



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 1. Aspectes generals de la Tomografia Elèctrica de Resistivitat

1.1. Conceptes bàsics

En aquest apartat es presentaran breument alguns conceptes bàsics del mètode de tomografia elèctrica relacionats amb els objectius de la tesi.

El mètode de tomografia elèctrica en corrent continu es basa en l'estudi de la distribució del potencial elèctric generat en el subsòl a partir de fonts de corrent artificials amb la finalitat d'obtenir un model de distribució de la resistivitat del subsòl. A grans trets, el mètode consisteix en l'aplicació d'un corrent elèctric continu en el subsòl i l'enregistrament de les diferències de potencial mitjançant combinacions geomètriques d'elèctrodes, ja sigui en la superfície o en fondària. A partir d'aquestes mesures de potencial i intensitat de corrent, i tenint en compte la geometria del dispositiu utilitzat, es determina la denominada resistivitat aparent, que és la magnitud habitualment utilitzada en la inversió per a obtenir un model de resistivitat del subsòl que ajusti les dades. El desenvolupament dels aspectes formals del mètode es pot trobar a Keller i Frischknecht (1966), Orellana (1982), Loke (2004) o Everett (2013).

1.1.1. Resistivitat elèctrica

La caracterització geoelectrica del subsòl consisteix a determinar la distribució espacial de la resistivitat elèctrica (o la seva inversa, la conductivitat elèctrica), una propietat física dels materials que quantifica la dificultat que el corrent elèctric troba al seu pas a través d'ells. Aquesta magnitud física presenta un ampli rang de variació i solapament a la natura, ja que la resistivitat de les roques i dels minerals que componen el subsòl depèn fonamentalment de la composició química, de la porositat i estructura interna del material, i de la quantitat i tipus de fluid que contenen. A la Figura 1.1 es presenta el rang de valors de la resistivitat elèctrica (i la conductivitat elèctrica) per a diferents roques i minerals.

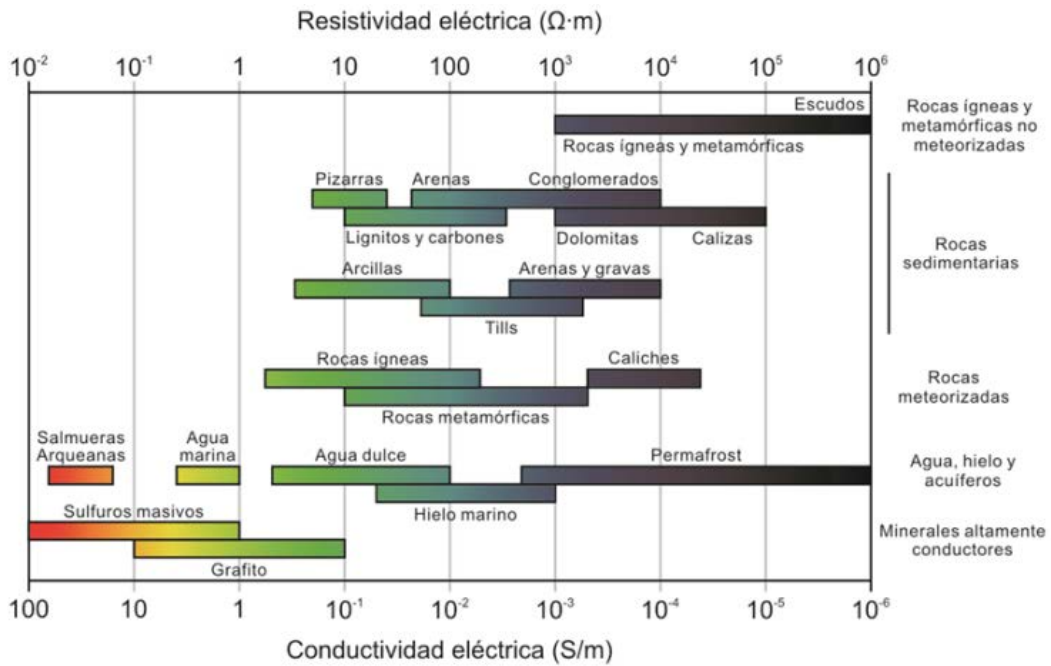


Figura 1.1. Esquema del rang de variació de la resistivitat elèctrica en alguns roques i minerals (modificat de Palacky, 1987).

La resistivitat d'un medi homogeni i isòtrop es pot calcular a partir de l'equació de continuïtat ($\nabla \cdot J = 0$), on J és el vector densitat de corrent, i de la llei d'Ohm ($J = \sigma E$), que mostra una relació lineal entre la densitat de corrent i el camp elèctric (E) mitjançant la conductivitat elèctrica, σ . Si considerem la injecció d'un corrent, I , en un elèctrode (A) dins d'un medi homogeni i isòtrop (amb l'elèctrode de tancament del circuit, B, a l'infinit), el corrent al voltant del punt d'injecció es propaga simètricament en totes direccions (Figura 1.2). Per tant, el camp elèctric en un punt M serà:

$$E = \frac{I\rho\hat{r}}{4\pi r_M^2} \quad (1.1)$$

On: ρ : resistivitat elèctrica; \hat{r} : vector unitari en la direcció de r ; r : distància de la font de corrent al punt M. El denominador és una superfície esfèrica de radi r_M que envolta la font de corrent.

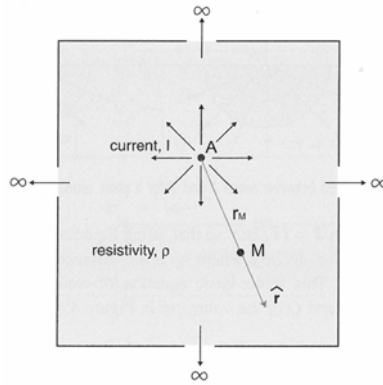


Figura 1.2. Distribució del corrent injectat en un medi homogeni i isòtrop. Modificat de Everett (2013).

En aquest cas, el potencial elèctric en el punt M es pot expressar de la següent manera:

$$V_M = \int_r^\infty E \cdot dr = \int_r^\infty \frac{I\rho}{4\pi r^2} dr = \frac{I\rho}{4\pi r_M} \quad (1.2)$$

On: V_M : potencial en el punt M.

En el cas d'utilització d'una font de corrent des de la superfície de la Terra (Figura 1.3), el corrent fluirà radialment en un semiespai infinit de radi r , i àrea $A = 2\pi r^2$. Per tant, el potencial elèctric en el punt M serà:

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi r_M} \quad (1.3)$$

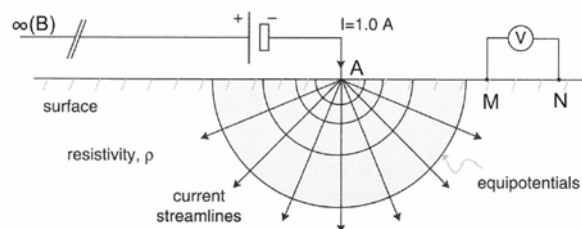


Figura 1.3. Distribució del potencial elèctric per a una font de corrent, A, situada en la superfície d'un semiespai infinit de resistivitat uniforme. Modificat de Everett (2013).

Per a determinar la diferència de potencial elèctric entre dos punts, M i N, deguda a la utilització de dos elèctrodes de corrent, A i B, ubicats en la superfície de la Terra (Figura 1.4), s'utilitza la següent expressió deduïda a partir de (1.3):

$$\Delta V_{MN} = V_M - V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BM}} + \frac{1}{r_{BN}} \right] \quad (1.4)$$

On, ΔV_{MN} : diferència de potencial elèctric entre els punts M i N deguda a la presència de dos fonts de corrent, A i B; r_{xy} : distància entre l'elèctrode de corrent "x" i el de potencial "y".

