



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DETALHAMENTO ELÉTRICO DA  
CONTAMINAÇÃO ÁCIDA NO AqüÍFERO  
CARAÍBA USANDO UM SISTEMA  
ELETROMAGNÉTICO SIROTEM MK3

EMERSON SIDINEI MOTA DOS SANTOS

**SALVADOR – BAHIA**

ABRIL – 2005

Detalhamento Elétrico da Contaminação Ácida no Aquífero Caraíba usando  
um Sistema Eletromagnético SiroteM MK3

por

EMERSON SIDINEI MOTA DOS SANTOS

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA APLICADA

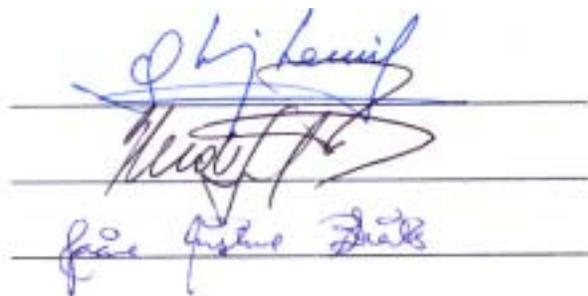
DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

Comissão Examinadora



The image shows three handwritten signatures in blue ink, each placed over a horizontal line. The first signature is the most prominent and appears to be 'Olivar Antonio Lima de Lima'. The second signature is less legible but appears to be 'Hédison Kiuty Sato'. The third signature is also less legible but appears to be 'Jacira Cristina B. Freitas'.

Dr. Olivar Antonio Lima de Lima (Orientador)

Dr. Hédison Kiuty Sato

Dra. Jacira Cristina B. Freitas

Data da aprovação: 27/04/2005

Dedicatória: Dedico este trabalho  
especialmente a meu Pai (Em  
Memória)

por ter incentivado a todo instante a  
concluir este curso. A toda minha  
família, Mãe, Esposa, irmãos, tias e  
Vovó, que muito contribuíram no  
desenvolvimento de minha vida  
espiritual e intelectual.

# RESUMO

Este trabalho envolve a aplicação do método eletromagnético no domínio do tempo SIROTEM, na área da metalúrgica Caraíba Metais localizada no extremo norte-ocidental do Complexo Petroquímico de Camaçari (COPEC), município de Dias D'Ávila, BA. Seu principal objetivo foi melhor delinear a pluma de ácido sulfúrico que está contaminando uma parte do bloco aquífero Caraíba, sob aquela unidade industrial (Lima, 1999). Foram levantadas cinco linhas transversais irradiadas a partir da planta de ácido sulfúrico usando o sistema SIROTEM MK3 do CPGG/UFBA. Nos cinco perfis observados de resistividade versus tempo, invertidos em termos de resistividade versus profundidade, é possível delinear com precisão, tanto a extensão lateral da zona contaminada quanto a configuração geométrica do substrato do aquífero na área. Os resultados obtidos, corrigidos dos efeitos de ruídos ambientais, confirmam e detalham com melhor precisão, as anomalias elétricas anteriormente detectadas com métodos elétricos convencionais.

# ABSTRACT

This work discuss the use of the transient EM method SIROTEM, for the underground monitoring of the Caraíba Metais Metallurgic industry, located in the northwestern corner of the Camacari Petrochemical Complex (COPEC), Dias D'Ávila county, Bahia. Its main goal was to delineate a sulfuric acid plume that is invading a portion of the Caraíba aquifer block bellow that industrial unit. Five transverse profiles were surveyed, all irradiating from the acid sulfuric unit, using a EM system SIROTEM MK3 from CPGG/UFBA. To interprete and to invert these results, I used the software package EMvision v.2.0 from Encon Technology Pty Ltd. In the inverted resistivity-time sections inverted in terms of the resistivity versus depth it is possible to precisely delineate, the lateral extent of the contaminated zone, but also the geometrical configuration of the aquifer substractum in the area. The results, free of environmental noises, were useful to confirm and to better detail the eletctrical anomalies previously detected with conventional eletrical methods.

# ÍNDICE

RESUMO . . . . .	iii
ABSTRACT . . . . .	iv
ÍNDICE . . . . .	v
ÍNDICE DE FIGURAS . . . . .	vi
INTRODUÇÃO . . . . .	1
<b>CAPÍTULO 1</b> <b>Caracterização Geológico-Geofísica do Bloco Aquífero</b>	
<b>Caraíba . . . . .</b>	2
1.1    Arcabouço Geológico . . . . .	4
1.2    Características do Aquífero . . . . .	6
1.3    Caracterização da Pluma . . . . .	7
<b>CAPÍTULO 2</b> <b>Fundamentos do Método Eletromagnético . . . . .</b>	10
2.1    Equações de Maxwell e Relações Constitutivas . . . . .	10
2.1.1    Dipolo Magnético Alternado . . . . .	13
<b>CAPÍTULO 3</b> <b>Caracterização Geofísica com Método Eletromagnético</b>	
<b>Transiente . . . . .</b>	15
3.1    O Sistema SIROTEM . . . . .	15
3.2    Procedimentos Operacionais . . . . .	17
3.3    Procedimentos de Interpretação . . . . .	18
3.4    Resultados Experimentais . . . . .	19
<b>CAPÍTULO 4</b> <b>Conclusões . . . . .</b>	30
<b>Agradecimentos . . . . .</b>	32
<b>Referências Bibliográficas . . . . .</b>	33

# ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Coluna estratigráfica da Bacia do Recôncavo . . . . .	3
1.2	Mapa topográfico da região da Caraíba Metais . . . . .	5
1.3	Mapa da resistividade verdadeira do aquífero regional e as linhas levantadas com o Sirotem. . . . .	8
1.4	Pseudo-seções transversais de resistividade e cargabilidade aparentes e modelo geológico interpretado. . . . .	9
3.1	Foto de campo, linha 1. . . . .	17
3.2	Foto de campo, linha 2. . . . .	17
3.3	Pseudo-seções do Campo e resistividades aparentes observadas e calculadas para a linha 1 . . . . .	22
3.4	Curvas de decaimento do campo, observado e modelado, Linha 1 . . . . .	23
3.5	Pseudo-seções do Campo e resistividades aparentes observadas e calculadas para a Linha 3 . . . . .	24
3.6	Curvas de decaimento do campo, observado e modelado, Linha 3 . . . . .	25
3.7	Pseudo-seções do Campo e resistividades aparentes observadas e calculadas para a Linha 4 . . . . .	26
3.8	Pseudo-seções do Campo e resistividades aparentes observadas e calculadas para a Linha 5. . . . .	27
3.9	Curvas de decaimento do campo, observado e modelado, Linha 4 . . . . .	28
3.10	Curvas de decaimento do campo, observado e modelado, Linha 5 . . . . .	29

# INTRODUÇÃO

Devido aos recentes avanços tecnológicos e computacionais, os métodos eletromagnéticos têm se tornado cada vez mais úteis e aplicados tanto na exploração mineral quanto no monitoramento ambiental. Existem vários sistemas e técnicas disponíveis no mercado, operando tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência. Desse modo, o desenvolvimento instrumental associado a modelagem matemática tri-dimensional em microcomputadores tem demonstrado que as técnicas EM transientes são eficientes e rápidas, e dão resultados práticos satisfatórios em problemas de detecção e monitoramento ambiental.

Na área ambiental numerosos trabalhos de aplicação encontram-se descritos na literatura científica. Hoekstra Blohm (1980) aplicaram o sistema eletromagnético transiente (TEM) para traçar uma contaminação natural por salmoura na região central de Michigan. Stewart e Gray (1986) usaram sondagens TEM para traçar a intrusão de água salgada em aquíferos costeiros no Sul da Flórida. Yang et al. (1999) também usaram sondagens TEM em combinação com sondagens convencionais de resistividade para delinear a intrusão de água salgada em Tawain (Danielsen et al., 1982). No presente trabalho aplicamos a técnica EM transiente SIROTEM para detalhar uma pluma de contaminação por ácido sulfúrico na área industrial da metalúrgica Caraíba Metais.

Cinco seções geelétricas foram investigadas, quatro delas irradiadas a partir da fonte de contaminação superficial representada pela unidade de produção do ácido sulfúrico. Na aquisição dos dados de campo foi utilizado o sistema SIROTEM MK3 do CPGG/UFBA, na forma de operação em bobina única (transmissor-receptor), de forma quadrada e de lado variando entre 10 e 20m. Apesar da presença freqüente de ruídos criados pelas construções, instalações elétricas e rede do aterramento industrial, os resultados obtidos são bastante satisfatórios e permitiram delinear, com riqueza de detalhes, a extensão lateral da contaminação e a configuração do substrato do aquífero freático da área.

O trabalho está apresentado conforme a seguinte estrutura. No capítulo I é apresentado a caracterização geológica da área com base nos trabalhos anteriores de Lima (1991, Lima (2002, Palma (2004). O capítulo II contém uma revisão das bases físicas dos métodos eletromagnéticos com ênfase nas formas transientes. A metodologia adotada na aquisição e a técnica de interpretação dos dados está discutida no capítulo III. No capítulo IV são discutidos os resultados obtidos e as principais conclusões do trabalho.

# CAPÍTULO 1

## Caracterização Geológico-Geofísica do Bloco Aqüífero Caraíba

A Região Metropolitana de Salvador se caracteriza, geologicamente, como dois domínios geotectônicos: (i) O Alto Cristalino onde se estabeleceu a cidade de Salvador, predominantemente composto de rochas poli-metamórficas arqueanas com coberturas dispersas de sedimentos meso e cenozóicos; (ii) A Bacia Sedimentar do Recôncavo, com sua espessa seqüência sedimentar que inclui numerosos campos de petróleo e um dos mais importantes aqüíferos do estado. Sobre ela foram instalados grandes centros industriais tal como o Centro Industrial de Aratu (CIA) e o Pólo Petroquímico de Camaçari(COPEC). A zona de contato entre esses dois domínios é a denominada Falha de Salvador, com rejeito total estimado em mais de 4.000 m. Este limite é, em sua maior extensão, impermeabilizado pelos fanglomerados de matriz argilosa da Formação Salvador, que foram progressivamente depositados ao longo dela.

Todas as indústrias do COPEC estão instaladas sobre a seção superior do Supergrupo Bahia, a seqüência tectono-clástica que preencheu o rifte do Recôncavo do Jurássico até o Cretáceo como mostra a figura 1.1. Tal seção superior, corresponde às formações Marizal e São Sebastião. A Formação Marizal, depositada por um sistema de rios anastomosados, representa uma sucessão de arenitos de granulação média a grosseira, caulínicos, intercalados com conglomerados descontínuos e delgadas camadas de folhelhos e siltitos. Ela repousa, em discordância erosiva, sobre uma espessa seqüência de arenitos e folhelhos intercalados da Formação São Sebastião.

Dois sistemas aqüíferos importantes são reconhecidos nessa área (Lima, 1999): (i) um sistema aqüífero livre ou freático representado por corpos arenosos acoplados das formações Marizal e São Sebastião. Em função de suas características geológicas e geomorfológicas, esse aqüífero tem capacidade de armazenamento limitada mas exerce uma forte influência físico-química nas recargas naturais e induzidas para o sistema aqüífero subjacente; e (ii) um sistema regional semi-confinado, constituído por múltiplos horizontes arenosos, que estocam águas minerais, os quais se intercalam com espessos folhelhos na Formação São Sebastião. Este é o principal reservatório de água doce da Região Metropolitana de Salvador-(RMS)

### Carta Estratigráfica da Bacia do Recôncavo



Figura 1.1: Coluna estratigráfica da Bacia do Recôncavo

que, infelizmente, está sendo desordenadamente explorado para atender as atividades agro-industriais da região.

