

## Investigação Geofísica com os métodos Slingram-HLEM e GPR de contaminação salina na Vila de Caratateua, Curuçá-Pará.

Anderlon Andrade da Silva, graduado em Geofísica/UFPA, anderlonandrade@gmail.com

José Geraldo das Virgens Alves, Instituto de Geociências/UFPA, jgvalves.geof@gmail.com

Copyright 2013, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 13<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 26-29, 2013.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 13<sup>th</sup> 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 presents a study of underground to investigate possible contamination caused by salt water arising shrimp ponds. The study was conducted at the farm Our Lady of Fatima located in the village Caratateua, municipality of Curuçá /Pará - Brazil. The electromagnetic geophysical methods were used Slingram and ground penetrating radar (GPR). Collected was water from wells for laboratory measures of physical and chemical parameters, electrical conductivity, pH, TDS and salinity and depth measurements of the static level and wells. The interpretation of data Slingram identified the presence of more conductive areas (probably saline contamination) and more resistive zones (possible blocks laterites). Through the GPR data identified the presence of attenuated zones probably indicating contamination saline and reflectors that indicate the laterite blocks and the local water table. The results of the correlation between the data, shown by contours maps, 3D block-diagram, pseudo-sections and radargrass demonstrate that the combination of the two methodologies HLEM electromagnetic and GPR is well suited for this type of research

### Introdução

O Estado do Pará pela vasta riqueza estuarina de seu litoral, na porção nordeste, vem desenvolvendo, paulatinamente, em algumas fazendas, a cadeia produtiva do camarão, conhecida cientificamente *Litopenaeus vannamei*. No mercado paraense de carcinicultura atuam cinco fazendas: Camalta – Camarões Terra Alta S/A, a Camasa – Camarões Atalaia S/A, São Paulo, Campasa e Nossa Senhora de Fátima, sendo esta última local de estudo do presente trabalho.

A carcinicultura é a técnica de criação de camarões em viveiros. Essa atividade demanda a instalação de piscinas artificiais em terreno alto com lonas impermeabilizantes ou no mangue com a consequente supressão da vegetação nativa dos manguezais. O impacto ambiental é sentido em curto, médio e longo prazo, pois por se tratar de intervenção agressiva (extinção da vegetação até a raiz, o que impede a regeneração da mesma), afeta o equilíbrio biótico das

demais espécies, bem como retira uma barreira natural para as altas marés, podendo afetar a orla. Além disso, os efluentes dos viveiros podem provocar a contaminação das águas por fungicidas e a salinização do lençol freático, impossibilitando o consumo por parte das populações na vizinhança.

Assim, consciente da importância do impacto ambiental da carcinicultura, este trabalho visa contribuir com identificação de resposta geofísica na investigação de contaminação salina proveniente dos resíduos dos viveiros. A área escolhida para o estudo, a Fazenda Nossa Senhora de Fátima, onde estão instalados quatro viveiros de camarão marinho (Figura 1).

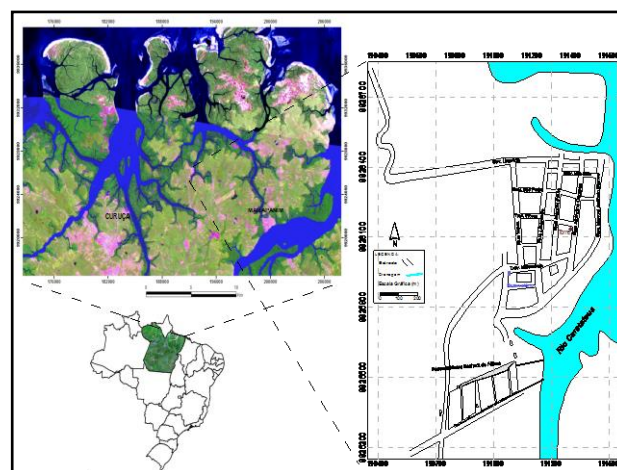


Figura 1: Mapa de localização da Vila Caratateua.

Fonte: Pesquisa de campo.

Os levantamentos dos dados ocorreram nos dias 16 de outubro e 23 de dezembro de 2009 utilizando os métodos eletromagnéticos Radar de Penetração no Solo (GPR) e Slingram (arranjo HLEM – Horizontal Loop Eletromagnético). Também, realizou-se no dia 17 de outubro de 2009 uma coleta da água dos poços para uma avaliação de sua qualidade. Com isso, a metodologia Hidrogeoquímica obteve o resultado analítico da água para as medidas de pH, Condutividade Elétrica, Sais Totais Dissolvidos – STD e salinidade.

