

# Evidencias de generación de hidrocarburos en la formación de margas del Mas d'Ascla (Jurásico superior, Cadena Ibérica oriental) y su relación con el campo de Amposta de la Cuenca de Tarragona

R. Salas y A. Permanyer

Dpto. de GPPG, Facultad de Geología, C/. Martí i Franques, s/n, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona  
E-mails: ramons@natura.geo.ub - albert@natura.geo.ub.es

## RESUMEN

Se han realizado un estudio geoquímico detallado y la modelización térmica con la finalidad de arrojar luz sobre la historia de la roca madre y la preservación orgánica de la formación de margas del Mas d'Ascla en la cuenca del Maestrazgo (Cadena Ibérica). La sección tipo de la Fm Ascla presenta un modelo de apilamiento transgresivo-regresivo y ha sido interpretada como una secuencia de depósito de tercer orden. Los valores más elevados de TOC (hasta 1,26 %) se sitúan a lo largo de los 50 primeros metros del TST de la sección estratigráfica de La Salzedella. La tendencia espacial del TOC a través de la subcuenca de La Salzedella muestra un aumento significativo desde las áreas marginales al oeste hasta las más abiertas situadas al este. La relación entre esteranos y terpanos tricíclicos ( $C_{26}/C_{25}<1$ ) evidencia el origen marino. Determinados terpanos triterpanos están relacionados con el tipo de ambiente sedimentario, tales como  $C_{20}/C_{23}$ , gammaceranos, hopanos  $C_{29}/C_{30}$  y  $Ts/Tm$ , que se consideran como parámetros químicos indicados para caracterizar cortejos sedimentarios y litologías. Los cambios en la población bacteriana y por tanto las variaciones en hopanos aparecen claramente relacionados con los ambientes sedimentarios. Se presenta un cambio significativo en el modelo de distribución de los homohopanos  $C_{31}/C_{32}$  entre el TST y el HST. Los datos isotópicos indican que existe una estrecha correlación entre los extractos de roca madre de la Fm Ascla y las muestras de crudo del campo de Amposta. Los resultados de los análisis GC-C-IRMS 13C confirman esta signatura y demuestran que la Fm Ascla es la roca madre del campo de Amposta situado en la plataforma continental.

Palabras clave: Cuenca de Tarragona, geoquímica orgánica, hidrocarburos, Jurásico superior, roca madre

## ***Evidence of hydrocarbon generation in the Mas d'Ascla marls formation (Upper Jurassic, Iberian Chain) and its relationship to the Amposta oil field of the Tarragona Basin***

### ABSTRACT

*A detailed geochemical study and thermal modelling was performed to shed light on the source rock history and organic preservation of the Mas d'Ascla marls formation in the Maestrat basin (Iberian Chain). The type section of the Mas d'Ascla Fm displays a transgressive-regressive stacking pattern and has been interpreted as a third order depositional sequence. The highest values (up to 1.26 %) of TOC are found along the 50 lowermost meters of the TST in the Salzedella section. The spatial trend of TOC across the Salzedella sub-basin displays a significant increase from the marginal areas in the west to more open areas of the basin in the east. Steranes and tricyclic terpane ratios ( $C_{26}/C_{25}<1$ ) provide evidence of marine origin. Tricyclic terpanes are related to sedimentary environment types, such as the  $C_{24}/C_{23}$  ratio used to characterize trends in carbonate-shale variations of the sedimentary environments. Some biomarkers such as  $C_{20}/C_{23}$  tricyclic hydrocarbons, gammacerane,  $C_{29}/C_{30}$  hopanes and  $Ts/Tm$  are regarded as suitable chemical parameters to characterize systems tracts and lithologies. Changes in the bacterial population and therefore variations in hopanes appeared to be clearly associated with sedimentary environments. There is a significant change in the distribution pattern of  $C_{31}/C_{32}$  homohopanes between the TST and HST. Isotopic data show a strong correlation between extracts from the Ascla source rock samples and Amposta oil. This isotopic signature is confirmed by GC-C-IRMS 13C results, demonstrating that the Ascla formation is the source rock of the offshore Amposta oil field.*

*Key words: hydrocarbon, Late Jurassic, organic geochemistry, source rock, Tarragona Basin*

## Introducción

La formación de margas del Mas d'Ascla fue deposi-

tada en ambientes marinos abiertos en la subcuenca de La Salzedella (Fig. 1), donde se sitúa el depocentro principal de la cuenca del Maestrazgo (Salas *et al.*,

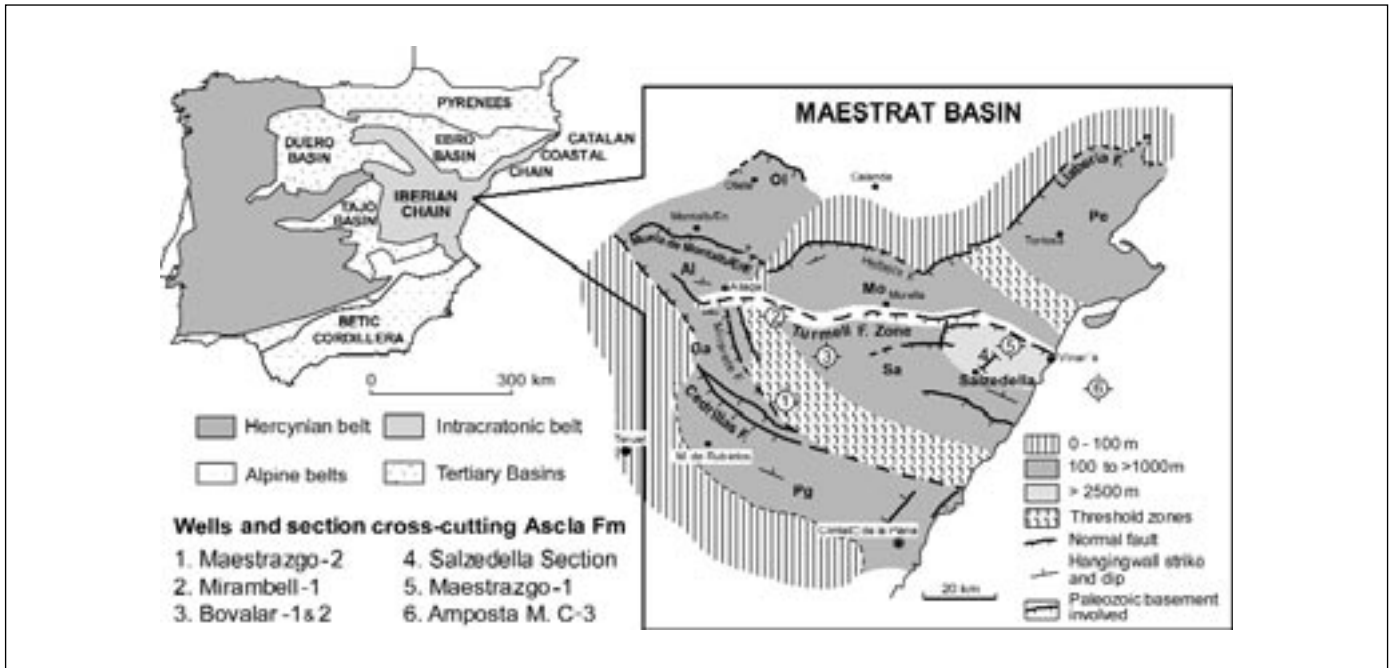


Fig. 1. Mapa de situación de la cuenca del Maestrazgo en el contexto geológico de la Península Ibérica. Se muestra un mapa estructural de la cuenca durante la etapa de rifting Jurásico superior-Cretácico inferior. Las áreas indicadas de potencias corresponden al cretácico inferior. Subcuenas: Pg, Penyagolosa; Ga, Galve; Sa, La Salzedella; Al, Aliaga; Mo, Morella; Pe, El Perelló; Oi, Oliete. Todos los pozos y la sección estratigráfica que cortan la Fm Ascla se encuentran situados en la subcuenca de La Salzedella

Fig. 1. Location map of the Maestrat Basin in the geological context of the Iberian Peninsula. A simplified structural map of the Maestrat basin during the late Jurassic-early Cretaceous rifting stage is also shown. Sub basins: Pg, Penyagolosa; Ga, Galve; Sa, La Salzedella; Al, Aliaga; Mo, Morella; Pe, El Perelló; Oi, Oliete. All the wells and stratigraphic section that cross-cutting the Ascla Fm and are located in the Salzedella sub-basin

2001). Esta formación contiene intervalos de margas y calizas margosas laminadas con suficiente materia orgánica para ser considerada como una roca madre potencial (Salas, 1989; Permanyer *et al.*, 1999). El potencial como roca madre de la Fm Ascla no fue reconocido cuando la cuenca del Maestrazgo y las áreas adyacentes de la plataforma continental fueron exploradas para hidrocarburos durante la década de los setenta. En tierra, las campañas de exploración no tuvieron éxito. En la plataforma continental, fueron descubiertos algunos campos petrolíferos en la denominada Cuenca de Tarragona (Fig. 2). Si bien la mayor parte de los crudos descubiertos en la cuenca de Tarragona indudablemente tienen su origen en rocas madre miocenas (Albaigés *et al.*, 1986), el crudo del campo de Amposta, situado a 40 km al oeste de La Salzedella, presenta unas características geoquímicas únicas y no se correlaciona con los otros crudos (Albaigés *et al.*, 1986).

