



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA**

ALLEX RAIOL CARDOSO MEDEIROS

**METODOLOGIAS GEOFÍSICAS E HIDROGEOQUÍMICAS APLICADAS À
PROSPECÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA EM AMBIENTE DE INTRUSÃO
SALINA NA VILA DE ALGODOAL-PA**

**BELÉM-PA
2008**

ALLEX RAIOL CARDOSO MEDEIROS

**METODOLOGIAS GEOFÍSICAS E HIDROGEOQUÍMICAS APLICADAS À
PROSPECÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA EM AMBIENTE DE INTRUSÃO
SALINA NA VILA DE ALGODOAL-PA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, em cumprimento às exigências para a obtenção de grau de bacharel em Geofísica.

Orientadora: José Geraldo das Virgens Alves.

**BELÉM-PARÁ
2008**

ALLEX RAIOL CARDOSO MEDEIROS

**METODOLOGIAS GEOFÍSICAS E HIDROGEOQUÍMICAS APLICADAS À
PROSPECÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA EM AMBIENTE DE INTRUSÃO
SALINA NA VILA DE ALGODOAL-PA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, em cumprimento às exigências para a obtenção de grau de bacharel em Geofísica.

Data de aprovação: __/ __/ __

Conceito: _____

Banca Examinadora:

Profª José Geraldo das Virgens Alves-Orientador
Mestre em Geofísica

Profª Lúcia M. da Costa e Silva-Membro
Doutora em Geofísica

Proº José Gouvêa Luiz-Membro
Doutor em Geofísica

**BELÉM-PARÁ
2008**

Aos meus pais José Maria e Ivete, pela
graça da vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus e a Nossa Senhora de Nazaré, por todas as bênçãos recebidas ao longo de minha vida.

Ao meu orientador Prof. MSc. José Geraldo das Virgens Alves por todo o apoio acadêmico ao longo de todo o Trabalho de Conclusão de Curso.

À Universidade Federal do Pará e ao Curso de Graduação de Geofísica que ofereceu todo o suporte no decorrer de 4 anos.

Aos alunos da Turma de 2005 e ao técnico Paulo Magalhães (“vulgo Paulo alho”) que ajudaram na aquisição geofísica.

Ao professor Vaquera (*In momorian*) que ajudou nas análises de laboratório das amostras de geoquímicas.

Aos professores José Gouvêa Luiz e Lúcia Maria da Costa e Silva que contribuíram bastante na minha formação como geofísico.

Aos verdadeiros amigos que fiz ao longo de toda a graduação: Michel Cardoso (“vulgo Micgeof”), Joel Monteiro (“vulgo Jololo”), Elyston Moura (“vulgo Jacaré”), Tiago Alcântara (“vulgo Magro”), Anderson Santiago (“vulgo Carteiro”), Disraeli, Danusa Maiara, Ângelo (“vulgo Japonês”), Karina Palheta.

RESUMO

Este trabalho de prospecção de água subterrânea visou definir as áreas mais promissoras para a exploração de água subterrânea, livres da intrusão salina, através da correlação de metodologias geofísica e geoquímica, na Vila de Algodal / Ilha de Maiandeuá, local de grande importância e relevância pesqueira e turística do Nordeste do Estado do Pará.

O método geofísico aplicado foi o eletromagnético, sistemas Slingram (EM34-3, Max Min I). Os perfis foram corridos ao longo das ruas transversais na direção NW-SE, com amostragem a cada 12,5 metros. Também, foram realizadas medidas *in situ* dos parâmetros físico-químicos, condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) e pH, além de coleta das águas dos poços para análise do teor de cloro (mg/L) em laboratório.

Os resultados da correlação entre os dados, mostrados através de mapas de contorno, pseudo-seções e blocos-diagrama, indicam as zonas promissoras à exploração de água subterrânea e aquelas contaminadas pela água do mar.

Palavras-chave: Geofísica, água subterrânea, intrusão salina, método eletromagnético, Vila de Algodal, Geoquímica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Mapa de localização da área de estudo. (Fonte: Modificado de Santos, 1996).....	12
Figura 2- Mapa georeferenciado dos perfis geofísicos e poços na área de estudo...	13
Figura 3 – Perfil litológico construído a partir de perfis de Raios Gama perfilados em 7 poços tubulares na Vila de Algodual (Fonte:Luiz <i>et al.</i> , 2001).....	16
Figura 4- Ilustração da relação da intrusão salina.....	17
Figura 5- Formação do cone de intrusão salina em aquífero costeiro.....	18
Figura 6- Croqui da indução eletromagnética na aquisição de dados EM (Fonte:Reynolds, 1997).....	20
Figura 7- Desenho esquemático do equipamento EM34-3 em modo Dipolo Horizontal (DH) (Fonte: Pinéo, 2005).....	21
Figura 8- Profundidade teórica de investigação do EM34-3 em relação à distância entre as bobinas e o modo de dipolo, e freqüências aplicadas pelo equipamento....	22
Figura 9-Relação entre a condutividade real e a condutividade aparente do terreno para os modos de dipolos DH e DV (Fonte: Pinéo, 2005).....	23
Figura 10- Perfil eletromagnético HLEM sobre um corpo resistivo (H_s = campo magnético secundário; H_p = campo magnético primário), utilizando o equipamento MAX MIN I.....	24
Figura 11- Medidas de condutividade aparente com o EM34 no modo dipolo horizontal.....	27
Figura 12- Aquisição de dados com o equipamento MAX MIN I.....	28
Figura 13 – Mapa de condutividade aparente para o dipolo horizontal.....	30
Figura 14- Bloco diagrama 3D de condutividade aparente para o dipolo horizontal..	31
Figura 15 – Mapa de condutividade aparente para o dipolo vertical.....	32
Figura 16- Bloco diagrama 3D de condutividade aparente para o dipolo vertical.....	33
Figura 17- Mapa da componente em-fase para a freqüência 14080 Hz.....	35
Figura 18- Mapa da componente em-fase para a freqüência 7040 Hz.....	36
Figura 19- Mapa da componente em-fase para a freqüência 3520 Hz.....	37

Figura 20- Mapa da componente em-fase para a freqüência 1760 Hz.....	38
Figura 21- Mapa da componente em-fase para a freqüência 880 Hz.....	39
Figura 22- Mapa da componente em-fase para a freqüência 440 Hz.....	40
Figura 23- Mapa da componente em-fase para a freqüência 220 Hz.....	41
Figura 24- Mapa da componente em-fase para a freqüência 110 Hz.....	42
Figura 25- Bloco diagrama 3D da componente em-fase para as 8 freqüências.....	43
Figura 26- Pseudo-seção eletromagnética da componente em-fase para os seis primeiros perfis.....	44
Figura 27- (A) Gráfico da condutividade da água poços na Vila de Algodual (Dezembro/2007) e sua classificação quanto à salinidade. (B) Gráfico da condutividade da água poços na Vila de Algodual (Maio/2007) e sua classificação quanto à salinidade.....	48
Figura 28- (A) Mapa de condutividade elétrica dos poços da Vila de Algodual para o período chuvoso (Maio/2007). (B) Mapa de condutividade elétrica dos poços da Vila de Algodual para o período não chuvoso (Dezembro/2007).....	49
Figura 29- Diagrama de dispersão que visualiza a relação que existe entre as variáveis Condutividade [$\mu\text{S}/\text{cm}$] e os conteúdos de cloro [mg/L] na segunda campanha de amostragem.....	50
Figura 30- (A) Mapa de teor de cloro no período de Maio/2007. (B) Mapa do teor de cloro no período de Dezembro/2007.....	52
Figura 31- (A) Mapa de pH no período de Maio/2007. (B) Mapa de pH no período de Dezembro/2007.....	53

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	AREA DE ESTUDO	11
3	GEOLOGIA REGIONAL	14
4	GEOLOGIA LOCAL	15
5	AQUÍFERO COSTEIRO	16
6	MÉTODO GEOFÍSICO	19
	6.1 MÉTODO ELETROMAGNÉTICO (EM).....	19
7	MÉTODO HIDROGEOQUÍMICO	25
	7.1 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA.....	25
	7.2 pH.....	25
	7.2 CLORO.....	25
8	METODOLOGIA	27
	8.1 LEVANTAMENTO ELETROMAGNÉTICO.....	27
9	RESULTADOS E DISCURSÕES	29
	9.1 MEDIDAS ELETROMAGNÉTICAS - EM34.....	29
	9.2 MEDIDAS ELETROMAGNÉTICAS - MAX MIN I.....	34
	9.3 MEDIDAS HIDROGEOQUÍMICAS.....	45
10	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55

1 INTRODUÇÃO

Atualmente há grande preocupação em âmbito mundial relacionada aos problemas ambientais, incluindo o caso da poluição de águas subterrâneas, cujas origens podem ser diversas. As causas da poluição das águas subterrâneas são essencialmente o despejo de efluentes não tratados e/ou de resíduos sólidos provenientes de atividades industriais (por exemplo, curtume, rejeitos minerais), agrícolas (agrotóxicos) e áreas urbanas (lixões, cemitérios, expansão urbana sem saneamento básico) e, também, o fenômeno da intrusão salina, do que trata o presente trabalho.

A intrusão salina é um fenômeno que ocorre em regiões costeiras, onde os aquíferos podem fazer contato com a água do mar. Enquanto a água doce escoar para o mar, a água salgada, mais densa, tende a penetrar no aquífero, formando uma cunha sob a água doce. Este fenômeno é agravado quando nas proximidades de regiões costeiras, há exploração de grandes volumes de água doce subterrânea e também pela impermeabilização entre o aquífero e sua zona de recarga, provocando o avanço da água salgada no interior deste e a conseqüente salinização da água dos poços de captação (Rocha, 2003).

As águas salinas ou salobras mesclam-se com relativa facilidade com as águas doces, o que eleva o risco de degradação da qualidade da água. Quando a água do mar penetra em um aquífero, basta apenas uma relação de 2% do volume de água do mar para 98% de água doce para toda a mistura não apresentar mais as características adequadas de potabilidade (Custodio, 1987).

Esta problemática afeta diretamente toda costa brasileira. Neste contexto, está incluído o litoral do Estado do Pará, onde a água subterrânea, de suma importância como fonte de abastecimento de água.

A área de enfoque deste estudo é a Vila de Algodual / Ilha de Maiandeuá, localizada no Nordeste do Estado do Pará, em ambiente costeiro, onde os moradores enfrentam problemas sazonais na captação de água; no mês de Janeiro devido a estiagem alguns poços secam e, no mês de Julho, devido ao consumo exagerado, tanto pode secar como salinizar o aquífero livre.

O mapeamento da intrusão salina vem sendo estudado, através de métodos geofísicos, por diversos autores, como por exemplo:

Luiz *et al.* (2001) através dos métodos elétricos de Sondagem Elétrica Vertical (SEV), Caminhamento elétrico (arranjo dipolo-dipolo), Potencial Espontâneo e medidas *in situ* da condutividade elétrica da água dos poços usados para o abastecimento doméstico na Vila de Algodual, mostraram resultados que sugerem uma zona alongada na direção NW-SE, localizada na porção central da área investigada, como sendo a melhor região para locação de poços. Estes resultados serão de suma importância, pois serão correlacionados com os dados do trabalho.

Sabadia *et al* (2000) no município de Caucaia (Praia do Pacheco) Forateleza-Ceará utilizou o método eletromagnético indutivo com o equipamento EM34-3XL para cartografar as diferentes profundidades do fluxo da intrusão salina, de modo a controlar a sua evolução temporal. Através desse método, observou valores altos de condutividade aparente do terreno proveniente do SW e E da área, como sendo uma possível frente de contaminação ocasionada pelas zonas correspondente às antigas salinas e fluxo natural em direção a linha de costa. Ao norte da área, encontram-se valores baixos de isocondutividade aparente, estando relacionados à zona de recarga das pequenas dunas.

O levantamento dos dados ocorreu em Maio/2007, durante o treinamento de campo da Disciplina Grupo de Trabalho II do Curso de Graduação em Geofísica da UFPa, cujo objetivo é a aplicação de metodologia Geofísica voltada à prospecção de água subterrânea. Foi aplicado o método eletromagnético na configuração Slingram (arranjo HLEM-Horizontal Loop Eletromagnetic), com os equipamentos EM34-3 e MAX MIN I.

Também, como parte do estudo, realizou-se uma avaliação da qualidade da água dos poços com metodologia geoquímica. Para isso, nessa oportunidade, foi feita uma amostragem de água para medidas posteriores do teor de cloro (mg/L) em laboratório e medidas *in situ*, de Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), pH, Nível Estático (m) e profundidade (m). Essas medidas foram repetidas no mês de Dezembro/2007.

No estudo, objetivou-se identificar áreas livres do risco de contaminação pela intrusão salina, de modo a orientar os moradores da Vila sobre os locais adequados e a profundidade máxima para perfuração de poços, sem que a água venha a ser contaminada.

2 **ÁREA DE ESTUDO**

A área em estudo, segundo a Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE *apud* Lobato, 1999), é constituída por duas ilhas denominadas Algadoal e Maiandeuá, administrada pelo Município de Maracanã (Figura 1), porém, as comunidades residentes e mesmo opiniões técnicas, consideram que seja apenas uma Ilha, chamada Maiandeuá, sendo a principal vila chamada de Algadoal. Situam-se no litoral nordeste do Estado, em torno das coordenadas geográficas 00° 35' 27" S e 47° 35' 12.4" W; limitando-se com o oceano Atlântico ao Norte, com o furo da Mocoóca ao Sul, com o Rio Maracanã a Leste e com o Rio Marapanim a Oeste. Suas zonas litorâneas são de grande importância do ponto de vista ambiental, pois constituem regiões de interface entre o mar e o continente. Por esta razão, foi transformada em uma Área de Proteção Ambiental, APA, através da lei estadual 5.621/90. Elas estão separadas por um furo intermitente denominado "Furo Velho", abrangendo uma área de 2.378 ha, sendo 385 ha da Ilha de Algadoal, contendo a vila de Algadoal, a praia da Princesa e uma área com mangues, restingas e dunas; e 1.993 ha da ilha de Maiandeuá, onde se localizam os vilarejos de Fortalezinha, Mocoóca e Camboinha e as localidades de Camaleão, Passagem e Pedra Chorona.

A área apresenta precipitação pluviométrica com valores anuais totais elevados, podendo-se esperar, em média, valores próximos a 3.000mm. Ao longo dos meses a distribuição das chuvas define-se em dois períodos distintos: um bastante chuvoso (dezembro a maio), onde as precipitações são muito intensas, principalmente no trimestre fevereiro, março e abril, acarretando elevados excedentes hídricos, e o outro de chuvas bastante reduzidas (período de estiagem) que atinge os demais meses do ano, quando ocorre o *deficit* hídrico. A temperatura média anual é em torno de 27°C. Para a área em estudo, pode-se atribuir que as temperaturas médias mensais apresentam uma variação inferior a 5°C. Essa variação está associada à distribuição mensal das chuvas, ocorrendo, durante o período chuvoso, temperaturas máximas menos elevadas se comparadas ao período de estiagem (Amaral, 1998).

Para chegar até a Ilha, o acesso é feito, a partir da cidade de Belém, capital do Estado do Pará, pela Rodovia Federal (BR-316) até a Cidade Castanhal. A partir

daí, prossegue-se pela Rodovia PA-136 e, finalmente, pela PA-318 chegando até a Cidade de Marudá. A partir daí, o transporte torna-se fluvial através do Rio Marapanim chegando a Vila de Algodal (Figura 1).

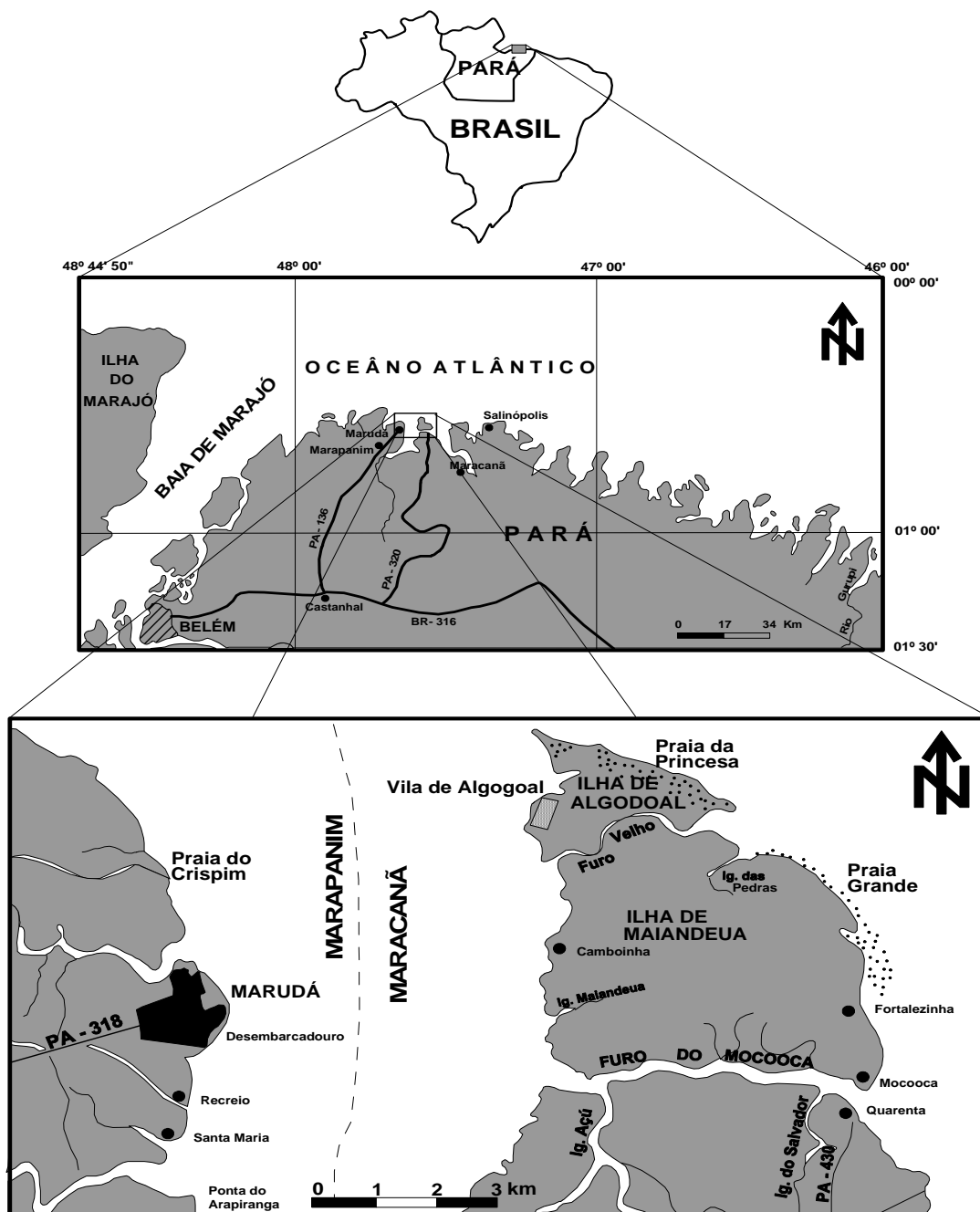


Figura 1- Mapa de localização da área de estudo. (Fonte: Modificado de Santos, 1996).

