

CONCLUSIONS

L'objectiu d'aquesta tesi ha estat estudiar dos mètodes geofísics diferents. Per un costat el mètode de prospecció magnetotel·lúric basat en la mesura de les variacions del camp electromagnètic natural, i per una altra banda, el mètode de prospecció elèctrica de corrent continu basat en la injecció del corrent elèctric en el subsòl terrestre per a mesurar la diferència de potencial elèctric.

El fet d'estudiar dues tècniques de prospecció diferents és la raó per la qual aquesta tesi presenta una estructura diferenciada en dos grans temes: el mètode magnetotel·lúric i el mètode de prospecció elèctrica. Existeix, però, una relació important entre ells, aquests mètodes poden aportar informació complementària de la resistivitat elèctrica a diferents fondàries del subsòl. La integració de les seves respostes és una qüestió important per a millorar les interpretacions.

Aquesta tesi és un estudi rigorós amb aportacions innovadores en el tractament de les respostes procedents de cadascun dels dos mètodes.

Les conclusions extretes s'han assenyalat en cada un dels capítols de la tesi, però en aquest apartat, es presenten les aportacions de cada tema amb una visió més global.

Integració de les diferents respostes magnetotel·lúriques

Aquest estudi se centra en un aspecte totalment innovador, l'anàlisi dels errors de les respostes magnetotel·lúriques. La importància relativa que les diferents

respostes magnetotel·lúriques presenten en el procés de la inversió no ha estat una qüestió àmpliament estudiada, però, pel contrari, té un interès considerable per a millorar la interpretació de les dades.

Aquesta qüestió permet que la informació procedent de les diferents respostes en el procés de la inversió tingui la mateixa influència mitjançant els errors que aquestes tenen associats.

La relació entre l'error de la resistivitat aparent i l'error de la fase és una expressió totalment coneguda i acceptada. El desenvolupament teòric d'aquest problema ha permès deduir una nova expressió per a relacionar l'error de la funció de transferència geomagnètica amb l'error de qualsevol de les altres respostes del mètode.

Els resultats obtinguts han estat comprovats mitjançant un mètode numèric, el qual ha estat aplicat a dades sintètiques i a dades reals. En primer lloc, la utilització de les relacions conegudes ha permès comprovar el correcte funcionament del mètode numèric, i en segon lloc, s'han comprovat les expressions entre els errors deduïdes analíticament. La tècnica numèrica utilitzada en aquest capítol ha permès adquirir un coneixement molt ampli dels diferents aspectes que envolten el tractament de les dades en la solució del problema invers. Encara que en aquest cas, s'han utilitzat respostes magnetotel·lúriques, aquest estudi permet afrontar la implementació de l'algorisme de la inversió en la prospecció elèctrica, el qual es descriu en el capítol 6, amb uns coneixements importants que faciliten la realització del programa.

Finalment, una darrera aportació d'aquest capítol és la introducció d'un mètode alternatiu per a determinar les relacions entre els errors de les diferents respostes. L'avantatge d'aquest procés és que no precisa d'un desenvolupament teòric per a conèixer les relacions entre les diferents dades. Aquest procediment es podrà aplicar al cas de la integració de les dades geofísiques procedents de diferents mètodes d'exploració com són les dues tècniques considerades en aquesta tesi: el mètode magnetotel·lúric i el mètode elèctric.

Els resultats obtinguts han estat satisfactoris, tot i que presenten una certa incertesa que fa que es considerin com aproximats.

Nou mètode per a la correcció de la distorsió galvànica

La distorsió galvànica és un dels problemes o limitacions més comú en el mètode magnetotel·lúric. Aquest fenomen afecta a les respostes mesurades que estan relacionades amb el camp elèctric (resistivitat aparent i fase) i està causat per la presència d'inhomogeneïtats o cossos en els metres més superficials del subsòl terrestre. Així, abans de dur a terme la interpretació de les dades mesurades, és necessari corregir el seu efecte. Per això, es presenta un nou mètode per a identificar i corregir aquest fenomen sobre les estructures regionals bidimensionals. El mètode és aplicable a les dues polaritzacions o modes, TE i TM, es basa en les equacions de Maxwell, i utilitza només les respostes del mètode, impedància i funció de transferència geomagnètica.

El funcionament d'aquesta nova tècnica és molt satisfactori tant sobre dades sintètiques com sobre dades experimentals i destaca per la seva senzillesa de càlcul. En aquesta línia, un dels treballs futurs que caldria considerar és la implementació del mètode en els programes d'inversió en 2-D per a què la correcció de la distorsió galvànica es realitzi de manera automàtica.

