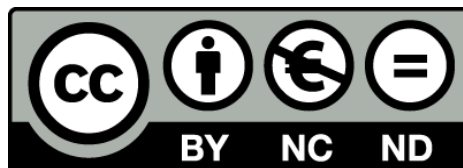


Basement fault influence on the Bicornb-Quesa Salt Wall kinematics, insights from Magnetotelluric and Paleomagnetic techniques on Salt Tectonics

Marc Rubinat Cabanas



Aquesta tesi doctoral està subjecta a la llicència **Reconeixement- NoComercial – SenseObraDerivada 3.0. Espanya de Creative Commons.**

Esta tesis doctoral está sujeta a la licencia **Reconocimiento - NoComercial – SinObraDerivada 3.0. España de Creative Commons.**

This doctoral thesis is licensed under the **Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0. Spain License.**



Institut de Recerca Geomodels
Grup de Recerca Consolidat de Geodinàmica i Anàlisi de Conques
Departament de Geodinàmica i Geofísica
Universitat de Barcelona

***Basement fault influence on the Bicornb-Quesa
Salt Wall kinematics, insights from Magnetotelluric
and Paleomagnetic techniques on Salt Tectonics***

**Thesis submitted by Marc Rubinat Cabanas for the degree of Doctor in
Geology.**

**This thesis has been done within the framework of the Exploration, Analysis of
Basin and Orogenic Systems Doctorate Program of the University of Barcelona
(2004-2006 Biennium) under the supervision of Dr. Eduard Roca i Abella.**

Marc Rubinat Cabanas

Barcelona, April 2012

Dr. Eduard Roca i Abella

This thesis has been completed within the Geodynamics and Basin analysis Group of the University of Barcelona (Grup de Recerca Consolidat reconegut per la Generalitat de Catalunya; referències 2005SGR-000397 i 2009SGR-1198) and the Geomodels Research Group (financed by the Generalitat of Catalunya, Instituto Geológico y Minero de España (IGME) and some private national and international companies). In addition this thesis has been first developed by a Repsol-UB research grant. The research programmes are within the framework of the Spanish governmental projects: CONSTRUCCIÓN DE MODELOS ESTRUCTURALES 3D (CGL2004-05816-C02-01), MODELIZACIÓN ESTRUCTURAL 4D (CGL2007-66431-C02-01) y INTECTOSAL: CGL2010-21968-C02-01. We also want to thank Midland Valley Exploration and Paradigm for the software licences kindly provided for the realization of the thesis.

La presència de materials evaporítics condiciona l'estructura que es desenvoluparà en un àrea ja que les propietats reològiques de les evaporites són molt diferents a les d'altres materials. Especialment la sal, que es deforma plàsticament, és menys densa i més dèbil que la majoria dels materials (Jackson i Talbot, 1986; Jackson i Vendeville, 1994). Aquestes propietats permetran la formació de coixins salins, diapirs salins, parets salines, llengües salines, etc. La generació d'aquestes estructures i el fet de que la sal sigui impermeable propicia la formació de trampes per hidrocarburs i la possibilitat d'emmagatzemar CO₂ o altres residus. Aquest fet els hi dóna a les estructures salines interès econòmic i facilita l'avenç científic en la matèria, com mostra la publicació d'articles que han millorat el coneixement d'aquestes estructures a partir dels anys '90 (ex. Vendeville i Jackson 1992; Jackson 1995; Letouzey et al. 1995; Ge et al. 1997; Rowan et al. 2003; Stewart 2006; Hudec i Jackson 2007, etc.)

L'efecte causat a una cobertora fràgil, pel moviment de una falla normal de basament sobre la qual tenim un nivell de desenganxament dúctil ha estat ampliament estudiat (Koyi et al. 1993; Nalpas i Brun 1993; Jackson i Vendeville 1994; Vendeville et al. 1995; Stewart i Clark 1999; Withjack i Callaway 2000; Dooley et al. 2003; 2005). També, amb la mateixa disposició de materials fràgils-dúctils, ha estat investigada la inversió de les falles normals de basament durant una etapa compressiva (Letouzey et al. 1995; Stewart i Clark 1999; Krzywiec 2004; Ferrer et al. 2012). Per altra banda, la deformació de pell prima provocada per una època compressiva a sobre de un nivell de desenganxament també ha estat estudiada (ex. Chapple 1978; Davis i Engelder 1985; Coward i Stewart 1995; Sans i Koyi 2001), i amb la mateixa geometria les conseqüències de una compressió en un diapir previ (Vendeville i Nilsen 1995; Canerot et al 2005; Roca et al 2006; Callot et al. 2007; Dooley et al. 2009). Tanmateix, no hi ha cap estudi previ publicat en revistes científiques internacionals que descriu la deformació per compressió de la pell prima prèviament afectada per una falla de basament. Per tal d'omplir aquest buit, s'ha estudiat la paret salina de Bicorn-Buesa, molt adequada ja que està localitzada a sobre d'una falla de basament, en una zona afectada per compressió amb deformació de pell prima (Roca et al 1996, 2006).

Actualment, per l'estudi de la tectònica salina les dades més utilitzades són la sísmica (ex. Netzeband et al 2006, Fiduk i Rowan 2012) i els estudis de camp (ex. Jackson et al 1990; Roca et al 1996; Sans 2003). A més a més, mitjançant tècniques com la restitució estructural (ex. Worrall i Snelson, 1989; Hossack, 1995; Rowan i Ratliff, 2012) i els models tant numèrics com analògics (ex. Jackson i Talbot 1989; Zaleski i Julien 1992; Podladchikov et al 1993; Chemia et al 2008) s'aprofundeix en el coneixement de la tectònica salina i les diverses àrees d'estudi.

