

CAPÍTOL 2: INTEGRACIÓ DE LES DIFERENTS RESPOSTES MAGNETOTEL·LÚRIQUES

2.1 - INTRODUCCIÓ

Tal com s'ha descrit en el capítol 1, el mètode magnetotel·lúric presenta, habitualment, tres tipus de respostes diferents: la resistivitat aparent, la fase i la funció de transferència geomagnètica o també anomenada *tipper*. Cada tipus de resposta és sensible a unes determinades característiques del subsòl i aporta una informació diferent de l'estructura que es mesura.

L'obtenció dels models que identifiquen les diferents estructures geològiques es fa sistemàticament mitjançant l'aplicació de l'anomenat, problema invers. Aquest procés numèric determina una distribució de resistivitats elèctriques del subsòl, la qual presenta una resposta elèctrica molt propera a les dades mesurades. El problema principal de la inversió és que no té una solució única perquè els problemes que generalment es tracten són problemes mal condicionats. En el cas concret del mètode magnetotel·lúric, amb l'objectiu de reduir el nombre de les possibles solucions i obtenir una millor interpretació, la inversió es pot realitzar conjuntament amb les tres respostes anteriorment citades. Quan s'integren els diferents tipus de dades

magnetotel·lúriques en el procés de la inversió cal controlar la importància relativa o el pes entre elles. Molts algorismes utilitzen les relacions entre els errors de les respostes magnetotel·lúriques per a determinar aquest pes, com és la coneguda relació que existeix entre l'error de la resistivitat aparent i l'error de la fase.

S'han realitzat pocs estudis sobre la qüestió plantejada en aquest capítol. Per això, el desenvolupament que es presenta destaca per la seva originalitat, i pretén aportar certes pautes per optimitzar la informació que s'introdueix en el procés de la inversió a través de l'error associat a cada tipus de resposta (Gabàs i Marcuello, 2003).

L'estudi desenvolupat s'estructura de la següent manera:

- En primer lloc, es defineix el concepte de pes o d'influència d'un determinat tipus de resposta a través del seu error i es descriuen aquelles relacions entre errors que són conegudes.
- En segon lloc, es dedueixen noves relacions entre els errors de les diferents respostes a partir de les equacions de Maxwell, equacions sobre les quals es fonamenta el mètode magnetotel·lúric.
- Seguidament, es dissenya una tècnica per a confirmar les relacions analítiques, la qual s'aplica sobre dades sintètiques i, posteriorment, sobre dades reals.
- Finalment, es desenvolupa una manera alternativa per a determinar, de forma aproximada, les relacions entre els errors de les diferents respostes sense considerar les expressions analítiques. Aquesta metodologia dissenyada es basa en aspectes qualitius i ha estat aplicada sobre models de simples característiques.

2.2 – EL PES DE LES RESPOSTES

Els algorismes d'inversió utilitzen els tres tipus de respostes presentades o qualsevol combinació entre elles: resistivitat aparent (ρ_a), fase (φ), o funció de transferència geomagnètica, (**T**).

Cal tenir present, però, que la introducció de diferents tipus de dades no sempre aporta un model satisfactori del subsòl. Hi ha ocasions on les noves dades incorporades al procés de la inversió no aporten nova informació o noves restriccions a la solució. Aquest darrer aspecte està totalment lligat amb la idea de la influència relativa d'un tipus de dada, o el que també s'anomena, el pes d'una dada en el procés

de la inversió.

La influència relativa d'una dada es determina a través de l'invers del seu error experimental. Un error experimental petit està indicant l'obtenció d'una bona mesura, i en conseqüència, una influència o un pes important en la inversió. Pel contrari, un error gran implica un pes petit en el procés.

Alguns programes d'inversió utilitzen l'anomenat error llindar, o *error floor*, a més a més de l'error experimental observat. L'error llindar es defineix com el mínim error possible que pot tenir una dada en el procés de la inversió. Així, quan una dada té un error experimental inferior a l'error llindar fixat, l'algorisme d'inversió associa l'error llindar a aquesta dada de manera que es redueix la seva influència en el procés. S'exerceix, doncs, un control sobre aquelles dades que, d'alguna manera, dominarien la solució a causa del seu elevat pes.

En el cas de treballar amb dades sintètiques, les quals no presenten cap error experimental, aquest paràmetre permet controlar el pes de tot un conjunt de dades del mateix tipus, és a dir, de tota una mateixa resposta.

2.2.1 – RELACIÓ ENTRE ELS ERRORS: RESISTIVITAT APARENT I FASE

Les dues respostes que es tracten en aquest apartat no són independents entre elles, perquè formen part de la mateixa magnitud: la impedància. La relació que existeix entre elles ha estat descrita en el capítol anterior:

$$Z = |Z| \cdot e^{i\varphi} \quad \rho_a = \frac{1}{\omega\mu} |Z|^2 \quad (2.1)$$

Utilitzant la representació en el pla complex de la impedància per a una determinada freqüència, figura 2.1, es pot deduir perfectament la relació entre l'error del mòdul de la impedància, $\varepsilon(|Z|)$, i l'error de la fase, $\varepsilon(\varphi)$, a través de la definició de la funció trigonomètrica del sinus de $\varepsilon(\varphi)$ (Bendat i Piersol, 1966).

$$\varepsilon(\varphi) = \sin^{-1} \left[\frac{\varepsilon(|Z|)}{|Z|} \right] \quad (2.2)$$

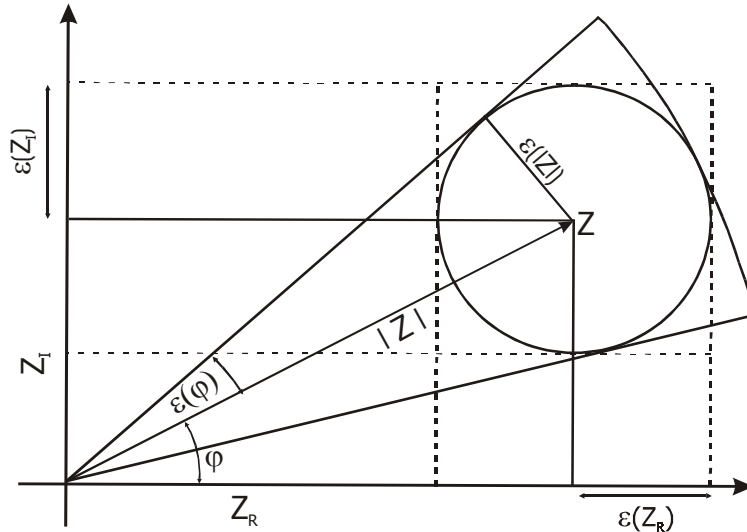


Figura 2.1. Representació gràfica de la impedància. Es mostra la fase, la part real i la part imaginària de la impedància, i els errors corresponents (modificat de Bendat i Piersol, 1966).

Assumint que $\varepsilon(|Z|) \ll |Z|$, es pot deduir la relació entre els errors de la fase i de la resistivitat aparent:

$$\varepsilon(\varphi) = \sin^{-1} \left[\frac{\varepsilon(|Z|)}{|Z|} \right] \approx \left[\frac{\varepsilon(|Z|)}{|Z|} \right] \approx \varepsilon(\ln|Z|) \approx \frac{1}{2} \varepsilon(\ln(\rho_a)) \quad (2.3)$$

$$\frac{\varepsilon(\varphi)}{\varepsilon(\ln(\rho_a))} = \frac{1}{2} \quad (2.4)$$

La majoria d'algorismes d'inversió assumeixen la relació (2.4) per determinar els errors de la fase en tot el rang de freqüències i per a totes les estacions del perfil. Aquest resultat indica que quan els errors d'ambdues respostes es troben en la relació d'un mig, el pes de les respostes en el procés de la inversió és el mateix.

2.2.2 – RELACIÓ ENTRE ELS ERRORS: IMPEDÀNCIA I FUNCIÓ DE TRANSFERÈNCIA GEOMAGNÈTICA

Com s'ha comentat anteriorment, el coneixement de la relació entre els errors permet obtenir un model final on la informació procedent de les diferents respostes hagi estat processada amb el mateix pes.

Per poder aplicar aquest tractament sobre les dades, es dedueix en aquest apartat una nova relació entre els errors de la impedància i la funció de transferència geomagnètica utilitzant les equacions sobre les quals es fonamenta el mètode magnetotel·lúric i que han estat presentades en el capítol 1.

La deducció d'aquesta relació precisa de la utilització de dues condicions concretes:

- es considera que l'estructura regional és bidimensional, on la direcció de l'estructura coincideix amb l'eix x .
- el desenvolupament es basa en la polarització E a causa que la funció de transferència geomagnètica només existeix en aquesta polarització.

La primera equació de Maxwell (1) presenta la següent expressió quan s'utilitzen les dues condicions anteriors:

$$\frac{\partial E_x}{\partial y} = -i\omega\mu H_z \quad (2.5)$$

A partir de les definicions de la impedància i de la funció de transferència geomagnètica en les direccions corresponents:

$$E_x = Z_{xy} \cdot H_y, \quad H_z = T_{zy} \cdot H_y$$

i substituint aquestes expressions en l'equació (2.5), s'obté una nova relació entre la impedància i la funció de transferència geomagnètica:

$$T_{zy} = -\frac{1}{i\omega\mu} \frac{\partial \ln E_x}{\partial y} \cdot Z_{xy} \quad (2.6)$$

A causa que la funció de transferència geomagnètica és una magnitud adimensional, la

relació (2.6) es pot reduir a una senzilla expressió considerant que el terme $\left(-\frac{1}{i\omega\mu} \frac{\partial \ln E_x}{\partial y}\right)$ té dimensions d'admitància i es pot representar com Y_{zx} . Aquesta magnitud es defineix com la inversa de la impedància:

$$H_z = Y_{zx} \cdot E_x \quad (2.7)$$

i per tant, l'equació (2.6) s'escriu com:

$$T_{zy} = Y_{zx} \cdot Z_{xy} \quad (2.8)$$

Aplicant l'esquema de la propagació dels errors sobre l'equació (2.8), es dedueix l'error de la funció de transferència geomagnètica:

$$\varepsilon(|T|) = \left|\frac{\partial T}{\partial Z}\right| \cdot \varepsilon(|Z|) + \left|\frac{\partial T}{\partial Y}\right| \cdot \varepsilon(|Y|) = |Y| \cdot \varepsilon(|Z|) + |Z| \cdot \varepsilon(|Y|) \quad (2.9)$$

La relació (2.9) es pot escriure com una fita inferior quan el terme desconegut que depèn de l'error de l'admitància, $|Z| \cdot \varepsilon(|Y|)$, es menysprea. Així, s'obté la següent expressió que mostra el comportament entre l'error de la funció de transferència geomagnètica i l'error de la impedància.

$$\varepsilon(|T|) \geq |Y| \cdot \varepsilon(|Z|) = \left|\frac{T}{Z}\right| \cdot \varepsilon(|Z|) \quad (2.10)$$

Utilitzant addicionalment la relació (2.4) es dedueix de forma explícita l'expressió entre els errors d'altres tipus de respostes (funció de transferència geomagnètica i resistivitat aparent, o funció de transferència geomagnètica i fase).

$$\frac{\varepsilon(|T|)}{|T|} \geq \frac{\varepsilon(|Z|)}{Z} \approx \varepsilon(\ln|Z|) \approx \varepsilon(\varphi) \approx \frac{1}{2} \varepsilon(\ln(\rho_a)) \quad (2.11)$$

Tal com mostra l'expressió anterior, el resultat obtingut mostra que aquesta raó depèn del propi valor de la funció de transferència geomagnètica, i per tant, és variable per a cada freqüència i per a cada estació. Aquest comportament entre els errors és diferent de la relació entre l'error de la resistivitat aparent i l'error de la fase, (2.4), que val 0.5 per a totes les freqüències i estacions del perfil.