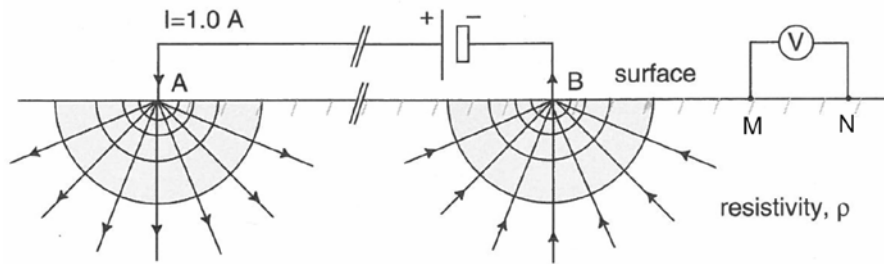


Figura 1.4. Distribució del potencial elèctric amb l'ús de dos fonts de corrent, A i B, i dos elèctrodes de mesura del potencial, M i N, situats en la superfície d'un semiespai infinit de resistivitat uniforme. Modificat de Everett (2013).

A partir de l'expressió (1.4) es pot obtenir la resistivitat del medi homogeni i isòtrop:

$$\rho_{MH} = \frac{\Delta V_{MH}}{I} \frac{2\pi}{\left[\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BM}} + \frac{1}{r_{BN}} \right]} = R_{MH}K \quad (1.5)$$

On ρ_{MH} : resistivitat del medi homogeni (ohm·m); ΔV_{MH} : diferència de potencial mesurada en un medi homogeni; I : intensitat del corrent injectat; R_{MH} : diferència de potencial normalitzada pel corrent injectat mesurada en el medi homogeni; K : factor geomètric de la combinació d'elèctrodes utilitzada.

La magnitud R_{MH} de l'expressió (1.5) es una diferència de potencial normalitzada pel corrent injectat. La magnitud K en l'expressió (1.5) es denomina factor geomètric, té unitats de longitud, i representa l'efecte de les distàncies relatives entre els elèctrodes

involucrats en la mesura. Per al seu càlcul s'ha de tenir en compte que el potencial en els elèctrodes M i N depèn de la distància a cada elèctrode de corrent (A i B). Amb l'ús d'elèctrodes en la superfície d'un semiespai infinit, el factor geomètric es pot calcular a partir de la següent expressió:

$$K_{superfície} = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BM}} + \frac{1}{r_{BN}}\right)} \quad (1.6)$$

On r_{xy} : distància entre l'elèctrode de corrent "x" i el de potencial "y".

Però quan es s'utilitzen elèctrodes en fondària (medi infinit), s'ha de tenir en compte l'efecte de la superfície de la Terra, que es determina mitjançant l'ús del mètode de les imatges (Van Nostrand i Cook, 1966). Per tant, s'han de considerar també en el càlcul, les distàncies entre les imatges simètriques respecte de la superfície dels elèctrodes de corrent i cada elèctrode de potencial (Figura 1.5). L'expressió per al càlcul del factor geomètric en mesures amb elèctrodes en pous es pot escriure com:

$$K_{entre pous} = \frac{4\pi}{\left(\frac{1}{r_{AM}} + \frac{1}{r'_{AM}} - \frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r'_{AN}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r'_{BM}} + \frac{1}{r_{BN}} + \frac{1}{r'_{BN}}\right)} \quad (1.7)$$

On r_{xy} : distància entre l'elèctrode de corrent "x" i el de potencial "y"; r'_{xy} : distància entre la imatge simètrica respecte de la superfície de l'elèctrode de corrent "x" i el elèctrode de potencial "y".

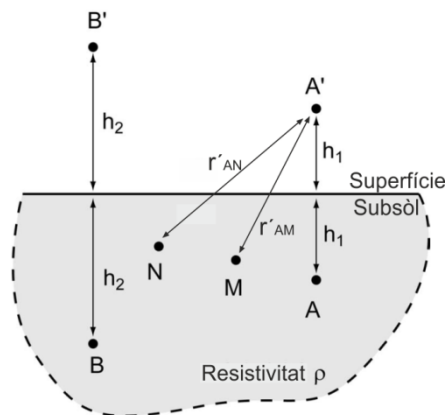


Figura 1.5. Representació de les distàncies entre les imatges simètriques respecte de la superfície dels elèctrodes de corrent i els de potencial per al càlcul del factor geomètric en mesures amb elèctrodes en fondària. Modificat de Marescot (2006).

1.1.2. Resistivitat aparent

La resistivitat aparent es pot definir com la resistivitat d'un medi homogeni que produirà la mateixa resposta que la mesurada amb els mateixos paràmetres d'adquisició (posició, corrent elèctric, etc.), i es pot calcular a partir de l'expressió (1.5) com:

$$\rho_a = \left(\frac{\Delta V}{I} \right) K = RK \quad (1.8)$$

On ρ_a : resistivitat aparent (ohm·m); ΔV : diferència de potencial mesurada; I : intensitat del corrent injectat; K : factor geomètric de la combinació d'elèctrodes utilitzada; R : diferència de potencial normalitzada pel corrent injectat.

Per tant, la resistivitat aparent es pot considerar com una diferència de potencial normalitzada pel corrent injectat i pel factor geomètric de la combinació d'elèctrodes utilitzada, de manera que es pot presentar amb unitats de resistivitat (Spies i Eggers, 1986).

Habitualment, amb mesures en superfície es considera que $\rho_a > 0$, i el cas contrari s'atribueix, generalment, a la presència d'errors en les dades o en la posició dels elèctrodes. Però quan es treballa amb combinacions d'elèctrodes en pous poden aparèixer resistivitats aparents negatives. Wilkinson et al. (2008) van detectar resistivitats aparents negatives en situacions de grans contrastos de resistivitat en les proximitats dels elèctrodes. A partir de les expressions (1.5) i (1.8) s'obté la següent definició de la resistivitat aparent (Sheriff, 2002), que permet justificar d'una manera senzilla les condicions on es poden obtenir resistivitats aparents negatives amb l'ús de la tomografia elèctrica:

$$\rho_a = \rho_{MH} \left(\frac{R}{R_{MH}} \right) \quad (1.9)$$

On ρ_a : resistivitat aparent; ρ_{MH} : resistivitat del medi homogeni; R : diferència de potencial normalitzada pel corrent mesurada; R_{MH} : diferència de potencial normalitzada pel corrent mesurada en el medi homogeni.

Així, la presència de resistivitats negatives es podria donar en situacions on R_{MH} i/o R siguin molt petites. En aquesta situació, la presència d'inhomogeneïtats a prop dels

elèctrodes o la presència de soroll elèctric (natural o cultural) podrien produir canvis de signe en la mesura i, per tant, resistivitats aparents negatives.

En adquisicions amb elèctrodes en superfície, R_{MH} i R només seran molt petites amb grans distàncies entre els dipols d'injecció i potencial o en situacions d'ús de combinacions d'elèctrodes amb dipols creuats. Però en adquisicions amb elèctrodes en fondària, la distribució de les línies equipotencials fa que les situacions on R i R_{MH} siguin molt petites esdevinguin més freqüents i, per tant, també la presència de resistivitats aparents negatives. Aquest és un aspecte important a tenir en compte a l'hora de preparar les seqüències d'adquisició de tomografia elèctrica.

1.1.3. Teorema de reciprocitat

En el cas de l'exploració geoelectrica, el teorema de reciprocitat estableix que si en una combinació d'elèctrodes s'intercanvien la posició del dipol de corrent amb la del dipol de potencial s'obté el mateix valor de resistivitat aparent (el factor geomètric de la combinació no canvia). A la Figura 1.6 es presenta la geometria d'una combinació d'elèctrodes tetra-electròdica en superfície al intercanviar el dipol de corrent pel de mesura del potencial.