En aquesta tesi, els magnífics afloraments del Segment de Paret Salina (SPS, anomenat SWS en anglès) de Bicornb-Quesa, (tant de la cobertora com de la pròpia paret diapírica) ens permeten aprofundir en el coneixement de la tectònica salina ja que no és habitual que aflorin tant bé i tant extensament els materials diapírics. A més a més, aquesta tesi vol mostrar la possibilitat d'utilitzar altres dades que estan àmpliament esteses en altres camps de la geologia però molt poc en l'estudi de tectònica salina: les dades magnetotellúriques (Hoversten et al. 2000; Newman et al. 2002; Key et al. 2006) i les paleomagnètiques (Weinberger et al. 1995; 1997; Henry et al. 2000). L' utilització d'aquestes dades ens permetrà aplicar la tècnica de restitució amb més informació i per tant millorant aquesta.

Marc Geològic

El Bicornb-Quesa SPS, anteriorment anomenat Bicornb-Quesa Diapir, es troba situat al Domini Valencià. El Domini Valencià és una plataforma subhoritzontal de 40 km² de materials d'edat Mesozoica-Cenozoica, majoritàriament carbonats, desenganxats del basament als materials evaporítics del Keuper. Aquesta plataforma carbonatada es troba tallada per un sistema de fosses amb direccions ENE-WSW i NNW-SSE al centre de les quals s'hi poden trobar segments de parets diapíriques com les del Bicornb-Quesa SPS.

El Domini Valencià es troba situat al límit de dos cadenes muntanyoses, al Nord trobem la Cadena Ibèrica i al Sud la Cadena Bètica. Tradicionalment aquest domini ha estat inclòs en la Cadena Bètica i definit com la part més externa de la Zona Prebètica. La Zona Prebètica, al seu torn, constitueix la part més externa del cinturó de plecs i encavalcaments de la Cadena Bètica (García-Rodrigo 1960; Azéma et al. 1979; García-Hernández et al. 1980; De Ruig 1992).

La Cadena Ibèrica és una cadena muntanyosa amb direcció NW-SW que està formada per la inversió de conques de rift intracontinentals que es formen entre el Permià Superior i el Cretaci Superior i invertides durant l'Oligocè a Eocè (ex. Alvaro et al., 1979; Guimerà et al 1990).

La Zona Prebètica es tracta d'una zona on la cobertora para-autòctona carbonatada (Mesozoica-Cenozoica) està afectada per plecs i encavalcaments desenganxats del basament Varisc en el Triàsic (Vera, 1983). Les discordances associades amb els plecs i encavalcaments han permès identificar estadis compressius entre l'Oligocè i el Tortonià (ex. Calvo et al., 1978; De Ruig et al., 1987; Beets i De Ruig, 1992; Montenat et al.; 1996; Roca et al 1996). El sostre del basament Varisc localitzat sota la Zona Prebètica cabussa pocs graus cap al sud-

est i es troba afectat per una sèrie de falles normals molt verticals (Carbó 1982; Castaño i Carbó 1995; ter Borgh et al. 2011). A sobre del nivell de desenganxament, la cobertora està deformada amb plecs caixa, falles inverses, falles normals i diapirs formats per evaporites triàsiques. Les direccions d'aquestes estructures són ENE-WSW tot i que també podem trobar altres orientacions (De Ruig 1992; Roca et al. 2006; ter Borgh et al. 2011). En aquest context de cobertora deformada contractivament, al sud predominen les estructures que absorbeixen més deformació (encavalcaments i plecs) i aquestes decreixen significativament cap al NNE. D'acord amb aquest decreixement de la deformació es distingeixen tres dominis estructurals: El Prebètic Intern, el Prebètic Extern i el Domini Valencià (García-Rodrigo 1960; Azéma et al. 1979; García-Hernández et al. 1980; De Ruig 1992).

La Zona Prebètica ha estat afectada per diverses etapes en les quals s'han generat o deformat diapirs. Durant el Juràssic el desplaçament per gravetat de la sal cap a les parts internes de la conca generà diapirisme a les parts internes de la zona Prebètica (Martinez del Olmo 1999). Després, durant el Miocè Inferior-Mig, una fase extensional relacionada amb l'obertura del Mediterrani genera un nou creixement de diapirs al llarg de la zona Prebètica (De Ruig 1992; Santisteban et al. 1994; Roca et al. 1996; Martínez del Olmo 1999; Roca et al. 2006). Els diapirs generats són escanyats durant la formació de la Cadena Bètica (Moseley 1981; De Ruig 1992,1995; Roca et al. 1996,2006;). Després d'aquesta deformació compressiva tota l'àrea d'estudi es troba afectada per una etapa extensiva durant el Miocè tardà, que genera la reactivació d'algunes falles i diapirs preexistents a la cobertora (Ott d'Estevou et al. 1988; De Ruig 1995; Roca et al. 1996).

Dades Magnetotel·lúriques

El mètode magnetotel·lúric és una tècnica electromagnètica de font natural que permet caracteritzar la conductivitat elèctrica del subsòl mitjançant la mesura simultània de les variacions de camp elèctric i magnètic a la superfície de la Terra. La penetració del camp electromagnètic depèn de la conductivitat i de la freqüència de la senyal. Els fonaments del mètode estan extensament explicats a Vozoff (1991) i Simpson i Bahr (2005).