Na vila de Algodal foram corridos oito perfis de medidas geofísicas, com amostragem a cada 12,5m e direção NW-SE, com exceção ao perfil 8 (direção N-S). Os perfis foram realizados nas seguintes ruas:

- Perfil 1– Rua Vila Nova. Comprimento: 250m;
- Perfil 2 – Sexta Travessa. Comprimento: 337,5 m;
- Perfil 3 – Quinta Travessa. Comprimento: 500m;
- Perfil 4 – Rua Miguel. Comprimento: 437,5m;
- Perfil 5 – Rua Elias Saraiva. Comprimento: 475m;
- Perfil 6 – Rua São Pedro. Comprimento: 362,5m;
- Perfil 7 – Travessa São Pedro II. Comprimento: 75m e
- Perfil 8 – Alameda Bragantina. Comprimento: 112,5m.

A Figura 2 ilustra o posicionamento georeferenciado dos perfis, estações de medidas geofísicas e poços na Vila de Algodal.

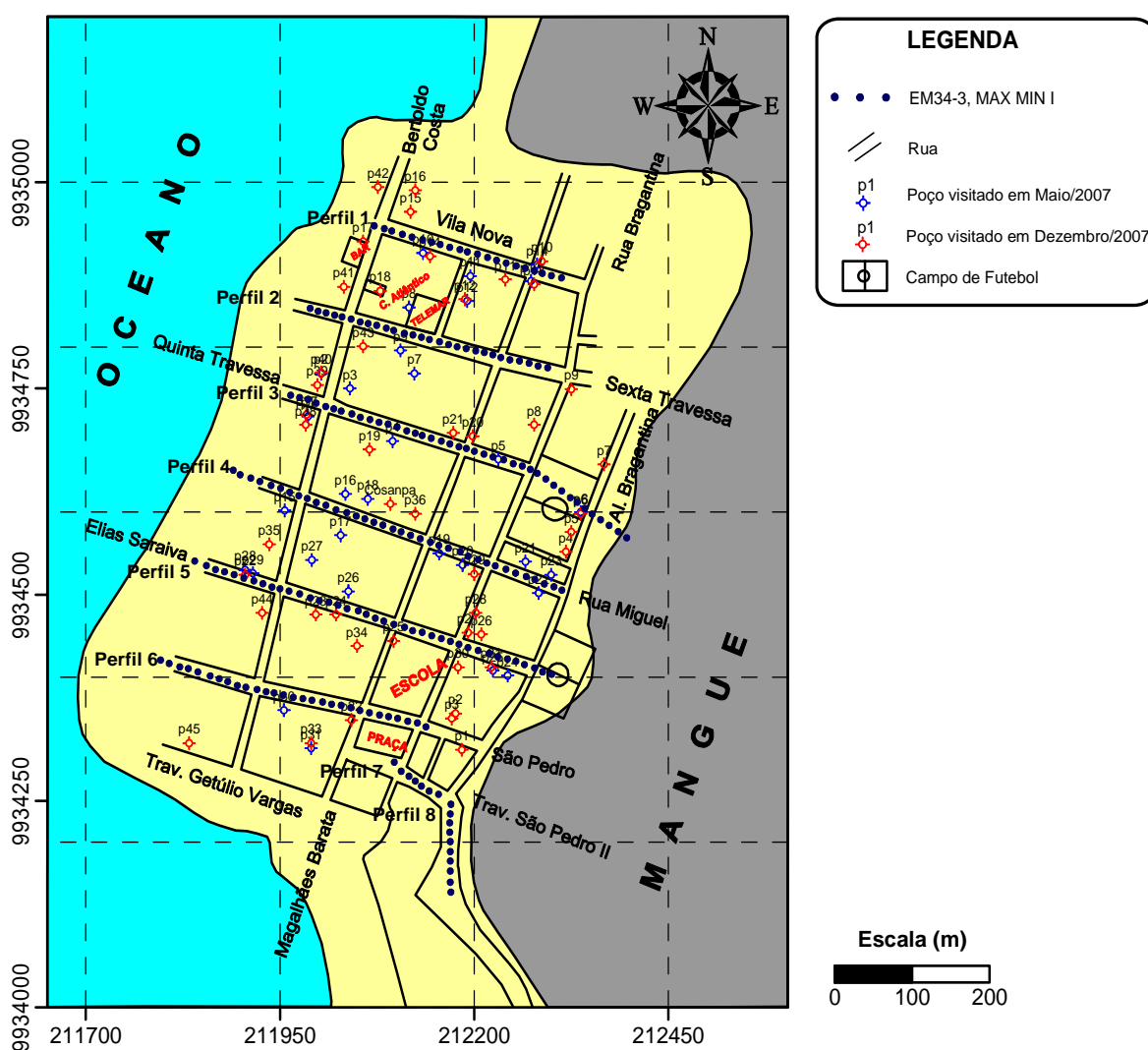


Figura 2- Mapa georeferenciado dos perfis geofísicos e poços na área de estudo.

3 GEOLOGIA REGIONAL

Geomorfologicamente Rossetti *et al* (1989) definiu a região Bragantina, nordeste do Estado do Pará, onde está localizada a Vila de Algodual/Ilha de Maiandeuá, por apresentar depósitos Cenozóicos, inseridos na Formação Pirabas e pelos sedimentos Barreiras e Pós-Barreiras.

Segundo Santos (1996), a planície costeira de Algodual está dividida geomorfologicamente em sistemas de relevo de Planalto Costeiro e Planície Costeira, sendo que a primeira está elaborada sobre sedimentos de Formação Barreiras e do Pós-Barreira, onde constituem o embasamento dos sedimentos quaternários e as unidades de relevo de Falésia e a Plataforma de abrasão, e a última, predominante na área, está relacionada aos sedimentos arenosos e argilosos holocênicos, com Pântanos salinos, relevos de Canal Estuarino, Praias, Dunas, Planície de marés e Cordões Praia-dunas.

A Formação Pirabas é caracterizada por fácies Castelo, constituída por calcários duros diversificados e gerado em mar aberto; fácies Baunilha Grande, formadas por vegetais piritizados (ou argilas negras) e nódulos de calcários escuros, contendo crustáceos e depositados em ambiente redutor típico de mangue; e fácies Capanema, composta por calcário argiloso, micritos e bioclasto, folhelhos rítmicos e arenitos calcíferos de ambiente lagunar em borda de bacia ou estuário (Petri 1957; Ferreira 1966, 1977, 1980).

4 GEOLOGIA LOCAL

A Vila de Algodual foi definida por Santos (1996) contendo 9 unidades morfoestratigráfica:

- (1) Cordões Praia-duna;
- (2) Paleodunas;
- (3) Dunas Costeiras;
- (4) Praias;
- (5) Planície Supramaré;
- (6) Planície Intermaré;
- (7) Barra arenosa de Maré;
- (8) Barra em Pontal e
- (9) Pântano Salino.

Contendo também 10 fácies estratigráfica (Santos, 1996):

- (1) Lama de Intermaré;
- (2) Areias de canais de escavamento de maré;
- (3) Areia e lama de barras;
- (4) Lama de planície de supramaré;
- (5) Areia e lama marinha;
- (6) Lama estuarina;
- (7) Areia marinha;
- (8) Argila siltosa biotubada;
- (9) Sedimentos indiferenciados e
- (10) Areia mosqueada.

A estratigrafia rasa (cerca de 25 m de profundidade) da Vila de Algodual, nos primeiros metros de profundidade apresenta uma alternância de sedimentos argilosos e arenosos, contendo 7 camadas, obtidas a partir da interpretação de perfis de Raio Gama corridos em sete poços tubulares que estão cerca de 5 a 10 m de distância entre eles, veja na Figura 3.

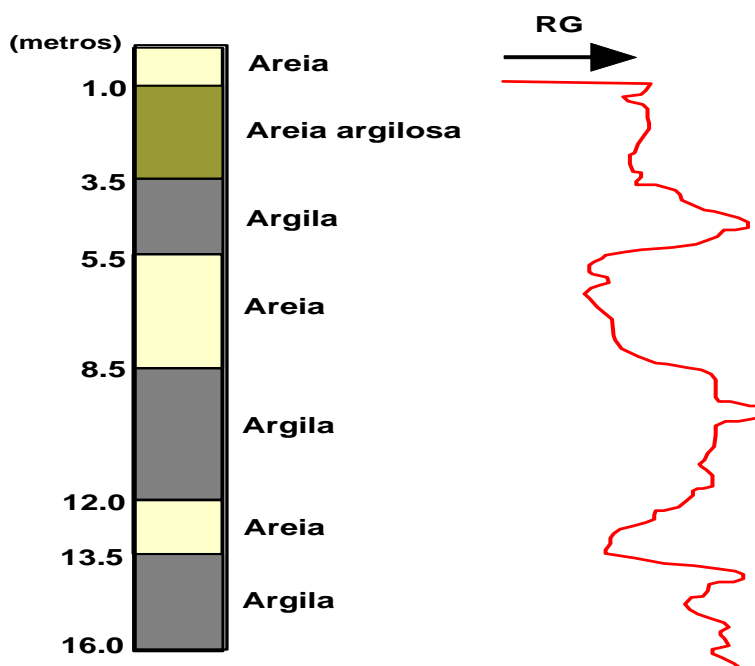


Figura 3 – Perfil litológico construído a partir de perfis de Raios Gama perfilados em 7 poços tubulares na Vila de Algodual (Fonte:Luiz *et al.*, 2001).

5 AQUÍFEROS COSTEIROS

Em regiões costeiras, há uma grande problemática relacionado à intrusão da cunha salina, onde muitas das vezes contamina por sal e impossibilita a utilização da água subterrânea para consumo humano, a partir daí, tem-se a necessidade de determinar a interface que separa a água doce da água salgada.

A água salgada proveniente ao mar em áreas costeiras infiltra-se pela subsuperfície e mergulha em direção ao continente. O aquífero de água doce, por ser menos densa, flutua sobre a água salgada que por sua vez delimita uma interface.

A equação 1, relaciona a profundidade da interface água doce/água salgada, na vertical de um ponto, num aquífero costeiro, com a cota da superfície piezométrica (h_d) nesse ponto:

$$h_s = (\rho_d / \rho_s - \rho_d) h_d \quad (1)$$

onde:

h_s = profundidade da interface

ρ_s = densidade da água salgada

ρ_d = densidade da água doce

h_d = nível piezométrico

Esta equação basear-se no equilíbrio estático entre o peso da coluna de água doce num ponto da interface e o peso da coluna de água salgada no mesmo ponto. Por conta disso, fornece uma boa aproximação quando o escoamento é aproximadamente na horizontal, tendendo a subavaliar a posição da interface à medida que nos aproximamos de um ambiente costeiro. A altura do nível da água doce (freático) em relação ao nível do mar e a profundidade da sua base (topo da cunha salina) em relação ao mesmo nível possuem uma relação de 1:40 (Bowen, 1986), ou seja, para cada metro que o nível estático (N.E.) fica acima do nível do mar, existem 40 metros de água doce abaixo dele. Ou também para cada 1 metro de rebaixamento do nível estático resultará em 40 metros de elevação da interface, ainda que de forma vagarosa, levando em consideração que a intrusão salina é um processo lento (Figura 4).

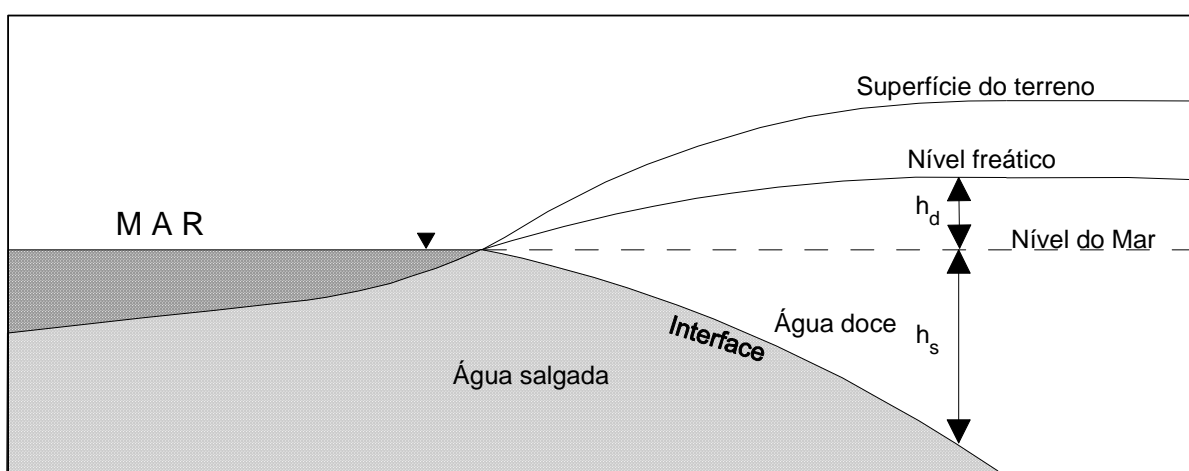


Figura 4 - Ilustração da relação de intrusão salina.

Antes de ser iniciada uma exploração de água subterrânea de um aquífero costeiro através de poços artesianos ou do tipo amazonas, existe um equilíbrio

dinâmico entre a interface água salgada/ água doce. A pressão da água doce e o contínuo escoamento para o mar conseguem manter a posição da cunha salina em equilíbrio. Porém, quando é realizado exploração elevada de água subterrânea do aquífero costeiro, o bombeamento reduzirá a pressão da água doce e também a diminuição da sua descarga em relação ao mar, ocasionando a formação de um cone de intrusão salina em poços artesianos e do tipo amazonas, sendo assim contaminadas por água salgada, veja na Figura 5.

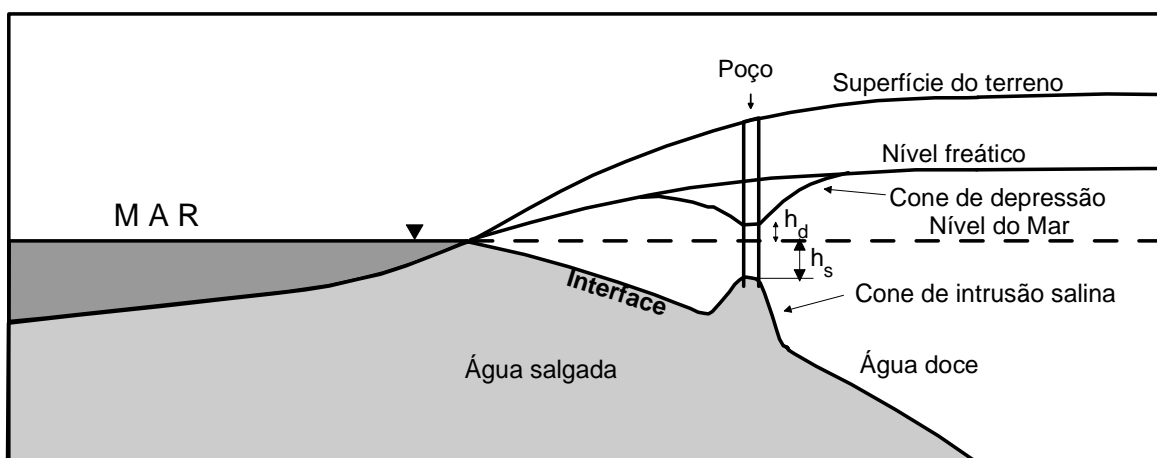


Figura 5- Formação do cone de intrusão salina em aquífero costeiro.

6 MÉTODO GEOFÍSICO

Foram utilizados no mapeamento na intrusão salina e localização de áreas promissoras para prospecção de água subterrânea na Vila de Algodal, o seguinte método geofísico: método eletromagnético (EM34-3, MAX MIN I). A seguir será apresentada uma fundamentação teórica de cada um desses métodos em questão.

6.1 MÉTODO ELETROMAGNÉTICO (EM)

Os métodos eletromagnéticos (EM) podem ser classificados de duas formas: (1) no Domínio do tempo (TEM), onde a excitação é por pulso de corrente na bobina transmissora seguida de recepção do transiente e (2) no Domínio da frequência (FEM), onde os instrumentos usam uma ou mais frequências para coleta de dados em o transmissor e receptor operam em conjunto e sintonizados.

De acordo com Reynolds (1997), os métodos EM são fundamentados pelo princípio de indução eletromagnética, que por sua vez, registram a resposta proveniente de uma interação entre a onda eletromagnética e a subsuperfície.

O processo de indução eletromagnética é ilustrado na Figura 6, onde uma corrente elétrica que varia com o tempo, circula em uma bobina (transmissora -Tx). Por conta disso, a corrente gera um campo magnético oscilante (primário - H_p) de mesma frequência e fase. Linhas de forças do campo magnético primário penetram na subsuperfície e conseqüentemente no corpo condutor. Quando isso acontece uma força eletromotriz (ou voltagem) aparece no condutor. Sendo assim, uma corrente fluirá dentro do corpo condutor em resposta a força eletromotriz induzida. Esta corrente flui normalmente no condutor em planos perpendiculares às linhas de força do campo magnético primário transmitido. A corrente que flui dentro do condutor gera outro campo, denominado campo magnético secundário (H_s), cujas linhas de forças se opõem à variação do campo magnético primário. Assim, uma resposta completa a esta corrente induzida é obtida pelo fato de existir uma combinação do campo magnético primário e secundário. A resultante dessa combinação de H_p e H_s é medida através da indução de uma bobina receptora (Rx).

