

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

TESE DE MESTRADO

**APLICAÇÃO DOS MÉTODOS GEOFÍSICOS ELÉTRICO E
ELETROMAGNÉTICO NA DETERMINAÇÃO DE UNIDADES
SEDIMENTARES COSTEIRAS TROPICAIS EM BRAGANÇA,
NORDESTE DO PARÁ**

REGINA CÉLIA DOS SANTOS SILVA



BELÉM - PARÁ
2002

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

**APLICAÇÃO DOS MÉTODOS GEOFÍSICOS ELÉTRICO E ELETROMAGNÉTICO NA
DETERMINAÇÃO DE UNIDADES SEDIMENTARES COSTEIRAS TROPICAIS EM
BRAGANÇA, NORDESTE DO PARÁ**

TESE APRESENTADA POR

REGINA CÉLIA DOS SANTOS SILVA

COMO REQUISITO PARCIAL À OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS NA ÁREA DE GEOFÍSICA

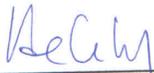
Data da aprovação: 25 / 02 / 2002

Nota: 9,0 (EXCELENTE)

COMITÊ DE TESE:



Prof. Dr. José Gouvea Luiz (Orientador)



Prof. Dr. Helenice Vital



Prof. Dr. Pedro Walfir Martins Souza Filho

BELÉM

2002

Ao Gabriel, meu filho com
muito amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de demonstrar meu reconhecimento a todos aqueles que contribuíram para o sucesso deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. José Gouvea Luiz pela sua orientação, dedicação e ensinamentos que contribuíram para o aprimoramento desta Tese.

Ao Prof. Dr. Pedro Walfir pela co-orientação e sugestões durante o desenvolvimento deste trabalho.

A Prof. Dra. Helenice Vital pelas suas sugestões e participação na banca examinadora.

Ao professor José Geraldo das Virgens Neves pelas sugestões e incentivo acerca do trabalho.

Ao técnico do Centro de Geociências Afonso Quaresma pela ajuda na coleta dos dados de campo.

Ao Saulo Sabino pelo amor, carinho e incentivo durante a realização desta dissertação.

Ao grande amigo Marcos Welby pela constante ajuda e dedicação durante todo período de mestrado.

As amigas Ana Paula, Márcia Helena e Rosangela Maciel, pela amizade e momentos de descontração.

Aos funcionários do curso de Geofísica Benildes Lopes e Paulo Magalhães, pela cooperação e momentos de descontração.

Aos demais colegas do CPGF que tornaram este período de mestrado um grande aprendizado.

Ao Programa de Manejo e Dinâmica de Manguezais (MADAM) pelo apoio financeiro

Agradeço a Deus por ter me dado forças para concretização desse objetivo.

SUMÁRIO

	p.
DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	v
RESUMO	1
ABSTRACT	2
1 - INTRODUÇÃO	3
2 - ÁREA DE ESTUDO	6
2.1 - LOCALIZAÇÃO E ACESSO	6
2.2 - CLIMA	6
2.3 - VEGETAÇÃO	6
3 - GEOLOGIA REGIONAL	8
3.1 - GEOLOGIA LOCAL	9
3.1.1 - Planalto Costeiro	9
3.1.2 - Manguezais	9
3.1.3 - Pântanos Salinos	10
3.1.4 - Cheniers	10
3.1.5. – Praias	10
4 - BASE TEÓRICA DOS MÉTODOS GEOFÍSICOS USADOS	13
4.1 - CONCEITOS SOBRE O MÉTODO DA ELETRORRESISTIVIDADE	13
4.2 - CONCEITOS SOBRE O MÉTODO ELETROMAGNÉTICO	16
4.2.1 – Sistema Slingram	17
5 – LEVANTAMENTO GEOFÍSICO	19
5.1 – INTRODUÇÃO	19
5.2 – OPERAÇÃO DE CAMPO	19

5.2.1 – Levantamento com o Método da Eletrorresistividade	19
5.2.2 – Levantamento com o Método Eletromagnético (HLEM)	21
6 – RESULTADOS	23
6.1 - ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS DE SEV	23
6.1.1 - SEV 1 (Mangue Morto)	24
6.1.2 - SEV 2 (Chenier)	25
6.1.3 - SEV 3 (Manguezal de Intermaré)	26
6.2 - ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS ELETROMAGNÉTICOS	28
6.2.1 – Transecta 1 (Formação Barreiras-Mangue)	28
6.2.2 – Transecta 2 (Pântano Salino)	34
6.2.3 – Transecta 3 (Chenier)	39
6.2.4 – Transecta 4 (Praia)	44
7 – CONCLUSÕES	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS	p.
Figura 1 - Mapa de localização da Planície Costeira Bragantina	5
Figura 2 - Mapa morfoestratigráfico da Planície Costeira Bragantina	12
Figura 3 - Disposição dos eletrodos na superfície do terreno para aplicação do método da eletrorresistividade	13
Figura 4 - Tipos de arranjos utilizados em eletrorresistividade	15
Figura 5 - Perfil HLEM sobre um corpo condutor	17
Figura 6 - Fotografia mostrando a operação de campo utilizando o arranjo Schlumberger	19
Figura 7 - Fotografia mostrando o resistivímetro Geotest	20
Figura 8 - Fotografia mostrando a operação com o método eletromagnético	21
Figura 9 - Fotografia mostrando o transmissor e o receptor eletromagnético.....	22
Figura 10 - Sondagem elétrica vertical 1: mangue morto	24
Figura 11 - Sondagem elétrica vertical 2: chenier	26
Figura 12 - Sondagem elétrica vertical 3: manguezal de intermaré	27
Figura 13 - Valores das componentes em-fase e quadratura do campo magnético para o perfil 1: a) frequências entre 14080 Hz-1760 Hz; b) frequências entre 880 Hz-110 Hz	31
Figura 14 - Valores de intensidade do campo magnético para o perfil 1: a) frequências entre 14080 Hz-1760 Hz; b) frequências entre 880 Hz-110 Hz	32
Figura 15 - Valores de fase do campo magnético para o perfil 1: a) frequências entre 14080 Hz-1760 Hz; b) frequências entre 880 Hz	33
Figura 16 – Representação das medidas da transecta 1 na forma de sondagens eletromagnéticas (SEM).....	34
Figura 17 - Valores das componentes em-fase e quadratura do campo magnético para o perfil 2: a) frequências entre 14080 Hz-1760 Hz; b) frequências entre 880 Hz-110 Hz	36

Figura 18 - Valores de intensidade do campo magnético para o perfil 2: a) frequências entre 14080 Hz-1760 Hz; b) frequências entre 880 Hz-110 Hz	37
Figura 19 - Valores de fase do campo magnético para o perfil 2: a) frequências entre 14080 Hz-1760 Hz; b) frequências entre 880 Hz-110 Hz	38
Figura 20 - Representação das medidas da transecta 2 na forma de sondagens eletromagnéticas (SEM)	39
Figura 21 - Valores das componentes em-fase e quadratura do campo magnético para o perfil 3: a) frequências entre 14080 Hz-1760 Hz; b) frequências entre 880 Hz-110 Hz	41
Figura 22 - Valores de intensidade do campo magnético para o perfil 3: a) frequências entre 14080 Hz-1760 Hz; b) frequências entre 880 Hz -110 Hz	42
Figura 23 - Valores de fase do campo magnético para o perfil 3: a) frequências entre 14080 Hz-1760 Hz; b) frequências entre 880 Hz-110 Hz	43
Figura 24 - Representação das medidas da transecta 3 na forma de sondagens eletromagnéticas (SEM)	44
Figura 25 - Valores das componentes em-fase e quadratura do campo magnético para o perfil 4: a) frequências entre 14080 Hz-1760 Hz; b) frequências entre 880 Hz-110 Hz	46
Figura 26 - Valores de intensidade do campo magnético para o perfil 4: a) frequências entre 14080 Hz-1760 Hz; b) frequências entre 880 Hz -110 Hz	47
Figura 27 - Valores de fase do campo magnético para o perfil 2: a) frequências entre 14080 Hz-1760 Hz; b) frequências entre 880 Hz.-110 Hz	48
Figura 28 - Representação das medidas da transecta 4 na forma de sondagens eletromagnéticas (SEM)	49

TABELAS

Tabela 1 - Principais unidades morfológicas da área de estudo, suas sub-unidades e área de abrangência	11
--	----

RESUMO

Esta dissertação mostra a aplicação de métodos geofísicos na determinação das unidades sedimentares da Planície Costeira Bragantina, que estão sendo estudados no Programa de Manejo e Dinâmica de Manguezais-MADAM (Mangrove Dynamics and Management). A finalidade deste trabalho é testar a metodologia geofísica no ambiente costeiro, visando auxiliar o mapeamento geológico e o entendimento da evolução estratigráfica holocênica da Planície Costeira Bragantina.

Na realização deste trabalho, foram aplicados em diferentes unidades morfoestratigráficas da área de estudo: (a) o método convencional da eletrorresistividade através de sondagens elétricas verticais, usando o arranjo Schlumberger e (b) o método eletromagnético slingram (Horizontal Loop Eletromagnetic), com oito frequências.

Com as sondagens elétricas verticais determinaram-se os valores de resistividade em subsuperfície para os diferentes horizontes, correlacionando-os sempre que possível com as informações geológicas disponíveis. Em geral, os resultados obtidos com as sondagens elétricas não foram muito satisfatórios em termos das profundidades investigadas pelo fato do ambiente estudado ser muito condutivo, dificultando a penetração de corrente elétrica e contribuindo para que a profundidade de investigação fosse baixa.

A aplicação do método eletromagnético mostrou-se mais simples e rápido do que as sondagens elétricas. A interpretação dos dados obtidos com esse método, realizada através da análise de perfis de medidas e de sondagens eletromagnéticas, permitiu inferir contatos laterais e estabelecer assinaturas geofísicas para os depósitos da planície costeira.

ABSTRACT

This thesis shows the application of geophysical methodology on several deposition environments of the Planície Costeira Bragantina (Bragantina Coastal Plain), which are being studied in the Mangrove Dynamics and Management (MADAM) Project.

The aim of the work was to test geophysics on coastal deposition environment to help the geological understanding of the recent stratigraphic evolution of the Bragantina Coastal Plain.

Geophysical measurements were carried out on several morpho-stratigraphic geological units using: (a) the conventional dc resistivity method, through Schlumberger vertical sounding, and (b) the slingram horizontal loop electromagnetic method, with measurements taken for eight frequencies.

Vertical electric soundings allowed to know the resistivity distribution in subsurface. The resistivity models could be correlated to geology, but the results were not satisfactory for the depth of investigation as a result of the environment high conductivity.

The electromagnetic method was easier and quicker to apply than the resistivity method. Electromagnetic data were analyzed in profiles and in electromagnetic soundings. The data allowed to establish geological contacts and geophysical signatures for the coastal deposits of the area.

1 - INTRODUÇÃO

A Planície Costeira Bragantina, localizada no NE do Pará, que possui uma das maiores áreas de manguezais do planeta, apresenta cerca de 40 km de linha de costa estendendo-se desde a Ponta do Maiaú até a foz do Rio Caeté (Figura 1). O contexto global desta planície é de grande importância para o entendimento da natureza dos processos deposicionais nela atuantes. Por isso, vários trabalhos já foram realizados com o objetivo de esclarecer os seus ambientes sedimentares e as sucessões estratigráficas holocênicas associadas às feições morfológicas nelas presentes. Dentre eles, tem-se os desenvolvidos por Souza Filho (1995), Souza Filho & El-Robrini (1996), Silva (1996) e Santos (1996).

A história deposicional desta planície vem sendo estudada através de observações geológicas de superfície e subsuperfície. As investigações geológicas da subsuperfície da planície, realizadas através de furos de sondagens que atingem a profundidade máxima de 6 a 14 metros, têm-se mostrado insuficientes para o conhecimento das relações estratigráficas das unidades geológicas que constituem o ambiente da região. Uma solução para tal problema seria aprofundar as sondagens, o que, entretanto, demandaria um custo que poderia ser proibitivo para o desenvolvimento da pesquisa. Além disso, tal solução não resolveria o problema da amostragem pontual, restrita ao diâmetro da sondagem (implica em baixa resolução lateral), que as sondagens proporcionam. Uma solução alternativa, que pode ser muito mais efetiva, tanto do ponto de vista econômico como de resolução, é o uso de metodologia geofísica.

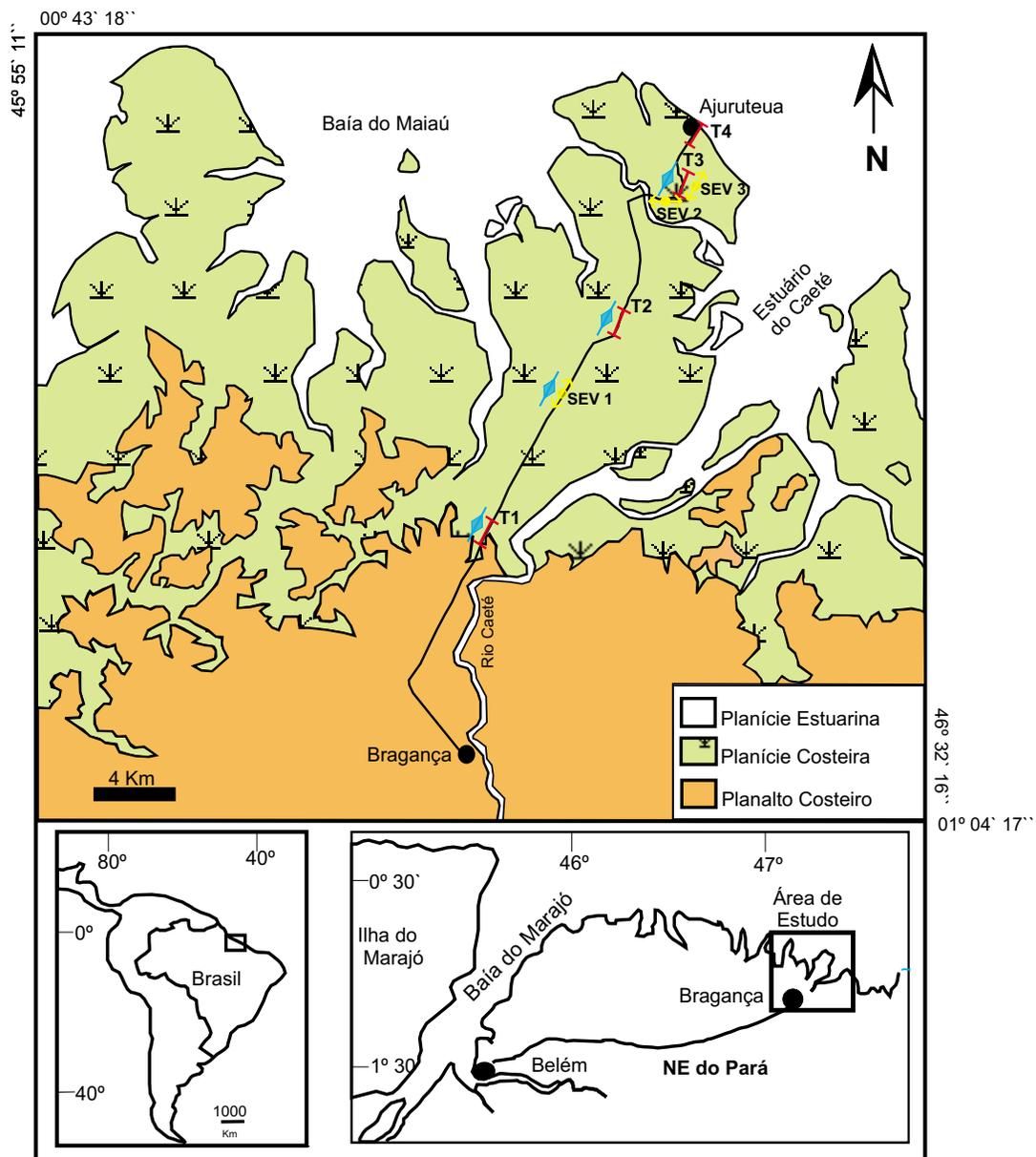
O ambiente geológico da região e a profundidade relativamente pequena de investigação requerida no estudo sugerem o uso de métodos geofísicos que respondem às propriedades elétricas. Além disso, alguns trabalhos (Palacky, 1988; Palacky, 1981; Palacky & Kadkaru, 1979; Seigel & Pitcher, 1978) já demonstraram que é possível obter-se uma excelente correlação entre mapas de condutividade (resistividade) elétrica aparente e mapas geológicos.

O presente trabalho foi desenvolvido na Planície Costeira Bragantina através da aplicação dos métodos geofísicos elétrico e eletromagnético. Com o método elétrico foram realizadas medidas de resistividade aparente coletadas em sondagens elétricas verticais (SEV), enquanto que com o método eletromagnético foram realizadas medidas das componentes em-fase e quadratura do campo magnético secundário, utilizando o sistema Slingram (HLEM – Horizontal Loop Electromagnetic) Max Min II, que permite amostragem em oito frequências.

As medidas geofísicas foram efetuadas em quatro trechos da rodovia Bragança-Ajuruteua, escolhidos com base no levantamento geológico anteriormente realizado por Souza Filho & El-Robrini (1996) e sugestões do primeiro autor.

O trabalho foi realizado com a finalidade de caracterizar “assinaturas” geofísicas, mais especificamente as assinaturas eletromagnéticas, dos depósitos costeiros com o objetivo de avaliar a eficácia dos métodos geofísicos utilizados: (a) na determinação da variação geológica lateral e vertical; (b) para a obtenção de um modelo apropriado que represente a subsuperfície da área estuda.

Ademais, vale ressaltar que o uso dos métodos geofísicos elétrico e eletromagnético na Planície Costeira Bragantina é uma tentativa pioneira de se aplicar esta metodologia em ambientes costeiros no Brasil.



Sondagem Elétrica Vertical ↔ SEV 1
 Caminhamento Eletromagnético — T1
 Sondagem Eletromagnética —

Figura 1- Mapa de localização da Planície Costeira Bragantina e do levantamento geofísico (Modificado de Souza Filho, 1995).

2 - ÁREA DE ESTUDO

2.1 - LOCALIZAÇÃO E ACESSO

A área estudada situa-se na costa nordeste do estado do Pará, na faixa costeira do município de Bragança, que se estende desde a Ponta do Maiaú até a Foz do Rio Caeté, entre as coordenadas 00^o 43' 18'' - 00^o 04' 17'' e 46^o 32' 16'' - 46^o 55' 11'' W, cobrindo cerca de 1.570 Km² (Figura 1).