En la zona d'estudi s'han realitzat un total de 60 punts de mesura dividits en tres perfils: un que travessa perpendicularment el diapir i dos localitzats a fora d'aquest tallant perpendicularment falles principals de l'àrea d'estudi. Aquests perfils mostren un canvi de resistivitat que són fàcilment correlacionables amb les diferents litologies. Les resistivitats altes corresponen a les evaporites seques (sal i

anhidrita), les roques metamòrfiques del basament, les roques volcàniques i les dolomies. Les resistivitats mitjanes corresponen a les calcàries i finalment les resistivitats baixes corresponen a les argiles, sorres i evaporites humides (guix i sal humida). Gràcies a aquestes imatges s'ha pogut caracteritzar el basament i veure els gruixos dels diferents materials en profunditat.

Entre la informació més valuosa que ens ha proporcionat aquest mètode cal destacar la presència d'una falla de basament amb un salt de 1000 metres cabussant cap al N localitzada sota del Bicornb-Quesa SPS i que va ser activa entre el Pèrmic i el Triàsic, i entre el Juràssic Superior i el Cretaci. En canvi a la resta dels perfils el basament és pràcticament pla, només una petita falla de 100m ha estat localitzada sota la falla que relleva el Bicornb-Quesa SPS, la falla de Carroig. També hi destaca l'acumulació de sal seca en el centre del Bicornb-Quesa SPS i al bloc inferior de les falles principals de la zona que provoquen l'inclinació dels blocs en direcció oposada a les falles.

Estructura de Bicornb-Quesa

El Bicornb-Quesa SPS es troba situat a la part central del Domini Valencià, es tracta d'una estructura allargada de 12 km de llarg i que es va eixamplant progressivament cap a l'est fins a assolir els dos quilòmetres d'amplada a la seva culminació est. En aquest punt s'intersecta amb el segment de paret salina de Navarrès, que s'estén 15 quilòmetres seguint una direcció sud-sud-est. La terminació oest del Bicornb-Quesa SPS coincideix amb la intersecció de dues semifosses: la semifossa de Sàcaras amb direcció NW-SE i la de Juanera amb direcció ENE-WSW. Flanquejant la paret diapírica i en certa continuïtat amb aquestes fosses trobem les semifosses de Bicornb i Quesa situades al Nord i Sud de la paret, respectivament.

L'estructura de Bicornb-Quesa SPS es troba fortament condicionada per la presència del nivell dúctil i diapíric del Triàsic Mig-Superior. Aquest nivell desenganxa la deformació dels materials localitzats a sobre i a sota, donant estructures molt diferents a sota de la sal (deformació de pell gruixuda) i a sobre (deformació de pell prima) (Nalpas i Brun 1993; Vendeville et al 1995; Withjack i Callaway 2000; Dooley et al. 2005). Així doncs podem diferenciar tres estils estructurals a la zona: el del basament, el del nivell de desenganxament i el de la cobertora.

L'estructura de basament

Els perfils magnetotel·lúrics, així com les dades gravimètriques de la regió (Carbó 1980) i l'alçada relativa dels diferents materials ens han mostrat la situació de un basament pràcticament pla, tallat per la falla de basament de Bicornb-Quesa, sota el Bicornb-Quesa SPS. També ens ha permés localitzar la petita falla de basament localitzades sota la falla de Carroig, ja anomenades abans. Però aquestes dades també ens han indicat la presència d'una falla de basament cabussant cap a l'est sota del Navarrès SPS.

L'estructura del Triàsic Mig-Superior

Gràcies a poder diferenciar sis unitats dins de la paret salina, cinc del Keuper (K1 a K5) i una del Muschelkak superior, ha estat possible cartografiar les parets salines, fet que ens ha aportat molta informació sobre l'evolució del diapir. Entre aquests materials el K1 és el que té el major contingut de sal en tota la seqüència evaporítica. Aquest fet fa que aquesta unitat sigui la que inicií el diapirisme i nucleji els diapires.

El Bicornb-Quesa SPS és lleugerament asimètric, té el flanc nord vertical i el flanc sud cabussa uns 50 graus cap al sud. L'estructura interna de la paret diapírica és molt complexa, amb un gran nombre de plecs, zones de cisalla i falles. Entre aquestes estructures destaquen dos anticlinals d'escala quilomètrica, un localitzat a l'est i l'altre a l'oest amb el nuclis formats de K1, i separats entre ells per un sinclinal format majoritàriament per K2-K5. Les estructures d'aquests dos anticlinals són molt similars, tenen direcció NNE-SSW i estan limitades per una sèrie de zones de cisalla i falles que els separa de la successió K2-K5 localitzada a les vores del diapir. Aquests anticlinals es generen com a bulbs nucleats en sal com mostra la estructura interna d'aquest, on destaquen grans plecs amb direcció NNE-SSW, paral·lels a la paret però on sovint trobem zones caòtiques amb la presència de zones brexificades degut a la extrusió de sal. L'anàlisi de quasi 300 eixos de plecs menors també corrobora dos funcionaments diferenciats entre aquests bulbs de K1 i les vores de K2-K5. Els eixos de K1 mostren una clara tendència vertical, formats degut a un creixement del diapir mitjançant plecs tipus cortina (Talbot i Jackson 1987, Jackson i talbot 1989) , mentre que en la successió K2-K5 els que predominen són els eixos subhorizontals amb direcció NNW-SSE a WNW-ENE. Aquests van ser generats prèviament als tipus cortina ja que son tallats per aquests. Així doncs foren formats anteriorment al creixement del diapir

durant una època compressiva ja que tenen una direcció que coincideix amb la direcció de màxim escurçament de les Cadenes Bètica i Ibèrica.

