

# Utilización de métodos geofísicos en la caracterización petrofísica de rocas detríticas



**Diego Pérez Millán**

**Directoras: Ana Rosa Soria De Miguel y Teresa Román Berdiel**

## ÍNDICE

1. ABSTRACT .....	1
2. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	1
3. SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y MARCO GEOLÓGICO .....	2
4. METODOLOGÍA .....	3
4.1. Revisión bibliográfica .....	3
4.2. Trabajo de campo .....	3
4.3. Trabajo de laboratorio .....	4
4.3.1. Petrografía y petrofísica .....	4
4.3.2. Medida de la ASM.....	4
4.4. Trabajo de gabinete .....	5
5. ESTRATIGRAFÍA Y SEDIMENTOLOGÍA .....	6
5.1. Estratigrafía .....	6
5.2. Sedimentología.....	8
6. RESULTADOS .....	13
6.1. Petrofísica y petrografía .....	13
6.2. ASM y curvas termomagnéticas.....	16
7. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	18
8. CONCLUSIONS .....	20
9. BIBLIOGRAFÍA.....	21

## 1. ABSTRACT

The Triassic Buntsandstein facies in the south-eastern sector of the Iberian Chain is considered to be one of the detritic facies with potential to be a geological reservoir. From the sedimentary characterization and from the identification of microfacies with petrographic microscope, along with petrophysical data, it has been possible to identify the sandsheet association of facies as favourable for the geological reservoir. These positive results are associated to sandstones that show medium size, moderate to well selected with almost no matrix, and they present hematite pelicular cementation. Moreover, from the representation of the AMS data versus porosity and permeability according to height of the column, no correlation between them has been proved. This is because the porosity and permeability depend on the type of hematite cementation. This cementation does not control the anisotropy of magnetic susceptibility; on the contrary it is controlled by the amount and type of magnetic mineralogy.

## 2. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Las series silicicísticas son unas de las unidades estratigráficas más favorables como potencial almacén geológico de CO<sub>2</sub>, sobre todo en relación a sistemas fluviales, eólicos (el caso que abarca este trabajo) y transicionales. En España las tres unidades detriticas consideradas como potenciales unidades almacén son las facies Buntsandstein, Weald y Utrillas y dentro de la Cordillera Ibérica y Cuenca del Ebro, la unidad detritica más considerada a este respecto son las facies Buntsandstein.

Por ello, este trabajo se centra en el Triásico Inferior (en facies Buntsandstein) que en la Cadena Ibérica ha sido estudiado desde los años 1970 por diferentes autores: Garrido y Villena, 1977; Sopeña *et al.*, 1983, 1988, 1989; Arribas, 1985; Pérez-Arlucea y Sopeña, 1985; Rey y Ramos, 1991; López-Gómez y Arche, 1993, 1995; Ezquerra *et al.*, 1995; Arche y López-Gómez, 1999, 2005; López-Gómez *et al.*, 2002, 2005, 2010; Arche *et al.*, 2004; Sánchez-Moyá y Sopeña, 2004; Diez *et al.*, 2005; Dinarès-Turell *et al.*, 2005; Bourquin *et al.*, 2007; entre otros.

Las facies Buntsandstein, en un principio, fueron interpretadas como areniscas en el contexto de sistemas aluviales que evolucionaron en las cuencas del Rift Ibérico intracratónico relacionado con la fragmentación de Pangea. Sin embargo, según Soria *et al.* (2011) existen acumulaciones eólicas sustanciales (sobre un área de al menos 40 km<sup>2</sup>) en las facies Buntsandstein de la rama Aragonesa SE de la Cadena Ibérica. Este sistema triásico de dunas desértico corrobora los modelos paleoclimatológicos del Triásico Inferior de condiciones áridas extremas (principalmente Olenkiense) en el oeste de Europa (Péron *et al.*, 2005; Bourquin *et al.*, 2007). Este sistema desértico había sido predicho con anterioridad por Marzo (1986), puesto que los depósitos de *wadi* que interpretó en las cadenas Catalanas indicaban la posibilidad de sistemas eólicos coetáneos en Iberia.

El presente trabajo trata de profundizar en el conocimiento de las facies Buntsandstein para comprobar su validez como almacén geológico de CO<sub>2</sub>, a partir de los estudios realizados en el perfil de Torre de la Arcas (Cordillera Ibérica). El objetivo principal de este trabajo es determinar la distribución de facies dentro de este perfil y de sus propiedades sedimentarias y petrológicas, correlacionando estos estudios con los datos petrofísicos (porosidad y permeabilidad) obtenidos en este afloramiento, que es un aspecto esencial en la caracterización de almacenes geológicos. Sin embargo, los datos directos de estos estudios a partir de diferentes metodologías (porosímetro de mercurio, permeámetros, aparato triaxial, infiltrómetro) para conocer la inyectabilidad de dichas unidades son caros, lo que limita el número de muestras a estudiar a la hora de abordar los trabajos de

modelización geológica de estas unidades, por lo que el segundo objetivo del trabajo es conocer la validez de la aplicación de técnicas geofísicas, en concreto de la anisotropía de la susceptibilidad magnética, en la caracterización petrofísica de unidades detríticas.

La anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) es una técnica que permite determinar la fábrica de las rocas de una forma rápida en comparación con mediciones microscópicas o macroscópicas de los elementos de la fábrica. Su utilización con estos fines ha sido demostrada a partir del trabajo de Graham (1954) y desde entonces se ha sido utilizando cada vez más en distintos tipos de rocas y aplicaciones geológicas (Parés, 2015 y referencias allí citadas). Un conocimiento preciso de la fábrica magnética de la roca (tipo y grado de desarrollo) es particularmente interesante en rocas porosas que son potenciales reservorios, debido a las posibles relaciones entre dicha fábrica y algunas propiedades físicas como la porosidad y permeabilidad (Bakhtari, 1998). Algunos trabajos recientes apuntan en este sentido, observando que la distribución de la porosidad está controlada por el estilo tectónico de la fábrica magnética (Robion *et al.*, 2012), o bien observando una relación entre el grado de anisotropía de la susceptibilidad magnética y el porcentaje de porosidad (Parés, 2015). Por otro lado, existen trabajos que relacionan la susceptibilidad magnética total ( $K_t$ ) y la ASM de determinadas unidades con el contenido y la distribución de minerales de la arcilla. Dada la influencia de la presencia de arcillas en los parámetros petrofísicos, los resultados se utilizan para relacionar el contenido en determinadas arcillas (calculado a partir de sus propiedades magnéticas) con la porosidad y la permeabilidad (Potter *et al.*, 2004; Ebuefegha y Potter, 2015).

### 3. SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y MARCO GEOLÓGICO

El afloramiento de Buntsandstein estudiado se sitúa 1 km al S de la población de Torre de las Arcas por la carretera TE-1334. Esta localidad está en la comarca de las Cuencas Mineras de la provincia de Teruel, a 130 km al sur de Zaragoza y 86 km al norte de Teruel. El afloramiento estudiado está dentro de la Hoja nº 493 (Oliete) del Mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000 (Almela *et al.*, 1977).

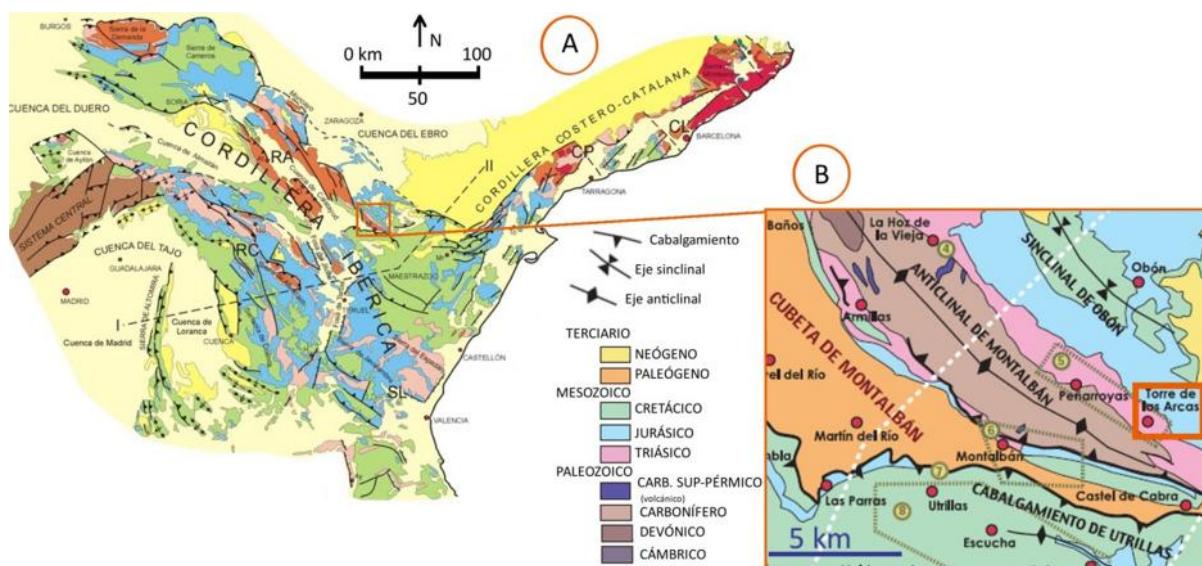


Figura 1. A) Situación geológica dentro de la RA (Rama Aragonesa) de la Cordillera Ibérica (tomado de Sopeña, 2004). B) Situación geológica del Buntsandstein de Torre de Las Arcas donde se ha levantado la columna estratigráfica (tomado de Aurell. y Simón, 2007).

El área de estudio está enmarcada en la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica (Fig. 1A), en el flanco norte del anticlinal de Montalbán (Figura 1B). La Cordillera Ibérica, localizada en el sector

NE de la Península Ibérica, constituye actualmente un relieve positivo originado durante la Orogenia Alpina debido a la inversión tectónica positiva de la Cuenca Ibérica mesozoica (Álvaro *et al.*, 1979). El estilo tectónico del conjunto de la cordillera es de zócalo y cobertura, y una de sus características esenciales es la presencia de dos grandes ciclos orogénicos diferentes: el Ciclo Hercínico, que estructuró los materiales paleozoicos y precámbricos del zócalo, y el Ciclo Alpino que afectó tanto al zócalo como a la cubierta sedimentaria mesozoico-terciaria (Álvaro, 1991). Durante el Mesozoico y el Cenozoico constituyó la zona de mayor concentración de la deformación en el interior de la placa Ibérica (Casas *et al.*, 1997). Según Álvaro (1991) y Salas y Casas (1993) durante el Mesozoico la Cordillera Ibérica experimentó una importante extensión, con dos períodos de *riifting* (Triásico y Jurásico Superior-Cretácico Inferior) y dos períodos de *posrift* (Jurásico Inferior y Medio y Cretácico Superior). Durante los períodos de *riift* se depositaron materiales en ambientes continentales, transicionales y marinos someros, mientras que las etapas de *postriift* estuvieron caracterizadas principalmente por una importante expansión de las plataformas carbonatadas marinas más o menos someras (Casas *et al.*, 1997).

El anticlinal de Montalbán es una estructura compresiva cenozoica, con una orientación NW-SE y afecta al zócalo variscico y a su cobertura mesozoica y cenozoica. Según Casas *et al.* (1997) el núcleo de esta estructura está formado por areniscas y lutitas del Carbonífero y, hacia el flanco norte, afloran materiales del Triásico Inferior y Medio, con pliegues tumbados y cabalgamientos de escaso desplazamiento, mientras que en el flanco sur aparece subvertical o invertido.

