



Algumas considerações sobre a polaridade do pulso do GPR e sua importância para a interpretação dos dados.

Pedro Xavier Neto^{1,2}, e-mail: pedroxavier@petrobras.com.br

Walter Eugênio de Medeiros^{1,3}, e-mail: walter@dfte.ufrn.br

1- Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica – PPGG/UFRN, Natal, RN.

2- PETROBRAS/UN-RNCE, Natal, RN

3- Depto. de Física – UFRN, Natal, RN.

Resumo

A análise da polaridade do sinal do GPR pode ser muito útil na interpretação dos dados por trazer embutida em si informações sobre os atributos eletromagnéticos do meio. Entretanto existem poucos registros na literatura sobre o assunto e não existe nem mesmo uma padronização estabelecida, como na sísmica, por exemplo, havendo somente convenções de fabricantes baseadas em critérios e definições próprias que, na ausência de um padrão geral, servem como guia para orientar a interpretação dos dados de GPR, utilizando critérios de contraste de impedância dielétrica entre os diferentes meios atravessados pela onda eletromagnética.

Este trabalho apresenta algumas considerações sobre este assunto com base na compilação de uma nota técnica de um fabricante, na qual é mostrado o comportamento da polaridade, associando-a a eventos específicos e sempre presentes nas secções de GPR, tais como: onda direta pelo ar, onda direta pelo solo, e onda refletida. A utilização de atributos de polaridade do pulso na interpretação de dados de GPR será exemplificada através de duas situações estudadas pelos autores. Na primeira mostrar-se-á a utilização dos conceitos de polaridade na detecção de dutos metálicos enterrados, enquanto o segundo caso exemplifica o uso de informações de polaridade na localização de estruturas de dissolução (cavernas) em substrato calcário.

Introdução

O sinal do GPR é representado graficamente como uma função da amplitude da onda eletromagnética em relação ao tempo de propagação, à semelhança do que ocorre na sísmica de reflexão. O pulso sofre deflexões que representam variações de sinal da amplitude da onda cada vez que ela é refletida nas diferentes interfaces do meio. Estas variações são regidas pela impedância dielétrica dos meios que, nas interfaces, definem os coeficientes de reflexão. Estes por sua vez materializam o contraste entre as constantes dielétricas de cada meio atravessado pela onda. Analiticamente essas relações podem ser definidas pelas seguintes expressões:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (1), \text{ onde } R \text{ é o coeficiente}$$

de reflexão, Z_1 e Z_2 são, respectivamente, as impedâncias eletromagnéticas dos meios 1 e 2.

Em GPR é mais conveniente representar o coeficiente de reflexão através da expressão:

$$R = \frac{\sqrt{K_{MEIO}} - \sqrt{K_{ALVO}}}{\sqrt{K_{MEIO}} + \sqrt{K_{ALVO}}} \quad (2)$$

Onde, R é o coeficiente de reflexão numa dada interface, e K_{MEIO} e K_{ALVO} são, respectivamente, as constantes dielétricas do meio e do alvo imageado. A tabela 1 mostra os valores de constantes dielétricas e coeficientes de reflexão característicos de alguns meios (valores médios e aproximados).

DE		PARA		R
AR	K=1	SOLO SECO	K=5	-0.38
SOLO SECO	K=5	SOLO SATUR.	K=25	-0.38
SOLO SECO	k=5	CALCÁRIO	K=7	-0.08
SOLO SECO	K=5	METAL	K=∞	-1
SOLO SECO	K=5	AR	K=1	0.38
CALCÁRIO	K=7	AR	K=1	0.45

TABELA 1 – Valores médios de constantes dielétricas de alguns materiais e coeficientes de reflexão em suas interfaces. K é a constante dielétrica, (modificada de Annan, 1992).

Em meios de baixa perda de energia eletromagnética, a velocidade de propagação da onda pode ser aproximada pela expressão:

$$V = \frac{c}{\sqrt{K}} \quad (3); \text{ onde } V \text{ é a velocidade de}$$

propagação da onda eletromagnética no meio, c é a velocidade de propagação da onda eletromagnética no espaço livre ($c = 0.3 \text{ m/ns}$) e K é a constante dielétrica do meio. Nota-se da expressão acima que a velocidade de propagação mantém uma relação inversa com a constante dielétrica, sendo válida

portanto a relação $\sqrt{\frac{K_2}{K_1}} = \frac{V_1}{V_2}$ (4) (Annan, 1992).

Polaridade do sinal do GPR

Na sismica de reflexão é possível falar de assinatura da fonte, que representa a forma da onda emitida por uma fonte sísmica. Em GPR a onda eletromagnética começa a ser transmitida antes do início do registro, de forma que não se sabe a priori a forma do pulso que foi gerado na fonte no tempo zero. Por outro lado a primeira onda que chega ao receptor é a onda aérea que se propaga pelo ar. Este pulso viaja sem distorções e sua forma pode servir de indicador da polaridade do pulso emitido. O pulso em GPR representa a voltagem que é gerada e recebida pelas antenas, que são dipolos elétricos. A voltagem, que pode ser positiva ou negativa, depende da forma como estão dispostos entre si estes dipolos elétricos, representados pelas antenas receptora e transmissora.

Por outro lado ainda não foi estabelecido um padrão único pela indústria para o arranjo desses dipolos, o que torna de certa forma arbitrário o modo de dispor as antenas no terreno. Por exemplo, ao iniciar um levantamento de GPR com uma determinada disposição entre as antenas, a onda direta pelo ar chega no receptor com uma dada polaridade. Caso as antenas sejam rotacionadas em 180° inverte-se a polaridade da onda registrada (Young et al, 1995). Por isso é de fundamental importância manter um procedimento único e constante de disposição das antenas durante um levantamento de campo, para evitar inversões de polaridade. A figura 01 representa dois tipos característicos de pulso de GPR. O pulso é analisado em função de três semiciclos e a convenção de polaridade é definida pelo fabricante em função da deflexão do primeiro semiciclo.

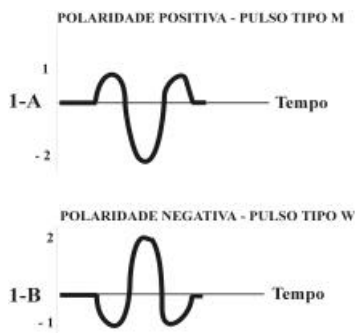


Figura 01 – Tipos característicos de pulsos em GPR e as convenções de polaridade, (modificada de Sensors & Software 2001).

Pela convenção do fabricante, o pulso da figura 1A possui polaridade positiva, enquanto a figura 1B representa um pulso com polaridade negativa. De uma forma mnemônica o pulso positivo alude à forma da letra M, com amplitudes relativas 1,

-2, 1. Por outro lado o pulso negativo lembra a letra W, com amplitudes relativas -1, 2, -1.

Em GPR existem eventos gerados pelas ondas que se propagam diretamente entre as antenas, viajando pelo ar e através do solo, e existem eventos resultantes da reflexão nas interfaces, figura 02.

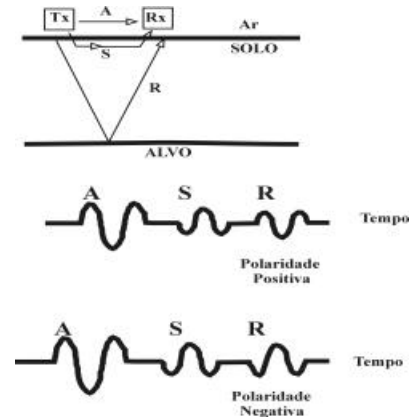


Figura 02 – Eventos característicos em GPR, e suas polaridades, (modificada de Sensors & Software 2001).

Convencionando uma polaridade positiva para a onda direta pelo ar, o pulso ao atingir o solo, que possui constante dielétrica maior do que o ar, muda de polaridade e chega à antena receptora com fase invertida, ou seja, como um pulso negativo. Já as ondas refletidas podem assumir polaridades positivas ou negativas, a depender dos contrastes dielétricos entre os meios (meio/alvo).

Por esta convenção, um alvo com alta impedância eletromagnética resulta num coeficiente de reflexão positivo, e retorna um pulso positivo ao receptor. Por outro lado um alvo com baixa impedância eletromagnética é associado a um coeficiente de reflexão negativo e retorna um sinal com polaridade negativa para o receptor. O primeiro caso pode ser exemplificado quando a onda passa do solo para o ar, como na presença de vazios como cavernas, por exemplo. Já o segundo caso é bem exemplificado com a presença de alvos metálicos enterrados, como dutos e tanques metálicos. Esses elementos, com baixíssima impedância eletromagnética (na prática igual a zero), possuem constante dielétrica que pode ser considerada como sendo de valor infinito o que, pela convenção em apreço, sempre resultará em reflexão com polaridade negativa.

Nos radargramas é possível analisar a polaridade, através da observação das deflexões nos modos de visualização tipo *wiggles*, densidade variável e área variável. Nos dois últimos modos, caso a opção de plote seja o pico preto positivo, um

Polaridade do sinal do GPR

alvo com polaridade positiva resultará na seqüência, PRETO-BRANCO-PRETO, enquanto a polaridade negativa resultará na seqüência BRANCO-PRETO-BRANCO.

Caso I – Localização de dutos metálicos enterrados.

A figura 3 mostra um estudo, em condições controladas, para o entendimento do comportamento do sinal do GPR na localização de dutos metálicos enterrados.

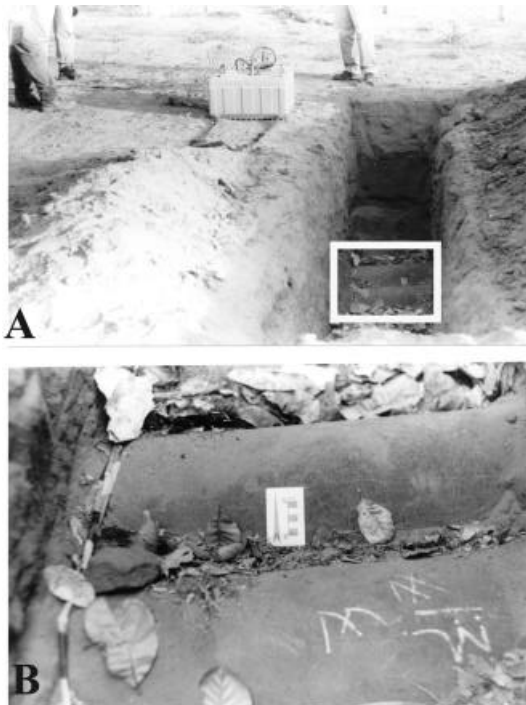


Figura 03 – Dois dutos metálicos enterrados. A figura 3B mostra uma ampliação do retângulo em destaque.

Nesta figura nota-se a existência de dois dutos, lado a lado, estando um deles numa posição um pouco mais elevada do que o outro. Foi levantada uma seção de GPR ao lado da trincheira aberta, utilizando antena com frequência de 200 Mhz. A figura 04 mostra um radargrama no qual foram aplicadas técnicas de processamento a fim de melhorar o imageamento das hipérboles resultantes do espalhamento da energia pelos dutos. A figura 05 mostra um plote em densidade variável da figura 04.

Percebe-se que a reflexão nos dutos possui polaridade negativa, como era de se esperar pela convenção anterior. O critério de polaridade permite um correto posicionamento das velocidades nas hipérboles, evitando ajustar equivocadamente o pico preto (polaridade positiva) como ápice das hipérboles geradas pelos dutos. A figura 06 mostra a seção final

migrada. O bom ajuste das hipérboles permitiu definir corretamente a velocidade de migração, e influi fortemente na qualidade final da imagem.

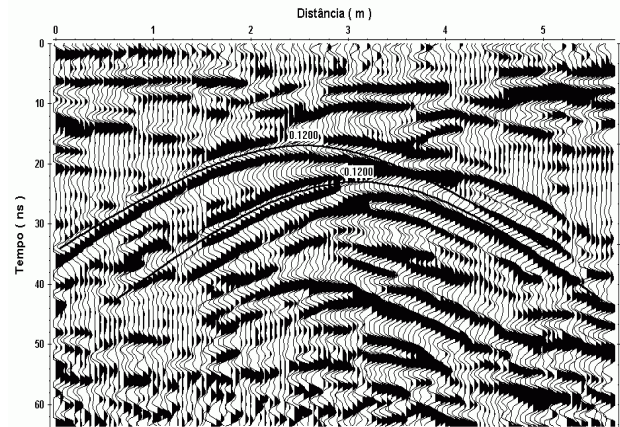


Figura 04 – Resposta do espalhamento de energia provocado pelos dutos. Através do ajuste das hipérboles (*fit*) pode-se inferir a velocidade para migração que representa a velocidade da onda no meio

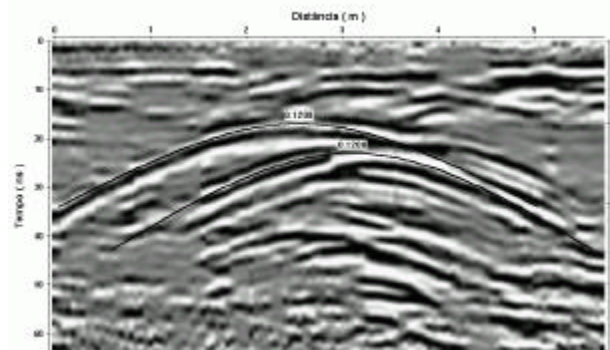


Figura 05 – Mesmo da figura 04, porém utilizando plote em densidade variável.

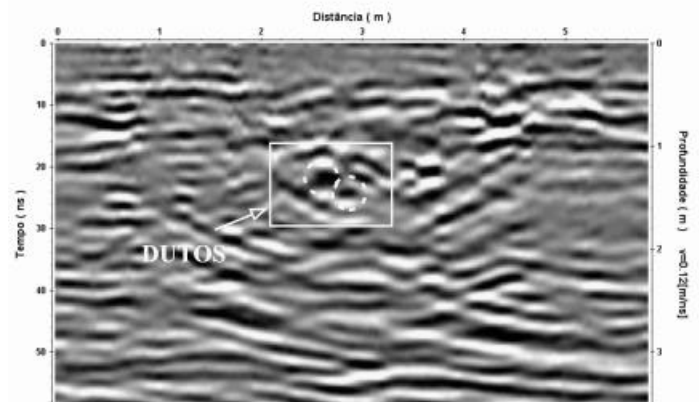


Figura 06 – Seção final migrada.

Polaridade do sinal do GPR

Caso II – Imageamento de estruturas de dissolução em substrato calcário.

A figura 07 mostra uma secção de GPR levantada sobre uma área de ocorrência de cavernas em substrato calcário, próxima ao município de Icapuí-Ce. O calcário, da Formação Jandaíra, é recoberto por sedimentos do Grupo Barreiras, possui um topo muito irregular e é intensamente cortado por falhas e fraturas, como mostra a figura 08.

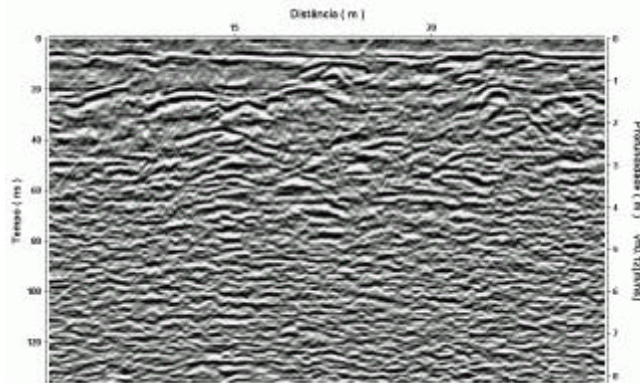


Figura 07 – Seção de GPR levantada no município de Icapuí-Ce.

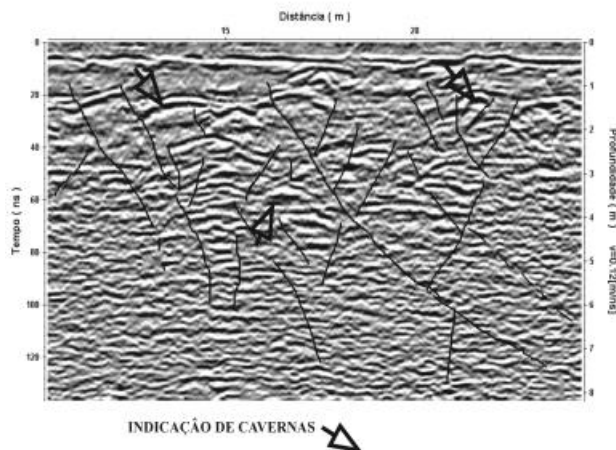


Figura 08 – Mesma seção da figura 07, porém com posicionamento interpretado de falhas, fraturas e cavernas.

Pelos critérios usados no Caso I, pode-se esperar que onda eletromagnética se propagando no calcário, ao encontrar uma caverna sofra uma mudança de fase, assumindo uma polaridade positiva, pois passa de um meio de constante dielétrica maior (calcário), para um de constante dielétrica menor (ar). Isto auxilia sobremaneira a identificação de

feições associadas a cavernas, e diminui a subjetividade da interpretação.

A figura 09 mostra um plote em área variável, onde se vê melhor a seqüência das deflexões PRETO-BRANCO-PRETO associadas a presença de cavernas.

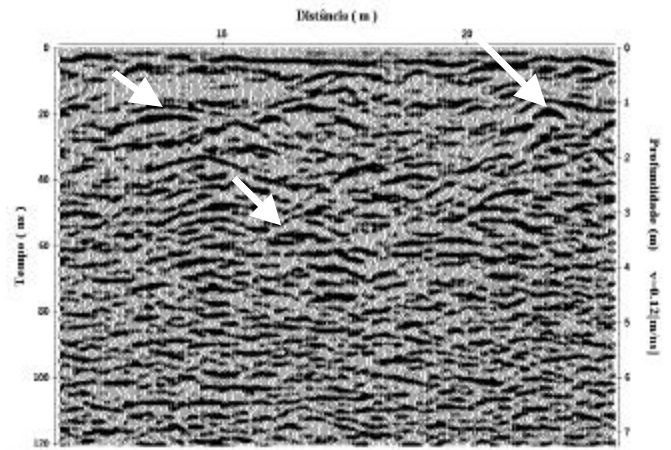


Figura 09 – Mesma seção das figuras 07 e 08 apresentada em plote com área variável. Notar a seqüência das deflexões PRETO-BRANCO-PRETO, associadas a presença de cavernas.

Conclusões

A utilização da polaridade do pulso do GPR pode auxiliar a interpretação dos dados na medida em que associa as feições imageadas nos radargramas às características dielétricas dos alvos, evitando critérios subjetivos, meramente morfológicos, que podem resultar em erros de interpretação.

Faz-se necessário aprofundar e expandir a discussão sobre o tema objetivando estabelecer um padrão único, à semelhança do que ocorre com o padrão da sísmica de reflexão (padrão SEG - *Society of Exploration Geophysics*).

Referências

- Annan, A. P., 1992, Ground penetrating radar workshop notes (Oct. 1992): Sensors & Software Inc.
- Sensors & Software Inc. 2001, Nota Técnica EKKO Update (jan. 2001).
- Young, R.A., Deng, Z. and Sun, J., 1995, Interactive processing of GPR data, The Leading Edge (Apr. 1995).



