

Modelos de densidades de la corteza de la cuenca de Almazán (Provincia de Soria)

C. Rey-Moral⁽¹⁾, D. Gómez-Ortiz, F. Sánchez-Serrano y R. Tejero-López

(1) Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid.
E-mail: c.rey@igme.es

RESUMEN

El Mapa de anomalías de Bouguer de la Cuenca de Almazán muestra que está caracterizada por un mínimo relativo centrado en las proximidades de la localidad de Almazán. La sustracción del efecto gravimétrico del relleno sedimentario terciario de la Cuenca al mapa de anomalías de Bouguer observado muestra que fuentes más profundas producen un máximo relativo positivo. La restitución de líneas sísmicas de reflexión ha permitido elaborar un mapa de isobatas de la base del Terciario que, junto con el valor del contraste de densidad entre los sedimentos terciarios y los materiales infrayacentes, calculado a partir del *density log* del sondeo El Gredal, ha sido utilizado para estimar dicho efecto gravimétrico. La modelización de tres perfiles gravimétricos transversales a la cuenca y un perfil longitudinal a la misma sugiere que la corteza tiene una geometría cómica que justifica el máximo relativo encontrado. Los límites corteza superior-media, corteza media-inferior y el Moho ascienden con respecto a áreas limítrofes.

La situación de este domo coincide con la zona topográficamente más elevada dentro de la cuenca y su ápice constituye la zona central de la disposición radial de la red de drenaje en el área. Estas evidencias parecen relacionar esta estructura con la extensión que se produce en el Mioceno en el NE peninsular. Estos resultados plantean la necesidad de realizar investigaciones geofísicas en esta área y en toda la Cordillera Ibérica que contrasten modelos existentes y permitan profundizar en su evolución tectónica desde el Neógeno hasta la actualidad.

Palabras clave: Cuenca de Almazán, estructura cortical, modelo de gravedad

Cortical gravity modelling of the Almazan basin (Soria province. Spain)

ABSTRACT

Almazán Basin Bouguer Anomaly map shows that the basin is characterised by a relative gravity low east of Almazán town. Subtracting the theoretical anomaly gravity map due to the sedimentary filling to the observed gravity map, a new map depicts a relative positive gravity maximum. Restitution of seismic profiles provides an isopach map of the Tertiary sediments. Density contrast between the Tertiary sedimentary infill and the basement, calculated from El Gredal well, has been used to calculate the theoretical anomaly gravity map. Modelling of four gravity profiles (three of them transversal to the basin and one longitudinal to it) suggests a domical crustal shape that justifies the gravity relative maximum. Upper-Middle crust, Middle-Lowest crust and Moho boundaries upraise with regard to neighbouring areas.

The domical shape coincides with the most elevated area inside the basin and its apex coincides with the radial feature of the drainage network. These evidences seem to relate the crustal structure to the tectonic extension generated in the NE of the Spanish Peninsula during Miocene. These results consider the necessity of carrying out more geophysical research in this area and in the whole Iberian Range so the existing models can be contrasted and the geological evolution since the Neogene to present times can be understood.

Key words: Almazán Basin, cortical structure, gravity modelling

Marco geológico

En el NE peninsular, a finales del ciclo hercínico se instaura un régimen extensional, régimen dominante hasta el Cretácico Superior y que está caracterizado

por varias etapas de *rifting* (p.e. Sopena *et al.*, 1988; Mas *et al.*, 1993). Las etapas compresivas alpinas invierten la Cuenca Ibérica y dan lugar a la formación de la Cordillera Ibérica. Dentro de ella, la Cuenca de Almazán (Fig. 1) está situada en su extremo occiden-

tal. Se trata de una cubeta de orientación media E-O, rellena de sedimentos terciarios, donde la mayor potencia de sedimentos se encuentra en la zona de Almazán (ITGE, 1990; Bond, 1996; Maestro, 1999; Rey-Moral, 2001).

El relleno de la Cuenca está formado por más de 3000 m de sedimentos paleógenos sobre los que se disponen alrededor de 500 m de sedimentos neógenos (Armenteros *et al.*, 1989; Carballeira y Pol, 1989; Bond, 1996). La Cuenca está limitada por sedimentos mesozoicos pertenecientes a las Ramas Aragonesa y Castellana de la Cordillera Ibérica. El límite septentrional de dirección media E-O, está definido por un sistema de cabalgamientos y pliegues asociados a cabalgamientos (Platt, 1990; Guimerà *et al.*, 1995). El margen oriental está caracterizado por pliegues y cabalgamientos de dirección NO-SE que estructuran la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica. El límite con la Rama Castellana está constituido por fallas

inversas y desgarres inversos de dirección NO-SE y ONO-ESE. En la zona nororiental, donde los materiales paleógenos afloran, las estructuras características son pliegues que varían de orientación desde E-O a NO-SE, paralelos a su límite con la Sierra de Cameros y la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica (Maestro *et al.*, 1994; Casas y Maestro, 1996; Maestro *et al.*, 1997).

Todas estas estructuras constituyen la respuesta de la corteza a los campos de esfuerzos que rigen la deformación durante el Terciario y hasta la actualidad. Según Maestro (1999) existen tres etapas tectónicas compresivas caracterizadas por tres campos de esfuerzos con orientaciones: NE-SO, N-S a NNE-SSO y NO-SE. La cuenca de Almazán constituye una cuenca "piggy-back", formada como consecuencia del emplazamiento de una lámina cabalgante hacia el norte, el cabalgamiento de Cameros (Guimerà, *et al.*, 1995; Maestro, 1999; Casas Sainz *et al.*, 2000). La

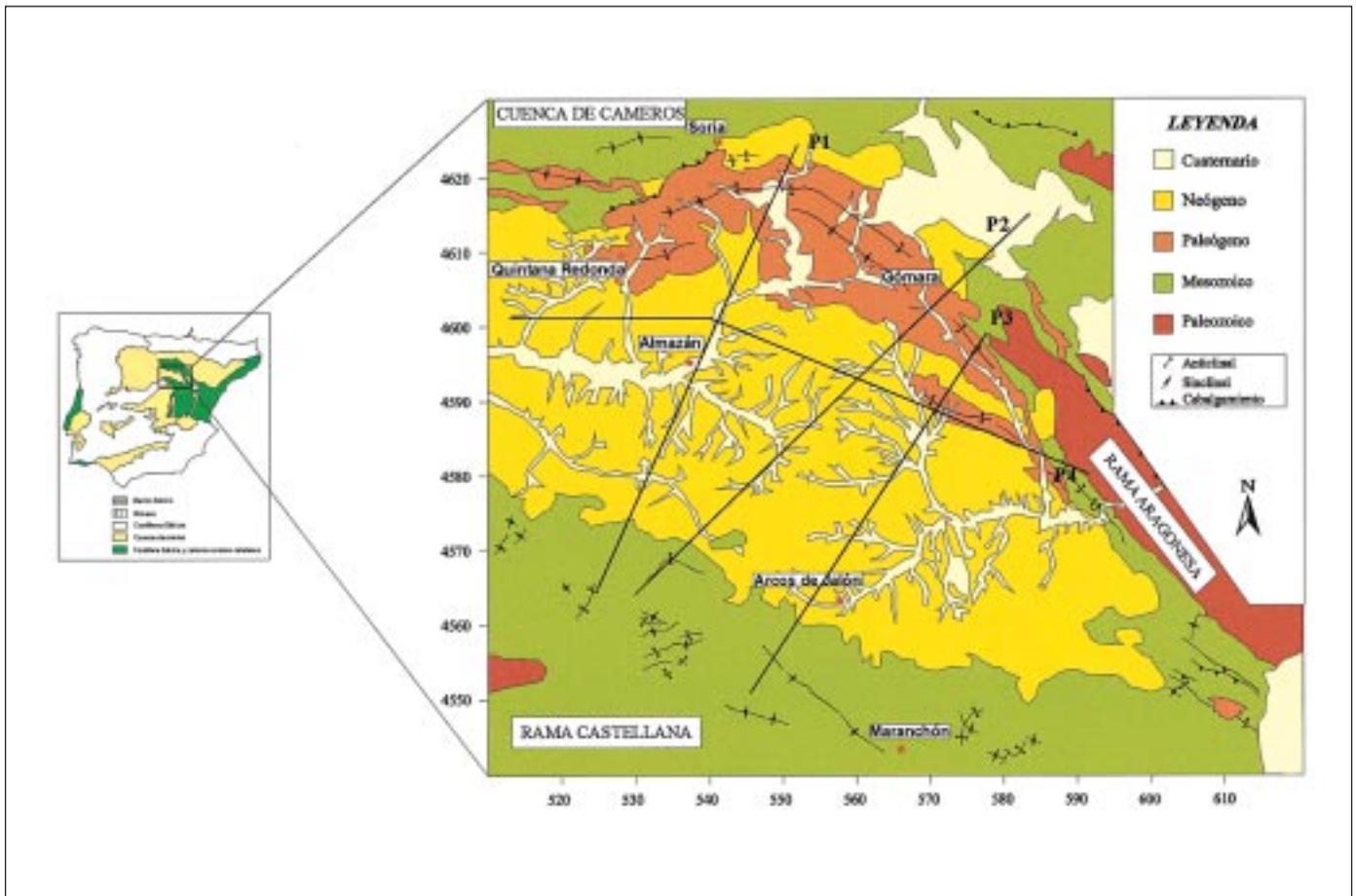


Fig. 1. Esquema geológico de la cuenca de Almazán donde se han representado los cuatro perfiles gravimétricos modelizados. Fuentes: hojas MAGNA e escala 1:50.000, editadas por el IGME
 Fig. 1. Geological setting of the studied area. Four gravity profiles have been modeled. Compilation of geological maps derived from MAGNA series: scale 1:50.000

compresión domina la deformación de la zona desde el Eoceno Superior al Mioceno Inferior y a partir del Mioceno Medio se produce un cambio gradual a un estado de esfuerzos de carácter extensional (orientación ESE a ENE) ya claramente dominante en el Plioceno (e.g. Cortés, y Maestro, 1997; Maestro, 1999). Como en todo el NE Peninsular sobre el campo extensional se superponen dos campos de esfuerzos compresivos con direcciones NNE a NE y NO a NNO, procedentes de los márgenes activos de la Placa Ibérica (p.e. Simón, 1984, 1989, 1990; Gracia y Simón, 1986; Moissenet, 1989).

A pesar de que la estructura y el relleno estratigráfico de la Cuenca de Almazán ha sido objeto de numerosos estudios, no se ha investigado la estructura de la corteza en la zona. Con el objetivo de profundizar en este conocimiento se ha realizado un estudio gravimétrico en el que se han elaborado diversos modelos de densidad de la corteza.

