



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Avenços en l'adquisició i interpretació de dades geoelectriques

Fabián Bellmunt Traver

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) i a través del Dipòsit Digital de la UB (diposit.ub.edu) 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 ni al Dipòsit Digital de la UB. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX o al Dipòsit Digital de la UB (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) y a través del Repositorio Digital de la UB (diposit.ub.edu) 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 o al Repositorio Digital de la UB. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR o al Repositorio Digital de la UB (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 and by the UB Digital Repository (diposit.ub.edu) 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 nor its spreading and availability from a site foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository is not authorized (framing). Those 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.



Grup d'Exploració Electromagnètica i Sísmica
Institut de Recerca Geomodels
Departament de Geodinàmica i Geofísica
Facultat de Geologia. Universitat de Barcelona

Avenços en l'adquisició i interpretació de dades geoelèctriques

Memòria presentada per Fabián Bellmunt Traver per a optar al títol de Doctor dins del programa de doctorat de Ciències de la Terra de la Universitat de Barcelona. Aquesta memòria ha estat realitzada baix la direcció del Dr. Alejandro Marcuello Pascual (Universitat de Barcelona).

Fabián Bellmunt Traver
Barcelona, Setembre 2015

Dr. Alejandro Marcuello Pascual
Director y tutor de la tesi

Capítol 2. Resum dels resultats

Aquest capítol s'ha agrupat en dues parts:

En la primera part, titulada “**Estratègies d’adquisició**”, es presenten els resultats del desenvolupament i l’aplicació de les diferents estratègies d’adquisició utilitzades amb finalitat de reduir el temps d’adquisició, tant per a la caracterització d’estructures com per al seguiment de processos dinàmics.

En la segona part, titulada “**Experiment de seguiment**”, es presenten el resultats de l’experiment de seguiment del procés de perforació del túnel de la nova línia L9 del metro de Barcelona, que inclou la construcció i instal·lació d’elèctrodes en pous, l’aplicació de diferents tècniques per a l’obtenció dels models de variació de la resistivitat i la interpretació dels models finals.

2.1. Estratègies d'adquisició

2.1.1. Caracterització d'estructures

Com s'ha comentat a la presentació de la memòria, en estudis de caracterització d'estructures hi ha situacions on és necessari reduir del temps de les adquisicions, com per exemple: si s'han de cobrir grans extensions de terreny o si s'han d'enregistrar mesures normals i recíproques per a disposar d'un control de qualitat de les dades, entre d'altres. En aquests casos, es podria pensar que augmentant el nombre de canals de mesura simultània dels equips es podria reduir al mínim el temps d'adquisició, però els resultats de l'estudi del temps d'adquisició realitzat en Bellmunt i Marcuello (2011) mostren que a partir d'un nombre de dades, l'augment en el nombre de canals no disminueix el temps d'adquisició.

Amb la finalitat de simplificar l'elecció de la configuració més adient i reduir el temps d'adquisició es van estudiar les relacions entre diferents configuracions i es va cercar una configuració d'elèctrodes capaç de generar d'una manera ràpida i senzilla les dades d'altres configuracions. Aquest estudi es va centrar en la generació de les dades dels dispositius d'ERT dipol-dipol i Wenner-Schlumberger, ja que presenten resolucions complementaries. Tanmateix això, és possible utilitzar aquesta estratègia per a generar altres dispositius d'ERT o inclús de CHERT. A continuació es presenten els resultats del desenvolupament d'aquesta estratègia d'adquisició.

La configuració escollida com a dispositiu generador va ser el dispositiu pol-dipol (PD), però amb l'elèctrode llunyà en una posició fixa i pròxima al perfil de tomografia elèctrica. Aquesta modificació transforma el dispositiu tri-electròdic PD en una nova configuració tetra-electròdica i permet evitar els problemes derivats de l'ús d'elèctrodes llunyans. Aquesta nova configuració es va anomenar pseudo pol-dipol (pPD) i, com el dispositiu PD tradicional, presenta dues direccions d'adquisició, una directa i una inversa que, en al·lusió a la tipologia del sistema tri-potencial (Carpenter, 1955; Carpenter i Habberjam, 1956), es van anomenar pPD- β i pPD- α , respectivament. A la Figura 2.1 es presenta la distribució geomètrica dels elèctrodes en les adquisicions amb el dispositiu PD tradicional i amb el nou dispositiu pPD en els dos sentits d'adquisició.

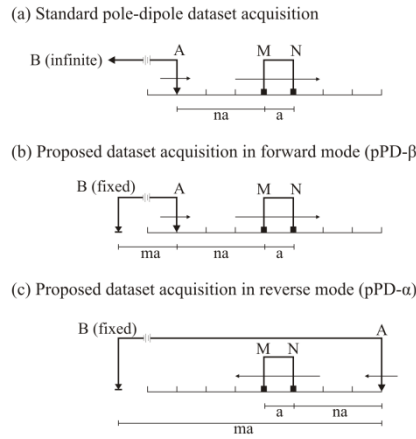


Figura 2.1. Geometria de les combinacions d'elèctrodes utilitzades per a l'adquisició del dispositiu PD tradicional (a) i el pPD en sentit directe (b) i invers (c). AB i MN representen els elèctrodes de corrent i de potencial, respectivament; "a" representa la distància entre els elèctrodes M i N; "n" és factor de separació entre els dipòls AB i MN; "m" és un factor de distància AB.

Les expressions que relacionen els valors de resistència dels dispositius dipol-dipol, Wenner-Schlumberger i pPD, es van obtenir amb l'aplicació de la llei d'addició i del teorema de reciprocitat. A la Figura 2.2 es presenten gràficament aquestes relacions.

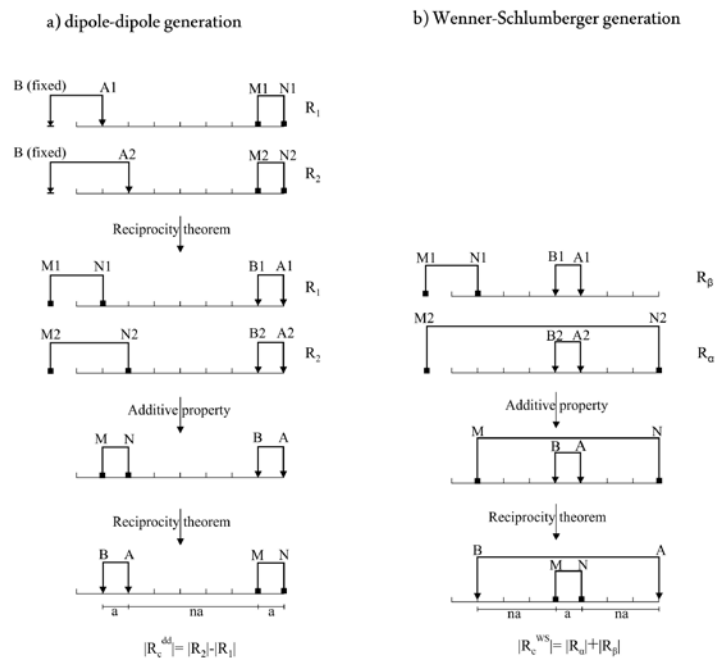


Figura 2.2 Esquema del procés de generació de dades dels dispositius a) dipol-dipol i b) Wenner-Schlumberger, a partir del dispositiu generador pPD. R_1 i R_2 : resistències mesurades amb el dispositiu pPD en una mateixa direcció d'adquisició; R_c^{dd} : resistència dipol-dipol calculada a partir de dues dades del dispositiu pPD; R_c^{WS} : resistència Wenner-Schlumberger calculada; $R_α$ i $R_β$: resistències mesurades amb el dispositiu generador pPD-α i pPD-β, respectivament.

Com es pot observar a la Figura 2.2, la generació d'una dada del dispositiu dipol-dipol requereix de dues dades del dispositiu pPD en la mateixa direcció d'adquisició, pPD- β o pPD- α . Mentre que per al càlcul d'una dada del dispositiu Wenner-Schlumberger és necessària una dada en cada direcció d'adquisició, pPD- β i pPD- α . Aprofitant l'adquisició del dispositiu pPD en les dues direccions d'adquisició, es va establir un control de qualitat semblant al que s'obtindria comparant dades normals i recíproques, però en aquest cas, mitjançant la comparació de dos conjunts de dades dipol-dipol calculats independentment a partir de les dades dels dispositius pPD- α i pPD- β . Es va establir una diferència màxima entre les dades comparades o llindar d'error del 10% per sobre del qual les dades pPD no eren admeses en el procés de generació.

Per a validar teòricament les expressions obtingudes i el control de qualitat establert, es van realitzar diverses simulacions sense i amb error en les dades segons l'expressió desenvolupada en Bellmunt i Marcuello (2011). Els resultats de la generació de les dades dels dispositius dipol-dipol i Wenner-Schlumberger a partir de les dades del dispositiu pPD obtingudes en les simulacions sense error afegit van resultar en diferències relatives menors de 10^{-4} respecte de les respostes dipol-dipol i Wenner-Schlumberger obtingudes directament mitjançant modelització. Amb l'adició de soroll (2%) a les dades del dispositiu pPD, al voltant del 90% de les dades dipol-dipol i Wenner-Schlumberger generades va superar el control de qualitat establert amb un nivell llindar d'error del 10%.

La validació experimental es va realitzar mitjançant dues campanyes d'adquisició de dades d'ERT en diferents contextos i escales de treball, una a Castellbisbal i l'altra a La Puebla de Roda (Catalunya, España). A la Taula 2.1 es presenten les característiques de cada una de les campanyes d'adquisició.

Taula 2.1. Característiques dels perfils 2D adquirits en les campanyes d'ERT.

Ubicació	Configuracions enregistrades	Quantitat d'elèctrodes	Separació entre elèctrodes	Longitud total perfil
Castellbisbal (Barcelona)	Wenner-Schlumberger dipol-dipol pPD- α / pPD- β	72	5,0 m	355,0 m
La Puebla de Roda (Huesca)	Wenner-Schlumberger dipol-dipol pPD- α / pPD- β	72	0,5 m	35,5 m

La generació de les dades dels dispositius dipol-dipol i Wenner-Schlumberger a partir de les dades pPD enregistrades a Castellbisbal (Figura 2.3) mostren que aproximadament el 90% de les dades generades van superar el control de qualitat establert amb un nivell lliandar d'error del 10%. Les dades que no van superar el control de qualitat es van detectar només en les zones més profundes de les pseudoseccions on, generalment, la relació senyal/soroll és més baixa.

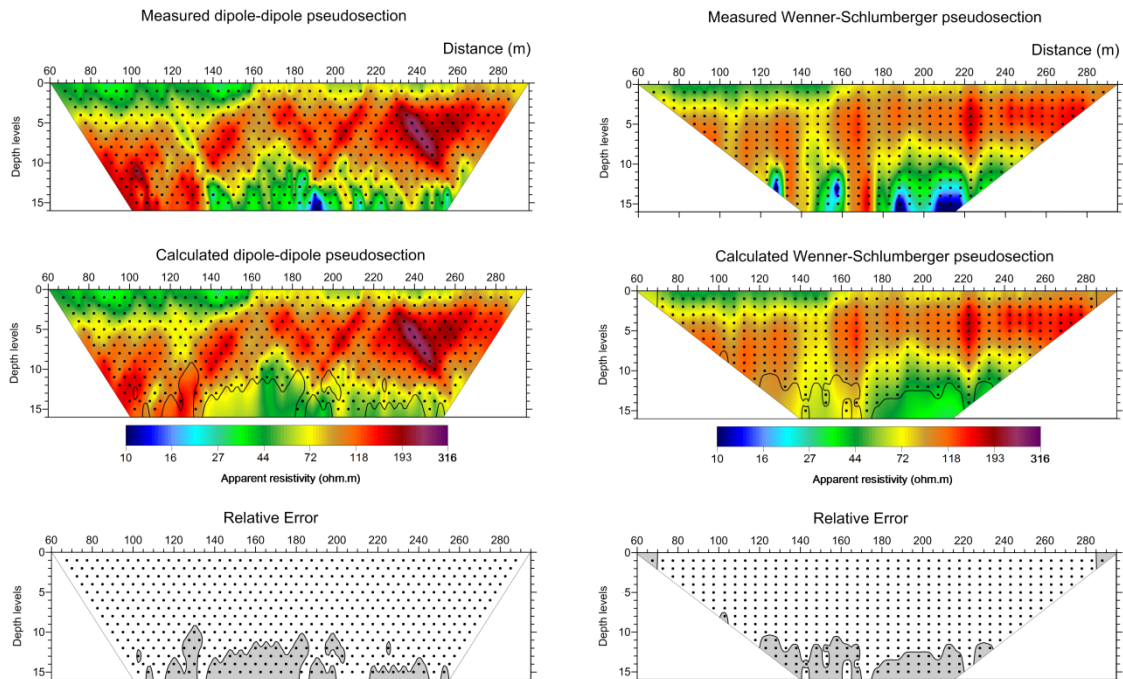


Figura 2.3. Pseudoseccions amb els resultats de l'aplicació de l'estratègia desenvolupada a les adquisicions realitzades a Castellbisbal (Barcelona). Els punts negres representen les dades. En la part superior es presenten les pseudoseccions de resistivitat aparent mesurades directament amb el dispositiu dipol-dipol (part esquerra) i Wenner-Schlumberger (part dreta). En la part central, les pseudoseccions de dades dipol-dipol (part esquerra) i Wenner-Schlumberger (part dreta) calculades amb les dades pPD que van superar el control de qualitat. Finalment, en la part inferior es presenta una pseudosecció on s'han marcat en color gris les dades que no van passar el control de qualitat amb un nivell lliandar d'error del 10%.

En el cas de La Puebla de Roda (Figura 2.4), aproximadament el 98% de les dades generades dels dispositius dipol-dipol i Wenner-Schlumberger va superar el control de qualitat establert (nivell lliandar d'error del 10%).

En tots els casos, el percentatge de dades que no van superar el control de qualitat va ser semblant per al dispositiu dipol-dipol i per al Wenner-Schlumberger.