Els estudis presentats fins aquest moment han tractat dos aspectes importants del mètode magnetotel·lúric que permeten millorar la interpretació de les dades mitjançant la utilització de la inversió. El mètode magnetotel·lúric pot presentar dificultats alhora d'estudiar les estructures més superficials del subsòl, per això s'ha considerat un segon mètode d'exploració, el mètode elèctric, i s'estudien també noves tècniques i procediments que milloren el tractament de les dades.

Modelització en la prospecció elèctrica

Aquest capítol de la memòria presenta un programa de modelització en 2-D que permet determinar la resposta elèctrica de qualsevol tipus d'estructura complexa de la qual no es pot obtenir la seva solució analítica.

En aquest algorisme s'incorporen noves tècniques que milloren el temps de computació i determinen amb una bona resolució la resposta elèctrica. Les millores o noves aportacions es produeixen en punts molt concrets de

l'algorisme: 1) la utilització de dues malles que se superposen, una malla defineix el model i l'altra depèn del tipus de dispositiu i controla la precisió numèrica; 2) un nou mètode per a determinar el potencial elèctric antitransformat mitjançant tres valors de k_y ; 3) la incorporació de la topografia, i 4) l'adaptació del programa per poder realitzar perfils elèctrics, tant per a perfils de sondejos elèctrics verticals, com per a la tomografia elèctrica, en particular, per a les configuracions Dipol-Dipol i Wenner-Schlumberger.

La simulació s'aplica en moltes ocasions per a conèixer la resposta abans de realitzar la campanya de prospecció elèctrica. Això permet dissenyar la campanya de forma adient, determinant quina configuració és la més sensible per aquella composició concreta del terreny i quina és la seva profunditat d'investigació.

Les dades mesurades en el camp no poden ser interpretades directament com les estructures del subsòl, perquè aquestes només són la resposta del terreny a una determinada injecció de corrent elèctric. Per realitzar una correcta interpretació és necessari solucionar el problema invers. El control absolut sobre la resolució del problema directe permet afrontar la inversió amb bones perspectives, perquè aquest últim procés requereix obtenir la resposta elèctrica en cadascuna de les iteracions.

El problema invers en la prospecció elèctrica

El model de distribució de la resistivitat elèctrica del subsòl es determina mitjançant la resolució del problema invers. Encara que existeixen nombrosos programes per a resoldre el procés de la inversió, cal tenir una visió crítica sobre aquests, perquè moltes vegades aporten interpretacions poc realistes que no són compatibles amb altres dades geològiques o geofísiques.

La creació d'un programa d'inversió en dos dimensions, al contrari que en els programes comercials, permet controlar molts aspectes del càlcul numèric i modificar, si l'usuari ho creu convenient, el codi font. L'algorisme utilitzat en aquest programa és un procés iteratiu basat en el mètode dels mínims quadrats, que necessita solucionar el problema directe i determinar la matriu de sensibilitat en cada iteració. Aquesta matriu només es calcula explícitament en la primera iteració; en les posteriors, s'utilitza el mètode de Quasi-Newton per actualitzar de

forma aproximada el seu valor.

En aquest cas, el model inicial necessari per a dur a terme el procés de la inversió no ha de ser forçosament homogeni, sinó que està definit pel propi usuari en funció de tota la informació prèvia que posseeix d'altres estudis.

El temps d'execució d'aquest programa pot ser elevat. En realitat, depèn del nombre de dades experimentals mesurades i del nombre de paràmetres que s'utilitzen per a definir el model. S'ha considerat preferible, però, obtenir un model que interpreti satisfactòriament les dades observades amb una bona localització de les estructures i de la resistivitat elèctrica abans que considerar el temps de càlcul.

Així doncs, l'aportació d'aquest apartat és el programa d'inversió bidimensional, el qual aporta resultats satisfactoris. Els programes van ser utilitzats per a interpretar unes dades experimentals procedents de perfils de tomografia elèctrica. La presentació dels models obtinguts després de la inversió bidimensional amb la configuració Wenner-Schlumberger són l'objectiu del proper capítol.

Aplicacions de la tomografia elèctrica

Els dos programes de prospecció elèctrica han estat utilitzats sobre dades experimentals amb uns resultats molt satisfactoris com es mostra en el capítol 7 de la tesi. Amb aquestes aplicacions s'ha pogut confirmar el bon funcionament del programa d'inversió fins i tot quan el contrast entre resistivitats és molt elevat.

