



Aplicação de GPR (ground penetrating radar) como ferramenta no diagnóstico ambiental em área industrial.

Marcelo Marques dos Anjos, UFRJ, marcelo@gedap.geologia.ufrj.br

Paula Lucia Ferrucio da Rocha, UFRJ, ferrucio@acd.ufrj.br

Suely Ferreira da Silva, UFRJ, suef@bol.com.br

Albari Pedroso, Petroflex, apedroso@petroflex.com.br

Rinaldo Moreira Marques, Geopesquisa, rinaldo@geopesquisa.com.br

Abstract

This paper presents the results of an investigation carried out by the Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) with the cooperation of the Petroflex Indústria e Comércio S.A., a petrochemical industry. This research is part of the company Social Project (2000-2005), titled: "Conheça seu Manguezal" (Knowing your mangrove). The company is located on the borders of the Guanabara Bay, Rio de Janeiro State, Brazil. In the study, Geophysical survey was applied in two areas located within the industrial park in order to identify solid waste contamination (rubber and plastic and metal brass). It was used the *Ground Penetrating Radar* (GPR) technique with equipment RAMAC/MALA, which provides high resolution images of the underground. The study area consists of clay landfills on clay and sands deposited in marine conditions, which are presently contaminated by brackish water. In general, the GPR results obtained in both, clay material and sediments saturated with brackish water are not satisfactory. However in the Petroflex area the results were excellent. The stratigraphic sequence in the area is the following, from top to bottom: The first bed is a clay landfill composed of illite, smectite and kaolinite, with average thickness of two meters and pH about four. The second bed is formed by a dark marine clay, with thickness averaging eight meters and pH about three. The third bed is composed of fine-grained sand with marine shells and thickness of six meters. The data were processed with the software GRADIX[®] versão 1.11 (Interpex), with the purpose of enhance the anomalies and the stratigraphy. The surveys originated sections with average depths of 14 meters and average velocity of 70 m/μ s. Results showed two physical discontinuities within the second bed (marine clay), which, possibly represent a Pleistocene platform exposition, described in the literature as Guanabariana Regression. It was also possible to identify two anomalies within the first bed (clay landfill). The first is represented by a signal attenuation, and the second to identify waste deposits ditch, where it was verified the presence of four buried drums. Such work has demonstrated the success of GPR applicability even to clay soil contaminated by brackish water. The interpretation of

the geophysical data will be applied in the Project for recovering of the mangrove area bordering the Guanabara Bay.

Introdução

Nesse estudo a geofísica foi utilizada para investigar duas áreas adjacentes ao parque industrial que estão contaminadas por resíduo sólido (borracha, latões plásticos e metálicos). Neste estudo foi possível também determinar a estratigrafia e mostrar a utilização, com sucesso, do GPR em áreas próximas a ambientes mixualinos ou em aterros argilosos. O trabalho na fábrica vem sendo desenvolvido em conjunto com outros profissionais que atuam na área de meio ambiente e os relatórios são produzidos em conjunto.

Localização e Geologia Local

A área em estudo está localizada na Indústria e Comércio Petroflex S.A situada na Rua Marumbi, 600-Campos Elíseo, Duque de Caxias, Rio de Janeiro. Para se ter acesso à empresa, é necessário, utilizar a via de acesso principal BR- 040 até o Km 114 seguindo em direção à refinaria Duque de Caxias. (Figura 1).

A área está inserida em uma Planície de Maré (que foi aterrada para a construção do pólo petroquímico) recoberta por sedimentos fluvio-marinhos holocênicos da Formação Magé. Estes sedimentos são individualizados pelos episódios transgressivos e regressivos ocorridos na Baía de Guanabara. Litologicamente estes sedimentos são constituídos de sedimentos finos, sílticos-argilosos ricos em matéria orgânica. Geneticamente estes sedimentos correspondem a um ambiente de planície de maré e progradação de litoral, em regime estuarino, que servem de substrato para o desenvolvimento do ecossistema de manguezais.

Ocorre na área de estudo, uma exposição do embasamento, na forma de uma colina denominada Morro do Mosquito, formado por gnaisses migmatizados de idade pré-cambriana sendo possivelmente a sua gênese associada a zona de contato entre o Batólito Serra dos Órgãos com suas rochas encaixantes (Amador, 1997)

Aplicação de GPR em área industrial

Em relação ao aspecto pedológico os solos presentes na região ocorrem de duas formas: de forma artificial, como aterro (argila compactada) com espessuras que variam em média de 0,80 a 3,25m com predominância em todo complexo industrial. Abaixo deste, segundo D' Orsi (1992), existe dois solos mal a muito mal drenados, tipo glei salino tiomórfico, sujeitos a grandes oscilações do lençol freático durante o ano chegando ao alagamento. Com a proximidade do litoral e devido à influência marinha há formação de argilas orgânicas com espessura variando entre 0,40 a 3,70 m, intercaladas com lentes arenosas, que muitas vezes apresentam conchas em seu interior (Falcão, 1999).

Metodologia

No trabalho, utilizou-se a técnica *Ground Penetrating Radar* (GPR) que consiste em imageamento de alta resolução do subsolo, através de pulsos eletromagnéticos gerados em superfície.

A técnica baseia-se em um pulso eletromagnético, gerado por uma antena transmissora na superfície, que se propaga para o subsolo e, ao interceptar uma interface, que separa materiais com propriedades eletromagnéticas diferentes (condutividade e constante dielétrica) se reflete e se refrata. A detecção dos alvos depende do contraste eletromagnético deste com o meio.

Quanto maior o contraste das propriedades do meio (condutividade elétrica e permissividade dielétrica) mais intenso será a reflexão obtida na superfície.

Os aspectos teóricos da técnica GPR estão amplamente difundido em vários artigos científicos. Tendo como foco o artigo de Davis & Annan (1989), pode-se enumerar outros: Annan, 1992; Cimadevila, 1994; Fisher *et alii*, 1992 etc.

Neste trabalho utilizou-se a técnica WARR (*Wide Angle Reflection and Refraction*) com as antenas receptora e transmissora de 100 Mhz, separadas por uma distância constante (*offset*) de 1 metro. Os perfis de GPR foram executados em uma malha irregular. Os resultados obtidos através de GPR foram processados utilizando-se do *software* GRADIX® versão 1.11 da INTERPEX objetivando destacar anomalias geofísicas e a estratigrafia. Os levantamentos resultaram em seções com profundidade de alcance médio de 14 metros com velocidade média de 70 m/ μ s. Inicialmente os dados foram filtrados e aplicados um ganho de 20ns.

A interpretação dos dados confirmou a seqüência estratigráfica descrita em Amador (1980). A primeira camada consiste em aterro com espessura média de 2 metros, a segunda camada é composta de argila marinha escura com aproximadamente 8 metros de

espessura, e a terceira camada, é formada de areia fina com conchas marinhas de espessura média de 6 metros.

Conclusões

Os resultados superaram as expectativas uma vez que o levantamento estava sendo realizado em área de solo muito salino. Em alguns radargramas foi possível identificar discontinuidades físicas que foram associadas às variações do nível do mar que se convencionou chamar de Transgressão Guanabariana, a qual delimita o Pleistoceno-Holoceno (Amador, 1980).

Além disto também foi possível identificar em outros radargramas anomalias geofísicas que posteriormente, na investigação direta, foram confirmadas e consistiam em latões enterrados e borracha. As figuras 2 e 3, mostram exemplos dos resultados identificados na área. Na figura 2, temos anomalias correspondentes aos tonéis enterrados e às borrachas além, das discontinuidades físicas correspondentes à estratigrafia do terreno. A figura 3, mostra as discontinuidades físicas referentes à variação do nível do mar.



Figura 1 - Mapa de Localização da Petroflex

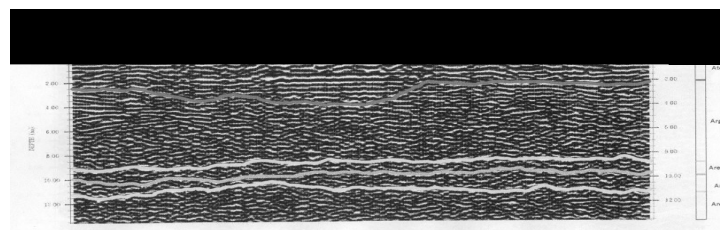


Figura 2 - radargrama mostrando as anomalias geofísicas (tonéis e borracha) e a estratigrafia.

Aplicação de GPR em área industrial

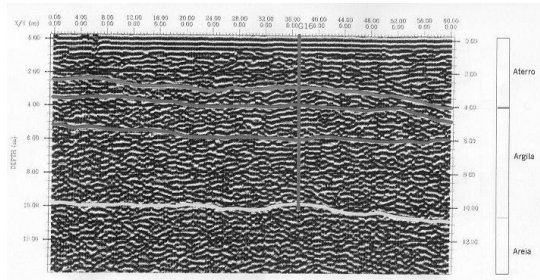


Figura 3 – radargrama mostrando as descontinuidades físicas em vermelho que correspondem, possivelmente, às variações do nível do mar.

Referências

Amador, E.S. 1997-Baía de Guanabara e Ecossistemas Periféricos – Homem e Natureza. Edição de Autor.,539 p.

Annan, A.P.1992- Use and techiques of ground penetrating radar in near- surfuce geophysicists. Workshoph Notes, Sensor & Softwere Inc. 22p.

D' Orsi R.N.(1992)- Impactos Ambientais na área da folha Petrópolis (RJ) 1:50.000: Considerações geológicas, programa de pós Graduação em Geologia, Instituto de geociências, UFRJ, Tese de Mestrado, 204p.

