



Geoelectrical Characterization of Sulphate Rocks

Ander Guinea Maysounave

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tdx.cat) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tdx.cat) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tdx.cat) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

Programa de Doctorat de Ciències de la Terra

GEOELECTRICAL CHARACTERIZATION OF SULPHATE ROCKS

Ander Guinea Maysounave

2011

Advisors / Directors de tesi:

Drs. Elisabet Playà Pous & Lluís Rivero Marginedas

Departament de Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica



Geoelectrical Characterization of Sulphate Rocks

Summary

(In catalan)

Ander Guinea 2011



1

.1 INTRODUCCIÓ

.1.1 Conceptes generals

Les roques evaporítiques s'originen durant processos sedimentaris, precipitant a partir de salmorres concentrades que generalment es formen per evaporació. L'origen d'aquesta aigua pot ser tant marí com continental (lacustre). De mitjana, un litre d'aigua marina té 36 g d'ions dissolts; fonamentalment clorurs, sodi, sulfats, carbonats, magnesi, calci i potassi. A mesura que els processos d'evaporació tenen lloc en un ambient confinat o semiconfinat en el qual la taxa d'evaporació és major que la d'entrada d'aigua, la concentració iònica de la solució augmenta fins arribar al punt de saturació en el qual comencen a precipitar els components menys solubles. D'aquesta manera el carbonat càlcic és el primer compost que precipita a partir de l'evaporació, seguit per sulfat càlcic, clorur sòdic i sals potàssiques. Existeixen també altres minerals d'origen evaporític que es formen en condicions diferents, tals com llacs evaporítics (*playa lake*) o ambients intersticials (*playa*). En el cas d'aigües d'origen continental la composició química de les salmorres pot variar respecte a les d'origen marí, però generalment amb la presència dels mateixos anions principals dissolts en proporcions diferents.

Des d'un punt de vista textural, les roques evaporítiques són essencialment cristal·lines, encara que poden presentar també textures clàstiques (com per exemple en el cas de les gipsarenites i gipsirudites). Són roques amb una alta solubilitat (des de 2.4 fins a més de 5000 g/L) i relativament baixa densitat (2.3 g/cm² de mitjana). Pràcticament no tenen porositat primària (>1%) i la seva composició mineralògica i geoquímica és molt restringida. La presència de fòssils en aquest tipus de roques és molt excepcional. Els dipòsits evaporítics són de caràcter principalment autòcton, encara que tendeixen a sofrir processos diagenètics pràcticament sinsedimentaris i més acusats amb l'enterrament. Avui dia la deposició de roques evaporítiques té lloc en regions principalment continentals (Mar morta, llac Asal, a Djibouti, salars de l'altiplano de Bolívia, ...) o molt localment en medis marins costaners (*sabkha* del Golf Pèrsic, ...). En el registre fòssil es troben seqüències evaporítiques associades a grans episodis d'evaporació en conques de gran extensió com la relacionada amb la crisi del Messinià (Miocè) en la conca mediterrània.

Els mètodes geofísics de prospecció elèctrica (mètodes geoelectrics) estudien la distribució de les propietats electromagnètiques del terreny a partir de mesures indirectes. Hi ha 3 propietats electromagnètiques principals: la permeabilitat magnètica μ , la permitivitat o

constant dielèctrica ϵ i la resistivitat ρ . Normalment, els mètodes geoelèctrics estudien la resistivitat elèctrica del terreny, la qual es mesura en ohm.m o en mS/m en cas que es parli de conductivitat en lloc de resistivitat. En els estudis geoelèctrics és essencial tenir un ampli coneixement dels materials estudiats a fi de poder interpretar correctament els valors obtinguts. Cada tipus de roca té associat un rang de valors de resistivitat elèctrica que depèn de diferents factors com la porositat, la temperatura, la humitat, etc. Una dels avantatges del mètode consisteix en l'ampli rang de valors de resistivitat existent i que permet diferenciar amb facilitat estructures i canvis litològics quan presenten un comportament elèctric diferenciat.

La tomografia elèctrica és una tècnica geofísica en què el seu objectiu és crear imatges de la distribució de la resistivitat elèctrica del terreny. A aquest efecte s'injecta en el terreny un corrent directe a partir de dos elèctrodes mentre que en altres dos es mesura la diferència de potencial, repetint aquest procés al llarg d'un perfil bidimensional. Canviant la separació electròdica es duen a terme mesures a diferents profunditats i aquestes són emmagatzemades en la memòria d'una unitat central que es situa en el centre del perfil. A partir d'aquesta unitat central s'estenen dos cables en ambdues direccions en el mateix pla; a través d'aquests cables es transmet el corrent elèctric als elèctrodes. Les mesures obtingudes no corresponen als valors reals de la resistivitat del terreny sinó a valors de resistivitat aparent. Això es deu al fet que quan el terreny no és homogeni, el corrent elèctric es propaga a través de diferents materials amb diferents valors de resistivitat i per tant el valor obtingut correspon a un intermedi. Sent així és necessari dur a terme una inversió de les dades amb algun programari creat a aquest efecte. Una vegada s'ha dut a terme el processament de les dades s'obté una imatge trapezoïdal invertida on es mostra la resistivitat real del terreny. Aquesta imatge ens permet interpretar els materials i estructures subjacents a l'àrea d'estudi. Els avantatges de la tomografia elèctrica són la seva naturalesa no invasiva, la seva ràpida velocitat d'adquisició i el seu relativament baix cost. Per contra les limitacions són, igual que en la resta de mètodes geofísics, la falta de dades directes que permetin contrastar els resultats, la seva vulnerabilitat al soroll i la pèrdua de sensibilitat amb la profunditat.

La polarització induïda és un fenomen induït pel pas de corrent elèctric i s'observa com una resposta de voltatge residual dels materials del terreny. El simple fet de mesurar diferents valors defineix una anomalia. La propietat de polarització de les roques evaporítiques no apareix descrita en la bibliografia; encara que si que ha estat àmpliament observada en el cas de les argiles. No obstant això, el rang de polarització dels materials argilosos no ha estat específicament estudiat a causa de les múltiples variables que influeixen en aquest fenomen

com la mida de gra, composició, temps de mesura, etc. Com a tendència general, els materials argilosos presenten valors de polarització induïda molt per sota dels observats en materials metàl·lics.

.1.1 Objectius de la tesi

Com a tècnica alternativa o complementària a la realització de sondejos, es proposen les tècniques geoelectriques per a l'estudi de dipòsits de sulfats. En els estudis previs duts a terme que trobem en la bibliografia, les diferents roques sulfatades tenen assignats amplis rangs de resistivitat elèctrica i la seva classificació està pobrament desenvolupada. A causa d'aquesta falta de coneixement, les interpretacions dels resultats de campanyes geoelectriques en aquests materials poden resultar ambigües o fins i tot errònies. L'objectiu d'aquesta Tesi Doctoral és definir les propietats elèctriques de les roques sulfatades assignant-los rangs de valor de resistivitat elèctrica precisos i posant en relació la seva variació amb els canvis composicionals. A tal fi s'han dut a terme estudis a diferents escales; des de la mesura de la resistivitat d'un cristall mineral individual, fins a la caracterització de seqüències evaporítiques de desenes de metres de potència. Addicionalment a les mesures amb les tècniques geofísiques estandarditzades, s'han dut a terme assajos de laboratori així com modelitzacions computacionals i càlculs teòrics amb els quals s'han comparat els resultats obtinguts en el camp.

.2 PROPIETATS ELÈCTRIQUES DELS SULFATS

.2.1 Guix

El guix és un dels minerals evaporítics més comuns i es diposita tant en ambients marins com a lacustres. El guix és sulfat dihidratat ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) i és el mineral més abundant entre el grup dels sulfats. Les roques de guix són fortament afectades per processos diagenètics. Quan és enterrat, el guix primari (aquell que s'ha format originalment en el medi sedimentari) tendeix a deshidratar-se i convertir-se en anhidrita (CaSO_4). Igualment, l'anhidrita sofreix processos d'hidratació quan queda exposada a processos de meteorització, convertint-se en guix secundari (aquell que procedeix de la hidratació de l'anhidrita). En general, es pot considerar que les roques de guix estan compostes per mineral de guix i matriu lutítica (essencialment de components argilosos o carbonàtics, encara que també poden aparèixer altres minerals com celestita, quars, anhidrita, glauberita, etc. de forma accessòria). El guix s'explota de manera extensiva per tot el món i és fa servir com a mineral industrial a causa de les seves característiques; s'utilitza en la construcció, com a aïllant, com a fertilitzant, etc. Els principals països productors de guix són EUA, Espanya, Canadà i Iran i en total produeixen més de 90 000 tones a l'any. A l'hora de determinar l'interès econòmic potencial d'un dipòsit de guix s'han de valorar 3 factors: la potència de la capa, la quantitat de matriu i les possibles estructures o discontinuïtats que puguin ser-hi presents.

