



Universidade de Brasília - UnB
Instituto de Geociências

**INTERPRETAÇÃO DE DADOS DE
ELETROMAGNETOMETRIA
AEROTRANSPORTADA (AEM) DO SISTEMA
GEOTEM (DOMÍNIO DO TEMPO)**

TESE DE DOUTORADO No. 080

MÔNICA G. VON HUELSEN

ORIENTADOR: Prof. Dr Roberto Alexandre V. de Moraes
Co orientador: Prof. Dr. Augusto César B. Pires

**BRASÍLIA/DF
2007**



Universidade de Brasília - UnB
Instituto de Geociências

***INTERPRETAÇÃO DE DADOS DE
ELETROMAGNETOMETRIA
AEROTRANSPORTADA (AEM) DO SISTEMA
GEOTEM (DOMÍNIO DO TEMPO)***

Mônica G. Von Huelsen

Tese de doutorado

Orientador: Prof. Dr. Roberto Alexandre V. de Moraes

Co orientador: Prof. Dr. Augusto César B. Pires

Banca Examinadora: Prof. Dr. Sérgio L. Fontes
Prof. Dr. Jandyr de M. Travassos
Dr. Marcelo de L. Bassay Blum
Prof. Dr. José Elói G. Campos
Prof. Dr. Roberto Alexandre V. de Moraes

Brasília

2007

À Taís, Cristiano, Antônia e Rubens

Agradecimentos

Registro aqui meus agradecimentos, pelos apoios técnico, científico e financeiro dispensados à minha pessoa, pelos colaboradores a seguir mencionados.

Ao professor Dr. Roberto Alexandre Vitória de Moraes, do Laboratório de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG/UnB), pela disponibilidade e dedicação com que me incentivou e orientou no desenvolvimento desta tese e de outros trabalhos científicos.

Ao professor Dr. Augusto César Bittencourt Pires, do Laboratório de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG/UnB), orientação, incentivo e sugestões ao meu trabalho.

Aos professores: Dr. José Elói Guimarães Campos, João Willy Correa Rosa, Carlos Tadeu Carvalho do Nascimento e Antônio Nuno de Castro Santa Rosa pelas sugestões e acompanhamento do trabalho.

Ao CNPq, que proporcionou os meios financeiros.

Ao Dr. Victor Labson e à Dra. Marilla Deszcz pelos dados e esclarecimentos de eventuais dúvidas.

Ao meu marido Cristiano Naibert Chimpliganond pela paciência, companheirismo e explicações e ao colega Engenheiro Sidinei Sebastião Tomás pelas sugestões.

Aos colegas Thiago Silva de Carvalho e Santino Araújo Filho pela colaboração.

A todos os amigos e funcionários do Instituto de Geociências que contribuíram de forma positiva com o trabalho.

Resumo

Desde 1950 estudos vem sendo realizados na aplicação da condutividade elétrica ao mapeamento geológico, com ênfase nos sistemas aeroeletromagnéticos. Estes sistemas usam o campo eletromagnético secundário obtido por contrastes em propriedades elétricas em subsuperfície em resposta a perturbações criadas por fontes eletromagnéticas naturais ou artificiais.

A diversificação na aplicação do sistema EM, que são geralmente portáteis, permite inúmeras combinações geométrica e eletrônica do par de bobinas transmissora e receptora. Sua portabilidade permite que sejam utilizados nas vários levantamentos geofísicos, como nos de superfície que usam transmissores fixos e móveis e o receptor móvel, de subsuperfície (*drill holes*), e naqueles em que são portados em plataformas móveis (marítimas ou aéreas).

Todo processo segue as leis de Maxwell e as respostas que são medidas dependem do modo em que se processa a medição (domínio da frequência ou do tempo), dos equipamentos empregados e da geometria transmissor/receptor que formam com o alvo energizado.

Não existe uma disposição ideal de transmissores e receptores, dependendo assim do tipo de estudo que se deseja realizar na área.

Um dos sistemas disponíveis comercialmente já algum tempo, é o GEOTEM aerotransportado. Ele foi utilizado no vale San Pedro (sudeste do Arizona) em 1997. Os dados desta região nos foram disponibilizados pela USGS (*United State Geological Survey*) e foram utilizados para testar rotinas computacionais adaptadas nesta tese, para interpretar dado AEM, o que permitiu realizar uma análise quantitativa do modelo de condutividade da bacia sedimentar de San Pedro e sua relação com a hidrogeologia.