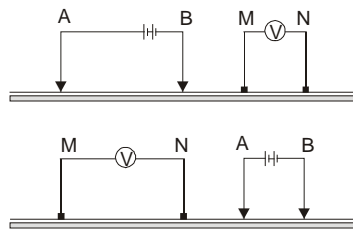


Figura 1.6. Geometries normal i recíproca d'una combinació d'elèctrodes tetra-electròdica.

Van Nostrand i Cook (1966) afirmen que el teorema es pot provar rigorosament per a qualsevol combinació d'elèctrodes, inclús quan el medi és heterogeni. L'única assumpció necessària és que el subsòl es comporti com un material òhmic, és a dir, que el medi sigui lineal. Parasnis (1988) presenta una demostració del teorema de reciprocitat imposant aquesta condició de linealitat del medi. Però estableix que en alguns casos, com per exemple quan s'utilitzen corrents grans i distàncies petites entre els elèctrodes, la densitat de corrent al voltant dels elèctrodes de potencial pot arribar a ser tan gran que la conductivitat

del subsòl (especialment si hi ha argila) pot ser dependent del camp elèctric i no complir la condició de linealitat assumida.

1.2. Aplicació de la tomografia elèctrica de resistivitat

El caràcter no invasiu de la tomografia elèctrica i, sobre tot, l'aparent simplicitat del procés d'adquisició i del programari de tractament de dades, han estès àmpliament la seva utilització a gran nombre de situacions. Per a simplificar la notació s'utilitzarà el terme ERT (*Electrical Resistivity Tomography*) per a mesures de tomografia elèctrica amb elèctrodes en superfície i CHERT (*Cross-Hole ERT*) per a mesures realitzades entre elèctrodes ubicats en diferents pous. Com s'ha dit a la presentació, l'ERT ha estat històricament utilitzada per a la caracterització d'estructures, però també es pot utilitzar per al seguiment de processos dinàmics. Però, l'aplicació de la CHERT per a caracterització està limitada pel cost de la perforació dels pous i, generalment, aquest només està justificat en la seva aplicació a estudis de seguiment.

A continuació es presenten les etapes d'utilització de la tomografia elèctrica (Figura 1.7) on s'exposen els aspectes més importants a tenir en compte en cada una d'elles, i que serviran per a introduir les estratègies desenvolupades en la tesi.

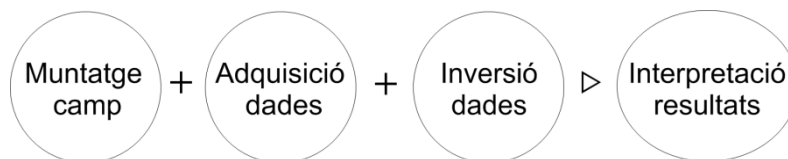


Figura 1.7. Etapes d'utilització de la tomografia elèctrica de resistivitat.

1.2.1. Muntatge en camp

Realitzar una tomografia elèctrica de resistivitat consisteix en col·locar elèctrodes de forma regular al llarg de la superfície del terreny i/o en profunditat mitjançant pous, de manera que l'aparell de mesura activa o desactiva automàticament els elèctrodes a utilitzar en cada adquisició. A la Figura 1.8 es representa una disposició típica d'elèctrodes en adquisicions

de tomografia elèctrica des de la superfície (part esquerra) i entre pous (part dreta). En aquesta tesi no es contempla l'adquisició de mesures entre pous i superfície.

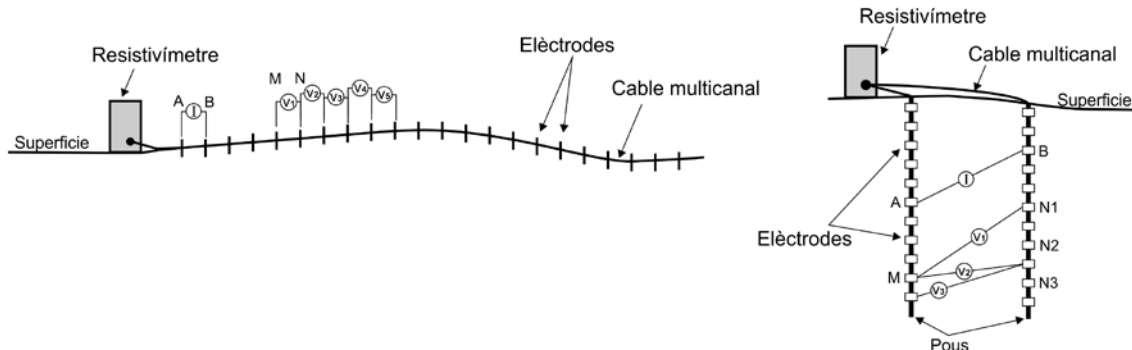


Figura 1.8. Representació de la disposició dels elèctrodes i adquisició multicanal d'una tomografia elèctrica des de la superfície (part esquerra) i entre pous (part dreta). A i B: elèctrodes d'injecció del corrent (I); M i N: elèctrodes de mesura del potencial (V), on s'ha afegit numeració per a simbolitzar una adquisició multicanal.

En l'adquisició de mesures amb CHERT, els procediments no estan tan estandarditzats com en l'adquisició de mesures d'ERT. D'entrada, per a la ubicació d'elèctrodes en pous hi ha dues opcions: 1) la introducció de cables multicanal directament en els pous involucrats i 2) la instal·lació dels elèctrodes en les infraestructures dels pous. En tots dos casos, s'han d'avaluar les característiques dels pous a utilitzar, és a dir, si hi ha entubació i de quin tipus (metàlica o PVC), la presència o no de fluids i el cost econòmic. A més, de si el tipus d'instal·lació desitjada serà permanent o no.

1) La utilització de cables multicanal directament dins dels pous involucrats és ràpida i senzilla, i permet utilitzar els elèctrodes d'una manera temporal o permanent amb la possibilitat d'extreure'ls una vegada finalitzat l'experiment. Això permet realitzar el seu manteniment, i evitar, entre d'altres, la seva corrosió, reduint així el cost de les campanyes de CHERT. Si s'extreuen, s'han de tenir les eines necessàries per a controlar la posició exacta dels elèctrodes en cada adquisició. En aquest tipus d'instal·lació, per a aconseguir el contacte elèctric entre els elèctrodes i els materials objecte d'estudi, és imprescindible la presència de fluid en els pous i que aquest estigui en contacte amb els materials de les parets dels pous. El contrast de resistivitat entre el subsòl i el fluid del pou, el seu diàmetre i la combinació d'elèctrodes a utilitzar marcaran l'efecte que la presència del fluid tindrà

sobre les mesures realitzades, sobre o subestimant el seu valor en alguns casos (Doetsch et al., 2010).

2) En el cas d'aprofitar les infraestructures dels pous (p.e. tubs de revestiment, tubs piezomètrics, etc...) per a la ubicació dels elèctrodes, aquestes no haurien d'ésser metàl·liques. En cas contrari, s'hauria d'estudiar el seu efecte en les mesures mitjançant modelització. Aquestes instal·lacions són sempre permanents, i fan possible adquirir dades en absència de fluids, ja que els elèctrodes estan en contacte directe amb les parets dels pous. En presència de fluid permeten reduir el seu efecte sobre les mesures. Tanmateix això, en estudis profunds (Kiessling et al., 2010; Carrigan et al., 2013) aquest tipus d'instal·lació pot ser molt complicada i costosa.

En una de les publicacions incloses en aquesta tesi (Bellmunt et al., 2012) es va contemplar la fabricació i la instal·lació d'elèctrodes en pous superficials (<30 m de fondària) amb l'objectiu d'establir una metodologia d'actuació i avaluar el seu cost, tant d'instal·lació com econòmic.

1.2.2. Adquisició de dades

La seqüència d'activació, o conjunt de combinacions d'elèctrodes a mesurar, durant l'adquisició d'una tomografia elèctrica s'anomena dispositiu o configuració. Com s'ha dit a la presentació, un dels aspectes més importants en l'adquisició de dades de tomografia elèctrica és l'elecció de la configuració més adient a cada situació en relació al temps disponible i a la resolució desitjada.