La resistivitat elèctrica assignada als dipòsits de guix present en les publicacions anteriors al present estudi, oscil·la entre 10 i 1200 ohm.m; no obstant això, la causa d'aquesta variació no està ben definida si bé és cert que s'esmenta la quantitat de matriu com a causant dels valors més baixos. S'ha establert una classificació geoelèctrica de les roques de guix mitjançant la qual s'ha quantificat l'efecte de la quantitat de matriu de la roca en el valor de resistivitat elèctrica. Per a això s'han dut a terme una sèrie de modelitzacions computacionals, experiments de laboratori, i mesures de camp:

.2.1.1 Treball de camp

S'han estudiat diverses formacions de guix al llarg de la conca d'avant país dels Pirineus Meridionals, la conca de l'Ebre i la conca del Vallès-Penedès (amb pureses de guix variables en cada dipòsit). En total s'han dut a terme 7 perfils de tomografia elèctrica realitzats amb un tomògraf Syscal Pro Switch amb 48 elèctrodes i amb una separació entre ells de 10, 5, 2, 1 o 0.5 metres en funció de la fondària d'investigació que es busqui en cada cas. Els arranjaments

electròdics utilitzats han estat Wenner-Schlumberger i Dipol-Dipol, variant segons es busquessin canvis litològics horitzontals o verticals respectivament. Una vegada adquirides les dades, s'ha fet servir el programa RES2DINV per a la seva inversió. Addicionalment a la realització de la prospecció geoelèctrica, es van prendre mostres de roques de guix a fi d'estudiar la seva puresa en mineral de guix per, d'aquesta manera, poder fer una estimació de la puresa dels diferents dipòsits. Aquestes mostres es van moldre per aconseguir una pols homogènia. D'acord amb la solubilitat del guix en aigua de 2.4 g/L en condicions normals, es van dissoldre 0.5 g de pols de les mostres en 250 mL d'aigua destil·lada. A continuació es van filtrar les solucions i el material romanent es va considerar la matriu insoluble (argiles, carbonats, quars...) que hi havia en la roca; la qual pot ser quantificada.

(A) Conca d'avant país dels Pirineus Meridionals: Durant el Lutecià (Eocè Mitjà), es va dipositar un potent paquet evaporític marí en la part oriental dels Pirineus. S'han identificat roques de anhidrita i halita en profunditat a partir de sondejos, encara que en superfície els materials aflorants són fonamentalment roques de guix secundari. S'ha dut a terme un perfil de tomografia en els voltants de la població de Sant Joan les Fonts (Girona). En el lloc de realització del perfil aflora una capa de guix de gran puresa, la qual s'ha mostrejat obtenint un valor de 97% en puresa de mineral de guix. Els valors de resistivitat elèctrica obtinguts després de processar les dades són d'aproximadament 1000 ohm.m per a aquesta capa.

(B) Conca del Vallès-Penedès: Durant l'evolució de la conca del Vallès-Penedès, va haver-hi alguns polsos transgressius en el Burdigal·lià (Miocè Inferior) que van permetre la inundació parcial de la part occidental de la conca. D'aquesta manera va tenir lloc la deposició de la unitat de Guixos de Vilobí, a l'oest de la població de Vilobí del Penedès. El dipòsit està compost per una alternança de paquets de guix bandejats amb làmines lutítiques i carbonatades. Aquesta formació va ser explotada antigament obtenint guix d'una puresa mitjana de 85-87% mentre que les mostres analitzades llancen una puresa una mica major, propera al 92%. El perfil de tomografia realitzat mostra valors de resistivitat elèctrica d'entre 700 i 1100 ohm.m per a aquest dipòsit.

(C) Marge català de la Conca de l'Ebre: Durant l'Eocè i l'Oligocè es van registrar una sèrie d'esdeveniments evaporítics lacustres en aquesta àrea. S'han dut a terme perfils de tomografia elèctrica en diferents zones en les rodalies de les localitats de Cervera (guixos de Lleida), Pira (guixos de Tarragona) i La Guàrdia de Prats (guixos de Tarragona). Els dipòsits mostren diferents pureses, variant entre 10% i 94%. Com a tendència general s'observa que els dipòsits amb pureses inferiors a 50% mostren valors inferiors a 50 ohm.m en els perfils de

tomografia, mentre que aquells amb pureses de 80% o superiors, mostren valors d'entre 700 i 1000 ohm.m. Els paquets amb pureses entre 60-70% mostren valors de resistivitat intermedis.

(D) Sector aragonès de la Conca de l'Ebre: Durant el Miocè, van precipitar diversos dipòsits evaporítics de centenars de metres en el sector aragonès de la Conca de l'Ebre. Durant la construcció de les infraestructures del tren d'alta velocitat a la província de Saragossa, es van dur a terme una sèrie de sondejos a l'àrea de Montes de Torrero per part de l'empresa Provodit. S'ha dut a terme un perfil tomogràfic la part central del qual està situat en un d'aquests sondejos en el qual s'observa que en els primers 35 metres hi ha guixos amb una puresa d'entre 20 i 40%. Els resultats de la tomografia mostren valors d'uns 20-30 ohm.m per a aquest dipòsit, en concordança amb l'observat en els dipòsits més impurs del marge català de la Conca de l'Ebre.

.2.1.2 Assajos de laboratori

S'han dut a terme una sèrie de mesures de resistivitat elèctrica en condicions de laboratori sobre un joc d'11 pastilles sintètiques elaborades a partir d'un reactiu de sulfat càlcic dihidratat i argila. La composició de cada pastilla és variable d'un 100% d'argila fins a un 100% de sulfat càlcic dihidratat (reactiu de laboratori pur) a intervals de 10% en composició. Per preparar les mostres s'ha fet la barreja de components pertinent a cada cas i s'han homogeneïtzat. Posteriorment s'han compactat mitjançant una premsa després de ser lleugerament humitejades amb un esprai amb aigua destil·lada a fi d'afavorir la fonamentació de la pastilla. El resultat són pastilles d'uns 13.5 grams de pes i amb un gruix d'aproximadament 0.5 centímetres.

Les mesures de resistivitat han estat dutes a terme en un circuit en sèrie mitjançant la injecció de corrent elèctric a partir d'una font elèctrica de laboratori que proporciona corrent directe continu i estable. El corrent s'ha transmès a les pastilles a partir d'uns elèctrodes composts per un adhesiu amb un botó metàl·lic proveït de gel conductor en una superfície circular d'1.5 centímetres de diàmetre. Aquests elèctrodes han estat enganxats en ambdues cares de les pastilles fent que actuïn com una resistència en el circuit. Després de passar per les mostres, la intensitat del corrent és mesurada amb un microamperímetre. Ja que les pastilles amb una puresa de sulfat càlcic dihidratat superior a 60% estan fora del rang de mesura del microamperímetre, s'ha repetit la seva elaboració usant tan sol 3.5 grams i obtenint d'aquesta manera pastilles de 0.15 centímetres de gruix. A partir de l'amperage és possible calcular la resistivitat elèctrica de les pastilles mitjançant la llei d'Ohm.

Les mesures en pastilles mostren una progressiva polarització de les mateixes a mesura que passa el temps; aquest fenomen es dona principalment en les mostres amb major quantitat d'argila en la seva composició. A mesura que augmenta la puresa en sulfat càlcic dihidratat, la polarització és cada vegada més petita fins a desaparèixer en les mostres de puresa major de 50%. Com els mètodes geoelectrics usen injeccions de corrent puntuals o d'impulsos, solament s'han considerat les mesures després de 10 segons a l'efecte de calcular la resistivitat elèctrica. El resultat mostra una pauta similar a la mostrada pels blocs de la modelització; les pastilles amb una puresa d'entre 0 i 50% tenen un valor de resistivitat baix que varia molt poc mentre que les pastilles d'entre 60 i 70% de puresa mostren un creixement exponencial de la resistivitat elèctrica. A partir del 80% de puresa aquest creixement s'estabilitza; en qualsevol cas els valors obtinguts són anòmalament alts.

.2.1.3 Modelització

Assumint que les roques de guix tenen solament 2 components, és a dir, mineral de guix i matriu lutítica, s'ha fet servir el programa RES2DMOD per construir una sèrie de blocs model de diferents composicions. Aquest programa calcula la pseudosecció de resistivitat aparent d'un model bidimensional del terreny, definit per l'usuari. Els models duts a terme consisteixen en 11 blocs rectangulars compostos per 2 components en diferents proporcions a intervals de 10% i englobats en un medi conductiu (d'1 ohm.m de resistivitat). Els dos components estan distribuïts en els blocs de manera homogènia i representen les fases mineral de guix i matriu lutítica de les roques de guix. A la matriu lutítica se li ha assignat un valor de resistivitat elèctrica mitjana de 10 ohm.m sobre la base dels seus components (encara que pot variar entre 1 i 30 ohm.m) i al mineral de guix un valor de 1000 ohm.m sobre la base de valors obtinguts en perfils de tomografia elèctrica en àrees amb dipòsits de guix purs i als màxims valors esmentats en la bibliografia prèvia.

Una vegada obtingudes les pseudoseccions corresponents a cada model, s'ha dut a terme la inversió de les mateixes mitjançant el programa RES2DINV, el qual usa el mètode de mínims quadrats per calcular la resistivitat real. En el cas del bloc format per 100% de matriu lutítica i el format per 100% de mineral de guix; el valor de resistivitat real és conegut, ja que ha estat definit en la primera etapa. D'aquesta manera, s'ha continuat iterant en el procés d'inversió fins a aconseguir un valor proper a 10 i 1000 ohm.m respectivament en un punt de referència. Això succeeix de manera estable entre les iteracions 17 i 18. La resta de blocs la resistivitat global dels quals és desconeguda han estat processats d'igual manera fins a aconseguir les iteracions 17 i 18 i s'ha mesurat el valor obtingut en el punt de referència.

Com a resultat s'ha obtingut que en els blocs amb una puresa en mineral de guix de 50% o menor el valor de resistivitat pràcticament no varia, movent-se en un rang d'entre 10 i 30 ohm.m. Per al cas dels blocs amb una puresa de 70% o superior mostren una resistivitat notòriament més gran (major de 600 ohm.m) i amb tendència ascendent proporcionalment amb la puresa fins a aconseguir els 1000 ohm.m definits per al cas del 100% de mineral de guix. Entre 50 i 70% de puresa s'observa una zona de transició on es produeix el salt del valor de resistivitat.

