

## MODELAGEM E INTERPRETAÇÃO VLF-EM APLICADA AO MAPEAMENTO GEOLÓGICO

Thiago Freitas Lopes Conceição; Edson Emanuel Starteri Sampaio, CPGG/UFBA

Copyright 2010, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica Este texto foi preparado para a apresentação no IV Simpósio Brasileiro de Geofísica, Brasília, 14 a 17 de novembro de 2010. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IV SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

### RESUMO

Aplicamos o sistema de prospecção geofísica eletromagnética, que utiliza ondas de rádio da banda VLF (*Very Low Frequency*), visando o mapeamento de contatos litológicos entre os sedimentos da Bacia de Camamu (BC) e as rochas do seu embasamento adjacente. Como suporte a esta análise, determinamos, quantitativamente, anomalias VLF para corpos condutores variando seu ângulo de mergulho e o valor da condutividade elétrica do mesmo. O emprego do VLF permitiu identificar, qualitativamente, o contato de borda da BC, bem como, corpos condutores dentro da bacia. Os resultados obtidos sugerem a aplicação do mesmo procedimento em áreas com dificuldades no mapeamento geológico básico.

### INTRODUÇÃO

O limite de borda da porção on-shore da Bacia de Camamu (BC), apresenta indefinições, em algumas regiões, no que diz respeito a delimitação correta entre os litotipos da bacia e do embasamento cristalino. Isto ocorre em função de que este contato não está aflorante.

Em um ramo secundário da BC, aqui denominado de Ramo Valença, selecionamos uma pequena região, para a aplicação do VLF, a fim de estabelecer uma alternativa rápida e barata capaz de mapear os contatos de borda deste ramo.

O VLF é bastante usado na prospecção geofísica para a detecção de condutores subterrâneos e para um mapeamento geológico rápido, em função de sua simplicidade inerente e baixo custo operacional, bem como da interpretação qualitativa eficaz dos dados de campo. Ele é baseado, principalmente, na medida das variações do campo magnético, produzidas por heterogeneidades laterais, relativas ao campo magnético primário.

Os objetivos deste artigo são: (1) calcular e analisar a variação dos parâmetros que definem a elipse de polarização eletromagnética, quando ocorre incidência normal de uma onda plana VLF em um semi-espaço infi-

nito altamente resistivo, cuja sub-superfície consiste de linhas de corrente com condutividade elétrica anômala. O agrupamento delas corresponde, geometricamente, a um corpo condutor, onde se varia o ângulo de mergulho do mesmo, com o intuito de estudar as anomalias. Os resultados são baseados em (SAMPAIO, 2009); (2) estabelecer critérios qualitativos e semi-quantitativos para a interpretação de estruturas geológicas, a partir de dados obtidos com o VLF-EM. Por fim, nossa meta é apresentar uma alternativa, baseada na aplicação da geofísica, para mapeamento geológico rápido.

### MODELAGEM VLF-EM

Sendo uma onda eletromagnética plana incidindo com direção normal à superfície de um semi-espaço de condutividade elétrica quase nula, que engloba um corpo condutor de condutividade elétrica  $\sigma_a$  com espessura de 2m e com limites laterais variando conforme seu ângulo de mergulho. Estudamos as variações desses parâmetros em uma direção transversal aos corpos modelados, no plano  $z = 0$ , visando fornecer subsídios para a interpretação dos dados de campo.

Os modelos, mostrados na Fig. 1, apresentam dois limites com a profundidade do topo do condutor fixa para todos os modelos em  $h = 4,0m$ ; ângulo de mergulho ( $\theta$ ) e comprimento do corpo ( $l$ ). Em todos, a permeabilidade magnética e a permissividade elétrica foram assumidas para valores no vácuo.