Las facies Buntsandstein están caracterizadas por una sedimentación detrítica, muy irregular, ligada al basculamiento de bloques, con formación de umbrales y surcos con importante salto vertical (Sopeña *et al.*, 1989), a consecuencia de una etapa de inestabilidad distensiva del zócalo (Casas *et al.*, 1991). Su potencia es variable debido al dispositivo tectónico que constituye el zócalo paleozoico, y a lo largo del flanco norte del anticlinal de Montalbán, dicha potencia aumenta desde La Hoz de la Vieja (60 m, al NW) hasta Torre de las Arcas (137 m, al SE), siendo todo el conjunto discordante sobre la serie Namuro-Westfaliense, quedando a la altura de Torre de las Arcas en discordancia angular (Almela *et al.*, 1977).

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. Revisión bibliográfica

De forma previa al trabajo de campo se ha buscado bibliografía y recopilado información sobre la geología, estratigrafía y sedimentología de la zona del Anticlinal de Montalbán. También se ha consultado la cartografía MAGNA 1:50.000 de las hojas 493 y 518, y sus respectivas memorias, para conocer la disposición de las unidades estratigráficas, al igual que la cartografía 1:200.000 de la hoja 40.

### 4.2. Trabajo de campo

Esta parte del trabajo incluye el levantamiento de una columna estratigráfica de 86,5 metros desde la base del Buntsandstein. Sobre esta columna se seleccionaron distintos puntos de interés en los que se tomaron 36 muestras cilíndricas orientadas (diámetro de 10 cm y unos 30 cm de longitud) con una perforadora portátil de gasolina refrigerada con agua, a partir de las cuales se extrajeron diferentes fragmentos para la medida de las propiedades petrofísicas, la realización de láminas delgadas y el análisis de ASM. Además se realizaron fotografías de los aspectos más representativos del afloramiento, como las distintas facies reconocidas y las estructuras sedimentarias identificadas.

## 4.3. Trabajo de laboratorio

### 4.3.1. Petrografía y petrofísica

Este apartado ha consistido en el estudio de 36 láminas delgadas orientadas con microscopio petrográfico de luz transmitida, que corresponden a cada una de las muestras tomadas con la perforadora y que han sido preparadas por el Servicio de Preparación de Rocas y Materiales Duros de la Universidad de Zaragoza.

La caracterización petrofísica de las muestras se realizó en el Instituto Petrofísico de Madrid (IPF), a partir de 19 muestras seleccionadas de las diferentes facies arenosas identificadas en campo. Para ello, a partir de los sondeos superficiales realizados en el campo, se toman muestras de 50 mm de altura y 40 mm de diámetro. La porosidad se mide mediante picnómetro de helio en condiciones atmosféricas y temperatura ambiente; a través del desplazamiento del gas dentro de un volumen celular conocido, el volumen de poro se da de acuerdo con los principios de la ley de Boley (IPF, 2012). La permeabilidad se midió a través de un permeámetro de gas en condiciones de estado estacionario; la permeabilidad al gas se calcula de acuerdo con la ley de Darcy y se corrige a su permeabilidad líquida equivalente por el factor de corrección de Klikenberg (IPF, 2012).

### 4.3.2. Medida de la ASM

La Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (ASM) es la variación espacial de la susceptibilidad magnética ( $K$ ) determinada a partir de la aplicación de un campo de baja intensidad en distintas orientaciones. Esta propiedad puede variar según el tipo de fases minerales presentes y su comportamiento magnético (ferromagnéticas, paramagnéticas y diamagnéticas), su distribución espacial y su concentración (Pueyo, 2012).

La susceptibilidad magnética ( $K$ ) es un tensor de 2º orden, que se representa por un elipsoide, así midiendo el campo inducido ( $M$ ) en varias direcciones, se obtienen los tres vectores que corresponden a los tres ejes del elipsoide de la susceptibilidad magnética: máximo ( $K_1$ ), intermedio ( $K_2$ ) y mínimo ( $K_3$ ) (Aranguren, 1994, Fig. 2). Para esto se utiliza la ecuación  $M=K\cdot H$ , siendo  $K$  adimensional.

Los tres ejes del elipsoide definen la fábrica magnética, que está caracterizada por la lineación magnética ( $K_1$ ) y por la foliación magnética (plano perpendicular a  $K_3$ ). Las relaciones entre estos ejes proporcionan los denominados parámetros escalares de la ASM, que se definen como (1) grado de anisotropía corregido  $P'$ , que da la intensidad de la orientación preferente de los minerales, (2) parámetro de forma  $T$ , que varía entre  $-1 < T < 0$  (elipsoides proláticos) y  $0 < T < +1$  (elipsoides oblatos), y (3) susceptibilidad media  $K_m$  representativa de una muestra (Jelinek, 1981):

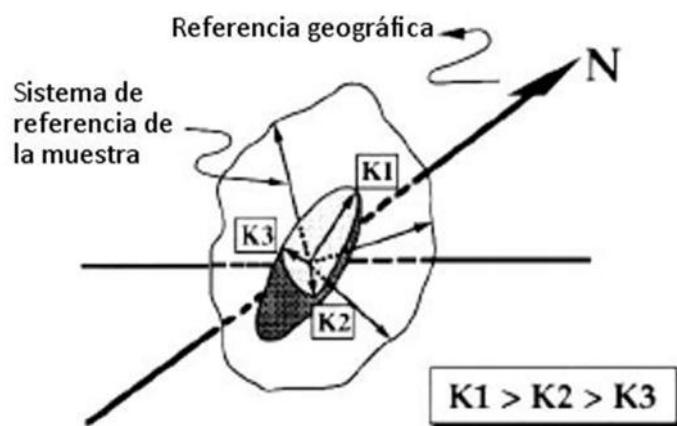


Figura 2. Elipsoide de la anisotropía de la susceptibilidad magnética (tomado de Aranguren, 1994).

Grado de anisotropía corregida:

$$P' = \exp \sqrt{2[(\mu_1 - \mu)^2 + (\mu_2 - \mu)^2 + (\mu_3 - \mu)^2]}$$

$$\text{Siendo } \mu_1 = \log k_1 \quad \mu_2 = \log k_2 \quad \mu_3 = \log k_3 \quad \mu = \frac{\mu_1 + \mu_2 + \mu_3}{3}$$

$$\text{Parámetro de forma: } T = \frac{2 \cdot \mu_2 - \mu_1 - \mu_3}{\mu_1 - \mu_3}$$

$$\text{Susceptibilidad media: } K_m = \frac{K_1 + K_2 + K_3}{3}$$

Numerosos estudios han demostrado que existe un perfecto paralelismo entre la orientación de la fábrica magnética y los elementos estructurales observables en las rocas (Hrouda, 1982; Borradaile, 1988). El término fábrica magnética “sedimentaria” se refiere a la disposición que adquieren los minerales en el momento de su depósito, y viene caracterizada por una disposición de la foliación magnética paralela a la estratificación en la que los ejes mayor e intermedio del elipsoide de susceptibilidad ( $K_1$  y  $K_2$ ) muestran una distribución aleatoria o sin una orientación preferente en este plano. Mientras que el término de fábrica tectónica se asigna a los casos de foliación magnética paralela al plano de aplastamiento tectónico (Pueyo, 2012). En rocas sedimentarias sometidas a acortamiento horizontal, la fábrica sedimentaria inicial es progresivamente borrada y reemplazada por una fábrica tectónica (Ramsay y Huber, 1983).

En este trabajo se han analizado mediante ASM un total de 114 muestras estándar (cubos de 2,1 cm de lado) obtenidas a partir de 19 (aquellas de las que se dispone de datos de porosidad y permeabilidad) de las 36 muestras cilíndricas orientadas. De manera que cada una de las 19 estaciones de ASM viene definida por la medida de 6 especímenes estándar.

Las medidas de ASM se han llevado a cabo en un susceptómetro KLY-3S Kappabridge (AGICO, República Checa), que es un puente de bajo campo magnético que trabaja con 300 A/m y 875 Hz con una rutina de medida a lo largo de 3 ejes ortogonales y medida a intervalos de 6° (180 posiciones).

Puesto que la susceptibilidad magnética de una roca varía según la mineralogía portadora (diamagnética, paramagnética y ferromagnética), es necesario realizar curvas de variación de la susceptibilidad magnética con la temperatura, que nos permiten su caracterización.

Se han realizado 7 curvas termomagnéticas en muestras seleccionadas a lo largo del perfil de manera homogénea. Para realizar las curvas termomagnéticas una pequeña parte de las muestras ha sido molida hasta obtener un polvo fino. Las medidas se realizan con un horno CS-3 que trabaja acoplado al KLY-3S. Las curvas se han hecho para un rango de temperatura entre 40 y 700°C, con una velocidad de calentamiento de 13°/minuto, y en atmósfera de argón. Estos dos aparatos están disponibles en el laboratorio de fábricas magnéticas del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Zaragoza.

#### 4.4. Trabajo de gabinete

Este apartado incluye el tratamiento de los valores obtenidos de ASM utilizando la estadística de Jelinek (Jelinek, 1978) mediante el programa Anisoft 4.2. (Chadima and Jelinek, 2009), mientras que el programa Cureval 8.0 (Chadima and Hrouda, 2009) ha servido para procesar los datos de las

curvas termomagnéticas de variación de la susceptibilidad con la temperatura, que han sido corregidos para el horno vacío.

Este apartado también incluye el trabajo de digitalización de la columna estratigráfica con el programa GIMP 2.8, así como el estudio de láminas delgadas y muestras, la descripción e interpretación de facies y asociaciones de facies y la elaboración de gráficos y redacción de la memoria.

## 5. ESTRATIGRAFÍA Y SEDIMENTOLOGÍA

### 5.1. Estratigrafía

En general, las facies Buntsandstein en el flanco norte del Anticlinal de Montalbán muestran tres grandes conjuntos litológicos: uno inferior conglomerático, uno intermedio arenoso y otro superior lutítico arenoso, que pasa gradualmente a la barra M1 de las facies Muschelkalk. El estudio realizado en este trabajo se centra únicamente en el tramo intermedio arenoso de estas facies puesto que *a priori* son las que mayores posibilidades tienen para el almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>.

Al sur de Torre de las Arcas se ha realizado una columna estratigráfica (Figura 3) de 86,5 m de espesor en la que se diferencian cuatro grandes tramos que contienen una mayor parte de areniscas rojas, y en menor medida conglomerados rojos. A continuación se enumeran y describen estos tramos de base a techo de la columna.

El tramo 1 son 36 m constituidos a base por 5,5 m de conglomerados rojos granosostenidos, formados por clastos cuarcíticos y arenosos con un centílo de 15 cm. Se disponen en cuerpos lenticulares de base canaliforme de hasta 50 cm de potencia. Internamente los cuerpos muestran evolución vertical granocreciente y un *set* lenticular de estratificación cruzada en surco de 17 cm de potencia. El resto del tramo son areniscas rojas en estratos tabulares y ocasionalmente lenticulares, mayormente de grano medio-grueso en las que domina la estratificación cruzada en *sets* de 20 a 50 cm de potencia, también contienen *ripples* asimétricos, laminación paralela y, de forma más puntual, estratificación cruzada planar, cantos dispersos y *ripples* simétricos.