O acesso é feito, a partir de Belém, pela rodovia federal BR-316, passando pelos municípios de Castanhal e Capanema. A partir daí, segue-se pela rodovia estadual PA-242 até o município de Bragança, perfazendo um total de 208 Km aproximadamente.

2.2 - CLIMA

O nordeste do Pará apresenta um clima tropical quente e úmido do tipo Am₂, de acordo com a classificação de Köppen, adaptada por Martorano et al. (1993). Caracteriza-se por apresentar um período chuvoso bem acentuado nos meses de dezembro a maio e uma estação menos chuvosa nos meses de junho a novembro, com a precipitação pluviométrica média anual variando de 2.500 a 3.000 mm.

A variação média anual de temperatura situa-se entre 21,1 °C e 30,9 °C, com média em torno de 25,7 °C e tem como fator determinante o regime pluviométrico. Os valores mais elevados de temperatura ocorrem nos meses de agosto a outubro, atingindo uma temperatura de 42 °C. Aliado ao regime pluviométrico, outro fator importante na variação da temperatura é a umidade relativa do ar, que oscila entre 80 e 91 % anualmente (Martorano et al., 1993).

2.3 - VEGETAÇÃO

A cobertura vegetal da região está inserida no contexto das florestas secundárias, as quais constituem extensas capoeiras sobre o planalto costeiro e por vegetação de mangue, campos arbustivos e campos herbáceos que ocorrem sobre a Planície Costeira.

A vegetação de mangue ocorre em toda a Planície Costeira Bragantina, penetrando em direção ao continente ao longo de canais estuarinos, em ambientes de águas salinas e salobras, sob a influência das marés. Os gêneros dominantes são *Rhizophora L.* (mangue vermelho),

Avicenia L. (mangue preto ou siriúba), *Laguncularia L.* (mangue branco ou tinteiro), com *Spartina sp.* e *Conocarpus L.* associados.

A vegetação herbácea ocupa áreas alagadas com influência pluvial e de águas salobras, estando representada pelos pântanos salinos vegetados, que têm como vegetação predominante a *Aleucharias sp* (Souza Filho, 1995).

Os campos salinos estão representados por *Chrysobalanus icaco L.* (ajuru), *Anacardium Occidentale L.* (caju) e *Byrsonma Crassifolia H.B.K* (muruci), com *Gramineae* e *Cyperaceae* associados, ocorrendo sobre os cheniers e dunas (Souza Filho, 1995).

3 - GEOLOGIA REGIONAL

A região em estudo está inserida na bacia costeira cretácea Bragança-Viséu, que representa uma fossa tectônica delimitada por falhas normais NW-SE (Aranha et al., 1990) e sua geometria e paleotopografia estão associadas às movimentações tectônicas, que têm controlado as espessuras dos depósitos terciários e quaternários (Igreja, 1991; Costa et al., 1993; Costa & Hasui, 1997).

O embasamento Pré-Cambriano é composto pelo Cinturão de Cisalhamento Gurupi e pelo Cráton São Luís, cujas principais unidades estratigráficas são: o Complexo Maracaçumé, a Formação Santa Luzia, o Grupo Gurupi, o Granito Cantão e a Formação Piriá.

Na região litorânea do Estado, onde está inserida a área de pesquisa, ocorrem principalmente as unidades cenozóicas representadas pelos carbonatos da Formação Pirabas e os sedimentos do Grupo Barreiras e do Pós-Barreiras.

As rochas da Formação Pirabas são compostas predominantemente por margas e calcários variados, por vezes intercalados com folhelhos, considerados com base no seu conteúdo fossilífero, como sendo do Mioceno Inferior (Maury, 1925). Mais tarde este termo foi estendido para incluir os calcários maciços cinza amarelados (biocalciruditos, biocalcarenitos biohermitos, calciruditos e micritos) intercalados com folhelhos cinza escuros e calcários arenosos (Goés et al., 1990). Estes calcários definem um ambiente de mar aberto, caracterizado por águas calmas, quentes e rasas, às vezes fortemente agitadas por ação de tempestades.

Os sedimentos do Grupo Barreiras encontram-se principalmente nas regiões do Salgado e Bragantina, bem como nos arredores da cidade de Belém. Assentam-se sobre a Formação Pirabas e são sobrepostos pelos sedimentos Pós-Barreiras. Eles foram datados por Arai et al. (1988, 1994), que atribuíram idade Mioceno Inferior para esses depósitos. Constituem-se geralmente por conglomerados polimíticos com intercalações de leitos de areia e argila. Rossetti et al. (1989) identificaram 13 fácies, que foram distribuídas em três associações, as quais teriam sido depositadas em ambientes de sistema de leques aluviais, planícies de areia e planície de lama, com influência marinha na porção mais distal do sistema. Na Planície Costeira Bragantina, o Grupo Barreiras sustenta o Planalto Costeiro que ocorre margeando a Planície Costeira.

Os sedimentos Pós-Barreiras jazem em discordância erosiva sobre os sedimentos Barreiras. Vários autores admitem que estes sedimentos são de idade Pleistocênica, porém Rossetti et al. (1989) atribuem idade holocênica à parte desses sedimentos. Constituem-se de

sedimentos areno argilosos, mal selecionados, depositados após um significativo período de não deposição.

3.1 - GEOLOGIA LOCAL

O litoral NE do Pará se estende desde a Foz do Rio Amazonas a oeste, até a foz do Rio Gurupi, a leste, perfazendo cerca de 600 Km de extensão. Esta região possui direção geral NW-SE e é considerada como uma costa transgressiva dominada por maré (Franzinelli, 1982; 1992).

Souza Filho (1995) compartimentou a Planície Costeira Bragantina nos seguintes domínios morfológicos ao levar em consideração suas características sedimentológicas, forma, vegetação e processos físicos dominantes: (1) Planície Aluvial, (2) Planície Estuarina e (3) Planície Costeira. Essas unidades e suas respectivas subunidades estão sintetizadas na tabela 1.

Por se encontrarem na subsuperfície investigada pelas medidas geofísicas, são importantes para este trabalho o domínio morfológico do Planalto Costeiro e as seguintes sub-unidades morfológicas da Planície Costeira Bragantina: manguezais, pântanos salinos, cheniers e praias. Estas unidades estão descritas abaixo e melhor ilustrados na Figura 2.

3.1.1 - Planalto Costeiro

Corresponde ao embasamento da Planície Costeira Bragantina, sendo constituído por sedimentos do Grupo Barreiras; está representado por uma superfície plana erosiva, suavemente ondulada e fortemente dissecada, onde as maiores cotas topográficas estão em torno de 50 e 60 m, apresentando uma pequena diminuição em direção à planície costeira, a norte (Costa et al., 1977). O contato com a Planície Costeira ocorre a partir de mudança: (a) litológica entre os sedimentos areno-argilosos avermelhadas do Grupo Barreiras e lamosos da Planície Costeira; (b) vegetacional a partir do contato floresta secundária-mangue; (c) morfológica bruta, através de falésias mortas de até 1m de altura (Souza Filho, 1995).

3.1.2 - Manguezais

Os manguezais correspondem a uma área que ocupa aproximadamente 466,8 Km² e são caracterizados por extensas planícies lamosas de até 20 Km de largura. De acordo com Souza Filho (1995) são constituídos por sedimentos lamosos, colonizados principalmente por *Ryzophora L.* e *Avicenia L.*, além de *Laguncularia L.* e *Spartina L.* associados.

Com base nas marés, altimetria relativa e no porte da vegetação do mangue, estes depósitos foram subdivididos em: a) Manguezal de Supramaré, topograficamente mais elevado, com menor porte arbóreo e influenciado pelas marés somente durante os períodos de sizígia e, b) Manguezal de Intermaré, topograficamente mais baixo, maior porte arbóreo, com frentes de progradação colonizada por mangues jovens, que bordejam a Planície Costeira. É composto por uma lama superficial oxidada cinza acastanhada e regularmente inundada pela maré semidiurna (Souza Filho, 1995).

3.1.3 - Pântanos Salinos

Os pântanos salinos, também chamados de Campos de Bragança, ocupam uma área de 82,7 Km². Encontram-se sobre a influência do domínio da supramaré e encaixados em uma drenagem colmatada, alimentada principalmente por sedimentos finos fluviais e oriundos da planície de maré lamosa. São subdivididos em: a) Pântano Salino Interno, alagado durante o período chuvoso e seco durante o período de estiagem e; b) Pântano Salino Externo, situado no limite do Planalto Costeiro com a floresta secundária e externamente pela planície costeira lamosa com a vegetação do mangue. Possui a mesma morfologia do pântano salino interno, diferenciando-se deste por ser relativamente mais baixo e por sofrer influência diária das marés (Souza Filho, 1995).

3.1.4 - Cheniers

Os Cheniers são corpos arenosos (cordões de praia e duna-praia) que repousam sobre os depósitos lamosos de manguezais, isolados dos processos costeiros por uma planície lamosa subsequente, impedindo a progradação da planície lamosa que foi interrompida pela formação do Chenier. Apresentam extensão de 5,5 Km² e são inundados somente no período chuvoso (Souza Filho, 1995).

3.1.5 - Praias

As Praias bordejam a planície de maré lamosa (manguezal de intermaré), sendo recortada pelos canais de marés. São representadas por cordões arenosos (*beach ridge*) lineares, que migram em direção ao continente sobre os depósitos de manguezais, constituindo uma costa retrogradacional (Souza Filho, 1995). A Praia é subdividida em pós-praia e estirâncio.

Tabela 1- Principais unidades morfológicas da área de estudo, suas sub-unidades e área de abrangência (Souza Filho, 1995).

Domínios Morfológicos	Sub-unidades Morfológicas	Área (Km²)
Planalto Costeiro		493
Planície Aluvial	Canal Meandrante	
	Planície de Inundação	3
	Levee	
Planície Estuarina	Canal Estuarino (funil estuarino, segmento retilíneo, segmento meandrante, canal de curso superior)	462
	Córrego de maré	
	Planície de Inundação	
Planície Costeira	Pântano Salino (Interno e Externo)	83
	Manguezal (Supramaré e Intermaré)	471
	Chenier	5,5
	Planície Arenosa	49
	Dunas Costeiras	6,5
	Praias	

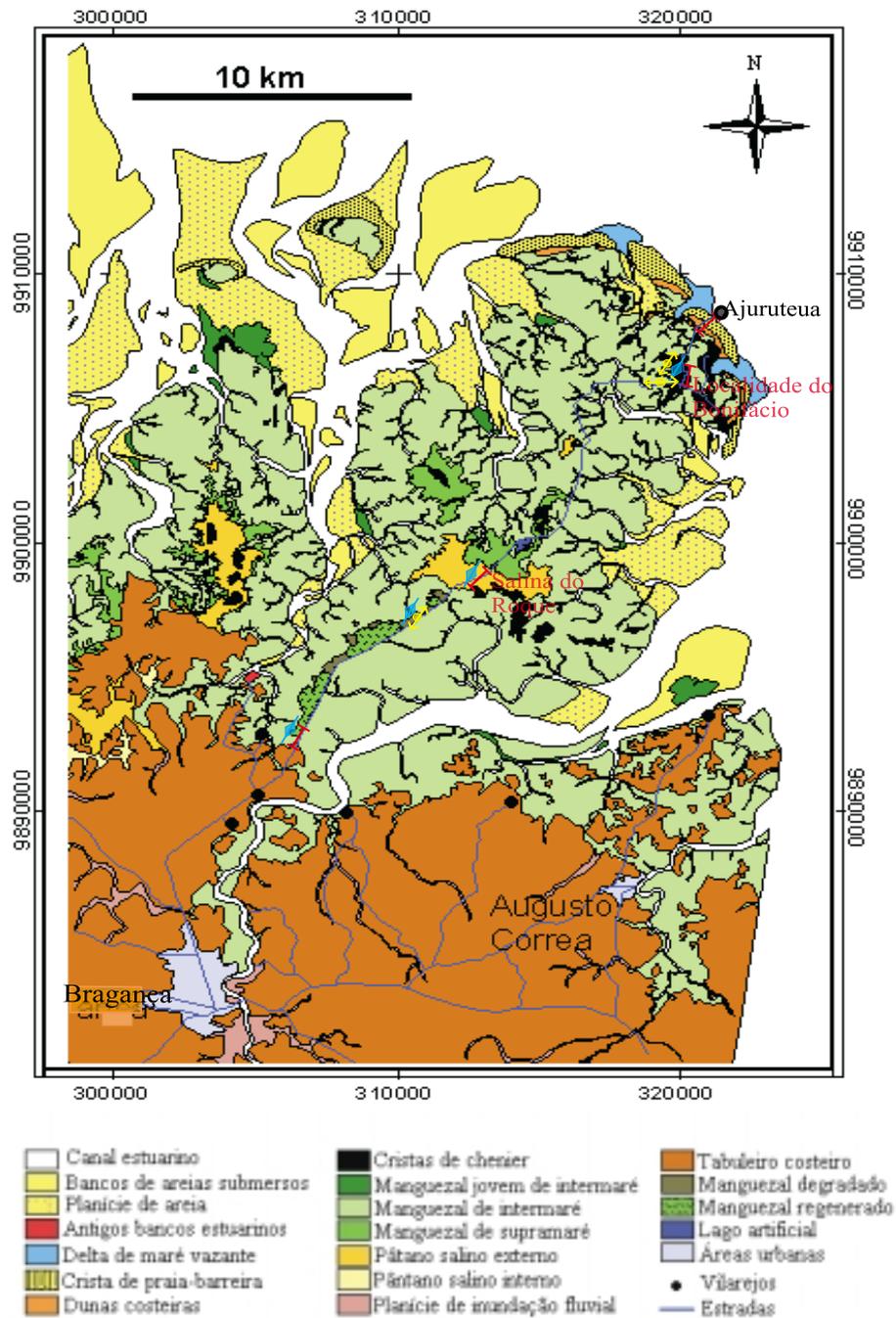


Figura 2- Mapa morfoestratigráfico da Planície Costeira Bragantina (Souza Filho, 2000)

4 - BASE TEÓRICA DOS MÉTODOS GEOFÍSICOS USADOS

4.1 - CONCEITOS SOBRE O MÉTODO DA ELETRORRESISTIVIDADE

No método da eletrorresistividade, corrente elétrica alternada de baixa frequência (inferior a 10 Hz) ou contínua é injetada no subsolo através de dois eletrodos (denominados A e B), medindo-se em seguida a diferença de potencial (voltagem) com outros dois eletrodos (denominados M e N). A Figura 3 ilustra a disposição dos eletrodos na aplicação do método na superfície do terreno.

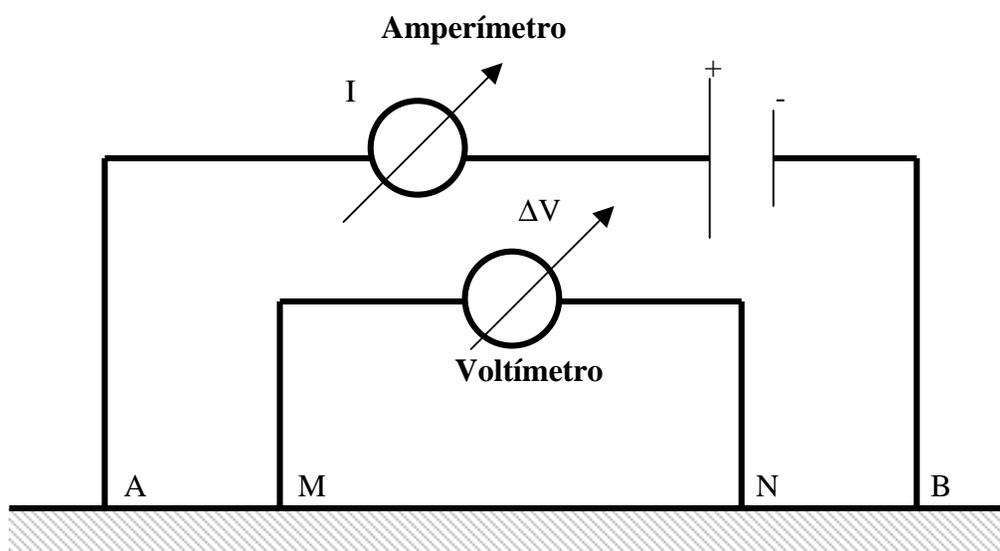


Figura 3- Disposição dos eletrodos na superfície do terreno para aplicação do método da eletrorresistividade

Conhecendo-se o valor da corrente injetada e da diferença de potencial é possível calcular a resistividade elétrica para um meio homogêneo e isotrópico através da seguinte expressão:

$$\rho = \frac{K\Delta V}{I} \quad (4.1)$$

Em que:

ρ → Resistividade elétrica. [$\Omega.m$]

ΔV → Diferença de potencial elétrico medida entre M e N. [Volt]

I → Corrente aplicada entre A e B. [Amper]

K → Fator geométrico para o arranjo dos eletrodos AMNB, que é dado por

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \quad (4.2)$$

sendo AM, AN, BM e BN distâncias entre os eletrodos.

Assumindo que o subsolo é em geral heterogêneo, a resistividade medida representa uma resistividade elétrica aparente (ρ_a), passando a equação (4.1) a ser escrita da seguinte forma:

$$\rho_a = \frac{K\Delta V}{I} \quad (4.3)$$

O método da eletrorresistividade é empregado com o objetivo de investigar a distribuição da resistividade na subsuperfície terrestre na direção vertical ou na direção horizontal. A investigação na direção vertical é denominada de Sondagem Elétrica Vertical (SEV), enquanto a investigação horizontal é denominada de Perfilagem Elétrica de Superfície ou Caminhamento Elétrico (Orellana, 1972).

Na SEV a investigação das variações da resistividade em profundidade é conseguida através do aumento da separação dos eletrodos A e B. Nesta técnica, os eletrodos de corrente são normalmente deslocados simetricamente em relação a um ponto central, abaixo do qual se considera a amostragem de resistividade. No caminhamento elétrico, os eletrodos de corrente e os de potencial são geralmente deslocados simultaneamente, mantendo-se constante o espaçamento entre eles.