El diagrama de la figura 2.1 és adequat per a representar la magnitud complexa de la funció de transferència geomagnètica i així, s'obté que l'error d'aquesta darrera magnitud coincideix exactament amb l'error de la seva part real i amb l'error de la seva part imaginària.

Per a simplificar l'estudi, en aquest desenvolupament teòric s'utilitza només la part real de la funció de transferència geomagnètica, $\varepsilon(|T|) = \varepsilon(T_R)$:

$$\frac{\varepsilon(T_R)}{|T|} \geq \frac{1}{2} \varepsilon(\ln(\rho_a)) \quad (2.12)$$

Finalment, es proposa buscar una fita inferior de l'anterior expressió per evitar la dependència amb la freqüència i amb les estacions utilitzant el màxim valor mesurat d'aquesta magnitud en tot el perfil magnetotel·lúric. Així, es determina aquest límit inferior (Gabàs i Marcuello, 2003):

$$\frac{\varepsilon(T_R)}{\varepsilon(\ln(\rho_a))} \geq \frac{\max|T|}{2} \quad (2.13)$$

El significat d'aquesta expressió és clar: si l'error que s'associa al logaritme de la resistivitat aparent és de 0.1 (o 10% per l'error de ρ_a), l'error equivalent per a la fase és de 0.05 rad (o 2.8°) i l'error equivalent per a la funció de transferència geomagnètica ha de ser com a mínim igual a ($\max|T| \cdot 0.05$).

2.3 – TÈCNICA DE VERIFICACIÓ

Un cop s'ha trobat la relació analítica entre els errors de les respostes magnetotel·lúriques, es proposa un procés numèric per verificar aquest comportament

entre els errors. D'acord amb la idea que el pes o la influència relativa de les dades està controlada pel seu propi error, es dissenya un mètode basat en el valor de l'error llindar i en el paràmetre RMS, *Root-Mean-Square*. Aquest darrer coeficient, RMS, s'utilitza per a quantificar l'ajust entre les dades experimentals i les respostes del model resultat de la inversió.

2.3.1 – DESCRIPCIÓ DEL MÈTODE

El mètode proposat consisteix en invertir el conjunt format per dues respostes magnetotel·lúriques procedents d'un mateix model amb els seus respectius errors o pesos. Amb els resultats de les inversions es pot determinar el model que s'ajusta millor a les dades inicials, el qual presenta el valor més petit del paràmetre RMS, i correspon al model que s'obté quan les respostes han estat invertides amb el mateix pes.

El mètode s'aplica a dos casos concrets:

- a) En primer lloc, s'inverteix el conjunt de dades format pel logaritme de la resistivitat aparent i per la fase. Aquest cas permet verificar el bon funcionament de la tècnica numèrica quan el mínim valor del RMS es determina amb la relació teòrica entre els seus errors, equació (2.4).
- b) En segon lloc, s'inverteixen les respostes del logaritme de la resistivitat aparent i de la part real de la funció de transferència geomagnètica. Igualment es pretén trobar el mínim RMS al voltant del valor que s'extreu de la relació teòrica (2.13).

En aquest estudi s'assumeix un error llindar constant per a cada tipus de resposta en tot el rang de freqüències i per a totes les estacions del perfil per a simplificar el procés de càlcul. Però, aquest fet s'ha de prendre amb molta cura alhora d'invertir les dades, perquè aquesta condició pot ser crítica per a freqüències baixes on el principal responsable de l'error té un origen estadístic. Dins aquest rang de les baixes freqüències, a mesura que la freqüència disminueix el valor de l'error estadístic augmenta, perquè existeix una disminució del nombre de dades disponibles, i per tant, es produeix un augment de l'error relatiu de la impedància, $\varepsilon(|Z|)/|Z|$.

Aquest mètode s'aplica en una primera comprovació sobre dades sintètiques i posteriorment, sobre dades reals.

2.3.1.1 – ASPECTES TÈCNICS

Els errors llindars que s'associen a les respostes magnetotel·lúriques canvien en cada inversió per tal de disposar de 10 valors diferents en l'escala logarítmica. Per tal de mantenir un nivell similar del valor del paràmetre RMS s'ha de complir la característica que el producte entre els errors de les dues respostes sigui aproximadament igual.

Les inversions s'inicien a partir d'un model homogeni, i es realitza una mitjana d'unes 20 iteracions abans de finalitzar la inversió. Seguidament, es tria aquella iteració amb el valor mínim del paràmetre RMS, perquè representa el model final que s'ajusta millor a les dades observades.

El darrer pas consisteix en representar gràficament el comportament del paràmetre RMS en funció de la raó entre els errors. Se suposa que el mínim d'aquesta funció es produeix quan la informació de les dues respostes es tracta amb el mateix pes, i per tant, quan compleix la relació teòrica dels apartats anteriors.

Aquesta tècnica numèrica utilitza el programa d'inversió bidimensional de dades magnetotel·lúriques anomenat REBOCC i que va ser desenvolupat per Siripunvaraporn i Egbert (2000). La característica d'aquest codi és que permet triar quines respostes es volen utilitzar en la inversió i amb quin error llindar. L'ajust dels models que resulten de la inversió utilitzant aquest programa, paràmetre RMS, es determina a partir d'aquesta equació:

$$\text{RMS} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{(d_i - f_i)}{\varepsilon_i} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (2.14)$$

on d_i són les dades observades, f_i són les respostes del model, ε_i són els errors experimentals de les dades mesurades, i N el nombre de dades observades.

2.3.2 – APLICACIÓ A LES RESPOSTES SINTÈTIQUES

Les dades sintètiques tenen una important aplicació en la verificació dels resultats procedents dels desenvolupaments teòrics ja que la qualitat de les dades està totalment garantida.

L'obtenció de les dades sintètiques es realitza amb l'algorisme Wannamaker *et al.* (1986), el qual aporta la resposta magnetotel·lúrica d'un model bidimensional en la polarització E. Aquest model consisteix en un medi homogeni de $100 \Omega \cdot m$ amb la presència d'un cos conductor de $1 \Omega \cdot m$. El cos rectangular té unes dimensions de 7.5 km d'amplada, està situat a 3 km de profunditat i arriba a 6 km, figura 2.2. El perfil consta de 14 estacions separades 6 km entre elles i es calcula la resposta en 11 freqüències distribuïdes en un l'interval que va des de $8 \cdot 10^{-4}$ Hz fins a 8 Hz.

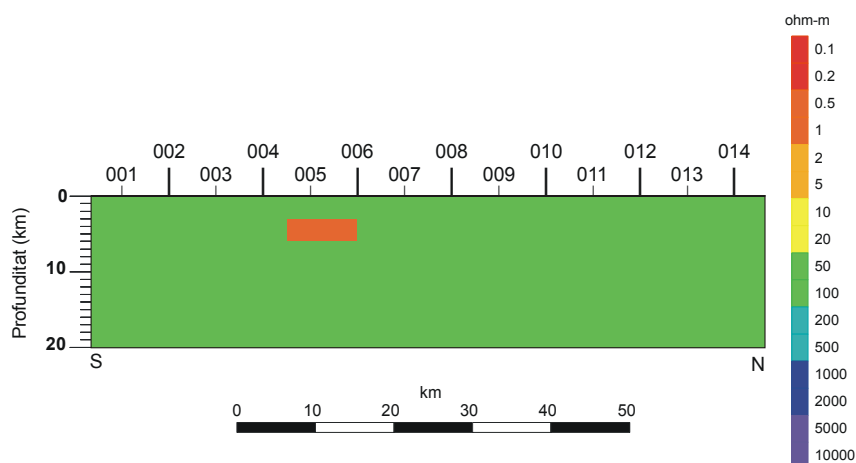


Figura 2.2. Model dissenyat per a calcular les respostes magnetotel·lúriques: resistivitat aparent, fase i part real i imaginària de la funció de transferència geomagnètica.

2.3.2.1 – CAS 1: RESISTIVITAT APARENT - FASE

Les inversions es realitzen utilitzant només aquestes dues respostes, resistivitat aparent i fase del model de la figura 2.2, i variant el valor de l'error lliardar des de 0.007 fins a 0.05 pel logaritme de la resistivitat aparent (de 0.7 % a 5 % per l'error de

ρ_a) i des de 0.005 fins a 0.04 radians per a la fase. En aquest cas el producte entre els errors es manté constant al voltant del valor de $2.8 \cdot 10^{-4}$, de manera que el paràmetre RMS presenta un nivell similar en totes les inversions realitzades, taula 2.1.

error log res	error fase	raó	RMS mínim
0.007	0.04	5.71	0.3056
0.01	0.03	3.00	0.2042
0.011	0.025	2.27	0.1857
0.013	0.02	1.54	0.175
0.015	0.015	1.00	0.182
0.0186	0.014	0.75	0.181
0.024	0.012	0.50	0.1622
0.03	0.01	0.33	0.1919
0.036	0.008	0.22	0.2526
0.043	0.006	0.14	0.3627
0.05	0.005	0.10	0.5336

Taula 2.1. Errors utilitzats en les dues respostes, quocient entre ells i valor del RMS.