Davis,J.L., Annan, A. P.,1989 Ground Penetration Radar for High-resolution mapping of soil and rock stratigraphy; geophysical prospecting, Vol.37, pp 531-551

Falcão, C.M 1999- Projeto de rede de Monitoramento das águas Subterrâneas da Petroflex. Rio de Janeiro: Monografia de Graduação, Faculdade de Geologia, UERJ,1999.

Fisher,E.,McMehan, G.A , A P. Annan, 1992, Aquisition and Processing of wide-Aperture Ground Penetrating radar Data. geophysics,Vol.57, N° 3, pp 495-508

Cimadevila,1994. Prospección Geofísica de Alta Resolución Mediante Geo-Radar. Aplicación a Obras Civiles.Tese de Doctor en Ciências Físicas.Universidad Complutense de Madrid.

GRADIX- manual do usuário

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Petroflex, que financiou o levantamento geofísico e também a bolsa de iniciação científica de Marcelo dos Anjos, à Geopesquisa pela colaboração na interpretação dos dados e ao projeto GPR/POÇO (FINEP-CTPETRO) pela infraestrutura oferecida para a conclusão deste trabalho.

Avaliação do Potencial Arqueológico da Pedra da Gávea: “Desmistificando um mito com o auxílio do GPR”.

Carlos Eduardo Guerra, UFRJ/UFPA, ipanemaceg@bol.com.br

Marcelo Marques dos Anjos, UFRJ, marcelo@gedap.Geologia.Ufrj.br

Paula Ferrucio da Rocha, UFRJ, ferrucio@acd.ufrj.br

Isabel Ludica, UFRJ, isabel@geologia.ufrj.br

Helio Monteiro Penha, penha@geologia.ufrj.br

Resumo

A ocorrência de vazios rochosos, comumente chamado de cavernas, está condicionada à ação geológica no tempo em formações específicas (calcárea por exemplo) e/ou à atividade humana.

Através da observação geológica direta e de procedimentos de investigações indiretas (geofísica), verificou-se a impossibilidade da ocorrência destas estruturas no maciço rochoso da Pedra da Gávea. Um levantamento do tipo reflexão, com seis linhas de caminhamento foi suficiente para constatar a inexistência de contrastes de propriedades elétricas. Um total de aproximadamente 850 m³ de rocha sólida foi investigado.

Introdução

A pedra da Gávea está localizada no Maciço da Tijuca, formada por rochas gnáissicas da sequência regional em sua base e um dique granítico horizontalizado no topo, com aproximadamente 50 m de espessura, o que confere o característico aspecto de "mesa" observado nessa interessante formação geológica. Esse dique granítico forma uma cornija protetora aos agentes erosivos, e pode ser observado também na Pedra Bonita (Penha, 1994)(**Figura 1**).

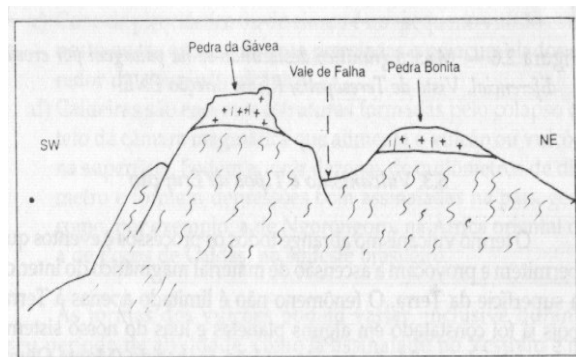


Figura 1

Conjunto Pedra da Gávea, Pedra Bonita, Rj, formado por gnaiesses encimados por cornijas graníticas de um dique sub-horizontalizado parcialmente erodido. Extraído de (Penha, 1994).

Segundo (Porto Jr., 2000), esse granito seria uma extensão do maciço da Pedra Branca, que intruiu em forma de diques e sills os gnaiesses encaixantes, relacionado ao magmatismo calcio-alcálico pós-tectônico do evento Brasileiro de idade em torno de 500 milhões de anos. Os detalhes atualmente observados na porção superior desta formação, como os "olhos da esfinge", o "portal" e as "inscrições fenícias" são fenômenos naturais de erosão diferencial por enclaves do gnaisse no granito (olhos) e conjunto de diáclases e fraturas (portal e inscrições). Esta hipótese é corroborada pelo geólogo Marcos Medeiros (Jornal O GLOBO, 2000), que admite a ação das intempéries como causa principal da peculiar formação popularmente conhecida como “escrita fenícia da Pedra da Gávea”.

Contrariando a crença popular, este tipo de formação não contempla a existência de cavernas, o que pode ser claramente constatado em procedimentos de investigações indiretas realizados com auxílio da ferramenta GPR (Radar de penetração no solo). Com estes subsídios, este trabalho se propõe a mostrar que o topo da Pedra da Gávea; cuja mística popular atribui equivocadamente a uma “esfinge com um possível acervo arqueológico incluso”, trata-se tão somente de formação maciça, que dificilmente poderia abrigar uma caverna.

O GPR

O Radar de Penetração no Solo (GPR) é uma ferramenta geofísica, cujo princípio físico baseia-se na teoria eletromagnética. Um pulso eletromagnético, emitido por uma fonte, percorre a formação em sub-superfície até encontrar uma região que apresente uma descontinuidade elétrica (uma camada ou um corpo por exemplo). Quando o pulso se depara com a fronteira desta descontinuidade, parte dele é transmitido além da fronteira, e parte é refletido à superfície onde um sensor faz a leitura. Uma unidade programada faz logo a seguir, o processamento do sinal refletido. Conhecida a velocidade do pulso, a posição do refletor pode ser determinada medindo-se o tempo que o pulso leva para ir ao refletor e retornar à antena receptora. O resultado final é um perfil de tempo de trânsito em função da profundidade. Quando existe uma região que apresenta um contraste

O Uso do GPR na Pedra da Gávea

de condutividade com relação ao meio investigado, o perfil apresenta uma formação característica comumente identificada por “hipérbolas” (**Figura 2**).

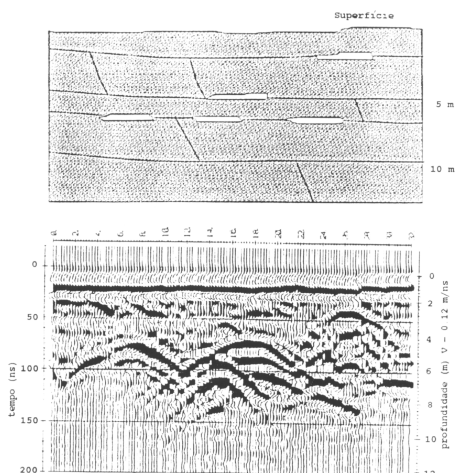


Figura 2
Exemplo de um perfil de GPR de um modelo de formação que apresenta contrastes de propriedades elétricas. (Extraído de Annan, 1992).

No levantamento da Pedra da Gávea foi utilizada a técnica de Perfis de Reflexão (**Figura 3**), que consiste no caminhamento do conjunto antenas emissora receptora, separadas por uma distância fixa, ao longo de uma linha com um comprimento finito.

MODO DE REFLEXÃO

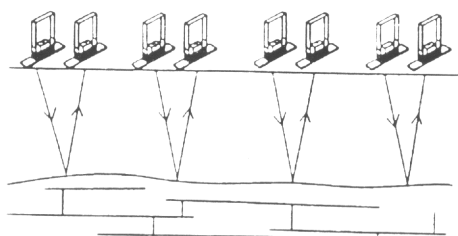


Figura 3
Levantamento GPR do tipo Reflexão, com caminhamento por uma linha de tomada. (Adaptado de Annan, 1992)

Uma seqüência de três linhas na região da “cabeça da esfinge” e três outras na região de topo perpendicular ao “portal” foi suficiente para varrer toda a área do topo da formação, onde se supunha

existir em sub-superfície, uma caverna construída ou naturalmente aproveitada por uma suposta “civilização antiga”. Com um conjunto de antenas de

100 Mhz e uma separação entre ambas entorno de 1,5 m, esperava-se encontrar contrastes elétricos a uma profundidade de até 15 metros. Na (**Figura 4**) podemos observar o maciço rochoso na “cabeça da esfinge” e o GPR utilizado no levantamento.

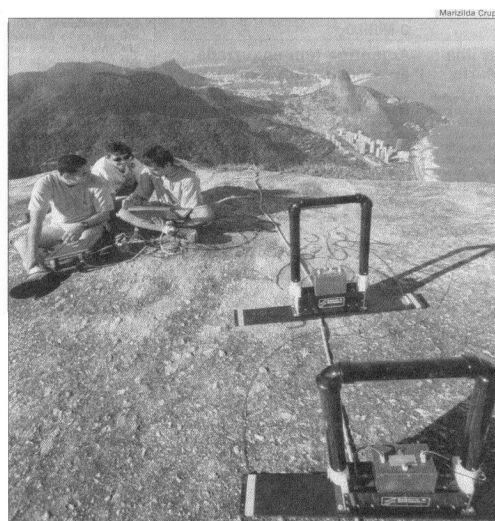


Figura 4
A ferramenta GPR disposta sobre uma linha de Levantamento, na “cabeça da esfinge”. Na operação do equipamento, seqüência esquerda para direita, os geofísicos Marcelo Marques (UFRJ), Paula Ferrúcio(UFRJ) e Carlos E. Guerra (UFPA/UFRJ), (Cortesia do JORNAL O GLOBO)

Análise dos Resultados

Mostraremos a seguir, alguns perfis obtidos no levantamento da Pedra da Gávea. A formação majoritária da região investigada apresenta uma condutividade elétrica que fica entre 0.01 e 1 (mS/m), com uma constante dielétrica que varia ente 4 e 6. Já a condutividade do ar é zero e a constante dielétrica é igual a 1. Estes valores formam um contraste que pode ser observado num perfil de GPR, caso haja a presença de vazios na estrutura granítica. Caso estes vazios sejam preenchidos por água, o contraste pode ser ainda maior, visto que a constante dielétrica da água é por volta de 80. Na (**Figura 5**) podemos observar um perfil GPR obtido numa linha traçada no “corpo da esfinge”. Podemos notar a pequena

O Uso do GPR na Pedra da Gávea

espessura do solo, o que era de se esperar, pois a região é um maciço rochoso de granito que é muito resistente a ação da erosão. Observamos também na mesma figura, a ausência total de contraste de propriedade elétrica, corroborando a hipótese inicial da inexistência de cavernas.