En un d'aquests anticlinals trobem localitzats materials del Muschelkalk majoritàriament sobre K1 i localment sobre K2-K3. Els materials del Muschelkalk es troben afectats pels plecs principals de direcció NNE-SSW. Així doncs aquests materials del Muschelkalk constitueixen una klippe tectònica que mostra el bloc superior d'un encavalcament que afecta a la seqüència del Keuper. Aquest es troba afectat pels plecs de creixement del diapir i, per tant, l'emplaçament d'aquesta unitat es dona anteriorment a l'emplaçament del diapir actual. La formació d'aquests dúplex intrasalins ha de produir-se en una època compressiva. Així doncs, aquesta estructura pot haver-se emplaçat contemporàniament a la compressió produïda per les Serralades Ibèrica o Bètica.

Aquests estadis de creixement del diapir no són els únics que queden enregistrats en l'actual paret salina. Al flanc nord del diapir es poden observar materials del K4 limitats per falles i zones de cisalla, es podria tractar de les restes del coll d'un diapir que va ser escanyat. Una paret salina al escanyar-se genera soldadures secundàries i estructures tipus Q-tip (Rowan i Vendeville 2006; Dooley et al. 2009) com la descrita anteriorment. Aquest primera paret salina, segons les restes de materials del Keuper que es troben en el Miocè i que reomple les semifoses que flanquejen la paret salina, va ser emplaçat durant el Miocè Inferior-Mig (Roca et al., 1996; Anadón et al., 1998).

L'Estructura de la cobertora

Al Nord destaca la presència de la semifossa de Sàcaras. Aquesta es desenvolupa com a resposta a la formació de la falla de la Solana que cabussa cap al SW. El bloc inferior, en les parts més properes a la falla, es troba flexionat, cabussant cap el NE. Aquesta flexió que aixeca la plataforma també es dona a la resta de falles principals que tallen la cobertora indicant la formació de diapirs reactius sota d'aquestes falles. El bloc superior de la falla de Solana el trobem inclinat 10-35° cap al NE. A prop de la falla el bloc superior el trobem deformat, formant un sinclinal, tal i com també passa en d'altres falles principals. La geometria d'aquests plecs ens indica que són plecs de propagació de falla extensiva i que la formació de la falla va ser precedida per aquests.

A l'Oest destaca la semifossa de la Juanera, la qual està limitada al nord per la falla extensiva del Carroig, que cabussa cap al sud. Aquesta falla connecta amb la terminació oest del diapir i té un salt de falla que arriba als 1000 metres. Els dipòsits sedimentats, d'edat Miocè Inferior-Mig, d'aquesta fosa es troben

afectats tant per la falla com per falles antitètiques relacionades amb aquesta, mostrant-nos moviments de la falla posteriors a la sedimentació del Miocè Inferior-Mig. També hi destaca una estructura anterior a la formació de la falla i la sedimentació dels materials. Es tracta d'un anticlinal que està localitzat a la prolongació del diapir sobre el que es disposen de manera discordant els materials del Miocè Inferior-Mig.

Al sud-oest està localitzada la semifossa de Quesa, que es pot considerar la prolongació de la semifossa de la Juanera tot i que té una polaritat inversa ja que la falla principal que la genera (Falla de Los Charcos) cabussa cap al NW. Aquesta falla arriba a tenir un salt de 900 metres i com en les anteriors trobem el bloc inferior inclinat a causa dels moviments de la sal. El bloc superior el trobem compartimentalitzat per falles, moltes de les quals cabussen cap al NW. En aquesta semifossa trobem materials que van des del Miocè Inferior al Superior (Ruiz-Sanchez i Santisteban 2004).

En el NE de l'àrea d'estudi trobem situada la semifossa de Bicornb-Quesa. Aquesta es troba relacionada a la formació de la falla de Cazuma, que cabussa cap al SE i arriba a tenir un salt de falla de 1300 metres. És la de més salt en l'àrea d'estudi i com en les altres falles principals trobem un diapir reactiu a sota del bloc inferior, que plega el pla de falla i flexiona la cobertora. En el bloc inferior trobem falles menors menys plegades i desplaçades que l'anterior. La disposició discordant del Miocè d'aquestes últimes falles ens ajuda a datar-les com a coetànies al Miocè Superior. Pel que fa referència al bloc superior, el trobem inclinat cap al NNW i presenta alguna falla menor extensional. D'acord amb la sedimentació de la semifossa aquestes últimes falles i la de Cazuma són coetànies al Miocè Inferior (Roca et al 1996).

Al voltant de la paret salina trobem que el Miocè Inferior-Mig està flexionat, flexió que provoca l'aixecament dels materials cabussant en direcció oposada a la paret salina. Aquesta flexió es més important a la paret nord. Les geometries d'estrats de creixement daten aquesta flexió com a Miocè Mig, i seria coetània a l'emplaçament de l'encavalcament de baix angle dirigit cap al NW del Pico de la Olla que talla els materials flexionats del Miocè. Aquest encavalcament afecta als materials Miocens inferiors però no als més joves, podent datar-lo com a Miocè Mig i relacionar-lo amb l'emplaçament de les Bètiques.