Algunos autores han considerado que el crudo del campo de Amposta se había generado a partir de la Fm Ascla (Seifert, 1983). Albaigés *et al.* (1986) descartaron la Fm Ascla como la roca madre del crudo de Amposta, argumentando que esta unidad no tenía

potencial como roca madre y que en el momento de formación de la trampa (Mioceno) ya estaría sobremadurada para poder haber generado petróleo. Sin embargo, Seemann *et al.* (1990), a partir del estudio del pozo Cenía-1 de la plataforma continental (Cuenca de Tarragona), encontraron que la Fm Ascla aún se encuentra en la fase de generación de petróleo y que tiene un cierto potencial residual de generación de crudo. Además, estos autores encontraron ciertas similitudes geoquímicas entre extractos de oca madre y el crudo de Amposta. La Fm Ascla también se halla todavía en la fase de generación de petróleo, tanto en el afloramiento cercano a La Salzedella como en el sondeo Maestrazgo-1, en las proximidades de Càlig (Permanyer *et al.*, 2000a). En ambas localidades, la formación pudo haber entrado en la ventana del petróleo durante el Cretácico superior, concretamente a 90 Ma (Turoniense), cuando fue enterrada a profundidades comprendidas entre 3-3,7 km (Permanyer *et al.*, 2000b).

El objetivo de este trabajo es el estudio de la materia orgánica de la Fm de margas del Mas d'Ascla y especialmente de los biomarcadores, de cara a evidenciar su papel como roca madre generadora de

hidrocarburos. Además, se realiza la modelización de la historia térmica de la cuenca del Maestrazgo en el sector de la Salzedella, con el fin de simular la historia geológica y térmica de la formación y acotar temporalmente sus etapas de entrada en las ventanas del petróleo y del gas. Finalmente, se pretende probar la posible contribución de la Fm Ascla en el origen del crudo del campo de Amposta, para ello se efectúan análisis isotópicos del tipo GC-C-IRMS-13C.

### Marco geológico

La formación de margas del Mas d'Ascla es de edad Kimmeridgiense superior-Titónico basal (Salas, 1989) y se localiza en la cuenca del Maestrazgo, que está situada en el sector oriental de la Cadena Ibérica. Esta cadena se desarrolló durante el Paleógeno a partir de la inversión de los rifts mesozoicos de la Cuenca Ibérica (Fig. 1). La Cuenca Ibérica se formó durante el ciclo de rift Pérmico superior-Triásico, cuando los sistemas de rift del Tetis y el Ártico-Atlántico Norte se propagaron hacia el oeste y sur, respectivamente. Durante el Jurásico inferior y medio la evolución de la Cuenca Ibérica estuvo controlada por subsidencia postrift de tipo térmico. El rifting se reanudó durante el Oxfordiense superior y se prolongó hasta el Albiense medio. Este ciclo de rifting controló el de-

sarrollo de la cuenca del Maestrazgo y de algunas otras cuencas. Este segundo ciclo de rifting coincide con la actividad de rift en el dominio del Atlántico Norte. Durante el Albiense superior al Maastrichtiense la Cuenca Ibérica subsidió como respuesta al reequilibrio térmico postrift de la litosfera (Salas *et al.*, 2001).

El rift Jurásico superior-Cretácico inferior se caracteriza por un sistema extensivo de fallas lístricas que dividen a la cuenca del Maestrazgo en cuatro bloques basculados hacia el norte o subcuencas. Merece especial atención la subcuenca de La Salzedella (Sa, Figs. 1, 2), situada en el sector central de la cuenca del Maestrazgo. Consiste en un bloque basculado hacia el norte de unos 50x100 km de extensión, controlado por una zona de fractura alargada (zona de falla del Turmell) que implica el basamento priesozoico (Salas y Guimerà, 1996).

El registro sinrift, de edad jurásica superior-cretácica inferior, de la subcuenca de La Salzedella llega a alcanzar los 5,5 km de potencia y está formado básicamente por carbonatos marinos de aguas someras. Durante el Aptiense basal y el Albiense ocasionalmente se desarrollaron depósitos clásticos deltaicos. El comienzo del rifting coincidió con una subida significativa del nivel del mar. Al tiempo que la subsidencia rápida del conjunto de bloques basculados produjo el ahogamiento de la rampa Oxfordiense de

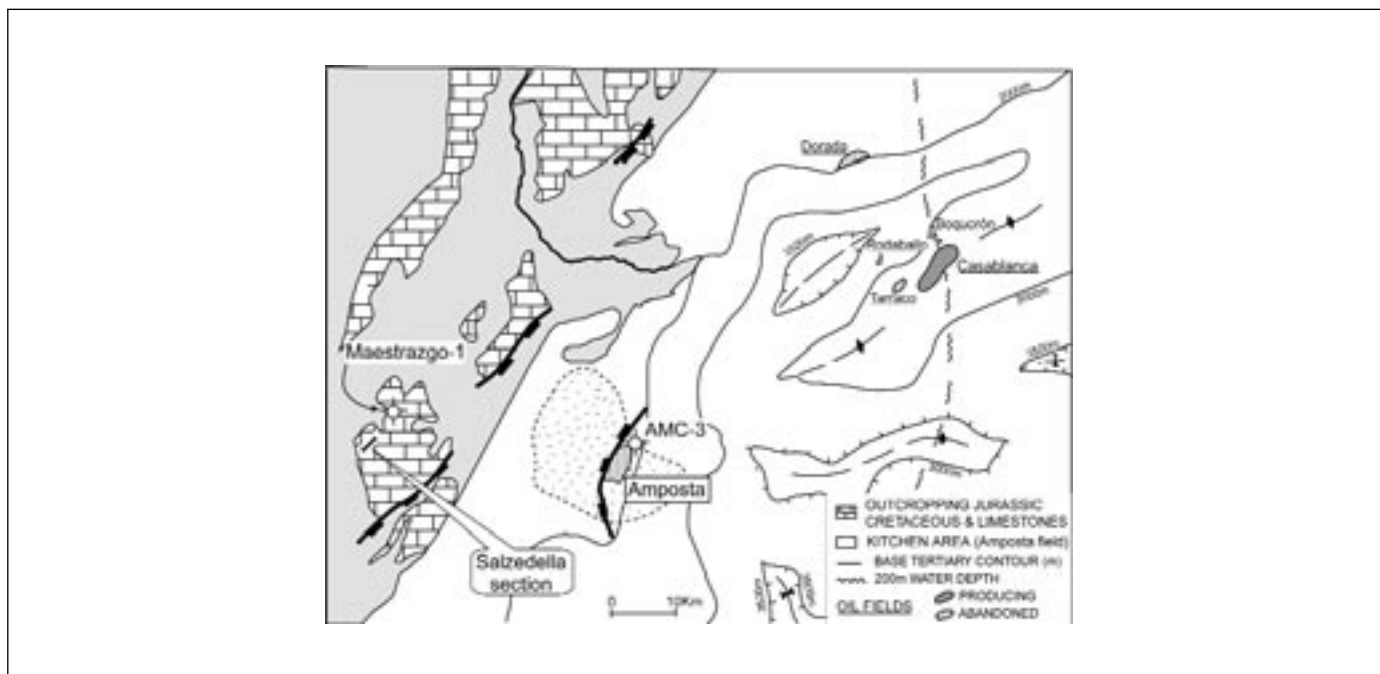


Fig. 2. Mapa de localización de la Cuenca de Tarragona con los campos de petrolíferos de la plataforma continental del este de la Península Ibérica. Modificado de Seemann *et al.* (1990)  
 Fig. 2. Location map of the offshore oil fields in the Tarragona Basin (eastern Iberian Peninsula). Modified from Seemann *et al.* (1990)

esponjas (hasta 50 m de potencia) y la acumulación de hasta 800 m de sedimentos kimmeridgienses con margas anóxicas (Fm Ascla) en las partes más distales de las cuencas. Lateralmente estas facies pasan a calizas micríticas laminadas y facies calcáreas más granosoportadas con arrecifes (Salas y Casas, 1993).