INTEGRAÇÃO AEROGEOFÍSICA E IMAGENS DE SATÉLITE: FOLHAS TRÊS RIOS, ANTA, DUAS BARRAS, ITAIPAVA TERESÓPOLIS E NOVA FRIBURGO - ESTADO DO RIO DE JANEIRO.

Miguel Ângelo Mane, Paulo de Tarso Luiz Menezes, Henrique Llacer Roig-
DGAP-FGEL-UERJ, migangel@uerj.br

ABSTRACT

In order to answer some questions about geological situations in Rio de Janeiro State, we have used a combination of geophysical and image processing techniques. These techniques involved the joint processing, integration and interpretation of Landsat image and aeromagnetic gammaespectrometric data.

We have applied geometric and atmospheric corrections, followed by band rationing, principal component analysis and spacial frequency filtering. The processed images were integrated with geophysical data by applying the combination (RGB) and fusion (IHS) techniques.

The interpretation of the integrated images contributed to geologic knowledge of the redefine important structures in State of Rio de Janeiro.

INTRODUÇÃO

Os conhecimentos atuais da geologia Fluminense mostram que ainda é incipiente os estudos sobre a sua abrangência e alguns detalhes, na medida em que muitos trabalhos ainda que dispersos não permitem uma correlação das estruturas e da litologia a que se tem conhecimento em cartas geológicas de detalhe (DNPM, 1998). De acordo com o DNPM, observam-se superposições de eventos no espaço e no tempo (sedimentação, metamorfismo, tectonismo, migmatização, magmatismo) que mostram de forma distinta o processo da formação das rochas que nem mesmo em trabalhos de detalhe são fáceis de recuperar.

As metodologias geofísicas têm se mostrado muito úteis no aprofundamento e melhoria de potencialidades antes desconhecidas. Com o objetivo de contribuir para a melhoria das informações geológicas existentes, foram reprocessados os dados do projeto aerogeofísico São Paulo – Rio de Janeiro onde algumas folhas foram selecionadas conforme descrito neste trabalho.

As áreas cobertas pelas seis folhas analisadas mostram novas condições geológicas, com detalhes importantes, cujos resultados são apresentados neste trabalho.

Foram analisados e interpretados os dados geológicos obtidos durante o mapeamento (1:50.000) das folhas de Rio de Janeiro. O tratamento digital desses dados, integrados a imagens RADARSAT, permitiu a geração de composições TM/Landsat-Radiometria cobrindo as 6 folhas das áreas estudadas (Folhas Três Rios, Anta, Duas Barras, Itaipava Teresópolis e Nova Friburgo).

CONTEXTO GEOLÓGICO

Almeida et al. (1973), aponta que a zona móvel que deu origem ao Cinturão Ribeira, produziu intensas transformações estruturais e petrológicas sobre a crosta preexistente e que foi responsável por intensa granitogênese, migmatização etc. Já em terrenos de baixo grau metamórfico a intermediário o estabelecimento de associações litológicas e características, a comparação de colunas estratigráficas e o acompanhamento das transformações metamórficas torna possível a definição de conjuntos litoestratigráficos maiores.

Conforme Fonseca (1979, 1984), Heilbron (1993) e Machado & Endo (1994) entre outros, o território do Estado do Rio de Janeiro se divide em três grandes segmentos crustais nos seguintes blocos: Bloco de Cabo Frio, Bloco da Serra dos Órgãos e Bloco ou Segmento das Zonas de Cisalhamento.

Como feições marcantes destacam-se os seguintes:

Bloco Cabo Frio - contraste entre o embasamento granitóide e as seqüências metassedimentares de idade brasileira; estruturas do embasamento de direção NW-SE, ortogonais às do Cinturão Ribeira; metamorfismo de pressão intermediária na Unidade Búzios e ausência de uma granitogênese brasileira.

Bloco Serra dos Órgãos - expressivos cavalgamentos/empurrões, zonas de cisalhamento, antififormes e sinformes todos de grande linearidade orientados na direção ENE-WSW e NNE-SSW; metamorfismo intenso, granitização, retrabalhamento crustal e granitogênese brasileira.

Bloco das Zonas de Cisalhamento - as estruturas dominantes são as grandes zonas de cisalhamento dúctil de caráter transpressivo; raras estruturas antififormes e sinformes sendo que a vergência é, nitidamente, para o quadrante noroeste, sem exceção.

Uma intrusão granítica com textura gnáissica de grandes dimensões - o Batólito da Serra dos Órgãos (Barbosa & Sad 1985) é intrusivo no Complexo Rio Negro e em Leucogranito Gnaiss.

Granitos pós-tectônicos ocorrem em maciços circunscritos, como em Teresópolis, Frades, Nova Friburgo (Junho 1990) e São José do Ribeirão (Matos et al 1980). Todo o conjunto de rochas mergulha suavemente para noroeste, em contatos semiconcordantes, com fracos sinais de deformação e metamorfismo nos ortognaisses.

INTERPRETAÇÃO

Modelo digital (TM/Landsat) com a geologia e o canal potássio (⁴⁰K)

É evidente no modelo digital de terreno a coincidência das regiões anômalas de potássio com platôs e rochas ricas em minerais radioativos. Já nas encostas (escarpas) os elementos radioativos não se sustentam devido a condições de mobilização (lixiviação). O potássio é o elemento que segue a distribuição das rochas ricas em elementos radioativos.

Os mapas radiométricos apresentados a seguir mostram respostas de anomalias que nem todas coincidem com a descrição litológica do mapa geológico. As rochas ricas em minerais radioativos distinguem os complexos magmáticos dos metamórficos. Outros contornos mostram provavelmente extensões de unidades cujo mapeamento poderá ser melhor definido.

Analisando o mapa de potássio verifica-se que os granitos ao redor da cidade de Nova Friburgo não são muito ricos nesse elemento químico. Já a área de Teresópolis as anomalias são mais acentuadas para esse elemento. Vale salientar que a região de Teresópolis tem predominância de grandes complexos sintectônicos enquanto que a de Nova Friburgo observam-se corpos magmáticos pós e sintectônicos.

CONSIDERAÇÕES

A geofísica mostra na figura 2 da integração de imagens TM/Landsat, geologia e canal de potássio (40K), que o mapa obtido tem correlação com feições importantes marcadas no mapa geológico (figura 1). Observam-se outras anomalias importantes que precisariam confirmação dado a falta de detalhe das informações geológicas. Algumas anomalias apontadas na figura 2 indicam que as estruturas vistas em superfície seguem a direção já conhecida SW-NE a nível regional. As falhas principais se situam nessa direção sendo que as transversais representam descontinuidades de estruturas na direção SW-NE conforme resultado radiométrico.

BIBLIOGRAFIA

- ADAMS, J. A. S. & GASPARINI, P. - 1970 - Gamma-ray spectrometry of rocks. Series: Methods in Geochemistry and Geophysics. Elsevier, Amsterdam, 295 p.
- ALMEIDA, F. F. M. de; AMARAL, G.; CORDANI, U. e KAWASHITA, K. -1973- The Precambrian evolution of the South American Cratonic Margin, South of Amazon River. In: The ocean basin and margins (Nairn & Stollids.),1:411-416, Plenum, Nova York.
- FALCÃO, H. - 1978 - Perfil analítico de Águas Minerais. Rio de Janeiro, DNPM, Bol. 49, 109 p.
- HEILBRON, M - 1995 - O segmento central da Faixa Ribeira: síntese geológica e ensaio de evolução geotectônica. Tese de Livre Docência, Faculdade de Geologia, UERJ, Rio de Janeiro, 110 pág., inédito.
- MACHADO, R.; ENDO, I. - 1994 - Superposição cinemática brasileira no Cinturão de Cisalhamento Atlântico e na cunha de Guaxupé. XXXVIII Congresso Brasileiro de Geologia. Balneário de Camboriú, SC, p. 269-270.
- TUPINAMBÁ, M.; HEILBRON, M.; OLIVEIRA, A.; PEREIRA, A. J.; CUNHA, E. R. S. P.; FERNANDES, G. A.; FERREIRA, F. N. ; CASTILHO, J. G.; TEIXEIRA, W. - 1996 - Complexo Rio Negro - uma unidade estratigráfica relevante no entendimento da evolução da Faixa Ribeira. 39º.Congresso Bras. Geol. in Anais.
- VALENÇA J. G. - 1976 - Rochas alcalinas do Estado do Rio de Janeiro - Correlações geológicas. Minerais Metálicos do Rio de Janeiro, 366:6-11.



Figura 1 – Esboço geológico da área estudada no Estado do Rio de Janeiro

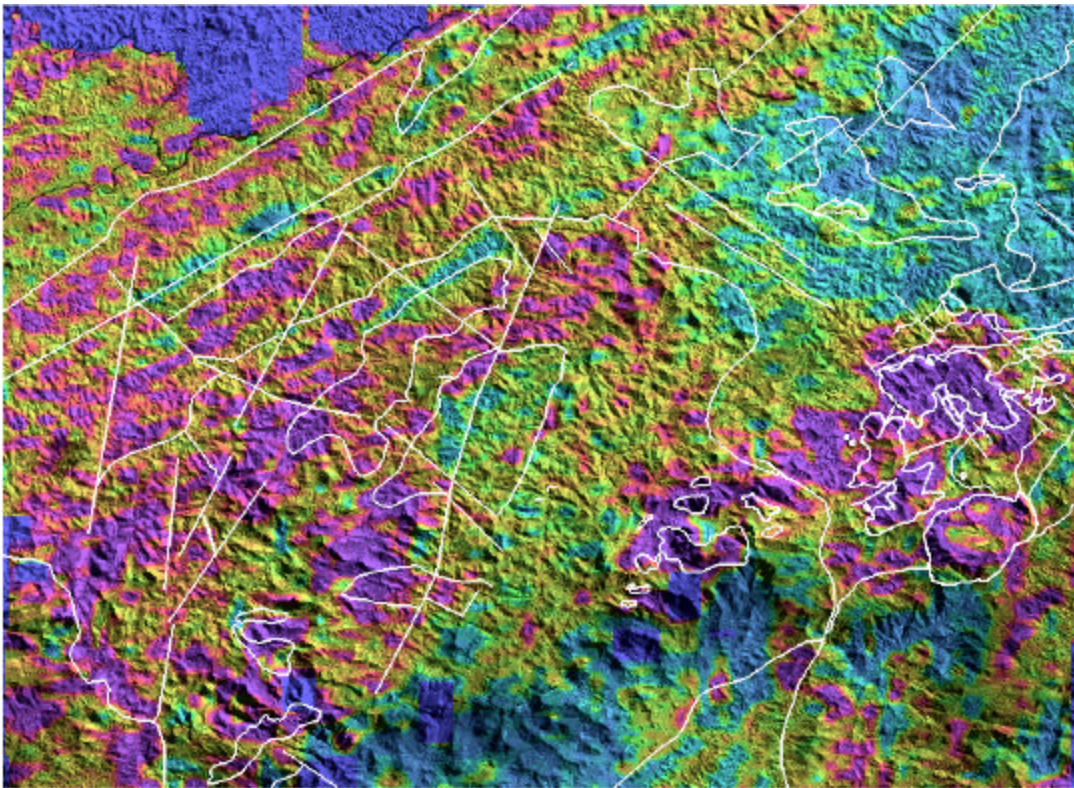


Figura 2 – Integração TM/Landsat com o canal de potássio e contorno geológico da área estudada



Investigações Geofísicas na Borda da Bacia Sedimentar de São Paulo

Welitom Rodrigues Borges¹ & Jorge Luís Porsani²

¹ Aluno de Mestrado em Geofísica do IAG/USP – Email: welitom@iag.usp.br

² Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo – Email: porsani@iag.usp.br

Abstract

This paper shows partial results of geophysical investigations carried out in the border of São Paulo Sedimentary Basin, within the São Paulo University campus. The main objective of this research is characterizing the sediments and the top of basement rocks using the GPR - *Ground Penetrating Radar* and Resistivity Methods. The geophysical profiles were carried out along the same line in order to compare results obtained from these methodologies. One GPR profile (216m) was acquired employing 50MHz antennas and one resistivity profile with dipole length of 20m. Besides two verticals electrical soundings (VES) measurements were done on the same line. The analysis of GPR profile permitted to identify the bottom boundary the soil and one coarse sand layer. The result was supported by borehole information. The electrical profile identified one conductivity anomaly zone between 80 and 110m, related probably with a shear zone.

Introdução

Neste trabalho utilizaram-se os métodos GPR e eletrorresistividade para caracterizar os sedimentos e o topo rochoso granito-gnáissico na borda da Bacia Sedimentar de São Paulo. A área de pesquisa localiza-se em frente ao prédio do Instituto Astronômico e Geofísico (IAG/USP), situado na Rua do Matão, 1226, Campus da Universidade de São Paulo (USP), porção centro-oeste do município de São Paulo, na margem esquerda do Rio Pinheiros (Figura 1).

Geologia da Área de Estudos

A Bacia Sedimentar de São Paulo está situada na porção central do conjunto de bacias tafrogênicas meso-cenozóicas do sudeste brasileiro. Exibe forma irregular, aproximadamente elíptica, com uma área total de aproximadamente 1000 km² e espessura máxima de 310m.

Na área em estudo predominam sedimentos arenos-argilosos de idade terciária (formações São Paulo e Itaquaquecetuba), que capeiam o embasamento gnáissico de idade pré-cambriana, com diferentes graus de intemperização (Iritani, 1993). Através da colaboração do projeto “Investigações Geofísicas de Subsuperfície e de Poço na Borda da Bacia Sedimentar de São Paulo”, financiado pela Fapesp, foi obtido um perfil litológico (Figura 2) de um poço executado em frente ao IAG, fundamental para as

interpretações geológicas e geofísicas (Porsani, 2001).

Metodologia e Aquisição dos Dados

O GPR é um método eletromagnético que emprega ondas de rádio entre 10 e 1000 MHz, para localizar estruturas e feições geológicas rasas. A metodologia consiste em obter uma imagem de alta resolução através da emissão de um curto pulso de alta frequência para gerar ondas eletromagnéticas que são radiadas para a subsuperfície por uma antena transmissora colocada na superfície. A propagação do sinal depende da frequência do sinal transmitido e das propriedades elétricas dos materiais, no caso, condutividade elétrica e permissividade dielétrica, que variam principalmente com o conteúdo de água no solo (Porsani, 1999). A mudança nas propriedades elétricas em subsuperfície faz com que parte do sinal seja refletido. As ondas refletidas e difratadas em diferentes interfaces são recebidas por uma antena receptora colocada na superfície do terreno. O resultado final é uma imagem de alta resolução que permite identificar as diversas interfaces presentes no local.

Os dados GPR foram adquiridos na forma de perfis de reflexão com afastamento constante e na forma de sondagens de velocidade do tipo “Wide Angle Reflection and Refraction” - WARR. A Figura 3 mostra um perfil de reflexão de 216m de comprimento, obtido com antenas de 50MHz. O espaçamento entre cada traço foi de 0,5m e o *stack* de 512. As sondagens de velocidade adquiridas com a técnica WARR permitiram calcular a velocidade de 0,08m/ns, importante para a conversão do perfil de reflexão em tempo para profundidade.

Na aquisição dos dados utilizou-se o equipamento Sueco Ramac (Mala-GeoScience) pertencente ao Departamento de Geofísica do IAG/USP, e os dados foram processados utilizando-se o software Gradix da Interpex Ltd., USA.

O método da eletrorresistividade é provavelmente um dos mais utilizados mundialmente, principalmente através da técnica de sondagem elétrica vertical. Neste método as técnicas de aquisição de dados mais usuais são: SEV – Sondagem Elétrica Vertical e Caminhamento Elétrico - CE. Além disso, existe uma variedade de arranjos de eletrodos, por exemplo, Schlumberger, Wenner, dipolo-dipolo, etc., conferindo ao método uma enorme versatilidade (Elis, 1999).

Investigações Geofísicas na Borda da Bacia Sedimentar de São Paulo

Nesta pesquisa, utilizamos as técnicas de SEV e CE. As SEV's foram adquiridas utilizando-se o arranjo Schlumberger e foram denominadas SEV01-IAG/FIS e SEV02-IAG/FIS. A primeira teve os eletrodos de emissão de corrente (AB/2) distanciados até 400m, alinhados paralelamente à rua do Matão na posição 165m da Linha IAG/FIS. A SEV02-IAG/FIS teve os eletrodos de emissão de corrente (AB/2) distanciados até 200m, alinhados perpendicularmente à Linha IAG/FIS na posição 200m. A SEV02-IAG/FIS foi realizada perpendicularmente à rua do Matão devido a suspeita da presença de uma zona de falha paralela e próxima a Linha IAG/FIS.

Os dados de SEV foram modelados através do algoritmo de inversão 1D utilizando-se o *software* Resixip da Interpex Ltd. USA. A Figura 3 mostra os dados da SEV01-IAG/FIS, o modelo geolétrico obtido da inversão 1D e o modelo geológico correspondente.

Foram adquiridos dois perfis de CE com arranjo do tipo dipolo-dipolo: um com o espaçamento dos eletrodos de 10m (CE-10) e outro com espaçamento de 20m (CE-20). Ambos os caminhamentos foram realizados sobre a linha IAG/FIS e tiveram 5 níveis de investigação, atingindo a profundidade teórica de 30m (CE-10) e 60m (CE-20).

Os dados do CE foram apresentados utilizando o *software* Surfer 7.0 da *Golden Software, Inc.* Neste trabalho apresentaremos apenas o resultado do CE-20 (Figura 5).

Discussão dos Resultados

O perfil de radar PERF01-IAG, de 50MHz tem 216m de comprimento (Figura 3) é caracterizado por vários horizontes refletores irregulares até cerca de 5m, além da presença de mais dois refletores. A base dos refletores é interpretada como o limite entre o solo/aterro e os sedimentos da Bacia de São Paulo. O primeiro refletor, localizado entre 50 e 110m no perfil, encontra-se a 8 metros de profundidade com um leve mergulho em direção a NE sendo relacionado à interferência da parede do prédio do Instituto de Física. Esta interpretação foi realizada após as análises dos perfis GPR perpendiculares ao PERF01-IAG e das sondagens de velocidade WARR. Sabe-se que refletores horizontais provocados por objetos superficiais variam de inclinação de acordo com a orientação dos perfis GPR.

O segundo refletor subhorizontal que ocorre a 12m de profundidade, entre as distâncias 100 e 160m foi correlacionado, com base no perfil geológico do poço P1, ao topo de uma camada de areia muito grossa (cascalho). A partir deste refletor não se observa nenhum refletor que mereça destaque. Este fato é atribuído à elevada condutividade dos

sedimentos que absorvem e atenuam a propagação da onda eletromagnética do GPR.

A análise quantitativa dos dados de SEV's permitiu caracterizar os materiais de subsuperfície, determinando-se as espessuras e as resistividades das camadas (Figura 4). Nota-se que o topo da camada resistiva, observado em torno de 10m de profundidade, coincide com o refletor horizontal visto no perfil GPR (Figura 3) e está relacionado com uma camada de areia grossa, conforme mostra o perfil litológico do poço P1 (Figura 2). A SEV02 apresentou o mesmo comportamento da SEV01, não sendo apresentada neste trabalho.

No perfil de caminhamento elétrico CE-20 (Figura 5) é nítida a presença de duas regiões resistivas, descontínuas entre 80 e 110m. Nesta região, tem-se uma zona condutora verticalizada, que provavelmente está relacionada com a presença de uma zona de falhas. O horizonte resistor que ocorre entre 120 e 190m é subhorizontalizado, e está relacionado com o refletor identificado pelo GPR (Figura 3) e correlacionado com uma camada de areia grossa observada no poço P1 (Figura 2).