A la part més occidental del diapir, així com a altres zones, aflora un anticlinal discordant amb els materials Miocens dels que hem parlat anteriorment, que té la sèrie Juràssica-Cretàcica apimada. Al flanc posterior d'aquest anticlinal,

localitzat a la semifossa de Quesa, trobem falles inverses d'alt angle, formades posteriorment o durant la formació de l'anticlinal. Al flanc anterior, localitzat a la semifossa de Bicorn, trobem falles aparentment inverses però que al restituir-les en realitat són falles normals que cabussen cap al NW. Aquestes falles presenten diferències estratigràfiques en el Cretaci però probablement puguin presentar-les en materials anteriors d'acord amb els models d'extensió de una cobertora desenganxada a un nivell dúctil sobre una falla de basament (Nalpas i Brun 1993, Vendeville et al. 1995, Withjack i Callaway 2001, Dooley et al. 2003). Aquestes diferències estratigràfiques ens permet datar la formació d'un diapir reactiu durant el Júrassic-Cretàcic. Aquest diapir reactiu es rejuveneix formant un anticlinal diapíric amb relleu positiu abans del Miocè Inferior-Mig, havent de interpretar doncs la formació d'aquest anticlinal durant la deformació compressiva paleocena causada per la Cadena Ibèrica.

Dades paleomagnètiques

El paleomagnetisme ens permet determinar la intensitat i direcció del camp magnètic terrestre en el moment de la sedimentació de la roca o bé en el moment de la remagnetització d'aquests materials mitjançant l'estudi del magnetisme terrestre romanent als diferents materials magnètics o paramagnètics. Aquest fet ens permet conèixer les rotacions que han patit els sediments.

Per tal de conèixer les possibles rotacions a l'àrea d'estudi s'han mostregat 41 localitzacions dividides entre les diferents litologies. Del total de les localitzacions, setze 16 s'han mostregat en els llims vermells del K3, 9 a les calcàries del Juràssic-Cretàcic i 16 més als materials detrítics del Miocè, dels quals 12 en el Miocè Inferior-Mig i 4 en el Miocè Superior.

Les mostres del Keuper presenten tres temperatures, una component viscosa de baixa temperatura que desapareix cap als 250°C, una component de temperatura mitjana (entre 250-520°C) i una altre component d'alta temperatura (entre 550-690°C). Després d'aplicar la correcció tectònica s'observa que les diferents estacions s'agrupen. La component d'alta temperatura (HTC), mostra inclinacions entre 5° i 37°, i declinacions que van de 292° a 352°. Hem de tenir en compte que les direccions de referència a la Península Ibèrica són de 358.4/15.6 ($\alpha_{95}=7$) pel Triàsic superior (Osete et al 1997 i Osete i Palencia 2006) i 003.1/41.6 ($\alpha_{95}=5.2$) per el Miocè (Krijgsman et al., 1996, Pérez-Rivarés et al., 2004 i Larrasoña et al., 2006). Tenint en compte l'error, la majoria de les mostres s'agrupen amb una inclinació corresponent al Triàsic superior i una rotació antihorària de 15-30°. Això mostra que aquesta magnetització es primària i que no

ha sofert rotacions d'eix horitzontal, només una d'eix vertical. Pel que fa referència a la component de temperatura mitjana (ITC) mostra una declinació 286-344° amb inclinacions que van de 23-64°. Tenint en compte que la magnetització més antiga (HTC) no ha estat involucrada amb rotacions d'eix horitzontal, la ITC tampoc ho pot haver estat. Les inclinacions de la ITC són més altes que les de referència Triàsiques i més baixes que les Miocenes i per tant s'han hagut que remagnetitzar entre aquestes dues edats. Hem de tenir també en compte que entre el Juràssic i el Cretaci Inferior les declinacions varien de 18 a 34° amb relació a les del Triàsic, mentre que les mostres presentades en aquest treball suggereixen la mateixa rotació antihorària que la HTC. Així doncs la remagnetització ha de tenir lloc entre el Cretàcic Superior i el Miocè Inferior.

Les mostres d'edat Juràssica-Cretàcica tenen una desmagnetització erràtica atesa la seva baixa intensitat. Així que no s'han pogut utilitzar per extreure'n paleopols.

Les mostres miocenes tenen totes dues components, la primera viscosa de baixa temperatura i una segona component que va fins als 570°C o 690°C depenent de la litologia de les mostres. Les mostres localitzades al Nord de la paret salina tenen una direcció que correspon al Miocè (003.1/41.6) mentre que les localitzades al Sud si observen rotacions. A la semifossa de Quesa les mostres es troben rotades horàriament entre 15-26°. Les situades a les semifosses de Juanera i Playamonte es troben rotades antihoràriament de 10-19°. El fet de no observar diferències de rotacions entre les mostres del Miocè Inferior i Superior de les diferents fosses ens indica que la rotació d'aquestes mostres es dona posteriorment a la deposició dels materials del Miocè Superior.

Evolució de la Paret Salina de Bicornb-Quesa

L'estudi de l'actual estructura de la paret salina i els seus voltants junt amb la informació que hem obtingut de la geometria en profunditat mitjançant la magnetotel·lúrica i les rotacions de l'interior del diapir i els seus voltants que ens proporciona el paleomagnetisme, ens permet comprendre la història evolutiva de l'àrea d'estudi. Aquesta informació, unida als estudis tectosedimentaris previs realitzats a l'àrea d'estudi (Roca et al 1996; Anadón et al 1998), ens ha dut a diferenciar un total de set etapes de deformació. Els tres primers estadis estan relacionats amb etapes extensionals i els altres quatre corresponen al desenvolupament dels cinturons de plects i encavalcaments Ibèric i Bètic.

