

“Metodologias Geofísicas e Hidrogeoquímicas aplicadas à prospecção de água subterrânea em ambiente de intrusão salina na Vila de Algodual-PA”

Allex Raiol Cardoso Medeiros*, Graduado em Geofísica/UFPA, allexraiol@yahoo.com.br
José Geraldo das Virgens Alves, Faculdade de Geofísica, Instituto de Geociências/UFPA, jgvalves@ufpa.br
Antônio Vaquera Vargas, Faculdade de Geologia, Instituto de Geociências/UFPA, vaquera@ufpa.br
Paulo Sérgio Pereira Magalhães, Téc. Geofísica, Faculdade de Geofísica, Instituto de Geociências/UFPA

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

This work aimed at the study of underground water prospection in environment of saline intrusion, using measured geophysical with the electromagnetic system Slingram (Max Min and EM34-3) and study physicist-chemistry of the water of wells. The works had been carried through Village of Algodual/Island of Maiandeuá located north-eastern of the state of Pará. The gotten results suggest a zone prolonged in direction NW-SE, located in the central portion of the Village of Algodual, as being promising for underground water exploitation.

Introdução

Atualmente há uma grande preocupação em âmbito mundial em relação 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 escapa 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.

Este problema afeta diretamente toda a costa brasileira. Neste contexto, está incluído o litoral do Estado do Pará, onde a água subterrânea é 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 (ver Figura 2), em ambiente costeiro, onde os moradores enfrentam problemas sazonais na captação de água; no mês de Janeiro devido à estiagem alguns poços secam e, no mês de Julho, devido ao consumo exagerado, tanto pode secar como salinizar o aquífero livre.



Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo (Modificado de Luiz *et al.*, 2001).

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. Aqueles resultados serão de suma importância, pois serão correlacionados com os dados deste trabalho.

O trabalho foi desenvolvido visando identificar áreas livres do risco de contaminação pela intrusão salina, de modo a orientar os moradores da Vila sobre os locais adequados para perfuração de poços, sem que a água venha a ser contaminada.

Área de estudo

A Vila de Algodual está situada no litoral nordeste do Estado do Pará, 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 Mocooca ao Sul, com o Rio Maracanã a Leste e com o Rio Marapanim a Oeste (ver Figura 1).

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 Algodão.

Na área estudada foram realizados 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 mostra o posicionamento georeferenciado dos perfis, estações de medidas geofísicas e poços na Vila de Algodão.

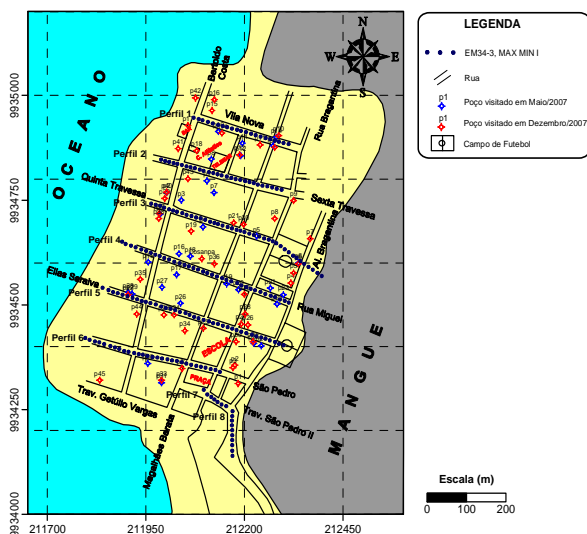


Figura 2 – Mapa georeferenciado dos perfis geofísicos e poços na área de estudo.

Contexto Geológico

A Vila de Algodão é constituída por depósitos holocênicos, dispostos sobre os sedimentos terciário-quadernários da Formação Barreiras e Pós-barreiras.