Recentment, s'han desenvolupat diferents algorismes per a calcular la millora que es produeix en les imatges de resistivitat a partir del control de, per exemple, la matriu de sensibilitat o la de resolució del model homogeni al afegir successivament petits conjunts de dades a un conjunt de base inicial (Stummer, 2004; Wilkinson et al., 2006; Loke et al., 2013). La seva finalitat és obtenir una resolució comparable a la del conjunt de dades amb totes les combinacions possibles, però només amb una (petita) fracció d'aquest conjunt.

Actualment, aquests algorismes no estan disponibles en els softwares comercials d'adquisició o tractament de dades de tomografia elèctrica de resistivitat i, per tant, l'elecció de la configuració es realitza, generalment, en funció de l'experiència, escollint entre les configuracions d'elèctrodes més utilitzades. Per tant, a l'hora d'escollir la configuració d'elèctrodes més adient, i ajustar el temps d'adquisició als requeriments de l'experiment, és necessari conèixer les seves característiques (avantatges i limitacions) i també les estratègies d'adquisició actualment a l'abast de qualsevol usuari. A continuació es presenten les característiques de les configuracions d'ERT i de CHERT, i una de les estratègies d'adquisició estudiada per a simplificar la seva elecció: la generació de dades per combinació. En el cas de les configuracions d'ERT es descriuran molt breument les seves característiques, ja que han estat àmpliament utilitzades i estudiades.

1.2.2.1. Configuracions d'ERT

En ERT, l'agrupació de les combinacions d'elèctrodes en les anomenades configuracions tradicionals (p.e. Wenner, Wenner-Schlumberger, dipol-dipol o pol-dipol) facilita el procés de selecció del dispositiu a utilitzar en cada context, ja que cada configuració és considerada més adient per a un tipus determinat de situació. Per tant, és possible fer una elecció raonada, en termes de profunditat d'investigació, amplitud del senyal, sensibilitat i resolució, a partir de la bibliografia especialitzada (Roy i Apparao, 1971; Whiteley, 1973; Coggon, 1973; Sumner, 1976; Barker, 1979; Orellana, 1982; Ward, 1990; Telford et al., 1990; Loke, 2001, 2004; Zhou et al., 2002; Dalhin i Zhou, 2004; Athanasiou et al., 2007; Candansayar, 2008) i també amb l'ús de la modelització. A continuació es presenten les característiques de les configuracions tradicionals d'ERT (Figura 1.9):

El dispositiu Wenner és considerat molt adequat per a la detecció de canvis verticals de la resistivitat (medis estratificats subhoritzontals) on es requereixi una alta resolució vertical i una relació senyal/soroll elevada.

El dispositiu Wenner-Schlumberger s'utilitza en contexts on es necessari una cobertura horitzontal adequada i una bona resolució vertical. Presenta una relació senyal/soroll elevada.

El dispositiu dipol-dipol es considera adient per a la detecció d'estructures amb canvis laterals de la resistivitat (cavitats, plomalls contaminants, murs soterrats, etc...) amb una bona resolució, sempre i quan l'equip de mesura sigui prou sensible, i/o s'augmenti la distància entre els elèctrodes de cada dipol al augmentar la profunditat d'investigació, ja que aquest presenta una baixa relació senyal/soroll.

El dispositiu pol-dipol presenta una bona resolució horitzontal i vertical, però la presència de l'elèctrode a l'infinit redueix la resolució lateral (causa asimetria en les imatges de resistivitat) i, per tant, és aconsellable adquirir-lo en dues direccions, canviant en cada una d'elles la posició de l'elèctrode a l'infinit. Generalment, s'utilitza per a determinacions amb petit espaiat entre els elèctrodes, ja que requereix situar un elèctrode allunyat del perfil. Presenta una relació senyal/soroll un poc més elevada que el dispositiu dipol-dipol.

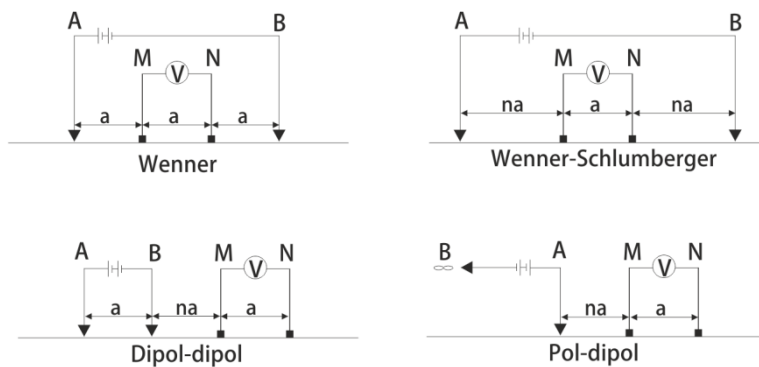


Figura 1.9. Representació geomètrica d'alguns dispositius tradicionals en ERT: Wenner, Wenner-Schlumberger, dipol-dipol i pol-dipol. "a" representa la distància entre els elèctrodes M i N; "n" és factor de separació entre els dipòls AB i MN.

Com s'ha comentat a la presentació, si es disposa de temps suficient per a l'adquisició, l'ús d'una o varies de les configuracions tradicionals permet obtenir bons resultats en gran nombre de contextos. Però, en situacions de temps d'adquisició limitat, l'enregistrament de més d'una configuració pot no ser possible. En una de les publicacions d'aquesta tesi (Bellmunt i Marcuello, 2011) s'analitzen els factors que influeixen en el temps d'adquisició de les configuracions.

1.2.2.2. Configuracions de CHERT

En el cas de la CHERT, les característiques de les configuracions no estan tan establertes com en cas anterior. Tanmateix això, en situacions on el temps d'adquisició no sigui un factor limitant, és possible acudir a la bibliografia especialitzada per a fer una elecció raonada (Park i Van, 1991; Shima, 1992; Zhou i Greenhalgh, 1997, 2000; Goes i Meekes, 2004; Loke, 2004; Coscia et al., 2008; Hagey i Petersen, 2011). En una de les publicacions incloses en aquesta tesi (Bellmunt et al., 2012) es va dur a terme un experiment de seguiment de la perforació del túnel de la línia L9 del metro de Barcelona on, degut a la velocitat d'avanç de la tuneladora, el temps no era un factor limitant per a l'adquisició.

En el cas d'estudis de seguiment on el temps d'adquisició sigui un aspecte crític, serà necessari conèixer a fons el funcionament de les diferents configuracions de CHERT per a establir un equilibri entre el temps d'adquisició i la resolució espacial desitjada. Precisament, en la tercera publicació de la tesi (Bellmunt et al., 2015) es van analitzar les característiques de les configuracions de CHERT en aquest tipus de situacions de seguiment amb la finalitat d'establir criteris senzills per a la reducció de la quantitat de dades. Part dels coneixements adquirits durant la realització d'aquest estudi s'inclouen en aquest apartat. A continuació s'introdueixen les característiques de les configuracions de CHERT en termes de penetració, amplitud del senyal i sensibilitat.

En aquesta memòria s'utilitza el terme "dipol", en lloc de "bipol" per a designar les configuracions de CHERT. Encara que Blome et al. (2011) el considera poc encertat, aquest terme ha estat àmpliament utilitzat en la notació de configuracions de tomografia elèctrica de superfície. Les diferents combinacions d'elèctrodes CHERT es nombraran amb el prefix CH (*cross-hole*: entre pous) i lletres majúscules separades per un guió. Aquestes últimes indiquen el tipus d'elèctrode (A i B: elèctrodes d'injecció del corrent; M i N: elèctrodes de mesura del potencial) i el guió separa els elèctrodes en funció del pou d'ubicació. L'ordre de les lletres a cada part del guió indica la posició vertical relativa dels elèctrodes des de la superfície. Per exemple, en el cas d'adquisicions entre dos pous, AM-N significa que els elèctrodes A i M estan inclosos en el mateix pou, l'elèctrode de potencial (N) està ubicat en un pou diferent, l'elèctrode no nombrat (B) està ubicat a l'infinit, i que l'elèctrode A està sempre en una posició més superficial que l'elèctrode M.