### Área de estudo

A área de estudo, fazenda Nossa Senhora de Fátima, está localizada na Vila de Caratateua, município de Curuçá, situada na Mesorregião do Nordeste paraense e na microrregião do Salgado (Figura 1). Geograficamente, a fazenda situa-se nas coordenadas 00° 40' 41,1" de latitude sul e 48° 46' 44,9" de longitude oeste, distando

aproximadamente 160 Km de Belém, 30 Km de Curuçá e a 4,5 Km da PA-318.

Para ser ter acesso a área partindo de Belém, se dá pela rodovia BR-316 até a cidade de Castanhal, a partir daí prossegue-se pelas rodovias PA-136 e a PA-318 até chegar o ramal para Vila de Caratateua, levando-se cerca de três horas.

A Figura 2 mostra o posicionamento dos perfis, estações de medidas geofísicas e dos poços em torno da área estudada.

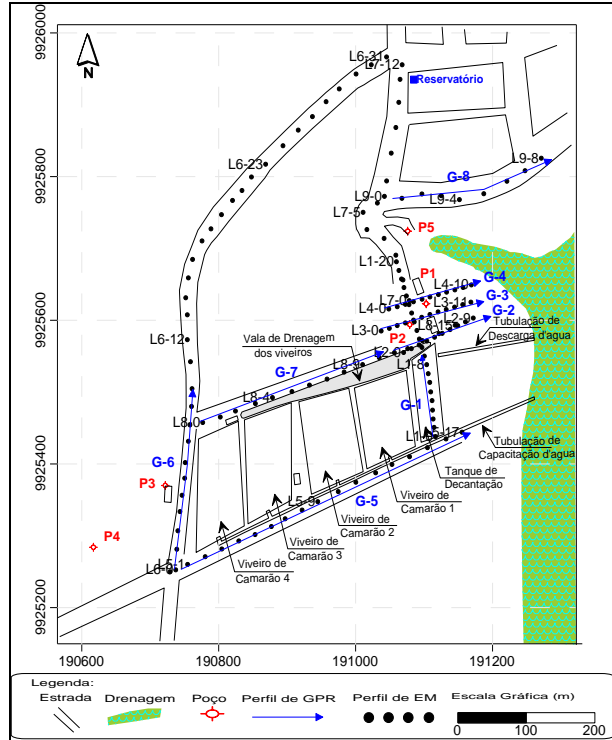


Figura 2: Mapa da área e localização dos levantamentos geofísicos e dos poços.

### Geologia local e hidrogeologia

A Vila de Caratateua é formada por unidade cenozóicas representadas pelos carbonatos da Formação Pirabas e os sedimentos do Grupo Barreiras e do Pós-Barreira. Os principais sistemas hidrogeológicos locais são o Pós-Barreira e o Barreira (IGREJA, 1990). Os poços do tipo amazonas exploram água apenas do sistema Pós-Barreira, enquanto o poço de abastecimento público utiliza da Formação Barreira.

### Metodologia

Os métodos eletromagnéticos utilizados na investigação geofísica foram o Slingram e Radar de Penetração no Solo (GPR), devido à rapidez e facilidade com que as medidas são realizadas em campo. Além disso, o método hidrogeoquímico foi utilizado para avaliar a qualidade da água nos poços próximos da fazenda Nossa Senhora de Fátima.

### Slingram-HLEM

O trabalho consistiu ao longo de nove perfis utilizando o sistema Slingram HLEM, com o equipamento MAX MIN I fabricado pela APEX Parametrics Ltda., que opera nas frequências múltiplas e inteiras de 110 Hz. As oitos frequências (110, 220, 440, 880, 1760, 3520, 7040 e 14080 Hz) permitiram a obtenção de uma imagem da subsuperfície abaixo dos perfis.

O levantamento dos dados foi realizado nos dias 16 de outubro e 23 de dezembro de 2009. As medidas foram realizadas ao longo de nove perfis orientados segundo as direções S-N (perfis L 1, 6 e 7) e W-E (perfis L 2, 3, 4, 05 e 9), como mostra a Figura 2.

