



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



GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

MODELAGEM VLF-EM APLICADA À
INTERPRETAÇÃO DA RELAÇÃO DE CONTATO
ENTRE A BACIA DE CAMAMU E SEU
EMBASAMENTO ADJACENTE NA REGIÃO DE
VALENÇA, BAHIA

THIAGO FREITAS LOPES CONCEIÇÃO

SALVADOR – BAHIA

FEVEREIRO – 2010

Modelagem VLF-EM aplicada à interpretação da relação de contato entre a
Bacia de Camamu e seu embasamento adjacente na região de Valença, Bahia

por

THIAGO FREITAS LOPES CONCEIÇÃO

ORIENTADOR: DR. EDSON EMANOEL STARTERI SAMPAIO

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA APLICADA

DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

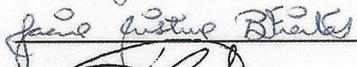
DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

Comissão Examinadora



Dr. Luiz César Corrêa Gomes - Co-ORIENTADOR (IFBA)



Dra. Jacira Cristina Batista de Freitas (IF/UFBA)



Dr. Hércules de Souza (MARINHA DO BRASIL)

Data da aprovação: 26/02/2010

”As pessoas, de início, não seguem causas dignas.

Seguem líderes dignos que promovem causas dignas”.

John C. Maxwell.

”Nunca encontrei homem tão ignorante que não tivesse algo a ensinar

e nem tão sábio que não faltasse algo a aprender.”

Autor desconhecido.

RESUMO

A localização espacial e o tipo de relação do contato geológico entre os sedimentos da Bacia de Camamu e as rochas de seu embasamento adjacente apresenta algumas incertezas. Ao longo da bacia ocorrem, principalmente, dois tipos de contato: por falha e erosional. O sistema de prospecção geofísica eletromagnética, que utiliza ondas de rádio da banda VLF (*Very Low Frequency*), é aplicado visando o mapeamento e o estudo da relação de contato entre o Ramo Valença da Bacia de Camamu e as rochas de seu embasamento adjacente. Como suporte a esta análise, também foram determinadas, quantitativamente, anomalias VLF para corpos condutores variando seu ângulo de mergulho e o valor da condutividade elétrica. O emprego do sistema VLF permitiu determinar, qualitativamente, a localização espacial desses contatos litológicos e, como consequência, discorrer sobre a relação do tipo de contato. Uma análise preliminar dos valores da inclinação e da condutividade elétrica também foi obtida. Com a integração de dados geofísicos e geológicos foi elaborada uma seção geológica de subsuperfície da região, bem como redesenhada a geometria da bacia estudada. Os resultados obtidos sugerem a aplicação do mesmo procedimento em outras áreas com problema similar da Bacia de Camamu.

ABSTRACT

The position and type of contact between the Camamu Basin and its basement presents some uncertainties. Along the border of the basin there are two main contact types: by fault and erosional. The VLF (Very Low Frequency) electromagnetic system has been applied to map and study the features of the contact between the Valença Branch of the Camamu Basin and its basement. To support this analysis, VLF anomalies of conducting bodies have been computed based on line source models varying dip angle and conductivity. The VLF data allowed to determine, qualitatively, the spatial location of lithologic contacts and, consequently, to define the type of contact. A preliminary analysis of the values of the dip and electrical conductivity was also obtained. From the integration of geological and geophysical data a geological section has been done and the geometry of the basin has been sketched. The results suggest the application of the same procedure in other parts of the Camamu Basin with similar problems.

ÍNDICE

RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE TABELAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	3
1.1 Localização e Acesso	3
1.2 Contexto Geológico	4
1.2.1 Geologia Regional	6
1.2.2 Geologia Local	9
CAPÍTULO 2 BASE TEÓRICA DO SISTEMA VLF	11
2.1 Fundamentos dos Métodos Eletromagnéticos	11
2.1.1 Equações de Maxwell	12
2.1.2 Elipse de Polarização	14
2.1.3 Lei de Biot-Savart	15
2.2 O Sistema VLF	15
2.2.1 Breve Histórico	15
2.2.2 Princípios e Aplicações	17
2.2.3 Campo Devido a Uma Antena VLF	21
2.2.4 Equipamentos e Parâmetros Medidos	22
2.2.5 Técnicas de Aquisição dos Dados	25
2.2.6 Técnicas de Tratamento de Dados VLF-EM	27
2.2.7 Técnicas de Interpretação	28
CAPÍTULO 3 MODELAGEM ELETROMAGNÉTICA VLF-EM	30
3.1 Considerações e Objetivos	30
3.2 Equações Básicas	30
3.3 Características do Programa	33

3.4	Modelos Sintéticos	33
3.4.1	Discussão dos Resultados	35
CAPÍTULO 4	PROSPECÇÃO GEOFÍSICA	42
4.1	Operação de Campo	42
4.2	Interpretação dos Dados de Campo	45
CAPÍTULO 5	CONCLUSÃO	56
	Agradecimentos	58
	Referências Bibliográficas	59
ANEXO I	Dados dos perfis não utilizados no trabalho	61
I.1	Perfil1	61
I.2	Perfil2	61
I.3	Perfil3	61
I.4	Perfil4	61
I.5	Perfil5	61

ÍNDICE DE TABELAS

2.1	Nomes, símbolos e unidades físicas das principais grandezas eletromagnéticas. Em negrito: campos vetoriais; Em minúscula: domínio do tempo; Em maiúscula: domínio da frequência. Apenas as unidades de μ , ϵ e σ estão no domínio da frequência. Todas as outras estão no domínio do tempo.	11
3.1	Descrição das constantes de parametrização utilizadas na modelagem VLF. . .	33
4.1	Descrição dos perfis VLF. Δx refere-se ao espaçamento entre as estações. . .	45

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Mapa de localização da área estudada	4
1.2	Mapa geológico simplificado da Bacia de Camamu com os principais lineamentos estruturais e a localização da área de estudo (retângulo vermelho) (CORRÊA-GOMES <i>et al</i> , 2005).	5
1.3	Mapa estrutural da Bacia de Camamu, segundo NETTO et al (1990)	7
1.4	Carta estratigráfica da Bacia de Camamu (NETTO et al, 1990)	8
1.5	Fotografia de campo de um exemplo de rocha do Bloco Itabuna	9
1.6	Fotografia de campo de um exemplo de sedimentos argilosos encontrados na área de estudo.	9
1.7	Principais planos de Falhas e Fraturas (FT), Foliação principal (F_P) e Superfícies de acamamento sedimentar (S_0), bem como lineações de estiramento mineral (L_X) plotados em rosáceas de direção e mergulho ou caimento (10° em 10° de intervalo) e diagramas de isodensidade de frequência, em redes estereográficas de igual área Schmdit-Lambert, hemisfério inferior.	10
2.1	Elipse de polarização do campo magnético	14
2.2	(a) Sistemas de coordenadas e orientação das linhas de corrente. (b) Campo magnético provocado por um elemento de densidade de corrente, modificada de KAROUS e HJELT (1983).	16
2.3	Principais transmissores VLF. Localização, códigos das estações (<i>e.g.</i> NAA), frequências em kHz e potência em Mw (MILSOM, 2003).	18
2.4	Comportamento de campos eletromagnéticos gerados por um transmissor de ondas de rádio VLF.	18
2.5	Esquema demonstrativo do princípio do sistema de prospecção VLF-EM. (a) condição especial para o uso do sistema VLF-EM; (b) exemplo de resposta do VLF-EM para o esquema mostrado.	19
2.6	Esquema indicando os campos devido a um monopolo de corrente	22
2.7	Fotografia do Sistema Eletromagnético T-VLF da IRIS Instruments	23
2.8	Elipsoides de polarização das componentes dos campos magnéticos H_x e H_z . Azul para elipsoide horizontal e vermelho para elipsoide vertical.	24
2.9	Direções preferenciais para levantamento VLF terrestre. (a) modo Tilt angle e (b) modo Resistivo.	26

2.10	Mapas com a cobertura do sinal VLF dos principais transmissores utilizados no Brasil: (a) Estação NAA Cutler, Maine, 24 kHz, 1000 kw; (b) Estação NSS Anapolis, Maryland, 21,4 kHz, 400 kw; (c) Estação NAU Porto Rico, 28,5 kHz, 100 kw e (d) Estação GBR Rugby, England, 16 kHz, 750 kw	26
2.11	Curvas tilt angle e elipsidade que mostram uma anomalia típica produzida por um corpo condutor vertical em subsuperfície.	29
3.1	Representações gráficas dos modelos sintéticos propostos para a modelagem VLF-EM, com a profundidade do topo do condutor fixa para todos os modelos em $h = 4,0m$; ângulo de mergulho (θ) e comprimento do corpo (l). (a) $\theta = 0^\circ$ e $l = 22m$; (b) $\theta = 45^\circ$ e $l = 31m$; (c) $\theta = 90^\circ$ e $l = 22m$; e (d) $\theta = 135^\circ$ e $l = 31m$	34
3.2	Resultados obtidos para o modelo de corpo horizontal ($\theta = 0^\circ$). Gráficos com as curvas do tilt em (a) e da elipsidade em (b) para diferentes valores de condutividade elétrica (σ_a).	38
3.3	Resultados obtidos para o modelo de corpo vertical ($\theta = 90^\circ$). Gráficos com as curvas do tilt em (a) e da elipsidade em (b) para diferentes valores de condutividade elétrica (σ_a).	39
3.4	Resultados obtidos para o modelo de corpo inclinado ($\theta = 45^\circ$). Gráficos com as curvas do tilt em (a) e da elipsidade em (b) para diferentes valores de condutividade elétrica (σ_a).	40
3.5	Resultados obtidos para o modelo de corpo inclinado ($\theta = 135^\circ$). Gráficos com as curvas do tilt em (a) e da elipsidade em (b) para diferentes valores de condutividade elétrica (σ_a).	41
4.1	Mapa geológico simplificado da Bacia de Camamu. Os retângulos vermelhos representam as partes da bacia onde foram executadas os perfis geofísicos VLF.	42
4.2	Fotografias de campo durante a aquisição de dados VLF. (a) aquisição VLF-EM. Neste modo o campo elétrico tem direção Norte-Sul e é perpendicular ao perfil. (b) aquisição VLF-R. A linha elétrica tem direção Leste-Oeste.	44
4.3	Mapa geológico simplificado com os perfis geofísicos VLF, mapa de relevo SRTM e dados geológicos de campo.	46
4.4	Interpretação quantitativa dos dados do Perfil 2 por superposição de curvas teóricas para o modelo com $\theta = 45^\circ$; (a) para o tilt e (b) para a elipsidade. Os pontos pretos com a uma cruz envolvida por uma circunferência são referentes aos valores medidos e os demais foram obtidos por interpolação.	49
4.5	Interpretação quantitativa dos dados do Perfil 3 por superposição de curvas teóricas para o modelo com $\theta = 45^\circ$; (a) para o tilt e (b) para a elipsidade. Os pontos pretos com a uma cruz envolvida por uma circunferência são referentes aos valores medidos e os demais foram obtidos por interpolação.	50

4.6	Resultados geofísicos VLF obtidos para o Perfil 1. (a) gráfico com as curvas da resistividade aparente (ρ_a) e da diferença de fase entre os campos elétrico e magnético (ϕ). (b) gráfico com as curvas do tilt vertical (α_a) e da elipsidade vertical (ε).	51
4.7	Resultados geofísicos VLF obtidos para o Perfil 2. (a) gráfico com as curvas da resistividade aparente (ρ_a) e da diferença de fase entre os campos elétrico e magnético (ϕ). (b) gráfico com as curvas do tilt vertical (α_a) e da elipsidade vertical (ε).	52
4.8	Resultados geofísicos VLF obtidos para o Perfil 3. (a) gráfico com as curvas da resistividade aparente (ρ_a) e da diferença de fase entre os campos elétrico e magnético (ϕ). (b) gráfico com as curvas do tilt vertical (α_a) e da elipsidade vertical (ε).	53
4.9	Seções geológicas de sub-superfície do Ramo Valença. (a) Seção antiga; (b) Seção proposta pela integração dos dados geológicos de campo e geofísicos deste trabalho.	54
4.10	Mapa geológico simplificado, corrigido a partir dos resultados deste trabalho, com a localização dos perfis geofísicos VLF, mapa de relevo SRTM e dados geológicos de campo conforme explica a legenda.	55
I.1	Resultados geofísicos VLF-R obtidos para o Perfil 1. Com o campo elétrico na direção Norte-Sul.	61
I.2	Resultados geofísicos VLF-R obtidos para o Perfil 2. Com o campo elétrico na direção Norte-Sul.	62
I.3	Resultados geofísicos VLF-R obtidos para o Perfil 3. Com o campo elétrico na direção Norte-Sul	62
I.4	Resultados geofísicos VLF-EM obtidos para o Perfil 4.	63
I.5	Resultados geofísicos VLF-EM obtidos para o Perfil 5.	63

INTRODUÇÃO

A partir de um termo de cooperação firmado entre o Centro de Pesquisas em Geofísica e Geologia (CPGG) da UFBA e a Petrobras, foi implantado, em 2007, na Universidade Federal da Bahia (UFBA), o Projeto *Rift*, intitulado de Estudo Geodinâmico das Bacias Sedimentares Onshore Tipo Rift do Jequitinhonha, Estado da Bahia, até Jatobá, Estado de Pernambuco, e de Seus Embasamentos Cristalinos. Ele faz parte do Programa Tecnológico de Fronteiras Exploratórias da PETROBRAS (PROFEX-PETROBRAS), e tem como metas o entendimento da evolução tectônica das bacias sedimentares costeiras continentais do tipo rift do estado da Bahia e de Pernambuco: Reconcâvo-Tucano-Jatobá, Jacuípe, Camamu, Almada, Jequitinhonha e Cumuruxatiba. A segunda é a compreensão da importância da participação dos embasamentos cristalinos dessas bacias: Orógenos Itabuna-Salvador-Curaçá, Faixa Araçuaí e Faixa Sergipana, nesses processos geodinâmicos. As metas serão alcançadas atacando-as através de três vertentes: a tectono-estrutural, a petrologia e a geofísica, dentro de novos conceitos geomecânicos para fins de prospecção de hidrocarbonetos.

No âmbito do projeto, em especial, o limite de borda da porção on-shore da Bacia de Camamu apresenta algumas indefinições, no que diz respeito a delimitação correta e o tipo de relação do contato entre os litotipos da bacia e o do embasamento cristalino. Isto ocorre em função das limitações de detalhamento da geologia de campo superficial em caracterizar este limite, pois, ao longo da borda oeste esse limite litológico, ora ocorre como contato por falhas, ora ocorre por contato erosional. Além disso, em algumas regiões este contato não é aflorante.

Desta forma, foi selecionada uma pequena região desta bacia para aplicar estudos geofísicos, a partir do uso do sistema VLF de prospecção eletromagnética, a fim de estabelecer uma alternativa rápida e barata capaz de esclarecer a posição espacial do contato, bem como possibilitar a caracterização do tipo da relação de contato entre a Bacia de Camamu e seu embasamento adjacente. O Sistema VLF, pertencente ao grupo dos métodos eletromagnéticos, é bastante usado na prospecção geofísica para a detecção de condutores subterrâneos e para um mapeamento geológico rápido, em função da 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.

As primeiras tentativas de mapeamento geológico usando os sinais de transmissores terrestres das estações de rádio ocorreram por volta dos anos 30. Estes estudos tinham aplicações

limitadas e foi só a partir da criação de potentes transmissores militares na banda VLF (3-30 kHz) que o uso de tais fontes passou a tornar-se importante na prospecção geofísica em meados dos anos 60. PAAI (1965) veio demonstrar um estudo dos comportamentos dos componentes do campo eletromagnético com o intuito de mapear jazidas minerais. Esta é a principal referência histórica para o uso do VLF em exploração geofísica, que mais tarde culminou na grande popularidade alcançada por este sistema de prospecção, vastamente usado para exploração mineral, de água-subterrânea, mapeamento de contaminantes químicos em solos e para mapeamento geológico.

O presente trabalho de graduação tem dois objetivos e uma meta. Os objetivos 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 infinito altamente resistivo, cuja sub-superfície consiste de linhas de corrente com condutividade elétrica anômala. O agrupamento delas corresponde, geometricamente, a um corpo condutor, onde é variado o ângulo de mergulho do mesmo, com o intuito de estudar as diferentes respostas VLF. Os resultados são baseados em SAMPAIO (2009); (2) estabelecer critérios qualitativos e semi-quantitativos para a interpretação de estruturas geológicas, principalmente contatos litológicos, a partir de dados obtidos com o sistema eletromagnético VLF. A meta é apresentar uma alternativa, baseada na aplicação da geofísica, para solucionar o problema do mapeamento e da descrição do tipo da relação de contato entre a Bacia de Camamu e de seu embasamento cristalino.

Este Trabalho Final de Graduação está organizado em 5 capítulos e um anexo. O capítulo 1 define e caracteriza a localização da área de estudo e seu contexto geológico. No segundo capítulo são definidos os conceitos básicos do eletromagnetismo, quando aplicados ao ambiente geofísico, estabelecendo as equações fundamentais usadas nas soluções dos Capítulos 3 e 4. Ele ainda versa sobre a teoria do sistema VLF, incluindo um breve histórico, e as técnicas operacionais deste sistema. O Capítulo 3 trata da solução, computação e análise dos parâmetros da elipse de polarização para o modelo de um corpo condutor com diferentes ângulos de mergulho. A prospecção geofísica VLF e sua interpretação encontram-se no capítulo 4. Por fim, o capítulo 5 traz as conclusões e sugestões finais.

CAPÍTULO 1

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

1.1 Localização e Acesso

Para aplicar os objetivos deste trabalho foi escolhida uma pequena região da Bacia de Camamu (BC). A área de estudo insere-se na zona rural na parte Oeste da cidade de Valença, Bahia, popularmente chamada de Roda D'água. A Figura 1.1 traz a localização da cidade de Valença, Bahia, com as principais vias de acesso, a hidrografia existente e os municípios vizinhos.

Partindo de Salvador pode-se chegar a Valença:

1. Pelo sistema *ferry-boat*, Salvador - Bom Despacho, na ilha de Itaparica. Na ilha, seguindo pela rodovia BA-001, passando por Nazaré, até a cidade de Valença, por 105km.
2. Partindo de Salvador pela BR-324, percorrendo 81km até o entroncamento com a BR-101 (antes de Feira de Santana), seguindo 95km até Santo Antônio de Jesus, aqui você pode optar por dois caminhos:
 - Pela BA-245, percorrendo 30km até Nazaré e seguindo mais 45km pela BA-001 até Valença.
 - Ou pela BR-101 por 47km e, depois, percorrendo 30km pela BA-542 até Valença.

O acesso ao povoado Roda D'água é permitido pela estrada da antiga Fábrica de tecidos Todos os Santos. A área estudada engloba o Rio Una e seus afluentes Rio Piau e Pitanga.

É importante salientar que o povoado da Roda D'água é composto por médias e pequenas fazendas de dendê, cravo e de criação de bovinos e suínos, além de possuir uma população de cerca de 450 habitantes que não possuem acesso a energia elétrica nem rede de saneamento sanitário.

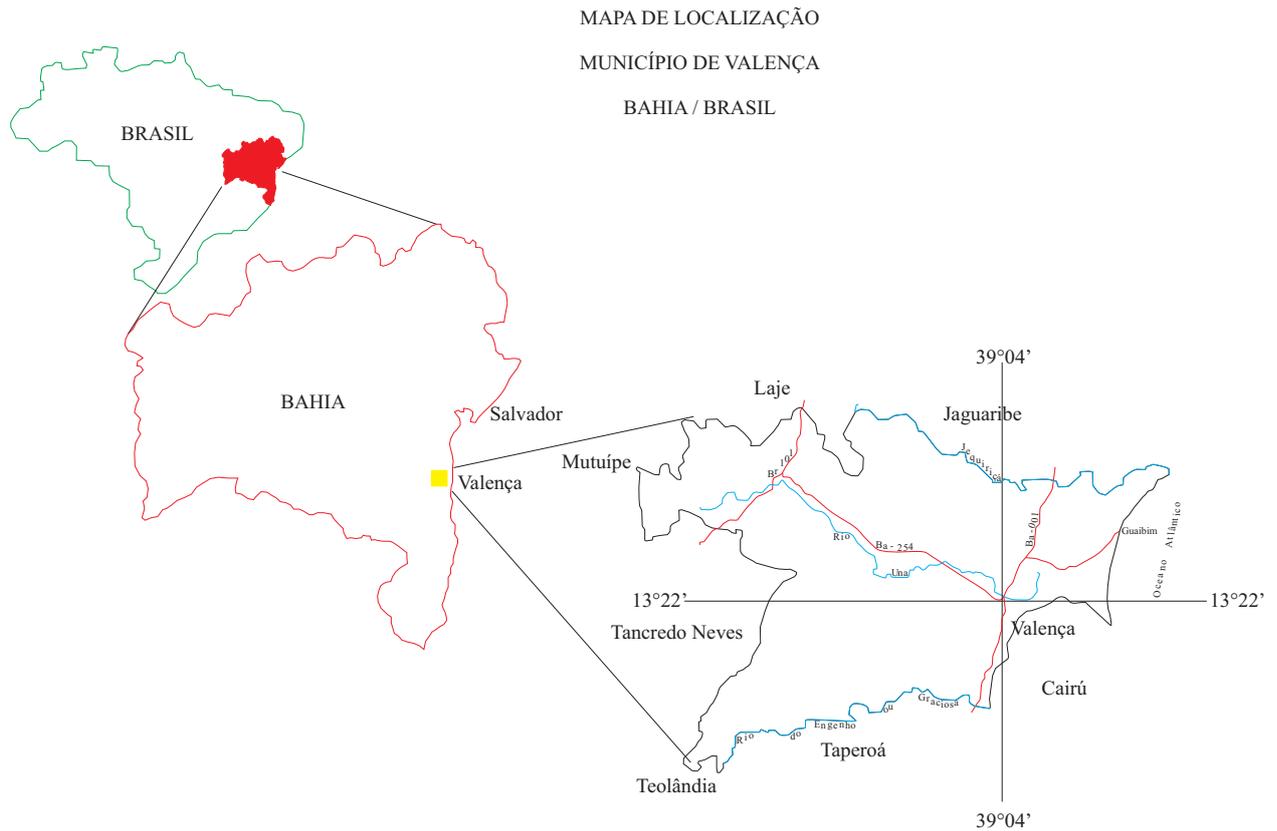


Figura 1.1: Mapa de localização da área estudada

1.2 Contexto Geológico

A área de estudo compreende um ramo secundário localizado a Oeste da Bacia de Camamu (BC), o qual será, neste trabalho, chamado de Ramo Valença. Ele é paralelo ao ramo principal da BC e apresenta orientação próxima a Norte-sul, conforme observado no mapa da Figura 1.2.

O contexto geológico será descrito aqui em função dos litotipos, de suas idades, e das feições estruturais presentes no embasamento proximal e nas coberturas sedimentares Mesozoicas encontradas ao longo da BC (em escala regional) e do Ramo Valença (em escala local), conforme descrito no texto do mapa geológico do estado da Bahia (BARBOSA e DOMINGUEZ, 1996).

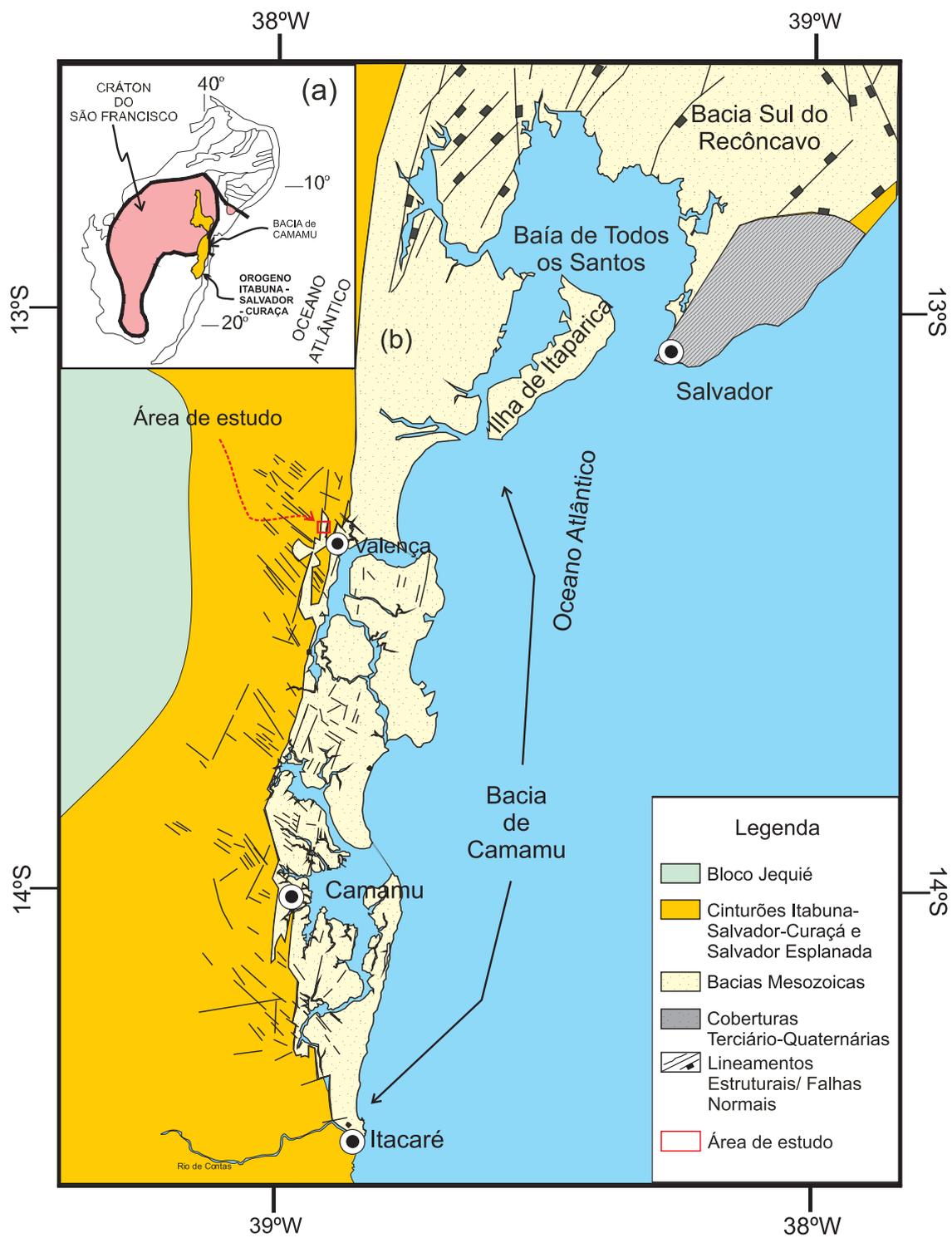


Figura 1.2: Mapa geológico simplificado da Bacia de Camamu com os principais lineamentos estruturais e a localização da área de estudo (retângulo vermelho) (CORRÊA-GOMES *et al.*, 2005).