Propõe-se aqui apresentar um procedimento de interpretação que pode ser utilizado para o dado AEM. Neste foram aplicadas duas técnicas: 1) a que obtém o comportamento da condutividade pela profundidade ao longo das linhas do levantamento; 2) a inversão de dados eletromagnetométricos para um sistema não linear.

Esta última metodologia desenvolvida foi inicialmente aplicada a dados sintéticos, cuja inversão é do tipo controlada. Posteriormente a aplicação deste procedimento deu-se aos dados reais mencionados.

As duas técnicas mostraram-se eficientes, sendo que a primeira exibiu um processo de inversão rápido e qualitativo e a segunda, menos rápido e quantitativo.

Finalmente a proposta final foi em obter volumes com os resultados das medições eletromagnéticas no domínio do tempo (TDEM) para que se tenha uma visão 3D do modelo da condutividade da região em estudo.

Para tanto serão apresentados os conceitos fundamentais do método eletromagnético aplicados ao sistema e escolhido (GeoTEMTM-*Time Domain Airborne EM System*) e os procedimentos de interpretação desenvolvidos.

ABSTRACT

Since 1950 research has been carried out on the application of the electric conductivity for geological mapping, with the most effort put on airborne electromagnetic systems. These systems use the secondary electromagnetic field developed by contrasts in electric properties in the subsurface as response to disturbances created by natural or artificial electromagnetic sources.

The many techniques developed in the use of those EM systems, which are commonly portable, imply in several combinations of how to combine physically and electromagnetically pairs of transmitter and receiver loops of different sizes and geometries. This resulted on the several modalities of use common to EM geophysical surveys, as those carried out on land using fixed and mobile transmitters and mobile receiver on surface, drill holes, airborne and in marine environment.

All physical process follows the Maxwell laws of electromagnetism and the signals measured depend on the way that the measurement is accomplished (frequency or time domain), the type of the equipment used and on the geometry that the transmitter/receiver pair form with the energized target at the Earth.

The ideal disposition of transmitters and receivers seems not to exist. It will depend on the kind of study is to be accomplished the area.

GEOTEM is an airborne system that is available commercially for some time. It was used in San Pedro basin (southeast of Arizona) in 1997. The data of this survey was made available by the United State Geological Survey and it was used for testing the computer routines and programs developed. This software was used in this thesis to perform a quantitative analysis with the conductivity model for the San Pedro Sedimentary Basin and its relation to the hydrogeological targets envisaged with these studies.

This research intends to present a procedure that can be used for an Airborne EM (AEM) interpretation. The methodology developed is first tested on synthetic models as to invert data generated by them in a controlled inversion scheme. Later on this procedure is applied to the real data mentioned.

The intention is to obtain an interpretation map with the results of the electromagnetic measurements in the time domain (TDEM) and a 3-D visualization of the conductivity model obtained for the airborne electromagnetic survey in study.

The approach followed is that based on fundamental concepts of the electromagnetic method applied to the system chosen (GeoTEMTM Time Domain Airborne EM System) and the interpretation procedures developed.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xvii
Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract.....	iv
Sumário.....	vi
INTRODUÇÃO.....	1

CAPÍTULO I

INSTRUMENTAÇÃO DO MÉTODO AEROELETROMAGNÉTICO

1. Considerações iniciais	5
1.1 Breve histórico e aplicação do método AEM.....	5
1.2 Aplicações do sistema AEM.....	12
1.3 Classificação dos sistemas aeroeletromagnéticos (AEM).....	13
1.4 Descrição de sistemas ATDEM (Sistema INPUT e seus Sucessores)	18
1.5 Tempo X frequência	22
1.6 Considerações finais	23

CAPÍTULO II

PRINCÍPIOS FÍSICOS DOS MÉTODOS ATDEM

2. Considerações iniciais	25
2.1 Equações de Maxwell no domínio do tempo.....	25
2.2 Equação da onda.....	27
2.3 Soluções da equação da onda	30
2.4 Princípios físicos dos equipamentos TEM	33