Segundo Luiz *et al.* (2001), a subsuperfície rasa da Vila é constituída de uma alternância de sedimentos arenosos e argilosos, provavelmente correlacionáveis aos sedimentos do Pós-Barreiras, conforme ilustrado no perfil litológico mostrado na Figura 3. Esse perfil foi construído a partir da interpretação de perfis geofísicos de Raio Gama perfilados em 7 poços tubulares de uma captação por bateria.

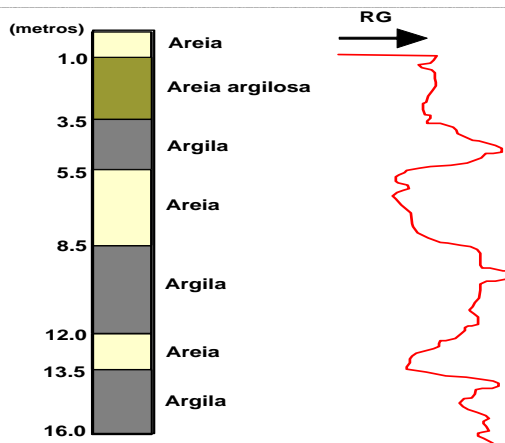


Figura 3 – Perfil litológico construído a partir de perfis de Raios Gama perfilados em 7 poços tubulares na Vila de Algodão (Luiz *et al.*, 2001).

Metodologia

O estudo envolveu (a) medidas da condutividade elétrica aparente obtidas na superfície do terreno, usando os equipamentos EM34-3 e o Max Min; (b) análise Hidrogeoquímica (físico-química) da água retirada de poços escavados tipo Amazonas.

As medidas da condutividade elétrica na superfície do terreno foram obtidas com o sistema eletromagnético EM34-3. 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 Max Min, 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.

As medidas com o EM34-3 podem ser usadas com separação de 10, 20 e 40 m entre as bobinas transmissora e receptora e os arranjos coplanar horizontal (dipolo vertical-DV) e coplanar vertical (dipolo horizontal-DH). Assim, em condições ideais, é possível investigar profundidades de aproximadamente 7,5, 15 e 30m no modo DH e 15, 30 e 60 m no modo DV (veja Figura 4).

O outro equipamento utilizado no estudo é chamado Max Min, 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.

O Max Min é um sistema Slingram. Pode ser empregado com diversos arranjos, sendo que o utilizado nesta pesquisa foi o arranjo chamado HLEM (*Horizontal Loop Eletromagnetic*), ou seja, bobinas transmissora e receptora no plano horizontal.

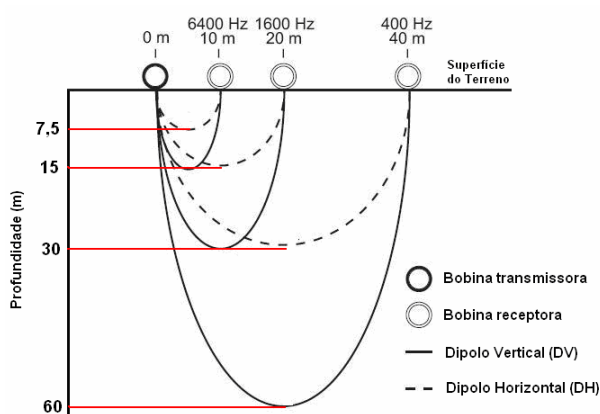


Figura 4 - Profundidade teórica de investigação do EM34-3 em relação à distância entre as bobinas e o modo de dipolo, e freqüências usadas pelo EM34-3.

Para analisar a qualidade da água dos poços da Vila de Algodual, com o objetivo de correlacionar com metodologia geofísica, foram realizadas medidas *in situ* dos parâmetros físico-químicos (Hidrogeoquímica), tais como a condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) e cloro (mg/L) para análise em laboratório da água dos poços. A coleta deu-se no período menos chuvoso (maio de 2007) e no chuvoso (dezembro de 2007) para modo de comparação.

Medidas eletromagnéticas (Max Min e EM34-3)

A aquisição dos dados de campo 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, período de alta estiagem.