A més, per a simplificar la comparació entre configuracions de CHERT es proposa la següent nomenclatura en funció de la ubicació dels dipols de corrent i de potencial (Figura 1.10): dispositius tipus H, que són els que presenten cada dipol en pous diferents (CH AB-MN); dispositius tipus I, aquells on cada elèctrode de cada dipol hi és en pous diferents sense estar creuats (CH AM-BN); dispositius tipus X, aquells on els dipols estan creuats (CH AM-NB); i tipus L, on els elèctrodes d'un dipol estan en pous diferents i els de l'altre, en un mateix pou (CH pol-tripol).

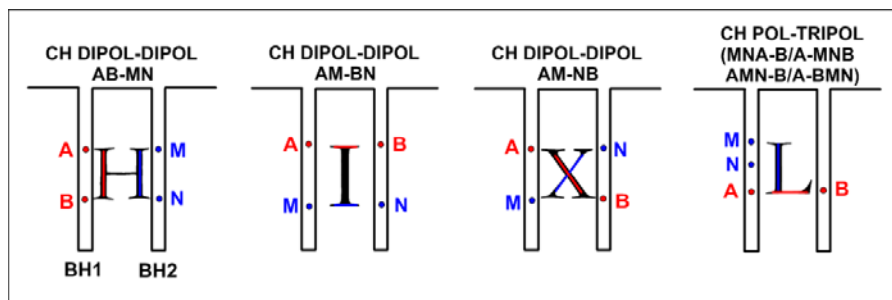


Figura 1.10. Disposicions geomètriques generals dels dispositius tipus H, I, X i L. Classificació establerta per a les configuracions de CHERT a partir de la posició dels dipols en els pous involucrats en les mesures. A i B representen el dipol d'injecció de corrent (vermell), i M i N, el de mesura del potencial (blau).

1.2.2.2.1. Penetració lateral

La profunditat d'investigació en l'ERT ha estat un tema molt estudiat i discutit (Evjen, 1938; Al'pin et al, 1966; Roy i Apparao, 1971; Roy, 1972; Koefoed, 1972; Navighian i Eliot, 1976; Edwards, 1977; Roy i Eliot, 1981; Barker, 1979, 1998, entre d'altres), degut principalment a l'intent d'associar les mesures realitzades des de la superfície amb una profunditat específica del subsòl. Però, en el cas de la CHERT, la profunditat d'investigació és funció de la fondària dels pous instrumentats. Per tant, en lloc de profunditat d'investigació seria més convenient estudiar la penetració lateral en direcció al centre del panell, és a dir, en direcció perpendicular a la línia d'elèctrodes, com en ERT.

A la Figura 1.11 es presenta la distribució de les línies de corrent i equipotencials en adquisicions amb les configuracions de CHERT presentades. Per a evitar l'efecte de la superfície, la distribució del corrent s'ha representat a fondàries on aquest pot ser menyspreable. La ubicació dels elèctrodes del dipol de corrent en un o dos pous (Figura

1.11), fa que el mode d'augmentar la penetració lateral sigui diferent en cada configuració. Amb l'ús d'un dispositiu tipus H, el màxim efecte d'una anomalia situada en el centre del panell (màxima penetració lateral) s'assoleix escanejant la part central del dipol de corrent des de l'altre pou. Mentre que amb els dispositius tipus I, X i L és necessari augmentar la distància entre els dipols de corrent i potencial.

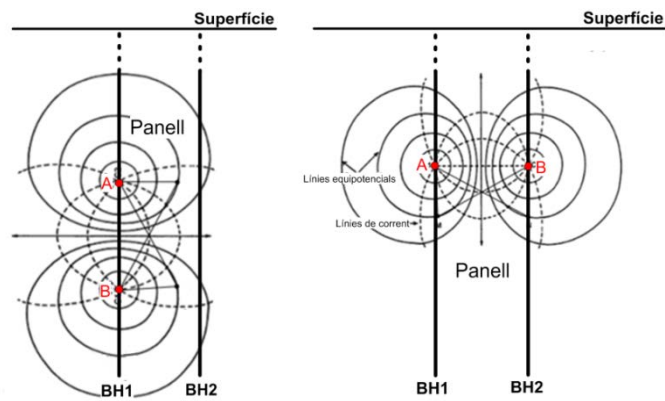


Figura 1.11. Distribució de les línies de corrent i equipotencials en un pla vertical al llarg de les línies d'electrodes-pous (línies negres verticals) amb l'ús dels dispositius tipus H (part esquerra) i tipus I, X, L (part dreta). Les línies discontinües indiquen que l'efecte de la superfície és menyspreable.

La penetració lateral d'una configuració es pot veure afectada per l'amplitud del senyal, la sensibilitat a les inhomogeneïtats o els efectes laterals. Aquests aspectes es tractaran a continuació.

1.2.2.2.2. Amplitud del senyal

El potencial elèctric disminueix amb la distància a les fonts del corrent i , per tant, l'amplitud del senyal i la relació senyal/soroll de cada configuració tendiran a reduir-se amb l'augment de la distància entre el dipols de corrent i de potencial.

En termes generals, amb els dispositius tipus I i X, on cada elèctrode de cada dipol està inclòs en un pou diferent i, per tant, a una certa distància, es registraran valors d'amplitud del senyal més elevats que amb els dispositius tipus H, on tots dos elèctrodes de cada dipol es situen en el mateix pou. Per tal d'augmentar l'amplitud del senyal amb els dispositius

tipus H serà necessari augmentar la distància entre els elèctrodes dins del mateix pou. Els dispositius tipus L es consideren configuracions intermèdies entre les anteriors.

La distribució del corrent i de les línies equipotencials presentades a la Figura 1.11 posa de manifest alguns dels problemes d'amplitud del senyal de les configuracions de CHERT. En el cas d'adquisicions amb el dispositiu tipus H (Figura 1.11) o amb el dispositiu tipus L amb una certa inclinació del dipol de corrent (Figura 1.12), part de les superfícies equipotencials esdevenen quasi paral·leles a la línia d'elèctrodes dels pous. Per tant, durant l'adquisició és possible enregistrar diferències de potencial molt petites (o inclús nul·les), que en certes situacions, poden afavorir l'aparició de resistivitats aparents negatives. En el cas del dispositiu tipus I amb una certa inclinació del dipol de corrent (Figura 1.12) també és possible enregistrar diferències de potencial molt petites si els elèctrodes de mesura s'ubiquen sobre la mateixa equipotencial en pous diferents. Aquesta situació també es pot donar amb la utilització de dispositius tipus X, ja que la línia equipotencial zero s'introdueix en la zona de mesura del potencial (Figura 1.12). Els dispositius tipus X poden ser problemàtics i no són habituals, per tant, no es tindran en compte en els següents apartats.

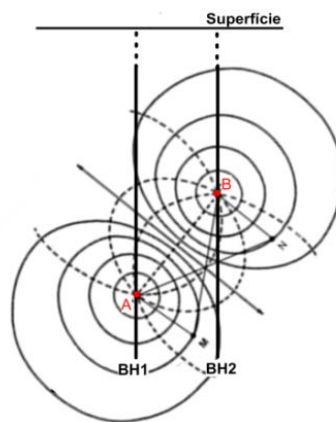


Figura 1.12. Distribució de les línies de corrent i de potencial elèctric en un pla vertical que inclou els dos pous amb els elèctrodes de corrent en pous diferents i amb una certa inclinació.

