

CAMPAMENT DE GEOLOGIA D'HIDROCARBURS

Sistemes petrolers de la Conca
Basco-Cantàbrica



Curs 2021-2022

Professorat: Patricia Cabello i Alberto Sáez

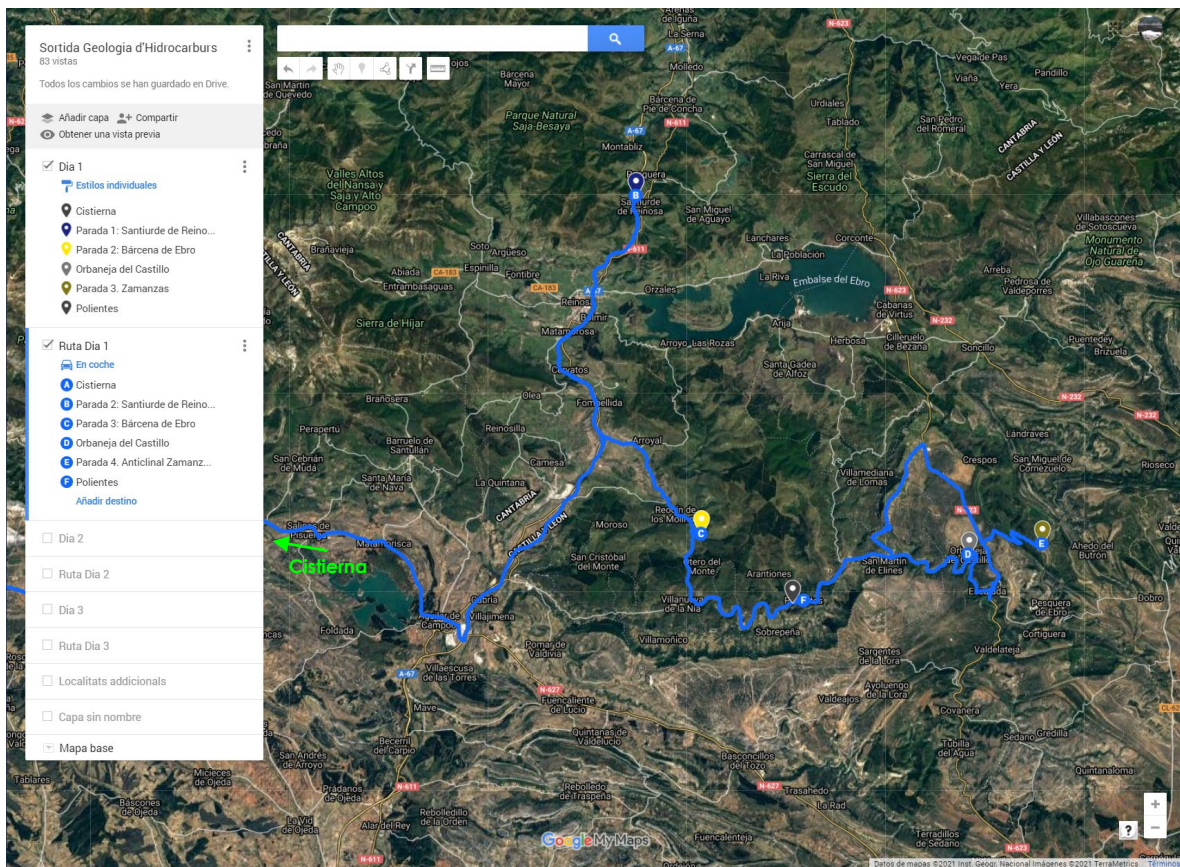
*Guia i sortida preparades amb el suport de
Jorge Navarro (CEPSA) i Lluís Cabrera (UB)*

Programa

Divendres 1 d'octubre

Cistierna – Hontomín – Santiurde de Reinosa – Bárcena de Ebro – Zamanzas – Polientes

- ▶ **Sortida 9:00h:** Viatge des de Cistierna a Hontomín
- ▶ **Parada 1: Santiurde de Reinosa.** Roca mare (Juràssic Inferior)
- ▶ **Parada 2: Bárcena de Ebro.** Roca reservori i segell (Juràssic Superior – Cretaci Inferior)
- ▶ **Orbaneja del Castillo.** Descans. Carstificació del les unitats cretàiques superiors.
- ▶ **Parada 3: Zamanzas.** Indicis de cru al Weald (Cretaci inferior)



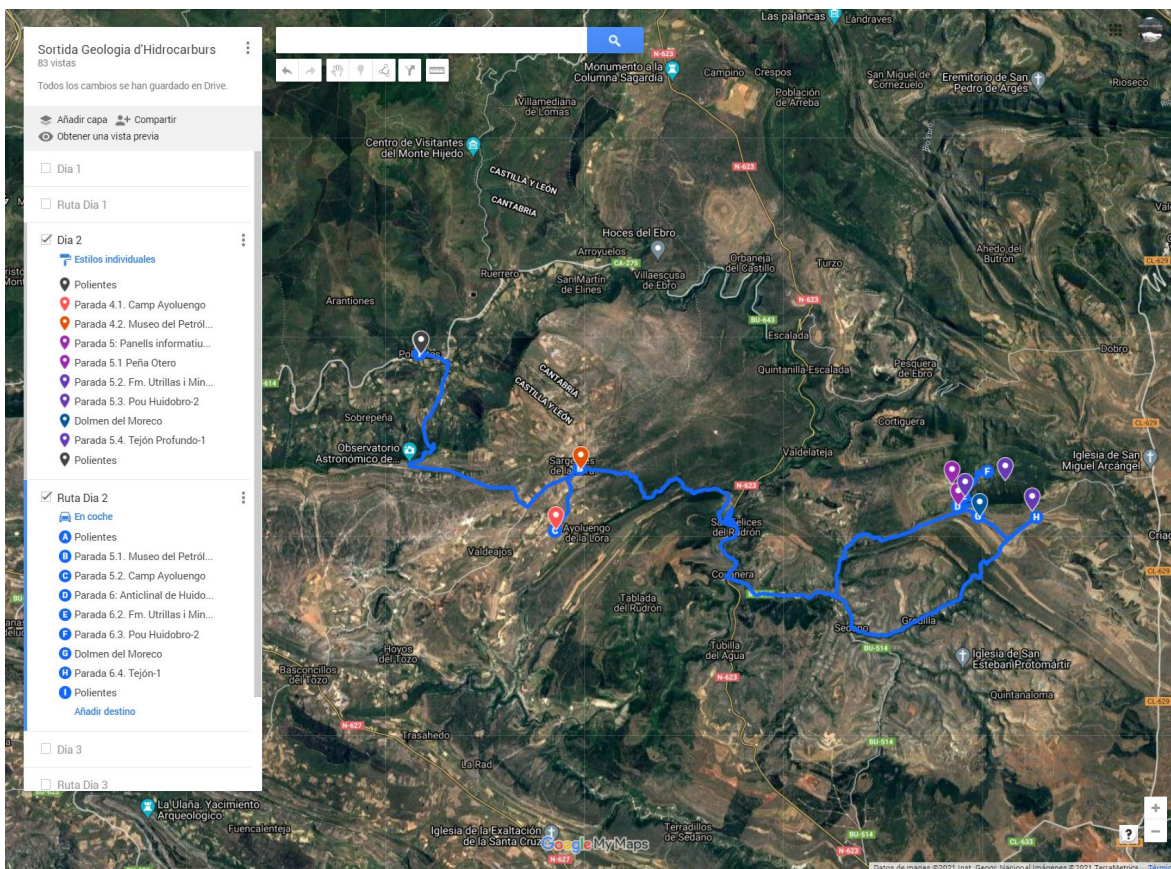
Dissabte 2 d'octubre

Polientes – Sargentos de la Lora – Huidobro – Polientes

- ▶ **Sortida 9:00h:** Viatge des de Polientes a Sargentos de la Lora
- ▶ **Parada 4: Ayoluengo.**
 - ▶ **Parada 4.1: Camp d'Ayoluengo.** Visita a les instal·lacions del camp
 - ▶ **Parada 4.2: Museo del Petróleo**
- ▶ **Parada 5: Huidobro.**
 - ▶ **Parada 5.1: Panells informatius de Huidobro.** Estructura del *play* i història de l'exploració
 - ▶ **Parada 5.2: Peña Otero.** Vista de paisatge de l'estructura anticlinal
 - ▶ **Parada 5.3: Fm. Utrillas (reservori quan hi ha segell) i Mina (malaquita i atzurita).**
 - ▶ **Parada 5.4: Pou Huidobro-2**

Opcionals:

- ▶ **Dolmen del Moreco**
- ▶ **Parada 5.5. Pou Tejón Profundo-1**



Diumenge 3 d'octubre

Polientes – Hontomín? – Barcelona

- ▶ **Sortida 9:30h:** Viatge des de Polientes fins a Barcelona. Opcionalment parada a Hontomín.

INTRODUCCIÓ

La conca Basco-Cantàbrica (CBC) ha estat l'àrea més important per a l'exploració d'hidrocarburs en la Península Ibèrica. Molts anys d'exploració d'aquesta regió han contribuït al desenvolupament d'una extensa base de dades (e.g. cartografia, sísmica, dades de pou, anàlisis geoquímics) i a un coneixement geològic en profunditat de les unitats estratigràfiques i de l'estructura de la conca. En aquesta regió, el sistema petrolier ha estat provat i s'han explotat hidrocarburs en diversos camps. A *onshore*, s'ha produït cru i gas associat al camp d'Ayoluengo, gas al camp de Castillo, i també s'han fet diversos descobriments no comercials, com Huidobro, Zamanzas i Cadialso. A *offshore*, els camps de Gaviota i Albatros han produït gas i condensats des del 1981.

A més a més, és a l'estructura d'Hontomín (parada opcional) on es va establir la Planta de Desenvolupament Tecnològic per l'emmagatzematge de CO₂ al subsòl, en el marc de la Fundació Ciudad de la Energía (CIUDEN; <http://www.enos-project.eu/consortium/fundaci%C3%B3n-ciudad-de-la-energ%C3%ADa-ciuden/>).

Context regional de la conca Basco-Cantàbrica (CBC)

La CBC correspon al sector occidental dels Pirineus, que es troba separat de la resta de la serralada per la falla de Pamplona (Fig. I.1). Limita al nord amb el Golf de Biscaia, al oest amb la Zona Cantàbrica i al sud amb les conques cenozoiques de l'Ebre i del Duero.

El reblliment sedimentari de la conca, majoritàriament Mesozoic i Terciari, assoleix els 15000 m de potència en les zones més subsidents. El registre estratigràfic inclou roques sedimentàries dipositades en ambients continentals, marins somers i marins profunds (Pujalte, 1974, 1976; Rat, 1988; Alonzo-Zarza et al., 2002; Aurell et al., 2002 i 2003; Martin-Chivelet, 2002; Barnolas i Pujalte, 2004; Quesada et al., 2005) (Fig. I.2), i reflecteix tres estadis principals d'evolució de la conca després de l'orogènia herciniana (Fig. I.3):

- a) Etapa de rift continental durant el Triàsic;
- b) Rift i obertura del Golf de Biscaia durant el Cretaci inferior;
- c) Orogènia alpina a partir del Cretaci superior.

El basament paleozoic de la CBC es troba preservat per sota de les unitats mesozoiques, i aflora al massís Asturià cap a l'oest i massís Basc a l'est. El registre estratigràfic del paleozoic i l'evolució de l'orogènia herciniana ha estat objecte de la sortida de camp prèvia de l'assignatura de Geologia Històrica i Regional.

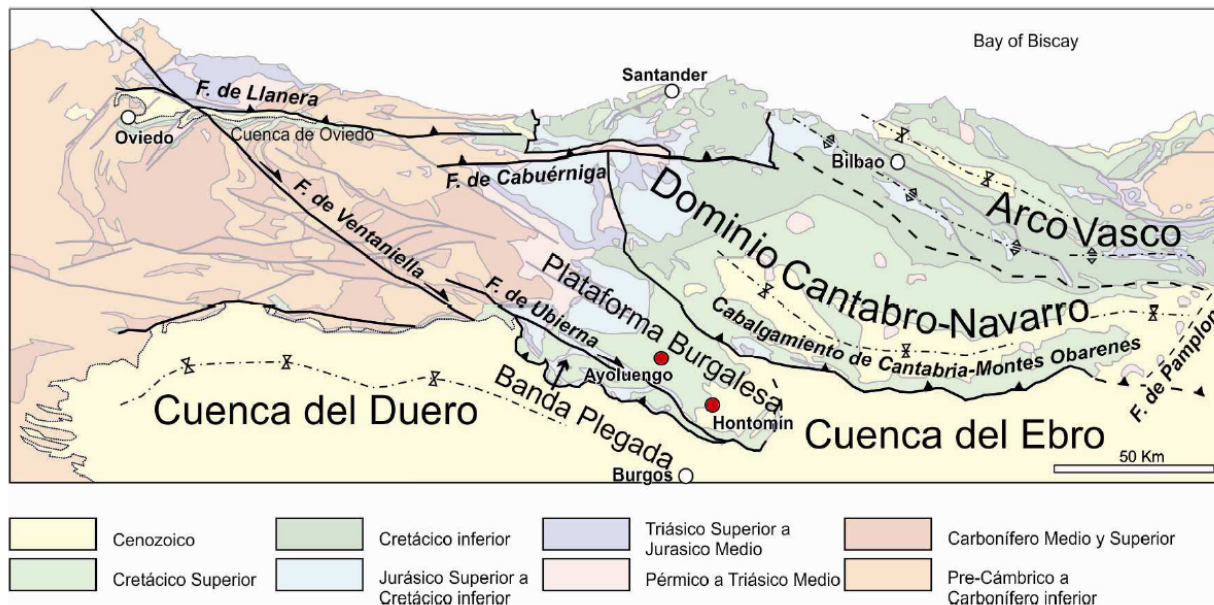


Figura I.1. Mapa del nord de la Península Ibèrica amb la localització de les unitats estructurals principals. La conca Basco-Cantàbrica s'estén des de la Serralada Cantàbrica al W, fins a la falla de Pamplona al E, i és el sector occidental dels Pirineus. La zona visitada a la sortida de camp s'inclou dins de l'anomenada *Plataforma Burgalesa*, que és part de la conca Basco-Cantàbrica. La localització del Camp d'Ayoluengo i d'Hontomín són indicades al mapa. Modificat de Quintà (2013).

L'evolució Mesozoica–Cenozoica de l'àrea es pot dividir en les següents etapes tectono-sedimentàries (Fig. I.3):

1. Etapa de rift continental (Permo-Triàsic): Correspon a un període d'extensió post-hercinià, on la subsidència és controlada per transtensió associada a falles sinistres de *strike-slip* d'orientació NW – SE (García-Mondéjar et al., 1996). Es produeix l'erosió dels relleus hercïnians recentment formats. El registre sedimentari d'aquest període es caracteritza per deposició en medis terrestres, marins (associats a polsos transgressius) i transicionals. Inclou les facies Buntsandstein (fins a 1000 m de potència), Muschelkalk (fins a 100 m de potència) i Keuper (potència desconeguda, degut al moviment de la sal per tectònica salina), i roques volcàniques associades.

2. Etapa d'inter-rift (Lias–Dogger): Etapa d'activitat tectònica reduïda o absent que coincideix amb un període de transgressió a escala global. La conca esdevé part d'un mar epicontinental que cobria gran part de l'oest d'Europa. Els gruixos estratigràfics registren variacions que indiquen subsidència diferencial (Robles et al., 1988; Quesada et al., 1991). Els sediments corresponents a aquest període són marins, majoritàriament carbonats d'ambients somers que evolucionen a sediments marins hemipelàgics.

La successió estratigràfica d'aquesta etapa s'inicia amb un tram transgressiu caracteritzat per la deposició en un ambient supramareal d'anhidrites i dolomies (Hettangià; Fm. Puerto de la Palomera), seguit per la sedimentació de carbonats marins soms (Sinemurià; Fm. Sopeña); la potència total d'aquest interval és d'uns 230 m. Durant el Juràssic Inferior (Pliensbaquià – Toarcià), la sedimentació continua amb la deposició d'una alternança de calcàries i margues negres, amb un contingut molt elevat de matèria orgànica i amb abundants fòssils que actuarà com la principal roca mare de la regió (Fm. Camino i Castillo Pedroso; i també conegudes com San Andrés). Aquest interval té uns 100 a 150 m de potència.

La sedimentació marina continua durant el Juràssic Mig, amb la deposició de margues i calcàries margoses (200 a 350 m de potència). El final d'aquesta etapa es caracteritza per un període d'erosió i/o no sedimentació, que queda enregistrat per una discordança regional.

3. Etapa de rift (Malm – Cretaci Inferior): Durant el final del Juràssic i principis del Cretaci té lloc l'inici del rift associat a la obertura del golf de Biscaia, i suposa el segon estadi extensiu a la conca. Durant aquest període té lloc una reestructuració paleogeogràfica completa amb patrons de sedimentació influenciats per tectònica salina (Serrano i Martínez del Olmo, 1990) (Figs. 1.2 i 1.4A).

A la zona d'estudi, es diferencien tres dominis paleogeogràfics: al sud, un sector marginal amb escàs registre sedimentari, localitzat al cinturó de plecs de Montorio; un sector central, caracteritzat per dues zones subsidents, Polientes i Sedano, separades per l'alt estructural d'Ayoluengo; i el tercer sector al nord, corresponent a l'alt anomenat Pantano del Ebro.

Durant els estadis inicials d'aquesta etapa de rift (Juràssic superior), la taxa de subsidència va excedir la taxa de sedimentació donant lloc a ràtios sorra-argila baixes (7-40%). El reblliment sedimentari d'aquest període inclou les facies Purbeck (de potència variable entre 1000 i 2000 m) corresponents a dipòsits al·luvials, fluvials, lacustres i marins soms amb cossos de gresos que actuaran com a reservori principal (Pujalte, 1976, 1989a, b) i que resten sobre una discordança que els separa de la sèrie del Juràssic Inferior i Mig. Per sobre, resten les facies Weald, amb gruixos de fins a 1000 m, i que inclouen dipòsits al·luvials o fluvials siliciclàstics (Pujalte, 1974, 1979, 1982), on les ràtios sorra-argila augmenten relativament. En alguns *plays* de la regió també s'han descrit com a potencial roca reservori. Ambdues unitats estan separades per una discordança regional associada a un pols tectònic.

4. Etapa de trencament i deriva (Cretaci Mig – Cretaci Superior): Etapa corresponent al final del rift. Durant l'Aptià – Albià es defineixen dos marges de conca deposicionals separats, el marge Ibèric i l'Europeu. El primer és el marge sud i es correspon a les àrees del Duero i Ebro, i l'altre es localitza a l'anticlinori del nord de Biscaia; ambdós estan separats per un solc a l'àrea de Bilbao. Es dipositen sediments continentals en les àrees marginals (Fm. Escucha i equivalents), que passen cap a conca a dipòsits de plataforma carbonatada i de talús (García-

Mondéjar et al., 1996, 2004, 2005) (Fig. I.2). El solc que separa els dos marges és reblert per dipòsits marins profunds.

Posteriorment (Albià superior – Cenomanià inferior), amb la finalització del rift té lloc l'expansió de la sedimentació i els dispositius carbonatats són substituïts per sedimentació siliciclàstica, des de facies continentals i deltaïques (Fm. Utrillas, fins a 250 m de potència, roca magatzem secundària) fins a facies flysch (Fig. I.2).

Finalment, del Cenomanià superior al Maastrichtià, es registra un cicle transgressivo-regressiu (Fms. Olleros de Pisuerga, Villaescucha, Nidáguila, Nocado, Tuerces, Quintanaloma i Valdeur; Floquet, 1998), on domina la sedimentació carbonatada primer i posteriorment augmenta l'entrada de sediment clàstic.

5. Etapa de marge actiu (final del Cretaci superior – Eocè superior) i etapa orogènica (Eocè superior – Miocè): Durant aquesta etapa el marge nord de la Península Ibèrica esdevé un marge actiu. La configuració paleogeogràfica és similar a la de l'etapa anterior fins després de la transgressió de l'Eocè inferior. A partir d'aquell moment, l'activitat tectònica s'intensifica i els dispositius deposicionals terrígens es desplacen cap a mar. Finalment i durant l'etapa orogènica, la tectònica en règim de compressió dona lloc a la formació de cinturons de plecs i encavalcaments que són àrea font de conques sintectòniques (Fig. I.4B). La conca del Duero, situada al sud, esdevé la conca d'avantpaís en la zona d'estudi.