### Curvas Teóricas para o Método Elipse de Polarização

O termo método de elipse de polarização é usado em métodos geofísicos que medem um ou mais de um parâmetros da elipse do campo magnético. O campo magnético pode ser obtido pelos modos TM ou TE. Para o caso do modo TM, o campo magnético é horizontal e paralelo à direção da estrutura prospectada. E no caso do modo TE, o campo magnético medido é variável e elipticamente polarizado no plano perpendicular à direção da estrutura. Utilizando as expressões dos campos  $H_x$  e  $H_z$ , para uma linha de corrente harmônica (LCH), calculamos a inclinação do eixo maior ( $\alpha$ ) e a elipsidade ( $\varepsilon$ ) da elipse de polarização no plano ( $X, Z$ ), empregando as expressões dadas por (SMITH and WARD, 1974) e (Mc NEILL and LABSON, 1991). Para cada modelo geramos os gráficos destes parâmetros para diversos valores de condutividade elétrica em  $S/m$ .

A Figura 2 representa, graficamente, as curvas das funções tilt e elipsidade computadas, respectivamente, para os modelos com  $\theta = 135^\circ$ ,  $\theta = 90^\circ$  e  $\theta = 45^\circ$ .

Para todos os valores do parâmetro  $\sigma_a$ , tanto o tilt quanto a elipsidade tendem em valor absoluto, para 0% quando

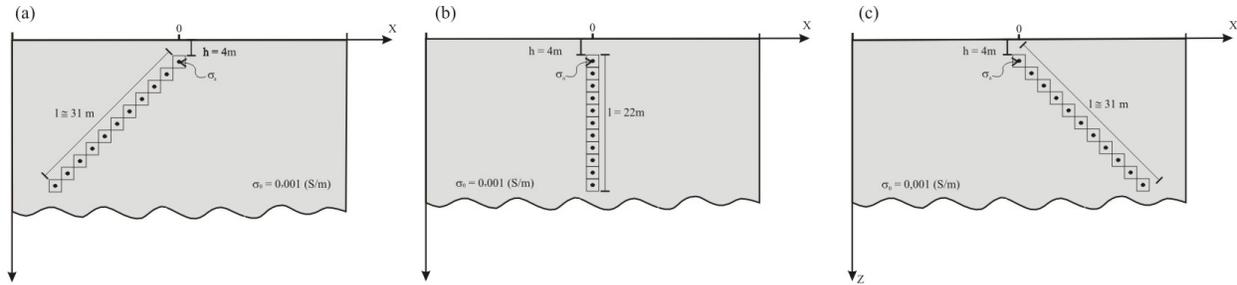


Figura 1: Representações gráficas dos modelos sintéticos: (a)  $\theta = 45^\circ$  e  $l = 31m$ ; (b)  $\theta = 90^\circ$  e  $l = 22m$ ; (c)  $\theta = 135^\circ$  e  $l = 31m$

$x \rightarrow \pm \infty$ . A magnitude dos valores destas funções tende a aumentar com o crescimento do valor da condutividade elétrica anômala. O tilt apresenta maior magnitude em comparação a elipsidade. Por sua vez, a função tilt cresce até um máximo de saturação, enquanto que a elipsidade aumenta até um valor máximo, que varia para cada modelo e depois cai. Notamos um significativo espalhamento lateral dos picos destas funções com o aumento da condutividade. Este comportamento é exemplificado em (GRANT and WEST, 1965) e ocorre devido às componentes real e imaginária do campo magnético vertical possuírem um limite condutivo e um outro resistivo.

Em todos os modelos, a magnitude do tilt apresenta variações de sinal, e é nulo em um ponto equivalente ao centro de massa. Esta anomalia (*crossover*) caracteriza a presença de um corpo condutor (Mc NEILL and LABSON, 1991). Ela é ocasionada pela inflexão do campo magnético vertical, sendo este componente nulo exatamente no ponto de inflexão. A elipsidade, por sua vez, é sempre positiva e descontínua, também, em um ponto equivalente ao centro de massa. Devido a isso, ocorrem dois picos que, a depender da geometria do modelo, apresentam magnitudes iguais ou diferentes. Outro aspecto importante é que, a função elipsidade varia mais amplamente para valores crescentes de  $\sigma_a$ , e apresenta sensível variação mesmo para  $\sigma_a = 0,01 S/m$ .