Mapa de anomalías de Bouguer

Para la obtención del mapa de anomalías de Bouguer se han tomado 907 medidas de gravedad y altitud en estaciones distribuidas en una malla lo más homogénea posible, teniendo en cuenta las limitaciones impuestas por la accesibilidad de las mismas. La distancia entre estaciones oscila entre 2 y 5 km, con valor medio de 3 km. Las medidas de la gravedad se han realizado con el gravímetro *Lacoste&Romberg*, modelo G-953, que alcanza una precisión de ± 0.01 mGal. La medida de la altitud se ha realizado con un altímetro Pauling MD-5 con una precisión de ± 1 m. A los datos observados se les ha corregido del efecto lunisolar y de deriva del aparato. La densidad de reducción es de 2.67 g/cm^3 . La corrección topográfica se ha calculado mediante el algoritmo de Kane (1962) hasta 22 km, siendo los primeros 170 m estimados en campo y desde 170 m a 22 km a partir de un Modelo Digital del Terreno, elaborado mediante la digitalización de la base topográfica 1:50.000 del Servicio Geográfico del Ejército. A estos datos, que cubren un área de 8000 km^2 centrada en la Cuenca de Almazán se han incorporado datos del Mapa de anomalía de Bouguer de la Península Ibérica (Mezcua *et al.*, 1996) y datos propios (zona sur) hasta alcanzar una superficie de $150 \times 150 \text{ km}^2$. Para analizar la compatibilidad entre datos de distintos levantamientos se han comparado los valores de las medidas tomadas en estaciones comunes. El error medio cuadrático es de ± 0.88 mGal, valor que no introduce distorsiones en el cálculo del Mapa de Anomalías de Bouguer en estudios de carácter regional. El total de los datos se

ha interpolado a una malla de 2000 m mediante *kriging*. La distribución de las anomalías de Bouguer en el área de estudio se muestra en el mapa de Anomalías de Bouguer (Fig. 2). Este mapa muestra tres grandes mínimos gravimétricos relativos alineados según una dirección NO-SE: al NO el mínimo de la Cuenca de Cameros, con -97 mGal, en el centro el mínimo de Almazán (-109 mGal) y más al sur el mínimo que se prolonga hacia el SE en la parte central de la Cordillera Ibérica. Estos tres mínimos se encuentran limitados por dos alineaciones de máximos relativos NO-SE asociados a la Rama Aragonesa (al NE) y Rama Castellana (al SO) de la Cordillera Ibérica. Por último, el mínimo relativo situado en el extremo SO del mapa corresponde con la zona NE de la Cuenca del Tajo (-105 mGal).

Efecto gravimétrico de la cuenca sedimentaria

Para investigar el carácter de la anomalía de Bouguer debida a las fuentes situadas bajo el relleno terciario de la Cuenca de Almazán se ha calculado el efecto gravimétrico de estos sedimentos. El resultado será sustraído del mapa de anomalías de Bouguer observado. Para realizar este cálculo se necesita conocer la geometría del cuerpo del que se va estimar la anomalía de Bouguer y el contraste de densidades con el material que le rodea.

Determinación de la geometría de la cuenca de Almazán

Para determinar la geometría del relleno terciario de la Cuenca de Almazán se han restituido 32 líneas de sísmica de reflexión realizadas por la compañía Shell (1980-1982). Las profundidades se han calculado a partir de los registros de velocidades y tiempos descritos en las líneas. El reflector restituido corresponde al techo de la Formación Utrillas, reflector bien identificado en el sondeo El Gredal (Shell, 1982) (Fig. 3a). La profundidad de la base del Terciario se ha estimado añadiendo un espesor medio de los sedimentos cretácicos post-Formación Utrillas calculado en función de columnas estratigráficas y sondeos (ITGE, 1990; Ferreiro 1991a,b,c). Este valor es de 225 m. Los datos se han interpolado mediante *kriging* a una malla de 2000 m. En la figura 3b está representado el mapa de isobatas elaborado. La geometría de la cuenca es la de una depresión de orientación media E-O donde la mayor potencia de sedimentos se encuentra en una cubeta alargada según una dirección E-O que se extiende desde la localidad de

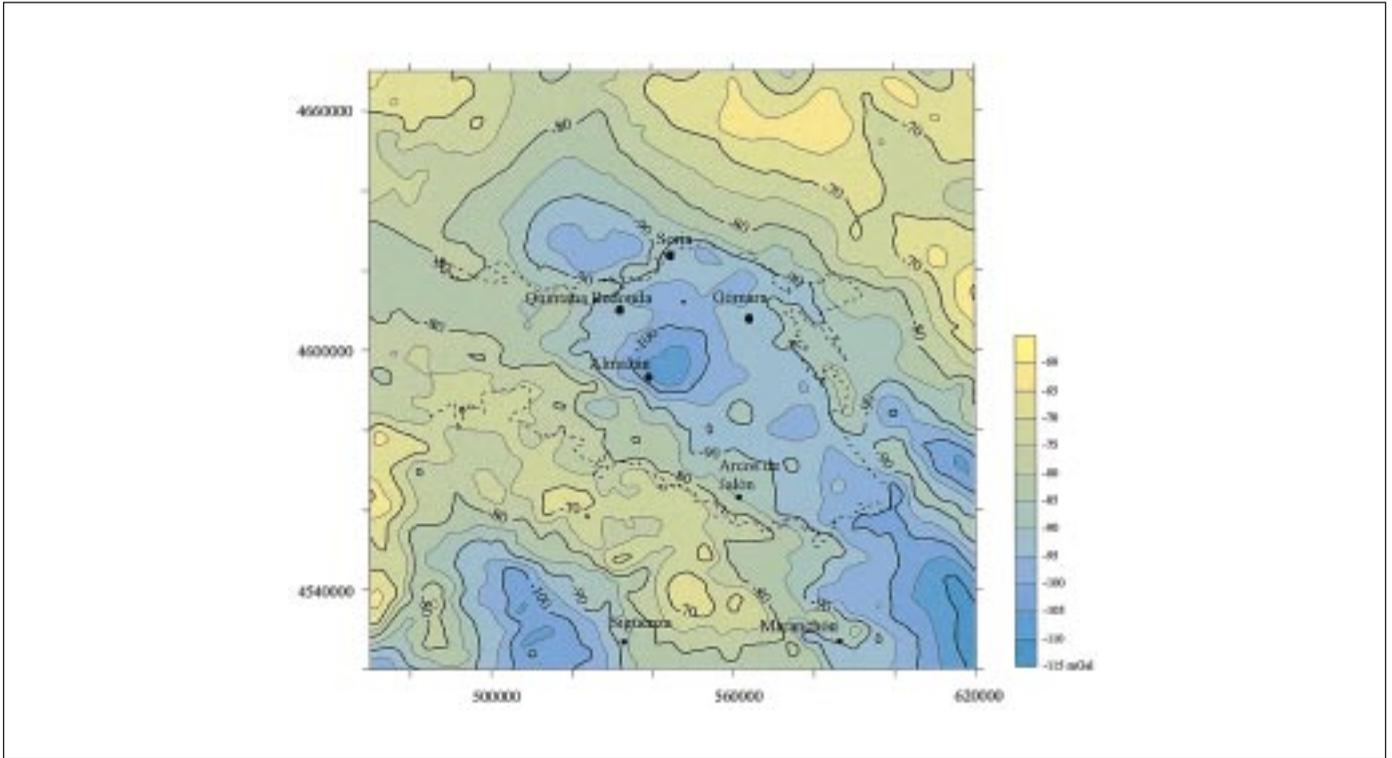


Fig. 2. Mapa de anomalías de Bouguer de la cuenca de Almazán y áreas adyacentes. En línea discontinua se marca el límite del relleno sedimentario. Espacio entre isolíneas 5 mGal. Coordenadas UTM en metros
 Fig. 2. Bouguer anomaly map of the Almazán basin. Dotted line defines the boundary of the tertiary sedimentary infilling. Contour interval 5 mGal. UTM coordinates in metres, zone 30 N

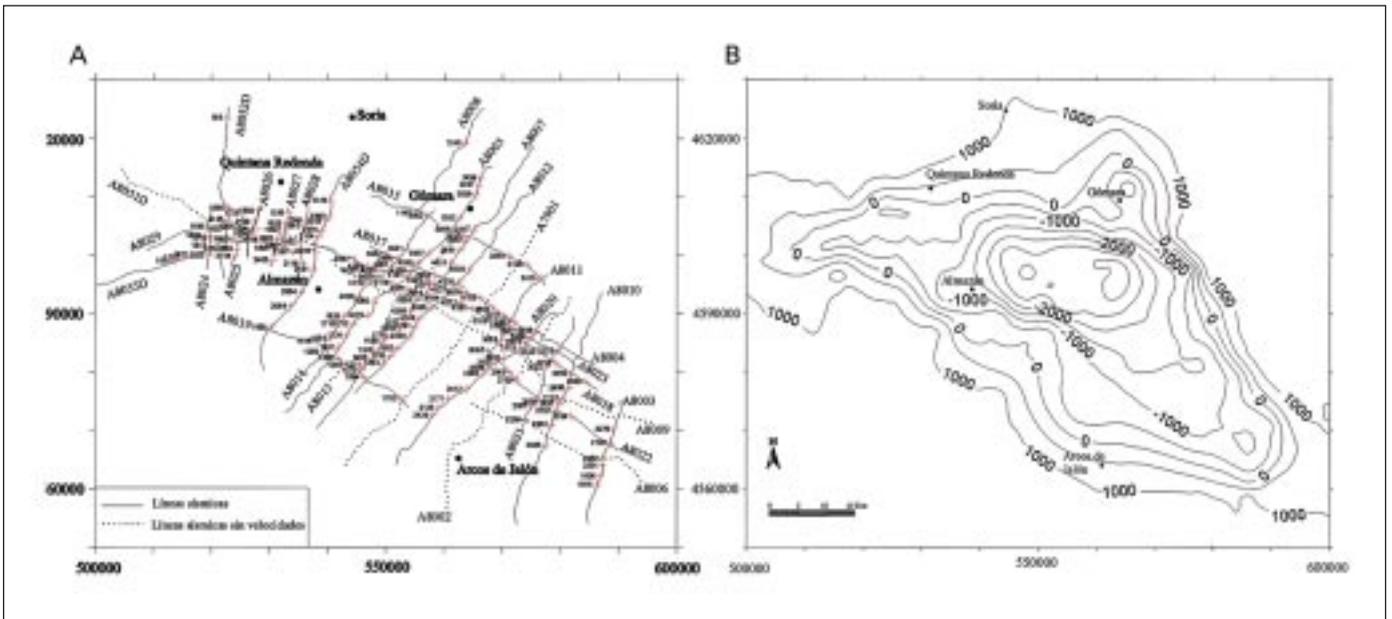


Fig. 3A. Datos de profundidad obtenidos a partir de la restitución de los perfiles sísmicos. Datos correspondientes al techo del Albiense. Datum 1200 m. Coordenadas UTM en metros; 3B. Mapa de isobatas de la base del Terciario de la cuenca de Almazán (datum nivel del mar). Coordenadas UTM en metros
 Fig. 3A. Depth values obtained from the migration of seismic profiles (top Albian). Datum 1200 m. UTM coordinates in metres, zone 30 N;
 3B. Base tertiary isobath map (datum sea level). UTM coordinates in metres, zone 30 N

Almazán hacia el límite de la cuenca con la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica, alcanzando la potencia de sedimentos terciarios más de 4000 m. Esta geometría es similar a las obtenidas por ITGE (1990), Bond (1996), Maestro (1999) y Casas-Sainz *et al.* (2000) aunque los espesores son ligeramente menores en el caso de los dos primeros.