Els resultats de la inversió sobre les dades procedents de la Ciutat de Mèxic D.F. aporten nous models que identifiquen les cavitats buides amb una resistivitat de $20000 \Omega \cdot m$. El valor determinat per a les cavitats és realista i no permet cap confusió en la seva interpretació, ja que existeixen pocs materials amb una resistivitat elèctrica tan elevada.

El programa de modelització també ha estat utilitzat en aquest capítol. La simulació s'ha aplicat a l'estudi d'una cavitat arqueològica de la qual no es podia obtenir un model amb un ajust acceptable. La modelització d'aquesta estructura

va permetre millorar la interpretació d'aquestes dades i justificar la raó per la qual els anteriors models no eren satisfactoris.

Finalment, la tomografia elèctrica realitzada sobre la Formació de Caspe també va permetre determinar les estructures en qüestió de forma satisfactòria. La planificació d'una malla formada per 9 perfils al llarg de dues direccions perpendiculars, va fer possible la construcció d'una imatge tridimensional del subsòl a partir dels models bidimensionals, on s'observa l'acabament del paleocanal situat a poca fondària.

Així doncs, el programa d'inversió desenvolupat presenta un funcionament satisfactori amb un comportament bastant estable en les iteracions, i aportant uns models finals compatibles amb la informació *a priori* de la zona d'estudi.

PERSPECTIVES DE FUTUR

Cada vegada és més comú la realització d'investigacions utilitzant més d'un mètode geofísic. La disponibilitat dels programes presentats, permet integrar de moment, la informació geològica i/o topogràfica. Per això, després d'aquest estudi sobre els mètodes de prospecció elèctrica i magnetotel·lúrica seria important poder incloure les dades procedents de les dues tècniques en un únic programa d'inversió que aportés una possible interpretació del subsòl. L'avantatge d'aquesta integració és que seria possible obtenir models amb una bona resolució tant pels metres més superficials del subsòl, prospecció elèctrica, com per a les profunditats més elevades, prospecció magnetotel·lúrica (p.e. Pridmore *et al.*, 1978; Sasaki, 1989; Yang, C.H. *et al.*, 1999; Harinarayana, T., 1999, Plata *et al.* 2000).

A més a més, l'evolució de les tècniques numèriques i els avanços que es realitzen en la memòria i velocitat dels ordinadors, així com en els instruments de mesura, permeten pensar en la possibilitat d'aportar interpretacions en tres dimensions. L'inconvenient principal de la interpretació en tres dimensions és que els programes precisen ordinadors molt potents i un temps de computació extraordinàriament gran, per tant, són programes que encara s'han de millorar molt per poder tenir un ús més estès. Existeixen, però, programes comercials que permeten aquest tipus d'interpretació dins la prospecció elèctrica (p.e. Hohmann, 1975; Zhang *et al.*, 1995; Spitzer, 1995; Loke, 1996a; Bing *et al.* 2001) i també dins la prospecció electromagnètica (p.e. Mackie *et al.*, 1993; Sasaki, 2001).