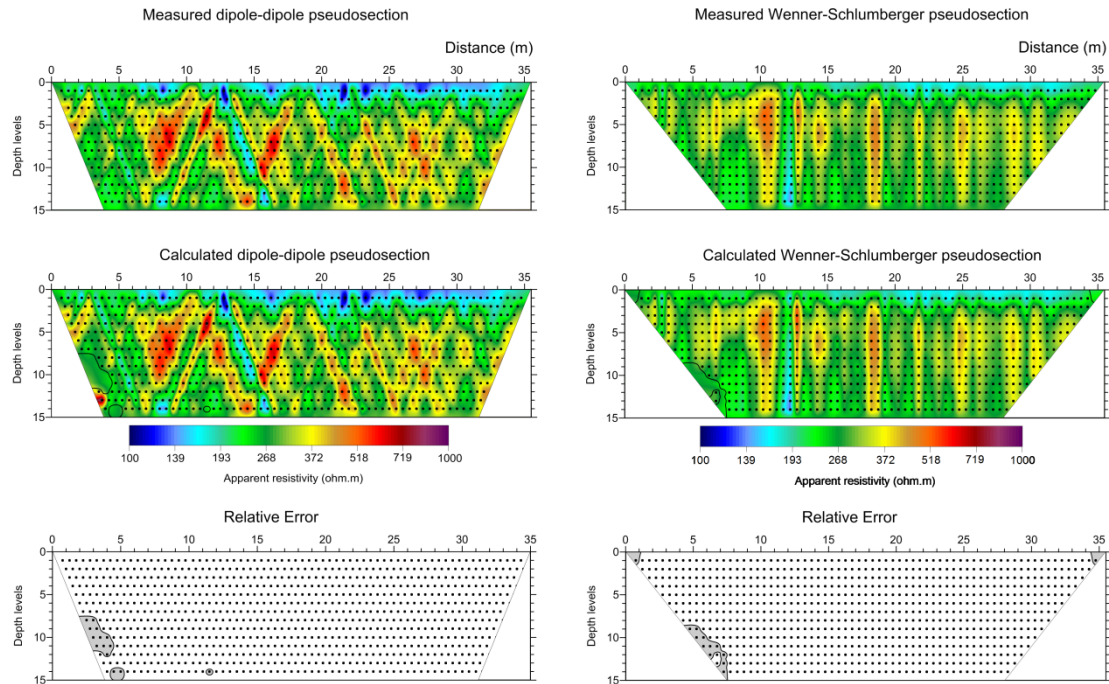


Figura 2.4. Pseudoseccions amb els resultats de l'aplicació de l'estratègia desenvolupada a les adquisicions realitzades a La Puebla de Roda (Huesca). Els punts negres representen les dades. En la part superior es presenten les pseudoseccions de resistivitat aparent mesurades directament amb el dispositiu dipol-dipol (part esquerra) i Wenner-Schlumberger (part dreta). En la part central, les pseudoseccions de dades dipol-dipol (part esquerra) i Wenner-Schlumberger (part dreta) calculades a partir de les dades del dispositiu generador que van passar el control de qualitat. En la part inferior, les pseudoseccions on s'han marcat en color gris les dades que no van passar el control de qualitat.

2.1.2. Seguiment de processos dinàmics

Amb la finalitat d'optimitzar les configuracions per al seu ús en experiments de seguiment de processos dinàmics on sigui necessària una reducció important en el temps d'adquisició i una bona resolució espacial es va estudiar el seu comportament.

En aquest estudi es van contemplar configuracions de CHERT, però es pot aplicar també a configuracions d'ERT. Es van considerar un dispositiu tipus I: CH AM-BN, un tipus H: CH AB-MN (dues variants de l'anomenat dispositiu CH dipol-dipol) i un dispositiu tipus L: CH AMN-B/A-BMN (anomenat també CH pol-tripol). A la Figura 2.5 es descriuen breument aquests dispositius. Les lletres majúscules designen el tipus d'elèctrodes: A i B

representen els elèctrodes d'injecció del corrent i , M i N, els de mesura del potencial. El guió separa els elèctrodes en funció del pou d'ubicació.

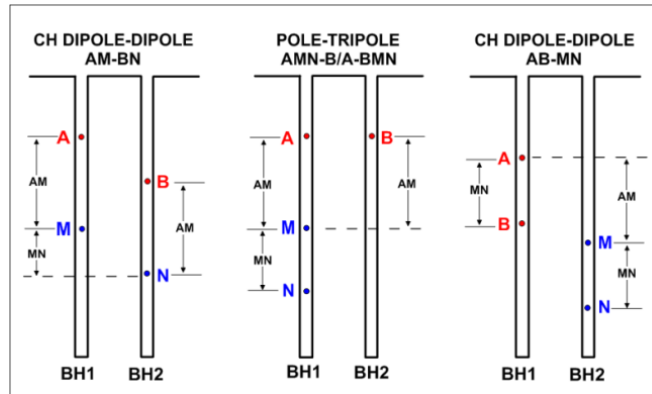


Figura 2.5. Esquema de distribució dels elèctrodes per als dispositius CH dipol-dipol (CH AM-BN i CH AB-MN) i CH pol-tripol amb el dipol MN en els dos pous (AMN-B/A-BMN). Les lletres majúscules i els punts vermells/blaus designen el nom de l'elèctrode i la seva posició en fondària (A i B representen els elèctrodes de corrent i , M i N, els de potencial); AM: distància vertical entre els elèctrodes de corrent i de potencial; MN: distància vertical entre els elèctrodes de potencial.

La capacitat de les configuracions de CHERT per al seguiment de processos dinàmics es va analitzar a través de la detecció d'anomalies i la simetria en el patró de sensibilitat. A tal efecte es va simular un procés d'injecció i migració d'un plomall mitjançant el model presentat a la Figura 2.6.

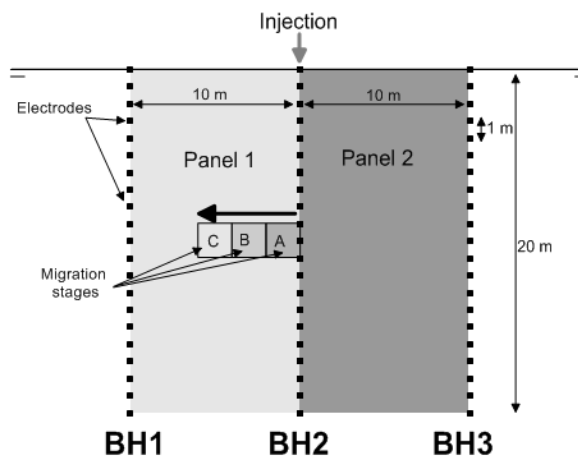


Figura 2.6. Model i etapes utilitzades per simular la injecció i migració d'un plomall. Els quadrats negres verticals representen la posició dels elèctrodes en els pous BH1, BH2 i BH3; La fletxa negra i els quadrats amb diferents tonalitats de color gris (amb les lletres A, B i C) simulen la migració del plomall en tres etapes. Els panells entre els pous s'han colorat amb diferents tonalitats de gris per a diferenciar les mesures CHERT adquirides entre els pous BH1 i BH2 (panell 1) i entre els pous BH2 i BH3 (panell 2).

En aquest experiment es va considerar la injecció d'un fluid a través del pou central BH2 i la seva migració lateral mitjançant l'ús d'un cos de secció quadrada (de costat 2x2) situat en tres posicions diferents de profunditat constant (etapes de migració A, B i C). Es van diferenciar dos panells: el panell 1, que inclou les dades enregistrades entre els elèctrodes ubicats als pous BH1 i BH2, i el panell 2, amb les dades enregistrades entre els pous BH2 i BH3. També es van utilitzar diversos contrastos de resistivitat.

La detecció d'anomalies amb les diferents configuracions es va quantificar a partir de la variació relativa entre la resposta de resistivitat deguda a la presència d'una anomalia, en aquest cas el plomall en les diferents etapes de migració, i l'obtinguda amb el medi homogeni. La simetria en el patró de sensibilitat es va avaluar a partir de la comparació entre les respostes de resistivitat obtingudes utilitzant el panell 1 i el panell 2 en la mateixa etapa de migració (Figura 2.6). La manca de diferències en els valors de resistivitat entre les dues respostes (panell 1 i 2) es va utilitzar com a indicador d'una alta simetria i una baixa capacitat per a resoldre adequadament la direcció de migració del plomall. Per coherència amb les publicacions de l'Annex, s'utilitzarà l'acrònim en anglès AD (*Anomaly Detection value*) per al valor de la detecció d'anomalies i IOS (*In-panel/Off-panel Sensitivity value*) per al valor de la diferència de sensibilitat en front a una anomalia situada dins i fora del panell entre els pous involucrats, per a diferents distàncies AM i MN de les configuracions. Les distàncies AM i MN es poden considerar normalitzades per la distància entre elèctrodes, $a=1$ m, de manera que els resultats de l'aplicació de la metodologia desenvolupada es poden considerar normalitzats per aquesta distància. A continuació s'exposen els resultats més importants.

A la Figura 2.7 es presenten, a mode d'exemple, les corbes d'AD i d'IOS obtingudes amb l'ús dels dispositius CH dipol-dipol (CH AM-BN i CH AB-MN) i CH pol-tripol en les tres etapes de migració per a una única distància MN. Es va observar que els patrons de les corbes de l'AD i de l'IOS es repetien per a les diferents distàncies MN de cada configuració. Però, amb l'ús dels dispositius CH AB-MN i CH pol-tripol, l'AD augmentava amb l'increment de la distància MN, i amb el dispositiu CH AM-BN, l'increment de la distància MN feia disminuir l'AD.

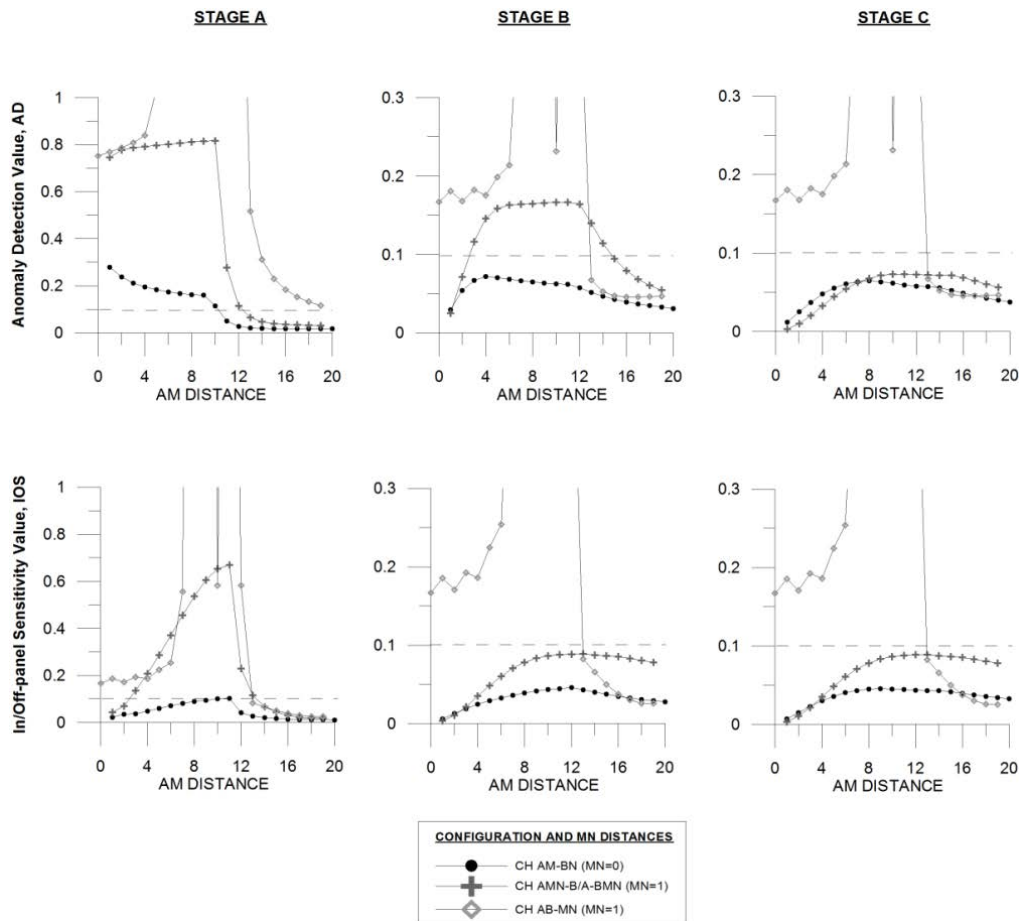


Figura 2.7. Representació de les corbes de l'AD (part superior) i de l'IOS (part inferior) obtingudes per als dispositius CH AM-BN (MN=0), CH pol-tripol (MN=1) i CH AB-MN (MN=1) en les tres etapes de migració (stage A, B i C) del model presentat amb un contrast de resistivitat, $R_c=0.1$.

Com es pot observar a la Figura 2.7, els màxims AD i IOS en les tres etapes de migració, i per als diferents contrastos de resistivitat, es van assolir amb l'ús del dispositiu CH AB-MN. El dispositiu CH pol-tripol va obtenir valors intermedis, i el dispositiu CH AM-BN va obtenir els valors més baixos en totes les etapes de migració.

Com era d'esperar, l'AD i l'IOS més elevats es van obtenir amb el plomall en l'etapa "A" de la migració i disminüien en les etapes "B" i "C". Durant la migració del plomall de l'etapa "A" a la "C", l'AD disminuïa i eren necessàries majors distàncies AM entre els elèctrodes de la configuració per a obtenir el màxim efecte de la presència del plomall. Però, el màxim IOS, és a dir, la menor simetria en el patró de sensibilitat, es va obtenir sempre amb distàncies AM=10-12, independentment de la configuració, del contrast de resistivitat i de l'etapa de migració del plomall utilitzats.

A partir dels resultats obtinguts es va construir un conjunt de dades optimitzat amb només les configuracions i distàncies MN que van obtenir els AD i IOS més elevats. En aquest cas, per a aprofitar els beneficis d'utilitzar configuracions amb resolucions complementaries, es va utilitzar un conjunt mixt format per les dades del dispositiu CH AB-MN amb distàncies $MN=3$ i $AM=0\pm 5$ i del dispositiu CH pol-tripol amb distàncies $MN=1$ i $AM=1-14$. Amb un total 518 dades per panell, aquest conjunt de dades tenia un temps d'adquisició inferior a 10 minuts (1036 dades).