Conclusões Preliminares

As camadas argilosas das formações São Paulo e Itaquaquetuba atenuam a propagação das ondas eletromagnéticas do radar e são excelentes condutoras de corrente elétrica. As SEV's e caminhamentos não conseguiram atingir o embasamento da bacia na região devido à presença destas camadas argilosas e também por falta de espaço físico para ampliar o arranjo dos eletrodos. A presença de uma zona condutora entre 80 e 110m, vista no CE-20, é um indicativo da presença de uma zona de falhas, devido a mudança lateral brusca de condutividade elétrica. Esta hipótese ainda será checada, mas parece haver uma correspondência com a variação da feição topográfica observada no campo.

O método GPR mostra-se bastante promissor para investigações na Bacia de São Paulo até a profundidade de 20 metros, delineando com clareza as camadas de sedimentos grossos, bem como a espessura do solo/aterro. Este resultado está de acordo com as informações obtidas do poço P1.

Agradecimentos

A Fapesp, pela concessão da bolsa de mestrado, processo 99/12217-5 e ao Departamento de Geofísica do IAG pela oportunidade de realizar esta pesquisa. Ao Prof. Dr. Jorge Luís Porsani pela orientação e ao Prof. Dr. Vagner Roberto Elis pelas discussões e ajuda na aquisição de dados.

Investigações Geofísicas na Borda da Bacia Sedimentar de São Paulo

Referências Bibliográficas

Elis, V. R., 1999. Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos, Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro SP, 264p.

Iritani, M. A., 1993. Potencial hidrológico da Cidade Universitária de São Paulo. Dissertação de Mestrado, IG/USP, 63p.

Porsani, J. L., 1999. *Ground Penetrating Radar (GPR): proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado SP.* Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro, SP, 145p.

Porsani, J. L., 2001. Investigações Geofísicas de Superfície e de Poço na Borda da Bacia Sedimentar de São Paulo. Relatório Parcial. Projeto Fapesp (99/12215-2) 50p.

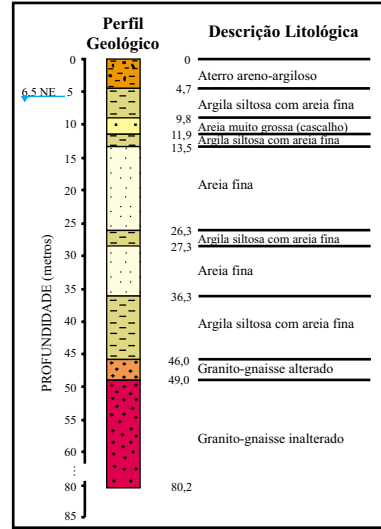


Figura 2. Perfil litológico do poço (Porsani, 2001).

Figura 1. Localização da área de pesquisa

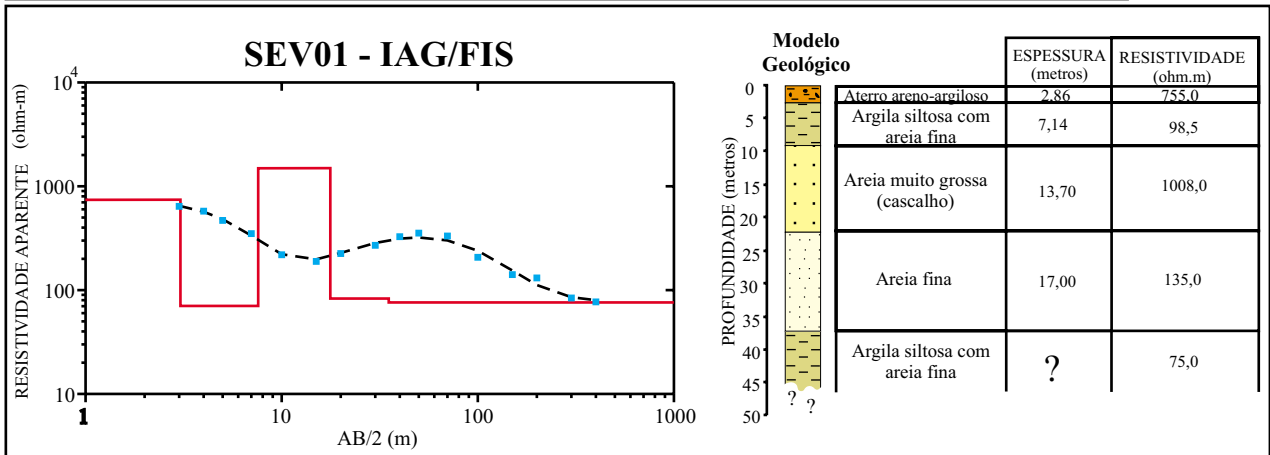
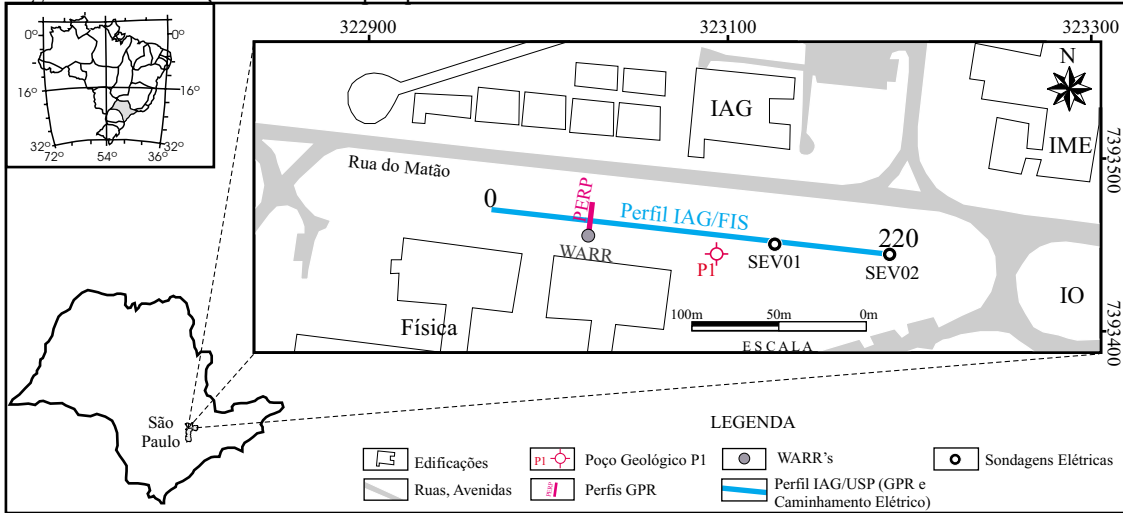


Figura 4. SEV01 IAG/FIS. a) Os dados são representados por ■ e a linha pontilhada é o resultado do ajuste do modelo de Terra 1D. A linha cheia é o modelo de Terra 1D ajustada aos dados. Erro de conversão de 7,74%. b) Modelo geológico-geoelétrico para a SEV01 IAG/FIS, proposto com base no perfil litológico do poço.

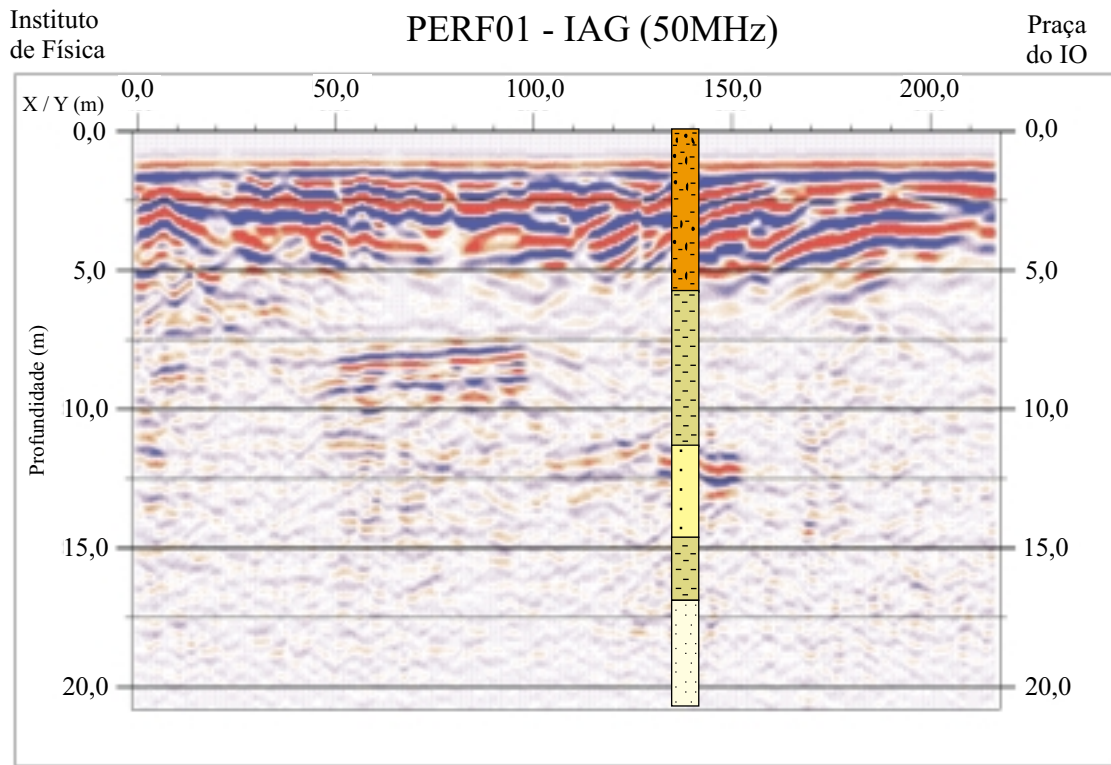


Figura 3. Perfil de reflexão GPR PERF01-IAG (50MHz) realizado em frente ao IAG/USP, com correspondência litológica do poço P1 sobreposto.

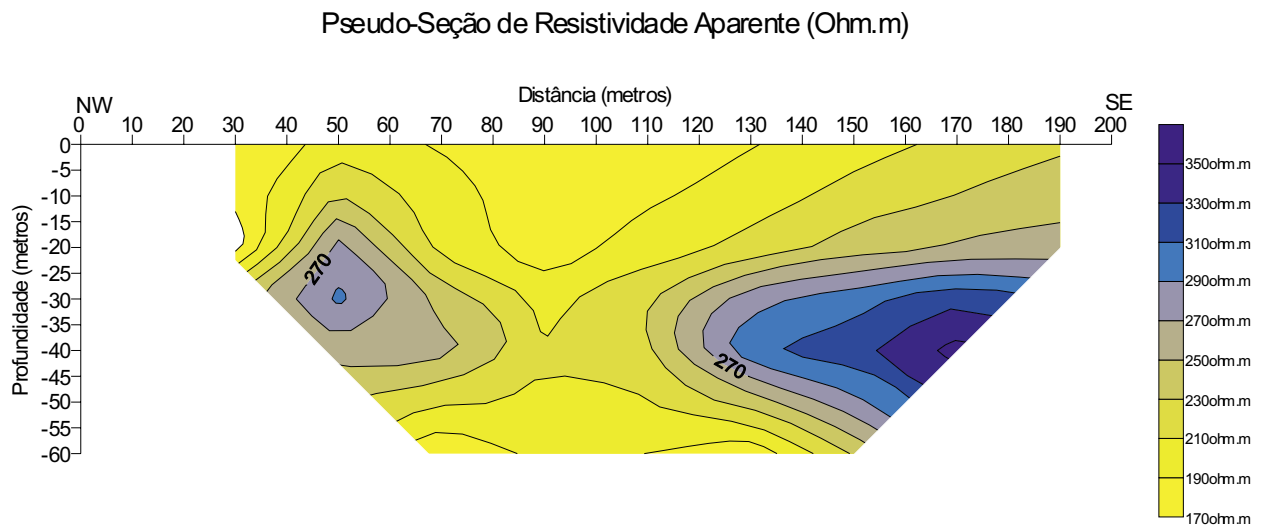


Figura 5. Pseudo-Seção de Resistividade Aparente do Caminhamento Elétrico CE-20, IAG/FIS



Investigações geofísicas no sambaqui fluvial dos Morais, Miracatu-SP

Debora S. Carvalho*, Carlos A. Mendonça*, Eronaldo B. Rocha*, Tatiana M. Romero*, Leandro M. L. Yokoyama*, Marcelo J. S. Gomes**, *IAG-USP, **MAE-USP, BRAZIL

A s r a

Sambaquis are prehistoric sites occurring at the Brazilian southern coast and mainly are characterized by their content in shells. In general, they constitute large archaeological sites with age as grater as 8500 years BP and in the State of São Paulo are mainly found along the basin of the Ribeira River. In this paper, we present some preliminary results from the geophysical investigations carried out in the Morais's sambaqui, situated at the Miracatu municipality of the Ribeira Valley. The geophysical surveys were conducted with magnetic and radiometric methods and the obtained results indicated a site structure roughly represented by a two layer model. The lower layer is constituted by disseminated pieces of shells and was fairly mapped by the radiometric data. Magnetic data recognized natural rock structures that presumably were used to protect the mound from the action of the erosion. Later archaeological excavations corroborate the overall site characterization that was initially figure out from the geophysical data interpretation.

In r

Os métodos geofísicos são de grande utilidade nas investigações arqueológicas pois conseguem mapear, com rapidez e simplicidade, diversas feições de interesse à pesquisa. A rapidez de medida é um parâmetro importante nessas aplicações pois muitas feições possuem dimensões sub-métricas requerendo, assim, uma alta densidade de dados para a produção de mapas com a resolução apropriada. As propriedades físicas medidas por estes métodos normalmente se correlacionam com diversas tipologias de materiais arqueológicos. A magnetometria, por exemplo, permite a detecção de materiais afetados pelo uso recorrente do fogo o qual altera a composição dos minerais contendo ferro e induz a geração de magnetização remanescente após o resfriamento (Gibson, 1986). Diversos autores utilizam dados de resistividade elétrica e suscetibilidade magnética obtidos com métodos eletromagnéticos (Scollar, 1962; Foster, 1968; Tabbagh, 1974) e elétricos (Panissod et al., 1998) para mapear solos compactados, trincheiras, vestígios de fundações e restos de construções antigas (Wynn, 1986; Weymouth, 1986).

Recentemente, têm sido reportadas experiências de uso de métodos radiométricos (Brito et al., 1999; Alberto et al., 2000) no

mapeamento de material carbonático (conchas) que normalmente diminui as concentrações dos radioelementos naturais (K, U e Th) no solo. Esta propriedade tem sido explorada nas investigações de sítios do tipo sambaqui (do Tupi, também=marisco e ki=amontoado; cf. FAPESP, 2000) que normalmente apresentam conchas em sua constituição. Como mostra a Figura 1, os sambaquis fluviais do Vale do Rio Ribeira ocorrem espalhados ao longo de todo o vale e, em termos arqueológicos, representam vestígios materiais de povoados pré-históricos de idade superior a 8500 anos antes do presente (Levy Figuti, informação verbal). Alguns trabalhos geofísicos usando espectrometria gama foram realizados com sucesso na região de Miracatu (Alberto, 2000; Alberto et al., op. cit.) pois a menor concentração de elementos radioativos permite a delimitação do material conchífero que muitas vezes é portador de materiais arqueológicos.

O presente trabalho mostra resultados obtidos com a aplicação de métodos radiométrico e magnetométrico no sambaqui fluvial dos Morais, Miracatu-SP. Conforme mostra-se a seguir, a interpretação destes dados permitiram o reconhecimento de feições arqueológicas importantes na caracterização do sítio e, de um modo geral, indicam a importância de se interpretar os dados geofísicos com base numa topografia de detalhe do sítio arqueológico.

Tra a s rea a s Levan a en T r

Antes da realização dos levantamentos geofísicos implantou-se uma malha de referência para a posterior tomada de medidas. Na construção da malha tomou-se como referência um ponto localizado no ápice do sambaqui e a partir dele foram demarcadas, com fio de nylon, linhas de direções NS espaçadas de 2 metros. Estas linhas, umas mais curtas, outras mais longas, dependendo dos obstáculos em superfície, cobriram toda a área de provável ocorrência do sambaqui. A topografia desta área foi levantada em detalhe (uma medida a cada 2 m²) usando um taqueômetro digital (estação total) que também foi usado para o posicionamento dos pontos com medidas geofísicas fora da malha regular (radiométricas, em especial). A topografia do sítio e seus arredores é mostrada na Figura 2a. Como mostrado nesta figura, o sítio é atravessado por

Investigações geofísicas em sambaqui fluvial

uma estrada secundária cujo corte facilitou a exposição de um perfil arqueológico praticamente contínuo ao longo do barranco situado em seu lado Leste.

Levan a en a aes e r r

As medidas gamaespectrométricas foram feitas sobre 298 pontos, a maioria sobre os nós da malha instalada, adotando-se um minuto de contagem em cada medida. Também foram tomadas, periodicamente, medidas sobre um ponto base para monitoramento das variações diurnas da radiação cósmica e verificação da repetibilidade das medidas. Medidas sobre uma lâmina d'água de mais de um metro foram feitas para correção da radiação de fundo.

A Figura 2b, mostra o mapa das contagens gama no canal do Tório sobreposto ao mapa da topografia do terreno. De um modo geral, o mapa radiométrico apresenta uma feição circular com baixas contagens nos flancos do sambaqui e contagens mais altas no seu topo e áreas vizinhas com exposição de gnaisses e solos argilosos. As escavações arqueológicas confirmaram que os locais de menor radioatividade correspondem a uma camada de solo contendo conchas disseminadas. A camada sobrejacente mais radioativa, que aparece no centro (ápice) do sítio, corresponde a um solo arenoso de tonalidade escura ainda não muito bem caracterizado em termos do seu significado arqueológico. À primeira vista, esta camada parece arqueologicamente estéril sugerindo, inclusive, ter origem associada a processos naturais, não-antropogênicos.

Levan a en a n

O levantamento magnético foi efetuado com um magnetômetro de precessão de prótons, tomando-se medidas a cada 0,5 m ao longo das linhas. Foi necessário o adensamento das linhas para garantir a resolução de anomalias localizadas o que exigiu a marcação de linhas intermediárias à malha previamente instalada. A remoção da variação diurna foi realizada por reocupação de uma estação base a pelo menos cada 5 minutos. Para facilitar a localização das fontes magnéticas, obteve-se a partir dos dados medidos os correspondentes valores da amplitude do sinal analítico cujo mapa é mostrado na Figura 2c. Neste mapa, os valores mais elevados de amplitude na parte sul do mapa associam-se a afloramentos de rochas gnáissicas cuja suscetibilidade média (obtida a partir de 30 medidas do afloramento) é de $11,76 \times 10^{-3}$ SI. As anomalias similares no entorno do sítio estão

sendo interpretadas como sendo corpos rochosos similares mas que atualmente encontram-se capeados por materiais do próprio sítio e solos transportados.

D s s e res a s re nares

Caso as escavações confirmem que as anomalias magnéticas identificadas no entorno do sítio são de fato causadas por blocos de rochas similares àqueles que afloram na borda sul do sambaqui ter-se-ia configurado uma feição favorável à preservação do sítio contra processos erosivos. Curiosamente, aspectos construtivos, também favoráveis à preservação, foram reconhecidos em outro sambaqui do Vale do Rio Ribeira (Capelinha, Miracatu-SP) sugerindo tratar-se de um aspecto cultural relativamente difundido nos povoamentos sambaqui. Em termos arqueológicos, a preocupação com a preservação do sítio sugere a existência de populações relativamente sedentárias ou, pelo menos, não tão nômades como anteriormente se pensava.