Contraste de densidad con los materiales infrayacentes

La densidad de los sedimentos terciarios y el contraste de densidad con los materiales que forman el fondo de la cuenca se han calculado mediante el método de Bhaskara Rao (1986), utilizando los datos del *density log* del sondeo El Gredal-1 (SHELL, 1980-82) sondeo que alcanza el basamento Hercínico (Fig. 4). El incremento de la densidad con la profundidad se calcula efectuando un ajuste polinómico a los datos de densidad del sondeo (Fig. 4). La expresión es $Dr(z)=a_0+a_1z+a_2z^2$, donde Dr es el contraste de densidad, z es la profundidad, a_0 representa el contraste de densidad en superficie. El valor obtenido es de -0.27 g/cm^3 .

El efecto gravimétrico del relleno terciario se ha calculado utilizando el método de Bhaskara Rao *et al.* (1990). La forma de la Cuenca de Almazán, representada por el mapa de isobatas construido se ha asimilado a un conjunto de prismas con una base de 2000 m de lado y una altura igual al espesor de sedimentos en el área considerada. La figura 5 muestra el mapa de anomalía de Bouguer del relleno sedimentario obtenido. La máxima anomalía de -37.2 mGal se sitúa en el centro de la cuenca sedimentaria, donde está situado el máximo espesor de sedimentos, con una dirección clara E-O, reproduciendo la forma del mapa de isobatas.

Mapa de Anomalías de Bouguer sustraído el efecto gravimétrico del relleno sedimentario terciario de la Cuenca de Almazán

La anomalía gravimétrica correspondiente a los sedimentos terciarios que rellenan la Cuenca de Almazán ha sido sustraída del mapa de anomalías de Bouguer observado. El nuevo mapa de anomalías de Bouguer obtenido (Fig. 6) permite obtener una imagen de la distribución de densidades por debajo de la cuenca. Este mapa de anomalías de Bouguer contrasta fuertemente con el mapa de anomalías de Bouguer observado. Los mínimos relativos están situados en los márgenes de la cuenca, mientras que ésta está

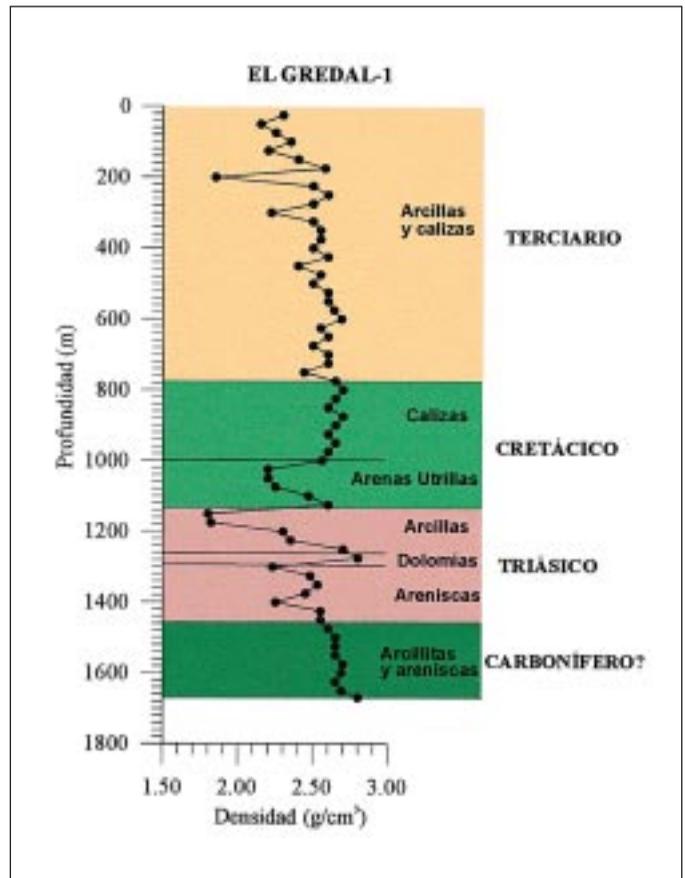


Fig. 4. Density log del sondeo El Gredal-1 (Shell, 1980-82)
Fig. 4. El Gredal density log (Shell, 1980-82)

caracterizada por un máximo relativo de dirección NNO-SSE, con una amplitud de -70 a -58 mGal . En el mapa se observan tres gradientes muy pronunciados que delimitan el norte, este y sur de la cuenca. En el norte un gradiente E-O delimita la Cuenca de Almazán con la Cuenca de Cameros. El gradiente NO-SE, ya existente en el mapa de anomalías de Bouguer observado está mejor definido. En el borde sur aparece un gradiente E-O asociado al límite de la cuenca con la Rama Castellana de la Cordillera Ibérica.

Modelización gravimétrica

Para investigar la naturaleza de estas anomalías se ha procedido a la modelización de cuatro perfiles gravimétricos en $2+1/2 \text{ D}$, mediante el programa GM-SYS de Geosoft, versión 6.1) La orientación de los perfiles gravimétricos ajustados se ha elegido en función de la situación de las líneas sísmicas, de la orientación y posición de las anomalías gravimétricas y de la orientación media de la estructura de la Cuenca de

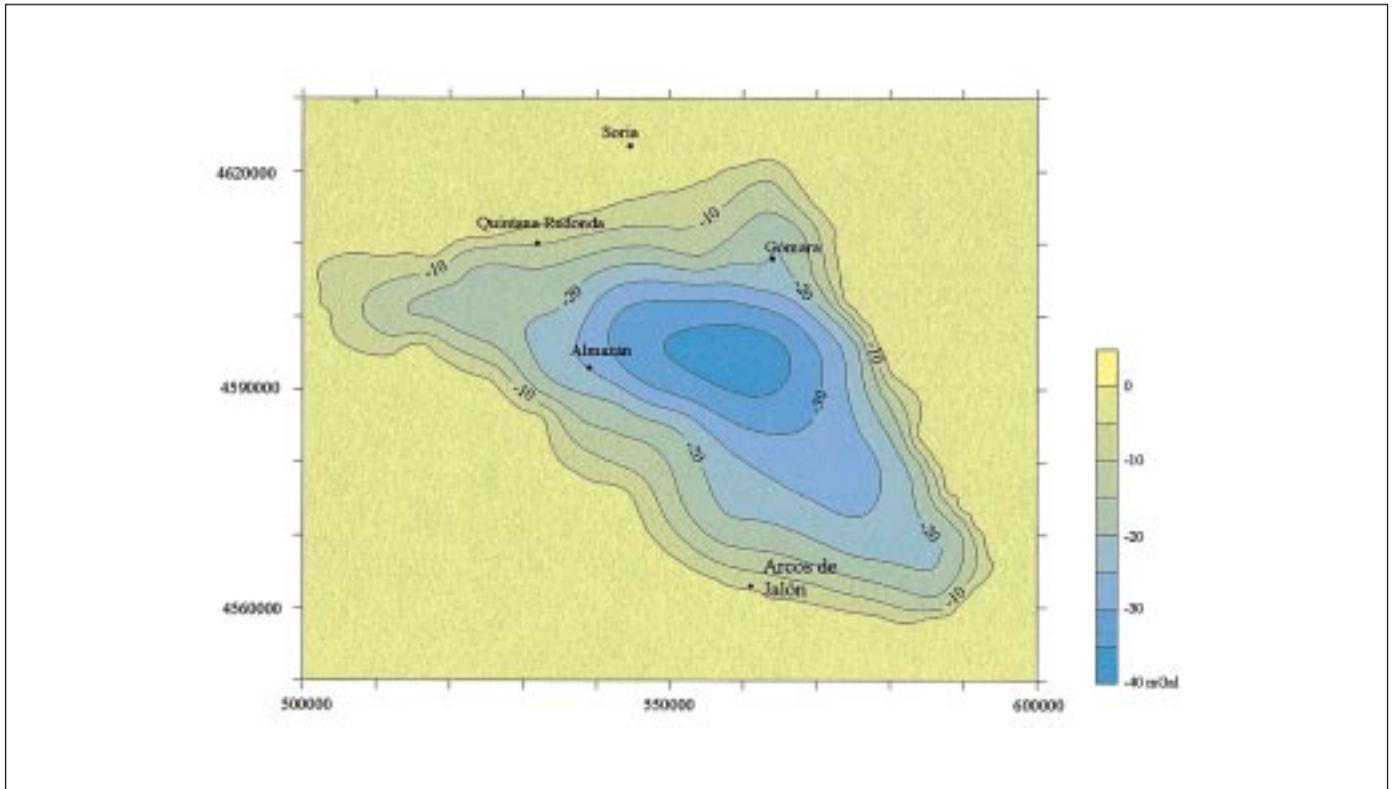


Fig. 5. Mapa de anomalías de Bouguer generada por los sedimentos terciarios que rellenan la cuenca de Almazán. Equidistancia entre isonómalas 5 mGal. Coordenadas UTM en metros

Fig. 5. Theoretical gravity map due to the tertiary sedimentary infilling. Contour interval 5 mGal. UTM coordinates in metres, zone 30 N

Almazán. La figura 1 muestra la disposición de los perfiles gravimétricos modelizados.

En los modelos de densidades se ha considerado que la corteza está formada por tres capas: una corteza superior de 11 km, una corteza media cuya base se sitúa en los 24 km y una corteza inferior de 7 km de espesor, situándose el Moho a 31 km de profundidad (p.e. Banda *et al.*, 1981; ILIHA DSS Group, 1993). Modelos gravimétricos realizados sugieren la existencia de un ascenso del Moho en la parte occidental de la Cordillera Ibérica (Maestro, 1999).