CAPÍTULO III

INVERSÃO DE DADOS AEROELETROMAGNÉTICOS

3. Considerações iniciais	38
3.1 Breve Histórico da inversão geofísica	38
3.2 Problemas e soluções inerentes à inversão	40
3.2.1 O problema inverso mal condicionado	41
3.3 O problema da existência	42
3.3.1 O MMQ	43
3.4 Unicidade e Estabilidade	45

CAPÍTULO IV

PROBLEMA INVERSO NÃO LINEAR E ALGUMAS ESTRATÉGIAS DE SOLUÇÃO

4. Considerações iniciais	48
4.1 Formulação	48
4.2 Métodos numéricos básicos	50
4.3 Os métodos de Newton e Gauss-Newton	51
4.4 Método da região verdadeira	53
4.5 Método quase Newton	55
4.6 Método de Marquardt	55
4.6.1 Tamanho do passo e sua aplicação no software utilizado	57
4.6.2 Matriz Escada (D)	58

CAPÍTULO V

INTERPRETAÇÃO DE DADOS AEROELETROMAGNÉTICOS COM BASE NA MODELAGEM DIRETA

5. Considerações iniciais	59
---------------------------------	----

5.1 Modelagem direta 1D	59
5.2 Transformada de Hankel e o filtro digital de Anderson	61
5.2.1 Determinação do filtro para bobinas de eixo vertical.....	63
5.3 Modelador direto utilizado na inversão	65

CAPÍTULO VI

ALGORITMO COMPUTACIONAL

6. Considerações iniciais	67
6.1 Procedimento de interpretação	67
6.2 Algoritmo computacional	68
6.2.1 Software aplicado para modelagem inversa	68
6.2.2 Cálculos realizados pelo programa.....	69
6.2.2.1 Modelador inverso.....	69

CAPÍTULO VII

TESTES DE VALIDAÇÃO

7. Considerações iniciais	71
7.1 Ferramentas para análise da solução	71
7.2 Modelagem inversa sintética	72
7.2.1 Modelos de referência	73
7.2.2 Descrição do modelo perturbado e sensibilidade da inversão.....	74
7.2.2.1 Inversão geométrica.....	75
7.2.2.2 Inversão geométrica na presença de ruído.....	76
7.2.2.3 Análise do RMS na inversão geométrica	77
7.2.2.4 Inversão geométrica: comportamento do passo e MVC.....	89
7.2.2.5 Inversão paramétrica.....	91
7.2.2.6 Inversão paramétrica na presença de ruído.....	92
7.2.2.7 Análise do RMS na inversão paramétrica	92
7.2.2.8 Inversão paramétrica: comportamento do passo e MVC.....	104

7.3 Considerações finais	107
--------------------------------	-----

CAPÍTULO VIII

TÉCNICA DE IMAGEAMENTO

8. Considerações iniciais	108
8.1 Resistividade aparente (CDIs)	108
8.2 Profundidade.....	110
8.3 Software aplicado para modelagem –CDI.....	115

CAPÍTULO IX

APLICAÇÃO AOS DADOS REAIS

9. Considerações iniciais	118
9.1 Localização.....	118
9.2 Geologia da área	119
9.2.1Estratigrafia da Bacia São Pedro	121
9.3 Trabalhos desenvolvidos na área.....	123
9.4 Levantamento de campo AEM empregado	127
9.4.1 Equipamento eletromagnético utilizado (GEOTEM).....	127
9.5 Pré análise dos dados obtidos	131
9.6 CDIs obtidas	135
9.6.1 CDIs destacadas.....	136
9.7 Inversão aplicada aos dados reais.....	155
9.8 Resultados obtidos através da inversão	159
9.9 Resposta AEM, CDI e inversão -NLSTCI : modelagem	160
CONCLUSÃO.....	168
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	171