A análise dos dados radiométricos e topográficos sugerem que o sítio é, a grosso modo, constituído por duas camadas, a inferior contendo os fragmentos disseminados de conchas que tipicamente caracterizam os sambaquis. A camada com conchas repousa sobre a superfície original do terreno na qual ocorrem diversos sepultamentos, que são encontrados também no interior da camada de conchas sem, entretanto, configurar o padrão predominante de ocorrência. As escavações arqueológicas, desenvolvidas em 19 m^2 do sítio, algumas atingindo 2 m de profundidade, identificaram 23 sepultamentos. Estes dados, somados à ausência de artefatos relacionados a atividades produtivas (caça, coleta e produção de instrumentos, por exemplo) ou de moradia, sugerem tratar-se de um sítio especializado na função de cemitério. Desta maneira, a extensão da camada de conchas estaria indicando, a extensão do próprio cemitério permitindo, assim, estimar o número de sepultamentos lá existentes. Esta informação, em conjunto com outros dados arqueológicos e de datação radiométrica, talvez venham a permitir a obtenção de estimativas paleo-demográficas dos povoamentos sambaquis o que seria de grande importância para os estudos destes povoamentos pré-históricos.

Em termos figurados, poder-se-ia dizer que a área definida pela anomalia radiométrica daria elementos para o recenseamento de uma população que, por similaridade com outros sítios já datados, teria vivido há mais de 8500 anos. No mesmo contexto, as anomalias magnéticas

Investigações geofísicas em sambaqui fluvial

expressariam aspectos construtivos que tais populações levavam em consideração ao tentar preservar o local usado para repousar os seus mortos.

Referências

Alberto, J. J. A., 2000, Mapeamento radiométrico de Sambaqui fluvial no sítio arqueológico de Miracatu-SP. Trabalho de Graduação, IAG/USP, São Paulo. 71 p.

Alberto, J. J. A., Rocha, E. B., Mendonça, C. A., Porsani, J. L., Brito, P. M. A., Hiodo, F. Y., 2000, Geophysical Prospecting Techniques to Delineate Fluvial Prehistoric Shell Deposits (Sambaqui) in Archaeological Site of Miracatu-SP; 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro, Brazil.

Brito, P.M.A., Mendonça, C.A., Porsani, J.L., 1999, Investigações geofísicas no Sambaqui Capelinha, Cajati-SP, X Reunião Científica da Sociedade de Arqueologia Brasileira, Recife, PE.

FAPESP, 2000, Muito antes da chegada de Cabral, Revista Pesquisa FAPESP, 46-49.

Foster, E.J., 1968 - Further developments of the pulsed induction metal detector: *Prosp. Archeol.*, **3**, 95-99.

Gibson, T.H., 1986, Magnetic prospection on prehistoric sites in western Canada: *Geophysics*, **1**, 553-560.

Panissod, D., Dabas, M.; Hesse, A., Jolivet, A., Tabbagh, J. & Tabbagh, A., 1998, Recent development in shallow-depth electrical and electrostatic prospecting using mobile arrays: *Geophysics*, **3**, 1542-1550.

Scollar, I., 1962, Eletromagnetic prospecting methods in archaeology: *Archaeometry*, **1**, 146-153

Tabbagh, A., 1974, Méthodes de prospection électromagnétique applicables aux problèmes archéologiques: *Archaeophysics*, **1**, 350-437.

Weymouth, J.W., 1986, Archaeological site surveying program at the University of Nebraska: *Geophysics*, **1**, 538-552.

Wynn, J. C., 1986, Archaeological prospection: An introduction to the Special Issue. *Geophysics*, **1**, 533-537.

Apoio FAPESP Proc. N° 99/12684-2

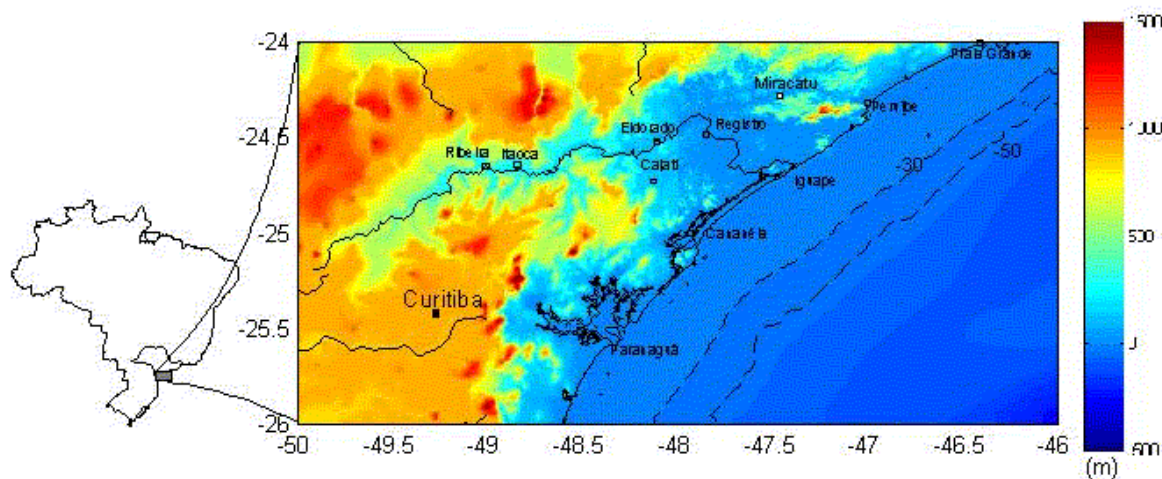


Figura 1 – Modelo digital de elevação e localização do sítio arqueológico estudado em Miracatu (quadrado em branco). Demais localidades do vale do Rio Ribeira com ocorrência de sambaquis são também assinaladas (quadrados sem preenchimento).

Investigações geofísicas em sambaqui fluvial

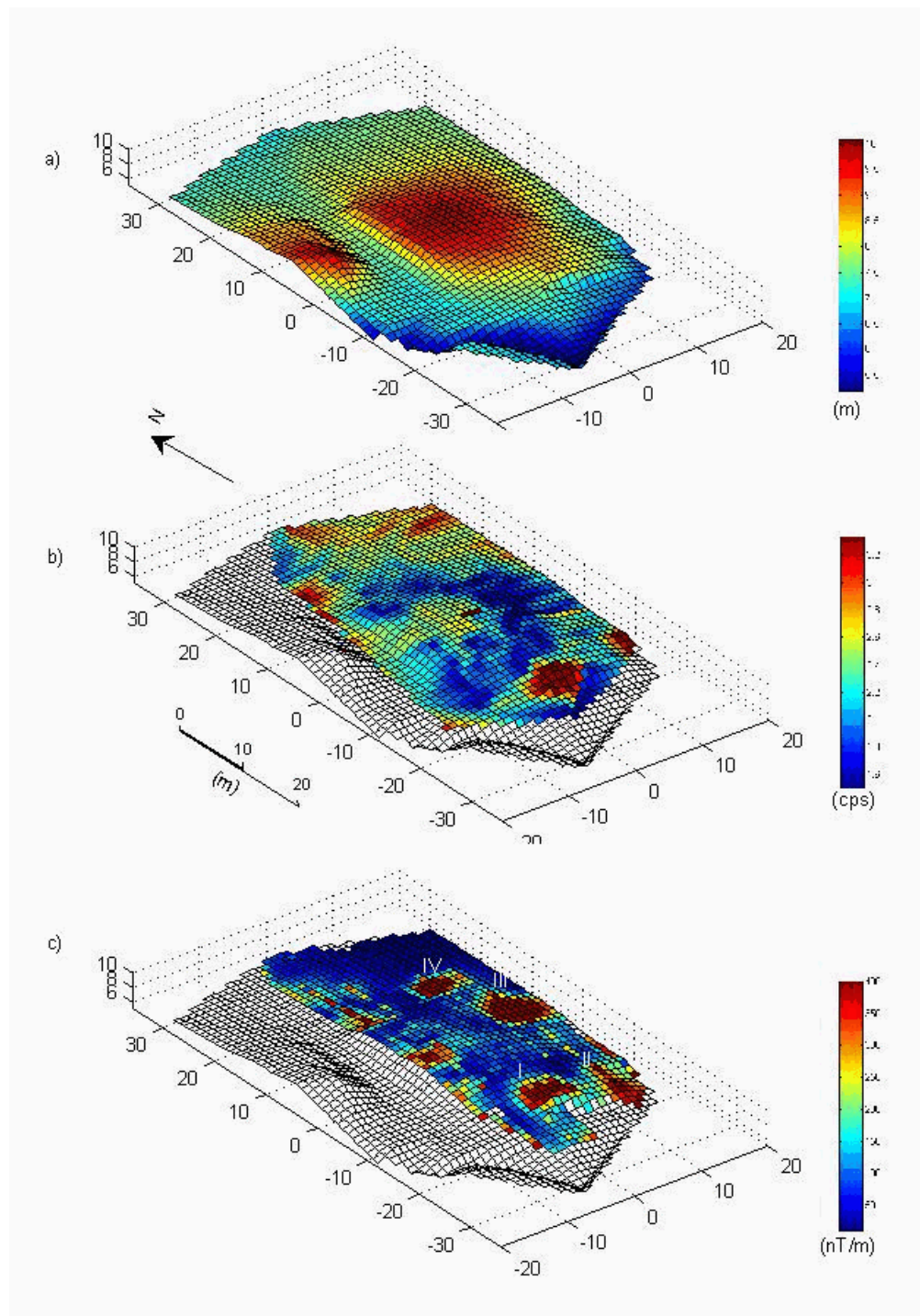


Figura 2 – a) Mapa topográfico do sambaqui dos Morais: depressão ao longo da linha NS em -10 m assinala o corte de estrada posteriormente utilizado para a construção do perfil arqueológico; b) mapa de contagens no canal do tório: valores menores delineiam a camada de solo contendo conchas disseminadas; c) mapa da amplitude do sinal analítico das anomalias magnéticas (expresso em db relativo ao valor de 20 nT/m): anomalias magnéticas I e II assinalam exposições de blocos gnaissicos (in situ) que escoram o sambaqui; as anomalias III e IV sugerem feições semelhantes em subsuperfície.

Levantamento Geofísico para Arqueologia em Trancoso, Porto Seguro-BA

João Augusto Barradas, CEFET/PA, jbarradas@jbarradas.com

José Gouvêa Luiz, Departamento de Geofísica/UFPA, gouvea@ufpa.br

Catarina Silva, IPHAN/Brasília-DF, catarina@iphan.gov.br

Resumo

Medidas geofísicas com os métodos magnético e georadar (GPR) foram realizadas na Vila de Trancoso, pertencente ao município de Porto Seguro, sul da Bahia. O objetivo das medidas era encontrar indicações sobre a localização de vestígios dos alicerces de uma Casa de Câmara e Cadeia do século XVI e os de um cruzeiro, de construção mais recente. As medidas geofísicas mostraram diversas anomalias magnéticas correlacionadas a padrões anômalos nos perfis de GPR, que podem estar relacionadas aos alicerces.

Introdução

As comemorações pela passagem dos 500 anos do descobrimento do Brasil fizeram com que, no período compreendido entre os anos de 1999 e 2000, fossem intensificados os estudos arqueológicos no município de Porto Seguro, no sul da Bahia, visando o resgate da história do descobrimento e da colonização que se seguiu. Diversas frentes de pesquisa arqueológica, usando o método invasivo convencional da escavação, foram então mobilizadas. Paralelamente, o IPHAN solicitou um levantamento geofísico, que usa técnicas não invasivas, para ser realizado na Vila de Trancoso, município de Porto Seguro, em duas áreas onde está proibida a realização de escavações.

Este trabalho apresenta os resultados do levantamento geofísico realizado na Vila de Trancoso, em área localizada na frente da Igreja de São João (Quadrado). O objetivo era encontrar os alicerces de uma Casa de Câmara e Cadeia do Século XVIII. Os resultados da outra área investigada, cujo objetivo era localizar os alicerces de um cruzeiro, de idade mais recente, não serão apresentados aqui. Em ambas as áreas foram empregados os métodos magnético e do georadar (GPR).

Metodologia Geofísica

As medidas magnéticas foram realizadas com magnetômetro de precessão de prótons, modelo GSM-19. Durante as medidas, o sensor do magnetômetro foi mantido a uma distância constante de 0,5m da superfície do terreno. A variação diurna do campo magnético foi controlada através da ocupação periódica de uma estação de referência a intervalos de cinco minutos. O intervalo de amostragem ao longo dos perfis de medida foi de 1 m, controlado por uma trena estendida no solo.

As medidas com o GPR foram realizadas com antenas de 100 MHz, utilizando-se o instrumento RAMAC2. A coleta dos dados foi feita de modo discreto a intervalos de 10 cm (as antenas foram mantidas em repouso sobre o terreno enquanto a fonte era acionada para a coleta de cada traço do registro). Uma trena colocada sobre o terreno foi usada para controlar o intervalo de amostragem. A localização dos perfis de medida foi determinada a partir da análise preliminar dos dados magnéticos.

Levantamento em Trancoso

Medidas Magnéticas

As medidas magnéticas realizadas na área do Quadrado foram tomadas a intervalos de 1 m, sobre 24 perfis espaçados de 2 m e orientados segundo a direção N7°E. Os perfis foram numerados de 70 a 116 (70, 72, 74, ..., 116) e sua numeração coincide com a distância (em metros) de cada perfil à base do atual cruzeiro localizado na frente da igreja.

Os dados magnéticos coletados na área em frente à Igreja de São João estão representados no mapa de isovalores mostrado na Figura 1.

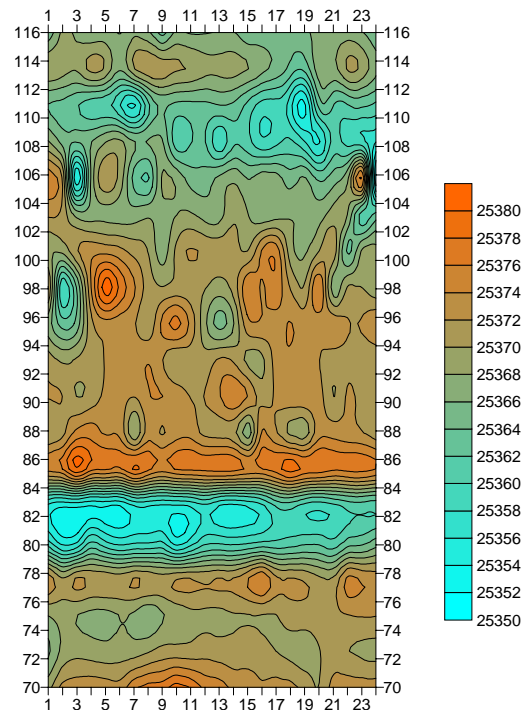


Figura 1 – Mapa magnético na área em frente à igreja da Praça de São João, em Trancoso.

Levantamento Geofísico para Arqueologia em Trancoso

Os contornos de isovalores, mostrados no mapa da Figura 1, permitem identificarem-se 3 regiões com características magnéticas distintas: A primeira região encontra-se na parte inferior do mapa e está limitada pelos perfis 70 e 88. Essa região caracteriza-se pelo alinhamento dos contornos de isovalores na mesma direção dos perfis e por apresentar um forte gradiente magnético entre os perfis 78 e 80 e entre os perfis 82 e 86. A segunda região localiza-se na parte central do mapa, entre os perfis 88 e 102 e caracteriza-se pelo alinhamento dos contornos de isovalores na direção perpendicular à direção dos perfis. A terceira região ocorre na parte superior do mapa, entre os perfis 102 e 116, e caracteriza-se pelo alinhamento dos contornos na mesma direção dos perfis, mostrando um padrão semelhante ao da primeira região, porém sem os fortes gradientes.

Uma das anomalias magnéticas mais marcantes, evidenciada no mapa, está localizada dentro da primeira região acima descrita: é a anomalia alongada, de fortes gradientes magnéticos, limitada pelos perfis 78 e 88. Essa anomalia apresenta a mais alta variação magnética (30 nT) observada nas medidas realizadas na área da frente da igreja. Os fortes gradientes associados à anomalia sugerem a existência de um contato abrupto entre materiais com características magnéticas diferentes e podem ser devido a um bloco de material estranho ao ambiente natural, que se estende ao longo dos 24 m dos perfis, que lá foi enterrado.

Dentro da segunda região magnética descrita, entre os perfis 88 e 102, há uma série de anomalias arredondadas que incluem valores altos e baixos. Essas anomalias podem ser devidas ao enterramento de objetos isolados de pequenas dimensões.

Na terceira região magnética, a anomalia evidenciada entre os perfis 108 e 114 apresenta um padrão em que a amplitude dos valores baixos é maior do que a amplitude dos valores altos. Essa anomalia não é contínua ao longo de toda a extensão dos perfis (observem-se as interrupções na posição das estações 9 e 21), aparece deslocada e sua largura é variável. Esse padrão sugere uma fonte de anomalia alongada na direção dos perfis com descontinuidades ou variação na sua profundidade. O alargamento da anomalia que ocorre entre a posição das estações 17 e 20 pode ter sido causado por uma fonte transversal à direção dos perfis, o que parece ser também a causa da inflexão para baixo que a anomalia apresenta na posição da estação 24. Essa inflexão estende-se até o perfil 104, a partir do qual aparece nova inflexão, que coincide aproximadamente com a direção do norte magnético, até chegar ao perfil 98.

Medidas com GPR

Foram realizados 4 perfis de GPR na área do Quadrado em Trancoso (denominados 291, 292, 293 e 294). A direção e a localização dos perfis foi projetada de modo a passarem sobre as anomalias evidenciadas no levantamento magnético. A figura 2 mostra a localização dos perfis de GPR e sua relação com as anomalias magnéticas. Os perfis de GPR vêm representados nas Figuras 3 a 6.

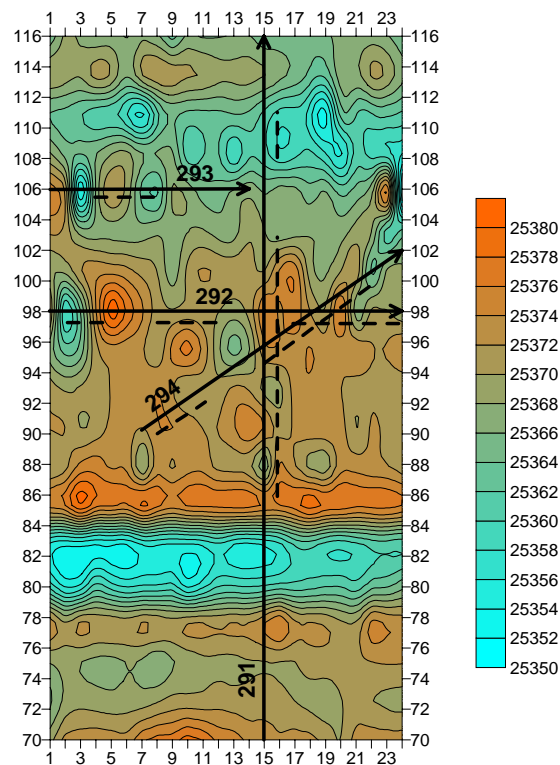


Figura 2 – Localização dos perfis GPR (linhas com setas) em relação às anomalias magnéticas. As linhas tracejadas representam a largura das anomalias evidenciadas com o GPR.