A metalúrgica Caraíba Metais está instalada no setor NNW do COPEC. A metalurgia do cobre tem como um importante subproduto o ácido sulfúrico concentrado, produzido numa unidade à parte, com capacidade de 18.000 m<sup>3</sup> por mês. A fábrica ocupa parte de um terreno de 1,45 km<sup>2</sup>, constituído de arenitos da Formação Marizal, os quais compõem um aquífero freático local, referido como bloco aquífero Caraíba (Lima, 2002). A operação de alguns processos industriais da Caraíba comprometeu, localmente, a qualidade da água subterrânea deste aquífero livre superior. A definição da extensão da zona hídrica afetada em sub-superfície e algumas medidas de monitoramento e controle foram tomadas a partir de 1993. Hoje, a empresa empreende um programa objetivo para recuperar a qualidade original da água em todo o bloco Caraíba, assim como fazer uso da água poluída extraída em partes de seus processos industriais.

## 1.1 Arcabouço Geológico

O bloco aquífero Caraíba é definido como um paralelepípedo quase retangular com 3,2km de comprimento, 2,1 km de largura e cerca de 50 m de profundidade conforme mostra a 1.2. Sua definição foi basicamente efetuada com base na estrutura geológica e no padrão de fluxo hidráulico subterrâneo, de sorte que seus limites laterais correspondem a correntes da drenagem superficial, ou zonas de descarga do bloco. Esse aquífero livre arenoso, com camadas impermeáveis, tem forma de uma cunha inclinada para NE, com mergulho inferior a 5°. A zona de recarga deste bloco inclui toda a área industrial da Caraíba.

Como um sistema de porosidade intergranular, o comportamento hidráulico do aquífero freático é fortemente dependente da textura e das estruturas internas dos arenitos. Estas foram herdadas dos processos deposicionais das formações, posteriormente modificadas por diagênese e tectonismo que atuaram durante a evolução geológica do Recôncavo. Um conhecimento da geometria dos corpos arenosos e da heterogeneidade espacial nas suas propriedades hidráulicas são requisitos básicos para entender o sistema de fluxo e o transporte de poluentes no aquífero, tanto nas condições naturais quanto em sua extração por bombeio de poços.

Mineralogicamente os arenitos da Formação Marizal são compostos predominantemente de quartzo, feldspato alterado (caulinita), pequenas quantidades de mica, nódulos ou concreções de óxidos-hidróxidos de ferro e manganês e proporções variáveis de argilas diagenéticas (caulinita-ilita). O conteúdo carbonático dos arenitos varia de 0 a 5%, em peso. As zonas lenticulares ricas em argilas contém 70% de caulinita, 10% de ilita e carbonato de cálcio entre 5 e 10%.



Estruturalmente o Supergrupo Bahia foi densamente seccionado por falhas de gravidade sub-verticais orientadas segundo NNE-SSW, com orientações conjugadas secundárias segundo NW-SE. Os sistemas de falhamentos no rifte se deram de forma intermitente até depois da deposição da Formação São Sebastião. Algumas dessas falhas atuam hidraulicamente como barreiras impermeáveis ou semi-permeáveis, tanto por colocarem em contato litologias distintas (arenitos contra folhelhos) quanto por causa dos danos mecânicos associados aos processos de falhamento.

A análise de dados de sondagens elétricas, perfis geofísicos de poços e seções de radar penetrante no solo (Lima, 1999) permitiram concluir que os arenitos da Formação Marizal foram depositados como corpos tabulares superpostos de barras de areias (2 m a mais de 10 m de espessura). Cada unidade arenosa é normalmente selada por uma fina camada de lamitos de alguns decímetros de espessura. Além disso, cada barra individual é identificada por uma diminuição granulométrica ascensional, culminando com os depósitos argilosos da cobertura de inundação. Isso se reflete basicamente como uma diminuição da porosidade efetiva e da permeabilidade, em direção ao topo das barras. Em afloramentos é possível observar que os bancos arenosos possuem estratificações paralelas e cruzadas, bem como estruturas de deformações contemporâneas, tais como encurvamentos de estratos e falhas singenéticas. Toda essa heterogeneidade interna deve ser devidamente considerada nas simulações das respostas hidráulicas do aquífero ao cenário de remediação programado.

## 1.2 Características do Aquífero

A água armazenada nos arenitos do bloco aquífero Caraíba é derivada diretamente das chuvas. A descarga natural do bloco se dá de forma mais efetiva, por evapotranspiração ao longo de faixas centradas nas correntes superficiais. Estimativas dos principais componentes do ciclo hidrológico local sugerem haver um equilíbrio secular entre recarga e descarga naturais na área.

A configuração do nível estático da água no bloco foi precisamente definida com base em medidas diretas efetuadas nos poços de monitoramento da indústria (Lima, 2000). As curvas equipotenciais mostram claramente que a planta industrial foi instalada numa zona terraplainada sobre um divisor global do fluxo subterrâneo. As linhas de fluxo dirigidas para N-NW possuem um gradiente quase constante em direção ao rio Lamarão como mostra a figura 1.2. O fluxo para S – SE mostra alguns desvios para correntes locais mas é também mais ou menos uniforme, em direção ao vale do rio Sacuricanga. As velocidades médias desse fluxo, estimadas com base em dados de permeabilidade do aquífero obtidos em ensaios de bombeamento de poços, variam entre 13 e 39 m por ano (Lima, 2002).

Informações relativas as propriedades hidráulicas dos arenitos da Formação Marizal

foram obtidas das seguintes fontes: (1) testes de laboratório (porosidade e permeabilidade) efetuados sobre amostras coletadas em perfurações; (2) experimentos de injeção e testes de bombeamento efetuados em poços de monitoramento; e (3) extrapolações por meios indiretos usando dados de perfilagens geofísicas de poços e de sondagens elétricas verticais (Lima, 1991; Lima, 2002).

Valores de laboratório resultaram numa permeabilidade média de  $1,2 \times 10^{-5}$  m/s e de 34 % para a porosidade. Ensaio de injeção e bombeamento de poços forneceram uma permeabilidade média de  $4,1 \times 10^{-5}$  m/s, enquanto dados de perfilagens elétricas produziram porosidades efetivas variando entre 23 e 27 %.

### 1.3 Caracterização da Pluma

A extensão lateral e em profundidade da pluma de contaminação ácida no bloco Caraíba foi determinada pelo uso combinado de imageamentos elétricos por resistividade, estudo de perfis geofísicos de poços e dados de análises físico-químicas de águas superficiais e subterrâneas coletadas em diferentes unidades industriais e nos poços de monitoramento Lima (2002).

A Figura 1.3 mostra um mapa da resistividade verdadeira do aquífero no entorno do perímetro industrial da Caraíba, obtido por Lima (2000) usando a técnica geoeletrica convencional. A anomalia de baixa resistividade delineada em fundo vermelho (resistividade variando entre 2 e 20 ohm.m) define, aproximadamente, a extensão superficial da pluma ácida subterrânea. Uma zona de transição na qual a resistividade elétrica aumenta de 50 para cerca de 150 ohm.m, delimita a auréola de neutralização em torno do núcleo acidificado da pluma.

A Figura 1.4 contém seções transversais de resistividade e cargabilidade aparentes obtidas ao longo da linha indicada no mapa da Figura 1.3. O modelo geológico interpretado (mostrado na base da figura) foi construído através da inversão unidimensional dos dados das 14 sondagens elétricas Schlumberger ali executadas. Duas zonas condutivas estão relacionadas à contaminação industrial. A superior, próximo ao nível estático, é atribuída aos líquidos efluentes das unidades de ácido sulfúrico, tratamento de água e planta de eletrólise. A inferior e mais concentrada, resulta do acúmulo histórico de vazamentos que foram retidos acima de uma delgada mas extensiva lâmina de folhelho inserida nos arenitos aquíferos abaixo de 15 m de profundidade (Lima, 2002). Esses resultados são consistentes com dados de pH, condutividade e composição química das águas coletadas nos poços de monitoramento.

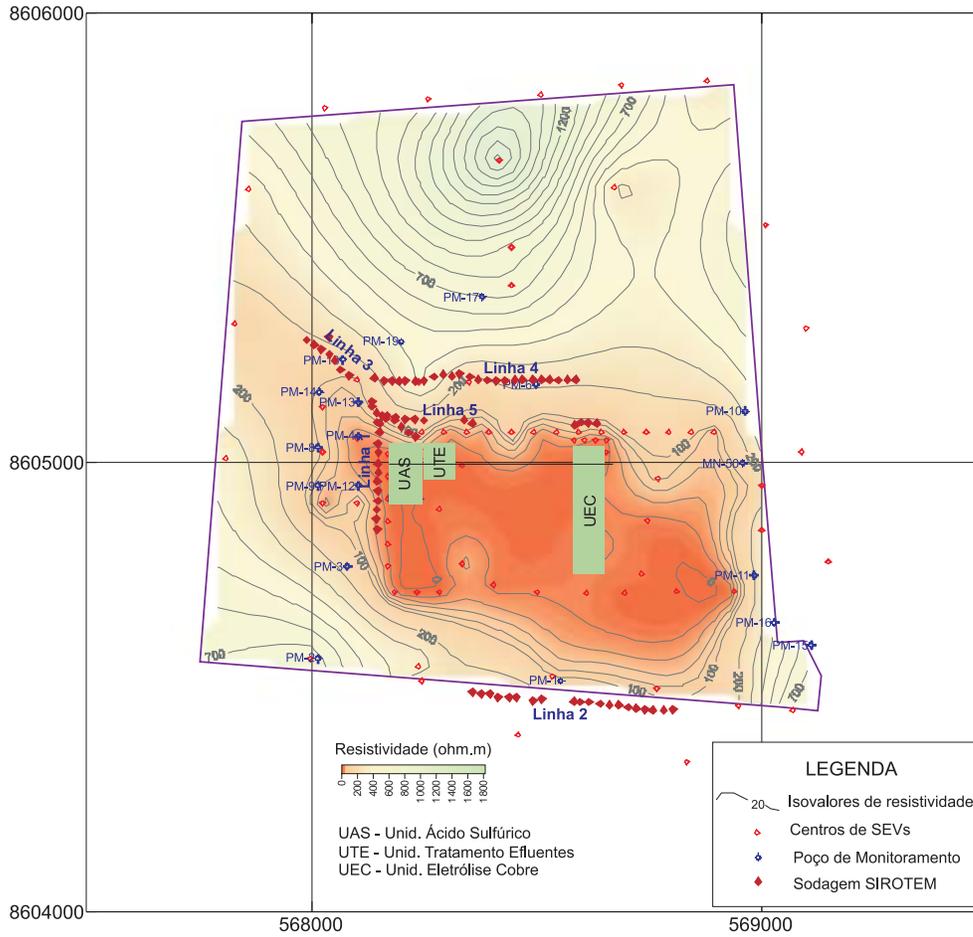


Figura 1.3: Mapa da resistividade verdadeira do aquífero regional e as linhas levantadas com o Sirotem.