Na (Figura 6) observamos a linha 2 obtida na mesma região, isto é, no “corpo da esfinge”. Como na figura anterior, não

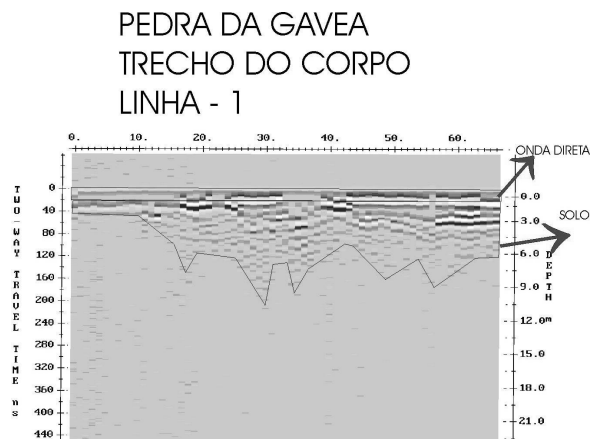


Figura 5

Perfil de tempo de trânsito referente a uma linha no trecho do “corpo da esfinge”. Em destaque, a pequena espessura do solo e uma visível ausência de contrastes.

se consegue obter nenhum registro de contraste ou anomalia elétrica, senão a fina camada de solo existente no topo. Nos outros perfis obtidos, ocorreram a mesma coisa, o que consideramos desnecessárias análises mais detalhadas.

A (Figura 7) mostra uma linha levantada no “portal da esfinge”. Esta formação trata-se de um granito semifraturado e erodido, apresentando uma fina cobertura de solo. Ente 0 e 3 metros de profundidade a forte atividade registrada é um indicativo claro de solo e desgaste da formação rochosa. Novamente, abaixo da profundidade de 3 metros não há nenhum traço de perfil que indique a presença de uma estrutura refletora.

Na (Figura 8) observamos a linha 3 levantada no trecho do “Portal da Gávea”. A espessura de solo neste trecho é maior do que a observada nas linhas anteriores. Isto pode ser um forte indicativo de uma ação mais acentuada do intemperismo. Este fato pode ser evidenciado pela presença de uma vegetação um pouco mais densa nesta localidade. Novamente o perfil se caracteriza pela total ausência de anomalias que aponte para a existência de cavernas.

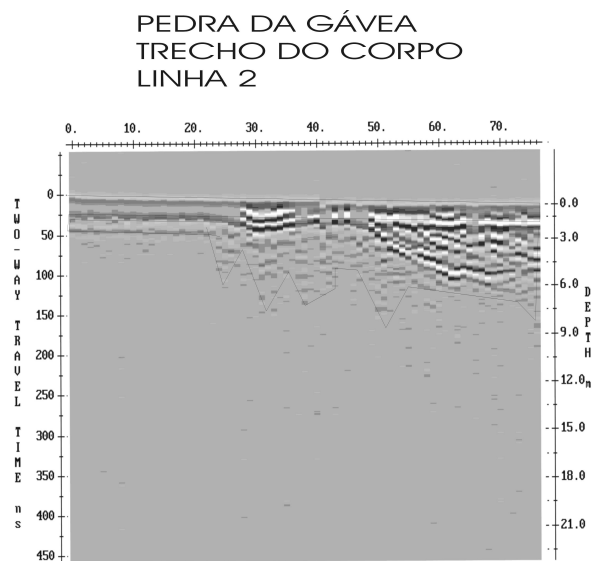


Figura 6

Perfil de tempo de trânsito referente a segunda linha no trecho do “corpo da esfinge”. Novamente pode-se observar a inexistência de anomalias elétricas significativas.

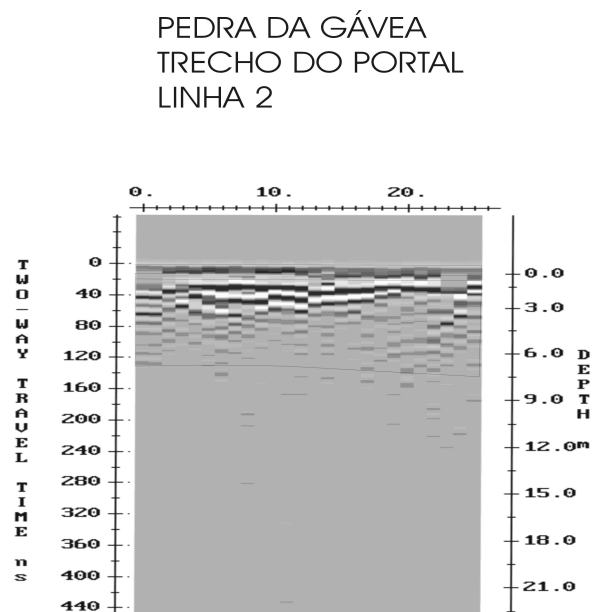


Figura 7

Perfil de tempo de trânsito referente a uma linha no trecho do portal da esfinge. O desgaste por erosão e fraturamento do granito no topo do portal pode ser observado na intensa reflexão do sinal GPR de 0 a 3 metros.

O Uso do GPR na Pedra da Gávea

PEDRA DA GÁVEA TRECHO DO PORTAL LINHA 3

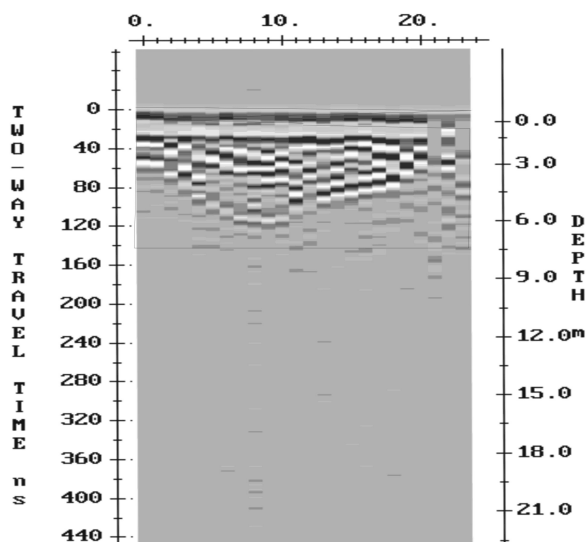


Figura 8
Perfil de tempo de trânsito referente a uma linha no trecho do portal da esfinge. Pode-se notar uma espessura de solo um pouco maior com relação aos perfis anteriores.

Conclusões

Embora a profundidade investigada pela antena de 100 MHz não chegue a 20 metros é necessário salientar que qualquer formação cavernosa, natural ou não seria um alvo perfeitamente factível de ser observado, uma vez que a região investigada é pequena e limitada. O instrumento não registrou nada que indicasse um contraste de condutividade até a profundidade de 15 metros, além disto, a descrição geológica da região e do afloramento não permite maiores especulações acerca da existência de cavernas na Pedra da Gávea. Por tudo isto pode-se concluir com uma margem de segurança, que a possibilidade da existência de cavernas naturais é remota. Dado o tipo de rocha, que é um granito, pode-se também inferir que a possibilidade de se observar uma caverna ou lacuna feita pela mão humana também é remota, visto que tais estruturas teriam que ocorrer próximas do topo da pedra, o que não foi observado pelo GPR. O que se

observa no “portal” nada mais é do que a ação de intemperismo facilitada por falhas estruturais do granito, i. é., zonas de fraquezas que sofrem mais rapidamente à ação do tempo.

Referências

- Penha, H.M, 1994, “Processos Endogenéticos na Formação do Relevo”. In: Geomorf.: uma atualização de bases de conceitos. Antonio Teixeira Guerra (ed). Ed. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 1994-458p.
- Porto Jr., R, 2000, “The Pedra Branca Granitic Complex, Rio de Janeiro, Brazil: petrology and evolution”. In: 31º International Geological Congress, Rio de Janeiro, SBG. Abstracts CD - ROM .Volume 2.
- Annan, P. A. , 1992, Uses and Techniques of Ground Penetrating Radar in Near Surface”. In Geophysicist Workshop Notes, Surfaces & Software Inc, 22p.
- Annan, P. A. , 1992, “Ground Penetrating Radar”. In Geophysicist Workshop Notes, Surfaces & Software Inc.
- Câmara, E. B., 2000, “Desvendando o enigma Da Pedra da Gávea”, matéria publicada no Jornal O GLOBO, caderno do Rio, domingo, 06 de agosto de 2000.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer a fotógrafa Marizilda Cruppi do jornal O GLOBO por ceder as fotografias, ao Jornalista Erick Brucher pelo convite para participar da reportagem no jornal O GLOBO (06/08/00) e também à Universidade Federal do Rio de Janeiro por propiciar as condições necessárias à realização deste trabalho.