No levantamento realizado, as leituras da componente em fase (componente real) e quadratura (componente imaginária), foram tomadas para as oito frequências disponíveis no equipamento. A separação entre as bobina transmissora e receptora foi igual a 50 m e as leituras foram realizadas a intervalos de 12,5 m (perfis L1 a L4) e de 25 m (perfis L5 a L9). Para o posicionamento das estações foi utilizado um GPS (Garmin Etrex) na projeção UTM, com elipsóide South American Datum – SAD-69.

Considerando-se a resposta característica do HLEM, em que a componente em fase apresenta forte anomalia de único pico negativo sobre corpo condutivo e que não apresenta problemas de reversão ou pico adicional, a avaliação dos resultados será feita nessa componente, uma vez que o objetivo é verificar se ocorreu a contaminação por água salgada, o que pode gerar uma forte anomalia de condutividade elétrica.

Os valores obtidos para a componente em fase do campo secundário são apresentados sob a forma de mapas de contornos e pseudo-seções. As medidas da componente em fase,  $Re [H_s] = (\%) H_p$ , variaram em um intervalo de -70% a +70%, por isso, os dados são apresentados dentro desse intervalo nos mapas de contorno e pseudo-seções. Para aperfeiçoar a observação, tanto os mapas de contorno como as pseudo-seções foram construídos com preenchimento entre linhas de isovalores dentro de um espectro de cinco cores (azul, verde, amarela, vermelha e roxa), representando a cor azul as porções condutivas (< -25% de  $H_p$ ) e a cor vermelha e roxa representam as porções resistivas da subsuperfície (> 25% de  $H_p$ ).

Os mapas de contorno de isovalores da componente em fase foram confeccionados para cada frequência, mostrando a investigação em planos desde o mais raso, com as medidas na frequência de 14080 Hz, ao mais profundo, com as medidas na frequência de 110 Hz. As pseudo-seções foram feitas para todas as frequências, distribuídas de modo descendente no eixo vertical, mostrando a varredura lateral e em profundidade sob cada perfil levantado.

A Figura 3 apresenta um bloco diagrama 3D que reúne todos os mapas de contorno para cada frequência, mostrando a investigação da área de forma integrada. A Figura 4 mostra os mapas de contorno para as quatro frequências mais altas, enquanto a Figura 5, para as quatro frequências mais baixas. A Figura 6, por sua vez,

mostra as pseudo-seções para os nove perfis levantados na área de estudo.

### GPR

O levantamento de dados com o GPR foi realizado ao longo de oito perfis utilizando o sistema SIR-3000 da Geophysical Survey System, Inc. (GSSI), que permite a operação biestática com conjunto de antenas blindadas de 200 MHz. As medidas foram tomadas com afastamento comum no modo tempo e posicionamento controlado pela inserção de marcas no registro a intervalos de 50 em 50 m.

A aquisição dos dados foi realizada no dia 16 de novembro de 2009. O levantamento foi realizado ao longo de oito perfis orientados segundo as direções S-N (perfis G1 e G6) e W-E (perfis G2, G3, G4, G5, G7 e G8) como mostra a Figura 2.

A janela de tempo usada na aquisição foi de 250 ns atingindo a profundidade de aproximadamente 10 m.

O processamento dos dados de GPR foi realizado com o programa Reflex-Win 4.2 da Sandmeier Software, pertencente à Faculdade de Geofísica da UFPA. A seguinte sequência de processamento foi utilizada: (a) interpolação das marcas de posicionamento; (b) correção estática ou tempo zero; (c) aplicação do filtro passa alta (DEWOW); (d) aplicação de filtro passa banda; (e) determinação da velocidade de propagação da onda de 0,15 m/ns, segundo a tabela de Davis e Annan (1989) e a medida do nível freático local nos poços; (f) conversão da escala vertical de tempo em profundidade.

### Hidrogeoquímica

Para analisar a qualidade da água dos poços próximo da Fazenda Nossa Senhora de Fátima, com o objetivo de correlacionar com a metodologia geofísica, foram realizadas medidas *in situ* dos poços próximo da fazenda (Figura 2) no dia 16 de outubro de 2009 (período menos chuvoso da região do nordeste paraense). Como também, parâmetros físico-químicos (Tabela 1), tais como: pH, condutividade elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), sólidos totais dissolvidos- STD- ( $\text{mg}/\text{cm}$ ) e salinidade (%).