Estadi de Rift Permian-Triàsic inferior

Les dades de Paleomagnetisme ens mostren variacions molt importants de gruix en la successió prejuràssica localitzada sota el Bicorn-Quesa SPS i en canvi no ens mostren cap variació sota les semifosses de Juanera i Sacarás. Aquest canvi de gruixos enregistra la primera fase deformativa de l'àrea d'estudi. Es tracta de l'estadi inicial de rifting intracontinental relacionat amb el trencament de Pangea i la divergència d'Euràsia i Àfrica (Dewey et al 1989; Malod i Mauffret 1990; Hanne et al 2003). Aquesta etapa extensional genera la formació de la falla de basament de Bicorn-Quesa, amb canvis de sedimentació al bloc inferior i superior de 1100 i 600m, respectivament. Probablement en aquest estadi també es generen altres falles de basament de la zona com les falles localitzades sota les parets salines de Xúquer i Navarrès.

Estadi de rift Juràssic-Cretàcic inferior

Aquest segon estadi deformatiu de l'àrea el trobem relacionat amb l'obertura del Océan Atlàntic, (García-Hernández et al. 1980, Klitgorg i Schouten 1986, Ziegler 1989, Arias Abéllan et al., 1996). A l'àrea d'estudi aquest moviment el trobem enregistrat un altre cop en els materials situats al damunt de la falla de basament de Bicorn-Quesa, on la successió juràssica-cretàcica inferior té 1000m al bloc superior i 700m al bloc inferior. Aquest moviment de la falla de basament i la presència de sal sobre aquesta generen la formació d'un plec forçat en els materials de la cobertura localitzats a sobre de la falla. Així doncs la sal acomoda la diferència de geometria entre la falla d'alt angle del basament i el plec frontissa que es genera a la cobertura (Nalpas i Brun 1993, Jackson i Vendeville 1994, Vendeville et al. 1995, Withjack et al. 2000). A sobre del bloc inferior de la falla a la zona de la xarxa superior del monoclin del plec frontissa, es forma un diapir reactiu incipient (Nalpas i Brun 1993, Withjack et al. 2000) amb sal provinent del bloc inferior i superior (Burliga et al 2012). La formació d'aquest diapir reactiu explica l'aprimament dels materials Juràssics-Cretàcics a la xarxa superior del plec frontissa on aquest materials només tenen 500m de gruix. Aquest aprimament el trobem al llarg de l'anticlinal que segueix la traça del Bicorn-Quesa SPS, i que és especialment visible al sud d'aquest. Al nord del anticlinal trobem una sèrie de falles inverses però que en realitat són falles normals sobrerotades que també són coetànies a aquesta fase de rift ja que presenten gruixos diferents de materials Juràssics-Cretàcics al bloc superior i inferior.

Etapa de Post-Rift Cretàcic-Oligocè

El gruix constant dels materials del Cenomanià-Turonian ens indica que el moviment de la falla de basament en aquesta època ja ha parat. El que no ha parat es el moviment del diapir reactiu ja que a la xarnera superior del monoclinall del plec frontissa, on s'havia generat el diapir reactiu, el gruix de la successió cenomanià-turoniana és de 80m. Així doncs la migració de sal continua en funcionament a causa de les diferències de càrrega litostàtica que es donen a la cobertora degut a la variació de gruix estratigràfic (Ge et al. 1997; Hudec i Jackson 2007). La formació d'aquest tipus d'estructura també s'observa al bloc superior de la falla de Carroig, on la successió cenomanià-turoniana té un gruix de 120m. Probablement té una gènesi similar relacionada amb la petita falla de basament localitzada sota la falla. Aquestes estructures es generen mentre la àrea d'estudi està immersa en un estadi de postrift (Salas i Casas 1993; Salas et al. 2001).

Estadi compressiu Paleocè

Entre el Senonià i el Miocè Inferior l'antiga zona aprimada (diapir reactiu) es rejuveneix, donant lloc a la formació d'un anticlinal amb vergència cap al sud amb flancs bastant verticals i relleu positiu. Aquest anticlinal té el seu flanc sud tallat per una falla inversa. La localització de la falla inversa i la presència de relleu positiu descarta el fet que es pugui haver produït per extensió, així que s'ha d'haver format durant una fase compressiva. La presència de la Cadena Ibèrica prop de la zona d'estudi, generant plecs i falles inverses desenganxades en el Keuper i dirigides cap al Sud durant el Paleocè i el Miocè Inferior ens suggereix que la deformació pot haver-se propagat cap al Sud fins l'àrea d'estudi. Aquesta deformació es propaga a través del nivell de desenganxament però les falles de basament que cabussen cap al nord li dificulten la propagació més cap al sud ja que actuen com a contrafort. Les dades paleomagnètiques també indiquen una mobilització de la sal, que pateix un moviment de rotació antihorària de 15-30° entre el Cretaci Superior i el Miocè, ja que es dona després de la remagnetització de la IMT però abans de la formació dels plecs de direcció NW. Així doncs, inferim que molt probablement la rotació es produeix durant aquesta fase compressiva.

Estadi Diapíric del Miocè Inferior-Mig

La composició dels sediments (Roca et al. 1996; Anadón et al. 1998) mostra que la paret salina de Bicornb-Quesa esdevé activa i comença a créixer a la cresta de l'anticlinal prèviament format i parcialment erosionat, just abans o al temps que

comença la sedimentació dels materials del Miocè Inferior-Mig a les semifosses. L'origen de la paret salina s'explica atès l'erosió de la xarnera de l'anticlinal que es generà pel rejuveniment del diapir reactiu durant el Paleocè. Però també i juga un paper important en l'activació de la paret salina la deformació extensiva causada per l'obriment del Mediterrani occidental (Roca et al. 1996; 2006). En aquest estadi es generen les fosses de Bicorn, Quesa i Juanera: el creixement del Bicorn-Quesa SPS causa evacuació de sal, especialment al bloc superior de la falla de basament que causa l'enfonsament de la cobertora, formant falles i generant semifosses, que seran omplertes per materials del Miocè inferior-Mig.