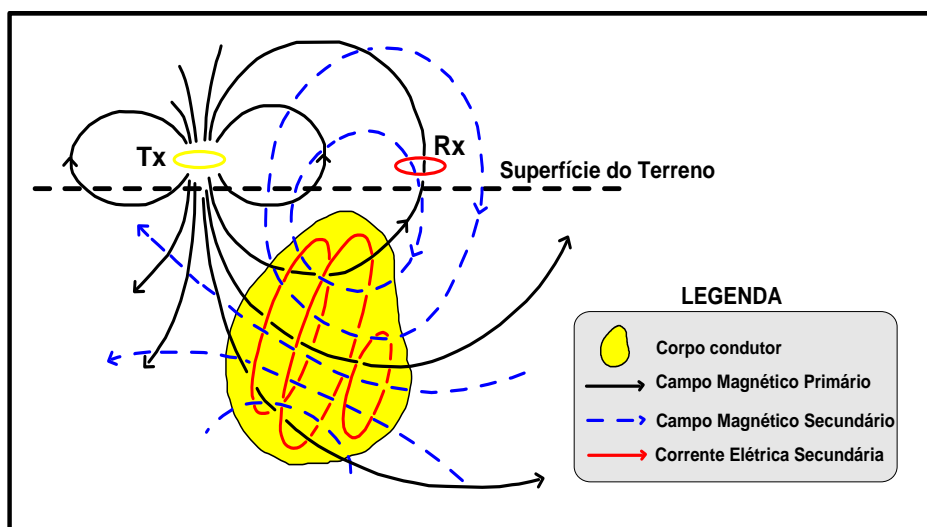


Figura 6- Croqui da indução eletromagnética na aquisição de dados EM (Fonte:Reynolds, 1997).

O uso de duas bobinas no método eletromagnético caracteriza o que se denomina de sistema Slingram. Nesse sistema, as duas bobinas podem ser dispostas segundo diversas orientações, como por exemplo: (a) disposição de ambas as bobinas em um plano horizontal, constituindo o arranjo coplanar horizontal, dipolo vertical ou HLEM; (b) disposição de ambas as bobinas no mesmo plano vertical, constituindo o arranjo coplanar vertical ou dipolo horizontal e (c) disposição em que a bobina transmissora é colocada no plano vertical e a bobina de recepção é colocada no plano horizontal, constituindo o arranjo de *loop* vertical (Pinéo, 2005).

Na área de estudo foram utilizados os equipamentos: EM34-3 e APEX MAX MIN I.

O equipamento EM34-3 foi fabricado pela empresa Canadense *Geonics Limited* com intuito de aplicar técnicas eletromagnéticas indutiva para medir a resistividade elétrica aparente da subsuperfície. Por conta disso, a grande vantagem da utilização deste equipamento, ao contrário do APEX MAX MIN I, fornece uma leitura direta da componente em quadratura, como a condutividade aparente (σ_a) em miliSiemens por metro (mS/m) e a componente em fase é medida em partes por milhão. Dessa forma é possível mapear a condutividade abaixo da superfície do terreno.

O EM34-3 atualmente está sendo bastante utilizado, como por exemplo, no estudo de natureza ambiental (mapeamento de intrusão salina), prospecção de água subterrânea (mapeamento de fraturas contendo água subterrânea), mapeamento de contaminações diversas (lixão, cemitério, aterro sanitário, etc.), estudo arqueológico, localização de tubos e condutores metálicos, dentre outros.

De acordo com a Figura 7, o instrumento EM34-3, é caracterizado por apresentar duas bobinas (transmissora-Tx e receptora-Rx) que estão conectados entre si, por cabos específicos. A bobina Tx e Rx é interconectada por um cabo de referência, que permite três espaçamentos interbobinas, 10, 20 e 40m, respectivamente.

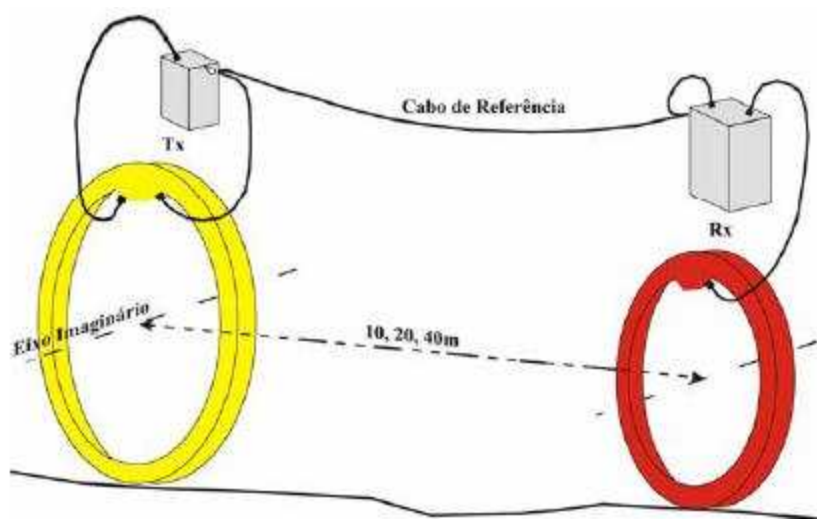


Figura 7- Desenho esquemático do equipamento EM34-3 em modo Dipolo Horizontal (DH) (Fonte: Pinéo, 2005).

O sistema EM34-3 opera dentro de uma faixa de baixos números de indução, conhecida como LIN, termo originado do inglês que significa *Low Induction Numbers*, em que o produto $(\omega\sigma s^2)$ é menor do que 1000, descrita pela equação abaixo (Mcneill,1980):

$$(H_P / H_S) = (i\omega\mu_0 \sigma s^2 / 4) \quad (2)$$

em que H_P é o campo magnético primário; H_S é o campo magnético secundário; ω é a frequência angular, dada por $\omega=2\pi f$, f é a frequência (Hz); μ_0 é a permeabilidade

magnética do espaço; σ é a condutividade elétrica do terreno (mS/m); S é a distância entre as bobinas (m) e i é o complexo.

Depois de calculado a razão entre o campo magnético secundário e o primário (H_P/H_S) e a partir da equação (2), acha-se a condutividade aparente que é indicada pelo instrumento, através da equação (3):

$$\sigma_a = (4/\omega\mu_0 s^2) (H_S/H_P) \quad (3)$$

Além disso, temos dois modos de dipolos: Dipolo Horizontal (DH), onde os eixos das bobinas posicionam-se na vertical e a profundidade de investigação é cerca de 0,75 vezes o espaçamento das bobinas e o modo Dipolo Vertical (DV), isto é, com os eixos das bobinas disposta na horizontal e a profundidade de investigação é cerca de 1,5 vezes o espaçamento das bobinas.

Como dito anteriormente, o espaçamento entres as bobinas Tx-Rx, podem ser 10, 20 e 40m, respectivamente. Assim, em condições idéias, é possível investigar profundidades de aproximadamente 7,5, 15 e 30m no modo DH e 15, 30 e 60m no modo DV (Figura 8).

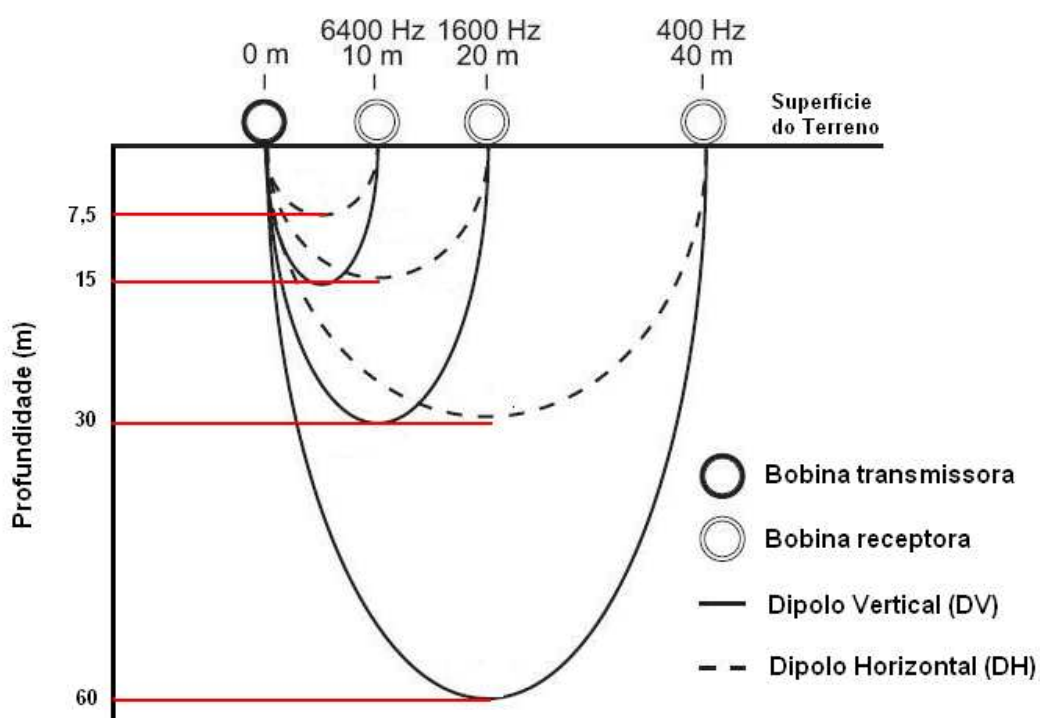


Figura 8- Profundidade teórica de investigação do EM34-3 em relação à distância entre as bobinas e o modo de dipolo, e freqüências aplicadas pelo equipamento.

O modo Dipolo Vertical atinge 2 vezes a profundidade de investigação em relação ao modo de Dipolo Horizontal, sendo que é mais sensível às variações laterais de condutividade. Além disso, é altamente susceptível ao desalinhamento das bobinas Tx e Rx. No modo DH, materiais acima da profundidade efetiva alcançada pelo equipamento influenciam em cerca de 70% da resposta.

Segundo Cunha (2002), o *skin depth* (profundidade de penetração) pode ser entendida como sendo a profundidade real obtida em um levantamento desse tipo, por conta disso, é diretamente controlada pelo meio em subsuperfície. Levando em consideração as condições ideais de operação, a profundidade de penetração será igual a profundidade de investigação do equipamento EM34-3.

A relação entre a condutividade real e a condutividade indicada no instrumento EM34-3, não é linear em ambientes onde a condutividade é elevada. Quando esses valores são superiores a 700 mS/m a condutividade indicada no modo DV tende a ser zero, ou seja, chegam a valores negativos (Mcneill, 1980), veja na Figura 9.

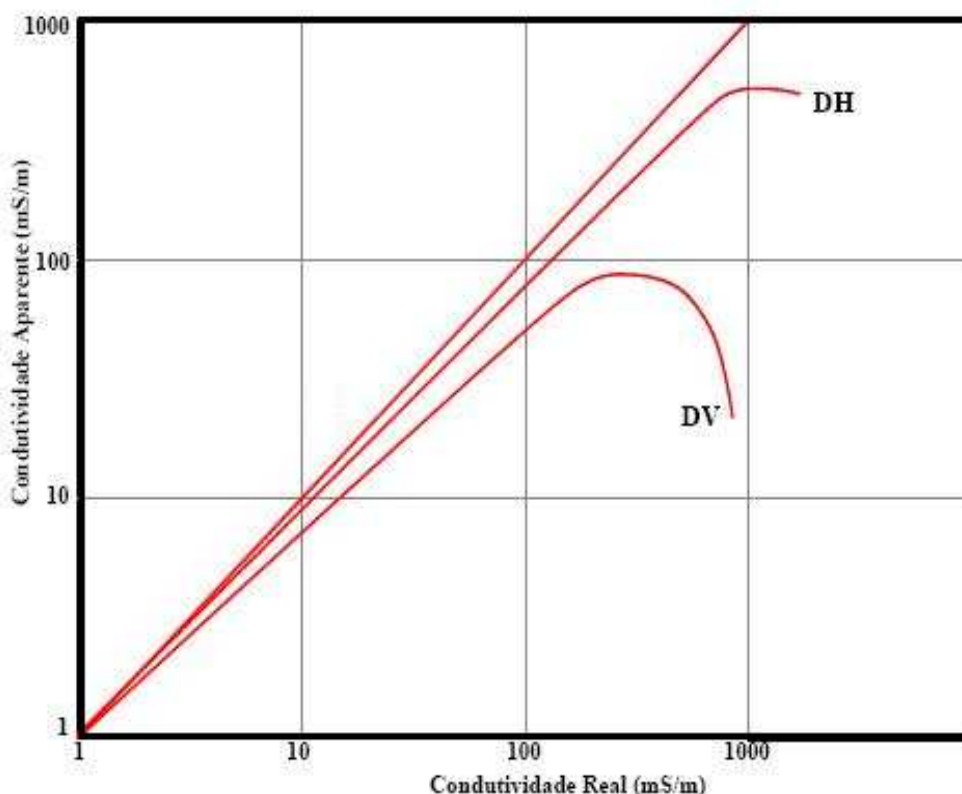


Figura 9-Relação entre a condutividade real e a condutividade aparente do terreno para os modos de dipolos DH e DV (Fonte: Pinéo, 2005).

O outro equipamento EM utilizado no estudo é chamado MAX MIN I, fabricado pela Companhia Apex Parametrics Ltd., que permite a amostragem de 8 frequências: 110, 220, 440, 880, 1760, 3520, 7040 e 14080 Hz. A utilização das 8 frequências permite a geração de uma imagem da subsuperfície de maneira indireta, abaixo dos perfis de medidas, em decorrência de um investigação tanto na horizontal como na vertical. Além disso, o instrumento opera também no sistema Slingram HLEM.

Conforme ilustra a Figura 10 temos um exemplo de uma resposta HLEM típica, em que um corpo resistivo (anomalia positiva) na horizontal (paleocanal) que se encontra em contato com uma rocha encaixante menos resistiva.

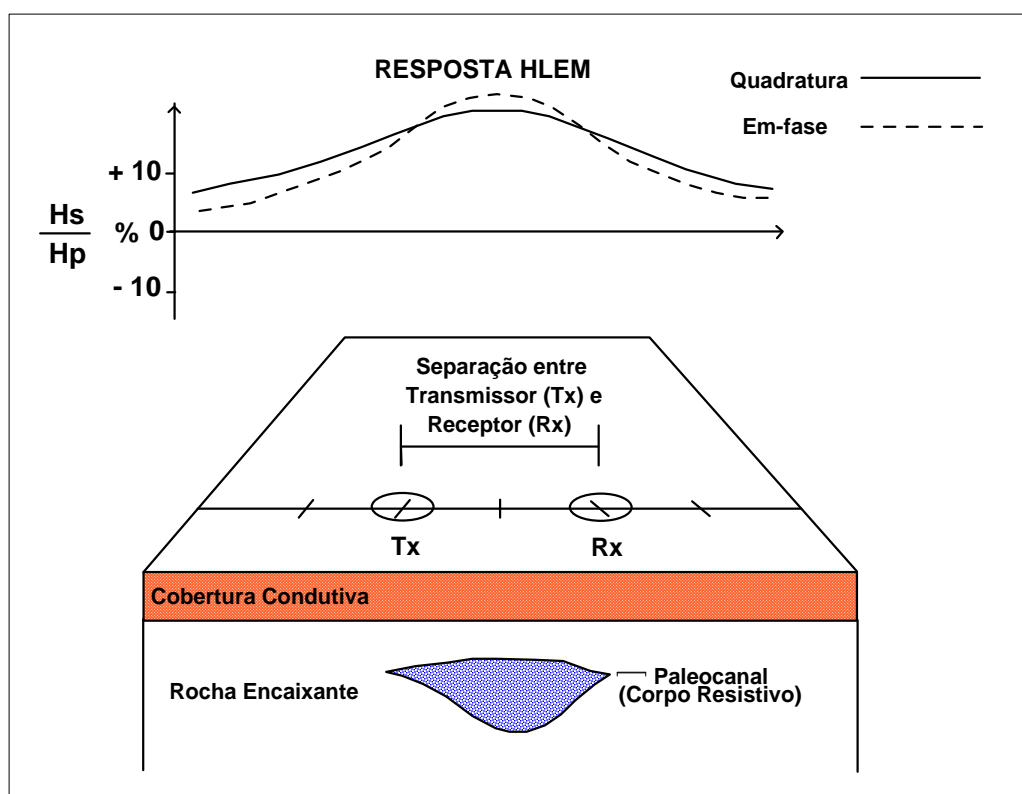


Figura 10- Perfil eletromagnético HLEM sobre um corpo resistivo (H_s = campo magnético secundário; H_p = campo magnético primário), utilizando o equipamento MAX MIN I.

As respostas anômalas tanto da componente real e quadratura, quando apresentam pico negativo está relacionado a valores altos de condutividade e caso contrário, para valores positivos têm-se valores alto de resistividade.

No caso da variação das frequências do equipamento MAX MIN I, quanto mais alta for, fornecerá informação rasa da subsuperfície e as frequências mais baixas teremos uma investigação mais profunda.

7 MÉTODO HIDROGEOQUÍMICO

Para analisar a qualidade da água dos poços da ilha de Algodóal, com o objetivo de correlacionar com metodologia geofísica, foram realizadas medidas *in situ* dos parâmetros físico-químicos, tais como a condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), pH e cloro (mg/L) para análise em laboratório da água dos poços.

Será apresentada a seguir uma breve descrição de cada uma dos parâmetros geoquímicos.

7.1 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

A condutividade elétrica (CE) é um parâmetro físico relacionada à passagem de corrente elétrica através da água, onde é diretamente proporcional ao teor de sais dissolvidos, ou seja, quanto maior a concentração de sais dissolvidos na água maior será a condutividade elétrica da mesma. Além disso, a CE possui uma unidade dada em $\mu\text{S}/\text{cm}$ (micro Siemens por centímetro), no caso para água subterrânea.

7.2 PH

O pH é uma propriedade química da concentração de íons de hidrogênio presente nas águas em geral. Sua unidade é unidimensional.

7.1 CLORO

O cloro é um parâmetro químico e um dos principais componentes da água do mar e, por sua característica de estabilidade química, a concentração dos íons de

cloreto pode ser considerada um excelente indicador da ocorrência do processo de intrusão salina relacionado ao mar, ou seja, sua movimentação deve ser, proporcional a taxa de intrusão. Sua unidade é dada em mg/L (miligrama/Litro) para água subterrânea.

8 METODOLOGIA

A aquisição dos dados de campo na Vila de Algodual foi realizada em duas oportunidades; do dia 10 a 27 de Maio de 2007, período que coincide com o elevado índice pluviométrico na área e de 19 a 25 de Dezembro de 2007, justo no período de alta estiagem.

8.1 LEVANTAMENTO ELETROMAGNÉTICO

Os dados eletromagnéticos foram obtidos a intervalos de 12,5m, visando boa resolução lateral, em 8 ruas na Vila de Algodual, utilizando os equipamentos: EM34-3 e MAX MIN I.

As medidas com o EM34-3 foram realizadas com as bobinas segundo os arranjos dipolo horizontal (DH) e dipolo vertical (DV). A separação entre transmissor e receptor (Tx-Rx) foi de 10m. A profundidade teórica de investigação é 7,5m para o DH, e de 15m para o DV. A Figura 10 ilustra o levantamento utilizando o EM34-3 na Vila de Algodual.



Figura 11- Medidas de condutividade aparente com o EM34 no modo dipolo horizontal.