Para o corpo verticalizado as curvas das funções tilt e elipsidade são simétricas. O modelo apresenta simetria bilateral em relação ao plano  $x = 0$ . Em consequência disso, a condutividade elétrica se distribui com simetria especular em relação ao centro dos corpos. Já nos corpos inclinados há perda da simetria destas curvas. Havendo uma tendência das mesmas em se prolongarem mais na direção da declividade do corpo, permitindo a identificação da direção do mergulho.

Os resultados obtidos para a variação dos parâmetros da elipse de polarização magnética são consistentes com as propriedades elétricas do semi-espaço  $z \geq 0$  e satisfazem às equações de Maxwell. Inversamente, o estudo da variação desses parâmetros pode ser empregado na identificação das propriedades do modelo.

## INTERPRETAÇÃO DE DADOS VLF-EM

A fim de ilustra a eficácia das curvas teóricas, executamos dois perfis na direção perpendicular as bordas Oeste e Leste, do Ramo Valença, respectivamente perfil 1 (P1) e perfil 2 (P2), próximos a cidade de Valença, Bahia. Nós usamos o equipamento TVLF, fabricado pela *Iris Instruments*. Com ele coletamos medidas do tilt ( $\alpha_v$ ) e elipsidade ( $\varepsilon_v$ ), verticais.

A figura 3 apresenta os dados VLF obtidos para P1 e P2. Os dois, apresentam uma anomalia típica de um contato litológico (Mc NEILL and LABSON, 1991), respectivamente nas estações, 1220m e 260m. Estas anomalias apresentam altas amplitudes devido a variação brusca de condutividade elétrica relacionada ao contraste entre as rochas do embasamento cristalino e os sedimentos da bacia.

Ainda, nos perfis P1 e P2 são observadas variações de sinal da amplitude, indicativas de corpos condutores (Mc NEILL and LABSON, 1991), em  $\alpha_v$ , respectivamente entre o intervalo [1300m,1360m], e [120 e 180m]. Em P1 a  $\varepsilon_v$  é nula no ponto 1320m, o que evidencia a presença de um condutor entre as estações 1320m e 1340m. Devido a assimetria das anomalias, o mergulho do condutor está para leste em P1 e para oeste em P2. Estas anomalias devem está relacionadas a falhas/fraturas com fluídos, à topografia do terreno, ou a níveis mais argilosos dentro da bacia.

Selecionamos as duas anomalias VLF-EM do tipo *crossover*, supracitadas, a fim de verificar o melhor ajuste com as curvas teóricas. A Figura 4, mostra esse ajuste dos dados interpolados com as curvas teóricas. Para o P1 utilizamos o modelo com  $\theta = 45^\circ$ , os dados do tilt se ajustaram melhor aos valores de condutividade entre as curvas  $\sigma_a = 0,30 S/m$  e  $\sigma_a = 0,10 S/m$  no lado direito do condutor, enquanto que, o lado esquerdo teve o melhor ajuste entre as curvas  $\sigma_a = 1,00 S/m$  e  $\sigma_a = 0,30 S/m$ . Já em P2, usamos o modelo com  $\theta = 135^\circ$ , neste o lado direito do corpo teve melhor ajuste para  $\sigma_a = 1,0 S/m$ , e o lado oposto teve ajuste para  $\sigma_a = 0,1 S/m$ . Nas duas anomalias, verificamos que a região do topo do condutor sofreu maior ação intempérica.

