



Universidad  
Zaragoza



Facultad de Ciencias  
Universidad Zaragoza

# Trabajo Fin de Grado

Estudio gravimétrico en un sector de la Cuenca de  
Calatayud

Gravimetric study in a sector of the Calatayud Basin

Autor

Iciar Celaya Adiego

Directores

Antonio María Casas Sáinz

María Teresa Román Berdiel

Departamento de Ciencias de la Tierra  
Facultad de Ciencias – Universidad de Zaragoza  
Curso 2022/2023

Índice

1. Resumen y Abstract.....	2
2. Planteamiento .....	3
3. Objetivos.....	3
4. Metodología.....	4
Fundamentos de la prospección gravimétrica.....	4
Toma de datos gravimétricos .....	5
Procesado de datos gravimétricos .....	6
Recogida de muestras de material para medida de densidades .....	8
5. Contexto geográfico y geológico .....	9
Situación de la zona de estudio.....	9
Estratigrafía.....	9
Estructura.....	12
6. Presentación de resultados.....	14
Perfil gravimétrico .....	14
Medida de densidades .....	15
Modelización gravimétrica.....	16
7. Discusión de resultados.....	19
8. Conclusiones.....	21
9. Bibliografía.....	22
10. Anexos.....	0
Anexo 1: Modelo geológico propuesto.....	0

## 1. Resumen y Abstract

El presente informe se centra en un estudio de prospección gravimétrica para obtener información sobre la geometría de unidades en el subsuelo, teniendo en cuenta las características petrofísicas de las diferentes unidades presentes en la zona; la prospección se basa en la medida del campo gravimétrico terrestre y en analizar sus anomalías, que están causadas por variaciones de densidad de los materiales subterráneos.

El objetivo de este estudio es analizar una zona concreta de la Cuenca de Calatayud aplicando técnicas geofísicas para ayudar a la caracterización geológica del entorno. Para ello, se ha realizado una campaña de prospección geofísica a lo largo de un perfil en jornadas de campo y se han analizado las características petrofísicas que presentan las diferentes rocas. Seguidamente se cotejan los datos obtenidos a lo largo de un corte geológico para poder caracterizar la estructura de la zona.

De este modo, los principales resultados obtenidos en este trabajo son: la existencia de una Anomalía de Bouguer negativa en la cuenca, la presencia de un espesor constante en la corteza, la geometría de la cuenca se encuentra condicionada por fallas de tipo normal y que el espesor del relleno de la cuenca es de unos 1000 m en su parte central.

---

This report focuses on a gravimetric prospecting study to obtain information on the geometry of units in the subsoil, taking into account the petrophysical characteristics of the different units present in the area; Prospecting is based on measuring the Earth's gravimetric field and analyzing its anomalies, which are caused by variations in the density of underground materials.

The objective of this study is to analyze a specific area of the Calatayud Basin applying geophysical techniques to help the geological characterization of the environment. To this end, a geophysical prospecting survey has been carried out along a profile in field sessions and the petrophysical characteristics presented by the different rocks have been analyzed. The data obtained along a geological section are then compared in order to characterize the structure of the area.

Thus, the main results obtained in this work are: the existence of a negative Bouguer Anomaly in the basin, the presence of a constant thickness in the crust, the geometry of the basin is conditioned by normal faults and that the thickness of the basin fill is about 1000 m in the central part.

## 2. Planteamiento

La geofísica es la aplicación de la física en el estudio de la Tierra desde su superficie hasta su centro. Como una parte esencial de las ciencias de la tierra en la actualidad. La geofísica es fundamental para entender la Tierra sólida, particularmente a escala global. Ideas modernas como la evolución de los continentes y océanos, o la formación de cadenas montañosas en la tierra o bajo los océanos, por ejemplo, están extensamente basadas en descubrimientos hechos usando geofísica (Musset y Khan, 2000).

Entre las diversas técnicas geofísicas, existen métodos que aprovechan campos terrestres naturales, como los campos gravitacional o magnético de la Tierra. Estos métodos, buscan perturbaciones locales que pueden estar causadas por características geológicas concretas.

La prospección gravimétrica es una de las técnicas geofísicas más usadas. Se utiliza para detectar diferencias laterales en las densidades de las rocas del subsuelo. Por lo tanto, es útil para encontrar cuerpos y estructuras enterrados en el subsuelo, tales como intrusiones ígneas, diapiros y algunas fallas, en escalas desde unos pocos metros hasta unas decenas de kilómetros (Musset y Khan, 2000).

La cuenca de Calatayud es una cuenca Cenozoica situada en la Cordillera Ibérica cuyo origen y tectónica sigue siendo un interrogante hoy en día. Fontboté (1954) indica que, con anterioridad a su formación, el zócalo de la cuenca debió encontrarse sobreelevado explicándose de esta forma el que los sedimentos miocenos descansen directamente sobre el basamento en los márgenes de cuenca. Mientras que Capote y González-Lodeiro (1983) propusieron para la zona de Ateca-Daroca una estructura Hercínica integrada por un gran anticlinal de fondo de dirección NO-SE con vergencia hacia el E, cuyo núcleo y flanco oriental permanecería oculto bajo el Terciario de la Cuenca de Calatayud. Por su parte, Tena et al. (1979) plantean una nueva hipótesis donde la tectónica de elevación de escamas diferenciadas por fallas inversas adopta una estructura de bloques fallados con una única vergencia.

En definitiva, los materiales de relleno de la cuenca se depositan en onlap cubriendo los bordes de la cuenca y la geometría de estos, por lo que no es posible observar el tipo de contacto y geometría entre el relleno y el basamento. Así pues, la aplicación de la geofísica es fundamental. En concreto el uso de la gravimetría es conveniente ya que hay un buen contraste entre las densidades de los materiales cenozoicos, que rellenan la cuenca, y paleozoicos, que conforman los bordes y el basamento de esta.

## 3. Objetivos

El presente trabajo se plantea con el objetivo de caracterizar la geometría de la Cuenca de Calatayud en su sector central, y de sus contactos con los materiales Paleozoicos en los bordes de la misma, mediante técnicas geológicas y geofísicas. Para este fin se establecieron una serie de objetivos secundarios:

- 1) Caracterizar la geometría de las unidades en superficie mediante fotointerpretación con ortoimágenes y trabajo de campo.

- 2) Caracterizar la geometría de las unidades en profundidad a través de la toma de datos de la aceleración de la gravedad mediante un gravímetro portátil.
- 3) Caracterizar las propiedades petrofísicas (densidad) de los materiales aflorantes.
- 4) Realización de un modelo geológico basado en los datos geológicos y gravimétricos obtenidos.

## 4. Metodología

### Fundamentos de la prospección gravimétrica

El concepto principal que define la prospección gravimétrica es el estudio de las variaciones del campo gravitatorio, que están en relación con la densidad en los materiales del subsuelo. Las anomalías gravimétricas, que son la base del estudio, se determinan midiendo la gravedad en la superficie y analizando las diferencias entre los valores registrados.