Apêndice A..... 182

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
1.1 1º sistema AEM. Canadá – Julho de 1948 (Extraído de Collet,1986).....	6
1.2a Bobina coplanar horizontal (eixos verticais)	7
1.2b Bobina coaxial vertical (eixo paralelo à linha de vôo). S: Campo secundário; P: campo primário; R: receptor; T: transmissor; k: constante (modificado de Geoterrex-dighem, 1999).....	7
1.3 Sistema Barringer de 1967 (Fraser, 1967 apud Fountain, 1998)	8
1.4 Sensores nos eixos y, x e z	8
1.5 Sistema AEM com charuto.....	9
1.6 Sistema Heli-INPUT	10
1.7 : GEOTEM –Sistema instalado na CASA 212	10
1.8 SPECTREM, turbina DC3.....	11
1.9 Sistema UNICOIL, 1981	12
1.10Princípios básicos do sistema AEM	14
1.11 Sistema ativo com transmissor e receptor móveis localizados no charuto a uma altura de 30m	15
1.12 Geometria dos sensores transmissor (T) e receptor (R) para cinco tipos básicos de sistemas aeroeletromagnéticos. a) transmissor fixo; b) dois aviões um com receptor e outro com transmissor; c)transmissor no avião e receptor no charuto (towed bird); d) transmissor e receptor nas extremidades das asas do avião (wing tip); e) transmissor e receptor no charuto carregado por helicóptero.....	16
1.13 Funcionamento do INPUT a) Campo magnético e corrente transmissora; b) tensões desenvolvidas pela corrente (sinal primário); c) campos primário e secundário induzidos no receptor (transmissão desligada). I: corrente; Hp: campo magnético induzido; Ep e Es: campo elétrico primário e secundário; T: tempo.....	19
1.14 GEOTEM (extraído de geoterrex-dighem, 1999)	20
1.15 MEGATEM.....	21
1.16 AEROTEM (extraído de AEROQUEST INTERNATIONAL, 2000)	22
1.17 DIGIHEM V	24
2.1 Campo magnético ou elétrico pelo tempo; para z=100m (modificado de Nabighian & Macnae, 1987a)	32
2.2 Campo magnético ou elétrico (para t = 0,03ms) pela distância, para um tempo fixo t=0,03ms (modificado de Nabighian & Macnae, 1987a)	33
2.3 Formas de onda do transmissor e do receptor (modificado de Nabighian & Macnae, 1987b).....	34
2.4a esboço do fluxo de corrente num condutor esférico após a corrente ser desligada do transmissor. A amplitude decai com o tempo.....	35
2.4b Circuito com Transmissor, Receptor e Condutor; M_{ij} são as indutâncias mútuas; I_1 e I_2 correntes no transmissor e condutor. H_p e H_s campo primário e secundário gerado no receptor devido ao transmissor e condutor, respectivamente; $e_p(t)$ e $e_s(t)$ são os campos elétricos, primário e secundário, medidos pelo receptor (Modificado de Nabighian & Macnae, 1987b).....	35

2.5 : (a) voltagem de saída do receptor pelo tempo (t); (b) campo magnético no receptor TEM pelo tempo, para bons e fracos condutores (modificado de Nabigian & Macnae, 1987b).....	36
3.1 Y- espaço das observações; P- espaço das soluções. $Y=F(P)$	43
3.2 Solução inversa Y- espaço das observações; P- espaço das soluções	44
3.3 Região de ambigüidade e a informação a priori resultando numa nova função e estabilizando o problema geofísico	46
3.4 a)desigualdade; b) Igualdade absoluta; c) Igualdade relativa (modificado de Silva, 2002).....	47
4.1 :Aproximação pelo método de Newton. Em azul aproximação de segunda ordem de pi de uma função arbitrária convexa com mínimo M. O mínimo M' de uma aproximação de segunda ordem é atingido após uma iteração do método de Newton (modificado de Silva et al., 2001).....	52
4.2 Parâmetro de Marquadt – estabilizando o passo (modificado de Silva, 2002).....	56
5.1 Espectro de fase do filtro (modificado de Koefoed, et al., 1972).....	63
5.2 Resposta sinc do filtro (modificado de Koefoed, et al., 1972).....	64
7.1 (a) Resposta da modelagem direta, obtida para um (b)semi-espaço e duas camadas como mostra a tabela 8.1.(+) 16 tempos considerados (off time)	73
7.2 (a) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 1(condutividade crescente), (---) reposta do modelo inverso; b) (—) Modelo 1 de condutividade crescente; (---) Modelo inverso; (c) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 2 (condutividade decrescente), (---) reposta do modelo inverso; d) (—) Modelo 2 de condutividade decrescente; (---) Modelo inverso.....	79
7.3 (a) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 3(condutividade mista), (---) reposta do modelo inverso; b) (—) Modelo 3 de condutividade crescente; (---) Modelo inverso; (c) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 4 (condutividade mista), (---) reposta do modelo inverso; d) (—) Modelo 4 de condutividade mista; (---) Modelo inverso.....	80
7.4 (a) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 1 (condutividade crescente), (---) resposta, contaminada com ruído de 1% , do modelador direto para o Modelo 1; (+) reposta do modelo inverso; b) (—) Modelo 1 de condutividade crescente; (---) Modelo inverso; (c) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 2 (condutividade decrescente), (---) resposta, contaminada com ruído de 1% , do modelador direto para o Modelo 2 (+) reposta do modelo inverso; d) (—) Modelo 2 de condutividade decrescente; (---) Modelo inverso	81
7.5 (a) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 3 (condutividade mista) ,(---) resposta, contaminada com ruído de 1% , do modelador direto para o Modelo 1; (+) reposta do modelo inverso; b) (—) Modelo 2 de condutividade mista; (---) Modelo inverso; (c) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 3 (condutividade mista), (---) resposta, contaminada com ruído de1% , do modelador direto para o Modelo 4, (+) reposta do modelo inverso; d) (—) Modelo 4 de condutividade mista; (---) Modelo inverso	82
7.6 (a) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 1 (condutividade crescente) ,(---) resposta, contaminada com ruído de 2% , do modelador direto para o Modelo 1; (+) reposta do modelo inverso; b) (—) Modelo 1 de condutividade crescente; (---) Modelo inverso; (c) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 2 (condutividade decrescente), (---) resposta, contaminada com ruído de 2% , do modelador direto para o Modelo 2 (+) reposta do modelo inverso; d) (—) Modelo 2 de condutividade decrescente; (---) Modelo inverso	83