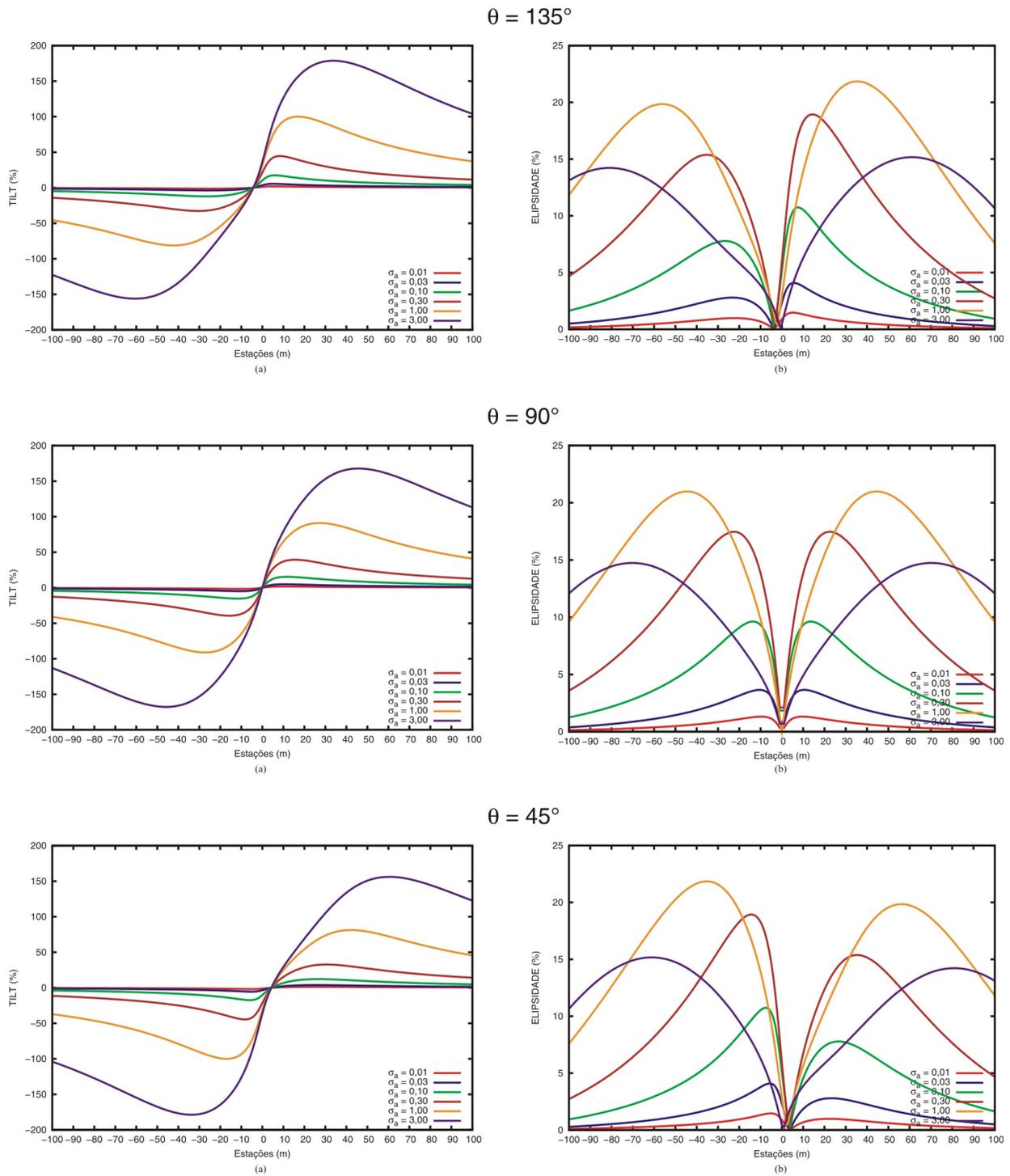


Figura 2: Variação do tilt (a) e da elipsidade (b) da elipse de polarização vertical perpendicular à direção dos modelo com  $\theta = 135^\circ$ ,  $\theta = 90^\circ$  e  $\theta = 45^\circ$ , respectivamente.