La gravedad en la superficie terrestre se considera con un valor medio de  $9.8 \text{ m/s}^2$ , pero en las prospecciones gravimétricas se necesitan detectar variaciones tan pequeñas como  $0.00001\%$  de la medida de la gravedad terrestre, para lo que se utilizan instrumentos con gran sensibilidad. Además, hay diversos factores que modifican la gravedad, como pueden ser los cambios en la elevación del terreno y las irregularidades en la topografía. Estos factores pueden ser identificados y corregidos sus efectos. Para la obtención de medidas absolutas de la gravedad se recurre a la medida de diferencias relativas en el campo gravitatorio, las cuales se normalizan con los datos de una medida absoluta en la estación de medida absoluta más próxima al área de estudio

Los gravímetros son básicamente balanzas de resorte que llevan una masa constante. Las variaciones en el peso de esa masa por el efecto de la gravedad hacen que la longitud del muelle varíe y así dan una medida en el cambio de la gravedad (Fig. 1). Esto se calcula a través de la Ley de Hooke, ya que la extensión del resorte es proporcional a la fuerza ejercida.

$$mg = kx [1]$$

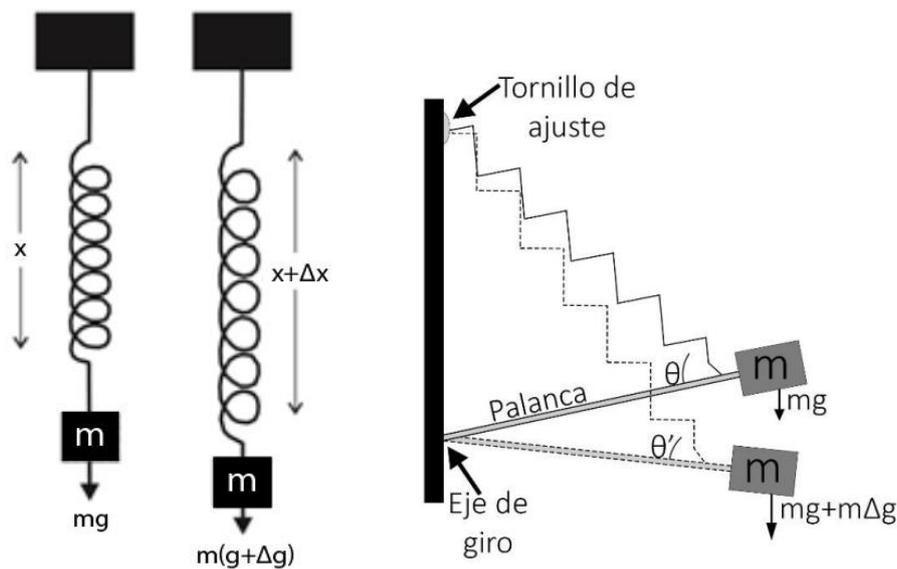
$$mg + m\Delta g = kx + g\Delta x [2]$$

$$m\Delta g = g\Delta x [3]$$

$$\Delta g = \frac{g\Delta x}{m} [4]$$

Donde  $m$  es el valor de la masa,  $\Delta g$  es la variación de la gravedad,  $k$  es la constante elástica del muelle y  $\Delta x$  es la variación de la longitud del muelle, la cual debe ser medida con una precisión de  $10^8$ . Para poder alcanzar esta precisión sería necesario o una gran masa o un muelle débil, lo que dificulta la estabilidad y utilización del aparato, por lo que se utilizan amplificadores mecánicos, ópticos o eléctricos.

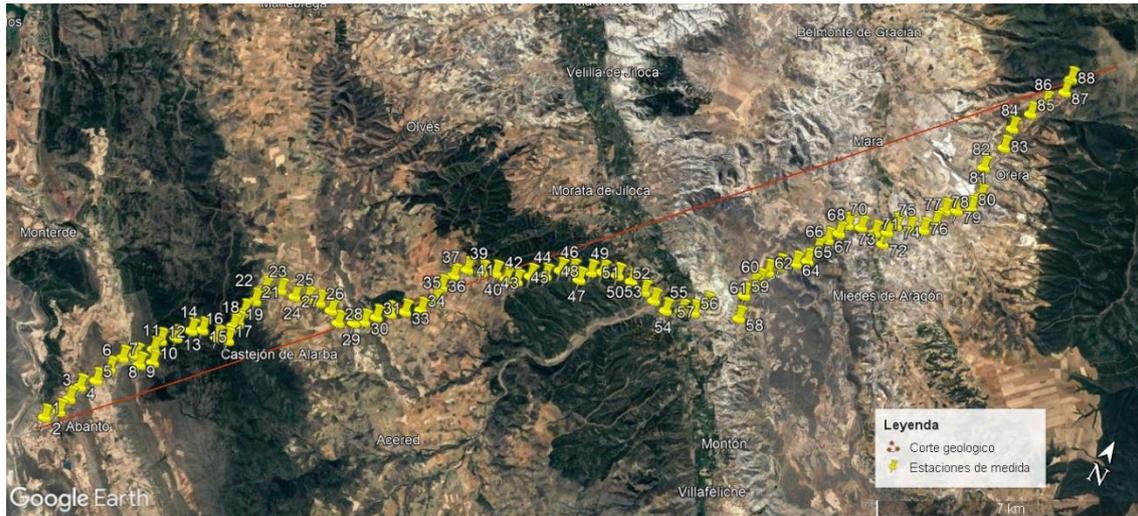
En este trabajo se han utilizado dos modelos de gravímetros estáticos: Burris Gravity Meter producido por ZLS Corporation, y LaCoste-Romberg modelo G, ambos basados en el funcionamiento del gravímetro LaCoste-Romberg (muelle de longitud 0). Así estos dispositivos están compuestos por muelles especiales sujetos a una masa a través de una barra, que a su vez se unen por diversas bisagras y palancas. En esta configuración la magnitud del momento ejercido por el muelle de la barra depende de la extensión del muelle y del seno del ángulo que forman palanca y muelle. Con lo cual, si la gravedad aumenta, el muelle se extenderá y el ángulo se reducirá (Fig. 1). No obstante, mediante un adecuado diseño de la geometría del muelle y la palanca, se puede reducir todo lo que se desee el momento de retorno del muelle. Los muelles que se utilizan son pretensados en su fabricación por lo que la fuerza de retorno es proporcional a la longitud del muelle. Las diferencias de temperatura pueden causar una dilatación o contracción del muelle, por lo que es necesario un sistema termorregulador.



**Figura 1:** (Izquierda) Principio general de los gravímetros a partir de la Ley de Hooke; (Derecha) Principio del gravímetro de LaCoste-Romberg.

### Toma de datos gravimétricos

Para la realización del perfil gravimétrico, de orientación SW-NE, se seleccionó un grupo inicial de 80 estaciones de medida, separadas entre sí entre 350 y 500 m, las cuales fueron posteriormente ampliadas en el sector norte hasta 88, tomándose medida también en la base absoluta de Zaragoza (edificio de Geológicas, Universidad de Zaragoza), y en una segunda base local en Velilla de Jiloca. Las estaciones originales están numeradas de sur a norte, siendo 1 la más meridional y 80 la más septentrional. Las estaciones que fueron añadidas con posterioridad en la zona norte se nombraron correlativas a las originales (Fig. 2).



**Figura 2:** Situación geográfica de las estaciones de medida en la zona de estudio.

Para un correcto posicionamiento horizontal de las estaciones de medida, estas se seleccionaron a través del software Google Earth, que permite la selección de puntos con coordenadas concretas. Este software y su modelo digital del terreno también han permitido obtener la altitud de cada una de las estaciones. Para mayor precisión esos puntos también han sido identificados en la base cartográfica armonizada de Aragón de escala 1:5000, ya que en esta base cartográfica las cotas identificadas tienen una precisión de 1cm.

La recogida de datos gravimétricos se realizó a lo largo de dos campañas: los días 12 de diciembre de 2022 y 19 de marzo de 2023.

En la primera campaña se midieron las estaciones 1 a 28, con la base en Zaragoza, y fueron medidas con el gravímetro ZLS Burris (Ultra Grav™ Control System). En la segunda se midieron las estaciones 28 a 88, con las bases en Zaragoza y Velilla de Jiloca, estas con el gravímetro Lacoste & Romberg (modelo G). Al inicio y finalización de cada campaña se tomaron medidas en el edificio C de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Zaragoza y en la Iglesia de Velilla de Jiloca (41.274045°, -1.604426°), para así poder calcular la deriva y armonizar ambas campañas.

Además, al haber tomado medidas en el edificio C de la Facultad de Ciencias, donde la gravedad absoluta es conocida ( $980225.00869 \pm 0.00136$  mGal), se pueden aplicar la diferencia a las demás estaciones, obteniendo su valor absoluto.

### Procesado de datos gravimétricos

Para poder analizar los datos gravimétricos obtenidos en el campo, estos deben ser procesados teniendo en cuenta las variaciones en las medidas sujetas a condiciones no relacionadas con la densidad de los materiales subyacentes.

Las correcciones que se han realizado son:

- Corrección de deriva
- Corrección de latitud

- Corrección de altitud, que incluye las correcciones de Aire Libre, Bouguer y Topográfica
- Corrección de mareas, realizada por el propio software del gravímetro

Estas correcciones han sido calculadas con la ayuda de una hoja de cálculo y con el software Oasis Montai (Geosoft, Canadá).