- 7.7 (a) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 3 (condutividade mista), (----) resposta, contaminada com ruído de 2% , do modelador direto para o Modelo 1; (+) reposta do modelo inverso; b) (—) Modelo 2 de condutividade mista; (---) Modelo inverso; (c) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 3 (condutividade mista), (---) resposta, contaminada com ruído de 2% , do modelador direto para o Modelo 4, (+) reposta do modelo inverso; d) (—) Modelo 4 de condutividade mista; (---) Modelo inverso 84
- 7.8 : (a) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 1 (condutividade crescente), (----) resposta, contaminada com ruído de 5% , do modelador direto para o Modelo 1; (+) reposta do modelo inverso; b) (—) Modelo 1 de condutividade crescente; (-) Modelo inverso; (c) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 2 (condutividade decrescente), (----) resposta, contaminada com ruído de 5% , do modelador direto para o Modelo 2 (+) reposta do modelo inverso; d) (—) Modelo 2 de condutividade decrescente; (---) Modelo inverso 85
- 7.9 (a) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 3 (condutividade mista),(----) resposta, contaminada com ruído de 5% , do modelador direto para o Modelo 1; (+) reposta do modelo inverso; b) (—) Modelo 2 de condutividade mista; (---) Modelo inverso; (c) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 3 (condutividade mista), (---) resposta, contaminada com ruído de 5% , do modelador direto para o Modelo 4, (+) reposta do modelo inverso; d) (—) Modelo 4 de condutividade mista; (---) Modelo inverso 86
- 7.10 a) gráfico da variação do rms com o número de iterações; para os modelos 1 e 2, respectivamente, condutividade crescente(C) e decrescente (D). Os valores em destaque representam o rms em percentagem para os modelos contaminados com 1%, 2% e 5% de ruído gaussiano 87
- 7.11 Gráfico da variação do rms com o número de iterações; para os modelos 3 e 4, respectivamente, camada central condutiva (M1) e camada central resistiva (M2). Os valores em destaque representam o rms em percentagem para os modelos contaminados com 1%, 2% e 5% de ruído gaussiano 88
- 7.12 Gráficos mostrando a variação do passo com a mudança de dois parâmetros (p); p1: parâmetro referente a primeira camada, p2: parâmetro referente a segunda camada; (●) cada passo; (→) indica a convergência para o mínimo da função; a) modelo 1, condutividade crescente, mínimo da função= $2 \cdot 10^{-7}$; b) modelo 2, condutividade decrescente, mínimo da função= $3 \cdot 10^{-20}$; c) modelo 3, misto, mínimo da função= $2,0 \cdot 10^{-6}$; d) modelo 4, misto, mínimo da função= $3,6 \cdot 10^{-21}$ 90
- 7.13 (a) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 1(condutividade crescente), (---) reposta do modelo inverso; b) (—) Modelo 1 de condutividade crescente; (---) Modelo inverso; (c) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 2 (condutividade decrescente), (---) reposta do modelo inverso; d) (—) Modelo 2 de condutividade decrescente; (---) Modelo inverso 94
- 7.14 (a) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 3(condutividade mista), (---) reposta do modelo inverso; b) (—) Modelo 3 de condutividade crescente; (---) Modelo inverso; (c) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 4 (condutividade mista), (---) reposta do modelo inverso; d) (—) Modelo 4 de condutividade mista; (---) Modelo inverso 95
- 7.15 (a) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 1 (condutividade crescente), (----) resposta, contaminada com ruído de 1% , do modelador direto para o Modelo 1; (+) reposta do modelo inverso; b) (—) Modelo 1 de condutividade crescente; (-) Modelo inverso; (c) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 2