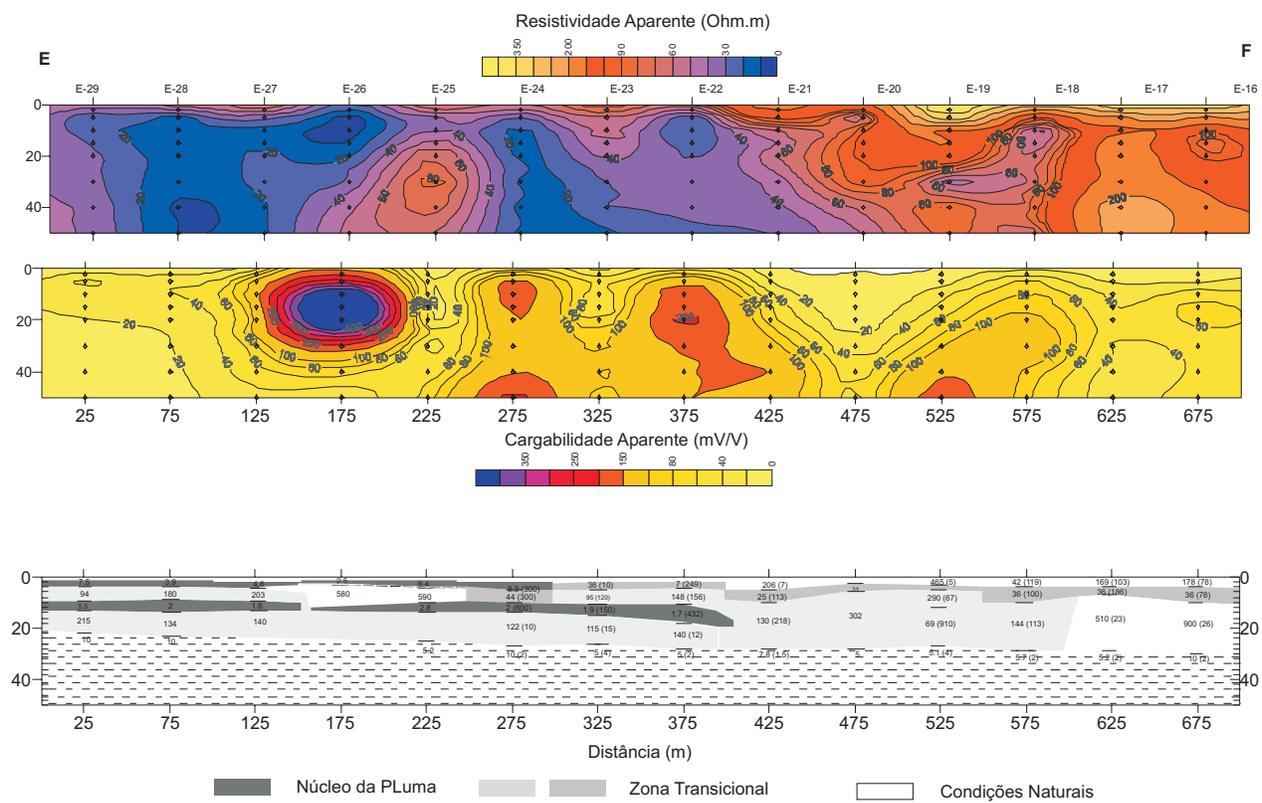


Figura 1.4: Pseudo-seções transversais de resistividade e cargabilidade aparentes e modelo geológico interpretado.

## CAPÍTULO 2

# Fundamentos do Método Eletromagnético

Os métodos eletromagnéticos são amplamente utilizados na exploração de recursos minerais, de hidrocarbonetos e de água subterrânea (Parasni, 1966). Estes métodos se baseiam na distribuição de correntes e cargas elétricas induzidas em subsuperfície por campos eletromagnéticos gerados natural ou artificialmente. Este capítulo nos dá uma idéia da complexidade da resolução de algumas funções, referentes ao domínio do tempo eletromagnético.

O emprego da notação complexa é usado extensivamente pois facilita a manipulação algébrica das fórmulas. É preciso empregá-la com o devido cuidado, levando em consideração que todas as medidas são feitas no domínio do tempo, e que elas são quantidades reais. Assim, simplesmente despreza-se a parte imaginária do resultado obtido no domínio do tempo; e considera as partes real e imaginária de uma expressão resultante no domínio da frequência como os componentes em-fase e em-quadratura de um dado sinal.

### 2.1 Equações de Maxwell e Relações Constitutivas

Evidências experimentais comprovam a validade das equações de Maxwell na descrição dos fenômenos eletromagnéticos macroscópicos. Portanto essas equações são abordadas como ponto de partida. Um campo eletromagnético constitui o domínio dos quatro vetores  $\mathbf{e}$  e  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{d}$  e  $\mathbf{h}$ , finitos e contínuos em todos os pontos ordinários do espaço, e com derivadas contínuas. Nos pontos não ordinários, como as fronteiras entre dois meios de propriedades diferentes, ou os pontos de singularidade, essas condições continuam válidas, desde que empreguemos as condições de contorno, ou representemos o campo com o apoio de distribuições, tal como o funcional delta de Dirac  $\delta(\mathbf{R})$ . Não há razão para considerar um vetor mais fundamental do que outro, a não ser em relação a uma medida experimental. A fonte de um campo eletromagnético é a distribuição espaço-temporal de carga ( $Q$ ) e de corrente elétrica ( $I$ ), e do ponto de vista macroscópico essa distribuição é considerada contínua (Ward Hohmann, 1988).

Em cada instante e em cada ponto do espaço, podemos definir duas outras quantidades,

a densidade volumétrica de carga elétrica,

$$\rho(\mathbf{R}', t) = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{Q}{\Delta v}, \quad (2.1)$$

e o vetor densidade superficial de corrente elétrica,

$$\mathbf{j}(\mathbf{R}', t) = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{I}{\Delta s} \mathbf{u}_n, \quad (2.2)$$

onde  $\mathbf{u}_n$  representa o vetor unitário na direção normal positiva da superfície. Deste modo, e utilizando a Função Delta de Dirac, podemos definir o valor de  $\rho(\mathbf{R}', t)$  ou o valor de  $\mathbf{j}(\mathbf{R}', t)$  devidos, respectivamente: (1) a uma fonte pontual de carga, situada no ponto  $\mathbf{R}_0 = x_0 \mathbf{i} + y_0 \mathbf{j} + z_0 \mathbf{k}$ ; (2) a um fluxo de corrente ao longo da reta definida pelas coordenadas  $(x_0, y_0, z)$ ; ou (3) a uma fonte pontual de corrente elétrica no ponto  $\mathbf{R}_0$ .

$$\rho(\mathbf{R}', t) = Q \delta(x' - x_0) \delta(y' - y_0) \delta(z' - z_0), \quad (2.3)$$

$$\mathbf{j}(\mathbf{R}', t) = I \delta(x' - x_0) \delta(y' - y_0) \mathbf{k}, \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{j}(\mathbf{R}', t) = I \delta(x' - x_0) \delta(y' - y_0) \delta(z' - z_0). \quad (2.5)$$

Portanto, em todos os pontos do espaço, os quatro vetores se encontram sujeitos às Equações de Maxwell, dadas a seguir na sua forma diferencial no domínio do tempo,

$$\nabla \times \mathbf{e} + \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t} = 0, \quad (2.6)$$

$$\nabla \times \mathbf{h} - \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial t} = \mathbf{j}, \quad (2.7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{b} = 0, \quad (2.8)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{d} = \rho. \quad (2.9)$$

Na forma integral, também no domínio do tempo, elas assumem as seguintes expressões:

$$\oint \mathbf{e} \cdot d\mathbf{l} + \frac{\partial}{\partial t} \int \mathbf{b} \cdot d\mathbf{s} = 0, \quad (2.10)$$

$$\oint \mathbf{h} \cdot d\mathbf{l} - \frac{\partial}{\partial t} \int \mathbf{d} \cdot d\mathbf{s} = I, \quad (2.11)$$

$$\oint \nabla \cdot \mathbf{b} dv = 0, \quad (2.12)$$

$$\oint \nabla \cdot \mathbf{d} dv = Q. \quad (2.13)$$

As equações 2.6 e 2.7 são desacopladas, pois contêm cinco vetores para apenas duas equações. Para acoplá-las é preciso empregar as relações constitutivas, descritas a seguir no domínio da frequência:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}), \quad (2.14)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}, \quad (2.15)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}. \quad (2.16)$$

## Equações de Maxwell no Domínio da Frequência

No caso em que os parâmetros constitutivos dependam da frequência, as transformadas de Fourier das equações 2.14, 2.15 e 2.16 se convertem em operações de convolução, tornando extremamente complicadas as equações de Maxwell acopladas no domínio do tempo. Transformando as equações de Maxwell para o domínio da frequência obtemos as seguintes equações acopladas,

$$\nabla \times \mathbf{E} + i\mu\omega\mathbf{H} = 0, \quad (2.17)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - (\sigma + i\epsilon\omega)\mathbf{E} = 0. \quad (2.18)$$

Aplicando o operador rotacional as equações 2.6, 2.7, 2.17 e 2.18, podemos obter as seguintes equações de onda de Helmholtz:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{e} + \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times (\mu\mathbf{h})) = 0, \quad (2.19)$$

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{h} - \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times (\epsilon\mathbf{e})) = \nabla \times (\sigma\mathbf{e}), \quad (2.20)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \kappa^2 \mathbf{E} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}), \quad (2.21)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + \kappa^2 \mathbf{H} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{H}), \quad (2.22)$$

onde,  $\kappa^2 = \mu\epsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega$ .

No caso particular para  $\omega = 0$  em uma região desprovida de fontes, as equações 2.21 e 2.22 se reduzem às seguintes equações de Laplace,

$$\nabla^2 \begin{Bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{Bmatrix} = 0. \quad (2.23)$$

Uma interpretação adequada dos dados geofísicos relacionados ao campo do eletromagnetismo requer a solução das Equações de Helmholtz ou das Equações de Laplace (Sen Stoffa, 1995) descritas acima. O problema pode ser abordado e resolvido mais facilmente em diversos casos, com o auxílio de funções potenciais. Entre as funções potenciais relacionadas ao eletromagnetismo encontram-se:

**Potencial Magnetostático** :  $\mathbf{H} = -\nabla V$ . Neste caso não há distinção entre os domínios do tempo e da frequência.

**Potencial Elétrico de Corrente Contínua** :  $\mathbf{E} = -\nabla U$ . Também para este caso não há distinção entre os domínios do tempo e da frequência.

## Potencial Vetorial Magnético :

$$\mathbf{b} = \nabla \times \mathbf{a}, \text{ ou} \quad (2.24)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}. \quad (2.25)$$

Neste caso,

$$\mathbf{e} = -\nabla U - \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial t}, \quad (2.26)$$

e os dois potenciais se relacionam pela condição de Lorentz,

$$\nabla \cdot \mathbf{a} + \mu\epsilon \frac{\partial U}{\partial t} + \mu\sigma U = 0. \quad (2.27)$$

### 2.1.1 Dipolo Magnético Alternado

Empregando o método de Kirchhoff na Equação para  $\sigma = 0$ , obtemos a seguinte solução para o potencial vetorial de Hertz relacionado a um dipolo magnético situado em  $\mathbf{R}_0$  e com uma dependência temporal do tipo  $\exp(i\omega_0 t)$ :

$$\pi^*(\mathbf{R}, t) = \frac{\mathbf{m}_m \exp(-i\kappa_0 R + i\omega_0 t)}{4\pi R} \mathbf{k}. \quad (2.28)$$

Considerando que;

$$\mathbf{e} = -\mu \nabla \times \pi, \text{ e} \quad (2.29)$$

$$\mathbf{h} = \nabla(\nabla \cdot \pi) + \kappa_0^2 \pi, \quad (2.30)$$

$$\mathbf{e}(\mathbf{R}, t) = -\frac{\mu \mathbf{m}_m \exp(i\omega_0 t)}{4\pi} \left( \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{i} - \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{j} \right) \frac{\exp(-i\kappa_0 R)}{R}, \quad (2.31)$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{R}, t) = \frac{\mathbf{m}_m \exp(i\omega_0 t)}{4\pi} \left( \nabla \frac{\partial}{\partial z} + \kappa_0^2 \mathbf{k} \right) \frac{\exp(-i\kappa_0 R)}{R}. \quad (2.32)$$

Este resultado também é fundamental para exploração geofísica com métodos eletromagnéticos que empregam bobinas transmissoras de indução, como o caso do **Slingram**, **FDEM Espectral** e **TDEM**.