1.2.1 Geologia Regional

As principais unidades tectônicas da área estudada estão incluídas no Cráton do São Francisco (CSF) (ALMEIDA, 1977). São elas: Orógeno Itabuna-Salvador-Curaçá (OISC) (BARBOSA et al., 2001) e a BC. Todos estes conjuntos serão descritos a seguir.

O CSF constitui grande parte dos terrenos metamórficos do estado da Bahia, abrangendo também porções dos estados de Minas Gerais, Goiás, Pernambuco e Sergipe. Foi sobre esta unidade geotectônica que a Bacia de Camamu (BC) evoluiu durante a separação, no Mesozoico, dos continentes Africano e Sul Americano.

O embasamento cristalino adjacente à BC, visto na Figura 1.2, corresponde ao OISC que se estende desde a cidade de Itabuna, a sul, até próximo à cidade de Curaçá, ao norte do estado da Bahia. Este domínio estrutural foi estruturado no Paleoproterozoico, com orientação $N10^\circ$, sendo constituído por, no mínimo, quatro grupos de tonalitos e trondhjemitos de história formacional que vai desde o Arqueano (3.2 - 2.5 Ga) até o Paleoproterozoico (2.45 - 2.07 Ga) (BARBOSA e SABATÉ, 2004). Este Orógeno foi fortemente modelado no Ciclo Geotectônico Transamazônico por potentes Zonas de cisalhamento (ZC) orientadas N-S. Todas suas litologias foram reequilibradas na fácies granulito.

Desse modo, as estruturas do embasamento apresentam, nas rochas, bandamentos e foliações (F_P) miloníticas sub-verticais com direções próximas a N-S, e lineações de estiramento mineral (L_X) com direção, na grande maioria das vezes, paralela ao strike das F_P s com baixo ângulo de caimento, tanto para norte como para sul (CORRÊA-GOMES et al., 2005a). Quanto às estruturas rúpteis, as principais orientações de falhamentos encontradas no embasamento são: (i) $N10^\circ$; (ii) $N30^\circ$; (iii) $N90^\circ$ e (iv) $N120^\circ$.

A BC, situada na costa central do Estado da Bahia, como pode ser visto na Figura 1.2, faz parte do conjunto de bacias da margem leste associadas com a quebra do Gondwana e subsequente abertura do Oceano Atlântico Sul. Durante o Cretáceo, por toda a margem leste, se desenvolveu um sistema de rifts continentais devido a este esforço de ruptura, gerando, nestas bacias, um pacote sedimentar fundamental para a formação dos sistemas petrolíferos da margem brasileira (NETTO, 1993). Conforme descrito por NETTO e RAGAGNIN (1990), a BC está localizada no litoral centro leste do estado da Bahia entre as latitudes $-13^\circ00'$ e $-14^\circ17'$ e é limitada, a norte pela Falha da Barra de orientação $N90^\circ$, ao sul pelo Alto de Taipus e a oeste pela Falha de Maragogipe. A leste, o meridiano $38^\circ W$ é considerado seu limite mais externo, conforme mostra a Figura 1.3.

Os pacotes sedimentares que preencheram a BC, principalmente durante o Mesozoico, são separados, cronologicamente, em sua carta estratigráfica, representada na Figura 1.4, assim como as respectivas fases tectônicas de cada deposição. As unidades crono estratigráficas são descritas na carta estratigráfica da BC (NETTO, 1993), sendo formadas por coberturas

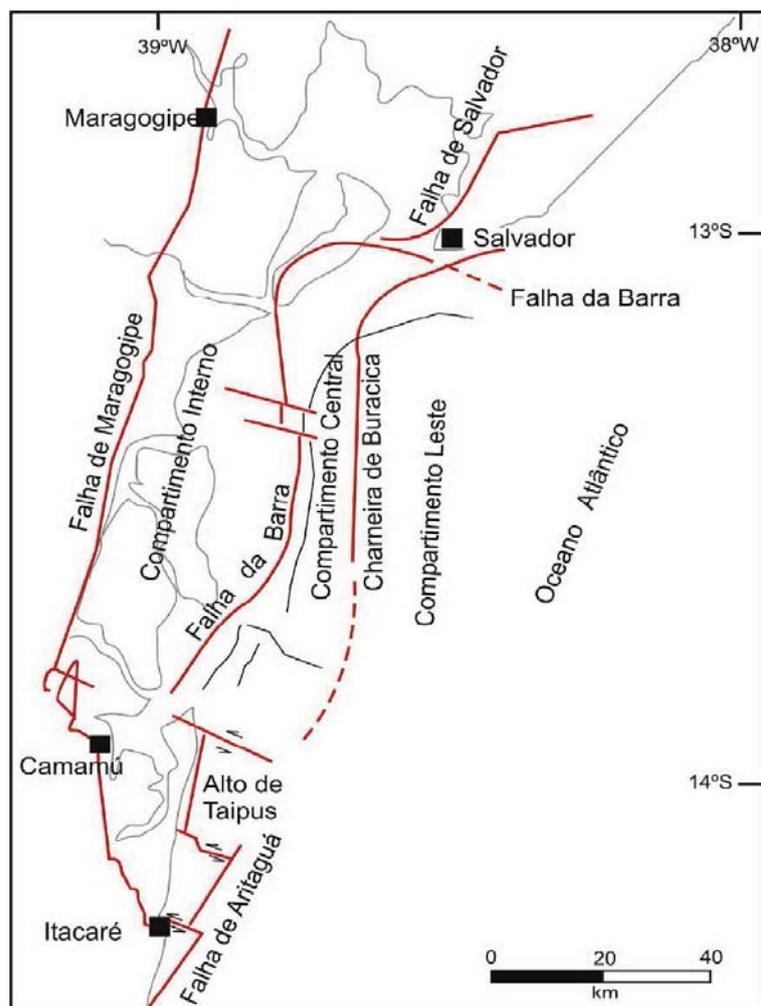


Figura 1.3: Mapa estrutural da Bacia de Camamu, segundo NETTO et al (1990)

sedimentares relacionadas com as seguintes fases tectônicas: (i) fase sinéclise (Eopermiano - 270Ma); (ii) fase pré-rifte (Jurássico - 165 a 146Ma); (iii) fases rifte, transicional (Cretáceo - 146 a 65Ma); (iv) fase de margem passiva (Terciário - 65 a 1,75Ma e Quaternário - maior que 1,75Ma).

As formações mesozoicas são descritas a partir dos seguintes litotipos:

Formações Afligidos, Sergi e Aliança (154 - 136Ma) - compostas por arenitos, arenitos conglomeráticos, calcilutitos, folhelhos e conglomerados;

Formação Morro do Barro (142-137Ma) - composta por folhelhos lacustrinos;

Formações Algodões e Taipus-Mirim (135 - 66Ma) - compostas por arenitos, calcários, calcários dolomíticos e folhelhos.

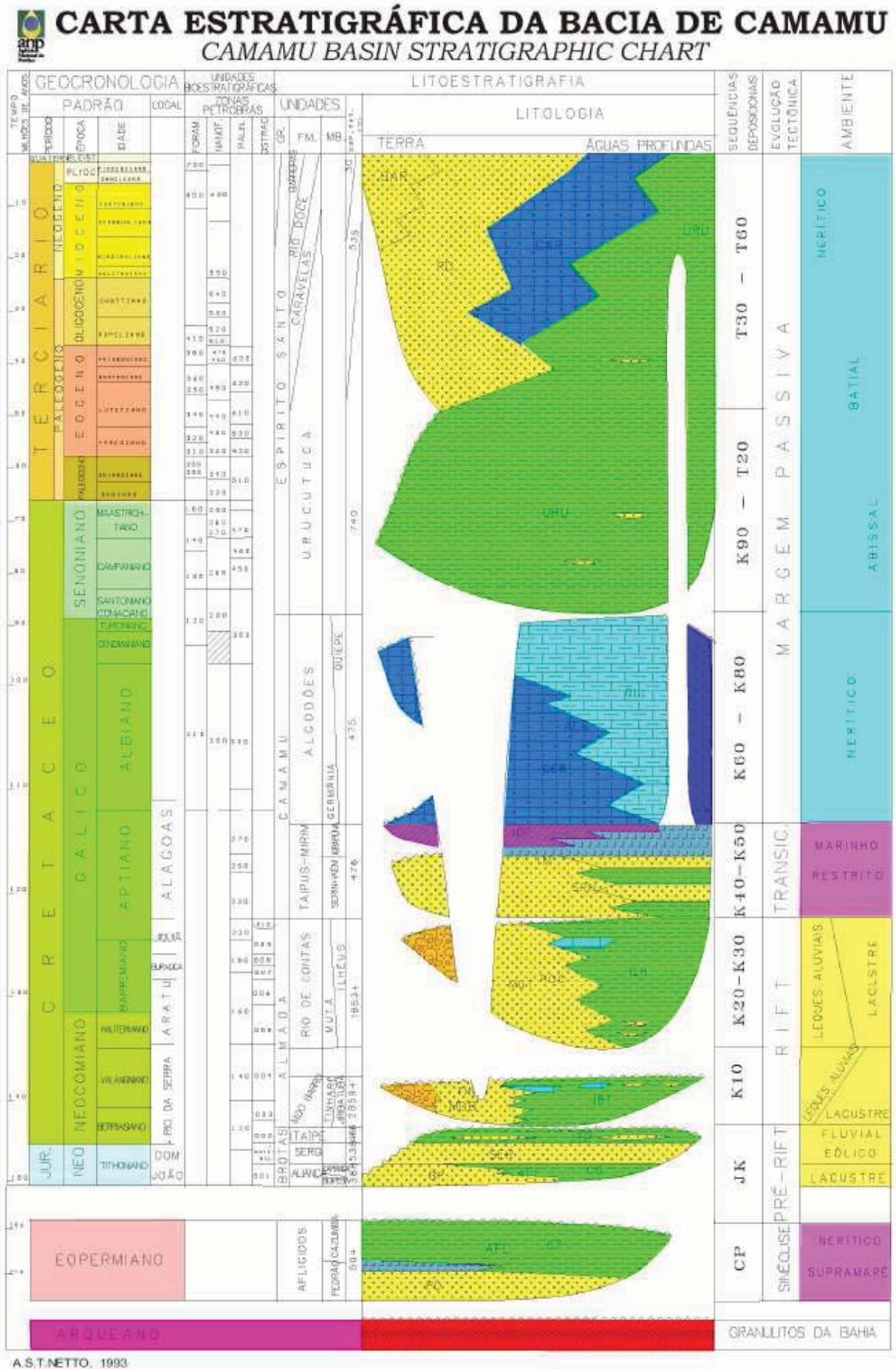


Figura 1.4: Carta estratigráfica da Bacia de Camamu (NETTO et al, 1990)

1.2.2 Geologia Local

Em se tratando do Ramo Valença, seu embasamento proximal compõe as rochas do Complexo Ibicaraí composto por enderbitos e metatrondhjemitos. Este complexo pertence ao Bloco Itabuna que faz parte do conjunto do OISC. A Figura 1.5 mostra uma fotografia de campo com um exemplo de rochas do OISC.

Com relação aos pacotes sedimentares deste Ramo, apenas ocorrem as unidades correspondentes ao Grupo Brotas, representado, localmente, por níveis argilosos vermelhos intercalados com folhelhos esverdeados com manchas de redução pertencentes à Formação Aliança, conforme é ilustrado na fotografia contida na Figura 1.6.

Cerca de 16 afloramentos foram visitados entre o embasamento cristalino e as sequências sedimentares da BC. Do total foram coletadas: (i) 186 medidas de planos de falhas e fraturas; (ii) 06 medidas de foliação principal (F_P); (iii) 04 medidas de lineação de estiramento mineral; (iv) 04 medidas de planos de sedimentação S_0 , que estão processadas e amostradas nos estereogramas da Figura 1.7. O conhecimento estrutural da bacia será de grande valia para a interpretação dos dados geofísicos, no que diz respeito à geometria da bacia e às características estruturais dos contatos.



Figura 1.5: Fotografia de campo de um exemplo de rocha do Bloco Itabuna



Figura 1.6: Fotografia de campo de um exemplo de sedimentos argilosos encontrados na área de estudo.

Verifica-se nas rosetas de direção da Figura 1.7, que as estruturas dúcteis do embasamento do Ramo Valença (F_P e L_X) apresentam o padrão principal de orientação Norte-sul. O mesmo encontrado no embasamento adjacente à bacia principal. Este mesmo padrão ocorre, também, nas famílias de falhas e fraturas do embasamento e da bacia, sugerindo uma herança de estruturas pré-existentes na formação da bacia. Sugere-se que, nesta área, as falhas e fraturas de borda são orientadas conforme o padrão Norte-sul e com mergulhos sub-verticais como pode ser visto nas rosetas de mergulho na mesma figura. Além disso, dentro da bacia, ocorrem falhas transferentes orientadas a NW-SE e NE-SW.

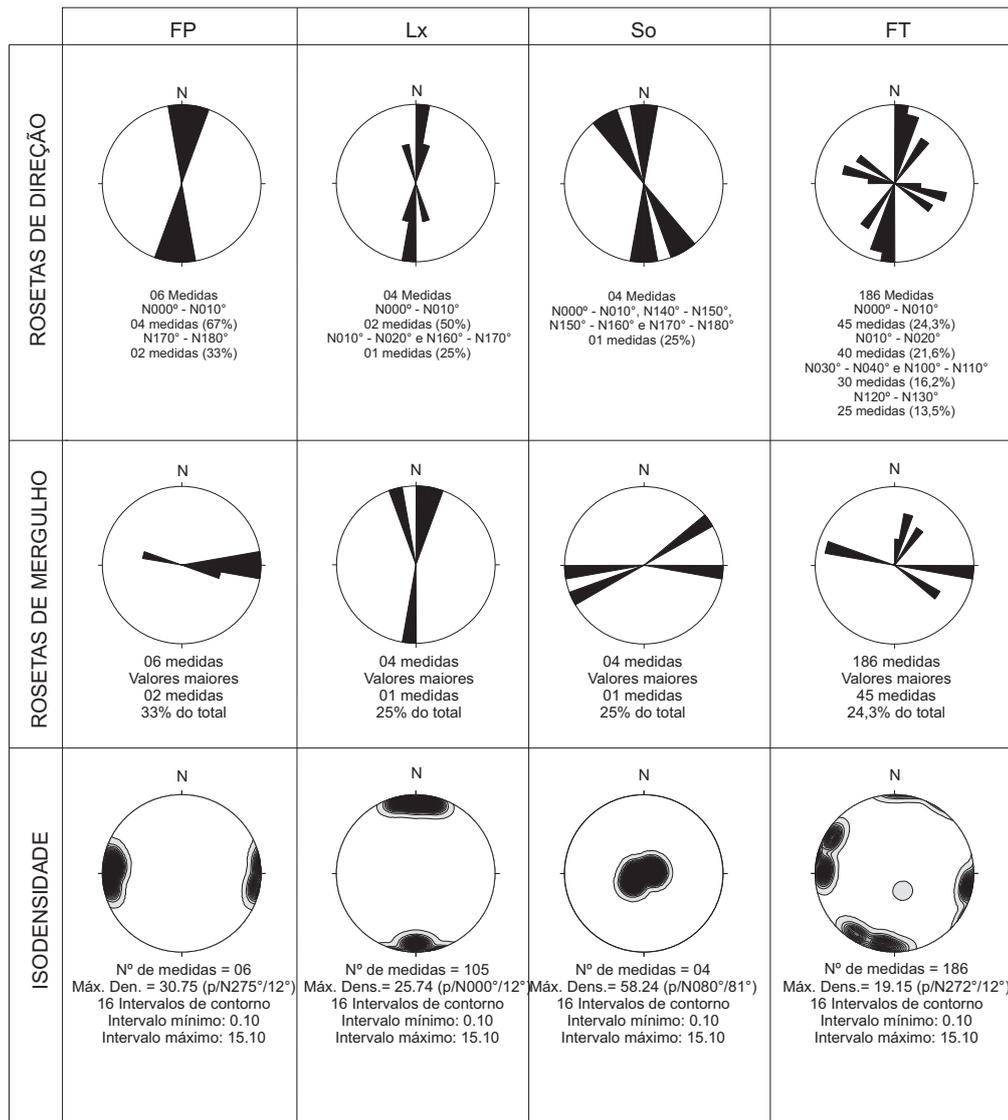


Figura 1.7: Principais planos de Falhas e Fraturas (FT), Foliação principal (F_P) e Superfícies de acamamento sedimentar (S_0), bem como lineações de estiramento mineral (L_X) plotados em rosáceas de direção e mergulho ou caimento (10° em 10° de intervalo) e diagramas de isodensidade de frequência, em redes estereográficas de igual área Schmdit-Lambert, hemisfério inferior.

CAPÍTULO 2

BASE TEÓRICA DO SISTEMA VLF

2.1 Fundamentos dos Métodos Eletromagnéticos

Neste capítulo serão apresentadas as expressões matemáticas básicas que descrevem os fenômenos eletromagnéticos e algumas de suas soluções, direcionadas aos objetivos do trabalho. No decorrer do trabalho, essas expressões serão apresentadas a partir da simbologia extensamente utilizada na literatura científica para as grandezas eletromagnéticas, conforme representadas na Tabela 2.1.

Grandeza Física	Símbolo	Unidade SI
Campo Elétrico	e ou E	volt/metro (V/m)
Deslocamento Elétrico	d ou D	coulomb/metro ² (C/m^2)
Indução Magnética	b ou B	tesla (T) ou Webber/metro ² (Wb/m^2)
Magnetização	m ou M	ampère/metro (A/m)
Campo Magnético	h ou H	ampère/metro (A/m)
Densidade de Corrente Elétrica	j ou J	ampère/metro ² (A/m^2)
Corrente Elétrica	I	ampère (A)
Densidade de Carga	ρ	coulomb/metro ³ (C/m^3)
Carga Elétrica	Q	coulomb (C)
Permeabilidade Magnética	μ	henry/metro ($henry/m$)
Permissividade Dielétrica	ϵ	farad/metro ($farad/m$)
Condutividade Elétrica	σ	siemens/metro (S/m)
Frequência angular da onda	ω	rad/s

Tabela 2.1: Nomes, símbolos e unidades físicas das principais grandezas eletromagnéticas. Em negrito: campos vetoriais; Em minúscula: domínio do tempo; Em maiúscula: domínio da frequência. Apenas as unidades de μ , ϵ e σ estão no domínio da frequência. Todas as outras estão no domínio do tempo.

2.1.1 Equações de Maxwell

O estudo eletromagnético de um meio consiste na determinação dos componentes do campo eletromagnético em cada ponto de medição, provocado por um sistema de fontes. Cargas e correntes elétricas constituem as fontes principais de um campo eletromagnético, sendo que as outras fontes, como são o caso de dipolos elétricos e magnéticos, dependem fundamentalmente delas.

Para descrição destes componentes eletromagnéticos são utilizadas as Equações empíricas de Maxwell¹. Elas estão desacopladas em equações diferenciais lineares de primeira ordem, porém, podem ser acopladas pelas relações empíricas constitutivas, onde o número dos campos vetoriais é reduzido de cinco para dois (WARD e HOHMANN, 1988).

Seja um campo eletromagnético o domínio de 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 em todos os pontos do espaço. Estes quatros vetores estão subordinados às Equações de Maxwell, dadas a seguir na sua forma diferencial no domínio do tempo (STRATTON, 1941):

$$\nabla \times \mathbf{e} + \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t} = 0, \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{h} - \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial t} = \mathbf{j}, \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{b} = 0, \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{d} = \rho, \quad (2.4)$$

que, na forma integral, assumem as seguintes expressões:

$$\oint \mathbf{e} \cdot d\mathbf{l} + \frac{\partial}{\partial t} \int \mathbf{b} \cdot d\mathbf{s} = 0, \quad (2.5)$$

$$\oint \mathbf{h} \cdot d\mathbf{l} - \frac{\partial}{\partial t} \int \mathbf{d} \cdot d\mathbf{s} = I, \quad (2.6)$$

$$\oint \nabla \cdot \mathbf{b} dv = 0, \quad (2.7)$$

¹James Clark Maxwell (1831-1879), físico escocês, baseou-se nos trabalhos e experiências de Ampère, Gauss e Faraday para elaborar sua teoria. Através de suas equações, generalizou as leis de Ampère e de Faraday em função da posição e do tempo.

$$\oint \nabla \cdot \mathbf{d}dv = Q. \quad (2.8)$$

As equações 2.1 e 2.5 representam a lei de Faraday e as equações 2.2 e 2.6 representam a lei de Ampère.

Em sua forma diferencial, essas equações estão desacopladas, pois, apresentam cinco vetores para apenas quatro equações. Para resolver este problema é preciso empregar as relações constitutivas apresentadas a seguir no domínio da frequência:

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}), \quad (2.9)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon\mathbf{E} = \epsilon_0\mathbf{E} + \mathbf{P}, \quad (2.10)$$

$$\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E}. \quad (2.11)$$

E então, no domínio do tempo, quando μ , ϵ e σ são constantes com a frequência, aplica-se a função Delta Dirac e a operação de convolução para obter as cinco equações de Maxwell acopladas.

$$\nabla \times \mathbf{e} + \mu \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t} = 0, \quad (2.12)$$

$$\nabla \times \mathbf{h} - \epsilon \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t} = \sigma \mathbf{e}, \quad (2.13)$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{h} + \mathbf{m}) = 0, \quad (2.14)$$

$$\nabla \cdot \left(\mathbf{e} + \frac{\mathbf{P}}{\epsilon_0} \right) = \frac{\rho}{\epsilon_0}. \quad (2.15)$$

Já no domínio da frequência, as equações 2.12 e 2.13 passam a ser:

$$\nabla \times \mathbf{E} + i\mu\omega\mathbf{H} = 0, \quad (2.16)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - (\sigma + i\epsilon\omega)\mathbf{E} = 0 \quad (2.17)$$

2.1.2 Elipse de Polarização

Os componentes do campo eletromagnético variam em amplitude e em fase conforme a direção. Devido à variação na fase, tanto na direção como no tempo, o campo total não é, em geral, linearmente polarizado, de modo que a extremidade do vetor descreve um elipsóide de polarização no espaço com o passar do tempo (SAMPAIO, 2006). A formulação da elipse de polarização do campo eletromagnético é dada por (STRATTON, 1941):

$$\frac{X^2}{H_x^2} + \frac{Z^2}{H_z^2} - 2\frac{XZ \cos \Delta\phi}{H_x H_z} = \sin^2 \Delta\phi \quad (2.18)$$

O ângulo ($\Delta\phi$) é a diferença de fase entre os campos magnéticos vertical e horizontal respectivamente de amplitudes H_z e H_x e fases ϕ_z e ϕ_x . Portanto, $\Delta\phi = \phi_z - \phi_x$.

Apresentaremos a seguir a descrição feita por SMITH e WARD (1974) dos parâmetros mais empregados no estudo da elipse de polarização, conforme ilustra a Figura 2.1.

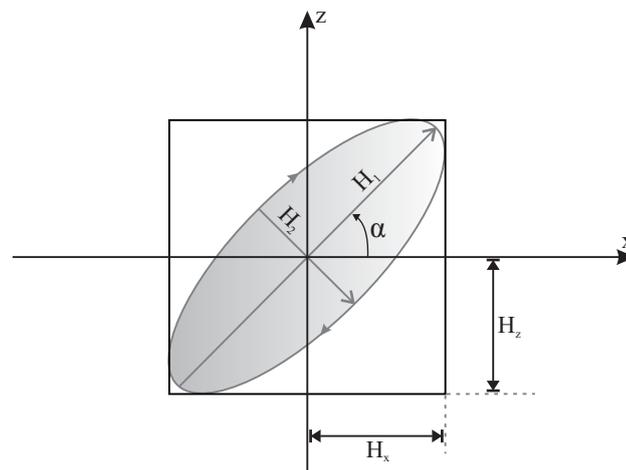


Figura 2.1: Elipse de polarização do campo magnético

- Tilt angle: ângulo espacial entre um dos eixos principais de uma elipse e um dos eixos coordenados.

$$\alpha = \pm 1/2 \arctan \left[\frac{2(H_z/H_x) \cos \Delta\phi}{1 - (H_z/H_x)^2} \right] \quad (2.19)$$

- Elipsidade: razão entre a magnitude dos dois eixos principais de uma elipse.

$$\varepsilon = \frac{H_2}{H_1} = \frac{H_z H_x \sin(\Delta\phi)}{|H_z e^{i\Delta\phi} \sin \alpha + H_x \cos \alpha|^2} \quad (2.20)$$

Estas grandezas físicas são bastante utilizadas para interpretação de dados VLF e, no decorrer deste trabalho, avançaremos nas aplicações destes parâmetros e apresentaremos típicos perfis com as curvas do tilt e elipsidade.