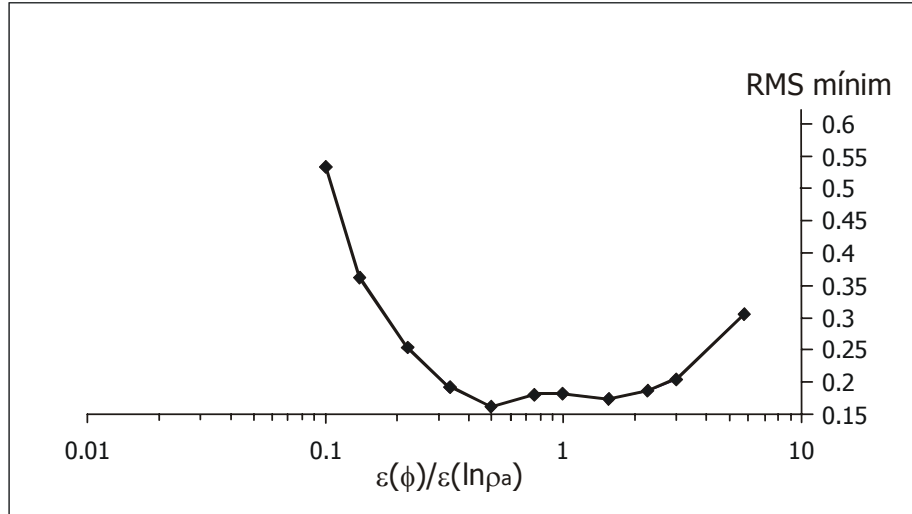


Figura 2.3. Comportament de la funció RMS respecte del quocient entre els errors de la fase, $\varepsilon(\phi)$, i del logaritme de la resistivitat aparent, $\varepsilon(\ln\rho_a)$, en l'escala logarítmica.

El resultat de les 10 inversions es presenta en la figura 2.3, on es mostra la corba de la funció RMS respecte de la raó entre els errors del logaritme de la resistivitat aparent i

de la fase en l'escala logarítmica. Encara que existeixen mínims locals en la funció i que la corba presenta un comportament molt suau en els valors centrals de l'eix d'abscisses, es detecta el mínim absolut en la posició 0.5. Valor que coincideix amb el valor teòric expressat en l'equació (2.4). Aquest primer resultat permet confiar en la validesa del mètode dissenyat.

2.3.2.2 – CAS 2: RESISTIVITAT APARENT – PART REAL DE LA FUNCIO DE TRANSFERÈNCIA GEOMAGNÈTICA

Una segona aplicació inverteix la resistivitat aparent i la part real de la funció de transferència geomagnètica del model de la figura 2.2.

En aquesta ocasió l'error llindar que s'utilitza en les inversions varia des de 0.01 fins a 0.06 pel logaritme de la resistivitat aparent (de 1% a 6% per l'error de ρ_a) i des de 0.003 fins a 0.03 per a la part real de la funció de transferència geomagnètica, taula 2.2. El producte entre els errors és molt proper a 2.510^{-4} en totes les inversions, la qual cosa permet que el valor del RMS es conservi en un mateix nivell.

error log res	error tipper	raó	RMS mínim
0.01	0.03	3.00	0.6156
0.015	0.015	1.00	0.5076
0.02	0.013	0.65	0.4475
0.025	0.011	0.44	0.4248
0.03	0.01	0.33	0.3953
0.038	0.009	0.24	0.3571
0.043	0.006	0.14	0.3938
0.05	0.005	0.10	0.393
0.06	0.003	0.05	0.4898

Taula 2.2. Errors utilitzats en ambdues dades, quocient entre ells i valor del RMS.

El resultat de les inversions es presenta en la figura 2.4, on es mostra la corba de la funció RMS respecte de la raó entre els errors del logaritme de la resistivitat aparent i de la part real de la funció de transferència geomagnètica en l'escala logarítmica.

El valor màxim de la part real de la funció de transferència geomagnètica per a totes les estacions i per a totes les freqüències és de 0.46. Això implica que la raó teòrica

determinada utilitzant la relació (2.13) és de 0.23.

Observant el gràfic de la figura 2.4, la funció obtinguda té un comportament molt abrupte sense la presència de cap zona suau ni mínims locals. El mínim absolut de la funció RMS és clar i està localitzat exactament en el valor 0.23, verificant perfectament la relació teòrica anterior.

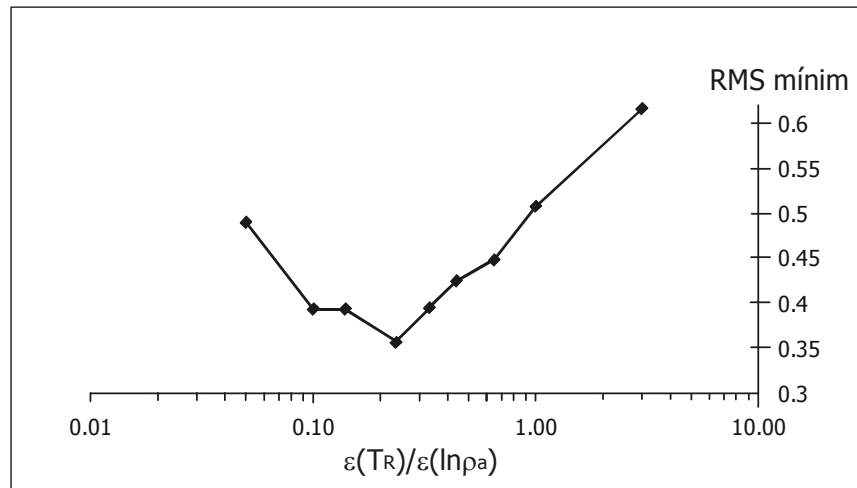


Figura 2.4. Comportament de la funció RMS respecte del quocient entre els errors de la part real de la funció de transferència geomagnètica, $\varepsilon(T_R)$, i del logaritme de la resistivitat aparent, $\varepsilon(\ln\rho_a)$, en l'escala logarítmica.

2.3.2.2.1 – DISCUSSIÓ DELS RESULTATS

Dos exemples dels models que resulten de les inversions entre aquestes dues darreres magnituds es presenten en la figura 2.5, on es mostren els models que es recuperen utilitzant dos valors diferents de la raó entre errors.

El model A presenta el model resultant quan el valor de la raó entre els errors és el mínim de la corba de la figura 2.4, el qual coincideix amb el valor teòric deduït, 0.23.

Aquesta relació entre els errors indica que les dues respostes utilitzades en la inversió són tractades amb el mateix pes, i per tant, la informació que aporta cada dada contribueix amb el mateix grau d'importància en el model final.

El model B representa el model final quan la relació entre els errors és 3 i el pes del logaritme de la resistivitat aparent és superior al pes de la part real de la funció de transferència geomagnètica. El resultat, com es pot veure en la figura 2.5, mostra un

allargament en profunditat del cos conductor que no existeix en el model inicial de la figura 2.2.

Quan la inversió es porta a terme amb una raó inferior a la teòrica, el resultat és un model on les dades de la part real de la funció de transferència geomagnètica, o de la fase en la primera aplicació del mètode, tenen un pes superior a les dades de la resistivitat aparent. Pel contrari, quan la raó utilitzada en el procés de la inversió és superior a la teòrica, llavors es dóna més pes a les dades de la resistivitat aparent que a les de l'altra magnitud considerada. Un exemple d'aquest cas és el Model B de la figura 2.5.

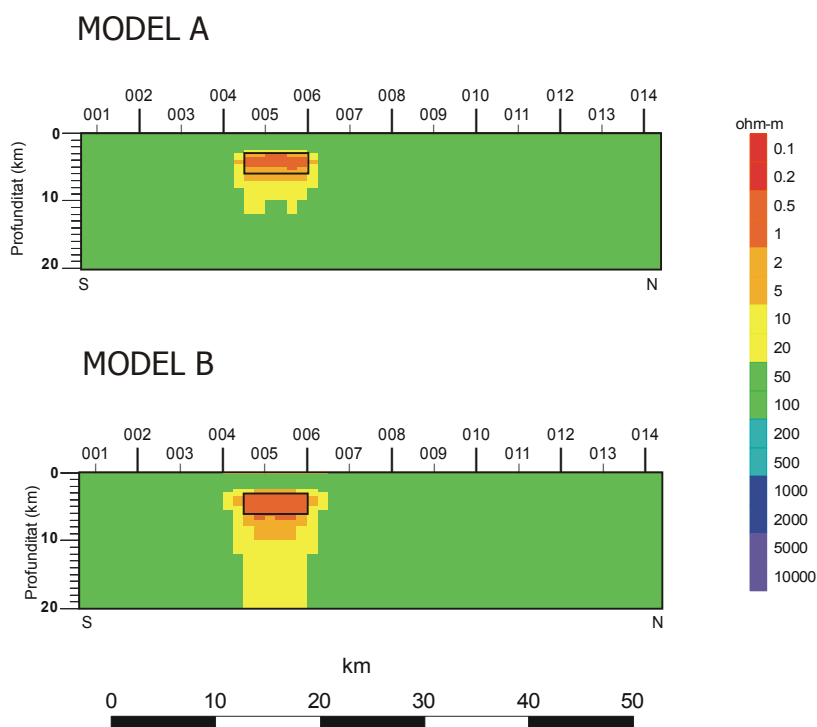


Figura 2.5. Models obtinguts després de la inversió del parell format per la resistivitat aparent i la part real de la funció de transferència geomagnètica utilitzant dos valors diferents del quocient entre els errors: Model A: model resultant de la inversió quan la raó val 0.23 i coincideix amb el valor teòric. Model B: model resultant quan la raó val 3.

En aquesta tècnica no s'ha aplicat cap distorsió sobre les dades sintètiques, per això, els models resultants de les inversions s'ajusten molt bé a les dades inicials trobant uns valors molt petits del paràmetre RMS, menors que la unitat. Ara bé, l'objectiu principal

del mètode és la determinació d'aquella relació entre els errors que aporta el millor model final, és a dir, el mínim valor del paràmetre RMS.

2.3.3 – APLICACIÓ A LES RESPOSTES EXPERIMENTALS

L'ús de la modelització és un primer pas alhora de confirmar el bon funcionament del mètode i de les relacions entre els errors, però no és suficient quan es tracten aspectes que normalment s'apliquen a casos reals, com és el cas de la prospecció geofísica. Per aquest motiu, el mateix procés que s'ha utilitzat amb les respostes sintètiques s'aplica sobre unes dades experimentals de bona qualitat, COPROD2 (Jones, 1993), adquirides al sud de Saskatchewan i Manitoba (Canadà). El perfil consta de 27 estacions i 19 freqüències distribuïdes en un interval que va des de 0.0014 Hz fins a 1 Hz.