O levantamento com o Max Min e o EM34-3 foram obtidos a intervalos amostrados de 12,5m, visando uma boa resolução lateral.

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.

As medidas com o equipamento MAX MIN I foram levantadas 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 freqüências (110, 220, 440, 880, 1760, 3520, 7040, 14080 Hz) disponíveis no sistema

Medidas Hidrogeoquímicas

Os parâmetros Hidrogeoquímicos da água dos poços da Vila de Algodual 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.

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 humano (azul): 75 a 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$;
- Tolerável para consumo, porém com restrições (amarelo): 400 a 1250 $\mu\text{S}/\text{cm}$;
- Salgado (vermelho claro): 1250 a 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$; proibido para consumo humano.
- Muito salgado (vermelho escuro): maior que 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$; proibido para consumo humano.

Resultados

Os valores de condutividade aparente medidos com o EM34-3 na Vila de Algodual com o modo dipolo horizontal variam entre 45 e 190 mS/m , enquanto para os valores obtidos com o dipolo vertical entre 10 e 135 mS/m .

Os valores mais elevados da condutividade aparente, em vermelho e amarelo nos mapas de isocondutividade, foram obtidos com o dipolo horizontal, cuja profundidade teórica de investigação é de 7,5 m. A Figuras 5 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 e 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 7,5 m dada pelo resultado do dipolo horizontal.

Observa-se no mapa da Figura 6 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 15 m. Os locais de baixos anômalos de condutividade refletem áreas não afetadas pela contaminação salina, ou seja, água potável para consumo humano.

Comparando os mapas das Figuras 5 (dipolo horizontal) e Figura 6 (dipolo vertical) indicam uma diminuição da condutividade aparente com a profundidade tanto em valor do parâmetro como em área afetada pela intrusão salina.

Os dados obtidos com o Max Min são apresentados a seguir no formato de mapa de contorno da componente em fase (parte real) do campo secundário (Hs) para cada uma das oito freqüências (ver Figura 7) e em pseudo-

seções (ver Figura 8) para seis perfis adquiridos na Vila de Algodual.

Com base na resposta 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 num espectro de cores variando do azul representando porções resistivas ao vermelho representando as porções condutivas da subsuperfície.

Os mapas correspondentes às frequências 14080, 7040, 3520 e 1760 Hz (ver Figuras 7) 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 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 na Figura 7.

A Figura 8 mostra outra forma de visualização desta varredura eletromagnética por multi-frequência realizada através de pseudo-seções, veja na Figura 8. Ficando evidente para identificar as áreas promissoras (cor azul) para captação de água subterrânea em aquíferos profundos, livres da contaminação salina.

As Figuras 9 e 10 mostram os gráficos da condutividade elétrica da água dos poços nas duas épocas na Vila Algodual, Maio/2007 (31 poços) e Dezembro/2007 (46 poços), seguindo as 4 faixas da classificação das diretrizes de potabilidade da WHO.

Nesses dois gráficos ficou bem visível a variação sazonal do parâmetro condutividade elétrica da água dos poços da Vila de Algodual. 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 10 mostra um grande número de poços sendo afetado pela intrusão salina.

Uma outra forma de apresentação dos dados hidrogeoquímicos mostra a distribuição espacial da contaminação salina na Vila de Algodual, através de mapas georeferenciados de contornos de isovalores da condutividade elétrica da água dos poços, de modo a facilitar na correlação com os dados de geofísica, veja nas Figuras 11 e 12.

A Figura 11 mostra que para o período chuvoso (Maio/2007) a maioria dos poços possui condutividade elétrica na faixa de potabilidade recomendável (entre 60 a 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 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.

O grande avanço de salinização da água dos poços no período de estiagem é visto na Figura 12. 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 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.

