glaciales cuaternarias, dichas cubetas funcionaron como sendos ambientes lacustres proglaciales, produciéndose un importante proceso de colmatación hasta el final de la glaciación. La etapa final de este relleno sedimentario está representada por los sedimentos aluviales de la llanura aluvial actual y por los sedimentos fluvio-torrenciales (conos de deyección) situados en las zonas de confluencia de los valles tributarios con el valle principal.

Los sondeos eléctricos han aportado información sobre la profundidad a la que se encuentra el substrato rocoso paleozoico y han permitido diferenciar varias unidades geoelectricas en los sedimentos cuaternarios. Los resultados obtenidos en las tres cubetas de sobreexcavación estudiadas permiten caracterizar una serie de rasgos comunes a todas ellas.

Geometría y profundidad de las cubetas. El contacto entre los sedimentos cuaternarios y el substrato rocoso, más resistivo, se identifica claramente en las curvas de resistividad aparente, ya que corresponde a tramos de tipo H presentando el mínimo relativo característico. La profundidad de las cubetas es muy variable, siendo mayor en las zonas centrales de las mismas. Así, esta profundidad máxima es de 400 metros en la cubeta de Esterri (figura 5), 290 metros en la cubeta de Benasque (figura 6) y 200 metros en la de Bono (figura 7). La profundidad decrece paulatinamente hacia la parte distal cercana al umbral rocoso que cierra las cubetas. Este perfil

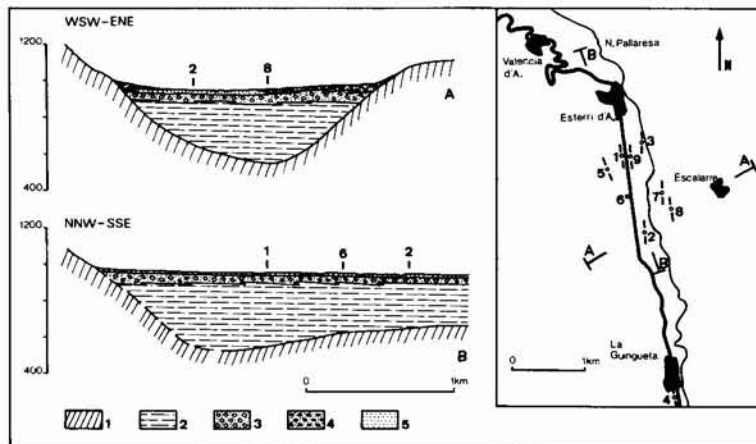


Fig. 5.—Perfil geoelectrico WSW-ENE transversal y NNW-SSE longitudinal de la cubeta de sobreexcavación glacial de Esterrí d'Aneu (valle del Noguera Pallaresa). Leyenda: 1, Substrato paleozoico resistente; 2, Arcillas glaciolacustres con resistividades inferiores a 90 Ω m; 3, Depósitos fluviodeltaicos con resistividades entre 400 y 600 Ω m; 4, Conos de deyección subactuales con resistividades superiores a 1.000 Ω m; 5, Depósitos aluviales subactuales con resistividades muy variables.