A continuación, se detallan las correcciones nombradas anteriormente:

**La corrección de deriva** tiene en cuenta la deriva del propio gravímetro, que es debida a pequeños cambios en las constantes físicas de sus componentes. Para poder conocer este factor se han de realizar medidas en una misma estación (estación base) a lo largo del día y así asumir que la deriva entre medidas es lineal. Así se establece la tasa de la deriva simplemente dividiendo la diferencia entre la medida inicial y la medida final en la base por el tiempo transcurrido entre ambas medidas. Todas las estaciones medidas a lo largo de la campaña se ajustan utilizando esa tasa de deriva. Para ello se utilizó la estación local de Velilla.

### La corrección de latitud

La gravedad varía debido a la forma algo oblata de la Tierra, y en teoría es máxima en los polos y mínima en el ecuador. La diferencia entre el radio ecuatorial y el polar es de 21 km (6356.775 km para el radio polar y 6378.160 km para el radio ecuatorial, con una media de 6371 km). A esto se añade el efecto de la rotación que crea una aceleración centrífuga que es máxima en el ecuador y mínima en los polos. Frente a estos efectos la mayor masa que hay entre la superficie y el centro de la Tierra en el ecuador, tiende a contrarrestarlos ligeramente. Para los efectos de la prospección gravimétrica, la Tierra puede considerarse como un elipsoide de revolución con esos ejes principales. El efecto neto de estos tres factores es que la gravedad en los polos es 5168 mGal mayor que en el ecuador.

La variación de  $g$  con la latitud está implícita en la fórmula universal de la gravedad de 1967 y sus sucesivas modificaciones:

$$g\varphi = 978031.85(1 + 0.005278895 \text{sen}^2\varphi + 0.000023462 \text{sen}^4\varphi) \text{mGal} [5]$$

La corrección de altitud se realiza en tres fases:

**La corrección de Aire Libre** corrige la disminución del campo gravitatorio que se produce al aumentar la altitud, como resultado del aumento de distancia al centro de la Tierra de acuerdo con la Ley de Newton y el teorema de Gauss. Si la estación se encuentra por encima del datum (considerando como datum el nivel del mar), esta corrección es positiva. Esta corrección es dependiente únicamente de la elevación del punto en el que se realiza la medida.

$$FAC = 0.3086 \left(\frac{\text{mGal}}{\text{m}}\right) * h (m) [6]$$

**La corrección de Bouguer** complementa a la corrección de aire libre ya que esta no considera el material existente entre la estación y el datum. La corrección de Bouguer elimina este efecto ajustando este espesor a una lámina horizontal infinita de roca.

$$BC = 4.191 * 10^{-5} * \rho * h (mGal) [7]$$

**La corrección topográfica** tiene en cuenta las irregularidades del terreno, ya que la corrección de Bouguer considera una lámina constante de material, por lo que existe una sobrecorrección. Esta ha sido calculada en este trabajo utilizando el software Oasis Montai (Geosoft, Canadá), utilizando los modelos digitales del terreno de 5 m de malla del IGN.

Tras el cálculo de las correcciones necesarias se define la anomalía del valor de la gravedad en un punto a partir de la diferencia entre el valor teórico y el valor real. Se pueden calcular dos tipos de anomalías: la Anomalía de Bouguer[8] y la Anomalía de Aire Libre[9]

$$BA = g_{obs} - \Delta g_{lat} + FAC \pm BC + TC \text{ (mGal)} [8]$$

$$FAA = g_{obs} - \Delta g_{lat} + FAC + TC \text{ (mGal)} [9]$$

La interpretación de datos gravimétricos en tierra se realiza en función de la anomalía de Bouguer. Esta se compone de una anomalía regional que se caracteriza por una gran amplitud y longitud de onda, por un origen profundo, a la cual se le superponen anomalías residuales con una longitud de onda menor, por un origen superficial, que generalmente son las que se buscan en estudios de este tipo. Por lo cual para conocer la anomalía residual hay que restar a la Anomalía de Bouguer a la Anomalía regional.

### Recogida de muestras de material para medida de densidades

El contraste de densidad de las rocas es la causa que genera las anomalías gravimétricas, por tanto, es conveniente conocer la densidad de los materiales subyacentes para la realización de un modelo que se ajuste al perfil gravimétrico.

Para ello se han recogido 14 muestras de las litologías aflorantes a lo largo del perfil. Cada una de las muestras se ha dividido en fragmentos más manejables de dimensión aproximada de 3cm de lado. La medida de la densidad se ha realizado con las muestras recubiertas de cera parafina para que el agua no penetre en los poros y no interfiera en los cálculos del peso.

Para calcular la densidad de cada muestra se aplica el principio de Arquímedes, por lo tanto, estas se han pesado tres veces: en seco, en seco y aisladas con cera parafina y sumergidas y aisladas con cera parafina. Conociendo la densidad de la parafina, estas medidas permiten calcular la densidad de cada fragmento utilizando la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m_1}{(m_2 - m_3) - \frac{m_2 - m_1}{\rho_{parafina}}} [10]$$

Donde:

$\rho$  = Densidad de la muestra

$m_1$ =peso muestra

$m_2$ = peso muestra parafinada

$m_3$ =peso muestra parafinada y sumergida en agua

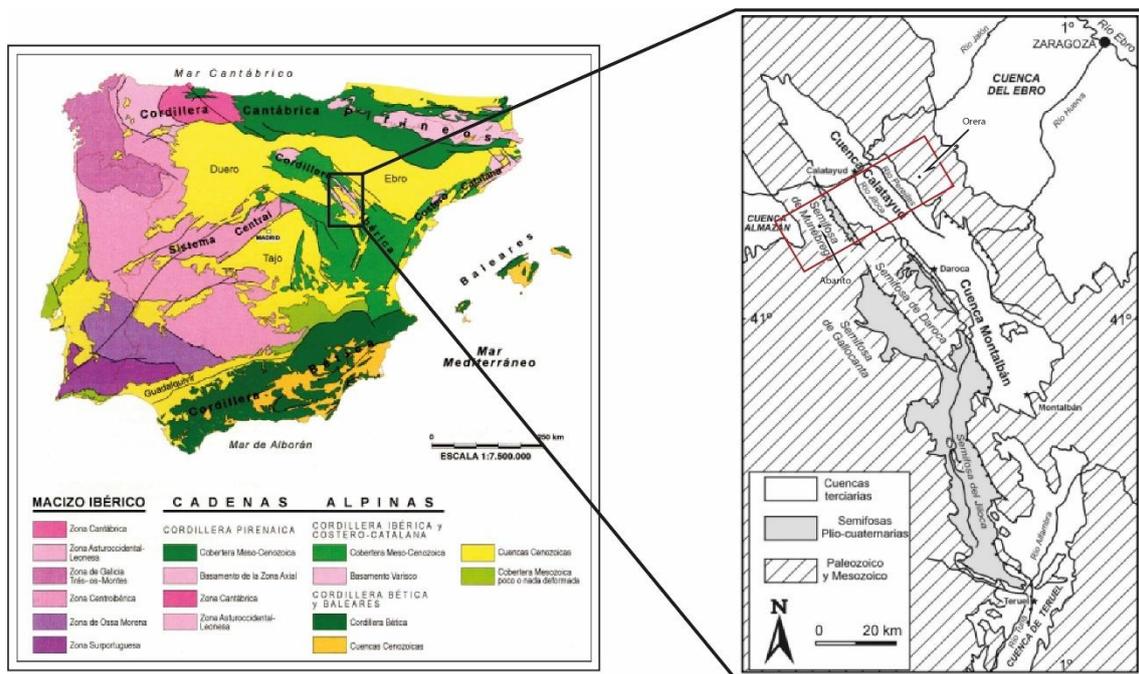
$\rho$  parafina= densidad de la parafina

## 5. Contexto geográfico y geológico

### Situación de la zona de estudio

La zona de estudio se localiza al S de la Cuenca del Ebro, en el sector Central de la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica. Dentro de esta se sitúa en la parte central de la Cuenca Neógena de Calatayud, entre los municipios de Abanto y Orera, ambos pertenecientes a la provincia de Zaragoza y a la comarca de la Comunidad de Calatayud (Fig. 3).