2.3.3.1 – CAS 1: RESISTIVITAT APARENT - FASE

El fet de tractar amb dades experimentals obliga a considerar uns valors més elevats dels errors llindars, perquè qualsevol dada real té associada una certa discrepància en la seva determinació, és a dir, un error experimental que controla el pes de la mesura en el procés de la inversió. Malgrat l'existència d'aquest error individual en cada mesura, el procés que es planteja es basa igualment en l'error llindar, ja que és el valor que l'usuari de l'algorisme d'inversió pot modificar.

Els errors que s'utilitzen en aquest cas pel logaritme de la resistivitat aparent oscil·len entre 0.1 i 1 (10% a 100%, per l'error de ρ_a), i per a la fase entre 0.03 i 0.3 radians, mantenint un valor aproximadament constant al voltant de 0.03 pel producte entre ambdós, taula 2.3.

Els valors de la raó van des de 0.03 fins a 3 en l'escala logarítmica i el resultat després d'una mitjana de 11 iteracions per inversió es mostra en la figura 2.6.

La gràfica mostra una corba molt suau amb una certa desviació del mínim respecte del valor teòric, 0.5. El fet de tractar amb dades reals implica l'existència d'una certa discrepància en la determinació del mínim de la funció RMS, és a dir, existeix un soroll que contamina les dades mesurades i que és el causant d'aquest petit biaix. El mínim del paràmetre RMS s'aconsegueix quan la raó val 0.44.

error log res	error fase	raó	RMS mínim
0.1	0.3	3.00	1.9729
0.12	0.25	2.08	1.6933
0.15	0.2	1.33	1.4186
0.2	0.15	0.75	1.1785
0.23	0.13	0.57	1.0713
0.28	0.122	0.44	0.9618
0.3	0.1	0.33	0.9817
0.37	0.08	0.22	0.9839
0.5	0.06	0.12	1.0348
1	0.03	0.03	1.6147

Taula 2.3. Errors utilitzats en les dues respostes, quocient entre elles i valor del RMS.

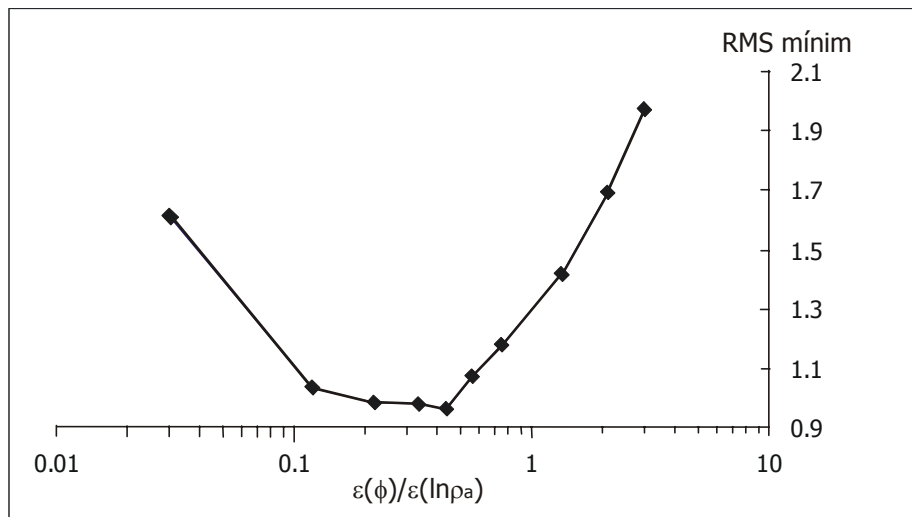


Figura 2.6. Comportament de la funció RMS respecte del quocient entre els errors de la fase, $\varepsilon(\phi)$, i del logaritme de la resistivitat aparent, $\varepsilon(\ln\rho_a)$, en l'escala logarítmica.

2.3.3.2 – CAS 2: RESISTIVITAT APARENT – PART REAL DE LA FUNCIO DE TRANSFERÈNCIA GEOMAGNÈTICA

En aquest darrer cas s'utilitzen uns errors que van des de 0.13 fins a 1 pel logaritme de la resistivitat aparent (13% a 100% per l'error de ρ_a) i des de 0.03 fins a 0.2 per a la part real de la funció de transferència geomagnètica, taula 2.4. El nivell del RMS es manté al voltant del valor 0.025 i el quocient entre ambdós errors oscil·la entre 0.03 i

1.54. El resultat es presenta en la figura 2.7, on es mostra la corba de la funció RMS respecte del quocient entre els errors del logaritme de la resistivitat aparent i la part real de la funció de transferència geomagnètica en l'escala logarítmica.

En aquest cas el valor màxim de la part real de la funció de transferència geomagnètica per a totes les estacions i per a totes les freqüències és troba en 0.75. Això implica que la raó determinada utilitzant la relació teòrica (2.13), és de 0.37.

error log res	error tipper	raó	RMS mínim
0.13	0.2	1.54	1.6293
0.15	0.15	1.00	1.5115
0.2	0.13	0.65	1.2896
0.25	0.11	0.44	1.1838
0.3	0.1	0.33	1.0836
0.36	0.08	0.22	1.0817
0.5	0.05	0.10	1.1211
0.66	0.043	0.07	1.1596
0.83	0.036	0.04	1.225
1	0.03	0.03	1.3922

Taula 2.4. Errors utilitzats en les dues respostes, quocient entre elles i valor del RMS.

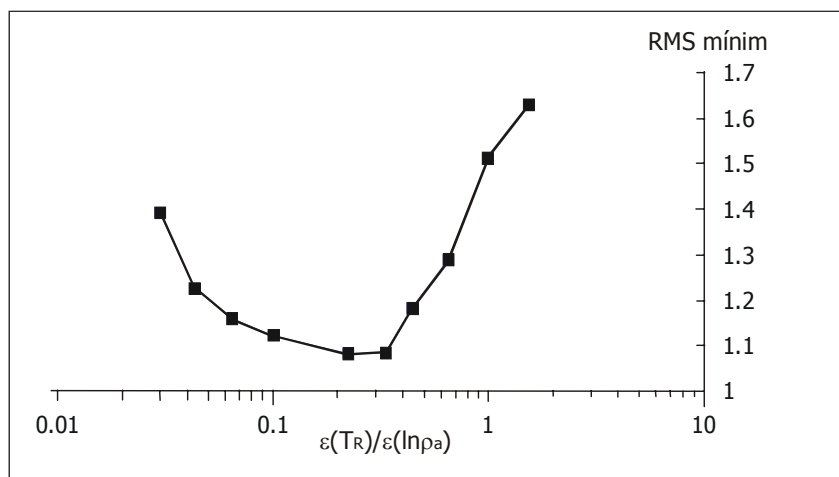


Figura 2.7. Comportament de la funció RMS respecte del quocient entre els errors de la part real de la funció de transferència geomagnètica, $\varepsilon(T_R)$, i del logaritme de la resistivitat aparent, $\varepsilon(\ln\rho_a)$, en l'escala logarítmica.

Si s'observa el gràfic de la figura 2.7, la funció obtinguda té un comportament suau fins arribar al valor mínim i posteriorment, el valor del RMS augmenta de forma abrupta. El mínim absolut de la funció RMS es troba localitzat entre els valors 0.22 i 0.33. Igualment, en aquest cas el resultat presenta una desviació respecte del valor teòric degut al soroll que contamina les dades reals.

2.3.3.3 – DISCUSSIÓ DELS RESULTATS

Els models que millor s'ajusten a les dades mesurades són aquells que presenten el mínim valor del RMS. Aquests models s'observen en la figura 2.8 i són totalment consistents amb alguns dels models presentats per Jones (1993).

El model A és el resultat d'invertir les respostes resistivitat aparent i fase utilitzant aquella raó entre errors que correspon al mínim de la corba RMS, la qual s'apropa considerablement al valor teòric que determina el mateix pes per a les dues respostes invertides.

El model B és el model que resulta quan la inversió utilitza les respostes resistivitat aparent i part real de la funció de transferència geomagnètica també amb el valor de la raó que correspon al mínim de la corba RMS.

En ambdós casos els models finals són molt assemblats. Les diferències més destacades es produeixen en la detecció dels cossos conductors. En el model A el cos situat entre les estacions E1 i 512 presenta unes dimensions més reduïdes que en el model B on el cos augmenta cap a l'est del perfil. També el cos conductor que es determina entre les estacions 505 i 503 té unes dimensions més gran en el model B, i a més a més, es localitza a una major profunditat que en el model A.

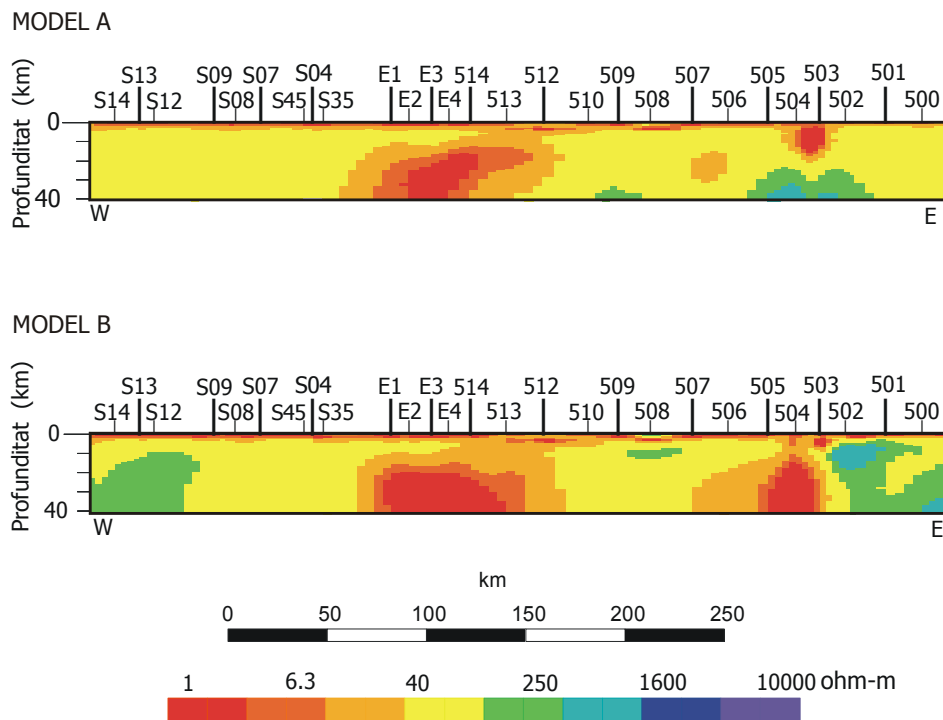


Figura 2.8. Models obtinguts després de la inversió per a les dades COPROD2 quan la raó utilitzada és la que correspon al mínim valor del RMS. Model A: model que resulta de la inversió de les dades resistivitat aparent i fase, raó = 0.44. Model B: model que resulta de la inversió de les dades resistivitat aparent i part real de la funció de transferència geomagnètica, raó = 0.33.