Nos trabalhos de prospecção elétrica vários tipos de arranjos de eletrodos (envolvendo a posição relativa dos pontos A, M, N e B) podem ser usados. Os arranjos mais empregados em eletrorresistividade são Wenner, Schlumberger e Dipolo-Dipolo (Figura 4). Os fatores geométricos dos referidos arranjos, são dados respectivamente por:

$$K_w = 2\pi a, \quad (4.4)$$

$$K_s = \pi \left(\frac{a^2}{b} - \frac{b}{4} \right) \quad (4.5)$$

e

$$K_d = \pi \left(\frac{a^3}{b^2} - a \right) \quad \text{com } c = b \quad (4.6)$$

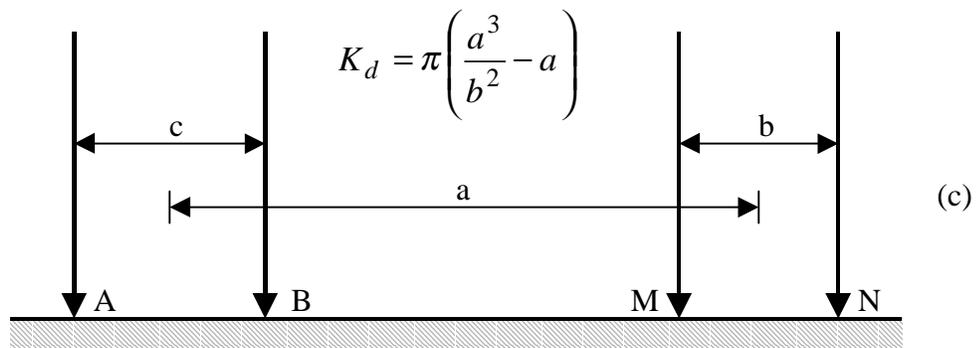
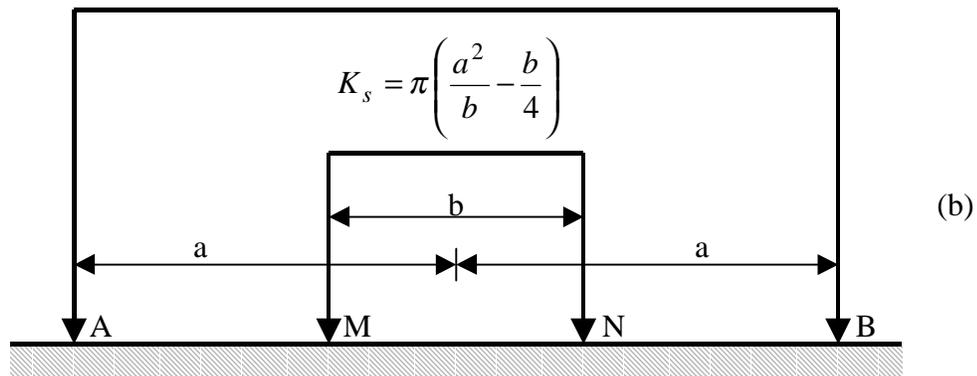
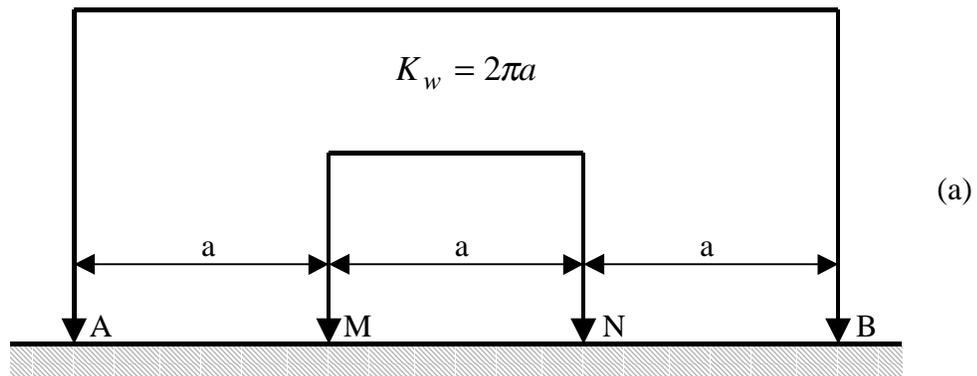


Figura 4- Tipos de arranjos utilizados em eletrorresistividade: (a) Arranjo Wenner; (b) Arranjos Schlumberger; (c) Arranjo Dipolo-Dipolo.

4.2 - CONCEITOS SOBRE O MÉTODO ELETROMAGNÉTICO

O método eletromagnético (EM) envolve a propagação de ondas eletromagnéticas geralmente de baixa frequência (<30000 Hz). Esse método é chamado indutivo quando o campo primário é gerado através de bobina transmissora e condutivo quando o campo primário é introduzido no subsolo através de eletrodos com contato galvânico no terreno.

Os métodos EM incluem uma variedade de técnicas, métodos de levantamentos, aplicações e procedimentos de interpretação. Cada técnica, porém, envolve a medida, em um receptor, de uma ou mais componentes do campo elétrico ou do campo magnético, gerado a partir de alguma fonte natural ou artificial de energia eletromagnética, chamada de transmissor (Swift, 1987).

A aplicação do método EM, no ambiente geológico baseia-se em que uma fonte eletromagnética alternada (transmissor) induz correntes secundárias em materiais condutivos da subsuperfície. Essas correntes secundárias geram campos magnéticos secundários. As respostas EM são medidas através de indução em uma bobina (receptor) e, dependendo da frequência, da condutividade da estrutura e da geometria de acoplamento entre transmissor e receptor, expressas como: (a) campos resultantes da interação entre o campo primário e o secundário; (b) campos secundários e (c) impedâncias.

As configurações de arranjos entre o transmissor e o receptor são selecionadas dependendo do tipo de aplicação, seja para perfilagem horizontal (medidas da variação lateral de resistividade através da superfície) ou para sondagem (medidas da variação de resistividade com a profundidade).

As sondagens EM consistem de medidas em diversas frequências (domínio da frequência) ou durante um intervalo de tempo (domínio do tempo), usando fonte e receptor fixos. Correntes de baixa frequência alcançam maiores profundidades do que correntes de alta frequência, enquanto tempos mais longos dão respostas de profundidades maiores do que tempos mais curtos. As sondagens também podem ser realizadas medindo-se a resposta com várias separações entre a fonte e o receptor em uma única frequência ou tempo. Neste caso, espaçamentos maiores medem a resposta das maiores profundidades.

A seguir serão descritos, com detalhe, o fenômeno eletromagnético que se processa na subsuperfície quando é aplicado o Método Eletromagnético. A descrição será feita em particular

para o arranjo entre transmissor e receptor conhecido como sistema Slingram, ao qual pertence o instrumento usado nas medidas realizadas na pesquisa desta dissertação.

4.2.1 - Sistema Slingram

O Slingram é provavelmente um dos mais empregados sistemas EM. Ele consiste de um dipolo transmissor (bobina transmissora) e um dipolo receptor (bobina receptora), em que as componentes em-fase e quadratura do campo magnético vertical secundário são medidos para uma dada frequência.

Existem diferentes arranjos de bobinas para o sistema Slingram, dentre os quais o mais utilizado é o arranjo horizontal coplanar, em que tanto a bobina transmissora como a receptora são horizontais. Por este motivo, o sistema Slingram é comumente chamado de método HLEM (Horizontal Loop Eletromagnetic). Uma típica resposta HLEM, em que um corpo condutivo vertical está em contato com uma rocha encaixante menos condutiva, é ilustrada na Figura 5.

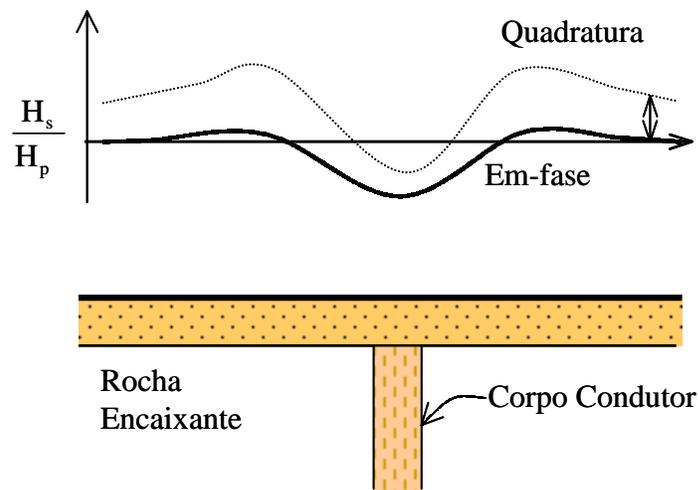


Figura 5- Perfil HLEM sobre um corpo condutor. H_p = Campo Primário;
 H_s = Campo Secundário.

Durante a operação com o Slingram HLEM, uma corrente de frequência pré-determinada circula na bobina transmissora, a qual comporta-se como um dipolo magnético oscilante. Esta corrente produzirá um campo magnético primário, que induzirá força eletromotriz e, conseqüentemente, corrente em corpos condutores existentes na subsuperfície. O campo secundário, por sua vez, induzirá uma voltagem oscilante na bobina receptora, que alcança o seu

máximo num tempo diferente daquele em que o máximo do campo primário é alcançado. Por isso, os campos primário e secundário são ditos estarem fora de fase.

A voltagem induzida pelo campo secundário é separada em duas componentes durante a sua medida na bobina receptora: uma que se encontra em fase com o campo primário (componente em fase ou componente real) e uma segunda que se encontra um quarto de período fora de fase (componente fora de fase, componente em quadratura ou componente imaginária). As medidas do campo secundário são tomadas como percentagem do campo primário gerado no transmissor, o qual é transmitido ao receptor via cabo ou por telemetria. O Slingram tem se mostrado muito eficaz na localização de corpos condutores, tais como mineralizações de sulfetos maciços e, também, no mapeamento de estruturas geológicas, como fraturas e zonas de cisalhamento para a prospecção de água subterrânea (Palacky, 1981). O sistema também pode ser usado para o mapeamento de seções geelétricas de um meio horizontalmente estratificado (Palacky, 1991), aplicação esta utilizada neste trabalho.

5 - LEVANTAMENTO GEOFÍSICO

5.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo contém os resultados da aplicação dos métodos geofísicos elétrico (SEV) e eletromagnético (HLEM), em trechos da rodovia Bragança-Ajuruteua. A finalidade da investigação consistiu em caracterizar as “assinaturas” dos depósitos costeiros com o objetivo de avaliar a conveniência dos métodos geofísicos utilizados na determinação da variação lateral e vertical para a obtenção de um modelo geológico apropriado que represente a subsuperfície da área estudada.

5.2 - OPERAÇÃO DE CAMPO

5.2.1 - Levantamento com o Método da Eletrorresistividade

Foram realizadas 3 sondagens elétricas verticais (SEV) ao longo da rodovia Bragança-Ajuruteua. A localização das SEV é mostrada na Figura 1, onde estão representados os seus centros e as direções de expansão dos eletrodos. As SEV foram executadas com o arranjo Schlumberger com a separação máxima entre os eletrodos de corrente igual a 100 m ($AB=100$ m). A Figura 6 ilustra a operação de campo realizada com o arranjo Schlumberger.



Figura 6- Fotografia mostrando a operação de campo utilizando o arranjo Schlumberger.

A localização dos centros das SEV foi escolhida de modo a coincidir com os pontos onde há perfis litológicos obtidos em poços existentes na área estudada. As condições operacionais, de um modo geral, não foram muito favoráveis pelo fato do ambiente ser altamente condutivo, o que provoca elevados valores de corrente (>500 mA) e baixos valores de potencial (<10 mV), valores que facilmente podem sair da faixa de valores do equipamento disponível para o levantamento. O ambiente contribui também para que a profundidade de investigação fosse baixa, já que a corrente tem dificuldade de penetrar em ambientes condutivos.

O equipamento utilizado nos levantamentos foi o resistivímetro Geotest (Figura 7), que possibilita medidas individuais dos valores de ΔV (diferença de potencial) e I (corrente). A resistividade aparente é calculada através da multiplicação do fator geométrico do arranjo pela razão $\Delta V/I$, utilizando-se a expressão (4.3).

Durante as tomadas das medidas, quando a abertura entre os eletrodos de corrente tornava-se muito grande, obtinha-se o ΔV tão pequeno (no limite de precisão do equipamento), que era necessário executar-se o procedimento chamado de “embreagem”, aumentando-se a distância entre os eletrodos de potencial, com superposição de duas medidas. Este procedimento permite também identificar os efeitos da variação lateral de resistividade nas proximidades dos eletrodos de potencial.

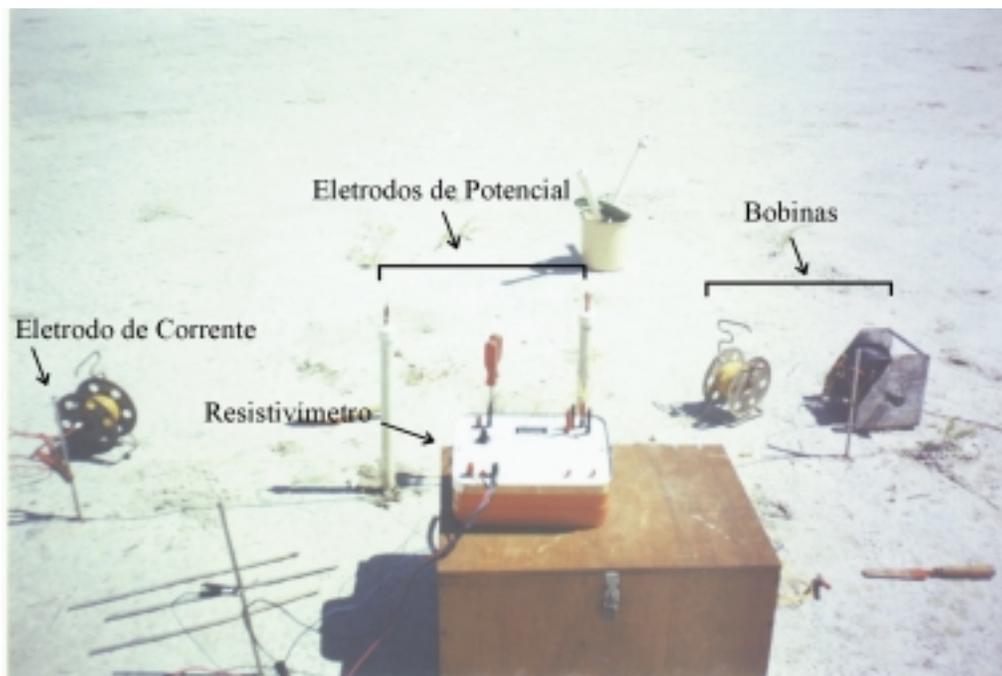


Figura 7- Fotografia mostrando o resistivímetro Geotest.

5.2.2 - Levantamento com o Método Eletromagnético (HLEM)

Durante a etapa de campo foram executados 4 perfis, utilizando o sistema de loop horizontal coplanar (HLEM), cujas localizações encontram-se ilustradas na Figura 1. O instrumento utilizado foi o APEX MAX MIN II, que permite amostragem nas seguintes frequências 110, 220, 440, 880, 1760, 3520, 7040 e 14080 Hz. As Figuras 8 e 9 ilustram a operação de campo com o método eletromagnético. Nos levantamentos realizados, as leituras em fase (componente real) e quadratura (componente imaginária) foram tomadas para todas as oito frequências. As distâncias entre as bobinas transmissora e receptora foram iguais a 25 e 50 metros, com as medidas realizadas a intervalos de 25m (em dois perfis) e 100 m (em dois perfis). As respostas foram consideradas mais satisfatórias para a separação de bobinas de 25 m, pois se obtém uma melhor resolução vertical.



Figura 8- Fotografia mostrando a operação com o método eletromagnético.

Tradicionalmente, os levantamentos HLEM são realizados para investigação lateral (perfilagem ou caminhamento). Entretanto, com oito frequências, o sistema Max Min permitiu que se obtivessem sondagens EM (investigação na vertical), combinados com investigação lateral. Esse procedimento, permite que, com uma representação adequada dos dados, se obtenha uma imagem de subsuperfície abaixo dos perfis.



Figura 9 – Fotografia mostrando o transmissor e o receptor eletromagnético.

6 - RESULTADOS

6.1 - ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS DE SEV

As SEV foram representadas na maneira convencional, em papel bilogaritmico, com a resistividade aparente (ρ_a) no eixo vertical e a separação de eletrodos no eixo horizontal. As curvas das SEV assim obtidas foram, a seguir, suavizadas para corrigirem-se as discontinuidades originadas pela mudança de posição dos eletrodos de potencial durante as “embreagens”. As curvas obtidas nesse tipo de representação mostram a variação de resistividade com a profundidade.

Nos ambientes geológicos relativamente simples, envolvendo camadas horizontais, estimativas de profundidade de suas interfaces de separação podem ser feitas com o auxílio das informações geológicas disponíveis, o que permite o estabelecimento de um modelo preliminar satisfatório para a estratificação com vínculos de espessura. Essa metodologia foi usada na interpretação das SEV, sendo as espessuras dos modelos preliminares, aqui analisados, obtidos a partir de perfis litológicos conhecidos, que se localizam próximos ao centro das SEV. Os valores de resistividade dos modelos preliminares foram obtidos a partir do método inverso, usando-se o programa desenvolvido por Zohdy & Bisdorf (1989). Os modelos preliminares foram a seguir melhorados a partir da interpretação quantitativa efetuada através dos métodos direto e inverso.

Para interpretação pelo método direto foi utilizado um programa computacional desenvolvido no Departamento de Geofísica da UFPA (não publicado). Esse programa permite calcular os valores de resistividade aparente para um dado modelo teórico de camadas horizontais, homogêneas e isotrópicas. Os dados das curvas calculadas são então comparados visualmente com os dados das curvas de campo, a fim de se obter um ajuste satisfatório (coincidência entre a curva calculada e a curva de campo). Os valores numéricos, atribuídos aos parâmetros do modelo que produziu o melhor ajuste são tomados como possíveis valores dos parâmetros geoeletricos da subsuperfície investigada.

O método inverso permite um refinamento dos parâmetros geoeletricos através de ajuste automático. Neste método, as resistividades aparentes medidas no campo e um modelo inicial são introduzidos no computador para processamento. Os modelos iniciais usados aqui foram obtidos com o método direto. Na aplicação do método inverso usou-se o programa desenvolvido no Departamento de Geofísica da UFPA.

A seguir serão mostrados os resultados da interpretação quantitativa das SEV realizadas em três trechos da rodovia Bragança-Ajuruteua:

6.1.1 - SEV 1 (Mangue Morto)

A SEV 1 encontra-se localizada a 4 Km do Furo do Taici e foi realizada sobre a unidade morfoestratigráfica mangue degradado (Figuras 1 e 2).

Os resultados para a SEV 1 encontram-se ilustrados na Figura 10, em que o modelo geoeétrico (correlacionado com o modelo geológico) é constituído por uma camada de lama, a qual é subdividida em: 0,37 m de lama oxidada com 0,23 Ω .m de resistividade e um horizonte com 4,14 m de lama orgânica com 0,19 Ω .m de resistividade. A segunda camada é constituída por areia e lama (sedimentos de barra em pontal) e possui 3,91 m de espessura e 0,39 Ω .m de resistividade. O terceiro pacote é composto por barras arenosas estuarinas apresentando 11,96 m de espessura e 0,91 Ω .m de resistividade. E, finalmente, a quarta camada que representa o substrato com valor de resistividade de 8,86 Ω .m.