La formación de margas del Mas d'Ascla se encuentra bien desarrollada en la subcuenca de La Salzedella, según se desprende de los datos suministrados por los sondeos petrolíferos realizados en la cuenca del Maestrazgo (Fig. 1). Dicha formación alcanza los 300 m de potencia en el depocentro de la subcuenca, cerca de la localidad de La Salzedella. Esta unidad muestra un modelo de apilamiento transgresivo-regresivo que ha sido interpretado como una secuencia de depósito de tercer orden, la cual correspondería a la secuencia de depósito Kimmeridgiense-2 definida en sectores más marginales de la cuenca (Bádenas *et al.*, 1998). La Fm Mas d'Ascla fue depositada en la parte proximal del sector de rampa profunda de una plataforma de carbonatos de tipo rampa,

probablemente con ruptura de pendiente distal (Salas, 1989). Los depósitos de tempestitas nos informan que la sedimentación tuvo lugar bajo la acción de las olas de tormenta. El cortejo transgresivo (TST) registra los valores más altos de Carbono orgánico total (TOC) de la unidad (Fig. 3), en relación con episodios que se han interpretado como más pobres en oxígeno y anóxicos (Permanyer *et al.*, 2000).

### Materia orgánica

Los análisis geoquímicos han resultado muy útiles a la hora de estudiar con gran precisión las variaciones en la composición de la materia orgánica de los diferentes cortejos sedimentarios de la Fm Ascla. Variaciones en la composición de la materia orgánica y en particular de las poblaciones bacterianas han podido ser evidenciadas mediante análisis geoquímicos. Estas variaciones se interpretan como íntimamente relacionadas con cambios del nivel del mar. De

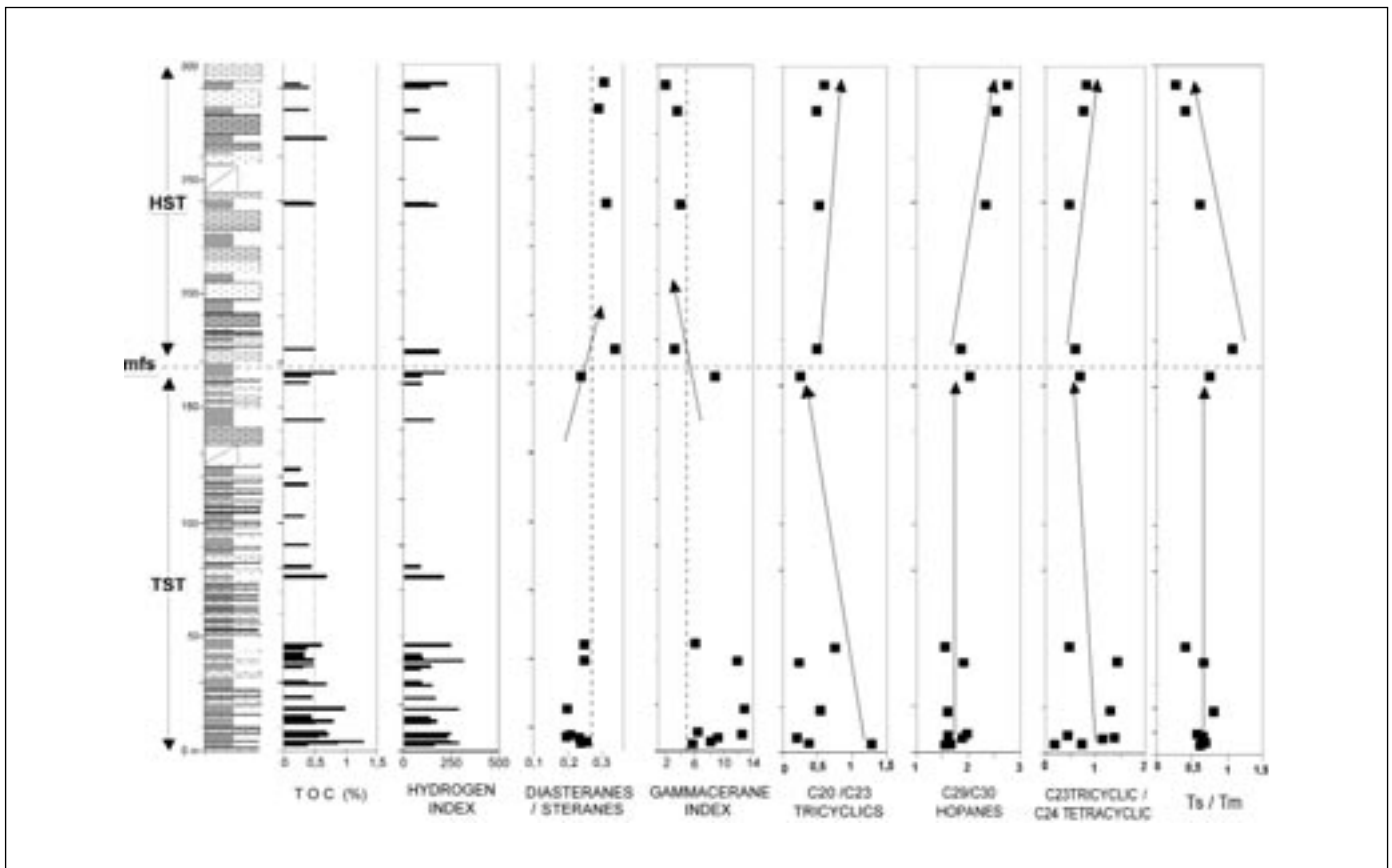


Fig. 3. Variación de los parámetros geoquímicos principales y de algunos biomarcadores característicos. Correlación con los cortejos sedimentarios de la formación Ascla en su localidad tipo  
 Fig. 3. Variation of geochemical bulk parameters and some typical biomarkers correlated with stratigraphic sequences in the Ascla formation

este modo, las situaciones de cortejos transgresivos (TST) o de cortejos de nivel del mar alto (HST) inducen variaciones en las profundidades de la lámina de agua que influirían directamente sobre las poblaciones de fitoplancton y bacterias.

En este capítulo se estudian las relaciones entre los cortejos sedimentarios y la composición geoquímica de los sedimentos anóxicos de la Fm Ascla. Esta unidad contiene intervalos ricos en materia orgánica formados por margas y calizas margosas laminadas oscuras con un contenido en carbono orgánico total (TOC) de hasta 1.26 %. A pesar de ello su potencial como roca madre de petróleo ha sido puesto en duda por varios autores (Seifert *et al.*, 1983; Albaigés *et al.*, 1986; Seemann *et al.*, 1990). Sin embargo, la Fm Ascla fue propuesta como la roca madre del campo de Amposta (Seeman *et al.*, 1990) situado en la plataforma continental mediterránea adyacente al área de estudio (Fig. 2).

### Contenido orgánico

Las variaciones en el contenido de carbono orgánico (Fig. 3) permiten distinguir tres eventos anóxicos: i) un evento principal en la parte basal de la formación, que corresponde a la parte inferior del TST y presenta los valores más altos de TOC (hasta 1.26%); ii) un pequeño intervalo intermedio próximo a la superficie de máxima inundación (mfs) y iii) el último evento, situado en la parte alta del HST. En conjunto, el contenido orgánico es relativamente bajo a lo largo de la unidad, debido a un proceso de oxidación (visible en los cromatogramas por debajo de los alcanos n-C21), y al proceso de maduración/migración como sugiere el diagrama IH/Tmax (Fig. 4).

### Origen y grado de madurez de la materia orgánica

De acuerdo con la interpretación sedimentológica, la materia orgánica es de origen marino. El análisis microscópico revela la presencia de abundantes filamentos de algas planctónicas marinas. Algunos datos geoquímicos, como los porcentajes de esteranos regulares (C27, C28, C29) y la relación de terpanos tricíclicos (C26/C25 < 1) también evidencian el origen marino (Permanyer *et al.*, 2000) (Fig. 5).

Teniendo en cuenta la isomerización de los esteranos, el grado de madurez de la materia orgánica decrece lentamente desde la parte basal al techo de la formación. Los valores equivalentes de reflectancia de la vitrinita (deducidos según Bein y Sofer, 1987) muestran una buena concordancia con los valores

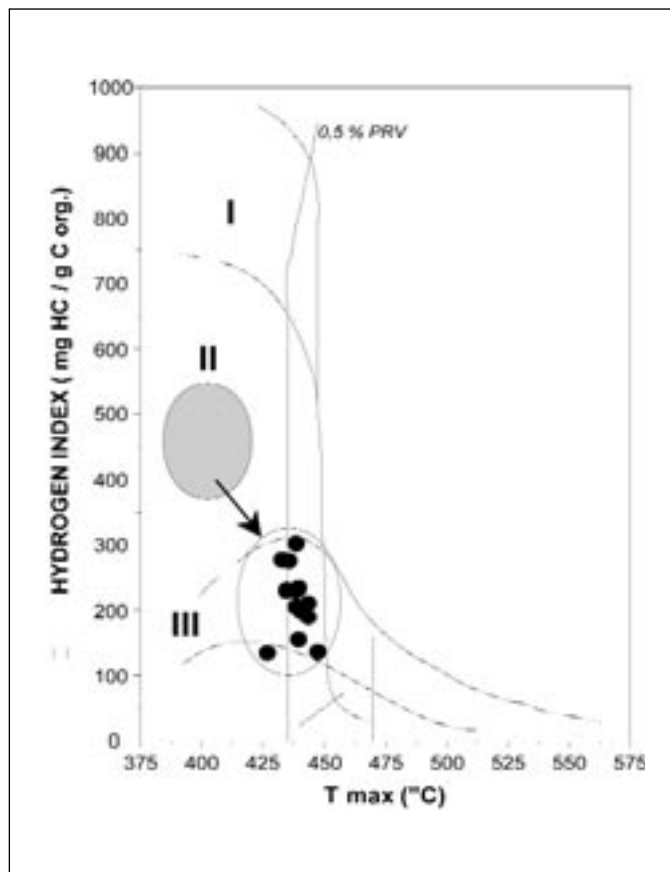


Fig. 4. Diagrama de Índice de Hidrógeno /Tmax. La flecha indicaría el camino seguido por las muestras desde una posición asumida anterior a su maduración