Davant d'aquesta situació, l'estudi del comportament del factor geomètric de les configuracions de CHERT esdevé essencial per tal d'obtenir una amplitud del senyal i una relació senyal/soroll adequades a l'experiment. En la tercera publicació d'aquesta tesi (Bellmunt et al., 2015), es va analitzar i utilitzar el comportament del factor geomètric de les configuracions de CHERT per a adequar l'amplitud del senyal a les necessitats de l'experiment.

1.2.2.2.3. Sensibilitat

La sensibilitat d'una configuració mostra com un canvi en la resistivitat del subsòl provoca una variació en el potencial mesurat amb els elèctrodes. El seu càlcul es realitza generalment per al medi homogeni i es presenta en forma de secció distància-profunditat, on es representa amb línies de contorn la manera en que cada regió del medi contribueix a la resposta total mesurada (patró de sensibilitat). La sensibilitat (S) es pot calcular a partir de la següent expressió:

$$S_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial q_j} \quad (1.10)$$

On, f_i : és la resposta i del model; q_j : el paràmetre j del model.

Spitzer (1998) estudià diversos mètodes de càlcul de la sensibilitat i va concloure que els patrons de sensibilitat calculats considerant models homogenis resulten en una bona aproximació als medis heterogenis per a contrastos de resistivitat menors de 1:10 i amb la font del corrent ubicada en el medi de baixa resistivitat. Quan la font es localitza en el medi de més alta resistivitat es detecten majors pertorbacions en el patró de sensibilitat, inclús amb menors contrastos. Per tant, encara que s'han de tenir en compte aquestes limitacions a l'hora d'utilitzar els patrons de sensibilitat, es considera adient el seu ús per a l'avaluació general de les respostes de les configuracions a les variacions de la resistivitat en el subsòl.

A la Figura 1.13 es presenten els patrons de sensibilitat dels dispositius tipus H, I i L. El signe del valor de la sensibilitat indica l'efecte que una variació en la resistivitat del medi tindrà sobre la resistivitat aparent mesurada amb la configuració. Un augment de la resistivitat en una regió de sensibilitat positiva produirà un augment en la resistivitat aparent mesurada, mentre que el mateix increment en una zona de sensibilitat negativa produirà una disminució de la resistivitat aparent mesurada. Per tant, aquest tipus de representació permet preveure la resposta de les configuracions.

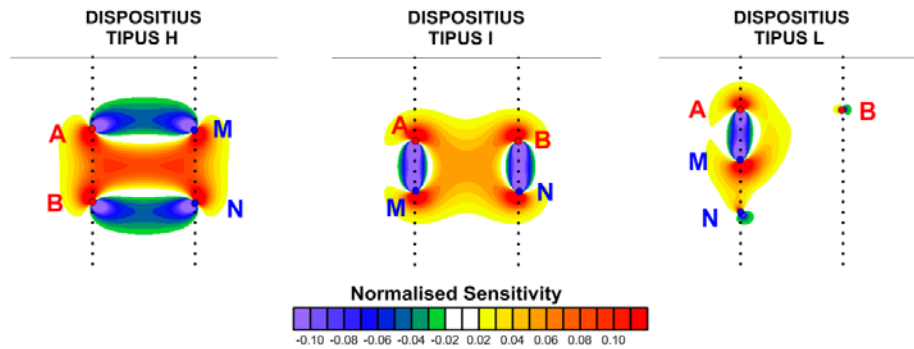


Figura 1.13. Seccions de sensibilitat dels dispositius CHERT. De esquerra a dreta: dispositiu tipus H: CH AB-MN, tipus I: CH AM-BN i tipus L: CH AMN-B. A i B representen els elèctrodes de corrent, M i N els de potencial, i els punts negres verticals, la posició dels elèctrodes en els pous.

El patró de sensibilitat dels dispositius tipus H consisteix en lòbuls allargats horitzontalment. Els dos lòbuls de sensibilitat negativa es situen en la regió entre els pous (panell) per sobre i per sota del lòbul de sensibilitat positiva, que s'estén fora del panell. El patró de sensibilitat per a les configuracions tipus I consisteix en lòbuls de sensibilitat negativa situats verticalment al llarg dels dos pous, entre els elèctrodes de corrent i de potencial involucrats, i lòbuls de sensibilitat positiva per sobre i per sota dels negatius i en la regió entre els pous. El patró de sensibilitat per als dispositius tipus L és bastant similar al del tipus I, però la sensibilitat està centrada, principalment, en el pou on es troben els tres elèctrodes. En tots els casos, la sensibilitat és més elevada a prop dels elèctrodes i disminueix amb la distància. Per tant, la presència d'inhomogeneïtats al llarg dels pous, habitual degut al procés de perforació, pot afectar a les mesures i emascarar les estructures més allunyades dels pous.

Un aspecte important a tenir en compte a l'hora de dissenyar un experiment amb mesures de CHERT és el quocient d'aspecte (AR : *aspect ratio*). És a dir, la raó entre la distància horitzontal entre els pous involucrats i la màxima distància vertical entre els elèctrodes. LaBrecque et al. (1996) estableixen que aquest no hauria d'ésser ser major de 0.75, i idealment 0.5, per a obtenir una bona qualitat en les imatges de resistivitat en mesures de CHERT. Tanmateix això, Hagrey (2011) conclou, a partir de simulacions numèriques, que és possible obtenir bons resultats amb distàncies entre els pous de fins a dues vegades la profunditat instrumentada, o inclús majors si s'utilitza una inversió condicionada fixant a priori els límits i els valors de la resistivitat.

La representació de la suma acumulada dels valors de sensibilitat (S_a) de totes les combinacions d'elèctrodes a enregistrar en l'experiment pot utilitzar-se per a avaluar la sensibilitat que s'obtindrà en la regió central entre els pous (Figura 1.14). Com es pot observar, la major sensibilitat es concentra en les zones properes als pous i disminueix amb la distància.

$$S_{aj} \sim \sum_i S_{ij}^2 \quad (1.11)$$

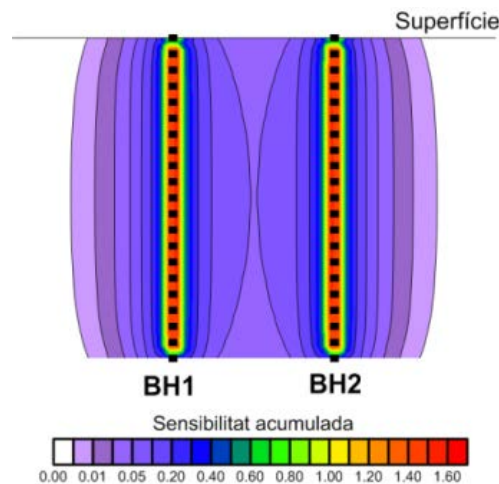


Figura 1.14. Sensibilitat acumulada típica de mesures de CHERT amb el dispositiu tipus I.

1.2.2.3. Generació de dades per combinació

Aquesta estratègia d'adquisició consisteix en generar les dades de configuracions no mesurades directament a partir de la combinació d'altres dades mesurades. A continuació es presenta el seu funcionament, i els avantatges i inconvenients del seu ús.

Carpenter (1955) i Carpenter i Habberjam (1956) van utilitzar la generació per combinació per a generar les dades d'una de les configuracions del sistema tri-potencial (Wenner alfa, beta i gamma) a partir de les altres dues (Figura 1.15). Aquestes mesures complien la denominada "lei d'addició" per al potencial normalitzat per la intensitat ($R = \Delta V/I$). A partir d'aquest punt, i per a simplificar la nomenclatura, s'utilitzarà el terme resistència, R , com a sinònim de potencial normalitzat per la intensitat.