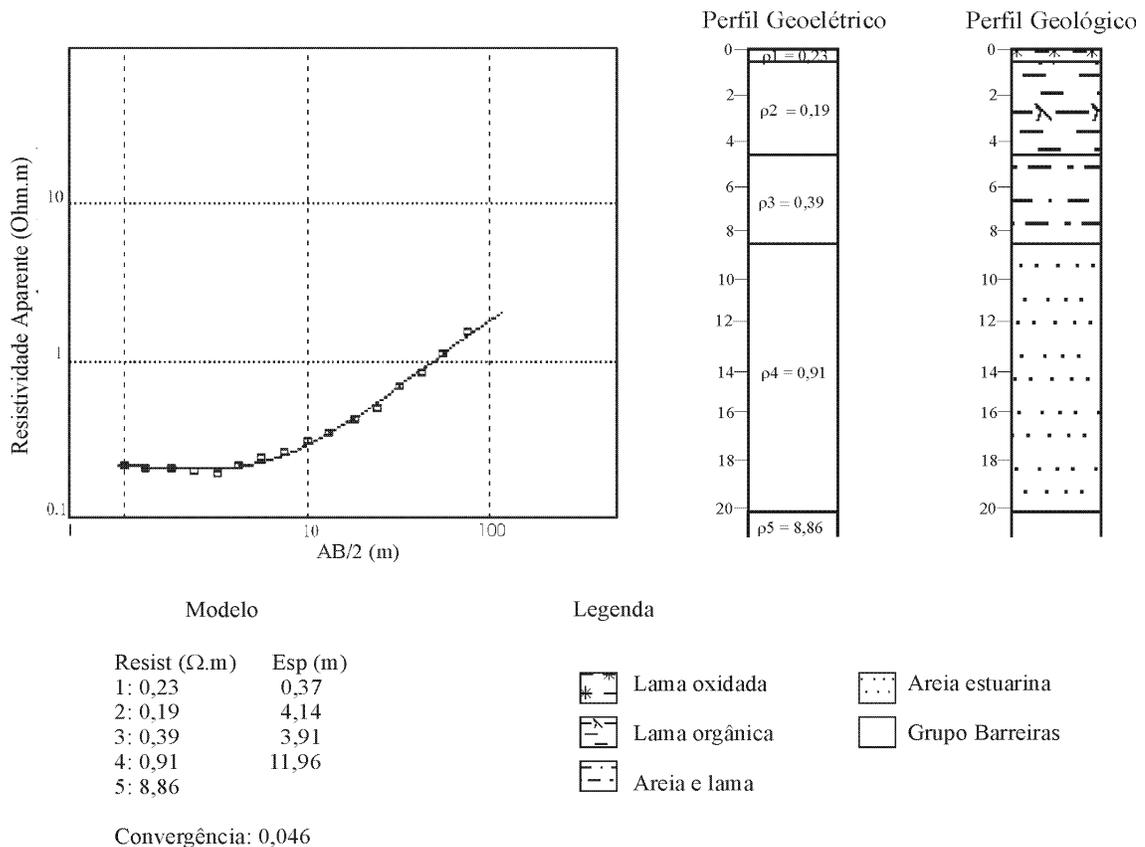


Figura 10 – Sondagem elétrica vertical 1: Mangue morto.

O aumento nos valores de resistividade aparente para a segunda e terceira camadas está relacionado com a presença de sedimentos arenosos. No entanto, esses valores estão abaixo dos valores característicos para esses sedimentos, demonstrando que os baixos valores de resistividade são devidos à presença de soluções salinas que ocupam os seus poros. O valor da resistividade da última camada é relativamente bem mais elevado do que os valores observados nos pacotes subjacentes. Essa camada corresponde provavelmente a material da Formação Barreiras, o que condiz com as profundidades encontradas por Souza Filho et al. (no prelo) na área em estudo.

6.1.2 - SEV 2 (Chenier)

A SEV 2 foi realizada a aproximadamente 11 Km da SEV 1, sobre a unidade morfoestratigráfica Chenier (Figuras 1 e 2). O modelo resultante para esta SEV, mostrado na Figura 11, consiste de uma camada superficial de areia com 0,53 m de espessura e 0,47 Ω .m de resistividade; uma segunda camada, composta por areia e lama, de 1,14 m de espessura e apresentando um menor valor de resistividade de 0,23 Ω .m (a presença de sedimentos lamosos contribuem para a diminuição dos valores de resistividade). Sob esta tem-se um pacote arenoso, que é subdividido em 3 horizontes: 5,78 m de areias estuarinas apresentando valor de resistividade de 0,40 Ω .m; um segundo horizonte apresentando 3,51 m de espessura e 0,71 Ω .m de resistividade, composto de areias marinhas, e um terceiro horizonte com 5,18 m de espessura e 0,94 Ω .m sendo constituído por areias ricas em conchas. Observa-se um aumento gradual nos valores de resistividade aparente nesses três horizontes arenosos indicando que a entrada de material carbonático (presença de conchas), contribui para que os valores de resistividade aumentem. Abaixo do pacote arenoso, encontra-se o substrato constituído por material lamoso (mangue) com valor de resistividade de 1,07 Ω .m. Este valor de resistividade mostra-se maior do que os valores observados anteriormente para o mesmo tipo de material, o que sugere que o material lamoso, nessa profundidade, pode apresentar-se mais compactado.

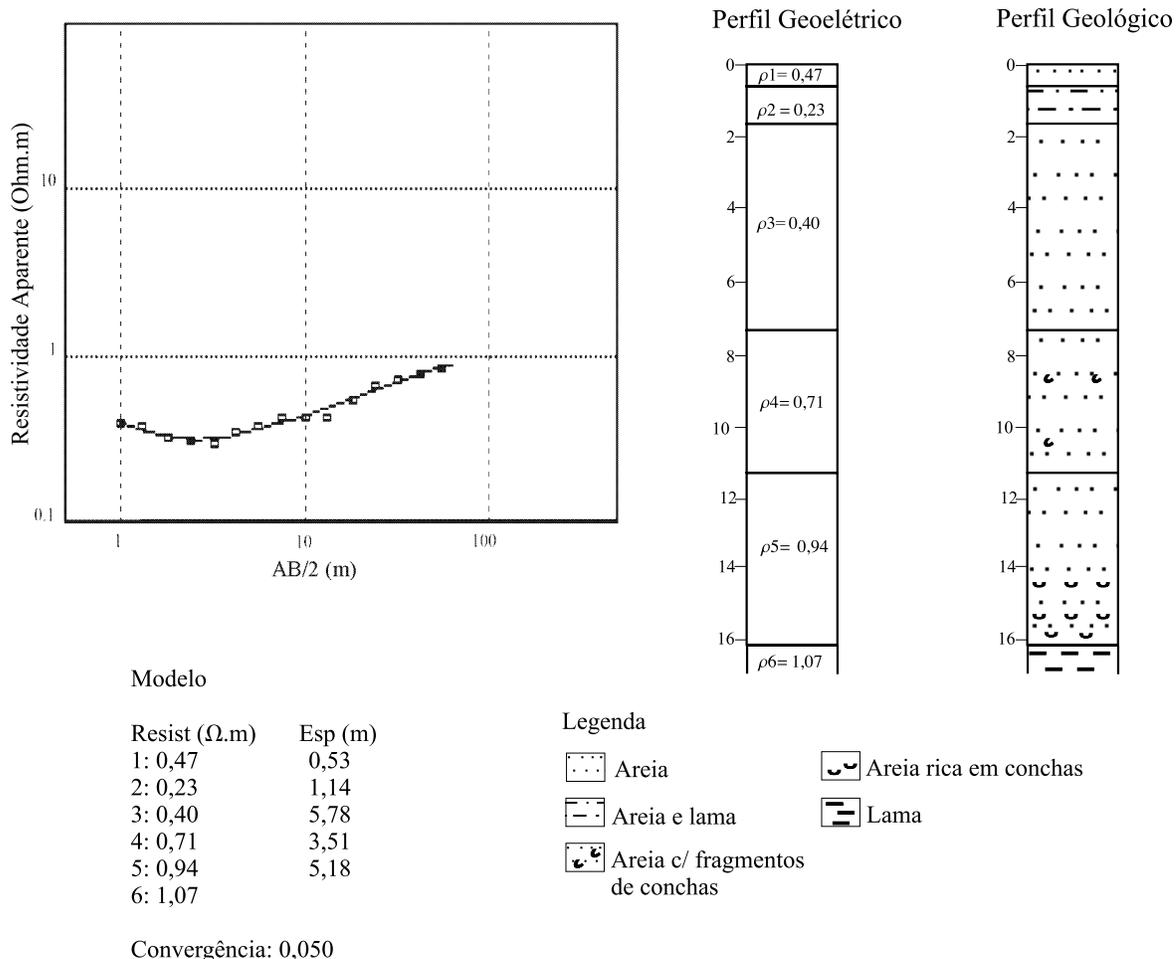


Figura 11 – Sondagem elétrica vertical 2: Chenier.

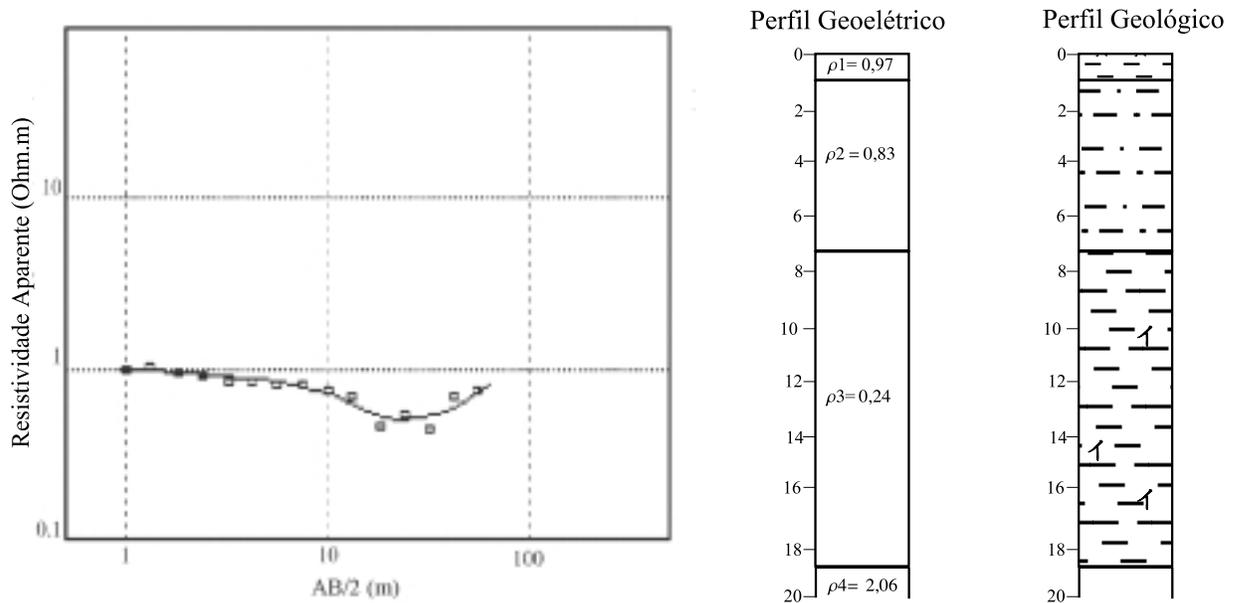
6.1.3 - SEV 3 (Manguezal de Intermaré)

A SEV 3 foi realizada a 13 Km da SEV 2, próximo à localidade do Bonifácio, sobre a unidade morfoestrigráfica denominada de Manguezal de Intermaré (Figuras 1 e 2).

Na Figura 12 encontra-se o modelo resultante para a SEV 3, que mostra a seguinte seqüência composta de quatro camadas: a primeira representa o mangue (sedimentos lamosos) apresentando 0,92 m de espessura e 0,97 Ω.m. O valor de resistividade desses sedimentos é maior do que o observado nas SEV 1 e 2 para a mesma litologia, provavelmente porque os sedimentos lamosos superficiais desse trecho apresentam uma cobertura mais seca. A segunda camada é constituída por areia e lama com espessura de 6,29 m e 0,83 Ω.m de resistividade. O aumento de resistividade nessa camada pode ser devido à entrada de areia no sistema. Sob essa camada encontra-se um pacote lamoso com 11,68 m de espessura e 0,24 Ω.m de resistividade (este valor

de resistividade está próximo dos valores observados anteriormente nas SEV 1 e 2 para esse tipo de sedimento). Abaixo desse pacote encontra-se o substrato com valor de resistividade de 2,06 $\Omega.m$, que provavelmente corresponde aos sedimentos da Formação Pirabas.

As respostas obtidas com as sondagens elétricas nos sedimentos costeiros mostram valores de resistividade muito baixos. Tal fato decorre do ambiente estudado ser altamente condutivo, devido à presença de soluções salinas que ocupam os poros dos sedimentos e também à grande quantidade de matéria orgânica e argila encontrada nos sedimentos lamosos. Entretanto, a correlação entre os valores de resistividade com os perfis litológicos é excelente.



Modelo

Resist ($\Omega.m$)	Esp (m)
1: 0,97	0,92
2: 0,83	6,29
3: 0,24	11,68
4: 2,06	

Convergência: 0,050

Legenda

- Areia e lama
- Lama
- Formação Pirabas

Figura 12 – Sondagem elétrica vertical 3: Manguezal de Intermaré.

6.2 - ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS ELETROMAGNÉTICOS

A interpretação qualitativa dos dados eletromagnéticos foi realizada com o objetivo de inferir os contatos laterais e estabelecer assinaturas geofísicas para os depósitos costeiros.

Para a análise qualitativa, os dados foram representados: (a) na forma de perfis (transectas), sendo cada perfil construído de modo a representar as componentes em-fase e quadratura, a amplitude e a fase do campo magnético; (b) na forma de sondagens eletromagnéticas, em que cada posição de medida foi plotada a amplitude contra o período. Da análise foram feitas as seguintes interpretações para cada perfil.

6.2.1 - Transecta 1 (Formação Barreiras-Mangue)

Este é o caminhamento localizado mais a sul na estrada que liga Bragança à Ajuruteua (Figuras 1 e 2). Ele inicia sobre a Formação Barreiras e cruza três contatos identificados no mapeamento geológico de superfície, que separam os sedimentos da Formação Barreiras dos sedimentos de mangue. O intervalo entre as medidas neste perfil foi de 25 m.

Os valores medidos ao longo do caminhamento estão representados nas Figuras 13 (componentes em-fase e quadratura do campo magnético), 14 (amplitude do campo magnético) e 15 (ângulo de fase do campo magnético). Nessas figuras estão representados também os contatos geológicos identificados no mapeamento de superfície e os contatos indicados pelas medidas geofísicas.

Na Figura 13 observa-se que na porção SW do caminhamento (entre as posições 12,5 m e 112,5 m) há uma discrepância entre os valores das componentes em-fase (representada pela linha cheia na figura) e quadratura (linha tracejada), principalmente para as frequências menores do que 3520 Hz. A posição que marca essa mudança nos valores corresponde à posição do contato geológico identificado, sendo a mudança, portanto, causada pela passagem dos sedimentos da Formação Barreiras para os sedimentos do mangue.

Observam-se ainda na Figura 13, inflexões na componente em-fase nas posições 287,5 m e 387,5 m que correspondem respectivamente ao contato entre o mangue e a Formação Barreiras e novamente entre esta e os sedimentos do mangue, conforme evidenciado pelo mapeamento geológico. Há também, inflexões na componente em-fase nas posições 162,5 m e 437,5 m que não correspondem a contatos identificados geologicamente. Essas inflexões ocorrem dentro da zona mapeada com os sedimentos de mangue e podem estar associadas a variações desses

sedimentos, tanto de caráter litológico como geométrico (variação na espessura do pacote, por exemplo), ou ainda, a variações na salinidade da água presente nos seus poros.

Outra feição marcante na Figura 13 é uma anomalia similar à provocada por corpos condutivos, com centro na posição 200 m e evidenciada apenas nas frequências 14080 Hz e 7040 Hz. Esse comportamento anômalo deve ter sido causada pelas águas salinas do estuário do Rio Taici, que corta a transecta na posição da anomalia. Por isso ela é observada somente nas frequências mais elevadas, que são fortemente influenciadas pelas fontes de anomalias mais rasas.

A representação dos dados eletromagnéticos na forma de amplitude do campo magnético, amostrada na Figura 14, não evidencia tão claramente a correlação entre os contatos geológicos e as anomalias geofísicas, como a representação da Figura 13. Observa-se na Figura 14a que a melhor correlação ocorre na representação dos dados obtidos com as frequências que vão de 880 Hz a 110 Hz. Para essas frequências, tanto os contatos geológicos, como os contatos indicados apenas pelos contatos eletromagnéticos da Figura 13 são relativamente bem estabelecidos, principalmente nas posições superiores a 150 m.

Na representação na forma de ângulos de fase do campo magnético (Figura 15), os contatos geológicos não podem ser correlacionados às anomalias geofísicas em todas as frequências. Observa-se na figura, por exemplo, que o contato entre a Formação Barreiras e os sedimentos de mangue localizados às proximidades da posição 112,5 m pode ser muito bem delineado para as frequências entre 880 Hz e 110 Hz (Figura 15b), enquanto que os demais contatos são de difícil reconhecimento nesse intervalo de frequências. Por outro lado, os contatos localizados nas posições 287,5 m e 387,5 m podem ser mais facilmente identificados nas frequências entre 14080 Hz e 1760 Hz (Figura 15a).

Na figura 16 as medidas obtidas ao longo da transecta 1 foram representadas na forma de sondagens eletromagnéticas (SEM), plotando-se os valores de amplitude do campo magnético $|Z|$ (eixo horizontal) contra o período (eixo vertical), para cada estação. Esse tipo de representação permite visualizar o comportamento do ambiente geológico na direção vertical abaixo das posições de medida, uma vez que com o aumento do período a resposta geofísica provém de profundidades cada vez maiores. As observações feitas ao longo desta transecta permitiram estabelecer um padrão de comportamento para as curvas de sondagem, sendo possível

correlacioná-las com os sedimentos da Formação Barreiras e os sedimentos de mangue identificados no mapeamento geológico.