.2.1.4 Classificació de les roques de guix

Representant en una mateixa gràfica tota la informació obtinguda en la modelització, les mesures de laboratori i les mesures de camp, s'observa una tendència comuna divisible en 3 trams: (1) roques de puresa entre 0 i 55% en mineral de guix: presenten un valor de resistivitat elèctrica amb un rang d'entre 10 i 100 ohm.m; (2) roques de puresa entre 55 i 75%: representen una transició entre els trams 1 i 3 i mostren valors de resistivitat entre 100 i 700 ohm.m; (3) roques de puresa entre 75 i 100%: són les roques més pures en mineral de guix i presenten valors de resistivitat elèctrica relativament alts d'entre 700 i 1000 ohm.m. D'aquesta manera s'ha establert una classificació geoelectrica de les roques de guix a partir d'aquests 3 grups, els quals han estat nomenats com: *Lutites i Lutites Riques en Guix; Guix Transicional; i Guix Pur*, respectivament. Les roques de Guix Pur són potencialment explotables per a finalitats comercials, mentre que els altres dos grups de la classificació tenen massa matriu com perquè tinguin interès econòmic.

.2.1.5 Interpretació del comportament elèctric de les roques de guix

Hashin i Shtrikman (1963) van definir els valors màxims i mínims de resistivitat elèctrica (ρ) que pot presentar un material compost únicament per dos components a partir de la proporció de cadascun (γ) i coneixent la resistivitat elèctrica de cadascun d'ells. Aquesta variació respon a diferències en la distribució de les fases. Aquests valors es coneixen com als límits de Hashin-Shtrikman superior (HS^+) i inferior (HS^-). El valor de resistivitat elèctrica triat per als components han estat 10 ohm.m per a la matriu lutítica i 1000 ohm.m per al mineral de guix; els mateixos que havien estat prèviament seleccionats en la modelització de blocs amb el programa RES2DMOD. S'han calculat els límits HS superior i inferior i s'han representat gràficament per a roques amb diferents pureses en guix. Comparant els límits obtinguts amb la tendència que ha estat descrita anteriorment en la classificació geoelectrica de les roques de guix, s'observa que el grup de roques de guix *Lutites i Lutites riques en Guix* té la mateixa

tendència que el límit HS inferior. Per altra banda, el grup de roques *Guix Pur* es correlaciona perfectament amb el límit HS superior, constituint el *Guix de Transició* un pas intermedi entre els dos límits.

Aquest canvi de comportament en la resistivitat elèctrica en funció de la composició es deu a la connexió entre les partícules de la matriu. Quan la puresa de la roca en mineral de guix és de 55% o inferior, la matriu de la roca es considera un sistema percolant, és a dir, connectat a llarga distància. En aquest cas el guix, com que té un valor de resistivitat elèctrica molt major que la matriu, actua com un resistor i la transmissió del corrent elèctric té lloc gairebé íntegrament a través de la matriu. És per això que el valor de la resistivitat és molt similar al de la fase de matriu lutítica en si mateixa, seguint el límit HS inferior per al sistema lutita-guix. Quan la puresa de la roca de guix és major de 55%, les connexions entre la matriu comencen a desaparèixer i al corrent elèctric no li queda més remei que transmetre's a través de la fase de mineral de guix, que en aquest cas actua com un conductor, mostrant així un comportament dielèctric. El 55% de puresa representa el llindar de percolació de la matriu a partir del qual el sistema passa a ser no-percolant. Quan la puresa de la roca és superior a 70%, la transmissió del corrent elèctric està dominada per la fase de mineral de guix i per això mostra els valors de resistivitat màxims representats pel límit HS superior.

.2.2 Anhidrita

L'anhidrita (CaSO_4) es forma fonamentalment a partir de la deshidratació del guix durant processos diagenètics d'enterrament; encara que també pot dipositar-se en condicions primàries a partir de precipitació en ambients de *sabkha*. L'anhidrita té una densitat i duresa superior a la del guix. En menor mesura que en el cas del guix, també és utilitzada com a mineral industrial, però a causa de les dificultats tècniques que presenta la seva explotació, sol obtenir-se a partir de la incineració de guix. Quan es troben cossos restítics d'anhidrita en una pedrera de guix, l'explotació s'atura a causa que les màquines de perforació poden sofrir desperfectes en intentar perforar-la. Durant l'exhumació, l'anhidrita s'hidrata i es converteix en guix secundari. És per això poc comú trobar roques d'anhidrita aflorants. El procés d'hidratació és molt complex i per això és molt habitual que quedin restes d'anhidrita en una transició entre ambdues roques.

Pel que fa a la resistivitat elèctrica de les roques d'anhidrita, en la bibliografia els valors assignats per a aquest tipus de roques varia àmpliament però en general se li atribueixen

valors d'entre 10^3 i 10^4 ohm.m. Igual que per al cas del guix, l'estudi de la resistivitat de l'anhidrita ha estat pobrement desenvolupat; en qualsevol cas, des d'un punt de vista textural, les roques d'anhidrita són similars a les de guix, presentant matriu lutítica en quantitat variable, la qual cosa condiona la seva conductivitat elèctrica. Les roques d'anhidrita presenten per tant, un sistema ternari de composició en comparació del sistema binari guix-matriu analitzat prèviament. L'estudi de les roques d'anhidrita s'ha desenvolupat de manera similar al realitzat per a les roques de guix, estudiant el seu comportament elèctric a diferents escales mitjançant treballs de camp, assajos de laboratori i càlculs computacionals.

.2.2.1 Treball de camp

S'han dut a terme 5 perfils de tomografia elèctrica en una pedrera activa en la formació de Guixos de Beuda, on l'explotació s'ha parat en diversos punts a causa de l'aparició de cossos d'anhidrita. Així mateix s'han realitzat addicionalment 2 perfils en pedreres abandonades de la formació de Guixos d'Òdena i 2 més en conques evaporítiques properes a les pedreres estudiades on l'anhidrita apareix en profunditat. Els mètodes d'adquisició han estat similars als utilitzats en la realització dels perfils tomogràfics en l'estudi de les roques de guix. La separació entre elèctrodes en les pedreres ha estat d'1, 1.5 i 2 metres en funció de les limitacions logístiques, mentre que en el cas dels perfils realitzats en els dipòsits no aflorants s'ha utilitzat un espaiat de 10 metres, ja que l'anhidrita apareix a major fondària.

(A) Pedrera de Beuda: A l'àrea de la Garrotxa (conca d'avant país dels Pirineus Meridionals) aflora extensivament guix secundari, provinent de la hidratació d'anhidrita, d'edat Lutecià. L'anhidrita ha aparegut, conjuntament amb altres minerals evaporítics com halita, en sondejos perforats a la zona. Prop de la localitat de Beuda (Girona), hi ha una pedrera activa que en la qual s'ha estat extraient guix almenys des de la dècada dels anys 30. Avui dia la pedrera té una extensió de més de 2 km de llarg i en diversos fronts s'ha hagut de detenir l'explotació a causa de l'aparició d'anhidrita. En total s'han dut a terme 5 perfils de tomografia elèctrica en zones on es coneixia la presència d'anhidrita ja sigui per coneixements previs de llocs on havien perforat els operaris de la pedrera com per reconeixement in situ del mineral d'anhidrita en el terreny i parets de la pedrera. En general la presència de matriu és bastant accessòria en la pedrera, per la qual cosa el sistema estudiat correspon fonamentalment al trànsit entre guix i anhidrita, sent les fases sulfatades les dominants en la resposta elèctrica de la roca. Com a tendència general, els resultats mostren valors propers a 10^4 ohm.m en els llocs on l'anhidrita és massiva amb poca presència de guix, mentre que on

domina el guix els valors són propers a 10^3 ohm.m. A les zones més transicionals els valors de resistivitat es mouen entre 1500 i 5000 ohm.m, en funció de la quantitat de cada fase.

(B) Pedreres abandonades a Òdena: La unitat de Guixos d'Òdena (marge est de la conca potàsica catalana, Priabonià-Eocè superior) ha estat àmpliament explotada durant el segle XX i és per això que avui dia és possible trobar nombrosos de fronts de pedrera abandonats. En molts d'ells es pot observar l'aparició d'anhidrita l'aparició de la qual va suposar l'aturada de l'extracció de guix. En dues d'aquestes antigues pedreres s'han dut a terme perfils tomogràfics. El resultat mostra que a les àrees on s'ha observat anhidrita massiva aflorant mostra valors de resistivitat propers a 10^4 ohm.m mentre que a les zones on predomina el guix els valors observats són d'entre 500 i 1000 ohm.m.

(C) Perfils duts a terme fora de pedreres: 2 perfils han estat realitzats en zones on l'anhidrita no apareix en superfície sinó que ha estat identificada en profunditat. Una de les 2 àrees d'estudi està situada en els voltants de la població de Serinyà (Girona), on es troba la formació de Guixos de Beuda que anteriorment ha estat estudiada en la pedrera de Beuda. La tomografia mostra una vegada més, valors de resistivitat elèctrica superiors a 5000 ohm.m relacionats amb la roca anhidrítica. El segon perfil estudiat és el mateix que ja havia estat objecte d'estudi per a la classificació del guix i que està situat a l'àrea de Montes de Torrero en la part sud-oest de la capital aragonesa de Saragossa. En el sondeig dut a terme durant la campanya de construcció de les vies de l'AVE en el qual apareix guix en els primers 35 metres, apareix també anhidrita a partir de 69 metres. A causa de la gran presència de matriu no és possible distingir entre els nivells gipsífers i els anhidrítics, obtenint un valor de resistivitat general d'uns 30-50 ohm.m.