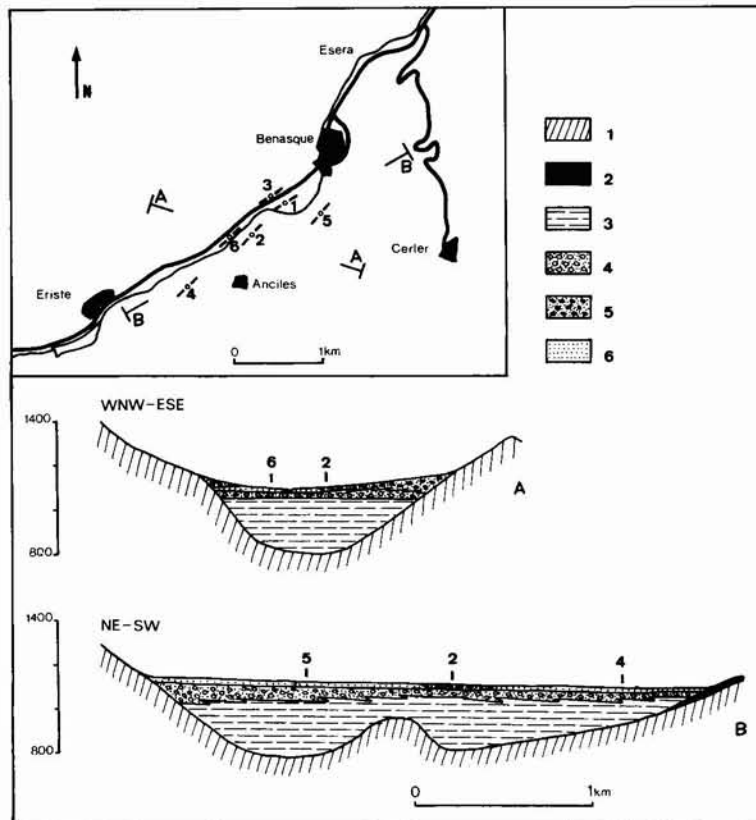


Fig. 6.—Perfil geoelectrico WNW-ESE transversal y NE-SW longitudinal de la cubeta de sobreexcavación glacial de Benasque (valle del Esera). Leyenda: 1, Substrato paleozoico con resistividades superiores a 1.000 Ω m; 2, Till; 3, Arcillas glaciolacustres con resistividades entre 120 y 180 Ω m; 4, Depósitos fluviodeltaicos con resistividades entre 500 y 1.000 Ω m; 5, Conos de deyección subactuales; 6, Depósitos aluviales subactuales.

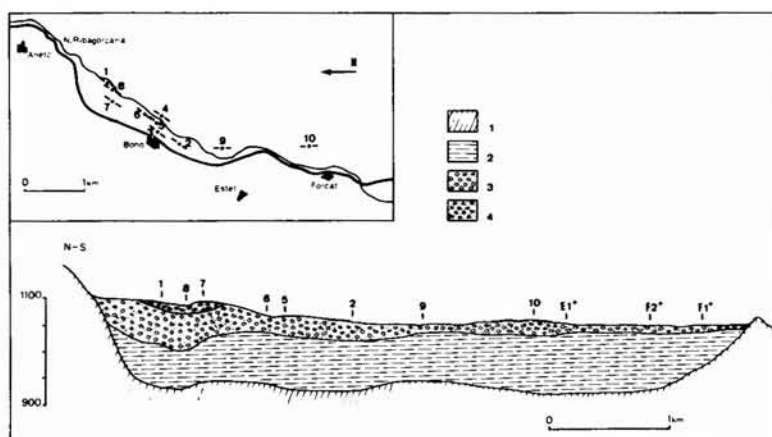


Fig. 7.—Perfil geoelectrico N-S longitudinal de la cubeta de sobreexcavación glacial de Bono (valle del Noguera Ribagorçana). Sondeos eléctricos E1+, F1+ y F2+ según Vilaplana (1983). Leyenda: 1, Substrato paleozoico con resistividades superiores a 3.000 Ωm ; 2, Arcillas glaciolacustres con resistividades entre 100 y 400 Ωm ; 3, Depósitos fluviodeltaicos y depósitos aluviales subactuales con resistividades entre 400 y 1.400 Ωm ; 4, Depósitos fluvio-torrentiales subactuales con resistividades de 1.500 Ωm .

longitudinal corresponde a un perfil de sobreexcavación típico, aunque puede presentar alguna complicación debido a la existencia de umbrales rocosos transversales a la cubeta y situados en el centro de la misma, como en el caso de la cubeta de Benasque (figura 6). Los perfiles transversales de todas las cubetas estudiadas presentan una típica morfología glacial en forma de artesa.

Los depósitos cuaternarios. En todas las cubetas estudiadas se distinguen claramente tres unidades geoelectricas: Unidad Inferior de sedimentos glaciolacustres con resistividades bajas, Unidad Media de sedimentos fluviodeltaicos con resistividades medias y Unidad Superior de sedimentos aluviales con resistividades elevadas (figuras 5, 6 y 7).

Unidad Inferior. La unidad inferior se encuentra en contacto con el substrato rocoso paleozoico del fondo de la cubeta y presenta valores de resistividad bajos (70-90 Ωm en la cubeta de Esterri, 120-180 Ωm en la cubeta de Benasque y 100-200 Ωm en la cubeta de Bono). La potencia de esta unidad geoelectrica es variable, siendo máxima en los sondeos Esterri-1 (340 m), Benasque-2 (250 m) y Bono-10 (110 m). Interpretamos los sedimentos de esta unidad como depósitos glaciolacustres predominantemente lutíticos con intercalaciones de pequeños niveles de arenas y algún clasto disperso. Las diferencias entre los valores de resistividad que presenta esta unidad se deberían a una distinta concentración de materiales finos y a un distinto aporte de materiales detríticos gruesos en las distintas cubetas estudiadas. En general,

la resistividad aumenta con el porcentaje de estos materiales detríticos de mayor tamaño.