El tramo 2 corresponde a 9,5 m de areniscas que varían en su tramo inferior de grano fino-medio a medio en su tramo superior. Se presentan en estratos tabulares de entre 15 y 70 cm de potencia. Este tramo muestra una alternancia de niveles con estratificación cruzada tanto planar como en surco en *sets* de 10 a 45 cm de potencia y niveles laminados, los cuales contienen laminación paralela y niveles de *ripples* asimétricos.

El tramo 3 son 13,5 m de areniscas que varían de grano grueso-medio en su parte inferior a grano fino-medio en su parte superior. Se presentan en estratos tabulares de entre 15 y 40 cm de potencia. Incluyen *sets* con estratificación cruzada en surco de hasta 80 cm de espesor. Estos *sets* intercalan *sets* de cruzada planar de hasta 20 cm de espesor y niveles con laminación paralela y *ripples* asimétricos.

El tramo 4 corresponde a 27,2 m de areniscas tableadas de grano fino-medio a medio. Los estratos son tabulares y presentan de forma mayoritaria laminación paralela. A lo largo del tramo las facies laminadas intercalan *sets* de estratificación cruzada planar y en surco que varían de 15 a 40 cm de potencia. También se identifican niveles de *ripples* asimétricos, de interferencia y algún interestrato lutítico.

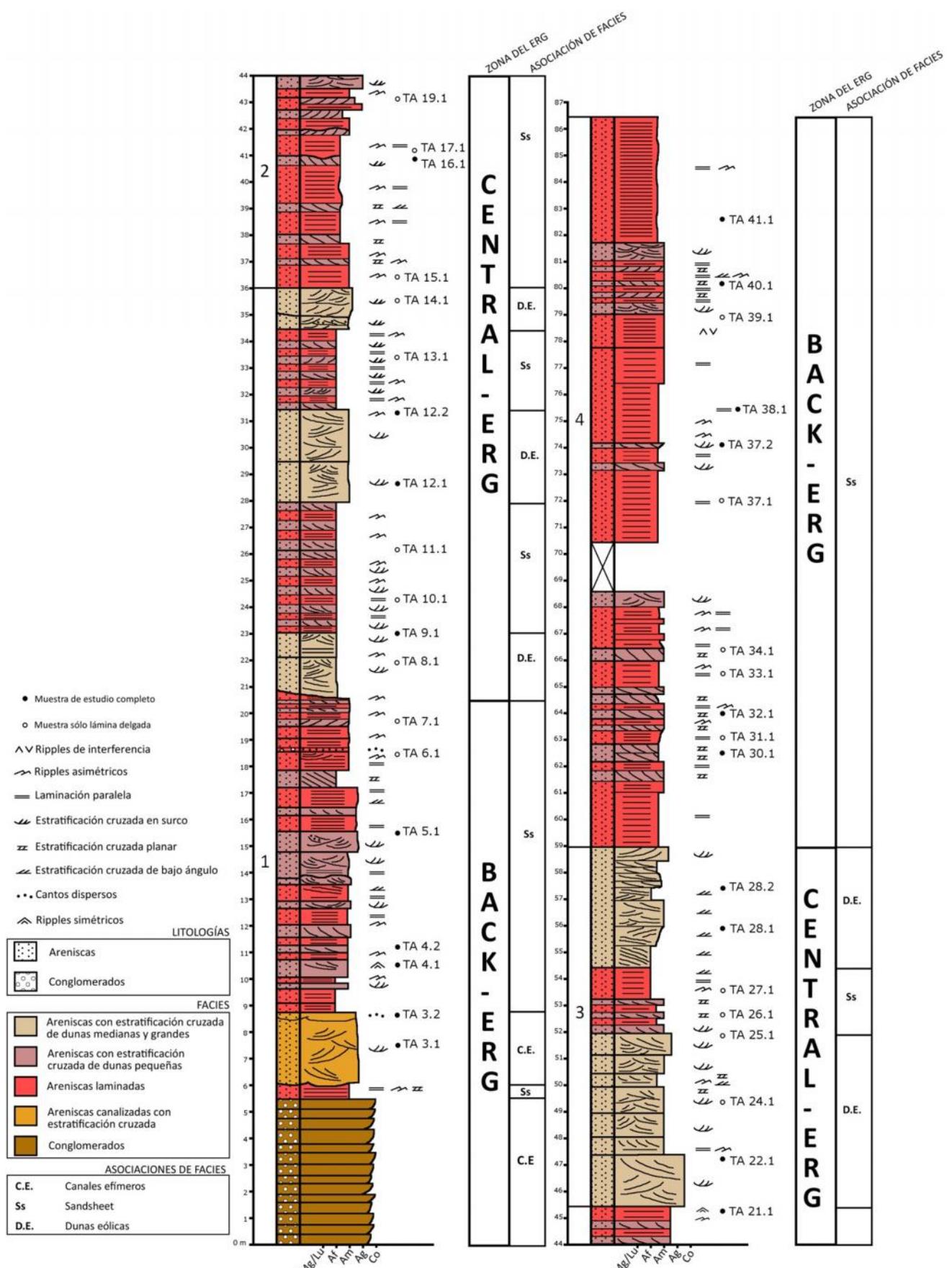


Figura 3. Perfil estratigráfico de detalle levantado al sur de Torre de las Arcas diferenciando las facies, asociaciones de facies y situación dentro del erg (ver situación en Figura 1).

## 5.2. Sedimentología

A partir de la columna estratigráfica realizada se han identificado en campo cinco facies, una conglomerática y cuatro arenosas, cuyas características más importantes se recogen en la tabla 1.

Facies	Descripción	Localización en el erg
Conglomerados (Co)	Conglomerados rojizos mayoritariamente granosostenidos en estratos lenticulares. Son depósitos heterométricos, con cantos angulosos-subangulosos, cuarcíticos y arenosos con matriz arenosa de grano grueso. Evolución granocreciente y estratificación cruzada en surco.	Back-erg
Areniscas canalizadas con estratificación cruzada (Ac)	Areniscas beis de grano grueso en estratos lenticulares de base canaliforme. Presentan sets de estratificación cruzada en surco de hasta 50 cm, laminación paralela y cantos dispersos.	Back-erg
Areniscas laminadas (Al)	Areniscas rojas de grano a medio-fino muy bien seleccionadas, en cuerpos tabulares de potencia centimétrica (15 y 70 cm), aunque ocasionalmente se identifica algún cuerpo de hasta 1 m de potencia. Dominan la laminación paralela de gran continuidad lateral y superficies de <i>ripples</i> asimétricos. También se reconocen estratificación cruzada planar y ocasionalmente en surco, en sets de entre 15 y 40 cm de espesor. En las facies arenosas con granulometrías medianas-finas se desarrollan superficies de <i>ripples</i> asimétricos y de oscilación.	Back-erg y central-erg
Areniscas con estratificación cruzada de dunas pequeñas (Ad)	Areniscas rojas de grano medio-grueso a medio muy bien seleccionadas dispuestas en estratos tabulares, de base y techo plano, con potencias decimétricas a métricas. En esta facies domina la estratificación cruzada planar (en sets de hasta 60 cm de potencia) y la estratificación cruzada en surco (en sets de hasta 30 cm de potencia). Intercalan niveles cm-dm con laminación paralela asociada a niveles de <i>ripples</i> simétricos y asimétricos.	Central-erg y back-erg intercaladas
Areniscas con estratificación cruzada de dunas medianas y grandes (AD)	Areniscas rojas de grano medio-grueso a medio muy bien seleccionadas dispuestas en estratos tabulares, de base y techo plano, con potencias decimétricas a métricas. En esta facies domina la estratificación cruzada planar (en grandes sets de hasta 30 cm de potencia) y la estratificación cruzada en surco (en sets de hasta 80 cm de potencia). Intercalan niveles cm-dm con laminación paralela asociada a niveles de <i>ripples</i> simétricos y asimétricos.	Central-erg

Tabla 1. Descripción de facies identificadas en la columna de Torre de las Arcas.

La organización vertical de estas facies ha permitido identificar tres asociaciones de facies: canales efímeros, *sandsheets* y dunas eólicas.

### Asociaciones de facies de canales efímeros

Dentro de esta asociación se han identificado 2 facies diferentes:

- Facies de conglomerados (Co): Se trata de conglomerados, mayoritariamente granosostenidos que se organizan en estratos lenticulares de bases y techos planos e irregulares de hasta 50 cm de potencia (Figuras 4a, 4b y 4c). Constituyen depósitos muy heterométricos, con cantos de angulosos a subangulosos y de naturaleza esencialmente cuarcítica y arenosos con un centílo de 15 cm. La matriz es arenosa de grano grueso. Internamente los cuerpos muestran cierta

evolución vertical granocreciente y presentan estratificación cruzada en surco en un *set* de 17 cm de potencia.

- Facies arenosas (Ac): Corresponden a areniscas beis de grano grueso que se organizan en un cuerpo lenticular de base claramente canaliforme, constituido por estratos lenticulares de bases canaliformes (Figuras 4d, 4f y 4g). Las areniscas presentan *sets* de estratificación cruzada en surco de hasta 50 cm de potencia y laminación paralela, así como cantos dispersos (Figura 4e).