Los materiales presentes en la zona de estudio incluyen unidades pertenecientes al Paleozoico (Cámbrico y Ordovícico), Mesozoico (Triásico) y Cenozoico (Mioceno). Esta zona se distribuye a lo largo de un perfil que regionalmente atraviesa la Sierra de Pardos, la fosa de Munébrega y la cuenca de Calatayud.



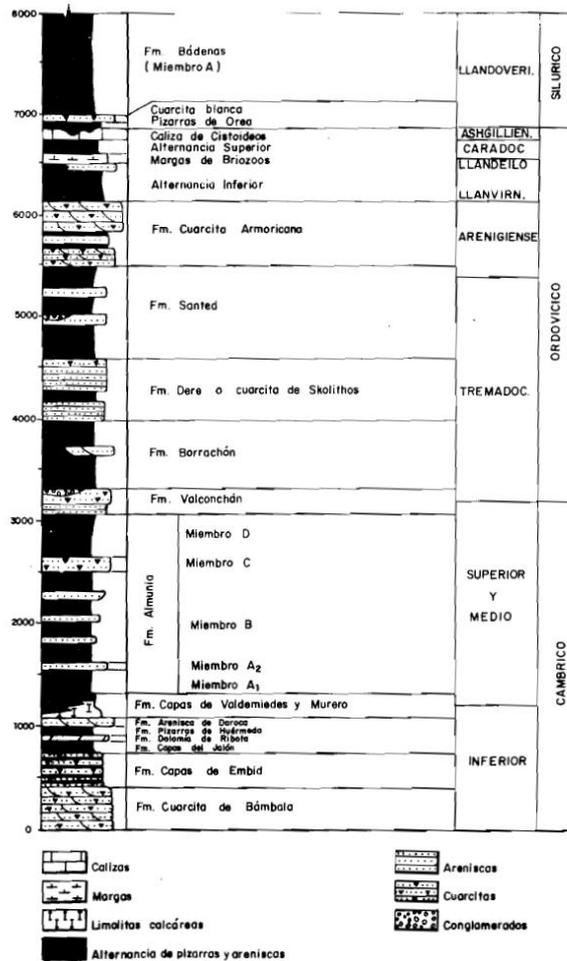
**Figura 3:** A la izquierda: Mapa de las principales unidades geológicas de la Península Ibérica. Modificado de Vera (2004). A la derecha: Localización geográfica y geológica de la Cuenca de Calatayud, encuadrado en rojo la localización de la zona de estudio. Modificado de Álvarez et al. (2003)

### Estratigrafía

La estratigrafía de la zona se compone de materiales paleozoicos, mesozoicos y cenozoicos, teniendo estos últimos un mayor protagonismo al tratarse de la Cuenca de Calatayud:

Los sectores limítrofes de la cuenca de Calatayud se encuentran formados por materiales paleozoicos, en la zona de estudio están conformados por unidades de edad Cámbrico inferior-Ordovícico. Los materiales Cámbrico-Ordovícicos expuestos en series de gran potencia se encuentran fundamentalmente compuestos por cuarcitas, pizarras, areniscas, limolitas, dolomías y microconglomerados. En ellos se han distinguido las siguientes unidades litoestratigráficas de muro a techo: Formación Cuarcitas de Bámbola, Formación Capas de Embid, Formación Capas del Jalón, Formación Ribota (dolomías tableadas y

masivas con alguna intercalación de calizas margosas y margas), Formación Pizarras de Huérmeda y Formación Daroca. El Cámbrico Medio y Superior está caracterizado por un potente conjunto pizarroso (Formación Almunia). En la zona NO del Macizo de Ateca sólo afloran materiales del Ordovícico Inferior. Está constituido por cuarcitas, pizarras y areniscas en los que se han distinguido las unidades que pertenecen, de muro a techo, a las Formaciones Valconchán (en ella se encuentra el límite Cámbrico-Ordovícico), Borrachón, Deré y Santed. ( Fig. 4, Del Olmo et al. 1983).



**Figura 4:** Columna estratigráfica sintética del Cámbrico-Ordovícico. Tomado de Del Olmo et al., (1983)

Los afloramientos mesozoicos corresponden a materiales triásicos, en facies Buntsandstein, Muschelkalk y Keuper, y las formaciones de Imón y Cortes de Tajuña.

El Buntsandstein está formado por conglomerados cuarcíticos, areniscas y limolitas rojas; el Muschelkalk consiste en dolomías dispuestas en capas gruesas, tableadas, alternancias margo- dolomíticas y limos; el Keuper está compuesto de arcillas abigarradas verdes, rojas y grises, con o sin cristales de yeso, de niveles métricos de yeso de carácter secundario, arcillas, limos, niveles margosos, y tramos arcilloso-rojizos con cristales de yeso diagenético. (Del Olmo et al. (1983)).

Las facies del triásico superior constan de afloramientos de poca potencia, formados por dolomías tableadas, brechas y carniolas agrupadas en las formaciones de Dolomías Tableadas de Imón y en las Carniolas de Cortes de Tajuña. (Del Olmo et al. (1983)).

El relleno sedimentario cenozoico de la Cuenca de Calatayud comprende sedimentos detríticos de carácter aluvial (conglomerados, areniscas, limos y arcillas) en los sectores de margen de cuenca que pasan a sedimentos lacustres (evaporitas y carbonatos) en los sectores centrales de la cuenca donde se acumulan potencias de hasta 1200 m. (Del Olmo et al. (1983)).

En el relleno mioceno de la Cuenca de Calatayud se distinguen tres unidades litoestratigráficas según Ortí y Rosell (1998) y Sanz-Rubio et al. (2003) (Fig. 5):

Unidad inferior: se compone de más de 500 m de evaporitas en la parte central de la cuenca. Su parte inferior según sondeos está compuesta por halita, mientras que los sulfatos cálcicos, yeso y anhidrita predominan hacia techo de la unidad, así como la glauberita como mineral subordinado. Esta es la unidad más potente y extensa en afloramiento, según Ortí y Rosell (1998) se puede dividir en los siguientes cinturones de facies:

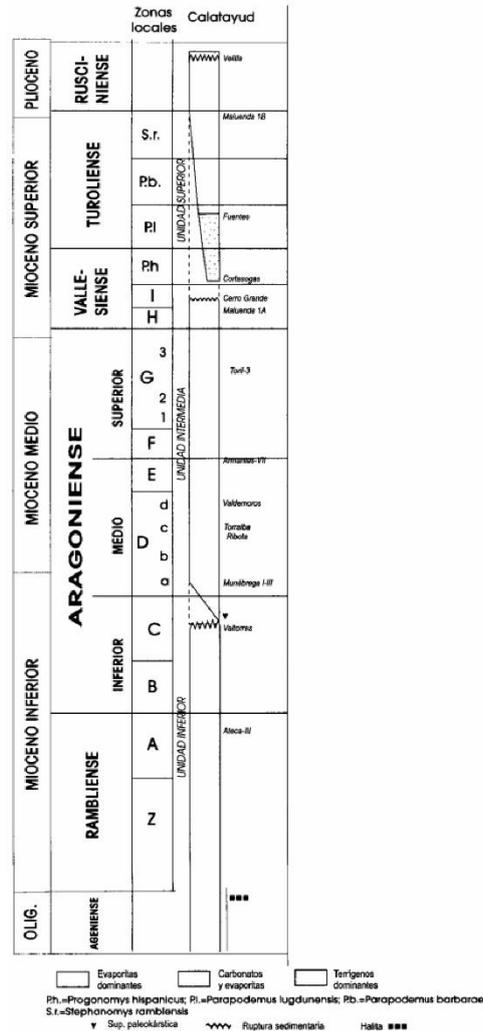
- (1) Cuerpo central, entre Calatayud y Velilla, siendo el más característico por sus litofacies laminado-nodulares rítmicas, integradas originalmente por yeso primario, glauberita y anhidrita. Llegan a aflorar los 150 m superiores de este cuerpo central
- (2) Zona cíclica intermedia, esta ciclicidad consiste en una alternancia de lutitas y yesos laminados secundarios, con una potencia promedio de ciclo entre 1 y 1.5 m. Hacia la base del término yesífero suelen presentarse intercalaciones de masa irregulares, lenticulares o nodulosas, que desplazan las láminas de yeso
- (3) Nódulos, yesos bioturbados y sílex, se presentan en la zona SE en sustitución de la zona cíclica anterior, aparecen capas de yesos con litofacies nodulares y bioturbadas entre capas de lutitas rojas con algunos nódulos de sílex.