Comparando-se as SEM realizadas sobre a Formação Barreiras com aquelas realizadas sobre a sub-unidade do mangue, observa-se ao longo da transecta 1 que entre os períodos $7,1 \times 10^{-5}$ S (14080 Hz) e $5,681 \times 10^{-4}$ S (1760 Hz) sobre os sedimentos de mangue (que é mais condutivo) o $|Z|$ é maior (maior deflexão à direita) do que sobre o ambiente da Formação Barreiras. Há portanto uma nítida correlação entre valores mais elevados de $|Z|$ e a presença de material condutivo do mangue. Por outro lado, a redução no $|Z|$ para períodos maiores do que $5,681 \times 10^{-4}$ S observada nas SEM plotadas na sub-unidade de mangue sugerem uma passagem para ambiente mais resistivo, que pode ser tanto explicado pela existência de material arenoso, como por uma redução na salinidade da água contida nos sedimentos.

Sobre a Formação Barreiras (constitui material mais resistivo) observa-se que entre as estações 12,5 m e 87,5 m as curvas mostram pequenas inflexões à direita para períodos entre 10^{-4} e 10^{-3} S. Enquanto que, o intervalo entre 287,5 m e 387,5 m para o mesmo período as curvas tendem a se posicionar mais a esquerda mostrando valores de $|Z|$ menores que 1. Essa diferença no comportamento das curvas para uma mesma unidade geológica pode ser explicado através da Figura 13 que mostra uma discrepância entre os valores das componentes em-fase e quadratura neste mesmo intervalo (entre as posições. 12,5 m e 87,5 m), e que está provavelmente relacionada a variações de caráter litológico e geométrico dentro deste pacote.

Na presença dos sedimentos de mangue (material mais condutivo) observa-se que entre as estações 112,5 m - 262,5 m e 387,5 m - 487,5 m do perfil, as curvas mostram inflexões para a direita no intervalo de período compreendido entre 10^{-4} e 10^{-3} S, em que verifica-se um aumento nos valores de $|Z|$, sendo este padrão correlacionado aos sedimentos de mangue. Observa-se ainda, que a mudança no padrão é gradual quando se passa da Formação Barreiras para o mangue e deste de volta para a Formação Barreiras. Essa mudança é caracterizada pelo aumento ou pela diminuição gradual nos valores de $|Z|$ entre os períodos $7,1 \times 10^{-5}$ S e $2,84 \times 10^{-4}$ S, o que pode ter sido causada respectivamente pelo aumento ou pela diminuição gradual na espessura dos sedimentos de mangue.

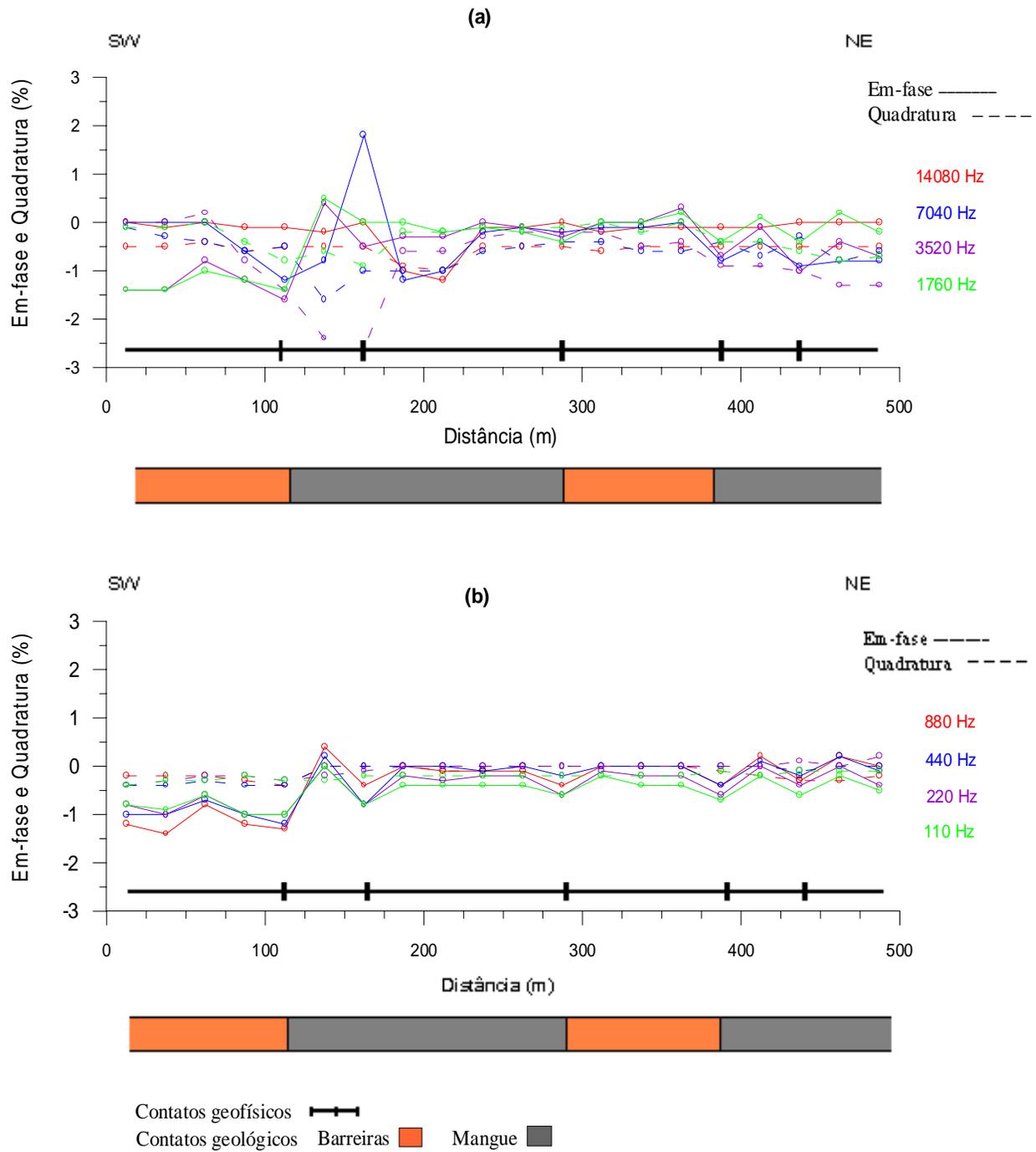


Figura 13 - Valores das componentes em-fase e quadratura do campo magnético para a Transecta 1: (a) frequências entre 14080 Hz-1760 Hz; (b) frequências entre 880 Hz-110 Hz.

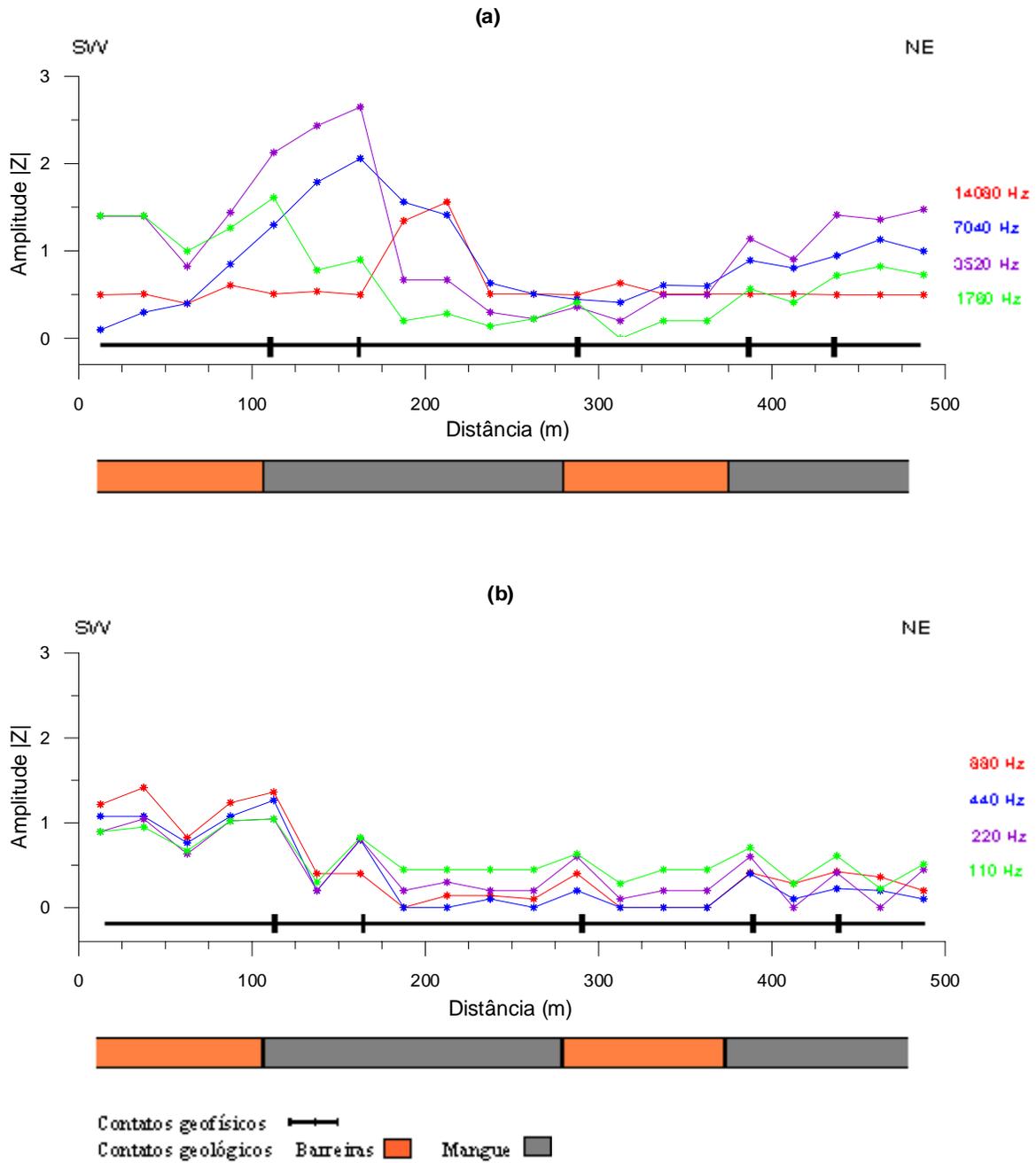


Figura 14 - Valores de intensidade do campo magnético para a Transecta 2: (a) frequências entre 14080 Hz-1760 Hz; (b) frequências entre 880 Hz-110 Hz.

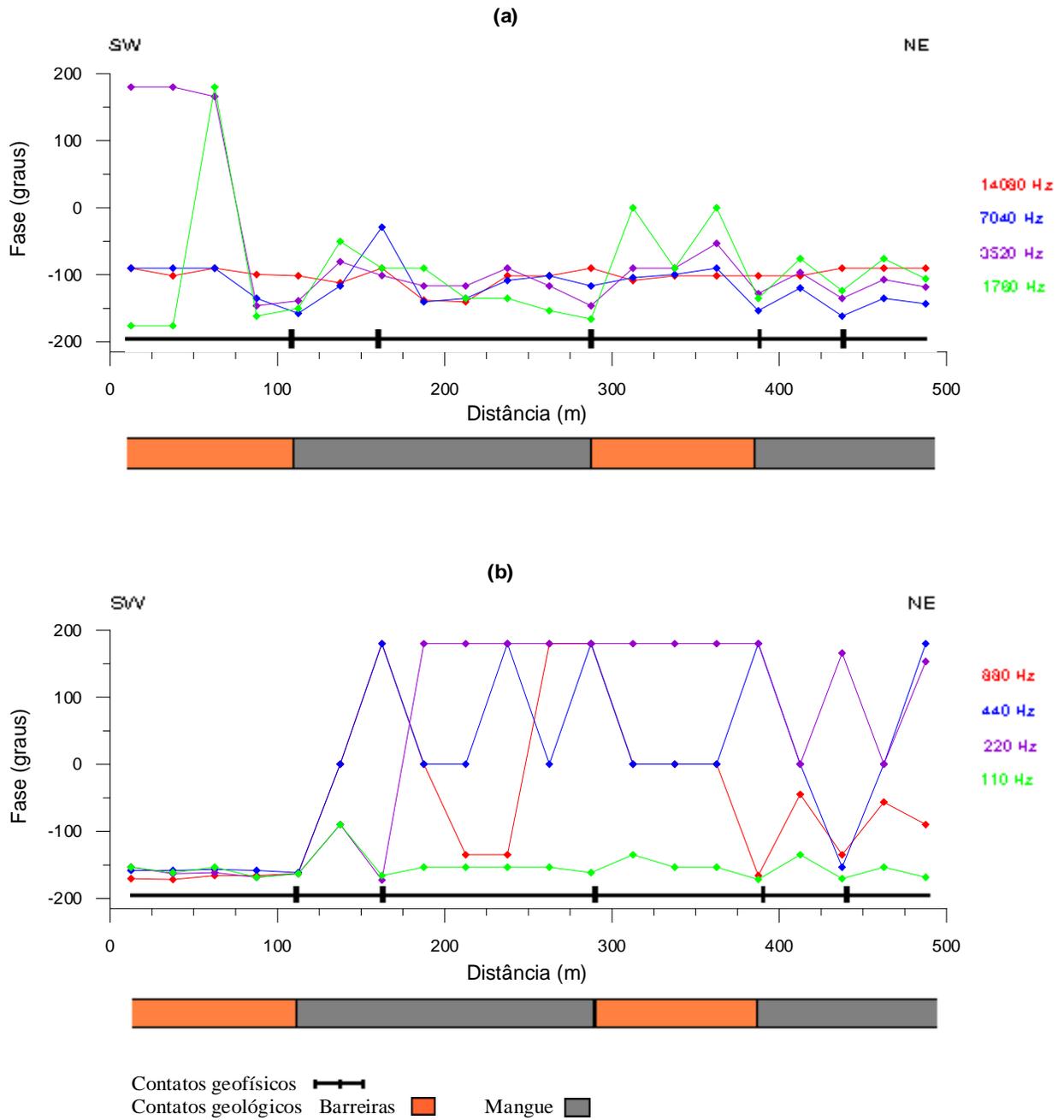


Figura 15 - Valores de fase do campo magnético para a Transecta 1: (a) frequências entre 14080 Hz-1760 Hz; (b) frequências entre 880 Hz-110 Hz.

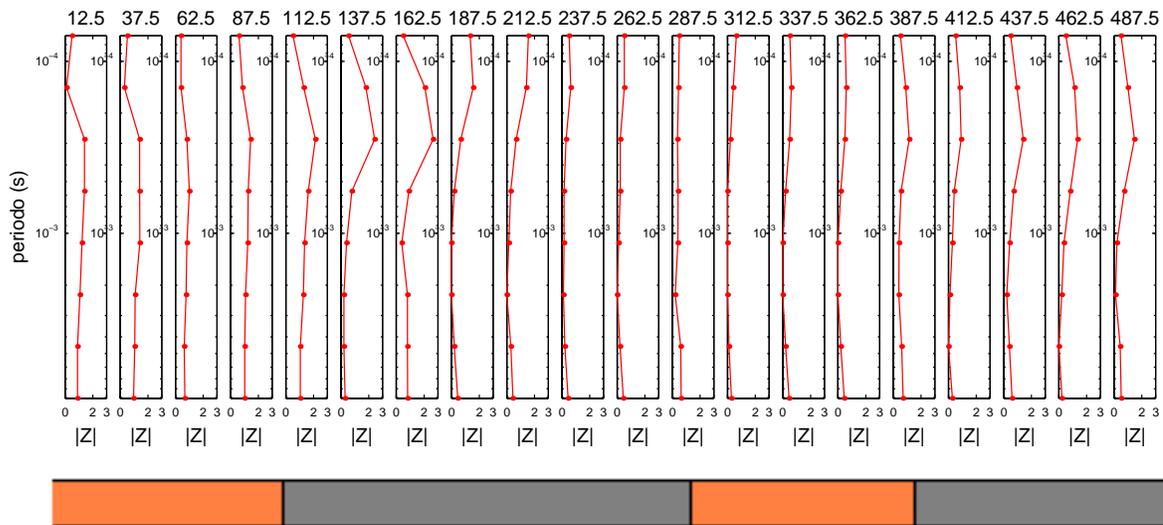


Figura 16- Representação das medidas da Transecta 1 na forma de sondagens eletromagnéticas (SEM).

6.2.2 - Transecta 2 (Pântano Salino)

A transecta 2 foi realizada a cerca de 9,7 Km da transecta 1 no local denominado Salina do Roque (Figuras 1 e 2), e encontra-se sobre a unidade morfoestratigráfica do Pântano Salino Externo. As observações geológicas de superfície ao longo desta transecta permitiram identificar apenas um contato lateral que separa os sedimentos lamosos do pântano salino dos sedimentos lamosos de mangue. Nesta transecta, o intervalo entre as medidas foi de 100 m.

As Figuras 17, 18 e 19 mostram respectivamente as respostas obtidas para as componentes em-fase e quadratura, amplitude e ângulo de fase do campo magnético. Observa-se também nas figuras o contato obtido através do mapeamento geológico e o inferido pelas medidas geofísicas.

As observações feitas ao longo da transecta 2 identificaram na posição 212,5 m inflexões nas componentes em-fase e quadratura (Figuras 17) e nas respostas de amplitude do campo magnético (Figura 18). Essas inflexões são bem evidentes em todas as frequências e correspondem ao contato entre os sedimentos lamosos de diferentes ambientes, identificados no mapeamento geológico. No entanto, a posição que marca essa mudança de valores encontra-se

um pouco deslocada em relação ao contato geológico identificado em superfície. Este deslocamento provavelmente ocorre porque a amostragem geofísica realizada com o espaçamento de 100 m não fornece uma amostragem tão detalhada da área, como aquela empregada nas medidas da transecta 1, ou devido haver um contato em subsuperfície.

Os valores de ângulo de fase do campo magnético plotados na Figura 19, não mostraram uma boa identificação do contato geológico observado em superfície. Somente, para as frequências entre 14080 Hz e 1760 Hz é possível identificar na estação 212,5 m uma leve inflexão nas curvas de respostas (Figura 19a). Para as frequências mais baixas, entre 880 Hz e 110 Hz, os contatos não são bem estabelecidos (Figura 19b).

A representação dos dados da transecta 2 na forma de SEM mostrada na Figura 20 (valores de amplitude do campo magnético $|Z|$ contra período), evidenciam um pequeno aumento na amplitude do $|Z|$ (períodos entre 10^{-4} e 10^{-3} S) na região do perfil realizada sobre a zona de pântano. A pequena diferença no $|Z|$ quando se passa dos sedimentos lamosos de pântano para os sedimentos de mangue é provavelmente porque os sedimentos de pântano salino são mais condutivos, devido a alta salinidade da água presente nos interstícios desses sedimentos (apresentam menor frequência de inundação, havendo cristalização de sal durante o verão), fazendo com que esses sedimentos apresentem um padrão similar ao dos materiais condutivos do mangue.