REFERÈNCIES

- Agarwal, A.K., Weaver, J.T. 2000. Magnetic distortion of the magnetotelluric tensor: a numerical study. *Earth Planets Space*, 52, 347-353.
- Anderssen, R.S., Senata, E. 1972. A simple statistical estimation procedure for Monte Carlo inversion in geophysics: efficiency and Hempel's paradox. *Pure Appl. Geophys.*, 96, 5-14.
- Avis, N.J., Barber, D.C. 1994. Image reconstruction using non-adjacent drive configuration. *Physiol. Meas.*, 15, A153-A160.
- Bahr, K. 1988. Interpretation of the magnetotelluric impedance tensor: regional induction and local telluric distortion. *J. Geophys.*, 62, 119-127.
- Baines, D., Smith, D.G., Froese, D.G., Bauman, P., Nimeck, G. 2002. Electrical resistivity ground imaging (ERGI): a new tool for mapping the lithology and geometry of channel-belts and valley-fills. *Sedimentology*, 49, 441-449.
- Barber, D.C., Seagar, A.D. 1987. Fast reconstruction of resistivity images. *Clinical physics and physiology measurements*, 8, 47-54.
- Bastani, M. 2001. *EnviroMT – A New Controlled Source/Radio Magnetotelluric System*. Acta Universitatis Upsaliensis, Tesi doctoral.
- Batayneh, A.T. 2002. Resistivity imaging for near-surface resistive dyke using two-dimensional DC resistivity technique. *Journal of Applied Geophysics*, 48, 25-32.
- Beck, J.V., Arnold, K.J. 1977. *Parameter Estimation in Engineering and Science*. John Wiley and Sons Inc.
- Bendat, J., Piersol, A. 1966. *Measurements and analysis of random data*. New York, Willey.
- Berdichevskiy, M.N., Dimitriev, V.I. 1976. Basic Principles of Interpretation for Magnetotelluric Sounding Curves. In A. Adam (ed.), *Geoelectric and Geothermal Studies*, KAPG Geophysics Monogr. Akademiai Kiado, Budapest, 165-211.
- Bing, Z., Greenhalgh, S.A. 2001. Finite element three-dimensional direct current resistivity modelling: accuracy and efficiency considerations. *Geophys. J. Int.*, 145, 679-688.
- Bostick, F. 1977. A simple almost exact method of MT analysis. *Workshop on Electrical Methods in Geothermal Exploration*, USGS Rept, nº 14080001-8-359.
- Broyden, C.G. 1965. A class of method for solving nonlinear simultaneous equations. *Mathematics of Computation*, 19, 577-593.
- Burden, R.L., Faires, J.D., Reynolds A.C. 1981. *Numerical Analysis.*, Prindle, Webber & Schmidt.
- Cagniard, L. 1953. Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting. *Geophysics*, 18, 605-635.
- Cantwell, T. 1960. *Detection and analysis of low frequency magnetotelluric signals*. Tesis doctoral M.I.T.
- Cantwell, T., Madden, T.R., 1960. Preliminary report of crustal magnetotelluric measurements. *J. Geophys. Res.*, 65, 4202-4205.

- Chakridi, R., Chouteau, M., Marechal, M. 1992. A simple technique for analysing and partly removing galvanic distortion from magnetotelluric impedance tensor: Application to Abitibi and Kapuskasing data (Canadà). *Geophys. J. Int.*, 108, 917-929.
- Chave, A.D., Smith, J.T. 1994. On electric and magnetic galvanic distortion tensor decomposition. *Journal of Geophysical Research*, 94, 14, 215-225.
- Chave, A.D., Jones, A.G. 1997. Electric and Magnetic-Field Galvanic Distortion Decomposition of Bc87 Data. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 49, 767-789.
- Chávez, R.E., Cámara, M.E., Tejero, A., Barba, L., Manzanilla, L. 2001. Site Characterization by Geophysical Methods in The Archeological Zone of Teotihuacan, Mexico. *Journal of Archeological Science*, 28, 1265-1276.
- Chouteau, M., Zhang, P., Chapellier, D. 1996. Computation of apparent resistivity profiles from VLF-EM data using linear filtering. *Geophysical Prospecting*, 44, 215-232.
- Coggon, J.H. 1971. Electromagnetic and electrical modeling by the finite-element method. *Geophysics*, 36, 132-155.
- Constable, S.C., Parker, R.L., Constable, C.G. 1987. Occam's Inversion : A Practical Algorithm for Generating Smooth Models from Electromagnetic Sounding Data. *Geophysics*, 52, 289-300.
- deGroot-Hedlin, C., Constable, S. 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, vol. 55, nº 12, 1613-1624.
- Dey A., Morrison H.F. 1979a. Resistivity modelling for arbitrarily shaped two-dimensional structures. *Geophysical Prospecting*, 27, 106-136.
- Draper, N.R., Smith, H. 1981. *Applied regression Analysis*. Wiley, New York, 2^a edició.
- Edwards, L.S. 1977. A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, vol. 42, nº 5, 1020-1036.
- Evjen, H.M. 1938. Depth factor and resolving power of electrical measurements., *Geophysics*, vol.3, 78-95.
- Fournier, H.G., Ward, S.H., Morrison, H.F. 1963. Magnetotelluric evidence for low velocity layer. Report 76, series # 4, Space Science Laboratory, U. Of California, Berkeley.
- Fox, R.C., Hohmann, G.W., Killpack, T.J., Rijo, L. 1980. Topographic effects in resistivity and induced-polarization surveys. *Geophysics*, vol. 45, nº 1, 75-93.
- Gabàs, A., Marcuello, A. 2003. The relative influence of different types of magnetotelluric data on joint inversions. *Earth Planets Space*, Vol. 55, nº 5, 243-248.
- Gad El-Qady, Sakamoto, C., Ushijima, K. 1999. 2-D inversion of VES data in Saqqara archaeological area, Egypt. *Earth Planets Space*, 51, 1091-1098.
- Garcia, X., Jones, A.G. 1999. Extended decomposition of MT data. The second international symposium on Three-dimensional Electromagnetics (3DEM-2), Salt Lake City (USA).
- Gharibi, M., Pedersen, L.B. 1999. Transformation of VLF data into apparent resistivities and phases. *Geophysics*, 64, 1393-1402.