Unidad intermedia: presenta hasta 120 m de sedimentos en la parte central de la cuenca, principalmente yeso laminado primario y depósitos dolomíticos. En las zonas centrales existen cuerpos carbonatados diagenéticos, mientras que en el borde de la cuenca se localizan sistemas lacustres aislados y extensos mudflats dolomíticos.

Unidad superior: tiene una potencia variable de entre 25 y 85 m y se compone de depósitos terrígenos aluviales-fluviales y carbonatados de medios fluviolacustres. Esta unidad se puede subdividir en:

- (1) Subunidad inferior: presenta ciclos de lutitas y yesos laminados secundarios en la zona de Morata, en cambio hacia Fuentes esta facies es sustituida por capas de yeso nodular y meganodular, y posteriormente por yesos bioturbados con nódulos de sílex entre Fuentes y Villafeliche.

- (2) Subunidad superior: constituida por ciclos de lutitas-yesos laminados, con potencia promedio entre 2 y 3 metros, que intercalan algunos niveles de arcillas y carbonatos.



**Figura 5:** Columna estratigráfica de las unidades miocenas de la Cuenca de Calatayud. Modificado de Sanz-Rubio et al. (2003).

### Estructura

El desarrollo de la Cuenca de Calatayud está directamente relacionado con la evolución tecto-sedimentaria de la Cordillera Ibérica. Esta cadena intraplaca es uno de los resultados de la convergencia entre las placas euroasiática e ibérica entre el Cretácico Superior-Oligoceno medio y la africana-ibérica durante el Oligoceno Superior-Cuaternario (Srivastava et al., 1990). Según Simón (1990) la evolución alpina de la Cordillera Ibérica puede dividirse en tres grandes periodos: (1) periodo de sedimentación en la cuenca mesozoica; (2) periodo orogénico (Paleógeno) y (3) periodo post-orogénico (Neógeno-Cuaternario).

### 1. Sedimentación mesozoica

En el tránsito Pérmico-Triásico comenzó a individualizarse un graben en la cuenca en la que se depositaron los materiales mesozoicos actualmente integrados en la estructura de la Cordillera Ibérica, Según Álvaro et al. (1979) la situación tectónica en el área de Castellón-Teruel-Valencia se ajusta a un punto triple, que indicaría la presencia de un hot spot en el manto superior. Este periodo puede dividirse en tres etapas: (1) etapa de graben (Triásico Inferior-Medio): reactivación de fallas tardihercénicas, individualización de la cuenca y fuertes subsidencias; (2) etapa de transición (Triásico Superior): adelgazamiento de la corteza y abundantes eventos magmáticos en la unión triple; (3) etapa de flexura (Jurásico Inferior-Cretácico Superior): flexión continental más suave que da lugar a una plataforma marina carbonatada.

### 2. Periodo orogénico

Durante el tránsito Mesozoico-Cenozoico tiene lugar la emersión definitiva del dominio ibérico y la inversión tectónica con respecto a la actual Cuenca del Ebro. La compresión paleógena produce pliegues y cabalgamientos en el basamento y la cobertera mesozoica de la Cordillera Ibérica con una dirección NW-SE.

### 3. Periodo post-orogénico

Durante el Mioceno inferior-medio se produce un cambio gradual de régimen compresivo a distensivo. Este último relacionado con un proceso de *rifting* que se desarrolla de forma progresiva de N a S desde el Rhin hasta el Mar de Alborán (Eoceno-Mioceno superior). Esto da lugar a la estructuración de un importante sistema de fosas tectónicas en el interior de la cadena, entre ellas, la Cuenca de Calatayud.

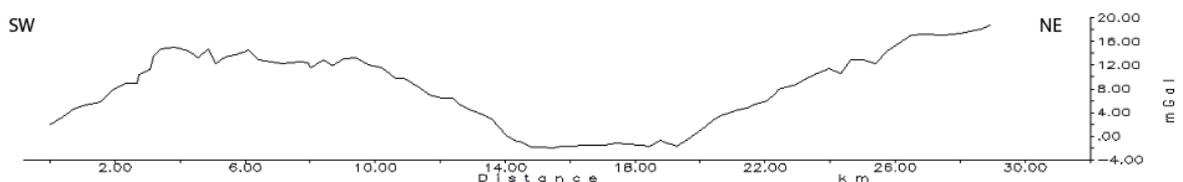
Dentro de este episodio de extensión generalizada, se han distinguido dos etapas fundamentales distensivas separadas por un periodo de relativa estabilidad tectónica en el cual se genera la denominada Superficie de Erosión Fundamental de la Cordillera Ibérica por Solé Sabaris (1978):

- (1) En una primera etapa distensiva se determina la configuración inicial del sistema de fosas, a la vez que se forma la mayor parte de estas. Se genera la Cuenca de Calatayud-Montalbán a favor de la dirección NW-SE, característica de la Cordillera Ibérica. Esta depresión presenta un marcado carácter de semifosa con una asimetría sedimentaria que implica un desplazamiento de facies hacia su margen oriental, el cual se limita por fallas normales.
- (2) En una segunda etapa distensiva, que comienza alrededor del Plioceno superior (Simón, 1984), se originan nuevas depresiones entre ellas la de Munébrega (Gutiérrez-Santolalla, 1994), rellenas solamente de sedimentos plio-cuaternarios, a la vez que se reactivan las fosas ya existentes. Finalmente, la Cordillera Ibérica adquiere su morfoestructura actual

## 6. Presentación de resultados

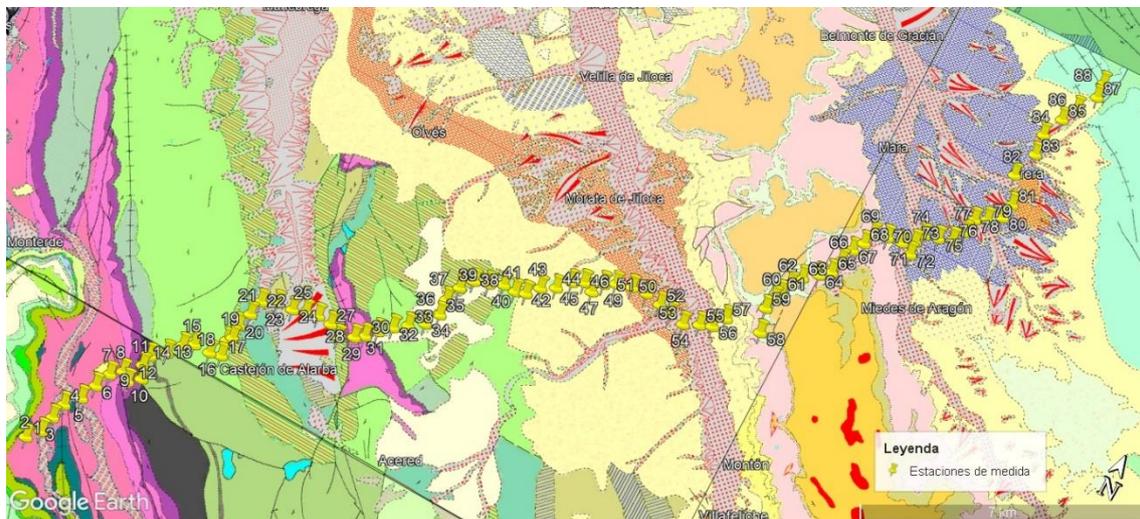
### Perfil gravimétrico

La Anomalía de Bouguer obtenida muestra una curva relativamente simétrica, en la que se observa un mínimo de 2 mGal en el SW del perfil, el cual aumenta hasta 15 mGal cuando se alcanza el 4 km y que se estabiliza formando una meseta hasta el 9 km donde comienza a descender. El perfil sufre un descenso marcado por un mínimo que oscila entre 0 y -2 mGal entre los km 14 y 20. A partir del km 20 el perfil vuelve a aumentar hasta alcanzar un máximo de 18 mGal, que se corresponde con el final del perfil en el km 29, en la parte NE (Fig. 6).