## **Análise dos resultados**

### Slingram-HLEM

Na área dos tanques, aparecem zonas bastante condutivas para as respostas às frequências mais altas (14080, 7040, 3520 Hz) e, considerando que o terreno é de solo arenoso, as anomalias sugerem que houve infiltração de água salgada através da vala de drenagem dos viveiros de camarão para o tanque de decantação e no próprio tanque de decantação. Essa contaminação salina pode ter ocorrido durante o esvaziamento da água dos viveiros (para a despescagem dos camarões) e pode ter continuado pela permanente drenagem consequente da manutenção do nível máximo de água dos viveiros.

Observando a resposta da componente em fase da frequência 14080 Hz, investigação mais rasa, os focos (lugares prováveis da infiltração) podem ser observados nos seguintes pontos: (1) L8-04 (100m), coincidindo com

início da vala de drenagem e a saída de água do segundo viveiro; (2) L8-08 (200m), ainda na vala de drenagem; e (3) sob o tanque de decantação.

Pela resposta da frequência 7040 Hz, observa-se uma migração em leque para leste, desde NE até SE. Essa migração pode ser bem observada através dos perfis L1 (N-S, desde o tanque de decantação), L2, L3 e L4, localizados paralelos à vala de drenagem. A direção da migração pode ser justamente a direção do fluxo de água do freático e, nesse trecho, há uma diferença de um metro na topografia no sentido W-E.

Na resposta da frequência 3520 Hz observa-se a base da infiltração, pois em seguida, na resposta da frequência 1760 Hz, a anomalia de condutividade desaparece por completo. E, não há mais a presença de anomalia de condutividade para as demais frequências.

Comparando os perfis L6, L7 e L9 e o início de L8 com os outros perfis verifica-se a presença de zonas bastante resistivas (em vermelho), indicando que não ocorreu contaminação nesses trechos, mesmo na resposta às frequências mais altas e que continuam em profundidade, até a frequência de 880 Hz. Essas zonas altamente resistivas podem ser associadas à presença de lateritas.

Concluindo esta análise, as zonas altamente condutivas estão presentes tão somente na área dos tanques e no seu entorno, somente também para as três frequências mais altas, significando que essa resposta da componente em fase não é referente ao tipo de ambiente da subsuperfície local, mas é, de fato, a resposta característica da infiltração da água salgada. Por fim, tudo indica que houve contaminação por água salgada a partir dos tanques, poluindo localmente o aquífero freático, o que pode ter sido a causa da salinização da água dos poços P1 e P2, nas duas residências próximas aos tanques, mas, que não atingiu o poço P5 que abastece a Vila de Caratateua. As análises físico-químicas confirmam esta afirmação (Tabela1). Para profundidades maiores, a resposta das frequências 440, 220 e 110 Hz indica um meio de condutividade mediana, normal, não anômalo.

### GPR

Os perfis G1 e G7 (Figura 7 e 13) evidenciaram a presença de zonas atenuadas do sinal, respectivamente, entre as posições de 0 – 62 m e 70 – 240 m. Essas zonas de baixas reflexões são provavelmente a infiltração da água salgada no solo. O perfil G1 foi realizado dentro do tanque de decantação e o perfil G7 paralelo à vala de drenagem. Além disso, ocorreu também na maior parte do perfil G5 (Figura 11) a atenuação do sinal, mas que deve corresponder ao aumento da argilosidade na área.

Os oito perfis (Figura 7 a 14) apresentaram nos radargramas a ocorrência de um refletor irregular. Essas zonas de reflexões nítidas podem ser ocasionadas pelo topo das concreções lateríticas, muito comum na área de estudo. A profundidade do topo dessas lateritas varia de 2 a 3 m, em alguns casos aflorando na superfície.

Os perfis G2, G3, G4 e G6 (Figura 8, 9, 10 e 12) apresentaram nos radargramas a presença de um refletor horizontal. Essa característica indica o nível freático local

a uma profundidade de 6,5 m, com exceção ao perfil G6 que está a uma profundidade de 9,5 m devido a diferença topográfica local.

#### Hidrogeoquímica

Os resultados de pH (Tabela 1) variam na faixa de 5,1 a 6,9. Essa faixa mostra um comportamento ácido comum da água do aquífero livre e está dentro dos padrões estabelecidos (variando geralmente de 5,5 e 8,5).