Per a avaluar la resolució espacial del dispositiu optimitzat es va realitzar la inversió de les dades en tres estadis. En primer lloc, es van invertir les dades dels dispositius CH AB-MN (1750 dades per panell) i CH pol-tripol (1540 dades per panell) individualment per a avaluar la resolució de les dues configuracions amb els majors AD i IOS. Després, es va invertir un conjunt mixt amb les dades dels dispositius del pas anterior (3290 dades per panell) per a avaluar la màxima resolució que es podia obtenir. Finalment, es va invertir el conjunt de dades optimitzat amb 518 dades per panell. Per a simular l'efecte dels errors experimentals es va afegir soroll (3%) a les respostes obtingudes utilitzant l'expressió presentada a Bellmunt i Marcuello (2011).

A la Figura 2.8 es presenten els models de resistivitat de les inversions utilitzant un contrast de resistivitat, $R_c=0.1$. Com es pot observar, els models obtinguts utilitzant el dispositiu CH pol-tripol van sofrir d'artefactes simètrics o efectes d'ombra (Nimmer et al., 2008; Tsourlos et al., 2011). És a dir, encara que el plomall es trobava dins del panell 1, els models de resistivitat mostraven una anomalia en el panell 2 en una situació simètrica respecte del pou central. Els models d'inversió del dispositiu CH AB-MN van presentar també artefactes però, en aquest cas, distribuïts principalment al llarg dels pous. La màxima resolució va ser per al conjunt mixt de dades (*mixed*) i per a l'optimitzat (*organized dataset*), que van ser capaços de resoldre tots els estadis de migració de l'experiment dissenyat.

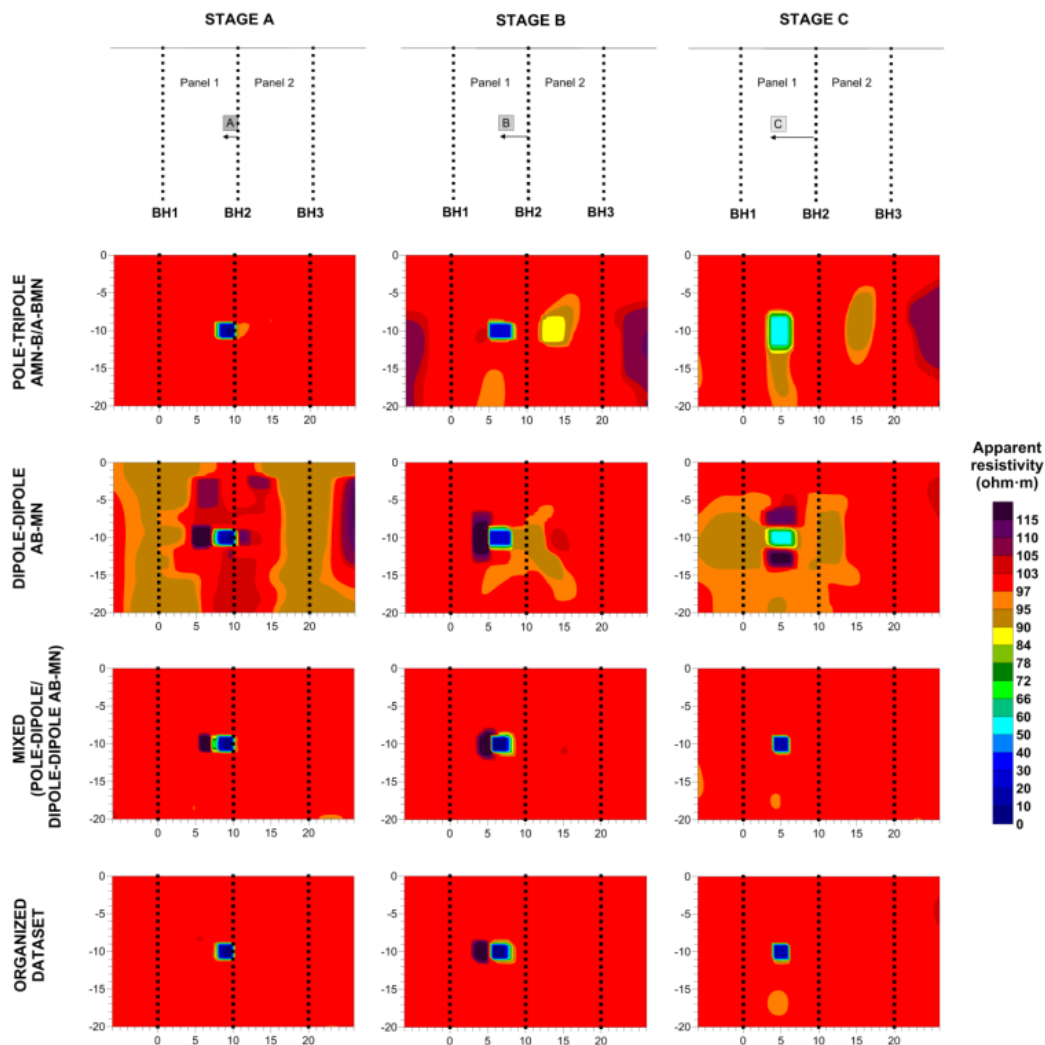


Figura 2.8. Models de resistivitat obtinguts amb la inversió dels dispositius CH pol-tripol i CH AB-MN, tant individualment (part superior), com en un conjunt mixt de dades (*mixed*), i del dispositiu optimitzat (part inferior: *organized dataset*). Contrast de resistivitat, $R_c=0.1$.

A la Figura 2.9 es presenten els models de resistivitat obtinguts amb un contrast de resistivitat, $R_c=10$. En aquest cas, els models d'inversió obtinguts no van mostrar pràcticament artefactes, però el valor de la resistivitat del plomall va ésser subestimat. A l'igual que abans, la màxima resolució s'assoleix amb la inversió del conjunt de dades mixt (*mixed*). El conjunt de dades optimitzat (*organized dataset*) va ser capaç de resoldre totes les etapes del model de migració amb una resolució semblant a la del dispositiu mixt. Però, en aquest cas, el valor de la resistivitat del plomall en l'etapa "C" va ser inferior al del conjunt de dades mixt (*mixed*).

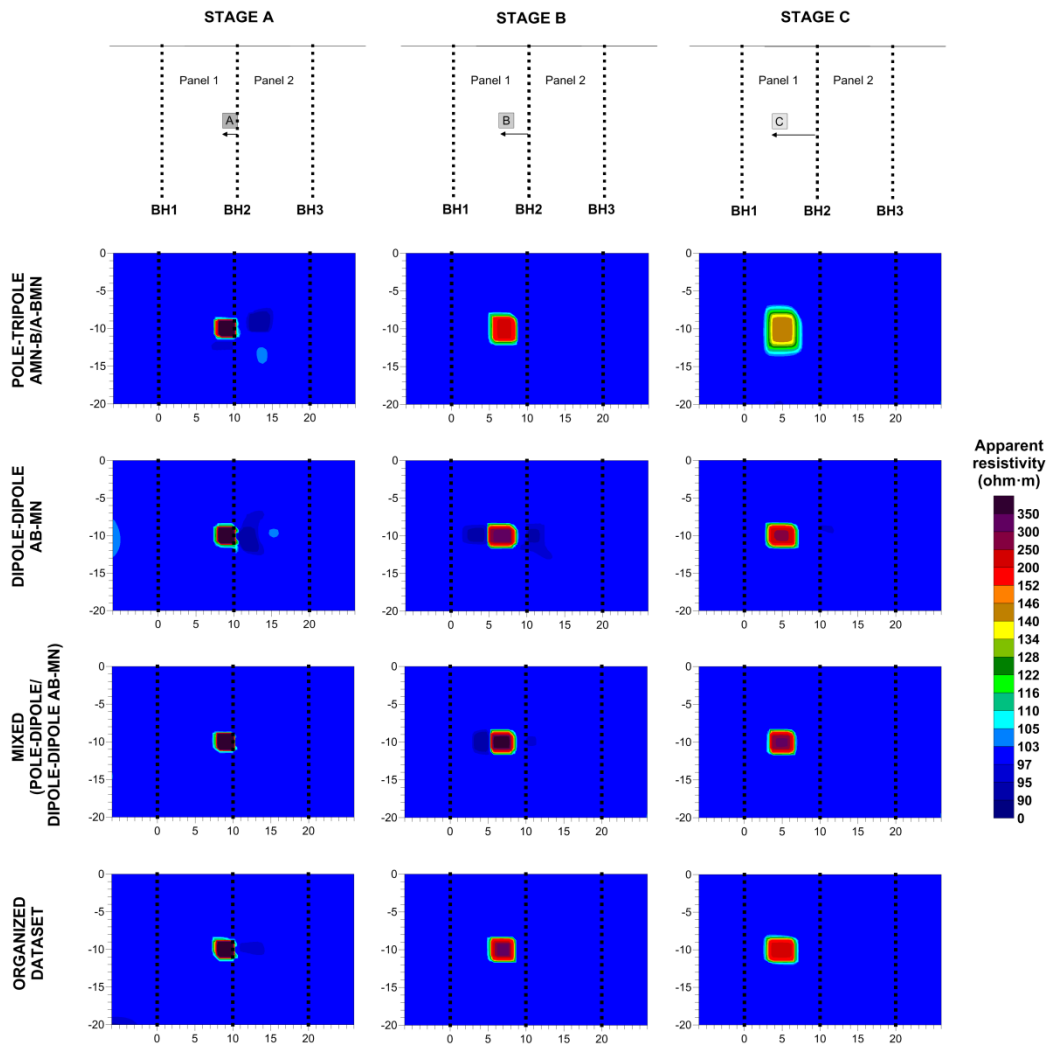


Figura 2.9. Models de resistivitat obtinguts amb la inversió dels dispositius CH pol-tripol i CH AB-MN, tant individualment (part superior), com en un conjunt mixt de dades (*mixed*), i del dispositiu optimitzat (part inferior: *organized dataset*) amb un contrast de resistivitat, $R_c=10$.

2.2. Experiment de seguiment amb CHERT

Aprofitant la perforació del túnel de la nova línia L9 del metro de Barcelona pel barri de Sant Cosme, el Prat de Llobregat (Figura 2.10 i Figura 2.11) es va dissenyar un experiment de seguiment amb CHERT de l'avanç de la tuneladora (Figura 2.12) i dels efectes de la perforació en el subsòl. L'experiment va incloure la construcció i instal·lació d'elèctrodes en pous, l'adquisició de les dades, l'avaluació de diferents tècniques per a l'obtenció dels models de variació de la resistivitat i la seva interpretació.



Figura 2.10. Ubicació del barri de Sant Cosme, El prat de Llobregat.



Figura 2.11. Recorregut de la línia L9 del metro de Barcelona. La parada de Sant Cosme es situa a l'esquerra del recorregut, en les proximitats de la zona d'estudi.



Figura 2.12. Detall del capçal de perforació d'una màquina tuneladora.

A partir de la profunditat prevista per a l'eix del túnel (19 m) i del seu diàmetre (9,4 m) es van perforar dos pous, de 30 m de fondària i 15 m de separació, un a cada banda de l'eix del túnel per al reconeixement dels materials i la realització d'experiments hidrogeològics durant la perforació (Figura 2.13). El nivell freàtic es va detectar a uns 4 m de fondària.

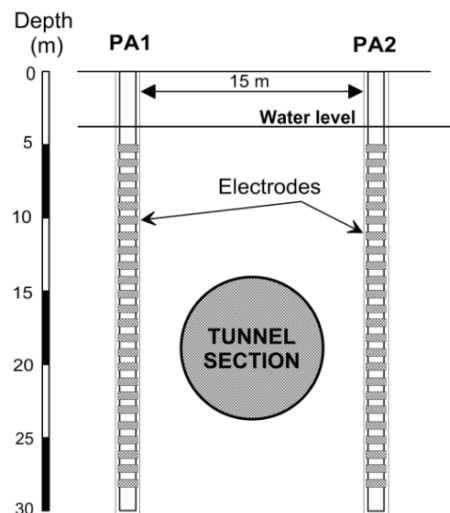


Figura 2.13. Esquema d'ubicació dels pous, nivell freàtic i profunditat prevista per al túnel.

Per a l'adquisició de les dades de CHERT es van utilitzar dos tipus d'instal·lacions, una temporal i una altra fixa. En primer lloc, es van fabricar dos cables amb 24 elèctrodes d'acer inoxidable cada un, i equidistantment separats (1 m), per a la seva introducció directament en els pous. En segon lloc, es van fabricar 48 elèctrodes amb malla fina d'acer inoxidable (0.3 x 0.1 m), i es van fixar 24 elèctrodes, amb un espaiat d'1 m, en la part externa de cada un dels tubs piezomètrics que s'havien d'instal·lar en els dos pous per als experiments hidrogeològics. A la Figura 2.14 es presenten diverses fotografies de l'experiment.

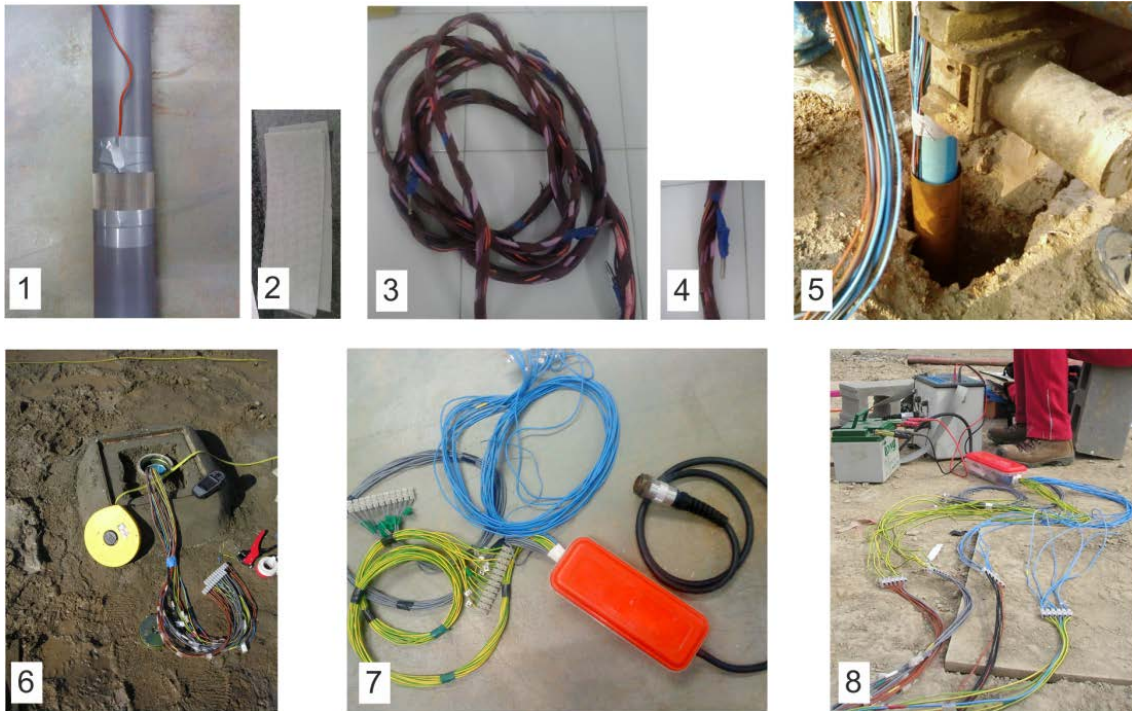


Figura 2.14. Fotografies de l'experiment: 1-2) Prova de muntatge dels elèctrodes permanents i detall d'un elèctrodes de malla d'acer de 0.3 x 0.1 m; 3-4) Cable amb elèctrodes per introduir directament en els pous i detall d'un elèctrode; 5-6) Instal·lació dels elèctrodes permanents i resultat final; 7-8) Cables de connexió elèctrodes-equip d'enregistrament i realització de mesures.