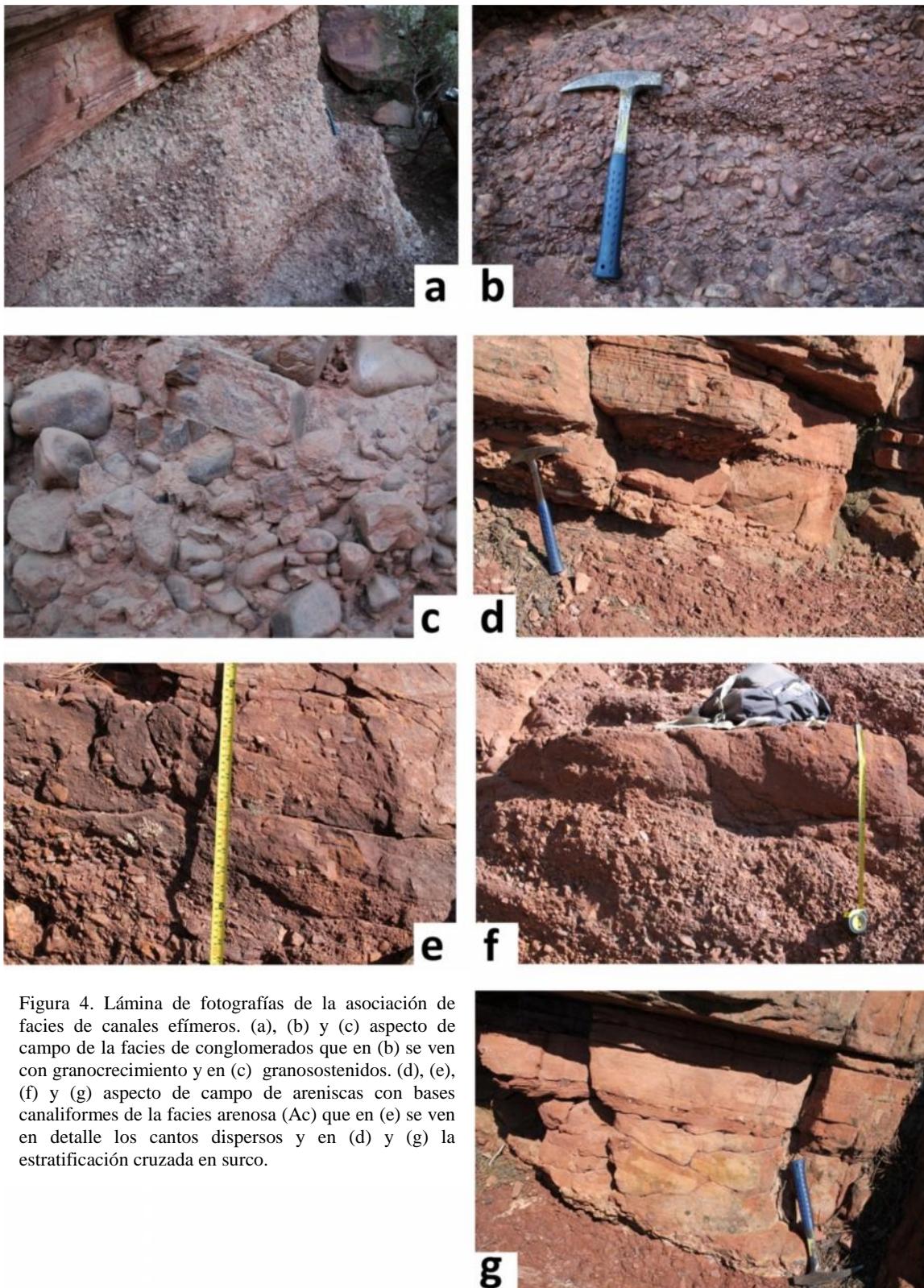


Figura 4. Lámina de fotografías de la asociación de facies de canales efímeros. (a), (b) y (c) aspecto de campo de la facies de conglomerados que en (b) se ven con granocrecimiento y en (c) granosostenidos. (d), (e), (f) y (g) aspecto de campo de areniscas con bases canaliformes de la facies arenosa (Ac) que en (e) se ven en detalle los cantos dispersos y en (d) y (g) la estratificación cruzada en surco.

## Interpretación

El desarrollo de cuerpos tabulares de conglomerados de poco espesor y bases irregulares aunque bastantes planas, junto con las características texturales de dichos conglomerados (Facies Co, texturas granosostenidas, depósitos muy heterométricos con granulometrías muy variables) y la escasa presencia de estructuras sedimentarias (únicamente estratificación cruzada en surco en las facies arenosas más gruesas), nos lleva a interpretar este depósito como resultado de la sedimentación a partir de flujos no confinados de canales efímeros (Glerinie, 1970, Marzo 1986, Veiga y Spalletti, 2007) generados por corrientes de agua torrenciales.

En ocasiones estos flujos (fluvial efímero) pueden incidir y generar canales de escaso desarrollo lateral (Facies Ac) y depósitos granodecrescentes resultado de la disminución de la corriente, lo que favorece la presencia de *megaripples* de cresta sinuosa cuya migración genera *sets* de estratificación cruzada en surco.

## Asociaciones de facies de *sandsheet*

Esta asociación corresponde a areniscas de grano medio-grueso a medio-fino muy bien seleccionadas, dispuestas en cuerpos tabulares de potencia centimétrica (15 y 70 cm de espesor), aunque ocasionalmente se identifica algún cuerpo de hasta 1m de potencia (Figura 5a). En esta facies domina la laminación paralela de gran continuidad lateral, así como superficies de *ripples* asimétricos (Figura 5b) (facies Al). Otras estructuras que se reconocen son estratificación cruzada planar (Figura 5c) y ocasionalmente en surco (Figura 5d), en *sets* de entre 15 y 40 cm de espesor (facies Ad). En las facies arenosas con granulometrías medias-finas se desarrollan también superficies de *ripples* de oscilación asimétricos (Figuras 5e y 5f).

## Interpretación

Las arenas bien seleccionadas de la facies Al muestran una laminación paralela muy continua lateralmente que se ha interpretado como consecuencia de la migración de *ripples* eólicos (Hunter, 1977; Kocured y Dott, 1981; Hadlari *et al.*, 2006). Su organización en cuerpos tabulares de bases y techos planos ha llevado a interpretar esta asociación como correspondiente a *sandsheet* eólicos. La gran continuidad lateral de la laminación eólica indica transporte bajo condiciones de energía bastantes constantes, lo que también ha sido descrito como *sandsheets* (Fryberger *et al.*, 1983; Veiga *et al.*, 2002; Radies *et al.*, 2004; Scherer *et al.*, 2007). La presencia de *sets* de estratificación cruzada planar y ocasionalmente en surco de espesores decimétricos se ha interpretado como consecuencia de la migración de pequeñas dunas.

## Asociación de facies de dunas eólicas

Corresponde a areniscas rojas de grano medio-grueso a medio bien seleccionadas dispuestas en estratos tabulares, de base y techo plano, con potencias decimétricas a métricas. En esta facies domina la estratificación cruzada planar (en *sets* de hasta 30 cm de potencia) (Figura 6a) y la estratificación cruzada en surco (en *sets* de hasta 80 cm de potencia) (Figuras 6b y 6c), que pueden llegar a conformar cosets de estratificación cruzada de hasta 2 m de potencia (facies AD y Ad). Estos *sets* intercalan niveles centimétricos a decimétricos con laminación paralela (Figura 6c) que normalmente está asociada a niveles de *ripples* simétricos y asimétricos (Figura 6d) (facies Al).

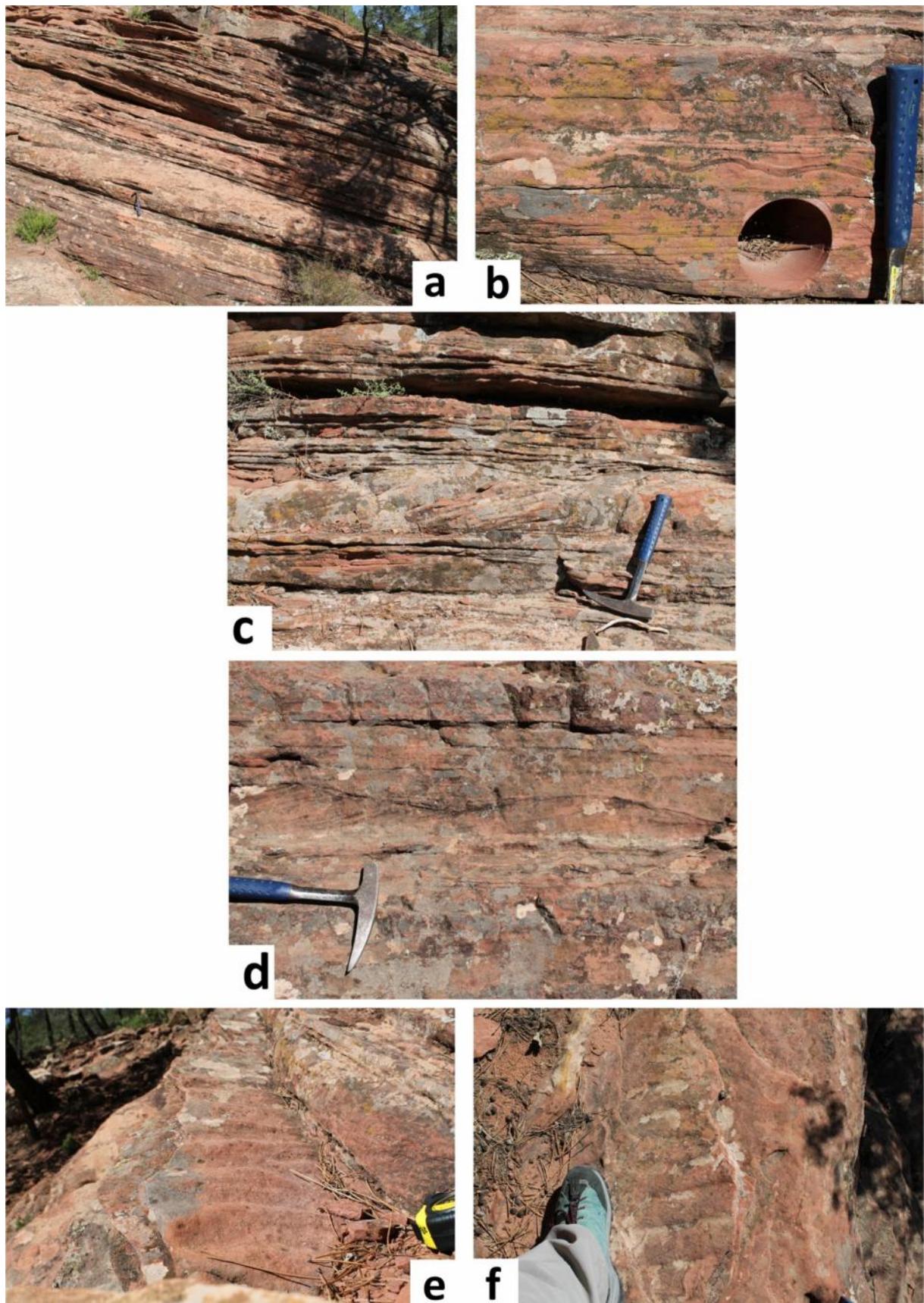


Figura 5. Lámina de fotografías de la asociación de facies de *sandsheet*. (a) y (c) Aspecto de campo de la asociación de facies de *sandsheet* con laminación horizontal y estratificación cruzada planar. (b) Nivel de *ripples* asimétricos intercalados con laminación paralela. (d) Nivel de estratificación cruzada en surco. (e) y (f) Superficie de *ripples* de oscilación asimétricos.

## Interpretación

La presencia de arenas muy bien seleccionadas con estratificación cruzada a gran escala ha llevado a la interpretación de que esta facies es producto de una sucesión de dunas eólicas con crestas que van de sinuosas a rectas (McKee, 1980; Scherer, 2000). Los sentidos de paleocorrientes obtenidos para estas dunas son: SE y NW.

La presencia de *sets* superpuestos indica que las dunas llegaron a migrar unas sobre otras. Por otra parte la existencia de niveles tabulares y continuos de pequeña escala (escasa potencia), que presentan laminación paralela, junto con niveles de *ripples* simétricos y asimétricos, y que están situados entre los *sets* de estratificación cruzada de las dunas eólicas, se interpretan como interdunas secas (Figura 6e). Así esta asociación refleja una interdigitación duna-interduna (Mountney y Jagger, 2004).



Figura 6. Lámina de fotografías de la asociación de facies de dunas eólicas. (a), (b) y (c) aspecto de campo de las facies AD con estratificación cruzada planar (a) y en surco (b) y (c). *Ripples* de oscilación asimétricos en (d) y superficie de interduna seca en (e).

Los resultados de este trabajo avalan los resultados previos de Soria *et al.* (2011) y de Vicente de Vera (2014), los cuales muestran que durante el depósito de las facies Buntsandstein en el sector de Torre de las Arcas se produjo la instalación de un sistema desértico arenoso (*erg*) caracterizado por asociaciones de facies de canales efímeros, de *sandsheet* y de dunas eólicas.

En general, este medio sedimentario se puede dividir en tres zonas (Figura 7) en base a la interpretación ambiental de asociaciones de facies laterales y verticales junto con direcciones de dispersión de sedimentos (Porter, 1986): (a) *fore-erg*; es el área distal del *erg* y se caracteriza por la interacción entre el sistema sedimentario eólico y otros sistemas sedimentarios (fluviales, marinos, lacustres...); (b) *central-erg*: es la parte central del sistema y contiene la mayor acumulación de depósitos eólicos de arena; (c) *back-erg*: es el sector proximal del *erg*.