Estadi compressiu del Miocè Mig

Durant el Miocè Mig el desenvolupament de la serralada Prebètica produeix l'escurçament de la paret salina preexistent (Roca et al. 1996; 2006) produint l'escanyament del diapir i una sortida massiva de materials diapírics com indiquen els registres sedimentaris (Roca et al. 1996; Anadón et al. 1998). Un cop la paret salina s'ha tancat, la propagació cap al NNW de la deformació es centra a la zona de la paret salina degut a la seva major debilitat, i a la dificultat de la compressió a desplaçar-se pel nivell de desenganxament que es trobarà més baix degut a la falla de basament. Així doncs les parets del SPS es pleguen i posteriorment es genera un encavalcament dirigit cap al NNW, el encavalcament de Picos de la Olla, que afecta als materials del Miocè Inferior-Mig plegats per la compressió.

Altres estructures compressives a l'àrea d'estudi són els dúplex intrasalins que afecten materials del Muschelkalk que es disposen a sobre de la sèrie del Keuper i que es troben plegats pels plecs de direcció ENE-WSW. També dintre de les roques del diapir, les formacions K2-K5 localitzades a les bores de les parets es deformen formant plecs amb direcció paral·lela a la direcció de propagació (WNW-NNW), probablement generant plecs tipus baina. Aquests plecs són clarament anteriors a la formació del diapir, a que estan tallats per les estructures de creixement de la paret salina, però posteriors a la rotació del ITC i HTC, ja que els plecs no estan rotats. Així doncs aquestes dues estructures no podem datar-les del cert i podrien ser causades per la Cadena Ibèrica o per la Bètica.

Reactivació del diapir en el Miocè Superior

Aquest és l'últim estadi de deformació present a la zona d'estudi. La paret salina creix formant dos bulbs reblerts de K1 on predominen plecs amb eixos verticals tipus cortina i zones caòtiques (probablement zones per on ha circulat més sal o bé cap-rocks). Els bulbs es troben limitats per zones de cisalla i falles. Situada entre aquests i la paret del diapir es troben materials K2-K5 afectats per

plecs longitudinals (ENE-WSW) probablement formats al començament del creixement de la paret salina, ja que també afecten als plecs de direcció WNW-NNW però estan tallats pels bulbs.

Les dades paleomagnètiques miocenes ens mostren que hi ha hagut una rotació horària de la cobertora situada al sud del diapir, durant o posteriorment a la sedimentació dels materials Miocens superiors. Aquestes dades ens permeten dir que el creixement de l'actual paret salina és causada per un desplaçament cap al sud de la cobertora situada al sud del Bicorb-Quesa SPS. Aquest desplaçament de la cobertora deixaria lloc pel creixement del diapir. Aquest moviment de la cobertora també queda enregistrat per la formació de falles normals de direcció ENE-WSW que compartimentalitzen la cobertora al sud de la paret diapírica però que no es trobem al nord de la paret diapírica. Aquesta diferenciació es deguda a la localització de les falles de basament que separen dos dominis limitats per les parets salines de Navarrès i Bicorb-Quesa i la semifossa de Sàcaras. El domini situat a l'est no es desplaça mentre que el situat a l'oest es desplaça cap al SSW. Aquest desplaçament generarà una rotació horària a la zona de màxima obertura situada al sud de Bicorb-Quesa SPS i una rotació anti-horària a les zones de transferència situades a les semifosses de Playamonte i Juanera.

Influència de les falles de basament preexistents en la iniciació i reactivació de diapirs.

L'evolució de la paret salina de Bicorb-Quesa ens ha permès veure les relacions que succeeixen en un diapir format sobre una falla de basament que ha sofert una llarga etapa evolutiva on un diapir reactiu s'ha rejuenit, ha crescut, ha estat tancat i ha crescut novament. Hem pogut observar que l'evolució està molt condicionada per la presència de la falla de basament i pel nivell de desenganxament, tot i que dintre d'aquesta geometria prèvia és molt important la direcció de propagació de la deformació. En el nostre cas, durant el Paleocè la deformació es propaga en direcció a la falla de basament per sobre del bloc superior, i durant el Miocè Mig es propaga sobre el bloc inferior també en direcció a la falla de basament. A partir d'aquesta informació hem creat un model general sobre la iniciació i desenvolupament dels diapirs per compressió de pell prima generats a sobre de una falla de basament preexistent. Cal destacar que l'estructura que es generarà depèn de múltiples factors com la velocitat de deformació, el gruix de les diferents capes, la proporció de sal en el material evaporític, etc, tal i com mostren Withjack i Callaway (2000) en el seus models extensius. Nosaltres hem analitzat dos escenaris amb un nivell de sal que desacobla la deformació del basament i la cobertora. En el primer cas el nivell de

sal està desconnectat entre el bloc inferior i superior de la falla de basament i en el segon, el nivell de sal està

Iniciació dels diapirs per contracció

En el cas de tenir una deformació causada per una compressió que es propaga per el bloc superior en direcció a la falla de basament, en el model desacoblat amb la sal desconnectada, la falla de basament actuarà com a contrafort. Aquest fet portarà a la formació de plecs de desenganxament i retroencavalcaments en el bloc superior o bé algun encavalcament drecera que afecti la falla de basament. Qualsevol d'aquestes estructures no propiciaran la formació de diapirs degut a l'elevat gruix de sediments situats al bloc superior de la falla.