2.1.3 Lei de Biot-Savart

A Lei de Biot-Savart define precisamente o campo magnético em qualquer ponto como uma integral de linha ao longo do caminho das correntes elétricas que são as fontes do campo (FORBE et al., 1997). Ela é uma lei experimental e foi formulada poucas semanas depois de Oersted² anunciar, em 1820, sua descoberta segundo a qual correntes galvânicas produzem campos magnéticos. Naquele ano, Jean Biot e Felix Savart (ambos físicos franceses) deduziram que o campo magnético, ao longo de um condutor reto, variava em função de I/r , ou, era diretamente proporcional à corrente I e inversamente proporcional à distância r até o condutor. Somente após outras experiências posteriores eles conseguiram estabelecer, empiricamente, uma lei válida para casos gerais (REITZ et al., 1979).

A mesma representa uma expressão que auxilia a obtenção do campo magnético H em função da corrente I que o gera. É necessário notar que esta lei, sob o aspecto conceitual, não acrescenta absolutamente nada às equações de Maxwell. Ela poderia ser considerada como uma variação algébrica da lei de Ampère.

Cabe salientar que, fora estas duas leis (Ampère e Biot-Savart), não há nenhum meio analítico de determinar o campo magnético H em função de J . Somente os métodos numéricos, relativamente modernos, podem determinar o campo magnético H em um bom número de casos, sem que se tenha ainda meio de solucionar todos os problemas existentes.

É observado na Figura 2.2 um caso 2D, em que a componente vertical do campo magnético provocada por uma densidade de corrente $J(\xi, \zeta)$ pode ser definida pela lei de Biot-Savart da seguinte forma (REITZ e MILFORD, 1966):

$$H_z(x, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} d\xi \int_{-\infty}^{\infty} \frac{J(\xi, \zeta) \cdot (x - \xi)}{(x - \xi)^2 + (z - \zeta)^2} \cdot d\zeta \quad (2.21)$$

2.2 O Sistema VLF

2.2.1 Breve Histórico

A idéia de usar sinais de rádio para prospecção eletromagnética tem como escopo o efeito anômalo no comportamento das ondas de rádio causado pelas propriedades elétricas da Terra em subsuperfície em uma dada região de observação. As primeiras técnicas que usavam o método *Tilt-Angle* foram apresentadas na década de 1930, no principio foram utilizadas ondas de rádio com alta frequência resultando em uma profundidade de exploração muito

²Hans Christian Oersted (1777-1851), físico e químico dinamarquês, conhecido sobretudo por ter descoberto que as correntes elétricas podem criar campos magnéticos que são parte importante do Eletromagnetismo.

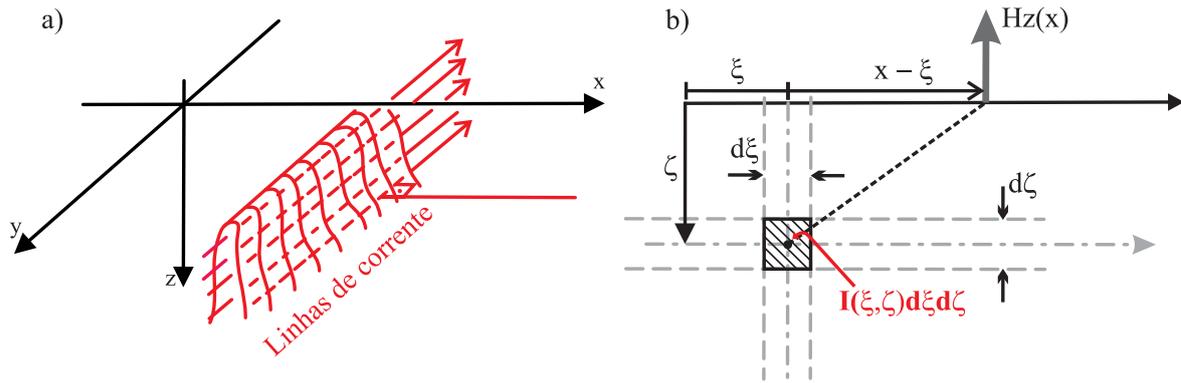


Figura 2.2: (a) Sistemas de coordenadas e orientação das linhas de corrente. (b) Campo magnético provocado por um elemento de densidade de corrente, modificada de KAROUS e HJELT (1983).

baixa. As pesquisas geofísicas com ondas de rádio deram um salto na década de 60 quando o brilhante geofísico Vaino Ronka e seu fiel parceiro Alex Herz, realizando testes com instrumentos eletromagnéticos próximo de Bancroft, Ontário, começaram a captar códigos Morse de transmissores de rádio VLF³ usados para comunicação entre submarinos militares. Então, Ronka concluiu que se esses sinais poderiam ser captados como um ruído, podendo os mesmos também serem utilizados como fonte de sinal. Assim, os exploracionistas simplesmente sintonizariam estações de rádio VLF existentes e usariam essas ondas para detecção de jazidas minerais.

O início do sucesso da prospecção eletromagnética VLF adveio com os trabalhos realizados por (PAAL, 1965) que descreveu o comportamento de componentes do campo eletromagnético em regiões mineralizadas. Paal, examinando jazidas minerais rasas já conhecidas na Suécia, observou que, ao longo de corpos condutores em subsuperfície, o campo magnético horizontal VLF teve o máximo de amplitude, enquanto que o campo vertical foi ao mínimo de amplitude, tal comportamento foi reconhecido como sendo o de uma corrente elétrica induzida fluindo ao longo do corpo mineralizado. Além disso, ele realizou medições da intensidade do campo dentro das minas para estudar a viabilidade do uso do sinal VLF. Embora perturbada por máquinas, cabos e minérios, a intensidade do campo horizontal, a profundidades acima de 200m, ainda era relevante para a prospecção VLF com a ressalva das condições de sinal existentes na Suécia.

O primeiro Sistema VLF terrestre comercial foi apresentado pela Geonics Ltd em 1964 (PATERSON e RONKA, 1971), e, dentro de poucos anos, estavam disponíveis no mercado uma série de instrumentos semelhantes de outros fabricantes, quatro anos depois era a vez do

³ *Very Low Frequency* ou VLF refere-se a ondas de rádio que compreendem o intervalo de 3 a 30 kHz no espectro de onda.

Sistema VLF ganhar o espaço aéreo. Os equipamentos, para levantamentos aéreos, basicamente mediam ou a inclinação do Campo magnético (*Tilt-Angle*) ou a intensidade do campo magnético horizontal e vertical, de modo a mapear a presença de grandes alvos eletricamente condutores em subsuperfície.

COLLET e BECKER (1967), apresentaram ao mercado o *Radiohm*, uma adaptação de um equipamento magnetotélúrico que utilizava como fonte de sinal as antenas VLF ao invés de ruído atmosférico com a vantagem de obter uma fonte coerente e de permitir que a diferença de fase entre os campos elétrico e magnético horizontais fosse mensurável e utilizada para a interpretação dos dados. Além disso, contrariamente aos equipamentos anteriores que trabalhavam somente com as componentes do campo magnético, o *Radiohm* media também diretamente a impedância de onda, a partir da qual a resistividade aparente do terreno podia ser inferida, técnica esta vastamente utilizada para mapeamento geológico de subsuperfície, mesmo em terrenos altamente resistentes.

Ao mesmo tempo, BARRINGER (1973) começou a trabalhar na adaptação da técnica *RadioPhase* (Sistemas de medição de diferença de fase) para levantamentos aéreos. Estas técnicas utilizavam o campo elétrico vertical como referência e pela primeira vez pode-se medir o componente em quadratura do campo elétrico horizontal.

Finalmente, TILSLEY (1973) sugeriu a utilização de transmissores portáteis de ondas VLF como um complemento aos transmissores VLF regulares que poderiam ser desligados sem aviso prévio. Um transmissor portátil também se torna útil quando não há um bom acoplamento do campo eletromagnético da fonte com o prospecto.

O Sistema VLF é o mais popular sistema geofísico de prospecção do mundo, embora não se tenha muitos trabalhos publicados sobre ele. Os instrumentos que operam neste sistema de exploração possuem tamanho e peso de um rádio transmissor. Portanto, possuem vantagens no custo e no tempo de execução. O EM-16 da Geonics Ltd se tornou o *best-seller* instrumento geofísico de todos os tempos, ao ponto de possibilitar um garimpeiro estar com uma picareta na mão e um EM-16 na outra (Mc NEILL e LABSON, 1991).

2.2.2 Princípios e Aplicações

Como foi explanado na seção anterior, o Sistema de prospecção eletromagnética VLF utiliza transmissores de alta potência usados em comunicações de rádio militares que estão locados em diferentes regiões do globo terrestre como fontes de campo primário. A Figura 2.3 contém um mapa com as localizações dos transmissores VLF em todo o mundo.

Estes emissores de ondas são monopolos elétricos verticais. Consequentemente, as linhas de campo magnético se distribuem concentricamente no plano horizontal em torno do transmissor, mas, nas regiões distantes da estação, as ondas de rádio podem ser consideradas uma

onda plana, permanecendo assim, caso se mantenham estáveis, as condições geolétricas do meio onde se propaga.

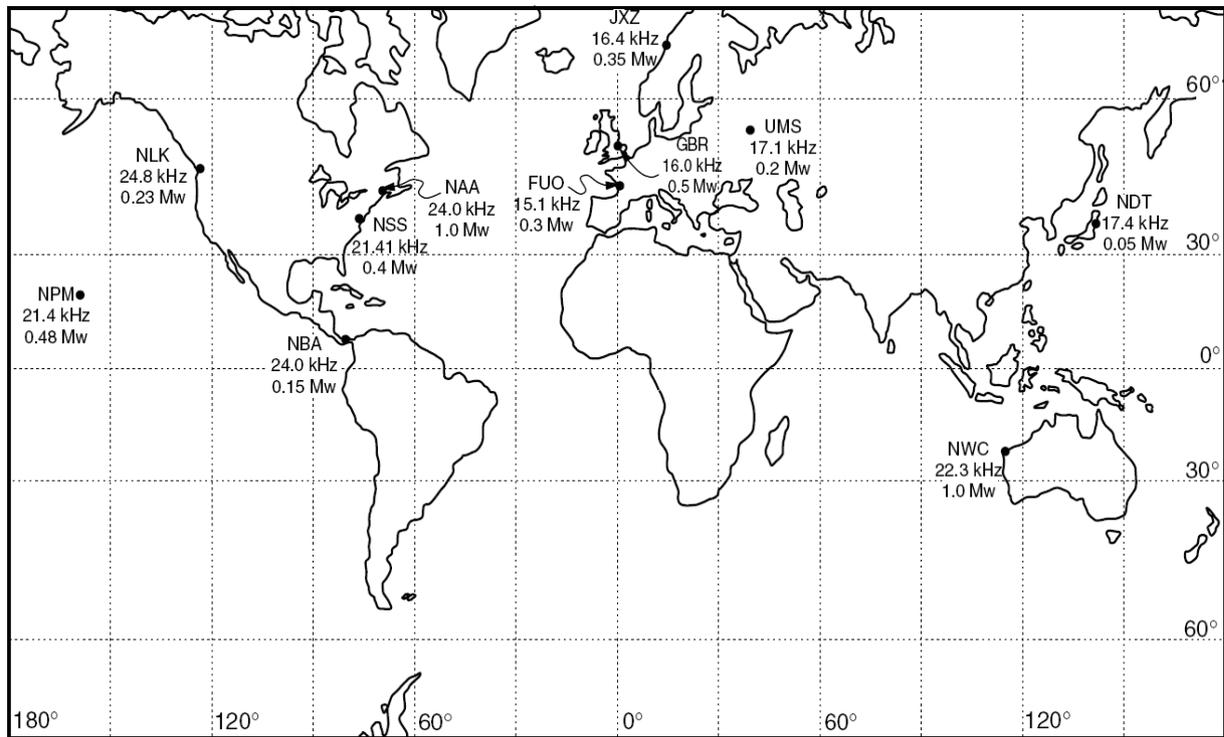


Figura 2.3: Principais transmissores VLF. Localização, códigos das estações (*e.g.* NAA), frequências em kHz e potência em Mw (MILSOM, 2003).

Os sinais VLF se propagam principalmente na cavidade entre a ionosfera e a superfície da terra que serve como guia de onda, conforme ilustra a Figura 2.4. No entanto, nos condutores são induzidas correntes que vão produzir campos secundários e o campo resultante (campo primário mais secundário) terá intensidade, direção e, possivelmente, fase diferentes das do campo primário. Este sistema geofísico se baseia em medir alguma destas mudanças, indicando a presença de condutores e, por vezes, algumas das suas características.

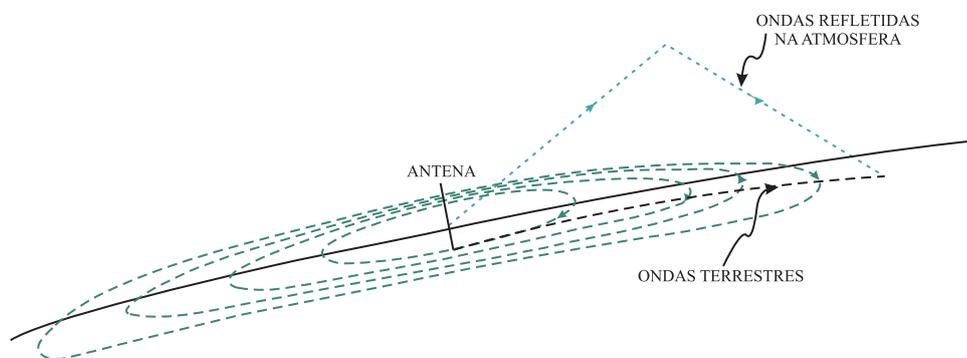


Figura 2.4: Comportamento de campos eletromagnéticos gerados por um transmissor de ondas de rádio VLF.

A Figura 2.5 representa, esquematicamente, o funcionamento do sistema VLF para o caso de polarização magnética.

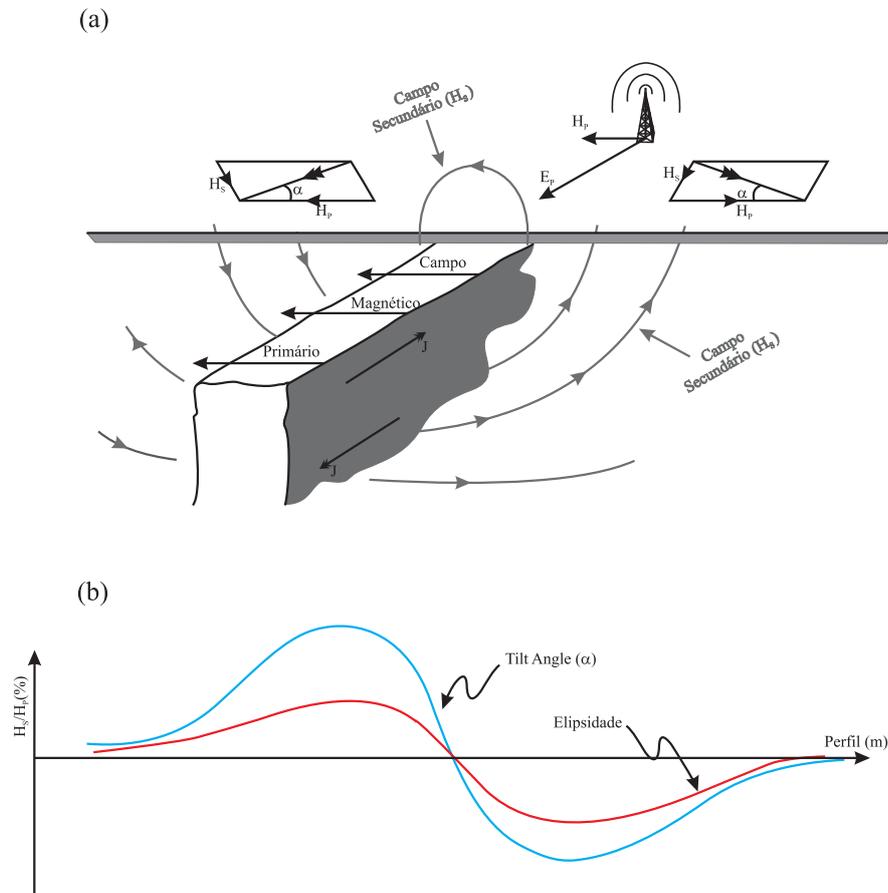


Figura 2.5: Esquema demonstrativo do princípio do sistema de prospecção VLF-EM. (a) condição especial para o uso do sistema VLF-EM; (b) exemplo de resposta do VLF-EM para o esquema mostrado.

Vimos, também, na seção anterior, que o uso do Sistema VLF surgiu para estudos de exploração mineral. Contudo, ele pode ser uma ferramenta eficaz de reconhecimento geofísico para o mapeamento de características geolétricas. Ele apresenta ótimos resultados em regiões onde o contraste de condutividade elétrica entre unidades geológicas é bastante pronunciado. Esta premissa inclui zonas de falhas e fraturas e corpos mineralizados, que tendem a ser mais condutores do que a rocha circundante ou rocha hospedeira, além de outras unidades geológicas condutoras, como os solos argilosos, e solos lixiviados. Enfim, as áreas de aplicação do Sistema VLF são:

- Mapeamento geológico (Falhas, Diques, Lineamentos, Contatos litológicos, *etc*);
- Exploração de água subterrânea;
- Geofísica ambiental (Mapeamento de contaminantes químicos);

- Mapeamento de *Overburden*⁴;
- Exploração Mineral (Feições condutoras).

Cabe salientar que, em prospecção geofísica, a profundidade de investigação é um parâmetro de extrema importância. No caso dos métodos eletromagnéticos, este parâmetro é controlado pelo "skin depth" da onda plana, que é dado por:

$$\delta = \sqrt{2\rho_a/\omega\mu} \quad (2.22)$$

Onde, ρ_a é a resistividade aparente da geologia local.

Portanto, esta expressão depende das condições elétricas da geologia local bem como da frequência utilizada. De um modo geral, o *skin depth* para o Sistema VLF varia entre 60-100 metros de profundidade em solos altamente resistivos e 8-10 metros em solos condutivos.

O Sistema VLF é usado principalmente como um instrumento de reconhecimento para identificar as áreas anômalas para investigação, quer com outros métodos geofísicos ou perfuração. Os pontos fracos do método incluem:

- As medidas são sensíveis à interferência antrópica, tais como: Redes de transmissão; cercas e outros objetos condutores.;
- A interpretação dos dados é geralmente de natureza qualitativa, pois, a modelagem quantitativa exige uma elevada densidade de dados e um modelo bem restrito.;
- Efeitos topográficos podem influenciar os dados, são difíceis para remover, e são dependentes do modelo.;
- Os Transmissores de sinal VLF estão sujeitos a interrupções para manutenção.;
- Condições ionosféricas desfavoráveis podem comprometer a qualidade dos dados..

Para finalizar esta seção, é pertinente informar que o sistema VLF pode ser subdividido em dois distintos modos de operação, são eles:

1. VLF-EM (Sistema VLF Eletromagnético);
2. VLF-R (Sistema VLF Resistivo).

A diferença entre estes dois modos, bem como os parâmetros mensuráveis por cada um, serão abordados nas seções posteriores.

⁴Overburden é o termo utilizado na mineração e na arqueologia para descrever o material que se encontra acima da área de interesse econômico ou científico.

2.2.3 Campo Devido a Uma Antena VLF

Assumindo que a fonte transmissora seja um monopolo vertical de comprimento h localizado no plano horizontal. As componentes eletromagnéticas do campo a uma distância r na superfície do condutor são dadas por:

$$E_z = \frac{n_0 I_0 h}{2\pi} \left(\overbrace{\frac{i\beta}{r}}^a + \overbrace{\frac{1}{r^2}}^b - \overbrace{\frac{i}{\beta r^3}}^c \right) e^{-i\beta r} e^{i\omega t} \quad (2.23)$$

$$H_\phi = \frac{I_0 h}{2\pi} \left(\frac{i\beta}{r} + \frac{1}{r^2} \right) e^{-i\beta r} e^{i\omega t} \quad (2.24)$$

Onde, tem-se $I_0 e^{i\omega t}$ como a corrente fluindo na base da antena; $n_0 = (\mu_0/\epsilon_0)^{1/2} = 120\pi\Omega$ (impedância intrínseca no espaço livre); $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ h/m (permeabilidade magnética no vácuo); $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ F/m (permissividade elétrica no vácuo); $\beta = 2\pi\lambda^{-1}$ (constante de propagação); λ é o comprimento de onda no espaço livre.

Na equação 2.23 os termos destacados em a , b e c representam as contribuições de propagação, de indução e eletrostático, respectivamente. Quando $r \geq \lambda$ as componentes do campo para um monopolo situado em um condutor perfeito, medido na superfície, consistem de um campo elétrico vertical e um campo magnético horizontal, os quais estão em fase. A razão $E_z/H_\phi = n_0$ é independente da distância radial r . Essas componentes são mostradas na Figura 2.6.

A componente normal exterior do produto vetorial $E_x \times H$ (chamado de vetor de *Poynting*) pode ser integrada sobre uma superfície fechada, e o resultado é proporcional à energia que flui através da superfície (STRATTON, 1941). Mas se esta superfície for muito grande ($r \gg \lambda$), no caso um hemisfério centrado no monopolo transmissor, pode-se concluir que a potência total fluindo através da superfície esférica é dada por:

$$P = \frac{4\pi}{3} \cdot n_0 \left(\frac{I_0 h}{\lambda} \right)^2 \quad (2.25)$$

Esta equação permite reescrever as equações 2.23 e 2.24 com formulações mais úteis, as quais permitem calcular a potência de um transmissor VLF que são:

$$E_z = 9,5 \frac{\sqrt{P}}{r} \quad (2.26)$$

$$H_\phi = \frac{E_z}{n_0} \quad (2.27)$$

Por fim, o campo elétrico vertical é frequentemente dado em decibéis, assim:

$$E_z[db] = 20 \log \frac{E_z[mV/m]}{1[mV/m]} \quad (2.28)$$

$$E_z[db] = 49,54 + 10 \log P - 20 \log r \quad (2.29)$$

Onde, P é dada em kW e r em km .

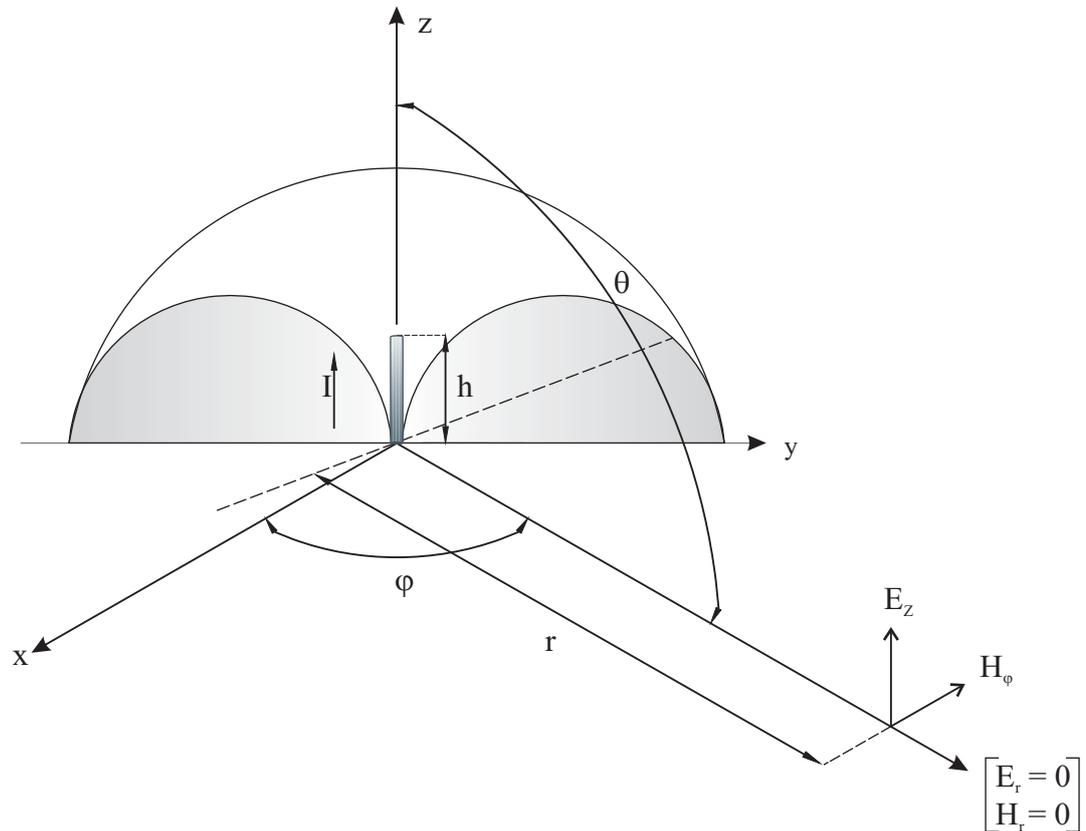


Figura 2.6: Esquema indicando os campos devido a um monopolo de corrente

2.2.4 Equipamentos e Parâmetros Medidos

Com relação ao que já foi explanado até aqui, a Lei de Faraday da indução eletromagnética nos diz que qualquer oscilação do campo magnético (*e.g.* uma onda de rádio) vai produzir um campo elétrico e, portanto, uma corrente elétrica em meios condutores. Estas são chamadas de correntes de turbilhonamento, que criam um campo magnético secundário. O campo eletromagnético secundário ou perturbado pode apresentar fase e orientação diferentes do campo primário, em função da forma, geometria ou orientação do condutor, como também em razão de contrastes de condutividade com o material adjacente (ou rocha hospedeira). É

a partir deste fundamento que os diversos equipamentos VLF trabalham avaliando o campo secundário.