## Domínio do Tempo Versus Domínio da Frequência

Se o sinal é periódico, pode-se expressá-lo por uma série de Fourier, e as relações continuam válidas para cada termo da série. Entretanto, se o sinal não é periódico, como o caso do sinal transiente no tempo, é necessário empregar as integrais de Fourier. Um par de Transformadas de Fourier compõe um sistema de duas equações integrais, o qual possibilita determinar uma função no domínio da frequência a partir de sua representação no domínio do tempo ou vice-versa. Convém observar que a passagem de uma função de um domínio para outro altera a sua unidade física (Abramowitz Stegun., 1968).

## CAPÍTULO 3

# Caracterização Geofísica com Método Eletromagnético Transiente

Embora a extensão da pluma de contaminação ácida tenha sido definida com base em dados interpretados de geofísica elétrica a corrente contínua, algumas incertezas relacionadas a ruídos culturais e a problemas experimentais recomendavam a confirmação de alguns desses resultados através do uso de outros métodos ou técnicas independentes. Uma questão não devidamente considerada na etapa anterior de desenvolvimento dos trabalhos geofísicos se refere a rede de aterramento elétrico industrial da empresa. Apenas recentemente se teve ciência e informações acerca da presença extensiva de uma densa rede de aterramento elétrico, constituída por grossos cabos de cobre, equiespaçados e entrelaçados em malha, e soterrados a pequena profundidade (da ordem de 1m). É provável que várias das sondagens elétricas internas à área industrial tenham sido afetadas por essa densa malha. Algumas anomalias extremamente altas de cargabilidade também podem ter resultado de efeitos dessa rede.

Um outro problema apenas parcialmente contornado diz respeito ao elevado contraste de resistividade elétrica entre a zona não saturada do aquífero e o núcleo da pluma ácida que pode alcançar de 100 a 1000 vezes maior. Tal problema pôde ser localmente contornado usando a técnica de sondagens de resistividade com um eletrodo de corrente enterrado a diferentes profundidades no terreno (Palma, 2004).

Por isso, decidiu-se empregar o método eletromagnético transiente SIROTEM para avaliar seu desempenho em ambiente de ruído cultural elevado e como técnica geofísica de investigação rasa. Em caso de aplicação bem sucedida seus resultados seriam combinados aos resultados geológicos e geofísicos anteriores, dando maior garantia a delimitação geométrica da pluma contaminante. Tal experimento foi proposto como tema e executado como meu trabalho final de graduação.

### 3.1 O Sistema SIROTEM

O equipamento SIROTEM - MK3 é um sistema eletromagnético que opera no domínio do tempo, fabricado pela empresa australiana Geoinstruments Pty Ltd. Trata-se de um sistema

controlado e operado por microprocessador com armazenamento interno das informações adquiridas. Neste trabalho, foi usado num padrão de aquisição em bobina única (single loop) para transmissão e recepção dos pulsos e sinais eletromagnéticos.

Foi utilizada uma espira quadrada não aterrada espalhada na superfície do terreno é energizada por uma corrente contínua (função de excitação em degrau). Essa corrente fixada induz correntes secundárias no terreno subsuperficial. Decorrido um tempo finito suficientemente longo para se anularem os transientes da ligação, essa corrente é abruptamente interrompida. Pela lei de indução de Faraday, variações abruptas no campo primário do transmissor induzem correntes secundárias que se propagam na terra. Na aproximação quase-estática distinguem-se os seguintes estágios no processo transiente: (i) num estágio inicial, as correntes ficam confinadas na superfície do terreno condutor; (ii) numa etapa intermediária, devido as perdas ohmicas, essas correntes superficiais começam a fluir e dissipam-se (difundem-se) no condutor; (iii) após a realização do processo difusivo a configuração da distribuição de correntes torna-se praticamente invariante no tempo (estágio tardio).

No período desligado o campo magnético transiente ou sua derivada temporal é medido como uma função do tempo, usando a bobina quadrada como receptor, após a corrente ter sido desligada. Com a interrupção da corrente primária, o campo secundário decai de uma forma que depende basicamente da geometria e da distribuição da condutividade elétrica em sub-superfície. Os procedimentos de instalação da bobina, energização do terreno e medição do campo transiente são repetidos a cada estação de medição. Os valores observados e os parâmetros deles derivados são arbitrariamente atribuídos aos centros das bobinas. A profundidade de investigação ou de difusão das correntes nesse modo para um meio homogêneo, depende efetivamente, da resistividade elétrica do meio, do tempo de observação a partir do instante em que a corrente é desligada e da permeabilidade magnética desse meio.

O levantamento realizado na região da Caraiba Metais teve como objetivo principal contribuir para melhor mapear a distribuição espacial da resistividade dos materiais geológicos em sub-superfície, até cerca de 20m de profundidade, ou seja até a base do substrato do aquífero. O cálculo de resistividade aparente no SIROTEM para configuração de bobina coincidente, em um semi-espaço homogêneo é baseada na seguinte fórmula assintótica:

$$r = 6,32.10^{-12}.A^{2/3}.b^{4/3}.(V/I)^{-2/3}.t^{-5/3}$$

Onde  $r$  é a resistividade aparente (em ohm-metro),  $A$  é a área efetiva da bobina,  $b$  é o comprimento do lado da bobina,  $V/I$  é a resposta transiente ( $V/A$ ) e  $t$  o tempo de decaimento ( $s$ ).

## 3.2 Procedimentos Operacionais

Os trabalhos de campo foram realizados num período de 7 dias no mês de agosto de 2004. Eles foram planejados conjuntamente com os Profs. Olivar A . L. de Lima e Hédison K. Sato. A equipe de trabalho da UFBA foi composta por mim, pelo técnico geofísico Luiz M. dos Santos e por dois auxiliares, operários da Caraiba Metais, que auxiliaram no deslocamento dos cabos da bobina nas mudanças das estações. Podemos observar nas Figuras 3.1 e 3.2 fotos de dois locais na área da empresa onde efetuamos os levantamentos, sendo que a figura da direita é justamente o local onde os dados não foram utilizados por motivos que serão discutidos mais a frente. O levantamento com o sistema SIROTEM foi realizado



Figura 3.1: Foto de campo, linha 1.



Figura 3.2: Foto de campo, linha 2.

em 85 estações distribuídas ao longo de cinco seções irradiadas a partir da planta de ácido sulfúrico, conforme indicado no mapa da Figura 1.3. Como já foi dito, esse sistema possui forma de onda quadrada, bipolar para a corrente no transmissor, e as medidas são realizadas durante o período em que a corrente permanece desligada. O desligamento da bobina não é instantâneo e pode ser satisfatoriamente aproximado por uma rampa que, para uma bobina de 20m de lado, dura cerca de 60 microsegundos. O intervalo de tempo em que as medidas podem ser efetuadas com este equipamento variam de 0,050 ns a 1843 ns em até 53 janelas selecionadas pelo usuário (Geoinstruments, 1996).

A profundidade de exploração de um sistema eletromagnético transiente (TEM), no modo bobina única, é empiricamente estimada como igual ao lado da bobina quadrada. Com esta aproximação foram utilizados dimensões de bobinas de 10 e 20 m de lado, objetivando investigar até 20m de profundidade. Com esse desenho pretendeu-se investigar, em nível de detalhe, a estrutura geológica da sub-superfície até a base impermeável do aquífero.

Um sistema EM de bobina única tem a vantagem de explorar profundidades maiores em meios condutores nos quais as principais fontes de ruído estão localizadas em profundidades mais rasas que as do alvo de interesse (Nabighian Macnae, 1996). Essa parece ser a condição predominante na área do bloco aquífero Caraiba. Na forma de aquisição utilizada no campo,

efetivamente, foi realizada uma sondagem eletromagnética transiente sob cada estação do terreno, tomada como o centro da bobina única.

Em função de testes de aquisição preliminares efetuados na área adotou-se a estratégia de fazer duas aquisições por estação, usando diferentes janelas e atrasos de tempos. Uma com atraso de tempo zero, 20 janelas e 256 empilhamentos para investigar, com mais detalhe, a parte mais rasa da subsuperfície; outra, com 40 janelas, para alcançar a máxima profundidade investigada. Os dados coletados com o sistema SIROTEM foram tratados e analisados com o software EM-Vision 2.0 adquirido juntamente com o sistema.

### **3.3 Procedimentos de Interpretação**

Os dados obtidos no campo, após análise visual das curvas individuais de cada sondagem TDEM e eliminação ou substituição por valores interpolados de pontos com altos ruídos, foram usados para construir pseudo-seções de resistividade aparente versus tempo para todas as linhas levantadas. Portanto, o processamento inicial dos dados brutos obtidos com o SIROTEM na área da Caraíba Metais foram representados como curvas de decaimento do campo ou da resistividade aparente em função do tempo, e após redução ou eliminação de ruídos, como pseudoseções de resistividade contra tempo, usando o pacote de softwares EM-Vision.

O programa EM-Vision possui todos os recursos para realizar o processamento, a modelagem e a interpretação quantitativa dos dados SIROTEM. Num primeiro passo, se exporta os dados armazenados no SIROTEM para o microcomputador no qual o EM-Vision foi instalado. Os registros são armazenados no formato ASCII, contendo todas as informações sobre a configuração utilizada na aquisição dos dados, tais como: data, hora, ganhos e filtros aplicados, números de estações, área da espira transmissora-receptora, número de medidas por estação, resistência do circuito, tensão e corrente elétrica máxima, e os dados numéricos correspondentes às respostas EM do ambiente em subsuperfície.

De posse dos arquivos de dados efetua-se uma análise dos ruídos ambientais e culturais, os quais podem ser removidos ou interpolados, por inspeção dos gráficos de decaimento da resistividade com o tempo. No presente caso, em todas as linhas, os tempos correspondentes às seis primeiras janelas de medição foram sumariamente excluídos por causa das instalações construtivas e da rede do aterramento industrial, em toda extensão da área, a cerca de 1m da superfície.