As medidas eletromagnéticas com o equipamento MAX MIN I foram corridas segundo o arranjo HLEM, com Tx-Rx= 50m, tomando-se a amplitude das componentes em fase (parte real) e em quadratura (parte imaginária) do Campo Secundário (Hs) nas oito frequências (110, 220, 440, 880, 1760, 3520, 7040, 14080 Hz) disponíveis no sistema. São, portanto, 16 parâmetros medidos em cada estação que permitem uma boa varredura em profundidade. A Figura 12 mostra a aquisição de dados com o MAX MIN I.



Figura 12- Aquisição de dados com o equipamento MAX MIN I.

9 RESULTADOS E DISCURSÕES

9.1 MEDIDAS ELETROMAGNÉTICAS - EM34

Os dados de condutividade aparente obtidos no levantamento eletromagnético utilizando o EM34-3 estão representados na forma de mapas de contorno de isocondutividade e bloco diagrama 3D, nas Figuras 13 e 14 (dipolo horizontal) e Figuras 15 e 16 (dipolo vertical), respectivamente.

Os valores de condutividade aparente medidos na Vila de Algodual com o modo dipolo horizontal variam entre 45mS/m e 190mS/m, enquanto para os valores obtidos com o dipolo vertical entre 10mS/m e 135mS/m.

Os valores mais elevados da condutividade aparente, em vermelho, amarelo e roxo nos mapas de isocondutividade, foram obtidos com o dipolo horizontal, cuja profundidade teórica de investigação é de 7,5m. As Figuras 13 e 14 ilustram os altos anômalos que ocorrem em três áreas distintas, sendo que o primeiro localiza-se na orla da praia (oeste), entre os perfis 4 e 5, sendo uma forte evidência de contaminação pela intrusão salina. A outra área fica localizada ao nordeste da Vila, sendo que esses valores altos de condutividade aparente podem estar relacionados tanto pela intrusão salina, pois há um canal a Norte que separa a Vila de Algodual da Praia da Princesa como pelo mangue a Leste. Por último, os altos anômalos de condutividade aparente encontram-se ao sul, porém está ligada somente com a presença do mangue. Os baixos anômalos de condutividade foram representados na coloração azul e verde ocorrem por uma direção NW-SE que passa pelo centro da área. Os menores valores de condutividade sugerem os locais, na Vila de Algodual, que não estão sendo contaminados pela intrusão salina em uma profundidade rasa em torno de 7,5m dada pelo resultado do dipolo horizontal.

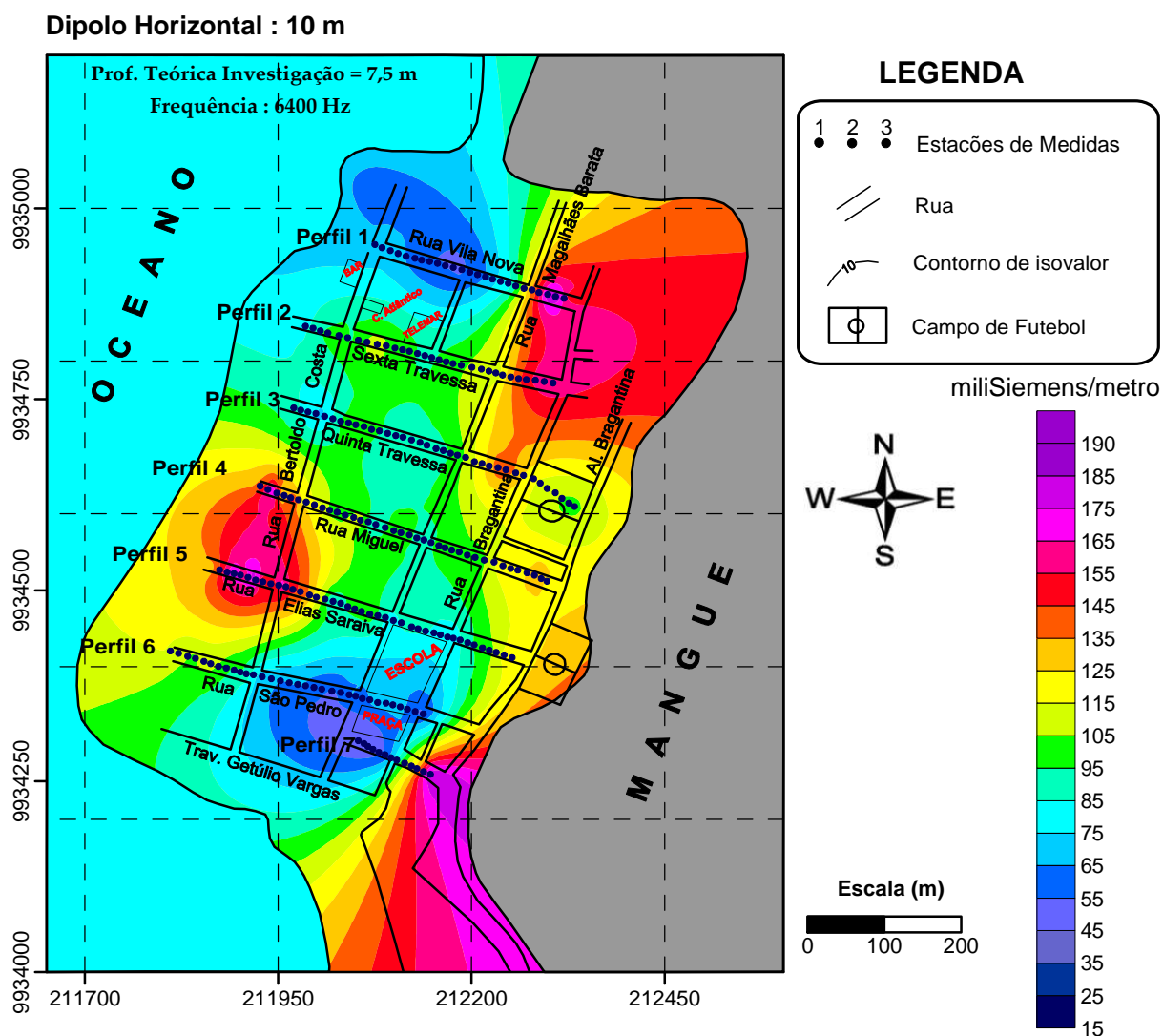


Figura 13 – Mapa de condutividade aparente para o dipolo horizontal.

Bloco Diagrama 3D-EM34-3 (DH = 10 m)

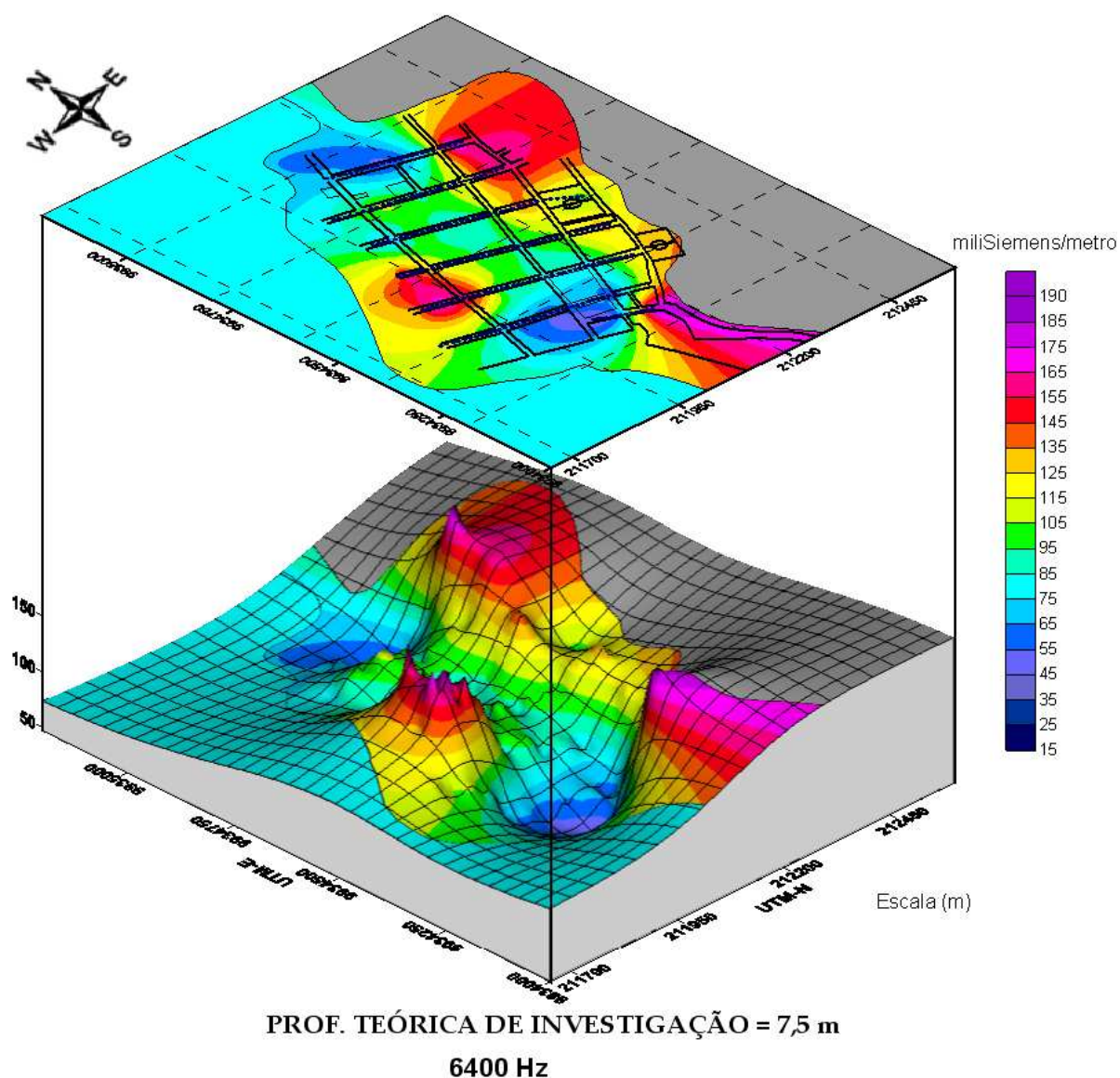


Figura 14- Bloco diagrama 3D de condutividade aparente para o dipolo horizontal.

Observa-se no mapa e no bloco diagrama das Figuras 15 e 16, respectivamente, obtido com o modo dipolo vertical, um alto anômalo, Rua São Pedro, próximo a praia, início do Perfil 6, outro na Rua Miguel no início do Perfil 4, o terceiro a nordeste e um quarto no cruzamento da Quinta Travessa com a Rua Bragantina. Isto significa que em todos esses locais a contaminação salina ainda está presente e desceu à profundidade de 15m. Os locais de baixos anômalos de condutividade refletem áreas não afetadas pela contaminação salina, ou seja, água potável para consumo humano.

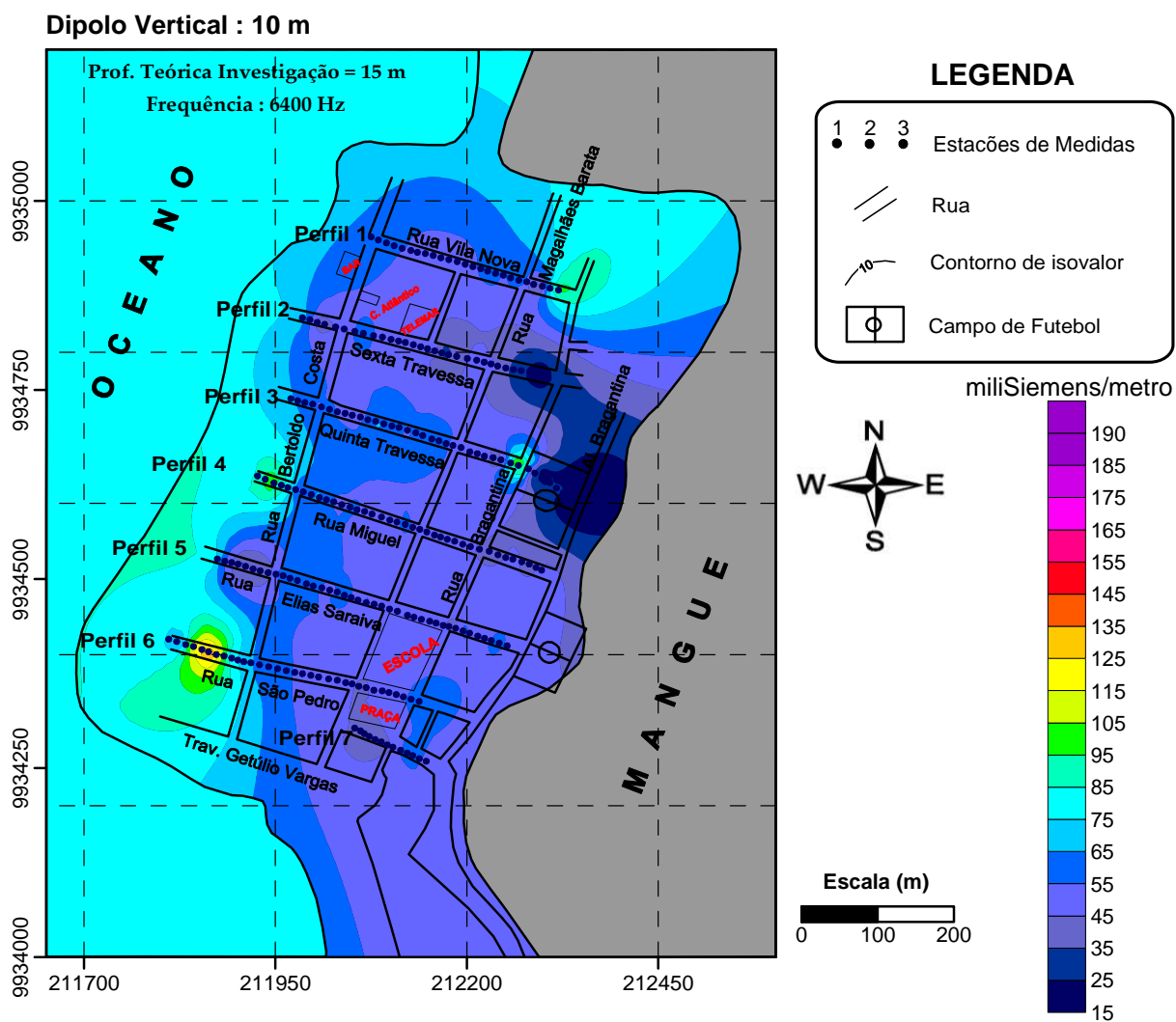


Figura 15 – Mapa de condutividade aparente para o dipolo vertical.

A comparação dos mapas e blocos diagrama das Figuras 13, 14 (dipolo horizontal) e figuras 15, 16 (dipolo vertical) indicam uma diminuição da condutividade aparente com a profundidade tanto em valor do parâmetro como em área afetada.

Bloco Diagrama 3D-EM34-3 (DV = 10 m)

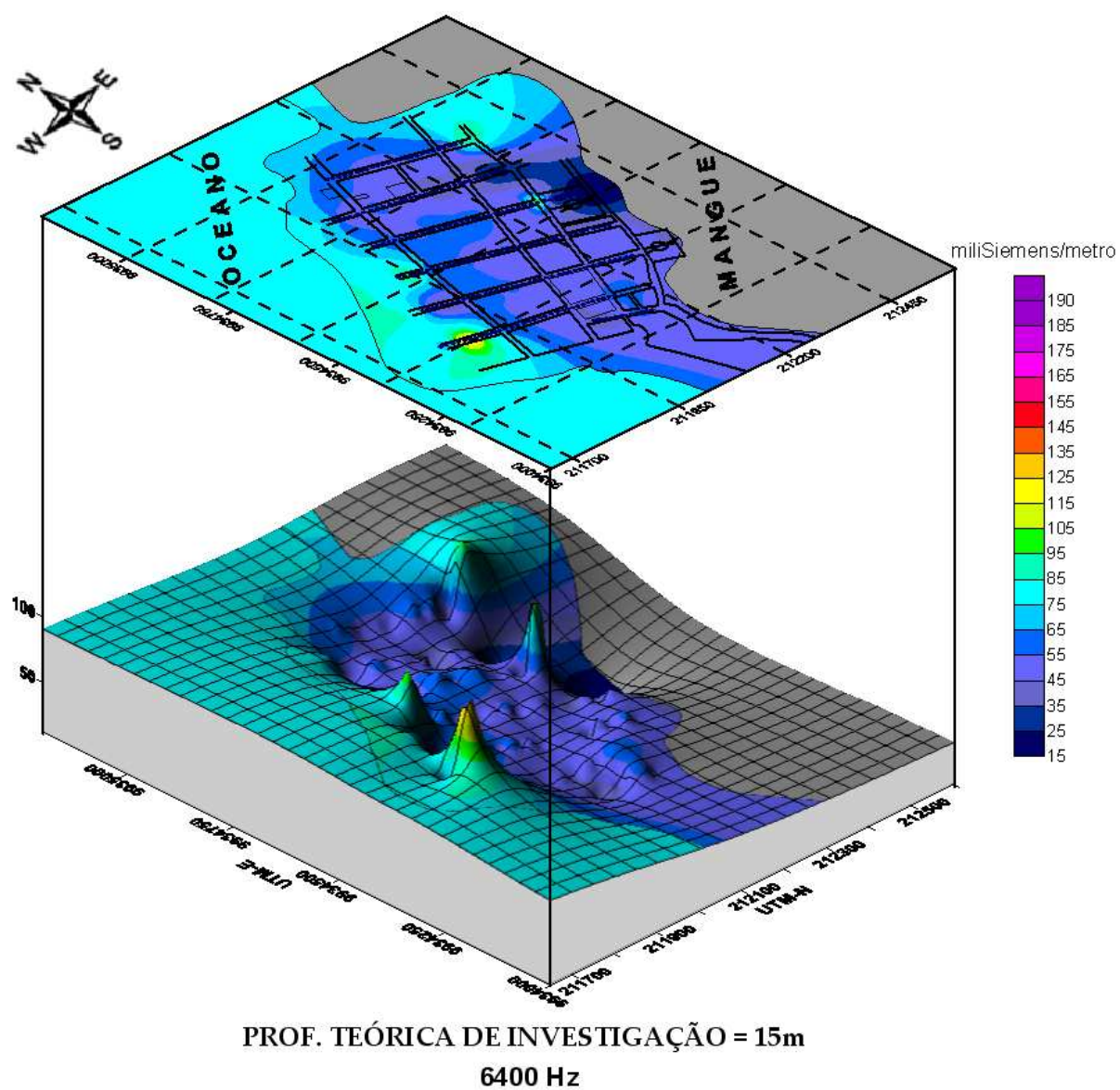


Figura 16- Bloco diagrama 3D de condutividade aparente para o dipolo vertical.