**Figura 6:** Perfil gravimétrico obtenido.

Para poder encontrar relaciones entre las litologías aflorantes y el perfil gravimétrico que se ha obtenido, se han superpuesto las estaciones de medida al mapa geológico de la zona de estudio (Fig. 7).



**Figura 7:** Estaciones de medida superpuestas al mapa geológico de la zona de estudio.

### Medida de densidades

Las 14 muestras recogidas durante las campañas de campo se dividieron en fragmentos más manejables de unos 3 cm<sup>3</sup>, y se tomó una medida de cada una de las muestras. Los valores de densidad de estas muestras oscilan entre 1.79 y 2.75 g/cm<sup>3</sup>. Las densidades más bajas obtenidas se corresponden con materiales miocenos del N de la zona de estudio, donde existen niveles arcillosos ricos en sepiolita (mineral de baja densidad), estas oscilan entre 1.79 (muestra 64) y 2.69 (muestra 34) g/cm<sup>3</sup>. Por el contrario, las densidades más altas se localizan en materiales de edad ordovícica, en el margen sur de la cuenca, y que oscilan entre 2.69 (muestra 18) y 2.75 (muestra 41) g/cm<sup>3</sup>. Las unidades mesozoicas presentan unas densidades comprendidas de entre 2.29 (muestra 8.5) y 2.68 (muestra 29) g/cm<sup>3</sup> (Fig. 8).

<b>Muestra</b>	<b>Edad</b>	<b>Litología</b>	<b>densidad</b>
8,5	Triasico	Dolomía	<b>2,29</b>
9	Triasico	Dolomía	<b>2,56</b>
13	Paleozoico	Pizarra	<b>2,67</b>
18	Paleozoico	Cuarcita	<b>2,69</b>
29	Triasico	Arenisca	<b>2,68</b>
30	Triasico	Arenisca	<b>2,57</b>
34	Cenozoico	Arenisca	<b>2,69</b>
41	Paleozoico	Pizarra	<b>2,75</b>
58	Cenozoico	Marga	<b>2,43</b>
61	Cenozoico	Arenisca	<b>2,63</b>
62	Cenozoico	Marga	<b>2,47</b>
64	Cenozoico	Arcilla	<b>1,79</b>
67	Cenozoico	Arcilla	<b>1,86</b>
73	Cenozoico	Arcilla	<b>1,88</b>

**Figura 8:** Tabla con el número de muestra, edad, litología y densidad de las muestras analizadas.

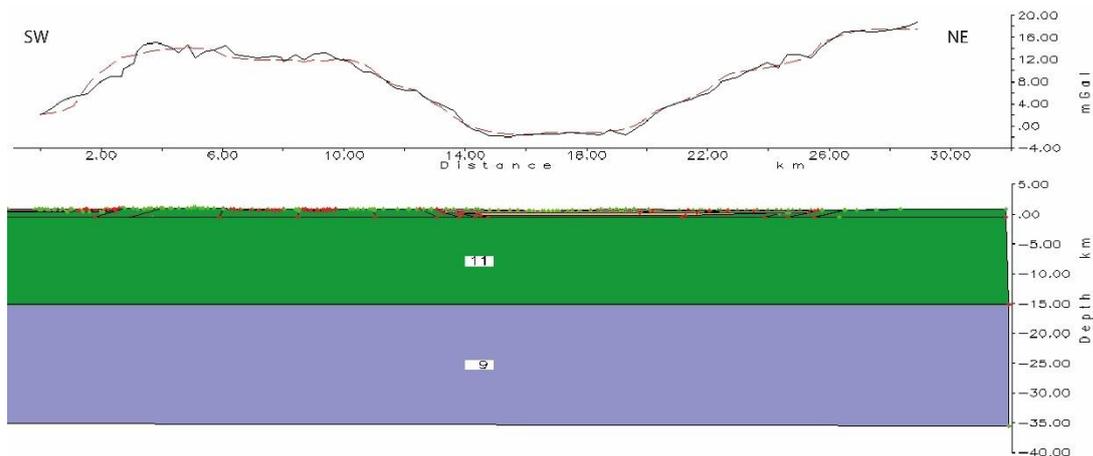
Los materiales que representan un mayor rango de variación en los valores de densidad son los cenozoicos, ya que estos comprenden desde sepiolitas a conglomerados.

Junto a los valores calculados también se han tenido en cuenta los proporcionados por Pueyo et al. (2015) para las unidades no aflorantes o de las que se carece de muestra. Estos autores establecen la densidad de las unidades de la Cordillera Ibérica en base a más de 1500 muestras.

### Modelización gravimétrica

En la curva de la Anomalía de Bouguer observada anteriormente (Figura 6) se distinguen tres zonas bien diferenciadas: (1) la zona SW, donde se produce un aumento de los valores, los cuales se estabilizan formando una meseta, (2) la zona central, donde se produce una disminución de los valores, hasta alcanzar valores mínimos, y (3) la zona NE donde los valores aumentan hasta alcanzar valores máximos. Así teniendo en cuenta los datos de las densidades obtenidas y consultadas, la geometría de la propia anomalía y la geología local, se realiza el modelo gravimétrico de la figura 9.

En la figura 9, podemos observar cómo se dispone el zócalo paleozoico hasta una profundidad de 15 km, con una base plana, que esta en contacto con la parte superior de la corteza inferior, la cual profundiza hasta los 35 km. Ambos cuerpos tienen una geometría plana en base y techo, sin cambios de espesor en los mismos, lo cual implica una base plana para la corteza continental en este sector de la Cordillera Ibérica.



**Figura 9:** Anomalía de Bouguer Observada (negro) y calculada mediante el programa GravMag para el modelo propuesto (rojo discontinuo). Modelo gravimétrico propuesto mostrando hasta la base de la corteza.

Iciar Celaya Adiego

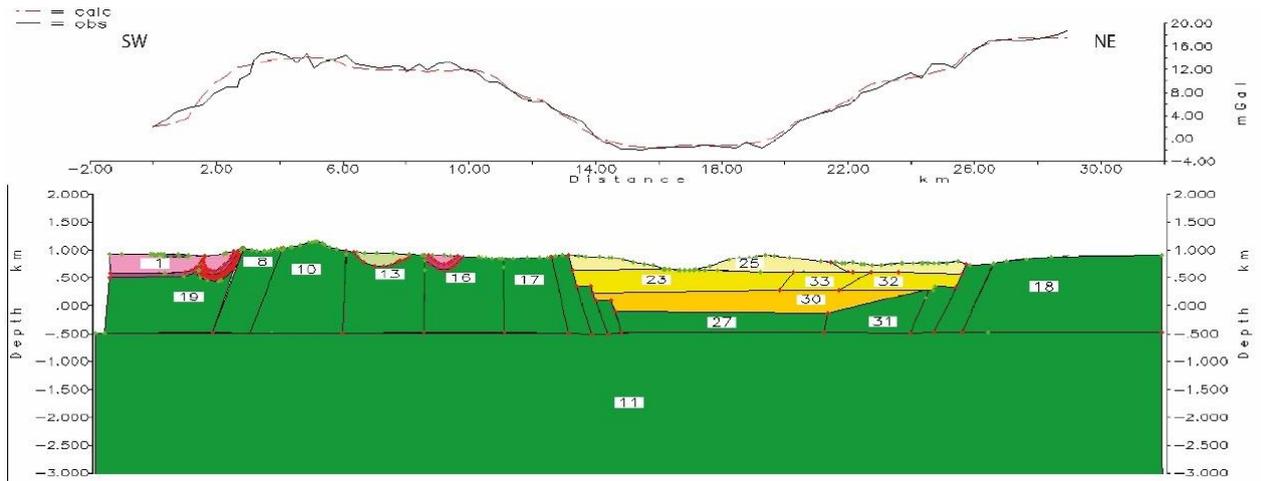


Figura 10: Ampliación de la parte superficial del modelo gravimétrico propuesto.