Para o parâmetro medido de 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 8000mg/L nas amostras de Dezembro/2007, veja nos mapas da Figura 13 e 14. Esses altos valores no período da estiagem correspondem à salinização mostrada no mapa da Figura 15 de condutividade de Dezembro/07 e tem, inclusive, distribuição espacial semelhante, mostrando alta correlação desses parâmetros.

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 de Algodual, isto é, sua movimentação deve ser aproximadamente, a mesma que a taxa de intrusão salina.

Conclusões

Tanto a metodologia geofísica como a hidrogeoquímica 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 Algodual.

Os resultados das metodologias geofísicas eletromagnéticas rasas, obtidas com o EM34 (DV e DH, Tx-Rx=10m) e com o Max Min (as quatro maiores frequências, Tx-Rx=50m) apresentaram ótima correlação entre si e com as medidas de parâmetros hidrogeoquímicos, garantindo alta confiabilidade na informação e reafirmando o estudo realizado anteriormente por Luiz *et al.* (2001).

Foi possível identificar e delimitar as áreas atualmente afetadas e aquelas livres da contaminação na Vila de Algodual, podendo inferir que a exploração no aquífero livre ou zonas ainda livres da intrusão não estão protegidas de forma perene, ou seja, o aumento do consumo da água dos poços pode ocasionar a ampliação da intrusão salina.

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

Portanto, cabe sugerir um furo profundo até topar o embasamento e, depois, por perfilagem geofísica no furo, 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 (Cosanpa), onde está a bateria de poços rasos, atualmente desativada, por motivos operacionais.

E, por fim, garantido o abastecimento local de água potável e, estando a Vila de Algodual 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.

Agradecimentos

Ao Prof. Vaquera (*In memoriam*) que contribuiu na parte de hidrogeoquímica de forma significativa na conclusão deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) e a todos que me ajudaram direto e indiretamente.

Referências

Luiz, J. G., Nishimura, E. M., Souza, C. S. e Heimer, M. Medidas elétricas na ilha de Algodual, Estado do Pará. In: Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 7., Salvador, 2001.

Dias, R. F. D., Medeiros, A. R. C., Luiz, J. G e Nunes, Z. M. P. Aplicação do método eletromagnético na determinação da interface água doce- água salgada na Vila do Bonifácio, Bragança-PA. In: Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 10., Rio de Janeiro, 2007.

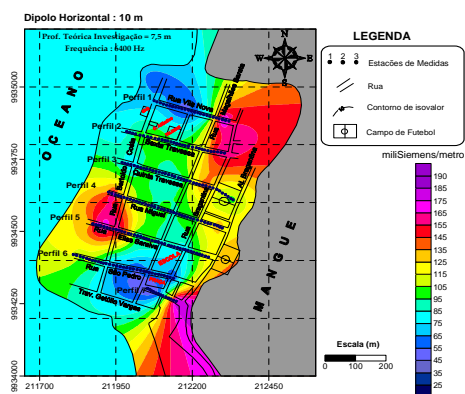


Figura 5 – Mapa de condutividade aparente para o dipolo horizontal.

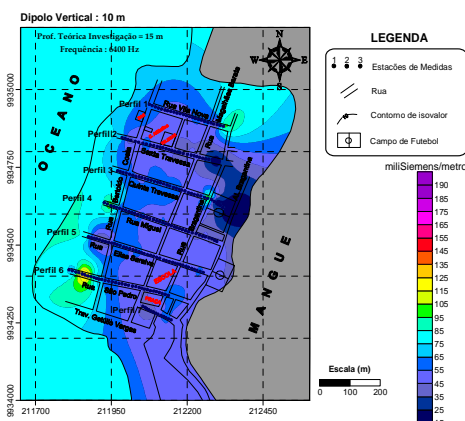


Figura 6 – Mapa de condutividade aparente para o dipolo vertical.