Las densidades asignadas a cada cuerpo se han basado en las medidas realizadas en muestras recogidas en la zona de estudio y en el *density log* del sondeo del Gredal. Las densidades de las capas corticales se han establecido a partir de la relación de velocidad de ondas P con la densidad (Woollard, 1975) menos en el caso de la corteza superior en donde el valor asignado corresponde a la media de las densidades medidas en pizarras y cuarcitas del basamento Hercínico. En la tabla 1 están resumidos los valores asignados a cada cuerpo, las litologías que los forman y la edad de las mismas.

Todos los modelos se han construido integrando

los datos geológicos y de sondeos publicados y la imagen obtenida de la cuenca a partir del análisis de las líneas sísmicas. Además durante el proceso de ajuste se ha asumido que las fuentes profundas están localizadas en discontinuidades correspondientes a límites entre capas corticales y al límite corteza-manto. Anteriores modelizaciones gravimétricas señalan la existencia de una elevación del Moho en el extremo NO de la Cordillera Ibérica (Salas y Casas, 1993; Maestro, 1999). En la figura de cada modelo está representada la anomalía de Bouguer observada, la anomalía de Bouguer calculada y el modelo de densidades ajustado.

Modelo 1

El perfil 1 (Fig. 7a) tiene una orientación NE-SO. Se extiende desde la Rama Castellana de la Cordillera Ibérica hasta la Cuenca de Cameros, en su zona de unión con la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica.

La curva de anomalía de Bouguer comienza en el límite meridional con -72 mGal cuyo valor va progresivamente descendiendo hasta alcanzar los -108

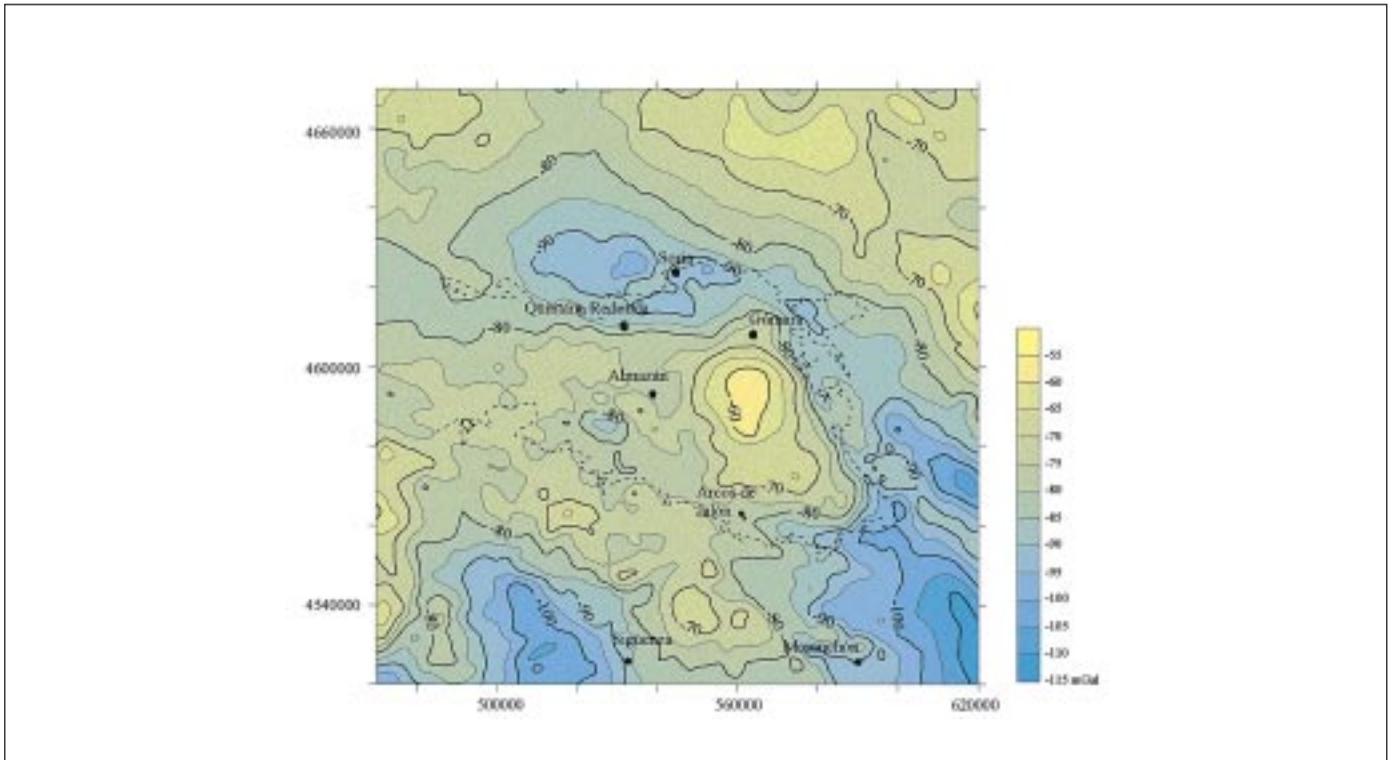


Fig. 6. Mapa de anomalías de Bouguer del basamento. En trazo discontinuo aparece el límite de la cuenca de Almazán. Intervalos entre isoanómalas 5 mGal. Coordenadas UTM en metros
 Fig. 6. Bouguer anomaly map representing the gravity effect of the basement. Dotted line indicates tertiary basin infilling boundary. Contour interval 5 mGal. UTM coordinates in metres

CUERPO	DENSIDAD (g/cm ³)	LITOLOGÍA	EDAD
1	2.49	Areniscas, arcillas, conglomerados y calizas	Terciario
2	2.64	Calizas, margas, arcillas y areniscas	Cretácico Superior y Jurásico (Ramas Aragonesa y Castellana de la Cordillera Ibérica)
3	2.57	Calizas, margas, arcillas y areniscas	Jurásico Superior y Cretácico Inferior (Facies Purbeck y Weald)
4	2.60	Areniscas, conglomerados, yesos y calizas	Triásico (Facies Buntsandstein, Muschelkalk y Keuper)
5	2.69	Corteza Superior	
6	2.83	Corteza Media	
7	2.95	Corteza Inferior	
8	3.30	Manto litosférico	

Tabla 1. Densidades de los cuerpos que integran los modelos de densidades
 Table. 1. Density of different bodies from gravity models

mGal en la parte central del modelo para recuperarse hasta los -84 mGal en el límite norte. Sobre la tendencia regional descendente hacia el NNE, se superponen un conjunto de máximos y mínimos. El mayor mínimo relativo de unos 25 km de longitud de onda se sitúa en el centro del perfil. Entre los km 65-70 exis-

te otro mínimo relativo de pequeña longitud de onda. El mínimo relativo se justifica con el mayor espesor de sedimentos terciarios del centro de la cuenca, sedimentos que aparecen desplazados por una falla inversa de alto ángulo que presenta un desplazamiento en la vertical de casi 2 km. Esta falla ya fue

interpretada a partir de datos sísmicos en ITGE (1990). La Cuenca de Almazán en este modelo alcanza los 3500 m bajo el nivel del mar en la parte central (cuerpo 1). El contacto de la cuenca sedimentaria con la Cuenca invertida de Cameros se produce mediante una falla normal de alto ángulo.

En el sondeo El Gredal, el espesor del Cretácico Superior es de 225 m, valor que se ha mantenido constante a lo largo de todo el modelo. En la zona central del modelo, el cuerpo disminuye de espesor debido a la ausencia de materiales jurásicos. El cuerpo 3, correspondiente a los sedimentos del Jurásico Superior-Cretácico Inferior, sólo se encuentra en la zona septentrional del perfil donde aflora, disponiéndose sobre los sedimentos jurásicos. En el centro de la cuenca, los materiales infrayacentes al relleno terciario son de edad cretácica, ya que como muestra la sísmica de reflexión, los materiales jurásicos y triásicos (cuerpo 4) están ausentes en el centro de la Cuenca de Almazán. Para conseguir el ajuste del

modelo ha sido necesario disminuir el espesor de la corteza superior (cuerpo 5) bajo la cuenca. Esta necesidad satisface la anomalía positiva relativa obtenida al sustraer el efecto gravimétrico de los sedimentos terciarios. Además se ha introducido un suave arqueamiento en el Moho y en el límite corteza media-inferior.

El ajuste entre la curva de anomalía de Bouguer observada (con círculos en el modelo) y la calculada (en línea continua) es de 0.92%.

Modelo 2

En el extremo SO del modelo 2 (Fig. 7b) se encuentran los afloramientos mesozoicos de la Rama Castellana de la Cordillera Ibérica y en el extremo NE se sitúa la zona de conexión entre la Cuenca de Cameros y la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica.