Avaliação do Radar de Penetração no Solo (GPR) em uma Investigação do Subsolo

Patricia L. Grazinoli, Geol., MSc, Doutoranda COPPE-UFRJ, e-mail pat@geotec.coppe.ufrj.br
Henrique Lorenzo Cimadevila, Geofísico, MSc, Prof. Universidade de Vigo, Espanha

Abstract

This paper presents a stratigraphy study carried out with the Ground Penetrating Radar (GPR). This study was made at the construction site of a building in the campus of the Federal University of Rio de Janeiro. The site was investigated by conventional percussion borings (SPT - Standard Penetration Test), and the two methods were evaluated for the capacity to detect the interfaces between different layers, in particular the soil-rock interface. In the GPR investigation three antennae were used: 50, 100 and 200 MHz. The penetration of the GPR method was restricted by the presence of a fill layer, about 3m thick, and by the possibility that the pore-water contains salt. The data obtained with the various antennae, after processing, revealed the most relevant ground features, the data obtained with the 50 MHz antenna being specially revealing with respect to the soil-rock interface.

Introdução

Este trabalho mostra os resultados obtidos com o uso do Radar de Penetração no Solo (GPR) na interpolação de sondagens convencionais a percussão (SPT) no local de construção de um prédio no campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro (Ilha do Fundão). A investigação de solos e rochas é comumente efetuada por técnicas de sondagem, amostragem e ensaios de campo, os quais são indispensáveis no planejamento e determinação de parâmetros geotécnicos. No entanto, as condições geológicas modificam-se consideravelmente entre dois pontos de sondagem, ou seja, a investigação é válida apenas para curtas distâncias ao redor do furo. Os métodos geofísicos, em particular o GPR, fornecem informações contínuas do subsolo de forma não-destrutiva, podendo servir de base para a execução de sondagens em locais mais relevantes (Daniels & Roberts, 1994).

A área que hoje constitui a Ilha do Fundão, onde está a Cidade Universitária, foi criada pelo aterro de braços de mar entre um conjunto de ilhas. Assim, é comum se encontrar nas sondagens executadas na Cidade Universitária, espessuras consideráveis de aterro sobre camadas de solos argilosos orgânicos ou camadas de areias que constituíam mangues ou praias destas ilhas. Por outro lado, as ilhas apresentavam abaixo destas camadas sedimentares, solos residuais e, freqüentemente a pequenas profundidades, o embasamento rochoso.

A área de estudo se situa no Centro de Tecnologia, onde se pretende construir um novo prédio. O local foi investigado, dentro da prática da Engenharia Civil para previsão de fundações, por sondagens a percussão. Dois prédios vizinhos tiveram suas fundações em estacas, sendo no último empregadas estacas pré-moldadas de concreto, cravadas até o impenetrável. Estas estacas são economicamente vantajosas quando se consegue prever seus comprimentos, a fim de se evitar emendas ou perdas de estacas moldadas com comprimento excessivo. Decidiu-se, então, avaliar o potencial do GPR no que diz respeito à sua capacidade de identificar contatos entre camadas, em particular o contato solo-rocha.

A Figura 1 mostra o perfil do terreno obtido por uma sondagem no centro do prédio. Pode ser observada a presença de uma camada de aterro sobre o solo natural sedimentar, argila orgânica cinza escura. Abaixo vem o solo residual, seguido da rocha alterada. O nível d'água se situa a cerca de 3m de profundidade. O aterro é constituído por um silte argiloso fofo. Mesmo num aterro bastante antigo e limpo (sem indicações da presença de entulhos ou pedras), é de se prever uma atenuação para o GPR.

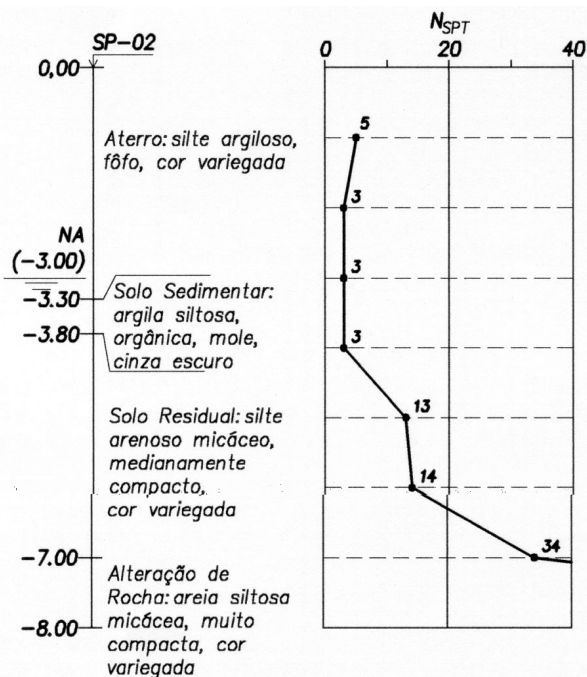


Figura 1 – Perfil de sondagem.

Avaliação do Radar de Penetração no Solo (GPR) em uma Investigação do Subsolo

Metodologia do GPR

O radar de penetração no solo (GPR) utilizado foi um Ramac/Mala. Foram empregados três pares de antenas operando em modo bistático: 50, 100 e 200 MHz, a fim de se verificar a penetração e resolução de cada uma delas na presença de um aterro. Os pares Tx-Rx de 50 e 100 MHz foram posicionados a uma separação fixa de 1 m (entre centros). Para a antena de 200 MHz, foi usada uma separação de 0,50 m.

A seção investigada corresponde a uma linha transversal ao prédio, com 31m de extensão, sendo a aquisição feita a cada 10cm.

Os dados adquiridos foram processados de duas formas, a fim de produzir seções tipo mapa de amplitudes (ou "line-scan") e tipo "wiggle". No processamento foram empregados: (i) ganho (exponencial) e (ii) filtro tipo "passa-banda", visando principalmente filtrar as altas frequências.

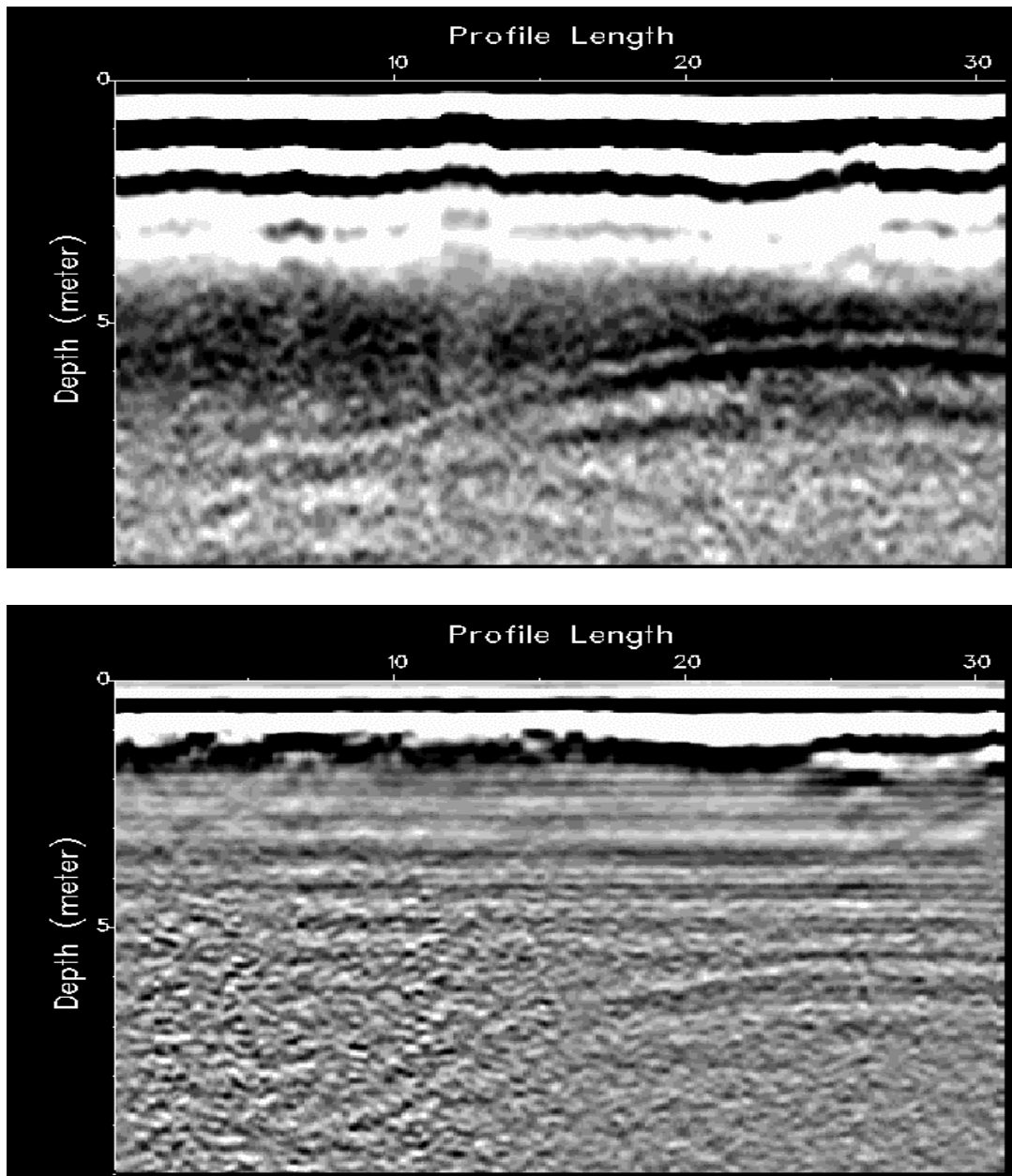


Figura 2 – Radargramas obtidos com antenas de 50 MHz (acima) e 100 MHz (abaixo)

Avaliação do Radar de Penetração no Solo (GPR) em uma Investigação do Subsolo

Resultados

Os resultados obtidos com as antenas de 50 e 100 MHz em termos de mapa de amplitudes estão apresentados na Figura 2. Pode ser observado claramente, no perfil de 50 MHz, o contato com a rocha. Já com a antena de 100 MHz, este contato pode ser ainda visualizado, porém com menor nitidez.