La configuració actual de la CBC a la zona del campament es pot observar al mapa de la Fig. I.5 i als talls de la Fig. I.6.

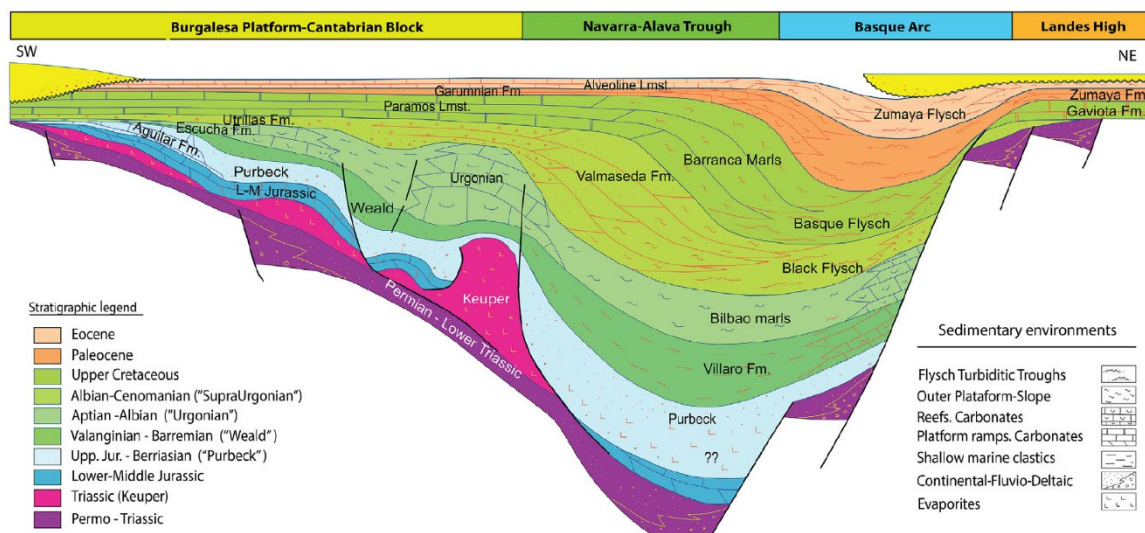


Figura I.2. Tall sedimentari de la conca Basco-Cantàbrica on s'indiquen les seqüències genètiques i ambients sedimentaris. Font: Cámara (2017).

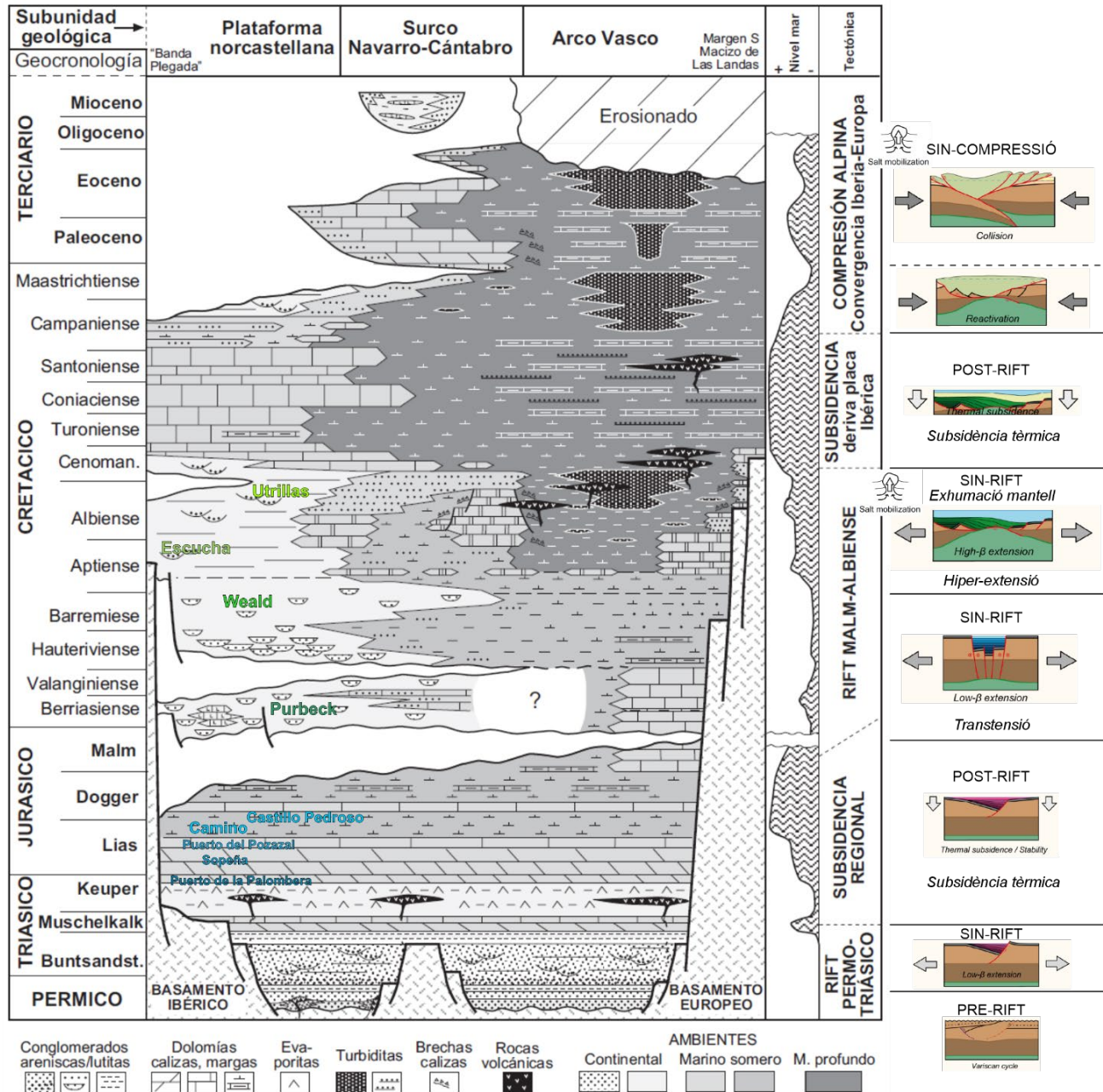
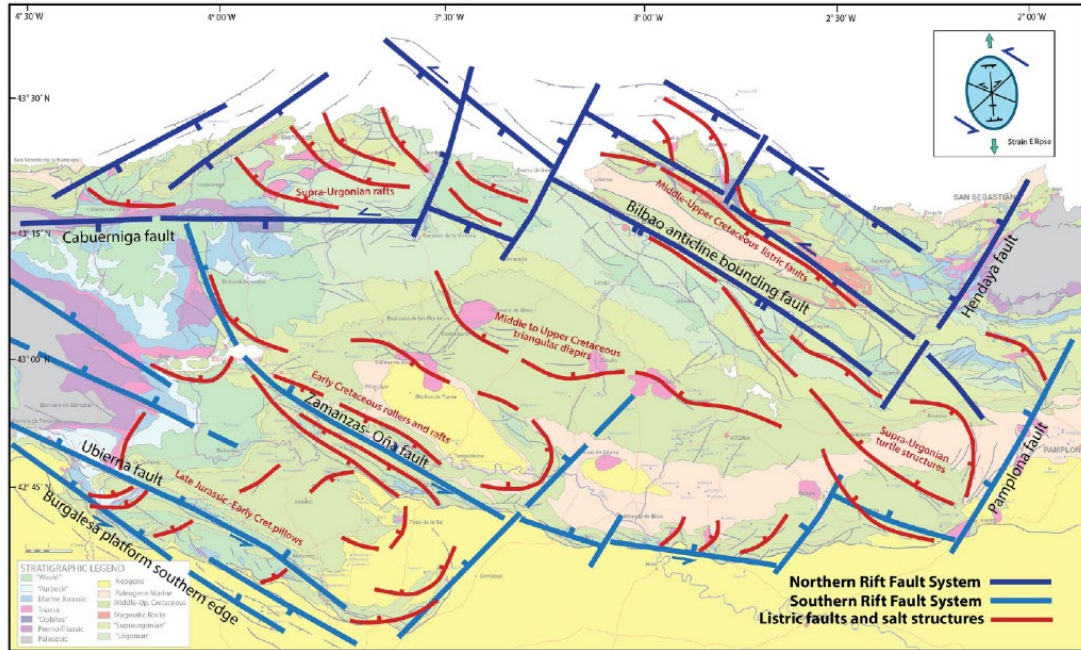


Figura I.3. Esquema cronostatigràfic simplificat de la successió Mesozoica i Terciària de la conca Basco-Cantàbrica (modificat de Barnolas y Pujalte, 2004). A la dreta s'indiquen les etapes tectòniques principals definides a la regió (modificat de Miró, 2020).

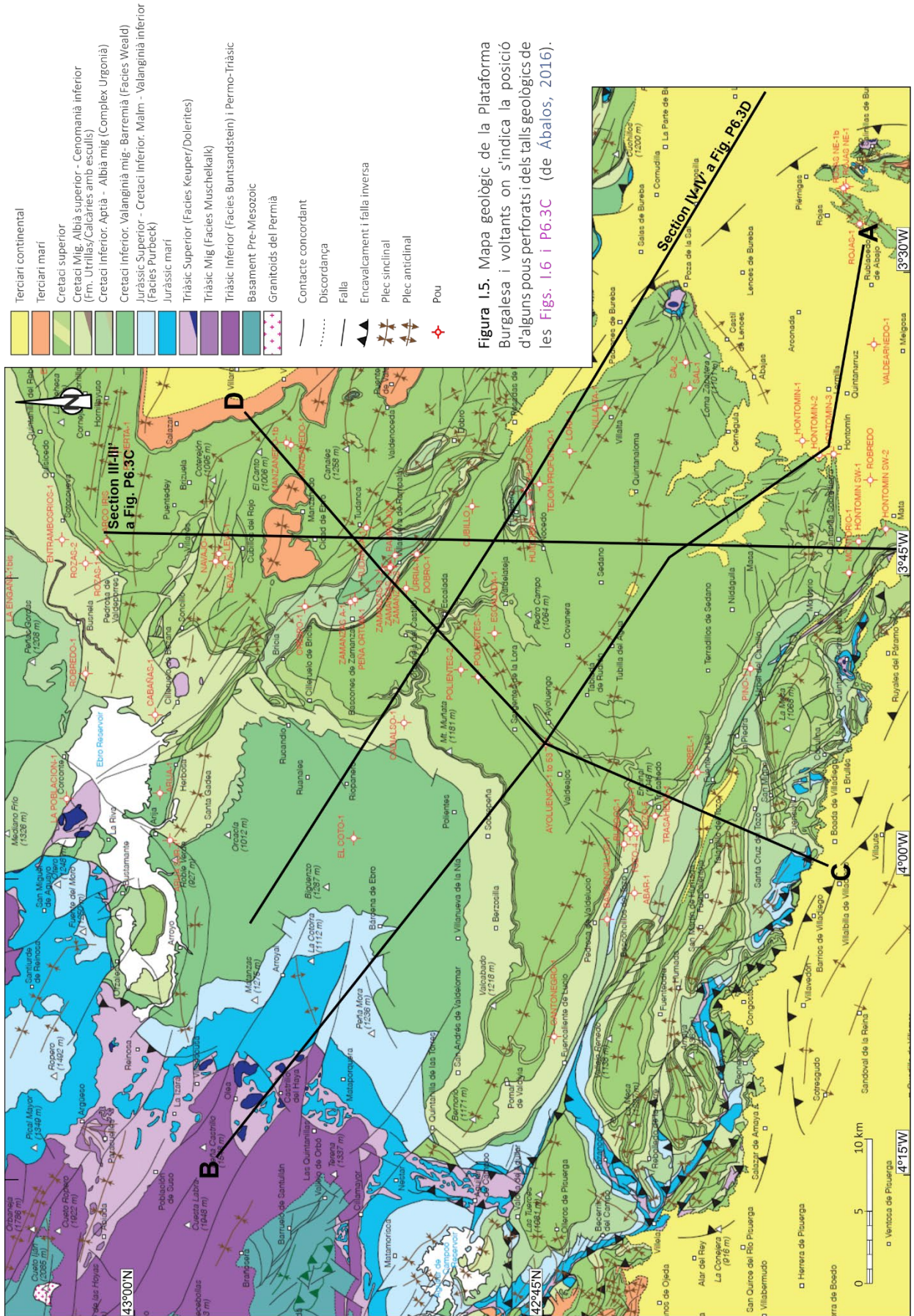
Late Jurassic-Early Cretaceous rift stage



After Tertiary compression



Figura I.4. Patrons estructurals de la Conca Basco-Cantàbrica durant el rift principal en el Juràssic superior – Cretaci Inferior, i després del Terciari (de Cámara, 2017).



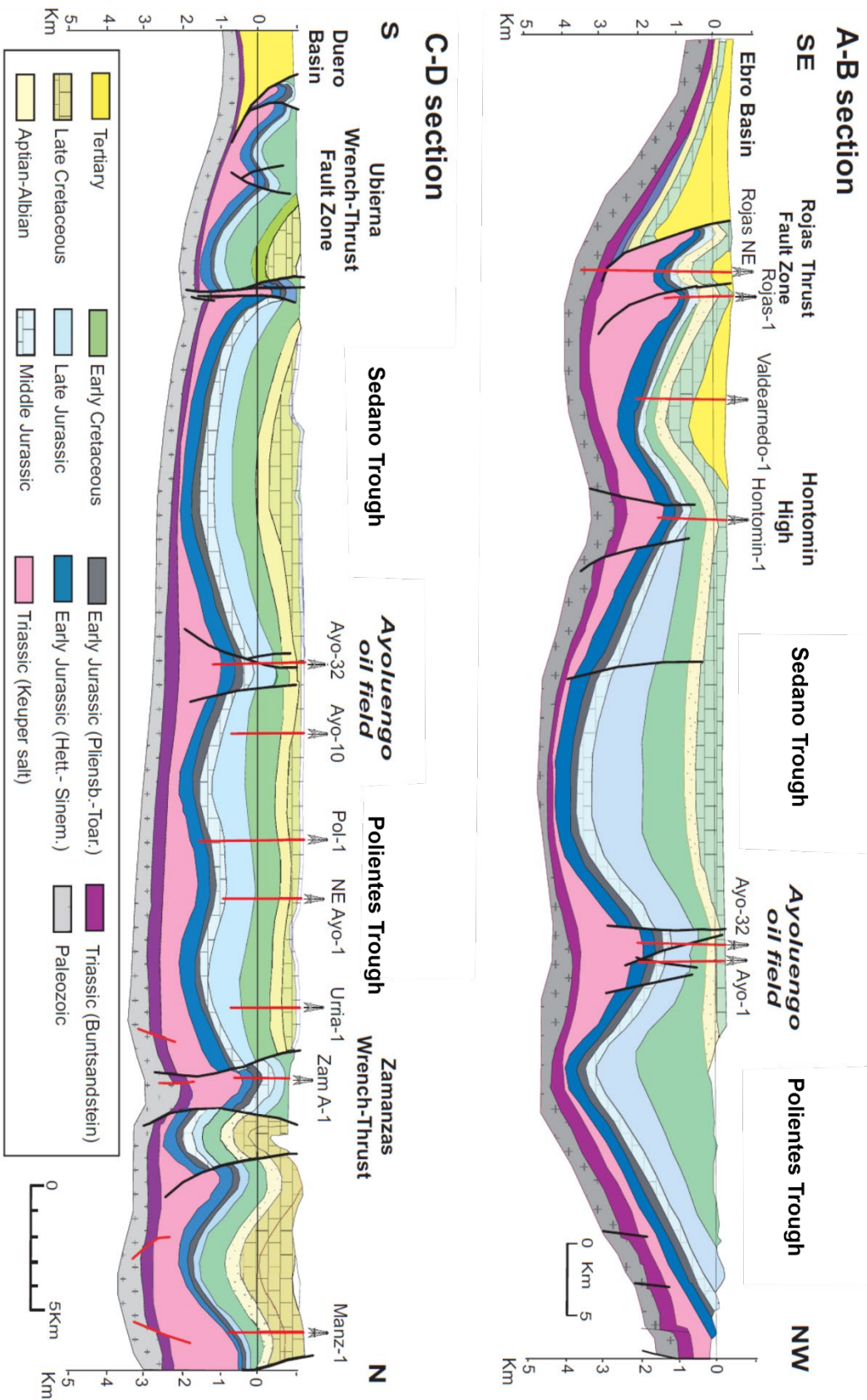


Figura 1.6. Tallis geològics que mostren l'estil estructural de la zona SW de la conca Basco-cantàbrica i dels *plays* visitats. Veure la seva posició a la [Fig. 1.5](#) (de Beroiz i Permanyer, 2011).

Columna estratigràfica del camp d'Ayoluengo i voltants

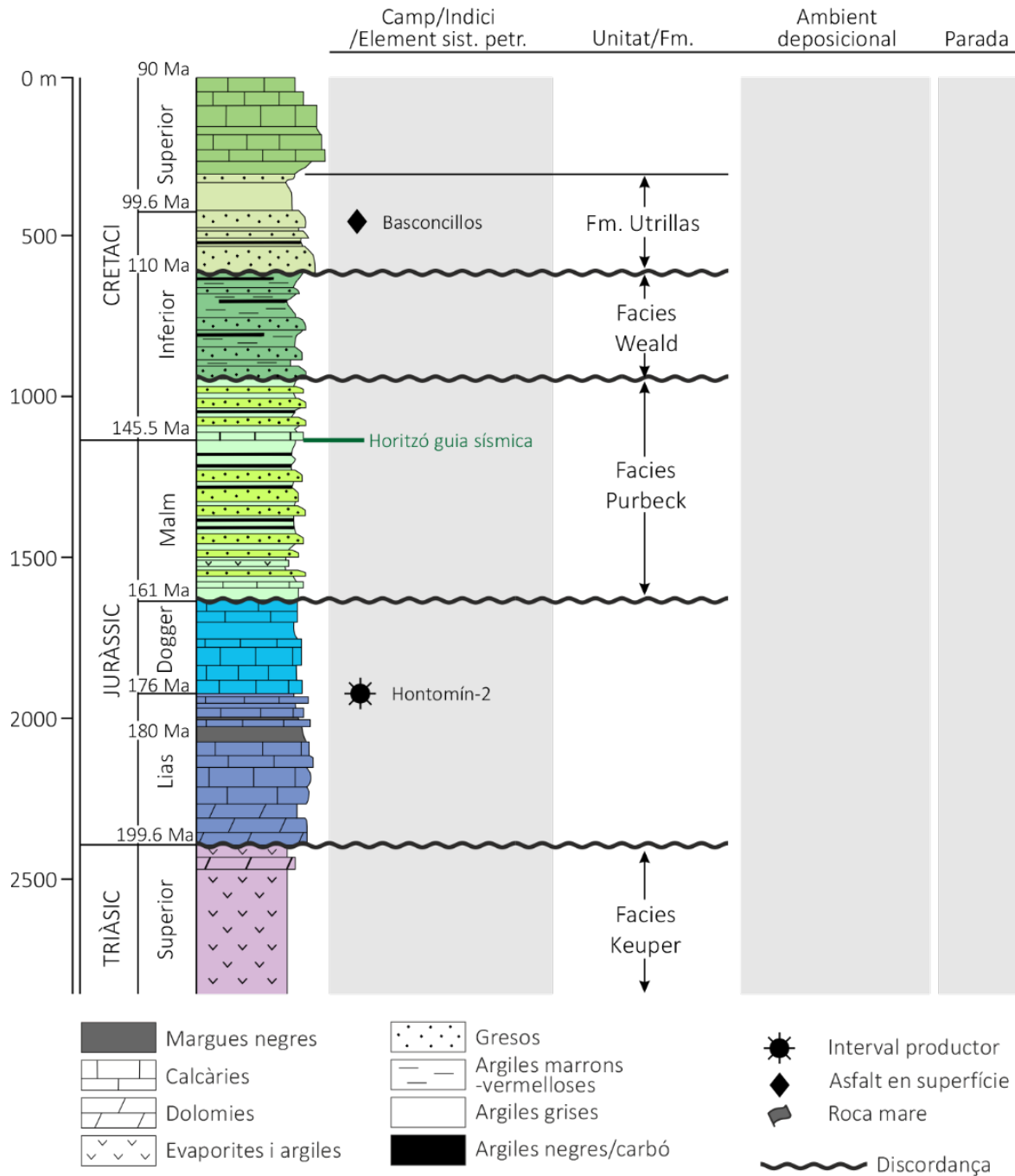


Figura I.7. Successió estratigràfica del camp d'Ayoluengo i voltants, on es mostren les unitats visitades en les parades de la sortida de camp. S'indiquen també les posicions estratigràfiques de les sorres al·fàtiques (*tar sands*) a Basconcillos del Tozo (al SW del camp d'Ayoluengo, no visitat) i del descobriment d'Hontomín (Hontomín-2), així com l'horitzó guia corresponent al mapa d'isòbates de la Fig. P5.2. Modificat de Navarro (2016a).