A condutividade elétrica permite classificar a água por quatro classes, segundo a Organização Mundial de Saúde: (a) recomendado para consumo: 75 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) a 400 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ); (b) tolerável para o consumo (com restrições): 400 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) a 1250 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ); (c) salgado: 1250 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) a 500 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ); (d) muito salgada: > 5000 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

A condutividade da água dos poços P1 e P2 permitem classificá-los como água muito salgada, já os poços P3 e P4 são recomendados para o consumo.

A água dos poços P1 e P2 mostra uma quantidade de sólidos totais dissolvidos estão acima do limite máximo permitido para o consumo (1000 mg/L), enquanto a água para os poços P3 e P4 está dentro desse limite.

Por fim, os poços P1 e P2 apresentam elevadas quantidades de sais dissolvidos em água, comparados com os poços P3 e P4.

**Tabela 1:** Resultados de pH, condutividade elétrica, STD, salinidade e profundidade dos poços próximo analisados.

Poços	Prof. (m)	Nível Hidrostático (m)	pH	Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	STD (mg/L)	Salinidade (%)
P1	7,2	6,2	6,9	7850	5102	4,4
P2	40	6,3	6,8	9060	5889	5,1
P3	40	9,5	5,1	280	222	0
P4	10	9,2	6,2	81,3	64	0
P5	20		5	35	75	0

#### Conclusões e Recomendações

O objetivo principal do presente trabalho foi investigar se a salinidade ocorrida em dois poços foi causada por contaminação salina, a partir dos viveiros de carcinocultura da fazenda de Nossa Senhora de Fátima, localizada na Vila de Caratateua, município de Curuçá-Pará.

Como resultado da investigação, ficou evidente a eficácia do sistema eletromagnético Slingram, através da resposta da componente em fase do campo secundário. A representação dos dados na forma de mapas de contorno e pseudo-seções permitiu identificar com clareza a presença de zonas altamente condutivas, próximas à superfície do terreno e dos viveiros de camarão, bem distintas da resposta normal do ambiente local, constatando que houve a infiltração de água salgada contaminando o meio raso e, conseqüentemente, o aquífero livre no entorno dos viveiros.

A resposta anômala de condutividade somente ocorreu nas três frequências mais altas (14080, 7040 e 3520 Hz), pois para as demais frequências a resposta é semelhante para todo o ambiente, portanto a contaminação foi rasa. Essa anomalia de condutividade somente aparece no entorno dos viveiros, espalhando-se no sentido leste, provável direção do fluxo de água subterrânea, atingindo nessa migração os dois poços (P1 e P2) que usam água do aquífero livre. No entanto, essa migração não alcança o poço de abastecimento da Vila, localizado mais a norte. Portanto, a contaminação ficou bem localizada e restrita à área do entorno dos viveiros.

Outro resultado interessante advém da resposta indicando zonas altamente resistivas, também rasas, que devem corresponder à presença de lateritas, sugerindo uma eficácia dessa metodologia para a prospecção de concreções ferruginosas. Isso demonstra que o Slingram é útil na discriminação de zonas anômalas tanto condutivas como resistivas.

O resultado obtido com o método radar de penetração do solo contribuiu na identificação das feições da subsuperfície rasa. Nos radargramas foi possível visualizar as zonas atenuadas (áreas de sombra) que sugerem a presença da contaminação salina.

Também, foi possível identificar nos dados de GPR a profundidade do nível freático local, aproximadamente 6,5 m, o que coincide com os dados coletados nos poços.

Outra importante resposta refere-se na possibilidade de identificar a profundidade do topo de blocos lateríticos (entre 2 a 3 m).

Recomenda-se para solução do problema da contaminação salina na área de estudo que a vala de drenagem seja tubulada ou pavimentada e seja colocado um novo revestimento no tanque de decantação. Para os dois poços contaminados, um longo processo de bombeamento da água pode amenizar ou solucionar o problema em questão ao longo do tempo. Ainda, é necessária a impermeabilização dos primeiros metros do poço de abastecimento da Vila para evitar a sucção de água salina durante a maré alta.

#### Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CRIADORES DE CAMARÃO-ABCC. **O agronegócio do camarão marinho no Brasil em 2003**. [S.l.], 2004. 11p.
- DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. **Geophysical Prospecting**, v. 37, p. 531-551, 1989.
- MEDEIROS, A. R. C. **Metodologias Geofísicas e hidrogeoquímica aplicadas a prospecção de Água Subterrânea em ambiente de intrusão salina na Vila de Algodal – Pa**. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica) – Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.
- IGREJA, H. L. S. **Aspectos tectono-sedimentares do Fanerozóico do nordeste do Pará e nordeste do**



Maranhão, Brasil. 1991. 191f. Tese (Doutorado em Geologia) – Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, 1991.