Em seguida, foram geradas as pseudo-seções de resistividade e as curvas de decaimento reduzidas e realizada a inversão automática das seções para resistividades verdadeiras das camadas versus profundidade. Em particular, como a área estudada já foi objeto de estudos geoeletricos anteriores, se propôs um modelo inicial de terreno horizontalmente estratificado,

com resistividades próximas dos valores previamente conhecidos. Dados os modelos diretos, iniciais, representativos de algumas ou de todas as estações da seção, o programa busca um ajuste automático de todas as sondagens das seções, de acordo com os números de camadas fixadas nos modelos diretos e em conformidade com um critério de erro mínimo quadrático para ajuste linear das sondagens EM. Com os modelos finais ajustados para todas as seções, o programa permite calcular a resposta teórica, em função do tempo, do modelo geológico ajustado, a ser comparada com a seção experimental obtida no campo. Portanto, neste trabalho, para cada uma das seções levantadas são mostradas, conjuntamente, uma pseudo-seção contendo os dados originais registrados reduzidos de efeitos de ruídos, uma pseudo-seção da resistividade aparente observada em função do tempo, uma pseudo-seção da resistividade aparente computada para o modelo final ajustado, e a seção geológico-estrutural final. Para verificar a precisão dos ajustes efetuados para cada sondagem EM, o programa permite visualizar e apresentar gráficos comparativos das curvas observadas e calculadas, do decaimento do campo ou da função resistividade aparente versus tempo. A questão da ambiguidade presente nos métodos EM foi aqui tratada em função dos dados geoeletricos anteriores e das informações de poços disponíveis. Dessa forma, se pode garantir que os modelos finais ajustados estão em conformidade com o conhecimento geológico e geofísico que se tem da área. Observou-se que em quase todas as linhas, verificou-se excelente concordância de interpretação, com exceção da linha 5 (área das "contratadas") que apresentou muito ruído.

### 3.4 Resultados Experimentais

As curvas das 85 sondagem TDEM executadas na área da Caraiba Metais mostram, logo no início, um decréscimo acentuado da resistividade com o tempo, em resposta ao elevado contraste de resistividade entre a zona não-saturada da Formação Marizal e o aquífero local, em grande parte contendo águas com variados graus de contaminação. Estas curvas, geralmente terminam com tendências assintóticas para valores entre 2 e 10 ohm.m, ou mostram ainda decaimento para valores abaixo de 1,0 ohm.m. Alguns pontos de inflexão intermediários demonstram haver uma estratificação elétrica no material aquífero da área estudada.

A Figura 3.3 contém a combinação de pseudo-seções obtidas ao longo da linha 1 com bobina de 20 m de lado, iniciada próximo a torre de resfriamento e se estendendo para sul até a estação de número 28. No modelo geoeletrico final mostrado na base a figura citada, se delinea um zona de muito baixa resistividade ao longo de todo o perfil, presente a partir de 10 a 15m de profundidade e que se estende, provavelmente, até a base do aquífero. A auréola de transição mostrada possui resistividades variando entre 10 e 56 ohm.m, em função, possivelmente, de variações no conteúdo de argila nos arenitos. Observam-se, nas pseudo-seções de resistividade aparente, duas notáveis anomalias condutivas que dão conta das dimensões

e intensidades das atuais fontes de contaminação. Na Figura 3.4 é mostrado um gráfico representativo das sondagens experimental e teórica obtidas na estação localizada a 190 m do início do perfil da linha 1. Através dela é possível verificar o grau de precisão alcançado no ajuste unidimensional, iterativo, da referida pseudo-seção. A Figura 3.5 mostra a combinação de pseudo-seções obtidas ao longo da linha 3, também com bobina de 20 m de lado. Essa linha foi iniciada na proximidade do poço de monitoramento PM-18 e concluída em frente a torre de resfriamento da planta de ácido sulfúrico. O modelo geoeletrico final, mostrado na base da referida figura, indica a presença de uma zona muito condutora, estendendo-se de uma profundidade de cerca de 7 m até a profundidade máxima alcançada na área, estimada em cerca de 25 m. O substrato de 2,4 ohm.m, verificado na extremidade NW do perfil, é interpretado como representando o espesso pacote de folhelhos da Formação São Sebastião, que delimita a base do aquífero freático na maior parte do Bloco Caraíba. O intervalo superior, de resistividade entre 37 e 76 ohm.m, representa a zona saturada do aquífero em transição para dois núcleos mais condutivos, bem visíveis nas pseudo-seções de resistividade aparente. O mapa de contornos da resistividade verdadeira do aquífero mostrado na Figura 1.3 delimita, claramente, a extensão lateral da pluma em volta do perímetro industrial da empresa. Todavia, há também sugestivas indicações de uma tendência de seu crescimento lateral no sentido NW, para além do limite apontado. Os resultados de SIROTEM na linha 3 indicam, nitidamente, a presença de um eixo de propagação preferencial do contaminante na direção mencionada, que deve estar associado a uma faixa mais permeável do aquífero.

A Figura 3.6 apresenta-se o gráfico das sondagens experimental e teórica obtidas na estação localizada a 150m do início do perfil da linha 3. Trata-se de uma curva representativa daquelas obtidas na seção. Novamente, aqui, podemos verificar o grau de precisão do ajuste unidimensional da referida pseudo-seção. As combinações das seções obtidas ao longo das linhas 4 e 5 (contratadas) vêm mostradas, respectivamente, nas figuras 3.6 e 3.7. Essas linhas foram levantadas ao longo dos canteiros paralelos a via E - W que passa em frente às plantas de ácido sulfúrico e da eletrólise. A linha 4 foi obtida com bobina de 10 m de lado, enquanto a linha 5 foi levantada com bobina de 20 m de lado. Como são linhas paralelas e estendidas sobre o mesmo contexto geológico se esperava modelos muito semelhantes para as mesmas. Todavia, há algumas diferenças marcantes. Portanto, na Figura 3.5 o sinal TDEM penetrou apenas a camada transicional e o topo da pluma. A configuração de camadas ao longo da linha 4 é de geometria regular e tem pouca variação na resistividade elétrica. A linha 4 como mostra a Figura 3.8 foi iniciada no limite lateral da planta de ácido sulfúrico. No modelo geoeletrico final mostrado na base da Figura 3.5, se delinea uma zona de muito baixa resistividade ao longo de todo o perfil, presente a partir de 10 a 15 m de profundidade e que se estende, provavelmente, até a base do aquífero. A auréola de transição é mostrada possuir resistividades variando entre 10 e 56 ohm.m, em função, possivelmente, de variações no conteúdo de argila nos arenitos. Observam-se, nas pseudo-seções de resistividade aparente, uma notável anomalia condutiva que dá conta da dimensão

e intensidade da principal fonte de contaminação. O modelo SIROTEM interpretado para esta seção guarda uma boa correlação com os dados geoeletricos convencionais mostrados na Figura 1.4. As Figuras 3.9 e 3.10 mostram os gráficos das sondagens experimentais e teóricas obtidas em estações representativas das linhas 4 e 5. Elas servem para avaliar a qualidade dos ajustes obtidos nas sondagens TDEM dessas duas linhas geofísicas.

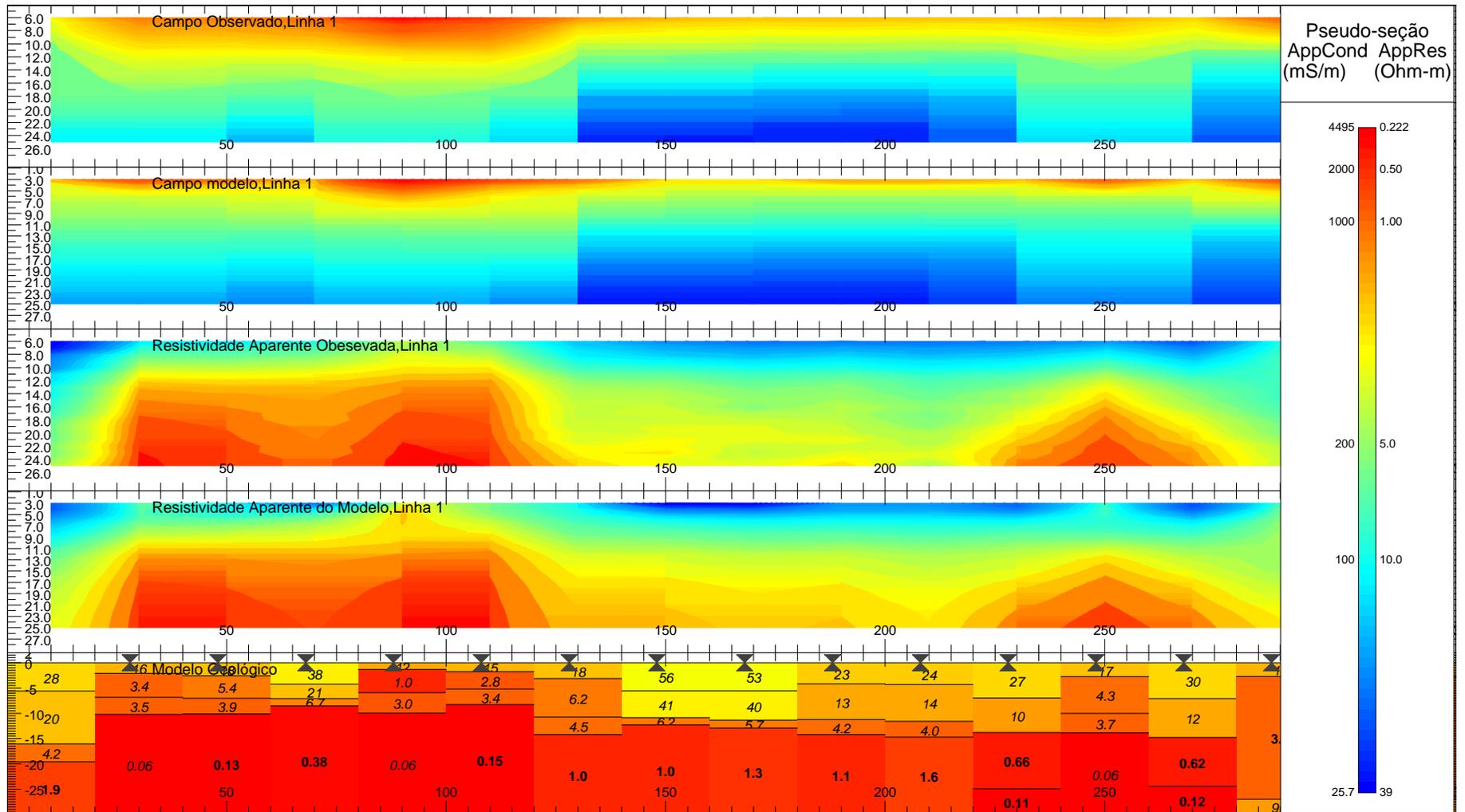


Figura 3.3: Pseudo-seções do Campo e resistividades aparentes observadas e calculadas para a linha 1