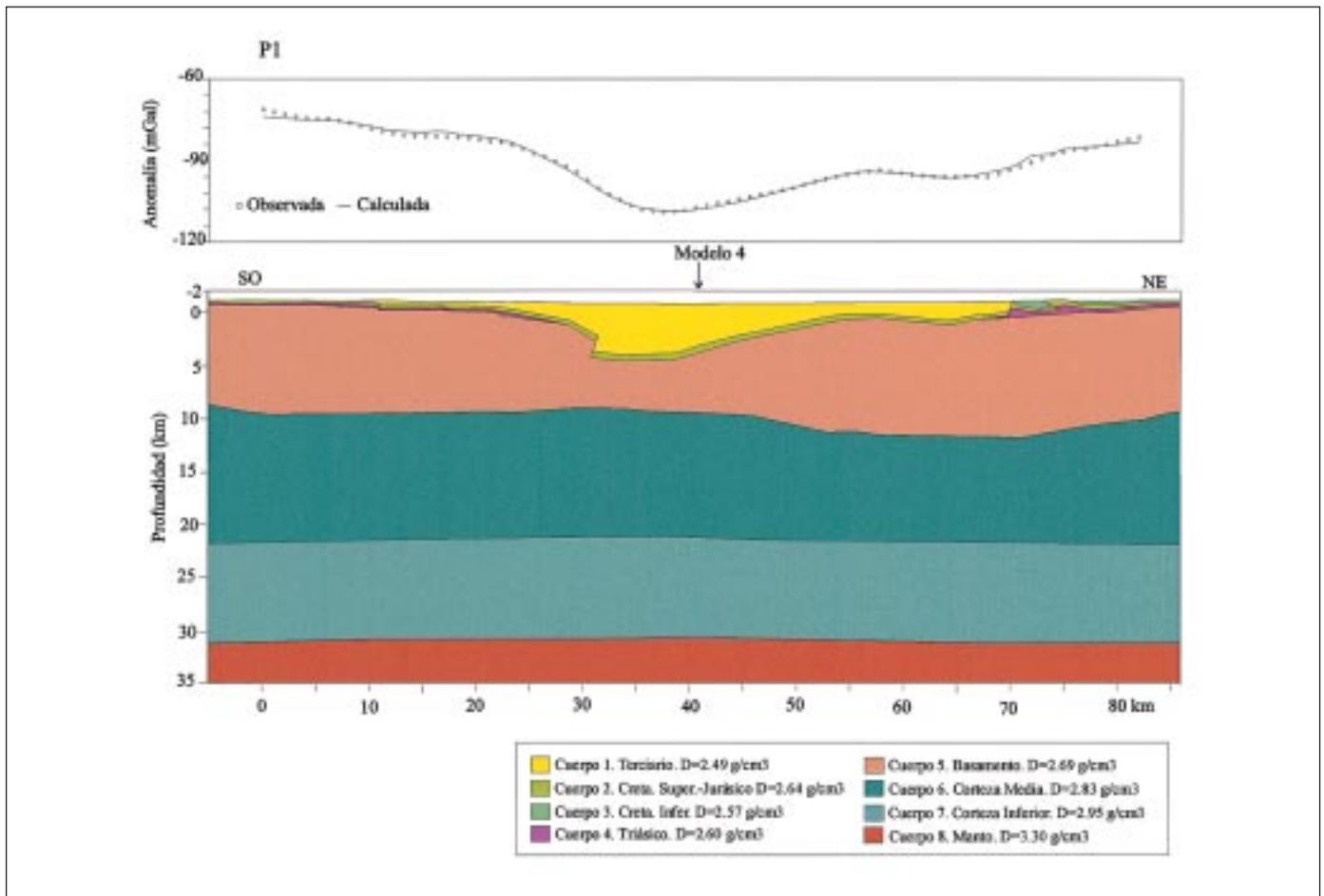


Fig. 7.a. Modelo de densidades P1
Fig. 7.a. Gravity model P1

La curva de anomalía de Bouguer comienza en el límite meridional con -75 mGal cuyo valor va progresivamente descendiendo hasta alcanzar los -96 mGal en la parte central del modelo para recuperarse hasta los -77 mGal en el límite norte. La tendencia regional de la anomalía es un mínimo que tiene como longitud de onda la longitud del modelo. Dentro de este mínimo regional, el mayor mínimo relativo mayor tiene una longitud de onda de unos 40 km de longitud. Otros máximos y mínimos relativos se aprecian en los bordes del modelo con longitudes de onda que casi nunca superan los 5 km de longitud.

La menor densidad del relleno sedimentario de la Cuenca y sus variaciones de espesor, junto con las variaciones de potencia de la corteza superior satisfacen la anomalía de Bouguer observada. La Cuenca alcanza un espesor máximo de 3500 m. En el límite norte de la Cuenca, el modelo de densidades ajustado muestra cómo los materiales mesozoicos se disponen sobre las rocas terciarias. El contacto puede

interpretarse como una superficie cabalgante con buzamiento hacia el NE. También en este modelo los materiales jurásicos y cretácicos desaparecen bajo la parte central de la Cuenca. En el extremo NNE del modelo ha sido necesario introducir un cuerpo de baja densidad para justificar el mínimo relativo presente en esta zona. Este cuerpo puede corresponder a sedimentos del Jurásico Superior-Cretácico Inferior aflorantes en las proximidades (Hoja nº 351 del mapa geológico MAGNA, Ólvega). Su límite meridional se ha interpretado como una falla inversa. También en el extremo SO del perfil ha sido necesario introducir un cuerpo de baja densidad, situado bajo el cuerpo 2 que engloba la sucesión Jurásico-Cretácico, por ello se ha supuesto un aumento de espesor de materiales triásicos (cuerpo 4).

El ajuste del modelo ha necesitado considerar fuentes situadas a distintas profundidades en la corteza. El mejor ajuste se ha conseguido elevando los límites de las distintas capas corticales. La base de la

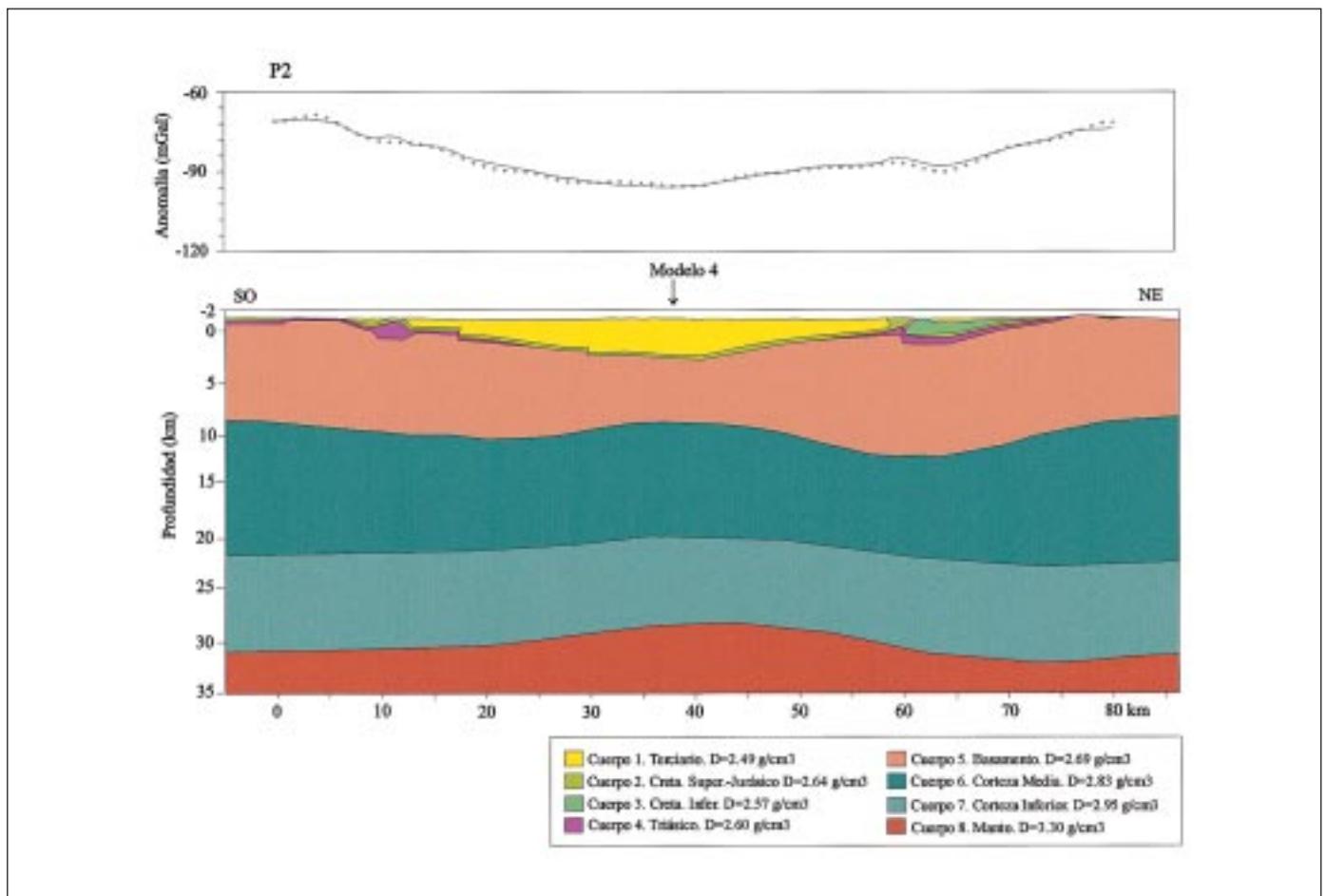


Fig. 7.b. Modelo de densidades P2
Fig. 7.b. Gravity model P2

corteza superior asciende hasta los 8 km y el Moho se eleva 3 km, valores más altos que en el modelo anterior.

El ajuste entre la curva de anomalía de Bouguer observada (con círculos en el modelo) y la calculada (en línea continua) es de 0.92 %.

Modelo 3

El modelo 3 (Fig. 7c) atraviesa la Cuenca de Almazán desde el sur de Arcos del Jalón hasta cortar los afloramientos paleozoicos del Macizo de Ateca.

La curva de anomalía de Bouguer comienza en el extremo sur del modelo con -69 mGal cuyo valor desciende progresivamente hasta alcanzar los -94 mGal en la parte central del modelo para volver a subir ligeramente hasta los -90 mGal en el límite norte. El modelo presenta una tendencia regional descendente hacia el NE.

Con este perfil se produce un acercamiento hacia

el final de la cuenca en su parte oriental. La anomalía regional queda ampliamente justificada por los contrastes de densidad entre los materiales mesozoicos y el relleno sedimentario y entre esos mismos materiales mesozoicos y el bloque del basamento. El espesor de los sedimentos terciarios (cuerpo 1) está considerablemente reducido, con una profundidad del techo del Cretácico Superior de 2000 m bajo el nivel del mar. En el borde norte de la Cuenca los materiales mesozoicos se disponen sobre los sedimentos terciarios a favor de una superficie de bajo ángulo. Los sedimentos jurásicos y triásicos también están ausentes en la parte central de la Cuenca en este modelo. Siguiendo el criterio adoptado en el modelo anterior, en la zona SO del modelo también ha sido necesario aumentar el espesor de sedimentos triásicos para justificar la anomalía. En este modelo también se obtiene un mejor ajuste con una elevación de los límites Corteza Superior-Media, Corteza Media-Inferior y Moho.