- Groom, R.W. 1988. The effects of Inhomogeneities on Magnetotellurics. Tesis doctoral, University of Toronto.
- Groom, R.W., Bailey, R.C. 1989. Decomposition of Magnetotelluric Impedance Tensor in the Presence of Local 3-D Galvanic Distortion. *Journal of Geophysical Research*, 94, n° B-2, 1913-1925.
- Groom, R.W., Bailey, R.C. 1991. Analytic Investigations of the Effects of Near-Surface Three-Dimensional Galvanic Scatterers on MT Tensor Decompositions. *Geophysics*, 56, 496-518.
- Groom, R.W., Bahr, K. 1992. Corrections for near surface effects: Decomposition of the magnetotelluric impedance tensor and scaling corrections for regional resistivities: a tutorial. *Survey in Geophysics*, 13, 341-379.
- Hallof, P.G. 1970. Theoretical induced polarization and resistivity studies, scale model cases, phase III. McPhar Geophysics Ltd.
- Harinarayana, T. 1999. Combination of EM and DC measurements for upper crustal studies. *Surveys in Geophysics*, 20, 257-278.
- Hohmann, G.W. 1975. Three-dimensional induced polarization and electromagnetic modeling. *Geophysics*, vol. 40, 309-324.
- Inman, J.R. 1975. Resistivity inversion with ridge regression. *Geophysics*, vol. 40, n° 5, 798-817.
- Jiracek, G. 1990. Near surface and topographic distortion in electromagnetic induction. *Surveys in Geophysics*, 11, 163-203.
- Jones, A.G. 1988. Static shift of magnetotelluric data and its removal in a sedimentary basin environment. *Geophysics*, 53, 967-978.
- Jones, A.G. 1992. Electrical conductivity of the continental lower crust in Continental Lower Crust. Edited by D. M. Fountain, 81-143, Elsevier, New York.
- Jones, A.G. 1993. The Coprod 2 Dataset: Tectonic Setting, Recorded MT Data, and Comparison of Models. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 45, 933-955.
- Jones, A.G., Hutton R. 1979b. A multi-station magnetotelluric study in southern Scotland II. Monte-Carlo inversion of the data and its geophysical and tectonic implication. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 56, 351-358.
- Jones, A.G., Savage, J.G. 1986. North American Central Plains conductivity anomaly goes east. *Geophys. Res. Lett.*, 13, 685-688.
- Karous M., Hjelt S.E. 1983. Linear filtering of VLF dipangle measurements. *Geophysical Prospecting*, 31, 782-794.
- Kaufman, A.A., Keller, G.V. 1981. *The Magnetotelluric Sounding Method*. Elsevier. Amsterdam, 596 pp.
- Keilis-Borok, V.I., Yanovskaja, T.B. 1967. Inverse problems of seismology. *Geophys. J.*, 13, 223-234.
- Langer, R.E. 1933. An inverse problem in differential equations. *Am. Soc. Math. J.*, vol. 39, 14-28.