Unidad Media. La unidad media se encuentra entre las unidades inferior y superior, presentando valores de resistividad comprendidos entre 400-600 Ωm (cubeta de Esterri), 500-1.000 Ωm (cubeta de Benasque) y 400-1.000 Ωm (cubeta de Bono). La potencia de esta unidad es muy irregular, condicionada por el contacto no planar, tal vez erosivo, con la unidad inferior. De todas formas, la potencia de esta unidad es siempre mayor en la zona proximal de las cubetas, donde la formación fluviodeltaica adquirió un mayor desarrollo (figuras 5, 6 y 7). En algún punto esta unidad puede superar los 100 metros de potencia (120 metros en el sondeo Esterri-6), aunque, generalmente, la potencia está comprendida entre 40 y 80 metros. La unidad media correspondería a los sedimentos fluviodeltaicos (arenas, gravas y limos) que representan los últimos episodios del relleno final de la cubeta lacustre.

Unidad Superior. La unidad superior corresponde a los sedimentos que afloran en superficie, constituidos por cantos, gravas y arenas de los depósitos aluviales subactuales (llanura aluvial y conos de deyección). Las resistividades de esta unidad son muy variables, estando muy condicionadas por el punto de realización del sondeo: si el sondeo se realiza sobre sedimentos detríticos gruesos correspondientes a conos de deyección, la resistividad es máxima (1.400 Ωm en el sondeo Esterri-8); si el sondeo se realiza sobre los depósitos de la llanura aluvial actual, la resistividad suele ser menor. La potencia de la unidad superior es muy variable, de 1 a 20 metros.

Ambientes lacustres asociados a obturaciones de origen morrénico

Algunos ambientes lacustres cuaternarios del Pirineo se originaron debido a la obturación, tanto frontal como lateral, de los valles por los materiales morrénicos depositados por las lenguas glaciales. De este modo se originaron sendos ambientes glaciolacustres proglaciales y yuxtaglaciales.

Ambientes lacustres proglaciales. Un kilómetro al Norte de la población de Vilaller, en el valle del Noguera Ribagorçana, se encuentra el complejo glacial terminal del Seminari de Vilaller, conservando la morfología de un arco morrénico (Vilaplana, 1983). Aguas arriba de este arco morrénico se encuentra una pequeña llanura donde afloran arenas finas y limos correspondientes a la llanura aluvial del río Noguera Ribagorçana.

La realización de sondeos eléctricos en esta llanura permite determinar la existencia de materiales relativamente conductores en profundidad asociables a depósitos glaciolacustres. Esto indicaría la existencia de un antiguo lago proglacial originado después del retroceso del glaciar del Noguera Ribagorçana.

El substrato rocoso paleozoico se encuentra a una profundidad variable, entre 32 y 38 metros (figura 8). Encima del substrato rocoso se encuentra una unidad geoelectrica de resistividades bajas (90-100 Ω m), con una potencia de 19 a 23 metros, asociable a unas ritmitas glaciolacustres predominantemente lutíticas. Sobre esta unidad glaciolacustre se dispone una unidad geoelectrica con una resistividad de 200 Ω m y una potencia variable de 6 a 9 metros que correspondería a los depósitos fluviodeltaicos (arenas, limos y gravas) de las últimas etapas de relleno de la cubeta lacustre. La unidad superior, con una resistividad de 100-125 Ω m y una potencia muy variable, entre 3 y 9 metros, debido al contacto erosivo con la

unidad infrayacente, corresponde a los depósitos aluviales subactuales (arenas finas y limos) del río Noguera Ribagorçana.