EXERCICI: Cal completar els espais en gris amb les informacions proporcionades i les observacions realitzades a les parades.

Elements del sistema petroler del sector SW de la CBC

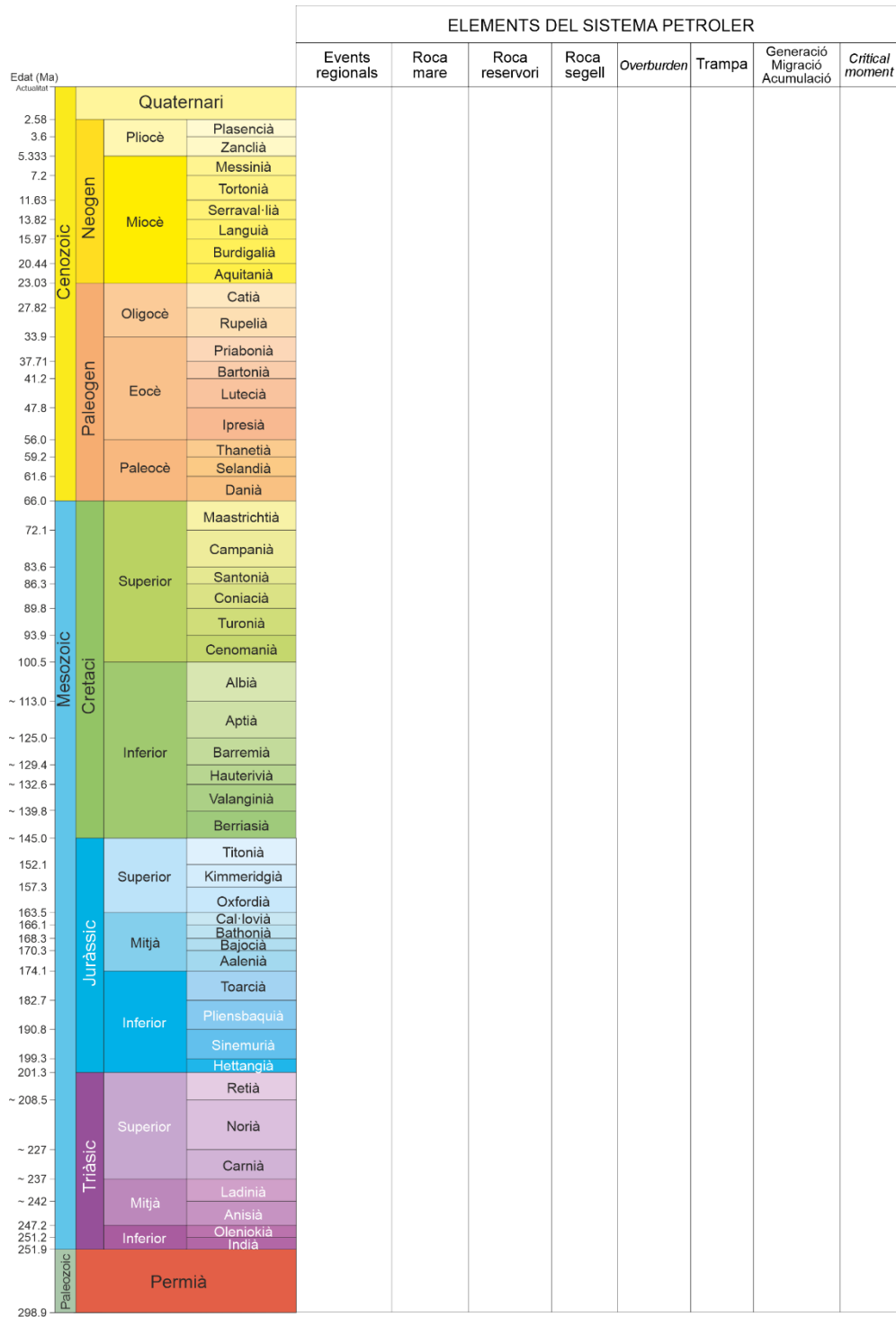


Figura 1.8. Diagrama dels elements del sistema petroler pel sector SW de la conca Basco-Cantàbrica.

EXERCICI: Cal completar el diagrama amb les informacions proporcionades i les observacions realitzades a les parades. Afegiu la llegenda dels events regionals a la dreta del quadre.

ITINERARI DIA 1

PARADA 1. Santiurde de Reinosa

Localització: 43°04'08.22"N; 4°05'14.33"W; Sortida 144 de A-67.

Objectiu:

- ✓ Observar i discutir les característiques de la roca mare principal a la regió
- ✓ Maduració i generació d'hidrocarburs

Roca mare: La successió estratigràfica del Lias a la CBC està constituïda principalment per sediments carbonatats que alternen amb alguns nivells siliciclàstics. El Liàsic mostra patrons sedimentaris uniformes en totes les parts de la conca, encara que amb importants variacions de gruix (315 - 630 m), indicatius de subsidència diferencial (Fig. P1.1). Aquestes condicions de dipòsit de la sedimentació relativament uniforme de carbonat són molt similars a les d'altres conques ibèriques o de l'Atlàntic Nord.

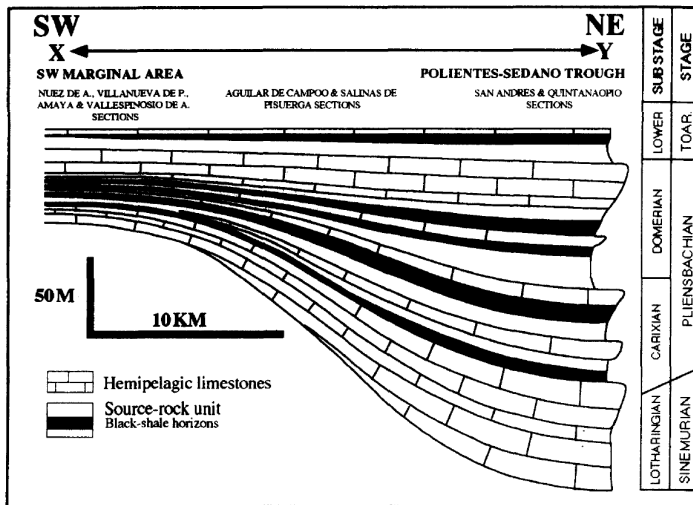


Figura P1.1. Tall simplificat que mostra la successió estratigràfica del Liàsic inferior (Lotaringià-Toarcià) al sector SW de la conca Basco-Cantàbrica. Es pot observar com el gruix estratigràfic augmenta cap al solc de Polientes-Sedano (de Quesada et al., 1997).

La successió està constituïda per dues unitats principals (Fig. P1.2), que es poden seguir al llarg de tota la conca (Quesada et al., 1991; 1993). La unitat inferior (Hettangià-Sinemurià inferior), de 250 – 350 m de potència, està constituïda per carbonats marins poc profunds, i passa verticalment a una unitat transgressiva hemipelàgica (Lotaringià-Toarcià). Al seu torn, la unitat superior es subdivideix en dues unitats litostratigràfiques (Fig. P1.2):

- 1) Unitat dominantment carbonatada (Lotaringià), de 10-90 m de potència, formada per l'alternança de lutites carbonatades, *wackestones* esquelètics, calcàries margoses i margues (Fm. Puerto del Pozazal);
- 2) Unitat dominada per margues (Pliensbaquià-Toarcià), de 55 a 190 m de potència, que presenta intercalacions de calcàries, margues riques en matèria orgànica i *black*

shales (Fms. Camino - Fig. P1.3 - i Castillo Pedroso). En les *black shales*, la matèria orgànica es distribueix làmines separades entre sí per làmines més gruixudes de llim molt fi o argila que passen a carbonat, quars i feldspat, juntament amb il·lita, pirita i clorita accessòries. La laminació en aquests dipòsits pot ser interrompuda per petites traces fòssils (majoritàriament *Planolites* i *Chondrites*). S'han identificat també ammonites, belemnits, petits bivalves, foraminífers bentònics, braquiòpodes i ostracodes. Les *black shales* suggereixen l'ocurrència de condicions d'aigües de fons anòxiques o quasi anòxiques formades en depressions durant la seva sedimentació (Quesada et al., 1997).

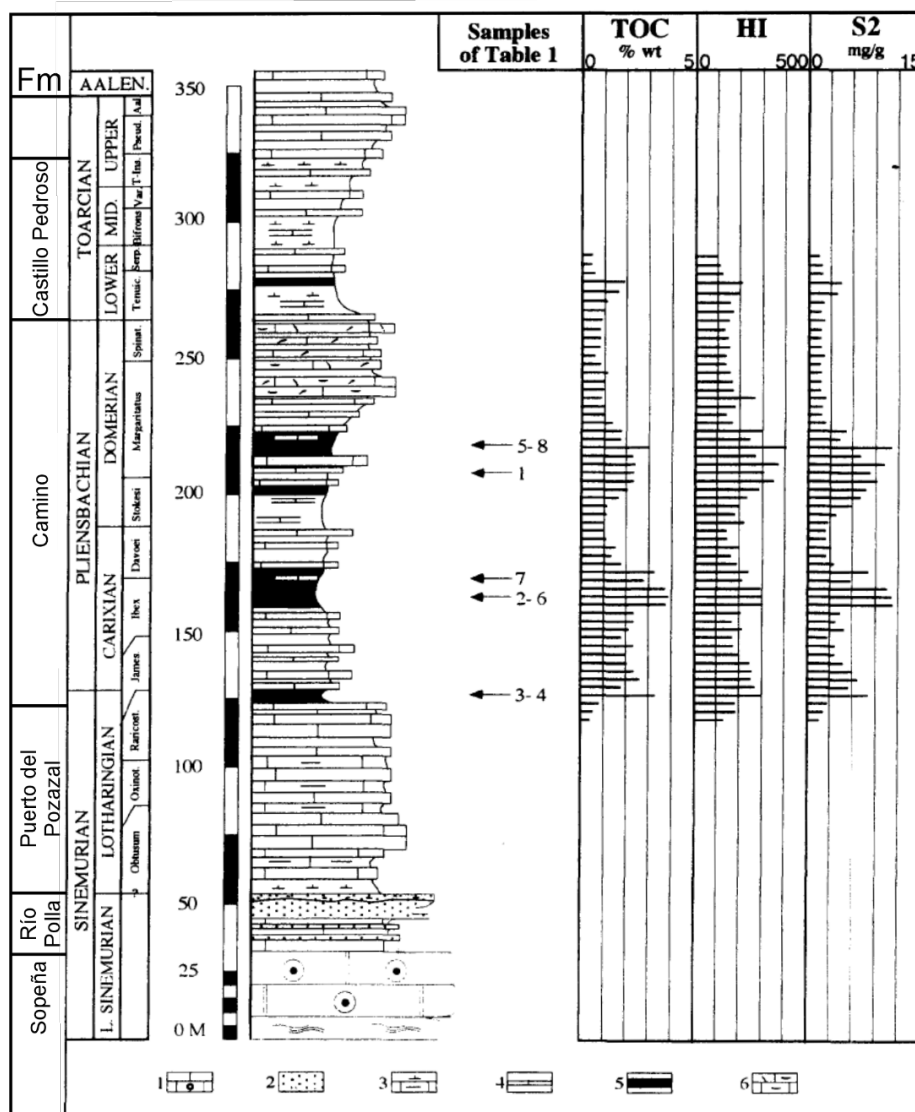


Fig. 4. Type-section and geochemical logs (with average values) of the Lotharingian-Toarcian succession in the Polientes-Sedano Trough. 1: shallow-marine limestones; 2: siliclastic sandstones and calcarenites; 3: interbedded limestones and marls; 4: interbedded limestones and organic marls; 5: black shales; 6: bioclastic limestones (modified after Quesada and Robles, 1995; ammonite biostratigraphy after Braga et al., 1988 and Comas-Rengifo et al., 1988).

Figura P1.2. Successió estratigràfica tipus del Liàsic Inferior on s'indiquen els valors de **TOC**, **HI** i **S2** mitjans obtinguts dels anàlisis geoquímics a partir de mostres de diferents afloraments representatius de la regió. Modificat de Quesada et al. (1997).



Figura P1.3. A) Aflorament de Santiurde de Reinosa on aflora part de la successió del Liàsic inferior (Fm. Camino; Pliensbaquià) a la sortida 144 de A-67. B) Detall on s'observa una alternança de capes de calcàries i margues negres.

Des d'un primer moment, diversos autors van considerar la possibilitat que aquests sediments liàsics que afloraven a la zona poguessin ser la principal roca mare del petroli d'Ayoluengo i de tota la regió (Quesada et al., 1997; Beroiz i Permanyer, 2011; Permanyer et al., 2013). Això donat que: (1) el Liàsic està estratigràficament per sota dels jaciments i indicis de petroli de la regió; i (2) els trams dipositats en condicions anòxiques són similars a d'altres zones d'Europa on generen petroli i jaciments ben coneguts.

Les anàlisis geoquímiques d'un tram de fins a 190 m de potència de la unitat del Pliensbaquià-Toarcià mostren alts continguts de matèria orgànica susceptible de donar hidrocarburs: valors mitjans de [TOC](#) per sobre del 1% i màxims del 8.7%; valors mitjans d'[índex d'hidrogen \(HI\)](#) entre 100 i 400 mgHC/g i màxims de 760 HCmg/g; i valors mitjans de [S₂](#) de 56.5 mgHC/g (Quesada et al., 1997, Fig. P1.2).

També, la comparació de les molècules orgàniques i de la composició isotòpica d'aquests sediments organògens i les del cru i aigües de formació d'Ayoluengo i Hontomín indiquen un origen marí i una gran similitud entre elles (Quesada et al., 1997, Permanyer et al., 2013). Ambos [querògens](#), el de la roca mare i el del jaciment d'Ayoluengo són de tipus II (o I-II) (Fig. P1.4).

Maduració i generació de cru: Els models d'enterrament (Beroiz & Permanyer, 2011) obtinguts per la roca mare de Juràssic inferior als depocentres de Sedano i Polientes (exemple pel pou de Cadialso-1, Fig. P1.5, i localització a les Figs. I.5 i P1.6) indiquen que la roca mare entra a la finestra del cru ($Ro > 0.5$) al Cretaci inferior (130 Ma), amb l'inici de la generació de cru en aquesta edat ([Transformation Ratio, TR](#) 10%). La principal fase de generació de cru ([TR](#) de 25-65%) va tenir lloc una mica més endavant (120-100 Ma), també

durant el Cretaci inferior. En aquest temps, la roca mare en els depocentres de la conca va ser enterrada a profunditats entre els 3500 i 4500 m. En la actualitat, la roca mare es troba a la finestra de generació de gas en aquesta posició de la conca, i estaria esgotada (TR 100%) i localment sobremadurada (T_{max} 478°C a San Andrés, Fig. P1.4B; Quesada et al., 1997).

En contrast, en l'estructura de Ayoluengo (així com en els marges de la conca; Fig. P1.6), el Juràssic inferior va ser sotmès a un enterrament menor que en els solcs de Polientes i Sedano. Addicionalment, el gruix estratigràfic d'aquesta roca mare era també menor que al centre de la conca (Fig. P1.1). Així, en aquest alt estructural relatiu i en els marges de conca, l'inici de la generació de cru (TR 10%) va requerir més temps i es va donar al Cretaci superior (84 Ma) pel cas d'Ayoluengo, concretament; la fase principal de generació de cru (TR 25-65%) va ser entre el Cretaci superior i el Paleogen (72-40 Ma) (Fig. P1.5). En l'actualitat, la roca mare a Ayoluengo es trobaria dins de la finestra de generació de cru (TR 80%), i en els marges de la conca, encara seria immadura (T_{max} < 435°C; Fig. P1.4B).

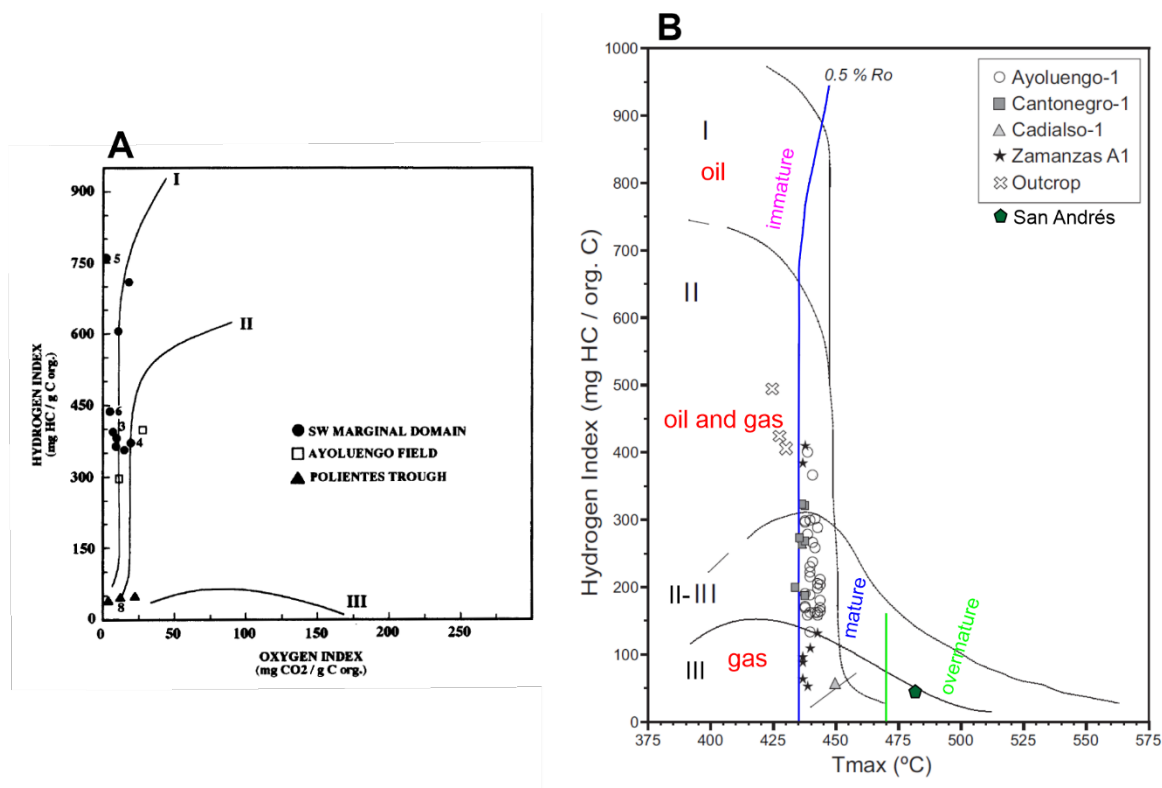


Figura P1.4. A) Diagrama [índex d'hidrogen \(HI\)](#) vs [índex d'oxigen](#) per mostres representatives de les margues negres del Lias provinents del marge SW de la conca (*SW marginal domain*), del centre de conca (*Polientes trough*) i del cru del camp d'Ayoluengo (*Ayoluengo field*) (Font: Quesada et al., 1997). B) Diagrama [índex d'hidrogen](#) vs T_{max} també per mostres de les margues negres del Lias provinents d'aflorament (*Outcrop*), representatius d'una posició al marge SW de conca, i del subsòl en diverses localitats (Ayoluengo, Cantonegro, Cadialso i Zamanzas) (Font: Beroiz i Permanyer, 2011). S'indica també la posició que li correspondria a una mostra analitzada del sector de San Andrés (centre del solc de Polientes), d'acord a les T_{max} publicades a Quesada et al. (1997).