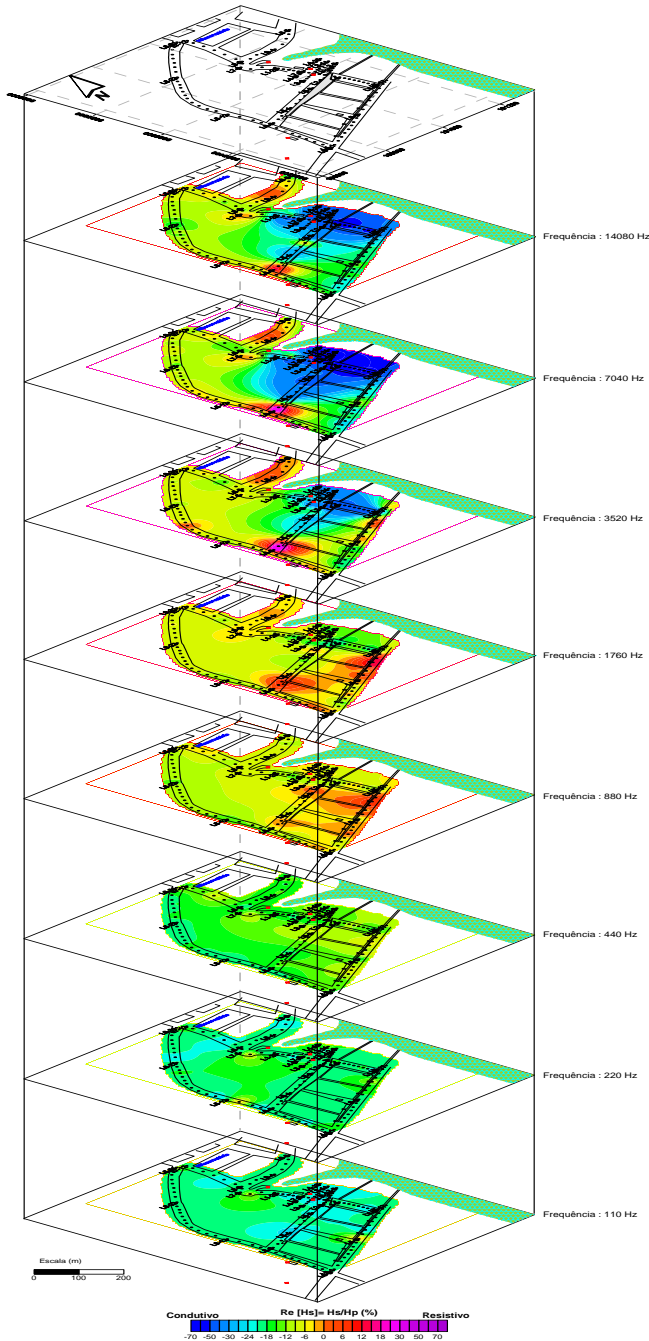


Figura 3: Bloco diagrama 3D da componente em fase.

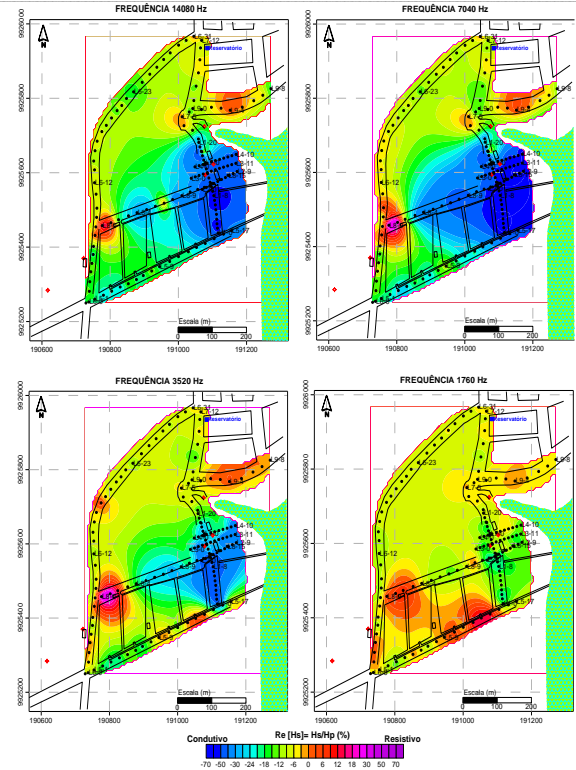


Figura 4: Mapas de contornos da componente em fase do campo magnético secundário para as frequências 1480, 7040, 3520 e 1780 Hz.