Outras feições foram detectadas nas seções tipo wiggle, como mostrado na Figura 3: no perfil da antena de 50 MHz, vê-se claramente o contato solo-rocha; no perfil da antena de 100 MHz pode ser identificado um contato que deve corresponder à base do aterro; no perfil da antena de 200 MHz pode ser visto um contato que deve corresponder ao lençol d'água freático.

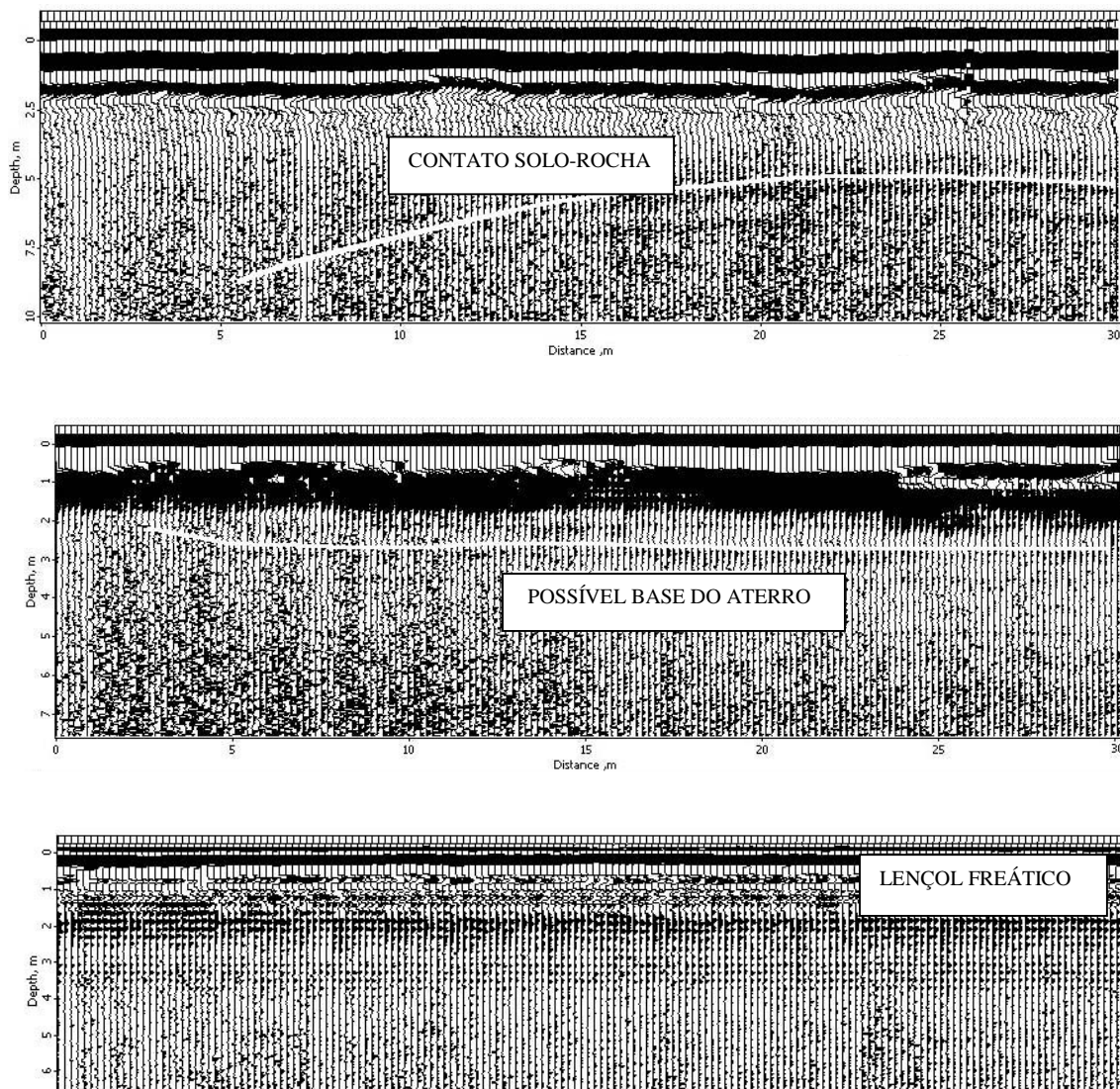


Figura 3 – Seções tipo wiggle obtidas com antenas de 50 MHz (acima), 100 MHz e 200 MHz (abaixo)

Avaliação do Radar de Penetração no Solo (GPR) em uma Investigação do Subsolo

Para definição da profundidade nos perfis, foi adotada uma velocidade da onda eletromagnética de 0,1 m/ns, ajustada a partir das sondagens, uma vez que a técnica CMP não produziu resultados satisfatórios provavelmente devido à presença do aterro.

Os resultados mostram a importância da utilização das diferentes antenas em um mesmo perfil, visto que em cada perfil adquirido foi possível a identificação de diferentes feições do subsolo, as quais complementam de forma bastante satisfatória os dados obtidos unicamente com sondagens.

A identificação do contato solo-rocha com a antena de 50 MHz se deve, a princípio, ao forte contraste da constante dielétrica entre as camadas de solo ac íma e o material rochoso. Pode-se dizer que devido ao fato do maior comprimento de onda desta antena, e conseqüentemente maior profundidade de penetração, há um menor atenuação (dispersão) da onda eletromagnética nos primeiros metros do perfil de solo. Desta forma, a identificação do contato solo-rocha foi possível apenas com esta antena. Por outro lado, as antenas de menor freqüência, de 100 e 200 MHz, mostraram feições mais superficiais do subsolo, como a base do aterro e o lençol freático.

Conclusões

Neste trabalho demonstrou-se a capacidade do Radar de Penetração no Solo (GPR) em definir perfis contí-

nuos como parte de investigações geotécnicas para fins de Engenharia Civil. Tal aplicação foi bem sucedida se se considerar que feições importantes, como o contato solo-rocha, foram identificadas. No subsolo em questão, que apresenta uma espessa camada de aterro (embora limpo, isento de entulho e pedras), há uma perda considerável de energia na camada superficial, limitando a capacidade de penetração do método. Outra explicação para a perda de energia é a provável presença de água salgada nos poros das camadas de sedimentos e mesmo de solo residual.

A aplicação feita do GPR como ferramenta complementar em uma investigação geotécnica mostrou-se extremamente útil já que sondagens mecânicas fornecem dados apenas pontuais do subsolo. Sabe-se que a heterogeneidade e anisotropia dos materiais geológicos interferem enormemente na prática da Engenharia Civil, não apenas em problemas de fundações.

Referência Bibliográfica

Daniels, J.J. & Roberts, R.L., 1994 – Ground Penetrating Radar for Geotechnical Applications. Proceedings, XIII ICSMFE, New Delhi, India, pp 1-13.



Emprego do GPR na investigação morfológica dos solos dos tabuleiros costeiros no litoral norte do Estado da Bahia.

Marco A. B. Botelho, José M. Ucha, Geraldo S. Vilas Boas e Lucedino P. Ribeiro – IGEO/UFBA

Abstract

Experimental employ of Ground-penetrating radar to investigation of tablelands of north coastal at Bahia, Brazil

Nine profiles were studied along a catena developed on Barreiras Group sediments, in Fazenda Rio Negro, Entre Rios town (Bahia - Brasil). It was used, besides the analysis traditionally made, the search electromagnetic through GPR - Ground-penetrating radar. The objective of such a study was it of analyzing the level of answer of that tool in the acquisition of information about the features that happen in the underground, by means of comparisons of the radargramas and pedologic descriptions obtained in the area. The used equipment was a Geophysical Survey model, with antenna of 80 MHz. The results of the radargramas indicate that the antenna used is not the ideal for risings that demand larger detail of the most superficial layers, up to 1,0 depth meter. For the deepest layers it showed an excellent answer, mainly in the investigation in the occurrence of hardened layers, as the hardpan. The radargrametric analysis confirmed the existence of a process of transformation in Podzols, that happens accompanied by the hardpan and fragipan in depth.

Index terms: soil prospection, Ground-penetrating radar, soil genesis, coastal tablelands, Barreiras Group.

Introdução

O GPR (Ground-penetrating radar) ou Radar de Penetração no Solo é uma ferramenta empregada pela geofísica na prospecção geológica, na detecção de fraturas em maciços rochosos, de espaços vazios em rochas carbonáticas, em estudos geotécnicos e como teste não destrutivo na engenharia civil, entre outras aplicações. Embora tenha sido largamente difundida nos últimos dez anos, ainda tem sido pouco utilizada na ciência do solo. Pode trazer interessantes contribuições para o entendimento das distribuições e transições entre os tipos de solos, principalmente entre solos que apresentam alto grau de diferenciação morfológica, como é o caso dos processos de transformação podzólica. O método de investigação em solos pelo radar detecta as mudanças abruptas das propriedades dielétricas (Tomer et al, 1996). Assim, feições mais marcantes, como o aparecimento de

duripãs e fragipãs, são especialmente observadas ao longo do perfil obtido pelo radar.