Fig. 4. Hydrogen Index vs. Tmax diagram. The arrow indicates the path followed from an assumed position before maturation

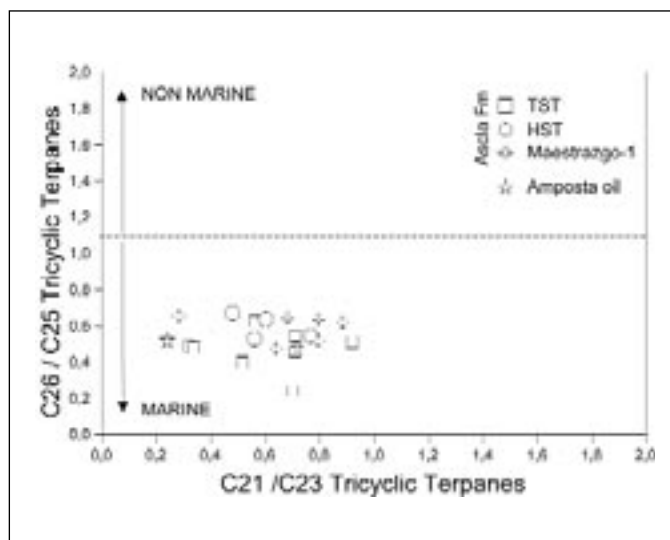


Fig. 5. Relación entre los terpanos tricíclicos C21/C23 y C26/C25. Todas las muestras se agrupan en el campo de origen marino

Fig. 5. Relationship between the C21/C23 and C26/C25 tricyclic terpanes ratios: all the samples are well grouped in the marine sector

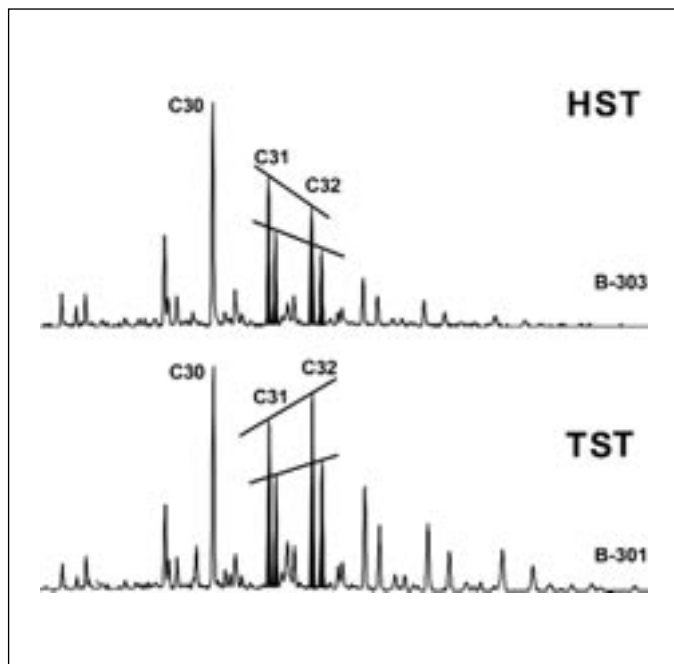


Fig. 6. Cromatogramas de masas (m/z 191) mostrando la predominancia de C32 sobre C31 en las muestras del cortejo transgresivo (TST). Esta predominancia se evidencia para ambos epimeros R y S Fig. 6. Detailed mass chromatograms (m/z 191) showing the predominance of C32 over C31 in samples from transgressive system tract (TST). This predominance exists for the two epimers R and S

medidos en la base de la formación (PRV=0.73%). Por otra parte, los colores de fluorescencia indican un estado de maduración dentro de la ventana del petróleo (Permanyer *et al.*, 1999).

### Biomarcadores

La distribución relativa de las series de homohopanos (C31 a C35) permite diferenciar dos grupos de muestras como se indica en la figura 6. Las muestras del TST presentan una dominancia del homohopano C32 sobre el C31, mientras que en el HST la dominancia es del C31 sobre el C32. Este cambio estaría relacionado con diferencias entre las poblaciones bacterianas de cada cortejo sedimentario (Fig. 7). Las composiciones isotópicas también reflejan diferencias en los dos cortejos sedimentarios (Fig. 8) con valores que se agrupan con la misma tendencia que el caso de las series de homohopanos.

Por otra parte, el aumento de diasteranos respecto los esteranos en el HST es significativo (Fig. 3). La presencia de diasteranos parece ser contradictoria en una etapa de sedimentación carbonatada predominante, pero el propio sistema progradante puede implicar una cierta contribución de arcillas de origen

terrigénico. Estas arcillas no estarían presentes durante la sedimentación del cortejo transgresivo.

La dependencia de Ts (18a(H)-trisorneohopano) del tipo de facies sedimentarias ha sido propuesta por numerosos autores y en particular su aumento sistemático en ciclos regresivos (Rangel *et al.*, 2000). La Fig. 3 muestra la razón Ts/Tm para el caso estudiado, con una disminución de la misma en el HST, mientras que la razón no varía en el TST.

La presencia de gammacerano se relaciona con ambientes carbonatados (Peters y Moldowan, 1993). En la formación del Mas d'Ascla el gammacerano muestra un aumento considerable en el HST si se compara con el TST. En contraste, el índice de gammacerano (gammacerano/C30 hopano) muestra un acentuado descenso en el HST (Fig. 3), que está en desacuerdo con el aumento del carácter carbonático del ciclo regresivo.

Otras relaciones entre biomarcadores, tales como C20/C23 tricíclicos, C29/C30 hopano o C23 tricíclico/C24 tetracíclico (Fig. 9), muestran también variaciones entre el cortejo transgresivo y el cortejo de nivel de mar alto.

### Modelización térmica

Los modelos de evolución térmica de cuencas sedimentarias implican varios factores tales como materia orgánica, generación de hidrocarburos, y duración de las etapas de migración y entrapamiento. La modelización de la evolución térmica necesita integrar la historia de enterramiento y los datos de paleotemperatura. Para obtener la historia de enterramiento de las unidades estratigráficas de una cuenca sedimentaria se procede por el método de *back stripping*, el cual consiste en ir descompactando hacia atrás en el tiempo cada una de las unidades estratigráficas (Steckler y Watts, 1978; Sclater y Christie, 1980). Para ello es necesario conocer las formaciones, edades, litologías, densidades, porosidades en superficie, factores de compactación, erosiones e hiatos. En los modelos térmicos, la temperatura a una determinada profundidad depende del flujo de calor en superficie y de una determinada conductividad térmica. La conductividad térmica es una función de la litología en aquellos casos en que la transferencia de calor se realiza mediante conducción. Estos modelos pueden ser aplicados sin problemas cuando no haya indicadores de perturbaciones térmicas causadas por flujo de fluidos, en cuyo caso deben hacerse las oportunas correcciones. El fundamento teórico de la modelización térmica se basa en el modelo cinético TTI (índice de tiempo temperatura) (Lopatin, 1971; Wapples, 1985).

**Parámetros de maduración utilizados como factores de restricción**

La reflectancia de la vitrinita es el indicador más extensamente utilizado en la modelización térmica. El incremento de la reflectancia de la vitrinita (%PRV) se considera directamente proporcional al incremento de la temperatura con el enterramiento y al tiempo de exposición a esa (Waples, 1980). Sin embargo, la vitri-

nita puede ser escasa o inexistente en sucesiones marinas, debiéndose emplear en estos casos otros indicadores. En la base de la formación se han medido valores de PRV=0.73%, el cual corresponde a una temperatura de enterramiento de 111°C según las equivalencias propuestas por Barker y Pawlewicz (1994).