9.2 MEDIDAS ELETROMAGNÉTICAS – MAX MIN I

Os dados eletromagnéticos obtidos pelo sistema MAX MIN I são apresentados a seguir no formato de mapa de contorno da componente em fase do campo secundário (Hs) para cada uma das oitos frequências (Figuras de 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 e 24), bloco diagrama 3D (Figura 25) e em pseudo-seções (Figura 26) para seis perfis corridos na Vila de Algodal.

Com base na resposta característica do HLEM, em que a componente em fase apresenta anomalia de pico negativo sobre o corpo condutivo, os mapas e as pseudo-seções foram construídos com espectro de cores variado do vermelho e amarelo representando porções resistivas ao vermelho representando as porções condutivas da subsuperfície.

Os mapas correspondentes às frequências 14080, 7040, 3520 e 1760 Hz (Figuras 17, 18, 19 e 20) mostram a resposta eletromagnética da distribuição mais rasa dos meios salinizados e presença do mangue (em vermelho) e estão muito bem correlacionados com as respostas do sistema EM34-3. A partir da frequência 880 Hz, os mapas quase não apresentam mais valores correspondentes a zonas condutivas, indicando grandes corpos resistivos em profundidade até a frequência de 110 Hz, veja nas Figuras 21, 22, 23 e 24. .

A outra forma de visualização desta varredura eletromagnética por multi-frequência é feita no bloco diagrama 3D e pseudo-seções (Figuras 25 e 26). Dá para distinguir, pelas pseudo-seções, as áreas promissoras para captação de água subterrânea em aquíferos profundos, livres da contaminação salina e no bloco diagrama 3D, uma visualização em 3 dimensões do problema em questão.

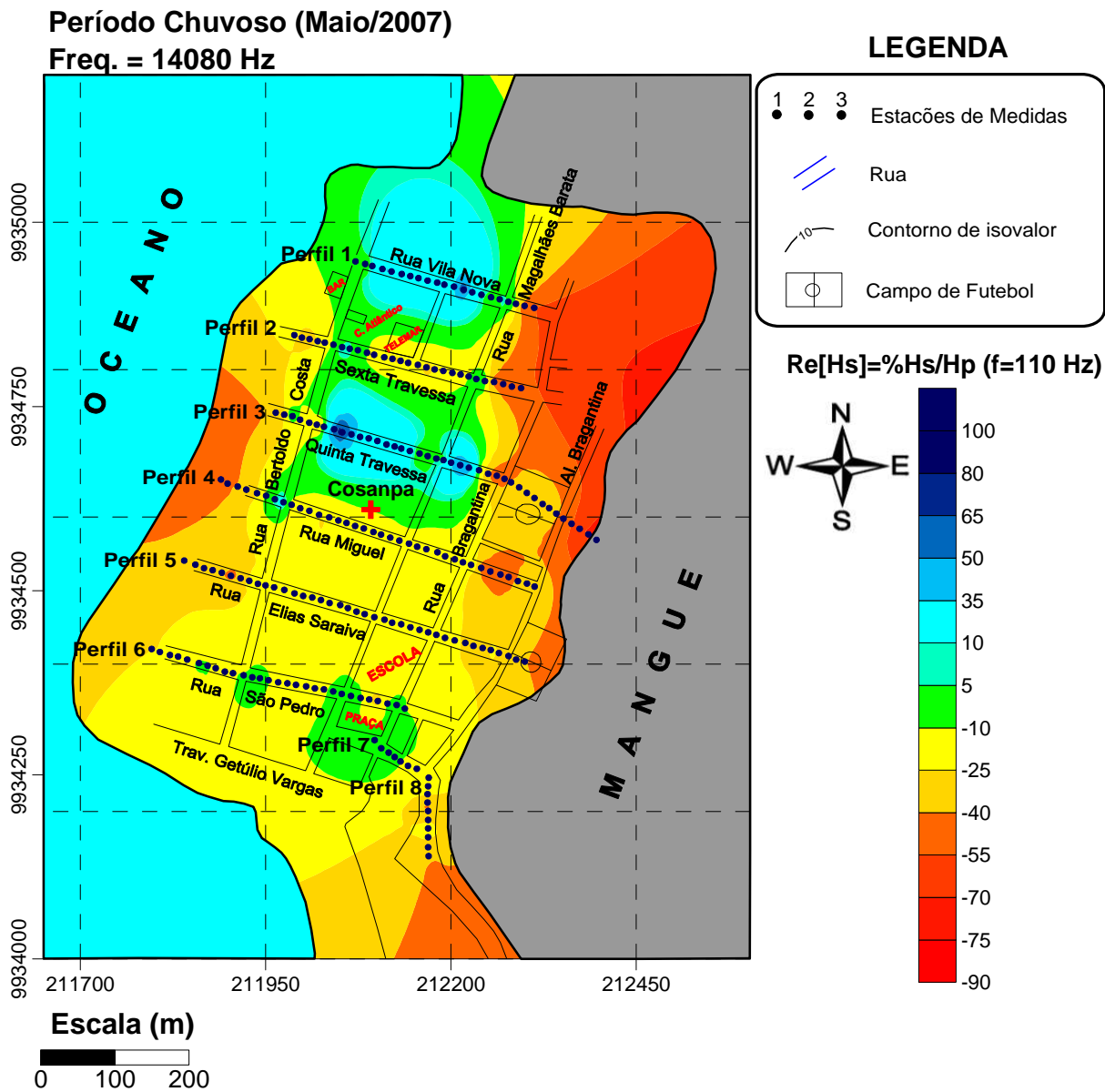


Figura 17- Mapa da componente em-fase para a frequência 14080 Hz.

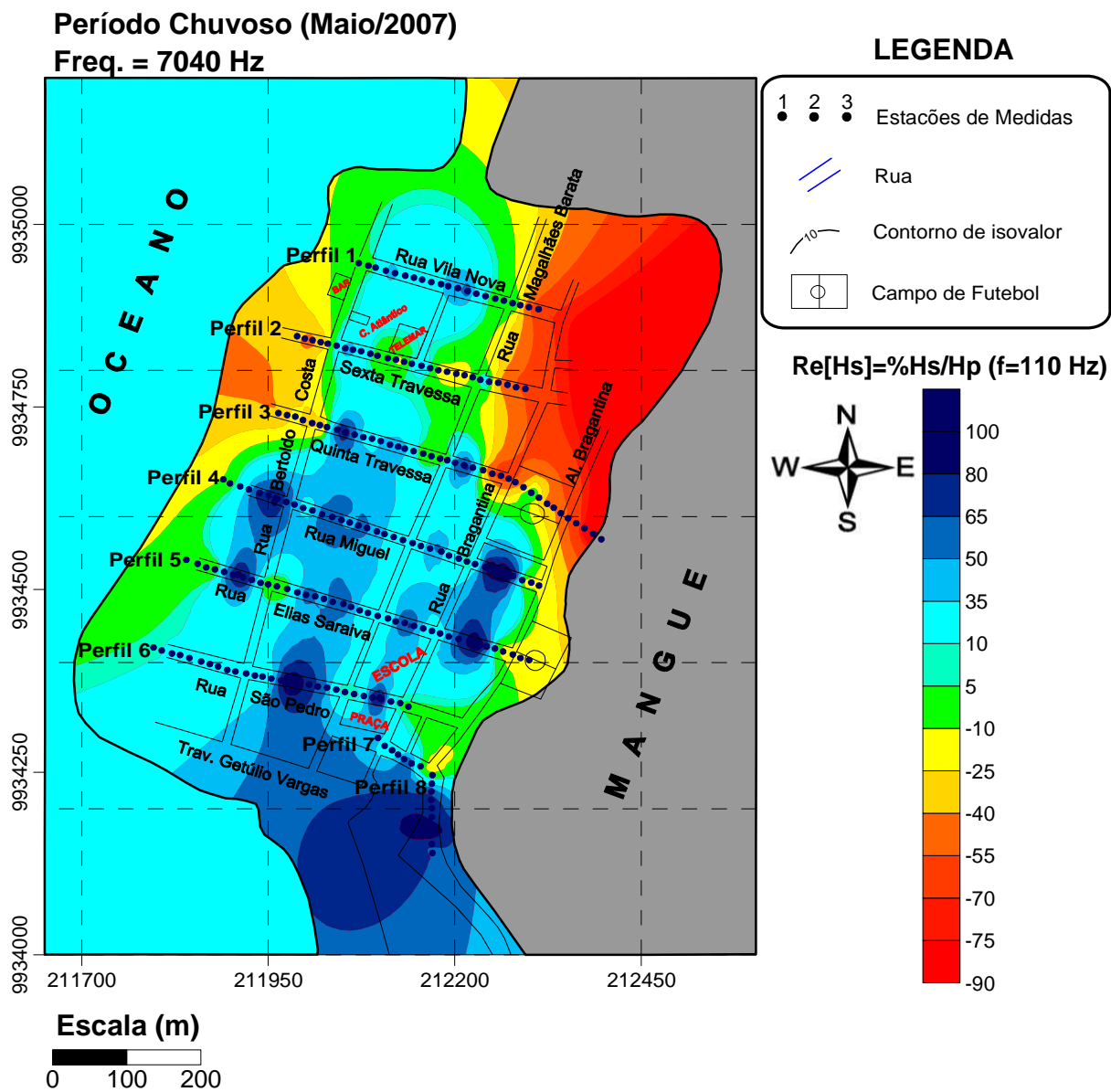


Figura 18- Mapa da componente em-fase para a freqüência 7040 Hz.

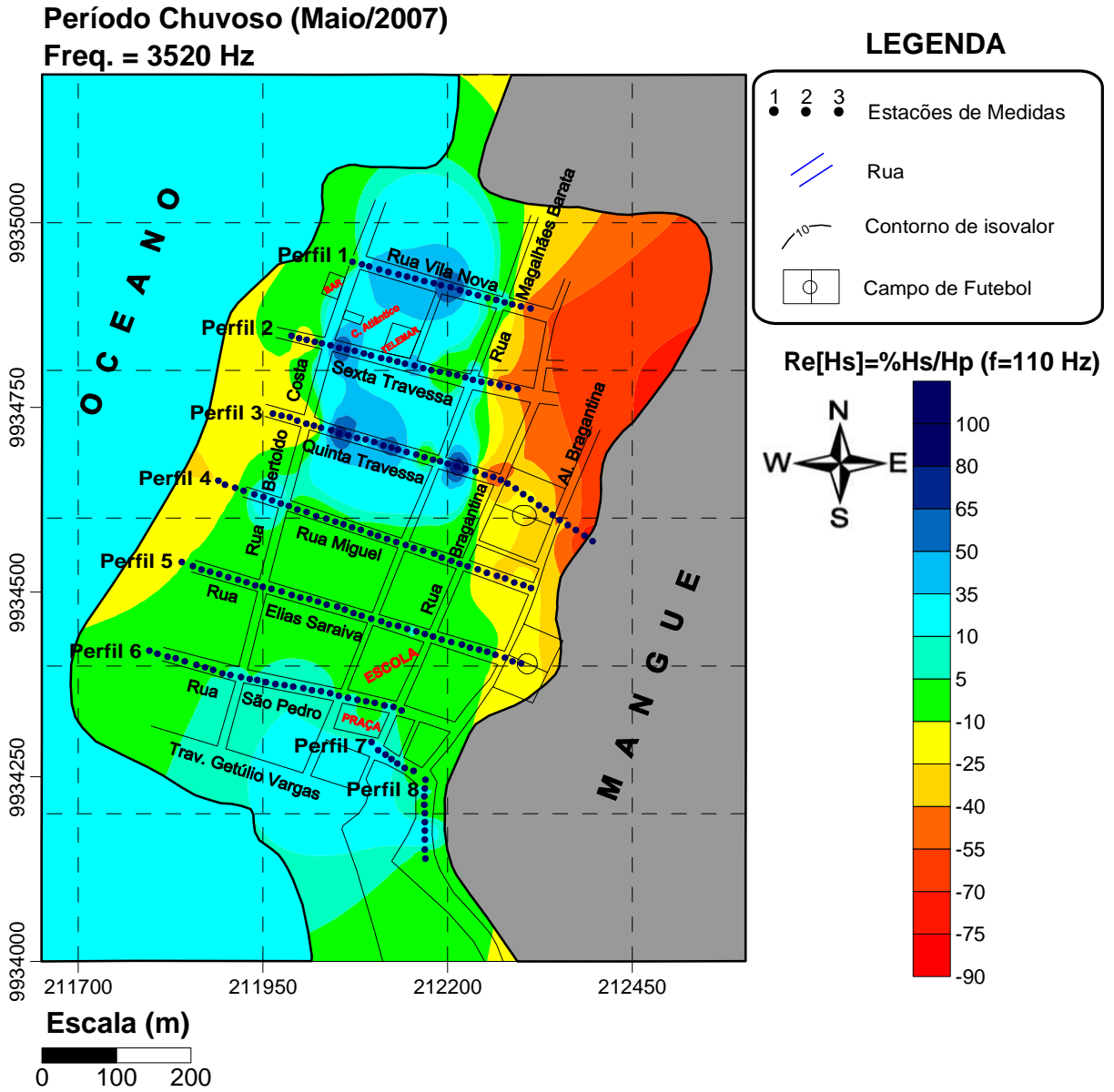


Figura 19- Mapa da componente em-fase para a freqüência 3520 Hz.

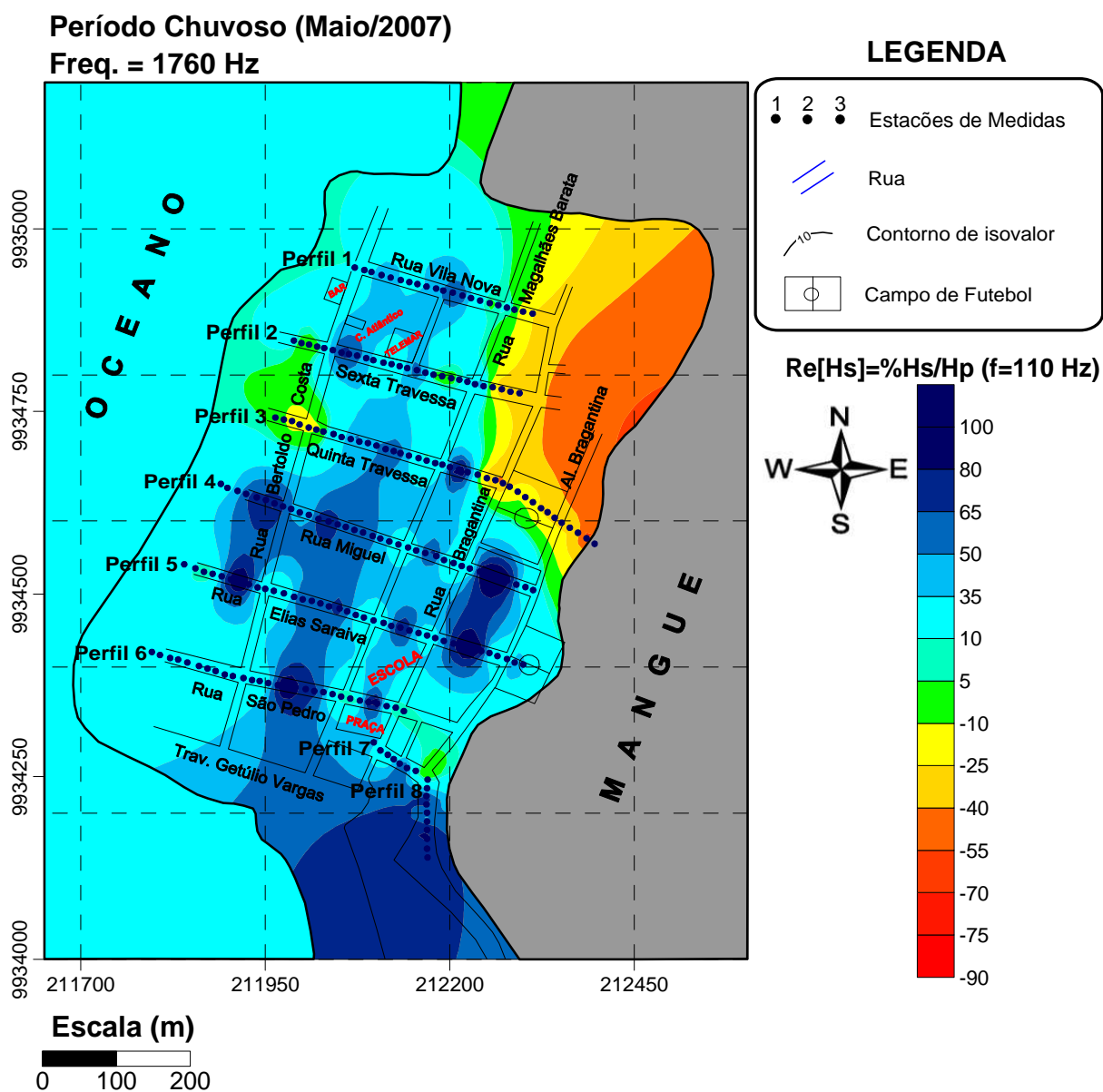


Figura 20- Mapa da componente em-fase para a freqüência 1760 Hz.