2.4 – MÈTODE ALTERNATIU PER DETERMINAR RELACIONS ENTRE LES RESPOSTES

En el cas que no es puguin obtenir relacions teòriques entre les respostes com les trobades en (2.3) o (2.13), és important disposar d'eines que permetin realitzar una estimació de la importància relativa entre les respostes.

El mètode dissenyat i aplicat en l'apartat 2.2.3 d'aquest capítol permet comprovar les relacions teòriques entre les diferents magnituds. Però no sempre és possible trobar relacions desenvolupades a partir d'equacions teòriques. En aquest apartat es presenta un mètode alternatiu per estimar aquestes relacions. El mètode ofereix un resultat aproximat quan no és possible realitzar un desenvolupament analític, però requereix

un volum important de càlcul. Seguidament, es presenta el desenvolupament del mètode alternatiu i la seva aplicació sobre les respostes sintètiques. El que fa atractiu aquest mètode és el fet que es puguin extreure relacions entre les respostes sense considerar les relacions analítiques dels apartats 2.2.1 i 2.2.2, i que els resultats coincideixin de forma satisfactòria amb les relacions analítiques, quan aquestes existeixen.

2.4.1 – DESCRIPCIÓ DEL MÈTODE

El procediment dissenyat es basa en l'estudi de la superfície RMS obtinguda després de realitzar inversions entre parelles de respostes que presenten diferents raons entre els seus errors. Les parelles de dades utilitzades són les mateixes que en el cas del mètode anterior, ja que l'objectiu és igualment obtenir les relacions dels apartats 2.2.1 i 2.2.2: la relació entre l'error del logaritme de la resistivitat aparent i l'error de la fase, i la relació entre l'error del logaritme de la resistivitat aparent i l'error de la part real de la funció de transferència geomagnètica.

La metodologia utilitzada es divideix en quatre parts, les quals es descriuen a continuació.

I) En primer lloc, es trien dos models diferents els quals han de presentar les mateixes dificultats o facilitats alhora d'aplicar el procés de la inversió. En aquest treball s'ha considerat un model i la seva imatge mirall, és a dir, el seu simètric. Amb això, s'aconsegueix que els dos models tinguin "tècnicament" la mateixa resposta però sobre estacions diferents del perfil.

A continuació, es generen les respostes sintètiques amb l'algorisme de modelització bidimensional Wannamaker *et al.* (1986).

El conjunt de dades obtingut de cada model consta de les respostes magnetotel·lúriques: resistivitat aparent, fase i part real i part imaginària de la funció de transferència geomagnètica.

II) Per a realitzar les inversions es construeix una combinació formada per dues respostes magnetotel·lúriques, on cadascuna d'elles procedeixen d'un dels models creats. L'esquema presentat en la figura 2.9 descriu aquest procés.

Així, per exemple, per estudiar la relació entre l'error del logaritme de la resistivitat aparent i l'error de la fase s'inverteix el conjunt de dades format per la resistivitat aparent del model 1-A i per la fase del model 1-B.

El mateix succeeix quan s'investiga la relació entre l'error del logaritme de la resistivitat aparent i l'error de la part real de la funció de transferència geomagnètica. El conjunt de dades que serveix com a fitxer d'entrada de la inversió està format per la resistivitat aparent del model 1-A i per la part real de la funció de transferència geomagnètica del model simètric, model 1-B.

Donat que aquesta tècnica treballa amb dades sintètiques, cada resposta té assignat un valor de l'error llindar, *error floor*.

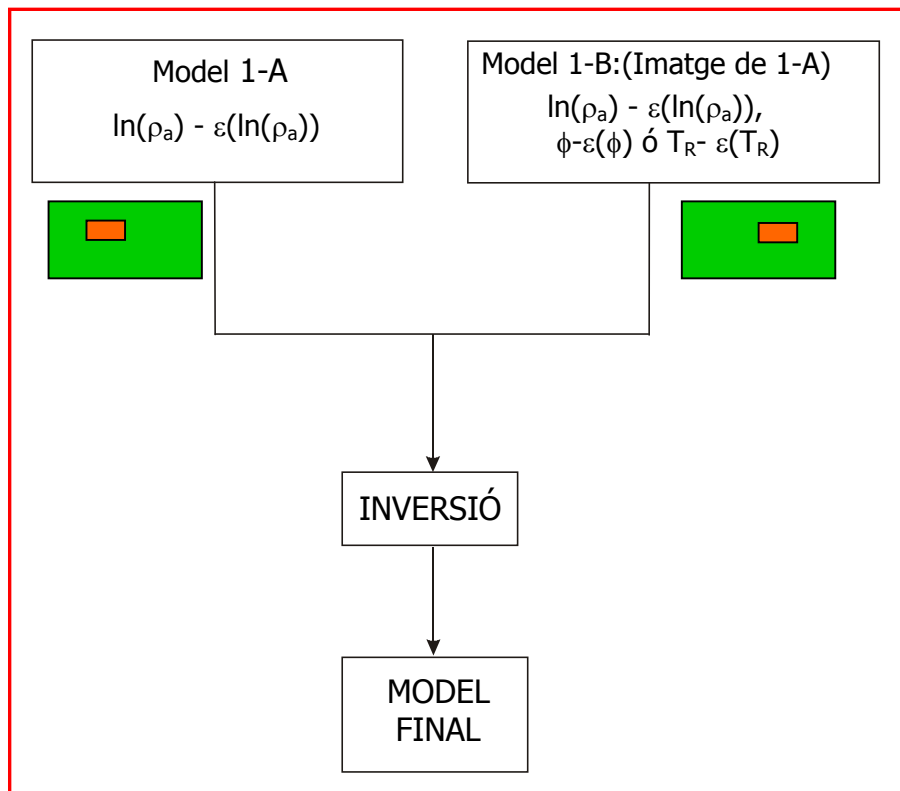


Figura 2.9. Esquema del procés dissenyat per a realitzar la inversió utilitzant les dades procedents de dos models diferents, on un model és la imatge de l'altre. El model final representa aquell model amb un ajust més bo, és a dir, amb el mínim valor del RMS.

El programa d'inversió bidimensional que s'utilitza, REBOCC (Siripunvaraporn i Egbert, 2000), permet aplicar aquesta estratègia. La inversió d'un conjunt de dades format per dues respostes que representen models diferents amb els seus respectius errors.

III) El paràmetre RMS s'utilitza per quantificar l'ajust del model resultant de la inversió. Com s'ha comentat en el primer mètode, per poder controlar la influència de les respostes en l'algorisme d'inversió REBOCC, es treballa amb el valor de l'error llindar, *error floor*. Per això, es repeteixen les inversions variant els valors dels errors llindars i es construeix una representació de la superfície RMS respecte els errors de les dades.

Com les respostes invertides corresponen a dos models diferents, però simètrics entre ells, el model final després de la inversió recupera una imatge que reflexa les característiques dels dos models inicials en funció del pes assignat a cadascuna de les respostes.

IV) Analitzant la superfície RMS en l'espai dels errors, és possible identificar de forma estimada la localització d'una recta que indica el canvi de comportament, i a partir d'ella, extreure el quocient entre els errors. Aquesta anàlisi es descriu en el proper apartat.

2.4.2 – SUPERFÍCIE RMS

El comportament de la superfície RMS es descriu d'una manera esquemàtica en la figura 2.10, on els eixos de la gràfica es troben en l'escala logarítmica i on s'identifiquen tres regions diferents en funció dels pesos de les respostes invertides.

Seguint el gràfic de la figura 2.10, quan d'ambdues dades presenten errors petits, l'ajust és pobre ja que els errors associats restringeixen molt el model final. Pel contrari, en el cas que ambdues dades presentin errors grans, el model final no presenta gaires restriccions i, en conseqüència, molts models es poden ajustar a les dades originals, aportant un valor baix del paràmetre RMS segons la relació (2.14). Finalment, quan una de les dades presenta un error petit i l'altra dada presenta un error gran, el model que resulta de la inversió ajustarà molt millor aquella dada que presenti l'error petit, ja que implica que té associat un pes superior en el procés de la inversió. El valor del RMS en aquest cas serà un valor intermedi.

A causa que s'estan considerant parells de dades en el procés, la superfície RMS presenta dues zones de valor mig. Cadascuna d'aquestes zones ajusta aquella dada que s'inverteix amb un valor més petit de l'error, és a dir, amb un pes major. Així,

aquestes dues parts queden unides per una zona de transició on es compleix la característica que ambdues respostes posseeixen el mateix pes en la inversió, zona ratllada de la figura 2.10, i on es pot definir l'equació d'aquesta recta:

$$\log(\varepsilon(Y)) = a\log(\varepsilon(X)) + b \longrightarrow \frac{\varepsilon(Y)}{\varepsilon(X)} = 10^b \quad (2.15)$$

El pendent de la recta és la unitat, perquè es considera que existeix una relació lineal entre els errors de les dades invertides. Per tant, el terme independent és el paràmetre que aporta directament la raó entre els errors llindars.

L'objectiu del mètode proposat és determinar el terme independent d'aquesta recta que passa per sobre de la zona de transició de la superfície RMS. Zona que indica que les dades involucrades es tracten amb la mateixa influència o pes en el procés de la inversió. Com aquesta zona de transició no presenta un canvi abrupte, hi ha una simplificació d'aproximar-la a una recta, i per això es considera que el mètode que es descriu aporta una estimació de la raó entre els errors.

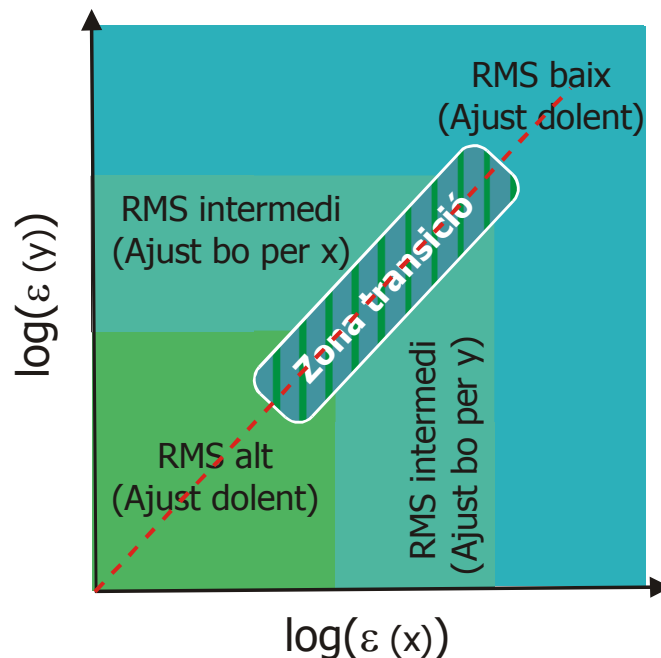


Figura 2.10. Esquema que descriu el comportament de la superfície RMS en funció dels errors assignats a les dades (X, Y) que s'utilitzen en el procés de la inversió i, en vermell i discontinu, representació de la recta definida en l'equació (2.15).