La utilización de biomarcadores como parámetros de madurez está relacionada con el grado de isomeri-

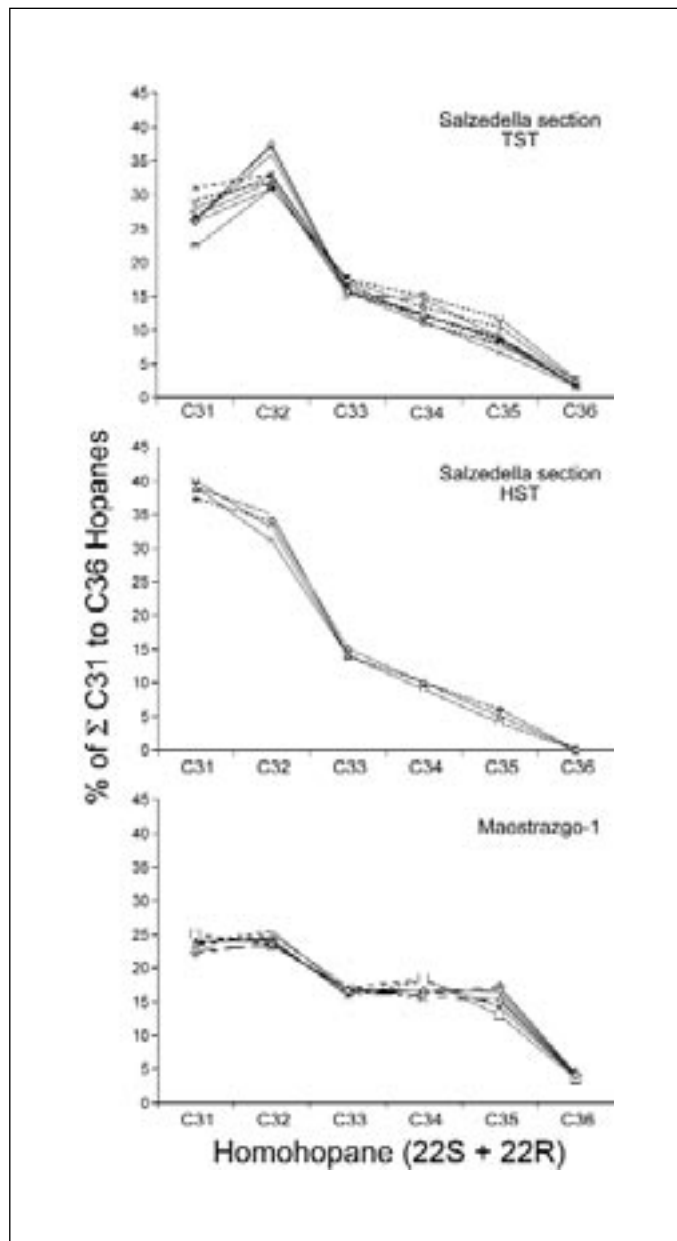


Fig. 7. Distribución de los homohopanos C31 a C35 en los cortejos TST y HST para las muestras de La Salzedella y para las muestras del sondeo Maestrazgo-1 (Càlig)  
 Fig. 7. Distribution of the C31 to C35 homohopanes of the TST and HST tracts for Salzedella section and Maestrazgo-1 samples

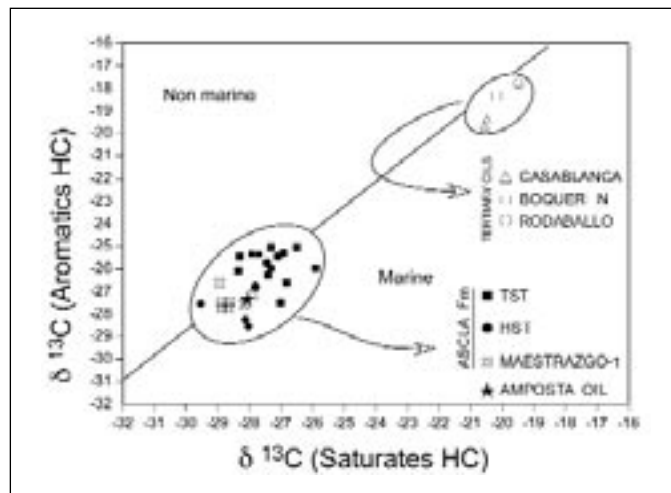


Fig. 8. Comparación de la composición isotópica de las muestras de la formación Ascla (corte de La Salzedella y sondeo Maestrazgo-1) con la del crudo de Amposta y la de los petróleos de origen terciario  
 Fig. 8. Isotopic composition of samples from the Ascla formation (the Salzedella section and Maestrazgo-1 well) compared with oils from the Amposta and Tertiary oil fields

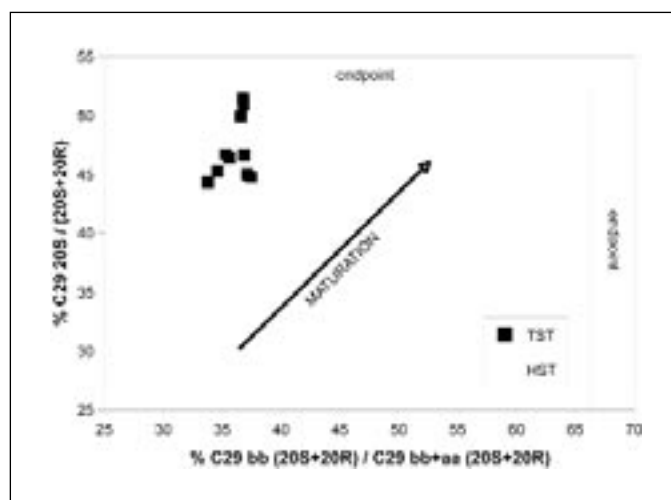


Fig. 9. Relación de isomerización de los esteranos regulares para las muestras de los cortejos transgresivos (TST) y de nivel de mar alto (HST)  
 Fig. 9. Regular steranes isomeration ratio from samples of the TST and HST tracts

zación de determinados hidrocarburos saturados. Las relaciones más frecuentemente utilizadas son  $20S/(20R+20S)$  y  $bb(20S+20R) / bb+aa(20S+20R)$  en C29 esteranos regulares y  $22S/(22R+22S)$  en hopanos. La isomerización de los esteranos puede ser utilizada para calcular los valores equivalentes de reflectancia de la vitrinita, tal como ha sido propuesto por Bein y Sofer (1987). Los datos de Tmax obtenidos a partir de la pirolisis *Rock-Eval* son de fácil y rápida obtención y constituyen una alternativa para calcular las temperaturas de enterramiento (Sweeney y Burnham, 1990; Espitalié *et al.* 1993). Sin embargo, puede quedar un cierto número de problemas en gran parte sin resolver como resultado de la dependencia de Tmax del tipo de querógeno que se trate (de origen marino, lacustre o terrestre). En nuestro caso los valores de Tmax obtenidos, entre 435 y 450, equivalen a  $PRV=0.7-1.0\%$ .

La isomerización de los C20 esteranos expresada por la razón  $bb(20S+20R)/bb+aa(20S+20R)$  respecto a  $20S/(20S+20R)$  disminuye hacia la parte alta de la formación (Fig. 9). La reflectancia equivalente de la vitrinita, calculada a partir del grado de isomerización de los esteranos C29 muestra valores de  $0.72\%-0.76\%$  (equivalentes a  $109-114^{\circ}\text{C}$  de temperatura de enterramiento) para la parte basal de la formación, hasta  $0.62-0.67\%$  hacia la parte superior. Los valores calculados para la parte basal son coincidentes con los valores medidos ( $0.73\%$ ) de reflectancia de la vitrinita para este tramo inferior (Permanyer *et al.*, 1999, 2000). De modo que existe una buena aproximación entre valores de reflectancia medidos y los equivalentes calculados a partir de biomarcadores.

### **Inclusiones fluidas y paleotemperaturas**

El estudio de las inclusiones fluidas presentes en los cementos de calcita de la formación Ascla ha proporcionado restricciones sobre la evolución térmica de esta formación (Rossi *et al.*, 2001). Las inclusiones fluidas han mostrado la existencia de una fase inicial de calentamiento durante el Cretácico, seguida por un enfriamiento durante el Paleógeno, relacionado con el posterior levantamiento e influencia de aguas meteóricas.

La temperatura máxima registrada por las inclusiones fluidas de la formación Ascla es de  $117^{\circ}\text{C}$ . Esta temperatura es, probablemente la máxima temperatura alcanzada por la formación Ascla si tenemos en cuenta que las inclusiones fluidas medidas están en calcita y que en este mineral la moda más alta para las temperaturas de homogeneización acuosas tiende a aproximarse a la temperatura más alta (Barker y Goldstein, 1990).

### **Modelo térmico**

El modelo térmico (Fig. 10) se ha realizado en una dimensión, asumiendo los postulados de Lopatin (1971) y Waples (1980, 1984, 1985, 1994). Se ha asumido también la ausencia de perturbaciones térmicas significativas del flujo de calor. De acuerdo con la evolución geológica de la cuenca se han considerado dos períodos con distinto gradiente geotérmico. El primero, de  $27^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , para la fase inicial de rifting (Jurásico superior-Cretácico inferior). El segundo, de  $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , para el final del rift y el inicio de la etapa de post-rift Albiense superior-Maastrichtiense. Además, se ha considerado una temperatura de superficie de  $15^{\circ}\text{C}$ .