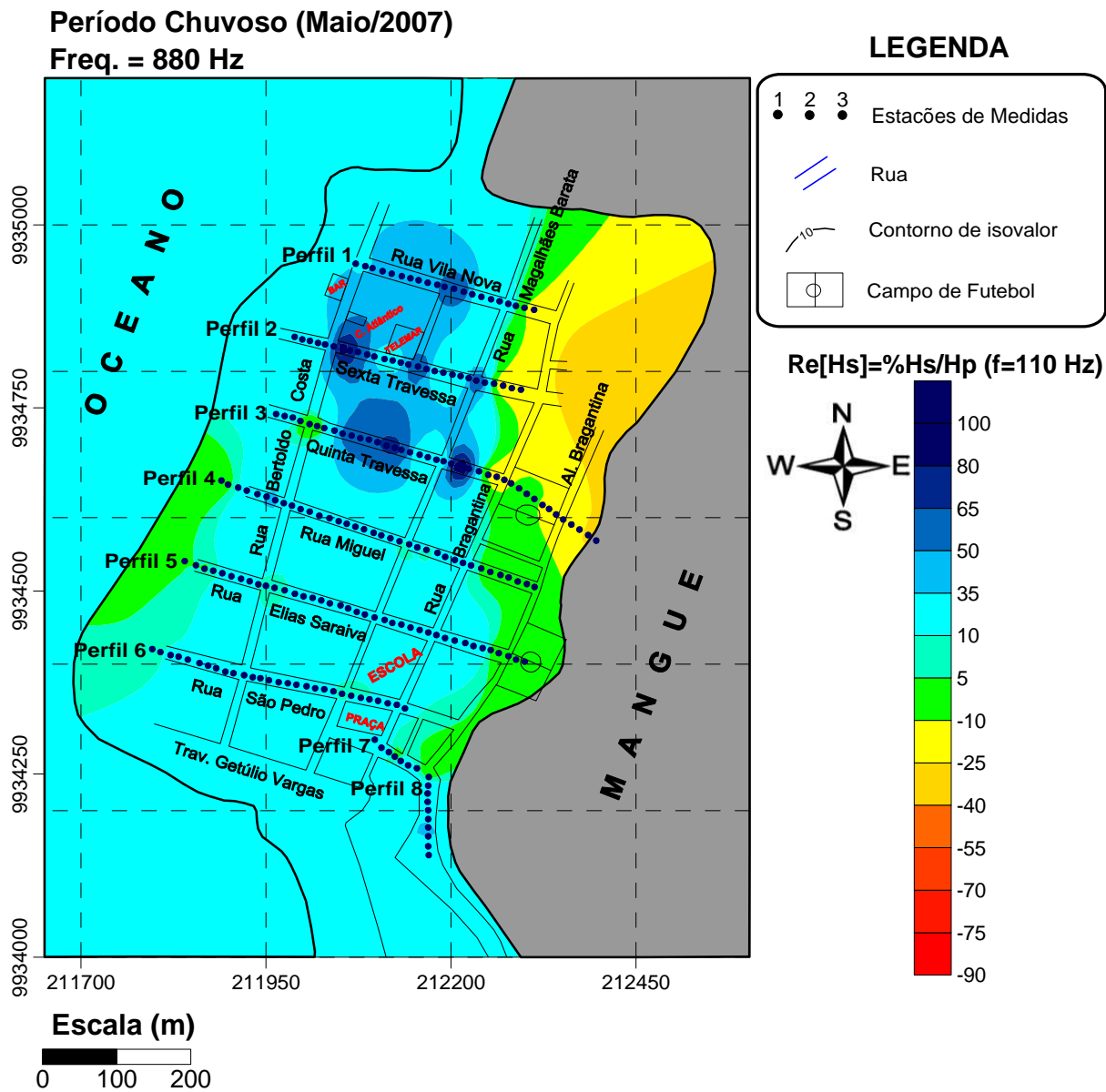


Figura 21- Mapa da componente em-fase para a frequência 880 Hz.

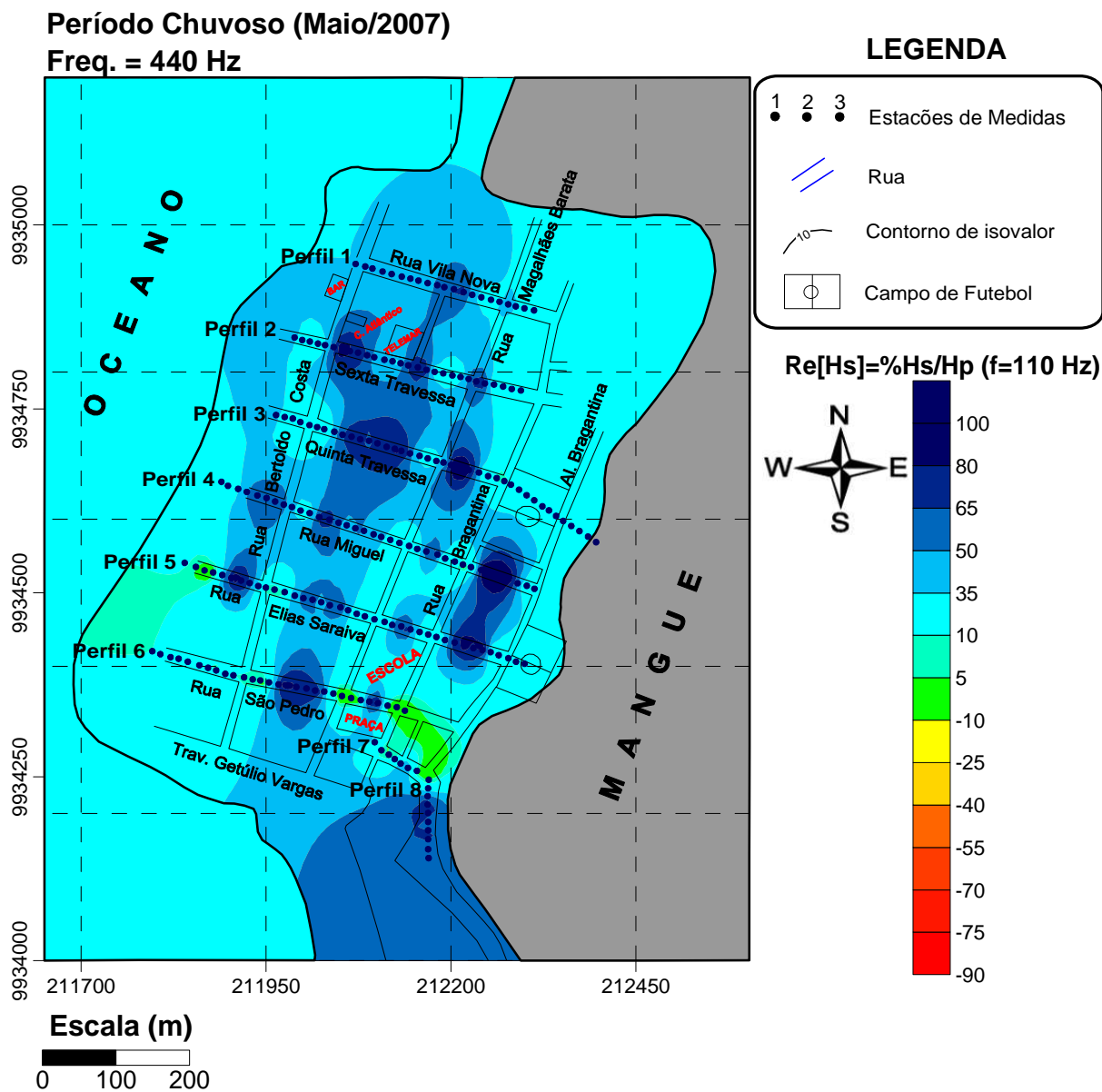


Figura 22- Mapa da componente em-fase para a frequência 440 Hz.

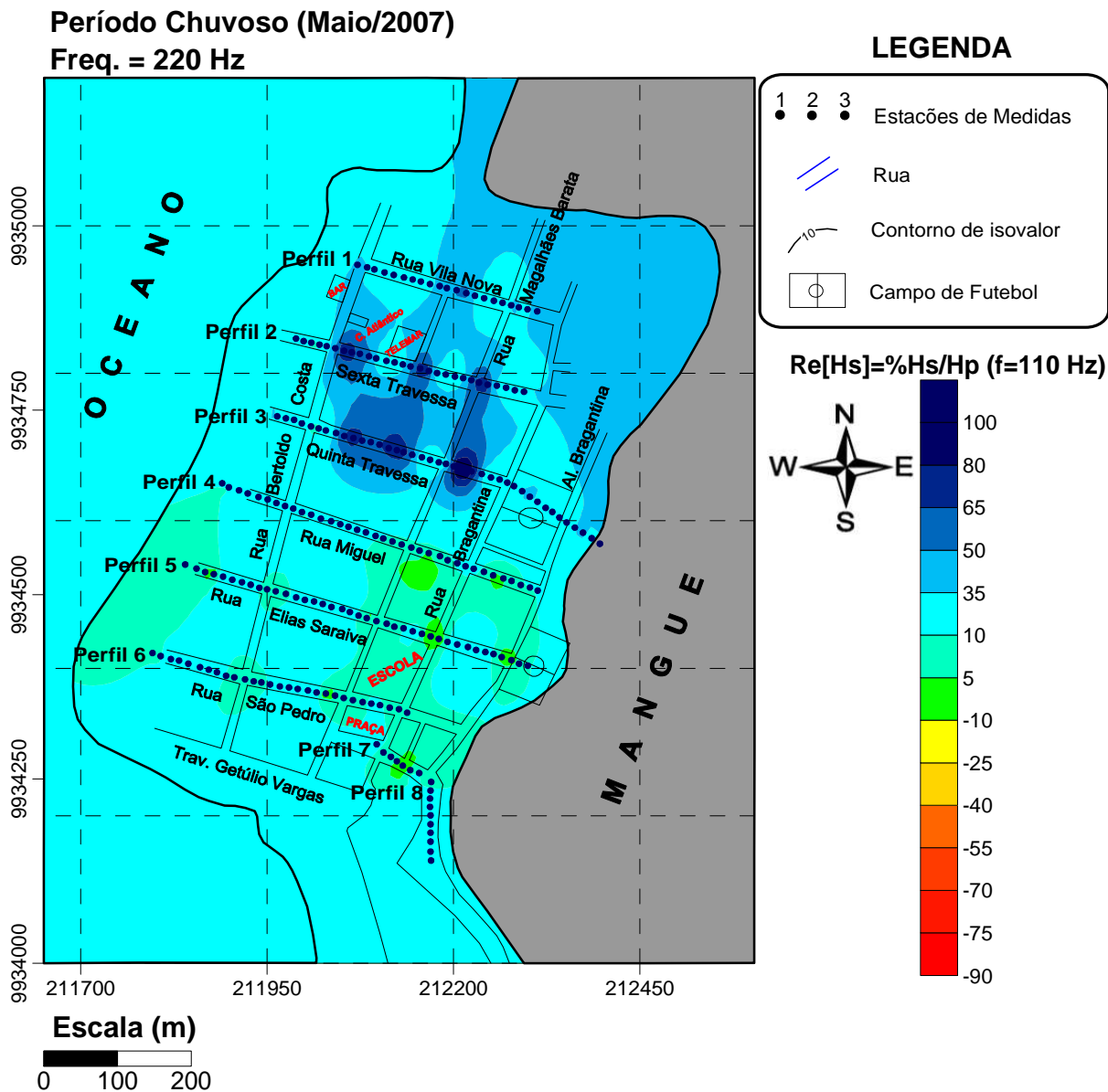


Figura 23- Mapa da componente em-fase para a frequência 220 Hz.

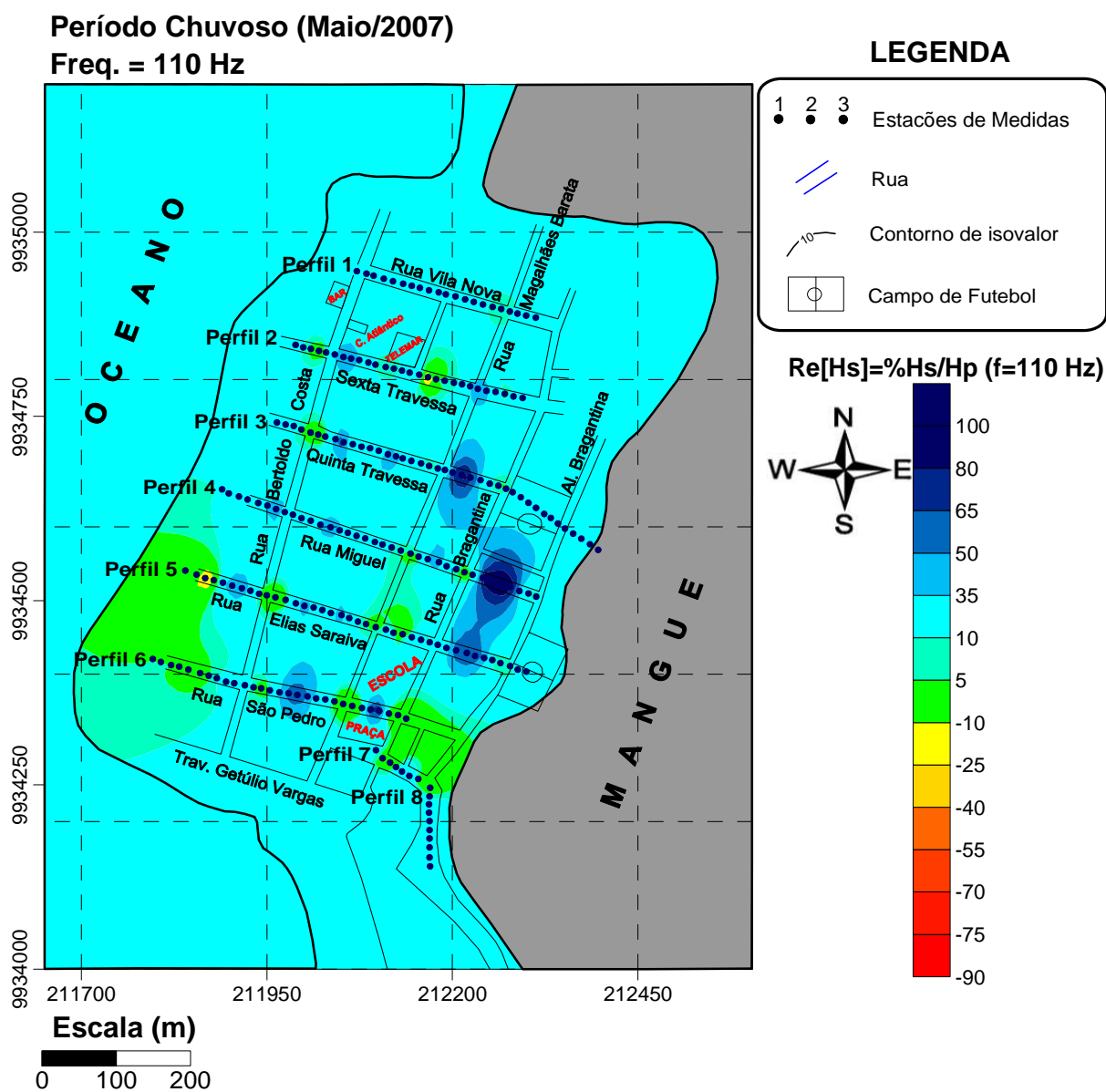


Figura 24- Mapa da componente em-fase para a frequência 110 Hz.

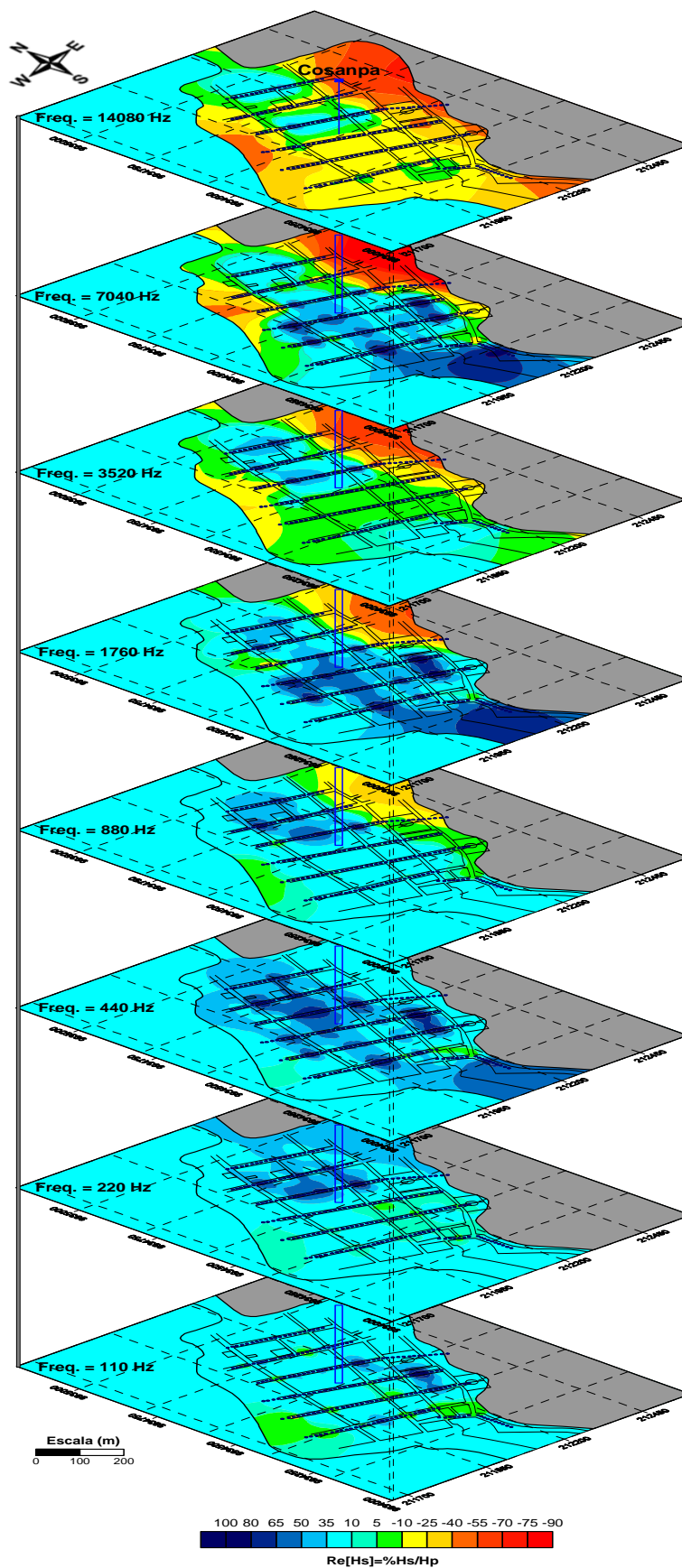


Figura 25- Bloco diagrama 3D da componente em-fase para as 8 freqüências.