2.4.3 – APLICACIÓ DEL MÈTODE

Aquesta tècnica s'aplica sobre dades sintètiques obtingudes a partir de models bidimensionals simples, els quals permeten un millor control de la qualitat de les dades a invertir. Les respostes magnetotel·lúriques en la polarització E es determinen a partir de l'algorisme de modelització Wannamaker *et al.* (1986) en 18 estacions i 13 freqüències, des de 0.0008 Hz fins a 8 Hz, i la distància entre dues estacions consecutives del perfil és de 6 km.

Per tal de comprovar que els resultats no depenen de l'estructura escollida s'utilitzen dos parells de models. El primer parell de models consisteix en un medi de $100 \Omega \cdot m$ on es localitza un cos conductor de $1 \Omega \cdot m$ a una profunditat de 3.1 km de la superfície. L'estructura presenta una secció rectangular de 7.5 km x 3 km, figura 2.11. El segon parell de models consisteix en un contacte vertical entre dos medis de $20 \Omega \cdot m$ i $500 \Omega \cdot m$, figura 2.12.

A partir d'aquests models es construeixen els següents conjunts de dades sintètiques:

- a) Dels models de les figures 2.11 i 2.12, designats amb la lletra A, només s'utilitza la resposta de la resistivitat aparent.
- b) Els models designats amb la lletra B, models mirall, s'utilitza la resistivitat aparent, la fase o la part real de la funció de transferència geomagnètica, però de forma independent, és a dir, només una d'aquestes respostes intervé en la inversió.

Seguint amb l'esquema exposat anteriorment, una vegada es coneix la combinació de dades a invertir, el mètode requereix assignar un error lliure a cadascuna de les dues respostes que varia entre 0.002 i 1 en l'escala logarítmica (tres valors per dècada logarítmica). Així, es realitzen aproximadament 50 inversions per a cada parell de dades. Es realitza una mitjana de 20 iteracions i en cada iteració es calcula la qualitat de l'ajust a partir del paràmetre RMS. Aquella iteració que posseeix el mínim RMS és la que es considera que s'ajusta millor a les dades originals, i per tant, és el valor que s'utilitzarà per a representar la superfície RMS.

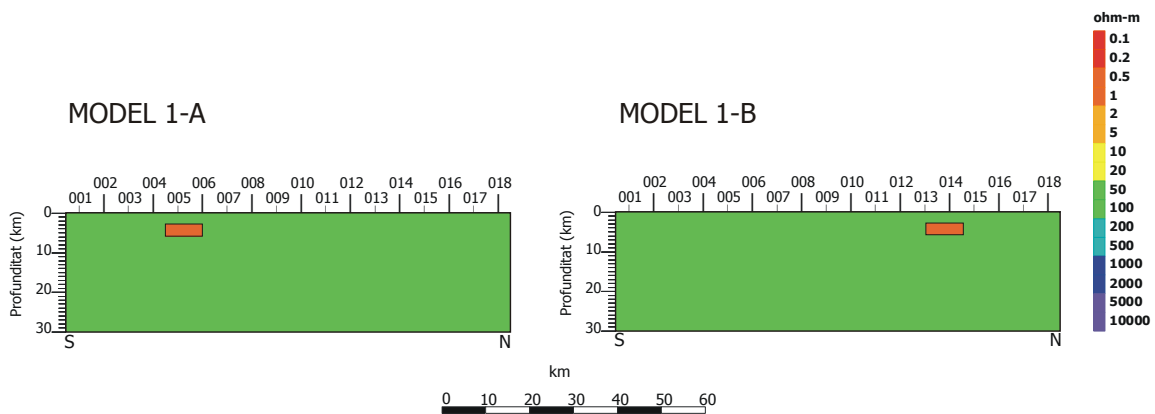


Figura 2.11. Primer parell de models utilitzats per aplicar el mètode de verificació de les relacions entre els errors, el qual precisa de models simètrics entre ells.

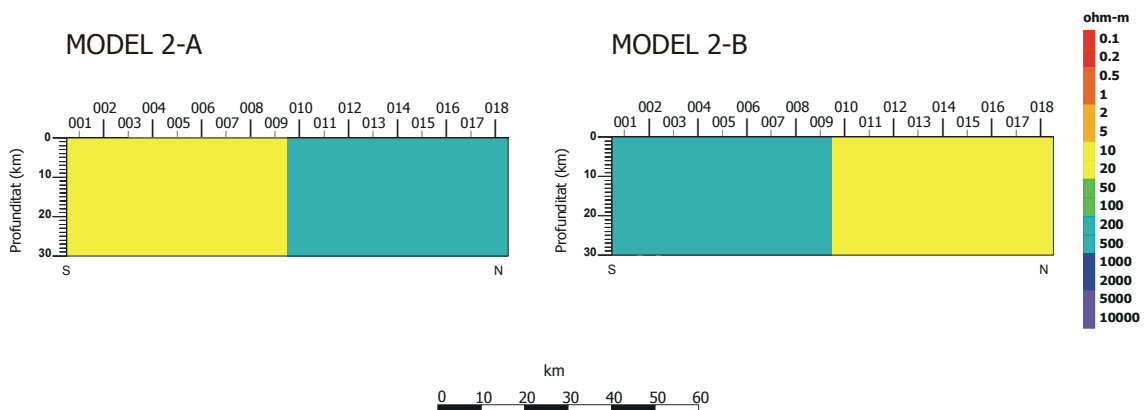


Figura 2.12. Segon parell de models utilitzats per aplicar el mètode de verificació de les relacions entre els errors, el qual precisa de models simètrics entre ells.

2.4.4 – RESULTATS

Es presenten en aquest apartat els resultats obtinguts amb aquest nou mètode que permet obtenir una raó aproximada dels errors sense tenir en compte les relacions analítiques deduïdes en els apartats 2.2.1 i 2.2.2. Els resultats es presenten en funció dels quatre casos analitzats.

2.4.4.1 - CAS 1: RESISTIVITAT APARENT- RESISTIVITAT APARENT (MODELS 1A – 1 B)

Aquest primer cas serveix per verificar el funcionament d'aquest mètode. És evident que quan dues respostes del mateix tipus presenten el mateix error en la inversió, el seu pes o influència en el model final és també el mateix. Quan aquesta idea s'aplica sobre la resistivitat aparent s'obté el gràfic de la figura 2.13, on queda perfectament determinada la zona de transició sobre la superfície RMS descrita en l'apartat 2.3.2. El comportament de la superfície RMS i els models en tres punts en concret s'observen en la figura 2.13.

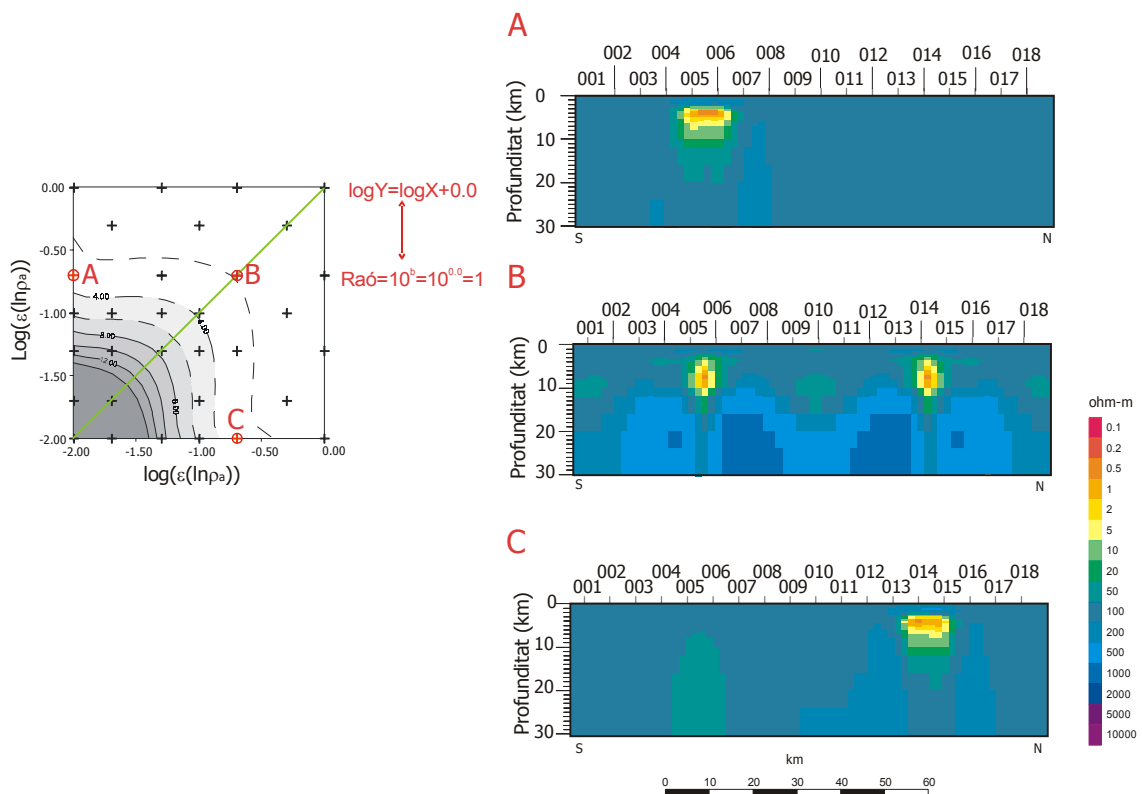


Figura 2.13 Esquerra: Representació de la superfície RMS. En verd es representa la recta que senyala la zona de transició. Dreta: Models que resulten de la inversió en els punts A, B i C.