Abans d'iniciar les mesures de CHERT, la instal·lació permanent es va deixar establir durant tres setmanes. Posteriorment, es va realitzar un registre de conductivitat amb una sonda d'inducció per a determinar la profunditat exacta de cada un dels elèctrodes fixats als tubs piezomètrics i evitar així errors en el càlcul del factor geomètric de les combinacions d'elèctrodes (Oldenborger et al., 2005; Wilkinson et al., 2008). El quocient o relació d'aspecte final de l'experiment va ser de 0.67 (Figura 2.13).

En l'experiment es va considerar l'ús del dispositiu CH dipol-dipol AM-BN, anomenat també bipol-bipol (Zhou i Greenhalgh, 2000), per a la caracterització geoelèctrica del subsòl abans del pas de la tuneladora i per a mesurar les variacions de la resistivitat durant i després de la perforació del túnel.

La utilització de la instal·lació temporal, és a dir, la adquisició amb els cables fabricats per a ser introduïts directament en els pous, no va ser satisfactòria perquè les diferències de potencial enregistrades van ser extremadament petites, per sota de la resolució de l'equip de mesura ($1\mu\text{V}$). Per tant, es va descartar la seva utilització durant el seguiment del procés de

perforació del túnel. S’esperava que les zones ranurades dels tubs piezomètrics permetessin el contacte elèctric entre els elèctrodes i els materials a estudiar a través de l’aigua freàtica. Però, aquestes van resultar insuficients. Amb la instal·lació fixa, amb els elèctrodes en la part externa dels tubs piezomètrics, es van enregistrar diferències de potencial molt superiors a la resolució de l’equip de mesura i, per tant, aquesta va ser la instal·lació finalment utilitzada en l’experiment. A la Taula 2.2 es mostra el calendari de l’equipament dels piezòmetres amb els elèctrodes permanents i de les adquisicions de dades de CHERT.

Taula 2.2. Calendari de les adquisicions CHERT durant l’experiment de monitoratge.

Date/time	Drilling conditions	Type of geophysical measurement
14/02/08 08/03/08	Piezometers equipped	Geophysical borehole logging (dual induction probe)
12-13-14-19-20/ 03/08		CHERT-testing
21/03/08 14:52 h	TBM is passing through the test site	CHERT
21/03/08 19:53 h	TBM is passing through the test site	CHERT
02/04/08 12:17 h	Tunnel drilled	CHERT
16/04/08 11:49 h		CHERT

CHERT: cross-hole electrical resistivity tomography. TBM: tunnel boring machine.]

Les dades de CHERT enregistrades en l’experiment de seguiment del procés de perforació del túnel es van representar en forma de pseudosecció utilitzant les següents coordenades:

$$x = \min[|Z_M - Z_A|; |Z_N - Z_B|]; \quad y = Z_M - Z_N; \quad z = (Z_A + Z_B + Z_M + Z_N)/4$$

On, Z_i : fondària de l’elèctrode “i”.

En aquesta representació es va considerar que la fondària era positiva i que $Z_{M,N} > Z_{A,B}$. En el cas de $Z_{M,N} < Z_{A,B}$ es pot considerar la coordenada $x < 0$. La coordenada x representa la separació mínima entre els dipols de corrent i de potencial (distància AM o BN). La coordenada y , la distància vertical entre els elèctrodes MN ($Z_A - Z_B = 0$), i la coordenada z la profunditat mitjana de la combinació utilitzada. A la Figura 2.15 s’han representat, mitjançant una pseudosecció 3D, totes les dades enregistrades amb el dispositiu CH AM-BN durant la perforació del túnel el dia 21/03/08.

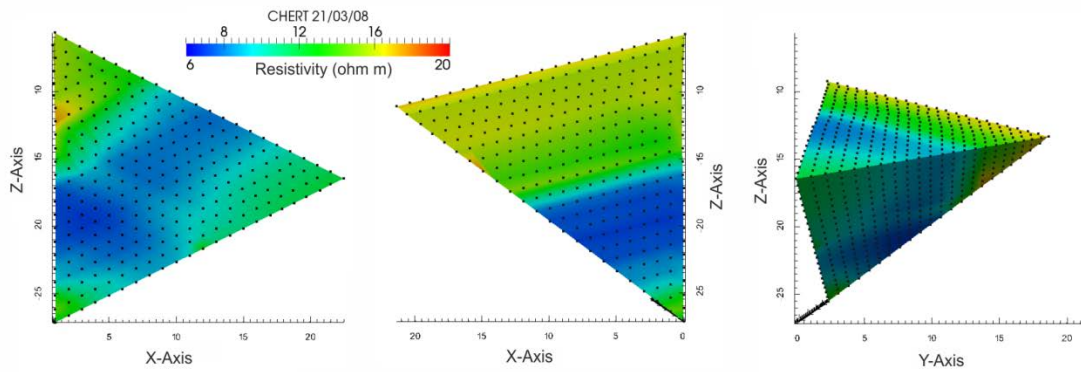


Figura 2.15. Diferents vistes de la pseudosecció 3D que inclou totes les dades del dispositiu CH AM-BN enregistrades el durant la perforació del túnel (dia 23/03/08). Els punts de color negres representen les dades.

Actualment, hi ha disponible gran quantitat de software lliure que permet una visualització ràpida i senzilla de volums de dades 3D. Tanmateix això, es possible obtenir les pseudoseccions 2D per a diferents distàncies verticals MN (coordenada y) de la configuració (Figura 2.16 i Figura 2.17).

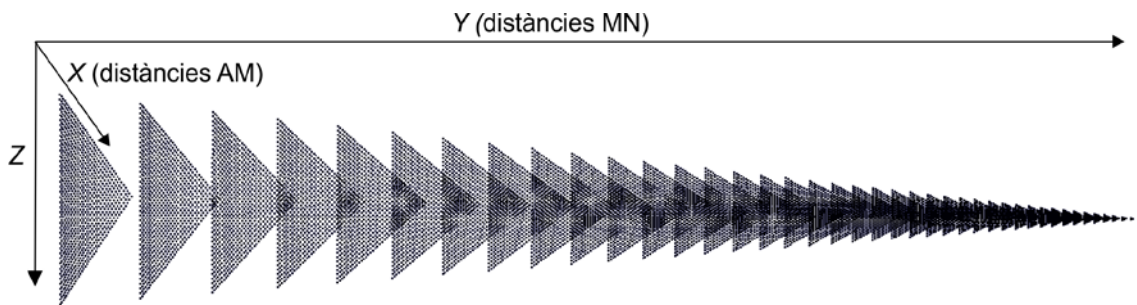


Figura 2.16. Representació de les pseudoseccions 2D de la configuració CH AM-BN per a diferents distàncies MN. Els punts negres representen les dades.

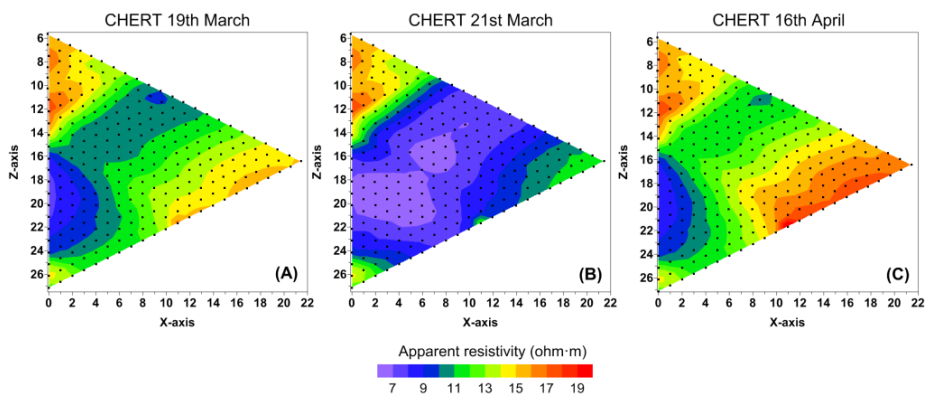


Figura 2.17. Pseudoseccions 2D de resistivitat aparent de les dades de l'experiment de seguiment de la perforació del túnel de la línia L9 del metro de Barcelona. A), B) i C) corresponen a les pseudoseccions de les dades CHERT enregistrades abans, durant i després del pas de la tuneladora, respectivament, amb una coordenada $y=0$ en tots tres casos.

La representació de les dades CHERT en forma de pseudosecció (2D o 3D) va permetre deduir la posició i la fondària a les que es produïen les variacions de la resistivitat en el subsòl durant el procés de seguiment. A més, es va utilitzar com a un primer control visual de qualitat per a detectar i eliminar les dades sorolloses (*outliers*) abans del procés d'inversió.

A continuació es presenten els models de variació de la resistivitat obtinguts a partir de les tres tècniques d'inversió considerades en aquest experiment:

1) Inversió condicionada: com a model de referència en la inversió de les dades de seguiment es van utilitzar el models de resistivitat obtingut abans d'iniciar-se el procés de perforació del túnel.

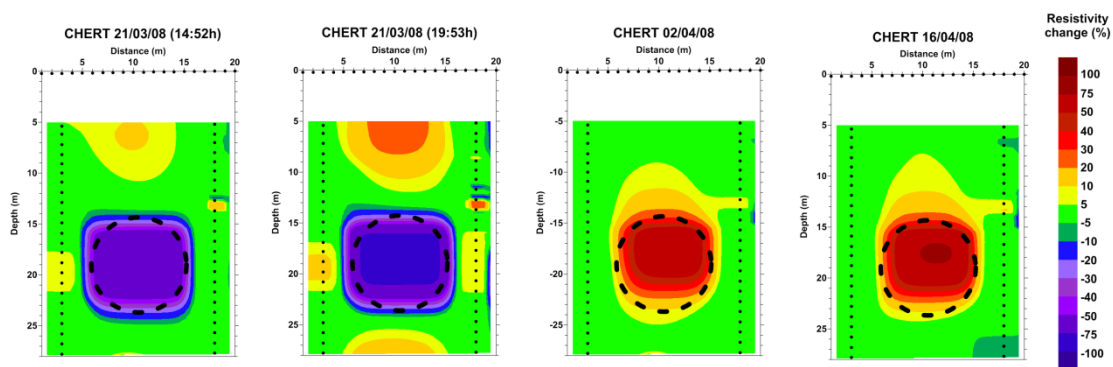


Figura 2.18. Models de variació de la resistivitat obtinguts a partir de la inversió condicionada. La línia discontinua representa la secció prevista del túnel.

2) Diferència de models: les variacions de la resistivitat es van obtenir a partir del càlcul de la diferència entre els valors de resistivitat dels models obtinguts durant el seguiment i el model inicial abans de la perforació. Tots obtinguts amb inversions individuals.

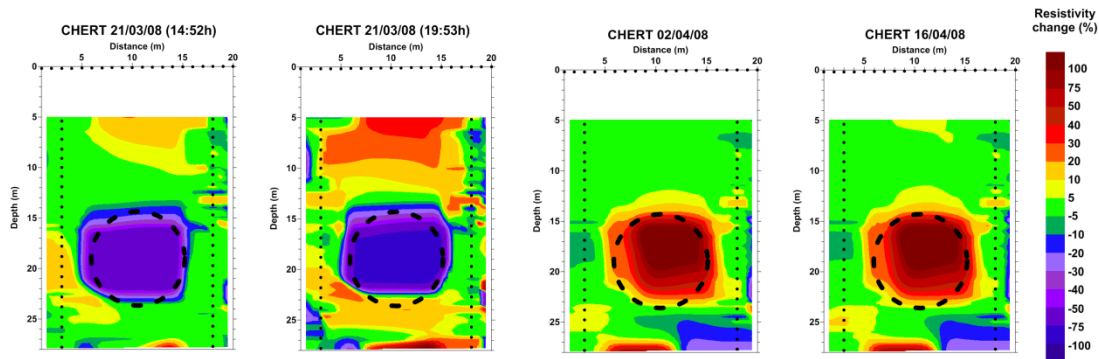


Figura 2.19. Models de variació de la resistivitat obtinguts a partir de la diferència de models. La línia discontinua representa la secció prevista del túnel.

3) Inversió del quocient: els models de variació de la resistivitat es van obtenir invertint un quocient entre dos valors de resistivitat de dos estadis de temps diferents normalitzat per la resistivitat d'un medi homogeni.

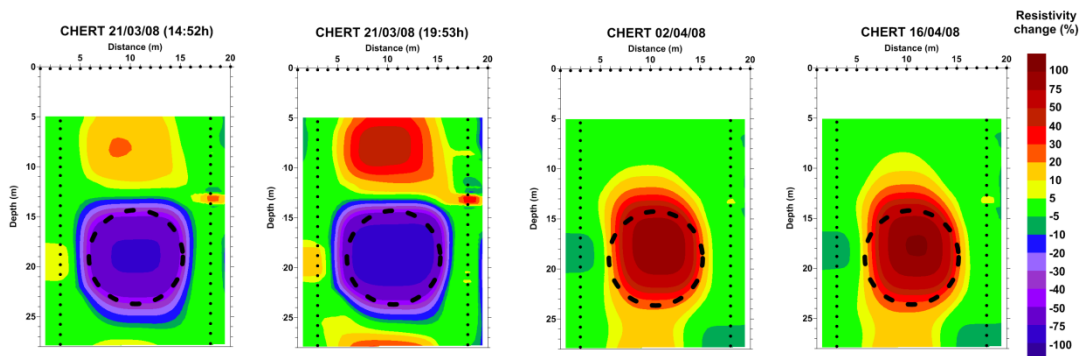


Figura 2.20. Models de variació de la resistivitat obtinguts a partir de la inversió del quocient. La línia discontinua representa la secció prevista del túnel.