Pelo fato de normalmente utilizar transmissores fixos, o sistema VLF exige para a operação equipamentos bastantes simplificados. Estes consistem quase sempre de um rádio receptor dotado de grande sensibilidade, onde vem acoplado um inclinômetro. A Figura 2.7 ilustra um típico receptor de ondas VLF.



Figura 2.7: Fotografia do Sistema Eletromagnético T-VLF da IRIS Instruments

Ainda nesta seção, descreveremos os dois modos de operação do Sistema VLF e os principais parâmetros medidos por cada um. O mais popular é o modo VLF-EM (*Very Low Frequency - Electromagnetic Survey* ou, ainda, *Tilt-Angle Mode*), que mede as componentes em fase e em quadratura do campo magnético vertical. O outro chama-se VLF-R (*Very Low Frequency - Resistivity Mode*).

VLF-EM ou Modo Tilt Angle

Na seção 2.1.2 foi explicitado que a combinação dos campos VLF primário e secundário resulta em um campo elipticamente polarizado, conforme a configuração vista na Figura 2.8. É a partir do estudo desta elipse de polarização que se inferem os principais parâmetros utilizados para a interpretação dos dados VLF-EM. São eles:

- (i) Tilt Angle vertical (α_v) e horizontal (α_h);
- (ii) Elipsidade vertical (ε_v) e horizontal (ε_h).

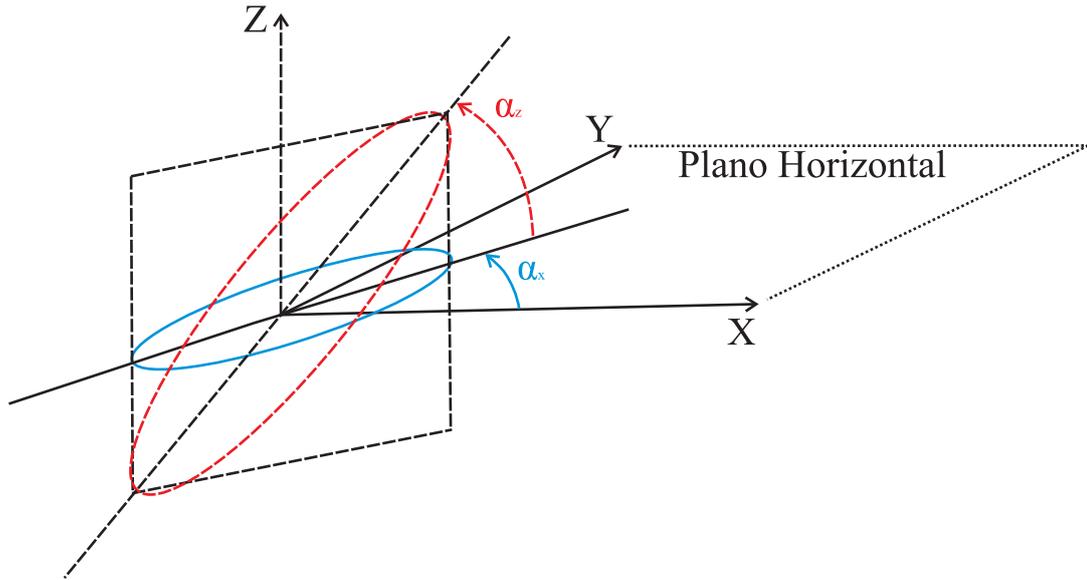


Figura 2.8: Elipsóides de polarização das componentes dos campos magnéticos H_x e H_z . Azul para elipsóide horizontal e vermelho para elipsóide vertical.

Tomando como referência a elipse vertical e as equações 2.19 e 2.20 descritas na seção 2.1.2, podemos, ainda, reescrevê-las em termos das componentes real $\Re(H_z)$ e imaginária $\Im(H_z)$ do campo, onde:

$$\Re(H_z) = \frac{H_z}{H_x} \cos \Delta\phi, \quad (2.30)$$

e

$$\Im(H_z) = \frac{H_z}{H_x} \sin \Delta\phi. \quad (2.31)$$

Então,

$$\alpha = \pm 1/2 \arctan \left(\frac{2\Re(H_z)}{1 - \left(\frac{H_z}{H_x}\right)^2} \right) \quad (2.32)$$

e

$$\epsilon = \frac{H_2}{H_1} = \frac{\Im(H_z)}{|\Re(H_z) + i\Im(H_z) \sin \alpha + \cos \alpha|^2}. \quad (2.33)$$

Ou ainda,

$$\epsilon = \frac{H_2}{H_1} = \frac{\Im(H_z)}{[\Re(H_z) \sin \alpha + \cos \alpha]^2 + [\Im(H_z) \sin \alpha]^2} \quad (2.34)$$

As equações 2.32 e 2.34 relacionam α e ϵ com as componentes do campo vertical, multiplicadas com o fator de correção os quais estão em função da razão H_z/H_x e $\Delta\phi$. Para intensidades relativamente pequenas de campo secundário ($H_z \ll H_x$) a equação 2.32 reduz-se a:

$$\alpha = \pm 1/2 \arctan [2\Re(H_z)]. \quad (2.35)$$

Esta equação indica que a tangente e, portanto, a inclinação, é aproximadamente proporcional à componente real do campo secundário medido na direção vertical para pequenos ângulos. A elipsidade pode ser escrita como:

$$\varepsilon = \Im(H_z) \quad (2.36)$$

Esta última expressão mostra uma direta proporcionalidade entre a elipsidade e a componente em quadratura do campo secundário vertical.

A aproximação inerente nessas expressões conduz a erros para grandes campos secundários aplicados (PATERSON e RONKA, 1971). Ele cresce para grandes campos secundários, alcançando aproximadamente 10% para $\left(\frac{H_z}{H_x}\right) = 0,5$.

VLF-R ou Modo Resistivo

Os equipamentos que operam o modo resistivo tomam leituras referentes às componentes em fase e em quadratura do campo elétrico horizontal medido ao longo da direção radial do transmissor, a partir da medida da diferença de potencial elétrico entre dois eletrodos introduzidos no solo separados a uma distância conhecida. Este modo de operação permite inferir:

- (i) Resistividade aparente, que tem a mesma expressão do Sistema Magnetotelúrico.

$$\rho a = \frac{1}{\omega\mu} \left(\frac{E_y}{H_x}\right)^2 \quad (\Omega m) \quad (2.37)$$

- (ii) Ângulo de fase, entre o campo elétrico e campo magnético.

$$\phi = \arctan \left(\frac{\Im(E_y/H_x)}{\Re(E_y/H_x)}\right) \quad (^\circ) \quad (2.38)$$

2.2.5 Técnicas de Aquisição dos Dados

A aquisição de dados VLF é diferente para os dois modos de operação VLF já vistos na seção 2.2.4. Para o modo Tilt preferencialmente o levantamento de campo é executado em linhas perpendiculares à direção da antena transmissora e da feição geológica conforme ilustra a Figura 2.9(a), a fim de intensificar a influência do campo secundário nos dados mensurados. Por outro lado, no modo Resistivo a melhor opção é seguir o levantamento em linhas paralelas à direção da antena e perpendiculares à feição geológica que se deseja mapear, como dado na Figura 2.9(b).

Estas técnicas apresentadas sugerem que, em campo, é necessário um bom planejamento para execução do levantamento onde se procura selecionar um transmissor o mais próximo

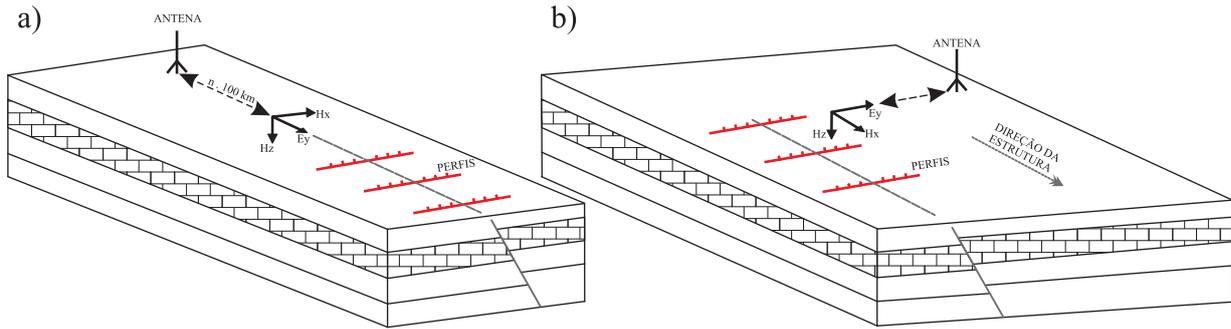


Figura 2.9: Direções preferenciais para levantamento VLF terrestre. (a) modo Tilt angle e (b) modo Resistivo.

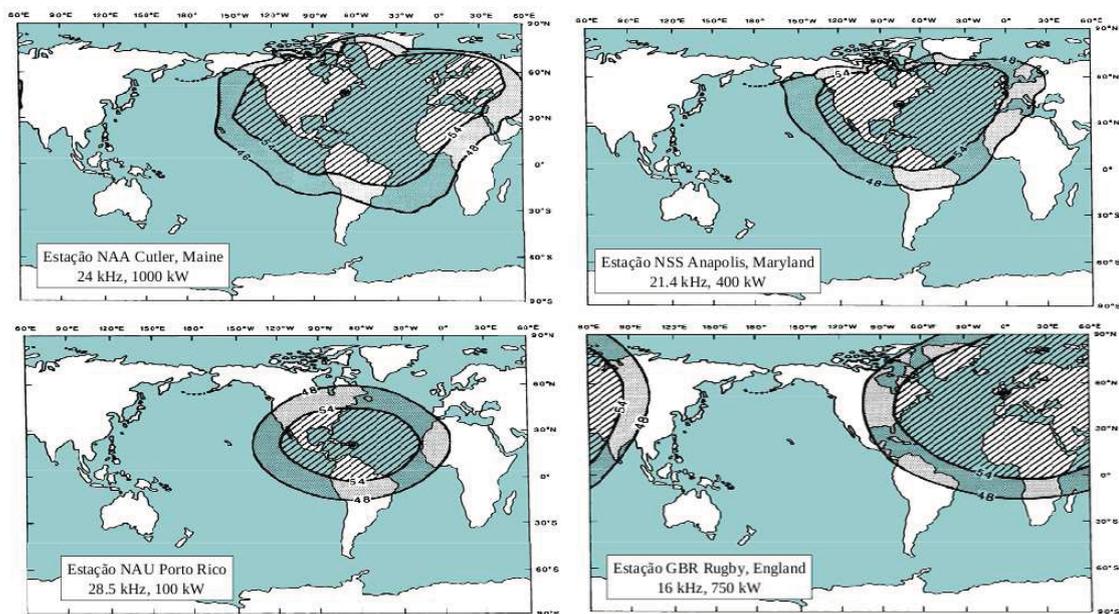


Figura 2.10: Mapas com a cobertura do sinal VLF dos principais transmissores utilizados no Brasil: (a) Estação NAA Cutler, Maine, 24 kHz, 1000 kW; (b) Estação NSS Anapolis, Maryland, 21,4 kHz, 400 kW; (c) Estação NAU Porto Rico, 28,5 kHz, 100 kW e (d) Estação GBR Rugby, England, 16 kHz, 750 kW .

possível em consonância com o alvo geológico. A Figura 2.10 mostra os mapas de cobertura do sinal VLF dos transmissores mais utilizados no Brasil. Com base neles, é feita a escolha de um campo eletromagnético primário suficientemente forte na área pesquisada.

Cabe salientar que, mesmo obtendo um perfeito acoplamento entre transmissor, receptor e prospecto, a influência de ruídos antrópicos (*e.g.* redes de transmissão elétrica, condições ionosféricas desfavoráveis, e geomorfologia local adversa) são circunstâncias que também devem ser consideradas no planejamento de campo.

Além disso, é necessária uma verificação periódica no sinal da estação usada, uma vez que

o mesmo pode variar com a temperatura como também ser interrompido sem aviso prévio. No hemisfério sul, a recepção apesar de ser adequada durante todo o dia, é no período da manhã que o sinal VLF tem melhor qualidade de recepção.

Nos transmissores de altas frequências de sinal ocorrem oscilações nas leituras e, para adquirir um certo equilíbrio e assegurar a maioria dos tipos de medidas, convém manter o ganho do sinal no amplificador entre os valores de 30 a 100 %.

Finalmente, é importante dizer que um campo transmissor muito forte pode impedir o sinal de outras estações, sendo conveniente orientá-lo para pequenos ângulos em relação à direção da feição geológica e esta operação do campo fica particularmente sensível.

2.2.6 Técnicas de Tratamento de Dados VLF-EM

Os dados VLF, tradicionalmente, são apresentados em forma de gráficos com as curvas da tilt angle vertical (α), e com a da elipsidade vertical (ε). Por outro lado, estas curvas podem ser de difícil interpretação, por causa de efeitos topográficos e interferência do ruído, portanto, diferentes técnicas de filtragem foram desenvolvidas para melhorar a identificação de anomalias verdadeiras.

FRASER (1969) mostrou uma técnica de filtragem que propôs resolver o problema de ruídos causados pela alta frequência utilizada no método VLF. A solução estaria na aplicação de um filtro numérico simples, o qual transforma o *cross-over* da anomalia (ponto onde o gráfico da anomalia apresenta o gradiente máximo) em um pico, aplicando, para isso, uma janela de filtragem com sucessivas subtrações nos dados. Este processo de filtragem deixa os dados apropriados à confecção de mapas de contorno, delineando, desta maneira, as estruturas geológicas que produzem os sinais anômalos. Embora este filtro contemple algumas dificuldades na visualização de dados VLF, muitos geofísicos ainda preferem trabalhar com os dados brutos, pois, a filtragem pode deslocar o pico da anomalia levemente ao longo do perfil, bem como as respostas de estruturas complexas podem ser substancialmente alteradas no processo de filtragem.

Outra técnica de filtragem largamente utilizada foi proposta KAROUS e HJELT (1983). Eles propuseram um método de filtragem finito, mais generalizado e rigoroso do já bastante conhecido filtro Fraser, mas derivado da lei de Biot-Savart que descreve a associação de campos magnéticos aos fluxos de corrente em sub-superfície. O método consiste na aplicação de um filtro discreto às componentes real e imaginária para obter a densidade de corrente equivalente a uma determinada profundidade. O mesmo dispõe os resultados em forma de pseudo-seções, com isso se tem uma visualização imediata dos dados de campo, mas é necessário ter em atenção que as pseudo-seções não correspondem à distribuição de corrente verdadeira em profundidade.

2.2.7 Técnicas de Interpretação

Com a interpretação qualitativa de dados VLF, devemos atentar que todos os sistemas de observação de dados usam o campo primário como sendo aproximadamente horizontal. Então, sendo a componente VLF primária horizontal, as condutividades locais adicionarão componentes verticais e conseqüentemente teremos, no local, um campo resultante inclinado. É a partir desta premissa que são descritas, de forma analítica, as curvas com os valores mensuráveis.

Como já foi visto, a depender do modo de operação teremos informações diferentes. No caso do VLF-EM a curva do tilt angle pode mostrar informações valiosas sobre o condutor, nesse caso:

1. O *cross-over* localiza o topo do condutor;
2. A declividade do *cross-over* indica a sua profundidade;
3. A assimetria do perfil indica a inclinação do condutor.

A Figura 2.11 mostra um típico par de perfis de Tilt Angle e Elipsidade a qual ilustra as quantidades medidas nos perfis que são utilizadas na interpretação. O θ_{max} e ε_{max} são medidas absolutas entre o mínimo e o máximo dos perfis. A distância lateral entre o mínimo e o máximo dos perfis de Tilt Angle (distância Δx) também é utilizada nas investigações para se fazer a estimativa da profundidade do condutor. Entretanto, a distinção entre a condutividade e a profundidade da anomalia é normalmente difícil, e os ábacos disponíveis podem ser usados para determinar as características do corpo. Desta maneira, as filtragem FRASER e KAROUS e HJELT mostram, de forma eficaz, soluções numéricas que auxiliam na interpretação qualitativa.

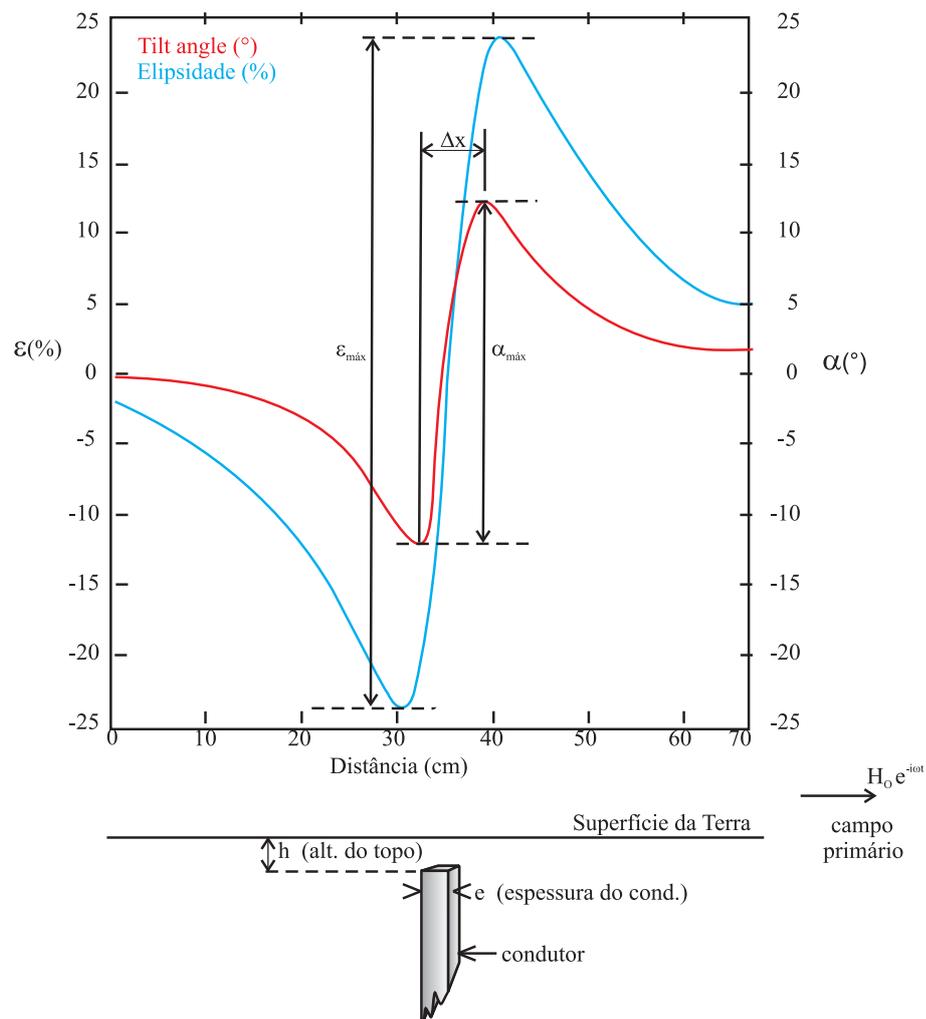


Figura 2.11: Curvas tilt angle e elipsidade que mostram uma anomalia típica produzida por um corpo condutor vertical em subsuperfície.

Por outro lado, na interpretação quantitativa, as técnicas de modelagem numérica são fortes instrumentos de auxílio para a interpretação de dados eletromagnéticos VLF, bem como são largamente recomendadas para obtenção indireta da condutividade elétrica do prospecto.

No entanto, um modelo numérico fidedigno à situação real da terra (com variação na condutividade, geometria irregular, anisotropia e presença de cobertura), é difícil de ser simulado e não oferece soluções tratáveis. Por isso, os modelos estudados são feições geológicas mais simplificadas como corpos condutores alongados, contatos litológicos, lâminas infinitas, e falhas, mas não se deve esperar um alto grau de precisão nas interpretações, a menos que se trabalhe com condições extremamente favoráveis (GRANT e WEST, 1965).

CAPÍTULO 3

MODELAGEM ELETROMAGNÉTICA VLF-EM

3.1 Considerações e Objetivos

A formulação matemática de problemas geofísicos, em particular nos métodos eletromagnéticos, é de grande complexidade e geralmente de difícil solução. Na maioria dos casos, é impossível obter uma solução analítica. Desta forma, muitas anomalias eletromagnéticas (EM) não são entendidas e, portanto, não aparecem na literatura disponível.

Nas investigações geofísicas, a resolução do problema direto é de extrema relevância na análise de assinaturas EM provocadas por diferentes situações geológicas, de modo a criar subsídios para uma interpretação mais confiável. Sendo assim, o tratamento teórico conhecido como modelagem direta é uma excelente ferramenta geofísica para auxiliar a interpretação qualitativa de dados.

Neste capítulo, são utilizadas simulações numéricas para analisar a resposta VLF nas situações geológicas do escopo deste trabalho. Com isso, pretende-se fornecer subsídios para uma interpretação qualitativa e quantitativa dos dados de campo. Para esta finalidade, foi empregada a teoria numérica apresentada por SAMPAIO (2009) no desenvolvimento de algoritmos.

3.2 Equações Básicas

De acordo com WARD e HOHMANN (1988) o campo magnético no domínio da frequência, H , devido a uma linha de transmissão harmônica (LTH) ao longo do eixo y é dado pela expressão:

$$\mathbf{H}(x, z) = \frac{I}{2\pi} i\kappa\rho K_1 \left(\frac{z - \zeta}{\rho^2} \mathbf{u}_x - \frac{x - \xi}{\rho^2} \mathbf{u}_z \right) \quad (3.1)$$

Na Equação 3.1: (x, z) são as coordenadas das estações; (ξ, ζ) são as coordenadas da LTH; K_1 é a função modificada de Bessel de segunda espécie, ordem 1, e argumento $i\kappa\rho$; $\rho = \sqrt{(x - \xi)^2 + (z - \zeta)^2}$ é a distância entre a fonte e o receptor; $i = \sqrt{-1}$ e o número de

onda $\kappa = \sqrt{\mu\epsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega}$, $\Im(\kappa) < 0$.

A proposta é modelar uma LTH, ao longo do eixo y , a partir de um prisma retangular que é infinitamente longo e tem sua seção retangular dada por $\Delta\xi\Delta\zeta$, onde $I = J\Delta\xi\Delta\zeta$, sendo J a densidade de corrente.

Considera-se, inicialmente, que N LTH, $\zeta > 0$ causam um campo magnético secundário medido nas estações ao longo do perfil, $z = 0$, $x = x_l$, $l = 1, 2, \dots, L$, e que as estações possuem espaçamento constante de Δx . Então, pode-se dividir a equação 3.1 em outras duas:

$$H_z(x_l, 0) = -\frac{\Delta\xi\Delta\zeta}{2\pi} \sum_{n=1}^N J(\xi_n, \zeta_n) i\kappa\rho_{ln} K_1 \frac{x_l - \xi_n}{\rho_{ln}^2}, \quad (3.2)$$

$$H_x(x_l, 0) = -\frac{\Delta\xi\Delta\zeta}{2\pi} \sum_{n=1}^N J(\xi_n, \zeta_n) i\kappa\rho_{ln} K_1 \frac{\zeta_n}{\rho_{ln}^2}, \quad (3.3)$$

Então, em regiões 2-D, cada uma destas LTH possuiriam valores de condutividade anômala, $\sigma_a(\xi_n, \zeta_n) \gg \sigma$. Logo, pode-se inferir que campos eletromagnéticos produzem densidades de corrente $J(\xi_n, \zeta_n)$ em cada uma delas através do componente y do campo elétrico, $E_{yp}(\zeta) = E_{y0}e^{-i\kappa\zeta}$. Em outras palavras:

$$J(\xi_n, \zeta_n) = \sigma_a(\xi_n, \zeta_n)E_{yp}(\zeta_n) = -\sigma_a(\xi_n, \zeta_n) \frac{\omega\mu}{\kappa} H_{x0} e^{-i\kappa\zeta_n}. \quad (3.4)$$

Na equação 3.4, E_{y0} e H_{x0} são, respectivamente, os valores do componente elétrico em y e magnético em x de um campo de onda plana VLF na profundidade $z = 0$. Note que, se $H_{x0} > 0$ então $E_{y0} < 0$ e $J(\xi_n, \zeta_n) < 0$.

Para todos os efeitos práticos, a corrente elétrica desaparece fora das regiões de condutividade anômala, pois, a condutividade de fundo é muito menor que a condutividade anômala. Portanto, podemos reescrever as equações 3.2 e 3.3 da seguinte forma:

$$H_z(x_l, 0) = \bar{E}_0 \sum_{n=1}^N e^{-i\kappa\zeta_n} \sigma_a(\xi_n, \zeta_n) i\kappa\rho_{ln} K_1 \frac{x_l - \xi_n}{\rho_{ln}^2}, \quad (3.5)$$

$$H_x(x_l, 0) = \bar{E}_0 \sum_{n=1}^N e^{-i\kappa\zeta_n} \sigma_a(\xi_n, \zeta_n) i\kappa\rho_{ln} K_1 \frac{\zeta_n}{\rho_{ln}^2}, \quad (3.6)$$

$$\bar{E}_0 = \frac{\omega\mu\Delta\xi\Delta H_p \cos\beta}{2\pi\kappa} \quad (3.7)$$

$H_p > 0$ é a magnitude do vetor horizontal que representa o valor do campo magnético de uma onda plana em $z = 0$ e β representa o ângulo entre este vetor e o eixo x . É sugerido que $0 \leq \beta < \pi/2$, que implica em $H_p \geq H_{x0} > 0$ (SAMPALIO, 2009). As equações 3.5 e 3.6 não levam em conta o acoplamento mútuo entre as LTH.