O perfil 291 (Figura 3) passa sobre diversas anomalias detectadas no levantamento magnético. Nesse perfil, entre as posições 5 e 10 m, há um ligeiro arqueamento com concavidade para baixo, que se estende entre as profundidades 1 e 4 m. O centro desse arqueamento (posição 8 m) coincide com o local onde se identificaram fortes gradientes magnéticos. Quando o perfil 291 de GPR foi projetado, esperava-se encontrar nessa região indícios que explicassem a causa dos fortes gradientes magnéticos. O perfil GPR, entretanto, não mostra nada característico que nos leve a identificar a causa dos gradientes magnéticos. Entre as posições 16 m e

Levantamento Geofísico para Arqueologia em Trancoso

32 m há uma série de feições anômalas nos registros de GPR, que podem ser relacionadas a materiais estranhos aos sedimentos naturalmente depositados. Todas essas feições anômalas, que incluem arqueamentos e interrupções na continuidade lateral dos registros, coincidem com anomalias magnéticas. Para melhor comparação, na Figura 2, as posições das anomalias do GPR foram desenhadas sobre o mapa de anomalias magnéticas. Entre as posições 38 m e 41 m pode-se observar outra anomalia no perfil 291. Também essa anomalia coincide com uma anomalia magnética, conforme é mostrado na Figura 2. Tanto o padrão da anomalia magnética, como o padrão da anomalia de GPR indica que nesse local pode estar enterrado um dos alicerces procurados neste levantamento.

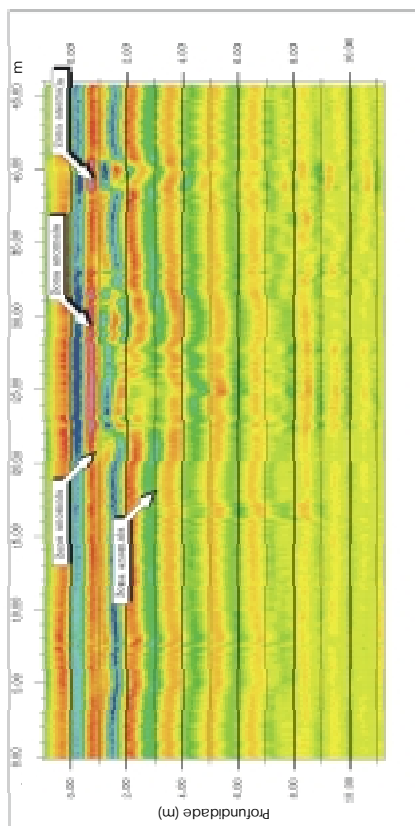


Figura 3 – Perfil 291.

O perfil 292 (Figura 4) foi realizado ao longo do perfil magnético 98. As anomalias evidenciadas neste perfil GPR ocorrem sobre ou às proximidades de anomalias magnéticas, conforme se pode observar na Figura 2. As anomalias de GPR são caracterizadas pelos seguintes padrões: (a) Entre as posições 2 e 4 m e profundidade de 0,5 m há um arqueamento pequeno com concavidade voltada para cima e, a partir da

profundidade de 1 m, um arqueamento com concavidade voltada para baixo. Entre os dois arqueamentos ocorre uma inversão de polaridade no registro (caracterizado por mudança na cor). O arqueamento voltado para cima é um padrão característico de vazio (buraco preenchido com ar) na subsuperfície; (b) Entre as posições 7 e 11 m e as profundidades 0,5 e 1 m ocorre uma interrupção na continuidade lateral do registro; (c) Entre as posições 15 e 23 m e a partir da profundidade 1 m aparece um arqueamento suave com concavidade voltada para baixo, cuja extremidade direita é caracterizada por uma descontinuidade lateral no registro. Esse arqueamento torna-se mais acentuado com o aumento da profundidade, terminando por volta dos 6 m de profundidade. Essa feição anômala pode ser devida a alguma perturbação no subsolo causada por enterramento ou colocação de estrutura pesada às proximidades da superfície do terreno.

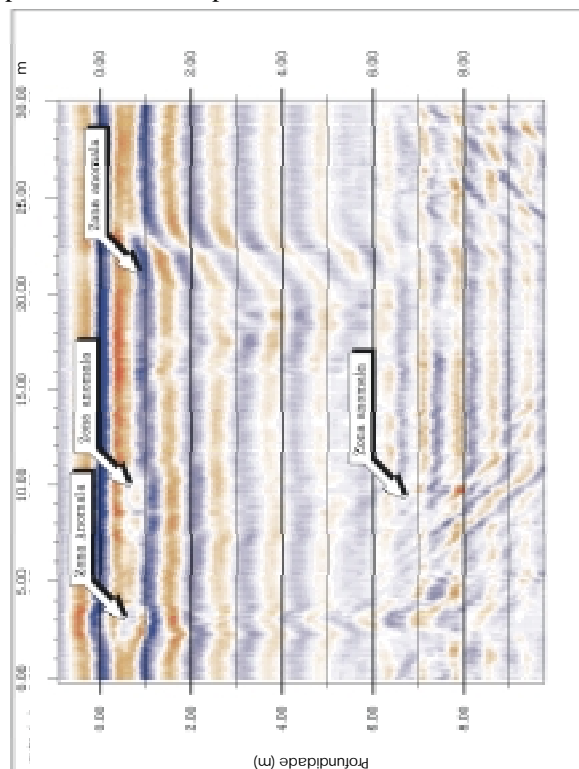


Figura 4 – Perfil 292.

O perfil 293 (Figura 5), realizado sobre o perfil magnético 106, mostra uma zona anômala à profundidade entre 0,5 m e 1 m. A zona anômala é caracterizada por uma feição com arqueamentos suaves com concavidade voltada para cima até a profundidade de cerca de 0,8 m e concavidade para baixo a partir da profundidade de 1 m. A concavidade voltada para cima pode ter sido provocada por vazios

Levantamento Geofísico para Arqueologia em Trancoso

na subsuperfície. Esta anomalia ocorre no mesmo local onde foram observadas anomalias magnéticas (Figura 2).

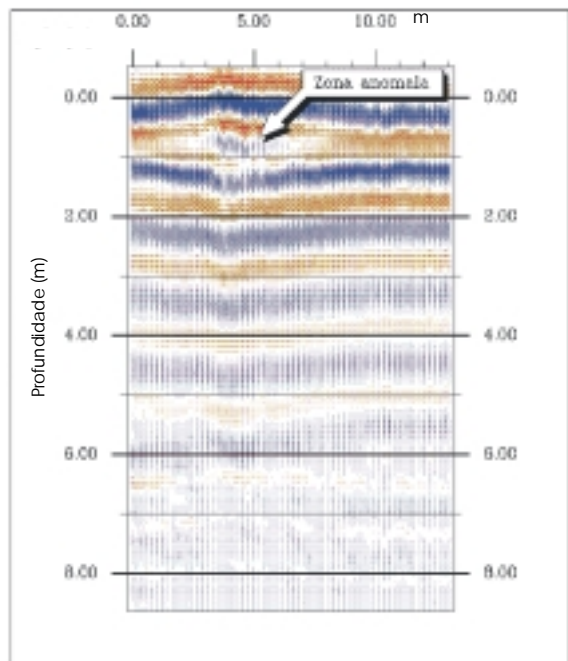


Figura 5 – Perfil 293.

O perfil 294 (Figura 6) cruza os perfis de GPR 291 e 292 e evidencia anomalias nas mesmas posições que aqueles perfis. Observe-se, por exemplo, que o padrão anômalo que ocorre entre as posições 9 e 20 m é semelhante ao padrão mostrado entre as posições 15 e 23 m do perfil 292. As anomalias evidenciadas no perfil 294 têm correspondentes anomalias magnéticas conforme mostra a Figura 2.

As anomalias evidenciadas com o GPR nos perfis 291, 292 (entre as posições 15 e 23 m) e 294 (entre as posições 9 e 20 m) ocorrem onde há no terreno uma pequena elevação, feição que serve de guia na prospecção arqueológica.

Conclusões sobre o Levantamento em Trancoso

O levantamento magnético realizado na área em frente à Igreja da Praça de São João evidenciou diversas anomalias. Com base no mapa magnético foi possível separar três regiões com características magnéticas distintas, que podem ter algum significado arqueológico.

A maioria das anomalias magnéticas evidenciadas na área da frente da igreja foi investigada com perfis de GPR, que mostraram diversas feições anômalas correlacionáveis às

anomalias magnéticas. À exceção da anomalia de fortes gradientes magnéticos que se desenvolve na parte inferior da área investigada, todas as outras anomalias magnéticas têm anomalias expressivas correspondentes no GPR. Isso pode ser observado no mapa da Figura 2.

Recomenda-se que as anomalias magnéticas que mostraram correlação com anomalias do GPR sejam investigadas por sondagens com profundidades de pelo menos 1 m. Principalmente aquelas que ocorrem na região do mapa magnético compreendida entre os perfis 90 e 110 e entre as estações 15 e 24, pois aí se encontra uma pequena elevação no terreno (que é uma feição guia na prospecção arqueológica). Dessa região, parece muito importante a parte compreendida entre os perfis magnéticos 108 e 110, que tem um padrão magnético alongado na direção dos perfis e mostrou uma feição anômala com o GPR que pode ser devida a alicerces. É recomendado que essa seja a primeira anomalia a ser investigada.

Uma sondagem e, se possível, uma trincheira transversal à direção dos perfis, deve também ser programada para investigar a causa da anomalia magnética caracterizada por fortes gradientes magnéticos que ocorre na parte inferior do mapa magnético da área em frente da igreja (entre os perfis 78 e 88). Logo após a detecção dessa anomalia pensou-se que sua causa seria alicerces dispostos paralelos aos perfis magnéticos. Isso não foi, entretanto, comprovado pelo perfil 291 de GPR que corta a anomalia.

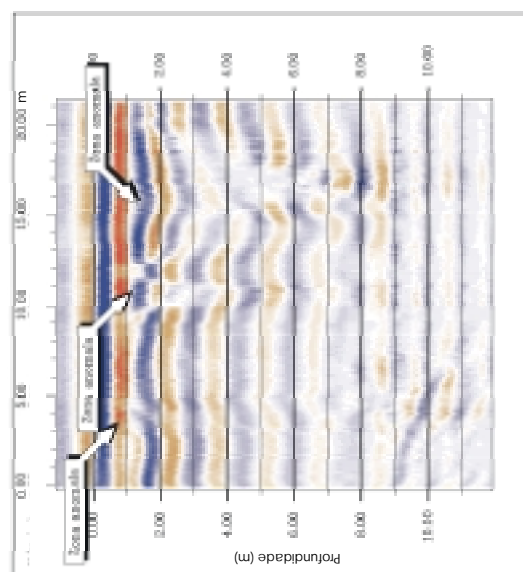


Figura 6 – Perfil 294.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao IPHAN pelo financiamento do levantamento.



Levantamento Geofísico para Arqueologia no Outeiro do Glória, Porto Seguro-BA

José Gouvêa Luiz, Departamento de Geofísica/UFPA, gouvea@ufpa.br

João Augusto Barradas, CEFET/PA, jbarradas@jbarradas.com

Cássia Boaventura, IPHAN/Porto Seguro-BA, iphan.portoseguro@portonet.com.br

Resumo

Medidas geofísicas com os métodos magnético e georadar (GPR) foram realizadas na área denominada Outeiro do Glória, localizada na sede do município de Porto Seguro, com o objetivo de encontrar vestígios dos alicerces da primeira igreja católica construída no Brasil. Os resultados do levantamento geofísico indicaram uma série de anomalias magnéticas que são associadas a padrões anômalos nos registros de GPR. As indicações fornecidas pelo levantamento geofísico permitiram redirecionar o programa de escavações arqueológicas, iniciado antes das medidas geofísicas e que ainda não havia detectado vestígios dos alicerces procurados. As medidas geofísicas sugerem, também, que, apesar da grande resolução do método GPR, seu uso isolado pode não fornecer resultados satisfatórios para a pesquisa arqueológica, porém, quando combinado com o método magnético, seus resultados passam a ser muito mais significativos.

Introdução

No município de Porto Seguro, localizado no sul do Estado da Bahia, e nos municípios vizinhos, de acordo com a história, encontram-se registros arqueológicos relacionados à descoberta do Brasil e à colonização portuguesa que se seguiu. No período 1999-2000, a região foi alvo inúmeras pesquisas arqueológicas, com a finalidade de mapear e resgatar a história do descobrimento, visando a comemoração dos seus 500 anos em abril de 2000. Diversas frentes de pesquisa arqueológica, usando o método invasivo convencional da escavação, foram então mobilizadas. Paralelamente, o IPHAN solicitou um levantamento geofísico, que usa técnicas não invasivas, para ser realizado na Vila de Trancoso, município de Porto Seguro, em uma área onde não seriam feitas escavações. Após a coleta de dados em Trancoso, foi acertado um levantamento geofísico adicional para ser realizado na área denominada Outeiro do Glória, localizada na sede do município de Porto Seguro. Nessa área, já haviam iniciado escavações de trincheiras e nenhum vestígio arqueológico importante havia sido encontrado.

Este trabalho trata do levantamento geofísico realizado no Outeiro do Glória. O objetivo era localizar vestígios dos alicerces da primeira igreja católica construída no Brasil no Século XVI. As medidas geofísicas foram realizadas com os métodos magnético e do georadar (GPR).

Metodologia Geofísica

As medidas magnéticas foram realizadas com magnetômetro de precessão de prótons, modelo GSM-19. Durante as medidas, o sensor do magnetômetro foi mantido a uma distância constante de 0,5m da superfície do terreno. A variação diurna do campo magnético foi controlada através da ocupação periódica de uma estação de referência a intervalos de cinco minutos. O intervalo de amostragem ao longo dos perfis de medida foi de 1 m, controlado por uma trena estendida no solo.

As medidas com o GPR foram realizadas com antenas de 100 MHz, utilizando-se o instrumento RAMAC2. A coleta dos dados foi feita de modo discreto a intervalos de 10 cm. Uma trena colocada sobre o terreno foi usada para controlar o intervalo de amostragem. A localização dos perfis de medida foi determinada a partir da análise preliminar dos dados magnéticos e de informações obtidas de arqueólogos.

Levantamento no Outeiro do Glória

Medidas Magnéticas

O levantamento consistiu de medidas, a intervalos de 1 m, sobre 24 perfis orientados segundo a direção N15E e espaçados de 1 m. Os perfis foram numerados de zero a 23, com o perfil zero distando 10 m da borda interna da trincheira oeste escavada na pesquisa arqueológica e o perfil 23 distando 33 m da referida trincheira. A Figura 1 mostra a área do levantamento magnético e o posicionamento das trincheiras da pesquisa arqueológica na época do levantamento geofísico.

As medidas magnéticas estão representadas no mapa de isovalores mostrado na Figura 2. Esse mapa evidencia três padrões magnéticos: o primeiro deles ocorre entre os perfis 18 e 23 e é caracterizado por linhas de contorno alongadas na direção dos perfis. O segundo padrão pode ser observado entre os perfis 10 e 18 e tem como característica a presença de anomalias arredondadas e ovais, principalmente na região entre as estações -13 e -20 (próximo à letra B no mapa) onde os contornos também são alongados mas em direções transversais à direção dos perfis. Observa-se que esse padrão anômalo estende-se até à região do primeiro padrão magnético, próxima à letra C no mapa. Finalmente, o terceiro padrão aparece entre os perfis zero e 10 e é caracterizado por ter os maiores valores do campo magnético e variações

Levantamento Geofísico no Outeiro do Glória

magnéticas mais suaves (observe que a distância entre as linhas de contorno é maior nessa região) do que nas regiões onde ocorrem os outros 2 padrões.

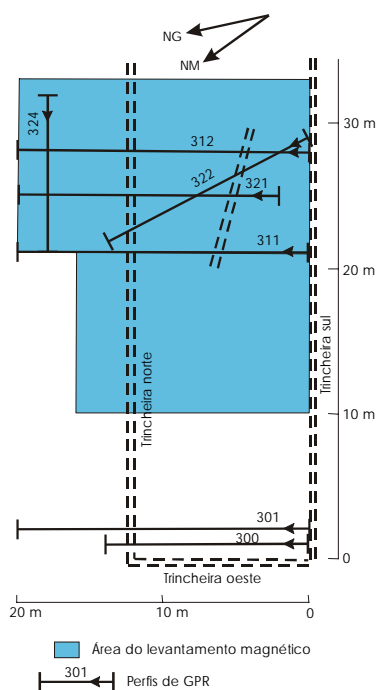


Figura 1 – Mapa de localização do levantamento geofísico no Outeiro do Glória, Porto Seguro - BA.

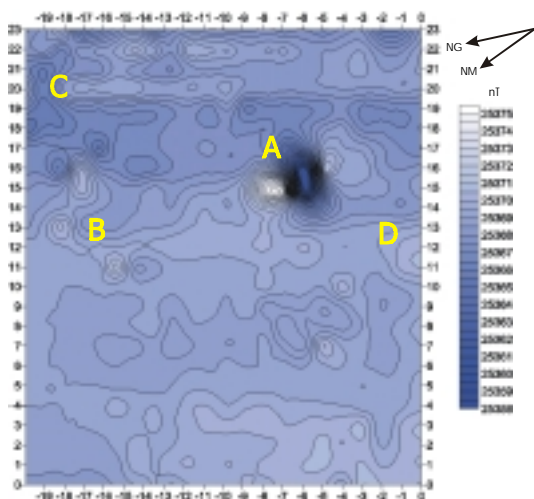


Figura 2 – Mapa magnético do Outeiro do Glória.

Os diferentes padrões magnéticos podem estar relacionados a diferentes tipos litológicos, que podem ser tanto naturais como artificiais (aterro, revolvimento do terreno, enterramento de objetos).

Observa-se ainda no mapa, próximo à letra A, uma anomalia marcante com amplitude de 21 nT. Essa anomalia é caracterizada por um alto magnético, um baixo magnético e outro alto magnético, alinhados com a direção do Norte Magnético (NM). A coincidência desse padrão anômalo com a direção do NM sugere que a sua magnetização é induzida pelo atual campo magnético terrestre e deve ser devida a algum material recentemente enterrado no terreno.

Medidas com GPR

Foram realizados 7 perfis de GPR na área do Outeiro do Glória, sendo 5 perfis (denominados 311, 312, 321, 322 e 324) sobre a área do levantamento magnético (para investigar as anomalias magnéticas) e 2 perfis (300 e 301) fora da área do levantamento magnético, porém na área limitada pelas trincheiras da exploração arqueológica. A figura 1 mostra a localização dos 7 perfis de GPR realizados na área da exploração arqueológica. A posição dos perfis de GPR em relação às anomalias detectadas pelo levantamento magnético está representada na Figura 3. Na representação mostrada nas Figuras 1 e 3, a seta colocada nos perfis de GPR indica o sentido da coleta dos dados.