.2.2.2 Assajos de laboratori

A fi de comprovar el comportament elèctric de les roques d'anhidrita i comparar-ho amb les de guix s'han dut a terme mesures en pastilles anàlogues a les realitzades per a la classificació del guix, però amb un reactiu de sulfat càlcic anhidre en lloc del dihidratat. L'objectiu d'aquest assaig ha estat comprovar que independentment de la fase sulfatada present en les pastilles, el llinard de percolació composicional en el qual la resistivitat augmenta exponencialment és el mateix. Una vegada elaborades les pastilles i realitzades les mesures de resistivitat elèctrica oportunes, s'observa una tendència anàloga a l'observada per a les pastilles de guix. Les pastilles amb una puresa igual o inferior a 50% mostren valors molt similars als assajos de pastilles de guix, amb una resistivitat d'entre 6 i 20 ohm.m; igualment en

les pastilles de 60 i 70% s'observa una ruptura en la tendència amb un important increment en la resistivitat. Finalment les pastilles més pures mostren valors de resistivitat elèctrica superiors als que van mostrar les de guix.

Complementàriament a les mesures en pastilles s'han dut a terme mesures de resistivitat en cristalls. Com aconseguir cristalls d'anhidrita prou grans com per dur a terme l'assaig és molt complicat, les mesures s'han fet en cristalls de guix, paral·lelament i perpendicularment al pla d'exfoliació principal, al llarg de les capes d'aigua intercrystal·lina. L'anhidrita té una estructura similar a la del guix però sense aquestes capes d'aigua i per tant el fet que el pla d'exfoliació principal tingui una major conductivitat elèctrica explicaria teòricament la major resistivitat de l'anhidrita respecte al guix. Per dur a terme aquestes mesures, s'ha tallat un cristall d'escala decimètrica en seccions paral·leles i perpendiculars al pla anteriorment esmentat. A causa que el cristall tendeix a trencar-se pel pla d'exfoliació principal per ser una superfície de debilitat, les mostres tallades perpendicularment han estat prèviament englobades en una resina no conductora per millorar-ne la seva cohesió. El sistema electròdic utilitzat ha estat una mica més complex que l'utilitzat per a les pastilles, creant els elèctrodes a partir d'un gel conductor en una superfície delimitada amb cinta aïllant. En total s'han mesurat 6 mostres en cada direcció en 5 assajos diferents i s'ha obtingut un valor mitjà de tots els assajos. El resultat mostra que efectivament en la direcció paral·lela als plans d'exfoliació principal als quals està lligada l'aigua estructural són uns 2 ordres de magnitud més conductius que aquells plans que són perpendiculars.

.2.2.3 Modelització numèrica

A fi de comprovar quina és la influència de cada fase sulfatada quan el sistema és no percolant, s'han dut a terme una sèrie de càlculs computacionals de la conductivitat elèctrica a partir de fotografies de làmines primes. La selecció de fotografies en lloc de roques es deu al fet que en elles és possible controlar la quantitat de cada fase present, i es poden quantificar amb total precisió. En una mostra de roca és molt complicat conèixer la concentració de cada fase mineral i a més a més, per saber la relació de guix/anhidrita no serveix l'assaig de quantificació d'insolubles.

La mesura de la conductivitat s'ha calculat mitjançant el programa Elec2D. Aquest programa s'executa en el llenguatge informàtic del programari matemàtic Matlab i és capaç de calcular la pèrdua d'intensitat d'un corrent elèctric en travessar un entorn bidimensional format per cel·les amb diferents conductivitats associades. Abans de poder calcular la resistivitat de les fotografies seleccionades és necessari convertir-les en una matriu numèrica a

partir del seu format HTML. A partir d'un convertidor HTML/Ascii s'obté una matriu de nombres en els quals cada xifra representa un píxel de la imatge i el valor de la xifra varia en funció del color. Per a un sistema de guix-matriu es converteix la imatge a partir de dues variables numèriques: 1 i 2. Els 1 representen la matriu i s'obtenen dels colors foscos de la foto; mentre que els 2 representen els minerals de guix, i s'obtenen a partir dels píxels clars. En el cas de la presència d'anhidrita cal afegir una tercera variable: 3. Per optimitzar el reconeixement del convertidor HTML/Ascii de les diferents fases, les fotografies han estat prèviament tractades amb un programa de tractament d'imatge.

Un cop es disposa dels arxius amb el format adequat és possible dur a terme el càlcul de la resistivitat elèctrica mitjana de la mostra en les direccions paral·leles als eixos de la mateixa. A cadascuna de les variables numèriques se li ha d'assignar un valor de resistivitat, que han estat 10, 10^3 i 10^4 ohm.m per a matriu, guix i anhidrita, respectivament. Els dos primers valors ja havien estat utilitzats prèviament durant la modelització dels blocs de les roques de guix; i el valor de l'anhidrita s'ha interpretat dels màxims valors mesurats en els perfils tomogràfics, els quals representen roques d'anhidrita massiva. S'ha dut a terme la mesura de la resistivitat al llarg dels eixos x i y de les fotografies i s'ha fet una mitjana aritmètica. Els resultats mostren tendències similars a les mostrades pel treball de camp amb valors de resistivitat molt alts quan la presència d'anhidrita és molt abundant i amb valors d'entre 1500 i 2000 ohm.m quan la presència de guix i anhidrita és equilibrada. En el cas de presència abundant de matriu els valors són molt més baixos.

.2.2.4 Interpretació del comportament elèctric de les roques d'anhidrita

En el sistema binari de guix-matriu, les roques amb una composició en mineral de guix igual o inferior al 55% (i la matriu del qual és percolant), presenten el valor de resistivitat elèctrica corresponent al límit inferior de Hashin-Shtrikman i les roques amb una puresa de 70% o més gran, al límit superior. Es pot considerar que el comportament de les roques d'anhidrita amb tres fases (guix-anhidrita-matriu lutítica) serà el mateix. Entre el 55 i el 70% hi ha una zona de transició amb valors intermedis. Berriman (1995) va descriure les fórmules matemàtiques per calcular els límits de Hashin-Shtrikman per a un sistema de n fases tenint la fracció (γ) i la resistivitat (ρ) de cadascuna de les 3 fases. La resistivitat elèctrica seleccionada per les 3 fases és la mateixa que ha estat utilitzada anteriorment en els models numèrics. Com a resultat s'obtenen dos gràfics ternaris corresponents als límits HS^+ i HS^- respectivament. A partir del comportament esmentat prèviament, es pot elaborar un gràfic combinat on la part corresponent a 55% o menys en composició de sulfats mostra la tendència del límit HS^- i per

sobre de 70% la del HS⁺. Si comparem aquest gràfic amb els resultats obtinguts en les mesures de camp, els assajos de laboratori i la modelització numèrica amb el programa Elec2D, s'observa que els valors de resistivitat obtinguts són molt similars als quals s'esperaria obtenir a partir del gràfic. La major divergència la mostren alguns dels valors calculats amb l'Elec2D per a composicions amb quantitats de matriu entre 70 i 60%, on els resultats obtinguts són una mica més alts que els que corresponen en el gràfic de HS combinat. Això es deu fonamentalment al fet que l'escala a la qual s'han dut a terme els càlculs és molt més heterogènia que escales majors, mentre que per seguir les tendències dels límits Hashin-Shtrikman es considera que la distribució de les diferents fases en la roca és aproximadament regular. A una escala major, aquesta premissa és més propera a la realitat i per tant s'ajusta més. El fet de tenir aquestes heterogeneïtats representa un tram major de la fase de valors intermedis a causa que el límit de percolació no està tan ben definit.

.2.2.5 Classificació de les roques de sulfat càlcic

A partir del gràfic combinat dels límits HS s'ha elaborat una classificació de les roques de sulfat càlcic en funció del seu valor de resistivitat elèctrica. D'aquesta manera s'han distingit 6 grups diferents de roques: (1) Lutites i Lutites Riques en Guix/Anhidrita: En aquest grup entren totes les roques de sulfat càlcic amb una puresa en sulfats de 55% o inferior; tenen un valor de resistivitat elèctrica inferior a 50 ohm.m. (2) Guix/Anhidrita de Transició: Són roques de sulfat càlcic amb una puresa d'entre 55 i 70%; els valors varien en funció de la composició des de 50 ohm.m fins a uns 2000 ohm.m. (3) Guix Pur: La fase dominant és el guix amb quantitats accessòries d'anhidrita i/o matriu; té valors de resistivitat elèctrica d'entre 700 i 1200 ohm.m. (4) Guix amb Anhidrita: Són roques de transició entre Guix pur i Anhidrita pura amb predomini de guix; els valors de resistivitat que presenta es troben principalment entre 1000 i 2000 ohm.m. (5) Anhidrita amb Guix: Són anàlogues al grup anterior però amb predominança de l'anhidrita sobre el guix; els valors de resistivitat que presenten tenen un rang d'entre 2000 i 5000 ohm.m. (6) Anhidrita Pura: La fase dominant és l'anhidrita amb presència accessòria de guix i/o matriu; en el seu marge més pur arriba a aconseguir 10⁴ ohm.m de resistivitat elèctrica.