Polygon Number	In	Fill Style	Density Mg/M**3
BACKG			< 2.670>
1			< 2.500>
2			< 2.650>
3			< 2.650>
4			< 2.670>
5			< 2.500>
6			< 2.650>
7			< 2.500>
8			< 2.750>
9			< 2.700>
10			< 2.750>
11			< 2.677>
12			< 2.670>
13			< 2.670>
14			< 2.600>
15			< 2.500>
16			< 2.690>
17			< 2.550>
18			< 2.820>
19			< 2.400>
20			< 2.500>
21			< 2.600>
22			< 2.670>
23			< 2.000>
24			< 2.600>
25			< 2.550>
26			< 2.550>
27			< 2.450>
28			< 2.750>
29			< 2.700>
30			< 2.550>
31			< 2.600>
32			< 2.600>
33			< 2.300>

Cuando se amplía la parte superior del modelo (Fig. 10), se puede observar con detalle la geometría y espesores de las unidades presentes. En primer lugar, observamos en el SW el afloramiento en superficie de dos estructuras sinclinales formadas por materiales triásicos. Ambos alcanzan una profundidad de unos 500 m desde la superficie. Prosiguiendo con los materiales triásicos, encontramos entre los km 8-10 un sinclinal que alcanza profundidades menores (250 m).

Entre los 6 y 8 km cabe destacar la presencia de la fosa de Munébrega que esta rellena por materiales neógenos, y que presenta un espesor de unos 200 m, y una geometría sinclinal suave en su base.

Cabe destacar en el modelo que los materiales paleozoicos presentes a partir de la profundidad de -500 m se han unificado en un único polígono, ya que se considera que a partir de esa profundidad la densidad de los materiales se ve homogeneizada.

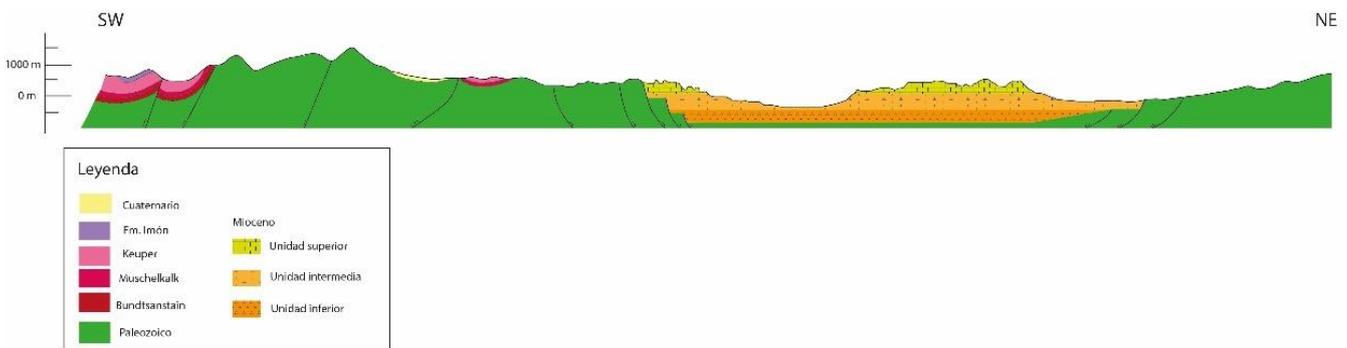
Figura 11: Leyenda de densidades de Figura 10

Estos materiales paleozoicos están afectados por una serie de fallas normales de dirección NW-SE.

Entre los 12-14 km se hace más patente la presencia de estas fallas en los materiales paleozoicos, ya que presentan saltos, mas importantes, que dan paso a la presencia de los materiales miocenos de la Cuenca de Calatayud.

Los materiales de la cuenca de Calatayud presentan un espesor total de unos 900 m de acuerdo con la modelización gravimétrica, el cual puede variar a lo largo de la cuenca. En la modelización se han respetado las unidades diferenciadas por Sanz-Rubio (1999). La unidad superior tiene un espesor de unos 300 m y esta subdividida en tres unidades con distintas densidades, basadas en cambios laterales de facies dentro de la misma unidad. En la unidad intermedia, al igual que en la superior, se subdivide en tres unidades con densidades distintas. En total esta unidad tiene un espesor de unos 350 m. Por último, la unidad inferior está compuesta únicamente por un cuerpo que ocupa toda la base de la cuenca, con unos 400 m de espesor.

A partir del modelo gravimétrico, de la cartografía geológica y los datos de campo, se ha realizado un corte geológico (Fig. 12) (Anexo 1).



**Figura 12:** Modelo geológico propuesto, con escala vertical y horizontal iguales.

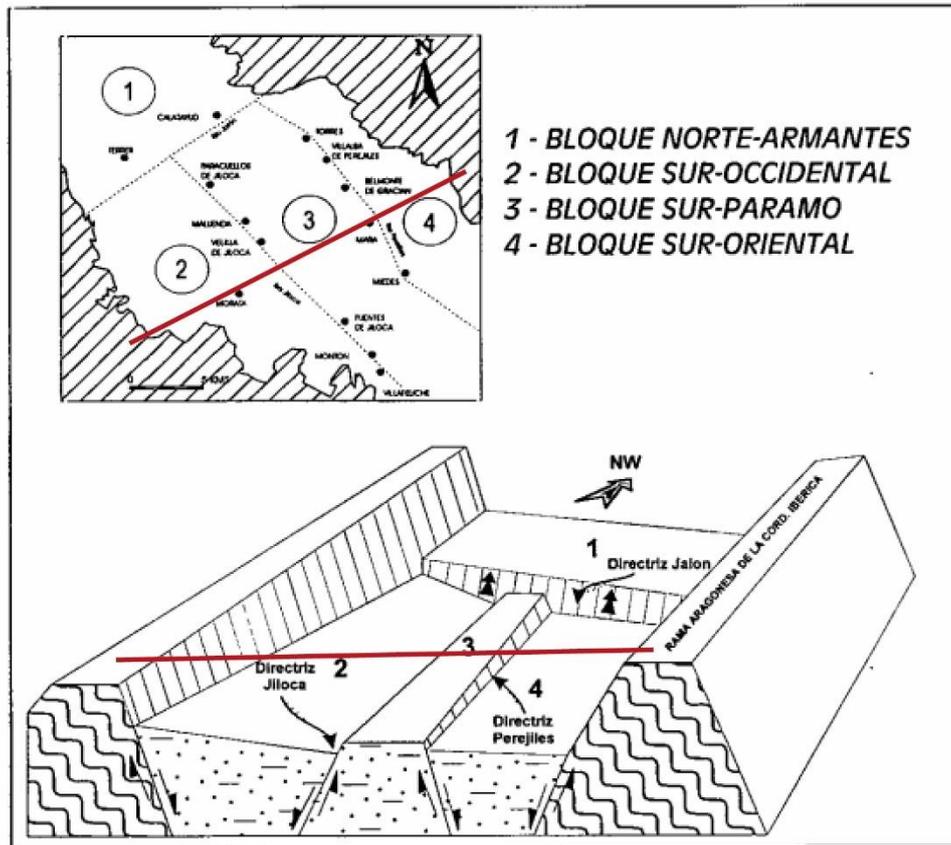
## 7. Discusión de resultados

Según Del Olmo et al (1983) de la creación de la cuenca de Calatayud como de otras cuencas cenozoicas, es responsable una etapa tectónica sucedida entre el Mioceno inferior más alto y el Mioceno medio, en las que aparecen fallas con un gran salto y dirección NW-SE. Esto podría explicar el modelo propuesto, el cual se trata de una serie de fallas normales en ambos bordes de la cuenca que condicionan el depósito de los materiales, es decir los materiales serian coetáneos a las fallas responsables de la creación de la propia cuenca.

Con respecto a la geometría de ambos bordes, estas difieren. En el borde sur encontramos una serie de fallas normales que están formando un semi graben, que dan paso a las unidades de la cuenca de Calatayud. En cambio, en el borde norte el cambio de facies es más gradual, ya que en la parte inferior de la cuenca encontramos una geometría con una suave pendiente que da paso a unas fallas normales similares a las del borde sur.