La recta de color verd passa exactament per sobre del canvi de curvatura de les línies de nivell identificant la zona de transició descrita en la figura 2.10. Aquesta zona indica que les dues respostes utilitzades en la inversió tenen la mateixa influència en el model

final. La recta de pendent la unitat passa exactament per l'origen de coordenades de la gràfica, de manera que és senzill deduir la seva equació i per tant, la raó entre els errors:

$$\log(\varepsilon(\ln(\rho_a))) = \log(\varepsilon(\ln(\rho_a))) + 0 \quad (2.16)$$

$$\frac{\varepsilon(\ln \rho_a)}{\varepsilon(\ln \rho_a)} = 10^b = 10^0 = 1$$

En el model A s'observa la recuperació d'un sol cos conductor en les primeres estacions del perfil. Aquest resultat evidencia que en aquest cas s'han invertit dues dades amb pesos molt diferents, i en conseqüència, només s'ha recuperat aquella dada que té una influència superior en el procés de la inversió. Si s'observa la superfície RMS, el model A correspon al cas on els errors valen 0.01 i 0.2, és a dir la resposta del model 1-A té un pes més gran i és la dada que domina la solució de la inversió. La informació que aportava la resistivitat aparent del model 1-B no es reflecteix en el model final.

Pel contrari, en el model B, quan els errors valen 0.2 i 0.2, el resultat mostra els dos cossos conductors en les posicions correctes, reflectint que la informació que aporta cada resposta es tracta amb el mateix pes.

Finalment, en el model C succeeix el cas oposat al model A, amb uns valors dels errors corresponents a 0.2 i 0.01. El resultat és que es recupera amb més claredat el model representat per la resistivitat aparent procedent del model 1-B. Aquesta dada té assignat un pes superior respecte de la resistivitat aparent del model 1-A.

2.4.4.2 - CAS 2: RESISTIVITAT APARENT- FASE (MODELS 1 A – 1 B)

Aquesta aplicació permet verificar de nou la metodologia en el cas d'utilitzar una altra relació perfectament establerta. És el cas de la raó entre l'error de la fase i del logaritme de la resistivitat aparent. Observant de nou el comportament de la superfície RMS en la figura 2.14 i tenint en compte la recta de pendent unitat que se superposa i que identifica la zona de transició, s'estima la següent equació en l'espai logarítmic:

$$\log(\varepsilon(\phi)) = \log(\varepsilon(\ln(\rho_a))) - 0.3 \quad (2.17)$$

$$\frac{\varepsilon(\phi)}{\varepsilon(\ln \rho_a)} = 10^b = 10^{-0.3} = 0.5$$

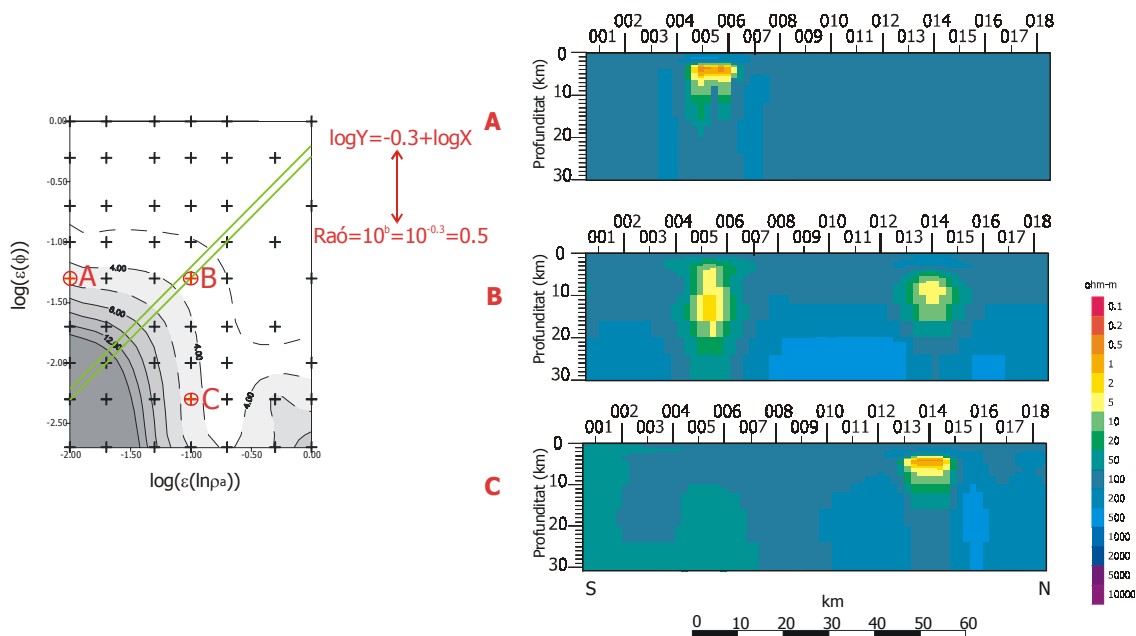


Figura 2.14 Esquerra: Representació de la superfície RMS. En verd es representen les rectes que senyalen la zona de transició. Dreta: Models que resulten de la inversió en els punts A, B i C.

En aquest cas s'ha identificat una possible zona de transició on les dades s'inverteixen amb el mateix pes, però no una recta exacta. Els tres models obtinguts en els punts A, B i C, es mostren també en la figura 2.14.

La superfície RMS en el punt A té associats els errors de 0.05 per a la fase i 0.01 pel logaritme de la resistivitat aparent, és a dir, aquesta darrera resposta presenta un pes bastant més important que el de la fase. Així, la informació que aporta la fase, model 1-B, està totalment menyspreada en el model final de la inversió i no es reflecteix en ell. Pel contrari, en el model B, s'observa la recuperació dels dos models inicials introduïts a partir de les respostes, $\ln \rho_a$ i ϕ . L'error del $\ln(\rho_a)$ és 0.1 i l'error de ϕ és 0.05, de manera que el quocient o raó entre aquests errors coincideix amb la relació teòrica (2.4). El model obtingut en aquest cas reflecteix una inversió on la informació aportada per cada resposta es tracta amb el mateix pes.

Finalment, en el model C, és la fase la resposta que presenta una influència més gran amb un valor de l'error de 0.005 en front del valor de 0.1 que s'associa a l'error del logaritme de la resistivitat aparent.

2.4.4.3 - CAS 3: RESISTIVITAT APARENT – PART REAL DE LA FUNCIÓ DE TRANSFERÈNCIA GEOMAGNÈTICA (MODELS 1 A – 1 B)

El tercer cas s'aplica sobre l'error del logaritme de la resistivitat aparent i l'error de la part real de la funció de transferència geomagnètica. La recta que es dedueix a partir de la figura 2.15 es descriu a continuació:

$$\log(\varepsilon(T_R)) = \log(\varepsilon(\ln(\rho_a))) - 0.6 \quad (2.18)$$

$$\frac{\varepsilon(T_R)}{\varepsilon(\ln \rho_a)} = 10^b = 10^{-0.6} = 0.25$$

Utilitzant el diagrama de superfície es pot determinar la zona de transició, curvatura de les línies de nivell del paràmetre RMS, i assignar un valor al voltant de -0.6 pel terme independent de la recta, b . Per tant, es pot deduir un valor aproximat del quocient entre els errors del logaritme de la resistivitat aparent i la part real de la funció de transferència geomagnètica per aquest model en concret. Tal com mostra l'equació (2.18) aquest valor seria proper a 0.25.

Els models que es representen en la part dreta de la figura 2.15 corresponen a uns valors de la raó de 5, 0.25 i 0.01.

En el model B de la figura es detecten els dos cossos conductors encara que no amb la mateixa intensitat. Això pot ser degut a problemes numèrics del mètode, però el resultat important, és que s'obté una relació aproximada entre els errors, on la informació de les dues dades es tracta amb la mateixa influència en la inversió. La raó obtinguda per aquest model és un valor molt proper al valor que es calcula a partir del desenvolupament teòric de l'apartat 2.4, el qual dona un resultat de 0.23.

Igual que en el cas anterior, els models A i C, són el resultat d'invertir les dades amb pesos diferents. En el cas del model A, només es recupera el model que està representat per la resistivitat aparent mentre que el model C, només ajusta el model que està representat per la part real de la funció de transferència geomagnètica.

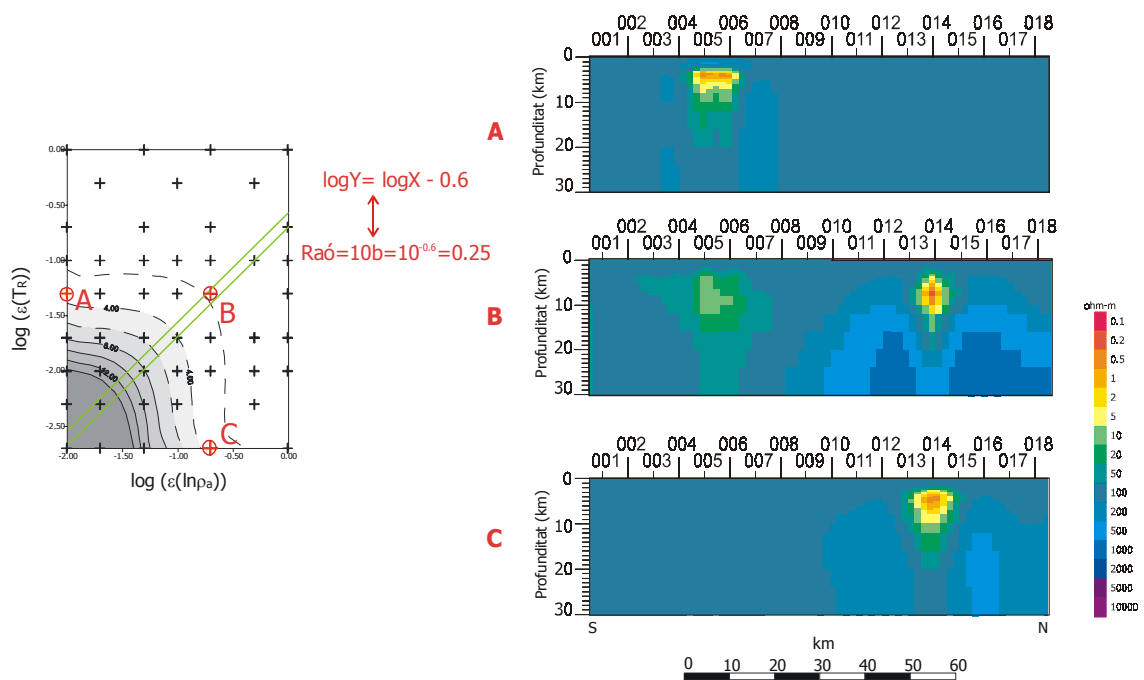


Figura 2.15 Esquerra: Representació de la superfície RMS. En verd es representen les rectes que senyalen la zona de transició. Dreta: Models que resulten de la inversió en els punts A, B i C.