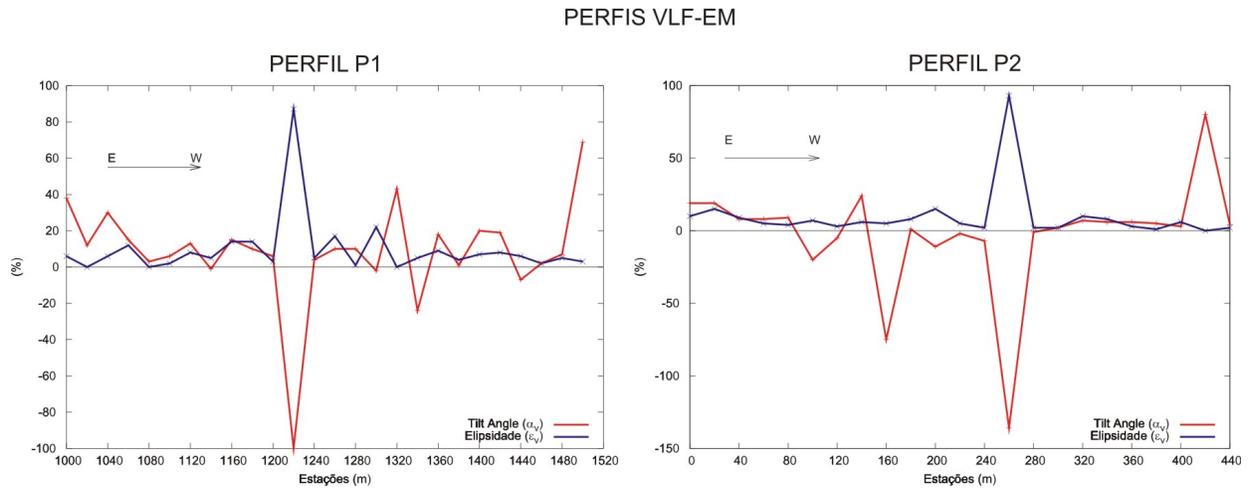


Figura 3: Dados de campo observados nos perfis 1 e 2. Perfil 1 atravessando o limite da borda oeste, e perfil 2 cortando a borda leste do Ramo Valença.