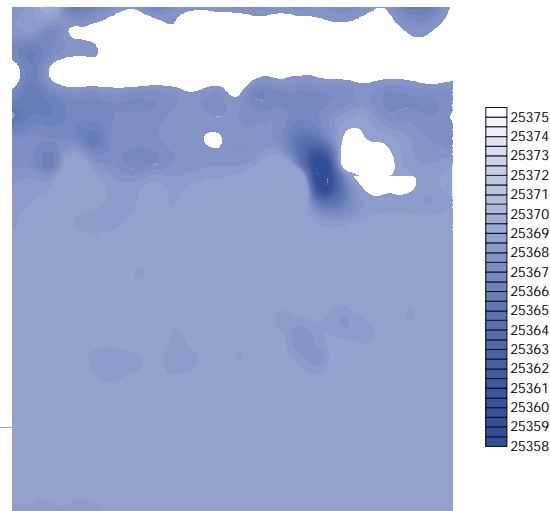


Figura 3 – Mapa de localização dos perfis GPR em relação às anomalias magnéticas.

Os perfis de GPR mostram basicamente três feições anômalas que podem ser consideradas importantes por correlacionarem-se com anomalias evidenciadas no levantamento magnético. Duas dessas feições aparecem próximo à extremidade final dos perfis 311 (Figura 4) e 324 (Figura 5) e

Levantamento Geofísico no Outeiro do Glória

correlacionam-se com as anomalias magnéticas que ocorrem às proximidades da letra B no mapa magnético (Figuras 2 e 3). Essas feições ocorrem entre as posições 14 m e 16 m no perfil 311 e entre as posições 7 m e 9 m no perfil 324, e são similares nos dois perfis. Elas mostram um padrão arqueado com convexidade voltada para a superfície do terreno. A mesma feição anômala do perfil 311 foi parcialmente captada no final do perfil 322 (Figura 6), onde apenas um dos flancos do arqueamento está presente.

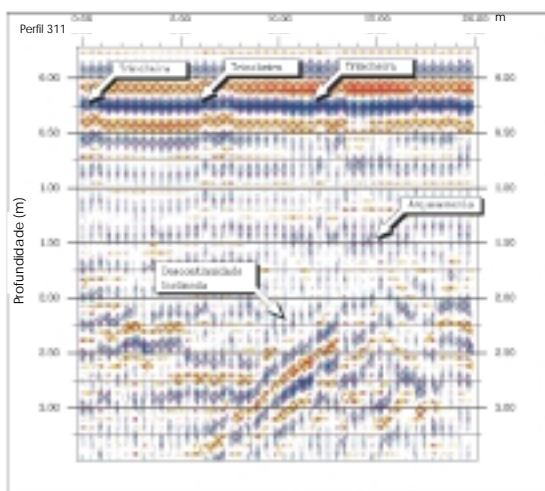


Figura 4 – Perfil 311.

O perfil 311 apresenta ainda a terceira feição anômala, que está localizada entre as posições 0 e 2 m. Essa feição, que também é arqueada com convexidade apontando para cima, pode ser correlacionada à anomalia magnética localizada próximo à letra D nos mapas das Figuras 2 e 3.

Todas as três feições anômalas descritas nos perfis 311, 322 e 324 ocorrem em profundidades maiores do que 1,5 m.

Os perfis 322 (Figura 6) e 321 (Figura 7) cortam a zona onde se localiza a mais forte anomalia magnética evidenciada na área do levantamento (anomalia próxima à letra A no mapa da Figura 3), mas não mostram nenhum padrão anômalo que possa ser correlacionado à anomalia magnética. Uma trincheira interna, que corta a área em diagonal, está localizada próximo à anomalia magnética e produz ruído nos registros de GPR. Isso que pode ter encoberto as reflexões causadas pela fonte da anomalia magnética.

Em todos os perfis de GPR realizados no Outeiro do Glória, a partir da profundidade 1,5 m desenvolve-se um padrão de reflexões não uniforme, que contrasta com o padrão de acumamento horizontal contínuo que ocorre em profundidades

menores. Essa mudança de padrão provavelmente significa variação litológica (talvez a passagem de material de granulação mais fina para material de granulação mais grosseira).

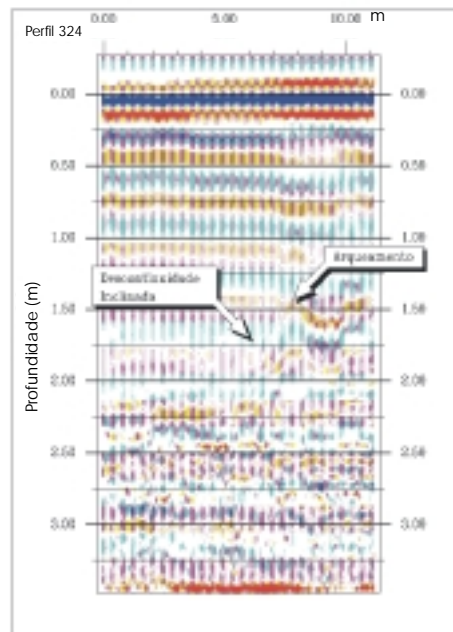


Figura 5 – Perfil 324.

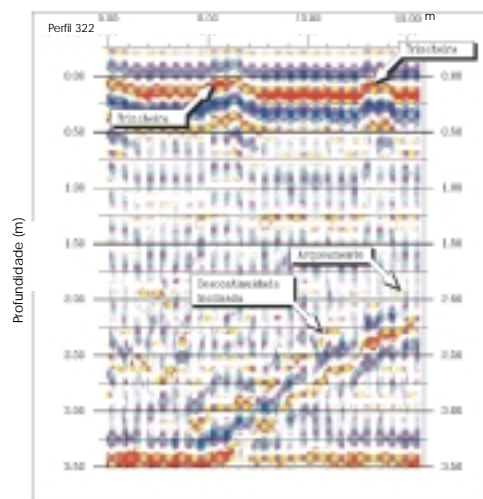


Figura 6 – Perfil 322.

Os perfis 300 e 301, realizados fora da área do levantamento magnético, mas dentro da área da exploração arqueológica limitada pelas trincheiras, não evidenciaram nenhuma feição anômala importante.

Levantamento Geofísico no Outeiro do Glória

As trincheiras da exploração arqueológica produziram nos perfis de GPR um padrão com dois arcos de convexidade para cima, que inicia na profundidade zero e se repete nas profundidades maiores. Essas feições aparecem destacadas nos perfis.

Conclusões

O levantamento magnético realizado no Outeiro do Glória mostrou diversas anomalias, sendo a maioria delas de pequena amplitude. A mais forte anomalia (destacada com a letra A nos mapas das Figura 2 e 3) apresenta características de magnetização induzida e provavelmente é devida a material recente enterrado no subsolo. O perfil 322 de GPR que corta essa anomalia (Figura 3) não evidenciou nenhum padrão anômalo, talvez devido à interferência provocada por difrações e reflexões da onda do GPR na trincheira localizada próximo. Uma sondagem que atinja mais de 1,5 m de profundidade, realizada sobre a zona anômala, poderá esclarecer a causa da anomalia magnética.

As outras anomalias magnéticas (destacadas com as letras B, C e D nos mapas das Figuras 2 e 3) são recomendadas para investigação por sondagem pois elas correlacionam-se com feições anômalas mostradas pelo GPR. As sondagens devem ir além de 1,5 m de profundidade.

Os resultados alcançados sugerem que o uso isolado do método GPR, apesar da sua alta resolução, pode não fornecer resultados satisfatórios na pesquisa arqueológica. Porém, quando combinado com o método magnético, seus resultados tornam-se muito significativos.

Agradecimentos

Os autores são gratos ao Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) pelo financiamento da pesquisa.

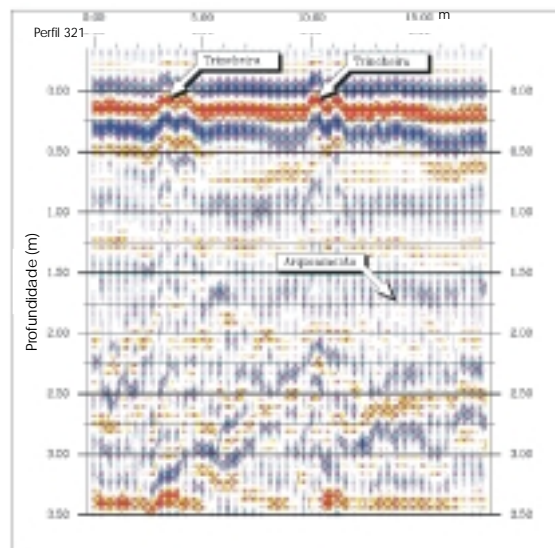


Figura 7 – Perfil 321.



Processamento de dados de GPR como uma etapa imprescindível para obtenção de boas imagens sobre solos condutivos: um exemplo associado a localização de dutos.

Pedro Xavier Neto^{1, 2}, e-mail: pedroxavier@petrobras.com.br

Josibel Gomes de Oliveira Jr²,

Walter Eugênio de Medeiros^{2,3}, e-mail: walter@dfte.ufrn.br

1- PETROBRAS/UN-RNCE/ATEX/PS, Natal, RN.

2- Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica – PPGG/UFRN, Natal, RN.

3- Depto. de Física – UFRN, Natal, RN.

Resumo

O Radar Penetrante no Solo (GPR) é uma ferramenta importante para avaliação de problemas em engenharia, meio ambiente e geologia. A qualidade do imageamento com GPR depende tanto da boa parametrização do levantamento quanto das características do solo. Ambientes com solos resistivos são bons para utilização do GPR enquanto solos condutivos, em geral, comprometem a qualidade do imageamento, pois acarretam forte atenuação no sinal. A fim de corrigir este efeito, faz-se necessário submeter os dados a um tratamento adequado.

Uma expressiva melhoria da qualidade da imagem através de processamento é mostrada neste trabalho, tomando como exemplo um problema de localização de dutos enterrados em solos derivados de rocha calcária. O processamento constou das etapas de: remoção do pulso acoplado, correção para *offset* zero, correção estática, subtração da média entre traços, recuperação das amplitudes, deconvolução *spike*, ajuste das hipérbolas, migração *Stolt*, análise espectral, filtragem de frequência e AGC.

Antes do processamento, a seção bruta permite identificar apenas a localização horizontal dos dutos; após o processamento, foi possível separar os dutos em profundidade. O processamento permitiu também imagear os contatos entre as camadas geológicas da área.

Introdução

Dentre os métodos geofísicos de investigação rasa, o GPR vem se destacando pela boa relação custo/benefício, materializada na resolução que o método oferece e na rapidez da aquisição dos dados. A vocação de uso do GPR está intrinsecamente relacionada ao ambiente no qual o método foi desenvolvido. O GPR foi originalmente projetado para localizar alvos soterrados no gelo, um meio altamente resistivo, portanto, favorável à propagação das ondas eletromagnéticas.

Os bons resultados desses primeiros trabalhos estimularam outros usos do GPR, tais como, mapeamento do nível estático, medidas de atributos elétricos do meio, identificação de plumas de contaminação, localização de fraturas em maciços rochosos, etc. A maior parte desses estudos

foi realizada a partir da década de 70, para instituições como *Geological Survey of Canada* e *U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL)* (Olhoeft, 2000a), em regiões de clima temperado, cujos solos apresentam baixa condutividade elétrica, portanto, muito propícios à utilização do GPR.

Durante boa parte da evolução do GPR, os resultados obtidos dos levantamentos foram utilizados sem nenhum tipo de processamento mais elaborado, uma vez que a alta resolução e a qualidade do imageamento já atendiam aos objetivos dos estudos, e os alvos podiam ser razoavelmente bem identificados, mesmo em seções brutas, (Olhoeft, 2000b). Porém essa facilidade depende diretamente da existência de atributos elétricos favoráveis no solo, notadamente da existência de meios onde ocorre baixa perda de energia eletromagnética, favorecendo a propagação do sinal e permitindo um imageamento satisfatório.

As condições acima descritas são facilmente satisfeitas em regiões de clima temperado, onde os solos normalmente estão permanentemente congelados - *permafrost* - ou possuem baixo conteúdo de argila. O mesmo não acontece em regiões tropicais onde os solos em geral possuem maior conteúdo de argila, o que resulta no aumento da condutividade e numa atenuação e dispersão mais forte da onda eletromagnética. Nestas condições normalmente a qualidade da imagem bruta não oferece boas condições para uma análise expedita, sendo necessário, no mínimo, a utilização de ganhos para recuperar a amplitude do sinal. Porém, algumas vezes, somente a recuperação de amplitude não é suficiente para um diagnóstico mais abalizado, principalmente quando o que se pretende são informações quantitativas (tais como profundidade, espessura, diâmetro e volume). Para atender essas demandas torna-se necessário investir num processamento mais elaborado dos dados de GPR, de modo a compensar os efeitos de atenuação da onda eletromagnética representados pela absorção e dispersão. A absorção provoca uma diminuição do conteúdo de altas frequências, a medida em que o sinal se propaga na terra, enquanto que a dispersão provoca distorções na fase da onda, que também podem resultar em perda de amplitude (Bano, 1996).

GPR em solos condutivos: a necessidade de processamento

O problema da localização de dutos no Campo de Estreito - Bacia Potiguar/RN.

O Campo de Petróleo de Estreito foi descoberto na década de 80, e situa-se na porção centro-sul da Bacia Potiguar emersa (figura 01).

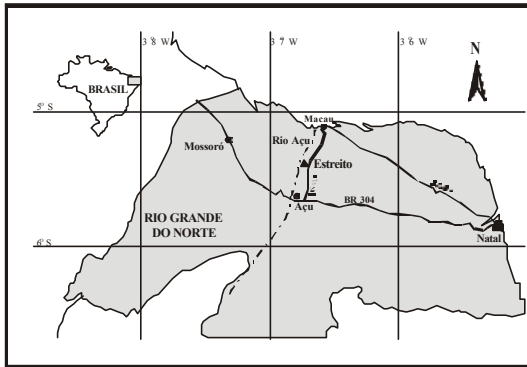


Figura 01 – Localização da área de estudo

O campo é cortado pelo Rio Açu, em cujas margens desenvolve-se intensa atividade agrícola, tanto de subsistência, em pequenas propriedades, como agroindustrial. A fruticultura irrigada e a exploração de petróleo são as principais atividades econômicas da área.

A drenagem do óleo produzido no campo se dá através de várias linhas de surgência que ligam os poços a duas estações coletoras principais, uma em cada margem do rio. A ligação entre as duas estações é feita através de um feixe de dutos, enterrados a profundidades entre 0.6 a 1.2 metros, com diâmetros que variam de 4 a 16 polegadas. Por questões de segurança tanto as linhas de surgência como os dutos de ligação entre as estações coletoras vêm sendo substituídos por elementos mais novos, a fim de prevenir vazamentos de óleo e danos ao meio ambiente. Contudo, neste ambiente de intensa atividade agrícola (envolvendo sucessivas aragens, revolvimento do solo, construção de estradas de acesso e currais para gado), dois problemas de aspectos conflitantes estão colocados: a localização precisa dos dutos foi perdida em um trecho de aproximadamente 1 km, ao mesmo tempo que trincheiras exploratórias não podiam ser escavadas, devido à grande dificuldade de conseguir permissão dos proprietários das terras. Para localizar os dutos neste trecho, optou-se então por usar o GPR, mesmo havendo consciência de uma possível performance baixa devido à alta condutividade dos solos, que mantêm-se quase sempre úmidos devido

à utilização de irrigação nas propriedades que margeiam o rio Açu.

Foram levantadas 13 linhas de GPR com sistema SIR 2 da GSSI (*Geophysical Survey System Inc.*) em três dias de operações de campo, cujos procedimentos e resultados, fortemente dependentes de processamento, são descritos a seguir.

Contextualização geológica

A principal unidade geológica, que subaflore em boa parte da área, é a Formação Jandaíra constituída predominantemente por um calcário de idade cretácea recoberto por um solo argiloso, pouco espesso, caracterizado no Projeto RADAMBRASIL (1981) como cambissolo eutrófico. Este solo provém da decomposição do calcário, contém bastante argila e é localmente conhecido como massapê. Ao longo das margens do Rio Açu ocorrem sedimentos quaternários que formam sua planície de inundação, recobrendo em faixas estreitas o solo de alteração do calcário.

Aquisição dos dados de GPR

Foram realizados testes preliminares com as antenas de 200 e 400 MHz, optando-se pela frequência de 200 MHz, com base numa análise visual das seções brutas no campo. O instrumento foi calibrado para efetuar leituras a cada 5 cm, com *range* de 150 ns e razão de amostragem de 0,293 amostra/ns (totalizando 512 amostras por traço).

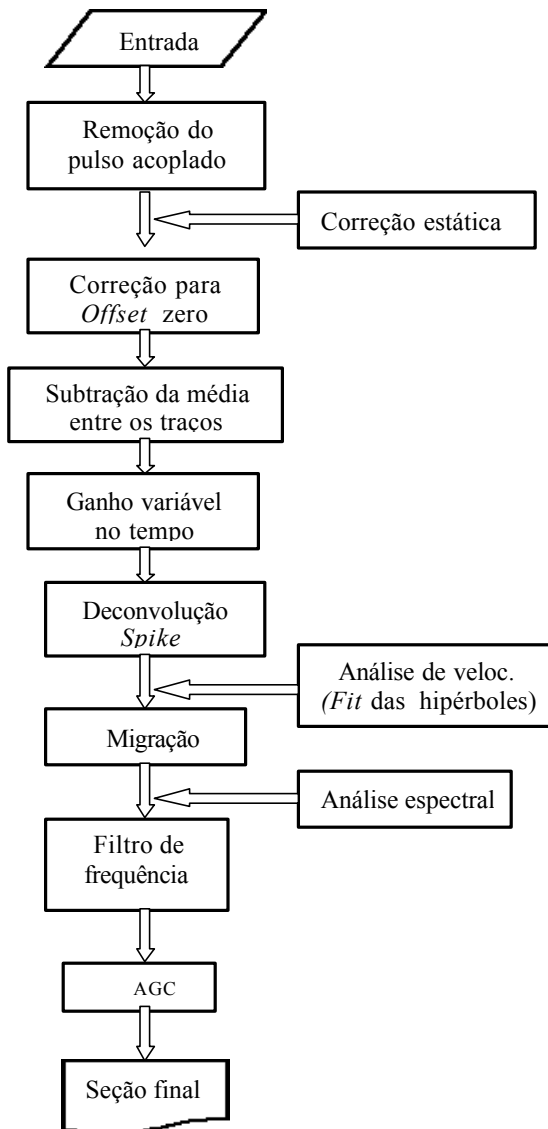
As linhas de GPR foram dispostas ortogonalmente em relação à direção esperada para os dutos. Por vezes, foi necessário repetir a linha, mudando a direção, de modo a ajustar esta ortogonalidade. Neste ajuste fez-se uso da característica de polarização da onda eletromagnética, que faz com que a amplitude dos eventos refletidos seja máxima quando as antenas são dispostas a 90 graus da seção circular dos dutos, o que se traduz numa melhor definição das hipérbolas geradas pelo espalhamento da energia ao refletir nos dutos (Radzevicius e Daniels, 2000). No levantamento, foram usados filtros e ganhos sugeridos pelo próprio sistema de aquisição, em função do comprimento do pulso, *do range* e da razão de amostragem escolhida. Um exemplo de seção bruta está mostrado na figura 2 (200 MHz).

Da análise desta seção, pode-se inferir (com alguma dificuldade) apenas a localização horizontal dos dutos. Contudo, informações sobre profundidade e diâmetro dos dutos não podem ser extraídas.