A partir das equações 3.5 e 3.6 é que são determinados os parâmetros da elipse de polarização de modo direto, com o emprego das equações 2.19 e 2.20. Contudo, para o desenvolvimento dos algoritmos estas equações foram manipuladas, como é dado a seguir:

Sendo,

$$\tan 2\alpha = \frac{2 \tan \alpha}{1 - \tan^2 \alpha} \quad (3.8)$$

E resolvendo a expressão do segundo grau para $\tan \alpha$:

$$(\tan 2\alpha) \tan^2 \alpha + 2 \tan \alpha - \tan 2\alpha = 0 \quad (3.9)$$

Obtemos duas raízes:

$$\alpha_1 = \arctan \left(\frac{-1 + \sqrt{1 + \tan^2 2\alpha}}{\tan 2\alpha} \right), \quad (3.10)$$

$$\alpha_2 = \arctan \left(\frac{-1 - \sqrt{1 + \tan^2 2\alpha}}{\tan 2\alpha} \right). \quad (3.11)$$

Mas,

$$\tan 2\alpha = \frac{2H_z H_x \cos \Delta\phi}{H_x^2 - H_z^2} \quad (3.12)$$

Então, substituindo a equação 3.12 nas duas raízes acima, temos:

$$\alpha_1 = \arctan \left[\frac{H_z^2 - H_x^2}{2H_z H_x \cos \Delta\phi} + \sqrt{\left(\frac{H_z^2 - H_x^2}{2H_z H_x \cos \Delta\phi} \right)^2 + 1} \right], \quad (3.13)$$

$$\alpha_2 = \arctan \left[\frac{H_z^2 - H_x^2}{2H_z H_x \cos \Delta\phi} - \sqrt{\left(\frac{H_z^2 - H_x^2}{2H_z H_x \cos \Delta\phi} \right)^2 + 1} \right]. \quad (3.14)$$

Ambas as raízes são representativas do tilt angle e serão utilizados para definir também os eixos maiores e menores das elipses. Escrevendo o vetor E em um plano XZ, a partir das projeções no eixo Z e X, temos que:

$$E = lX + nZ \quad (3.15)$$

Onde, $l = \cos(\alpha)$ e $n = \sin(\alpha)$, para cada valor do tilt encontrado acima teremos os dois valores do eixo da elipse que são iguais ao módulo de um vetor, que, separando as partes real e imaginária de cada vetor, temos:

$$E_1 = \sqrt{[\Re(H_x) \cos \alpha_1 + \Re(H_z) \sin \alpha_1]^2 + [\Im(H_x) \cos \alpha_1 + \Im(H_z) \sin \alpha_1]^2}, \quad (3.16)$$

$$E_2 = \sqrt{[\Re(H_x) \cos \alpha_2 + \Re(H_z) \sin \alpha_2]^2 + [\Im(H_x) \cos \alpha_2 + \Im(H_z) \sin \alpha_2]^2}. \quad (3.17)$$

Neste caso, se $E_1 > E_2$, o valor do tilt será dado por α_1 e a elipsidade será dada pela razão E_2/E_1 . No caso oposto, quando $E_2 > E_1$, α_2 é o valor para o tilt e E_1/E_2 a elipsidade. É pertinente salientar que os valores computados para a elipsidade, neste trabalho, serão sempre positivos ao contrário de outros trabalhos que utilizam a equação 2.20.

3.3 Características do Programa

Para simular as respostas VLF-EM foi utilizado um programa em fortran. O mesmo calcula de modo direto, a partir de uma dada distribuição de valores de condutividade elétrica anômala, os campos H_x e H_z . Em seguida, computa os parâmetros α e ε da elipse de polarização. No programa são simuladas linhas de corrente compondo todo o corpo a ser modelado, estas são representadas por células retangulares com dimensões escolhidas pelo operador as quais guardam o valor da condutividade elétrica. A tabela 3.3 apresenta as constantes de parametrização utilizadas na modelagem.

Parâmetros do Modelo	
Direção do campo primário	$\beta = \pi/4$ (rad)
Frequência do campo primário	$f = 24000$ (Hz)
Condutividade do background	$\sigma_0 = 0.001$ (S/m)
Espaçamento entre as estações	10 (m)
Quantidade de estações	$L = 201$
Número de linhas de corrente	$N = 11$
Espessura e largura das células	2 x 2 (m)

Tabela 3.1: Descrição das constantes de parametrização utilizadas na modelagem VLF.

3.4 Modelos Sintéticos

A proposta é estudar o comportamento dos parâmetros da elipse de polarização eletromagnética (α e ε) para modelos de corpos tabulares condutores imersos em um background altamente resistivo. No estudo, serão avaliadas as formas das curvas referentes a estes parâmetros, variando os valores de condutividade elétrica e profundidade das LTH.

Uma onda eletromagnética plana incide na direção normal à superfície de um semi-espaço de condutividade elétrica quase nula, que engloba um corpo condutor de condutividade

elétrica σ_a com espessura de 2m e com limites laterais variando conforme seu ângulo de mergulho. A configuração destes modelos está representada na Figura 3.1.

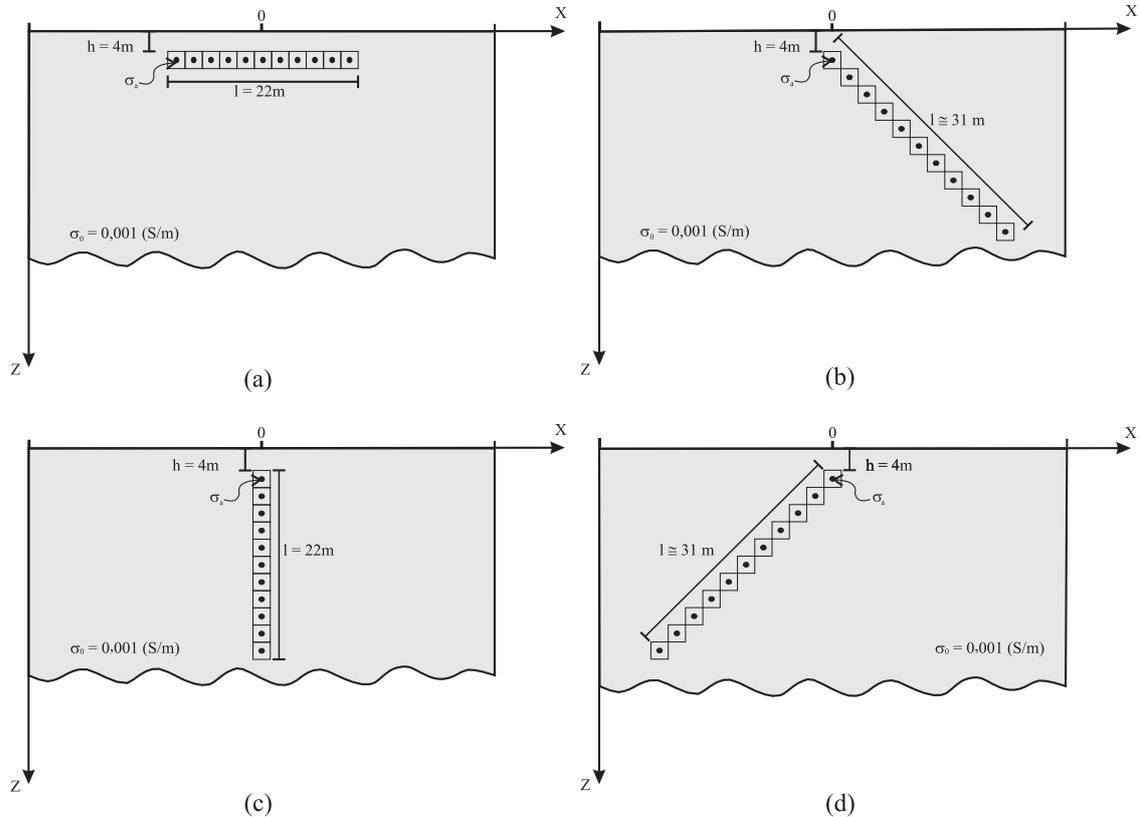


Figura 3.1: Representações gráficas dos modelos sintéticos propostos para a modelagem VLF-EM, com a profundidade do topo do condutor fixa para todos os modelos em $h = 4,0m$; ângulo de mergulho (θ) e comprimento do corpo (l). (a) $\theta = 0^\circ$ e $l = 22m$; (b) $\theta = 45^\circ$ e $l = 31m$; (c) $\theta = 90^\circ$ e $l = 22m$; e (d) $\theta = 135^\circ$ e $l = 31m$.

Os modelos diferem quanto ao ângulo de mergulho do corpo, são 4 valores escolhidos: (i) $\theta = 0^\circ$; (ii) $\theta = 45^\circ$; (iii) $\theta = 90^\circ$ e (iv) $\theta = 135^\circ$. Em todos eles a linha do perfil tem 200m de comprimento, compreendendo o intervalo $[-100,100]$ na direção do eixo x , e estações com espaçamento de 1m. A profundidade do topo de cada modelo é constante e igual a $h = 4m$ e a profundidade da base depende da inclinação do corpo. Para cada modelo foram gerados os gráficos com as curvas do α e da ε para 6 valores de condutividade elétrica, são eles : (i) $\sigma_a = 0,01 S/m$; (ii) $\sigma_a = 0,03 S/m$ e (iii) $\sigma_a = 0,1 S/m$; (iv) $\sigma_a = 0,3 S/m$; (v) $\sigma_a = 1,0 S/m$; (vi) $\sigma_a = 3,0 S/m$.

As soluções representadas pelas equações 3.13 a 3.17 permitem determinar os valores dos parâmetros da elipse de polarização magnética em qualquer ponto do interior ou da superfície do semi-espaco $z \geq 0$, para o caso de polarização elétrica. No presente trabalho, foram estudadas as variações desses parâmetros apenas sobre o plano $z = 0$ e em uma direção

transversal aos corpos modelados, visando fornecer subsídios para a interpretação de dados VLF.

3.4.1 Discussão dos Resultados

As Figuras 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 representam, graficamente, as curvas das funções tilt e elipsidade computadas, respectivamente, para os modelos com $\theta = 0^\circ$, $\theta = 90^\circ$, $\theta = 45^\circ$ e $\theta = 135^\circ$.

Para todos os valores do parâmetro σ_a , tanto o tilt quanto a elipsidade tendem em valor absoluto, para 0% quando $x \rightarrow \pm \infty$. A magnitude dos valores destas funções tende a aumentar com o crescimento do valor da condutividade elétrica anômala. Também, os valores computados para o tilt são superiores em comparação aos encontrados para a elipsidade.

Por sua vez, a função tilt cresce até um máximo de saturação em $\sigma_a = 3,0 S/m$, enquanto que a elipsidade aumenta até um valor máximo, que varia para cada modelo e depois cai. Além disso, é notado também um significativo espalhamento lateral dos picos destas funções com o aumento da condutividade. Este comportamento é exemplificado em GRANT e WEST (1965) e ocorre devido às componentes real e imaginária do campo magnético vertical possuírem um limite condutivo e um outro resistivo.

Em todas as Figuras, as curvas do tilt variam de sinal. Elas crescem a partir de uma região próxima ao primeiro plano de separação entre a condutividade de fundo e a condutividade anômala do corpo. As mesmas são nulas em um ponto equivalente ao centro de massa, e começam a decair tendendo a zero, após o segundo limite de separação de condutividades elétricas. Esta característica é popularmente denominada de *crossover* em prospecção geofísica e determina a presença de um corpo condutor anômalo. Ele é ocasionado 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 σ_a , e apresenta sensível variação mesmo para $\sigma_a = 0,01 S/m$.

Os resultados obtidos para os modelos com corpos dispostos na horizontal e na vertical mostram que as curvas das funções tilt e elipsidade são semelhante e simétricas, caracterizando uma ambiguidade do método. Os dois modelos apresentam 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. Em obediência à lei de Ampère, a componente vertical do campo magnético é uma função ímpar, logo, a curva do tilt também é uma função ímpar. A elipsidade comporta-se como uma função par, pois, a formulação usada para calculá-la (*c.f.* equações 3.16 e 3.17), apenas permite valores reais e positivos.

A densidade de corrente elétrica é tangencial aos planos $x = \pm 11m$ e $x = \pm 1m$, respectivamente para $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$, e é descontínua. Este fato e a primeira equação de Maxwell são responsáveis pela descontinuidade da derivada em relação a x da componente vertical do campo magnético, nesses mesmos planos. Em função disso, o tilt e a elipsidade são nulos exatamente no centro de simetria do corpo em $x = 0m$.

Com relação à magnitude das funções em estudo, nota-se, para o modelo horizontal, que as mesmas apresentam maiores magnitudes em comparação aos resultados para um corpo verticalizado. Isto era de se esperar, pois para um corpo horizontal as LTH estão em um mesmo nível de profundidade, o que maximiza as anomalias. Para $\theta = 0^\circ$, as magnitudes da função tilt compreendem o intervalo máximo de $[-320\%, 320\%]$ e são quase o dobro em relação às calculadas quando $\theta = 90^\circ$, as quais estão no máximo intervalo de $[-168\%, 168\%]$. A elipsidade apresenta pequena variação de magnitude quando são comparados os resultados dos dois modelos. Assim mesmo, ela, também, apresenta maiores valores quando $\theta = 0^\circ$. A mesma, para o corpo horizontalizado, tem o máximo igual a $28,0\%$, e no vertical chega a $21,0\%$. Ainda, é notado que no modelo horizontal o máximo da elipsidade ocorre para $\sigma_a = 0,3 S/m$, enquanto que no modelo vertical é para $\sigma_a = 1,0 S/m$. Isto sugere que a espessura horizontal dos corpos predomina como parâmetro de resposta.

Em especial, no modelo horizontal, é notada, na curva do tilt, uma sinuosidade na região central perfil. Este comportamento do tilt está relacionado à geometria do corpo. Quanto maior for a extensão do corpo, menor sua profundidade e maior sua condutividade elétrica, mais significativo será este fenômeno.

Modelando o mesmo corpo com uma inclinação de 45° e 135° , ocorre uma quebra da simetria das curvas do tilt e da elipsidade. Havendo uma tendência das mesmas em se prolongarem mais na direção da declividade do corpo, permitindo a identificação da direção do mergulho. Essas funções convergem para zero quando $x \rightarrow \pm\infty$. Os valores do tilt mudam de sinal na estação $x = \pm 4m$, a qual representa um ponto equivalente ao centro de massa do corpo. A elipsidade, no centro do perfil, apresenta uma descontinuidade em diferentes estações a depender do valor da condutividade elétrica. Os pontos são: $x = \pm 4m$, $x = \pm 4m$, $x = \pm 4m$, $x = \pm 3m$, $x = \pm 2m$ e $x = \pm 1m$, respectivamente para $\sigma_a = 0,01 S/m$, $\sigma_a = 0,03 S/m$, $\sigma_a = 0,1 S/m$, $\sigma_a = 0,3 S/m$, $\sigma_a = 1,0 S/m$ e $\sigma_a = 3,0 S/m$.

A magnitude do tilt é semelhante nos dois modelos, compreendendo os máximos intervalos de $[-179\%, 156\%]$ para $\theta = 45^\circ$, e $[-156\%, 179\%]$ quando $\theta = 135^\circ$. Os valores da elipsidade atingem o máximo de $21,8\%$ para $\sigma_a = 1,00 S/m$ em ambos. Todos os primeiros picos máximos são encontrados na parte resistiva, enquanto que os segundos estão na região onde se tem o corpo condutor. É notável, também, que a diferença da magnitude dos dois picos máximos na curva da elipsidade tende a diminuir com o aumento da condutividade elétrica do corpo.

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. Este tipo de interpretação será objeto de estudo do Capítulo 4, com o emprego de dados reais VLF.

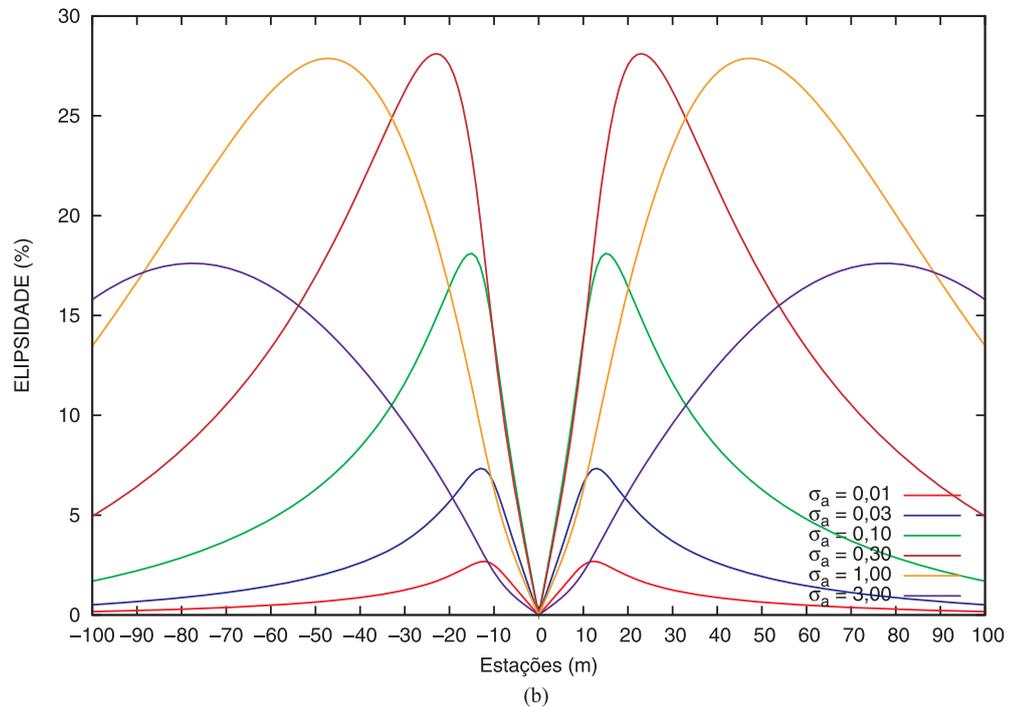
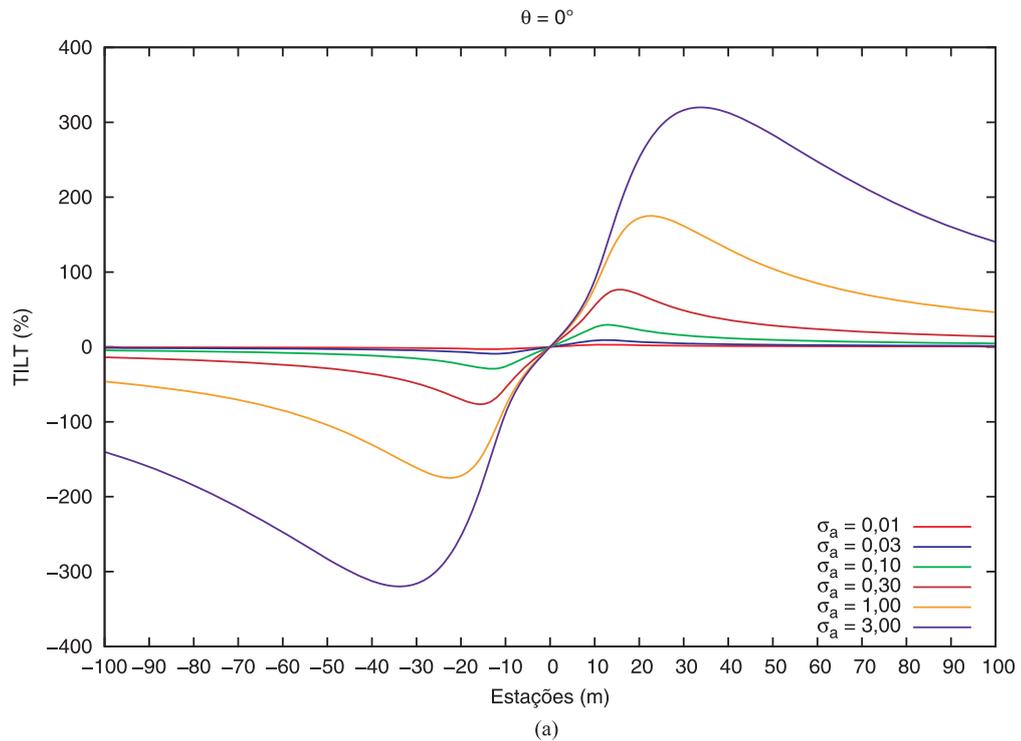


Figura 3.2: Resultados obtidos para o modelo de corpo horizontal ($\theta = 0^\circ$). Gráficos com as curvas do tilt em (a) e da elipsidade em (b) para diferentes valores de condutividade elétrica (σ_a).

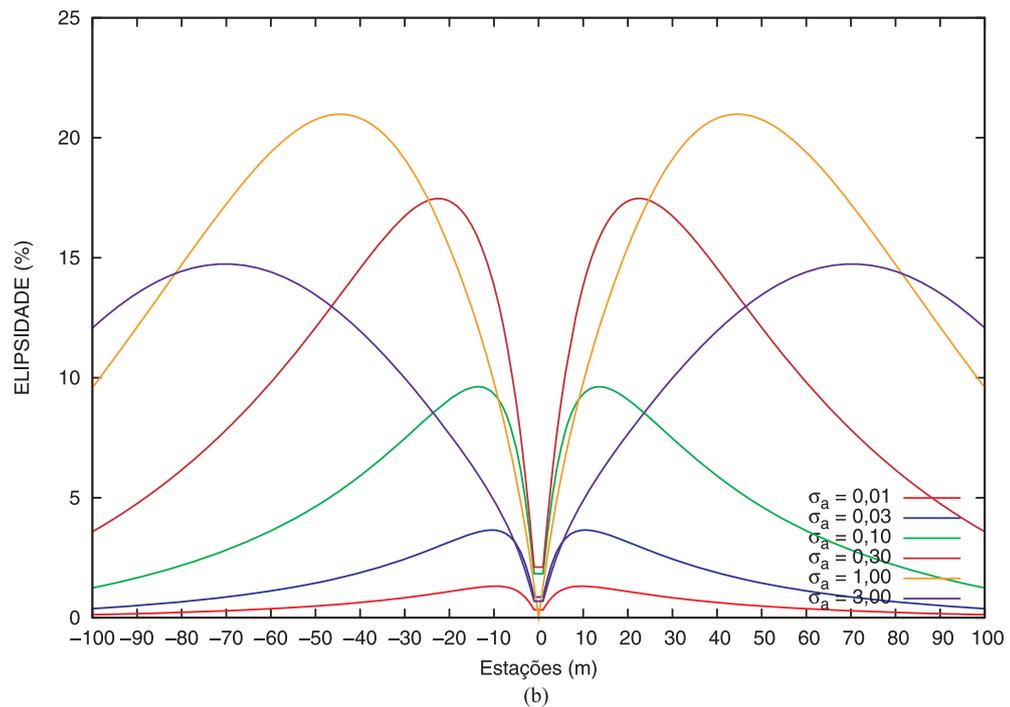
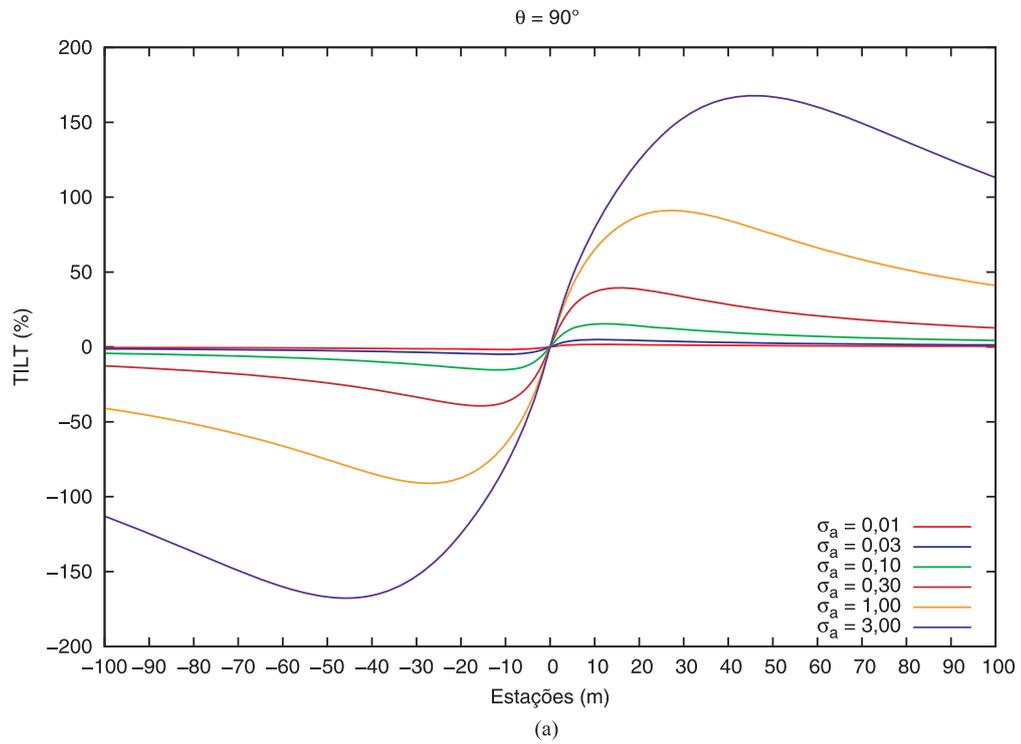


Figura 3.3: Resultados obtidos para o modelo de corpo vertical ($\theta = 90^\circ$). Gráficos com as curvas do tilt em (a) e da elipsidade em (b) para diferentes valores de condutividade elétrica (σ_a).