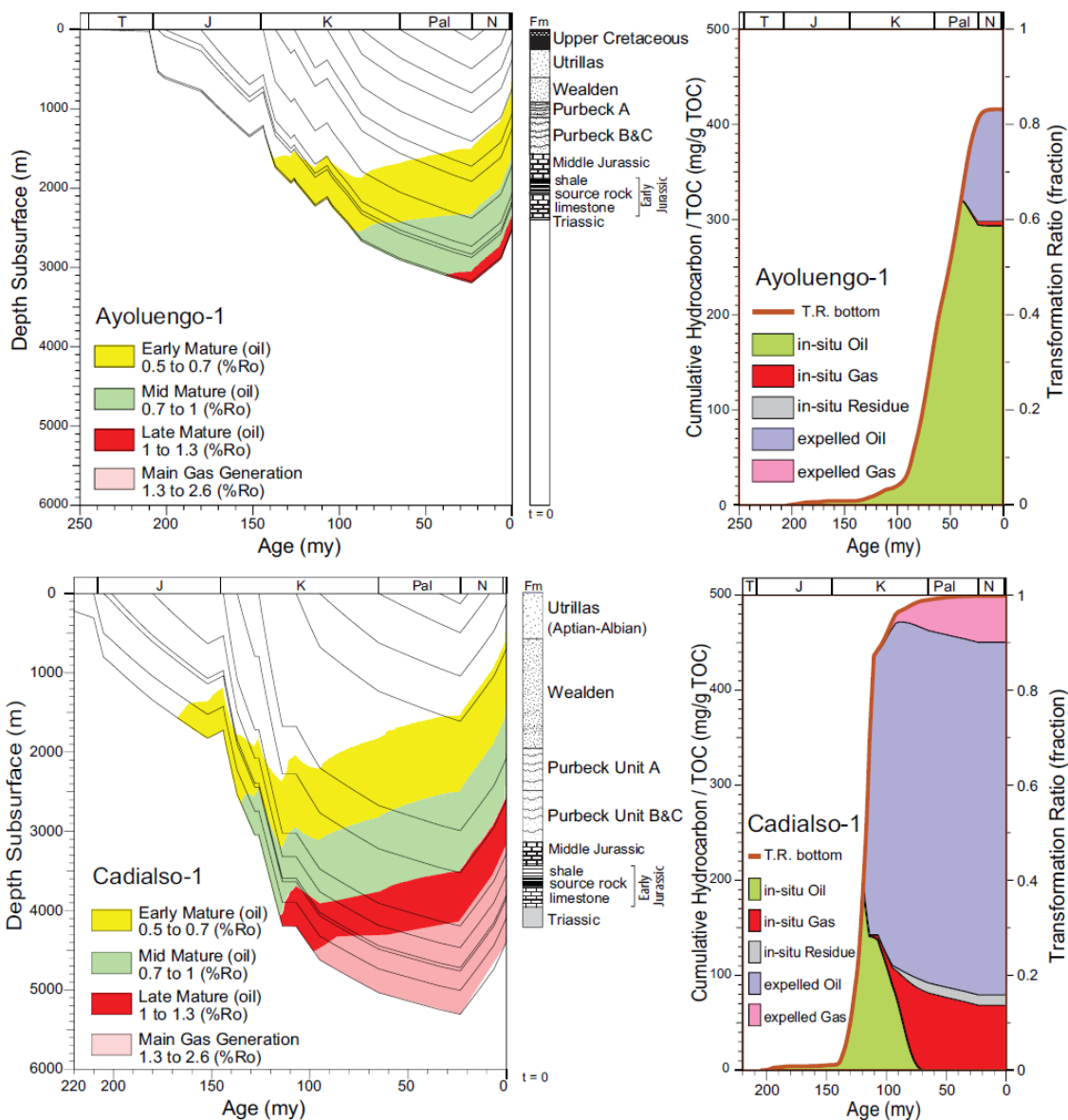


Figura P1.5. Corbes d'enterrament, volum acumulat d'hidrocarburs i [transformation ratio](#) obtinguts a partir de la modelització de conques 1D en dos pous: el pou Ayoluengo-1, situat en un alt estructural relatiu en la conca (camp d'Ayoluengo), i Cadialso-1, que es troba en el centre del solc de Polientes, al NE del depocentre de Sedano (veure Fig. P1.6) (Font: Beroiz i Permanyer, 2011).

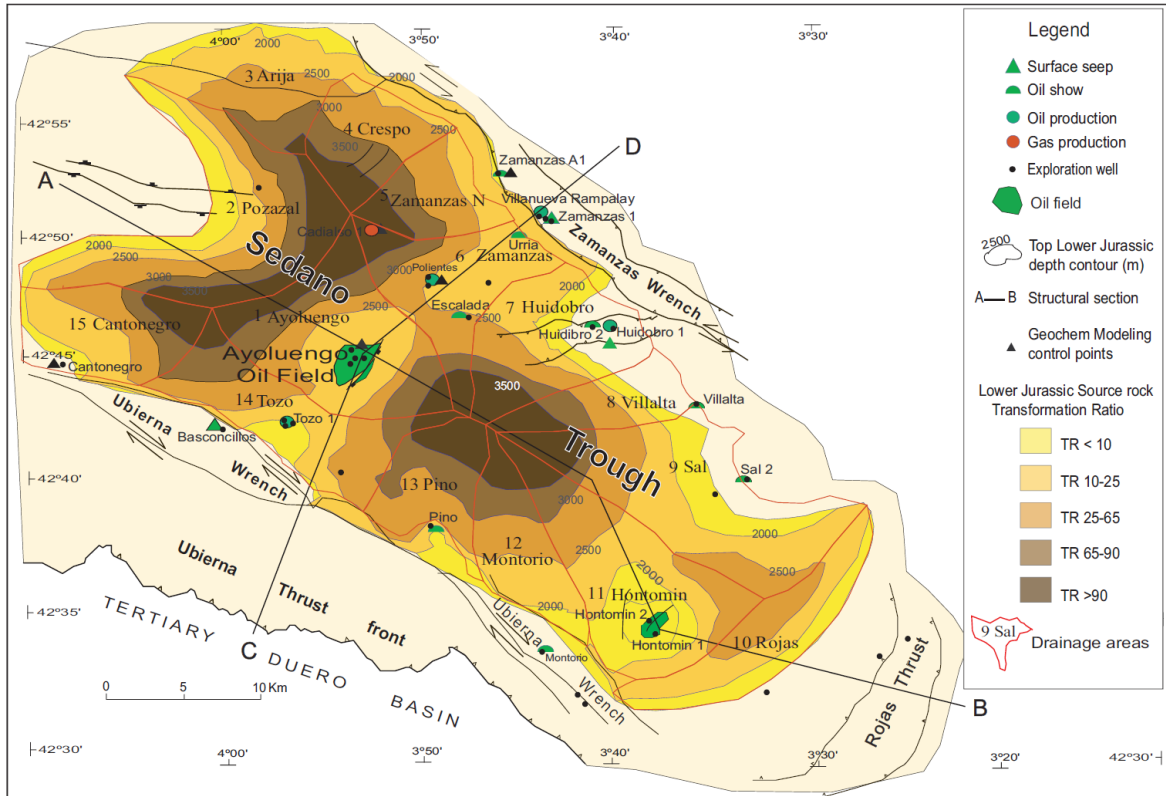


Figura P1.6. Mapa de maduració de la roca mare principal a la conca (margues negres del Lias) on s'indica el [transformation ratio](#) a temps actual obtingut a partir de múltiples models de conca 1D en el solc de Sedano (de Beroiz i Permanyer, 2011).

EXERCICI Parada 1

1. Indica la posició d'aquesta parada en els mapes geològics i talls proporcionats.
2. Quan va començar aquesta roca mare a generar hidrocarburs al sectors més subsidents de la conca?
3. I a l'alt estructural d'Ayoluengo?
4. Completa el diagrama de la Fig. I.8 amb els elements del sistema petroler d'aquesta parada: roca mare i generació.

PARADA 2. Bárcena de Ebro

Localització: 42°50'57.70"N; 4°01'49.57"W, seguint la carretera de Bárcena de Ebro a Bustillo del Monte (CA-746)

Objectiu:

- ✓ Observar, interpretar i discutir les característiques de la roca equivalent a la roca magatzem d'Ayoluengo i d'altres [plays](#)

Roca reservori: Es reconeix una alternança mètrica a decamètrica de trams gresosos i lutífics que són equivalents laterals de les roques reservori del camp d'Ayoluengo, situat al 17 km cap el SE. Els sediments pertanyen a la part mitjana i alta de la Fm. Loma Somera (de 700 m de potència màxima), que forma part del Grup Cabuérniga del trànsit Juràssic-Cretaci (Pujalte, 1982) (Fig. P2.1).

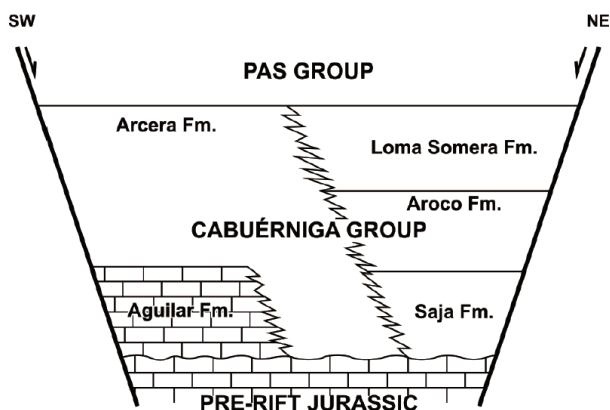


Figura P2.1. Distribució de les formacions que constitueixen el Grup Cabuérniga, on s'inclou Loma Somera, els dipòsits de la qual són equivalents laterals de la roca reservori a Ayoluengo. Font: Carola (2014).

Els sediments de la Fm. Loma Somera pertanyen a les anomenades Facies Purbeck (Figs. I.2 i I.3). Aquesta formació està constituïda per dos membres d'aigua dolça i un membre superior d'aigua salada. El membre inferior (que no es veu a la parada) està format quarsarenites que mostren estratificació creuada amb paleocorrents unidireccionals.

El membre intermedi (*parada opcional al N de Reocín de los Molinos, CA-272*) està format per una alternança de limolites, amb capes de lignit, traces d'arrels i petits gasteròpodes del tipus *Viviparidae* (d'aigua dolça), amb intercalacions gresoses primes que contenen restes vegetals (Fig. P2.2). Una de les seqüències inclou, a més a més, calcàries amb characeas, i també s'han reconegut fòssils de conostracis (Fig. P2.2C).

El tram superior el formen limolites calcàries amb estratificació lenticular i gresos amb estratificacions creuades bi o multidireccionals, amb fòssils d'aigua salada, principalment lamel·libranquis de conquilla gruixuda (ostreïds), que poden formar lumaquel·les (Fig. P2.3). També s'han reconegut petits asteroïdeus (Fig. P2.3D).



Figura P2.2. Membre intermedi de la Fm. Loma Somera (Facies Purbeck, Juràssic superior-Cretaci inferior) al N de Reocín de los Molinos (CA-272). A) Vista d'una part de l'aflorament on s'observa limolites amb intercalacions de capes de gres. B) Limolites amb motllos del que podrien ser petits bivalves. C) Mostra una capa calcària amb abundància de conchostracis (branquiòpodes bivalves, crustacis majoritàriament d'aigua dolça o salobre) . D) Limolita amb carbó.

El model deposicional publicat per a la Fm. Loma Somera consisteix en una extensa plana de marea, intersectada per una xarxa jeràrquica de canals, que cap a terra passa a una plana costanera al·luvial (García de Cortázar i Pujalte, 1982). Pel que fa a la paleogeografia, cal indicar que les facies d'aquesta unitat mostren gradient de salinitat creixent cap el NE i els paleocorrents donen direcció de transport també cap el NE. Aquesta polaritat paleogràfica dona peu a pensar que els sediments de la roca magatzem d'Ayoluengo, situat 17 km mes al SE, correspondrien a dipòsits més continentals, probablement fluvials (Navarro 2016, 2017).



Figura P2.3. Membre superior de la Fm. Loma Somera (Facies Purbeck, Juràssic superior-Cretaci inferior), a la carretera Bàrcena de Ebro a Bustillo del Monte (CA-746). A) Fotografia d'un tram de l'aflorament on predominen els cossos tabulars de gres de potència mètrica. Cap al sostre, s'observa la intercalació de capes de lutites. B) Detall d'un dels cossos gresosos, amb estratificació creuada en solc. C) Tram lutític amb abundància de matèria orgànica. D) Mostra de gres fossilífer amb d'asteroïdeus. E) Lumaquel·la d'ostreïds.

EXERCICI Parada 2

1. Indica la posició d'aquesta parada en els mapes geològics i talls proporcionats.
2. Fes una columna estratigràfica representativa de la successió aflorant, tot indicant quines serien les roques reservori i quines el segell.
3. Completa el diagrama de la [Fig. 1.8](#) amb la roca reservori i segell d'aquesta parada (equivalents als elements del sistema petrolier al camp d'Ayoluengo).

PARADA 3. Zamanzas

Localització: 42°50'33.38"N; 3°43'45.78"W

Objectiu:

- ✓ Observar indicis de cru en el [play](#) de Zamanzas

En aquesta parada, situada al [play](#) de Zamanzas, s'observen indicis de cru en una escombrera de sorres asfàltiques ([tar sands](#)) del Weald (Cretaci inferior) ([Fig. P3.1](#)).



Figura P3.1. Indicis de cru (taques arrodonides de color negre) en una escombrera de les facies Weald.

El [play](#) es localitza al plec anticlinal de Zamanzas d'orientació NW-SE, que està associat a un sistema de falles de *strike-slip* amb la mateixa orientació ([Figs. I.6 i P3.2](#)). Al llarg de l'àrea de Zamanzas es diferencien un conjunt de plecs anticlinals i sinclinals (alguns tombats o molt apretats) separats per falles, el moviment de les quals ha estat subjecte a diverses interpretacions ([Fig. P3.2](#)). L'anticlinal de Zamanzas correspon al plec situat a l'extrem SW d'aquesta zona altament deformada, i és on se situen la major part dels pous d'exploració perforats ([Figs. I.5 i P3.2](#)).

L'estructura de Zamanzas s'hauria format durant l'orogènia Alpina ([Fig. I.3](#)), acomodant part de la deformació compressiva en el marge nord de la Plataforma Burgalesa. Les falles lítriques amb estructures de *rollover* associades, arrelades per sobre de la sal del Triàsic, s'haurien generat durant el rift del Juràssic superior-Cretaci inferior ([Fig. P3.3](#)). Durant la compressió alpina, aquestes estructures s'haurien invertit donant falles inverses i generant estructures anticlinals com la de Zamanzas.

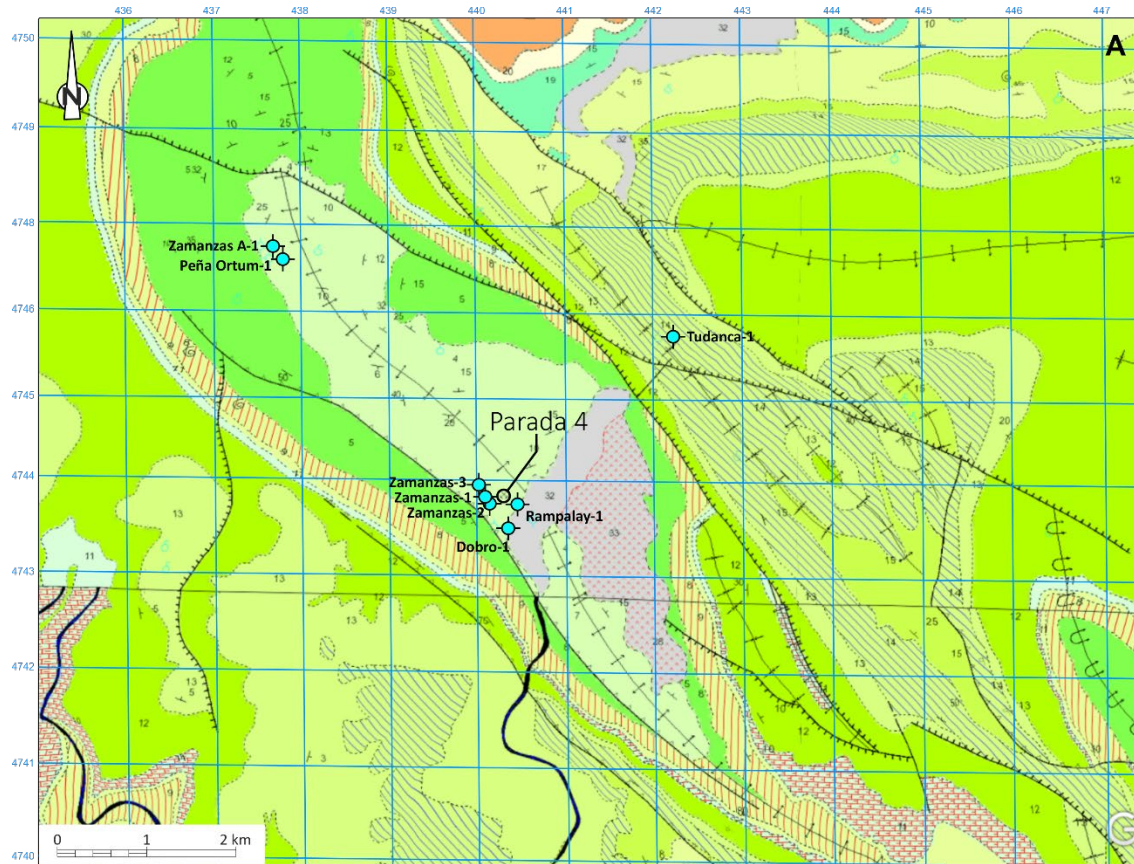


Figura P3.2. A) Mapa geològic de l'àrea de Zamanzas on s'indica la posició de la parada 4, així com els pous perforats a la zona. De IGME (1977a). Les coordenades estan marcades en km, en UTM Zona 30. B) Esquema geològic sobre una imatge de Google Earth que cobreix la mateixa extensió aproximadament que el mapa en A, on s'interpreten els plects principals a l'àrea, i dues falles inverses que s'han interpretat com a normals en el mapa de la sèrie MAGNA en A. Aquestes falles delimitarien en el seu bloc central una estructura de *pop-up* (segons interpretació de Carola, 2014).

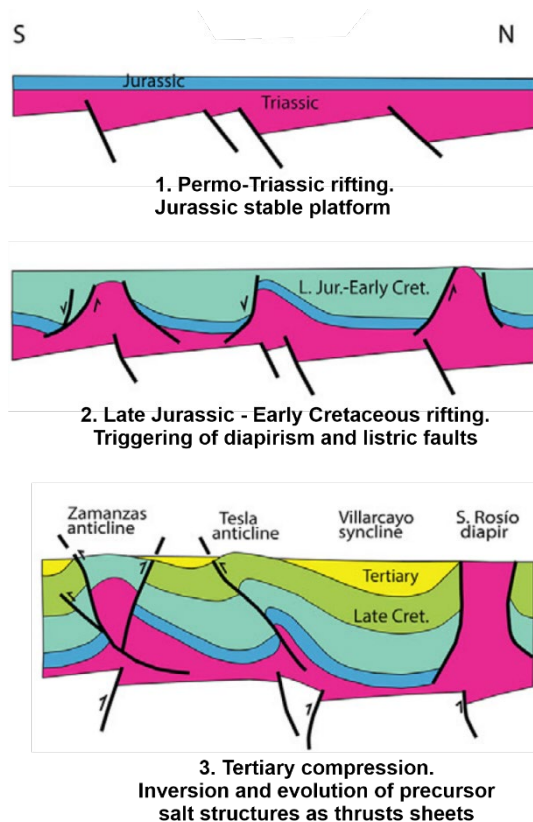


Figura P3.3. Tall geològic i la seva restitució interpretativa que mostra l'estructura de Zamanzas i altres estructures equivalents situades cap al NE. De Cámara (2017).

Durant els primers anys de la dècada del 1940, CAMPSA, antiga empresa estatal d'hydrocarburs, va explotar les sorres bituminoses (*tar sands*) del Weald situades al nucli de l'anticlinal, mitjançant mètodes rudimentaris i experimentals de mineria subterrània (Navarro, 2021, comunicació personal). El mètode es basava en l'excavació de galeries de fins a 500 m de longitud, d'on s'extreien les sorres que es llançaven posteriorment en grans dipòsits d'aigua que s'escalfaven amb llenya. La calor facilitava la separació del betum (*bitumen*) que surava a la superfície i d'on es recollia i s'emmagatzemava en barrils. La producció era de 1 a 3 barrils al dia, i va ser abandonada.