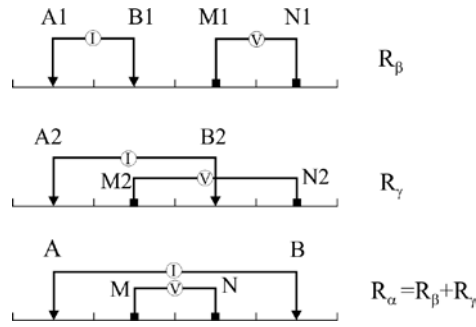


Figura 1.15. Diagrama on es representa l'aplicació de la llei d'addició del potencial elèctric per a la generació de les dades d'una variant Wenner del sistema tri-potencial. A i B: representen els elèctrodes d'injecció del corrent; M i N: elèctrodes de mesura de la diferència de potencial; R: resistència normalitzada pel corrent injectat (R^α :Wenner alfa, R^β : Wenner beta i R^γ : Wenner gamma, del sistema tri-potencial).

Posteriorment, Xu i Noel (1993) van analitzar el procés de generació de dades en detall i van establir que era possible obtenir qualsevol configuració d'elèctrodes a partir de la combinació lineal d'un conjunt de dades no únic, denominat dispositiu complet o primari, amb totes les combinacions linealment independents (LI) possibles entre els elèctrodes (que no es poden calcular per combinació d'altres). El dispositiu pol-pol era considerat la millor opció per a una transformació ràpida i senzilla, encara que altres opcions eren possibles. Coggon (1973), Karous i Pernu (1985), i Candansayar i Basokur (2001) van utilitzar configuracions tri-electròdiques per a generar les dades d'altres configuracions.

Xu i Noel (1993) van calcular la quantitat de mesures linealment independents que es poden adquirir en superfície amb un total de N elèctrodes a partir de les següents expressions:

$$D_N^{(2)} = N(N - 1)/2$$

$$D_N^{(3)} = (N + 1)(N - 2)/2$$

$$D_N^{(4)} = N(N - 3)/2$$

On: $D_N^{(e)}$ és la quantitat de mesures linealment independents (LI) que es poden adquirir amb un total de N elèctrodes. "e" indica el nombre d'elèctrodes involucrats en cada mesura (2: configuració bi-electròdica; 3: configuració tri-electròdica; 4: configuració tetra-electròdica).

Per exemple, amb un total de 72 elèctrodes hi ha 2556 mesures LI amb una configuració bi-electròdica, 2555 mesures LI amb una configuració tri-electròdica o 2484 mesures LI amb una configuració tetra-electròdica.

S'ha de tenir en compte que amb un total de N elèctrodes és possible adquirir un total de $N(N-1)(N-2)(N-3)/8$ combinacions de quatre elèctrodes no recíproques (Noel i Xu, 1991). Per exemple, amb 72 elèctrodes el conjunt de totes les combinacions tetra-electròdiques possibles inclourà 3.086.370 dades. Per tant, l'ús d'aquesta estratègia d'adquisició permet reduir d'una manera important el temps d'adquisició degut al menor nombre de combinacions linealment independents a enregistrar per a les transformacions.

Tanmateix això, hi ha dos aspectes que s'han de tenir en compte a l'hora d'utilitzar aquesta estratègia:

- Per una banda, l'ús de configuracions bi-electròdiques (dispositiu pol-pol) permet la generació de les dades de qualsevol configuració. Però serà necessària la combinació de dos o quatre mesures pol-pol per a la generació d'una única dada de configuracions tri- o tetra-electròdiques, respectivament. A la Figura 1.16 es presenta un exemple de generació d'una dada del dispositiu dipol-dipol a partir de la combinació de quatre mesures pol-pol. Amb l'ús de configuracions tri-electròdiques (dispositiu pol-dipol), seran necessàries dues dades pol-dipol per a generar altres dades de configuracions tri- i tetra-electròdiques.

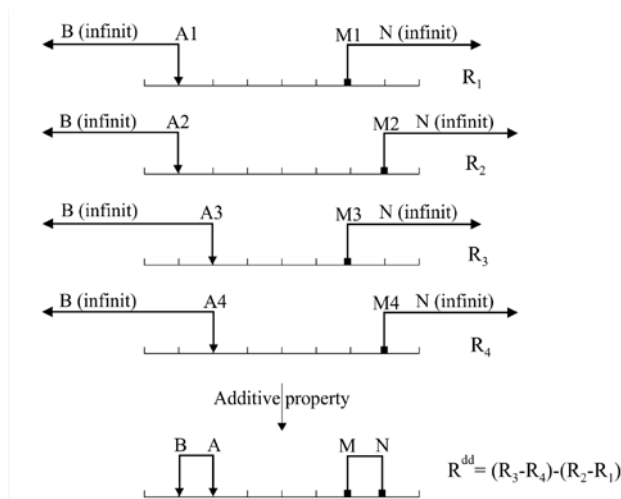


Figura 1.16. Ús del dispositiu pol-pol per a la generació d'una dada del dispositiu tetra-electròdic dipol-dipol. A i B: representen els elèctrodes d'injecció del corrent; M i N: elèctrodes de mesura de la diferència de potencial; R_i i R^{dd} : resistència obtinguda amb la combinació d'elèctrodes $A_i M_i$ (i els elèctrodes a l'infinít B i N) i la calculada per al dispositiu dipol-dipol, respectivament.

- Per altra banda, les configuracions bi- i tri-electròdiques presenten certes limitacions pràctiques, com són la impossibilitat d'aplicació en zones amb restriccions d'espai (zones urbanes o àrees amb una topografia molt accidentada), una baixa relació senyal/soroll i la introducció d'errors sistemàtics degut a l'ús d'elèctrodes llunyans (Beard i Tripp, 1995; Van, Park i Hamilton, 1991; Park i Van, 1991).

Per tant, la propagació d'errors i els problemes de soroll derivats de l'ús d'elèctrodes llunyans amb l'ús de configuracions bi- o tri-electròdiques fan aquesta estratègia poc adequada a nivell pràctic.

1.2.3. Representació de les dades

La representació de les dades de resistivitat aparent es realitza generalment mitjançant seccions distància-profunditat, anomenades comunament pseudoseccions. Aquest concepte va ser desenvolupat en treballs pioners per Hallof (1957) i Marshall i Madden (1959). La pseudosecció és una forma de representació de les dades mesurades que mostra com varia la resistivitat aparent amb la posició i profunditat. Però, assumir que ofereix una imatge aproximada de la distribució de la resistivitat en el subsòl pot portar a interpretacions errònies, ja que depèn de la configuració d'elèctrodes utilitzada. La imatge adient del subsòl la dona el model de resistivitat que s'obté de la inversió de les dades. Tanmateix això, la representació mitjançant pseudoseccions permet gestionar les dades d'una manera senzilla i establir un primer control visual de qualitat per a detectar valors de resistivitat anormalment elevats o molt petits, resistivitats negatives, etc.

En tomografia 2D s'assumeix que la resistivitat elèctrica no canvia significativament en la direcció perpendicular al perfil elèctric, de manera que la resistivitat es manté constant en una direcció de l'estructura. En el cas d'estructures bidimensionals, particularment per a perfils sobre cossos allargats, aquesta és una afirmació raonable. Aquest raonament ens permet assignar la pseudosecció generada en el plànol vertical dels elèctrodes, encara que les mesures es veuen afectades per les possibles variacions laterals de la resistivitat fora d'aquest plànol.

La representació de les dades es realitza assignant una distància horitzontal (eix x) i vertical (eix z) a les resistivitats aparents en funció de la configuració utilitzada i del factor de profunditat “ n ” (pseudo-profunditat), respectivament (Figura 1.17). Però és possible ajustar la profunditat d’investigació característica de cada configuració utilitzant els factors de profunditat calculats per Edwards (1977).