.2.3 Glauberita

La glauberita, o sal de glauber, és un sulfat sodicocàlcic deshidratat ($\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$) que apareix normalment associat amb altres sulfats (guix, anhidrita, thenardita) o clorurs (halita,

carнал·lita). La composició mineral i la seva relativa abundància poden variar fortament d'un dipòsit glauberític a un altre. Igual que la resta de sulfats, la glauberita apareix normalment englobada en una matriu lutítica. De fet, la roca de glauberita rarament apareix en dipòsits amb elevada puresa de mineral de glauberita, sinó que tendeix a tenir una quantitat de matriu elevada. Igual que en el cas de l'anhidrita, la glauberita pot alterar-se a guix per hidratació quan s'exposa a processos de meteorització. La glauberita s'usa com a mineral industrial i els principals països productors són Mèxic, Espanya, EUA, Canadà i Iran. La glauberita es fa servir principalment com a component del detergent en pols per a rentadores; addicionalment és utilitzat en les indústries paperera, farmacèutica i tèxtil i també per a l'elaboració de vidre o per sintetitzar enzims (en l'elaboració de vi), entre altres aplicacions.

No hi ha referències en la bibliografia sobre el valor de resistivitat elèctrica de la glauberita. En qualsevol cas, en ser un mineral sense capes cristal·lines d'aigua, igual que l'anhidrita, és esperable que tingui un valor de resistivitat major al del guix (d'aproximadament 1000 ohm.m) en les roques amb escassa presència de matriu. Seguint un esquema similar al seguit en l'estudi de sulfats càlcics, s'han estudiat dipòsits de glauberita mitjançant perfils de tomografia elèctrica i s'han dut a terme una sèrie d'assajos de laboratori per mesurar resistivitat elèctrica de mostres de roca.

.2.3.1 Treball de camp

S'han dut a terme un total de 6 perfils de tomografia elèctrica en formacions evaporítiques de la conca de l'Ebre en les quals s'ha trobat glauberita. 4 perfils han estat realitzats a l'àrea de Montes de Torrero (Saragossa), mentre que els altres 2 s'han dut a terme a la zona d'Arrúbal-Alcanadre (La Rioja). Addicionalment a la campanya de geofísica s'ha disposat d'informació del subsòl d'ambdues àrees a partir de sondejos antics. El protocol de mesura utilitzat ha estat el Wenner-Schlumberger degut a que les mesures amb el Dipol-Dipol es podien distorsionar a causa de l'acusada topografia en algunes zones. En Arrúbal-Alcanadre també s'han pres mostres de les quals s'han mesurat els insolubles, igual que s'ha fet prèviament en els estudis de guix i anhidrita.

Durant el Terciari, la conca de l'Ebre es va desenvolupar com una conca d'avant-país de la cadena pirinenca. En el Miocè va tenir lloc un episodi evaporític que va precipitar seqüències de centenars de metres. A Montes de Torrero, el guix és el mineral més abundant a les zones més superficials, mentre que en profunditat es poden trobar anhidrita, glauberita, thenardita i halita entre altres. Els carbonats microcristal·lins i l'argila són molt abundants en el terreny,

fent que els sulfats siguin impurs. A l'àrea d'Arrúbal-Alcanadre l'erosió del riu Ebre ha deixat al descobert dipòsits terciaris en els quals excepcionalment aflora glauberita.

Els perfils duts a terme a Montes de Torrero, mostren valors de resistivitat baixos a causa de la impuresa de les roques. En els perfils s'observen estructures de materials amb valors de transició lateralment discontinues. Aquestes estructures representen canvis laterals de composició en les roques; encara que en alguns casos poden estar associats a antigues cavitats que han estat emplenades pels materials de nivells superiors. Un dels perfils mostra de forma local valors de resistivitat superiors a 1000 ohm.m, corresponents a roques sulfatades de puresa superior al 75%. A causa de la impuresa general de la seqüència evaporítica, no és possible diferenciar entre els diferents tipus de sulfats mitjançant la tomografia elèctrica, encara que sí que és possible observar estructures i detectar zones amb major puresa de sulfats en la seva composició. A l'escala en la qual s'ha treballat, amb perfils de 500 metres d'extensió amb una profunditat d'investigació de 90 metres, és típic trobar heterogeneïtats en els dipòsits evaporítics; a causa d'això, la distribució dels materials en el terreny és complexa.

A l'àrea d'Arrúbal-Alcanadre s'han dut a terme 2 perfils de tomografia en la part superior d'una antiga pedrera en la qual aflora una capa de glauberita de gran puresa. A causa del ambient de dipòsit de la glauberita, és molt excepcional trobar un dipòsit tan pur. La inversió de les dades adquirides calcula que aquesta capa té una resistivitat superior a 2500 ohm.m. L'anàlisi d'insolubles de mostres recollides en la part inferior del precipici llança una estimació de la puresa en sulfats major del 95%. Tant per damunt com per sota de la capa de glauberita, la seqüència evaporítica és impura i per això s'obté resistivitat baixa en la resta de materials. Des del punt de vista estructural, la capa desapareix lateralment. En el precipici s'observa com cap a l'est la capa s'encunya fins a desaparèixer mentre que el marge oest apareix tapat per material d'ensulsiada. En un dels 2 perfils s'observa un altre cos de valors de resistivitat similars a major profunditat que potencialment podria correspondre a un dipòsit de característiques similars.

.2.3.2 Interpretació del comportament elèctric de les roques de glauberita

Les roques de glauberita estan formades per diferents minerals evaporítics i matriu lutítica. Mitjançant l'equació general de Berriman (1995) per a un material format per n -fases, és possible calcular els límits de Hashin-Shtrikman per a un sistema de 4 fases. En aquest cas s'ha considerat un sistema format per glauberita, anhidrita, guix i matriu. Aquest sistema es molt complex i normalment es fan simplificacions. A més a més, la representació d'un

diagrama de 4 fases és un tetraedre i per tant és difícil d'interpretar. Per tant, s'ha simplificat de manera que quan les roques de glauberita estan en el domini de percolació de la matriu, s'ajusten al límit inferior de Hashin-Shtrikman, i aquest no varia pràcticament per a qualsevol combinació de sulfats i solament depèn de la matriu. Per tant, per a composicions amb una puresa del 55% en sulfats o inferior, es pot considerar un sistema binari de matriu-sulfats. Entre 55 i 70%, hi ha valors de transició, igual que en el cas de les roques d'anhidrita o de guix. Per a les roques de puresa en sulfats de 70% o superior, s'han elaborat 4 diagrames ternaris com si fossin sistemes de 3 fases en els quals es representen els sulfats per a una determinada quantitat de matriu (0, 10, 20 o 30%). El valor de resistivitat triat per la glauberita ha estat 3000 ohm.m, a partir dels resultats obtinguts en el camp.

El que s'observa en aquests diagrames ternaris és que totes les fases sulfatades tenen influència en el valor de resistivitat elèctrica quan la roca és pura, encara que l'anhidrita és la que més influeix. Els valors de resistivitat es solapan per a diferents composicions i per tant no és possible quantificar la quantitat de cada sulfat, encara que si és possible predir la conductivitat elèctrica per a una composició donada. En qualsevol cas, els dipòsits de roques de glauberita amb gran puresa en mineral de glauberita són excepcionals i en la majoria dels casos apareixen barrejats amb gran quantitat de matriu i per tant tindrà un rang de resistivitat d'entre 10 i 60 ohm.m, mentre que valors més alts estaran lligats a la presència de guix, anhidrita o altres minerals evaporítics. Gràcies la tomografia es poden identificar estructures, però és necessària informació addicional (com a sondejos) per poder conèixer la composició.

.2.4 Polarització induïda en sulfats

Alguns tipus de roques poden polaritzar-se quan un corrent elèctric les travessa. En la bibliografia no s'esmenta la propietat de la carregabilitat elèctrica de les roques sulfatades. En seccions anteriors s'ha posat en evidència la polarització de sulfats en els assajos de laboratori. En el cas de pastilles, la polarització estava condicionada per la presència d'argiles en la composició. Per tant són les argiles les que es polaritzen i no els sulfats; tot i que s'ha de tenir en compte que aquests sulfats estan composts de materials reactius de laboratori en pols. En els assajos realitzats sobre cristalls de guix també es va observar el fenomen de la polarització, però en aquest cas les mostres són de guix pur. Per tant sembla haver-hi alguna relació entre la carregabilitat del guix i la seva estructura cristal·lina. Altres assajos addicionals s'han dut a terme en petits blocs microcristal·lins de guix, anhidrita i glauberita de gran puresa i també

s'ha produït la polarització. Els mateixos assajos en un altre tipus de materials com a roques calcàries, granítiques o gresos; no han sofert polarització.

S'ha estudiat la polarització de les roques sulfatades a major escala mitjançant la tècnica de la polarització induïda en varis dels dipòsits en els que anteriorment s'ha treballat. En alguns casos s'han obtingut perfils de carregabilitat sense anomalies; el que implica que cap material es polaritza. No obstant això la major part de perfils realitzats no s'han pogut interpretar degut a la presència de soroll a causa de l'alta sensibilitat d'aquest mètode al mateix. Solament en el dipòsit de guix de Pira s'han obtingut valors de carregabilitat positius en una capa de guix de composició transicional (d'aproximadament 50% de puresa en guix), i que es repeteixen en diferents perfils. Aquest estudi està explicat detalladament més endavant, però els resultats es consideren aplicables sols de manera local a causa de la falta de dades addicionals.

.3 MÈTODES I LIMITACIONS

.3.1 Estructures en roques sulfatades

En les roques sulfatades es poden trobar una sèrie d'estructures que poden estar lligades a processos primaris (estratificació, canvi lateral de fàcies...) o secundaris (dissolució, deformació...). Aquestes estructures poden ser identificades en alguns casos mitjançant tècniques geolèctriques i poden tenir una influència en la resistivitat de dipòsit. Algunes de les estructures més típiques que habitualment es troben en sulfats han estat modelitzades mitjançant el programa RES2DMOD i s'han dut a terme models directes dels mateixos. La inversió de les dades ha permès obtenir les corresponents seccions de resistivitat que generarien aquestes estructures. Les imatges obtingudes han permès comparar els resultats teòrics amb les estructures que apareixen en els perfils que han estat realitzats en les seccions anteriors per caracteritzar el comportament elèctric de les roques sulfatades.