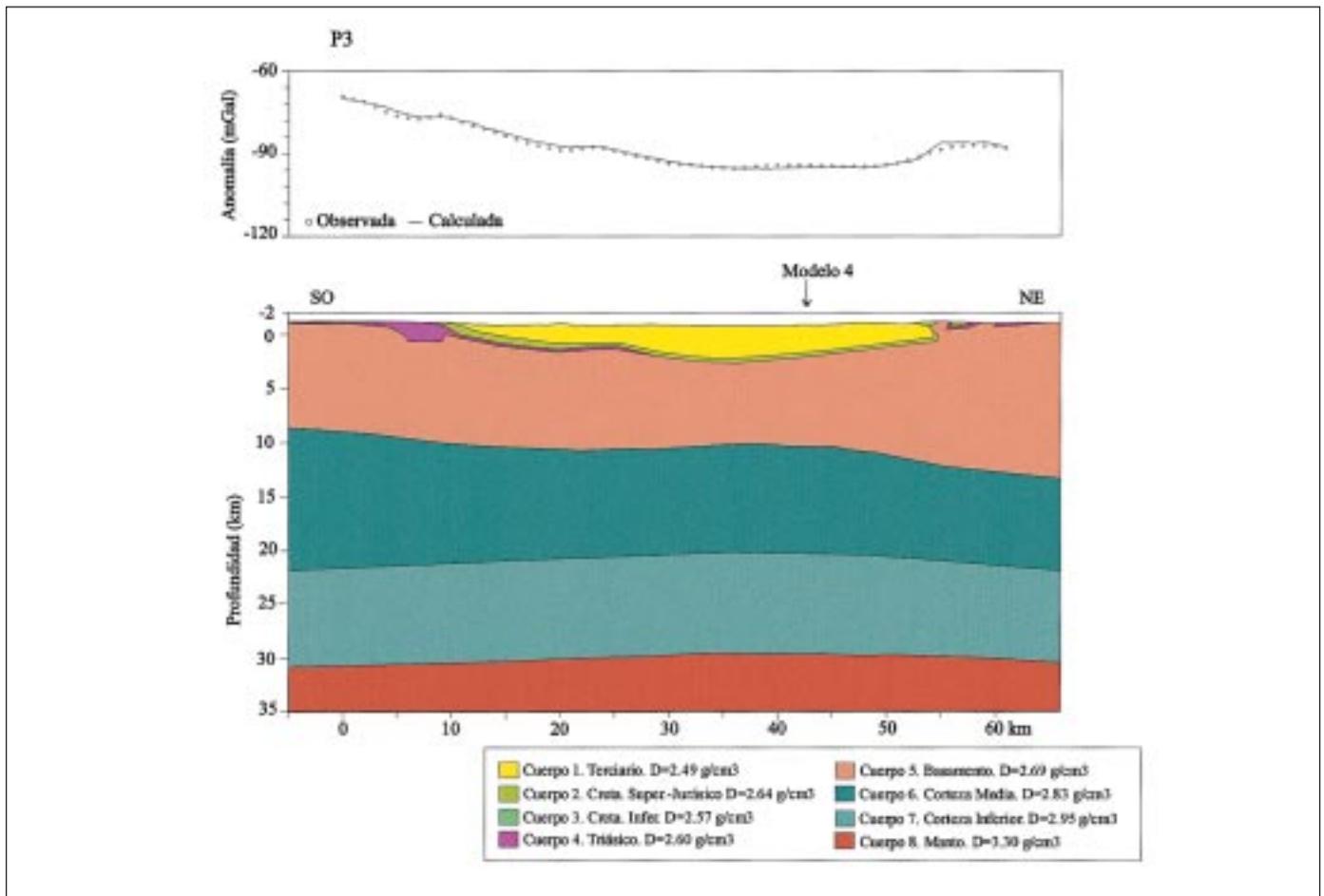


Fig. 7.c. Modelo de densidades P3
Fig. 7.c. Gravity model P3

El ajuste entre la curva de anomalía de Bouguer observada (con círculos en el modelo) y la calculada (en línea continua) es de 0.9%.

Modelo 4

Con el perfil 4 (Fig. 7d), de dirección O-E-SE se ha querido tener una visión longitudinal de la Cuenca de Almazán. El extremo occidental se sitúa en el umbral sedimentario que une la Cuenca de Almazán con la Cuenca del Duero y finaliza en los afloramientos mesozoicos y paleozoicos de la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica.

La curva de anomalía de Bouguer comienza en el extremo oeste del modelo con -84 mGal descendiendo progresivamente hasta alcanzar los -108 mGal en la parte central del modelo para volver a recuperarse hasta alcanzar -90 mGal en el límite este. La curva está caracterizada por un mínimo relativo de gran

longitud de onda. Dentro de este mínimo que ocupa todo el modelo y toda la cuenca sedimentaria (80 km), existen dos máximos relativos, uno en el extremo oeste de unos 8 km de longitud de onda y otro en el este de unos 15 km.

Los rasgos más destacados de este modelo son: la presencia de una pequeña fosa terciaria dentro de la Cuenca y la importante elevación del límite Corteza Superior-Corteza Media en la zona centrorienta del modelo. En el proceso de ajuste se observó una importante discrepancia entre la anomalía de Bouguer observada y la calculada en la parte centro occidental de la Cuenca. En principio, esta discrepancia se atribuyó a variaciones de densidad de los sedimentos terciarios. Ensayando cuerpos con distintas formas, diferentes densidades y situados a distintas profundidades no se logró satisfacer ni el valor ni la forma de la anomalía, no sólo en este perfil, sino tampoco en los perfiles transversales adyacentes. La mejor solución ha sido introducir un descenso del

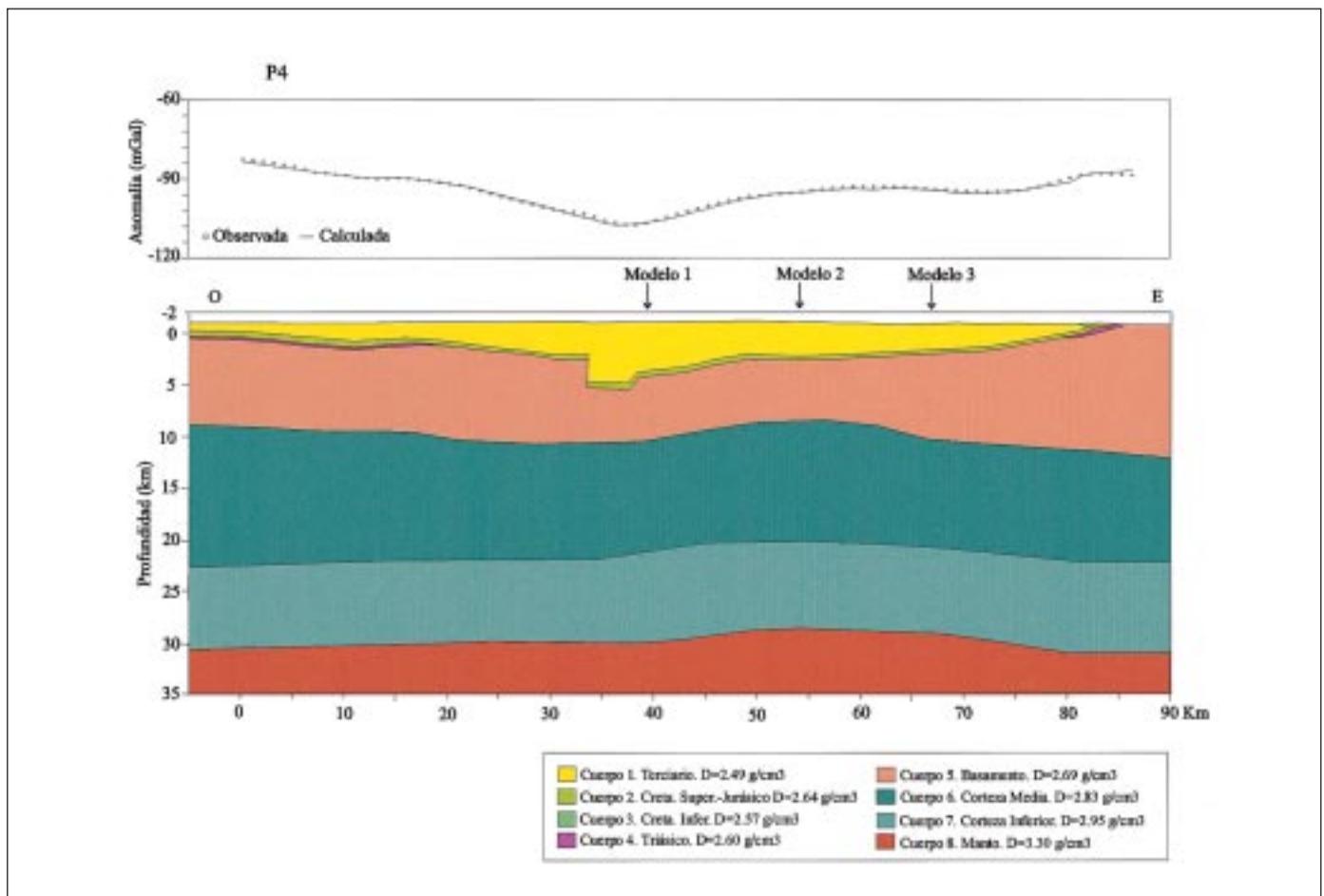


Fig. 7.d. Modelo de densidades P4
Fig. 7.d. Gravity model P4

fondo de la Cuenca, descenso que se interpreta como una fosa limitada por fallas de alto ángulo. La falla occidental de esta fosa coincide con la falla de dirección NE-SO señalada por Bond (1996) en la zona de Almazán. Esta falla eleva la parte oriental de la Cuenca, donde hacia el oeste empiezan a aparecer afloramientos de rocas mesozoicas en el fondo de los valles de los ríos, como en el del Duero. La existencia de estas estructuras no se encuentran claramente definidas en las líneas sísmicas, ya que se interrumpen en esta zona.

Por otra parte, en este modelo se observa un ascenso del límite Corteza Superior-Corteza Media entre los puntos de intersección con los modelos 1, 2 y 3. Integrando la forma de esta superficie con la de los modelos transversales se obtiene una geometría cómica de las discontinuidades corticales.

El ajuste entre la curva de anomalía de Bouguer observada (con círculos en el modelo) y la calculada (en línea continua) es de 0.7%.

Los modelos de densidades ajustados sugieren que bajo la Cuenca de Almazán existe una disminución del espesor de la corteza, con un ascenso de la discontinuidad del Moho. Aunque pueden existir diversos modelos de densidades que justifiquen las anomalías, en todos los casos ensayados el mejor ajuste, sin introducir cuerpos de difícil interpretación en superficie, se ha conseguido con esta geometría. Como se mencionó anteriormente otros autores también han apuntado el posible ascenso del Moho en esta área. Aunque estos modelos sólo serán contrastables cuando se realicen más investigaciones geofísicas, especialmente estudios sísmicos, en el siguiente apartado se va a discutir la posibilidad de la existencia de esta estructura cortical.

Discusión

En la Cordillera Ibérica se ha descrito la existencia de estructuras cómicas como son los domos de Gúdar y Javalambre (p.e. Simón Gómez, 1990). Estos domos están bien registrados en la superficie topográfica aunque no se sabe si tendrán un reflejo en la estructura cortical ya que ésta no se conoce. Para investigar si existe una relación entre la estructura de la corteza del área de Almazán y la topografía se han analizado los datos topográficos por medio de un Modelo Digital de Elevaciones.