2.4.4.4 - CAS 4: RESISTIVITAT APARENT – PART REAL DE LA FUNCIÓ DE TRANSFERÈNCIA GEOMAGNÈTICA (MODELS 2 A – 2 B)

Finalment, per tal d'observar la dependència amb els models que s'inverteixen, s'aplica el mateix mètode sobre l'error del logaritme de la resistivitat aparent i l'error de la part real de la funció de transferència geomagnètica pels models 2-A i 2-B de la figura 2.12. La recta que resulta a partir del diagrama de la superfície RMS de la figura 2.16, presenta la següent equació final:

$$\log(\epsilon(T_R)) = \log(\epsilon(\ln(\rho_a))) - 0.55 \quad (2.19)$$

$$\frac{\epsilon(T_R)}{\epsilon(\ln \rho_a)} = 10^b = 10^{-0.55} = 0.28$$

El terme independent presenta un valor proper a -0.55 , i per tant, el quocient entre els errors o la raó és de 0.28. Els models resultants de les inversions es presenten en la figura 2.16 pels tres punts A, B i C.

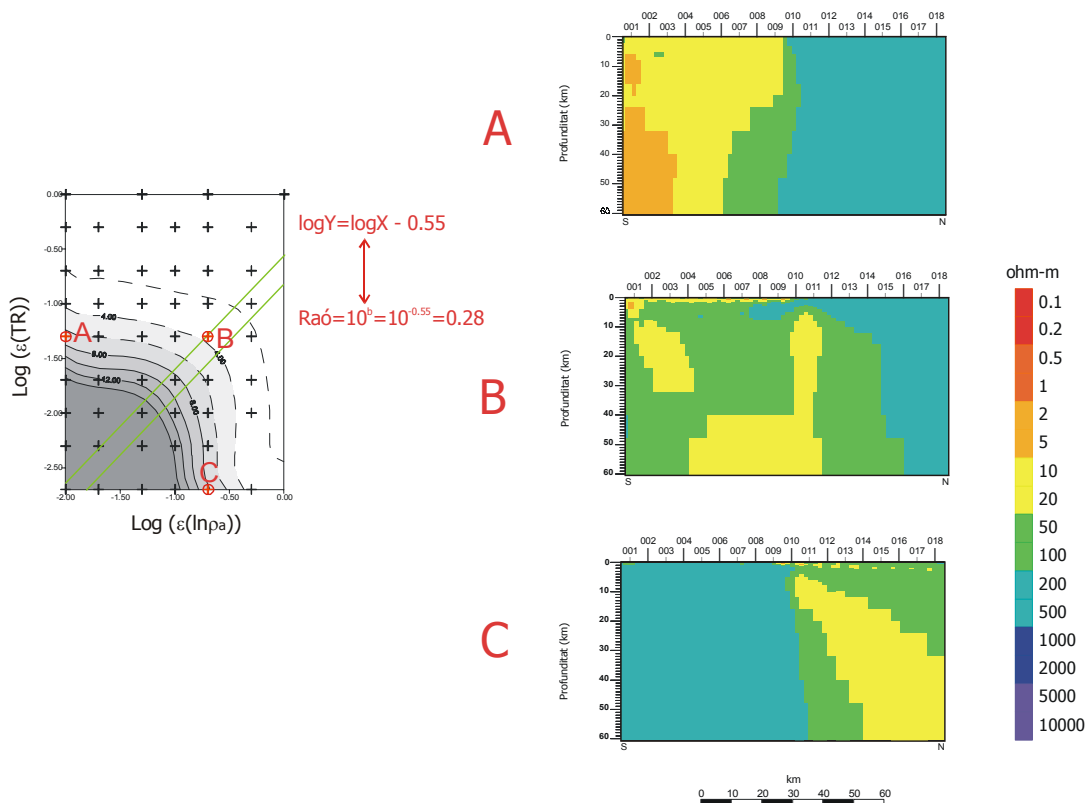


Figura 2.16 Esquerra: Representació de la superfície RMS. Les rectes dibuixades en color verd representen la zona de transició. Dreta: Models que resulten de la inversió en els punts A, B i C.

El punt A mostra el model obtingut després d’invertir les dades amb una raó de 5. En aquest cas la resistivitat aparent té una influència més gran, i per tant, es recupera el model representat per aquesta magnitud. El model 2-A, el qual situa el medi conductor de $20 \Omega \cdot \text{m}$ en les primeres estacions del perfil magnetotel·lúric.

El model B és el resultat de considerar un pes similar entre les dues dades. El model que s’observa no presenta un canvi lateral clar entre els dos medis de conductivitat diferent. Buscant el valor màxim de la part real de la funció de transferència geomagnètica per aquest model en concret es troba un valor de 0.56, i per tant, la relació teòrica entre els errors d’aquestes dues magnituds és de 0.28, exactament el

mateix valor obtingut amb aquest mètode alternatiu.

Finalment, el punt C mostra el model quan la raó entre els errors val 0.01 i la influència més gran en la inversió l'aporta la part real de la funció de transferència geomagnètica, model 2-B.

2.4.4.5 – DISCUSSIÓ DELS RESULTATS

Les estimacions de les raons entre els errors obtingudes amb l'aplicació d'aquesta tècnica coincideixen amb els valors que es troben a partir de les relacions teòriques.

El mètode alternatiu aporta una bona estimació de la relació entre les diferents magnituds magnetotel·lúriques, però al mateix temps requereix en temps de computació important, ja que s'han realitzat unes 50 inversions per a cada raó.

L'aplicació d'aquest tipus de mètodes quan es tenen en compte dades procedents de diferents orígens permet deduir relacions senzilles entre diferents paràmetres sense conèixer les corresponents equacions analítiques. Aquest és un aspecte molt interessant de la tesi que podria considerar-se en treballs futurs per a la integració de les respostes de magnetotel·lúrica conjuntament amb la resposta de l'exploració elèctrica.

2.5 - DISCUSSIÓ I CONCLUSIONS

En el mètode magnetotel·lúric existeixen respostes que en general, queden millor determinades que altres. Així, normalment la mesura de la impedància és més acurada que la funció de transferència geomagnètica, i quan s'introdueixen les dues respostes en el procés de la inversió, el model final pateix un biaix cap a les dades mesurades amb una major precisió. Cada tipus de resposta magnetotel·lúrica detecta de manera diferent les estructures del subsòl i aporta una informació també diferent en el model final. Per aquesta raó, és important que totes les dades tinguin la mateixa influència a l'hora d'aplicar el problema invers.

Com ha estat tractat en aquest capítol, el pes de les dades està controlat per l'error que tenen associat, i la raó entre els diferents tipus de dades magnetotel·lúriques és una mesura de la seva influència en el procés de la inversió.

L'estudi que es presenta mostra clarament aquest comportament entre les respostes aportant una nova relació entre l'error de la impedància i l'error de la funció de transferència geomagnètica. Aquesta raó deduïda a partir de la llei de Faraday, es pot aplicar a les diferents respostes. En aquest estudi s'ha plantejat entre la part real de la funció de transferència geomagnètica i la resistivitat aparent per trobar la raó $\varepsilon(T_R)/\varepsilon(\ln(\rho_a))$. El mateix desenvolupament es podria estendre a altres casos com per exemple la relació entre la resistivitat aparent i la part imaginària, $\varepsilon(T_I)/\varepsilon(\ln(\rho_a))$, o la part imaginària i la fase, $\varepsilon(T_I)/\varepsilon(\phi)$.

Les dues expressions treballades presenten algunes diferències. Per un costat es presenta la relació, ja coneguda i totalment acceptada, entre els errors de la fase i del logaritme de la resistivitat aparent. Aquesta raó és un valor fix que no depèn de les pròpies respostes mesurades.

$$\frac{\varepsilon(\phi)}{\varepsilon(\ln(\rho_a))} = \frac{1}{2}$$

Pel contrari, tal com mostra la següent equació, la relació entre els errors del logaritme de la resistivitat aparent i la funció de transferència geomagnètica depèn del mòdul d'aquesta darrera magnitud. Això implica que la raó varia per a cada conjunt de dades utilitzades, i a més a més, canvia per a cada freqüència i per a cada estació en funció del valor de la resposta, T .

$$\frac{\varepsilon(T_R)}{\varepsilon(\ln(\rho_a))} \geq \frac{|T|}{2}$$

Per tal d'evitar aquesta dependència, es determina una fita inferior amb la utilització del valor màxim de la funció de transferència geomagnètica en una freqüència i estació del perfil.

$$\frac{\varepsilon(T_R)}{\varepsilon(\ln(\rho_a))} = \frac{\text{màx}(|T|)}{2}$$

En molts casos les mesures del mòdul de la funció de transferència geomagnètica són valors inferiors a la unitat. Si s'accepta aquest valor com un límit per aquesta magnitud

i se substitueix en la relació anterior, s'obté el valor de 0.5 proposat per Ogawa *et al.* (1996). Aquest valor correspon al cas d'una màxima influència en el model de la funció de transferència geomagnètica.

La selecció dels errors que intervenen en la inversió és un aspecte important i es realitza en funció dels errors experimentals. L'ajust del model final depèn en part dels pesos associats a les dades, ja que el fet que aquests siguin massa grans o massa petits, limita el bon resultat del procés de la inversió. Per això, no resulta senzill realitzar l'elecció dels errors corresponents a cada resposta quan es volen invertir totes elles amb la mateixa influència. L'estudi que es presenta en aquest capítol resol de forma satisfactòria el problema utilitzant les relacions entre els errors de les diferents respostes magnetotel·lúriques.

Existeixen, però, casos on la intenció és totalment oposada. Per exemple, pot succeir que les dades mesurades de la resistivitat aparent i la fase, es trobin distorsionades a causa de la presència d'estructures superficials. En aquest cas seria convenient realitzar la inversió associant un pes superior a la funció de transferència geomagnètica per tal que el model final presenti un millor ajust.

La influència de les diferents respostes en el procés de la inversió és un problema important quan es volen integrar dades geofísiques procedents de diferents orígens. Aquesta és una situació que es pot considerar habitual en el mètode magnetotel·lúric, quan s'incorporen totes les respostes en la inversió. Per això els resultats trobats són d'utilitat per dos motius diferents.

- i. En primer lloc, es pot observar quina de les dades exerceix una major influència en la inversió, a través de les relacions teòriques entre els errors.
- ii. En segon lloc, permet optimitzar el procés de la inversió.