Com es pot observar, els models de variació obtinguts durant la perforació del túnel (dia 21/03/08) amb les tres estratègies utilitzades van mostrar una disminució de la resistivitat en la part central del panell entre els pous associada a l'efecte de la presència de la màquina tuneladora per sota de l'àrea d'estudi. El valor de disminució va ser lleugerament diferent amb cada una de les estratègies utilitzades: 1) 70-80%, 2) 75-90% i 3) 80-90%. En aquest estadi de la perforació, els models obtinguts amb les tres estratègies van presentar variacions d'entre el 5% i el 40% en les zones properes als elèctrodes i, també, per sobre i per sota de la profunditat esperada del túnel. Aquestes variacions van ser

més elevades en els models de variació calculats a partir de la diferència de models d'inversió individual (2).

En els models de variació de la resistivitat obtinguts després del procés de perforació, una vegada la tuneladora va deixar la zona d'estudi (dia 02/04/08 i 16/04/08), es va observar un increment en el valor de la resistivitat a la profunditat esperada per al buit del túnel. En aquesta ocasió, els models obtinguts amb les tres tècniques de càlcul van presentar una major discrepància en els valors màxims de canvi: 1) augment en la resistivitat del 80%, 2) augment del 170% i 3) augment del 100%. Les variacions a prop dels elèctrodes i en les zones al voltant del túnel es van reduir substancialment, sobretot en el cas de les tècniques de càlcul 1 i 3.

Capítol 3. Discussió dels resultats

En aquest capítol es presenta la discussió dels resultats presentats en el capítol anterior. En el cas de les estratègies d'adquisició, es presenten també les metodologies a seguir per a la seva aplicació, ja que en aquest capítol s'han establert alguns dels criteris a seguir.

3.1. Estratègies d'adquisició

3.1.1. Caracterització d'estructures

A continuació es discutiran dos aspectes de l'estratègia desenvolupada: 1) l'aplicació del control de qualitat a la generació de dades Wenner-Schlumberger i 2) la reducció en el temps d'adquisició.

1) El resultat de l'aplicació del control de qualitat per a la generació de dades dels dispositius dipol-dipol i Wenner-Schlumberger va mostrar que el nombre de dades que no va superar el control era molt semblant en ambdós casos. Per tal d'avaluar aquest comportament es va realitzar la comparació entre les dades del dispositiu Wenner-Schlumberger obtingudes directament de les simulacions (sense soroll afegit) i les generades a partir del dispositiu pPD (amb un 2% de soroll) sense l'aplicació del control de qualitat. En aquest cas, només un 1% de les dades comparades van presentar una diferència relativa major que el soroll afegit. Aquest resultat indica que el criteri de qualitat establert a partir de la comparació de dos conjunts de dades dipol-dipol és massa restrictiu per al seu ús en dades del dispositiu Wenner-Schlumberger. S'ha de tenir en compte que aplicant el control de qualitat un 10% de les dades Wenner-Schlumberger no havia superat el líndar d'error del 10%.

Aquest comportament es pot entendre a partir de les expressions desenvolupades per a la generació de les diferents configuracions i de la propagació d'errors. El càlcul de les dades del dispositiu Wenner-Schlumberger implica una suma de resistències. S'ha de tenir en compte que el canvi en la posició de l'elèctrode de corrent, A, en el dispositiu pPD- α (Figura 2.1 i Figura 2.2) suposa un canvi de signe en la resistència mesurada. Per tant, si els valors de resistència del dispositiu pPD són semblants, el valor de resistència Wenner-Schlumberger calculat serà del mateix ordre que aquests i, per tant, l'error relatiu resultant serà semblant a l'error de les dades pPD generadores. En la generació de dades del dispositiu dipol-dipol això no és necessàriament cert, ja que aquesta implica una diferència de resistències. En aquest cas, el valor de resistència calculat pot ser molt més

petit que els valors del dispositiu generador i , per tant, el seu error relatiu es pot veure amplificat.

2) La reducció en el temps d'adquisició amb l'ús de la generació de dades i el nou dispositiu pPD dependrà, principalment, del nombre i tipus de configuracions diferents a enregistrar en la mateixa tomografia elèctrica. En estudis on les característiques del subsòl siguin conegudes i s'utilitzi només una única configuració en mode normal i recíproc, p.e. dipol-dipol o Wenner-Schlumberger, l'ús de l'estratègia presentada permetrà reduir el temps d'adquisició només per aquelles configuracions no adequades a l'adquisició multicanal, com és el dispositiu Wenner-Schlumberger en mode normal. Tanmateix això, l'estratègia permet disposar, amb el mateix nombre d'adquisicions, de les dades dels dos dispositius i del factor de qualitat. En estudis on s'hagin d'enregistrar més d'una configuració en mode normal i recíproc l'estratègia presentada permet reduir el temps d'adquisició en més d'un 50%.

3.1.2. Seguiment de processos dinàmics

A continuació es discutiran tres aspectes de l'estratègia d'adquisició: 1) els AD i IOS obtinguts amb l'ús de la configuració CH dipol-dipol, 2) els efectes d'ombra observats en els models d'inversió del dispositiu CH pol-tripol i CH AM-BN, i 3) l'efecte d'utilitzar diferents distàncies MN en la inversió de les dades.

1) Les corbes d'AD i IOS calculades per al dispositiu CH dipol-dipol van presentar comportaments anòmals per a certes distàncies AM i MN.

En el cas del dispositiu CH AM-BN, es va observar un comportament diferent per a l'AD en funció de la distància MN utilitzada (Figura 3.1). Amb una distància $MN=0$, el màxim efecte de la presència del plomall (màxim AD) en les tres etapes de migració (A, B i C) es va produir amb unes distàncies $AM=1, 4$ i 8 , respectivament. Però, amb l'augment de la distància MN es va desenvolupar un pic secundari a l'AD a distàncies $AM=9-11$. En algunes ocasions, el valor d'aquest pic secundari va ser superior al valor de detecció primari. En el cas del dispositiu CH AB-MN, es van detectar valors d'AD extremadament elevats a distàncies $AM=7-12$, per a totes les distàncies MN i en les tres etapes de migració (Figura 3.1). Les distàncies $AM=7-12$ es corresponen amb un angle entre els dipols AB i MN

d'entre 40° i 60°, el que coincideix amb els resultats obtinguts per Al'pin et al. (1966) amb l'ús del dispositiu paral·lel en ERT.

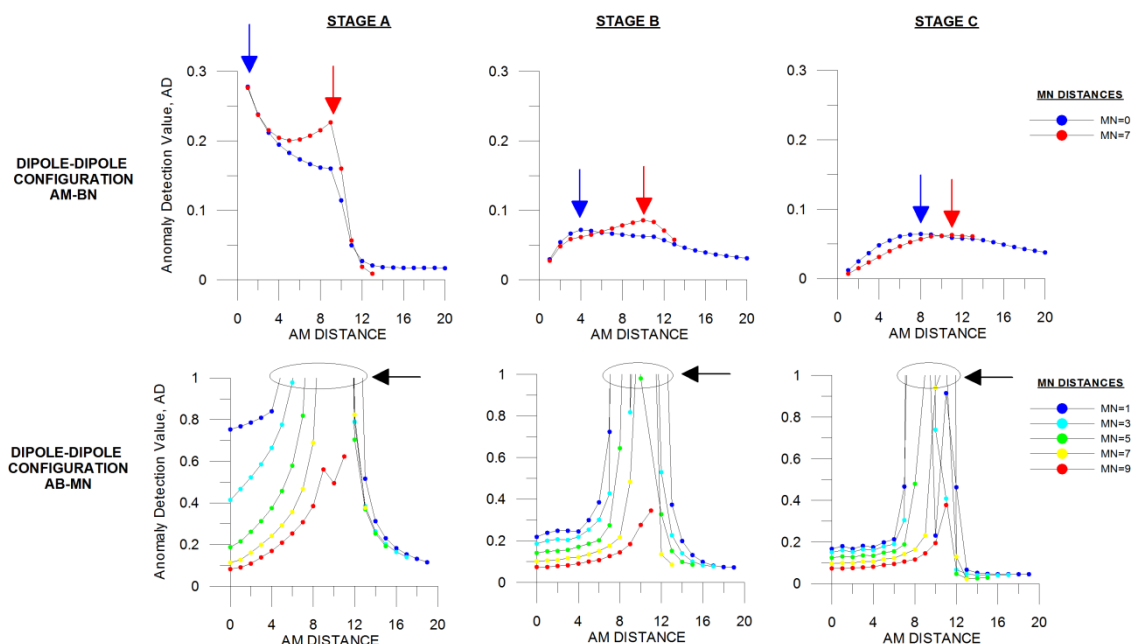


Figura 3.1. Corbes d'AD dels dispositius CH dipol-dipol (CH AM-BN i CH AB-MN) per a diferents distàncies AM i MN en les tres etapes de migració (stage A, B i C). Les fletxes blaves i vermelles indiquen el pic de detecció primari i secundari, respectivament, observats per al dispositiu CH AM-BN, i les fletxes i cercles de color negre marquen la zona on els valors d'AD són extremadament elevats per al dispositiu CH AB-MN.

Per a avaluar aquest comportament de l'AD es va estudiar l'amplitud del potencial elèctric de les configuracions considerades en l'experiment a través de la representació del factor geomètric. Aquest factor s'ha de calcular en cada experiment, ja que depèn de la posició dels elèctrodes, les distàncies entre els pous i de l'efecte de la superfície de la Terra. Quan una combinació d'elèctrodes amb unes distàncies AM i MN específiques es trasllada verticalment al llarg dels pous, la variació de la distància dels elèctrodes a la superfície de la Terra fa que el factor geomètric per a aquestes distàncies AM i MN concretes també canviï. A la Figura 3.2 es representa el comportament del factor geomètric de les configuracions utilitzades en aquest experiment per a diferents distàncies AM i MN. Per a facilitar la visualització aquest s'ha calculat a una fondària concreta, és a dir, l'elèctrode(s) menys profund(s) de la configuració (Figura 2.5) s'ubica en la superfície de la Terra. Aquesta representació permet obtenir una imatge clara, encara que més general, del comportament del factor geomètric de les configuracions a estudiar.

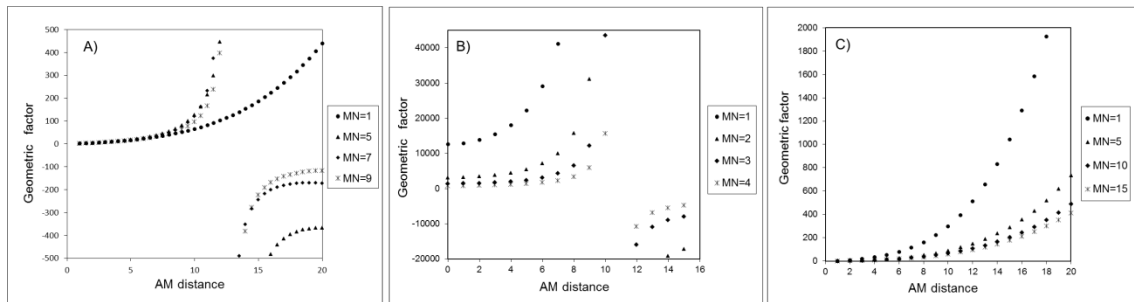


Figura 3.2. Representació del factor geomètric de les configuracions per al medi homogeni. A) Dispositius tipus I: CH AM-BN; B) Dispositius tipus H: CH AB-MN; C) Dispositius tipus L: CH pol-tripol (AMN-B/A-BMN), en funció de diferents distàncies AM i MN.

Com es pot observar, el patró de variació del factor geomètric en funció de les distàncies AM i MN és lleugerament diferent per a cada configuració. En els dos primers casos (Figura 3.2A i Figura 3.2B), el valor del factor geomètric presenta un comportament asimptòtic per a certes distàncies verticals MN i AM. Mentre que en el dispositiu CH pol-tripol (Figura 3.2C) el factor geomètric augmenta menys ràpidament. En tots tres casos, aquest increment és indicatiu d'una caiguda important en l'amplitud del senyal per a aquestes distàncies MN i AM.

En les situacions anteriors on les mesures de potencial enregistrades són molt petites, les configuracions d'elèctrodes es tornen extremadament sensibles. Qualsevol canvi en la resistivitat del medi, per petit que sigui, pot produir un gran canvi en el valor de la resistivitat aparent i, per tant, en l'AD. Però alhora, són extremadament inestables, ja que si el valor del potencial és suficientment baix, petits errors en les dades o en la localització dels elèctrodes (Wilkinson et al., 2008) podrien ocasionar grans variacions en la resistivitat i, en certes circumstàncies, canvis de signe amb l'aparició de resistivitats aparents negatives. Aquest comportament del potencial elèctric explica l'increment de l'AD per a certes distàncies MN i AM de les configuracions, i obre la possibilitat d'utilitzar aquestes combinacions d'elèctrodes altament sensibles com a mesures d'alarma de canvis en el subsòl. Tanmateix això, s'aconsella evitar aquestes distàncies si no és amb aquest ús específic.

En totes les configuracions utilitzades, i per als tres estadis de migració, l'IOS més elevat es va obtenir, sempre, amb distàncies AM=10-12 (Figura 2.7). Aquest comportament posa de manifest la necessitat d'utilitzar distàncies AM similars a la distància entre els pous

involucrats per a assolir la màxima asimetria en el patró de sensibilitat i reduir així la incertesa en la interpretació dels models de variació de la resistivitat en estudis de seguiment. Però, en el cas específic del dispositiu CH AB-MN, s’haurien d’evitar les distàncies AM amb valors extremadament elevats, ja que podrien presentar problemes en el procés d’inversió.

2) Els models de resistivitat obtinguts amb la inversió del dispositiu CH pol-tripol en les etapes “B” i “C” de l’experiment de migració van sofrir d’artefactes simètrics o efectes d’ombra.