O funcionamento do GPR se baseia na produção de um pulso eletromagnético de alta frequência, o qual é transmitido para o solo e sua resposta é registrada em intervalos de tempo muito pequenos (nanossegundos). A propagação desse sinal no solo depende das propriedades elétricas dos materiais, que são controlados, principalmente, pela umidade existente. As diferentes propriedades elétricas dos materiais são responsáveis pela geração dos sinais refletidos, que são detectados, amplificados, digitalizados e registrados em meio magnético. Quanto menor for a condutividade elétrica e a constante dielétrica do solo, maior será a penetração do sinal, permitindo o emprego de fontes com frequências mais altas e, conseqüentemente, com maior resolução. Solos arenosos e em condição insaturada são os melhores para a pesquisa com o radar (Davis & Annan, 1989). Os solos desenvolvidos sobre os tabuleiros costeiros no litoral norte do Estado da Bahia apresentam a transformação podzólica como uma feição comum, bem distribuída por todo o domínio dos sedimentos do Grupo Barreiras. Como principais classes de solos que ocorrem na região, temos os Latossolos Amarelos, os Argissolos Amarelos, os Argissolos Acinzentados e os Espodossolos. Esses solos, por suas características físicas, permitem um sucesso relativo na investigação através do radar, principalmente das camadas ou horizontes endurecidos existentes em subsuperfície, como os níveis de fragipãs e duripãs que, em alguns casos, são bastante espessos. No entanto, horizontes endurecidos mais próximos à superfície, como os horizontes coesos, não são detectados por baixas frequências, o que explica a não distinção dessas feições nos radargramas aqui apresentados.

Material e Método

Este estudo foi realizado na Fazenda Rio Negro, da Copener Florestal, no município de Entre Rios (BA). De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Cs, com temperatura média de 24 °C, precipitação média de 1280 mm. A área vem sendo cultivada com eucaliptos desde 1987.

A unidade lito-estratigráfica dominante é o Grupo Barreiras, de idade Plio-miocênica, composto por sedimentos terrígenos depositados por sistemas

fluviais entrelaçados e leques aluviais (Vilas Boas, 1996).

A topossequência selecionada possui 800 metros, e está inserida dentro de uma vertente com mais de 1.500 metros de extensão. Apresenta um sistema de transformação que se inicia em um Latossolo Amarelo argiloso, transiciona para um Argissolo Amarelo, passa para um Espodossolo, que ocupa uma área levemente abaciada no terço médio, e para um Latossolo Amarelo que, no final da vertente, grada novamente para um Espodossolo.

Os solos foram descritos segundo as normas e definições de Lemos e Santos (1996) e em alguns critérios utilizados por Ribeiro (1998). Para o presente trabalho, serão relatados apenas os dados morfológicos, relacionando-os aos perfis obtidos pelo radar.

O equipamento utilizado na pesquisa com o radar penetrante foi o Geophysics Survey Inc. modelo GPR SR system-2, com antena de 80 MHz de frequência, com comprimento de registro de 256 ns com 512 amostras por traço. O equipamento foi tracionado sobre toda a topossequência, registrando-se as principais feições para posterior abertura dos perfis. Foram selecionadas as profundidades de 15 e de 6 metros para a prospecção com o radar e de 2,0 metros para os perfis do solo. Adicionalmente foram efetuadas tradagens. Os radargramas obtidos formam um contínuo, com o final de cada imagem correspondendo ao início da imagem subsequente, propiciando uma visão completa do subsolo da topossequência. Para efeito de estocagem e facilidade no manuseio dos arquivos, utilizou-se para cada radargrama um volume máximo de 1,4 Mb.

Resultados

A descrição morfológica (Quadro 1) registra as principais propriedades dos perfis que podem ser relacionadas com a avaliação radargramétrica. A Figura 1 mostra o perfil topográfico da área pesquisada com a locação dos perfis e tradagens.

Uma descrição detalhada das características morfológicas é apresentada por Ucha *et al.* (2001)

Todos os horizontes fragipã e duripã, descritos por Ucha *et al.* (2001), estão em processo de degradação, com fraturas entre os blocos e desenvolvimento de raízes, não provocando a retenção das águas.

Como o GPR capta as principais diferenças no comportamento dielétrico do solo, feições como os blocos de duripã e de fragipã oferecem boas condições de reflexão das ondas eletromagnéticas. As imagens obtidas pelo GPR, ou radargramas, mostram claramente os domínios dos solos com duripã (Espodossolo e Argissolo), que oferecem comportamento diferenciado quando comparado com

o Latossolo, com o Argissolo ou com o Espodossolo sem as características fráguas/dúricas. Os solos transicionais sem a presença de horizontes endurecidos, como o Argissolo latossólico, não é diferenciado do Latossolo Amarelo, embora apresente teores de argila muito diferentes, sua distinção não foi captada pelo equipamento, provavelmente em função da frequência que foi utilizada, não possibilitando um maior detalhamento. Os padrões de reflexão das ondas eletromagnéticas de cada domínio podem ser analisados e suas características, depois de confrontadas com a morfologia, permitem a generalização sobre o restante da topossequência.

O radargrama que cobre os perfis P2 e P3 e as tradagens T1 (Argissolo Amarelo fragipânico) e T2 (Espodossolo duripânico) observados na Figura 2, mostra a existência de um refletor forte na profundidade de 3,0 m (tempo aproximado de 60 ns), com uma "quebra" de continuidade que tem início na distância de 50 m, surgindo com suave inclinação ascendente até atingir 1,5 m de profundidade em 120 m, seguindo até o final do radargrama. A mudança nítida no padrão de reflexão ocorre na porção abaixo desse refletor, que vai de 40 m até o final (170 m) do radargrama, está relacionada a existência das camadas de duripã. Entre 0 - 40 m de distância, o padrão de reflexão indica material sem refletor forte, ou seja, não há fragipãs espessos ou duripãs até esse ponto, indicando um volume aparentemente homogêneo. O horizonte coeso, embora existente, não é perceptível no perfil radargramétrico.

A diferença no padrão de reflexão exibido entre as distâncias 0 - 40 m e 40 - 170 m, no mesmo radargrama, mostra o domínio de duas porções de solos que possuem na presença do fragipã e do duripã o maior diferenciador: o Argissolo Amarelo coeso latossólico na primeira porção, o Argissolo Amarelo fragipânico e o Espodossolo duripânico na segunda e maior porção, recobrimdo a maior parte da Figura 2.

Abaixo do refletor são observadas linhas de difração em forma de "Vs" invertidos, em consequência das fraturas e da geometria do refletor (fragipã e duripã) que afetam a passagem das ondas para as partes mais profundas. O duripã não aparece de forma contínua, e mesmo quando apresenta grande espessura, em função do estágio de degradação que apresenta, possui um sistema de fraturas preenchidas por material friável, por onde as raízes penetram. Essa característica propicia as inflexões das ondas eletromagnéticas emitidas pelo radar e contribui para uma menor resolução das imagens obtidas.

A Figura 3 mostra o solo do tipo Espodossolo com duripã espesso e profundo (tradagem T3, em 207 m) transicionando para um Espodossolo sem duripã, que inicia em 290 m e se estende até os 310 m. O refletor

típico das camadas de duripã cessa de forma abrupta, num mergulho vertical de aproximadamente 60 cm num espaço de 8 m, reaparecendo após 20 m, voltando a exibir o padrão do duripã.

Na Figura 4, em 400 m, aparece o Argissolo Acinzentado com duripã (perfil P5) e, após 14 metros a jusante, o domínio já pertence ao Latossolo Amarelo sem horizontes endurecidos em profundidade (tradagem T4 em 420 m), o que caracteriza essas áreas de transição como zonas estreitas, com dificuldades na identificação dos vários tipos de solos que se superpõem.

Após o aparecimento do Latossolo Amarelo, observa-se que volta o Argissolo Acinzentado, que vai de 428 m à 450 m sem horizonte endurecido espesso, e segue com a presença do duripã até os 470 m finais do radargrama. Na Figura 5 esse padrão ainda permanece no seu início, passando para o domínio do Latossolo Amarelo (perfis P6 e P7), que se estende de 478 m até os 610 m finais. Esse padrão segue até os 635 m da Figura 6, onde transiciona para um Espodossolo com duripã (perfis P8 e P9), voltando a exibir o padrão do Latossolo na porção final do radargrama.

Conclusões

A investigação da subsuperfície do solo através do GPR mostrou resultados muito interessantes, permitindo a sua visualização de forma contínua ao longo da vertente. As informações radargramétricas mostraram-se fundamentais para o aprofundamento na pesquisa da gênese e das transformações dos solos dentro da análise integrada da topossequência. Além de poder reduzir os custos e o tempo necessários para uma avaliação desse porte, possibilita uma comparação das formas exibidas pelos perfis testemunhos e principalmente das transições entre os tipos de solos.

Para uma maior resolução radargramétrica das camadas mais superficiais, até 100 cm de profundidade, e mesmo para a obtenção de uma maior resolução das imagens sobre as passagens entre os horizontes/camadas subsuperficiais, a frequência das antenas utilizada nesta pesquisa não se mostrou adequada, sendo necessárias para uma pesquisa que objetive o recobrimento de todas as características do solo, mais dois conjuntos de antenas com frequências entre 400 e 900 MHz.

De uma forma geral, as diferenças mais perceptíveis nos radargramas estão relacionadas com a presença ou com a ausência de refletores fortes, representados nesta pesquisa pelos horizontes de duripã e de fragipã, que por sua vez, estão relacionadas com os processos de formação dos Argissolos e dos Espodossolos.

Agradecimentos

À Copener Florestal Ltda, pelo apoio e total cooperação.

Bibliografia

DAVIS, J. L., ANNAN, A. P. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. **Geoph Prosp.**, 37 : 531-551, 1989.

LEMONS, R. C., SANTOS, R. D. **Manual de coleta e descrição de solo no campo**. 3. ed. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 1996. 84p.