Posteriorment, aquest [play](#) va ser provat amb la perforació de fins a 6 pous d'exploració entre els anys 1945 i 1962. Les roques reservori corresponen als gresos de les facies Weald i Purbeck (Juràssic superior-Cretaci inferior) i als carbonats del Juràssic inferior i mig. Les roques segell són les argiles i margues interestratificades entre els reservoris. Tot i que es van trobar indicis en diversos pous, i que el pou Zamanzas-1 va produir 48 bbl/dia de les facies Weald, mai no es va arribar a trobar una acumulació comercial en aquest [play](#) (Beroiz i Permanyer, 2011).

El fracàs en l'exploració d'aquest [play](#) (i d'altres equivalents en la regió) podria estar associat a l'existència d'un segell parcial (o la seva manca) producte de l'exposició i erosió de les unitats suprajacents del reservori, així com pel moviment de les falles; i a la falta de sincronia

entre el moment de la maduració i migració del petroli i de la formació de les estructures que donen lloc a la trampa (Terciari mig, durant l'orogènia alpina). És a dir, que la trampa no estaria formada en el moment de generació i migració principal de cru en la regió (Cretaci inferior; Fig. P1.5).

EXERCICI Parada 3

1. Indica la posició d'aquesta parada en els mapes geològics i talls proporcionats.
2. Quina tipus de trampa forma aquest [play](#)?
3. Quina edat té la trampa?.....
4. Completa el diagrama de la Fig. I.8 amb els elements del sistema petrolier per aquest [play](#): formació de la trampa, roca reservori i segell.

ITINERARI DIA 2

PARADA 4. Ayoluengo

Localització: 42°44'52.88"N; 3°52'52.70"W (Sargentos de la Lora)

Objectiu:

- ✓ Conèixer l'estructura de [play](#) d'Ayoluengo i el tipus de trampa
- ✓ Conèixer les propietats de la roca reservori i segell relacionar-la amb parades anteriors
- ✓ Discutir sobre la roca mare i la migració
- ✓ Conèixer la història i el mètode de producció del camp d'Ayoluengo

Parada 4.1 - Camp d'Ayoluengo

Malgrat tots els indicis d'hidrocarburs a la regió, el camp d'Ayoluengo ha estat l'únic camp productor de l'àrea (l'únic econòmicament rentable). Va ser descobert per CAMPSA/ AMOSPAIN (consors de CHEVRON i TEXACO units a CAMPSA) l'any 1964. Té una extensió d'uns 20 km². El sistema petrolier en el camp d'Ayoluengo està format pels següents elements:

Roca mare i generació: Com s'ha comentat en la Parada 2 (Santiurde de Reinoso), la roca mare del camp s'atribueix majoritàriament les margues negres del Lias (Fms. Camino i Castillo Pedroso) ([Fig. I.3 i parada 1](#)), on la generació i migració principals van tenir lloc durant el Cretaci superior, prèviament a la configuració alpina definitiva ([Beroiz i Permanyer, 2011](#)).

A més de la roca mare liàsica, alguns geòlegs contempen la possibilitat que a Ayoluengo els nivells argilosos que alternen amb els nivells productius del reservori puguin haver estat roca mare, donat que s'han identificat nivells molt rics en matèria orgànica, amb una elevada capacitat generadora, amb presència de [querogen](#) tipus III i [TOC](#) de fins al 1%. Aquests nivells s'han identificat tant al subsòl com en aflorament ([Fig. P2.1C](#)) i tenen una potència variable, normalment inferior a 1 m. Aquesta idea també explicaria perquè els crus trobats a Ayoluengo són tan variables en qualitat i la distribució dels fluids al camp tan heterogènia.

Roca reservori i segell: Gresos que alternen amb argiles de la facies Purbeck (Juràssic superior – Cretaci inferior) dipositats en un ambient fluvio-lacustre similars als descrits com a membre superior de la Fm. Loma Somera a la [parada 2](#) (Bárcena de Ebro).

S'ha descrit que les capes de gres tenen forma lenticular, amb una potència mitjana de 2 a 3 m, i màxima de fins a 10 m ([Fig. P4.1](#)). L'extensió lateral és molt variable, i pot oscil·lar entre els pocs metres i diversos quilòmetres. Els nivells productius al camp se situen entre els 800 i 1500 m de profunditat. La porositat de la roca reservori és en general bona, i fonamentalment depèn del seu contingut en argiles. La porositat mitjana és del 18%, però

pot variar entre el 28% i el 8%. La permeabilitat també és variable, amb valors que es situen entre pocs mD i màxims de fins a 1000 mD.

S'estima que els hidrocarburs es troben emmagatzemats en unes 40 capes de gres intercalades entre argiles (Fig. P4.1). Les argiles farien de roca segell impeding la comunicació vertical entre els diversos paquets gresosos (compartimentació vertical del reservori). La distribució dels fluids en el reservori és molt irregular. Per exemple, es poden trobar nivells saturats en aigua, i altres nivells saturats en gas i cru; i les capes que tenen gas no sempre se situen per sobre de les capes amb cru i aigua. De fet, pràcticament cada nivell de gres es podria considerar com un reservori independent, i hi hauria tants contactes entre fluids com llançons de gres hi ha al camp. Aquest tipus de reservori rep el nom de multi-cap (multi-layer).

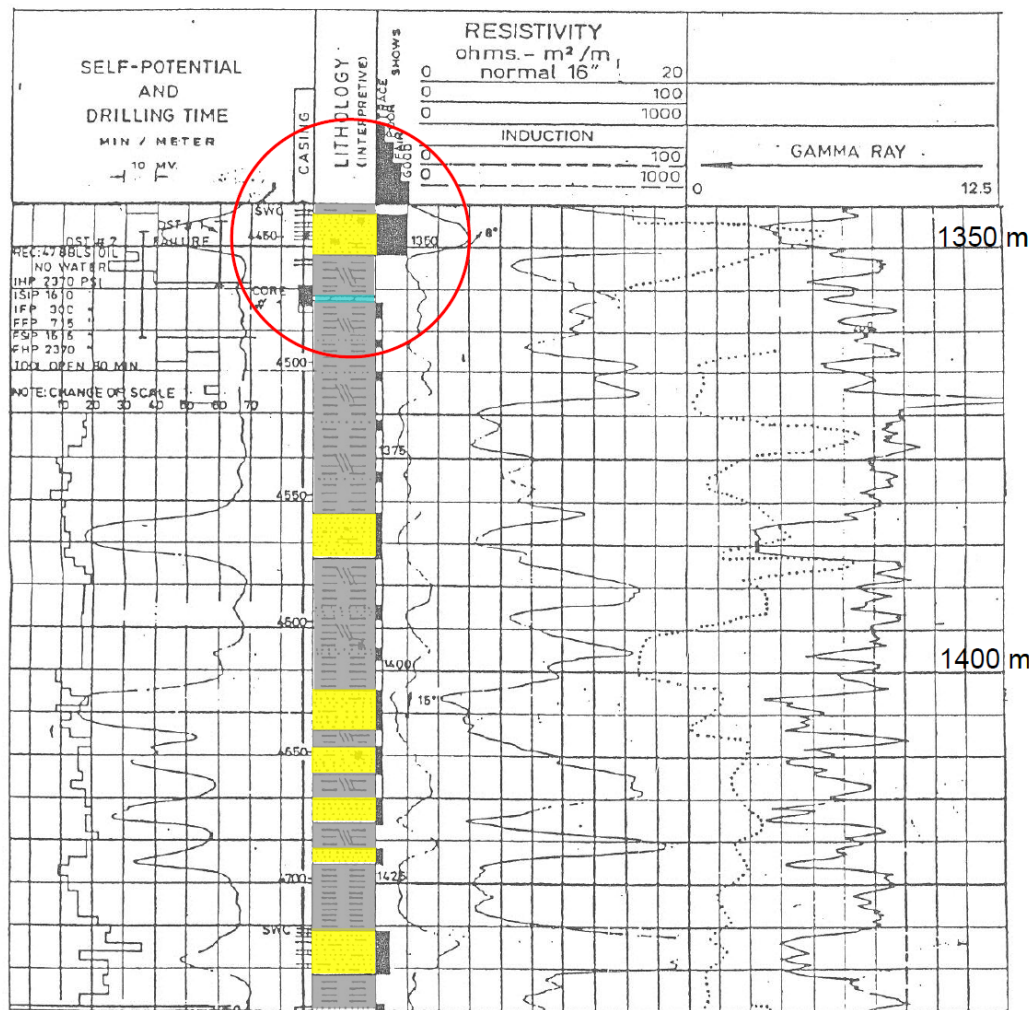


Figura P4.1. Registre elèctric (potencial espontani i resistivitat) i de raigs gamma d'un interval del pou Ayoluengo-1 (veure localització al mapa de la Fig. P4.2). La profunditat s'indica en peus (4450 a 4750 ft) i en metres (1350 a >1425 m). A la columna d'interpretació litològica es distingeixen tres litologies: gresos (groc), argiles (gris) i calcàries (blau). A la dreta d'aquesta columna s'indica, amb uns requadres negres, els indicis (shows) de cru que es van trobar durant la perforació. Els millors indicis es troben a l'interval gresós a 1346 – 1351 m, on es registren també resistivitats elevades. Aquest interval va produir 85 barrils al dia de cru.

Estructura del camp i trampa: Ayoluengo està situat en un alt relatiu entre les dues miniconques o solcs de Sedano i Polientes (Figs. I.6 i P1.6). L'estructura del camp correspon a un anticlinal fallat (Figs. P4.2 i P4.3). La falla principal (falla d'Ayoluengo) té un salt d'uns 250 m i divideix el camp en dos grans blocs, on el bloc oriental és l'aixecat. Té una orientació NE-SW i aflora en superfície. A més, altres falles (algunes antitètiques a la d'Ayoluengo) també hi són presents i juguen un paper important en la compartimentació lateral de capes productives a través del salt de falla.

L'estructura anticlinal es va formar en un context de tectònica salina (Klimowitz et al., 1999). Les falles extensionals que es varen formar durant l'etapa sin-rift del Juràssic Superior – Cretaci Inferior van donar lloc al desplaçament de la sal de les facies Keuper, que al mateix temps va induir la formació d'estructures salines tempranes com les d'Ayoluengo. Aquestes van ser fossilitzades pels dipòsits del Cretaci Mig i Superior. Durant el Terciari, estructures associades a la compressió Alpina es van sobreimposar a les estructures prèvies del camp d'Ayoluengo, amb el resultat de la inversió de falles mesozoiques i importants moviments de *strike-slip* en l'estructura (falles actuals).

Migració: La cuina ("kitchen") del cru per les margues negres del Liàsic es troba als sectors més subsidents de la conca (solcs de Polientes, al NW, i Sedano al SE; Fig. P1.6). La migració de cru des d'aquests sectors fins a la trampa d'Ayoluengo implica un transport horitzontal d'uns 10-15 km, i posteriorment vertical, probablement aprofitant les falles de l'estructura d'Ayoluengo com a conducte per la migració.

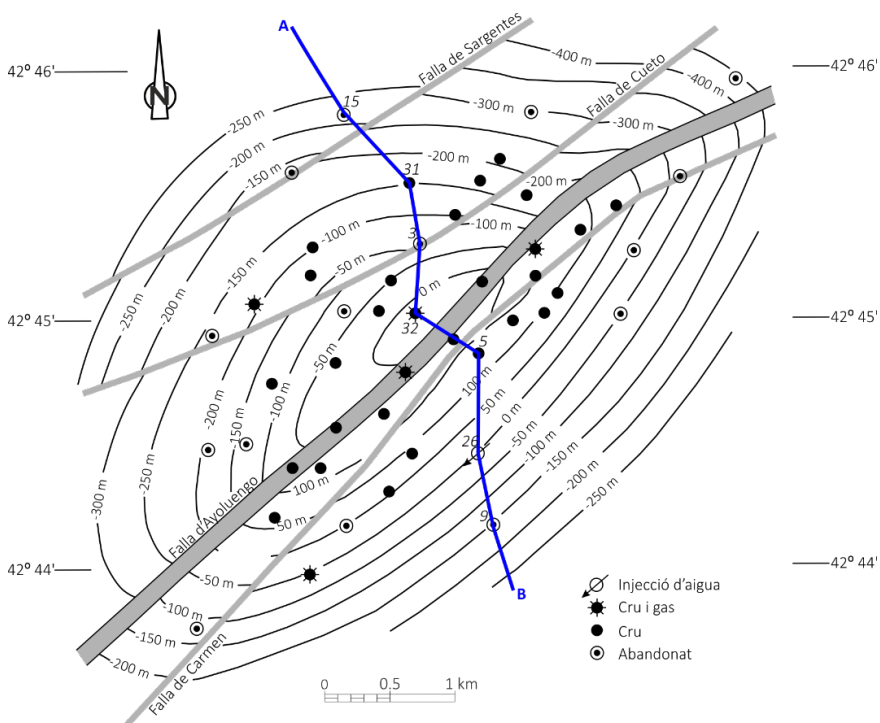


Figura P4.2. Mapa de isòbates de l'horitzó guia corresponent al sostre de la unitat productiva (Facies Purbeck) al camp d'Ayoluengo. S'indica la posició dels pous perforats al camp i el tall geològic de la Fig. P4.3. Modificat de Repsol (1994).

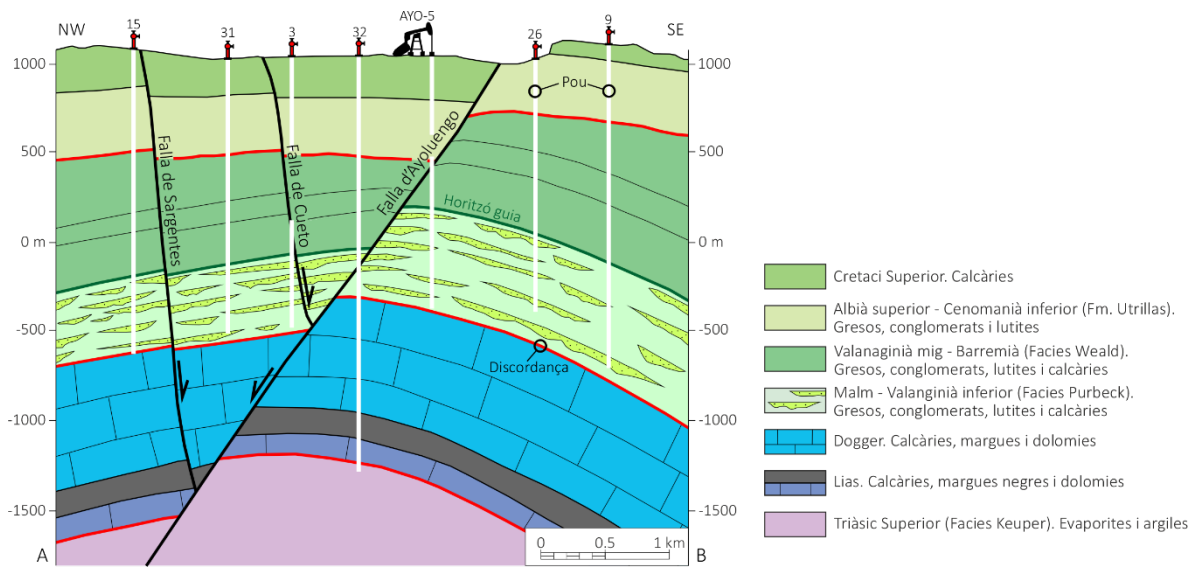


Figura P5.3. Tall geològic esquemàtic del camp d'Ayoluengo (veure posició a la Fig. P4.2) on s'observa l'estructura del *play* i les unitats presents. Veure la sèrie estratigràfica representativa a la Fig. I.7. En la part superior s'indica la posició dels pous perforats al llarg de la trajectòria del tall. Ayoluengo-5 (AYO-5) és un dels pous que ha perforat l'estructura en la seva posició més elevada. També s'indica l'horitzó guia, el mapa d'isòbates del qual es mostra a la Fig. P4.2. Modificat de Navarro (2016a).

Nota: en aquest tall cal indicar la posició dels contactes aigua-cru de forma representativa (veure exercicis de la Parada 5).

Producció del camp: El camp d'Ayoluengo va començar a produir l'any 1964 (Sanz, 1967; Alvarez de Buergo i García, 1996; Quesada et al., 2006; Navarro, 2016a, b, 2017). S'han arribat a extreure 16 MMbbls de cru i gas associat. La producció màxima del camp va assolir gairebé els 5000 bbls/dia (Fig. P4.4).

El cru és *parafínic* i presenta una densitat de 20° a 39° *API*, normalment és més pesat a mida que la profunditat disminueix. Conté una concentració elevada d'arsènic (20 a 25 ppm), i baixa en sofre (0.17%) i l'aigua present al reservori té una salinitat de 50000 ppm de NaCl. El contingut inicial de gas en el cru (*GOR: gas/oil ratio*, referit a condicions estàndar de P i T de 1 atm i 15°C) és d'uns 350 scfg/stb (*scfg: standard cubic feet of gas; stb: standard barrel*).

Es van perforar fins a 53 pous de producció (Fig. P4.2), donat l'elevada compartimentació vertical del reservori (deposicional) i la compartimentació lateral com a resultat de les falles presents al camp (estructural). De fet, s'han arribat a comptabilitzar més de 300 horitzons de producció independents. El factor de recuperació (*recovery factor*) estimat del jaciment és només del 20% (això vol dir que una important quantitat de cru present, el 80%, no s'ha recuperat).

El mètode de producció inicial va ser natural (recuperació primària- [primary recovery](#)), per expansió del gas en solució ([dissolved gas drive mechanism](#)), tot i que alguns nivells mostren també empenta d'aigua ([water drive](#)). Posteriorment, quan la pressió en el reservori va caure i la producció primària va deixar de ser òptima, es va recórrer al bombeig mecànic mitjançant bombes de balancí conegudes amb el nom de “cavallets”. Finalment, a partir del 2008, la producció va ser mitjançant la injecció d'aigua ([secondary recovery](#)) (Fig. P4.4).

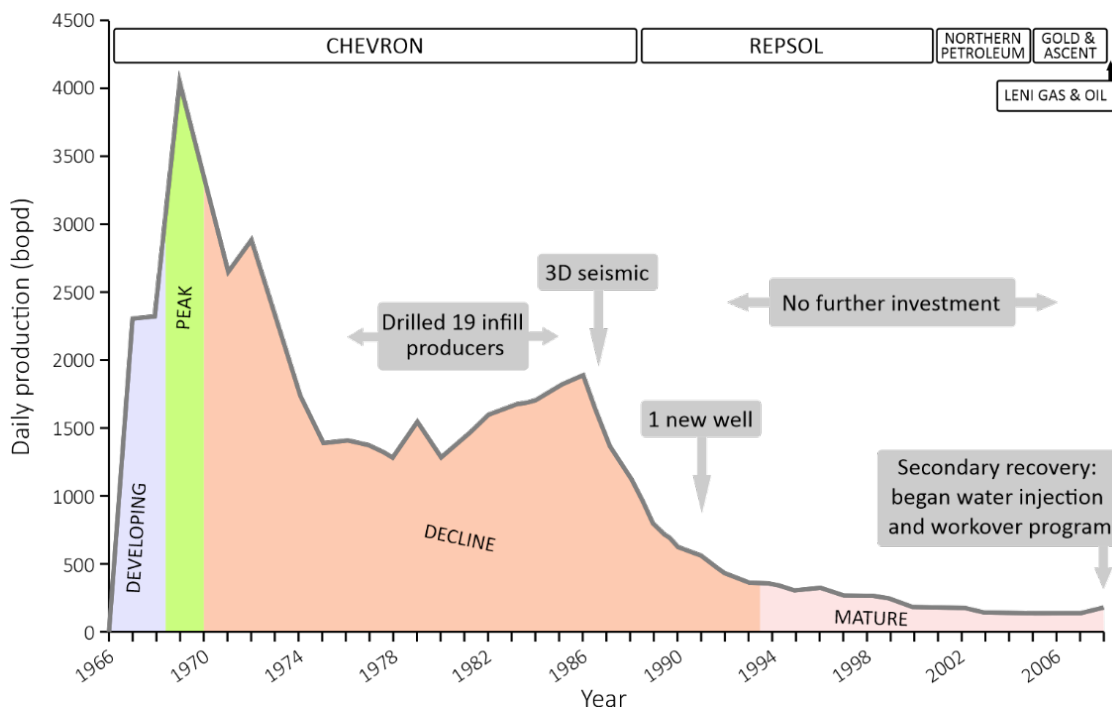


Figura P4.4. Història de la producció del camp d'Ayoluengo fins l'any 2008 (modificat de Navarro, 2016a). En la part superior s'indiquen els operadors. bopd: *Barrels Oil Per Day*. Veure descripcions de [infill producer wells](#), [secondary recovery](#), [workover](#) and [mature field](#) al Glossari.