.3.2 Triant el protocol de mesura

Una de les qüestions més importants quan es prepara una campanya de prospecció geolèctrica és seleccionar el protocol de mesura més adequat per a l'estructura que es pretén estudiar. En prospecció elèctrica s'han fet servir més de 100 dispositius de mesura diferents i depenent de la sensibilitat de cadascun, les variacions de resistivitat lateral o vertical poden aparèixer representades de diferent manera. Alguns d'aquests protocols poden generar artefactes i comprometre per tant la correcta interpretació del perfil de resistivitat.

S'han estudiat algunes estructures prèviament conegudes mitjançant perfils de tomografia elèctrica. Els dispositius de mesura utilitzats són el Wenner-Schlumberger i el Dipol-Dipol; a causa de les seves diferents característiques i al fet que són dos dels dispositius més utilitzats en prospecció elèctrica. El primer és especialment sensible a canvis de resistivitat verticals i el segon a canvis horitzontals. S'ha estudiat la distribució de la sensibilitat relativa per a tots dos protocols en un terreny homogeni i s'ha observat com varia quan s'introdueix un canvi a major o menor resistivitat a una profunditat de 5 metres. S'ha observat que el dispositiu Dipol-Dipol experimenta un increment particularment acusat en la seva sensibilitat relativa en profunditat quan la capa inferior té una resistivitat menor. Tot i això, aquest protocol tendeix a generar artefactes en molts casos.

En la formació de Guixos de Vilobí (conca del Vallès-Penedès, Barcelona), es troba un dipòsit de guixos purs laminats damunt dels quals de mur a sostre apareix un paquet lutític i una seqüència calcària. En el lloc d'estudi, la capa lutítica té forma arquejada suau, enfonsant-se cap a la part central. S'ha dut a terme un perfil de tomografia sobre aquesta estructura amb els dispositius Wenner-Schlumberger i Dipol-Dipol i s'ha observat que malgrat que el canvi de resistivitat és principalment vertical, és l'últim el que millor defineix l'estructura; en contra del que caldria esperar. S'ha analitzat la distribució de la sensibilitat relativa en tots dos casos i el resultat ha mostrat que en el cas del Dipol-Dipol, la sensibilitat relativa dins de la capa lutítica (menys resistiva) té un major augment. En qualsevol cas tots dos dispositius han definit l'estructura satisfactòriament sense la generació d'artefactes. S'ha dut a terme un model teòric amb una estructura similar i s'han obtingut resultats similars.

A Cantallops (conca del Penedès, Miocè), s'ha estudiat una estructura de graven en roques calcàries sota una conca sedimentària com a exemple d'estudi d'un límit entre materials complex. S'ha observat que el dispositiu Dipol-Dipol tendeix a generar artefactes en profunditat. Una major quantitat d'iteracions (9 en aquest cas) en el procés d'inversió millora la definició de la capa, però també fa augmentar el valor de resistivitat calculat per a la capa de roques calcàries. Això es deu al fet que la sensibilitat relativa del perfil s'acumula en la conca sedimentària, molt menys resistiva, fent que l'augment del valor dels materials subjacents no afecti l'estabilitat del càlcul en la part superior. També per a aquest cas s'ha dut a terme un model sintètic i s'ha observat el mateix patró. Aquest tipus d'estructures no es troben generalment en les roques sulfatades. Excepte si es desitja delimitar amb precisió el contacte entre dos materials amb comportaments elèctrics diferents com en el cas de Cantallops, és recomanable dur a terme un menor nombre d'iteracions en el procés d'inversió en el cas de grans contrastos de resistivitat (sobretot quan el material més resistent es troba en la part inferior del perfil). D'aquesta forma es minimitza l'obtenció de valors de resistivitat anòmalament alts per al material més resistent. Per norma general el procés d'inversió s'estabilitza entre les iteracions 4 i 6 sense experimentar canvis representatius en iteracions successives.

Independentment del protocol de mesura triat, les limitacions pròpies de la tomografia elèctrica fan que depenent de les condicions del terreny, no sigui possible discriminar entre diferents tipus de sulfats. Anteriorment s'han definit els valors de resistivitat de les roques de guix i anhidrita pures com 10^3 i 10^4 ohm.m respectivament, tenint les roques de glauberita un valor intermedi entre aquests dos. Els dipòsits sulfatats estan molt sovint coberts per dipòsits sedimentaris quaternaris. Si aquesta capa de sediments té una resistivitat baixa en comparació

amb als sulfats, la sensibilitat relativa del perfil augmentarà en aquesta capa, fent que la tomografia sigui menys sensible als canvis en la capa de sulfats. Com més gruixuda sigui la capa sedimentària, major és aquest efecte.

S'han dut a terme una sèrie de models sintètics simplificats a fi d'observar els canvis en la sensibilitat relativa i en la representació del model de resistivitat invertida en funció del dispositiu que es faci servir. Es tracta d'un canvi vertical de resistivitat representant una capa d'1 o 5 metres d'espessor, per sobre d'un dipòsit sulfatat de guix pur en la part central del qual pugues haver-hi un cos anhidrític de 18 metres d'extensió lateral. El gruix de la capa de lutites i la presència de l'anhidrita varien en cada model, amb un total de 4 models. S'ha calculat el model directe pels 4 models utilitzant els dispositius Wenner-Schlumberger i Dipol-Dipol per a un espaiat entre elèctrodes de 2 metres, amb un total de 48 elèctrodes. També s'ha analitzat la sensibilitat relativa en tots els casos i s'ha observat que en els models en els quals la capa sulfatada està a 5 metres de profunditat, aproximadament un 10% de la sensibilitat relativa total es troba per sota d'aquest nivell per a tots dos protocols de mesura. A causa d'això, en tots els casos el model invertit no mostra canvis laterals de resistivitat en la capa sulfatada, encara que el límit entre aquesta i la capa superior de lutites s'identifica. En els models en els quals la capa sulfatada es troba a tan sols un metre de profunditat, la sensibilitat relativa és molt major i per això es poden observar canvis laterals; especialment en el dispositiu Dipol-Dipol, el qual defineix amb exactitud la posició de les roques anhidrítiques.

Per tant, a l'hora d'intentar identificar cossos anhidrítics dins d'un dipòsit de guix, la capa sulfatada ha d'estar a poca profunditat. En aquest exemple s'han utilitzat valors de roques amb una puresa del 100%. En cas de tenir un dipòsit més impur, el contrast de resistivitat amb la capa superficial no serà tan marcat i per tant la distribució de la sensibilitat serà més semblant a la d'un terreny homogeni, augmentant la possibilitat de distingir fases dins del material resistiu.

.3.3 Efectes de les heterogeneïtats en valors de transició

Anteriorment s'han definit dos dominis per al rang de resistivitat elèctrica de les roques sulfatades en funció de la seva composició: A) Domini de la matriu; la matriu és percolant i per això condiona la conductivitat; i B) Domini del sulfat; la quantitat de la fase sulfatada és tal que aïlla a la matriu. Entre aquests dos dominis principals s'ha observat que hi ha un tercer domini transicional que correspon al límit de percolació de la matriu. Des del punt

de vista teòric s'ha considerat que la distribució de les fases en les roques sulfatades és homogeni a mesoescala; la qual cosa és una aproximació a la realitat. Per al cas d'una roca ideal formada per esferes microscòpiques perfectes de sulfat en una matriu formada igualment per esferes distribuïdes homogèniament, el límit de percolació seria infinitesimal i no hi hauria transició. Tot i això, tal com s'ha observat en els estudis de camp i en els càlculs numèrics; el límit de percolació en les roques reals no és puntual sinó que té un rang composicional d'aproximadament entre el 55 i el 75% en puresa de sulfats.

Aquest rang respon a les heterogeneïtats de les roques; i com més heterogènia és la distribució de les fases, major és el rang de transició. Això s'ha pogut observar en el cas dels càlculs de resistivitat de les làmines primes de les roques d'anhidrita, on algunes de les mostres amb una quantitat important de matriu, han mostrat valors majors a l'esperat a causa de l'heterogeneïtat a microescala que es mostra en les fotografies. El rang de la transició en cap cas pot superar el 25 a 75%, ja que per damunt i per sota d'aquest rang, la quantitat d'una de les fases és tan gran que és la dominant independentment de la distribució.

Mitjançant models directes s'ha calculat la tendència de la resistivitat elèctrica per al cas de les roques de guix fent servir la mateixa metodologia que ha estat usada prèviament per a la modelització numèrica de les roques de guix, però variant la distribució de les fases al model inicial. En el cas prèviament presentat, els models inicials constaven de fases representades per petits quadrats distribuïts de manera aproximadament homogènia. En el nou set de models, la fase sulfatada està conformada per petits rectangles dispersos irregularment. D'aquesta manera s'augmenta el paràmetre de l'heterogeneïtat en el càlcul de la línia de tendència. Els resultats mostren que la tendència original i la nova s'ajusten perfectament en valors de puresa extrems. La diferència entre tots dos models resideix en que, en augmentar l'heterogeneïtat en la distribució, la zona de transició augmenta el seu rang composicional respecte a l'original. En qualsevol cas, les dades de camp i de laboratori s'ajusten millor al rang inicial, ja que com s'ha esmentat anteriorment, a mesoescala les roques sulfatades són per norma general bastant homogènies.