RIBEIRO, L. P. **Os Latossolos Amarelos do Recôncavo baiano: gênese, evolução e degradação**. FAPEX, Salvador, 99p. il. 1998.

TOMER, M. D., BOLL, J., KUNG, K. J. S., STEENHIUS, T. & ANDERSON, J. L. Detecting illuvial lamellae in fine sand using ground-penetrating radar. **Soil Sci**, S.I. 161 : 121 - 129, 1996.

VILAS BOAS, G. S. **Sedimentos terciários**. In: Mapa Geológico do Estado da Bahia - texto explicativo. BARBOSA, J. S. F. & DOMINGUEZ, J. M. L. eds. Salvador, Secretária de Minas e Energia do Estado da Bahia/SGM, 1996. p. 165-167.

UCHA, J.M., BOTELHO, M.A.B., VILAS BOAS, G.S., RIBEIRO, L.P., SANTANA, P. Uso do Radar Penetrante no Solo (GPR) na Investigação dos Solos dos Tabuleiros Costeiros do Litoral Norte do Estado da Bahia. Submetido à Revista Brasileira de Ciência do Solo (aceito para publicação em 2001).



Figura 1 - Topossequência esquemática de Entre Rios PERFIS:

P1: Argissolo Amarelo coeso latossólico
 P2: Argissolo Amarelo coeso fragipânico
 P3: Argissolo Amarelo fragipânico
 P4: Espodossolo cárbico hiperespesso
 P5: Argissolo Acinzentado duripânico
 P6: Latossolo Amarelo coeso
 P7: Latossolo Amarelo coeso
 P8: Espodossolo duripânico
 P9: Espodossolo duripânico

TRADAGENS:

T1: Argissolo Amarelo fragipânico
 T2: Espodossolo duripânico
 T3: Espodossolo duripânico
 T4: Latossolo Amarelo
 T5: Argissolo Acinzentado duripânico

RADARGRAMAS:

R1: Figura 2; R2: Figura 3; R3: Figura 4; R4: Figura 5; R5: Figura 6

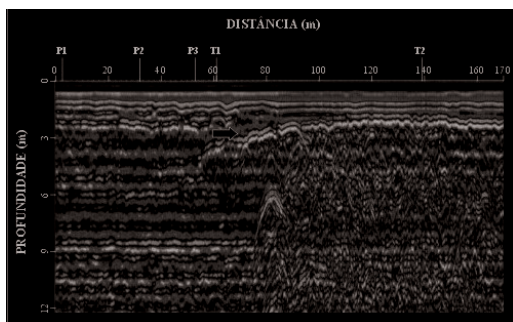


Fig. 2. Radargrama R1 mostrando Argissolo intergrade Latossolo entre a distância de 0-30 m e Argissolo Amarelo com fragipã entre 30-75 m. Após os 80 m aparece o Espodossolo com duripã. A seta indica o início refletor forte (duripã). O perfil P2 está localizado em 32 m e o P3 em 53 m. As tradagens T1 e T2 estão localizadas em 61 e 139 m, respectivamente.

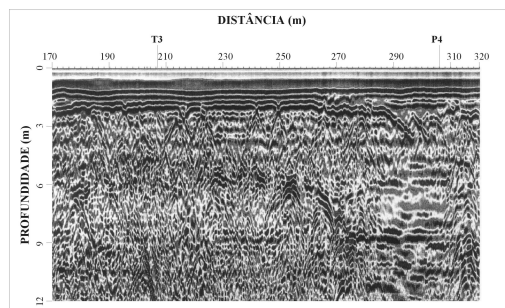


Fig. 3. Radargrama R3 mostrando Espodossolo com duripã entre as distâncias de 170-285 m e Espodossolo sem presença de pã entre 285-310 m. Perfil P4 localizado em 306 m. Tradagem T3 localizada em 207 m.

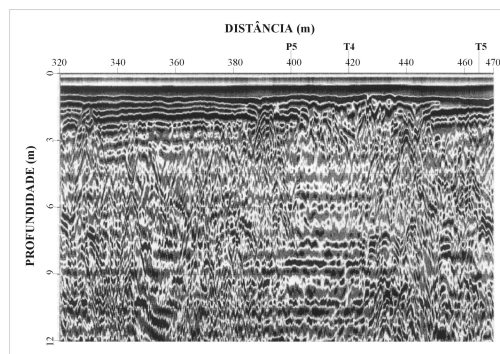


Fig. 4. Radargrama R3 mostrando sistema complexo de passagem de solos do tipo Espodossolo com duripã (320-346m) para Espodossolo com pã muito degradado (346-364m), gradando para Argissolo Acinzentado com pã (P5 em 400m) e para Latossolo Amarelo entre 400-428m (tradagem T4 em 420m). A área entre 428-450m volta a apresentar padrão de Argissolo Acinzentado sem pã e a partir de 450m volta o refletor forte, mostrando domínio do Argissolo Acinzentado com duripã (T5 em 465m).

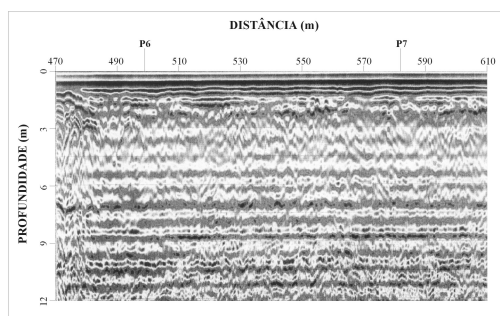


Fig. 5. Radargrama R4 mostrando o final do domínio do Argissolo Acinzentado (470-478 m) passando para o domínio do Latossolo Amarelo. Os perfis P6 e P7 estão localizados nas distâncias de 449 e 582 m.

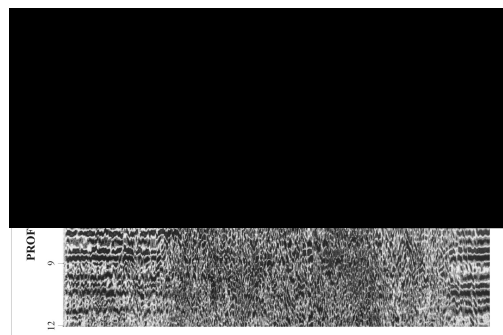


Fig. 6. Radargrama R5 mostrando o retorno do Espodossolo com fragipã e duripã (áreas mais escuras no centro da figura) e do Espodossolo com duripã (entre 744-778 m). As margens esquerda e direita do radargrama mostram o domínio dos Latossolos. Os perfis P8 e P9 estão localizados em 686 e 764 m, respectivamente.

GPR TECHNIQUE APPLIED TO MINERAL EXPLORATION OF GEODES IN BASALTS: agate geode deposits (RS, BRAZIL)

Angelo M. Hirakata ⁽¹⁾ & Adedir José Strieder ⁽¹⁾ (1) Labor. Modelagem Geológica, DEMIN-PPGEM-EE-UFRGS

Abstract

The agate geode deposits occurring in the Salto do Jacuí Mining District (RS, Brazil) are considered to be the world largest ones. They are hosted in tholeiitic basalts of Serra Geral Fm. (Paraná Flood Basalts). The agate geodes occur in highly vesiculated basalts, that are variably weathered. Agate geodes vary in size from 0,10 to 1,0 m, but usually show a mean diameter in the range of 0,25 – 0,40 m. Agate geodes are often completely massive, fulfilled by chalcedony, or by chalcedony and quartz. GPR technique was applied agate geode exploration.

Key words: GPR technique, agate geodes, basalts, mineral exploration, geophysics

Introduction

The Rio Grande do Sul state (Brazil) is one of the largest agate producer in the world (Agostini et al., 1998). The agate geodes occur in basaltic rocks of the Serra Geral Formation of the Paraná Basin. These basaltic rocks are characterized as Plateau (Flood) Basalt, similar to Karoo (Africa; Saunders & Harris, 1990) and Deccan (India; Joshee & Phadke, 1994) ones, where agate geodes are also recognized. The agate geodes are composed by a siliceous paragenesis: chalcedony, hyaline quartz, light amethyst. This type of deposit is distinguished as geodes in basalts (Bossi & Caggiano, 1974), as pointed out to occurrences in the north of Uruguay (Artigas and Taquarembó Departments).

The agate geode deposits in Rio Grande do Sul (Brazil) occur in the Salto do Jacuí Mining District (Fig. 01; Santos et al., 1998). The deposits are hosted in a specific vesicular basalt horizon that is over a glassy dacite and under a vesicular dacite as shown in figure 02 (Heemann, 1997). Agate geodes display simple geological features: i) they are often completely massive, ii) they show predominant siliceous paragenesis (chalcedony and quartz), and iii) they are host by variably weathered rocks (vesicular basalt). The geodes are often rounded to elliptical in shape, and have size ranging from 0,1 to 1,0 m; a mean size of 0,25 to 0,40 m in diameter can be characterized.

The aim of this paper is to present the results of GPR technique as applied for agate geode deposits in the Salto do Jacuí Mining District (Hirakata, 2000).

The discussion will be based on geological features of this type of ore deposit.