- (condutividade decrescente), (----) resposta, contaminada com ruído de 1% , do modelador direto para o Modelo 2 (+) reposta do modelo inverso; d) (—) Modelo 2 de condutividade decrescente; (---) Modelo inverso 96
- 7.16 (a) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 3 (condutividade mista) ,(----) resposta, contaminada com ruído de 1% , do modelador direto para o Modelo 1; (+) reposta do modelo inverso; b) (—) Modelo 2 de condutividade mista; (---) Modelo inverso; (c) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 3 (condutividade mista), (----) resposta, contaminada com ruído de 1% , do modelador direto para o Modelo 4, (+) reposta do modelo inverso; d) (—) Modelo 4 de condutividade mista; (---) Modelo inverso 97
- 7.17 (a) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 1 (condutividade crescente) ,(----) resposta, contaminada com ruído de 2% , do modelador direto para o Modelo 1; (+) reposta do modelo inverso; b) (—) Modelo 1 de condutividade crescente; (-) Modelo inverso; (c) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 2 (condutividade decrescente), (----) resposta, contaminada com ruído de 2% , do modelador direto para o Modelo 2 (+) reposta do modelo inverso; d) (—) Modelo 2 de condutividade decrescente; (---) Modelo inverso 98
- 7.18 (a) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 3 (condutividade mista) ,(----) resposta, contaminada com ruído de 2% , do modelador direto para o Modelo 1; (+) reposta do modelo inverso; b) (—) Modelo 2 de condutividade mista; (---) Modelo inverso; (c) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 3 (condutividade mista), (----) resposta, contaminada com ruído de 2% , do modelador direto para o Modelo 4, (+) reposta do modelo inverso; d) (—) Modelo 4 de condutividade mista; (---) Modelo inverso 99
- 7.19 (a) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 1 (condutividade crescente), (----) resposta, contaminada com ruído de 5% , do modelador direto para o Modelo 1; (+) reposta do modelo inverso; b) (—) Modelo 1 de condutividade crescente; (-) Modelo inverso; (c) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 2 (condutividade decrescente), (----) resposta, contaminada com ruído de 5% , do modelador direto para o Modelo 2 (+) reposta do modelo inverso; d) (—) Modelo 2 de condutividade decrescente; (---) Modelo inverso 100
- 7.20 (a) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 3 (condutividade mista) ,(----) resposta, contaminada com ruído de 5% , do modelador direto para o Modelo 1; (+) reposta do modelo inverso; b) (—) Modelo 2 de condutividade mista; (---) Modelo inverso; (c) (—) resposta do modelador direto para o Modelo 3 (condutividade mista), (----) resposta, contaminada com ruído de 5% , do modelador direto para o Modelo 4, (+) reposta do modelo inverso; d) (—) Modelo 4 de condutividade mista; (---) Modelo inverso 101
- 7.21 Inversão paramétrica: gráfico da variação do rms com o número de iterações; para os modelos 1 e 2, respectivamente, condutividade crescente(C) e decrescente (D) . Os valores em destaque representam o rms em percentagem para os modelos contaminados com 1%, 2% e 5% de ruído gaussiano 102
- 7.22 Inversão paramétrica: gráfico da variação do rms com o número de iterações; para os modelos 3 e 4, respectivamente, camada central condutiva (M1) e camada central resistiva (M2) . Os valores em destaque representam o rms em percentagem para os modelos contaminados com 1%, 2% e 5% de ruído gaussiano..... 103
- 7.23 Gráficos mostrando a variação do passo com a mudança de dois parâmetros (p); p1: parâmetro referente a primeira camada, p2: parâmetro referente a segunda camada; p3: parâmetro referente a terceira camada; (•) cada passo; (→) indica a