El modelo térmico se ha calibrado para una reflectancia de vitrina de  $0.73\%$ , teniendo en cuenta, además, los valores de vitrinita equivalente deducidos de la isomerización de los C29 esteranos (hasta  $0.76\%$ ). Para ello, estos valores de vitrinita se han convertido a temperaturas usando las calibraciones empíricas propuestas por Barker y Pawlewicz (1994), obteniéndose una temperatura de  $111-114^{\circ}\text{C}$  para la parte inferior de la formación, y de  $97^{\circ}$  a  $104^{\circ}\text{C}$  para la parte superior. Además, se han tenido en cuenta los valores de paleotemperatura registrados por las inclusiones fluidas, incrementándose los valores anteriores hasta la temperatura máxima alcanzada por la formación de  $117^{\circ}\text{C}$  (Rossi *et al.*, 2001).

Del modelo térmico obtenido se desprende que la Fm Ascla entró en la ventana del petróleo a los 90 Ma (Turoniense), cuando fue enterrada a profundidades comprendidas entre 3-3,7 km. Actualmente se encuentra aun dentro de la ventana del petróleo, tanto en el afloramiento cercano a La Salzedella como en el sondeo Maestrazgo-1. En ambas localidades las columnas estratigráficas y las cargas litológicas serían similares después de haber sufrido la erosión post eocena superior (Fig. 11).

### **Generación de hidrocarburos y correlación con el campo del Amposta**

Los parámetros de madurez térmica indicados más arriba, muestran de forma inequívoca que la formación Ascla está en la ventana del petróleo. Este hecho no solamente se corrobora a través de los mencionados parámetros si no también por la presencia de hidrocarburos libres detectada en la formación Ascla en el sondeo Maestrazgo-1. La presencia de hidrocarburos libres en la porosidad de fractura de los niveles más carbonáticos de la formación Ascla en el mencionado sondeo, es una clara evidencia de la genera-



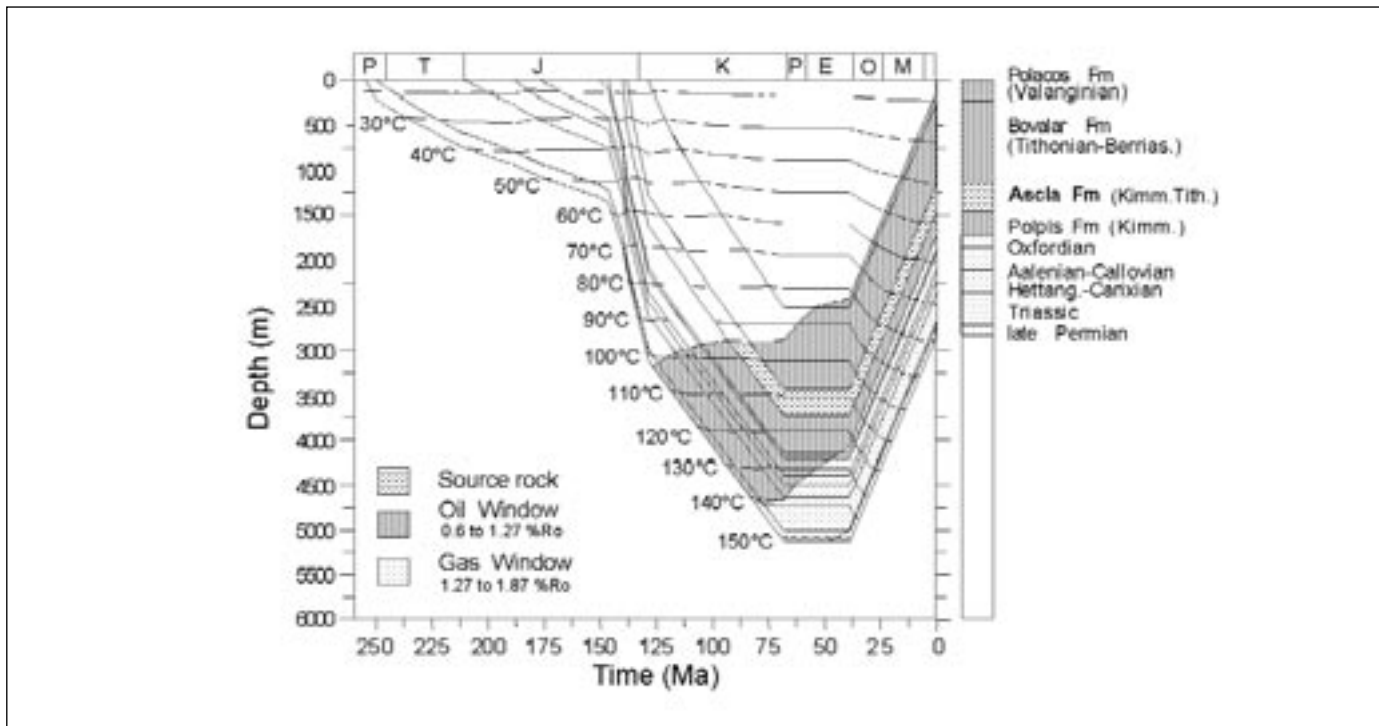


Fig. 10. Modelo de enterramiento y maduración térmica para la subcuenca de La Salzedella. La Fm Ascla entró en la ventana del petróleo a los 90 Ma (Turoniense), cuando fue enterrada a profundidades comprendidas entre 3-3,7 km y temperaturas de 108-117°C  
 Fig. 10. Burial and thermal model of the Salzedella sub-basin. The Ascla Fm starts in the oil window at 90 Ma (Turonian), when it was buried at depths between 3-3,7 km and 108-117°C

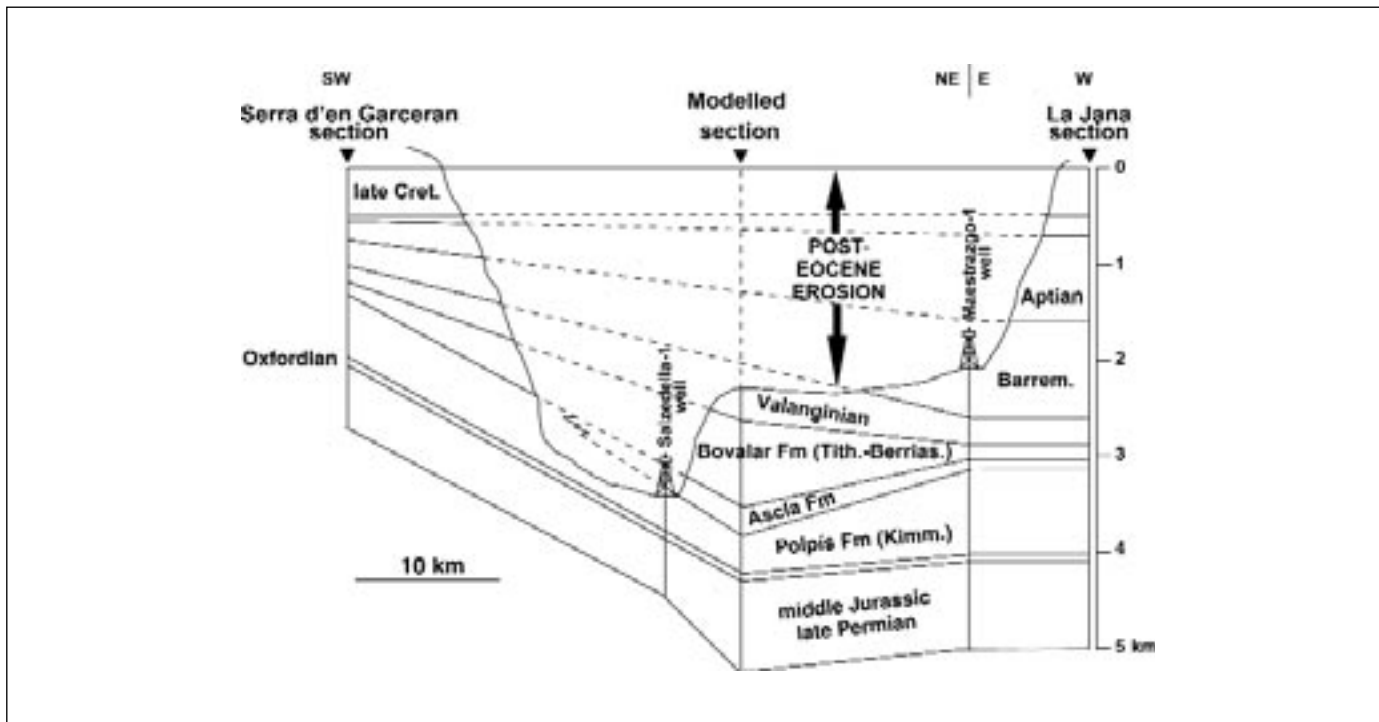


Fig. 11. Corte estratigráfico de correlación entre las secciones de la Serra d'en Galcerán y La Jana con indicación de la fuerte erosión post eocena superior ocurrida en el área de estudio consecuencia de la orogenia alpina  
 Fig. 11. Stratigraphic correlation between the Serra d'en Galcerán and La Jana sections. Note the strong post Eocene erosion that underwnt this area related to the Alpine orogeny

ción efectiva de petróleo. Estos hidrocarburos presentan las mismas características geoquímicas que los extractos obtenidos a partir de las muestras de afloramiento.