- Larsen, J. 1977. Removal of local surface conductivity effects from low frequency mantle response curves. *Geodynamica Acta.*, 12, 183-186.
- Ledo, J. 1996. Aplicación del método magnetotélúrico al estudio de la estructura litosférica de los Pirineos. Tesis Doctoral.
- Ledo, J., Queralt, P., Pous, J. 1998. Galvanic distortion on magnetotelluric data over a 3D regional structure. *Geophysical J. Int.*, 132, 295-301.
- Ledo, J., Gabàs, A., Marcuello, A. 2002. Static shift levelling using geomagnetic transfer functions. *Earth Planets Space*, 54, 493-498.
- Lee, T. 1972. A general technique for the direct interpretation of resistivity data over two-dimensional structures. *Geophysical Prospecting*, 20, 847-859.
- Levenberg, K. 1944. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Quart. Appl. Math.*, 2, 164-168.
- Lines, L.R., Treitel, S. 1984. Tutorial a review of least-squares inversion and its application to geophysical problems. *Geophysical Prospecting*, 32, 159-186.
- Loke, M.H., Barker, R.D. 1996a. Practical techniques for 3-D resistivity survey and data inversion. *Geophysical Prospecting*, 44, 499-523.
- Loke, M.H., Barker, R.D. 1996b. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosection by quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.
- Loke, M.H. 1999. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys.
- Lowry, T., Shive, P.N. 1990. An evaluation of Bristew's method for the detection of subsurface cavities. *Geophysics*, 55, 514-520.
- Mackie, R.L., Madden, T.R., Wannamaker, P.E. 1993. Three-dimensional magnetotelluric modeling using difference equations – Theory and comparisons to integral equation solutions. *Geophysics*, vol. 58, nº 2, 215-226.
- Madden, T., Nelson, P. 1964. A defense of Cagniard's magnetotelluric method, ONR Rept, NR-371-401, Geophysics Lab., MIT.
- Marcuello, A., Kaikkonen, P., Pous, J. 1992. 2-D inversion of MT data with a variable model geometry. *Geophysical Journal International*, 110, 297-304.
- Marcuello, A., Gabàs, A., Ledo, J. 2001. An estimation of distortion parameters on magnetotelluric data, 26th General Assembly of European Geophysical Society.
- Marquardt, D.W. 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *J. Soc. Indust. Appl. Math.*, vol. 11, nº 2.
- Mundry, E., Homilus, J. 1972. Resistivity measurements in valleys with elliptic cross-section. *Geophysical Prospecting*, 20, 341-362.
- Niblett, E., Sayn-Wittgenstein, C. 1960. Variation of electrical conductivity with depth by the magnetotelluric method. *Geophysics*, 25, 998-1008.

- Ogawa, Y., Jones, A.G., Unsworth, M.J., Booker, J.R., Lu, X., Creven, J.A., Permelee, J.A., Farquharson, C. 1996. Deep electrical conductivity structures of the Appalachian Orogen in the southeastern U.S. *Geophys. Res. Lett.*, 23, 1597-1600.
- Olayinka, A.I. 1988. Microprocessor controlled resistivity traversing and its use in borehole siting in basement areas of Nigeria. Tesi doctoral, Univ. Of Birmingham.
- Olayinka, A.I., Yaramanci, U. 2000. Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent resistivity data and its comparison with smooth inversion. *Journal of Applied Geophysics*, 45, 63-81.
- Oldenburg, D., Li Y. 1994. Inversion of induced polarization data. *Geophysics*, 43, 1327-1341.
- Orellana, E. 1982. *Prospección geoelectrica en corriente continua*. 2ª edición paraninfo, 577 pp.
- Pain C.C., Herwanger, J.V., Worthington, H.M., Cassiano, R.E., de Oliveira, R.E. 2002. Effective multidimensional resistivity inversion using finite techniques. *Geophys. J. Int.*, 151, 710-728.
- Parker, R.L. 1977. Understanding inverse theory. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 5, 35-64.
- Parkinson, W.D. 1962. The influence of continents and oceans on geomagnetic variations. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 6, 441-449.
- Pazdirek, O., Blaha, V. 1996. Examples of resistivity imaging using ME-100 resistivity field acquisition system. EAGE 58th Conference and technical Exhibition. Extended Abstract. Amsterdam.
- Pérez-Flores, M.A., Méndez-delgado, S., Gómez-Treviño, E. 2001. Imaging low-frequency and dc electromagnetic fields using a simple linear approximation. *Geophysics*, vol. 66, nº 4, 1067-1081.
- Petrik, W.R., Pelton, W.M., Ward, S.H. 1977. Ridge regression inversion applied to crustal resistivity sounding from South Africa. *Geophysics*, 42, 995-1005.
- Plata, J.L., Rubio, F.M., Peláez, A. 2000. Estudio comparativo de Sev, PR, PI, RMT y CSMT en un acuífero detrítico. Resúmenes de la II Asamblea Hispano-Lusa de Geodesia y Geofísica. 253-254.
- Pous, J., Marcuello, A., Queralt, P. 1987. Resistivity inversion with a priori information. *Geophysical Prospecting*, 35, 590-603.
- Price, A.T. 1973. The theory of the geomagnetic induction. *Phys. of the Earth and Plan. Int.*, 7, 22-233.
- Pridmore, D.F. 1978. Three-dimensional modelling of electric and electromagnetic data using the finite-element method. Tesi doctoral, Univ. De Utah.
- Queralt, P. 1989. Modelització d'estructures bidimensionals per prospecció elèctrica en corrent continu. Tesi doctoral.
- Queralt, P., Pous, J., Marcuello, A. 1989. Modelización de estructuras bidimensionales en prospección eléctrica mediante el método de los elementos finitos. *Rev. de geofísica*, 45, 3-14.
- Queralt, P., Pous, J., Marcuello, A. 1991. 2-D resistivity modeling: An approach to arrays parallel to the strike direction. *Geophysics*, 56, 941-950.