El Modelo Digital de Elevaciones (MDE) se ha elaborado mediante la digitalización de las curvas de nivel de los mapas topográficos escalas 1:50.000 (Serie L, Servicio Geográfico del Ejército). Los datos se han interpolado mediante *kriging* a una malla de

250 m y se ha manejado con un Sistema de Información Geográfica tipo *raster*, Idrisi for Windows. La figura 8 muestra una imagen de sombreado artificial del MDE de la zona. En ella son claramente diferenciables las alineaciones montañosas del borde sur de la Sierra de la Demanda y de la zona del Moncayo. En estas áreas y en el extremo nor-oriental del Sistema Central se encuentran las mayores altitudes de la zona. El límite norte, constituido por la Sierra de Cabrejas, destaca por la alineación E-O de los relieves, justo en su límite con la cuenca, para pasar a tomar una dirección NO-SE en la parte norte del mapa. Son relieves bastante abruptos con cotas que llegan hasta los 2200 m. Al este de Soria las directrices del relieve comienzan a tener una dirección NO-SE, como consecuencia de la aproximación a las estribaciones de la Cordillera Ibérica. Limitando con la cuenca se observan relieves relictos con una dirección clara ibérica NO-SE. Al sur de la cuenca se refleja la estructuración subtabular de los relieves mesozoicos de la rama Castellana de la Cordillera Ibérica. Son relieves suaves con valles bastante encajados que se desarrollan al incidir la red de drenaje sobre los materiales mesozoicos (Ferreiro, 1991c). En la Cuenca de Almazán, las mayores cotas se sitúan según una alineación NE-SO, coincidiendo con la divisoria de aguas de las cuencas del Duero, Tajo y Ebro (Fig. 9). Desde la divisoria, la topografía desciende suavemente hacia el valle del Duero y más abruptamente hacia el valle del Jalón. La Cuenca aparece como una altiplanicie con relieves suaves y enrasados con las principales unidades que la limitan (Sierra de Cameros, ramas Aragonesa y Castellana de la Cordillera Ibérica).

La red de drenaje presenta unas direcciones principales N-S, E-O y NE-SO y una llamativa disposición radial en la zona más elevada dentro de la cuenca, zona que coincide con el ápice del domo sugerido por los modelos gravimétricos. Las principales corrientes fluviales, el Duero y el Jalón discurren sub-paralelas a los flancos del domo asimilando su morfología a la anomalía detectada al sustraer el efecto gravimétrico del relleno terciario al mapa de anomalías de Bouguer observado (Fig. 6). De acuerdo con esta anomalía el domo tendría un eje mayor según una dirección N-S y estaría marcando una estructura cortical caracterizada por un ascenso del Moho.

Las relaciones entre la topografía y la estructura cortical sugerida por la modelización parece indicar que puede estar relacionada con deformaciones corticales recientes. Recientemente Cortés y Maestro (1997) y Maestro (1999) señalan la existencia de un campo extensional (extensión ESE a ENE y dos campos de esfuerzos compresivos en régimen de desga-

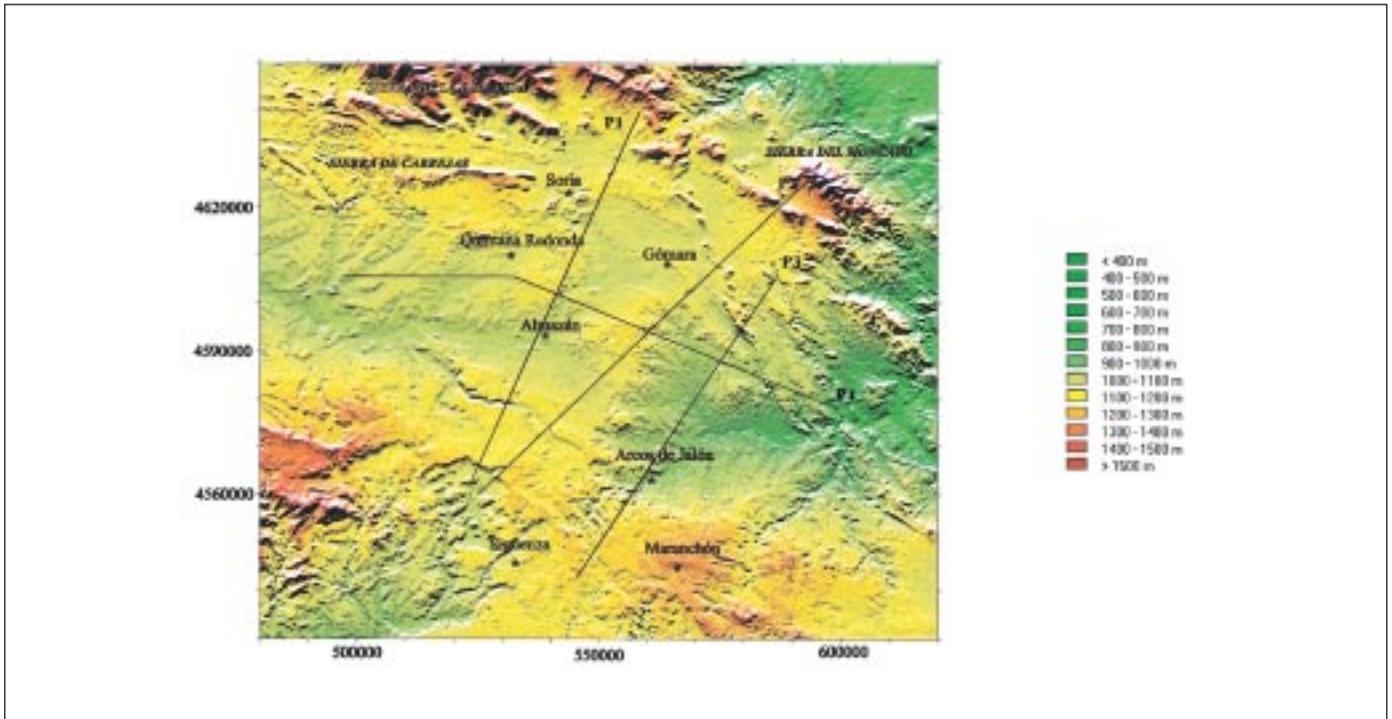


Fig. 8. Mapa de sombreado artificial del modelo digital de elevaciones de la cuenca de Almazán. Dirección de alumbramiento desde el NE, con un ángulo con respecto a la horizontal de 45°. Se han superpuesto los 4 perfiles modelizados. Coordenadas UTM en metros
 Fig. 8. Digital elevation model of the Almazán basin. Artificial shading direction NE. Illumination horizontal angle 45°. The modeled profiles are displayed. UTM coordinates in metres, zone 30 N

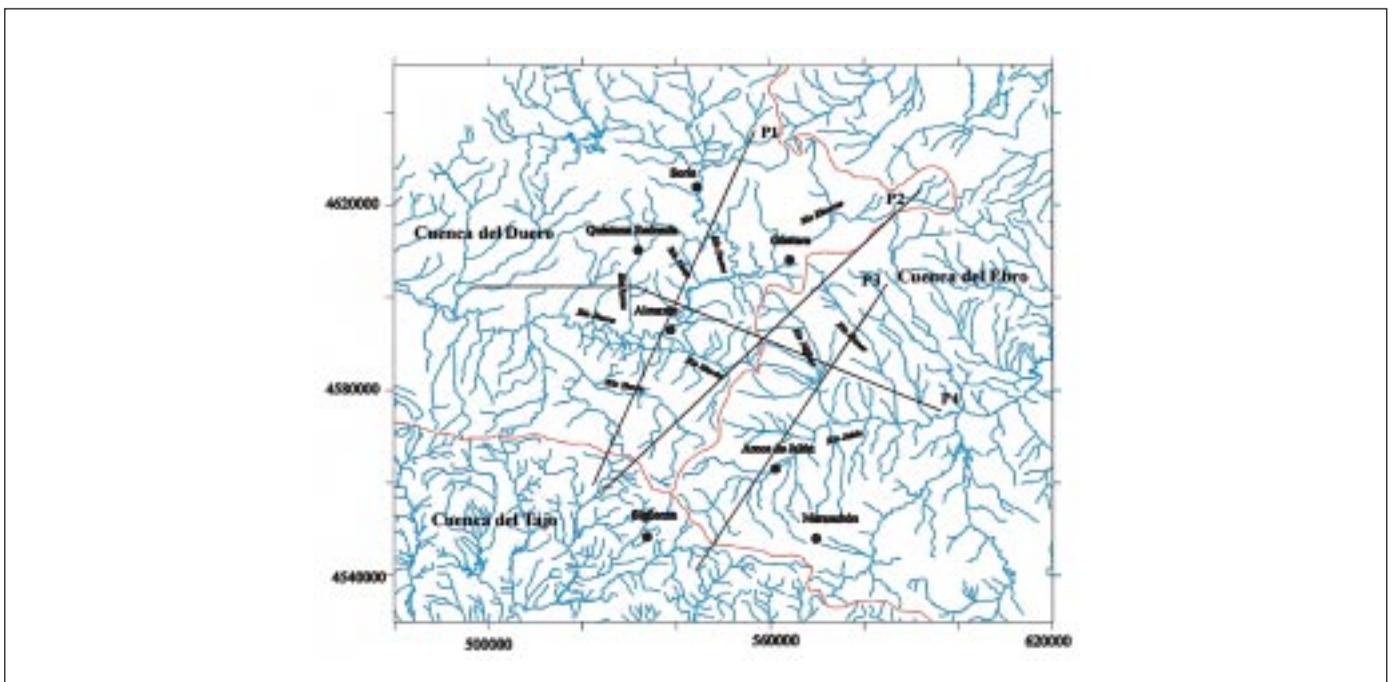


Fig. 9. Mapa de situación de los ríos principales de la cuenca de Almazán. La línea en rojo marca la divisoria de aguas entre cuencas hidrográficas del Duero, Tajo y Ebro. Se han superpuesto los 4 perfiles modelizados. Coordenadas UTM en metros
 Fig. 9. Drainage network in the Almazán basin. Red line represents the divisory hydrological basin line between the Duero, Tajo and Ebro basins. The 4 modeled profiles are displayed. UTM coordinates in metres, zone 30 N

rre (NNE-SSO a NE-SO y NO-SE a NNO-SSE) a partir del análisis de la fracturación de rocas del Mioceno Superior al Pleistoceno. La Cuenca de Almazán es una estructura generada durante las etapas compresivas alpinas ocurridas desde el Eoceno hasta el Mioceno Inferior (e.g. Maestro, 1999; Casas Sainz *et al.*, 2000). El adelgazamiento de la corteza se produciría al propagarse los esfuerzos extensionales que actúan en el este peninsular en el Mioceno Medio. Aunque estas evidencias parecen apuntar que la estructura cortical es reciente no se debe olvidar que esta zona fue sometida a una extensión muy importante hasta el Cretácico Superior (e.g. Mas *et al.*, 1993) y que la estructura cortical puede ser una estructura generada durante las etapas de *rifting* mesozoicas.