GPR em solos condutivos: a necessidade de processamento

Processamento dos dados

Os dutos estavam a profundidades menores do que 2 m, por isso os processos aplicados aos dados buscaram atenuar os efeitos deletérios que obliteram as reflexões mais rasas. O processamento foi feito seguindo o seguinte fluxo:



Análise e interpretação dos resultados

Após o tratamento inicial de dessaturação do pulso acoplado, correção para *offset* zero, correção estática, subtração da média dos traços,

recuperação de amplitudes, e deconvolução, obteve-se a secção mostrada na figura 3. Nota-se que as difrações aparecem melhor definidas do que na secção bruta, sendo possível efetuar o ajuste das

hipérbolas mais facilmente. A figura 4, mostra a secção migrada. Nota-se que houve uma reconcentração de energia e o colapso das difrações, formando imagens aproximadamente circulares que identificam precisamente o posicionamento horizontal e vertical dos dutos.

Uma observação interessante é que não foi possível ajustar a hipérbole correspondente ao duto que ocorre entre as posições 3 e 4 metros, como mostra a secção da figura 03, provavelmente devido à presença de heterogeneidades do meio.

Entretanto, após a migração, foi possível identificar claramente este duto, conforme mostra a secção da figura 4. Além disso, a secção processada final permite também determinar o topo do calcário Jandaíra que pode ser posicionado em torno da profundidade de 2,4 m.

Conclusões

O uso do GPR em regiões tropicais, que apresentam solos relativamente mais condutivos que as regiões temperadas, pode requerer processamento como uma etapa fundamental para o sucesso da interpretação. Utilizando técnicas adequadas de processamento, similar às utilizadas em dados sísmicos, é possível viabilizar a utilização do GPR em situações onde as características elétricas do meio desaconselham, num primeiro instante, o seu uso.

Referências bibliográficas

- Bano, M. 1996. Constant dielectric losses of ground-penetrating radar waves. *Geophys. J. Int.*, 134, pp. 279-288
- Brasil. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. Projeto RADAMBRASIL. Folhas SB 24/25 Jaguaribe/Natal; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1981, 744 p.
- Olhoeft, G.R. 2000a. Disponível na internet : <http://www.g-p-r/introduc.htm>
- Olhoeft, G.R. 2000b. Maximizing the information return from ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics* 43, 175-187.
- Radzevicius, S. J. e Daniels, J. J., 2000. Ground penetrating radar polarization and Scattering from cylinders. *Journal of Applied Geophysics* 45, 111-125.

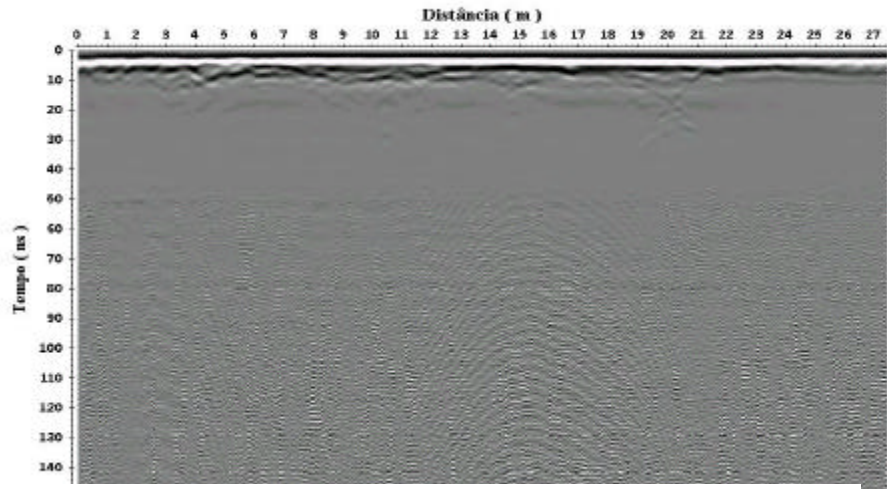


Figura 02 – Secção bruta

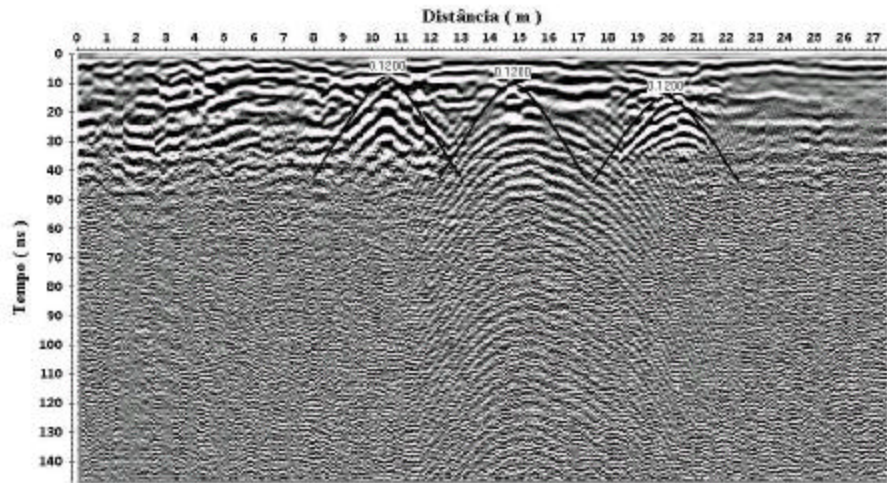


Figura 03 – Secção após desaturação, correção estática, ganho, deconvolução e análise de velocidades por *fit* de hipérboles

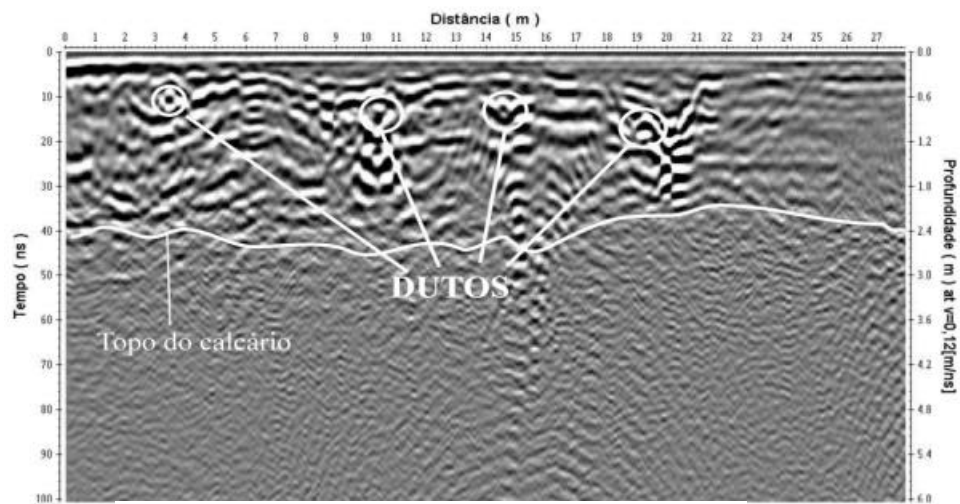


Figura 04 – Secção final migrada



Processamento de dados GPR utilizando métodos da sismica de reflexão

Marcus V. F. Popini, Milton J. Porsani e Jorge L. Porsani

CPRM/CPGG-UFBA/IAG-USP

Abstract

In this paper we have applied some filtering techniques, commonly used in the seismic data processing, to the Ground Penetrating Radar data. Particular emphasis was set to the deconvolution approach to improve time resolution. The conventional Wiener-Levinson filtering results, which work based on L_2 norm, was compared with the deconvolution performed using an interactive approach based on L_p norm. The additional sequence of processing was performed using the SU-CWP software. A section of GPR data was used for comparisons purpose. The numerical results shows the effectiveness of L_1 norm to improve the vertical resolution and the spatial continuity of the reflected events.

Introdução

O GPR (*Ground Penetrating Radar*, ou radar de penetração no solo) é uma técnica de imageamento de subsuperfície na qual ondas eletromagnéticas, geradas através de impulsos, são emitidas por uma fonte na superfície; refletidas nas descontinuidades do subsolo (camadas, rochas, estruturas), e detectadas por uma antena receptora posicionada também na superfície. Trata-se, portanto, de uma técnica similar ao método da sismica de reflexão. O pulso eletromagnético tem velocidade de propagação controlada apenas pelas propriedades dielétricas dos materiais. Muito embora o comportamento dinâmico (atenuação da amplitude e dispersão) dos métodos sísmico e de radar seja diferente, o comportamento cinemático (tempo de propagação do pulso) é igual e, assim sendo, muitas das etapas do processamento sísmico podem ser aplicadas ao processamento de dados de radar. Entre essas etapas, a técnica da deconvolução pode ser útil para realçar determinadas feições dos radargramas.

Deconvolução

Basicamente, a deconvolução é o processo que visa aumentar a resolução temporal dos dados através da compressão do pulso que acompanha as reflexões. O contraste das propriedades elétricas (permissividade elétrica e condutividade) entre camadas adjacentes do subsolo causa as reflexões que são registradas ao longo do levantamento em superfície. Logo, o radargrama registrado pode ser modelado como uma con-

volução da resposta impulsiva da Terra com o pulso do radar. A resposta impulsiva da Terra é o que seria registrado se o pulso fosse um impulso. Assim, o modelo convolucional de um radargrama pode ser matematicamente descrito pela equação:

$$x_t = p_t * e_t + \eta_t, \quad (1)$$

onde: x_t é o radargrama registrado - traço do radar; p_t é o pulso básico (considerado invariante no tempo); e_t é a função refletividade ou resposta impulsiva da Terra; η_t são os ruídos diversos (aleatórios e/ou aditivos); * significa convolução.

O método de deconvolução pode ser descrito em termos de filtros lineares, que são calculados com base na solução de sistemas lineares de equações. A deconvolução é considerada um problema de solução determinística quando a forma da onda da fonte é conhecida. Tal solução é dada pelo filtro inverso que, quando aplicado a um sismograma (ou radargrama), reproduz a resposta impulsiva da terra. Quando a forma da onda da fonte é desconhecida então a solução do problema da deconvolução é estatística, e o filtro de Wiener resulta em um método de deconvolução estatística (Yilmaz, 1987). Neste processo, estabelece-se um filtro h_t que convolvido com o traço sísmico x_t produzirá a função requerida. Quanto mais próximo de um impulso único for o pulso deconvolvido, melhor o filtro estimado representará o filtro inverso verdadeiro.

A norma L_2 (ou Euclidiana) utilizada no método convencional de deconvolução é insensível às diferentes características de fase dos pulsos, uma vez que os filtros de Wiener-Levinson só conseguem inverter pulsos de fase mínima. Esta restrição pode ser contornada pelo uso da norma L_p , como descrito a seguir.

Deconvolução iterativa com norma L_p

Segundo Treitel & Lines (1982 in: Carvalho, 1990) a deconvolução de dados sísmicos (e, por extrapolação, de radar) pode ser considerada um problema linear inverso no qual as observações são os valores em um traço sísmico e o modelo desejado, a resposta impulsiva do meio. As técnicas convencionais de mínimos quadrados, largamente usadas na deconvolução podem ser usadas para promover o ajuste dos parâmetros minimizando a norma L_2 , ou seja, a so-

ma dos quadrados dos desvios (diferenças entre as observações e as respostas do modelo). Esta abordagem é conveniente quando os desvios têm uma distribuição Gaussiana. Entretanto, em problemas que admitam grandes desvios pode ser mais conveniente minimizar a norma L_1 , ou soma dos valores absolutos dos desvios. Seguindo o procedimento proposto por Porsani et al. (2001), podemos definir a função-objetivo como segue:

$$Q(\mathbf{m}, \beta) = \sum_{t=0}^M \{f(\mathbf{m}, t)^\beta\}^2 \quad (2)$$

onde,

$$f(\mathbf{m}, t)^\beta = \{e_i^2\}^\beta, t = 0, \dots, M.$$

Quando β for igual a $\frac{1}{2}$, a equação anterior resultará igual à equação da função-objetivo para norma L_2 . Efetuando a expansão de Taylor de primeira ordem em torno do modelo \mathbf{m}_k e avaliando para valores discretos de t , obtem-se o sistema de equações associados aos erros linearizados,

$$\tilde{\mathbf{f}}_{\beta_k} = \mathbf{f}_{\beta_k} - \mathbf{F}_{\beta_k} \mathbf{X} \Delta \mathbf{m}_k, \quad (3)$$

\mathbf{F}_{β_k} é uma matriz diagonal cujos elementos na diagonal principal são dados por:

$$f_{jj} = -2\beta[e^2_j]^{\beta-1}e_j$$

A matriz \mathbf{X} é apresentada a seguir:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_0 & 0 & \dots & 0 \\ x_1 & x_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & x_M & \ddots & \ddots \\ 0 & 0 & x_M & x_{M-1} \\ 0 & 0 & 0 & x_M \end{bmatrix}$$

A equação (3) adiciona o parâmetro β no cálculo dos coeficientes do filtro permitindo que outras normas, além da convencional L_2 possam ser exploradas.

O sistema linear representado pela equação (3) pode ser resolvido para $\Delta \mathbf{m}_k$ com o método dos mínimos quadrados. O método é inicializado com o filtro de Wiener-Levinson, relacionado à norma L_2 . O filtro à iteração $k + 1$ é obtido a partir daquele à iteração k , através da equação:

$$\mathbf{m}_{k+1} = \mathbf{m}_k + \Delta \mathbf{m}_k. \quad (4)$$

Processamento

O dado utilizado neste trabalho corresponde a um perfil de GPR adquirido no Município de Descalvado (Mineração Jundu), em um terreno composto essencialmente por sedimentos arenosos das Formações Botucatu e Pirambóia. O perfil foi obtido

com um aparelho Ramac-Mala utilizando a técnica de reflexão simples (ou *step-mode*). A frequência central da antena foi de 100 MHz, o espaçamento entre os traços foi de 0,25 m, a extensão do perfil foi de 50 m (200 traços) e a profundidade aproximada atingida pelo radar foi de 30 m (baseada em uma velocidade de propagação da onda de radar de 0,12 m/ns).

O *software* utilizado no tratamento dos dados e geração das figuras foi o SU-CWP (Seismic Unix - Center of Wave Phenomena) da Colorado School of Mines, que é de distribuição gratuita, roda em ambiente Unix ou Linux, e permite uma ampla gama de variações nos parâmetros de processamento. Os dados foram gravados no formato *.dat* (*SEG-2*) e foram convertidos para o formato *.sgy* (*SEG-Y*) através de um programa escrito em linguagem C (Bennett, 1990). O passo seguinte foi adicionar um *header* aos dados e convertê-los para o formato *.su*, utilizando os comandos *suaddhead* e *sushw*. É importante observar que nos dados de sísmica a escala de tempo é dada em milisegundos e nos dados de GPR em nanossegundos. Isso deve ser levado em consideração ao selecionar-se o intervalo de amostragem (Δt). No radargrama em questão, cujo Δt é de 1,083 ns, utiliza-se como parâmetro *dt* do *sushw* o valor de 1083, e faz-se a correção do tempo na escala do plote ($\times 10^{-6}$ s). Ao escolher os parâmetros da aquisição no aparelho Ramac-Mala o valor de Δt não é selecionado diretamente, mas pode ser posteriormente calculado utilizando-se o parâmetro “frequência de amostragem” ($f_a = 1/\Delta t$). A seguir, o comando *sufilter* foi utilizado para aplicar um filtro passa-banda ao radargrama. O *range* de frequências a ser utilizado pode ser obtido plotando-se o espectro de frequências (comandos *sufft* e *suamp*). Após a aplicação de ganhos (*sugain*), foi gerado um arquivo para visualização e impressão com o comando *supswigp*.

Resultados obtidos

Para fazer a deconvolução do radargrama foi utilizado um programa escrito em linguagem Fortran, sendo que os resultados das etapas do processo são mostrados na figura 1. O filtro estimado no processo foi aplicado a toda a seção e modificado a cada iteração até aproximar-se de um filtro ótimo. Parâmetros tais como o número de iterações e o número de coeficientes do filtro foram testados e posteriormente definidos como 15 e 20, respectivamente. A título de comparação, foram utilizadas as normas L_2 e L_1 , e o resultado para um único traço é mostrado na figura 2. A análise dos espectros de frequências dos dados antes e após a deconvolução (figura) mostra que esse processo aumenta relativamente a amplitu-

de das frequências mais altas. A figura ?? mostra o resultado final da aplicação das etapas de processamento e deconvolução aqui testadas. Nessa figura, é possível observar que nas seções deconvolvidas, notadamente quando deconvolvida com norma L_1 , as reversões de polaridade na forma do pulso diminuem sensivelmente e a continuidade espacial dos refletores é aumentada. O refletor posicionado a aproximadamente 100 ns, que segundo informações de sondagens deve corresponder a um contato entre arenitos friáveis e arenitos compactos, é melhor definido na seção deconvolvida com norma L_1 . Da mesma forma, a hipérbole de difração cujo ápice está posicionado entre 35 e 40 m de distância e no tempo de 90 ns, que corresponde a um teto de caverna originada pelo colapso de alguns pacotes arenosos, também é melhor mapeada nas seções deconvolvidas.

Conclusões

Entre as vantagens do método GPR em relação a outros métodos geofísicos estão a praticidade na aquisição dos dados de campo e a alta resolução de tais dados. Somado a esses fatores, o processamento dos radargramas no software SU-CWP (gratuito e utilizável em qualquer PC com sistema operacional Linux, também gratuito), e a possibilidade de variar os diversos parâmetros de processamento em função do resultado que se deseja obter, tornam o método ainda mais acessível e atraente.

A importância da etapa de deconvolução no processamento de dados de GPR também fica demonstrada com os resultados preliminares obtidos. O método de deconvolução iterativa utilizando norma L_1 também apresentou resultados melhores do que aqueles obtidos com o método convencional.

Agradecimentos

Marcus Popini agradece à CPRM - Serviço Geológico do Brasil, ao CPGG-UFBA, e à Profa. Dra. Liliana Diogo (IAG/USP) pelo apoio a este trabalho.

Referências

Bennett, B., 1990 A computer program to convert SEG-2 data to SEG-Y Special Report Geophysics, 55, 1272-1284.

Carvalho, A. L. 1990 Deconvolução L_1 e aplicações ao processamento sísmico: Dissertação de Mestrado, PPPG/UFBA.

Porsani, M. J.; Niwas, S.; Ferreira, N. R., 2001, A robust inversion of vertical electrical sounding using a multiple reweighted least-squares method. Geophysical Prospecting, V.2, n. 49, p. 255-264.

Porsani, M. J. e Ursin, B., 2000, Mixed-phase deconvolution and wavelet estimation. The Leading Edge,

EUA, v. 19, n.1, p. 76-79.

Yilmaz, O., 1987, Seismic Data Processing: S.E.G., Tulsa.

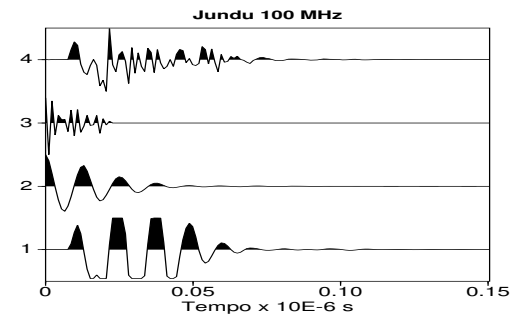


Figura 1: Etapas da deconvolução: 1) traço original; 2) autocorrelação do traço; 3) filtro inverso de Wiener-Levinson; 4) traço deconvolvido com filtro de WL (norma L_2).