Instal·lacions de superfície (Facilities): Van ser dissenyades i construïdes per gestionar uns 5000 bbls d'hidrocarburs al dia (Fig. P4.5). La gestió de la producció va sofrir canvis al llarg del temps, seguint la història de la producció del camp.

Inicialment, els pous productors es trobaven connectats a través d'una canonada que col·lectava i transportava els fluids a una estació receptora, on es separava el gas de l'aigua i el cru. A més, un oleoducte transportava el cru des del camp a una terminal de càrrega on camions cisterna carregaven i transportaven el cru fins a la seva destinació final.

Amb el declivi en la producció i quan la pressió en el reservori va començar a caure (Fig. P4.4), es va desmantellar l'oleoducte (any 1993), i la separació del gas respecte al cru i l'aigua va començar a produir-se als pous (Fig. P4.6). El cru i l'aigua es produïen per la canonada del

pou, mentre que el gas ascendia per l'espai anular (espai entre la canonada de revestiment i la de producció). Els fluids produïts s'emmagatzemaven en uns petits tancs situats al costat dels pous. Des d'allà, el gas es transportava a través de canonades fins a l'estació receptora, on entrava pels col·lectors i arribava al separadors, on es mesurava la quantitat de gas produït. Després passava per la unitat de deshidratació on perdia l'aigua en suspensió, i des d'allà es distribuïa per a ser utilitzat en el generador elèctric, en els motors de gas de les unitats de bombeig i en l'escalfador de cru.

El cru i l'aigua es transportaven per camions cisterna des dels tancs fins a una balsa situada en l'estació receptora. Des d'allà, passaven a l'escalfador de cru on, per augment de temperatura, el cru se separa de l'aigua. Posteriorment, el cru passava al separador de gotes per eliminar l'aigua que encara pogués contenir el cru. En el separador de gotes, un camp elèctric fa que les gotetes emulsionades amb el cru s'atreguin i s'ajuntin formant gotes més grans que acabaran separades del cru per densitat. El cru perfectament net s'enviava als tancs d'emmagatzemament.

Totes les aigües residuals produïdes eren filtrades per eliminar els sòlids fins, ions solubles, microorganismes i residus petrolífers que puguin contenir. Posteriorment, s'injectaven de nou al reservori, a una profunditat molt per sota de qualsevol aquífer superficial.

L'elevat contingut en arsènic dels crus d'Ayoluengo els va fer inadequats per a ser refinats, donat que els catalitzadors es feien malbé. Pel seu elevat poder calorífic van ser comercialitzats com a combustible industrial.



Figura P4.5. Instal·lacions en superfície ("facilities"), on es produïa la separació del cru i de l'aigua i l'emmagatzematge de cru, entre d'altres funcions (veure [Fig. P4.6](#)).

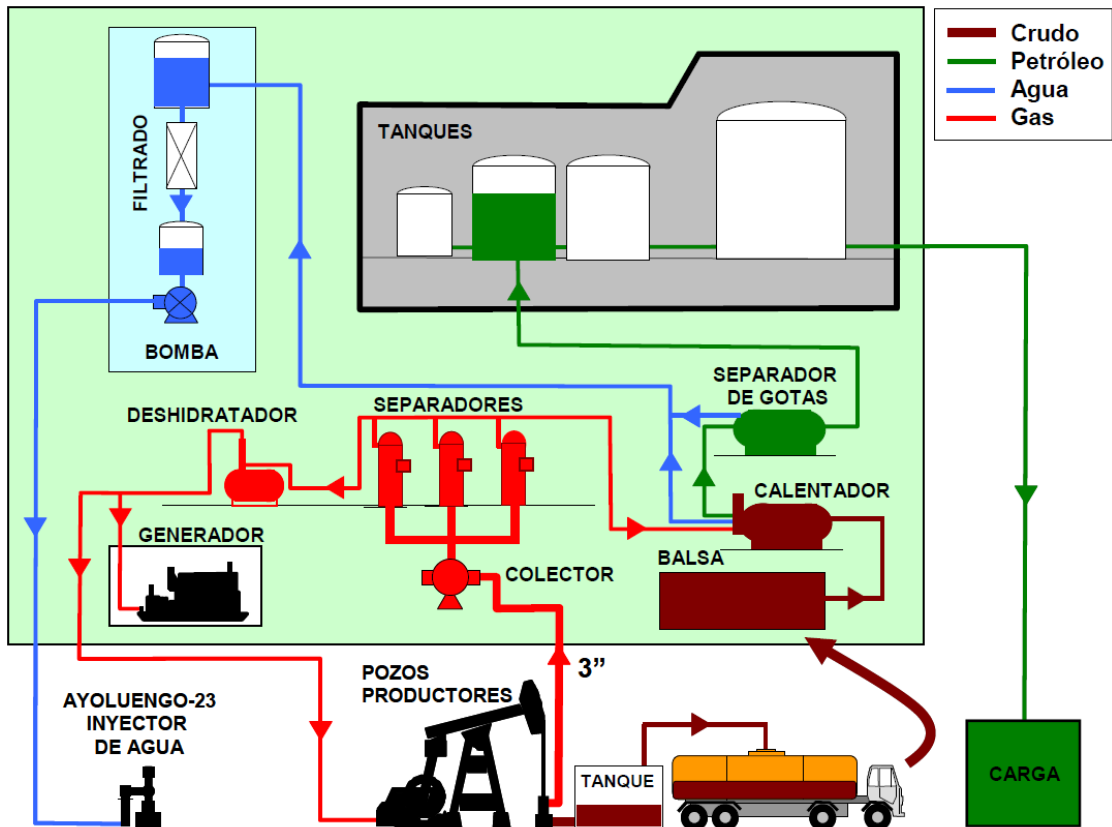


Figura P4.6. Esquema de les instal·lacions del camp d'Ayoluengo i de la gestió dels fluids extrets dels pous (de Navarro, 2016a).

Parada 4.2 - Museo del Petróleo (Sargentos de la Lora)

El Museo del Petróleo (Fig. P4.7) està situat a la població de Sargentos de la Lora (Burgos). És l'únic museu del petroli a Espanya. Va ser inaugurat l'any 2014 amb motiu del 50è aniversari del descobriment del camp d'Ayoluengo, i es va obrir al públic el 2015.



Figura P4.7. A) Entrada del Museo del Petróleo, a Sargentos de la Lora. A l'esquerra de la fotografia es pot veure un "cavallet", que és una bomba de balancí que s'utilitzava per a bombejar mecànicament els hidrocarburs del reservori.

EXERCICI Parada 4

1. Indica la posició d'aquesta parada en el mapa geològic i talls proporcionats.
2. Indica a la columna estratigràfica sintètica (Fig. I.7) quines són les roques mare, segell i reservori del camp utilitzant la simbologia de la llegenda proporcionada. Fes el mateix al tall de la Fig. P4.3.
3. D'acord a les explicacions proporcionades sobre la disposició dels fluids al reservori, dibuixa sobre el tall de la Fig. P4.3 contactes OWC que siguin representatius.
4. Per què es van perforar fins a 53 pous en aquest camp?
.....
.....
.....
5. Tot i que hi ha indicis de cru (ja degradat en forma d'asfalt) a la Fm. Utrillas al voltant del camp d'Ayoluengo, com explicaries que no sigui el reservori si existeix la roca mare en profunditat?.....
.....
.....
.....
6. Quan va deixar de produir el camp d'Ayoluengo?
7. Per què va deixar de produir?
.....
.....
8. Quin volum total de reserves de cru va produir?
9. Quin és el consum diari de cru en l'Estat Espanyol?
10. On es produïa la separació del cru i del gas associat?
11. El cru produït tenia algun/s component/s destacat/s? Si sí, quin/s?
.....
12. Quines aplicacions principals tenia el cru produït?.....
.....
.....
13. Per a què es feia servir el gas produït?.....
.....
.....

14. Fes una síntesi de les característiques del [play](#) d'Ayoluengo:

ROCA RESERVORI			
Unitat/Formació		Profunditat	
Edat		Porositat	
Litologia		Permeabilitat	
Potència		<i>Gamma ray</i>	
Extensió lateral		Altres propietats	
Ambient deposicional			
ROCA SEGELL			
Unitat/Formació		Profunditat	
Edat		Porositat	
Litologia		Permeabilitat	
Potència		<i>Gamma ray</i>	
Extensió lateral		Altres propietats	
Ambient deposicional			
ROCA MARE			
Unitat/Formació		Profunditat	
Edat		TOC	
Litologia		HI	
Potència		Tipus querogen	
Ambient deposicional		Altres propietats	
Edat de generació hidrocarburs			
TRAMPA			
Edat formació		Tipus	

PARADA 5. Huidobro

Localització:

Parada 5.1 - Panells informatius de Huidobro: 42°45'23.91"N; 3°42'08.26"W

Parada 5.2 - Peña Otero: 42°45'51.29"N; 3°42'16.62"W

Parada 5.3 - Fm. Utrillas i Mina de malaquita i atzurita: 42°45'36.35"N; 3°41'58.10"W

Parada 5.4 - Pou Huidobro-2: 42°45'53.01"N; 3°40'53.76"W

Parada 5.5 - Pou Tejón Profundo-1: 42°45'19.31"N; 3°40'11.46"W

Objectiu:

- ✓ Conèixer l'estructura del [play](#) d'Huidobro
- ✓ Visitar pous d'exploració i discutir la seva localització
- ✓ Observar les característiques de la Fm. Utrillas, amb indicis de cru a la regió i potencial roca reservori si hi ha segell

Parada 5.1 - Panells informatius de Huidobro

En aquest [play](#) es situa el pou d'exploració més antic perforat a Espanya (pou Huidobro o Huidobro-1900; [Fig. P5.1](#)). Es va perforar l'any 1900 a la cresta de l'estructura anticlinal de Huidobro. Aquest anticlinal (denominat la *Hoya de Huidobro*) té una orientació W-E, i en el seu centre afloren gresos del Cretaci inferior, envoltats per calcàries del Cretaci superior ([Figs. I.5 i P5.2](#)).



Figura P5.1. Pou Huidobro (o Huidobro 1900), primer pou d'exploració perforat a Espanya. Es localitza a la Hoya de Huidobro, a la cresta de l'anticlinal.

El pou d'Huidobro va assolir una profunditat total de 523 m. Va tallar una successió de gresos i argiles (facies Purbeck-Weald) de les quals només es va trobar [bitumen](#) i alguns indicis de cru a tres nivells gresosos ([Fig. P5.3](#)). Posteriorment al descobriment del camp d'Ayoluengo, es va reprendre l'activitat exploratòria a Huidobro per part de les companyies AMOSPAIN (CAMPESA, CHEVRON i TEXACO). Es van perforar els pous de Huidobro-1 (1966) i Huidobro-2 (1967) ([parada 5.4](#)), que van assolir unes profunditats de 906 m i 1469 m, respectivament. Es van situar també a la *Hoya*, en el flanc S de l'anticlinal, i a prop de la cresta de l'estructura

(Figs. P5.2 i P5.3). Aquests pous van arribar a produir alguns barrils de petroli però en quantitats no comercials.

Finalment, la companyia Chevron va fer un últim esforç exploratori en un altre possible *play* a Huidobro amb la perforació del pou Tejón Profundo-1 (parada 5.5) l'any 1988. Es va situar en el flanc S de l'anticlinal, fora de la Hoya (Figs. P5.2 i P5.3), i buscava un objectiu exploratori més profund que les facies Weald. Es treballava amb la hipòtesi de l'existència d'un altre sistema petrolier constituït per una roca mare de gas carbonífera (al basament de la conca) i un reservori a les facies gresoses del Buntsandstein (Triàsic inferior). El pou, que va assolir una profunditat de 3871 m, però, va acabar travessant la mateixa sèrie encavalcada i repetida (Fig. P5.3C i D), resultant negatiu, i es va abandonar immediatament.

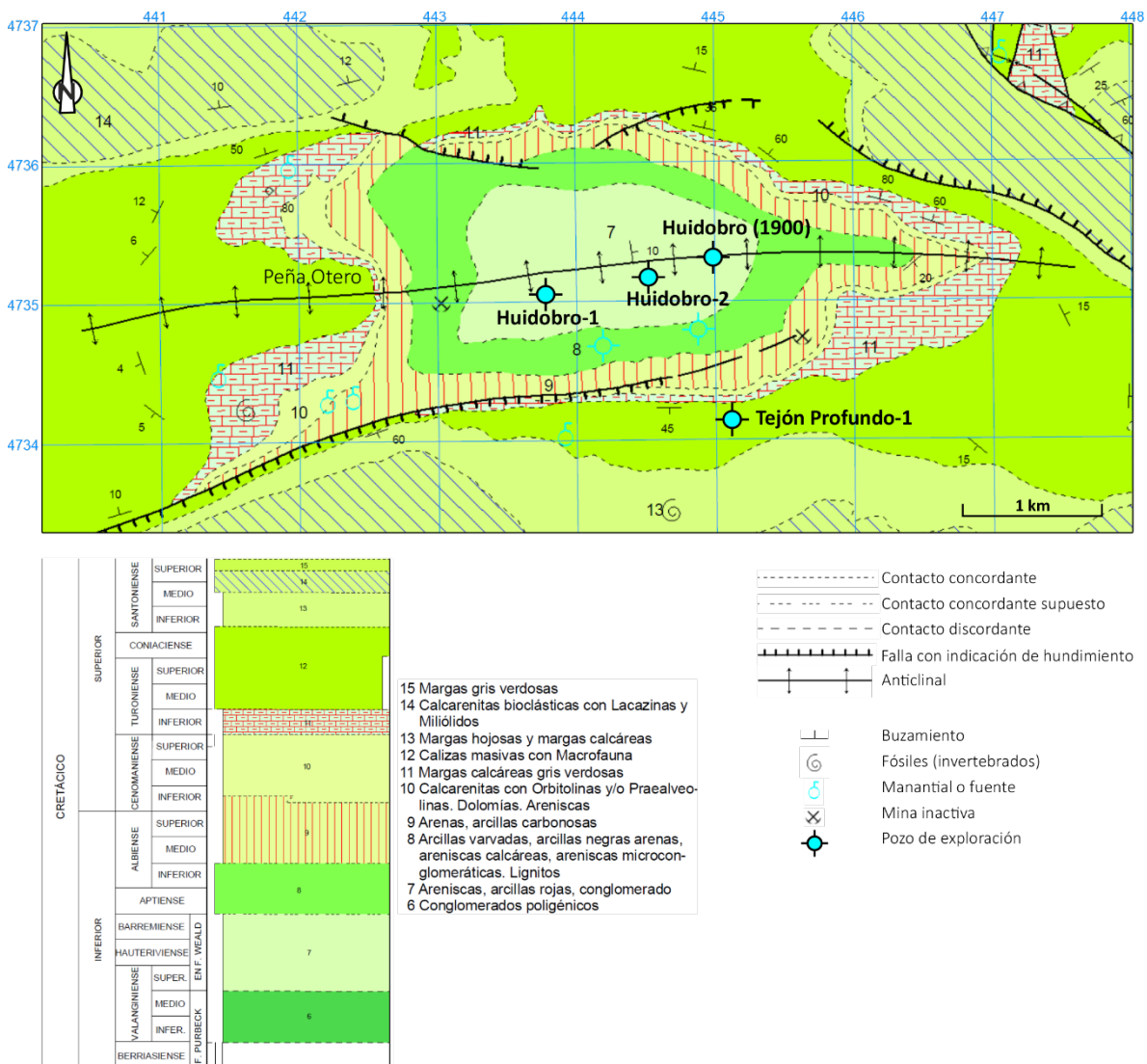


Figura P5.2. Mapa geològic de l'anticlinal de Huidobro on es mostra la posició dels pous d'exploració perforats. Font: IGME (1977b).

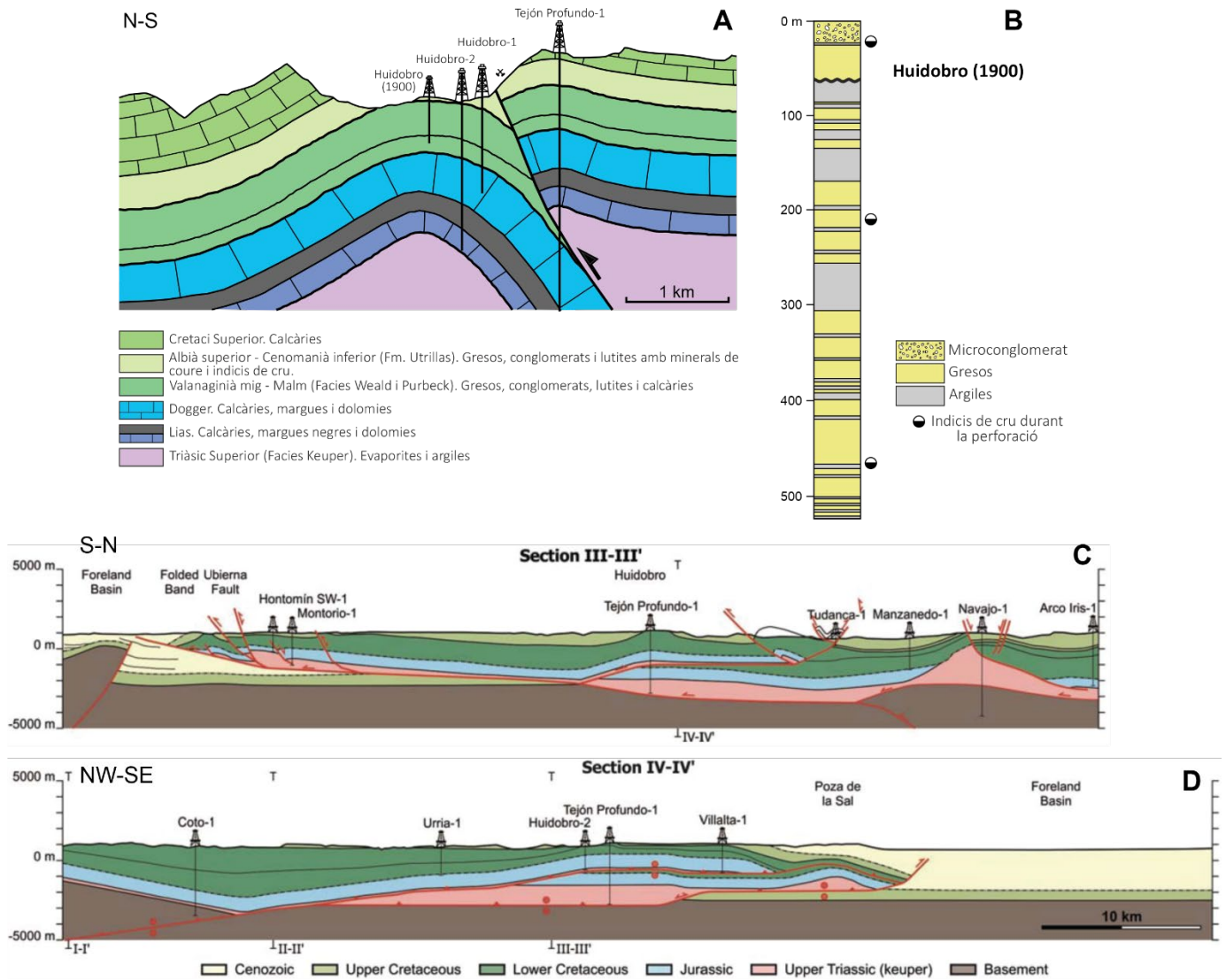


Figura P5.3. A) Esquema de tall geològic a l'estructura de Huidobro on s'indica la posició dels pous perforats (Font: *Panells informatius a Huidobro*). B) Columna litològica del pou Huidobro (1900), on s'indiquen els indicis de cru trobats durant la perforació. C) Tall perpendicular i D) oblic a l'estructura de Huidobro on s'observa la repetició de la sèrie mesozoica per la presència d'un encavalcament d'orientació SW-NE (i vergència N). Veure posició dels talls a la Fig. I.5. Font: Carola (2014).

Parada 5.2 - Peña Otero

Des d'aquesta parada es pot observar l'espectacular estructura anticlinal del [play](#) de Huidobro (Fig. P5.4). En el centre de la *Hoya*, se situen els pous exploratoris Huidobro (1900), Huidobro-1 i Huidobro 2. Al flanc S de l'anticlinal, a major altitud, es va situar el pou Tejón Profundo-1.