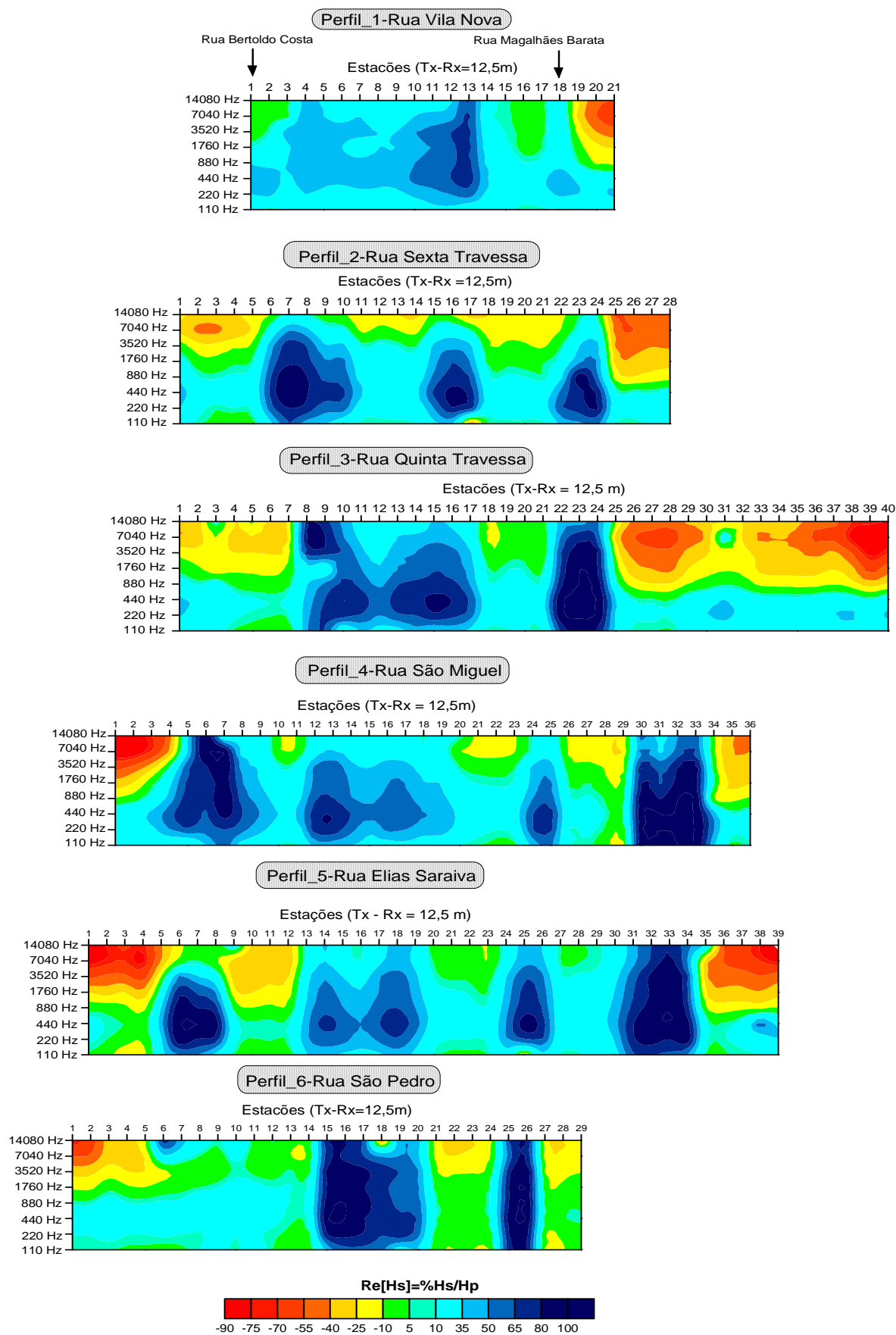


Figura 26- Pseudo-seção eletromagnética da componente em-fase para os seis primeiros perfis.

9.3 MEDIDAS HIDROGEOQUÍMICAS

Os parâmetros geoquímicos da água dos poços da Vila de Algodal foram medidos e coletados em duas épocas distintas, no mês de Maio (período chuvoso) e Dezembro (período não chuvoso) de 2007. No mês de Maio por apresentar um índice pluviométrico elevado, contribui para que a intrusão salina seja menos intensa. Já no período não chuvoso (Dezembro) a intrusão salina torna-se mais evidente, por causa da pouca ou nenhuma infiltração devido à estiagem e maior exploração. Esses dados são mostrados de três formas: tabela, gráfico e mapa de contorno.

A condutividade da água subterrânea na Vila, foi classificada por 4 classes, seguindo as diretrizes de qualidade de água estabelecida pela Organização Mundial de Saúde (WHO) :

- Recomendado para consumo (azul): 75mS/cm a 400 mS/cm;
- Tolerável para consumo, porém com restrições (amarelo): 400 mS/cm a 1250 mS/cm;
- Salgado (vermelho claro): 1250mS/cm a 5000 mS/cm;
- Muito salgado (vermelho escuro): maior que 5000mS/cm .

A Tabela 1 mostra os parâmetros geoquímicos analisados condutividade elétrica, pH e teor de cloro com suas respectivas épocas, localização, numeração, profundidade (m) e faixa de potabilidade.

Tabela 1- Parâmetros geoquímicos analisados com sua respectiva época, localização e numeração, profundidade e potabilidade dos poços da Vila de Algodal.

Época	Poço	UTM-E	UTM-N	Cond. (mS/cm)	pH	Cloro (mg/L)	Prof. (m)	Potabilidade
mai/07	P1	211986	9934716	477	5,26	118,9		tolerável
mai/07	P2	2003	4768	353	5,28	65,6	-5	recomendado
mai/07	P3	2040	4750	205	5,14	32,8	-5	recomendado
mai/07	P4	2095	4686	279	4,25	34,9	-6	recomendado
mai/07	P5	2231	4664	323	5,44	14,4		recomendado
mai/07	P6	2337	4600	231	5,97	23,6	-4	recomendado
mai/07	P7	2123	4768	368	5,42	52,3	-3,5	recomendado
mai/07	P8	2116	4848	91,5	5,22	10,3	-25	recomendado
mai/07	P9	2105	4796	61,2	4,94	14,4	-12	recomendado

mai/07	P10	2134	4914	168	6,03	18,5	-6,5	recomendado
mai/07	P11	2195	4886	196,7	6,21	18,5	-5	recomendado
mai/07	P12	2191	4856	169,1	5,93	26,7	-5	recomendado
mai/07	P13	2273	4880	1291	5,7	280,9	-5	salgado
mai/07	P14	2281	4900	946	5,67	205,1	-5	tolerável
mai/07	P15	1956	4602	594	5,45	118,9		tolerável
mai/07	P16	2034	4622	319	5,44	45,1	-12	recomendado
mai/07	P17	2028	4572	785	5,11	149,7	-5	tolerável
mai/07	P18	2063	4616	313	5,5	43,1	-5,81	recomendado
mai/07	P19	2155	4550	319	4,8	32,8	-6,59	recomendado
mai/07	P20	2185	4536	326	4,66	71,8	-9	recomendado
mai/07	P21	2266	4540	178,2	5,97	16,4	-4,8	recomendado
mai/07	P22	2283	4502	676	5,64	102,5	-4,5	tolerável
mai/07	P23	2299	4524	138,1	5,98	8,2	-3,1	recomendado
mai/07	P24	2243	4402	273	6,01	30,8	-4,3	recomendado
mai/07	P25	2224	4408	151,9	5,97	14,4	-5	recomendado
mai/07	P26	2038	4504	312	4,87	41,0	-5,5	recomendado
mai/07	P27	1991	4542	295	4,65	49,2	-4,5	recomendado
mai/07	P28	1905	4530	1093	5,40	221,5	-3,2	tolerável
mai/07	P29	1915	4526	860	5,93	180,4	-2,3	tolerável
mai/07	P30	1955	4360	225	6,27	41,0	-4,1	recomendado
mai/07	P31	1990	4314	205	5,69	25,6	-5	recomendado
dez/07	P1	2184	4312	1088	5,43	238,3	-2,9	tolerável
dez/07	P2	2176	4356	368	6,23	91,2	-4,5	recomendado
dez/07	P3	2171	4350	713	4,65	155,4	-10	tolerável
dez/07	P4	2318	4552	325	5,45	53,9	-2,97	recomendado
dez/07	P5	2325	4576	171,1	5,95	34,7	-2,58	recomendado
dez/07	P6	2337	4598	661	5,05	129,5	-2,22	tolerável
dez/07	P7	2367	4658	585	5,88	88,1	-2,8	tolerável
dez/07	P8	2277	4706	7020	5,55	2030,5	-4,02	tolerável
dez/07	P9	2325	4749	10630	4,07	3263,2	-3,58	tolerável
dez/07	P10	2287	4904	5220	4,56	1450,3	-4,7	muito salgado
dez/07	P11	2240	4882	1365	4,53	372,9	-10,8	salgado
dez/07	P12	2188	4858	201	5,21	18,6	-6,34	recomendado
dez/07	P13	2277	4876	1567	5,26	424,7	-4,47	salgado
dez/07	P14	2143	4910	160	6,16	12,9	-6,13	recomendado
dez/07	P15	2118	4964	92,4	5,36	16,1	-6,02	recomendado
dez/07	P16	2124	4990	113,5	4,39	14,5	-12	recomendado
dez/07	P17	2057	4928	306	4,32	53,9	-18	recomendado
dez/07	P18	2079	4868	612	4,21	145,0	-18	tolerável
dez/07	P19	2065	4676	295	4,47	51,8	-5,25	recomendado
dez/07	P20	2198	4692	401	4,1	35,2	-5,18	tolerável
dez/07	P21	2173	4696	583	5,09	88,1	-4,72	tolerável
dez/07	P22	1905	4524	6970	6,29	1916,5	-3,23	muito salgado
dez/07	P23	1996	4476	262	5,52	70,4	-5,16	recomendado

dez/07	P24	2022	4476	96	5,19	25,9	-5,32	recomendado
dez/07	P25	2096	4444	176,6	5	16,1	-4,9	recomendado
dez/07	P26	2209	4452	310	5,63	78,7	-4,84	recomendado
dez/07	P27	2192	4454	812	5,25	191,7	-10	tolerável
dez/07	P28	2202	4478	819	5,45	129,5	-8,45	tolerável
dez/07	P29	2200	4525	252	5,08	26,9	-8,22	recomendado
dez/07	P30	2179	4412	212	4,37	87,0	-10,53	recomendado
dez/07	P31	2222	4412	176,9	4,37	8,3	-4,44	recomendado
dez/07	P32	2042	4348	212	5,14	66,3	-4,92	recomendado
dez/07	P33	1990	4320	371	5,03	31,1	-5,1	recomendado
dez/07	P34	2049	4438	202	4,88	31,1	-5,4	recomendado
dez/07	P35	1936	4561	4800	5,52	1398,5	-3,88	salgado
dez/07	P36	2124	4598	573	5,2	98,4	-6,61	tolerável
dez/07	P37	1984	4718	821	5,04	217,5	-3,6	tolerável
dez/07	P38	1983	4706	779	4,73	196,8	-9	tolerável
dez/07	P39	1998	4754	10940	4,84	3729,4	-3,53	muito salgado
dez/07	P40	2003	4769	16920	3,93	5801,3	-12	muito salgado
dez/07	P41	2032	4873	16210	5,57	5386,9	-4,3	muito salgado
dez/07	P42	2076	4994	23600	6,46	8080,4	-4,21	muito salgado
dez/07	P43	2057	4801	20800	5,29	7044,4	-4,31	muito salgado
dez/07	P44	1927	4478	1845	5,58	492,1	-3,4	salgado
dez/07	P45	1833	4320	5870	5,01	1968,3	-3,35	muito salgado
dez/07	cosanpa	2092	4610	573	4,38	105,7		tolerável

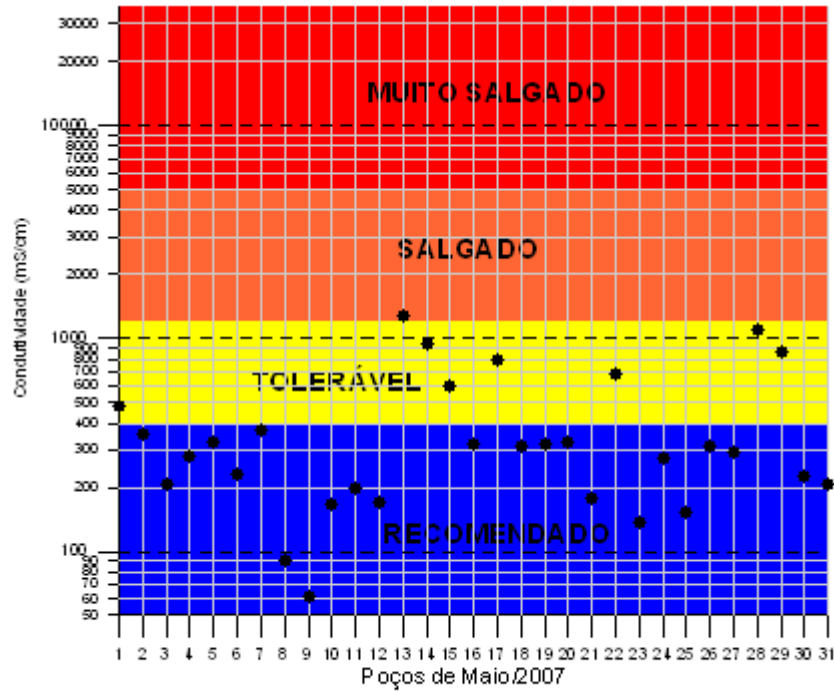
A Figura 27 (A) e (B) mostra os gráficos da condutividade dos poços nas duas épocas, Maio/2007 (31 poços) e Dezembro/2007 (46 poços), seguindo as 4 faixas da classificação das diretrizes de potabilidade da WHO.

Nesses dois gráficos fica bem visível a variação sazonal do parâmetro condutividade elétrica da água dos poços da Vila de Algodoal. No período chuvoso somente sete poços estavam na faixa tolerável de potabilidade e apenas um foi identificado com água salgada (poço 13). Já, no período de estiagem o gráfico da figura 2 mostra um grande número de poços sendo afetado pela intrusão salina.

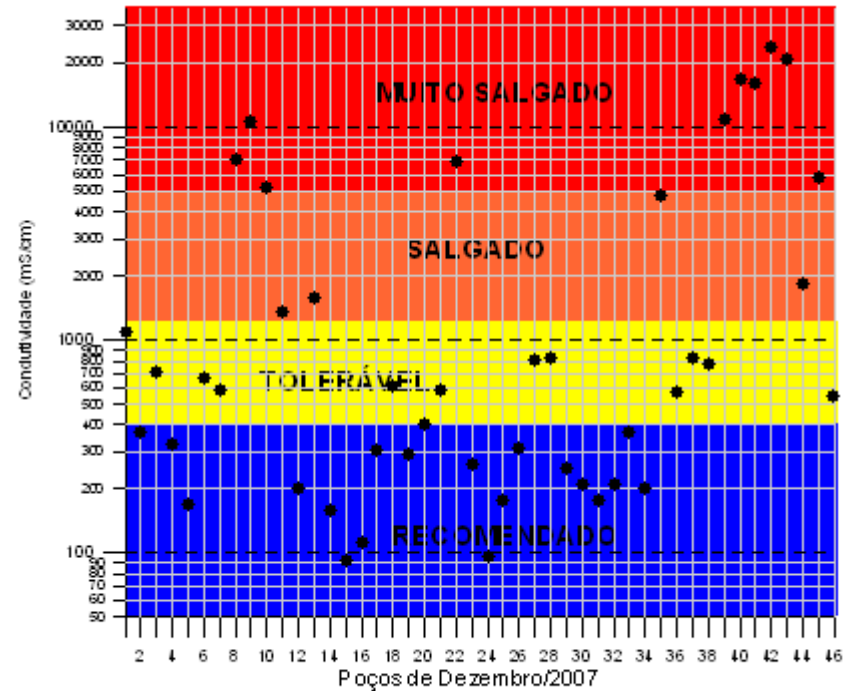
A terceira forma de apresentação dos dados geoquímicos mostra a distribuição espacial da contaminação salina na Vila de Algodoal, através de mapas georeferenciados de contornos de isovalores da condutividade elétrica da água dos poços (Figura 28 (A) e (B)).

A Figura 28 (A) mostra que para o período chuvoso (Maio/2007) a maioria dos poços tem condutividade elétrica na faixa de potabilidade recomendável (entre 60 mS/cm a 400 mS/cm, em azul). Somente sete poços situados a NE e a SW estão na

faixa de potabilidade tolerável. Apenas o poço 13 apresenta-se salinizado nesse período.



(A)



(B)

Figura 27- (A) Gráfico da condutividade da água poços na Vila de Algodal (Dezembro/2007) e sua classificação quanto à salinidade. (B) Gráfico da condutividade da água poços na Vila de Algodal (Maio/2007) e sua classificação quanto à salinidade.

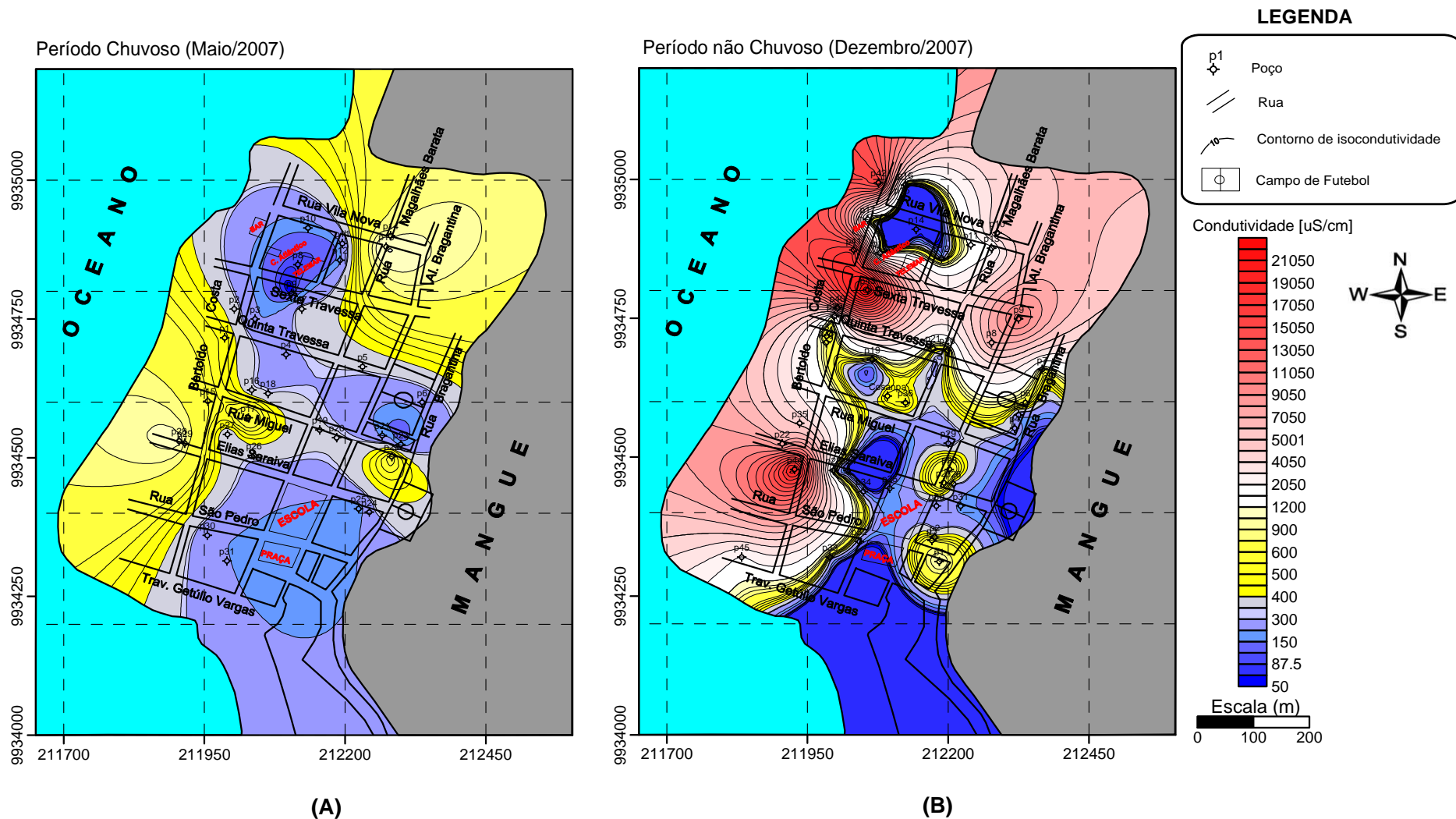


Figura 28- (A) Mapa de condutividade elétrica dos poços da Vila de Algodal para o período chuvoso (Maio/2007). (B) Mapa de condutividade elétrica dos poços da Vila de Algodal para o período não chuvoso (Dezembro/2007).