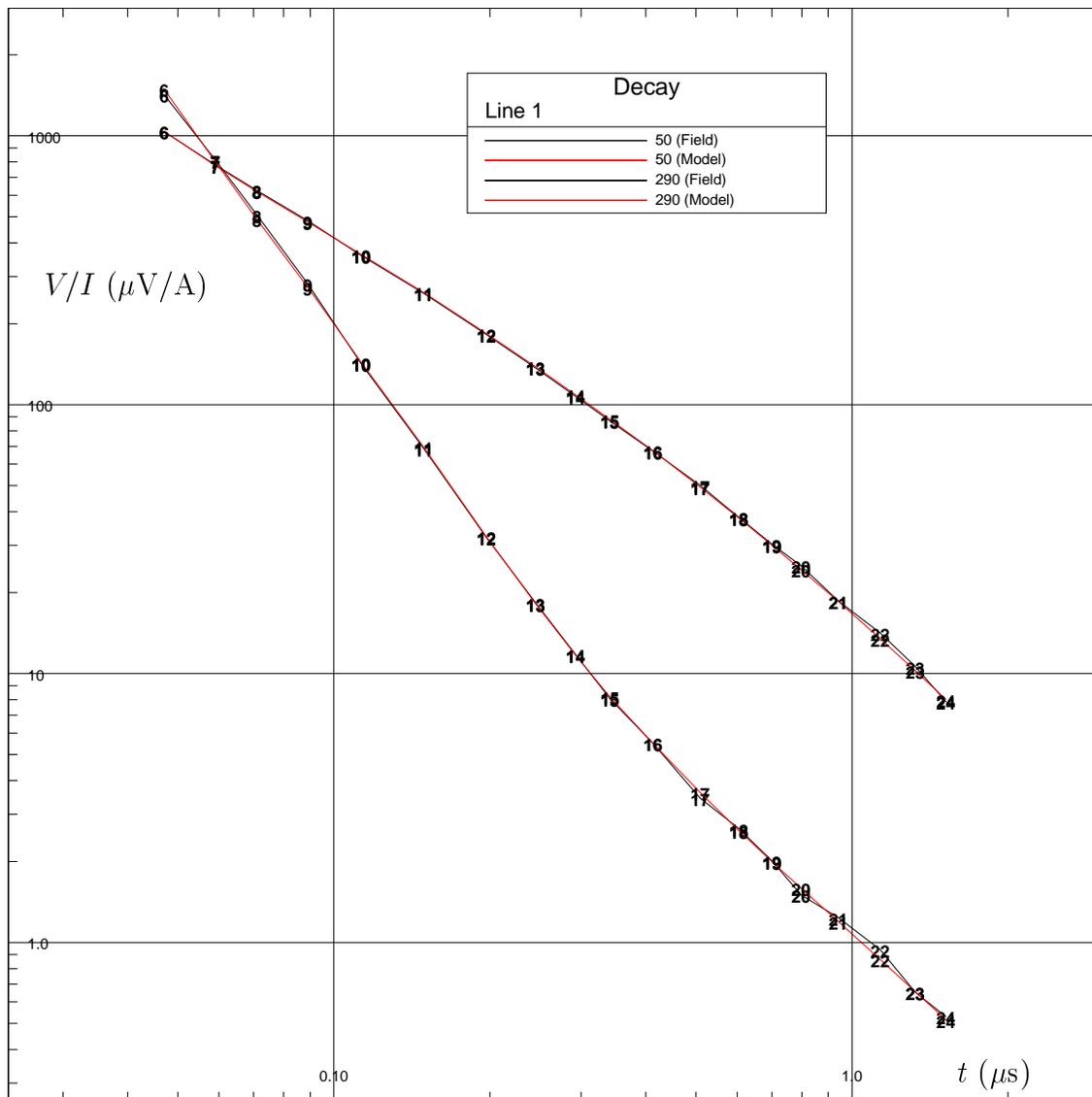


Figura 3.4: Curvas de decaimento do campo, observado e modelado, Linha 1

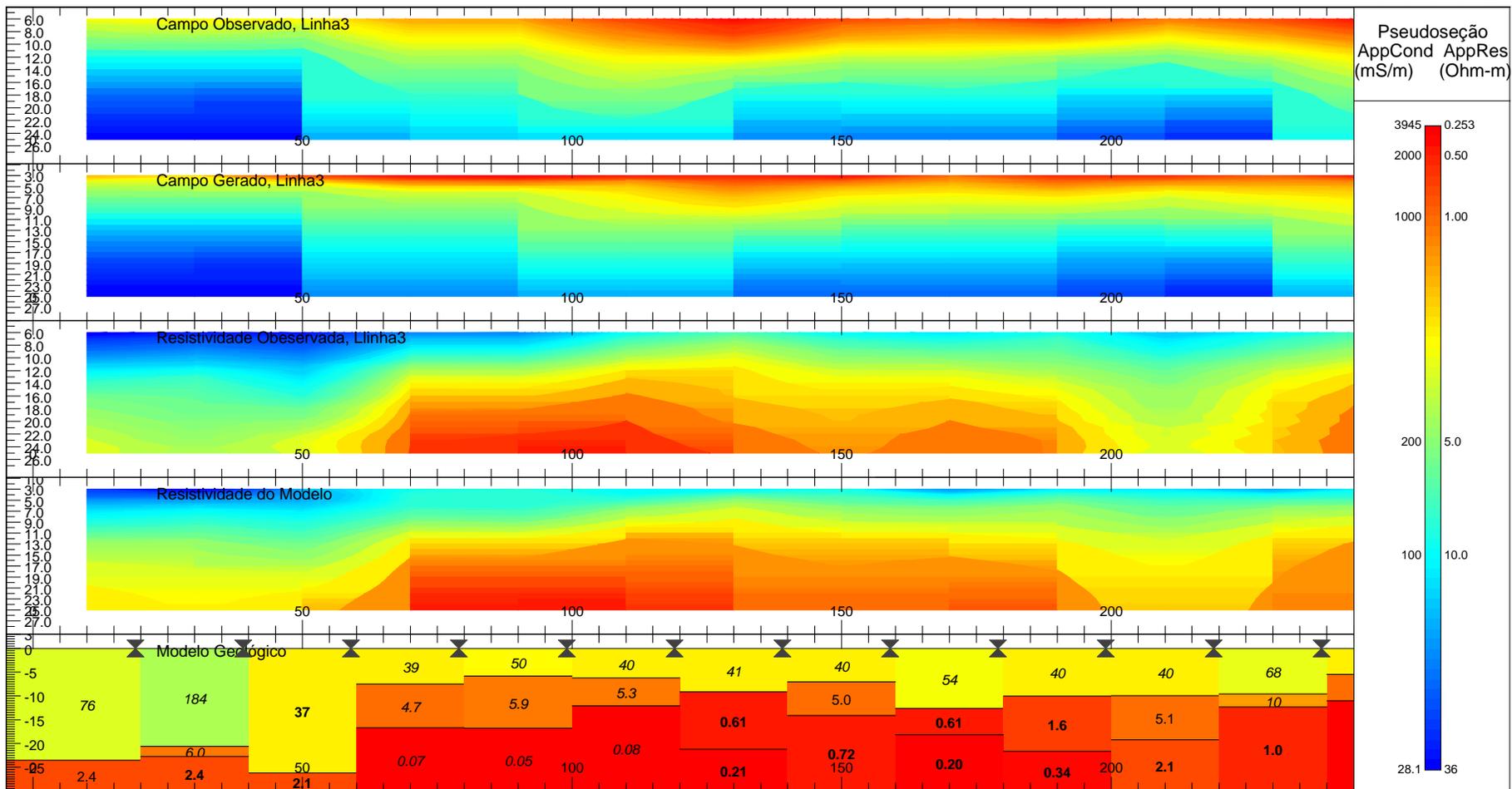


Figura 3.5: Pseudo-seções do Campo e resistividades aparentes observadas e calculadas para a Linha 3