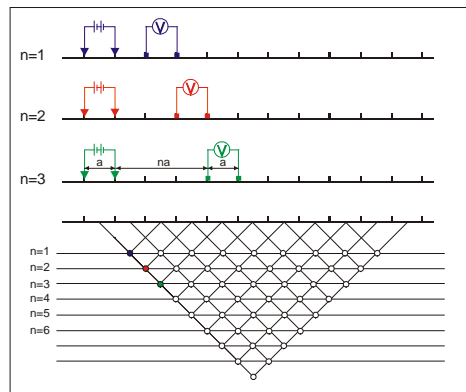


Figura 1.17. Representació de la construcció d’una pseudosecció de dades del dispositiu dipol-dipol. La posició horitzontal és el punt mig entre els dipols d’injecció i de potencial, i la vertical, el valor “ n ” de cada combinació utilitzada.

Tradicionalment, les dades de diferents configuracions d’ERT s’han representat en pseudoseccions individuals, ja que la representació de més d’una configuració en una mateixa pseudosecció pot presentar problemes d’interpolació degut, sobretot, al diferent efecte que les anomalies de resistivitat tenen sobre les mesures amb cada configuració. A la Figura 1.18 es pot observar com aquesta representació conjunta dificulta la detecció visual de les dades anòmales.

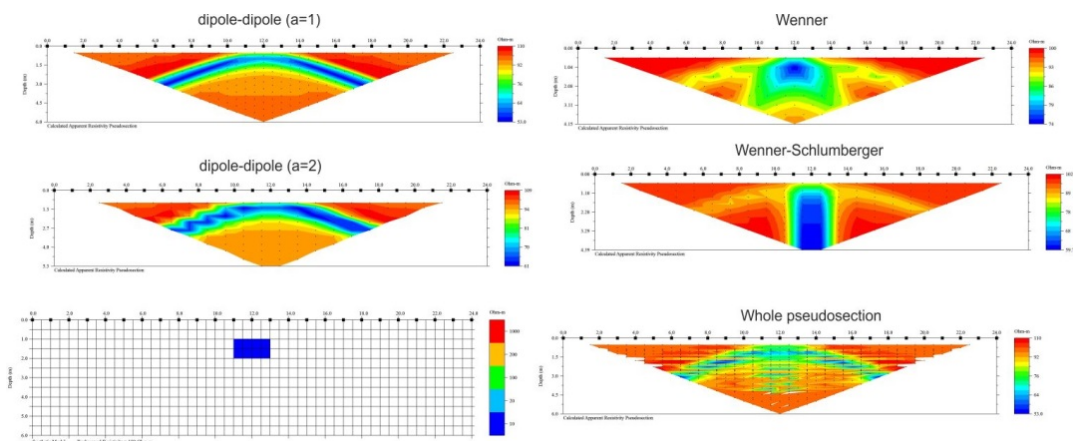


Figura 1.18. Model de resistivitat i pseudoseccions de dades dels dispositius dipol-dipol ($a=1$ i 2), Wenner, Wenner-Schlumberger i una conjunta amb totes les dades (*whole pseudosection*).

En CHERT, la representació de les dades es realitza, generalment, en forma de diagrama de punts, ordenats per la posició del transmissor (Figura 1.19), o de dispersió en funció de les posicions del dipol transmissor ($AB/2$) i receptor ($MN/2$). Aquestes representacions permeten gestionar gran quantitat de dades però no permeten deduir, d'una manera senzilla, la ubicació de les variacions de la resistivitat aparent. En una de les publicacions incloses en aquesta tesi (Bellmunt et al., 2012) es representen en forma de pseudosecció les variacions en la resistivitat d'un experiment de seguiment mitjançant mesures de CHERT.

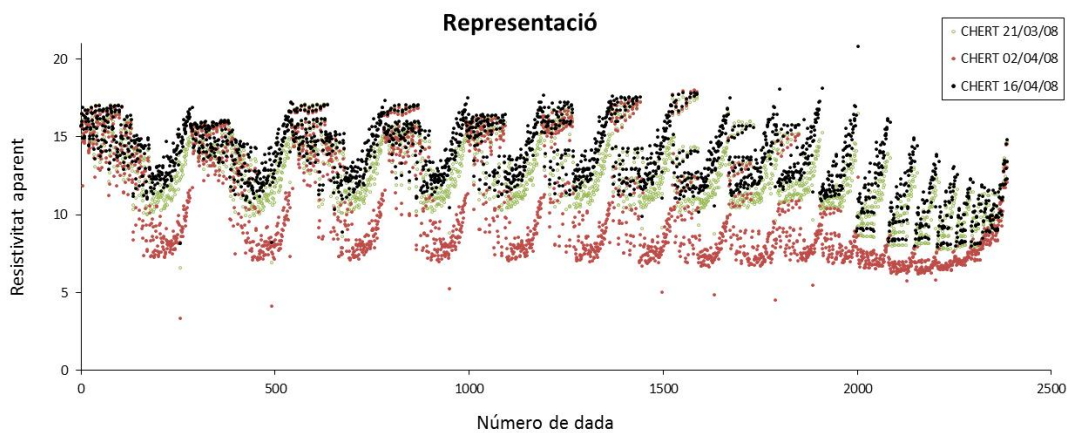


Figura 1.19. Diagrama de dispersió amb dades CHERT. L'eix "x" representa el número de dada, ordenat en funció de la fondària del transmissor ($AB/2$) i l'eix "y", la resistivitat aparent.

1.2.4. Inversió de dades

Els mètodes d'inversió de dades amb finalitats de caracterització estan ben establerts (p.e. Loke, 2004) i, per tant, no es descriurà el seu funcionament.

Per a la inversió de dades de seguiment enregistrades en diferents moments de temps es poden utilitzar diferents estratègies per al càlcul de les variacions de la resistivitat del subsòl. A continuació s'introdueixen breument tres estratègies que es poden utilitzar amb aquesta finalitat: 1) la inversió condicionada (Loke, 2001), 2) la diferència de models i 3) la inversió d'un quocient de resistivitats (Daily i Owen, 1991; Daily et al., 1992; Slater et al., 2000). En qualsevol de les tres estratègies es pot utilitzar la inversió suavitzada (deGroot-Hedlin i Constable, 1990) o robusta (Claerbout i Muir, 1973), en funció de com s'espera que siguin

les variacions en el subsòl i de la qualitat de les dades. Les variacions s'expressen normalment en percentatge.

1) La inversió condicionada consisteix en utilitzar el model de resistivitat obtingut amb la inversió d'un conjunt de dades d'un temps concret com a model de referència en les inversions dels conjunts de dades enregistrades posteriorment. És a dir, el model de resistivitat obtingut en un moment de temps s'utilitza per a restringir o limitar les variacions de la resistivitat durant la inversió dels conjunts de dades de temps posteriors.

2) La diferència de models consisteix en invertir de manera independent cada un dels conjunt de dades enregistrats en moments de temps diferents, i calcular les variacions de la resistivitat del subsòl en aquell període de temps a partir de la diferència píxel a píxel entre les imatges de resistivitat obtingudes. La variació es pot calcular respecte d'un conjunt de dades inicial, adquirit abans d'iniciar-se el procés a seguir, o entre dos conjunts de dades consecutius.

3) La inversió d'un quocient de resistivitats o resistències. Aquesta estratègia consisteix en invertir un valor de resistivitat o resistència normalitzada a partir de la següent expressió:

$$\rho_i^n = \rho_{MH} \left(\frac{\rho_i}{\rho_0} \right) \quad (1.12)$$

On ρ_i^n : valor del quocient de resistivitat normalitzat; ρ_{MH} : valor de la resistivitat d'un model homogeni; ρ_i : valor de la resistivitat obtinguda en el moment de temps "i"; ρ_0 : valor de la resistivitat obtinguda abans de l'inici de l'experiment (dades de referència).

Aquesta expressió es pot utilitzar amb valors de resistivitats aparents o de resistència ($R=V/I$), i produeix una imatge que es podria anomenar d'anomalies, ja que només es representen les variacions de resistivitat respecte del medi homogeni escollit.

Actualment, s'estan fent grans esforços per a desenvolupar algorismes d'inversió 4D que permetin introduir el temps de cada mesura en el procés d'inversió (Karaoulis et al., 2014; Power et al., 2014).