La parada, juntament a la de Zamanzas, il·lustra com les estructures anticlinals han estat les trampes de jaciments d'hidrocarburs per excel·lència, donada la seva facilitat en ser identificades, tant en sísmica com sovint en superfície.

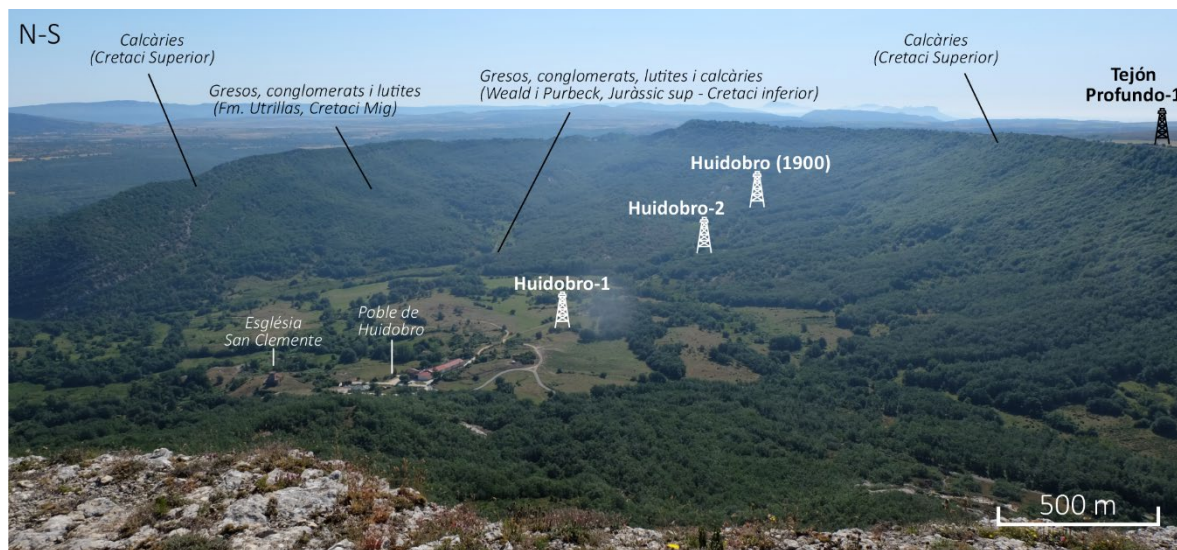


Figura P5.4. Vista des de Peña Otero cap a la Hoya de Huidobro. S'indica la posició dels pous d'exploració perforats al [play](#) de Huidobro.

Parada 5.3 - Fm. Utrillas i Mina de malaquita i atzurita

Baixant des del sud cap al nucli de l'anticlinal que forma la depressió de la *Hoya*, la carretera que va a la Església de San Clemente talla la unitat sorrenca de la Fm. Utrillas (Figs. P5.2 i P5.4), que té indicis de petroli a altres punts de la regió, com a Basconcillos de Tozo (al SW d'Ayoluengo; Fig. I.5). De fet, es considera que la Fm. Utrillas és una potencial roca reservori de la regió quan hi ha un bon segell.

La Fm. Utrillas (Fig. P5.5) és una unitat fluvial que s'estén per la Serralada Ibèrica i pel sud de la CBC. La unitat es va dipositar contemporàniament a la transgressió generalitzada de l'Albià superior-Turoniana (Fig. I.3), en extenses planes al·luvials costaneres. Cap el nord de la conca, els dipòsits fluvials passen a dipòsits marins i de transició de la Fm. Valmaseda (Fig. I.2). A la regió, els seus dipòsits detrítics són d'edat Albià superior-Cenomanià inferior, i es troben estratigràficament per sobre del Weald, tot i que es poden trobar per sobre de materials tant



Figura P5.5. Afloraments on s'observa l'aspecte característic de la Fm. Utrillas. En les fotografies podem observar un paquet d'uns 3 m de potència format majoritàriament de gresos d'aspecte blanquinós, poc cimentats (això es pot observar especialment a la imatge en B, darrera del Jorge Navarro i el Lluís Cabrera) que contenen algunes crostes ferruginoses. Aquest aflorament es troba al camp d'Ayoluengo (no és a Huidobro).

mesozoics como paleozoics per mitjà d'una important discordança erosiva (Fig. I.7). A la regió Basco-Cantàbrica, la Fm. Utrillas té una potència variable d'entre 100 i 500 m, i està majoritàriament formada per sorres i argiles, a vegades caoliníferes, versicolors, poc cimentades i amb crostes ferruginoses (Fig. P5.5). Aquests materials es va dipositar en un ambient fluvial de tipus trenat a meandriforme a partir de l'erosió del macís granític hercinià (Mapa Geológico y Minero de Castilla y León, 1:400.000, 1997).

Al sector de Burgos, la Fm. Utrillas mostra una gran tendència granodecreixent, i s'hi poden distingir dues unitats (Aróstegui et al., 2000). A la unitat inferior (U1), de 1 a 4 m de potència, es registren seqüències estrato-creixents i granodecreixents, de rebliment de canal trenat formades pels següents nivells: a) base erosiva, amb capes canaliformes amalgamades de gresos conglomerats; b) interval amb sorres menys conglomeràtiques riques en quars; c) gresos grollers amb estratificació creuada (Fig. P5.6A); d) gresos fins amb estratificació creuada i capetes de argil·lites rogenques amb estratificació *flaser*, ondulant i lenticular (Fig.

P5.6B). La unitat superior (U2) està formada per gresos i sorres de gra fi, llims, limolites i argil·lites de coloracions griseses i rogenques. En general, aquests dipòsits mostren seqüències estrato i granodecreixents, de 3-15 m de potència, que s'han interpretat com el producte de rebliment de canals i del seu desbordament amb característiques fluvials meandriformes.

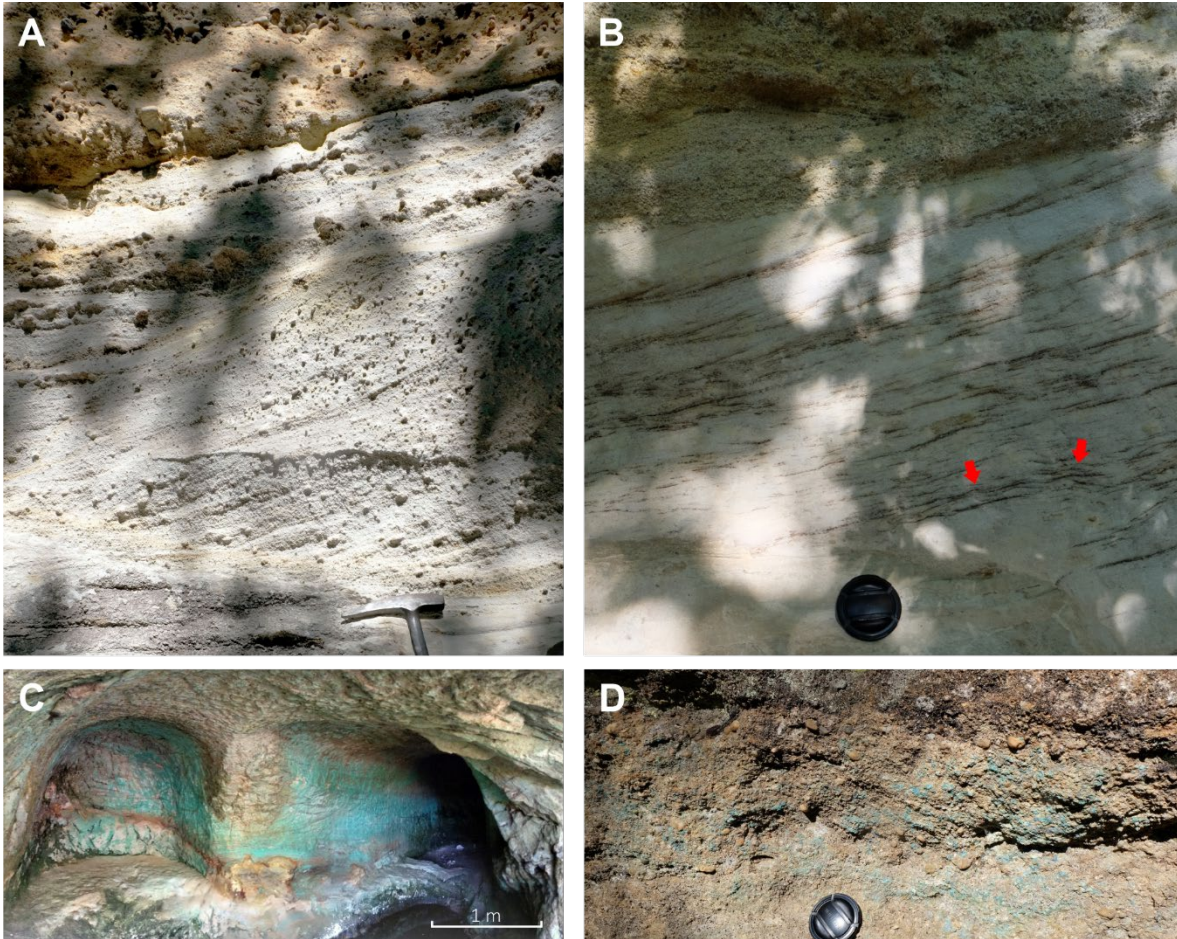


Figura P5.6. Fotografies on aflora la Fm. Utrillas a la Hoya de Huidobro. A) Estrats de gresos conglomeràtics de color blanquinós amb estratificació creuada, molt característics de la formació. Per damunt, mitjançant un contacte erosiu, es disposen uns conglomerats gresosos i gresos conglomeràtics de color marró clar. B) Gresos blanquinosos amb estratificació creuada que contenen làmines d'argil·lites rogenques localment amb estratificació *flaser* (fletxes vermelles). Pel damunt, mitjançant un contacte net, es disposen gresos més grollers amb còdols, i de color marró clar. C) Coves i galeries excavades a la Fm. Utrillas on s'observen mineralitzacions de malaquita. D) Gresos conglomeràtics amb mineralitzacions de malaquita.

Cap al marge SW de la CBC (Olleros de Pisuegra, a 50 km al W de Huidobro; Fig. I.5), la Fm. Utrillas evoluciona cap sostre a una alternança de dipòsits fluvials (amb canals de fins a 10 m de profunditat) i litorals (planes mareals fangoses amb canals mareals i barres de meandre) (Fig. P5.7), d'edat Cenomanià mig-superior. Aquest tipus de patró sedimentari, amb

alternança de sediments fluvials i transicionals, ha estat interpretat com el resultat de descensos i ascensos del nivell del mar de petita magnitud, sobreimposats a una pujada generalitzada del nivell del mar (Pujalte i Robles, 2008).

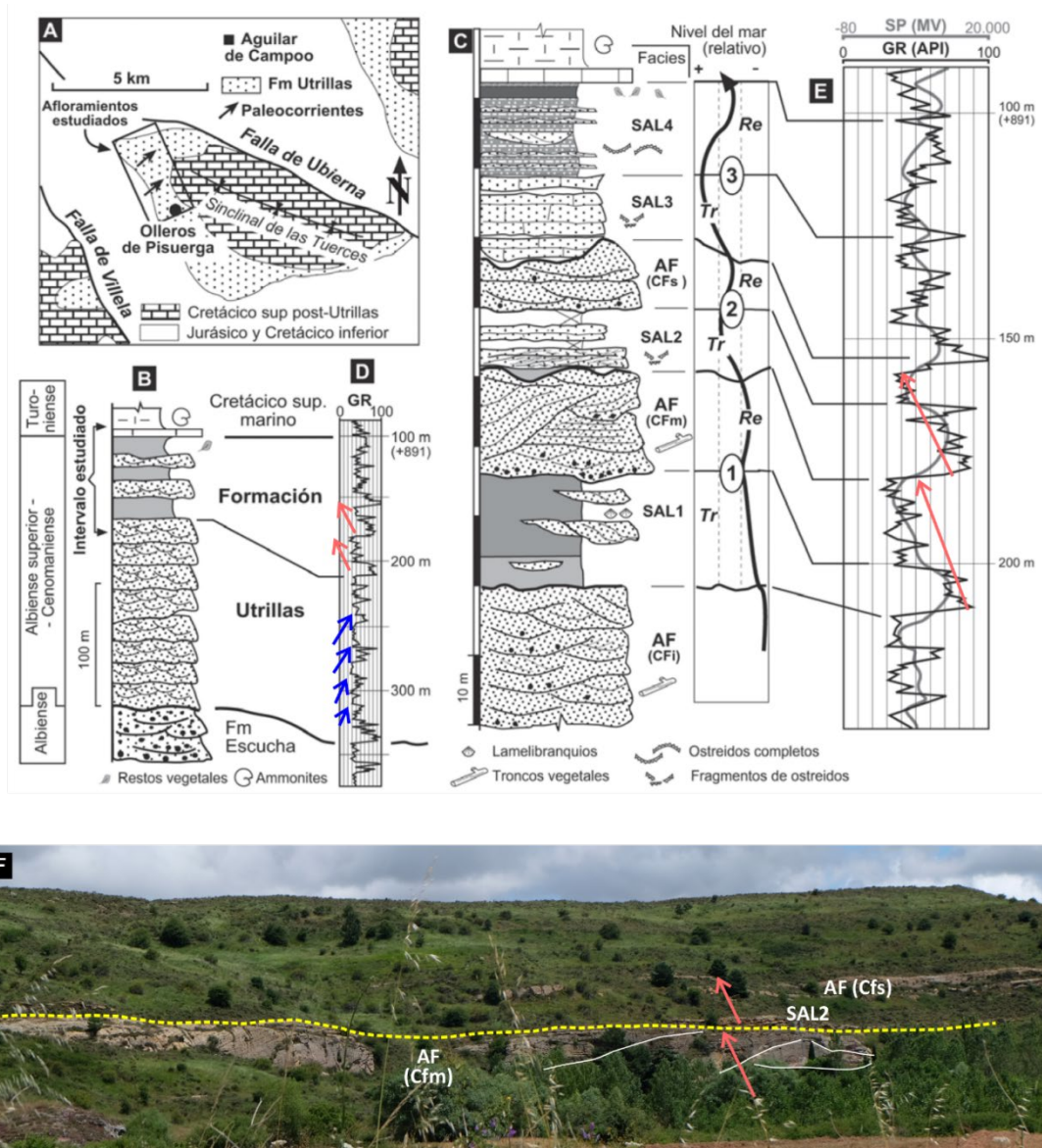


Figura P5.7. Característiques de la Fm. Utrillas a l'aflorament de Olleros de Pisuegra, 50 km a l'oest del [play](#) de Huidobro, al marge SW de la conca Basco-Cantàbrica (veure situació a [Fig. I.5](#)). A) Mapa amb la localització dels afloraments estudiats a Olleros de Pisuegra. B) Columna simplificada de la Fm. Utrillas en aquesta localitat. C) Columna detallada i interpretació seqüencial de la successió estudiada en aquesta localitat. AF = associació fluvial; CFi, m i s = cossos fluvials inferior, intermedi i superior; SAL 1 a 4 = subassociacions litorals; 1, 2 i 3 = paraseqüències; Tr i Re = intervals transgressius i regressius. D i E) Diagrames de [gamma ray](#) i [potencial espontani](#) de la Fm. Utrillas al pou Trashaedo-1 (veure localització al mapa de la [Fig. I.5](#)) i la seva correlació amb la successió estudiada. Les fletxes vermelles indiquen respostes de les electrofacies de tipus embut, i les blaves del tipus campana. Font: Pujalte i Robles (2008). F) Fotografia d'un dels afloraments on s'ha realitzat aquest estudi i on hem indicat alguns dels elements interpretats a Pujalte i Robles (2008).

Des de la perspectiva de la geologia d'hidrocarburs, es considera que aquesta alternança entre roques que presenten bones propietats com a reservori (són gresos poc cimentats que preserven la porositat primària) i argiles (roques impermeables) ha pogut esdevenir una bona trampa estratigràfica en la regió. No obstant, a falta d'un bon segell regional per damunt (ocupat per calcàries carstificades del Cretaci), aparentment no han pogut formar jaciments d'hidrocarburs.

A meitat d'alçada de la Hoya i de la potència total de la Fm. Utrillas, es troben les mines de coure de Huidobro, que contenen cristalls de malaquita i atzurita disseminats entre la matriu de les sorres i particularment als nivells conglomeràtics més porosos. El l'aflorament visitat en aquesta parada, també s'observen aquestes mineralitzacions (Fig. P5.5).

Parada 5.4 - Pou Huidobro-2

Aquest pou es situa a uns 725 m al W del primer pou perforat (Huidobro-1900), al centre de la Hoya de Huidobro i molt a prop de la creta de l'estructura anticlinal (Fig. P5.2). A la parada, podem observar el cap del pou (Fig. P5.8A).

Parada 5.5 - Pou Tejón Profundo-1

El pou Tejón-1 va ser l'últim pou perforat al [play](#) de Huidobro, l'any 1988. Es va situar fora de la Hoya de Huidobro, ja que tenia un objectiu exploratori més profund, tal i com s'ha explicat anteriorment. Es conserva el cap del pou (Fig. P5.8B).



Figura P5.8. A) Cap del pou Huidobro-2, situat a la Hoya de Huidobro. B) Emplaçament del pou Tejón Profundo-1, al bloc sud de l'estructura, on afloren les calcàries del Cretaci superior.

EXERCICI Parada 5

1. Indica la posició d'aquesta parada en els mapes geològics i talls proporcionats.

PARADA 6 (OPCIONAL). Hontomín

Localització: 42°34'49.60"N; 3°30'07.40"W

Objectiu:

- ✓ Visita a les instal·lacions d'una planta d'injecció de CO₂

La Planta de Desenvolupament Tecnològic Hontomín per l'emmagatzematge de CO₂ al subsòl va ser l'únic punt d'injecció actiu *onshore* de la Unió Europea durant cert temps. En l'actualitat, està temporalment aturada (Fig. P6.1).



Figura P6.1. Instal·lacions de la planta de la Fundación Ciudad de la Energía (Ciuden) per la injecció de CO₂ en el reservori d'Hontomín.

La planta es va construir per injectar gas aprofitant un antic jaciment (econòmicament no rendible) d'hidrocarburs fòssils que es troba a una profunditat d'uns 1500 m, constituït per calcàries i dolomies del Juràssic Inferior (Fm. Sopeña; Fig. I.3). El segell són les margues i argiles negres de les formacions Margues del Lias i Puerto de Pozazal. L'estructura del camp té forma de dom. El reservori presenta un grau elevat de fracturació i es troba compartimentat per diversos blocs, sense que la integritat del segell es trobi afectada.

Degut a la seva exclusiva i més antiga roca magatzem, el *play* d'Hontomín es considera que té un sistema petrolier diferent al sistema que formen la resta d'indícis i jaciments de la zona de Ayoluengo, tot i que comparteixen una mateixa roca mare (Beroiz & Permanyer, 2011; Permanyer et al., 2013).

EXERCICI Parada 6

1. Indica la posició d'aquesta parada en els mapes geològics i talls proporcionats.

Glossary/Glossari

API gravity/Graus API

Una escala de densitat específica desenvolupada per l'*American Petroleum Institute* (API) per mesurar la densitat relativa de diversos hidrocarburs líquids, expressada en graus. La gravetat API es mesura amb un hidròmetre, que es va dissenyar de manera que la majoria dels valors caiguessin entre el rang de 10° i 70°API. L'aigua dolça té una densitat API de 10.

Asphalt/Asfalt

Una forma sòlida o gairebé sòlida de betum (*bitumen*) que es pot fondre en escalfar-se i que conté impureses com el nitrogen, l'oxigen i el sofre. L'asfalt es forma de manera natural quan s'han eliminat o evaporat els components lleugers o volàtils del petroli.

Bitumen/Betum

Matèria orgànica inflamable d'origen natural formada a partir de querogen (*kerogen*) en el procés de generació d'hidrocarburs que és soluble en bisulfur de carboni. El betum inclou hidrocarburs com l'asfalt i la cera mineral. Normalment, el betum sòlid o gairebé sòlid, tan marró com negre, té una olor petrolífera distintiva. La dissolució de laboratori amb dissolvents orgànics permet determinar la quantitat de betum en mostres, una avaluació de la riquesa de roca mare.