Conclusiones

Se ha realizado un levantamiento gravimétrico de 907 estaciones de gravimetría que arroja una densidad de 0.11 estaciones por cada km². En el mapa de anomalías de Bouguer elaborado, la Cuenca de Almazán está asociada a un mínimo relativo centrado al E de la población de Almazán. Limitando este mínimo relativo se encuentran dos máximos relativos que con dirección NO-SE bordean la cuenca por el noreste y suroeste. Los límites noroeste y sureste están marcados por dos mínimos relativos. Mediante la aplicación del método de Bhaskara Rao *et al.* (1990), se ha calculado el efecto gravimétrico del relleno sedimentario de la Cuenca. El cálculo se ha hecho considerando una densidad variable en profundidad, partiendo de los datos aportados por el *density log* del sondeo El Gredal. El máximo espesor de sedimentos genera una anomalía máxima de -37.2 mGal.

La sustracción del efecto gravimétrico de la cuenca al mapa de anomalías de Bouguer observado ha permitido poner de relieve la presencia de un máximo relativo bajo la zona oriental del máximo espesor de sedimentos terciarios y por tanto la existencia de heterogeneidades de densidad bajo la Cuenca de Almazán.

Los datos geológicos de superficie, junto con los datos de sondeos, densidades, sísmicos y gravimétricos han sido integrados para elaborar 4 perfiles gravimétricos en 2 + 1/2 D de la cuenca, tres de ellos perpendiculares a la misma (según una dirección NE-SO) y otro transversal a la cuenca (en dirección E-O) y perpendicular a los anteriores. En estos modelos, se observa que el límite Corteza Superior-Media, Corteza Media-Inferior y el Moho ascienden bajo la Cuenca de Almazán. El Moho se sitúa a 28.5 km en su parte cen-

tral, frente a los 31 km de profundidad que alcanza en los márgenes.

Con objeto de investigar el origen y posible edad de la estructura cortical obtenida se ha analizado la relación entre esta estructura con la topografía y la disposición de la red de drenaje. La culminación del domo cortical coincide con la parte más elevada de la Cuenca que constituye la divisoria de aguas de las Cuencas del Duero y del Ebro. Este hecho y la disposición radial de la red de drenaje con respecto al domo parece sugerir que existe una relación entre la topografía actual y la estructura cortical y que la estructura dómica cortical es relativamente reciente y consecuencia del campo de esfuerzos extensional dominante desde finales del Terciario. No obstante, no se puede descartar que sea una estructura formada durante las etapas de *rifting* mesozoicas.

Este estudio aporta los primeros datos sobre la estructura profunda de la corteza en la Cuenca de Almazán y abre nuevos problemas en la investigación de la corteza en la Cordillera Ibérica. La resolución de estos problemas conlleva una investigación a mayor escala, en la que se intensifiquen los estudios geofísicos en la Cordillera Ibérica a escala de la cadena y a escalas más locales. Las hipótesis quedan abiertas a la espera de datos que permitan contrastarlas.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el Proyecto PB98-0846 de la Dirección General de Enseñanza Superior (Ministerio de Educación).

Referencias

- Armenteros, I., Dabrio, C.J., Guisado, R. y Sánchez de Vega, A. 1989. Megasecuencias sedimentarias del terciario del borde oriental de la Cuenca de Almazán (Soria-Zaragoza). *Stud. Geol. Salmanticensis*. Vol. Esp. 5, 107-127.
- Banda, E., Suriñach, E., Aparicio, A., Sierra, J. y Ruiz de la Parte, E. 1981. Crust and upper mantle structure of the central Iberian Meseta (Spain). *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 67, 779-789.
- Bhaskara Rao, D. 1986. Modelling of sedimentary basins from gravity anomalies with variable density contrast. *Geophys. Jour. Roy. Astr. Soc.*, 84 (1), 207-212.
- Bhaskara Rao, D., Prakash, M.J. y Ramesh Babu, N. 1990. 3D and 2 _ D modelling of gravity anomalies with variable density contrast. *Geophys. Prosp.*, 38 (4), 411-422.
- Bond, J. 1996. Tectono-sedimentary evolution of the Almazan Basin, NE Spain. In: Friend, F. and Dabrio, C.J. (Eds.). *Tertiary basins of Spain: the stratigraphic record of crustal kinematics*. Cambridge University Press, 203-213.

- Carballeira, J. y Pol, C. 1989. Informe complementario sobre el Paleógeno de la Cuenca de Almazán. Mapa geológico de España a escala 1: 50.000. ITGE, Madrid, 49 p.
- Casas-Sainz, A.M. y Maestro-González, A. 1996. Deflection of a compressional stress field by large-scale basement faults. A case study from the Tertiary Almazan basin (Spain). *Tectonophysics*, 255, 135-156.
- Casas Saínz, M. Cortés-Gracia, A. y Maestro González, A. 2000. Intraplate deformation and basin formation during the Tertiary within the northern Iberian plate: Origin and evolution of the Almazán Basin. *Tectonics*, 19 (2), 258-289.
- Cortés, A. y Maestro, A. 1997. Análisis de los estados de esfuerzos recientes en la Cuenca de Almazán (provincias de Soria y Zaragoza). *Rev. Soc. Geol. España*, 10 (1-2), 183-196.
- Esnaola, A. y Martín Fernández 1973. *Mapa Geológico de España a escala 1:50.000*. Hoja nº 351, Ólvega. ITGE. 23 págs. y un mapa.
- Ferreiro, E. 1991a. *Mapa Geológico de España a escala 1:50.000*. Hoja nº 377, Burgo de Osma. ITGE. 39 págs. y un mapa.
- Ferreiro, E. 1991b. *Mapa Geológico de España a escala 1:50.000*. Hoja nº 379, Gómara. ITGE. 35 págs. y un mapa.
- Ferreiro, E. 1991c. *Mapa Geológico de España a escala 1:50.000*. Hoja nº 406, Almazán. ITGE. 48 págs. y un mapa.
- GM-SYS v. 6.1 1992. Paquete informático de tratamiento de datos gravimétricos. *Northwest Geophysical Associates, Inc.* P.O. Box 1063. Corvallis, OR 97339, USA.
- Gracia, F.J. y Simón, J.L. 1986. El campo de fallas miocenas en la Bárdena Negra (provs. de Navarra y Zaragoza). *Bol. Geol. Min.*, 97, 693-703.
- Guimerà, J., Alonso, A., y Mas, J. R. 1995. Inversion of an extensional-ramp basin by a newly formed thrust: the Cameros basin (N. Spain), en J. G. Buchanan y P. G. Buchanan (eds.). Basin inversion, *Geological Society Special Publication* 88, 433-453
- ILIHA DSS Group. 1993. A deep seismic sounding investigation of lithospheric heterogeneity and anisotropy beneath the Iberian Peninsula. *Tectonophysics*, 221(1), 35-51.
- ITGE (eds.) 1990. Documentos sobre la geología del subsuelo de España. Vol. 5: Duero-Almazán. Madrid: *Instituto Tecnológico Geominero de España*, 20 mapas.
- Kane, M. F. 1962. A comprehensive system of terrain corrections using a digital computer. *Geophysics*, 27 (4), 455-462.
- Maestro, A. 1999. Estructura y evolución alpina de la Cuenca de Almazán (Cordillera Ibérica). Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza, 334 p.
- Maestro, A., Casas, A.M. y Cortés, A.L., 1994. El campo de esfuerzos terciarios en la Cuenca de Almazán (provincias de Soria y Zaragoza). *II Congreso de G.E.T.*, 149-152.
- Maestro, A., Cortés, A.L. y Casas, A.M. 1997. Estructura del sector norte de la Cuenca de Almazán (Cordillera Ibérica). *Geogaceta*, 20 (7), 1695-1697.
- Mas, J.R., Alonso, A. y Guimerà, J. 1993. Evolución tectono-sedimentaria de una cuenca extensional intraplaca: La Cuenca finijurásica-eocretácica de los Cameros (La Rioja-Soria). *Rev. Soc. Geol. España*, 6, 129-144.
- Mezcua, J., Gil, A., y Benarroch, R. 1996. Estudio gravimétrico de la Península Ibérica y Baleares. Ins. Geográfico Nacional. 7 p. Madrid.
- Moissenet, E. 1989. Les fossés néogènes de la Chaîne Ibérique: leur évolution dans le temps. *Bull. Soc. Géol. France*, 8 (5), 919-926.
- Platt, N. H. 1990. Basin evolution and fault reactivation in the western Cameros basin. Northern Spain. *Journal of the Geological Society*, London, 147, 165-175.
- Rey Moral, C. 2001. Estudio geofísico de una cuenca sedimentaria: La Cuenca de Almazán (provincia de Soria). Implicaciones tectónicas. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid. 247 p.
- Salas, R. y Casas, A. 1993. Mesozoic extensional tectonics, stratigraphy and crustal evolution during the Alpine cycle of the eastern Iberian basin. *Tectonophysics*, 228, 33-55.
- SHELL 1980-1982. *Informe final del sondeo El Gredal - 1*. Permiso de exploración de Almazán. Shell España. N. V.
- SHELL 1982. Memoria de Extinción de los Permisos de Investigación de Hidrocarburos Almazán A a K. Informe interno.
- Simón, J.L. 1984. Compresión y distensión alpinas en la Cadena Ibérica Oriental. *Tesis Doctoral*. Univ. Zaragoza. Pub. Instituto de Estudios Turoloenses, Teruel. 269 p.
- Simón, J.L. 1989. Late Cenozoic stress field and fracturing in the Iberian Chain and Ebro Basin (Spain). *Jour. Struct. Geol.*, 11(3), 285-294.
- Simón, J.L. 1990. Algunas reflexiones sobre los modelos tectónicos aplicados a la Cordillera Ibérica. *Geogaceta*, 8, 123-130.
- Sopeña, A., López-Gómez, J., Arche, A., Pérez-Arlucea, M., Ramos, A., Virgili, C. y Hernando, S. 1988. Permian and Triassic Rift basins of the Iberian Peninsula. In: W. Manspeizer (Ed.), *Triassic-Jurassic Rifting*. Elsevier, Amsterdam, 757-786.
- Wollard, G. P. 1975. Regional changes in gravity and their relation to crustal parameters. *Bureau Gravimetrique Int.*, Bull Inform., 36, sect. I, 106-110.

Recibido: Diciembre 2002

Aceptado: Junio 2003