A figura 20 mostra valores $|Z|$ mais altos do que o observado na figura 16, sugerindo um ambiente mais salino (condutivo). Verifica-se ainda, na parte basal dos perfis (períodos maiores que 10^{-3} S) que: (a) os valores de $|Z|$ são maiores do que os observados nos sedimentos da Formação Barreiras (Figura 16), sugerindo que a Formação Barreiras não ocorre ao longo da transecta 2 na profundidade investigada pelo método e sim a deposição da Formação Pirabas encontrada a 12 m de profundidade por Souza Filho et al. (no prelo); (b) esses valores são menores do que na parte superior indicando ambiente mais resistivo.

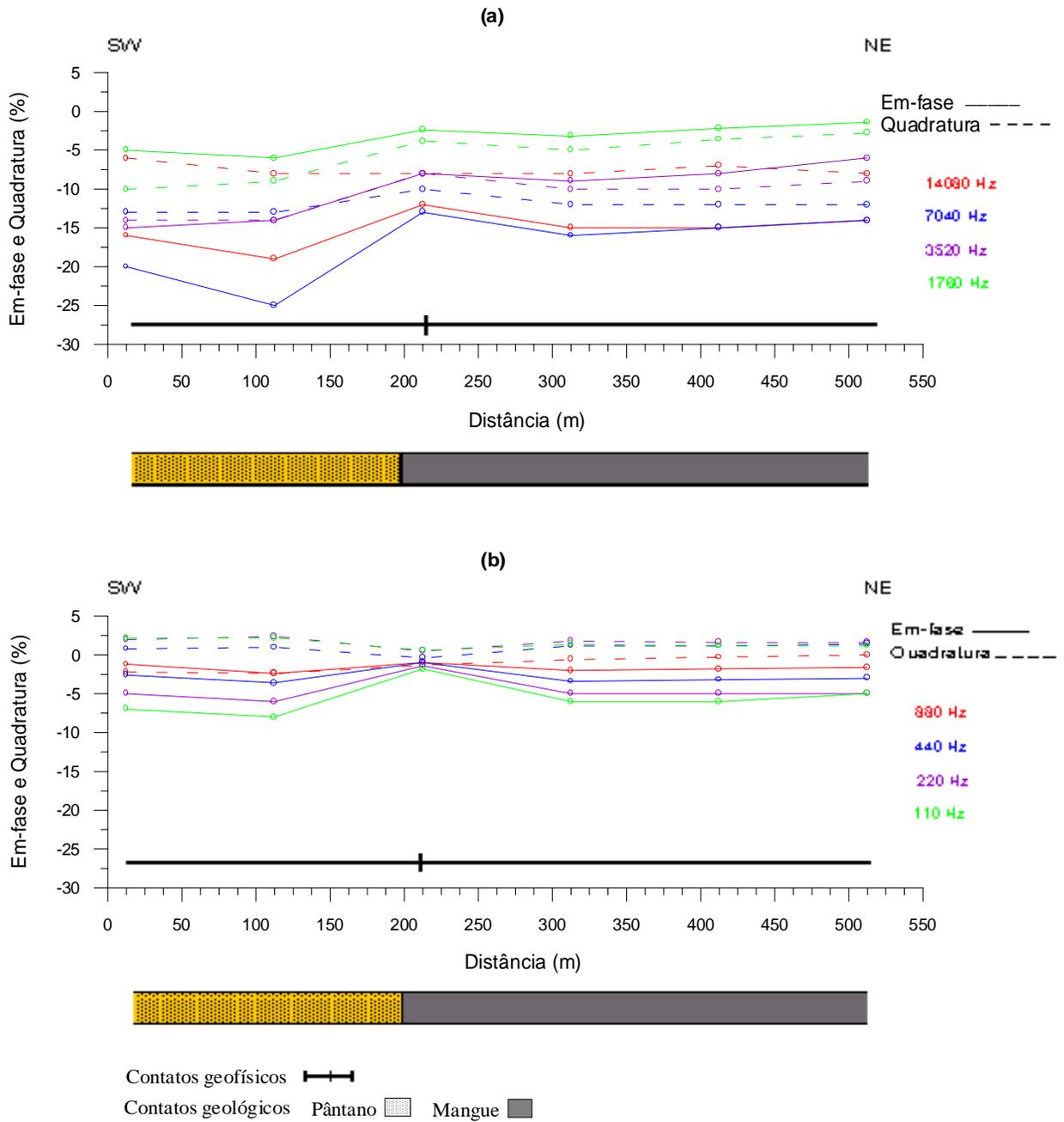
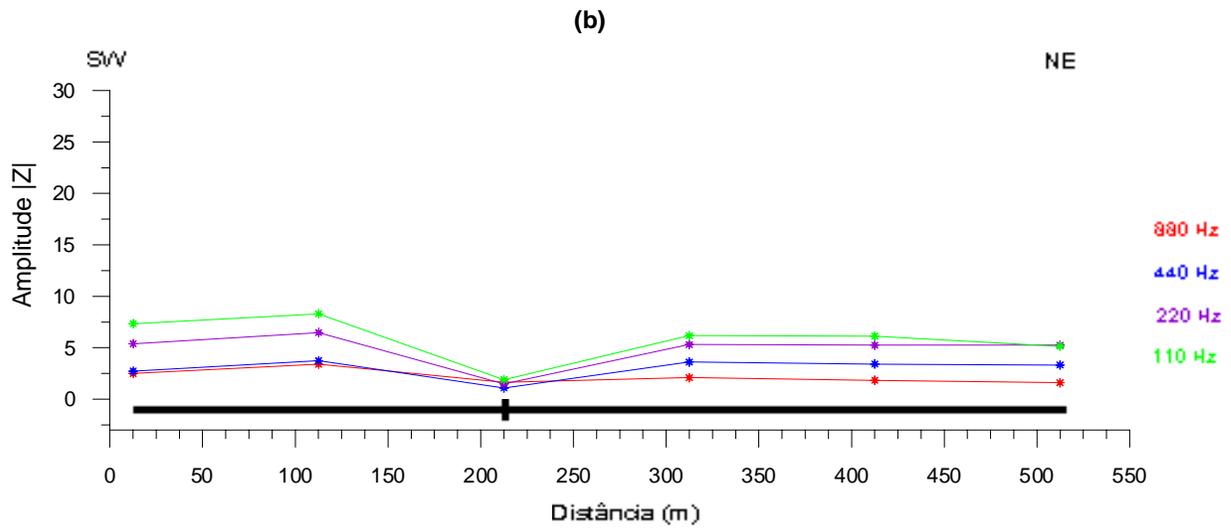
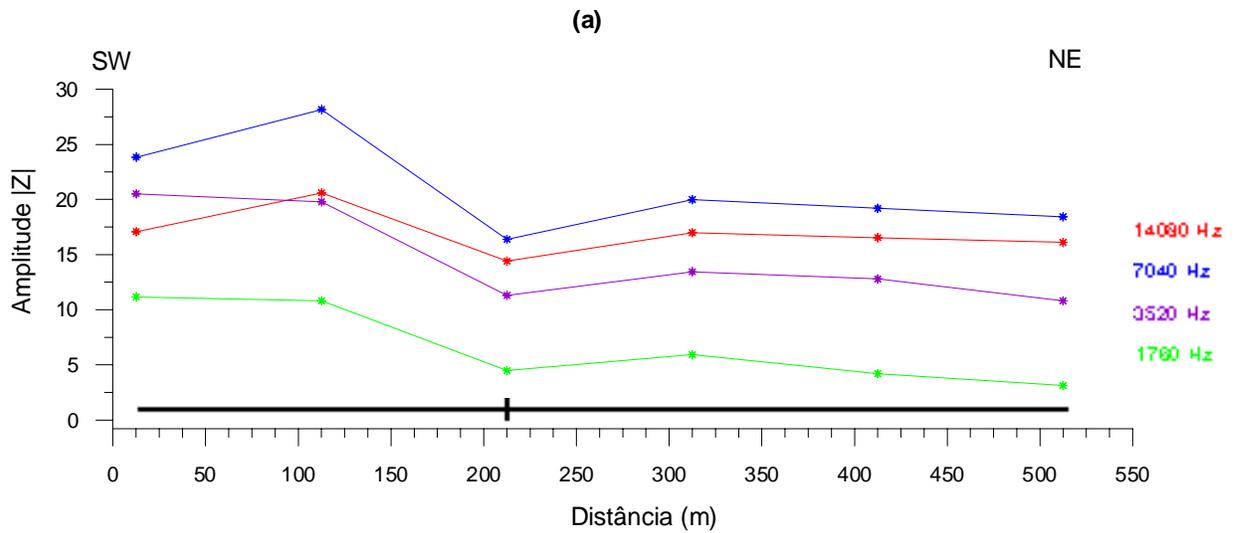


Figura 17 - Valores das componentes em-fase e quadratura do campo magnético para a Transceta 2: (a) frequências entre 14080 Hz-1760 Hz; (b) frequências entre 880 Hz-110 Hz.



Contatos geofísicos ————

Contatos geológicos Pântano Mangue

Figura 18 - Valores de intensidade do campo magnético para a Transecta 2: (a) frequências entre 14080 Hz - 1760 Hz; (b) frequências entre 880 Hz-110 Hz.

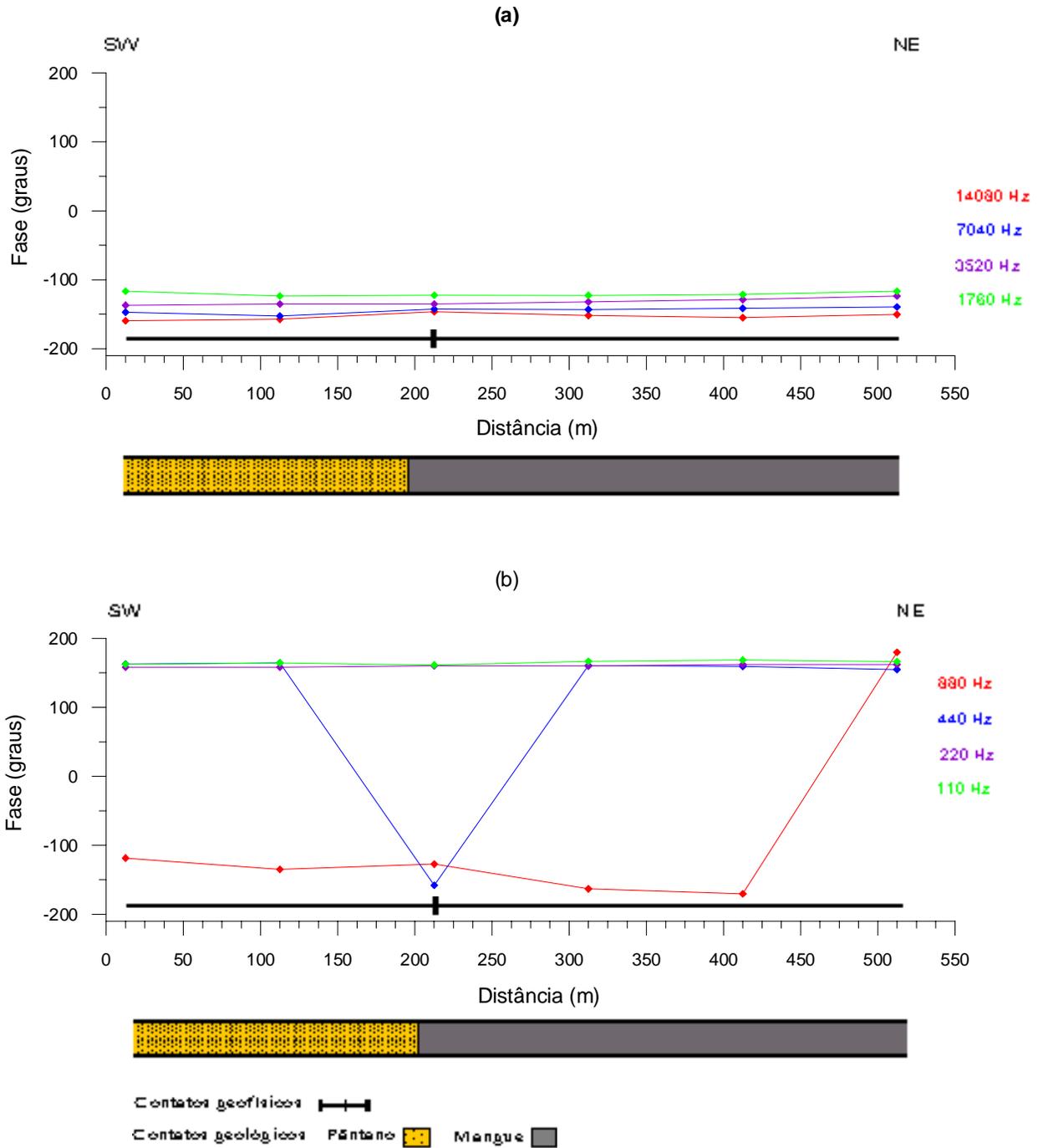


Figura 19 - Valores de fase do campo magnético para a Transecta 2: (a) frequências entre 14080 Hz-1760 Hz; (b) frequências entre 880 Hz-110 Hz.

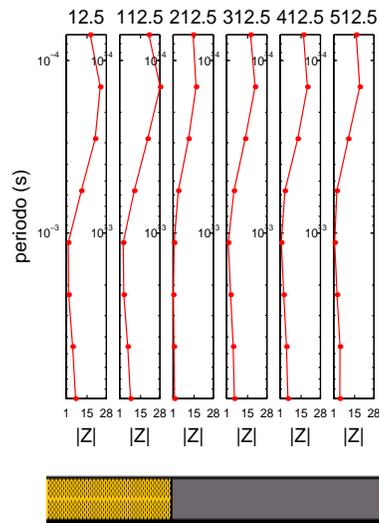


Figura 20 - Representação das medidas da Transecta 2 na forma de sondagens eletromagnéticas (SEM).

6.2.3 – Transecta 3 (Chenier)

Este caminhamento foi realizado à aproximadamente 12,2 Km da transecta 2, na localidade do Bonifácio (Figuras 2). O perfil inicia sobre a unidade morfoestratigráfica chenier e finaliza sobre os sedimentos de mangue. As medidas, neste perfil, foram realizadas a cada 100 m.

As repostas eletromagnéticas deste perfil encontram-se representadas nas Figuras 21 (na forma de perfis de fase e quadratura), 22 (na forma de perfis de amplitude) e 23 (na forma de perfis de ângulo de fase). Nas figuras observam-se ainda o contato evidenciado no mapeamento geológico de superfície e o obtido através das respostas geofísicas.

Na Figura 21 é mostrada na posição 712,5 m do perfil uma mudança brusca nos valores das componentes em-fase e quadratura, principalmente para as frequências maiores do que 1760 Hz (Figura 21a). Esta mudança nos valores coincide com a passagem dos sedimentos arenosos (chenier) para os sedimentos de mangue evidenciada no mapeamento geológico. Uma segunda mudança brusca ocorre na posição 312,5 m, dentro da zona mapeada em superfície como areia. Como o padrão das medidas observada entre as posições 12,5 m e 312,5 m é similar àquele observado entre 712,5 m e 1012,5 m é possível que em profundidade o mesmo tipo de material geológico ocorra nesse intervalo, isto é, sedimentos de mangue. Isso sugere uma diminuição na espessura da camada arenosa relacionada a porção distal de leque de lavagem.

Ainda na Figura 21 observa-se entre as posições 12,5 m e 312,5 m do perfil um comportamento bastante anômalo, que ocorre dentro da faixa dos sedimentos arenosos. Esta

feição é similar àquela encontrada em corpos condutivos e possui centro às proximidades da estação de 200 m, bem identificada nas frequências superiores a 1760 Hz (Figura 18a). A anomalia pode ter sido causada por um aumento da salinidade da água dos poros dos sedimentos nesse local, ou uma diminuição na espessura do depósito arenoso, sobreposto a sedimentos lamosos de mangue.

A Figura 22 mostra as medidas eletromagnéticas na forma de amplitude do campo eletromagnético. As respostas obtidas neste tipo de representação forneceu uma boa correlação entre a anomalia geofísica e as observações do mapeamento geológico de superfície, além corroborarem com as descrições feitas para a Figura 21.

Os perfis de respostas na forma de ângulo de fase (Figura 23), também permitiram uma visualização dos limites entre as unidades morfoestratigráficas (chenier-mangue), embora não tão marcante quanto os perfis das Figuras 21 e 22. Essas mudanças encontram-se melhor delineadas para as frequências entre 14080 Hz e 1760 Hz às proximidades das posições 321,5 m e 712,5 m (Figura 23a).

Na figura 24 encontram-se plotados os valores de amplitude $|Z|$ contra período (SEM) para cada posição de medida da transecta 3. A análise desta figura permite reconhecer os mesmos padrões geofísicos e contatos identificados na representação dos dados mostrada na Figura 21 (componente em-fase e quadratura do campo) e que correlacionam-se parcialmente com o mapeamento geológico de superfície (há um contato adicional indicado pelos dados geofísicos).

Para as estações entre 12,5 m e 212,5 m (Figura 24) que ocorrem sobre os sedimentos arenosos do mapeamento geológico, as curvas de sondagem neste intervalo mostram inflexões para a direita (período entre 10^{-4} e 10^{-3} S), que é o padrão de resposta que vem sendo observado sobre os sedimentos de mangue nos outros perfis, não correspondendo, portanto, ao padrão característico esperado para os sedimentos arenosos, isto vem corroborar a idéia da diminuição de espessura da camada arenosa em direção a SW, sendo a resposta eletromagnética relacionada aos depósitos de mangue subjacente.

Já as estações entre 312,5 m e 712,5 m, as curvas mostram valores de $|Z|$ menores que 5 em todo o intervalo de período, sugerindo um ambiente mais resistivo e que pode ser correlacionado com os sedimentos arenosos. A partir da estação 812,5 m as curvas mostram inflexões para direita (períodos entre 10^{-4} e 10^{-3} S), correspondendo ao padrão observado nos sedimentos de mangue (material mais condutivo).