En el cas de una deformació compressiva com l'anterior però amb un model amb la sal connectada la deformació es pot propagar per el nivell de desenganxament adaptant-se la geometria de repla-rampa-repla. Aquesta compressió portaria a la formació de un plec de desenganxament al eix superior del plec frontissa, així com a l'escanyament de la sal localitzada a la superfície de la falla de basament. Aquest escanyament provocaria la injecció de sal cap al plec de desenganxament, augmentant el plegament. Aquest plec es formaria a sobre del bloc inferior de la falla de basament on la cobertora es més prima, podent erosionar-se i formar un diapir. Aquest es el cas de la contracció paleocena-miocena inferior del Bicorb-Quesa SPS.

En el cas de tenir una deformació causada per una compressió que es propaga per el bloc inferior en direcció a la falla de basament, la deformació serà bloquejada al capdamunt de la falla de basament. Aquesta pot ser interrompuda per la falla en el cas de que la sal estigui desconnectada i per el plec forçat en el cas que la sal estigui connectada. Això ens porta a la formació de un encavalcament o un plec desenganxat proper a la xarnera del monoclinal, podent esser incrementat per la injecció de sal i per tant a la generació de un diapir.

Reactivació o escanyament per contracció

En el cas que la deformació causada per una compressió es produeixi per sobre del bloc superior en direcció a la falla de basament forçarem el tancament dels diapirs, si es troben al bloc superior. El diapir quedarà o inferior de la falla, escanyant i es produirà una gran extrusió de sal seguida per la formació de una soldadura secundària i/o una estructura "Q-tip" (Rowan i Vendeville 2006; Dooley et al. 2009). Un cop generades aquestes estructures, seran difícils de reactivar

posteriorment ja que té molt de gruix sedimentari per sobre. En el cas de que el diapir es localitza a sobre del bloc inferior si el nivell salí estigues connectat provocaria el tancament del diapir. Aquest diapir seria difícil de reactivar ja que el nivell salí es podria desconnectar degut a la compressió.

En el cas de que la propagació de la deformació es produeixi per sobre del bloc inferior de la falla, en direcció a la falla de basament, els diapirs preexistents tant en el bloc superior com inferior seran escanyats. Com en el cas anterior, formant soldadures secundàries i/o una estructura "Q-tip". Aquestes, però, només afectaran a la part superior dels diapirs, quedant els peus del diapir intactes però desplaçats i podent ésser reactivats posteriorment. Aquest és el cas de la contracció i posterior reactivació del diapir de Bicorn-Buesa en el miocè Mig i Superior respectivament.

Conclusions

Tant les dades de magnetotel·lúrica com de paleomagnetisme s'han mostrat molt útils per l'estudi de diapirs. Concretament, les dades magnetotel·lúriques ens han proporcionat una imatge de la forma del basament i de les diferents resistivitats del subsòl (és a dir, dels gruixos de les diferents unitats). Les dades paleomagnètiques, per la seva banda, ens han aportat informació molt valuosa sobre les rotacions tant de la cobertura com del diapir. Gràcies a aquesta informació, junt amb la cartografia detallada del diapir i la cobertura, i la informació disponible sobre els materials sindiapírics, ens han permès realitzar una restitució detallada i un model evolutiu de l'àrea.

Les dades de paleomagnetisme ens mostren que la paret salina es forma sobre una falla de basament que cabussa cap al NNW. Aquesta paret salina té una història de deformació complexa. La falla de basament té la màxima extensió durant l'etapa Pèrmic-Triàsic Inferior tot i que continua activa dins el Cretaci Inferior. L'activitat de la falla de basament produeix la formació d'un plec forçat dels materials Juràssics-Cretàcics sobre els materials evaporítics del Triàsic Superior-Mig. A la xarnera superior d'aquest plec, sobre la falla de basament, es genera un diapir reactiu. Durant el Paleogen l'emplaçament de la Cadena Ibèrica produeix un rejuveniment d'aquest diapir reactiu formant un plec del que s'erosiona la seva xarnera. Durant el Miocè Inferior una etapa extensiva genera la paret salina que és escanyada durant el Miocè Mig i posteriorment torna a créixer durant el Miocè Superior. Aquest darrer creixement es genera per l'extensió cap al sud de la cobertura, que genera la rotació horària d'aquesta plataforma i la compartimentalització d'aquesta.

L'anàlisi de la història evolutiva del diapir ens ha permès comprendre la influència que juga la falla de basament en la deformació de una cobertora desenganxada sobre un nivell evaporític. Però també la importància que té la direcció de propagació de la deformació compressiva de pell fina en aquesta cobertora prèviament afectada per una falla de basament. A partir d'aquí s'han realitzat diferents models evolutius destacant la relació de la direcció de propagació de la compressió respecte la falla de basament. Els models ens mostren que en cas que la propagació sigui de bloc inferior donarà una estructura propícia per al creixement de diapirs. En canvi, si la propagació es produeix pel bloc superior, aquest només generarà diapirs en el cas que la sal estigui connectada. En relació a la reactivació de diapirs prèviament escanyats, els models indiquen una major facilitat de reactivació en els diapirs escanyats per una compressió del bloc inferior que no pas del bloc superior, ja que els que han estat escanyats pel bloc inferior conserven el peu intacte, indret per on els diapirs podran ser reactivats.