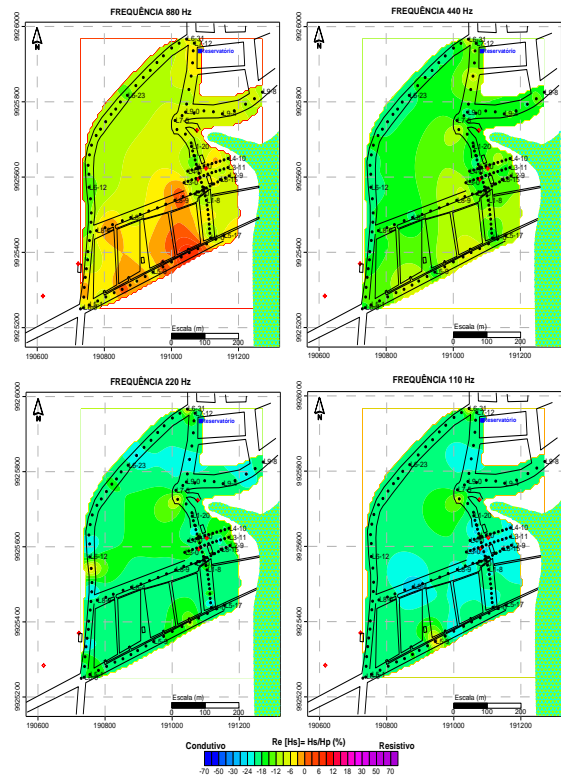


Figura 5: Mapas de contornos da componente em fase do campo magnético secundário para as frequências 880, 440, 220 e 110 Hz.

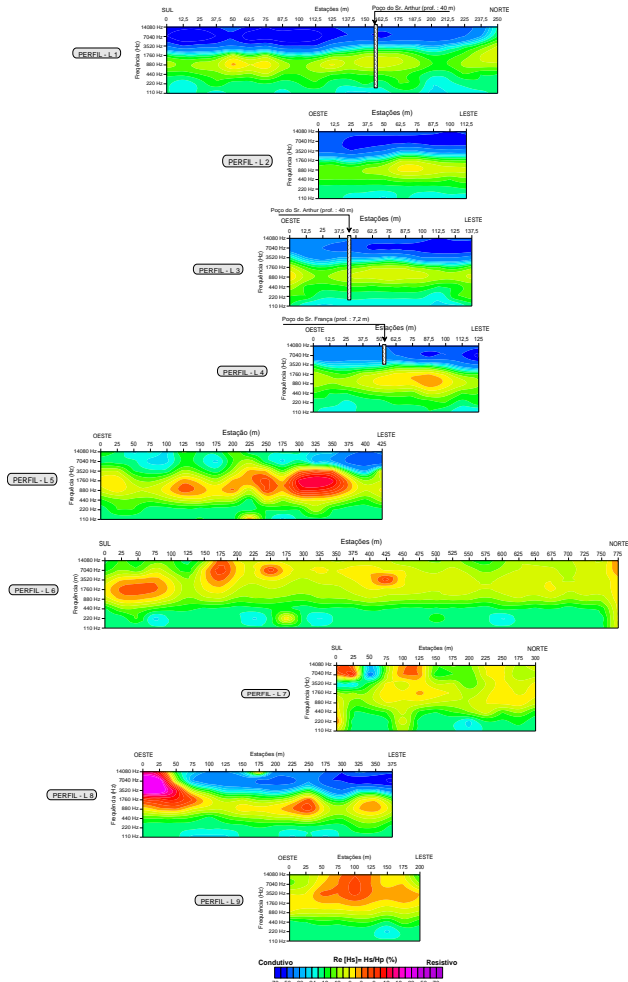


Figura 6: Pseudo-seções eletromagnéticas da componente em fase.