Sin embargo, en el caso de las facies Buntsandstein de Torre de las Arcas solo están representadas dos de estas zonas: el *back-erg* caracterizado esencialmente por las dos primeras asociaciones de facies (canales efímeros y *sandsheet*) y el *central-erg* caracterizado por la asociación de facies de dunas eólicas (Figura 3) aunque en una menor proporción también aparecen interdunas secas y *sandsheets* eólicos.

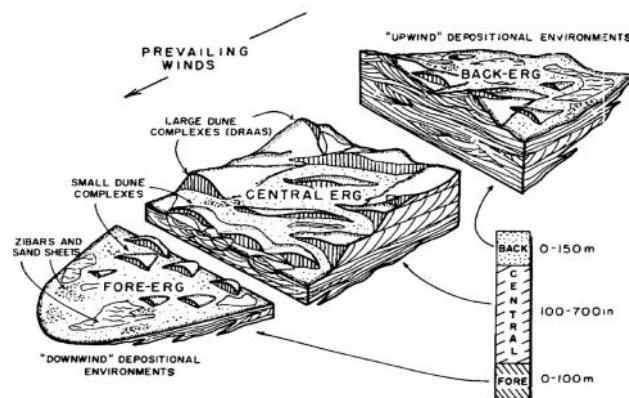


Figura 7. División de un sistema desértico arenoso (Porter, 1986).

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Petrofísica y petrografía

Del total de las 36 muestras tomadas en el campo, solo 19 de ellas han sido seleccionadas para realizar todos los estudios petrofísicos y de ASM. Estas 19 muestras, todas ellas arenosas, están seleccionadas a lo largo de toda la columna y en ellas están representadas todas las facies identificadas en el campo. Los resultados petrofísicos obtenidos de estas 19 muestras se pueden observar en la tabla 2.

A partir de los resultados que muestra esta tabla, se deduce que no siempre existe una buena correlación entre las facies identificadas en el campo y los datos de porosidad y permeabilidad obtenidos. Las facies Ac muestran siempre moderados valores de porosidad y muy bajos de permeabilidad, mientras que la facies Al muestra buenos valores tanto de porosidad como de permeabilidad. Sin embargo, las facies AD y Ad no muestran unos valores bien definidos.

Para intentar establecer a qué se deben las diferencias observadas en estas facies, se realizó un análisis petrográfico de las 36 muestras arenosas tomadas en el campo, a partir de la realización de láminas delgadas, haciendo una descripción general de las facies Buntsandstein de Torre de las Arcas e identificando y describiendo las microfacies que componen las cuatro facies arenosas anteriores. La facies de conglomerados no se incluye debido a que no es relevante en cuanto a sus cualidades como potencial almacén geológico, por lo que tanto el estudio petrofísico como el textural se han centrado en las facies arenosas.

Muestra	Porosidad IMP (%)	Permeabilidad K <sub>g</sub> (mD)	Facies
41-1	23,1	437,552	Al
40-1	22,5	1276,973	Al
38-1	16,6	775,152	Al
37-2	19,5	283,939	Ad
32-1	20,4	218,456	Ad
30-1	23,9	642,047	Ad
28-2	18,7	149,609	AD
28-1	14,6	5,048	AD
22-1	19,6	136,605	AD
21-1	17,5	84,862	Al
16-1	19,4	162,046	Al
12-2	11,1	1,393	AD
12-1	13,1	3,87	AD
9-1	17,2	27,681	AD
5-1	14,8	20,048	Ad
4-2	10,6	0,797	Ad
4-1	14	15,403	Ad
3-2	12	0,9	Ac
3-1	12,6	1,246	Ac

Tabla 2. Resultados de las propiedades petrofísicas de las muestras con la facies a la que pertenece cada una.

En general el tramo arenoso del Buntsandstein tiene una composición homogénea con un contenido principal en cuarzo que varía del 75 al 85%, también incluye hematites del 5 al 15%, fragmentos líticos del 5 al 10%, feldespatos del 2 al 5% y en alguna lámina de forma muy puntual una matriz arcillosa de micas normalmente muy escasa. El cemento principal es de hematites que se presenta de dos formas: ocluyendo los poros o de forma pelicular cubriendo los granos. Además su disposición puede ser homogénea en la lámina o concentrada en bandas generalmente paralelas a la base u oblicuas. Otro cemento menos frecuente es el cemento de crecimiento secundario de cuarzo cubriendo granos. Por las concentraciones relativas de cuarzo, feldespatos y fragmentos líticos estas areniscas se clasifican según el diagrama de Pettijohn *et al.* (1987) en sublitenitas.

A partir del estudio petrológico realizado se han diferenciado un total de 7 microfacies según el tamaño de grano medio, la selección, la presencia o no de laminación y la cementación observada (Tabla 3).

La microfacies 1 (Fig. 8a) está formada por arenas de grano medio con valores medios entre 0,3 y 0,4 mm. Las arenas tienen una mala selección, presentando también tamaños de grano fino y muy grueso (de hasta 6 mm). La cementación de hematites característica tiene una distribución homogénea, principalmente es pelicular cubriendo los granos, aunque puntualmente es de oclusión de poros.

La microfacies 2 (Fig. 8b) son arenas de grano medio con valores medios entre 0,25 y 0,4 mm, que incluyen algún grano de arena gruesa de hasta 0'8 mm. La selección varía de moderada a buena conforme la proporción de arenas finas disminuye. Tienen una cementación de hematites homogénea característica, apareciendo de forma pelicular cubriendo los granos.

La microfacies 3 (Fig. 8c) son arenas finas laminadas con valores de tamaño de grano medio en torno a 0'2 mm. Están mal seleccionadas de forma que aparece algún grano de arenas muy gruesas superiores a los 3 mm, con un porcentaje de arenas medias y gruesas superior que en las microfacies anteriores. Se diferencian láminas de distinto tamaño de grano con buena selección que son, en general, paralelas a la base, aunque en algún caso se disponen de forma oblicua. En estas laminaciones aparece asociada una importante cementación de hematites de oclusión de poros, que suele estar relacionada con las de tamaño de grano más fino.

La microfacies 4 (Fig. 8d) es muy similar a la 3. En ella se aprecia un mayor tamaño de grano medio (0'3 mm). Son arenas de grano medio con granos de arena muy gruesa superior a 1 mm que también están mal seleccionadas y tienen una cementación de oclusión de poros que está asociada a láminas más difusas (más finas y con menos continuidad).

Microfacies	Tamaño de grano medio (mm)	Selección	Cementación de hematites	Muestras
1	>0,25	Mala	Homogénea	3-2 y 4-1
2	>0,25	Moderada-Buena	Homogénea	22-1, 25-1, 30-1, 32-1, 37-2, 39-1, 40-1 y 41-1
3	<0,25	Mala	Láminas	4-2, 6-1, 15-1, 27-1 y 33-1
4	>0,25	Mala	Láminas	21-1, 34-1
5	<0,25	Moderada	Láminas	3-1, 5-1, 8-1, 10-1, 11-1, 12-1, 12-2, 13-1, 14-1, 16-1, 19-1, 24-1, 28-1, 37-1 y 38-1
6	<0,25	Moderada-Buena	Homogénea	7-1, 17-1 y 28-2
7	<0,25	Buena	Láminas	9-1, 26-1, y 31-1,

Tabla 3. Microfacies identificadas en microscopio petrográfico de luz transmitida.

La microfacies 5 (Fig. 8e) son arenas laminadas de grano fino con selección moderada, con un tamaño de grano máximo de 0'9mm. Los granos se disponen en láminas, que pueden ser oblicuas o paralelas a la base, con buena selección que pueden ser de tamaño fino. La cementación es de hematites mayoritariamente pelicular pero en algunas muestras también tiene una distribución en láminas ocluyendo poros, de las láminas de menor tamaño de grano.

La microfacies 6 (Fig. 8f) son arenas de grano fino con un tamaño medio entre 0,15 y 0,20 mm, con un tamaño máximo de 0,7 mm tienen una selección de moderada a buena. La cementación es pelicular y está distribuida de forma homogénea.

Por último, la microfacies 7 (Fig. 8g) son arenas finas laminadas con un tamaño de grano medio entre 0,15 y 0,2 mm con buena selección que se puede diferenciar en láminas. En esta microfacies las láminas tienen muy buena selección y la cementación es mayoritariamente pelicular y está distribuida de forma homogénea.

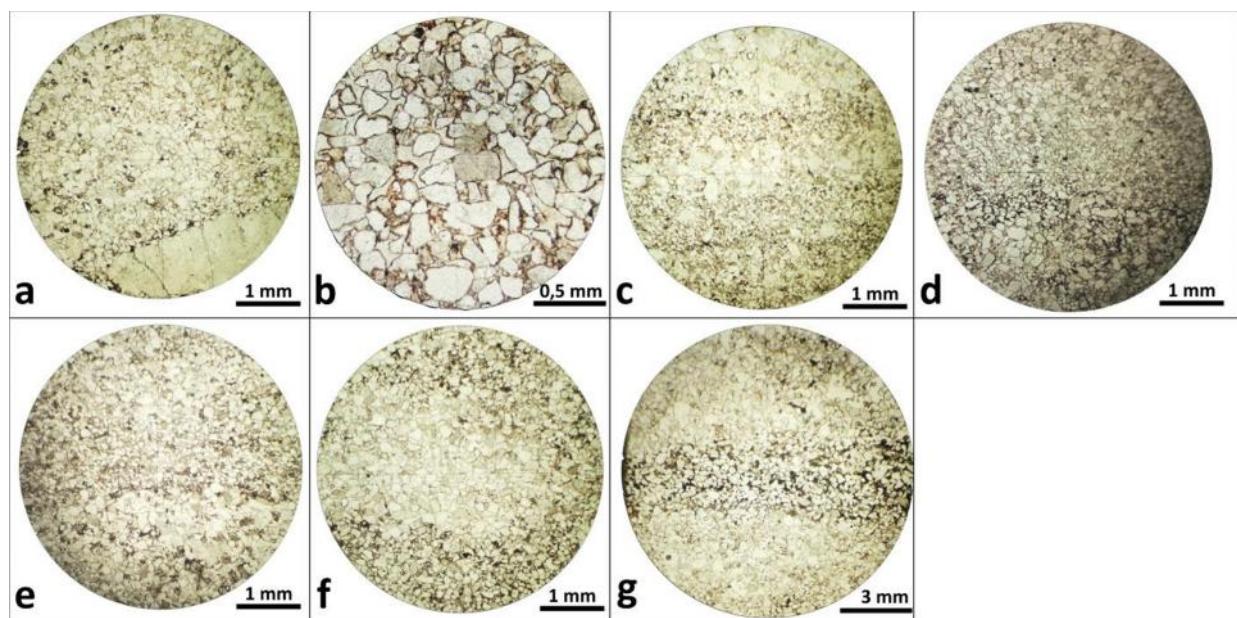


Figura 8. Conjunto de fotos de cada microfacies a) Lámina 3-2 (microfacies 1). b) Lámina 41-1 (microfacies 2), con cementación pelicular, tamaño de grano medio y buena selección. c) Lámina 4-2 (microfacies 3). d) Lámina 21-1 (microfacies 4) generalmente pelicular pero con láminas difusas e) Lámina 12-1 (microfacies 5). f) Lámina 17-1 (microfacies 6). g) Lámina 9-1 (microfacies 7).

Para reconocer las facies con datos de porosidad y permeabilidad más favorables se crea la tabla 4, en la que se diferencian las microfacies con sus respectivas muestras añadiendo los rangos de porosidad y permeabilidad.