Ambientes lacustres yuxtaglaciales. Es frecuente en el Pirineo la existencia de depósitos lacustres yuxtaglaciales debidos a la obturación de los valles tributarios por parte de la lengua glacial del valle principal (Serrat *et al.*, 1983). De esta manera, la lengua del glaciar del Noguera de Tor obturó los valles de Boí y de Ginebrell dando lugar a un ambiente lacustre de margen glacial (Vilaplana, 1983). La realización de tres sondeos eléctricos en las cercanías de la población de Taüll (figura 9) que pueden correlacionarse con perfiles estratigráficos ya existentes (Vilaplana, 1983) ha permitido constatar la existencia en profundidad de sedimentos glaciolacustres de resistividades bajas (90-110 Ω m) interestratificados con tills de resistividades medias (150-320 Ω m). Estas unidades están recubiertas por depósitos fluviotorrenciales de resistividades superiores a 3.000 Ω m y por depósitos de ladera de resistividades superiores a 500 Ω m. Los tills que se han detectado en los sondeos realizados fueron depositados por los glaciares de los valles de Boí y de Ginebrell, demostrando poseer una dinámica glacial propia, con pequeñas pulsaciones de avance y de retroceso, tal como ya fue indicado por Vilaplana (1983).

Otros ambientes lacustres

Los procesos de fracturación reciente del substrato rocoso debidos a la expansión de la ladera después de la retirada de los glaciares cuaternarios (Bordonau, 1985; Bordonau y Vilaplana, 1986) determinaron la aparición de pequeños rellanos y cubetas endorreicas en las laderas. Un claro ejemplo lo constituyen Les Basses d'Ules, en el valle de Arán, donde algunas de

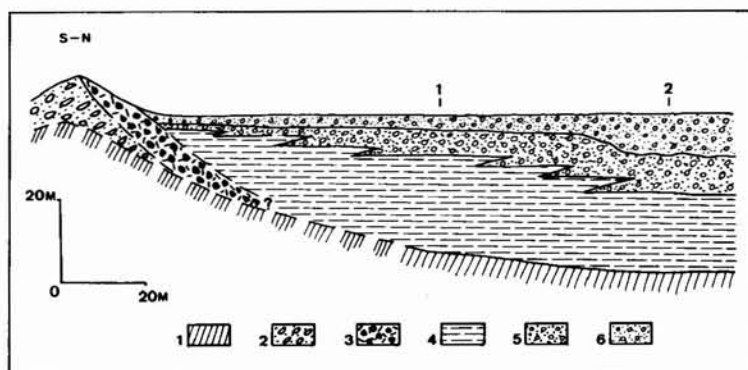


Fig. 8.—Perfil geoelectrico longitudinal de la cubeta proglacial del Seminari de Vilaller (valle del Noguera Ribagorçana). Leyenda: 1, Substrato paleozoico resistente; 2, Till supraglacial; 3, Till subglacial; 4, Arcillas glaciolacustres con resistividades inferiores a 100 Ω m; 5, Depósitos fluviodeltaicos con resistividades de 200 Ω m; 6, Depósitos aluviales subactuales con resistividades de 100 Ω m.

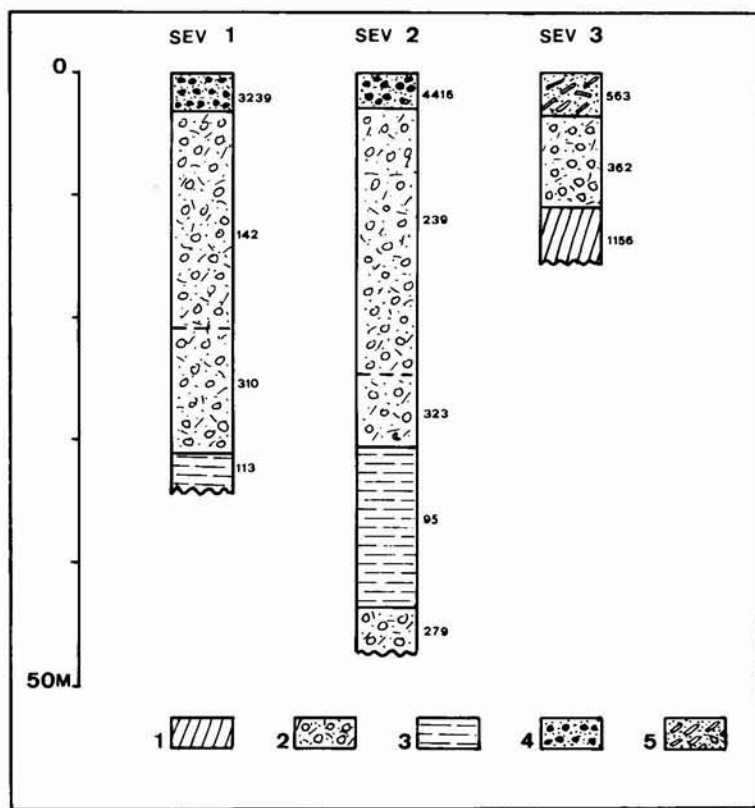


Fig. 9.—Columnas geoelectricas de los sondeos eléctricos realizados en el sector de Taüll (valle del Noguera de Tor) con indicación de las resistividades de las distintas unidades (Ωm). Leyenda: 1, Substrato paleozoico; 2, Clastos con matriz lutítico-arenosa (Till); 3, Arcillas glaciolacustres; 4, Depósitos fluviotorrenciales subactuales; 5, Depósitos de ladera subactuales.