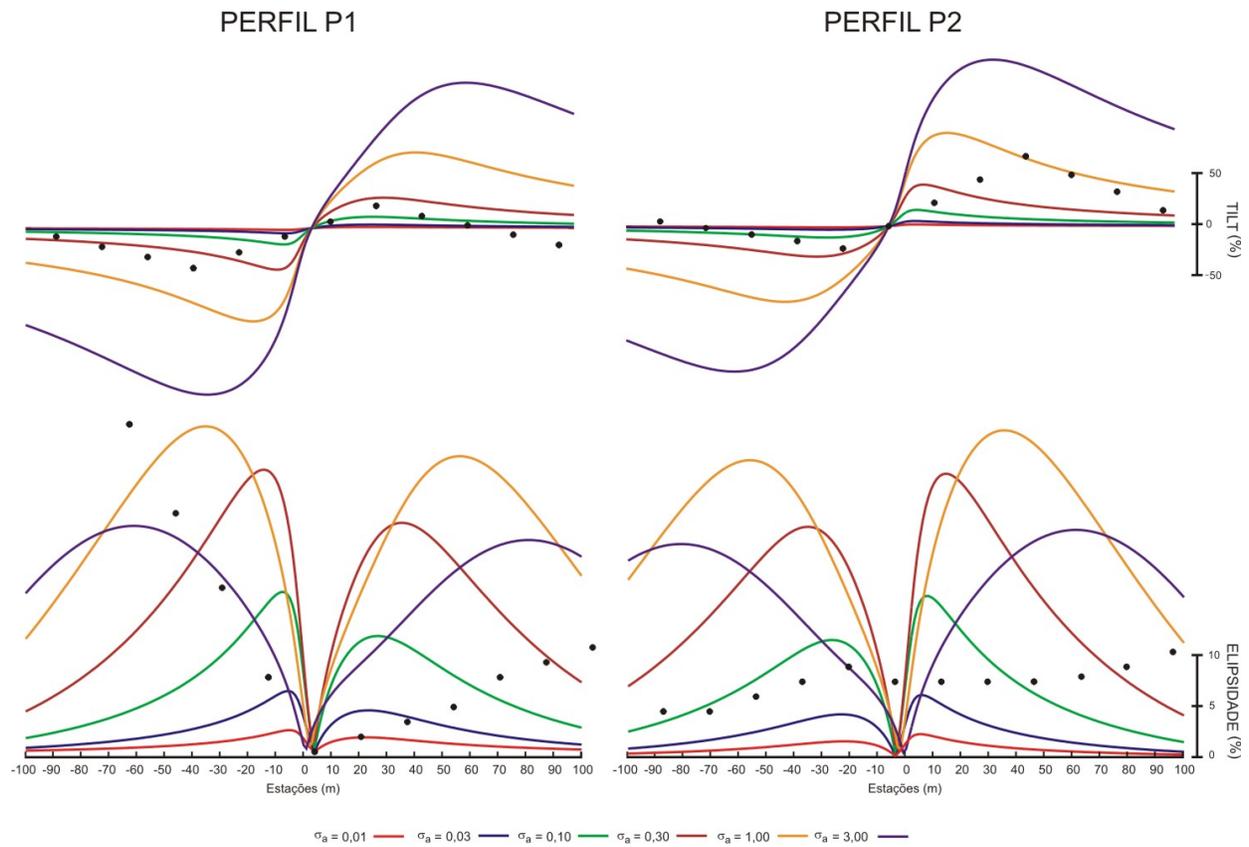


Figura 4: Interpretação por ajuste de curva dos dados do tilt angle e elipsidade para os perfis 1 e 2.

## CONCLUSÕES

Diante das dificuldades em delimitar, acuradamente, o limite de contato entre sedimentos da Bacia de Camamu e as rochas do seu embasamento adjacente, este trabalho apresentou um suporte alternativo para o mapeamento geológico utilizando o sistema eletromagnético VLF-EM. Como apoio a interpretação qualitativa dos dados de campo, calculamos os valores dos parâmetros da elipse de polarização vertical para corpos condutores em um semi-espaço altamente resistivo.

Dos resultados obtidos com as simulações numéricas, verificamos que a resposta VLF-EM, através das curvas do tilt e da elipsidade:

1. São influenciadas pela condutividade elétrica do corpo anômalo, provocando um crescimento e migração dos picos até um limite de saturação condutivo, quanto mais altos são esses valores;
2. Em corpos inclinados, apresentam assimetria possibilitando determinar o sentido do mergulho do corpo;
3. Uma vez que a componente tangencial da densidade de corrente é descontínua nos limites do corpo condutor, o módulo da densidade de corrente deve apresentar magnitude mais elevada dentro do mesmo. Nesses limites, verifica-se que há uma aumento da função tilt dentro do condutor e a elipsidade é descontínua.

Os dados experimentais desta pesquisa são satisfatórios. Nos dados referentes aos perfis 1 e 2, observamos anomalias VLF-EM características de um contato litológico, respectivamente nas estações 1220m e 260m. Além disso, analisamos, quantitativamente, anomalias de corpos condutores ocasionadas pela mudança de sinal do tilt angle.

Para uma interpretação de dados VLF-EM mais apurada, aconselhamos ter como auxílio: (i) Resultados numéricos de modelos geológicos mais complexos e que considerem a influência de efeito do acoplamento mútuo entre linhas de corrente elétrica; (ii) Os parâmetros da elipse horizontal, que podem ser úteis na interpretação; e (iii) Integração de dados geológicos, imagens de satélite e, se possível, dados geofísicos de outros métodos a exemplo da gravimetria e magnetometria.

Espera-se que a análise empregada neste trabalho sirva como sugestão para um mapeamento geológico básico empregando o método geofísico VLF-EM.

## AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi concedida através do Projeto Rift CPGG/UFBA (Centro de Pesquisas em Geofísica e Geologia da Universidade Federal da Bahia), e financiada pela PETROBRAS.

## REFERÊNCIAS

- GRANT, F. S., and WEST, G. F., 1965, Interpretation Theory in Applied Geophysics: McGraw Hill book, New York, USA.
- Mc NEILL, J., and LABSON, V., 1991, Geological Mapping Using VLF Radio Waves: Nabighian, M. N. (Ed.); Eletromagnetic Methods in Applied Geophysicists.
- SAMPAIO, E. E. S., 2009, VLF-EM Anomalies Simulation by Underground Line Sources of Alternating Current: VLF-EM Anomalies Simulation by Underground Line Sources of Alternating Current:, Resumos Expandidos, 11<sup>th</sup>. Congr. Intern. da SBGf.
- SMITH, B., and WARD, S. H. On the Computation of Polarization Ellipse Parameters:, 1974.