convergência para o mínimo da função; a) modelo 1, condutividade crescente, mínimo da função=1,3E-12 ; b) modelo 2, condutividade decrescente, mínimo da função=1,9.10 ⁻¹¹ ; c) modelo 3, misto, mínimo da função=2,0.10 ⁻¹² ; d) modelo 4, misto, mínimo da função=1,6.10 ⁻¹⁰	106
8.1 Configuração de uma bobina transmissora quadrada com dipolo elétrico (dl) ao longo da bobina	111
8.2 Sondagem e imagem da i-ésima fonte no j-ésimo tempo para uma bobina transmissora quadrada. d_j é a profundidade da imagem, R e I é a dimensão e a corrente da fonte (Adaptado de Eaton & Hohmann, 1989).....	112
8.3 a) Forma de onda da corrente empregada; b) forma de onda da derivada da corrente. Mostra um pulso típico do sistema AEM operando com frequência angular w . As linhas pontilhadas indicam o comprimento da função caixa onde a área da curva $w(t)$ é mantida. Para o critério de área igual adotado, tem-se: $t_a=1/w$ e $t_b=t_c - 1/w$	114
9.1 Localização da área. O retângulo branco delimita a área do levantamento AEM (modificado de Gettings, 2000).....	119
9.2 Mapa geológico da Bacia de San Pedro (modificado de Gettings, 2000)	120
9.3 Diagrama esquemático da Bacia San Pedro (modificado de Fellows,1999).....	122
9.4 Mapa de interpretação da profundidade do embasamento e alinhamentos significativos definindo estruturas geológicas (Modificado de Gettings, 2000)....	125
9.5 Mapa de anomalia magnética (Modificado de Gettings, 2000).....	126
9.6 a) vista de cima do sistema bobina-central, onde o quadrado representa a bobina transmissora (T) e a circular, é a receptora (R); ρ_1, ρ_2, ρ_3 são as resistividades das camadas da terra (em corte); b) Linhas de vôo do levantamento	129
9.7 Curva de decaimento-componente z.....	130
9.8 Mapa dos canais 14, 2, 6 e 10 do campo secundário (componente z) obtido no levantamento AEM (pV/m ²). O contorno em branco representa a mudança do comportamento do campo AEM, baseado no canal 14 componente z; e o contorno em vermelho representa a mudança do comportamento do campo AEM, baseado no canal 10 componente z	132
9.9 Mapa dos canais 14, 2, 6 e 10 do campo secundário (componente x) obtido no levantamento AEM (pV/m ²). O contorno em branco representa a mudança do comportamento do campo AEM, baseado no canal 14 componente z; e o contorno em vermelho representa a mudança do comportamento do campo AEM, baseado no canal 10 componente z	133
9.10 Mapa dos canais 14, 2, 6 e 10 do campo secundário (componente y) obtido no levantamento AEM (pV/m ²). O contorno em branco representa a mudança do comportamento do campo AEM, baseado no canal 14 componente z; e o contorno em vermelho representa a mudança do comportamento do campo AEM, baseado no canal 10 componente z	134
9.11 Linhas de vôo. Em vermelho destaque para as linhas de CDI (componente z) e perfis (componentes x e z) que serão mostrados a seguir.....	137
9.12 CDIs empilhadas dando uma visão geral do comportamento qualitativo da condutividade da região. Escala variando de azul (menor condutividade) a rosa (maior condutividade).....	138
9.13 CDI (componente z) e perfis (componentes x e z) da linha 1010101	139
9.14 CDI (componente z) e perfis (componentes x e z) da linha 1010401	140
9.15 CDI (componente z) e perfis (componentes x e z) da linha 1011601	141
9.16 CDI (componente z) e perfis (componentes x e z) da linha 4012701	142