En relación a la geometría de la propia cuenca Rubio E. (1999) propone un modelo en el que esta se encuentra compartimentada en cuatro bloques tectónicos fundamentales en función de tres lineaciones tectónicas en materiales neógenos, que actualmente coinciden con el curso de los ríos Perejiles, Jiloca y Jalón, y de las fracturas que delimitan el relleno neógeno y los bordes de cuenca actuales (Figura 13):

- (1) Bloque Norte-Armantes: integrado por el sector que queda al Norte del Río Jalón. Comprende todo el macizo de la Sierra de Armantes, incluyendo tanto materiales evaporíticos de la Unidad Inferior como materiales de la Unidad Intermedia.
- (2) Bloque Sur-Occidental: queda al Sur del Río Jalón, desde el cauce, del Río Jiloca hasta el margen occidental de la cuenca. Comprende materiales de Unidad Inferior e Intermedia. Este bloque se encuentra basculado hacia el Este. Los materiales adyacentes al borde paleozoico presentan un buzamiento pronunciado, que rápidamente se atenúa hacia el valle fluvial del Jiloca. Esta particularidad es originada por el juego de la falla existente en el valle fluvial del Jiloca.
- (3) Bloque Sur-Páramo: situado al Sur del Río Jalón, forma el interfluvio entre los ríos Jiloca y Perejiles, donde se encuentran los mejores afloramientos de la cuenca, siendo el área de mejor representación de la Unidad Superior. Los materiales se caracterizan generalmente por su horizontalidad, exceptuando los sectores colindantes con los cursos fluviales del Jiloca y Perejiles, que sufren procesos de deslizamiento rotacional, colapso y caída de bloques.
- (4) Bloque Sur-Oriental: se sitúa al Sur del Río Jalón, desde el Río Perejiles hasta el margen oriental de la cuenca. Presenta un basculamiento generalizado hacia el Este, donde los materiales terciarios y paleozoicos se presentan en relación de contacto mecánico-falla normal en gran parte de este margen, a menudo solapados por unidades detríticas pliocenas o postpliocenas.



**Figura 13:** Distribución de los cuatro grandes bloques tectónicos de la Cuenca delimitados por las directrices tectónicas de los ríos Jalón, Jiloca y Perejiles. En rojo se marca el perfil de la zona de estudio. Modificado de Rubio (1999).

Cabe destacar que en el modelo expuesto por Rubio (1999) contempla que la base de la cuenca se ve compartimentada por una serie de fallas normales formando un horst y dos grabens. En cambio, en el modelo gravimétrico obtenido en este trabajo no se aprecia la presencia de esta serie de fallas, lo que se observa es un fondo de la cuenca completamente plano.

De este modo los resultados obtenidos en este trabajo complementan en gran medida a los expuestos en Rubio (1999), ya que se aporta información sobre los espesores de las unidades que conforman la cuenca, así como de la geometría de los bordes de la cuenca que se encuentran cubiertos y no se puede apreciar en afloramiento ese contacto entre Paleozoico y Cenozoico. También cabe destacar, la información sobre la geometría de la base de la cuenca y de la corteza inferior, que en la Cuenca de Calatayud encontramos este contacto totalmente plano.

## 8. Conclusiones

Al relacionar la información obtenida de la modelización con la geología, se ha buscado la geometría y densidad de los cuerpos que generan la anomalía de Bouguer. Posteriormente al procedimiento que conlleva la realización de un perfil gravimétrico, y considerando los resultados obtenidos, se han llegado a las siguientes conclusiones:

- (1) Los valores mínimos que encontramos en la Anomalía de Bouguer se corresponden con la Cuenca de Calatayud. Con una diferencia de 16 mGal entre el valor máximo y el mínimo.
- (2) Los datos gravimétricos encajan con un espesor constante de la corteza en el corte realizado.
- (3) La geometría de la cuenca se ve condicionada por la presencia de fallas normales de dirección NW-SE.
- (4) El espesor total de los materiales cenozoicos sería unos 1000 m en su parte central.

By relating the information obtained from modeling to geology, the geometry and density of the bodies that generate the Bouguer anomaly have been inferred. After the procedure that involves carrying out a gravimetric profile, and considering the results obtained, the following conclusions have been reached:

- (1) The minimum values that we found in the Bouguer Anomaly correspond to the Calatayud Basin. With a difference of 16 mgal between the maximum and minimum value.
- (2) The gravimetric data fit with a constant thickness of the crust in the cross-section made.
- (3) The geometry of the basin is conditioned by the presence of normal faults trending NW-SE.
- (4) The total thickness of the Cenozoic materials interpreted to be about 1000 m in its central part.

## 9. Bibliografía

Álvarez, M.A., Calvo, J.P., Morales, J., Alonso-Zarza, A., Azanza, B., García, I., Hernández, M., van der Meulen, A.J., Peláez-Campomanes, P., Quiralte, V., Salesa, M.J., Sánchez, I.M. y Soria, D. (2003): El tránsito Aragoniense-Vallesiense en el área de Daroca-Nombrevilla (Zaragoza, España). *Coloquios de Paleontología*, 1, 25-33p.

Capote, R. y González-Londeiro, F. (1983). La estructura herciniana en los afloramientos paleozoicos de la Cordillera Ibérica. Libro Jubilar de J. M. Ríos, 1: 513-529.

Del Olmo, P., Olivé, A., Portero, J.M. (1983): Mapa geológico y Memoria de la Hoja nº 438 (Paniza). Mapa Geológico de España E. 1:50.000, Segunda serie (MAGNA), Primera edición, IGME, Madrid. 80p.

Fontboté, J. M. (1954). Tectónica comparada de las depresiones del Vallés-penedés y de Calatayud-Teruel. *Curs. y Conf. Inst "Lucas Mallada"*, 3:123-130.

Gutiérrez Santolalla, F. (1994). Geomorfología de la región de Calatayud. Tesis de Licenciatura, Univ. Zaragoza. 302 p

Mussett, A. E., Khan, M., A. (2000): *Looking into the Earth, An Introduction to Geological Geophysics*. Cambridge University Press, Estados Unidos, 492 p.

Ortí, F. y Rosell, L. (1998): Unidades evaporíticas de la Cuenca de Calatayud (Mioceno inferior-medio, Zaragoza). *Geogaceta*, 23, 111-1.

Pueyo, E. L., Izquierdo-Llavall, E., Rodríguez-Pintó, A., Rey-Moral, C., Oliva-Urcia, B., Sáinz, A. M. C., Calvín, P., Ayala, C., Ramajo, J., Del Río, P., Rubio, F., & García-Lobón, J. (2015). Petrophysical properties in the Iberian range and surrounding areas (NE Spain): 1-density. *Journal of Maps*, 12(5), 836-844.

Rubio, E. (1999). Análisis de los sistemas deposicionales carbonáticos y evaporíticos del neógeno de la cuenca de Calatayud (provincia de Zaragoza). 739p.

Sanz-Rubio, E., Sanchez-Moral, S., Cañaveras, J. C., Abdul-Aziz, H., Sorando, J. P. C., Cuezva, S., Pérez, A. V. M., Rouchy, J. M., Benito, C. S., & Van Dam, J. (2003). Síntesis de la cronoestratigrafía y evolución sedimentaria de los sistemas lacustres evaporíticos y carbonatados neógenos de la cuenca de Calatayud-Montalbán. *Estudios Geologicos-madrid*, 59(1-4).

Simón, J.L. (1990): Algunas reflexiones sobre los modelos tectónicos aplicados a la Cordillera Ibérica. *Geogaceta*, 8, 123-130.

Simón, J.L. (1984). Compresión y distensión alpinas en la Cadena Ibérica Oriental. *Inst. Estud. Turolenses*. 21-31.

Solé Sabaris, L. (1978). La Meseta. En "Geografía de España", De Terán, M. <Ed.>. Ariel, Madrid. PP 42-62.

Tena, J. M., Mandado, J. y Gisbert, J. (1979). Síntesis geológica de la Cuenca terciaria de Calatayud. Informe para el Instituto de Estudios Nucleares. 74 pp

Vera, J.A., (ed), 2004. Geología de España. Sociedad Geológica de España, Instituto Geológico y Minero de España. 884p

## 10. Anexos

### Anexo 1: Modelo geológico propuesto