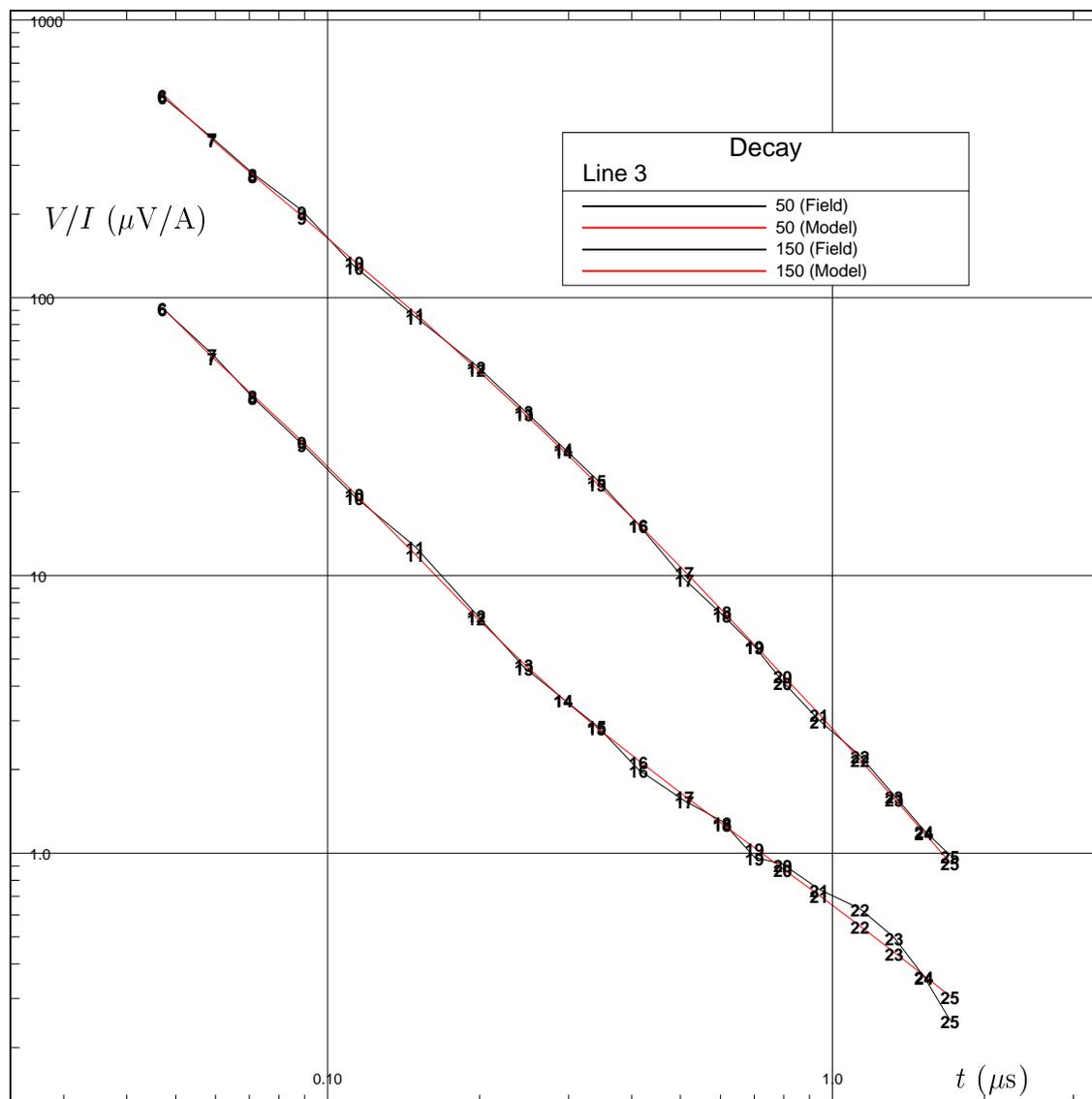


Figura 3.6: Curvas de decaimento do campo, observado e modelado, Linha 3

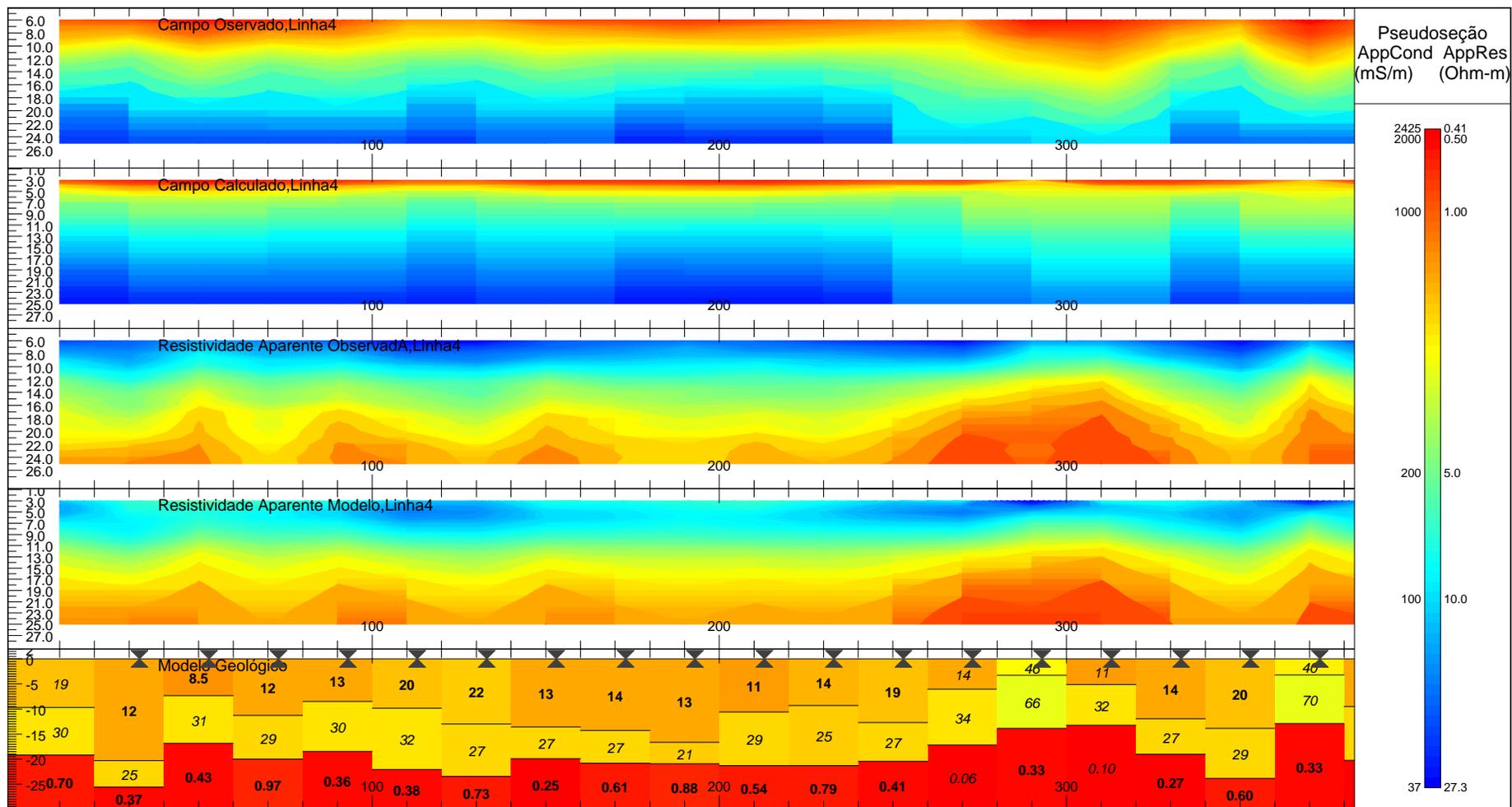


Figura 3.7: Pseudo-seções do Campo e resistividades aparentes observadas e calculadas para a Linha 4

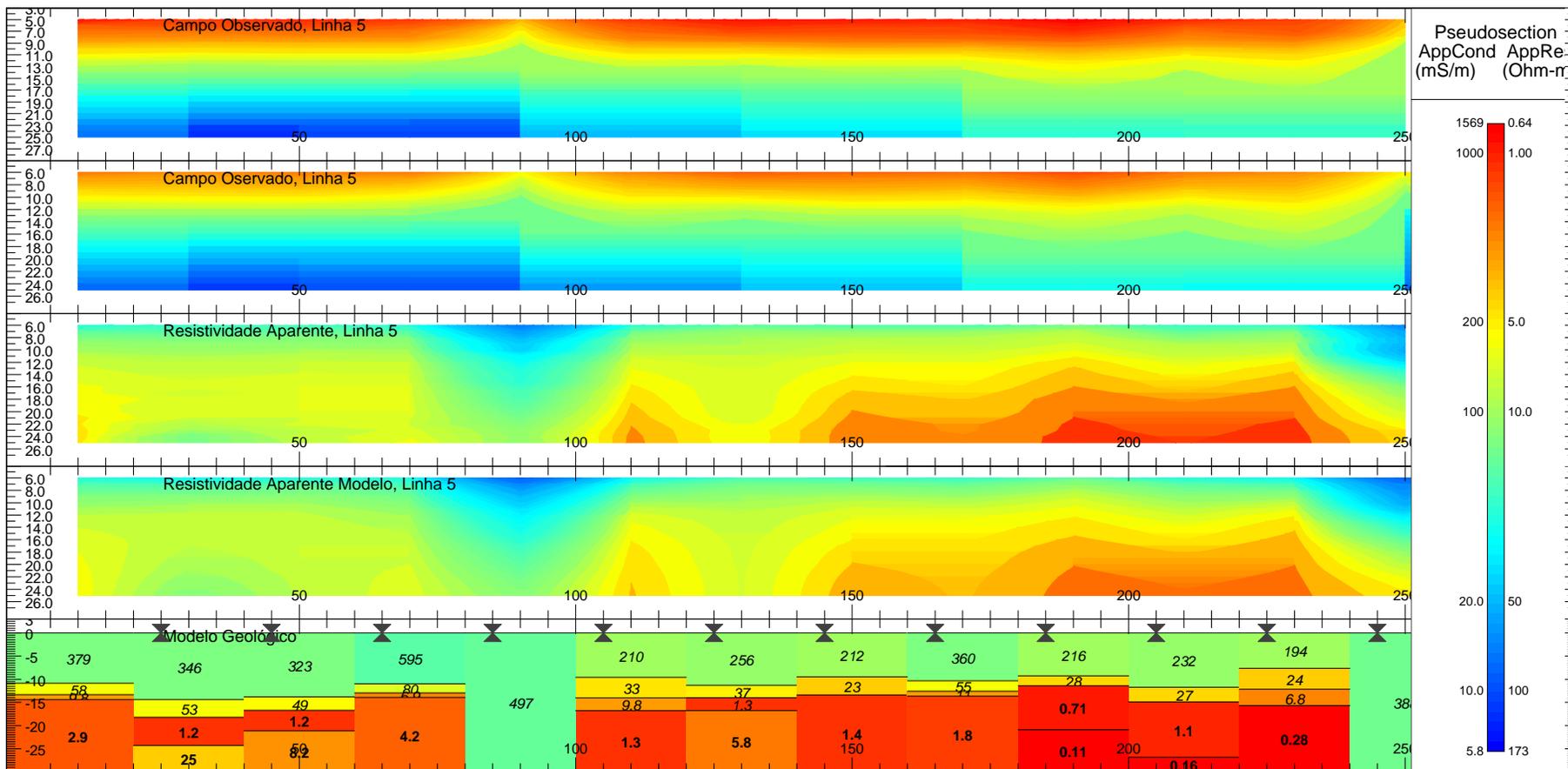


Figura 3.8: Pseudo-seções do Campo e resitvidades aparentes observadas e calculadas para a Linha 5.