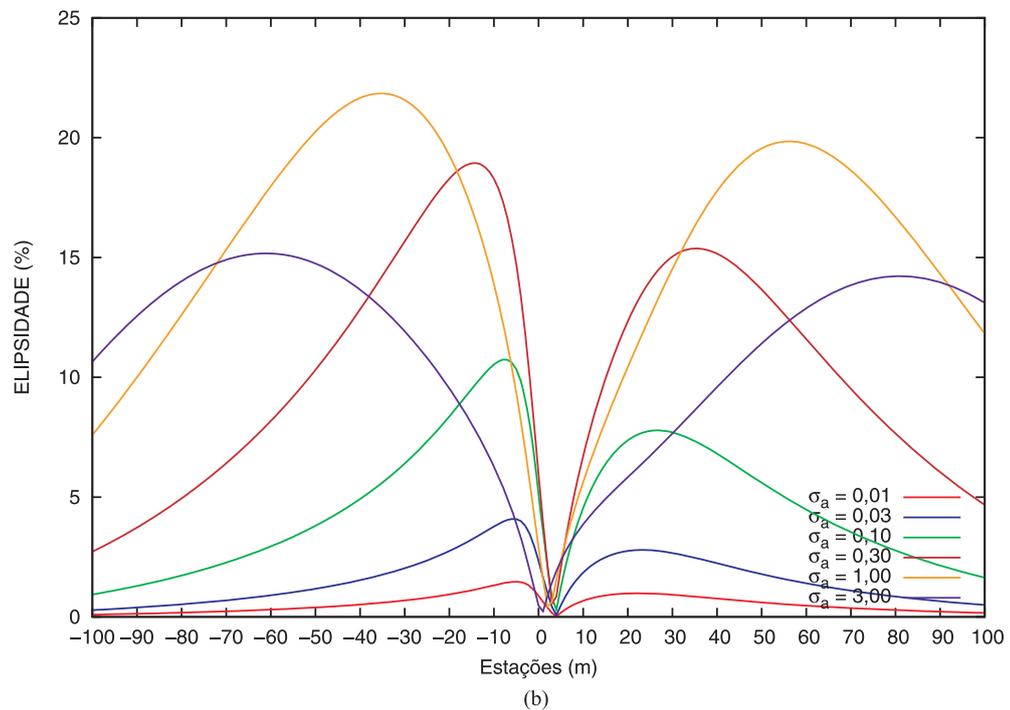
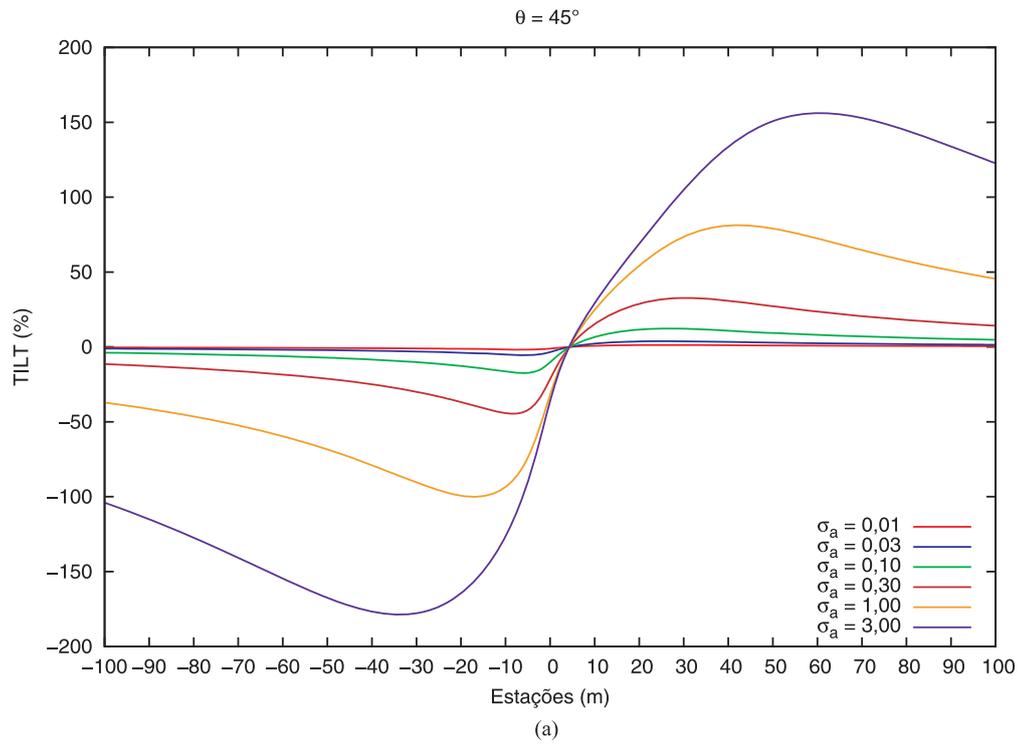


Figura 3.4: Resultados obtidos para o modelo de corpo inclinado ($\theta = 45^\circ$). Gráficos com as curvas do tilt em (a) e da elipsidade em (b) para diferentes valores de condutividade elétrica (σ_a).

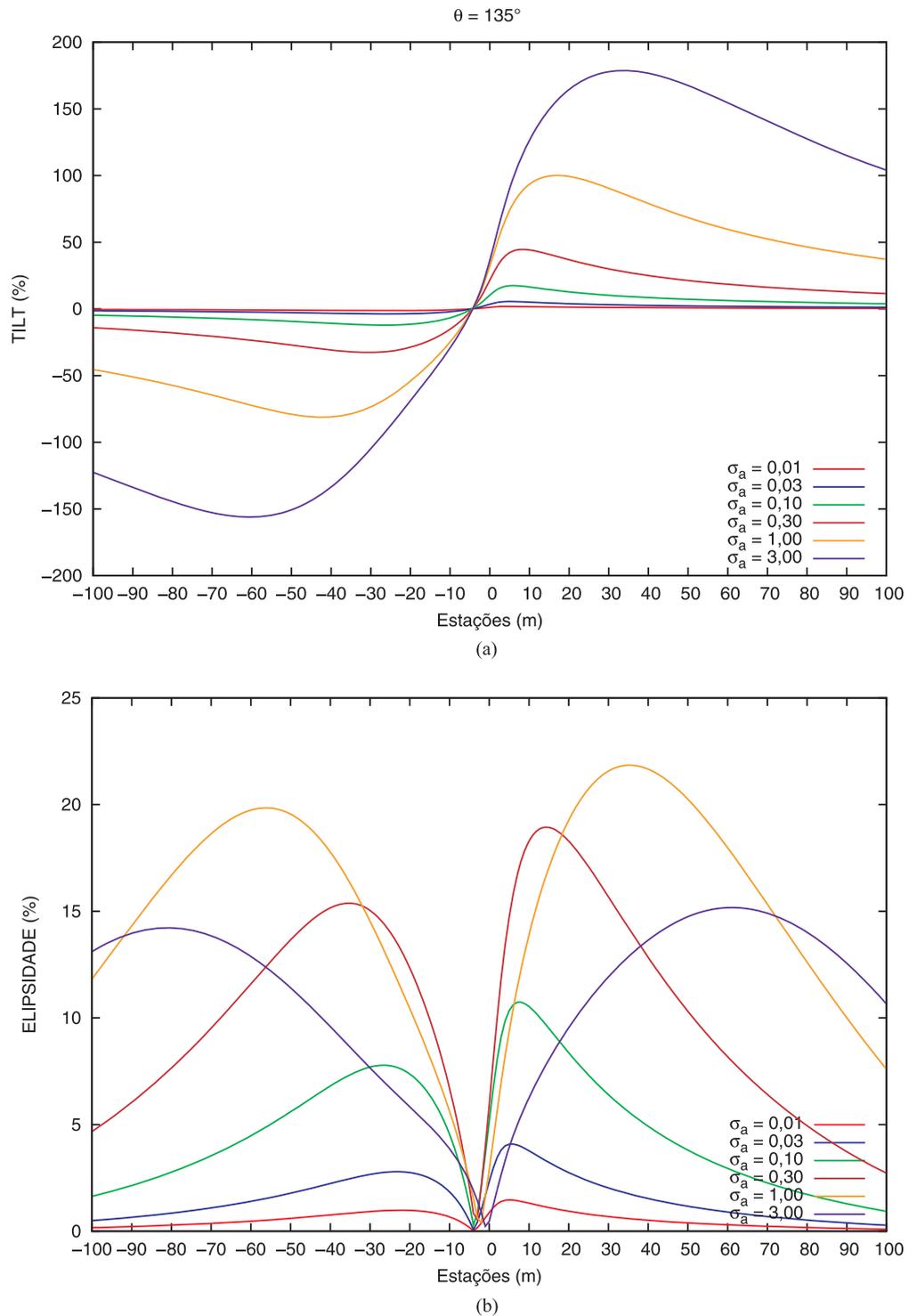


Figura 3.5: Resultados obtidos para o modelo de corpo inclinado ($\theta = 135^\circ$). Gráficos com as curvas do tilt em (a) e da elipsidade em (b) para diferentes valores de condutividade elétrica (σ_a).

CAPÍTULO 4

PROSPECÇÃO GEOFÍSICA

4.1 Operação de Campo

Com o objetivo de esclarecer as dúvidas na delimitação correta e no tipo de relação do contato entre os litotipos da Bacia de Camamu e do embasamento cristalino, o Projeto *Rift-CPGG/PETROBRAS* empreendeu a execução de perfis geofísicos em partes da bacia, conforme mostra o mapa da Figura 4.1.

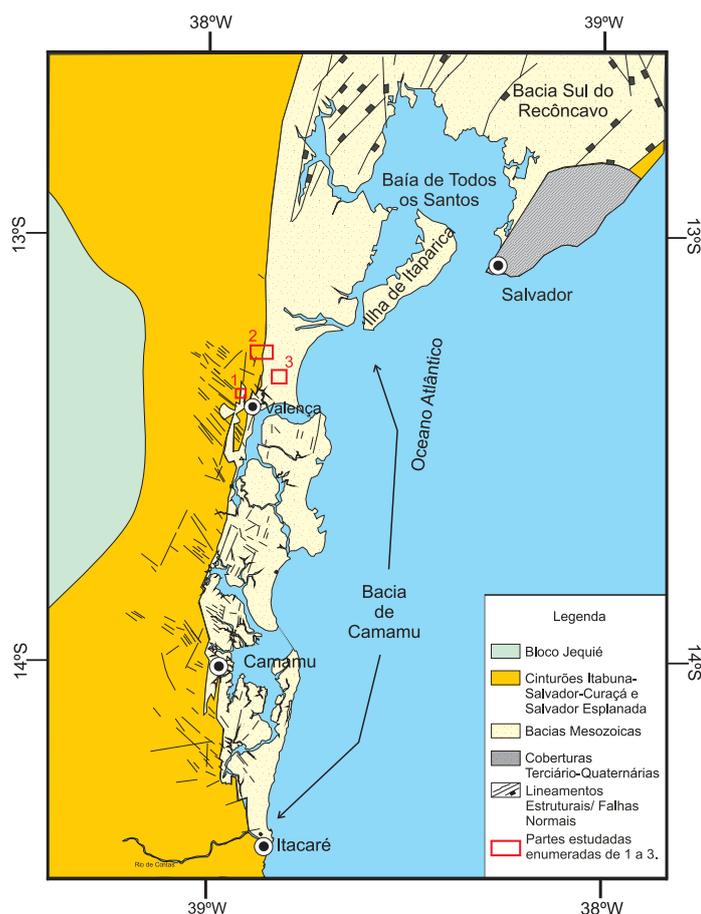


Figura 4.1: Mapa geológico simplificado da Bacia de Camamu. Os retângulos vermelhos representam as partes da bacia onde foram executadas os perfis geofísicos VLF.

A pesquisa iniciou com o planejamento para determinar o sentido preferencial do levantamento. Esta etapa contou com consultas a mapas geológicos da região, mapas das localizações dos transmissores e com as coberturas do sinal VLF dos transmissores escolhidos, conforme serão descritos ao longo desta seção.

O mapa geológico da Bacia de Camamu indica que, nas áreas onde foram executados os perfis, o contato litológico em estudo apresenta direção Norte-Sul, aproximadamente, em quase toda sua extensão. Na tentativa de obter o melhor acoplamento entre a estrutura prospectada e o transmissor, foram escolhidas seções com sentido Oeste-Leste em todas as partes estudadas, com início sempre a oeste dos contatos.

O equipamento usado na prospecção geofísica VLF foi o T-VLF, fabricado pela *Iris Instruments*, que pertence ao Centro de Pesquisas em Geofísica e Geologia CPGG/UFBA. Este equipamento oferece vários parâmetros de medidas a depender do modo de operação. Foram usados os dois modos de operação com o objetivo de obter os seguintes parâmetros: (i) tilt angle vertical (α_v); (ii) elipsidade vertical (ε); (iii) resistividade aparente (ρ_a) e (iv) diferença de fase entre os componentes horizontais do campo elétrico e magnético (ϕ). Todo o procedimento de campo seguiu as técnicas usadas para aquisição de dados VLF-EM e VLF-R esclarecidas na seção 2.2.5. Desta forma, a descrição, das operações de campo, segue abaixo:

1. O primeiro modo operado sempre foi o Tilt angle. Neste modo, o campo elétrico apresenta direção paralela ao plano da estrutura prospectada. É o caso de polarização elétrica, como pode ser visto na Figura 4.2(a). Em virtude disso foi escolhido como fonte de sinal o transmissor de código NAA (*c.f* Figura 2.3), localizado em Cutler, Maine, USA. O mesmo possui direção de $45^\circ W$, opera na frequência de 24,0kHz e possui uma boa cobertura de sinal, como foi dado na Figura 2.10(a). Ele é o que apresentou o melhor acoplamento com a estrutura geológica encontrada na região de estudo;
2. Em seguida era executado o modo resistivo. Este corresponde ao caso de polarização magnética, no qual o campo magnético primário apresenta direção paralela ao plano do contato geológico, conforme mostra a Figura 4.2(b). Por esta razão, utilizamos o transmissor Britânico de sigla GBR, que opera na frequência de 16,0 kHz, localizado em Rugby, UK (*c.f* Figuras 2.3 e 2.10(d)). Para a execução deste modo é necessário medir o campo elétrico horizontal que está a NNE da localização do perfil. Para medi-lo é utilizado um cabo de 10m de comprimento conectado a dois eletrodos, um em cada extremidade do cabo. Nós medimos o campo elétrico em duas direções, uma Norte-sul e outra Oeste-leste.



(a)



(b)

Figura 4.2: Fotografias de campo durante a aquisição de dados VLF. (a) aquisição VLF-EM. Neste modo o campo elétrico tem direção Norte-Sul e é perpendicular ao perfil. (b) aquisição VLF-R. A linha elétrica tem direção Leste-Oeste.

A aquisição dos dados aconteceu entre os meses de agosto e setembro de 2009 e teve duração de 35 dias. Todos os modos de operação foram executados, geralmente, no intervalo de 7h00 às 12h00, para minimizar os ruídos atmosféricos (Mc NEILL e LABSON, 1991). Além disso, por medidas de segurança, durante todo o procedimento de campo, foram observados e registrados, na caderneta de campo, além dos afloramentos geológicos, a localização, em relação à estação de medida, da presença de qualquer material condutivo, tais como: veículos, redes de alta tensão, cerca de arrame farpado, etc. Estes agentes podem influenciar os valores medidos, conduzindo a erros na interpretação dos dados. É pertinente informar, também, que a orientação da bobina receptora sempre era ajustada, com o auxílio de uma bússola, à direção paralela à estação transmissora escolhida. Os perfis tem o espaçamento entre as estações igual a 100 ou 20m, a depender de seu objetivo.

No total foram executados cinco perfis geofísicos, dos quais três estão localizados na região do Ramo Valença (área 1). São eles: Perfis 1, 2 e 3. O perfil 1 (P1), com 2500m de extensão, foi executado com espaçamento de 100m entre as estações. Ele tinha como objetivo possibilitar o reconhecimento de anomalias EM características de contatos litológicos, para posterior detalhamento. Já os Perfis 2 (P2) e 3 (P3), possuem 500 e 440m de tamanho, e foram executados com espaçamento de 20m, com o intuito de detalhe. Em todos os três foram operados os dois modos VLF. O perfil 4 está localizado dentro da Bacia de Camamu

(área 2). Ele tem 600m de tamanho com espaçamento de 20m. Devido às características da geologia foi inviável medir o campo elétrico. Logo, somente foi executado o modo Tilt angle. O mesmo tinha o objetivo de avaliar o contato entre diferentes litotipos da bacia. O último, Perfil 5, foi realizado na área 3 e tinha o objetivo de cruzar a Falha de Maragogipe, que, corresponde ao limite da borda oeste da Bacia de Camamu. Este teve de ser interrompido por inviabilidade operacional, devido à existência de uma topografia bastante acidentada, e uma vegetação densa e alagadiça. Por estes motivos foi executado apenas o modo VLF-EM. Na Tabela 4.1 é feita uma breve descrição dos perfis executados.

PERFIL	MODO DE OPERAÇÃO	ESTAÇÕES	Δx (m)	LINHA (m)
1	VLF-EM e VLF-R	26	100	2500
2	VLF-EM e VLF-R	26	20	500
3	VLF-EM e VLF-R	23	20	440
4	VLF-EM	31	20	600
5	VLF-EM	14	100	1300

Tabela 4.1: Descrição dos perfis VLF. Δx refere-se ao espaçamento entre as estações.

4.2 Interpretação dos Dados de Campo

A interpretação dos dados de campo só será aplicada aos perfis 1, 2 e 3, os quais estão localizados no Ramo Valença. Esta decisão foi tomada pelos seguintes motivos: (i) Estes perfis apresentaram qualidade do sinal acima de 80%, o que os tornam mais confiáveis; (ii) Nos mesmos, foi possível executar os dois modos de operação do VLF, fornecendo um maior número de informações geofísicas; (iii) Eles apresentam anomalias bastante significativas para o escopo deste trabalho. Além disso, teremos um único domínio geológico em questão, facilitando um melhor entendimento, o que conduz a resultados mais objetivos. Cabe informar também que, em relação aos dados VLF-R, apenas serão usados para a interpretação aqueles referente ao campo elétrico com orientação Oeste-leste, pois eles tiveram os melhores resultados. Todos os outros resultados que não foram usados estão anexados a esta pesquisa.

Os três perfis geofísicos usados neste trabalho totalizam 3440m. O P1 atravessa todo o Ramo Valença cruzando as duas bordas desta bacia e os perfis 2 e 3 atravessam as bordas Oeste e Leste, respectivamente. O P2 foi realizado ao longo do P1, detalhando a borda leste da bacia. No entanto, por motivos operacionais semelhantes aos já mencionados, não foi viável fazer o mesmo com o P3. Este corta a borda Leste do Ramo Valença a 500m ao sul do P1. A disposição destes perfis com a geologia pode ser vista no mapa da Figura 4.3.

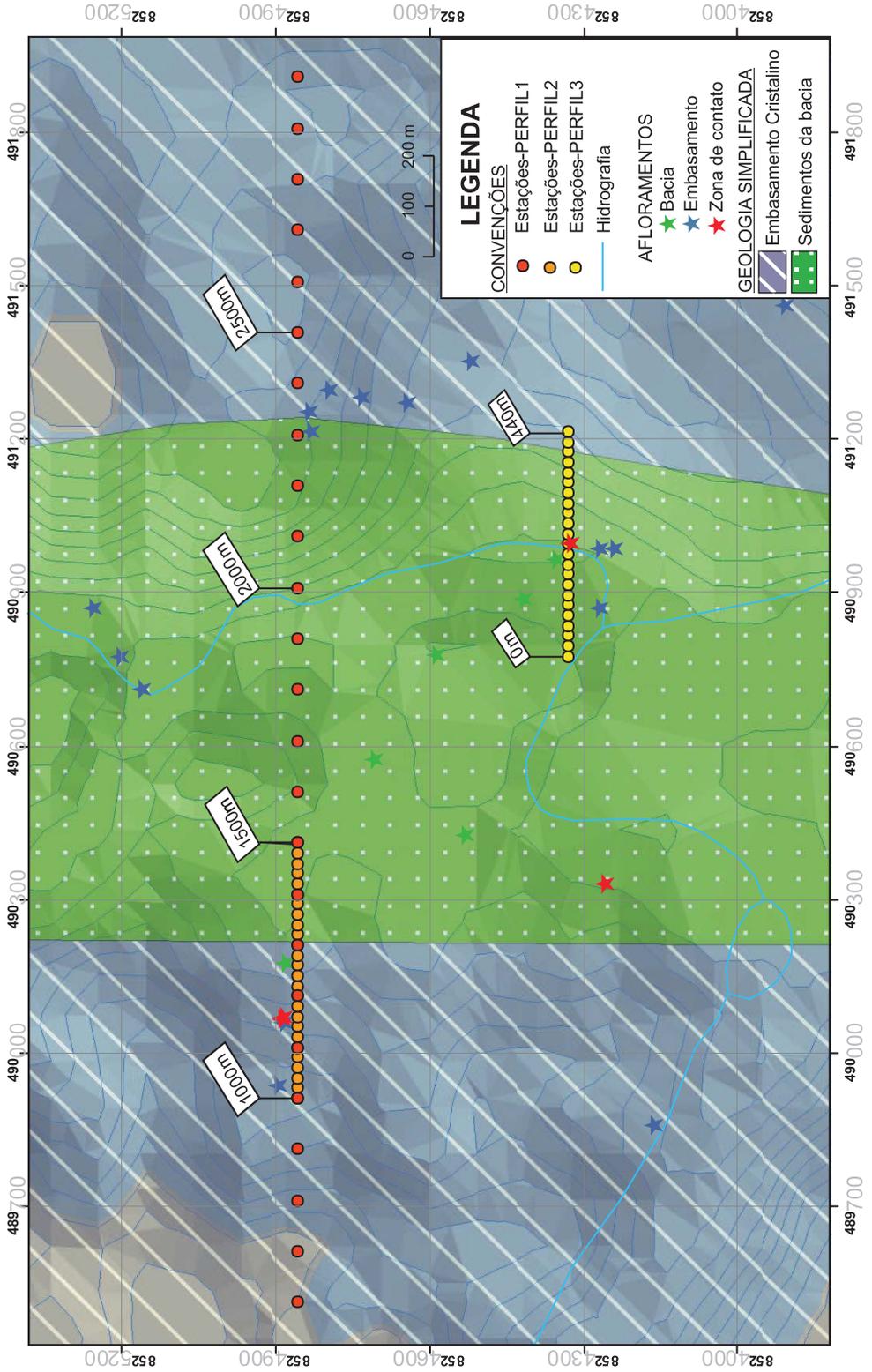


Figura 4.3: Mapa geológico simplificado com os perfis geofísicos VLF, mapa de relevo SRTM e dados geológicos de campo.

Iniciaremos com a interpretação qualitativa apontando as principais anomalias visualizadas nas curvas do α_v , da ε_v e da ρ_a dos três perfis supracitados.

Os dados obtidos para a resistividade aparente (ρ_a) e a diferença de fase (ϕ) estão representados nas Figuras 4.6(a), 4.7(a) e 4.8(a), para P1, P2 e P3, respectivamente. Esses estão em escala logarítmica na vertical para os valores de resistividade e linear na vertical e horizontal, para os valores da diferença de fase e das estações, respectivamente. Os dados obtidos para o ângulo de inclinação (α_v) e da elipsidade (ε_v), para o elipsóide vertical estão ilustrados nas Figuras 4.6(b), 4.7(b) e 4.8(b), para P1, P2 e P3, respectivamente, e vem representados em escala linear na horizontal e na vertical. O mapa geológico contendo a localização e a geometria do Ramo Valença, bem como imagens de relevo SRTM e dados geológicos de campo, consta da Figura 4.3. Nesta mesma figura, estão indicadas as localizações das estações dos perfis VLF usados.

Observando os dados referentes ao P1, podemos inferir que, a delimitação da bacia deve ocorrer entre as estações 900 e 2000m, pois ocorre uma sensível variação dos valores do α_v , ε , ρ_a e ϕ . Nesse intervalo, a resistividade diminui e volta a crescer após 2000m. O comportamento da fase é quase constante, com algumas variações dentro dele, embora nos limites apresente grandes distorções. No mesmo, o tilt apresenta significativas quedas com mudança de sinal apenas em 900m e a elipsidade se anula em ambas. Ainda dentro do intervalo mencionado, há algumas anomalias no tilt e na elipsidade que se correlacionam bem com os valores da resistividade aparente e às anômalas variações na fase, nas estações 1300 e 1600m.

Antes da estação 900m, os dados da resistividade são bastante ruidosos, bem como a fase medida. Também, o tilt mostra variações bruscas com elipsidade quase nula nos pontos 300 e 700m. Isto se deve às sucessivas variações de condutividade elétrica, provavelmente, ocasionadas por fraturamentos escalonados.