Facies	Microfacies	Muestras	Rango porosidad (%)	Rango permeabilidad (mD)
AD	2	22-1	19,6	136,6
	5	12-1, 12-2 y 28-1	11,1-14,6	1,4-5
	6	28-2	18,7	149,6
	7	9-1	17,2	27,7
Ad	1	4-1	14	15,4
	2	30-1, 32-1 y 37-2	19,5-23,9	218,5-642
	3	4-2	10,6	0,8
	5	5-1 y 16-1	14,8-19,4	20-162
Al	2	40-1 y 41-1	22,5-23,1	437,5-1277
	4	21-1	17,5	84,9
	5	38-1	16,6	775
Ac	1	3-2	12	0,9
	5	3-1	12,6	1,2

Tabla 4. Asociación de microfacies de microscopio a las facies de campo, caracterizando su porosidad y permeabilidad.

Es reseñable que las microfacies con peores parámetros de porosidad y permeabilidad corresponden bien a areniscas de grano medio mal seleccionadas (microfacies 1) o bien a microfacies laminadas mal seleccionadas, con láminas relativamente potentes y bien diferenciadas, en las cuales la cementación de hematites es de oclusión de poros, situándose ésta de forma preferencial en las láminas de menor tamaño de grano (microfacies 3 y en ocasiones microfacies 5). Estas microfacies con bajos valores petrofísicos se concentran fundamentalmente en el tercio inferior de la unidad. A partir del metro 36 de la serie, se observa un cambio hacia valores más altos de porosidad y permeabilidad, relacionados con microfacies con selección moderada a buena (microfacies 2 y 6) o con microfacies laminadas en las que, independientemente de la selección, la cementación de oclusión de poros es escasa (microfacies 7) o bien está asociada a láminas más difusas (más finas y con menos continuidad; microfacies 4 y alguna muestra de la microfacies 5).

## 6.2. ASM y curvas termomagnéticas

Con el análisis de la ASM se obtiene, entre otros parámetros, la susceptibilidad magnética media ( $K_m$ ) para cada estación, que varía entre  $29,3$  y  $172 \cdot 10^{-6}$  SI (ver Tabla 5). Aunque la distribución parece irregular se aprecia que el tramo superior de la columna tiene valores mayores que el tramo basal (ver Fig. 12).

También aportan información los parámetros escalares  $P'$  y  $T$ , que sirven para caracterizar el elipsoide magnético, así se puede ver en la gráfica de  $T$  (parámetro de forma) frente a  $P_j$  (grado de anisotropía corregida,  $P'$  de Jelinek, 1981) que dominan las muestras con elipsoides magnéticos oblatos  $T>0$  (Fig. 9a). Por otra parte, en la gráfica 9b de  $P_j$  ( $P'$ ) frente a  $K_m$  se aprecia una buena correlación entre ambos parámetros, lo que podría indicar que el grado de anisotropía está controlado por la mineralogía magnética.

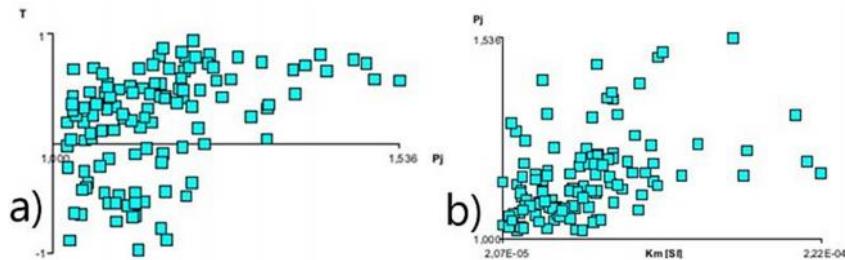


Figura 9. Gráficas representadas con Anisoft 4.2: a) T-Pj; b) Pj (P')-Km de las 114 muestras.

A partir de los datos direccionales se diferencian dos tipos de fábricas magnéticas: (1) por un lado son mayoría las fábricas con el eje K3 en la horizontal en dirección NE-SW y con el eje K1 en la vertical (Fig. 10a), (2) mientras que por otro lado están las fábricas mucho menos numerosas, con K3 perpendicular al plano de estratificación (Figura 10b) y K1 con la dispersión en la horizontal.

Cuando se representan todas las muestras juntas, se observa la mayoría de los ejes K1 y K2 distribuidos en una ciclográfica vertical de dirección NW-SE, con dos máximos de K1, el mayor en la vertical y el secundario en la horizontal, mientras K3 queda representado mayoritariamente en la horizontal en dirección NE-SW (Fig. 10c). Esta dirección de K3 es perpendicular a las directrices estructurales (Anticlinal de Montalbán) y por lo tanto paralelo al eje de acortamiento, mientras K1 o bien representa la dirección de transporte, o bien la dirección del plegamiento. Por lo tanto, la fábrica dominante es una fábrica tectónica, encontrando solo en una estación (3-2) una fábrica sedimentaria.

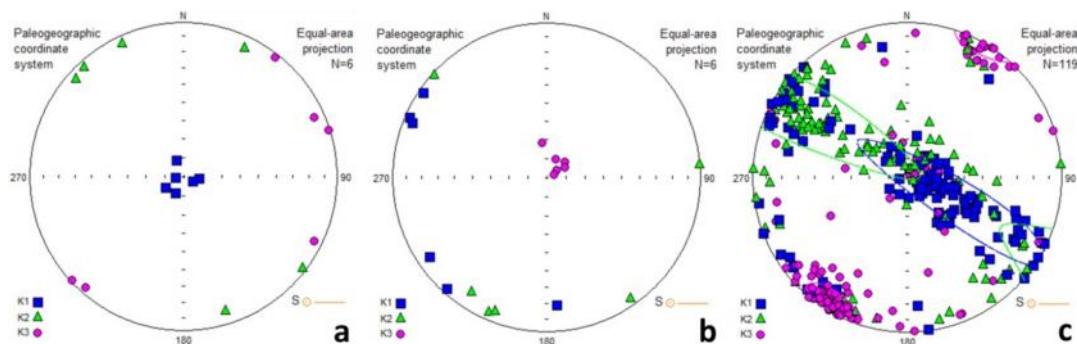


Figura 10. Fábricas magnéticas representadas en Anisoft 4.2 con estereogramas: a) Estación 37-2 con fábrica tectónica. b) Estación 3-2 con fábrica sedimentaria. c) Todas las muestras y los elipsoides magnéticos del conjunto. Fábricas magnéticas representadas con el plano de estratificación abatido a la horizontal.

El estudio de las curvas termomagnéticas con el programa Cureval8 permite identificar la mineralogía portadora de la susceptibilidad magnética y la proporción en la que se presentan.

Se han hecho curvas de las muestras 3-2, 5-1, 12-1, 16-1, 28-1, 32-1 y 38-1. La mayoría de ellas presentan en el tramo inicial de la curva de calentamiento (roja) forma de hipérbola (Fig. 11a), indicando un comportamiento paramagnético y, más adelante, se produce un descenso brusco de la susceptibilidad que indica la presencia de minerales ferromagnéticos. En todos los casos la caída final se produce alrededor de 680°C, que corresponde a la temperatura de Néel de la hematites (Fig. 11). Además, se observa también una caída parcial de la susceptibilidad a temperaturas en torno a los 580-600°C, que corresponde a la temperatura de Curie de la magnetita (Fig. 11). La proporción de minerales ferromagnéticos y paramagnéticos estimada (Hrouda *et al.*, 1997) oscila en las muestras estudiadas entre 70-80% de ferromagnéticos frente a 20-30% paramagnéticos, que corresponden a hematites y magnetita, y micas respectivamente. La curva de enfriamiento (azul) tiene unos valores de susceptibilidad magnética mayores, que indican la neoformación de minerales (probablemente magnetita) durante el calentamiento.

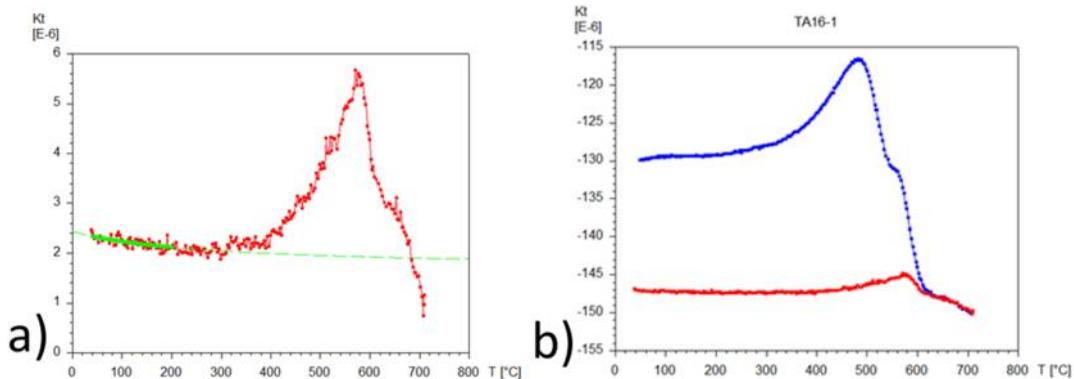


Figura 11. Representación con Cureval8 de la curva termomagnética 16-1 representativa del resto. a) Curva de calentamiento y cálculo de la hipérbola característica del comportamiento de los minerales paramagnéticos. b) Caída final de la susceptibilidad a la temperatura de Néel en 680  $^{\circ}\text{C}$  característica del hematites.

Los resultados que se exponen en la Tabla 2 se representan conjuntamente en la figura 12 en función de su posición en la columna estratigráfica. Con esta figura se puede analizar la posible correlación a lo largo de la columna estratigráfica entre los parámetros de la ASM ( $K_m$ ,  $P'$  y  $T$ ) con los resultados petrofísicos (porosidad y  $K_g$ ). Si se observan las tendencias de los parámetros desde el techo de la columna hacia la base, se ve la correlación de varios tramos entre todas las variables. Por lo general, en la zona del techo de la columna están los valores más elevados y en la base los más bajos, teniendo todos los parámetros una evolución decreciente hacia base, más marcada en el caso de la porosidad y permeabilidad que en el caso de los parámetros magnéticos. La correlación más evidente es, por un lado, de la porosidad con la permeabilidad y, por otro, de  $K_m$  con  $P'$  y con  $T$  en menor medida. Un ejemplo de esta correlación entre la porosidad y permeabilidad está en la evolución de ambas dentro del tramo que va desde el metro 64 al 31, en el que se ve coincidencia en todas las variaciones de estos dos parámetros. Por parte de  $K_m$  y  $P'$  un ejemplo de tramo con buena correlación sería el que va desde el metro 74 al 83, coincidiendo todas las tendencias de cambios entre valores. Finalmente se observa que la correlación entre  $K_m$  y  $P'$ , por un lado, y con la porosidad y permeabilidad, por otro, es muy reducida, coincidiendo una tendencia de crecimiento generalizado entre estos cuatro parámetros desde el metro 57 al 63.

## 7. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados conjuntos del análisis de facies, petrografía, petrofísica y ASM se exponen en la Tabla 5. Los parámetros petrofísicos se consideran como datos favorables para el almacenamiento geológico de  $\text{CO}_2$  si dan una permeabilidad alta a partir de 10mD (Nelms *et al.*, 2004) y una porosidad buena del 15-20% o muy buena superior al 20%. De este modo, en este trabajo se aprecia como la microfacies con datos más favorables es la 2, seguida de la 5 y, en menor medida la 6, 4 y 7. Las microfacies 2, 4 y 5 son características de las facies de areniscas laminadas (Al) y de las facies de areniscas de dunas pequeñas con estratificación cruzada (Ad), siendo estas a su vez representativas de la asociación de facies de *sandsheet*. Las microfacies 6 y 7 aparecen en la facies AD con datos favorables pero se encuentran lejos de los de la microfacies 2 y 5.