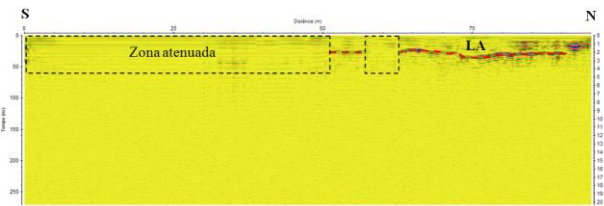


Figura 7: Perfil G1 interpretado – 100 m (LA - laterita).

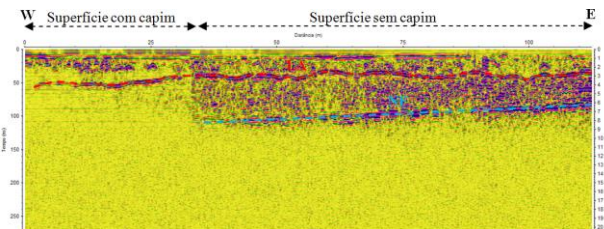


Figura 8: Perfil G2 interpretado – 116 m (LA-laterita e NF-nível freático)

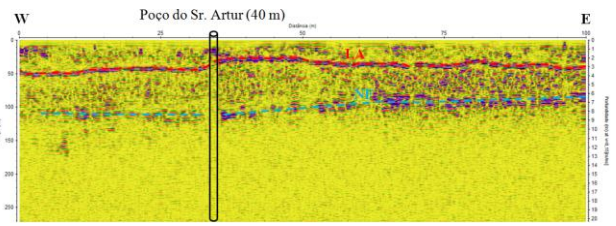


Figura 9: Perfil G3 interpretado – 100 m (LA-laterita e NF-nível freático).

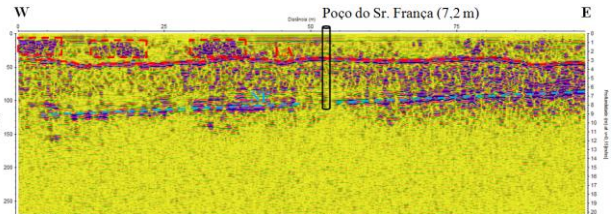


Figura 10: Perfil G4 interpretado – 100 m (LA-laterita e NF-nível freático).

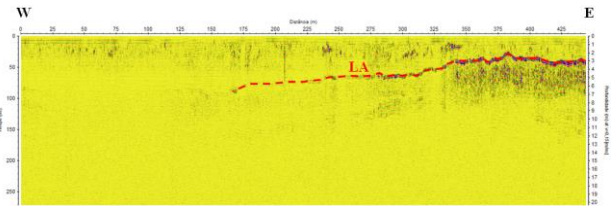


Figura 11: Perfil G5 interpretado – 450 m (LA-laterita).

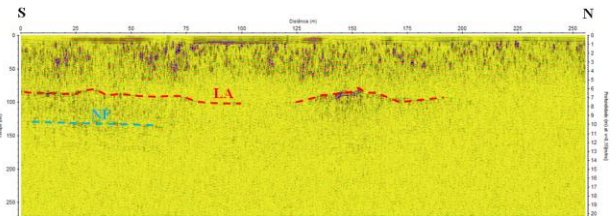


Figura 12: Perfil G6 interpretado – 260 m (LA-laterita e NF- nível freático).

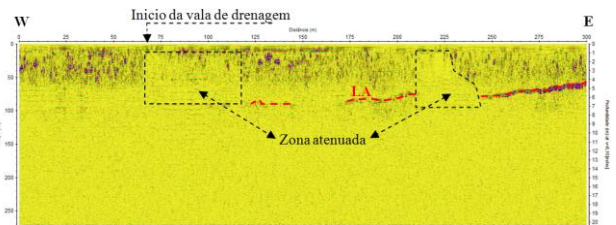


Figura 13: Perfil G7 interpretado – 300 m (LA-laterita).

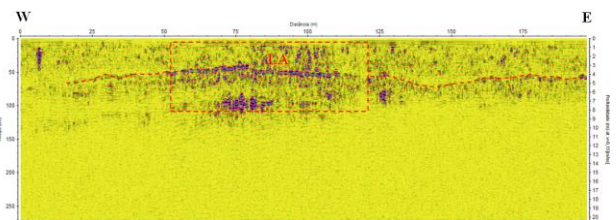


Figura 14: Perfil G8 interpretado – 200 m (LA-laterita).