Amb la finalitat d’eliminar aquests artefactes es van realitzar simulacions augmentant la cobertura angular de les configuracions amb mesures addicionals. Tant amb el dispositiu CH pol-tripol, com amb el CH AM-BN, ja que en tots dos es van detectar aquests artefactes. A la Figura 3.3 es mostren els resultats d’aquestes simulacions, on es va utilitzar: a) dispositiu CH pol-tripol amb una única distància MN=1 i diferents distàncies verticals entre els elèctrodes de corrent A i B; b) dispositiu CH AM-BN amb AM=1-20, MN=1-5 i diferents distàncies verticals entre els elèctrodes d’un i l’altre pou (distància AM≠BN); c) dispositiu mixt amb totes les dades dels dispositius CH pol-tripol i CH AM-BN.

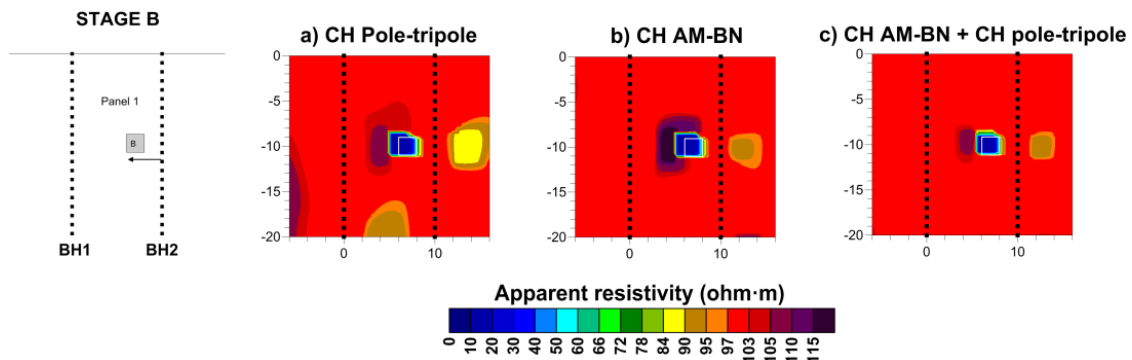


Figura 3.3. Models d’inversió obtinguts en l’etapa “B” de migració amb l’addició de mesures als dispositius CH pol-tripol i CH AM-BN (veure text). El requadre blanc representa la posició del cos.

Com es pot observar a la Figura 3.3, augmentar la cobertura angular d’aquestes configuracions amb combinacions d’elèctrodes addicionals permet reduir l’efecte d’ombra però no eliminar-lo completament.

La presència d'aquests artefactes es relaciona amb una alta simetria en el patró de sensibilitat d'aquestes configuracions ($IOS \leq 10\%$), i també amb una baixa detectabilitat (AD). A la Figura 3.4 es presenten els patrons de sensibilitat de les diferents configuracions utilitzades en aquest experiment.

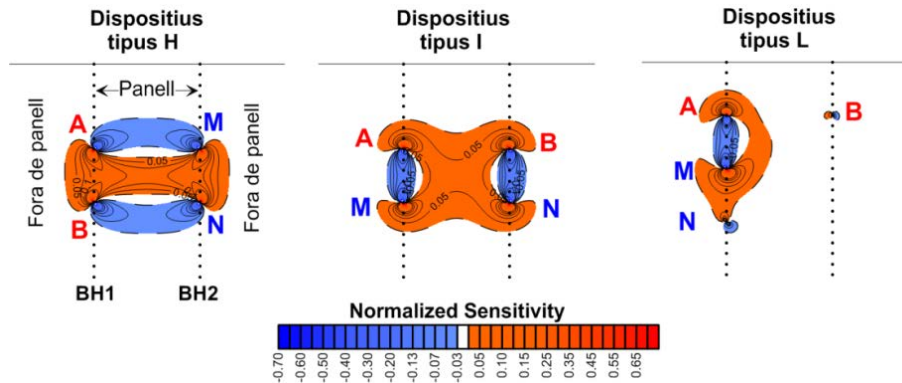


Figura 3.4. Seccions de sensibilitat de les configuracions de CHERT. D'esquerra a dreta: dispositiu tipus H: CH AB-MN, tipus I: CH AM-BN i tipus L: CH pol-tripol. Les zones de sensibilitat negativa s'han pintat de color blau i les de sensibilitat positiva de color taronja. A i B representen els elèctrodes de corrent, M i N els de potencial, i els punts negres verticals, la posició dels elèctrodes en els pous BH1 i BH2. La zona blanca indica valors de sensibilitat menors del 2-2.5% del total.

En el cas dels dispositius tipus I (CH AM-BN) i tipus L (CH pol-tripol), cada línia d'elèctrodes es pot considerar un eix de simetria de la sensibilitat (Figura 3.4). És a dir, la distribució de la sensibilitat, en termes de morfologia i signe, és molt semblant a cada banda de cada pou. Per tant, les respostes que s'obtidrien en el cas hipotètic d'ubicació d'un cos anòmal a una i altra banda del pou serien molt semblants en tots dos casos, el que explica perquè aquestes configuracions no són capaces de distingir correctament la ubicació del plomall en l'experiment presentat. Aquesta incertesa en la interpretació de la direcció de migració podria reduir-se amb l'ús del dispositiu CH pol-pol, ja que el seu patró de sensibilitat presenta els lòbuls de sensibilitat de signe diferent distribuïts separatament dins i fora del panell entre els pous (Figura 3.5). En la representació de la Figura 3.5 s'indica la superfície equipotencial zero, que correspon a una esfera amb els elèctrodes diametralment oposats.

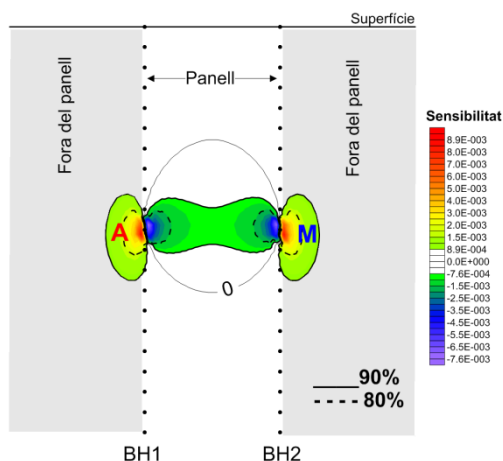


Figura 3.5. Secció de sensibilitat calculada per a un medi homogeni amb una font de corrent (A) i un receptor del potencial (M) en mesures de CHERT entre dos pous, BH1 i BH2. Els punts negres verticals indiquen la posició dels elèctrodes en els pous. Les línies negres discontinua i contínua delimiten la regió on es concentra el 80% i 90% del valor total de la sensibilitat, respectivament. La línia grisa es correspon amb l'equipotencial zero.

Amb la distribució de la sensibilitat del dispositiu CH pol-pol, i considerant el cas específic d'un experiment de seguiment amb la injecció d'un fluid en un dels pous, seria possible establir la direcció correcta de migració del plomall a partir de la resposta obtinguda en cada cas. A la Figura 3.6 es presenta un exemple on es mostren les diferents respostes obtingudes considerant el dispositiu CH pol-pol, i un cos dins i fora del panell entre els pous involucrats. S'han tingut en compte diferents contrastos de resistivitat.

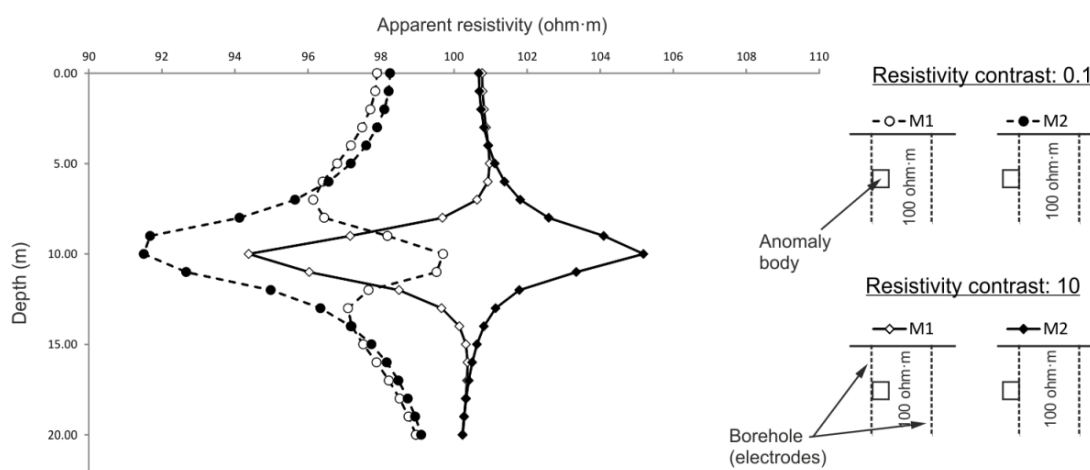


Figura 3.6. Comportament de la resistivitat aparent mesurada amb un dispositiu CH pol-pol considerant diferents posicions (dins i fora del panell entre els pous) i contrastos (medi homogeni de 100 ohm·m i un cos de secció quadrada de 10 i 1000 ohm·m) per a la mateixa anomalia.

Tanmateix això, la utilització de configuracions amb d'elèctrodes llunyans dificulta la seva aplicació i pot introduir errors sistemàtics durant l'adquisició. En aquest cas, una alternativa seria utilitzar dispositius tipus H (CH AB-MN), ja que presenten els lòbuls de sensibilitat negativa exclusivament dins del panell entre els pous, i fora del panell només hi ha lòbuls de sensibilitat positiva (Figura 3.4). Per tant, durant l'adquisició s'obté una resposta diferent considerant la presència d'una anomalia dins o fora del panell entre els pous.

3) També es va investigar, mitjançant simulacions, l'efecte d'utilitzar diferents distàncies MN en la inversió de les dades. A la Figura 3.7 es mostren els resultats obtinguts. Com es pot observar, els models d'inversió del dispositiu CH pol-tripol amb un única distància MN (MN=1: majors AD i IOS) va permetre resoldre l'etapa "A" de la migració amb una resolució semblant al conjunt de dades complet del dispositiu CH pol-tripol (MN=1-5). Però, en el cas del dispositiu CH AM-BN, s'observa que utilitzant només una distància MN (MN=7: major AD i IOS) no és possible assolir la mateixa resolució lateral que amb el conjunt complet de dades (MN=0-19). Aquest resultat és coherent amb l'elevada simetria del patró de sensibilitat i els menors AD i IOS detectats amb l'ús d'aquesta última configuració. Per tant, el dispositiu CH AM-BN necessitarà una major cobertura angular (nombre de dades) que el CH pol-tripol per a resoldre experiments d'aquest tipus.

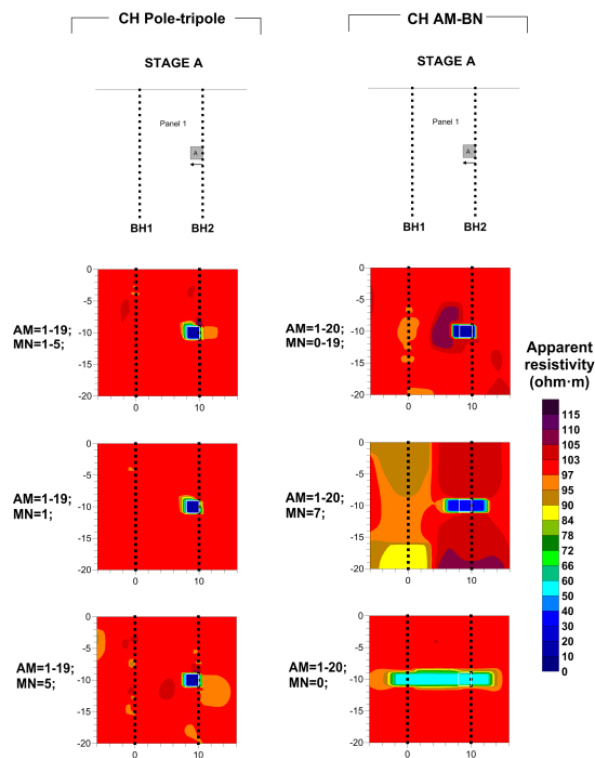


Figura 3.7. Models d'inversió obtinguts per a l'etapa "A" de migració amb els dispositius CH pol-tripol i CH AM-BN i diferents distàncies MN.

S'ha de destacar que en els models obtinguts amb l'ús d'un contrast de resistivitat, $R_c=10$, no s'han observat aquests artefactes, encara que el valor de resistivitat de les anomalies ha estat menys encertat. Això s'associa a que amb la utilització d'un contrast, $R_c=10$, les configuracions presenten un menor AD però major IOS que amb un contrast, $R_c=0.1$.

3.1.3. Metodologies d'aplicació de les estratègies desenvolupades

A partir dels resultats obtinguts, tant de l'aplicació com de la discussió d'alguns aspectes de les estratègies desenvolupades, s'ha establert una metodologia d'ús de cada una d'elles.

3.1.3.1. Caracterització d'estructures

La metodologia que es proposa amb aquesta estratègia d'adquisició és la següent:

- 1) Adquirir els dispositius $pPD-\alpha$ i $pPD-\beta$ en la mateixa línia de tomografia elèctrica utilitzant una seqüència d'adquisició estàndard del dispositiu PD. Per a adquirir el dispositiu invers només és necessari intercanviar adequadament les connexions dels elèctrodes en l'equip de mesura. L'elèctrode proper al perfil es manté en el mateix lloc en les dues adquisicions.
- 2) Calcular els conjunts de dades del dispositiu dipol-dipol a partir dels dispositius $pPD-\alpha$ i $pPD-\beta$.
- 3) Calcular de les diferències relatives entre aquests dos conjunts de dades calculats independentment.
- 4) Aplicar del control de qualitat mitjançant l'establiment d'un valor d'error lliandar adequat a la zona d'estudi. Si la diferència relativa entre dues dades dipol-dipol calculades independentment està per sota del lliandar establert, les dades pPD que els componen es prenen com a dades fiables.
- 5) Calcular les dades de les configuracions d'interès a partir de les dades pPD que han superat el control de qualitat. Per a la generació del dispositiu Wenner-Schlumberger es

proposa utilitzar el control de qualitat només per a identificar les dades susceptibles de contenir error, i deixar que l'interpretador decideixi si aquesta informació és o no fiable.