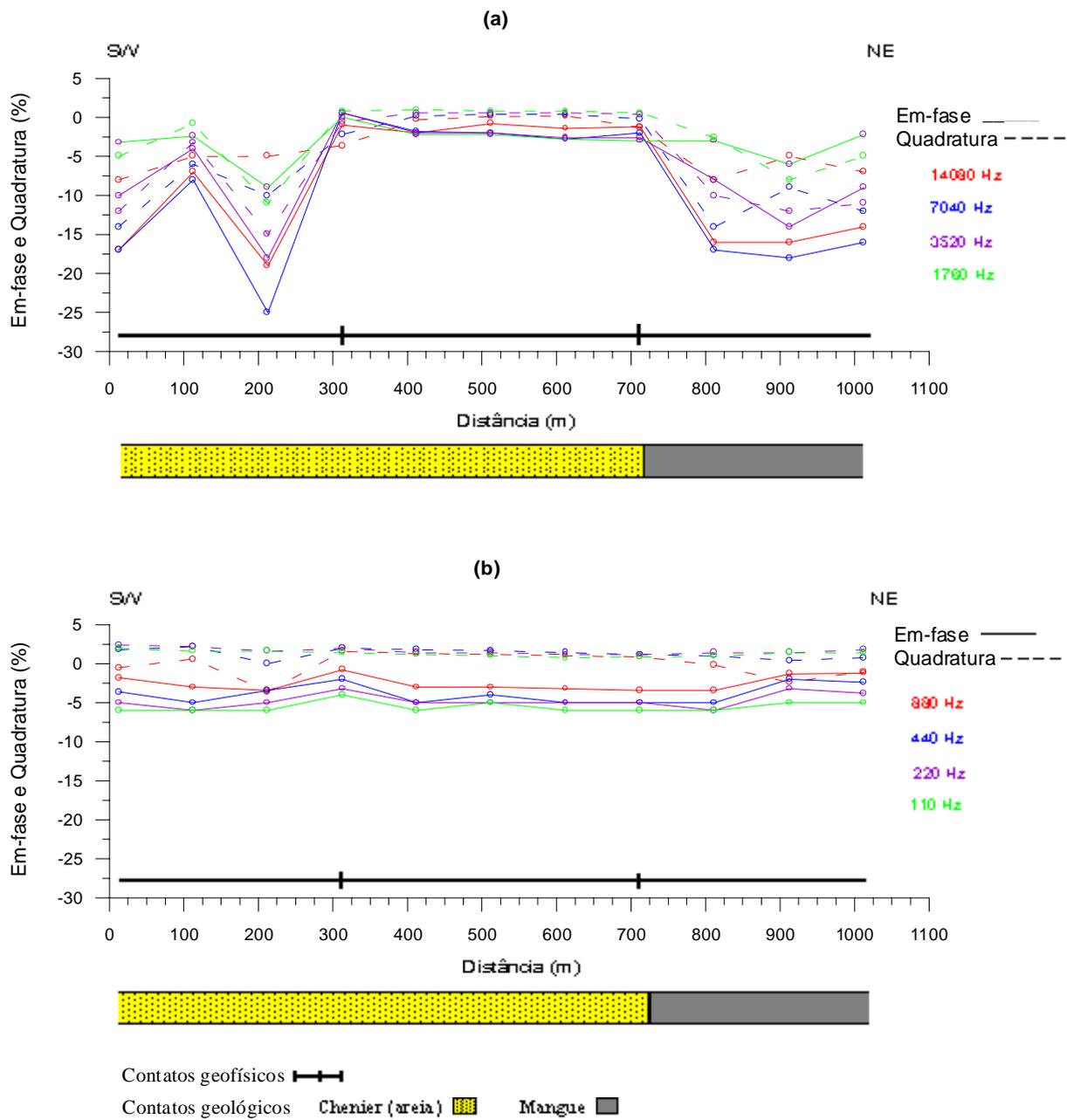


Figura 21 - Valores das componentes em-fase e quadratura do campo magnético para a Transecta 3:
 (a) frequências entre 14080 Hz-1760 Hz; (b) frequências entre 880 Hz-110 Hz.

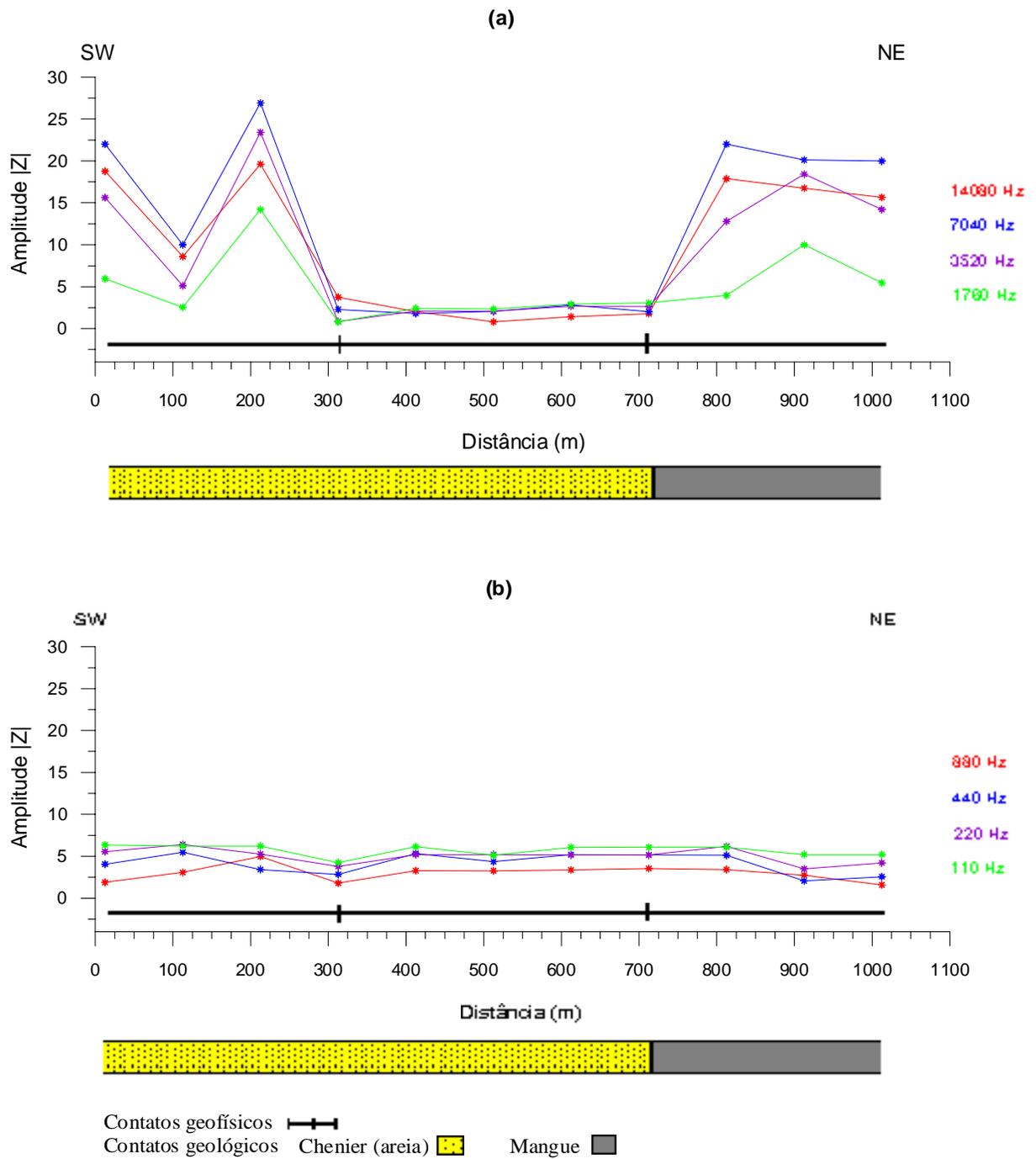


Figura 22 - Valores de intensidade do campo magnético para o perfil 3: (a) frequências entre 14080 Hz - 1760 Hz; (b) frequências entre 880 Hz-110 Hz. amplitude

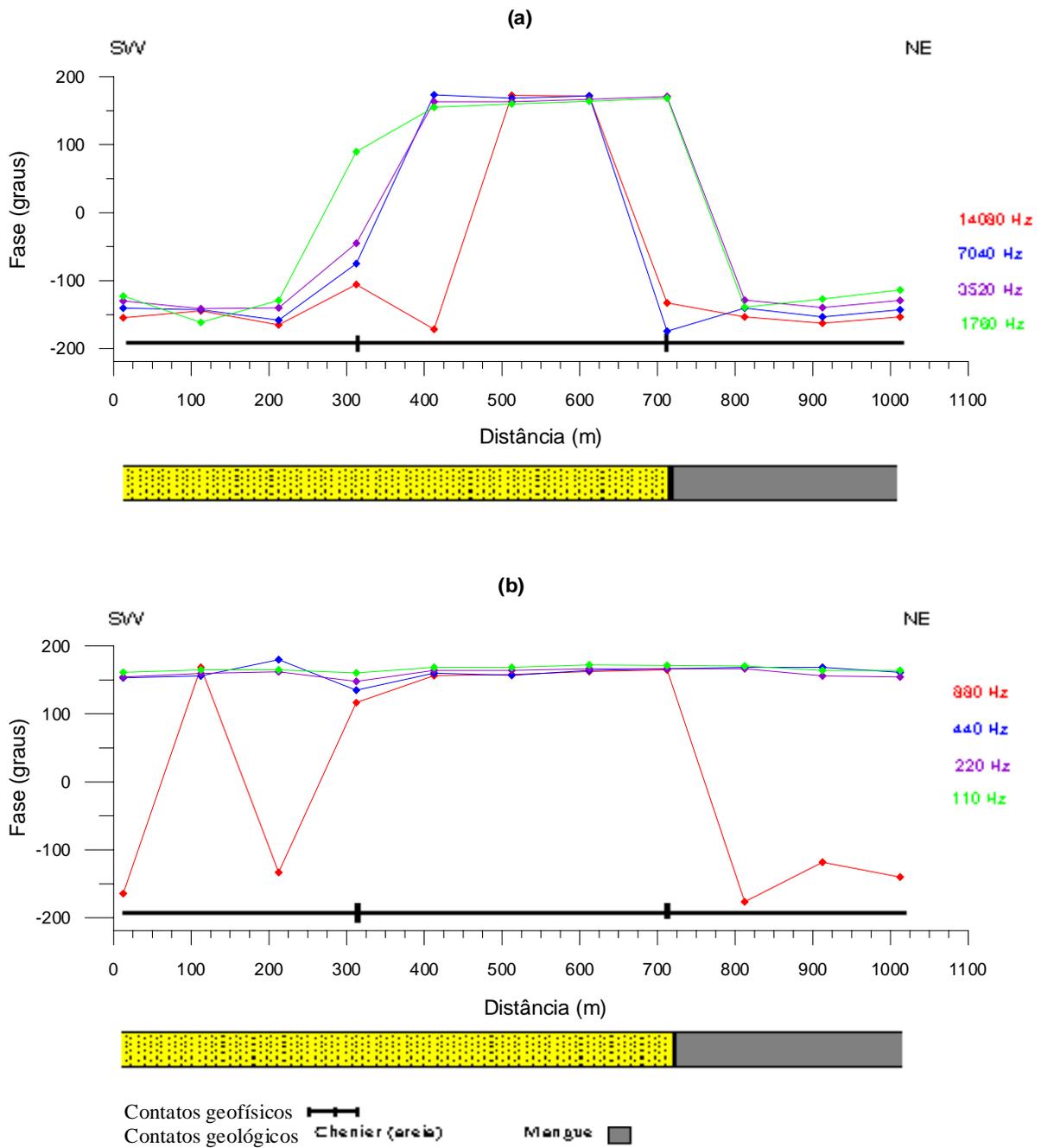


Figura 23 - Valores de fase do campo magnético para a transectal 3: (a) frequências entre 14080 Hz-1760 Hz; (b) frequências entre 880 Hz-110 Hz.

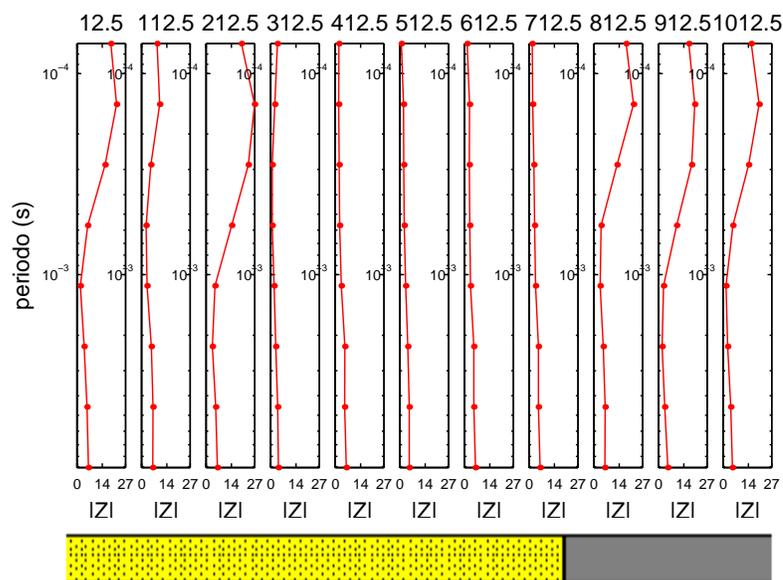


Figura 24 - Representação das medidas da Transecta 3 na forma de sondagens eletromagnéticas (SEM).

6.2.4 - Transecta 4 (Praia)

Esta é a transecta mais a norte na área estudada, sendo realizado ao final da estrada que liga Bragança à Ajuruteua, na praia de Ajuruteua (Figuras 1 e 2). Ele se inicia na praia e percorre cerca de 270 m de extensão em direção ao continente sobre as unidades morfoestratigráficas de praia e duna. O intervalo de medidas foi de 25 m.

As respostas obtidas são apresentadas na forma de perfis das componentes em-fase e quadratura do campo magnético (Figura 25), amplitude do campo magnético (Figura 26) e ângulo de fase do campo magnético (Figura 27).

Nas figuras 25 e 26 verificam-se que no intervalo entre as estações 12,5 m e 137,5 m do perfil as curvas apresentam um comportamento anômalo caracterizado por diversas oscilações, principalmente para as frequências entre de 14080 Hz e 1760 Hz (Figuras 25a e 26a), e que a partir da posição 137,5 m as curvas tendem a ter um comportamento suave, essa posição (137,5 m) marca o contato entre as unidades praia e duna. Ainda nas Figuras 25 e 26 observa-se uma feição anômala característica de corpos condutivos na posição 87,5 m, para todas as frequências. Este comportamento anômalo pode estar relacionado com a cunha salina.

Uma segunda feição anômala também pode ser observada nas Figuras 25 e 26 na posição 187,5 m. Essa feição é bem delineada apenas nas frequências menores que 880 Hz (Figuras 25b e

26b), o que indica ser ela relacionada a uma fonte localizada não muito próxima da superfície do terreno e, portanto, invisível ao mapeamento geológico.

A representação sob a forma de ângulo de fase é mostrada na Figura 27, onde se pode observar a feição anômala evidenciada nas Figuras 25 e 26. Essa feição é bem delineada para as frequências entre 14080 Hz e 3520 Hz, enquanto que para as frequências menores que 3520 Hz ela não é evidenciada (Figura 27a).

Na representação na forma de sondagem eletromagnética (Figura 28), são mostrados os valores de amplitude do campo magnético $|Z|$ (eixo horizontal) contra o período (eixo vertical), para cada posição de medida da transecta 4.

Sobre os sedimentos de praia os valores de $|Z|$ são maiores do que os observados nos perfis anteriores, indicando que estes sedimentos encontram-se em um ambiente bastante condutivo, devido a alta concentração de água salgada nos poros desses sedimentos.

Na Figura 28 observa-se ainda, que as curvas de sondagens possuem o mesmo padrão de resposta ao longo de quase toda extensão da transecta 4. Na porção superior das SEM (períodos entre $7,1 \times 10^{-5}$ S e 10^{-3} S), as curvas mostram valores de $|Z|$ entre 0 a 20, enquanto que na porção inferior os valores estão entre 30 e 40. A exceção ocorre na estação 12,5 m, em que os valores de $|Z|$ mostram-se bem elevados para os períodos entre $7,1 \times 10^{-5}$ S e $5,681 \times 10^{-4}$ S, provavelmente devido à influência da cunha salina.