- Ralston, A., Wilf, H.S. 1967. *Mathematical methods for digital computers (v.2)*. John Wiley & Sons, New York, 287pp.
- Rijo L. 1977. *Modeling of electric and electromagnetic data*. Tesi doctoral, Univ. of Utah.
- Rodi, W.L. 1976. A technique for improving the accuracy of finite element solutions for magnetotelluric data. *Geophys. J. R. Ast. Soc.*, 44, 483-506.
- Romo, J.M., Flores, C., Vega, R., Vázquez, R., Pérez-Flores, M.A., Gómez-Treviño, E., Esparza, F.Z., Quizano, J.E., Garcia, V.H. 1997. A closely spaced magnetotelluric study of the Ahuachapan-Chipilapa geothermal fields, El Salvador. *Geothermics*, 26, 627-656.
- Roy, A., Apparó, A. 1971. Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics*, vol. 35, nº 5, 943-959.
- Sasaki, Y. 1989. Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole resistivity data. *Geophysics*, vol 54, nº 2, 254-262.
- Sasaki, Y. 1992. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40, 453-464.
- Sasaki, Y. 2001. Full 3-D inversion of electromagnetic data on PC. *Journal of Applied Geophysics*, 46, 45-54.
- Schlumberger, M. 1920. *Etude sur la prospection électrique du sous-sol*. París, Geuthier-Villars, 94 pp.
- Schmucker, U. 1970. Anomalies of geomagnetic variations in the southwestern United States. *Bull. Scripps Inst. Ocean.*, vol. 13.
- Seaton, W.J., Burbey, T.J. 2000. Aquifer characterization in the Blue Ridge physiographic province using resistivity profiling and borehole geophysics: geologic analysis. *J. Environ. Eng. Geophys.*, 5, 45-58.
- Seaton, W.J., Burbey, T.J. 2002. Evaluation of two-dimensional resistivity methods in a fractured crystalline-rock terrane. *Journal of Applied Geophysics*, 51, 21-41.
- Shima, H. 1990. Two-dimensional automatic resistivity inversion technique using alpha centres. *Geophysics*, 55, 682-694.
- Siripunvaraporn, W., Egbert, G. 2000. An efficient data subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data. *Geophysics*, 65, 791-803.
- Slichter, L.B. 1933. The interpretation of the resistivity prospecting method for the horizontal structures: *Physics*. Vol. 4, 307-322.
- Smith, J.T. 1997. Estimating Galvanic - Distortion Magnetic - Fields in Magnetotellurics. *Geophysical Journal International*, 130, 65-72.
- Smith, F.B., Shanno, D.F. 1971. An improved Marquardt procedure for nonlinear regression. *Technometrics*, 13, 63-75.
- Smith, N.C., Vozoff, K. 1984. Two-dimensional DC resistivity inversion for dipole-dipole data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 22, 21-28.