3.1.3.2. Seguiment de processos dinàmics

La metodologia que es proposa amb aquesta estratègia d'adquisició és la següent:

- 1) Analitzar l'AD i l'IOS de les configuracions considerades. En aquest pas, es poden utilitzar els resultats obtinguts per Bellmunt et al. (2015), ja que mostren el comportament general de les configuracions més utilitzades i les seves capacitats per al seguiment d'anomalies.

- 2) Escollir les distàncies AM i MN de les configuracions amb els màxims AD i IOS, tenint en compte l'amplitud del senyal mitjançant l'estudi del comportament del seu factor geomètric. Es recomana utilitzar configuracions amb patrons de sensibilitat complementaris, però si no és possible es poden utilitzar varies distàncies MN d'una mateixa configuració.

- 3) Crear un conjunt de dades mixt amb les configuracions optimitzades tenint en compte el temps disponible per a l'adquisició.

3.2. Experiment de seguiment amb CHERT

En aquest apartat es discutiran: 1) els avantatges i inconvenients de l'ús d'elèctrodes introduïts directament en pous o fixats a les seves infraestructures 2) els resultats obtinguts amb les diferents estratègies d'inversió utilitzades en l'experiment i 3) la representació de les dades de CHERT en forma de pseudosecció.

- 1) La utilització dels cables amb elèctrodes directament en els pous no va permetre l'adquisició de dades amb una qualitat suficient per a l'experiment. Aquest fet s'associa a la presència de fluids conductors en l'interior dels pous i a un tram de ranurat insuficient en els tubs piezomètrics dels pous. Tanmateix això, en situacions d'utilització de pous sense

infraestructures (p.e. en perforacions de pous en materials competents o roca) aquest tipus d'instal·lació és l'única opció. Encara que presenta alguns inconvenients, aquest tipus d'instal·lació concedeix una gran flexibilitat d'actuació, ja que permet variar la fondària dels elèctrodes en els pous i la distància entre ells d'una manera ràpida i senzilla, a més, de reduir el cost econòmic a llarg termini (reutilització dels cables en diferents experiments).

2) A continuació es discutiran els resultats obtinguts amb les diferents tècniques d'inversió de dades per al càlcul dels models de variació de la resistivitat en l'experiment de seguiment.

En el cas dels models de variació de la resistivitat obtinguts a partir de la diferència de models d'inversió individual es va observar que petites diferències en l'ajust de les dades en les inversions individuals poden donar lloc a diferents valors de resistivitat en els models de variació. Per tant, les variacions de resistivitat dels models de variació en la zona propera als elèctrodes i en la part inferior del túnel una vegada finalitzada la perforació es consideren artefactes.

En el cas de la inversió del quocient de resistivitats, s'ha de tenir en compte que s'inverteix un valor de resistivitat aparent normalitzat. A partir de l'expressió de la resistivitat aparent, expressió (1.9), i del quocient de resistivitats, expressió (1.12), es pot obtenir la següent expressió:

$$\rho_i^n = \rho_{MH} \left(\frac{R_i}{R_0} \right) \left(\frac{R_{MH}}{R_{MH}} \right) = \rho_a \left(\frac{R_{MH}}{R_0} \right) \quad (3.1)$$

On ρ_i^n : quocient de resistivitats; ρ_{MH} : resistivitat del medi homogeni; R_i : diferència de potencial mesurada en el moment de temps "i"; R_0 : diferència de potencial mesurada en un moment de temps zero abans de l'inici de l'experiment.; R_{MH} : diferència de potencial mesurada en el medi homogeni; ρ_a : resistivitat aparent.

Com es pot observar del desenvolupament del quocient, expressió (3.1), amb l'ús d'aquesta resistivitat aparent normalitzada en la inversió s'assumeix que el terme $(R_{MH}/R_0) \approx 1$ i, per tant, el model inicial hauria d'ésser el model homogeni. En el cas de l'experiment realitzat en Bellmunt et al. (2011), el model de temps zero utilitzat per al càlcul del quocient presentava poca variació en els valors de resistivitat aparent, entre 6-20 ohm·m i, per tant, es considera adequat l'ús d'aquesta tècnica per al càlcul de les

variacions en la resistivitat. Però, s'ha de tenir molta cura a l'hora d'interpretar els valors de variació de la resistivitat amb l'ús d'aquesta estratègia.

La inversió condicionada va donar els millors resultats, però també és necessari assumir canvis petits en la resistivitat del medi.

A partir dels models de variació de la resistivitat obtinguts amb les tres tècniques utilitzades va ser possible estimar satisfactòriament el diàmetre de la secció del túnel. Tanmateix això, els canvis de resistivitat calculats amb les tres tècniques utilitzades en la zona del buit del túnel van ésser menors que els previstos inicialment mitjançant modelització. Aquests només van ser semblants als obtinguts en les simulacions amb la suposició de la presència d'una zona conductora, de 3 ohm·m i 1 m gruix, al voltant del buit del túnel (Suzuki et al., 2004). Generalment, aquests anells de baixa resistivitat es detecten en túnels perforats en medis rocosos amb la presència d'aigua, on el volum de roca al voltant del túnel es veu fracturat pels esforços originats durant la perforació i hi ha una acumulació de fluids en aquestes fractures. Però la seva presència en túnels perforats en sòls és poc coneguda. L'origen d'aquesta zona conductora al voltant del túnel podria ser l'augment en la porositat dels materials al voltant del túnel a causa a la relaxació del subsòl després de la perforació (i la posterior acumulació de l'aigua freàtica) o la presència de fluids viscosos injectats simultàniament a l'avanç de la tuneladora a través de l'escut de dovelles.

3) En la representació de les dades de CHERT en forma de pseudosecció s'ha de tenir en compte que les configuracions s'utilitzen generalment amb diferents distàncies entre els elèctrodes involucrats en cada pou. Per tant, el gran nombre de paràmetres a contemplar dificulta la representació de les dades.

A més, els elèctrodes s'ubiquen en dos línies verticals diferents d'elèctrodes i, per tant, s'han de considerar els patrons de sensibilitat de les configuracions abans d'assignar les coordenades a les mesures. Per exemple, la simetria en el patró de sensibilitat de les configuracions tipus I (CH AM-BN) i tipus H (CH AB-MN) quan s'utilitzen amb distàncies verticals semblants entre els elèctrodes de cada pou (Figura 3.4), indica que les dades podrien ser assignades indistintament a un o l'altre pou. A la Figura 3.8 es mostra un exemple de representació de dades del dispositiu tipus I (amb distàncies AM=BN) en forma de pseudosecció 2D per a un model amb un cos anòmal.

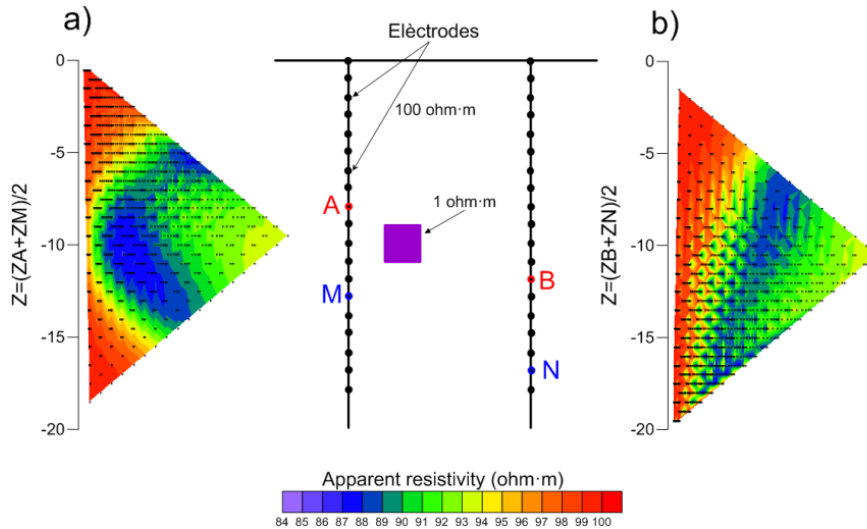


Figura 3.8. Model de resistivitat i pseudoseccions de dades del dispositiu CH AM-BN amb distàncies $AM=BN$ i $Z_A \geq Z_B$.

Com es pot veure a la Figura 3.8, l'assignació de les dades a un o altre pou produeix imatges diferents en funció de la ubicació del cos anòmal. Quan el cos es situa centrat en el panell entre els pous, les dues representacions són idèntiques. Aquest fet es pot utilitzar per a determinar la posició real d'una l'anomalia. Una altra opció és assignar una coordenada intermèdia, $Z = (Z_A + Z_B + Z_M + Z_N)/4$, però això modifica la profunditat de la anomalia en la pseudosecció quan s'inclouen mesures amb distàncies verticals $Z_M - Z_N = Z_A - Z_B \neq 0$.

En el cas d'utilització del dispositiu CH AM-BN amb distàncies $AM \neq BN$ (o $AB \neq MN$ en el dispositiu CH AB-MN), la sensibilitat es concentra en el pou amb la menor distància entre els elèctrodes involucrats i, per tant, cada conjunt de dades s'hauria d'assignar al pou corresponent. El cas de l'ús de dispositius tipus L (CH pol-tripol), les dades s'haurien d'assignar a la vertical del pou on s'ubica el dipol de potencial (MN), que és on es concentra la sensibilitat. A la Figura 3.9 es mostra la representació de les dades del dispositius tipus L en forma de pseudosecció 2D per a un model amb un cos anòmal. En aquest cas, cada pseudosecció ha estat assignada al pou on es situen els elèctrodes M i N.

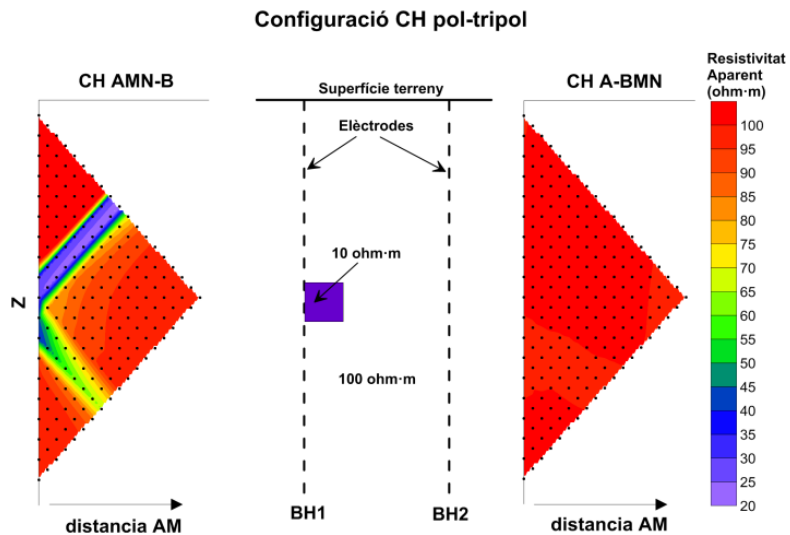


Figura 3.9. Model de resistivitat i pseudoseccions de dades del dispositiu CH pol-tripol. Només s'ha utilitzat una distància MN.

Davant el gran nombre de paràmetres que es poden utilitzar, i prenent en compte la sensibilitat de cada combinació, la representació de les dades de CHERT ha de realitzar-se mitjançant pseudoseccions 3D com la mostrada a la Figura 2.15, però ampliant en nombre de paràmetres si és necessari. Tanmateix això, si hi ha més de dos pous involucrats en les mesures, la representació de les dades de CHERT esdevé molt complicada.

Capítol 4. Conclusions i treballs futurs

4.1. Estratègies d'adquisició

La utilització de les dues estratègies d'adquisició desenvolupades en aquesta tesi permeten simplificar l'elecció de la configuració més adient i reduir el temps d'adquisició de les dades d'una manera eficient. Encara que cada una d'elles ha estat presentada en un context de caracterització o de seguiment de processos dinàmics, es poden utilitzar indistintament. Només s'ha de tenir en compte el temps d'adquisició disponible en cada experiment. A continuació s'exposen les conclusions de cada una de les estratègies desenvolupades.

En primer lloc, l'estratègia de generació de dades per combinació permet realitzar una adquisició de dades sistemàtica i endarrerir la decisió sobre la configuració més adient a utilitzar per a l'obtenció dels models de resistivitat, després inclús del procés d'interpretació. El control de qualitat establert a partir de comparació de dos conjunts de dades dipol-dipol mesurats independentment, similar a la comparació de dades normals i recíproques, ha resultat en un gran avantatge per al control dels errors en les dades sense incrementar el temps d'adquisició.

En quant al temps d'adquisició, els dos modes d'adquisició del nou dispositiu pPD són molt adequats per a les adquisicions amb equipament multicanal i, per tant, es pot utilitzar d'una manera eficient. A més, s'eviten els problemes derivats de l'ús d'elèctrodes llunyans, el que suposa un gran avantatge a nivell pràctic. Amb aquesta estratègia s'han generat dos dispositius concrets, però es pot estendre a qualsevol altra configuració d'una manera ràpida i senzilla, com per exemple el Wenner o el gradient.

En segon lloc, l'estratègia desenvolupada a partir de l'anàlisi de la detecció d'anomalies (AD) i del patró de sensibilitat (IOS) de les configuracions ha permès crear un conjunt de dades optimitzat que es pot utilitzar en experiments de seguiment on el temps d'adquisició sigui un aspecte crític. És a dir, es pot utilitzar en el seguiment de processos dinàmics a "temps real". Aquesta metodologia ha estat aplicada a unes configuracions i un model concrets, però mostra el comportament general de les configuracions i les seves capacitats per al seguiment d'anomalies. Tanmateix això, es pot estendre d'una manera senzilla a qualsevol altra configuració, tant de CHERT com d'ERT.

També s'ha pogut observar que l'ús de configuracions amb sensibilitats complementaries permet obtenir millors resultats amb un menor nombre de dades, és a dir, permet reduir la cobertura angular necessària. L'ús de dispositius tipus H ha estat desaconsellat degut als problemes d'amplitud del senyal (Zhou i Greenhalgh, 2000). Però tenint en compte que la majoria de les configuracions de CHERT tenen un patró de sensibilitat bastant similar al dels dispositius tipus I i L, el dispositiu tipus H es presenta com una eina important a l'hora de resoldre problemes de seguiment, i també en l'eliminació dels efectes d'ombra.