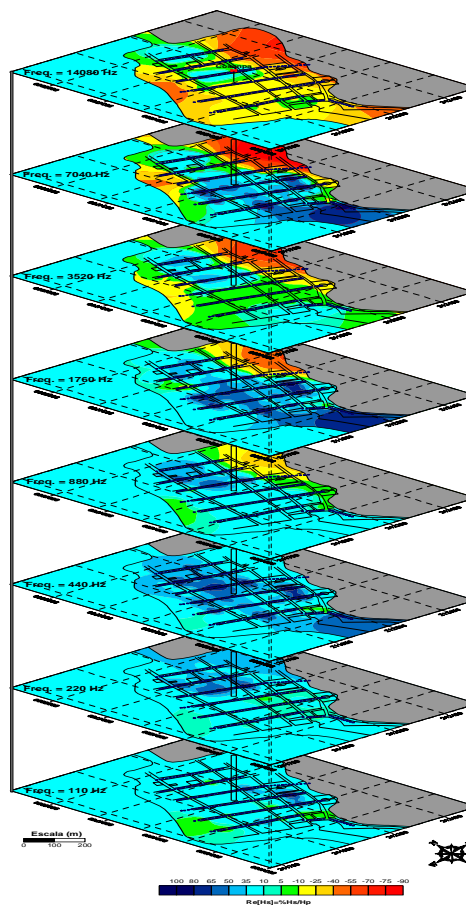


Figura 7 – Mapas da componente em-fase (parte real) para as 8 frequências.

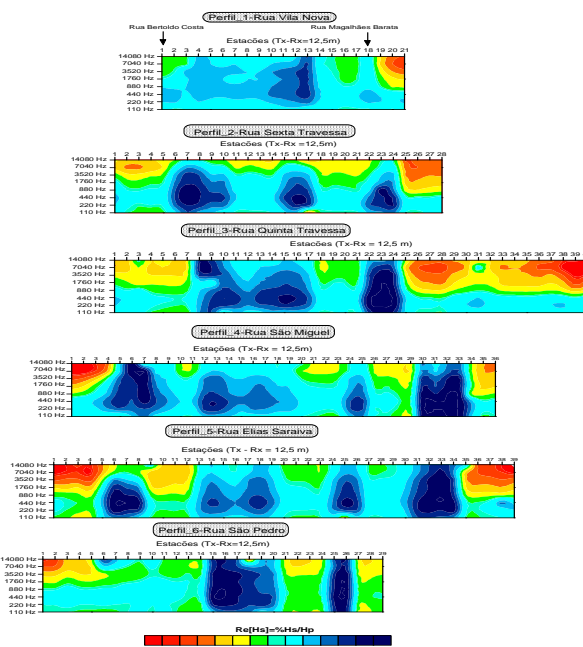


Figura 8 – Pseudo-seção eletromagnética da componente em-fase para os seis primeiros perfis.

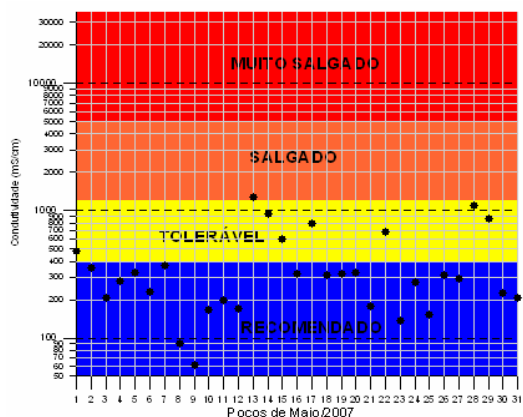


Figura 9 - Gráfico da condutividade da água poços na Vila de Algodal (Maio/2007) e sua classificação quanto à salinidade.