La posible contribución de la formación Ascla como roca madre del petróleo del campo de Amposta ha sido ampliamente debatida (Albaigés *et al.*, 1986; Seemann *et al.*, 1990; Seifert *et al.*, 1983). Recientemente, nuevos trabajos geoquímicos y petrográficos han puesto de manifiesto la existencia de un moderado potencial de la formación Ascla como roca madre de hidrocarburos (Permanyer *et al.*, 1999, 2000a; Rossi *et al.*, 2001). Sin embargo, la correlación de la formación Ascla con el crudo del campo de Amposta no ha sido demostrada de forma explícita hasta el momento.

Los valores isotópicos de los hidrocarburos saturados y aromáticos presentes en los extractos de la formación Ascla muestran una clara concordancia tanto con los valores obtenidos a partir de los hidrocarburos libres presentes en el sondeo Maestrazgo-1, como con el petróleo del campo de Amposta (Fig. 8). Estos valores, además, están de acuerdo con los proporcionados por Seemann *et al.* (1990) para el crudo de Amposta. Por otro lado, cuando se comparan las composiciones isotópicas de los extractos y crudo kimmeridgienses con las de los crudos de origen ter-

ciario de la cuenca de Tarragona, actualmente en producción (campos de Casablanca, Boquerón y Rodaballo), se observa una clara diferencia isotópica entre las muestras de uno y otro origen, las cuales se distribuyen en dos poblaciones bien diferenciadas (Fig. 2).

Los análisis isotópicos sobre n-alcenos y los isoprenoides pristano y fitano (GC-C-IRMS  $\delta^{13}C$ ) realizados en muestras de la formación Ascla, procedentes del sondeo Maestrazgo-1, y el crudo de Amposta, así como en los crudos de origen terciario, permiten distribuir las muestras que en dos grandes familias distintas: Kimmeridgiense y Terciario. La buena correlación entre el crudo de Amposta y la formación Ascla (Maestrazgo-1) significa que esta formación es muy plausiblemente la roca madre responsable de la generación del petróleo del campo de Amposta (Fig. 12).

### Implicaciones para el potencial petrolífero

Los resultados obtenidos por Rossi *et al.* (2001) indican que el petróleo efectivamente migró de la Fm Ascla, al menos para la sección de La Salzedella. Igual como más tarde se ha visto que también ocurre para el pozo Maestrazgo-1. Esta migración tuvo lugar cuan-

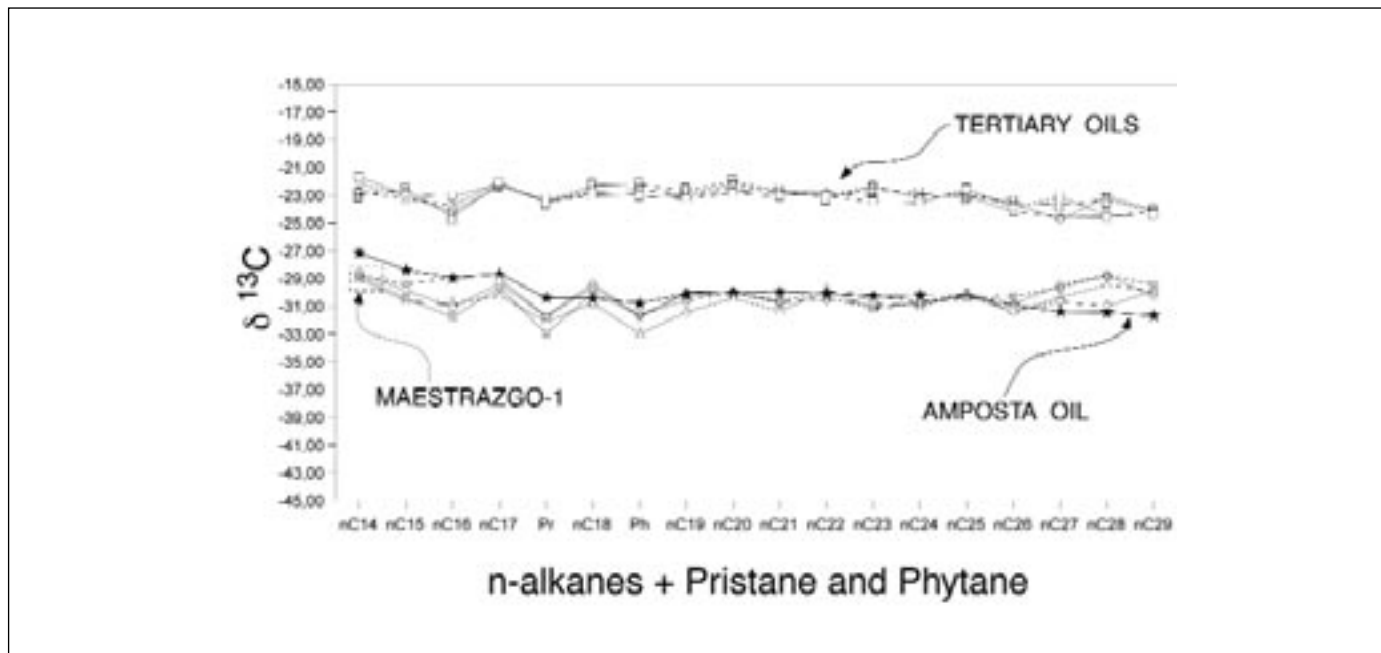


Fig. 12. Relación isotópica GC-C-IRMS  $^{13}C$  para las muestras del sondeo Maestrazgo-1 y de los petróleos de Amposta y de los de origen terciario. Dos familias aparecen claramente diferenciadas según su origen Terciario o Jurásico (Fm Ascla: Maestrazgo-1 y crudo de Amposta)

Fig. 12. GC-C-IRMS of Maestrazgo-1 well samples and Amposta and tertiary oils. Two groups appear clearly differentiated according to their respective origin: Tertiary and Upper Jurassic Ascla Fm, which include the maestrazgo-1 well and the Amposta field oil

do la formación alcanzó o estuvo cercana a su máxima profundidad de enterramiento y temperatura, muy probablemente durante el Cretácico superior-Terciario basal, pero antes del Eoceno superior (Fig. 10). De manera que la migración del petróleo ocurrió antes de la compresión alpina (Eoceno superior-Mioceno basal), la cual plausiblemente hubiera podido crear las trampas más evidentes y efectivas. Así, se puede afirmar que el potencial para la acumulación de petróleo en la subcuenca de La Salzedella es probablemente bajo (Fig. 1).

En el sector de La Salzedella la formación Ascla aflora y presenta un potencial de generación de petróleo residual y es en este sector donde la cuenca sufrió una importante erosión a partir del Eoceno superior, con el levantamiento general asociado a la orogenia alpina (Fig. 11). Por tanto sería razonable pensar que condiciones similares pudieron haber existido en la actual plataforma continental en el sector del campo de Amposta. Pero en esta área, a diferencia de la subcuenca de La Salzedella, la acumulación de grandes espesores de materiales miocenos pudo haber causado una segunda fase de generación de petróleo a partir de la Fm Ascla. Esta posibilidad vendría apoyada por el aumento del contenido orgánico del La Fm Ascla en los sondeos de la actual plataforma continental con respecto a los valores de los sondeos de tierra y la sección de La Salzedella. Así, se pasa de valores de TOC de 1,26% en la Salzedella a casi 2% en el sondeo Amposta Marino C3. Con lo cual parece confirmarse la existencia de una mayor capacidad de generación de petróleo de La Fm Ascla en las zonas ocupadas por la actual plataforma continental con respecto a las de tierra.

## Conclusiones

- 1) La materia orgánica de la formación Ascla es de origen marino, como evidencian los resultados de los análisis petrográficos y geoquímicos. En concreto, el porcentaje de los esteranos (%C27, C28, C29) y la relación de los terpanos tricíclicos prueban el origen marino de la formación.
- 2) Algunos biomarcadores, tales como los terpanos tricíclicos C20/C23, gammaceranos, hopanos C29/C30 y Ts/Tm, pueden ser considerados como buenos parámetros químicos para la caracterización de cortejos sedimentarios y litológicas.
- 3) Los cambios en la población bacteriana y por lo tanto las variaciones en hopanos, parecen estar claramente asociados con los ambientes sedimentarios. Los cambios en la columna de agua relacionados con los cortejos TST y HST dan lugar a

variaciones en la temperatura del agua, la población bacteriana y consecuentemente en la distribución de homohopanos. Se observa un marcado cambio en el modelo de distribución de homohopanos C31/C32 entre los cortejos TST y HST.