A Figura 28 (B) mostra o grande avanço de salinização da água dos poços no período de estiagem. Nota-se toda orla da praia e o norte da Vila contaminada com água salgada a muito salgada. Somente a porção central e sudeste e uma pequena área a norte da Vila não são contaminadas nesse período. Embora muito pequena essa área não contaminada ao norte da Vila, a qual contém os poços 15, 14 e 12 vem confirmar a informação verbal dada pelo morador Sr. Beco de que o poço de sua residência (poço 14) nunca ficou salinizado. Por tanto, essas as áreas são promissoras para exploração de água subterrânea do aquífero livre, pois apresentam valores baixos de condutividade elétrica na faixa recomendada pelas diretrizes da Organização Mundial da Saúde.

Outro parâmetro geoquímico medido foi o teor de cloro da água dos poços. A faixa de valores do cloro é de 0 a 270 mg/L para as amostras no mês de Maio de 2007 e, de 0 a 8000 mg/L nas amostras de Dezembro/2007 (Figura 30 (A) e (B)). Esses altos valores no período da estiagem correspondem à salinização mostrada no mapa de condutividade de Dezembro/07 e tem, inclusive, distribuição espacial semelhante, mostrando alta correlação desses parâmetros. De fato, os dados amostrais dos valores da variável cloreto em [mg/L], podem ser estimados com base nos valores de condutividade expressos em [μ S/cm], a partir da curva de regressão

$$Cl = -83,32 + 0,33898 * Condutividade \quad (4)$$

obtendo-se uma correlação de 0,99860 (Figura 29).

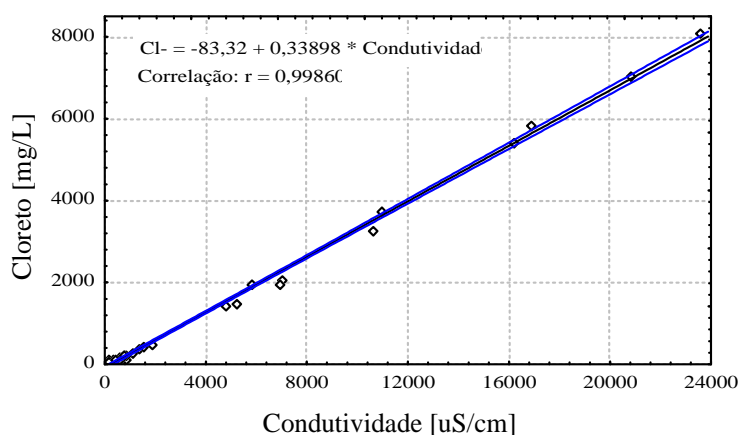


Figura 29- Diagrama de dispersão que visualiza a relação que existe entre as variáveis Condutividade [μ S/cm] e os conteúdos de cloro [mg/L] na segunda campanha de amostragem.

Por ser um dos principais componentes da água do mar e, por sua característica de estabilidade química, a concentração dos íons de cloreto pode ser considerada uma excelente indicadora da ocorrência do processo de intrusão de água do mar dentro do aquífero da Vila, isto é, sua movimentação deve ser aproximadamente, a mesma que a taxa de intrusão.

Por fim, os valores de pH medidos ficaram na faixa de 4,0 a 6,4 nas amostras coletadas em Maio/2007 e, de 4,0 a 6,5 nas de Dezembro/2007, praticamente sem nenhuma mudança de valores. Porém na Figura 31 (A) e (B) nota-se uma mudança da distribuição espacial, talvez por conta da melhor densidade da amostragem realizada em Dezembro/2007.

Embora o processo de intrusão marinha seja evidente; a mistura com a água do mar de natureza alcalina deveria resultar num aquífero de natureza pelo menos neutro. Entretanto, a atividade de íon de hidrogênio (pH) das amostras de água subterrânea coletadas em maio e dezembro de 2007 apresenta em geral, um pH inferior a água de chuva, principal fonte de recarga. A acidez das águas subterrâneas reflete o caráter ácido dos solos hospedeiros do aquífero. Esta acidez pode estar relacionada com a ocorrência maior de ácidos fúlvicos do que ácidos húmicos e, a baixa qualidade da matéria orgânica dentro dos solos da região

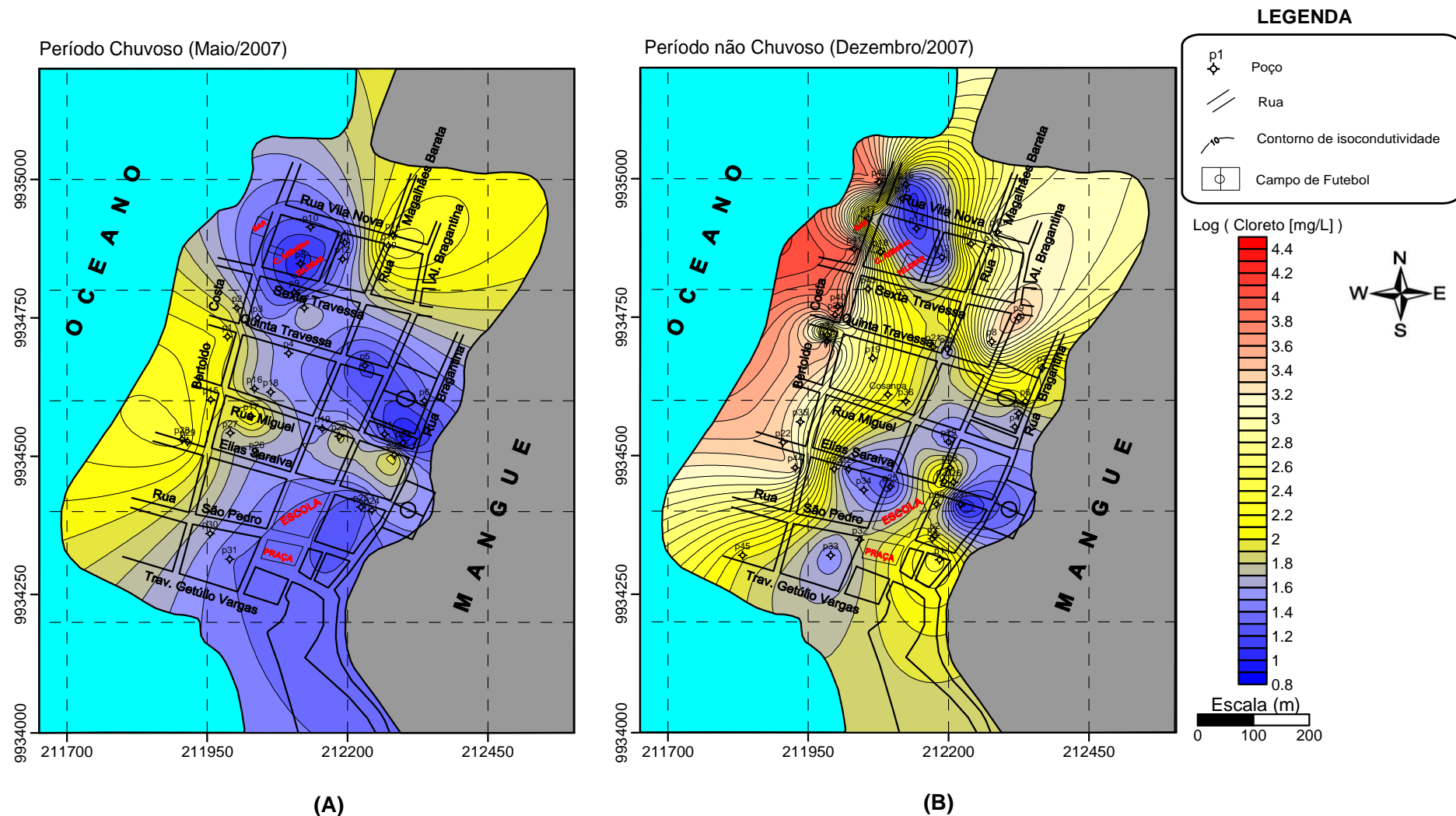


Figura 30- (A) Mapa de teor de cloro no período de Maio/2007. (B) Mapa do teor de cloro no período de Dezembro/2007.

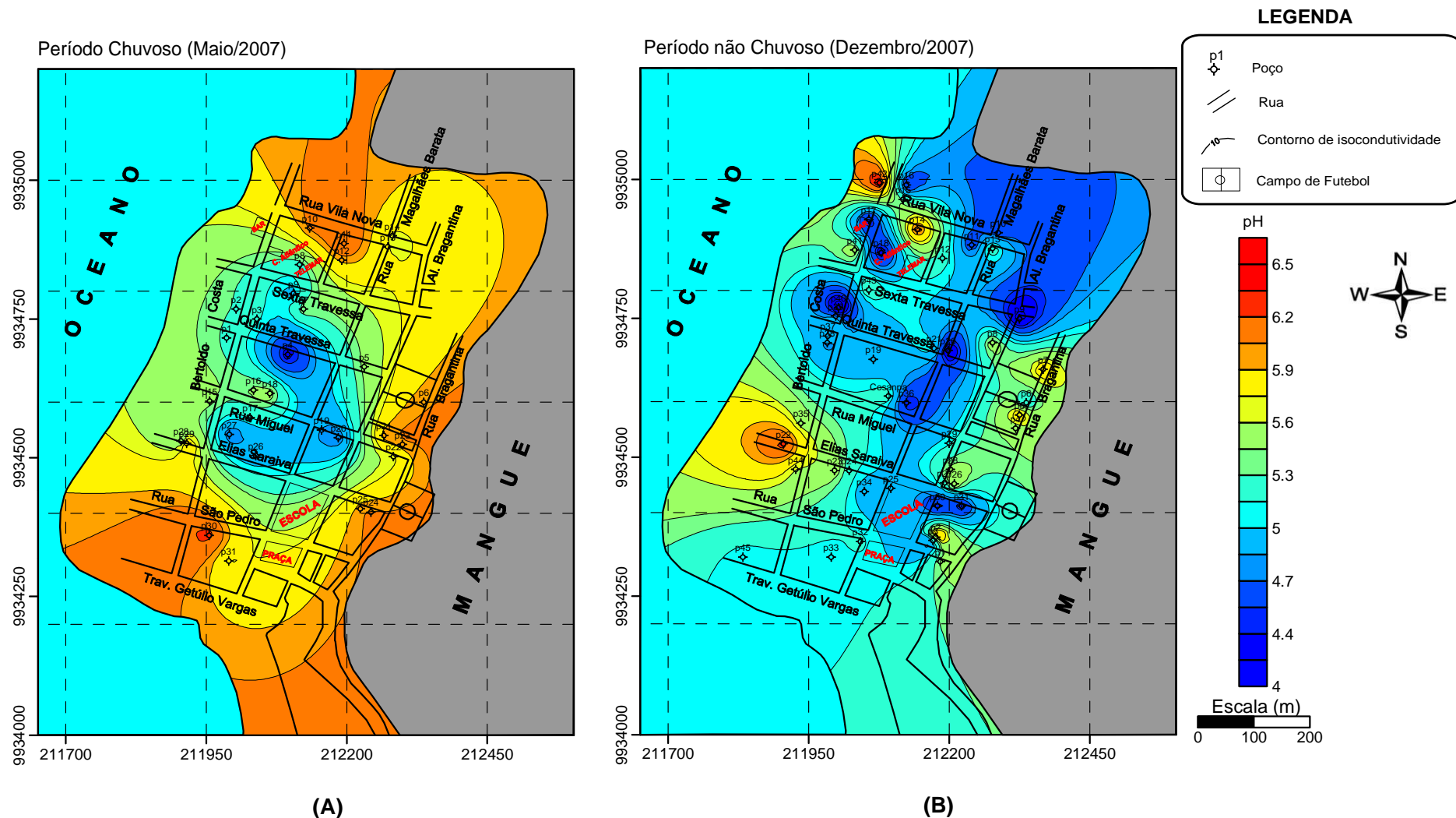


Figura 31- (A) Mapa de pH no período de Maio/2007. (B) Mapa de pH no período de Dezembro/2007.

10 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Todas as metodologias aplicadas neste trabalho contribuíram para se alcançar o objetivo de busca de soluções para a problemática do abastecimento de água potável para a Vila de Algodal.

Os resultados das metodologias geofísicas eletromagnéticas rasas, obtidas com o EM34 (DV e DH, Tx-Rx=10m) e com o MAXMIN I (as quatro maiores frequências, Tx-Rx=50m) apresentaram ótima correlação entre si e com as medidas de parâmetros hidrogeoquímicos, garantindo alta confiabilidade na informação.

Ficou evidente a ocorrência de intrusão salina que atinge o aquífero livre, seu comportamento sazonal, com ampliação da salinização justo no período da estiagem, quando diminui o poder de recuperação do aquífero, agravando ainda mais o problema dos moradores da Vila.

Foi possível identificar e delimitar as áreas atualmente afetadas e aquelas livres da contaminação. Mas, dá para inferir que a exploração no aquífero livre nas áreas ou zonas ainda livres da intrusão não estão protegidas de forma perene. O aumento do consumo pode ampliar a contaminação.

Daí, há que se apelar para a exploração de águas mais profundas. E, para isso, pode-se valer da resposta eletromagnética profunda obtida com o MAXMIN I através das quatro menores frequências, cujos mapas e pseudo-seções indicam grandes e contínuos pacotes resistivos em profundidade.

Portanto, cabe sugerir um furo profundo até topar o embasamento e, depois, por perfilagem geofísica de poço, escolher as seções permo-porosas profundas mais promissoras para o posicionamento dos filtros de captação da água subterrânea com o devido isolamento do aquífero livre na terminação do poço. O local da perfuração pode ser justamente no terreno público, onde está a rede de poços rasos, atualmente desativada.

E, por fim, garantido o abastecimento local de água potável e, estando a Vila de Algodal inserida em uma APA, recomendam-se ações de gestão de recursos hídricos por parte dos órgãos governamentais, no sentido de conscientizar a população em evitar a captação de água do aquífero livre e executar o adequado fechamento dos poços visando prevenir futuras contaminações antrópicas ou mesmo naturais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL, I. G.. **Caracterização de solos de uma topossequência na Ilha de Maiandeuá-PA.**Dissertação (mestrado). Faculdade de Ciências Agrárias do Pará, Belém,1998.
- ARAGÃO, R. C. **Metodologia geofísica aplicada à pesquisa de salvamento arqueológico nos Sítios Bittencourt, Jambuaçu e Jaburu, Estado do Pará.** Dissertação de Mestrado em Geofísica. Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 2006
- BOWEN, R. **Groundwater.** Elsevir Applied Science Publishers, 497p. 1986.
- CUSTODIO, E., HERRERA, C.,. **Utilización de la relación Cl/Br como trazador hidrogeoquímico en hidrologia subterránea.** Boletín Geológico y Minero, Julho – Agosto, Vol. 111, no 4, 2000.
- CUNHA, L. S. **Prospecção de Água Subterrânea em Terrenos Sedimentares na Região Litorânea Cearense (Cascavel-Ce): Integração de Dados Gofísicos, Hidrogeológicos e Hidroquímicos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará (UFC). Departamento de Geologia.2002.
- FERREIRA, C. S. **Característica litopaleontológicas da Formação Pirabas, Estado do Pará.** Anais da VI Conferência de Geologia das Guianas. Avulso.DNPM/DGM, 41:101-111, 1966.
- FERREIRA, C. S. **Fácies da Formação Pirabas (Mioceno Inferior): Novos conceitos e ampliações.** (Projeto específico ABC.FINEP). *An. Acad. Brás. Ciênc.* 49 (2).353, 1977.
- FERREIRA, C. S. **Correlação da Formação Pirabas (Mioceno Inferior) N e NE do Brasil, com as formações Chipola e Tampa da Península da Florida, USA.** In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE PALEOTOLOGIA,. Buenos Aires.1978. Atas. v. 3, p.49-55, 1980.
- LOBATO, C., et al. **Plano de Desenvolvimento Ecoturístico da Área de Proteção Ambiental de Algodal / Maiandeuá – APA Algodal.** Belém: SECTAM, 1999.
- LUIZ, G. L. *et al.* **Medidas elétricas na ilha de Algodal, Estado do Pará.** In: CONGRESSO INTERNACIONAL NA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 7., Salvador, 2001.
- MCNEILLI, J. D. **Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers. TN-6,** Geonics Inc., Mississauga, Ontario.1980.

PETRI, S. **Foraminíferos miocênicos da Formação.** *Bol. Fac. Ciênc. Let.*, Universidade de São Paulo, 216(16): 1-78. São Paulo, 1957.

PINÉO, T. R. G. **Integração de dados geofísicos, geológicos e de sensoriamento aplicados à prospecção de água subterrânea em meio fissural (Distrito de Juá, Irauçuba/CE).** Relatório de Graduação. Universidade Federal do Ceará (Dissertação de Mestrado), Ceará, 2005.

ROCHA, S. V.,. **Diagnostico do Saneamento no Município de Balneário Barra do Sul.** TCC (Trabalho de Conclusão de Curso)- Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Santa Catarina, 2003.

REYNOLDS, J. M. **An Introduction to Applied and Environmental Geophysics.** John Wiley & Sons. Inglaterra. 796p. 1997.

ROSSETTI, D. F.; TRUCKENBRODT, W.; GOES, A. M.. **Estudo paleoambiental e estratigráfico dos sedimentos Barreiras e Pós-Barreira na Região Bragantina, Nordeste do Pará.** *Bol. Mus. Par. Emílio Geoldi, Série Ciências da Terra*, 1(1): 24-74, Belém,1989.

SABADIA, J. A. B. *et al.* **Salinização dos aquíferos da praia do Pacheco - Município de Caucaia - Região Metropolitana de Fortaleza – Ceará.** In: JOINT WORLD CONGRESS ON GROUNDWATER, 1, Fortaleza, 2000.

SANTOS, V. F. **Estratigrafia holocênica morfodinâmica atual da planície costeira da Ilha de Algodal e Marudá.** Universidade Federal do Pará (Dissertação de Mestrado), Belém, 1996.