4.2. Experiment de seguiment

Amb l'experiment de seguiment CHERT de la perforació del túnel de la nova línia L9 del metro de Barcelona s'ha pogut demostrar que la tomografia elèctrica és una eina efectiva i de baix cost, que es pot utilitzar tant per a la caracterització com per al seguiment processos dinàmics en zones d'espai restringit (zones urbanes). La fabricació i instal·lació dels elèctrodes en dos pous no ha suposat un cost addicional significatiu, ni econòmic ni de temps, en l'experiment. La instal·lació dels elèctrodes en la part externa del revestiment ha permès reduir els efectes de la presència de fluids en els pous.

La utilització de tres procediments diferents per a l'obtenció dels models de variació de la resistivitat del subsòl ha permès la identificació dels principals canvis de resistivitat deguts a la perforació del túnel, i discriminar entre les variacions degudes al procés de perforació i d'inversió. Les tècniques que han donat millor resultat han estat la inversió condicionada i la inversió del quocient de resistivitat. Però, en tots dos casos s'han d'assumir que les variacions de la resistivitat són petites. Tanmateix això, hi ha alguns aspectes relacionats amb l'ús del quocient de resistivitat que necessiten un estudi més profund.

L'ús de la modelització ha permès justificar la presència d'una zona conductora al voltant del túnel. Aquest aspecte necessita un estudi més ampli i multidisciplinari amb la finalitat d'establir el seu origen en perforacions de túnels en sòls.

4.3. Treballs futurs

A continuació es presenten algunes línies de recerca que han sorgit resultat de la investigació realitzada en aquesta tesi:

- Ampliar l'anàlisi de la detecció d'anomalies i de la simetria en el patró de sensibilitat realitzat a altres tipus de configuracions, incloent combinacions entre pous i superfície o en pous individuals. Degut a la similitud en els patrons de sensibilitat de les configuracions de CHERT, seria necessari cercar noves configuracions amb sensibilitats complementaries semblants al dispositiu tipus H, però sense els problemes d'amplitud del senyal.
- Estendre l'anàlisi i optimització de les configuracions a situacions 3D, ja que el patró de sensibilitat de les configuracions és 3D.
- Estudiar l'aprofitament de les combinacions d'elèctrodes altament sensibles en la detecció precoç de canvis en el subsòl, com per exemple deguts a escapaments de contaminants, etc.
- Cercar estratègies per incloure les resistivitats aparents negatives no degudes a errors en les dades en els algorismes d'inversió de dades geoelectriques.
- Simplificar i estandarditzar la representació de les dades de CHERT en forma de pseudosecció. Actualment s'està treballant en el càlcul dels factors de profunditat característica (Edwards, 1977) de les configuracions de CHERT per a la seva representació en forma de pseudosecció.

Referències

Al'pin, L.M., 1966. The theory of dipole soundings, in Dipole methods for measuring earth conductivity: Transl. by G. V. Keller, New York, Consultants Bureau, 1-60.

Athanasidou, E.N., Tsourlos, P.I., Papazachos, C.B. i Tsokas, G.N., 2007. Combined weighted inversion of electrical resistivity data arising from different array types. *J. Appl. Geophysics*. 62, 124-140.

Barker, R.D., 1979. Signal contribution sections and their use in resistivity studies. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 59, 123–129.

Barker, R.D. i Moore, J., 1998. The application of time-lapse electrical tomography in groundwater studies. *Lead. Edge* 17, 1454-1458.

Beard, L.P. i Tripp, A.C., 1995. Investigating the resolution of IP arrays using inverse theory. *Geophysics* 60 (5), 1326-1341.

Blome, M., Maurer, H. i Greenhalgh, S., 2011. Geoelectric experimental design- Efficient acquisition and exploitation of complete pole-bipole data sets. *Geophysics* 76, F15-F26.

Candansayar, M.E. i Basokur, A.T., 2001. Detecting small-scale targets by the 2D inversion of two-sided three-electrode data: application to an archaeological survey. *Geophysics Prospect*. 49, 13-25.

Candansayar, M.E., 2008. Two-dimensional individual and joint inversion of three- and four-electrode array dc resistivity data. *J. Geophys. Eng.* 5, 290-300.

Carpenter, E.W., 1955. Some notes concerning the Wenner configuration. *Geophys. Prospect*. 3, 388-402.

Carpenter, E.W. i Habberjam, G.M., 1956. A tri-potential method of resistivity prospecting. *Geophysics* 21, 455-469.

Carrigan, C.R., Yang, X., LaBrecque, D.J., Larsen, D., Freeman, D., Ramírez, A.L., Daily, W., Aines, R., Newmark, R., Friedman, J. i Hovorka, S., 2013. Electrical resistance tomographic monitoring of CO₂ movement in deep geologic reservoirs. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 8, 401-408.

Claerbout J.F. i Muir, F., 1973. Robust modeling with erratic data. *Geophysics* 38 (5), 826-844.

Coggon J.H., 1973. A comparison of IP electrode arrays. *Geophysics* 38 (4), 737-761.

Coscia, I., Marescot, L., Maurer, H., Greenhalgh, S. i Linde, N., 2008. Experimental design for crosshole electrical resistivity tomography data sets, paper presented at 14th Annual European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, EAGE Dahlin.

Dahlin T. i Zhou B., 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophys. Prospect.* 52, 379-398.

Daily, W. i Owen, E., 1991. Cross-borehole resistivity tomography. *Geophysics* 56, 1228-1235.

Daily, W., Ramirez, A., LaBrecque, D. i Nitao, J., 1992. Electrical resistivity tomography of vadose water movement. *Water Resour. Res.* 28 (5), 1429-1442.

deGroot-Hedlin, C. i Constable, S., 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics* 55, 1613-1624.

Doetsch, J.A., Coscia, I., Greenhalgh, S., Linde, N., Green, A. i Günter, T., 2010. The borehole-fluid effects in electrical resistivity imaging. *Geophysics* 75 (4), F107-F114.

Edwards, L S., 1977. A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics* 42, 1020-1036.

Everett, M., 2013. *Near Surface applied geophysics*. Cambridge University Press, U.K., 403 p.

Evjen, H.M., 1938. Depth factors and resolving power of electrical measurements. *Geophysics* 3 (2), 78-95.

Goes, B.J.M. i Meekes, J.A.C., 2004. An effective electrode configuration for the detection of DNAPLs with electrical resistivity tomography. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 9, 127-141.

Hagrey S.A., 2011. CO2 plume modelin in deep saline reservoris by 2D ERT in boreholes. *The Lead. Edge* 30 (1), 24-33.

Hagrey S.A. i Petersen, T., 2011. Numerical and experimental mapping of small root zones using optimized surface and borehole resistivity tomography. *Geophysics*, 76 (2), G25-G35.

Hallof, P.G., 1957. On the interpretation of resistivity and induced polarization measurements. MIT, Massachusetts, USA.

Karaoulis, M.C., Kimb, J.H. i Tsourlos, P.I., 2014. 4D active time constrained resistivity inversion. *J. Appl. Geophys.* 73 (1), 25–34.

Karous, M. i Pernu, T.K., 1985. Combined sounding-profiling resistivity measurements with the three-electrode arrays. *Geophys. Prospect.* 33, 447-459.

Keller, G.V. i Frischknecht, F.C., 1966, *Electrical methods in geophysical prospecting*: Pergamon Press, New York, 517 p.

Kiessling, D., Schmidt-Hattenberger, C., Schuett, H., Schilling, F., Krueger, K., Schoebel, B., Danckwardt, E., Kummerow, J. i the CO2sink Group, 2010. Geoelectrical methods for monitoring geological CO2 storage: First results from cross-hole and surface-downhole measurements from the CO2SINK test site at Ketzin (Germany). *International Journal of Greenhouse Gas Control* 4, 816-826.

Koefoed, O., 1972. Discussion on "Depth of investigation in direct current methods" by A. Roy and A. Apparao. *Geophysics* 37, 703-704.

LaBrecque, J.D., Miletto, M., Daily, W., Ramirez, A. i Owen, E., 1996. The effects of noise on Occam's inversion of resistivity tomography data. *Geophysics* 61 (2), 538-548.

Loke, M.H., 2001. Electrical imaging survey for environmental and engineering studies. A practical guide to 2d and 3d survey. [On line]. Available at <http://www.terrajp.co.jp/lokenote.pdf>, read of August 2010.

Loke, M.H., 2004. Tutorial: 2-D y 3-D electrical imaging surveys. [On line]. Available at <http://www.geotomosoft.com>, read of August 2010.

Loke, M.H., Chambers, J.E., Rucker, D.F., Kuras, O. i Wilkinson, P.B., 2013. Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *J. Appl. Geophys.* 95, 135-156.

Marescot, L., 2006. Introduction à l'imagerie électrique du sous-sol. *Bull. Soc. Vaud. Sc. Nat.* 90 (1), 23-40.

Marshall, D.J. i Madden, T.R., 1959. Induced Polarization; a study of its causes. *Geophysics* 24, 790.

Nabighian, M.N. i Elliot, C.L., 1976. Negative induced polarization effects from layered media. *Geophysics* 41, 1236- 1255.

Nimmer, R.E., Osiensky, J.L., Binley, A.M. i Williams, B.C., 2008. Three-dimensional effects causing artifacts in twodimensional, cross-borehole, electrical imaging. *Journal of Hydrology* 359, 59-70.

Noel, M., i Xu, B., 1991. Archaeological investigation by electrical resistivity tomography: A preliminary study: *Geophys. J. Internat.* 107, 95–102.

Oldenborger, G.A., Routh, P.S. i Knol, M.D., 2005. Sensitivity of electrical resistivity tomography data to electrode position errors. *Geophys. J. Int.* 163, 1-9.

Orellana, E., 1982. *Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua*. Biblioteca Técnica Philips, Paraninfo, Madrid, España. 578 p.

Palacky, G.J., 1987, Resistivity characteristics of geologic targets, in Nabighian, M.N., ed., *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics Theory*: Tulsa, Okla., Soc. Explor. Geophys.1, 53-129.

Parasnis, D. S., 1988. Reciprocity theorems in geoelectric and geoelectromagnetic work. *Geoexplor.* 25, 177-198.

Park, S.K. i Van, G.P., 1991. Inversion of pole-pole data for 3-D resistivity structure beneath arrays of elèctrodes. *Geophysics* 56, 951-960.

Power, C., Gerhard, J., Karaoulis, M., Tsourlos, P. i Giannopoulos, A., 2014. Evaluating four-dimensional time-lapse electrical resistivity tomography for monitoring DNAPL source zone remediation. *Journal of Contaminant Hydrology* 162-163, 27-46.

Roy, A. i Apparao, A., 1971. Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics* 36, 943-959.

Roy, A., 1972. Depth of investigation in Wenner, three electrode and dipole-dipole resistivity methods. *Geophys. Prospect.* 20, 329-340.

Roy, K.K. i Elliot, H.M., 1981. Some observations regarding depth of exploration in D.C. electrical methods. *Geoexpl.* 19, 1-13.

Sheriff, R.E., 2002. *Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics*. Geophysical References Series. Soc. Explor. Geophys. 442 p.

Shima, H., 1992. 2D and 3D resistivity imaging reconstruction using cross-hole data. *Geophysics* 55, 682-694.

Slater, L., Binley, A.M., Daily, W. i Johnson, R., 2000. Cross-hole electrical imaging of a controlled saline tracer Injection. *J. Appl. Geophys.* 44, 85–102.

Spies, B.R. i Eggers, D.E., 1986. The use and misuse of aparent resistivity in electromagnetic method. *Geophysics* 51, 1462-1471.

Spitzer, K., 1998. The three-dimensional DC sensitivity for surface and subsurface sources: *Geophys. J. Internat.* 134, 736-746.

Sumner, J.S., 1976. Principles of induced polarization for geophysical exploration. Elsevier Scientific Publishing Company.

Stummer, P., Maurer, H. i Green, A.G., 2004. Experimental design: electrical resistivity data sets that provide optimum subsurface information. *Geophysics* 69 (1), 120–139.

Suzuki, K., Nakata, E., Minami, M., Hibino, E., Tani, T., Sakakibara, J. i Yamada, N., 2004. Estimation of the zone of excavation disturbance around tunnels, using resistivity and acoustic tomography. *Explor. Geophys.* 35, 62-69.

Telford W. M., Geldart, L.P i Sheriff, R.E., 1990. Applied geophysics, Cambridge University Press, 522 p.

Tsourlos, P., Ogilvy, R., Papazachos, C. i Meldrum, P., 2011. Measurement and inversion schemes for single borehole-to-surface electrical resistivity tomography surveys. *J. Geophys. Eng.* 8 (4).

Van Nostrand, R.G. i Cook, K.L., 1966. Interpretation of resistivity data: USGS. Prof. Pap. 499.

Van, G.P., Park, S.K. i Hamilton, P., 1991. Monitoring leaks from storage ponds using resistivity methods. *Geophysics* 56, 1267-1270.

Ward, S. H., 1990. Resistivity and induced polarization methods: in *Geotechnical and Environmental Geophysics* 1. Soc. Explor. Geophys.

Wilkinson, P. B., Meldrum, P. I., Chambers, J. E., Kuras, O. i Ogilvy, R. D., 2006. Improved strategies for the automatic selection of optimised sets of electrical resistivity tomography measurement configurations. *Geophys. J. Internat.* 167, 1119–1126.

Wilkinson, P. B., Chambers, J.E., Lelliott, M., Wealthall, G.P. i Ogilvy, R.D., 2008. Extreme sensitivity of crosshole electrical resistivity tomography measurements to geometric errors. *Geophys. J. Internat.* 173 (1), 49-62.

Whiteley, R.J., 1973. Electrode arrays in resistivity and I.P. prospecting: a review. *Bull. Aust. Soc. Explor. Geophys.*, 4, 1-29.

Xu, B. i Noel, M., 1993. On the completeness of datasets with multielectrode systems for electrical resistivity survey. *Geophys. Prospect.* 41, 791-801.

Zhou, B. i Greenlough, S.A., 1997. A synthetic study on cross-hole resistivity imaging with different electrode arrays. *Explor. Geophys.* 28, 1-5.

Zhou, B. i Greenlough, S.A., 2000. Cross-hole resistivity tomography using different electrode configurations. *Geophys. Prospect.* 48, 887-912.

Zhou, W., Beck, B.F. i Adams A.L., 2002. Effective electrode array in mapping karst hazards in electrical resistivity tomography. *Environ. Geol.* 42, 922–928.