- 4) Del modelo térmico obtenido para el sector de la Salzedella-Càlig se desprende que la Fm Ascla entró en la ventana del petróleo a los 90 Ma (Turoniense), cuando fue enterrada a profundidades comprendidas entre 3-3,7 km. Actualmente se encuentra aun dentro de la ventana del petróleo, tanto en los afloramientos cercanos a La Salzedella como en el sondeo Maestrazgo-1 (Càlig).
- 5) Los datos isotópicos obtenidos a partir de hidrocarburos aromáticos y saturados muestran una estrecha correlación entre los extractos de muestras de roca madre de la Fm Ascla y del crudo del campo de Amposta. Esta signatura isotópica se confirma por los resultados obtenidos del análisis GC-C-IRMS  $\delta^{13}\text{C}$  de los hidrocarburos presentes en la Fm Ascla del sondeo Maestrazgo-1 y el crudo del campo de Amposta. De este modo, se puede concluir que la Fm Ascla es la roca madre del campo de Amposta situado en la plataforma continental.

## Agradecimientos

Este trabajo es una contribución a los proyectos de investigación: PB98-1260-C02-01, BTE2000-0574-C03-01 y BTE2000-0574-C03-02. Estamos agradecidos a M. Sibila por su asistencia técnica en los análisis de la materia orgánica. Finalmente, debemos manifestar nuestra gratitud a la compañía REPSOL-YPF por las facilidades obtenidas en el muestreo de los sondeos de petróleo estudiados.

## Referencias

- Albaigés, J., Algaba, J., Clavell, E., y Grimalt, J. 1986: Petroleum geochemistry of the Tarragona Basin (Spanish Mediterranean offshore). *Organic Geochemistry*, 0:441-450.
- Bádenas, B., Aurell, M., Pérez-Urestri, I. y Delvene, G. 1998: Estratigrafía y evolución sedimentaria del Oxfordiense superior-Titónico inferior en Ricla (Zaragoza). *Geogaceta*, 24: 35-38.
- Barker, C. E. y Goldstein, R. H. 1990: Fluid inclusion technique for determining maximum temperature and its comparison to the vitrinite reflectance geothermometer. *Geology*, 18:1003-1006.
- Barker, Ch. E. y Pawlewicz, M. J. 1986: The correlation of vitrinite reflectance from thermal histories and peak

- temperatures. In: P. K. Mukhopadhyay y W. G. Dow (eds): *Reevaluation of vitrinite reflectance*. American Chemical Society Symposium Series, 570:216-229.
- Bein, A. y Sofer, Z. 1987: Origin of oils in Helez region, Israel - Implications for exploration in the Eastern Mediterranean. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 71:65-75.
- Espitalié, J., Deroo, G. y Marquis, F. 1985-1986: La pyrolyse Rock Eval et ses applications. *Rev. Inst.Fran.Petrol.*, Part I (1985), 40:563-578; Part II (1985), 40:755-784; Part III (1986), 41:73-89.
- Espitalié, J., Marquis, F. y Drouet, S. 1993: Critical study of kinetical modeling parameters. In: A.G.Dorée *et al.*, (eds): *Basin Modeling: Advances and Applications*. Amsterman, Elsevier, 233-242.
- Espitalié, J. y Drouet, S. 1992: Petroleum generation and accumulation in the Aquitain Basin (France). In: A.M.Specer (ed): *Generation, accumulation and production of Europe's hydrocarbons*. Spec. Publ. EAPG, Springer Verlag, 127-147.
- Lopatin, N. V. 1971: Temperature and geologic time as factors in coalification. *Izvestiya Akademii Nauk URRS, Seriya Geologicheskaya*, 3:95-106
- Permanyer, A., Marfil, R., de la Peña, J. A., Dorronsoro, C. y Rossi, C. 1999: Potencial petrolífero de la formación Margas de Mas d'Ascla (Jurásico superior) en la Cuenca del Maestrazgo. *Actas II Cong. Ibér. Geoquím.*, Lisboa, 199-202.
- Permanyer, A., Marfil, R., Salas, R., de la Peña, J.A., Dorronsoro, C. & Rossi, C. 2000a: Materia orgánica y diagénesis de la formación de margas del Mas d'Ascla (Jurásico superior) de la cuenca del Maestrazgo (Cadena Ibérica oriental). *Geogaceta*, 28:117-120.
- Permanyer, A., Salas, R. y Marfil, R. 2000b: Organic geochemistry and sequence stratigraphy: an example in the Kimmeridgian-Tithonian from the Maestrat Basin (Eastern Iberian Chain, Spain). *Proceedings of 7th Latin-American Congress on Organic Geochemistry*, (Foz do Iguaçu, Brasil), p.265-268.
- Permanyer, A., Salas, R. y Rossi, C. 2001: Contribution of Organic Geochemistry to integrated studies on Sedimentary Basin Evolution. *III Congreso Ibérico de Geoquímica, VIII Congreso de Geoquímica de España, Zaragoza-2001*. M.Lago, E.Arranz & C.Galé (eds.), pp.113-125.
- Peters, K. y Moldowan, M., 1993: *The biomarkers guide. Interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments*. Prentice Hall, New Jersey, 363 p.
- Rangel, A., Parra, P. y Niño, C. 2000: The La Luna formation: Chemostratigraphy and organic facies in the Middle Magdalena Basin. *Organic Geochemistry*, 31:1267-1284.
- Rossi, C., Goldstein, R. H., Marfil, R., Salas, R., Benito, M. I, Permanyer, A., de la Peña, J. A. y Caja, M. A., 2001: Diagenetic and oil migration history of the Kimmeridgian Ascla formation, Maestrat basin, Spain. *Marine and Petroleum Geology*, 18:287-306.
- Slater, J. M. y Christie, P. A. F. 1980: Continental stretching: an explanation of the post Mid-Cretaceous subsidence of the central North Sea basin. *Journal of Geophysical Research B*, 85: 3711-3739
- Salas, R., 1989: Evolución estratigráfica secuencial y tipos de plataformas de carbonatos del intervalo Oxfordiense-Berriasiense en las cordilleras Ibérica oriental y costero catalana meridional. *Cuadernos de Geología Ibérica*, 13:121-157.
- Salas, R. y Casas, A. 1993: Mesozoic extensional tectonics, stratigraphy, and crustal evolution during the Alpine cycle of the eastern Iberian basin. *Tectonophysics*, 228:33-55.
- Salas, R. y Guimerà, J. 1996: Main structural features of the Lower Cretaceous Maestrat Basin (Eastern Iberian Range). *Geogaceta*, 20(7):1704-1706.
- Salas, R., Guimerà, J., Mas, R., Martín-Closas, C., Meléndez, A. y Alonso, A. 2001: Evolution of the Mesozoic Central Iberian Rift System and its Cainozoic inversion (Iberian Chain). In: P.A. Ziegler, W. Cavazza, A.F.H. Robertson & S. Crasquin-Soleau (eds), *Peri-Tethys Memoir 6: Peri-Tethyan Rift/Wrench Basins and Passive Margins. Mémoires du Muséum national d'Histoire naturelle*, 6:145-185.
- Seemann, U., Pümpin, V. F. y Casson, N. 1990: Amposta oil field. In: *AAPG Treatise of Petroleum Geology, Atlas of oil and gas fields. A-017*, p. 1-20.
- Seifert, W. K., Carlson, R. M. K. y Moldowan, J. M. 1983: Geomimetic synthesis, structure assignment and geochemical correlation application of monoaromatized petroleum steroids. In: *Advances in Organic Geochemistry 1981*, 710-724.
- Steckler, M. S. y Watts, A. B. 1978: Subsidence of the Atlantic-type continental margin of New York. *Earth and Planetary Science Letters*, 41: 1-13
- Sweeney, J. J. y Burnham, A. K. 1990: Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. *A.A.P.G. Bull.*, 74:1559-1570.
- Waples, D. W. 1980: Time and temperature in petroleum formation: application of Lopatin's method to petroleum exploration. *A.A.P.G. Bull.*, 64:916-926.
- Waples, D. W. 1984: Thermal models for oil generation. In: J. Brooks & D. Welte (eds): *Advances in Petroleum Geochemistry*, Volume 1:7-67. London, Academic Press
- Waples, D. W. 1985: *Geochemistry in Petroleum Exploration*. Internat. Human Resourc. Develop. Corp., Boston, 232 p.
- Waples, D. W. 1994: Maturity modeling: thermal indicators, hydrocarbon generation and oil cracking. In: L.B. Magno & W.G. Dow, eds., *The petroleum system - from source to trap. A.A.P.G. Memoir 60*:285-306.

Recibido: Junio 2002

Aceptado: Diciembre 2002