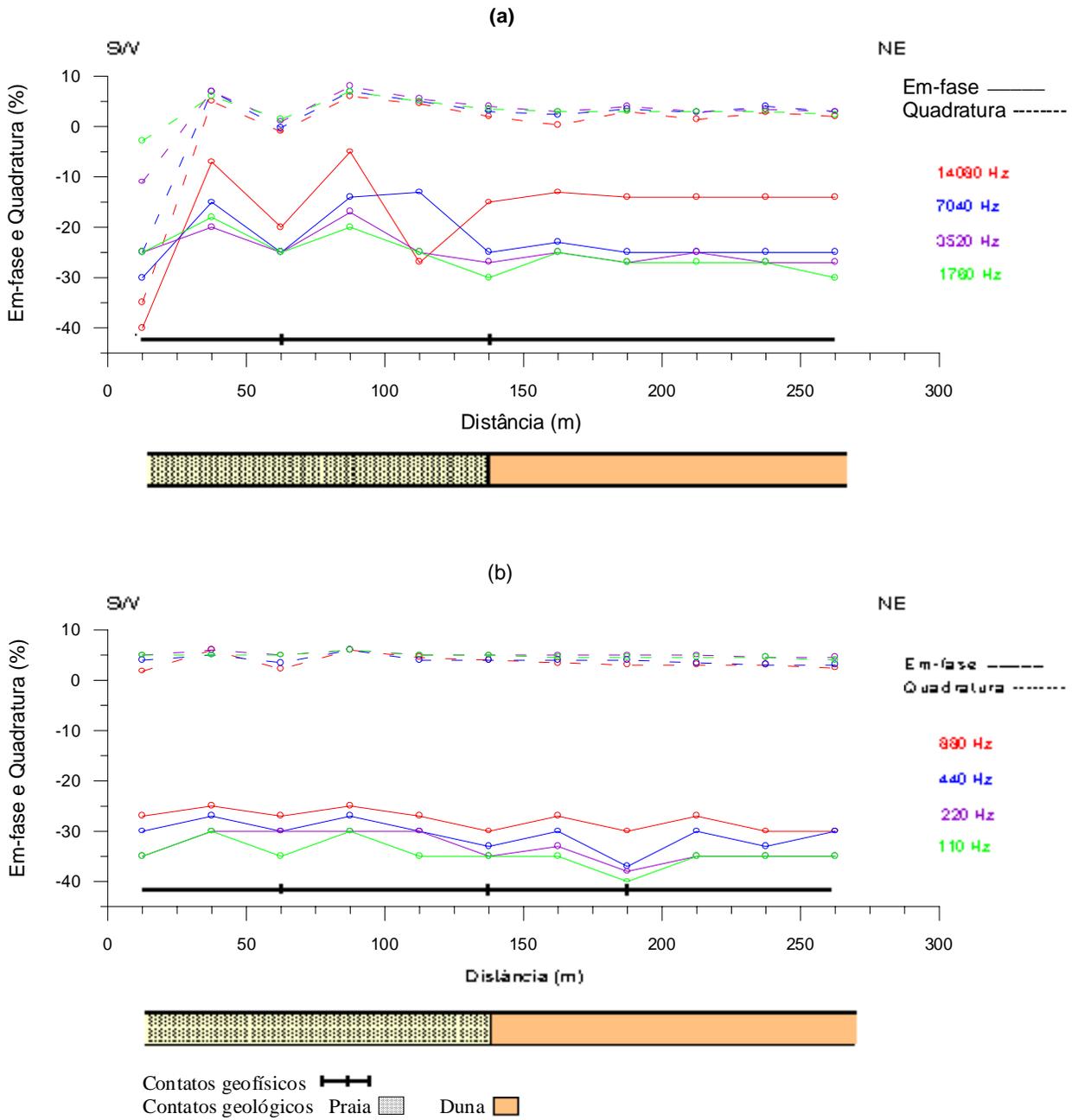
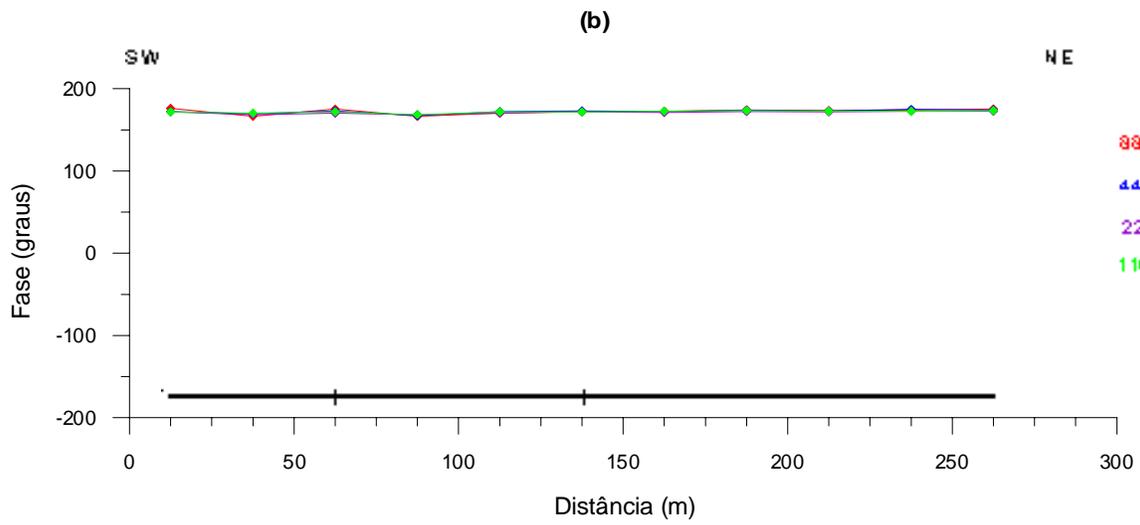
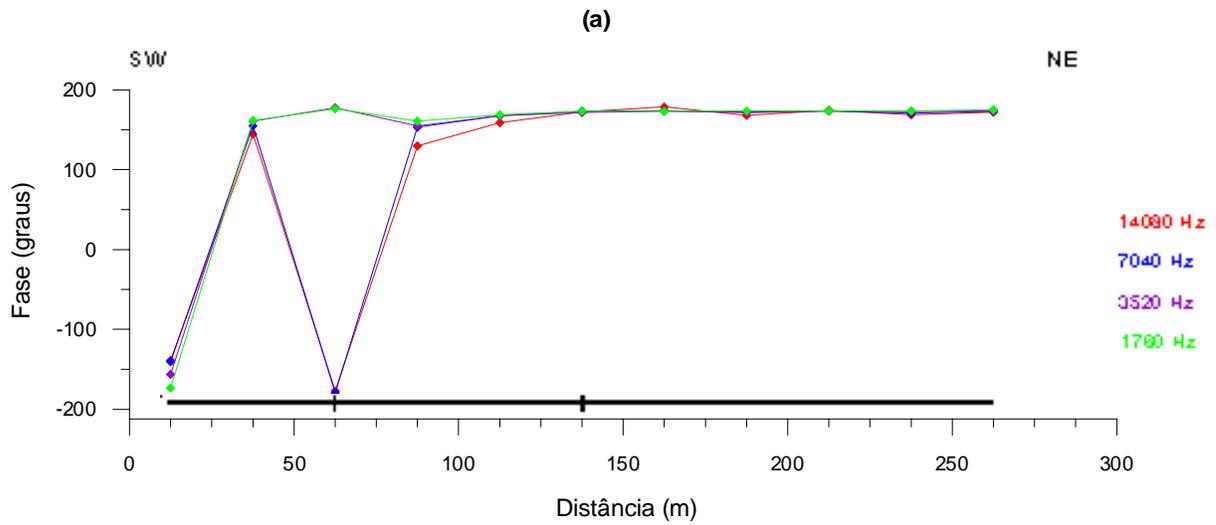


Figura 25 - Valores das componentes em-fase e quadratura do campo magnético para a Transecta 4:
 (a) frequências entre 14080 Hz-1760 Hz; (b) frequências entre 880 Hz-110 Hz.



Contatos geofísicos 
 Contatos geológicos Praia  Duna 

Figura 27 - Valores de fase do campo magnético para a Transectal 4: (a) frequências entre 14080 Hz-1760 Hz; (b) frequências entre 880 Hz-110 Hz.

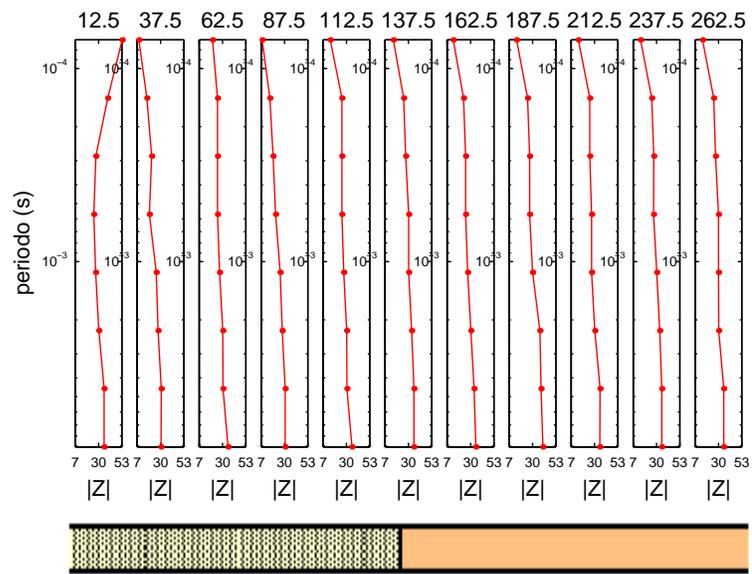


Figura 28 - Representação das medidas da Transecta 4 na forma de sondagens eletromagnéticas (SEM).

7 - CONCLUSÕES

A caracterização do cenário geológico da Planície Costeira Bragantina é importante para se conhecer melhor a dinâmica de funcionamento dos sistemas deposicionais costeiros, os quais são uma grande fonte de recursos da biodiversidade.

As aplicações dos métodos geofísicos elétrico e eletromagnético no estudo das unidades sedimentares costeiras descritas nesta dissertação foram uma tentativa de se avaliar a efetividade dos métodos neste tipo de ambiente, para auxiliar no mapeamento geológico sem perturbar o meio ambiente (rico em manguezais), agilizando o trabalho a custos mais baixos.

Os resultados da integração dos dados geofísicos e geológicos permitiram elaborar as seguintes conclusões:

O emprego de sondagens elétricas verticais para a investigação das unidades da Planície Costeira Bragantina, de um modo geral, não mostrou uma resposta satisfatória em termos das profundidades investigadas, que ficaram limitadas a uma profundidade máxima da ordem de 20 metros. A baixa profundidade de investigação das sondagens elétricas verticais se deveu ao fato do ambiente estudado ser altamente condutivo, o que dificultou a penetração da corrente elétrica. Por outro lado, apesar das sondagens elétricas não terem contribuído, da maneira esperada, no que diz respeito à profundidade de investigação, elas se mostraram eficientes para estabelecer valores de resistividade e espessura dos horizontes rasos, cuja profundidade de 20 m já representa o contato Terciário-Quaternário na Planície Costeira Bragantina.

A utilização do método eletromagnético (sistema slingram) no estudo das unidades costeiras mostrou-se muito eficiente. Por exemplo, a representação dos dados eletromagnéticos na forma de perfis das componentes em-fase e quadratura permitiu a identificação de todos os contatos entre as unidades estratigráficas identificados no mapeamento geológico. Os contatos geofísicos mostram-se bem delineados e de fácil reconhecimento em todo o intervalo de frequências utilizado. Neste tipo de representação ainda foi possível identificar contatos entre as unidades morfoestratigráficas que não foram visualizados no mapeamento geológico. Este fato pode ser observado nas Figuras 21 (Transecta 3) e 25 (Transecta 4). Também, as representações na forma de amplitude e fase do campo magnético permitiram correlacionar os contatos geológicos e os inferidos pelas medidas geofísicas, embora não tão claramente quanto os observados nos perfis das componentes em-fase e quadratura.

Por outro lado, a representação dos dados eletromagnéticos na forma de amplitude $|Z|$ contra período (sondagens eletromagnéticas) possibilitou visualizar o comportamento das unidades morfoestratigráficas na direção vertical e permitiu estabelecer os seguintes padrões de comportamento das curvas (assinaturas geofísicas) para os depósitos da Planície Costeira Bragantina: (a) nos sedimentos da Formação Barreiras (material mais resistivo) as curvas de sondagens tendem a se posicionar mais à esquerda como resultado dos baixos valores de $|Z|$; (b) nos sedimentos de mangue (mais condutivos) as curvas de sondagem tendem a ter uma maior deflexão para a direita mostrando os mais elevados valores de $|Z|$; (c) na presença dos sedimentos arenosos (mais resistivos) da unidade chenier, as curvas mostram um comportamento suave, com valores do $|Z|$ menores que 5 em todo o intervalo de frequências amostrados, conforme observado no Transecta 3; (d) na Transecta 4, realizado sobre os sedimentos de praia e duna, os valores do $|Z|$ são bem mais altos (entre 30 e 40), principalmente na porção inferior das SEM, indicando que esses sedimentos são bastante condutivos, devido a presença d água do mar em seus interstícios.

Pôde-se observar ainda que o espaçamento de amostragem igual a 50 m é mais satisfatório, pois fornece uma amostragem mais detalhada da área. Com o espaçamento de 100 m observou-se um pequeno deslocamento entre as posições dos contatos inferidos com a geofísica e os contatos obtidos com o mapeamento geológico. Este fato pode ser observado no Transecta 2 (Figuras 17, 18 e 19).

Finalmente, é importante ressaltar que o método eletromagnético foi capaz de fornecer informações detalhadas à cerca da geologia de superfície e subsuperfície de maneira rápida e com menores custos do que a investigação através de furos de sondagens. Para comparação, cita-se que um furo de sondagem de 14 m de profundidade leva cerca de três dias para ser concluído, enquanto que em um levantamento eletromagnético pode-se investigar cerca de 5 a 8 Km por dia, dependendo do espaçamento entre as medidas (25m – 100 m). No entanto não se deve descartar a importância dos furos de sondagens, pois eles permitem diminuir a ambigüidade inerente a interpretação geofísica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAI, M.; TRUCKENBRODT, W.; NOGUEIRA, A. C. R.; GOÉS, A.M; ROSSETTI, D. F. 1994. Novos dados sobre a estratigrafia e ambiente deposicional dos sedimentos Barreiras, NE do Pará. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 4., Belém,1994. **Anais**. Belém, SBG - Núcleo Norte. P.185-187.
- ARAI, M.;UESUGUI, N.; ROSSETTI, D. F.; GOÉS, A.M.1988. Considerações sobre a idade do Grupo Barreiras no nordeste do Estado do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35., Belém, 1988. **Anais**. Belém, SBG. V.2, p. 738-752.
- ARANHA, L. G. F.; LIMA, H. P.; SOUZA, J. M. P.; MARINHO, R. K. 1990. Origem e evolução das bacias de Bragança-Viséu, São Luís e Ilha Nova. In: RAJA GABAGLIA, G. P. & MILANI, E. J. **Origem e Evolução de Bacias Sedimentares**. Rio de Janeiro, PETROBRÁS. p. 221-233.
- COSTA, J. B. S. & HASUI, Y. 1997. Evolução geológica da Amazônia. In: COSTA, M. L. & ANGÉLICA, R. S. (ed) **Contribuições a Geologia da Amazônia**. Belém, FINEP/SBG, p. 15-90.
- COSTA, J. B. S.; BORGES, M. S.; BERMEGUY, R. L.; FERNANDES, J. M. G.; COSTA JR.,P. S.; COSTA, M. L.. 1993. Evolução cenozóica da região de salinópolis, Nordeste do estado do Pará. **Geociências**, 12: 353-372.
- COSTA, J. L.; ARAÚJO, A. A. F.; VILLAS BOAS, J. M.; FARIAS, C. A. S.; SILVA NETO, C. S.; WANDERLEY FILHO, V. J. R. 1977. **Projeto Gurupi**, Belém, DNPM/CPRM. V.1, 258p.

- FRANZINELLI, E. 1982. Contribuição a geologia da costa do Estado do Pará (entre as baías de Curuçá e Maiaú). In: SIMPÓSIO MAT. BRAS., 4., Manaus. 1982. **Atas**. Manaus. P. 305-322.
- FRANZINELLI, E. 1992. Evolution of the geomorphology of coast of the State of Pará, Brazil. In: PROST, M.T. **Évolution des littoraux de guyane et de la Zone Caraïbe Méridionale pendant le Quaternaire**. Paris, ORSTOM. P. 203-230.
- GÓES, A. M.; ROSSETTI, D. F.; NOGUEIRA, A. C. R.; TOLEDO, P. M. 1990. Modelo deposicional preliminar da Formação Pirabas no nordeste do Estado do Pará. **Boletim do Museu paraense Emílio Goeldi**, Belém, 2: 3-15. Série Ciências da Terra.
- IGREJA, H. L. S. 1991. **Aspectos tectono-sedimentares do Fanerozóico do nordeste do Pará e nordeste do Maranhão, Brasil**. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 191p. Tese (Doutorado em Geologia) – Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Centro de Geociências, UFPA, 1991.
- MARTORANO, L. G.; PERREIRA, L. C.; CÉZAR, E. G. M.; PEREIRA, I. C. B. 1993. Estudos Climáticos do Estado do Pará, Classificação Climática (KÓPPEN) e Deficiência Hídrica (THORNTHWHITE, MATHER). **Belém, SUDAM/EMBRAPA, SNLCS. 53p.**
- MAURY, C. J. 1925. **Fosséis terciários do Brasil**. Rio de Janeiro, Serviço Geológico Mineralógico do Brasil. p. 4-35. (Monografia, 4)
- ORELLANA, E., 1972. Prospection geoelectrica en corriente continua. **Parainfo S.A.**
- PALACKY, G. J. 1981. **The airborne electromagnetic methods as tool of geological mapping**. *Geophysical Prospecting* **29**: 60-88.
- PALACKY, G. J. 1988. **Resistivity Characteristics of geologic targets**. In: NABIGHIAN, M.N. (ed): *Electromagnetic Methods in Applcad. Geophysics – Theory*. **Tulsa: SEG, 1: 53-129.**
- PALACKY, G. J. 1991. **Application of the multifrequency horizontal-loop EM method in overburden investigations**. *Geophysical Prospecting* **39**, 1061-1082.
- PALACKY, G. J. & KADEKARU, K. 1979. **Effect of tropical weathering on electrical and electromagnet measurements**. *Geophysics*, **44**: 69-88.

- ROSSETTI, D. F.; TRUCKENBRODT, W.; GOÉS, A. M. 1989. **Estudo paleoambiental e estratigráfico dos sedimentos Barreiras e Pós-Barreiras na região Bragantina, Nordeste do Pará.** Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Belém, 1: 25-74. Série Ciências da Terra.
- SANTOS, V. F. 1996. **Estratigrafia Holocênica e Morfodinâmica Atual da Planície Costeira da Ilha de Algodal e Marudá.** Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 138p. Tese (Mestrado em Geologia) – Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, UFPA, 1996.
- SEIGEL, H. O. & PITCHER, D. H. 1978. Mapping earth conductivities using a multifrequency airborne electromagnetic system. Geophysics, 43: 563-575.
- SILVA, M. S. 1996. **Morfoestratigrafia e Evolução da Planície Costeira de Salinópolis. NE do Estado do Pará.** Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 142p. Tese (Mestrado em Geologia) - Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, UFPA, 1996.
- SOUZA FILHO, P.W.M. 1995. **Influência das Variações do Nível do Mar na Morfoestratigrafia da Planície Costeira Bragantina (NE do Pará) durante o Holoceno.** Belém, Universidade federal do Pará, 123 p. Tese de Mestrado.
- SOUZA FILHO, P. W. M. 2000. **Avaliação e aplicação de dados de sensores remotos no estudo de ambientes costeiros tropicais úmidos dominados por macromarés.** Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 219.p. Tese (Doutorado em geologia) - Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, UFPA, 2000.
- SOUZA FILHO, P. W. M. & EL-ROBRINI, M. 1996. Morfologia, processos de sedimentação e litofácies dos ambientes morfosedimentares da Planície Costeira Bragantina- Nordeste do Pará (Brasil). Geonomos, 4:1-16.
- SOUZA FILHO, P. W. M.; COHEN, M. C. L.; LARA, R. J.; KOCH, B.; BEHLINY, H. no prelo. **Sequence stratigraphy and facies model of a macrotidal flat on the Bragança Mangrove Coast, Amazon, northern Brazil**
- SWIFT, Jr. C. M. 1987. Fundamentals of the Electromagnetic Method. In: NABIGHIAN, M. N. ed. **Electromagnetic methods in applied geophysics.** Tulsa. SEG. v. 1. p. 5-10.

ZODHY, A. A. R. & BIRDORF, R. J. 1989. **Programs for the Automatic Processing and Interpretation of Schlumberger Sounding Curves in Quickbasic 4.0.** Open-file report 89-137 A & B, U.S. Geological Survey, 19p.