Para o P2, é observado claramente na Figura 4.7(a) que o contato principal entre embasamento e bacia deve ocorrer na estação 1220m que representa uma anomalia EM característica de um contato litológico (Mc NEILL e LABSON, 1991; SANTOS, 1994; FARIAS, 1996). Essa anomalia tem alta magnitude na ordem de -100% para o tilt e de 87% para a elipsidade, o que demonstra um limite com uma enorme variação de condutividade elétrica. Ela inicia na estação 1140m e termina em 1300m, passando por um limite de separação, exatamente em $x = 1220m$. Vimos, no capítulo anterior, que nos planos que separam meios condutivos distintos, a função tilt apresenta um mínimo e a elipsidade tem seu valor máximo. Devido à existência de um plano de simetria em $x = 1220m$, podemos inferir que este limite de separação seja representado por um plano sub-verticalizado, concordando com os dados geológicos obtidos em campo visualizados no Capítulo 1. Observa-se, também, na região do contato uma queda do valor de ρ_a .

A oeste da estação 1200m, no domínio geofísico do embasamento, são vistas sucessivas quedas no valor de ρ_a , e quebras no padrão da fase. O tilt e a elipsidade também possuem comportamento anômalo nas estações 1020m, 1080m e 1140m. Nelas ocorre inflexão da curva do tilt e a elipsidade é nula nas duas primeiras e quase zero na última. O mesmo comportamento anômalo observado no P1. Logo, fica claro que, a análise feita em P1 é satisfatória, sugerindo que, o contato da borda oeste do Ramo Valença trata-se de uma zona escalonada de falhas.

Analisando, agora, o P3. É visto uma anomalia EM, no ponto 260m, semelhante à encontrada em P2. Esta é típica de um contato litológico. Nela o tilt atinge 136% e a elipsidade chega a 93%. Esta, por sua vez, demarca o limite da borda leste do Ramo Valença. Ao contrário da borda oeste, no embasamento próximo a esta borda não são vistas anormalidades nos valores do tilt e da elipsidade. A resistividade e a fase não apresentam grandes variações. Apenas ocorre em ρ_a um pico máximo de $30\Omega m$ em 380m. O que sugere um contato menos fraturado.

É pertinente verificar que na região do contato, no lado do embasamento, ocorrem duas zonas condutoras. A primeira entre 260 e 280m devido a uma forte intemperização do topo da falha do contato, uma vez que este intervalo contém um leito de um riacho, evidenciando percolação de fluidos. A segunda em 320 e 360m, também por intemperismo da rocha do embasamento ocasionada principalmente pelas cheias deste mesmo riacho (*c.f.* Figura 4.3).

Como mostrado no Capítulo 3, a mudança de sinal ou o chamado *crossover* da função tilt evidencia a presença de um corpo condutor e os limites da zona condutora coincidem aproximadamente com os pontos máximo e mínimo da mesma função. Vimos, também, que a elipsidade é nula no topo do condutor. Desta forma, no P2, entre o intervalo [1300m,1360m], é visualizada uma significativa mudança de sinal em α_v e a ε_v é nula no ponto 1320m, o que evidencia a presença de um condutor entre as estações 1320m e 1340m. Os limites da zona condutora são de 43% a -24% para os valores do tilt. Constata-se, que o mergulho do condutor seja para leste visto a assimetria na anomalia. Este condutor deve estar relacionado a níveis mais argilosos dentro da bacia. Outra mudança de sinal, menos significativa do que a anterior, ocorre no intervalo entre 1420-1440m, provavelmente relacionada a falhas e fraturas dentro da bacia ou à topografia do terreno, pois é visto um aumento gradacional no valor da resistividade aparente.

As Figuras 4.4(a) e (b), mostram, respectivamente os valores do tilt e elipsidade, medidos e interpolados referentes ao intervalo de [1300m,1360m], superpostos nas curvas teóricas, das mesmas funções, para $\theta = 45^\circ$ obtidas no capítulo 3. O topo do condutor está em 0m. Observa-se que, nos dados do tilt, a região do lado direito do condutor se ajusta melhor a valores de condutividade entre as curvas $\sigma_a = 0,30 S/m$ e $\sigma_a = 0,10 S/m$, enquanto que, o lado esquerdo teve o melhor ajuste para os valores entre as curvas $\sigma_a = 1,00 S/m$ e $\sigma_a = 0,30 S/m$. Evidenciando, maior intemperismo na região do topo do mesmo.

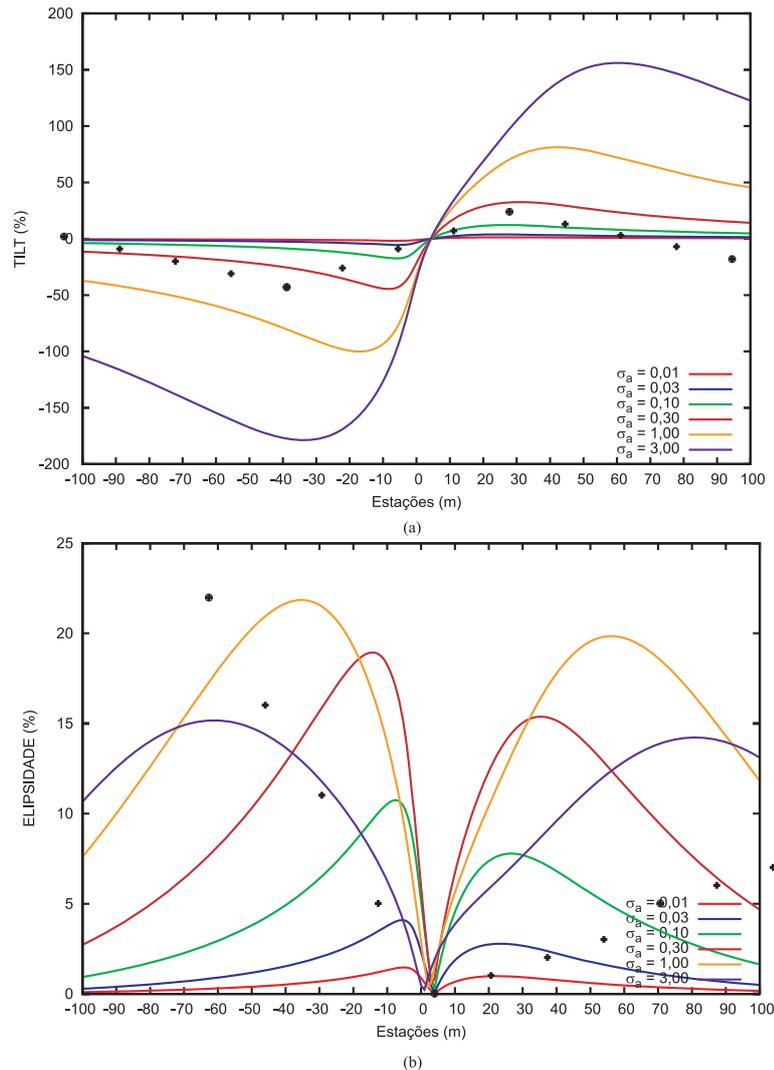


Figura 4.4: Interpretação quantitativa dos dados do Perfil 2 por superposição de curvas teóricas para o modelo com $\theta = 45^\circ$; (a) para o tilt e (b) para a elipsidade. Os pontos pretos com a uma cruz envolvida por uma circunferência são referentes aos valores medidos e os demais foram obtidos por interpolação.

De forma análoga, é notado no P3 uma significativa mudança de sinal do tilt entre as estações 120 e 180m, com limites de 24% e -75% para valores do tilt. A elipsidade se mantém constante e próxima a zero entre estas estações. Os valores da resistividade aparente neste intervalo mostram um máximo no ponto 140m, que separa uma região mais condutora a leste de outra menos condutora a oeste. A assimetria da anomalia revela que o corpo tende a mergulhar para oeste.

As Figuras 4.5(a) e (b) mostram a análise quantitativa para esta anomalia. As curvas teóricas usadas foram geradas para o modelo com $\theta = 135^\circ$. Observa-se que, o lado direito do corpo de condutividade anômala se ajusta para as curvas de maior condutividade elétrica

na ordem de $\sigma_a = 1,0 S/m$, e o lado oposto teve ajuste para $\sigma_a = 0,1 S/m$. Logo, o topo deste condutor sofreu maior ação intempérica. A elipsidade, no lado esquerdo do condutor, se ajusta, também, com a curva $\sigma_a = 0,1 S/m$.

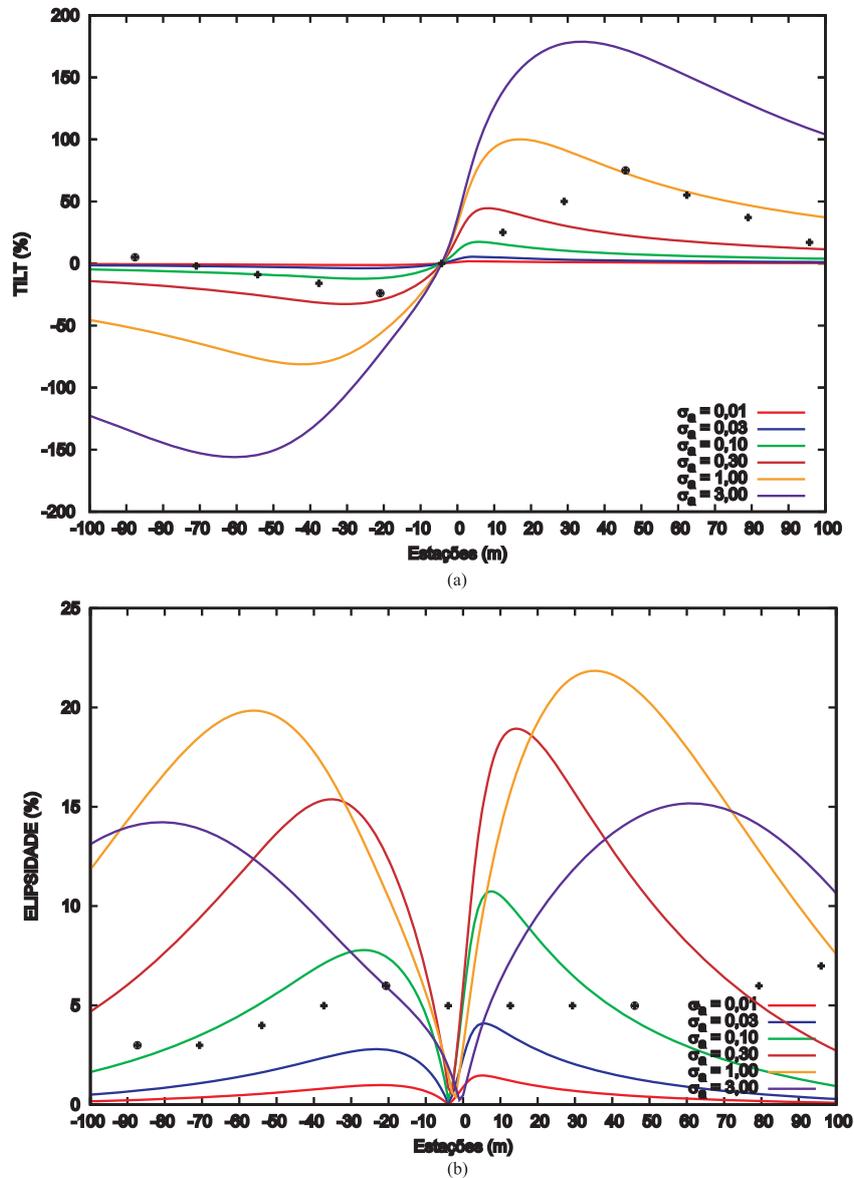
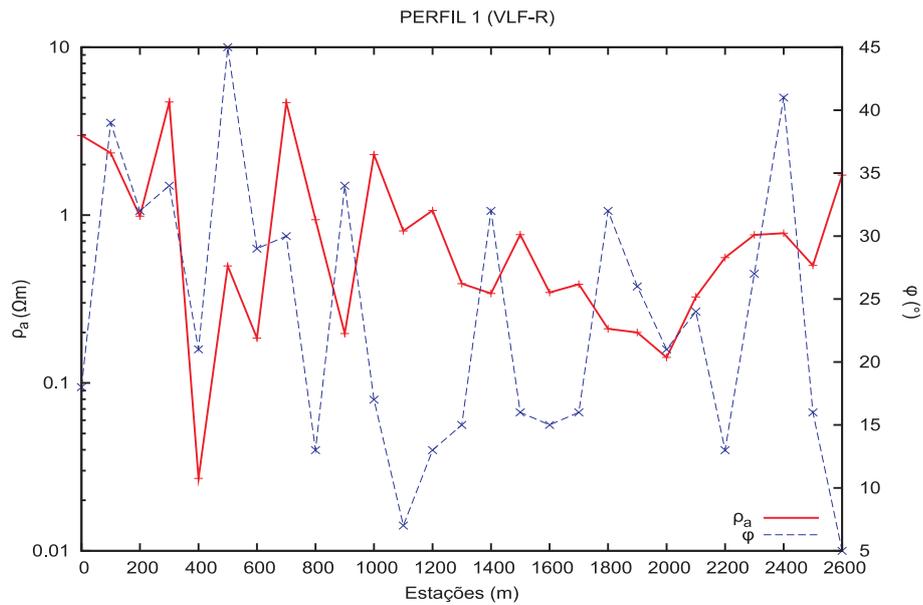
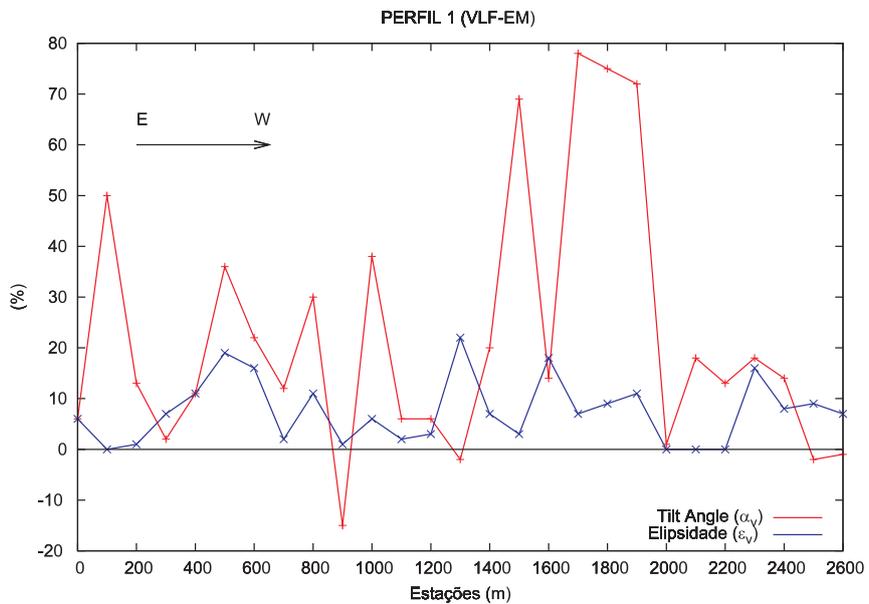


Figura 4.5: Interpretação quantitativa dos dados do Perfil 3 por superposição de curvas teóricas para o modelo com $\theta = 45^\circ$; (a) para o tilt e (b) para a elipsidade. Os pontos pretos com a uma cruz envolvida por uma circunferência são referentes aos valores medidos e os demais foram obtidos por interpolação.



(a)



(b)

Figura 4.6: Resultados geofísicos VLF obtidos para o Perfil 1. (a) gráfico com as curvas da resistividade aparente (ρ_a) e da diferença de fase entre os campos elétrico e magnético (ϕ). (b) gráfico com as curvas do tilt vertical (α_a) e da elipsidade vertical (ϵ).

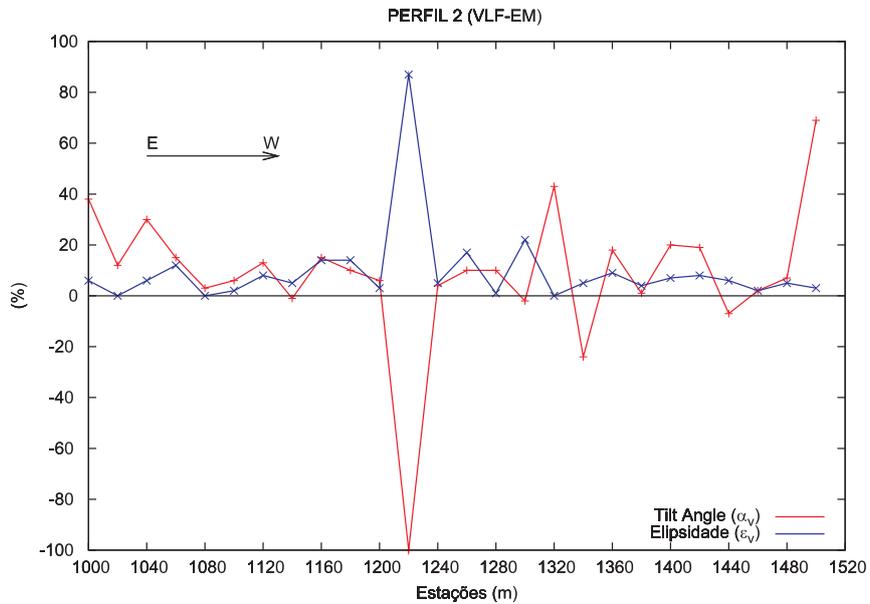
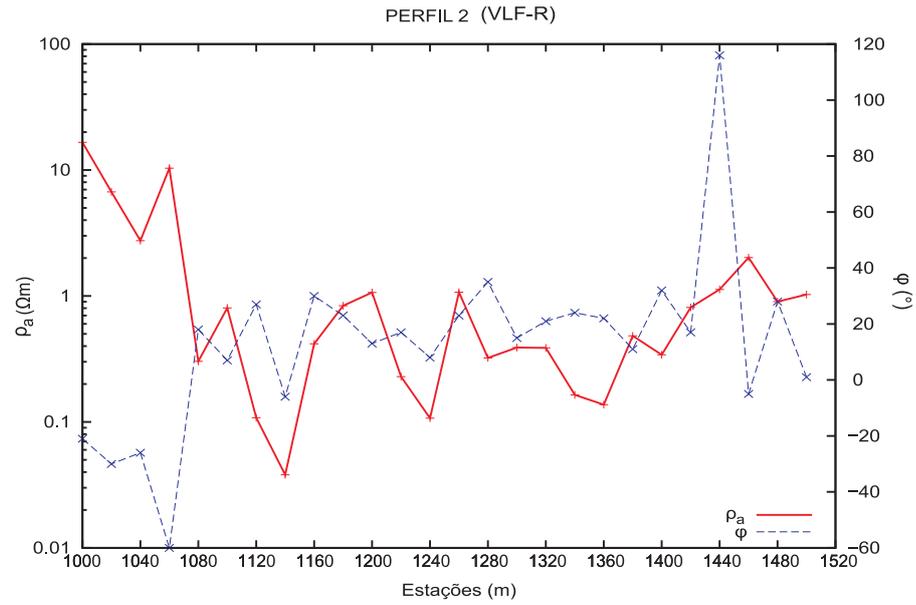


Figura 4.7: Resultados geofísicos VLF obtidos para o Perfil 2. (a) gráfico com as curvas da resistividade aparente (ρ_a) e da diferença de fase entre os campos elétrico e magnético (ϕ). (b) gráfico com as curvas do tilt vertical (α_a) e da elipsidade vertical (ε).

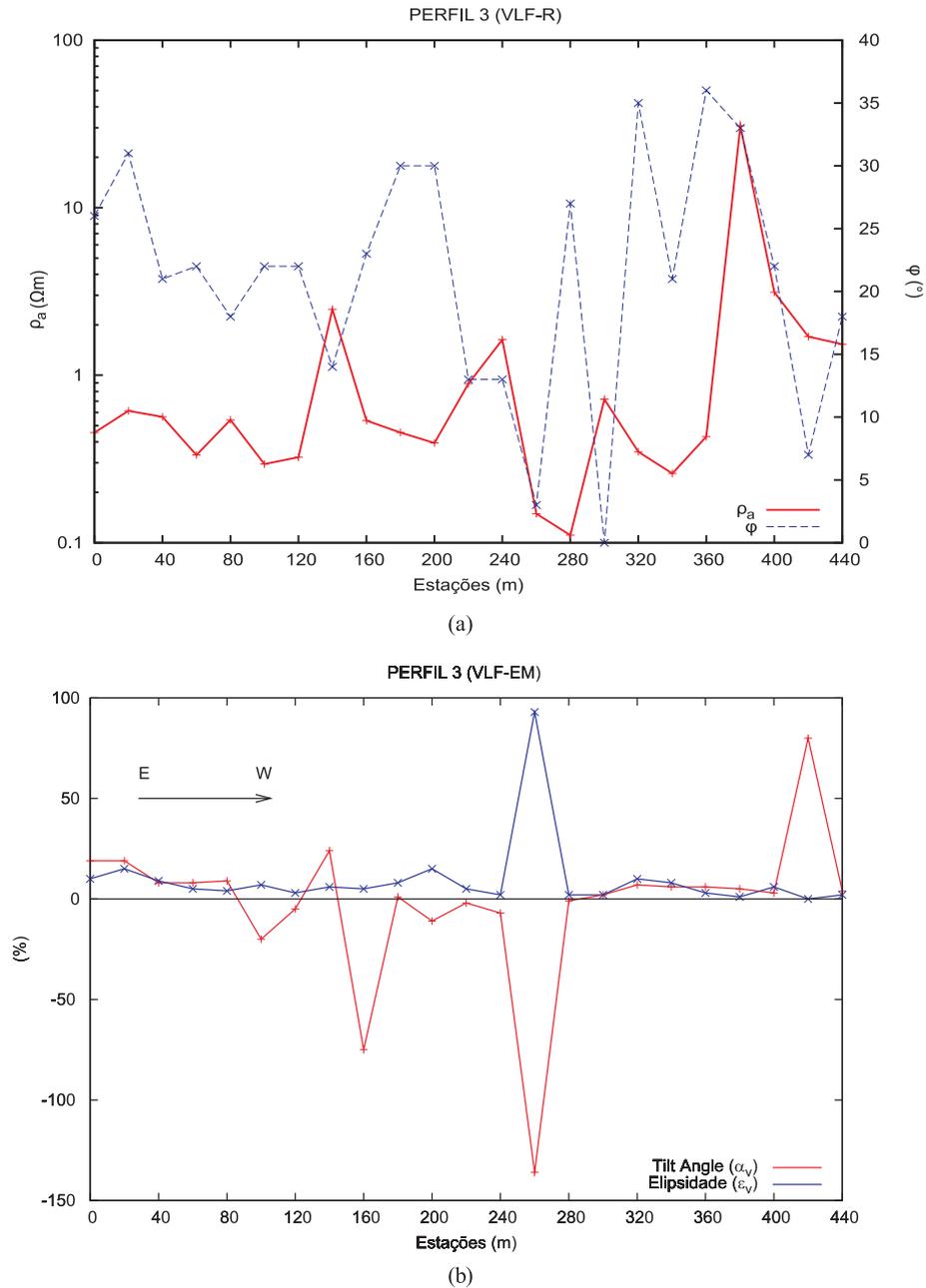


Figura 4.8: Resultados geofísicos VLF obtidos para o Perfil 3. (a) gráfico com as curvas da resistividade aparente (ρ_a) e da diferença de fase entre os campos elétrico e magnético (ϕ). (b) gráfico com as curvas do tilt vertical (α_a) e da elipsidade vertical (ϵ).

A Figura 4.9 ilustra uma comparação entre a seção geológica de sub-superfície do Ramo Valença, a partir da observação de mapas geológicos, e uma nova seção feita com base na interpretação qualitativa de dados VLF. Na seção antiga, a borda oeste foi mapeada como um contato erosional, e a borda leste como um contato por falha. Vimos que, a interpretação qualitativa dos dados VLF sugere que as duas bordas são limitadas por falhas, sendo que na borda oeste, peculiarmente, ocorrem contatos por falhas escalonadas.

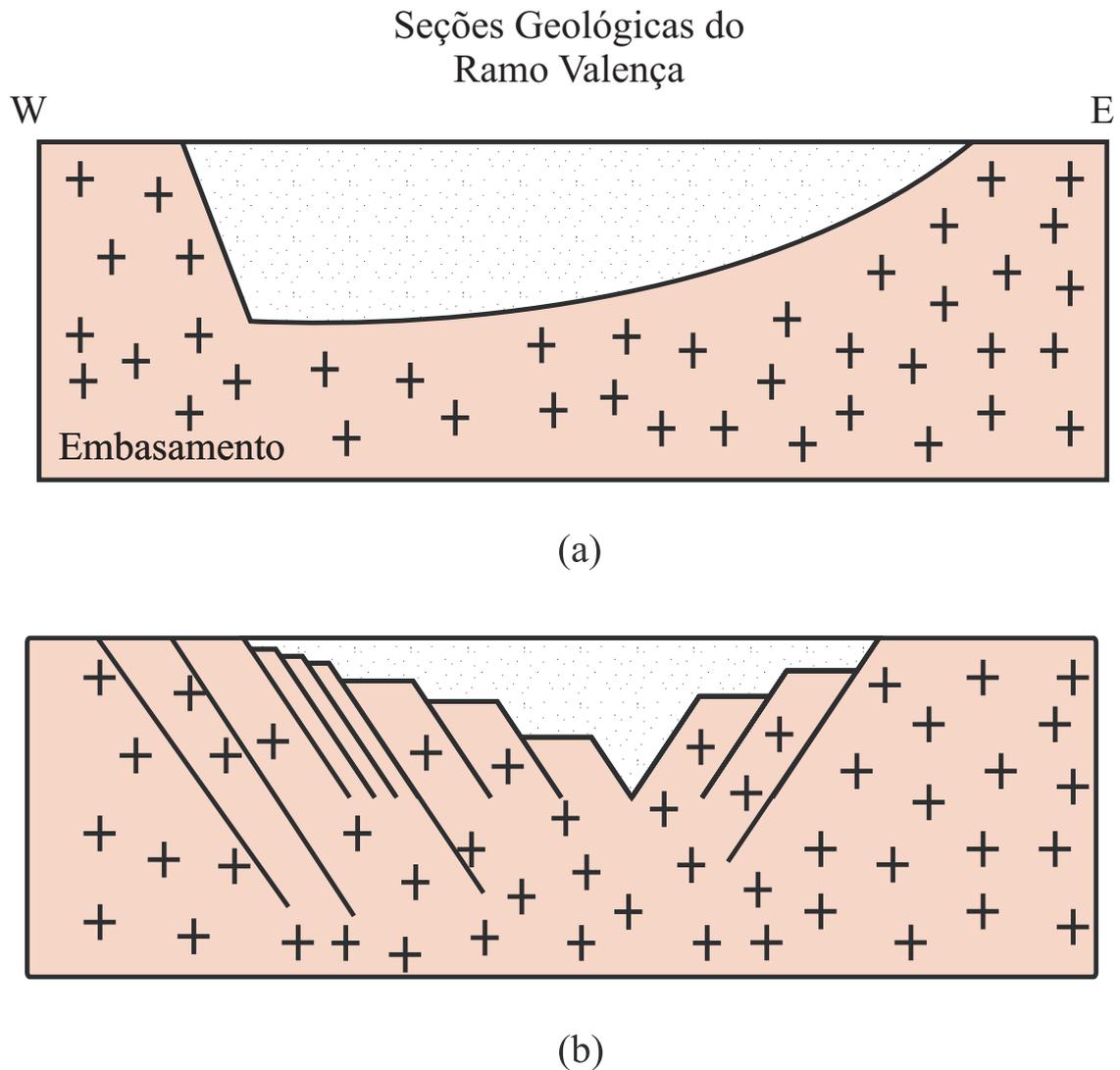


Figura 4.9: Seções geológicas de sub-superfície do Ramo Valença. (a) Seção antiga; (b) Seção proposta pela integração dos dados geológicos de campo e geofísicos deste trabalho.