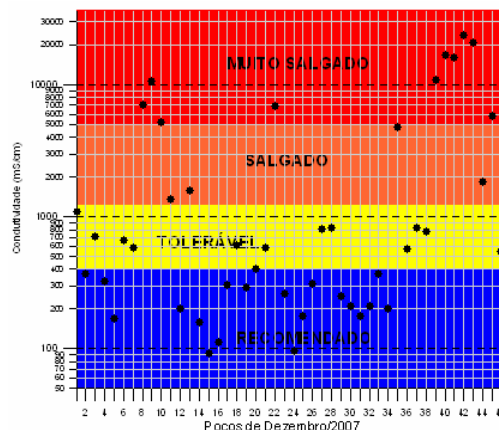


Figura 10 - Gráfico da condutividade da água poços na Vila de Algodal (Dezembro/2007) e sua classificação quanto à salinidade.

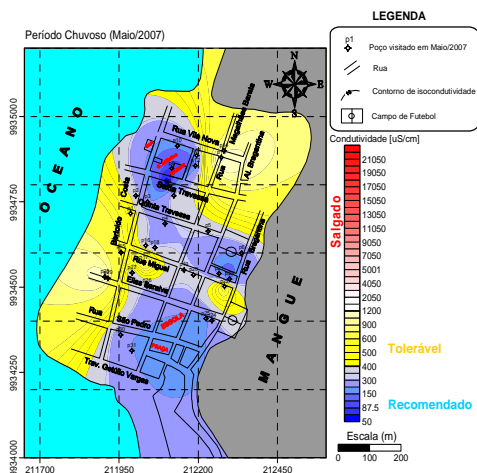


Figura 11-Mapa de condutividade elétrica dos poços da Vila de Algodal para o período chuvoso (Maio/2007).

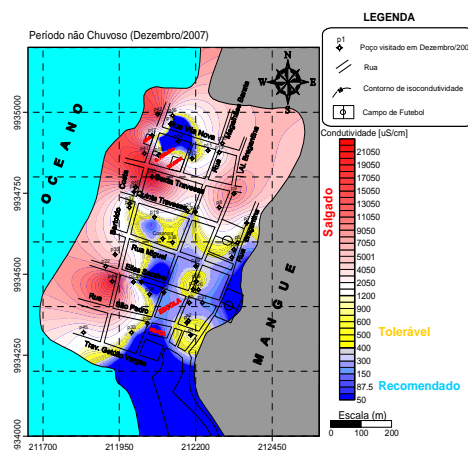


Figura 12- Mapa de condutividade elétrica dos poços da Vila de Algodal para o período não chuvoso (Dezembro/2007).

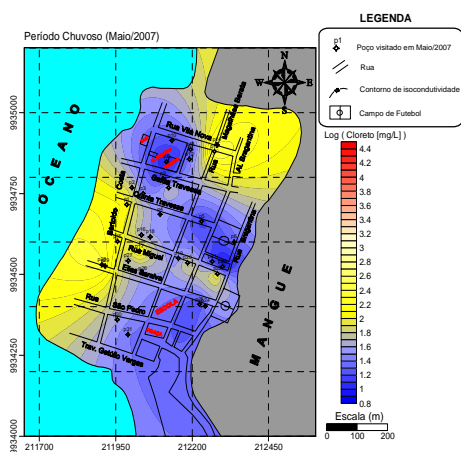


Figura 13-Mapa do teor de cloreto dos poços da Vila de Algodal para o período chuvoso (Maio/2007).

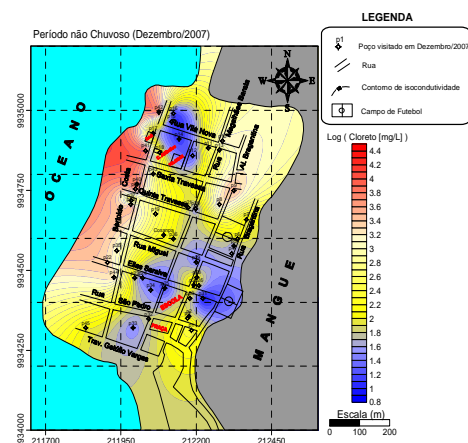


Figura 14-Mapa do teor de cloreto dos poços da Vila de Algodal para o período não chuvoso (Dezembro/2007).