estas cubetas están ocupadas por pequeñas lagunas y turberas. Para analizar el registro sedimentario en una de estas turberas se han realizado tres sondeos eléctricos verticales. Los resultados obtenidos permiten determinar la geometría de la cubeta, con una profundidad máxima inferior a 5 metros (sondeo Ules-3), y las características de los materiales de relleno (figura 10). Sobre el substrato rocoso paleozoico se encuentra una unidad geoelectrica de resistividad baja ($30-40 \Omega m$), con una potencia variable entre 3 y 4 metros, que correspondería a arcillas lacustres. La unidad geoelectrica superior corresponde a turbas (resistividad del orden de $200 \Omega m$ y potencia de poco más de 1 metro) en el centro de la cubeta, y a depósitos de ladera (resistividad de $150 \Omega m$ y potencia inferior a medio metro) en los márgenes de la misma. La interpretación de las curvas de resistividad aparente realizada en el presente estudio ha podido ser contrastada con los datos obtenidos en una perforación llevada a cabo mediante una sonda manual en el centro de la turbera y coincidiendo con el emplaza-

miento del sondeo eléctrico vertical Ules-2 (Serrat *et al.*, 1987).

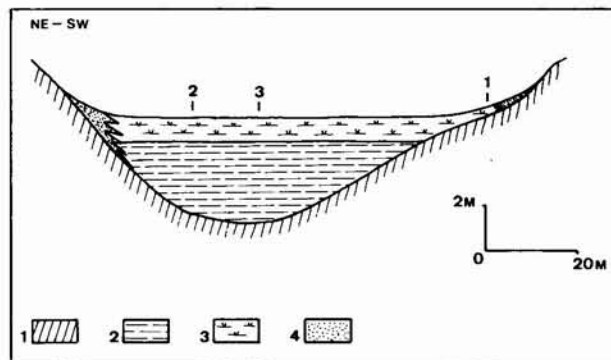


Fig. 10.—Perfil geoelectrico de la laguna de Les Basses d'Ules (valle del Garona). Leyenda: 1, Substrato paleozoico con resistividades superiores a $700 \Omega m$; 2, Arcillas lacustres con resistividades inferiores a $45 \Omega m$; 3, Turba subactual con resistividades del orden de $200 \Omega m$; 4, Depósitos de ladera subactuales.

Conclusiones

A partir del reconocimiento geomorfológico y de los sondeos eléctricos realizados se ha podido determinar tanto la geometría como las características de los materiales sedimentarios de las diversas cubetas lacustres cuaternarias del Pirineo estudiadas.

En las cubetas de sobreexcavación de Esterrí d'Aneu, Benasque y Bono se han determinado profundidades de varios centenares de metros y un registro sedimentario cuaternario constituido, de base a techo, por sedimentos glaciolacustres, sedimentos fluviodeltaicos y sedimentos aluviales y/o fluviotorrenciales. Esta misma secuencia, aunque con un espesor mucho menos importante, se ha encontrado en el Seminari de Vilaller, relacionada con una cubeta lacustre proglacial cuaternaria.

En el sector de Taüll, la presencia de sedimentos glaciolacustres interstratificados con tills demuestra la dinámica propia de los ambientes yuxtaglaciales, sometidos a cambios bruscos en el régimen sedimentario.

Por último, en Les Basses d'Ules, la baja resistividad de los sedimentos lacustres demuestra su carácter arcilloso, que corresponde a una sedimentación por decantación desligada de las aguas de fusión glacial.