9.17 CDI (componente z) e perfis (componentes x e z) da linha 4013001	143
9.18 CDI (componente z) e perfis (componentes x e z) da linha 4013701	144
9.19 CDI (componente z) e perfis (componentes x e z) da linha 3015201	145
9.20 CDI (componente z) e perfis (componentes x e z) da linha 2015901	146
9.21 CDI (componente z) e perfis (componentes x e z) da linha 5600101	147
9.22 CDI (componente z) e perfis (componentes x e z) da linha 5600301	148
9.23 CDI (componente z) e perfis (componentes x e z) da linha 5600501	149
9.24 Voxel das CDIs destacando a) toda a área interpolada b) corpo com condutividade maior que 0,04 S/m; b) corpo com condutividade maior que 0,05 S/m; c) corpo com condutividade maior que 0,05 S/m; d) corpo com condutividade maior que 0,005 S/m e plano AEM do canal 6.....	151/152
9.25 Voxel das CDIs destacando a) corpo com condutividade menor que 0,005 S/m, inclinação 45° e plano com a imagem AEM do canal 6. b) corpo com condutividade menor que 0,005 S/m, inclinação 45° e c) corpo com condutividade menor que 0,005 S/m, inclinação 10°	153/154
9.26 Localização das sondagens médias que sofrerão a inversão	155
9.27 Curvas de decaimento das sondagens médias	156/157/158
9.28 Mapa da profundidade da água com a localização dos poços, das sondagens reduzidas e das sondagens elétricas verticais (SEV) existentes na área.....	159
9.29 Voxel resultado da inversão; a) toda a área interpolada; b) corpo com condutividade maior que 0,02 S/m; c) corpo com condutividade maior que 0,02 S/m e plano e plano AEM do canal 6 a 250 m; d) corpo com condutividade maior que 0,02 S/m e plano AEM do canal 6 a 300m; e) corpo com condutividade maior que 0,02 S/m e plano AEM do canal 6 a 500m; f) Vista de baixo para o item b	162/163/164
9.30 Voxel resultado da inversão; a) corpo com condutividade menor que 0,01 S/m; b) corpo com condutividade menor que 0,01 S/m e plano AEM do canal 6 a 250 m; c) corpo com condutividade menor que 0,01 S/m e plano AEM do canal 6 a 300m; .d) corpo com condutividade menor que 0,01 S/m e plano AEM do canal 6 a 500m.	165/166
9.31 a) imagens da resposta AEM; b) voxel obtido utilizando as CDIs; c) voxel obtido pela inversão. Destaque para o perfil AB.	167

LISTA DE TABELAS

TABELA	PÁGINA
7.1 Modelo de profundidades e condutividades, baseado na região que será estudada (Capítulo IX) para a realização da modelagem direta	74
7.2 Modelos de profundidades e condutividades, para a realização da modelagem direta	75
7.3 Modelos e dp: 1%, 2% e 5% são os ruídos considerados, para os modelos 1, 2, 3 e 4; a média e o desvio padrão (dp) das profundidades das 1 ^a e 2 ^a camada (c) dados em metros (m).O modelo sintético considerado foi para profundidade da 1 ^a camada de 300m e para a 2 ^a de 1000m.....	76
7.4 Resíduo quadrático médio (rms) e o número de iterações (No. It) atingidos pela inversão geométrica, para cada modelo e suas respectivas contaminações	78
7.5 Matriz variância-Covariância e matriz correlação para inversão geométrica para os modelos crescente, decrescente	89
7.6 Matriz variância-Covariância e matriz correlação para inversão geométrica para os modelos misto 1 e misto 2	89
7.7 Modelos de condutividade (S/m) (1 = crescente, 2 = decrescente, 3 = misto1 e 4 =misto2) com seus respectivos limites inferiores e superiores considerados.As profundidades fixadas foram de 300 e 1000m.....	91
7.8 Modelos e dp: 1%, 2% e 5% são os ruídos considerados, para os modelos 1, 2, 3 e 4; a média e o desvio padrão (dp) das condutividades das 1 ^a , 2 ^a e 3 ^a camada (c) dados em metros (S/m).O modelo sintético considerado encontra-se na Tabela 8.5	93
7.9 : Resíduo quadrático médio (rms) e o número de iterações (No. It) atingidos pela inversão paramétrica, para cada modelo e suas respectivas contaminações	93
7.10 Matriz variância-Covariância e matriz correlação para inversão paramétrica para os modelos crescente, decrescente	104
7.11 Matriz variância-Covariância e matriz correlação para inversão paramétrica para os modelos misto 1 e misto 2	105
9.1 Posicionamento das janelas. Tempo em microssegundos após o final do pulso....	130
1 CDI versus inversão -NLSTCI	170