És possible tenir casos en els quals pugues haver-hi una estratificació de nivells amb diferents pureses, però en general les diferències no són importants i es poden considerar dipòsits homogenis amb la puresa mitjana de les diferents capes. Exemples d'aquest cas ho representen els guixos de Vilobí o Cervera, que anteriorment han estat estudiats. Els canvis bruscs en la puresa solen estar associats a la fi de seqüències o a cicles sedimentaris de major rang. També pot haver-hi canvis laterals de puresa, però en aquests casos es consideren

roques diferents. Hi han altres factors que poden afectar a la conductivitat de les roques com la temperatura, la pressió o la humitat; però no són variables importants en el cas de les roques sulfatades. A causa de tots els paràmetres citats, hi ha un cert grau d'incertesa. És per això que les classificacions de les roques sulfatades han de ser usades com a referències però els resultats obtinguts poden variar lleugerament de l'esperat.

.3.4 Estudis en clorurs

Després dels sulfats, els clorurs són les roques evaporítiques més abundants. Els clorurs més comuns són l'halita, la silvita i la carnal·lita. Precipiten a partir de salmorres molt concentrades en conques evaporítiques. A diferència dels sulfats, els dipòsits de clorurs tendeixen a intercalar capes molt pures amb capes completament lutítiques, representant diferents fases deposicionals (ciclicitat evaporítica). Aquesta característica fa que la resistivitat elèctrica que presenten aquestes roques siguin valors intermedis entre tots dos components sense seguir la tendència dels límits de Hashin-Shtrikman. A més, la presència de fluids pot afectar dràsticament a la conductivitat d'aquests dipòsits, generant una gran diferència entre la roca seca o humida.

S'han dut a terme 3 perfils de tomografia elèctrica als voltants de les localitats de Cardona i Súria, on afloren dipòsits salins de l'Eocè Superior que van ser deformats durant l'Oligocé, donant lloc a estructures diapíriques. En aquests perfils s'observa que on les roques de sal estan saturades en aigua o humides, la salmorra present en les roques fa que el valor de resistivitat baixi a valors propers a 1 ohm.m. D'altra banda, la sal seca té una resistivitat elèctrica d'aproximadament 100 ohm.m. Aquest valor és molt més baix del que caldria esperar; això pot deure's a l'heterogeneïtat de les roques prèviament esmentada combinada amb certa presència de fluids en aquestes zones.

En l'estudi dut a terme a Súria, complementàriament a la campanya de prospecció elèctrica s'han dut a terme perfils de tomografia sísmica. Mitjançant aquesta tècnica és possible distingir la sal gràcies a la seva velocitat de propagació de les ones P (4500 m/s) independentment que continguin o no fluids intersticials. Per tant, combinant totes dues tècniques és possible obtenir molta informació d'aquests dipòsits.

.4 EXEMPLES D'APLICACIÓ

.4.1 Dipòsit de guix a Pira (Tarragona)

.4.1.1 Introducció i mètodes

S'han dut a terme un total de 8 perfils de tomografia elèctrica amb la finalitat d'estudiar una formació gipsífera situada als voltants de la localitat de Pira (Tarragona). La disposició dels perfils és paral·lela entre sí amb una direcció E-W, amb l'excepció de dos perfils que són oblics a la resta. Per a l'estudi s'ha utilitzat un arranjamnt electròdic Wenner-Schlumberger a causa que la unitat estudiada cabussa menys de 15 graus en direcció NNW i presenta una relativa continuïtat lateral. Les mesures es van dur a terme amb una Syscal Pro Switch amb 48 elèctrodes i amb un espaiat de 2 metres. En 3 d'aquests perfils s'ha mesurat també la polarització induïda en el domini del temps amb una configuració aritmètica per a lapses de temps de 500 ms. La inversió de les dades es va fer mitjançant el programa RES2DINV. A partir de les dades invertides, s'ha elaborat un model tridimensional del dipòsit calculat per interpolació mitjançant el mètode de la inversa de la distància. Aquest model ha estat representat com a talls zenitals a diferent fondària. Addicionalment a la campanya de prospecció elèctrica, es va dur a terme la perforació d'un sondeig de testimoni continu de 15 metres de profunditat situat en la posició central d'un dels perfils de tomografia. Els testimonis del sondeig van ser detalladament descrits des d'un punt de vista petrogràfic i es van prendre mostres dels mateixos per elaborar làmines primes i per fer anàlisis d'insolubles a fi de determinar la puresa del guix a diferents profunditats. El material residual de les anàlisis va ser caracteritzat mineralògicament mitjançant difracció de raigs X.

.4.1.2 Descripció geològica de l'àrea d'estudi

Durant el Paleogen, va tenir lloc una sedimentació evaporítica en el marge català de la conca de l'Ebre. La sedimentació del marge català va estar condicionada per l'evolució tectònica de la Serralada Costanera Catalana. A la Conca del Barberà hi ha una depressió excavada en materials eocens-oligocens. Durant la compressió paleògena, es van desenvolupar una sèrie de plecs i encabalgaments vergents cap al NNW en aquesta àrea. Aquestes estructures estan lligades a falles normals preexistents que van actuar durant l'episodi extensional Miocè.

Els materials estudiats corresponen al membre Guixos de Pira de la formació Montblanc. Es caracteritzen per estar formats de guixos secundaris en superfície, provinents

de la deshidratació d'anhidrita. En profunditat es troba anhidrita. En alguns nivells el guix apareix com a nòduls centimètrics (de vegades d'escala mètrica) o capes enterolítiques; aquestes textures són heretades de l'anhidrita. Algunes unitats de guix, amb gruixos individuals d'entre 50 i 100 metres, estan intercalades entre unitats detrítiques. Les unitats estudiades es poden separar en dues seqüències.

La inferior està formada per lutites vermelles amb intercalació de gresos i la superior, que és menys terrígena i que correspon als materials evaporítics. A causa de processos deposicionals, la unitat gipsífera mostra canvis laterals de composició; depenent de la posició de la precipitació del de guix dins de la conca evaporítica, pot haver-hi un contingut major o menor de components terrígens. L'estudi de tomografia elèctrica es va dur a terme en un terreny de sembra proper a la localitat de Pira. Les capes de guix afloren en la part sud del camp i s'espera trobar-les representades en les línies de tomografia elèctrica (especialment als de la part més nord).

.4.1.3 Resultats i discussió

Els perfils de resistivitat elèctrica invertida mostren nivells de baixa resistivitat elèctrica (entre 1 i 50 ohm.m) i nivells amb alta resistivitat elèctrica (per sobre de 900 ohm.m). La capa superior conductiva representa el nivell lutític del camp de sembra, que es disposa per sobre del nivell de guix resistiu. Aquest contacte és més superficial en els perfils situats al sud i més profund cap al nord, en concordança amb el cabussament NNW observat en les capes aflorants. Aquesta tendència s'observa perfectament en els 2 perfils oblics als altres. En els perfils situats més al nord, igual que en les capes aflorants en el sud, s'observa que la unitat té més de 20 metres de potència i el seu límit inferior no s'arriba a identificar. No obstant això, en els 2 perfils situats més al sud, la capa resistiva de guix té tant sols uns 5 metres de potència, i per sota la resistivitat elèctrica cau fins a uns 50 ohm.m.

En aquesta zona s'ha dut a terme un sondeig de 15 metres de profunditat per poder observar petrològicament aquest canvi en la resistivitat elèctrica. El testimoni del sondeig mostra que en la part superior n'hi ha uns 90 cm de lutites. Per sota apareix guix fins a una profunditat d'uns 12 metres, a partir d'on tornen a aparèixer lutites, encara que amb quantitats accessòries de guix. La seqüència de guix ha estat mostrejada i s'han fet anàlisis d'insolubles per fer una estimació de la puresa de les diferents capes que la componen. D'aquesta manera s'ha observat que en les mostres analitzades en la part superior (fins a uns 7 metres de profunditat), la puresa supera el 90% en mineral de guix. Aquesta secció correspon

a la capa resistiva que s'ha observat en els perfils de tomografia, amb valors propers a 1000 ohm.m. Entre 7 i 12 metres de profunditat, la puresa del guix descendeix dràsticament donant valors propers al 50%. Aquest fet explicaria el descens bruscat en els valors de resistivitat elèctrica. Dins d'aquest rang de profunditat apareixen alguns nivells prims més purs (que poden tenir més de 90% en guix); però la tendència general és d'una presència major de matriu.

Segons la classificació de les roques de guix, el nivell superior correspon a *Guix Pur*. El nivell de guix que apareix per sota és en el límit entre *Lutites Riques en Guix* i *Guix de Transició*. Finalment el nivell que apareix per sota de 12 metres correspon a *Lutites*. Des d'un punt de vista geoelectric, no hi ha una diferència de resistivitat destacable entre els 2 nivells inferiors a causa que en tots dos casos la matriu té un comportament percolant, per la qual cosa la tomografia elèctrica no permet diferenciar-los. En la part nord de l'àrea d'estudi la resistivitat elèctrica de les capes de guix es manté elevada en profunditat, per la qual cosa s'interpreta que la roca dominant és *Guix Pur*.

Pel que fa a les mesures de polarització induïda en el domini del temps dutes a terme en la posició de 3 dels perfils de tomografia elèctrica realitzats, s'han obtingut anomalies de carregabilitat elèctrica focalitzades en el nivell de guix amb una puresa d'aproximadament el 50% de la part sud de la zona d'estudi. En els 3 perfils s'observa la mateixa tendència, donant valors de més de 5 mV/V a la zona amb màxima anomalia. D'aquesta manera ha estat possible distingir el trànsit entre el guix de 50% de puresa i les lutites amb quantitats accessòries de guix que no havia estat possible distingir amb la mesura de la resistivitat elèctrica.