Critical moment/Moment crític

El moment crític és el moment de més probabilitat d'atrapar i preservar hidrocarburs en un sistema petrolier —després que es formen les trampes i els hidrocarburs migren cap a un reservori i s'acumulen— i marca l'inici de la preservació en un sistema petrolier viable.

Gamma ray (GR) log/Registre de raigs gamma (GR)

Un registre de la radioactivitat natural total (emissió de raigs gamma per una formació), mesurat en unitats API. Les argiles són els responsables de la major radioactivitat natural, de manera que el registre de raigs gamma sovint és un bon indicador de la presència d'aquestes roques.

Gas-drive mechanism/Mecanisme per empenya de gas

Un mecanisme de producció primària (*primary recovery*) per pous de petroli que contenen gas dissolt i lliure, pel qual l'energia del gas en expansió s'utilitza per conduir el petroli des del reservori cap al pou de producció.

GOR (gas/oil ratio) /GOR (relació gas/cru)

Relació de gas a petroli en un reservori en condicions estàndard de 15°C i 1 atm. També es coneix com la proporció entre el gas produït i el cru produït.

Hydrogen index (HI)/Índex d'hidrogen (HI)

Quantitat d'hidrogen en relació amb la quantitat de carboni orgànic present en una roca. Es calcula com: $HI = (S_2/TOC) \times 100$ (en mg/g).

Infill drilling (infill producers)

Addició de pous en un camp que disminueix la distància de separació mitjana entre pous. Aquesta pràctica accelera la recuperació esperada i augmenta la recuperació final estimada en reservoris heterogenis millorant la continuïtat entre els injectors i els productors.

Kerogen/Querogen

Matèria orgànica sòlida i insoluble, natural, que es troba a les roques mare i que pot produir hidrocarburs en escalfar-se. Els querògens es descriuen com a tipus I, que consisteixen principalment en querògens algals i amorfs (però presumiblement algals) i que són molt propensos a generar petroli; Tipus II, barreja de matèria orgànica d'origen terrestre i marina que pot generar cru; i el tipus III, matèria orgànica terrestre i llenyosa que normalment genera gas.

Mature field/camp madur

Els camps madurs són camps d'hidrocarburs que estan en un estat de producció en declivi o que arriben al final de la seva vida productiva.

Oxygen index (OI)/Índex d'oxigen

Quantitat d'oxigen en relació amb la quantitat de carboni orgànic present en una roca. Es pot calcular com: $OI = (S_3/TOC) \times 100$ (en mg/g).

Paraffinic hydrocarbon/Hidrocarburi parafínic

Grup d'hidrocarburs format per molècules lineals amb la fórmula C_nH_{2n+2} . El metà, CH_4 , és el membre més senzill. Els membres superiors, que comencen aproximadament a C_{18} , són semblants a la cera i s'anomenen parafines.

Play

Zona on es troben (o on es podrien trobar) d'acumulacions d'hidrocarburs o [prospects](#).

Primary recovery/Recuperació primària

Primera etapa de la producció d'hidrocarburs, en què l'energia natural del reservori, com l'empenta de gas o l'empenta d'aigua, desplaça els hidrocarburs del reservori cap al pou i fins a la superfície. Inicialment, la pressió del reservori és considerablement superior a la pressió a la base del pou. Aquesta diferència de pressió tan elevada condueix els hidrocarburs cap al pou i cap a la superfície. No obstant, a mida que avança la producció, decau la pressió del reservori, i per tant, disminueix la pressió diferencial. Per reduir la pressió al pou o augmentar la pressió diferencial per mantenir la producció d'hidrocarburs, és necessari implementar un sistema d'elevació artificial, com ara una bomba de vareta. La producció mitjançant ascensor artificial es considera també recuperació primària. Durant la recuperació primària, només es produeix un petit percentatge dels hidrocarburs in situ, normalment al voltant del 10% pels reservoris de petroli. La recuperació primària també s'anomena producció primària.

Prospect

Àrea d'exploració en la qual es preveu que existiran hidrocarburs en quantitat econòmicament rentable. Un *prospect* sol ser una anomalia, com ara una estructura geològica o una anomalia d'amplitud sísmica, on els exploradors recomanen perforar un pou. La justificació de la perforació d'un *prospect* es realitza reunint proves d'un sistema petrolier actiu o una probabilitat raonable de trobar una roca reservori de qualitat, una trampa de mida suficient, roca segell adequada i condicions adequades per a la generació i migració d'hidrocarburs fins a la trampa.

Recovery factor/Factor de recuperació

Quantitat recuperable d'hidrocarburs inicialment al reservori (*in place*), normalment expressada en percentatge.

Resistivity

Capacitat d'un material de resistir la conducció elèctrica. És l'invers de la conductivitat i es mesura en ohm-m.

Ro (Vitrinite reflectance)/Ro (Reflectivitat de la vitrinita)

Mesura de la maduresa tèrmica de la matèria orgànica. Aquest mètode analític es va desenvolupar per classificar la maduresa dels carbons i ara s'utilitza en altres roques per determinar si han generat hidrocarburs o poden ser roques mare efectives. La reflectivitat de la vitrinita d'una mostra de roca es mesura al microscopi. La mesura sobre grans es dona en unitats de reflectància, % Ro, amb valors típics que oscil·len entre el 0% Ro i el 3% Ro, amb valors per a les roques mare generadores de gas que normalment superen el 1.5%.

Pyrolysis (Rock-Eval)/Piròlisi

Tipus d'anàlisi geoquímica en què una mostra de roca és sotmesa a escalfament controlat en un gas inert fins a arribar al punt de generar hidrocarburs per tal d'avaluar-ne la qualitat com a roca mare, l'abundància de matèria orgànica, la seva maduresa tèrmica, i la qualitat dels hidrocarburs que podria generar o haver generat. La piròlisi trenca grans molècules d'hidrocarburs en molècules més petites.

S₁

Quantitat d'hidrocarburs lliures presents en una mostra abans de l'anàlisi per piròlisi (mg HC/g de roca).

S₂

Quantitat d'hidrocarburs generada a través del cracking tèrmic de la matèria orgànica no volàtil en mg/g de roca durant la [piròlisi \(pyrolysis\)](#). La temperatura a la qual s'assoleix el pic de S₂ és la [T_{max}](#).

S₃

La quantitat de CO₂ produït durant la descomposició tèrmica per [piròlisi](#) del querogen (en mg CO₂/g roca).

S₄

Contingut de carboni residual de la mostra després de la [piròlisi](#) (després del refredament de la mostra) (en mg C/ g roca).

Secondary recovery/Recuperació secundària

Segona etapa de la producció d'hidrocarburs durant la qual s'injecta un fluid extern, com l'aigua o el gas, al reservori a través de pous d'injecció situats en una roca que té comunicació hidràulica amb els pous de producció. L'objectiu de la recuperació secundària és mantenir la pressió en el reservori i desplaçar els hidrocarburs cap al pou de producció. Les tècniques de recuperació secundària més habituals són la injecció de gas (*gas injection*) i d'aigua (*waterflooding*).

Spontaneous potential (SP)/Potencial espontani

Registre de la diferència natural de potencial elèctric, en milivolts, entre un elèctrode al forat del pou i un elèctrode de referència fix a la superfície. El component més útil d'aquesta diferència és el potencial electroquímic, ja que pot provocar una desviació significativa davant dels capes permeables. La magnitud de la deflexió depèn principalment del contrast de salinitat entre el fang de perforació i l'aigua de formació, i el contingut d'argila de la capa permeable. Per tant, el registre de potencial espontani (SP) s'utilitza per detectar capes permeables i estimar la salinitat de l'aigua de la formació i el contingut en argila de la formació. El registre SP no es pot mesurar en fangs no conductors.

Tar sands/Sorres al·fàtiques o bituminoses

Cos de sorra/gres que conté residus d'hidrocarburs pesats com el quitrà o l'[asfalt](#) o cru degradat que ha perdut els components volàtils. Els hidrocarburs es poden alliberar de les sorres mitjançant l'escalfament i altres processos, però les sorres al·fàtiques, com les d'Athabasca al Canadà, no solen ser comercials a causa dels alts costos de producció. Aquest terme està caient en desús, a favor del terme "arena de petroli" (*oil sand*).

T_{max}

T_{max} és la temperatura (en °C) a la qual es produeix la taxa màxima de generació d'hidrocarburs (pic [S₂](#)) en una mostra de querogen durant la [piròlisi](#). Per als tipus de [querògens](#) II i III, T_{max} <435°C indica que la roca mare no hauria entrat a la zona o finestra de la genera d'hidrocarburs (imadura); la finestra de cru està indicada per T_{max} entre 435°C i 455°C per querògens del tipus II, i entre 435 i 465 per al tipus III, mentre que T_{max} > 455°C i 465°C són indicatius de la finestra de generació de gas per als tipus II i III, respectivament.

TOC

Concentració de matèria orgànica en roques mare representada pel percentatge en pes de carboni orgànic. Un valor aproximat del 0.5% de carboni orgànic total en percentatge en pes es considera el mínim per obtenir una roca mare efectiva. El TOC es pot calcular mesurant la quantitat de [S₁](#), [S₂](#) i [S₄](#) durant la [piròlisi](#) mitjançant l'expressió següent: %TOC = [0.082(S₁+S₂) + S₄]/10.

Transformation ratio (TR)

Proporció d'hidrocarburs (cru i gas) generats a partir de la maduració del [querogen](#) respecte la quantitat total d'hidrocarburs que el querogen és capaç de generar.

Vitrinite

Tipus de querogen llenyós de composició relativament uniforme. Atès que els canvis de vitrinite són previsibles i constants en escalfar-se, la seva reflectància ([R_o](#)) és una mesura útil de la maduresa de la roca mare.

Water-drive mechanism/Mecanisme per empenta d'aigua

Mecanisme primari de recuperació ([primary recovery](#)) on la pressió de l'aigua lliure és suficient per moure els hidrocarburs fora del reservori, cap al pou i cap a la superfície.

Workover

Procés de manteniment o reparació importants en un pou de petroli o gas.

Font de les definicions del glossari:

Schlumberger Oilfield Glossary: <https://glossary.oilfield.slb.com/en/>

AAPG Wiki: https://wiki.aapg.org/Main_Page

Selley, R.C., 1998. Elements of Petroleum Geology, Second Edition. Academic Press, 470 p.

Referències bibliogràfiques

- Ábalos, 2016. Geologic map of the Basque-Cantabrian Basin and a new tectonic interpretation of the Basque Arc. *International Journal of Earth Science* 105, 2327 – 2354. DOI: 10.1007/s00531-016-1291-6
- Alonso-Zarza, A.M., Armenteros, I., Braga, J. C., Muñoz, A., Pujalte, V., Ramos, E., 2002. Tertiary. A: W. Gibbons, T. Moreno (Eds), *The Geology of Spain*, Geological Society, London, 293 – 334.
- Alvarez de Buergo, E., García, A., 1996. Cálculo de reservas remanentes de hidrocarburos en zonas estructuralment complejas: aplicación al campo de Ayoluengo, 1ª parte. *Geogaceta* 20, 161 – 164.
- Aróstegui, J., Irabien, M.J., Sangüesa, J., Zuluaga, M.C., 2000. La formación Utrillas en el bordes sur de la cuenca Vasco-Cantábrica: Aspectos estratigráficos, mineralógicos y genéticos. *Estudios Geológicos* 56, 251-267. DOI: 10.3989/egeol.00565-6142
- Aurell, M., Melendez, G., Oloriz, F., 2002. Jurassic. A: W. Gibbons and T. Moreno (Eds), *The Geology of Spain*, Geological Society, London, 213 – 254.
- Aurell, M., Robles, S., Bádenas, B., Rosales, I., Quesada, S., Meléndez, G., García-Ramos, J.C. 2003. Transgressive-regressive cycles and Jurassic paleogeography of northeast Iberia. *Sedimentary Geology*, 162, 239-271. doi:10.1016/S0037-0738(03)00154-4.
- Barnolas, A., Pujalte, V., 2004. La Cordillera Pirenaica. A: J. A. Vera (Ed), *Geología de España*, SGE-IGME, Madrid, 233 – 343.
- Beroiz, C., Permanyer, A., 2011. Hydrocarbon habitat of the Sedano Through, Basque-Cantabrian basin, Spain. *Journal of Petroleum Geology* 34, 387 – 410.
- Cámara, P., 2017. Chapter 17 - Salt and Strike-Slip Tectonics as Main Drivers in the Structural Evolution of the Basque-Cantabrian Basin, Spain. A: J.I. Soto, J.F. Flinch, G. Tari (Eds), *Permo-Triassic Salt provinces of Europe, North Africa and Atlantic Margins. Tectonics and Hydrocarbon Potential*, 371–393, <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-809417-4.00018-5>
- Carola, E., 2014. The transition between thin- to thick-skinned styles of deformation in the Western Pyrenean Belt. PhD thesis, Universitat de Barcelona, 245 p.
- Floquet, M., 1998. Outcrop cycle stratigraphy of shallow ramp deposits: the late Cretaceous series on the Castilian Ramp (Northern Spain). In: P. C. Graciansky, J. Hardenbol, T. Jacquin, P. R. Vail (eds), *Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins*. SEPM Special Publication 60, SEPM, 343 – 361.
- García de Cortázar, A., Pujalte, V., 1982. Litoestratigrafia i facies del Grupo Cabuñerniga (Malm-Valanginiense inferior?) al S de Cantabria-NE de Palencia. *Cuadernos Geología Ibérica* 8, 5 – 21.
- García-Mondéjar, J., Agirrezabalala, L. M., Aramburu, A., Fernandez-Mendiola, P. A., Gómez-Pérez, I., López-Horgue, M., Rosales, I., 1996. Aptian-Albian Tectonic pattern of the Basque-Cantabrian Basin (northern Spain). *Geological Journal* 31, 13 – 45.
- García-Mondéjar, J., Fernández-Mendiola, P. A., Agirrezabalala, L. M., Aramburu, A., López-Horgue, M. A., Iriarte, E., Martínez de Rituerto, S., 2004. El Aptiense-Albiense de la Cuenca Vasco-Cantábrica. In: J. A. Vera (ed), *Geología de España*, SGE-IGME, 291 – 296.
- García-Mondéjar, J., López-Horgue, M. A., Aramburu, A., Fernández-Mendiola, P. A., 2005. Pulsating subsidence during a rift episode: stratigraphic and tectonic consequences (Aptian–Albian, northern Spain). *Terra Nova* 17, 517 – 525.
- IGME, 1977a. Mapa Geológico de España Escala 1:50.000, Hoja 109 (Villarcayo).

- IGME, 1977b. Mapa Geològic de Espanya Escala 1:50.000, Hoja 135 (Sedano).
- Klimowitz, J., Malagón, J., Quesada, S., Serrano, A., 1999. Desarrollo y evolución de estructuras salinas mesozóicas en la parte suroccidental de la Cuenca Vasco-Cantábrica (Norte de España): Implicaciones exploratorias. In: AGGEP (ed), Libro Homenaje a José Ramírez del Pozo, Madrid, 159 – 166.
- Martin-Chivelet, J., 2002. Cretaceous. A: W. Gibbons and T. Moreno (Eds), The Geology of Spain, Geological Society, London, 255 – 292.
- Miro, J., 2020. Rift-inheritance, segmentation and reactivation of the North Iberian rift system in the Basque - Cantabrian Pyrenees. Tesi Doctoral, Universitat de Strasbourg i Universitat de Barcelona, 247 p.
- Navarro, J., 2016a. El campo de Petróleo de Ayoluengo: 50 años de historia. Guía de campo (no publicat), 38 p.
- Navarro, J., 2016b. Spain's Oldest and Only Onshore Oilfield. AAPG Explorer, February 2016, 32 – 33.
- Navarro, J., 2017. Ayoluengo – A Unique Oil Field Onshore Spain. 79th EAGE Conference & Exhibition 2017 Paris, France, June 12 – 15, 2017. Paper number We C1 11. DOI: 10.3997/2214-4609.201701276
- Permanyer, A., Márquez, G., Gallego, J.R., 2013. Compositional variability in oils and formation waters from the Ayoluengo and Hontomín fields (Burgos, Spain). Implications for assessing biodegradation and reservoir compartmentalization. Organic Geochemistry 54, 125–139.
- Pujalte, V., 1974. Litoestratigrafía de la facies Weald (Valanginiense superior-Barremiense), en la provincia de Santander (norte de España). Boletín Geológico y Minero 85, 10 – 21.
- Pujalte, V., 1976. Posibilidad de una nueva división estratigráfica de los sedimentos no marinos del Jurásico superior y Cretácico inferior, en la provincia de Santander. Boletín Geológico y Minero 57, 101 – 118.
- Pujalte, V., 1979. Control tectónico de la sedimentación "purbeck-weald" en las provincias de Santander y N. de Burgos. Acta Geológica Hispánica 14, Homenaje a Lluís Solé i Sabarís, 216 – 222.
- Pujalte, V., 1982. La evolución paleogeográfica de la cuenca "Wealdense" de Cantabria. Cuadernos de Geología Ibérica 8, 65 – 83.
- Pujalte, V., 1989a. Ensayo de correlación de las sucesiones del Oxfordiense-Barremiense de la Región Vasco-Cantábrica basado en macrosecuencias deposicionales: implicaciones paleogeográficas. Cuadernos de Geología Ibérica 13, 199 – 215.
- Pujalte, V., 1989b. Macrosecuencias deposicionales del Oxfordiense-Barremiense de la region Vasco-Cantábrica: Implicaciones estratigráficas y paleogeográficas. In: AGGEP (ed), Libro Homenaje a Rafael Soler, 105 – 115.
- Pujalte, V., Robles, S., 2008. Parasecuencias Transgresivo-Regresivas en un Cortejo Transgresivo: parte superior de la Fm Utrillas en Olleros de Pisuerga, Palencia. Geogaceta 44, 187 – 190.
- Quesada, S., Dorronsoro, C., Robles, S., Chaler, R., Grimalt, J., 1997. Geochemical correlation of oil from the Ayoluengo field to Liassic black shale units in the southwestern Basque-Cantabrian Basin (northern Spain). Organic Geochemistry 27, 25 – 40.
- Quesada, S., Hernández, E., Rosales, I., Klimowitz, J., Serrano, A., 2006. A field trip guide book: Two days around Ayoluengo oild field area. In: W. Martínez del Olmo (ed), Libro XXV Aniversario de la AGGEP. Asociación de Geólogos y Geofísicos Españoles del Petróleo, 209 – 222.
- Quesada, S., Robles, S., Pujalte, V., 1991. Correlación secuencial y sedimentológica entre registros de sondeos y series de superficie del Jurásico Marino de la Cuenca de Santander (Cantabria, Palencia y Burgos). Geogaceta 10, 3 – 6.

- Quesada, S., Robles, S., Pujalte, V., 1993. El "Jurásico Marino" del margen suroccidental de la Cuenca Vasco-cantábrica. *Geogaceta* 13, 92 – 96.
- Quesada, S., Robles, S. i Rosales, I., 2005. Depositional architecture and transgressive–regressive cycles within Lias backstepping carbonate ramps in the Basque–Cantabrian basin, Northern Spain. *Journal of the Geological Society*, 162, 531-548.
- Quintá, A., 2013. El patrón de fracturación alpina en el sector suroccidental de los Pirineos Vascos. PhD thesis, Universitat de Barcelona, 170 p.
- Rat, P., 1988. The Basque–Cantabrian basin between the Iberian and European plates; some facts but still many problems. *Revista de la Sociedad Geologica de España*, 1 (3-4), 327-348.
- Repsol, 1994. Concesión de Explotación "LORA", Campo petrolífero de Ayoluengo, Burgos, España. Informe intern de Repsol.
- Robles, S., Pujalte, V., García-Mondéjar, J., 1988. Evolución de los sistemas sedimentarios del margen continental cantábrico durante el Albiense y Cenomaniense, en la transversal del litoral vizcaino. *Revista de la Sociedad Geológica de España* 1, 409 – 441.
- Sanz, R., 1967. Ayoluengo field, Southwest Cantabrian Basin. *Proceedings of the 7th World Petroleum Congress*, Mexico, 251 – 258.
- Serrano, A., Martínez del Olmo, W., 1990. Tectónica salina en el Dominio Cantábri-Navarro: evolución, edad y origen de las estructuras salinas. In: F. Ortí, J. M. Salvany (eds), *Formaciones evaporíticas de la Cuenca del Ebro y cadenas periféricas y de la zona de Levante*, Universitat de Barcelona, 39 – 53.