Como resultado final da integração dos dados geofísicos, dados geológicos e imagens de relevo SRTM, o mapa da Figura 4.3 foi refeito, conforme é mostrado na Figura 4.10.

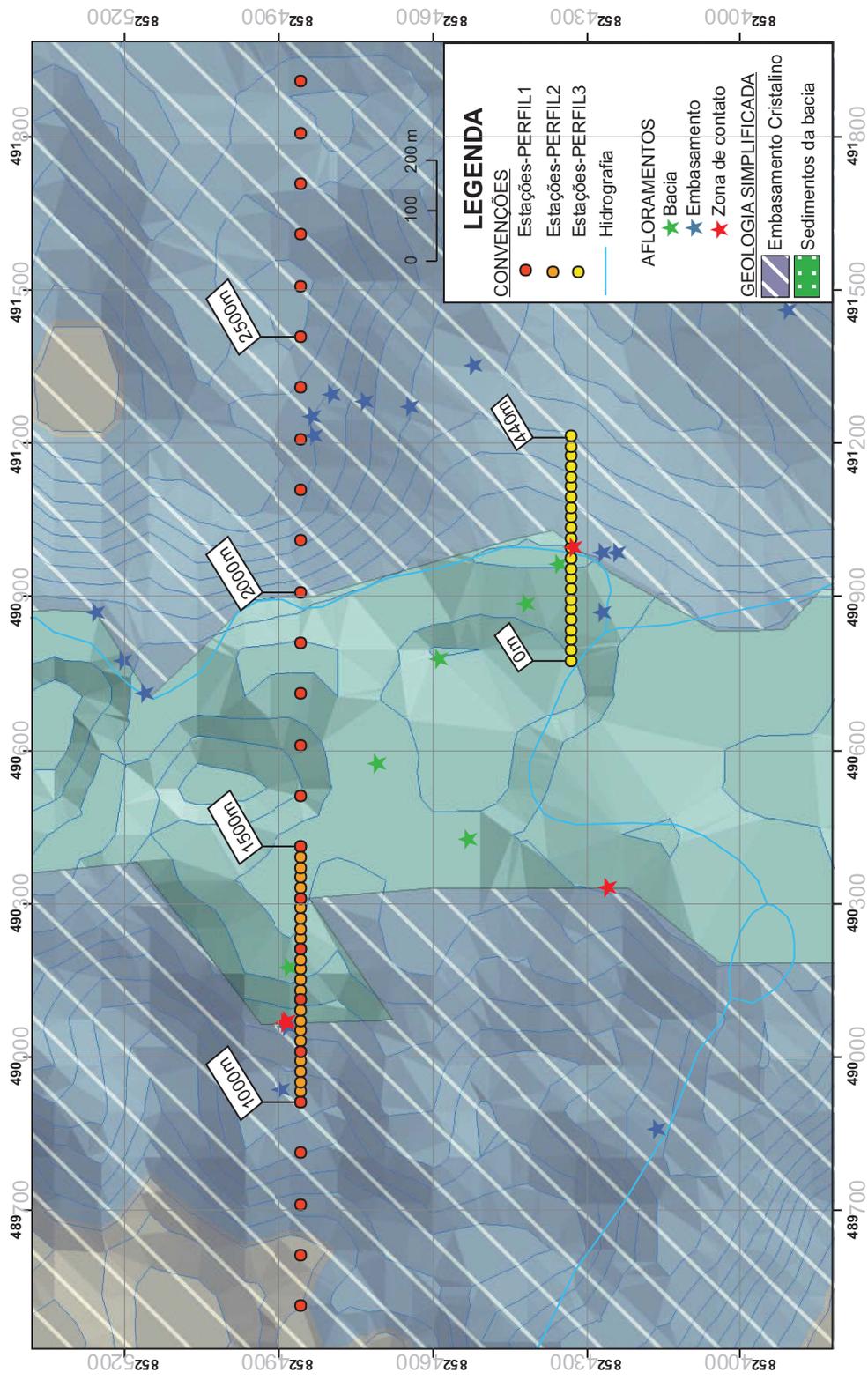


Figura 4.10: Mapa geológico simplificado, corrigido a partir dos resultados deste trabalho, com a localização dos perfis geofísicos VLF, mapa de relevo SRTM e dados geológicos de campo conforme explica a legenda.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

Diante das dificuldades em delimitar, acuradamente, e esclarecer a relação de contato entre a Bacia de Camamu e o embasamento adjacente, este trabalho apresentou um suporte alternativo para o mapeamento geológico. Foi utilizado o sistema eletromagnético VLF, e como apoio na interpretação qualitativa, foram feitas modelagens de corpos condutores. Foram utilizados dados geológicos de campo e mapas de relevo SRTM, no estudo dos contatos, bem como da geometria do Ramo Valença situada no Noroeste da cidade de Valença, Bahia.

Um dos fatores atenuantes na aplicação dos métodos EM é a dificuldade de entender as anomalias EM. Com o objetivo de reconhecer as anomalias VLF foram realizadas simulações numéricas simples de situações geológicas direcionadas a diversas disposições geométricas de corpos condutores. Dos resultados obtidos com essa modelagem, verificamos que a resposta VLF, através das curvas do tilt e da elipsidade:

1. É influenciada 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. Apresenta simetria quando calculadas para corpos dispostos na horizontal e na vertical. Porém, nos corpos inclinados, ocorre uma quebra de simetria das curvas, sendo possível a determinação da direção do mergulho;
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. Sendo que, elas são nulas em um centro de simetria para $\theta = 0^\circ$ e 90° , ou em um equivalente centro de massa para $\theta = 45^\circ$ e 125° .

Os dados experimentais desta pesquisa são satisfatórios no âmbito da objetividade do trabalho. Nos dados referentes aos perfis 2 e 3, é observada a existência de uma anomalia VLF característica de um contato litológico, respectivamente nas estações 1220m e 260m. A consequência mais espetacular da interpretação qualitativa foi a descoberta de que os

dois contatos das bordas do Ramo Valença são controlados por falhas com mergulhos sub-verticais, ao contrário do mapa geológico utilizado. Além disso, é observado nos perfis geofísicos que a borda oeste é controlada por um sistema de falhas escalonadas, enquanto que na borda leste o controle por falhas é de menor intensidade. A integração de dados geofísicos e geológicos possibilitou um melhor entendimento estrutural da bacia o que colaborou no delineamento da geometria do Ramo Valença. Desta forma, este trabalho pode ser aplicado em regiões da bacia onde existam dúvidas quanto à localização e o tipo da relação do contato da bacia e de seu embasamento adjacente.

Para uma interpretação de dados VLF mais apurada, é aconselhável 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; (iii) Resultados numéricos de modelagem de dados de resistividade aparente e a diferença de fase e (iv) 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 e ponto de partida para sanar as dificuldades do mapeamento geológico do contato da Bacia de Camamu. Uma extensão importante seria coletar dados VLF em perfis perpendiculares à Falha de Maragó-jipe, considerada a principal falha de borda da bacia, a fim de investigar o comportamento geofísico da mesma. Outra seria realizar levantamentos VLF ao longo de contatos litológicos entre os sedimentos da bacia e sedimentos mais recentes (*e.g.* Coberturas), o que teria aplicação em estudos neotectônicos da bacia. Outra ainda, seria executar levantamentos aéreos VLF ou terrestres em linhas paralelas, com o objetivo de delimitar toda a borda oeste da Bacia de Camamu.

Agradecimentos

Agradeço a todas as pessoas e instituições que contribuíram para a realização deste trabalho. Merecem destaque especial:

1. O Dr. E. E. S. Sampaio, meu orientador, cujo apoio foi decisivo à elaboração da presente pesquisa, além de efetuar críticas e sugestões valiosas ao trabalho.
2. O Dr. L. C. Corrêa-Gomes, meu Co-orientador, este que há anos vem colaborando na minha trajetória acadêmica.
3. Meus colegas do Projeto Rift pelo incentivo e proveitosas discussões; o geofísico E. S. M. Santos que me prestou ajuda na coleta de dados geofísicos deste trabalho; Leila, Tatiane e Rejane pela ajuda com a manipulação do software ARCGIS.
4. Todos os camaradas da vida acadêmica; Em especial os meus colegas de turma: Alana Aderne, Felipe Vidal, Thaís Santana e Vinícius Lemos; Alan Albano por me dar suporte com Latex.
5. A PETROBRAS pelo suporte financeiro concedido.
6. Iêda, minha mãe, e Mariane, minha namorada, que estiveram comigo ao longo de toda minha jornada com muita paciência e resignação. Além é claro de colaborarem no acontecimento deste trabalho.

Referências Bibliográficas

- ALMEIDA, F. (1977) O Craton do São Francisco, *Rev. Bras. Geoc.*, **VII**:349–364.
- BARBOSA, J. e DOMINGUEZ, J. (1996) Mapa Geológico do Estado da Bahia - Texto Explicativo, SGM, Salvador.
- BARBOSA, J. S. F. e SABATÉ, P. (2004) Archean and Paleoproterozoic crust of the São Francisco Cráton, Bahia, Brasil, *Geodynamic features*, **133**.
- BARBOSA, J. S. F.; C., C. G. L.; MARINHO, M. M. e SILVA, F. C. A. d. (2001) Geologia do segmento sul do Orógeno Itabuna-Salvador-Curaça, In: *Workshop sobre o Orógeno Itabuna-Salvador-Curaça*, vol. 1, SBG.
- BARRINGER, A. R. (1973) Radiophase, *Rel. Téc.*, United States Patent 3763419.
- COLLET, L. S. e BECKER, A. (1967) Radiohm Method for Earth Resistivity surveying, *Rel. Téc.*, Canadian Patent 795919.
- CORRÊA-GOMES, L.; DOMINGUEZ, J.; BARBOSA, J. e SILVA, I. (2005a) Padrão de Orientação dos Campos de Tensão, Estruturas, Herança do Embasamento e Evolução Tectônica das Bacias de Camamu e Porção Sul do Recôncavo, Costa do Dendê, Bahia, *Revista Brasileira de Geociências*, **4**(35):117–128.
- FARIAS, V. J. C. (1996) Aplicação dos Métodos Eletromagnéticos VLF e HLEM na Prospecção Hidrogeológica no Município de São Domingos do Araguaia, PA. Belém, Dissert. de Mestrado, Universidade Federal do Pará.
- FORBE, L. K.; CROZIER, S. e DODRELL, D. M. (1997) Rapid Computation of Static Fields Produced by Thick Circular Solenoids, *IEEE Transactions on Magnetics*, **33**(5).
- GRANT, F. S. e WEST, G. F. (1965) *Interpretation Theory in Applied Geophysics*, McGraw Hill book, New York, USA.
- KAROUS, M. e HJELT, S. (1983) Linear Filtering of VLF Dip-Angle Measurements, *gprosp*, **31**:782–794.
- Mc NEILL, J. e LABSON, V. (1991) Geological Mapping Using VLF Radio Waves, In: *Nabighian, M. N. (Ed.); Eletromagnetic Methods in Applied Geophysicists*, vol. II, Application, cap. 7, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma.
- MILSOM, J. (2003) *Field Geophysics*, Wiley, New York.
- NETTO, A. (1993) Carta Estratigráfica da Bacia de Camamu, *Rel. Téc.*, ANP.

- NETTO, A. e RAGAGNIN, G. (1990) Compartimentação exploratória da Bacia de Camamu, Bahia, In: *Anais do XXXVI Congresso Brasileiro de Geologia*, pp. 171–182, Natal/RN, SBG.
- PAAI, G. (1965) Ore Prospecting Based on VLF-Radio Signals, *Geoexploration*, **3**.
- PATERSON, N. e RONKA, V. (1971) Five Years of Suveying With the VLF-EM Method, *gexpl*, **9**:7–26.
- REITZ, J. e MILFORD, F. J. (1966) *Foundations of Electromagnetic Theory*, Addison-Wesley, Tokyo.
- REITZ, J.; MILFORD, F. J. e CHRISTY, R. W. (1979) *Foundations of Electromagnetic Theory* Reading, MA: Addison-Wesley.
- SAMPAIO, E. E. S. (2006) Campo eletromagnético devido a uma linha de dipolos elétricos em um meio condutor, EDUFBA, Salvador.
- SAMPAIO, E. E. S. (2009) VLF-EM Anomalies Simulation by Underground Line Sources of Alternating Current, In: *Resumos Expandidos, 11th. Congr. Intern. daSBGf, Salvador, SBGf*.
- SANTOS, M. J. D. d. (1994) Interpretação de Sinal em Prospecção VLF , Dissert. de Mestrado, Universidade do Porto.
- SMITH, B. e WARD, S. H. (1974) On the Computation of Polarization Ellipse Parameters.
- STRATTON, J. A. (1941) *Electromagnetic Theory*, McGraw-Hill, New York.
- TILSLEY, J. E. (1973) A portable VLF-EM Source for Use in Geological Mapping of Veins and Fault Structures and Convencional Prospecting, Rel. Téc., Report: David S. Robertson and Associates.
- WARD, S. H. e HOHMANN, G. W. (1988) Eletromagnetic Theory for Geophysical Application, In: *Nabighian, M. N. (Ed.); Eletromagnetic Methods in Applied Geophysicists*, vol. I, Theory, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma.

ANEXO I

Dados dos perfis não utilizados no trabalho

I.1 Perfil1

I.2 Perfil2

I.3 Perfil3

I.4 Perfil4

I.5 Perfil5

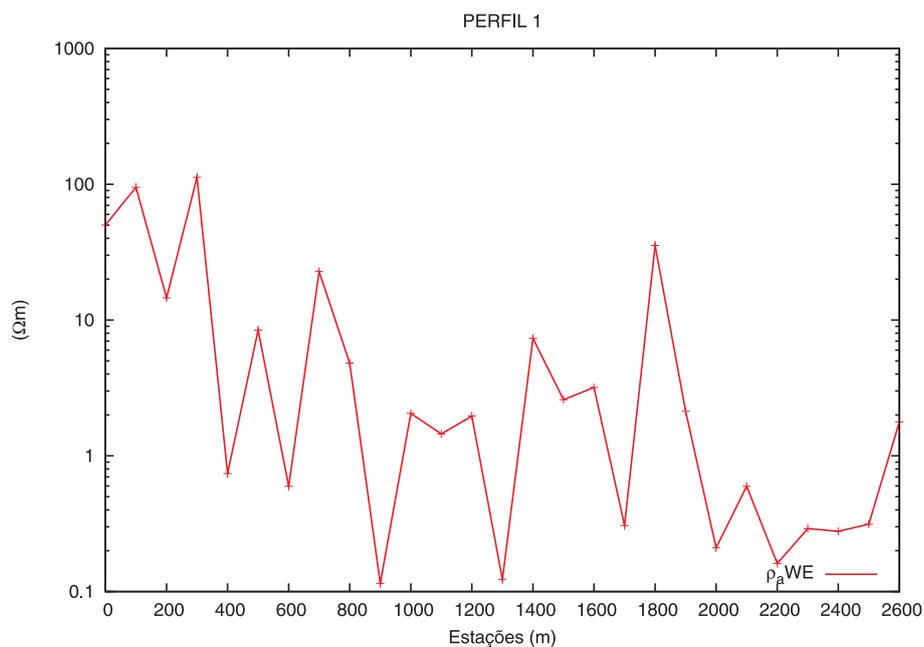


Figura I.1: Resultados geofísicos VLF-R obtidos para o Perfil 1. Com o campo elétrico na direção Norte-Sul.

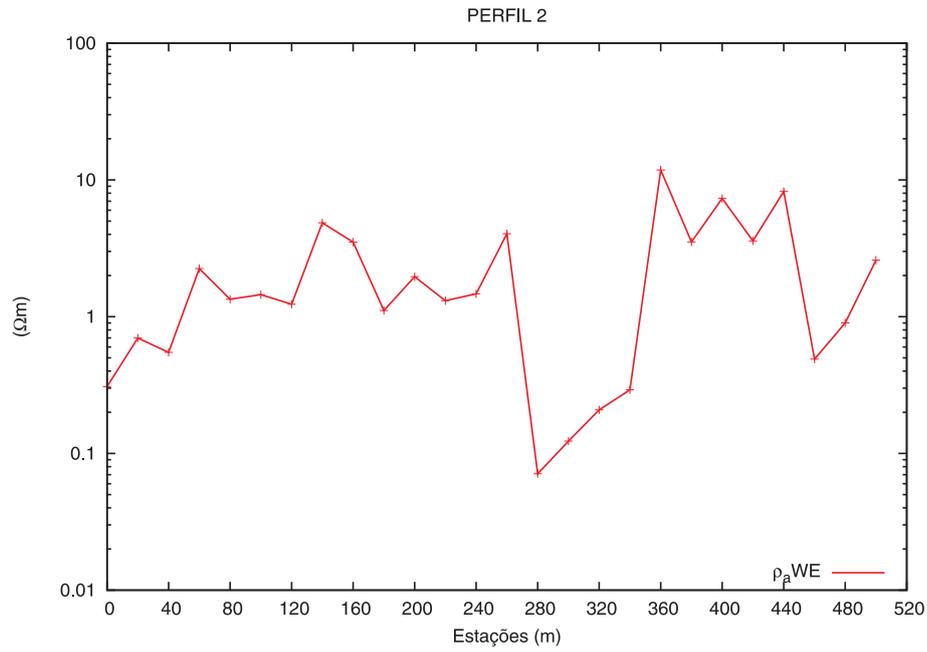


Figura I.2: Resultados geofísicos VLF-R obtidos para o Perfil 2. Com o campo elétrico na direção Norte-Sul.

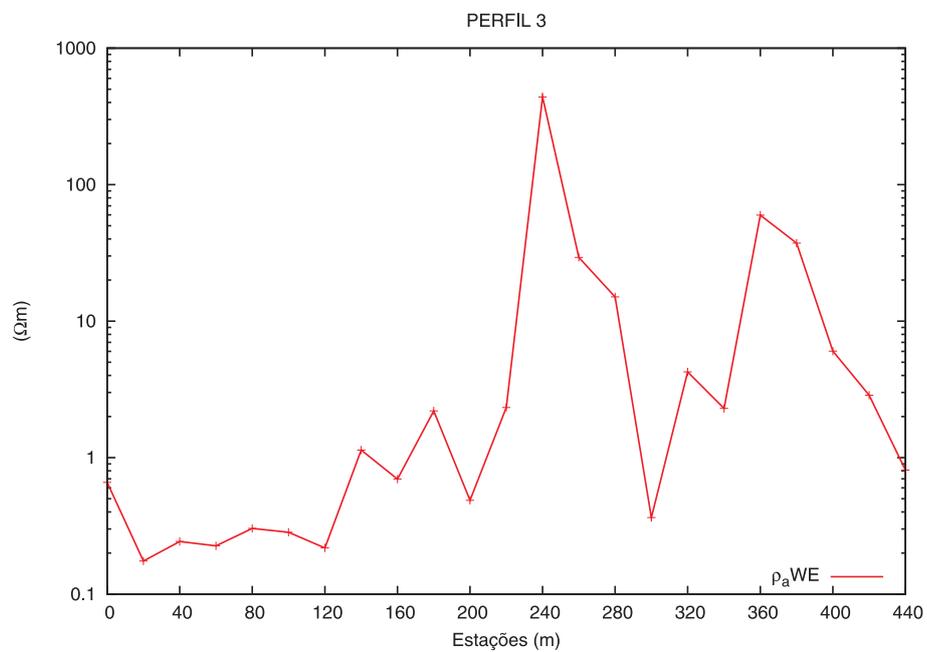


Figura I.3: Resultados geofísicos VLF-R obtidos para o Perfil 3. Com o campo elétrico na direção Norte-Sul.

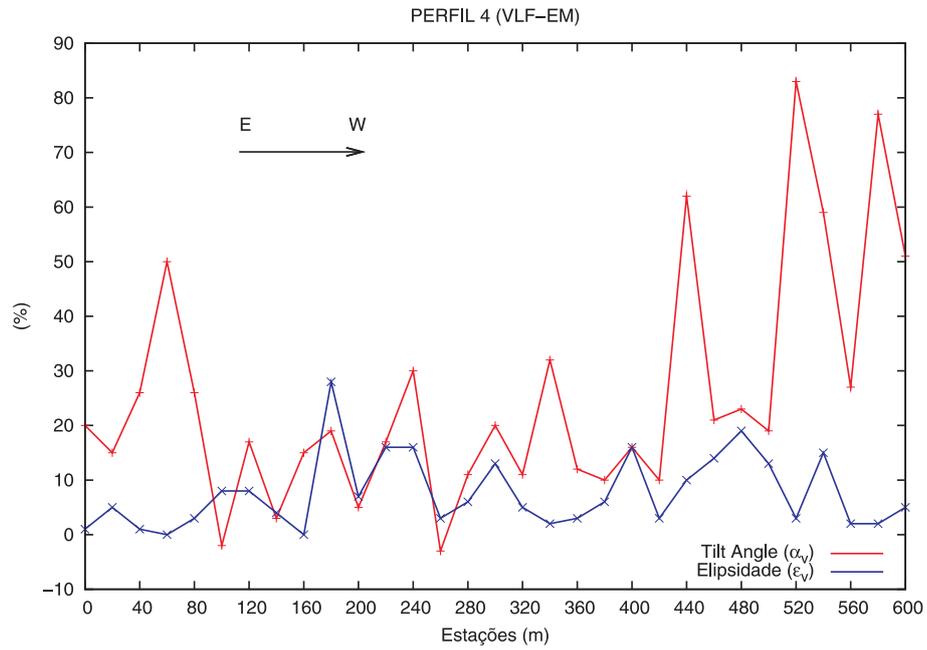


Figura I.4: Resultados geofísicos VLF-EM obtidos para o Perfil 4.

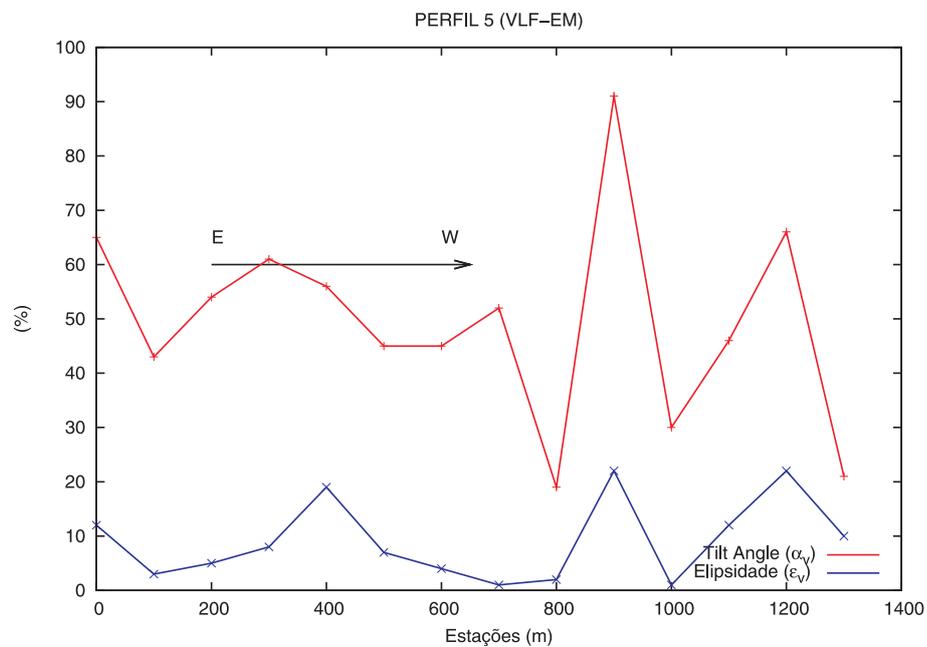


Figura I.5: Resultados geofísicos VLF-EM obtidos para o Perfil 5.