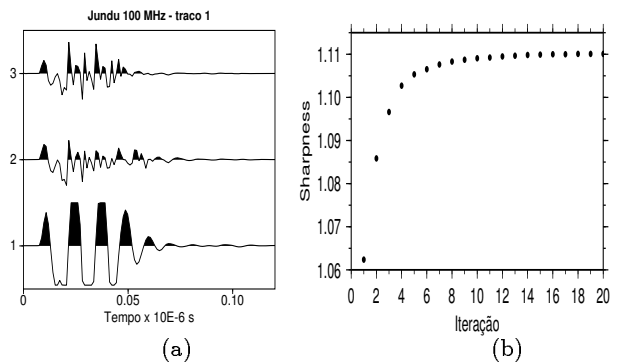


Figura 2: a) Efeito da deconvolução: 1 - traço original; 2 - traço deconvolvido com norma L_2 ; 3 - traço deconvolvido com norma L_1 . b) Evolução do caráter impulsivo do traço deconvolvido em do número de iterações (Porsani e Ursin, 2000) estabilizando após 15 iterações.

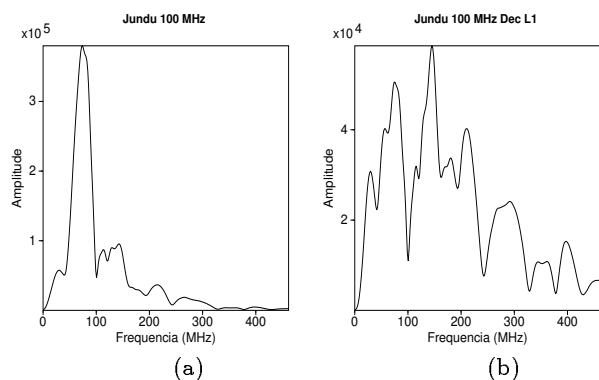


Figura 3: Espectros de frequências dos dados: a) dado original; b) dado deconvolvido norma L_1 .

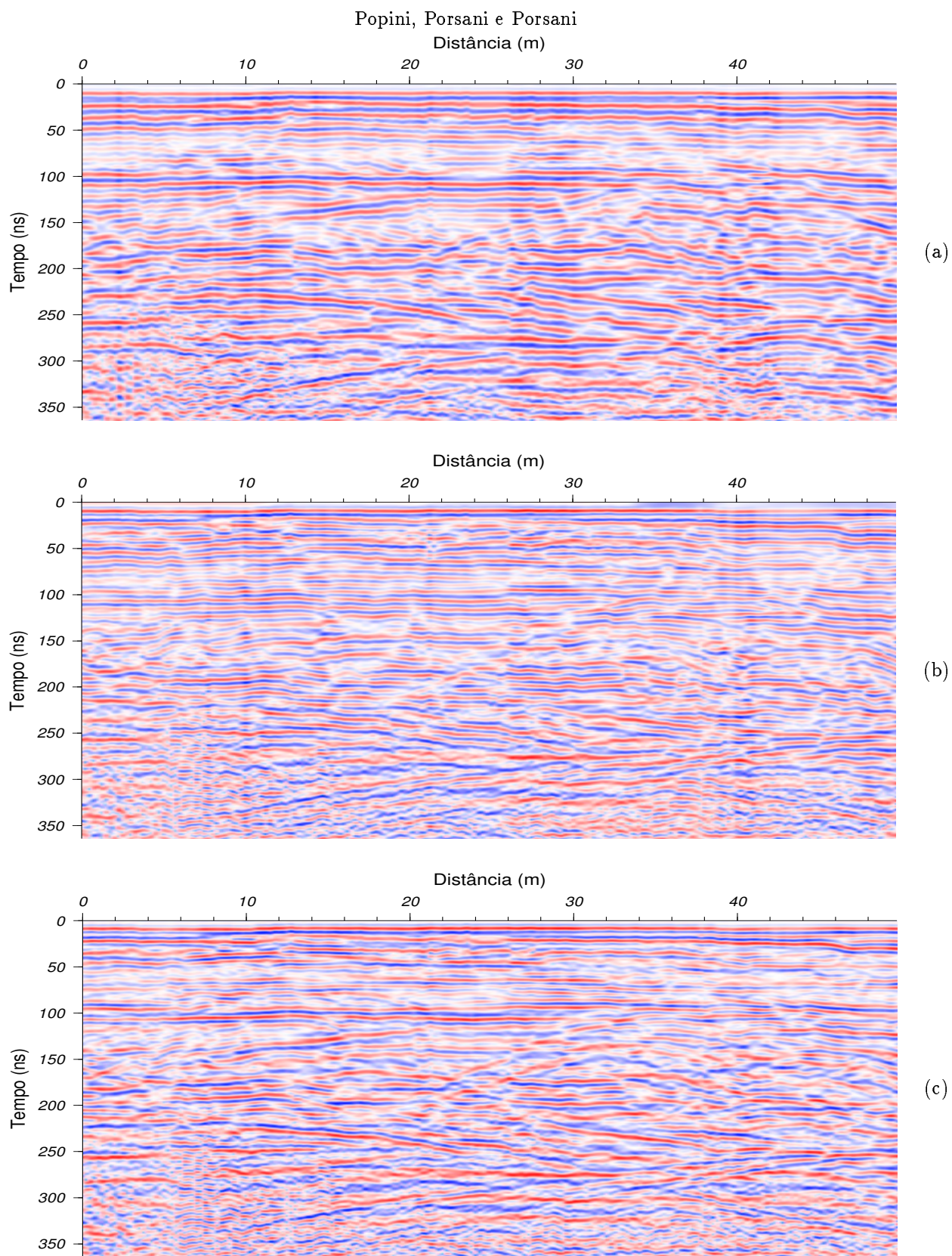


Figura 4: Jundu 100 MHz **a)** seção original após o filtragem passa-banda e aplicação de ganhos, **b)** mesmo dado após a deconvolução de fase mínima (norma L_2) e **c)** mesmo dado após a deconvolução com norma L_1 (filtro com 20 coeficientes, 15 iterações).



Utilização do GPR na definição de estruturas sub-superficiais rasas

João Carlos Dourado, IGCE-Unesp, jdourado@rc.unesp.br

Otávio Coaracy Brasil Gandolfo, Georadar, gandolfo@cwaynet.com.br

Chang Hung Kiang, IGCE-Unesp, chang@rc.unesp.br

Walter Malagutti Filho, IGCE-Unesp, malaguti@rc.unesp.br

Antonio Celso de Oliveira Braga, IGCE-Unesp, acobraga@rc.unesp.br

Abstract

This paper presents the results of GPR survey carried out in vicinity of the Taubaté county, state of São Paulo. The study area lies on tertiary sedimentary rocks of the Pindamonhagaba Formation of Taubaté Basin.

The radargram shows clearly the structural and the stratigraphical framework represented by normal faults and bedding planes.

Introdução e Objetivo

A Geofísica Aplicada teve um grande desenvolvimento à partir da metade do Século XX, onde seu emprego foi intensificado principalmente nas áreas da pesquisa de hidrocarbonetos, na prospecção mineral, na hidrogeologia e nas grandes obras de Engenharia Civil.

Porém, principalmente à partir da década de 80, com o aumento da preocupação sobre a degradação ambiental, a Geofísica Aplicada tem sido cada vez mais utilizada para levantamentos de interesse na área de Geologia Ambiental. Os estudos nesta nova área é caracterizado pela menor profundidade e dimensões dos alvos estudados, quando comparados com as demais áreas de aplicações.

A tabela 1 mostra uma correlação entre a profundidade e tamanho dos alvos investigados pela Geofísica Aplicada e as respectivas áreas de aplicações

Tabela 1 – Correlação entre áreas de aplicação e as profundidade e dimensões do alvo

Área de Aplicação	Profundidade e dimensões do alvo
Pesquisa de Hidrocarbonetos	Centenas a milhares de metros
Hidrogeologia	Dezenas a milhares de metros
Prospecção Mineral	Dezenas a centenas de metros
Geologia de Engenharia	Metros a dezenas de metros
Estudos Ambientais	Sub métrico a dezenas de metros

Portanto, os estudos ambientais constituem uma área de aplicação da Geofísica que mais necessita de técnicas com alta resolução, capaz de detectar alvos pequenos localizados à pequenas profundidades.

Foi neste cenário que surgiu no final da década de 80 início da década de 90 a técnica do Radar de Penetração no Solo (Ground Penetrating Radar - GPR), mostrando ser a técnica geofísica de maior resolução, sendo capaz de detectar objetos centimétricos localizados a profundidades também centimétricas.

Este trabalho mostra os resultados dos levantamentos com o GPR realizados em um afloramento nas proximidades da cidade de Taubaté – SP.

O objetivo deste trabalho é mostrar que quando as condições são favoráveis bons resultados podem ser conseguido com esta técnica.

Local de Estudo

O afloramento está localizado nas proximidades da cidade de Taubaté – SP, sendo formado por um corte da estrada que liga a cidade à Escola Agrícola.

Neste afloramento, como pode ser visto na foto que está inserida na Figura 5, os sedimentos clásticos da Formação Pindamonhagaba (Mioceno) são colocados lado a lado com depósitos coluvionares recentes por meio de falhamentos normais, indicando atividades neotectônicas (Fernandes, 1993). Pode-se notar ainda uma série marcante de falhamentos normais, com rejeitos significativos, no interior dos sedimentos horizontalmente estratificados.

Ensaio realizados

Os ensaios GPR foram realizados dentro do projeto de mestrado intitulado : Estudo de Aplicabilidade da Sísmica de Reflexão de Alta Resolução e Radar de Penetração no Solo (Gpr) na Bacia de Taubaté (Gandolfo, 1999), com suporte financeiro da Fapesp, processo número 97/10419-4.

Além dos ensaios de GPR foram realizados ensaios de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e ensaios de sísmica de reflexão de alta resolução, estes últimos, infelizmente não apresentaram resolução suficiente para individualizar as estruturas superficiais.

GPR na definição de estruturas rasas

A sondagem elétrica vertical realizada, cuja curva de campo é mostrada na Figura 1 e a coluna interpretada é mostrada na Figura 2, mostra que o afloramento é composto por sedimentos de altos valores de resistividade elétrica, com uma camada inicial de 1440 ohms.m sobre outra de 5950 ohms.m, situada a uma profundidade de 3,8 metros. O nível d'água foi detectado na profundidade de 15 metros.

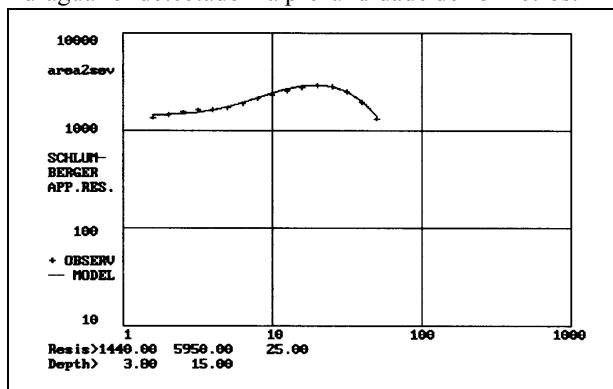


Figura 1 – Sondagem Elétrica Vertical realizada com arranjo Schlumberger.

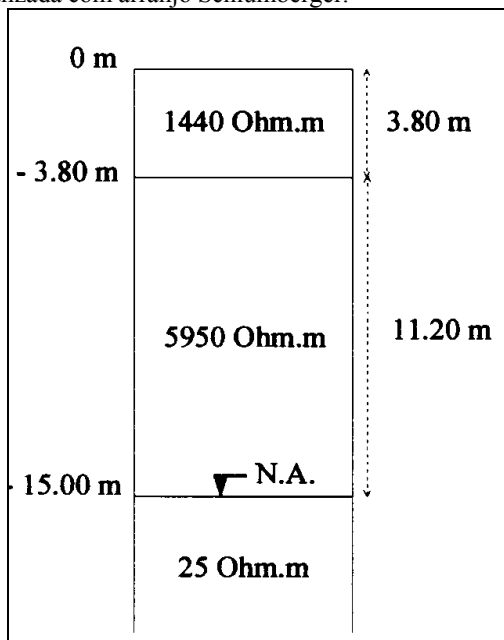


Figura 2 – Estratos geoeletricos obtidos com a interpretação da SEV.

Os ensaios de radar de penetração no solo foram realizados com o sistema RAMAC/MALÅ Geoscience utilizando-se neste afloramento antenas de 50 e 100 MHz.

No Afloramento em questão foram realizados dois tipos de ensaios: o CMP e o *Common Offset*, como descrito por Annan, 1992.

O ensaio do tipo CMP (*commone mid point*), que foi realizado com antenas de 100 MHz, teve

como objetivo determinar a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas em sub-superfície, cujo resultado é mostrado na Figura 3.

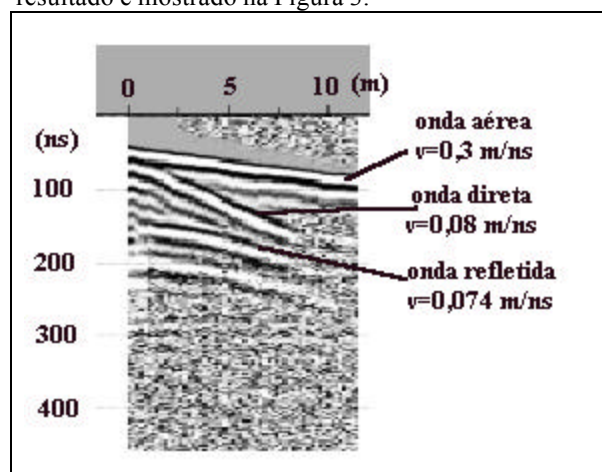


Figura 3 . Radargrama obtido com antenas de 100 MHz no ensaio do tipo CMP, o deslocamento das antenas foi feito em intervalos de 0,20 m.

A ligeira diminuição da velocidade da onda no meio, quando se compara as ondas diretas (que se propagam na superfície) com as ondas refletidas (que se propagam no interior das camadas) deve estar relacionada com o aumento da umidade em sub-superfície.

A aquisição de dados com a técnica do *common offset*, neste afloramento, foi realizada utilizando-se antenas de 100 MHz com espaçamento de 0,25 m. entre os pontos de medidas. O radargrama obtido é mostrado Figura 4.

Este radargrama foi processado no programa Gradix, da Interpex, e foi utilizado basicamente os seguintes passos: 1) correção do tempo zero e remoção do *wow*; 2) aplicação de ganhos; 3) filtragem passa-banda; 4) equalização dos traços; 5) conversão tempo-profundidade.

Interpretação do Radargrama

As Figura 5a e 5b mostram a interpretação estrutural do radargrama com base na observação direta do afloramento.

Como pode ser observado, as diversas estruturas presentes no afloramento são facilmente correlacionáveis com feições correspondentes no radargrama, como por exemplo a estratificação horizontal destacada pela alternância de estratos arenosos com camadas silto-argilosa. As ondulações presentes no bloco rebaixado (*graben*) no meio da seção de radar é devida principalmente à mudança na espessura do solo de cobertura e variações localizadas da velocidade de propagações eletromagnéticas.

GPR na definição de estruturas rasas

Pequenas perturbações, como aquela que ocorre em torno de 1,2 metros de profundidade próxima da estaca de 10 metros são resultados de pequenas estruturas sub-superficiais, uma vez que possuem formato hiperbólico, cuja velocidade com valor de 0,074 m/ns é idêntica do meio sub-superficial.

Os falhamentos normais, marcados em amarelo na seção interpretada da Figura 5, são observados facilmente tanto na foto como no radargrama. Cita-se como exemplo, a falha que coloca em contato sub-vertical os sedimentos clásticos da Bacia de Taubaté com solos recentes, e que pode ser visualizada entre as estacas 15 e 20 da foto da Figura 5. No radargrama este falhamento aparece uma um alinhamento sub-vertical dos picos da onda refletida.

Conclusões

Os resultados obtidos neste trabalho, com o radar de penetração no solo, mostra que para esta área, a resolução foi muito boa, definindo estruturas rasas, com poucos metros de profundidade e feições estruturais sub-métricas. As feições estruturais mais visíveis são aquelas definidas pela estratificação e pelas falhas normais com rejeitos centimétricos.

Deve-se ressaltar, no entanto, que este bom resultado está diretamente relacionado com as condições de alta resistividade elétrica dos sedimentos arenosos presente no afloramento.

Referências Bibliográficas

- Annan, A. P. 1992. Uses and techniques of ground penetrating radar in near-surface geophysics. Workshop notes: Society of Exploration Geophysicists, Sensor & Software Inc., 110 p.
- Fernandes, F. L., 1993 – Arcabouço Estrutural e Evolução da Bacia de Taubaté – Dissertação de Mestrado apresentada ao Departamento de Geologia da Escola de Minas – UFOP, 137p
- Gandolfo, O.C.B. 1999 – Aplicação da Sísmica de Reflexão de Alta Resolução e do Radar de Penetração no Solo (GPR): Um estudo comparativo.- Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Unesp – Campus Rio Claro - SP, 140 p.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado de São Paulo – Fapesp pelo suporte financeiro ao projeto ao projeto, Processo Número 97/10419-4

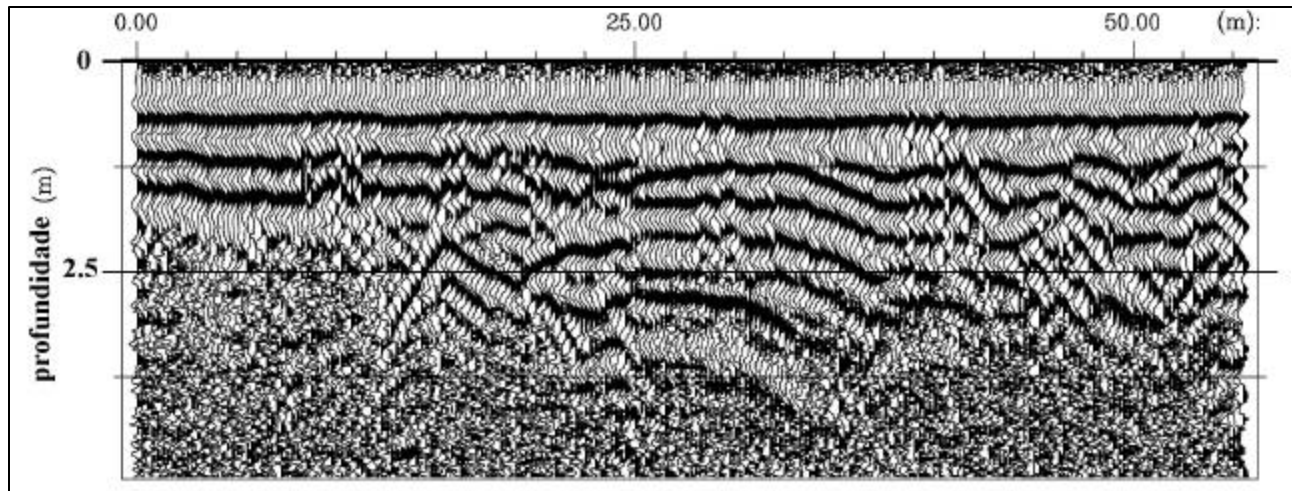


Figura 4 – Radargrama obtido com ensaio common offset utilizando antenas de 100 MHz..

GPR na definição de estruturas rasas

Figura 5a e 5b – Seção de radar e foto do afloramento com e sem interpretação