- Spitzer, K. 1995. A 3-D finite-difference algorithm for DC resistivity modelling using conjugate gradient methods. *Geophys. J. Int.*, 123, 903-914.
- Spitzer, K. 2001. Magnetotelluric static shift and direct current sensitivity. *Geophys. J. Int.*, 144, 289-299.
- Strenberg, B.K. 1979. Electrical resistivity of the crust in the southern extension of the Canadian shield-layered earth models. *J. Geophys. Res.*, 84, 212-228.
- Stevenson, A.F. 1934. On the theoretical determination of earth resistance from surface potential measurements. *Physics*, vol. 5, 114-124.
- Stratton, J.A. 1941. *Electromagnetic Theory*. McGraw-Hill, 613 pp.
- Swift, C.M., Jr. 1967. A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the Southwestern United States. *Tesi doctoral, M.I.T.*
- Tarantola, A. 1987. *Inverse problem theory.*, Elsevier, Amsterdam, 613 pp.
- Tejero, A., Chávez, R.E., Urbieto, J., Flores-Márquez, E.L. 2002. Cavity Detection in the Southwestern Hilly Portion of Mexico City by Resistivity Imaging. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 7, 3, 130-139.
- Tichonov, A.H. 1950. Determination of the electrical characteristics of the deep strata of the earth's crust. *Doklady Akad. Sci.*, LXXXIII, 295.
- Tsourlous, P.I., Szymanski, J.E., Tsokas, G.N. 1998. A smoothness constrained algorithm for the fast 2-D inversion of DC resistivity and induced polarization data. *Journal of the Balkan Geophysical Society*, vol. 1, n° 1, 3-13.
- Tsourlous, P.I., Szymanski, J.E., Tsokas, G.N. 1999. The effect of terrain topography on commonly used resistivity arrays. *Geophysics*, vol. 64, n° 5, 1357-1363.
- Tong, L.T., Yang, C.H. 1990. Incorporation of topography into two-dimensional resistivity inversion. *Geophysics*, vol. 55, n° 3, 354-361.
- Utada, H., Munekane, H. 2000. On Galvanic Distortion of Regional Three-Dimensional Magnetotelluric Impedances. *Geophysical Journal International*, 140, 385-398.
- Van Bemmelen, W. 1908. Registration of earth-currents at Batavia for the investigation on the connection between earth-current and force of earth-magnetism. *Koninklijke Akademie van Wetenschappen Amsterdam*, Part I, Proc. V. 10-2, 512-523, Part II, proc. V. 10-2, 782-789, Part III, Proc. V. 11, 242-248.
- Vergés, J., Muñoz, J.A., Martínez, A. 1992. South Pyrenean fold-and-thrust belt: Role of foreland evaporitic levels in thrust geometry. *Thrust Tectonics*. Ed. K. McClay. Chapman & Hall, London. 255-264.
- Vozoff, K. 1972. The Magnetotelluric Method in the Exploration of Sedimentary Basins. *Geophysics*, vol. 37, n° 1, 98-141.
- Vozoff, K. 1989. The magnetotelluric method. *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*. Vol. 2. (Ed. Nabighian, M.N.) Society of Exploration Geophysicists, 641-711.
- Wannamaker, P. E., Hohmann, G.W., Ward, S.H. 1984. Magnetotelluric Responses of three-dimensional bodies in layered earths. *Geophysics*, vol. 49, n° 9, 1517-1533.

Wannamaker, P. E., Stodt, J.A., Rijo, L.A. 1986. A stable finite element solution for two-dimensional magnetotelluric modeling. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 88, 277-296.

Ward, S.H. 1980. Electrical, electromagnetic, and magnetotelluric methods. *Geophysics*, 11, 45, 1659-1666.

Ward, S.H., Hohmann, G. W. 1988. Electromagnetic theory for geophysical applications: in Nabighian, M. N. Ed. *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics-Theory*, Vol. 1: Soc. Expl. Geophys. Invest. in Geophys., 131-312.

Ward, S.H., Hohmann, G. W. 1991. Electromagnetic theory for geophysical applications: in Nabighian, M. N. Ed. *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Vol. 2: Soc. Expl. Geophys. Invest. in Geophys., n° 3, 131-311.

Weaver, J.T., Agarwal, A.K. 1991. Is addition of induction vectors meaningful? *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 65, 267-275.

Weidelt, P. 1972. The inverse problem of geomagnetic induction. *Geophys.*, 38, 257-289.

Weise, H. 1962. Geomagnetische Tiefentellurik. *Geophys. Pura Appl.*, 52, 83-103.

Wenner, F. 1912. The four-terminal conductor and the Thomson bridge: *US. Bur. Standards Bull.*, vol. 8, 559-610.

Yang, C.H., Tong, L.T. 1999. A Study of Joint Inversion of Direct Current Resistivity, Transient Electromagnetic and Magnetotelluric Sounding Data. *TAO*, vol. 10, n° 1, 293-302.

Zhang, P., Roberts, R. G., Pedersen, L. B. 1987. Magnetotelluric Strike Rules. *Geophysics*, 3, 52, 267-278.

Zhang, J., Mackie, R.L, Madden, T.R. 1995. 3-D resistivity forward modeling and inversion using conjugate gradients. *Geophysics*, vol. 60, n° 5, 1313-1325.

Zhou, W., Beck, B.F., Stephenson, J.B. 2000. Reliability of dipole-dipole electrical resistivity tomography for defining depth to bedrock in covered karst terranes. *Environmental Geology*, 39, 7.

Zienkiewicz, O.C. 1981. *El método de los elementos finitos*, Ed. Reverté, Barcelona, 903 pp.

ADRECES D'INTERNET

<http://mahi.ucsd.edu/SEMC>