Muestra	K <sub>m</sub> (10 <sup>-6</sup> )	Desviación estándar (10 <sup>-6</sup> )	P'	Desviación estándar	T	Desviación estándar	Porosidad IMP (%)	Permeabilidad K <sub>g</sub> (mD)	Facies
41-1	72,8	18,7	1,196	0,137	0,238	0,377	23,1	437,552	Al
40-1	103	37,5	1,317	0,151	0,701	0,243	22,5	1276,973	Al
38-1	29,3	3,65	1,03	0,004	0,297	0,261	16,6	775,152	Al
37-2	101	14,4	1,157	0,055	-0,22	0,63	19,5	283,939	Ad
32-1	103	21,0	1,28	0,167	0,111	0,696	20,4	218,456	Ad
30-1	92,6	2,68	1,229	0,064	0,387	0,566	23,9	642,047	Ad
28-2	56,2	13,2	1,1	0,034	0,427	0,2	18,7	149,609	AD
28-1	32,5	16,9	1,143	0,111	0,123	0,579	14,6	5,048	AD
22-1	172	41,8	1,184	0,03	-0,281	0,354	19,6	136,605	AD
21-1	80,1	19,3	1,26	0,086	0,493	0,242	17,5	84,862	Al
16-1	76,7	7,39	1,065	0,054	0,117	0,525	19,4	162,046	Al
12-2	64,7	9,10	1,112	0,058	0,381	0,45	11,1	1,393	AD
12-1	48,1	21,7	1,132	0,028	-0,01	0,306	13,1	3,87	AD
9-1	93,0	14,9	1,185	0,121	0,361	0,361	17,2	27,681	AD
5-1	35,2	6,29	1,092	0,064	0,186	0,418	14,8	20,048	Ad
4-2	42,5	11,4	1,116	0,025	-0,025	0,532	10,6	0,797	Ad
4-1	37,0	18,0	1,138	0,103	-0,123	0,402	14	15,403	Ad
3-2	45,8	18,5	1,144	0,044	0,52	0,231	12	0,9	Ac
3-1	51,4	6,84	1,068	0,025	0,157	0,593	12,6	1,246	Ac

Tabla 5. Resultados de susceptibilidad magnética (adimensionales) y propiedades petrofísicas por muestra y con la facies a la que pertenece.

Por estos mismos criterios, la microfacies con valores menos favorables para el almacenamiento geológico son la 1, la 3 y la 5, todas con una mala o moderada selección. Estas microfacies incluyen sobretodo muestras del tramo inferior de la columna de las facies Ac, que junto a la facies de conglomerados hace que la asociación de facies de canales efímeros sea la más desfavorable. Además la 3 y la 5 son microfacies laminadas que si no pierden la continuidad de estas laminaciones con cemento tapando los poros, son unas areniscas que reducen la permeabilidad.

Analizando estos resultados se aprecia como la cementación en láminas ocluyendo los poros es el principal factor que limita la permeabilidad, y por lo tanto la validez como almacenamiento geológico. El ejemplo más visible son los dobles valores de la microfacies 5 que puede llegar a tener en el tramo superior valores favorables si la cementación ocluyendo poros en láminas se hace más difusa, pero en el tramo inferior tiene valores desfavorables por un buen desarrollo de esta cementación en láminas. El siguiente factor más importante es la selección, ya que a unos buenos resultados de las microfacies 2 y 6 está asociada una selección de moderada a buena, mientras que una selección de mala a moderada está ligada a las microfacies 1, 3 y 5 más desfavorables. También se diferencia que los resultados favorables están ligados a microfacies con tamaño de grano medio y los no favorables a microfacies con tamaño de grano fino.

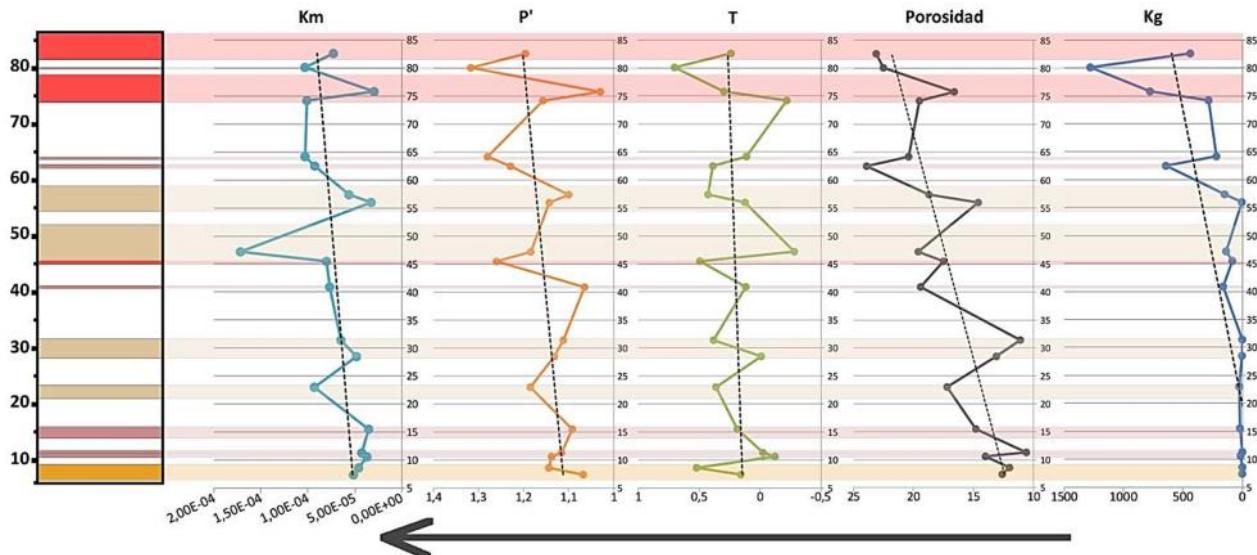


Figura 12. Variación según la altura (m) del perfil estratigráfico de los parámetros: Km ( $10^{-6}$  SI), P', T, porosidad (%) y  $K_g$  (mD). Para una mejor comprensión de la imagen solo se han representado los tramos de facies con representación en las gráficas y siguiendo la leyenda de la figura 3. Se ha dibujado una flecha indicando el sentido en el que aumentan todos los parámetros.

Por otra parte, la correlación entre datos de ASM y petrofísicos es muy escasa, si bien sí que se observa una tendencia general similar en la disminución de todos los parámetros hacia la base de la columna. Esta mala correlación puede deberse a que los resultados de ASM vienen determinados por el contenido, tipo y orientación de la mineralogía magnética, mientras que los resultados de porosidad y permeabilidad están controlados fundamentalmente por la forma en la que se disponen las cementaciones de hematites, bien de forma pelicular (en cuyo caso los datos petrofísicos son buenos), o bien ocluyendo poros de forma selectiva en las láminas arenosas de granulometría más fina (en cuyo caso los datos petrofísicos son desfavorables). Por este motivo, en el caso de este trabajo los estudio de ASM (parámetros Km, P' y T) no son adecuados para establecer aproximaciones a datos petrofísicos (porosidad y permeabilidad).

## 8. CONCLUSIONS

The performance of this work and the analysis of the results obtained allow reach this series of conclusions:

- The Buntsandstein facies of Torre de las Arcas constitute an erg system, corroborating the models of Soria *et al.* (2011) and Vicente de Vera (2014). Within this system it has been differentiated three principal associations of facies (ephemeral channels, sandsheet and aeolian dunes), characterized by four sandy facies and one conglomeratic facies.
- The petrographic study has allowed differentiate 7 microfacies (from one to seven) according to observed grain size, selection, presence or not of lamination and cementation.
- The sandsheet association facies has the highest thickness of the study section and presents very favourable data for geological storage of  $\text{CO}_2$ . The aeolian dunes association facies includes unfavourable and favourable data, and the ephemeral channels association facies is what shows worst petrophysical results, and also it is the least developed in the stratigraphic column.
- The most favourable results are at the top of the stratigraphic column and they are associated to moderately to well selected sandstones with homogeneously distributed pellicular hematite cementation. The less favourable results are in at the bottom and they are associated to badly

to moderately selected sandstones with selective hematite cementation, filling pores and distributed in sheets.

- The correlation between petrophysical and AMS data is not good and in this work the possibility of making porosity and permeability estimations from the AMS parameters is discarded.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Almela Samper, A., Mansilla Izquierdo, H., Quintero Amador, I. y Gómez Nogueroles, E. (1977): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 493 (Oliete) y memoria*. IGME, Madrid, 44 p.
- Álvaro, M. (1991): *Tectónica, Memoria explicativa de la hoja 40 (Daroca) del Mapa Geológico de España a escala 1:200.000*. ITGE, Madrid.
- Álvaro, M., Capote, R. y Vegas, R. (1979): Un modelo de evolución geotectónica para la Cadena Celtibérica. *Acta Geológica Hispánica*, 14: 172-177.
- Aranguren Iriarte, A. (1994): Estructura y cinemática del emplazamiento de los granitoides del Domo de Lugo y del Antiforme del Ollo de Sapo. *Serie NovaTerra*, 10: 236 p.
- Arche, A. y López-Gómez, J. (1999): Tectonic and geomorphic controls on the fluvial styles of the Eslida Formation, Middle Triassic, Eastern Spain. *Tectonophysics*, 315: 187–207.
- Arche, A. y López-Gómez, J. (2005): Sudden changes in fluvial style across the Permian-Triassic boundary in the eastern Iberian Ranges, Spain: analysis of possible causes. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 229: 104–126.
- Arche, A., López-Gómez, J., Marzo, M. y Vargas, H. (2004): The siliciclastic Permian-Triassic deposits in Central and North-eastern Iberian Peninsula (Iberian, Ebro and Catalans Basins): a proposal for correlation. *Geodinamica Acta*, 2: 305–320.
- Arribas, J. (1985): Base litoestratigráfica de las facies Buntsandstein y Muschelkalk en la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica, Zona Norte. *Estudios Geológicos*, 41: 47–57.
- Aurell Cardona, M. y Simón Gómez, J.L. (2007): Sustrato rocoso. En: *Comarca de las Cuencas Mineras* (DGA). Colección Territorio, 24, Zaragoza, 29-40.
- Bakhtari, H.R., Frizon de Lamotte, D., Auborg, C. y Hassanzadeh, J. (1998): Magnetic fabrics of Tertiary sandstones from the Arc of Fars (Eastern Zagros, Iran). *Tectonophysics*, 284: 299–316.
- Borradaile, G.J. (1988): Magnetic susceptibility, petrofabrics and strain. *Tectonophysics* 156: 1–20.
- Bourquin, S., Durand, M., Diez, J.B., Broutin, J. y Fluteau, F. (2007): The Permian-Triassic boundary and Early Triassic sedimentation in Western European basins: an overview. *Iberian Geology*, 33: 221-236.
- Camerot, J., Crespo Zamorano, A. y Navarro Vázquez, D. (1978): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 518 (Montalbán) y memoria*. IGME, Madrid, 31 p.
- Casas, A.M., Cortés, A.L., Liesa, C.L., Meléndez, A. y Soria, A.R. (1997): Estructura del borde N. de la Cordillera Ibérica entre la sierra de Arcos y el Anticlinal de Montalbán. *Cuadernos de Geología Ibérica*, 23: 243-268.
- Chadima, M., Hrouda, F. (2009): Cureval 8.0: Thermomagnetic Curve Browser for Windows. *Agico, Inc.*

Chadima, M., Jelinek, V. (2009): Anisoft 4.2: Anisotropy Data Browser for Windows. *Agico, Inc.*

Diez, J.B., Broutin, J. y Ferrer, J. (2005): Difficulties encountered in defining the Permian-Triassic boundary in Buntsandstein facies of the western Peritethyan domain based on palynological data. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 229: 40-53.