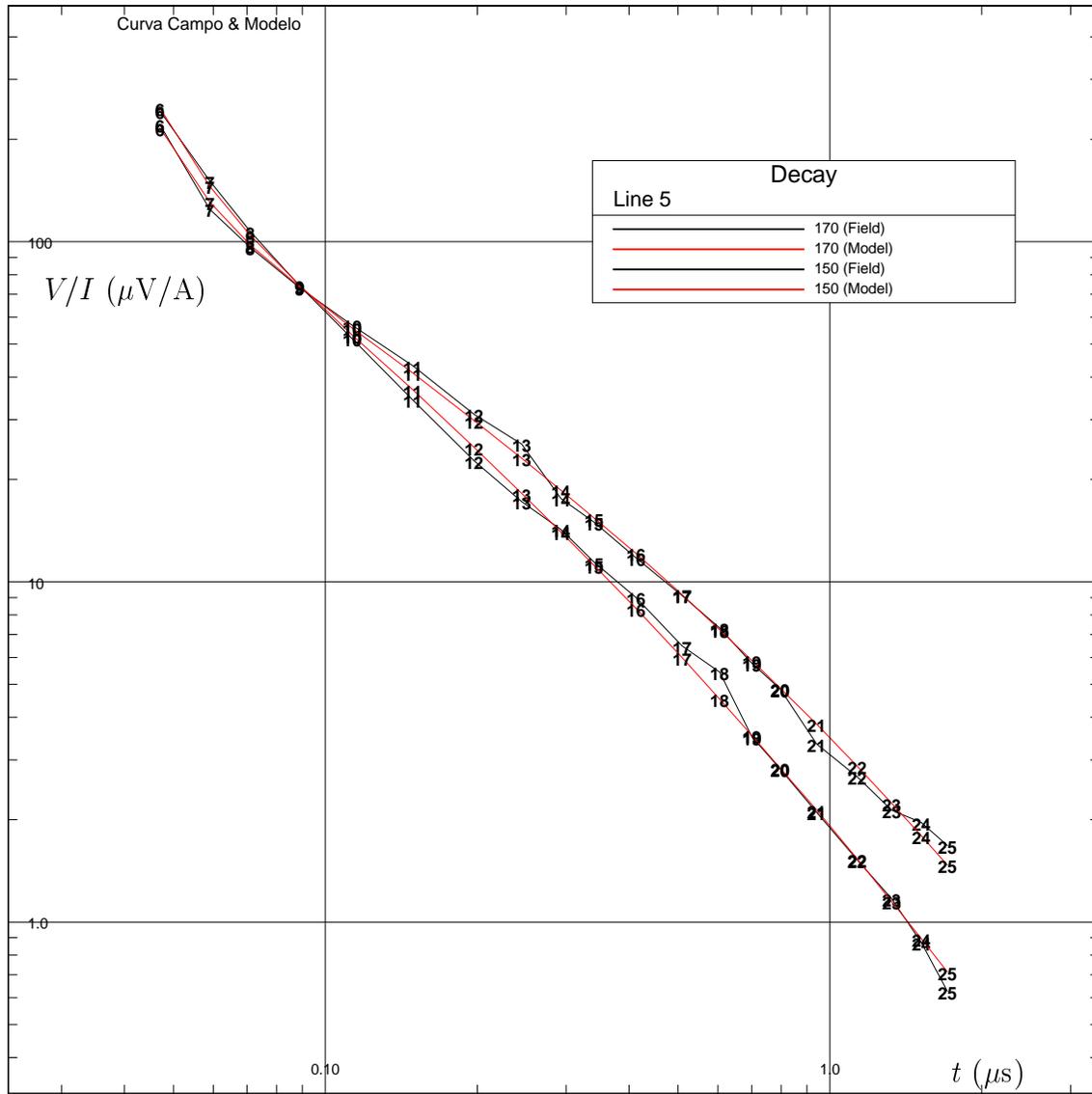


Figura 3.9: Curvas de decaimento do campo, observado e modelado, Linha 4

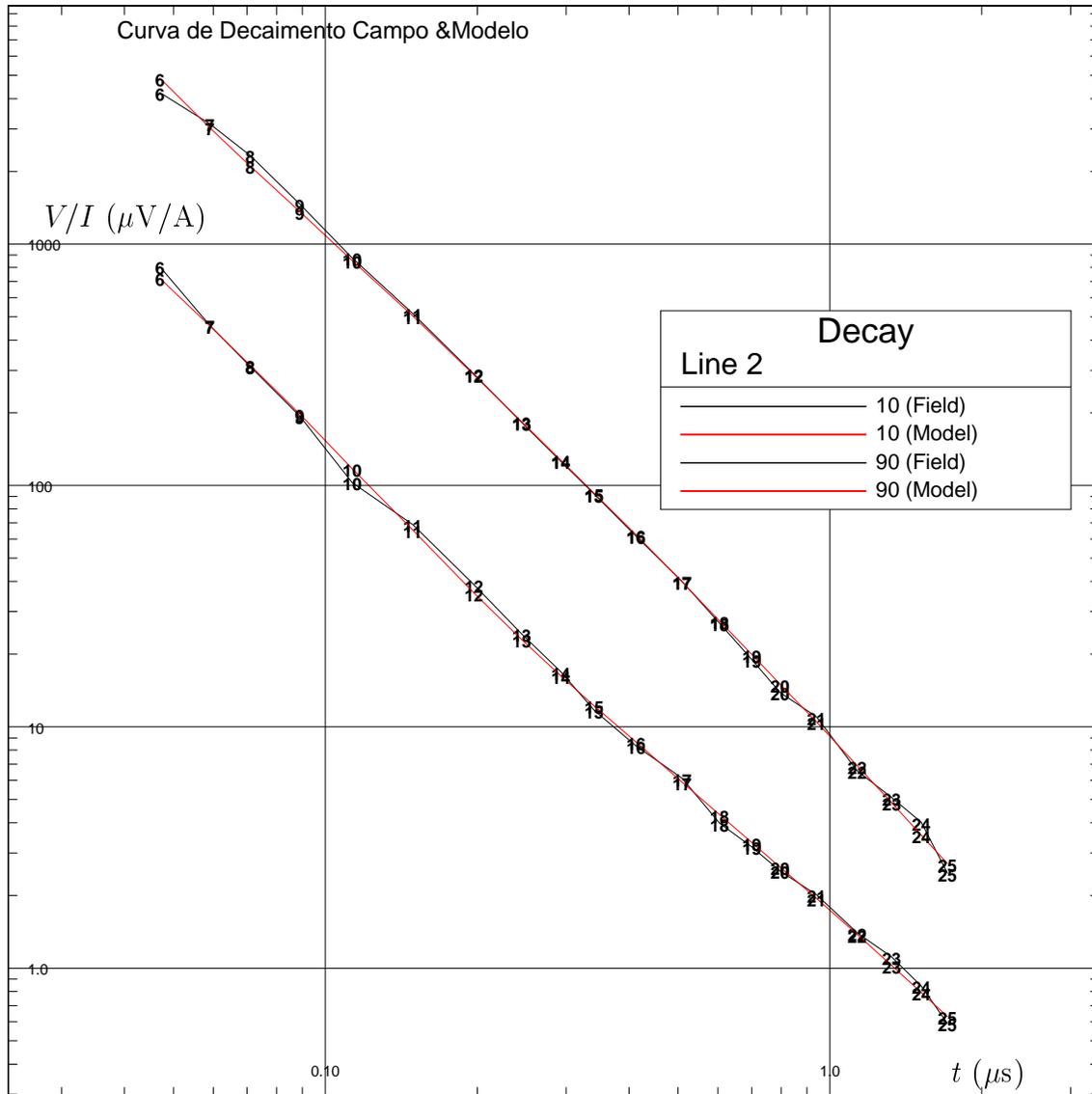


Figura 3.10: Curvas de decaimento do campo, observado e modelado, Linha 5

# CAPÍTULO 4

## Conclusões

O levantamento geofísico EM com SIROTEM realizado na área da Caraiba Metais foi planejado para ser executado ao longo de linhas transversais estrategicamente locadas em relação a anomalia elétrica mapeada com a técnica convencional de eletrorresistividade (Lima, 2000). O objetivo deste levantamento foi o de confirmar e estender a geometria da pluma ácida anteriormente detectada, para locais ou regiões onde a técnica eletroresistiva havia apresentado resultados incertos ou ambíguos.

Os resultados obtidos, discutidos no capítulo 2, demonstram que a técnica TDEM, mesmo em locais com fortes mas, localizados ruídos, pode produzir resultados coerentes e satisfatórios. No presente caso, os resultados globais possibilitaram não só avaliar as informações dos trabalhos geofísicos anteriores, mas também revelar a presença da contaminação em áreas não tão bem identificadas.

Esses resultados basicamente confirmam a configuração de duas zonas principais de contaminação ácida: a mais forte delas localizada sob a área de produção do ácido sulfúrico; e a outra situada abaixo da planta de eletrólise. Essas zonas consistem de um núcleo basal acidificado de resistividade muito baixa (por vezes inferior a 1 ohm.m). Este núcleo é envolvido por uma zona de transição, na qual a resistividade varia tanto em função de variações na qualidade da água armazenada, quanto em função da quantidade de argila disseminada nos arenitos.

Há também boa coincidência entre os valores de profundidade e de resistividade elétrica obtidos com as técnicas elétrica e eletromagnética. Cabe ainda registrar a vantagem operacional da técnica SIROTEM, na modalidade bobina única, que é de execução bem mais rápida que a da sondagem elétrica vertical. A título de comparação temos que o levantamento da linha 4, usando bobinas de 10 e de 20m de lado, foi realizado em meio dia de trabalho, enquanto o perfil de eletrorresistividade correspondente demorou mais de três dias para ser executado.

Também deve-se registrar que as dimensões das bobinas e as orientações das linhas usadas no presente levantamento foram fixadas com base no espaço físico disponível para operação e para atingir uma profundidade suficiente para obter respostas provenientes do substrato aquífero. Desse compromisso, resultou que obteve-se boa definição da configuração

da auréola e do topo do núcleo da pluma. Todavia, apenas localmente observou-se resposta proveniente do substrato. Isso se deve, em parte, à limitação na profundidade de investigação, como também do pequeno contraste de resistividade entre a pluma e os folhelhos da Formação São Sebastião.

Graças o avanço da tecnologia e, conseqüente, desenvolvimento significativo dos equipamentos de prospecção geofísica, processamento e interpretação numérica dos dados, atualmente é permitido realizar aquisições de dados eletromagnéticos com grande qualidade, melhorando, sensivelmente, a eficiência dos métodos eletromagnéticos. A utilização do TDEM tem várias vantagens em relação aos métodos de corrente contínua mais comuns, que medem resistividade. O TDEM não necessita de eletrodos e assim é menos sensível a mudanças laterais no subsolo. A resistividade de corrente contínua, requer longas expansões de eletrodos com comprimentos que são tipicamente cerca de três a cinco vezes a profundidade de exploração. Assim, a investigação para pequenas profundidades requer uma área de estratificação uniforme e terrenos com uma extensão lateral muito maiores que a profundidade de investigação. Em contraste, técnicas de TDEM podem obter grandes profundidades de exploração com uma bobina de aproximadamente 15 m para o transmissor.

Verificou-se desta forma a eficiência e viável aplicação da técnica TDEM no estudo do meio ambiente, deixando em aberto, para uma aplicação mais elaborada desta técnica em tantas outras áreas relacionada ao meio ambiente.

# Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a energia salutar e divina que me proporciona a estadia temporária neste mundo para desenvolver meu espírito e intelecto, a qual defino como Deus.

Ao mestre Olivar A.L de Lima especialmente pela oportunidade e imprescindível e orientação, principalmente na finalização, onde em nenhum momento se opôs a passar feriados, sábados domingos orientando-me neste trabalho.

Ao professor Hédison K. Sato na orientação e desenvolvimento deste trabalho, por todas as dicas e observações.

A banca examinadora formada pelos doutores Olivar Antônio Lima de Lima, Hédison K. Sato e Jacira Cristina B. Freitas por todas as correções e sugestões que foram incuídas e contribuíram fundamentalmente na melhoria da qualidade deste trabalho.

Ao CPGG pelo apoio instrumental e tecnológico disponibilizando o Sirotem Mk3, instrumento utilizado no levantamento geofísico, ao professor Edson Sampaio por disponibilizar a licença de software e computadores para a interpretação dos dados adquiridos.

A Joaquim Lago por toda orientação na utilização do sistema Linux e outros.

A Athaebson, geofísico e amigo pela orientação na utilização do software EMvision para a interpretados dados.

A Luis Medeiros pela paciência e apoio nos trabalhos de campo.

À Caraíba Metais pela parceria com o CPGG que possibilitou a execução do levantamento dos dados em sua área contribuindo com o desenvolvimento científico. Ao geólogo Péricles por todo apoio dado na empresa, assim como toda a equipe de segurança.

A todos os professores do CPGG que incentivaram nas horas de dificuldade.

A minha esposa pela paciência

Aos colegas e amigos Anderson Abreu, Liliane Mota, Daiana, Gustavo, Agamenon, Fernando, Carlos Eduardo, Eduardo, Fabio Rodamilans, Nubia, Joao, Anderson Gusmão, Josair, Alberto Alexandre, Ricardo, Osmar, Lene, Najara, Paulo, Rosangela, Joelson, Pitombo, enfim a todos que injustamente esqueci de citar e contribuíram e influenciaram na minha vida no IG/UFBA.

# Referências Bibliográficas

- Abramowitz Stegun., I. (1968) Higher transcendental functions, 2, NBSAM, New York.
- Danielsen, J. E.; Auken, E.; Jorgensen, F.; Sondergaard, V. Sorasen, K. I. (1982) The application of the transient eletromagnetic method in hydrogeophysucal surveys, Journal Applied Geophysics, **53**:181–198.
- Hoekstra, P. Blohm, M. W. (1980) Case Histories of Time-Domain Eletromagnetic Soundings im Enviromental Geophysics, SEG, 2.
- Lima, O. A. L. (1991) Avaliação hidrogeofísica de arenitos aquíferos na bacia do recôncavo-tucano, ba, , CPGG/UFBA, Salvador.
- Lima, O. A. L. (1999) Caracterização hidrológica e dos padrões de migração da Poluição no Sistema Aquífero do Recôncavo., Tese para concurso de professor titular., Universidade Federal da Bahia, Salvador-Ba.
- Lima, O. A. L. (2000) Estudo da contaminação no aquífero freático sob a área da caraíba metais: Caracterização do sistema e análise de sua recuperação, , CPGG/UFBA, Salvador.
- Lima, O. A. L. (2002) Estudo da contaminação no aquífero freático sob a área da caraíba metais: Caracterização e remediação, , CPGG/UFBA, Salvador.
- Nabighian, M. N. Macnae, J. C. (1996) Time domain electromagnetic prospecting methods, Geophysics n° 3, New York.
- Palma, C. M. (2004) Detalhamento elétrico de uma pluma de contaminação no bloco aquífero Caraíba usando uletrodos enterrados, Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador-Ba.
- Parasni, D. S. (1966) Mining geophysycs,amsterdam/londos/new york, Elsevier Publishing Company,, 221.
- Sen, M. Stoffa, P. (1995) Global optimization methods in geophysical inversion, Advances in Exploration Geophysics 4, Elsevier, Amsterdam.
- Ward, S. H. Hohmann, G. W. (1988) Electromagnetic Method Theory for Geophysical Applications, Paperback Edition, University of Utah.