Los resultados obtenidos han servido también para ratificar la validez, utilidad y limitaciones de los sondeos eléctricos en el estudio de las cubetas lacustres cuaternarias del Pirineo. El elevado contraste de resistividad entre los materiales del substrato paleozoico y los diferentes materiales cuaternarios que rellenan la cubeta permite determinar tanto la geometría de las cubetas y la potencia de los depósitos cuaternarios, como las diferentes unidades geoelectricas. Esto nos permite una interpretación sedimentológica y una reconstrucción aproximada de los ambientes deposicionales glaciolacustres. Por otra parte, la acusada topografía, tanto de la superficie del terreno como del substrato rocoso, puede inducir errores importantes en la interpretación de los sondeos eléctricos. Por este motivo se hace necesaria una modelización bidimensional para controlar las soluciones y realizar las oportunas correcciones. Esta modelización se ha llevado a cabo con la técnica de los elementos finitos y ha resultado operativa en los modelos de estas cubetas lacustres (existencia de umbrales en el substrato rocoso paleozoico y proximidad de las paredes rocosas de las laderas al centro del dispositivo eléctrico).

La validez de la metodología usada y el grado de resolución conseguido, aportan una valiosa información para plantear futuros estudios de este tipo en otras cubetas de origen glacial y, en general, en formaciones sedimentarias cuaternarias.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la CIRIT (Proyecto AR86). Agradecemos al Laboratori de Geofísica Eduard Fontseré del Institut d'Estudis Catalans que nos ha cedido el equipo geoelectrico para realizar los sondeos eléctricos y al Institut d'Investigació d'Alta Muntanya de la Universitat de Barcelona que nos ha facilitado la estancia en diversas campañas de campo.

Referencias

- Bordonau, J. (1985). Estudi geomorfològic del sector sudoccidental de la Vall d'Aran. L'evolució quaternària de les valls dels rius Jòeu i Nere. Tesis de Licenciatura, Universitat de Barcelona, 141 pàgs., inédita.
- Bordonau, J. (1989, en preparació). Variedades genéticas de tills en el *Ice-lateral till complex* de Cerler (Valle del Esera, Pirineos Centrales). *Abstracts de la II Reunió del Cuaternario Ibérico AEQUA-GTPEQ*, Madrid.
- Bordonau, J. y Vilaplana, J. M. (1986). Géomorphologie et tectonique récente dans le Val d'Aran (Zone axiale des Pyrénées Centrales, Espagne). *Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique*, 27, 303-310.
- Orellana, E. (1972). *Prospección Geoelectrica por corriente continua*, Paraninfo, Madrid, 523 pàgs.
- Pous, J. (1983). *Aplicaciones de la Inversión Generalizada a la Interpretación de las curvas de sondeos geoelectricos*. Tesis Doctoral, Universitat de Barcelona, 159 pàgs., inédita.
- Pous, J.; Marcuello, A. y Queralt, P. (1987). Resistivity inversion with a priori information. *Geophysical Prospecting*, 35, 590-603.
- Pous, J.; Bordonau, J. y Vilaplana, J. M. (1988). *Modelització geofísica (geoelectrica) de los conques lacustres quaternàries al Pirineu Català*. Informe de la CIRIT, 57 pàgs. inédito.
- Queralt, P.; Pous, J. y Marcuello, A. Modelización de estructuras bidimensionales en prospección eléctrica mediante el método de los elementos finitos. *Revista de Geofísica* (en prensa).
- Serrat, D.; Vilaplana, J. M. y Martí, C. E. (1983). Some depositional models in glaciolacustrine environments (Southern Pyrenees). In: Evenson, E. B.; Schlüchter, Ch. y Rabassa, J. (Eds.): *Tills and related deposits*, 231-244, A. A. Balkema, Rotterdam.
- Serrat, D.; Bordonau, J.; Montserrat, J. y Vilaplana, J. M. (1987). *Evolució paleoecològica dels darrers 100.000 anys al Pirineu Central*. Informe de la CIRIT, 26 pàgs., inédito.
- Vilaplana, J. M. (1983). *Estudi del glacialisme quaternari de les altes valls de la Ribagorça*. Tesis Doctoral, Universitat de Barcelona, 322 pàgs. J. M. Vilaplana. Departament Geomorfologia i Tectònica, Barcelona.
- Vilaplana, J. M. (1983). Quaternary glacial geology of Alta Ribagorça Basin (Central Southern Pyrenees). *Acta Geologica Hispànica*, 18, 217-233.
- Vilaplana, J. M. y Casas, A. (1983). Las cubetas de sobreexcavación glacial de Bono y Barruera (Alta Ribagorça: Pirineo Central). *Cuadernos del Laboratorio Xeològico de Laxe*, 6, 283-309.

Recibido el 11 de noviembre de 1988
Aceptado el 7 de febrero de 1989