La polarització de les roques de guix i dels sulfats en general ha estat prèviament observada en els assajos de laboratori realitzats. En altres zones on s'ha desenvolupat l'estudi del comportament geoelectric de les roques de guix s'han dut a terme mesures de polarització induïda a fi d'intentar establir un patró, però en la majoria de casos no s'han pogut establir interpretacions a causa de fonts de soroll elèctric ambiental. En els pocs casos en els quals s'ha mesurat sense presència de soroll (com a Cervera) no s'han observat anomalies de carregabilitat elèctrica destacables. És per això que, mancant un estudi més ampli, els resultats obtinguts per a la carregabilitat elèctrica dels dipòsits de guix solament són aplicables a nivell local per a aquest estudi.

.4.2 Estudi de puresa a una pedrera activa

.4.2.1 Introducció i mètodes

A més de la presència d'anhidrita, el factor més important a l'hora d'extreure guix en una pedrera és la continuïtat en la puresa del dipòsit; el que permet que el processament del material sigui molt més productiu. D'aquesta manera, el coneixement de canvis en la puresa del guix permet una millor planificació de l'explotació. Els mètodes d'avaluació de la puresa d'una explotació de guix que s'usen avui dia, consisteixen en analitzar mostres agafades en el mateix front de la pedrera i mitjançant sondejos. Gràcies a la tomografia elèctrica és possible obtenir una imatge general de la continuïtat de la puresa en els dipòsits de guix i detectar possibles cossos impurs que augmentin els costos del tractament del material en planta.

S'han dut a terme un total de 5 perfils de tomografia elèctrica en una pedrera propera a la localitat de Gelsa (Saragossa). Els perfils s'han desplegat paral·lelament al front d'explotació amb l'objectiu d'estudiar el material que serà extret a continuació. Un dels perfils s'ha realitzat en una zona una mica més allunyada, corresponent a la zona cap a la qual continuarà l'explotació una vegada exhaurits els fronts actuals. S'ha fet servir un resistímetre Syscal Pro switch amb 48 elèctrodes i una separació de 2 metres entre els mateixos. A causa de la proximitat de la paret de la pedrera s'ha triat el dispositiu Wenner-Schlumberger per minimitzar la distorsió de les mesures de resistivitat. La inversió de les dades s'ha dut a terme amb el programa RES2DINV.

.4.1.2 Descripció geològica de l'àrea d'estudi

Al començament del Miocè, la part del sector aragonès de l'actual conca de l'Ebre va augmentar la seva subsidència. Això va lloc a una sèrie de dipòsits evaporítics lacustres en disposició NW-ES. En aquesta conca es van dipositar tot tipus de minerals evaporítics de manera primària (anhidrita, glauberita, halita...), però amb predominança de guix. Aquest guix es va convertir en anhidrita i glauberita en un primerenc procés diagenètic. Posteriorment, aquestes fases sulfatades es van hidratar i van donar lloc a l'actual guix secundari que aflora avui dia en superfície amb fins a 100 metres de seqüència aflorant en algunes àrees.

La formació de Guix de Gelsa es va formar com un dipòsit lacustre perifèric de la gran conca sòdica de Saragossa on no hi havia Na. Es caracteritza per les seves fàcies secundàries nodulars i laminades. La seqüència evaporítica de la pedrera estudiada té els següents nivells de mur a sostre: (a) nivell de guix alabastrí macronodular, (b) capa centimètrica de carbonats i

lutites, (c) guix secundari massiu-laminat amb una potència d'uns 5-7 metres (depenent del lloc), (d) nivell de guix alabastrí que aflora localment, (e) material parcialment consolidat format per pols de guix procedent de la pedrera i altres sediments lutífics similars als del terreny circumdant. En la part SSE de la pedrera s'aprecia una zona topogràficament superior al nivell de guixos laminats en el qual tornen a aparèixer noduls alabastrís. En els nivells de guix alabastrí macronodular, s'ha arribat a explotar roca de guix amb una puresa de fins a 98% en mineral de guix, mentre que els nivells laminats tenen una puresa una mica inferior (propera al 90%).

.4.1.3 Resultats i discussió

Atès que les capes que formen el dipòsit de guix de Gelsa tenen una disposició horitzontal, tots els perfils mostren una disposició similar. En síntesi es poden observar 3 nivells diferents amb diferent resistivitat elèctrica. El superior és una capa discontinua amb 1 o 2 metres de profunditat (en funció de la zona) que presenta valors de resistivitat alts i correspon amb el material en pols que conforma el sòl de la part superior de la pedrera. Per sota la resistivitat decreix; aquest nivell representa el guix secundari massiu-bandat observat en el front de la pedrera. A una profunditat d'entre 5 i 7 metres apareix el tercer nivell que presenta una resistivitat superior al nivell que hi ha per sobre i que es correspon amb el guix nodular alabastrí. El contacte entre els dos tipus de guix és bastant recte en algunes zones, mentre que en unes altres apareix més irregular.

En el perfil realitzat a la zona d'explotació futura de la pedrera s'observa una disposició similar a l'observada en la resta dels perfils, però hi ha un àrea en la qual el nivell de guix nodular perd la seva continuïtat i mostra una resistivitat més baixa. Aquesta zona hauria de ser tinguda en compte durant l'expansió de la pedrera, ja que pot fer baixar la puresa mitjana del material extret. A més del contacte entre els diferents tipus de guix, també s'observa una tendència general de resistivitat més baixa en el nivell de guix massiu-bandat dels perfils situats més al sud. Això implica una major puresa d'aquest nivell en la part nord; tendència que ja ha estat observada en la roca extreta fins avui.

Amb la informació proporcionada pels perfils de tomografia elèctrica, és possible establir un pla d'explotació en el qual els diferents nivells puguin ser extrets en diferents etapes fent que la puresa de la roca sigui el més invariable possible per al seu posterior processament en planta.

.5 CONCLUSIONS

S'ha determinat la resposta geolèctrica de les roques de sulfats a partir de dades de camp, assajos de laboratori i càlculs teòrics. S'ha quantificat la relació entre la conductivitat elèctrica d'aquests materials amb la seva composició. Per a això s'han dut a terme mesures en pastilles sintètiques amb diferents composicions i s'han elaborat models composicionals. Gràcies a la tècnica de la tomografia elèctrica s'han estudiat diferents formacions de sulfats amb composicions dispars. Mitjançant la comparació de resultats s'ha establert que la connectivitat entre les partícules de la matriu juga un paper clau, ja que quan aquesta matriu és percolant la resistivitat que presenten les roques de sulfats és similar a la calculada per al límit inferior de Hashin-Shtrikman; mentre que en el cas contrari la tendència observada és la del límit superior. Entre aquests dos extrems hi ha una zona de transició l'extensió de la qual depèn de l'heterogeneïtat del terreny. Gràcies a totes aquestes observacions s'han elaborat una sèrie de classificacions en les quals es classifiquen els diferents tipus de roques sulfatades (de guix, anhidrita i glauberita) a partir de la seva resistivitat elèctrica. Aquestes classificacions serviran com a referència per a estudis futurs.

S'han analitzat les estructures que solen trobar-se en els dipòsits de sulfats mitjançant models teòrics i s'han comparat amb els perfils realitzats en el camp. També s'ha analitzat la idoneïtat d'usar un dispositiu de mesura o un altre en funció de l'estructura que s'està estudiant. Quan hi ha un gran contrast de resistivitat en el terreny, la sensibilitat de la tomografia elèctrica pot ser massa baixa en els dipòsits de sulfats, fent que no sigui possible diferenciar diferents fases. En el cas d'estudis duts a terme en clorurs, hi ha un índex d'heterogeneïtat major que en el cas dels sulfats i per tant quan la presència de materials lutítics és important, la tendència de la resistivitat no serà la dels límits de Hashin-Shtrikman, sinó que mostrarà valors de transició. Els fluids presents en el terreny també juga un paper molt important en aquests materials, fet que s'agreuja a causa de la seva alta solubilitat. La resistivitat elèctrica pot descendir dràsticament quan hi ha salmorra intersticial en les roques de sal. En aquests casos, la tomografia sísmica pot ser una eina útil per definir la distribució de la sal en el subsòl.

Com a exemples d'aplicació, s'ha estudiat un dipòsit de guix en les rodalies de la localitat de Pira (Tarragona), on gràcies a la tomografia elèctrica ha estat possible diferenciar diferents nivells de guix i identificar el guix potencialment explotable amb finalitats industrials. A nivell local, s'ha pogut identificar un nivell de guix impur gràcies a la polarització induïda.

Aquesta tècnica ha estat aplicada en altres casos però a causa del soroll ambiental o a la falta de resultats, els resultats de la polarització induïda en el cas de Pira no s'ha pogut extrapolat a altres dipòsits. Un sondeig mecànic ha corroborat els resultats de l'estudi geoelectric. En una pedrera a Gelsa (Saragossa) s'ha aplicat amb èxit la tècnica de la tomografia elèctrica per identificar nivells de guix de major puresa que estan sent actualment explotats en el front de pedrera i s'ha estudiat una zona en la qual la pedrera continuarà la seva explotació en el futur. En aquesta zona s'ha determinat un cos de menor puresa. Gràcies a aquesta informació, la planificació dels treballs futurs en la pedrera pot ser optimitzada.

En línies generals s'ha establert una base d'informació sobre la conductivitat elèctrica de les roques de sulfats i s'ha demostrat la utilitat dels mètodes geoelectrics en la seva exploració.