Dinarés-Turell, J., Diez, J.B., Rey, D. y Arnal, I. (2005): Buntsandstein magnetostratigraphy and biostratigraphic reappraisal from eastern Iberia: Early and Middle Triassic stage boundary definitions through correlation to Tethyan sections. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 229: 158-177.

Ebufegha, V. T., Potter, D. K. (2015): Low-temperature magnetic anisotropy in shales and mudstones: Application in modelling mineralogy and fabric in the Horn River Basin, British Columbia. *GeoConvention 2015: New Horizons*: 1-3.

Ezquerra, R., Zurita, C., Soria, A.R. y Martínez, P. (1995): Icnitas de vertebrados en las facies Buntsandstein (Triásico inferior) del Macizo de Montalbán (Peñarroyas, Prov. de Teruel). *Geogaceta*, 18: 109-112.

Ferreiro, E., Ruíz, V., López de Alda, E., Valverde, M., Lendínez, A., Lago San José, M., Meléndez, A., Álvaro, M., Leal, M.C., Aguilar Tomás, M., Gómez, J.J y Carls, P. (1991): *Memoria explicativa y mapa de la hoja 40 (Daroca) del Mapa Geológico de España a escala 1:200.000*. ITGE., 239 p.

Fryberger, S.G., Al-Sari, A.M. y Clisham, T.J. (1983): Eolian dune, interdune, *sand sheet*, and siliciclastic sabkha sediments of an offshore prograding sand sea, Dhahran Area, Saudi Arabia. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 67: 280-312.

Garrido, A. y Villena, J. (1977): El Triásico germánico en España: paleogeografía y estudio secuencial. *Cuadernos de Geología Ibérica*, 4: 37-56.

Glennie, K.W. (1970): Desert sedimentary environments. *Sedimentology*, 14: 222.

Graham, J.W., (1954): Magnetic susceptibility anisotropy, an unexploited petrofabric element. *Bulletin of Geological Society of America*, 65: 1257-1258.

Hadlari, T., Rainbird, R.H., Donaldson, J.A. (2006): Alluvial, eolian and lacustrine sedimentology of a Paleoproterozoic half-graben, Baker Lake Basin, Nunavut, Canada. *Sedimentary Geology*, 190: 47-70.

Hrouda, F. (1982): Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Geophys Surv*, 5:37-82.

Hrouda, F., Jelínek, V., y Zapletal, K. (1997). Refined technique for susceptibility resolution into ferromagnetic and paramagnetic components based on susceptibility temperature-variation measurement. *Geophys. J. Int.* 129, 715-719.

Hunter, R.E. (1977): Basic types of stratification in small eolian dunes. *Sedimentology*, 24: 361-387.

IPF (Instituto Petrofísico de Madrid), (2012): Helium Porosity and Permeability measurements. Technical Report.

Jelinek, V. (1978): Statistical processing of anisotropy of magnetic susceptibility measured on groups of specimens. *Studia Geophysica et Geodetica*, 22, 50-62.

Kocurek, G. y Dott, R.H. (1981): Distinctions and uses of stratification types in the interpretation of eolian sand. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51: 579-595.

- López-Gómez, J. y Arche, A. (1993): Architecture of the Canizar fluvial sheet sandstones, Early Triassic, Iberian Ranges. En: *Alluvial Sedimentation. Int. Assoc. Sedimentol. Spec. Publ.*, 17: 363–381.
- López-Gómez, J. y Arche, A. (1995): El Pérmico y Triásico del Levante español. Características principales y consideraciones paleogeográficas. *Cuadernos de Geología Ibérica*, 19: 201–234.
- López-Gómez, J., Arche, A. y Pérez- López, A. (2002): Permian and Triassic. En: *The Geology of Spain*, Geological Society, London. 185–212.
- López-Gómez, J., Arche, A., Marzo, M. y Durand, M. (2005): Stratigraphical and palaeogeographical significance of the continental sedimentary transition across the Permian-Triassic boundary in Spain. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 229: 3–23.
- López-Gómez, J., Arche, A., Vargas, H. y Marzo, M. (2010): Fluvial architecture as a response to two-layer lithospheric subsidence during the Permian and Triassic in the Iberian Basin, eastern Spain. *Sedimentary Geology*, 223: 320–333.
- Marzo, M. (1986): Secuencias fluvio-eólicas en el Buntsandstein del Macizo del Garraf (Provincia de Barcelona). *Cuadernos de Geología Ibérica*, 10: 207–233.
- McKee, E.D. (1980): *A study of global sandseas*. U.S. Geological Survey Professional Paper, 1052, 429p.
- Mountney, N.P. y Jagger, A. (2004): Stratigraphic evolution of an aeolian erg margin system: the Permian Cedar Mesa Sandstone, SE Utah, USA. *Sedimentology*, 51: 713–743.
- Murat, B. (1983): Contribution à l' etude stratigraphique, sédimentologique et tectonique du basin éocrétacé d'Oliete (Prov. De Teruel, Espagne). Thèse Doct. Travaux du Lab. Géol. Sed. et Paleont. Univ. Paul Sabatier, Toulouse, 347p.
- Parés, J. M. (2015): Sixty years of anisotropy of magnetic susceptibility in deformed sedimentary rocks. *Frontiers in Earth Science*, 3 (4): 1-13.
- Pérez-Arlucea, M. y Sopeña, A. (1985): Estratigrafía del Pérmico y Triásico de la Rama Castellana de la Cordillera Ibérica (Prov. de Guadalajara y Teruel). *Estudios Geológicos*, 41: 207–222.
- Péron, S., Bourquin, S., Fluteau, F. y Guillocheau, F. (2005): Paleoenvironment reconstructions and climate simulations of the Early Triassic: impact of the water and sediment supply on the preservation of fluvial system. *Geodinamica Acta*, 18: 431–446.
- Pettijohn, F., Potter, P. y Siever, R. (1987): *Sand and sandstone*. Springer – Verlag, New York, Segunda edición, 518 p.
- Porter, M.L. (1986): Sedimentary record of erg migration. *Geology*, 14: 497–500.
- Potter, D.K., Corbett, P.W.M., Barclay, S.A., Haszeldine, R.S. (2004): Quantification of illite content in sedimentary rocks using magnetic susceptibility-a rapid complemento r alternative to X-ray diffraction. *Journal of Sedimentary Research*, 74 (5): 730-735.
- Pueyo Anchuela, Ó. (2012): *Estudio de fábricas magnéticas y su relación con la deformación en el sector centro-occidental del Pirineo central (Aragón y Navarra)*. Tesis Doctoral, Univ. de Zaragoza, 366 p.
- Radies, D., Preusser, F., Matter, A. y Mange, M. (2004): Eustatic and climatic controls on the development of the Wahiba Sand Sea, Sultanate of Oman. *Sedimentol.*, 51: 1359–1385.

- Ramsay, J.G., y Huber, M.I. (1983): *The Techniques of Modern Structural Geology, Volume 1: Strain Analysis*. Academic Press, London, 307 p.
- Rey, D. y Ramos, A. (1991): Estratigrafía y sedimentología del Pérmico y Triásico del sector Deza-Castejón (Soria). *Rev. Soc. Geol. España*, 4: 105–125.
- Robion, P., Humbert, F., Colombier, J.C., Leghay, S., Frizon de Lamotte, D. (2012): Relationships between pore space anisotropy and anisotropy of physical properties of silicoclastic rocks from the Corbières–Minervois fold-and-thrust-belt (north-east Pyrenees, France). *Tectonophysics*, 576–577: 63–77.
- Salas, R. y Casas, A. (1993): Mesozoic extensional tectonics, stratigraphy and crustal evolution during the Alpine cycle of the E. Iberian basin. *Tectonophysics*, 288: 33–55.
- Sánchez-Moyá, Y. y Sopeña, A. (2004): El rift mesozoico ibérico. En: *Geología de España* (J.A. Vera, ed.). SGE-IGME, Madrid, 484–522.
- Scherer, C.M.S. (2000): Eolian dunes of the Botucatu Formation (Cretaceous) in southernmost Brazil: morphology and origin. *Sedimentary Geology*, 137: 63–84.
- Scherer, C.M.S., Lavina, E.L.C., Dias Filho, D.C., Olivera, F.M., Bongiolo, D.E. y Aguilar, E.S. (2007): Stratigraphy and facies architecture of the fluvial-eolian-lacustrine Sergi Formation (Jurassic) Recômcavo Basin, Brazil. *Sedimentary Geology*, 194: 169–193.
- Sopeña, A. (editor) (2004): Cordillera Ibérica y Costero Catalana. En: *Geología de España* (J.A. Vera, Ed.), SGE-IGME, Madrid, 465–527.
- Sopeña, A., Virgili, C., Arche, A., Hernando, S. y Ramos, A. (1983): El Triásico. *Geología de España, Libro Homenaje a J.M. Ríos*, vol. 2, I.G.M.E., Madrid, 47–62.
- Sopeña, A., López, J., Arche, A., Pérez-Arlucea, M., Ramos, A., Virgili, C. y Hernando, S. (1988): Permian and Triassic rift basins of the Iberian Peninsula. *Triassic-Jurassic Rifting and the Opening of the Atlantic Ocean*, 757–786.
- Sopeña, A., Ramos, A. y Pérez-Arlucea, M. (1989): Permian and Triassic Fluvial Systems in Central Spain. *Excursion Guidebook nº2 .4th International Conference on Fluvial Sedimentology*, 82 p.
- Soria, A.R., Liesa, C.L., Rodríguez-López, J.P., Meléndez, N., de Boer, P.L. y Meléndez, A. (2011): First evidence of Early Triassic erg system in Iberia. *Terra Nova*, 23: 76–84.
- Veiga, G.D. y Spalletti, L.A. (2007): The Upper Jurassic (Kimmeridgian) fluvial-aeolian system of the southern Neuquén Basin, Argentina. *Gondwana Res.*, 11: 286–302.
- Veiga, G.D., Spalletti, L.A. y Flint, A. (2002): Aeolian/fluvial interactions and high-resolution sequence stratigraphy of a non-marine lowstand wedge: The Avilé Member of the Agrio Formation (Lower Cretaceous), central Neuquén Basin, Argentina. *Sedimentology*, 49: 1001–1019.
- Vicente de Vera García, A. (2014): *Sedimentología de la facies Buntsandstein en La Hoz de la Vieja (Teruel, Cordillera Ibérica)*. Trabajo Final de Grado, Universidad de Zaragoza, 30 p.
- Winkler, A., Alfonsi, L., Florindo, F., Sagnotti, L., y Speranza, F. (1997): The magnetic anisotropy of rocks: principles, techniques and geodynamic applications in the Italian peninsula. *Annali di Geofisica*, 40: 729–740.