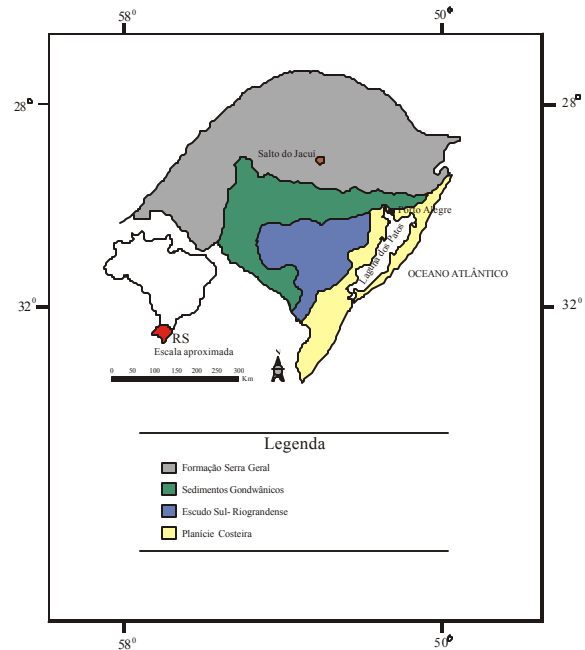


Figure 01 – Regional geological sketch for Salto do Jacuí Mining District localization (modified after Santos et al., 1998).

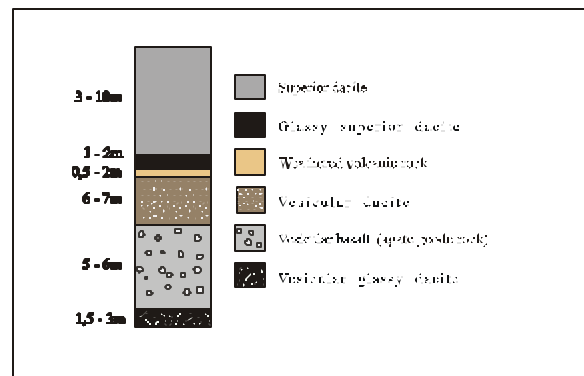


Figure 02 – Idealized cross section of an agate geode deposit in the Salto do Jacuí Mining District (RS, Brazil), showing the geode features and distribution (Heemann, 1997).

Geophysical (GPR technique) exploration procedures

The application of GPR technique in agate geode exploration is not a simple void problem, since agate geodes are fulfilled. But, it can be approximated to this problem in the sense that one must deal with the recognition of large pebbles in variably weathered rocks (host vesicular basalt). From the host basalt and geode characterization, one can easily recognize a large contrast in electrical properties to enable the application of GPR technique. In this way, the identification of diffraction hyperbola in radargrams depends on horizontal sampling intervals and antenna frequency. EM wave frequency, on the other hand, will have influence on depth penetration and structure for geode resolution.

The GPR investigation on agate geode deposits was conducted in two different steps: i) construction of an experimental trench simulating natural agate geode distribution in deposits, and ii) definition of a profiling grid in a deposit being exploited. In the experimental trench (Fig. 03), diverse agate geode types were distributed at different depth, and their position was determined through

theodolite for CAD modelling and integration with interpreted radargrams. The experimental trench results were used to analyse the correctness of interpretation in natural conditions (GPR profiling grid set at Garimpo do Angico, Fig. 05).

Discussion of experimental trench results

The GPR profiling over the experimental trench was conducted in different frequencies (1000, 400, 200 MHz), at different horizontal sampling intervals, sampling frequencies, etc... The GPR profiling was performed through lateral imaging, CPM and WARR (the last ones to determine wave velocities).

Figure 03 shows (a) 400 MHz radargram and zoom windows for details, and (b) agate geode position in the experimental trench. Figure 04 is one zoom window marked in figure 03a.

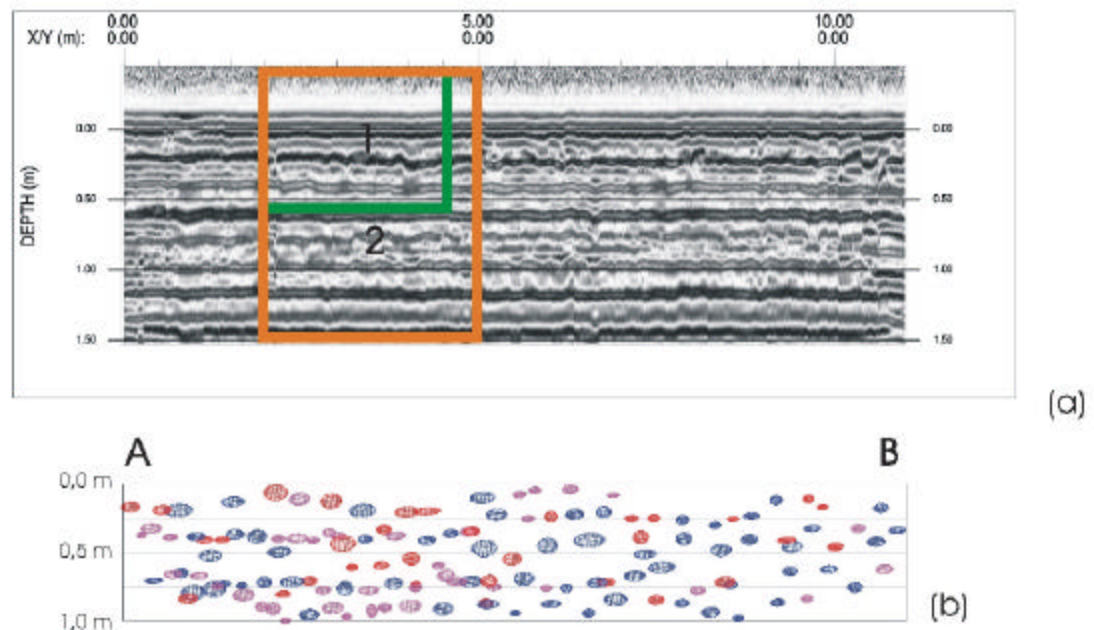


Figure 03 – 400 MHz radargram (a) for agate geode experimental trench (b) in Salto do Jacuí Mining District (RS, Brazil). Processing procedures for GPR profile include “set time zero”, “dewow”, and “filtering”. The colors in the trench indicate geodes in its central part (blue), close to the trench walls (red), and in the intermediate position (purple).

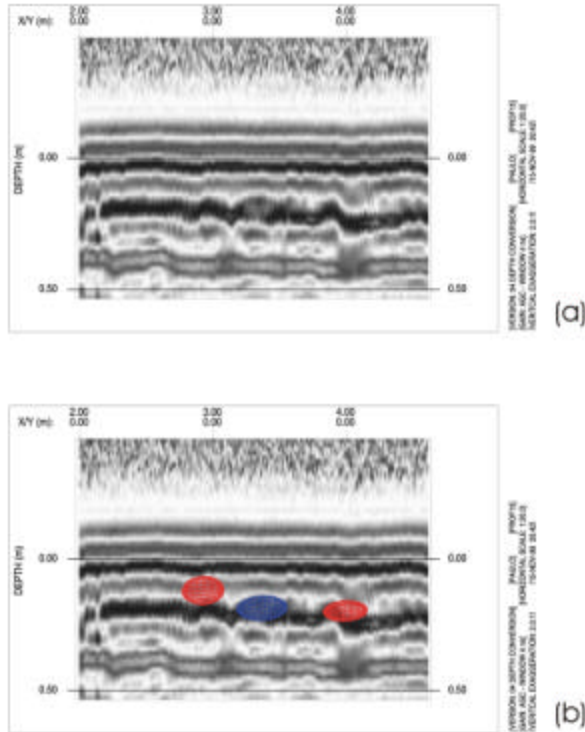


Figure 04 – Zoom window 1 of figure 03a. The processed radargram image is shown without (a) and with (b) agate geodes positioned in this part of the experimental trench.

It can be seen that agate geodes did not develop large and well-defined diffraction hyperbolas (Fig. 04). Any way, one can identify deflections in EM wave wiggles, contouring the geodes. These deflections are due to reflection and diffraction phenomena, and their resolution depend on applied EM frequency. Thus, it was observed a very close correlation between this type of deflection and the presence of agate geodes. However, it must be pointed out that, sometimes, the signal deflections appear at greater depth than the real geode depth; this can be explained by geode position in the trench: as GPR profiling was performed in the central part of the trench, geodes positioned in trench walls are at greater distance than geodes positioned right bellow the GPR antennas.

Discussion of Garimpo do Angico results

The profiling grid at Garimpo do Angico deposit is presented in figure 05. 37 GPR profiles were imaged at different frequencies, horizontal sampling intervals, and sampling frequencies (e.g. Fig. 06). The presence of partial hyperbola structures at crossing position positions of the profiles, as indicated in figure 05, were taken as an indication of geodes; some other

partial hyperbola structures were also drilled in order to confirm the agate geode in natural conditions.

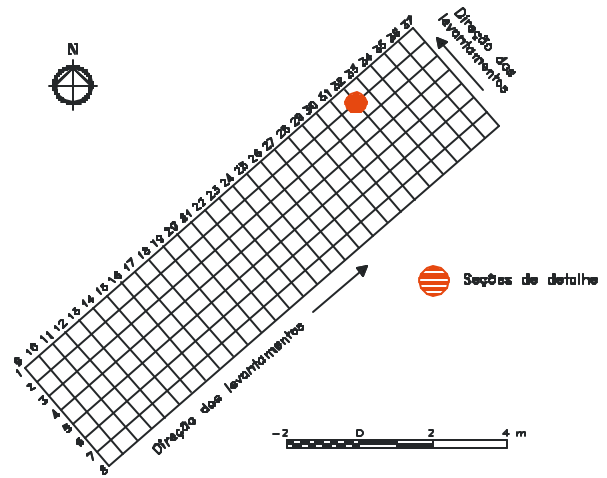


Figure 05 – Profiling grid set over Garimpo do Angico agate deposit (Salto do Jacuí Mining District, RS, Brazil).

Figure 06 shows some zoom windows of radargrams for longitudinal (a) and transversal (b) GPR profiles. The circle pointed at the radargram indicates an exemple of interpreted geode.

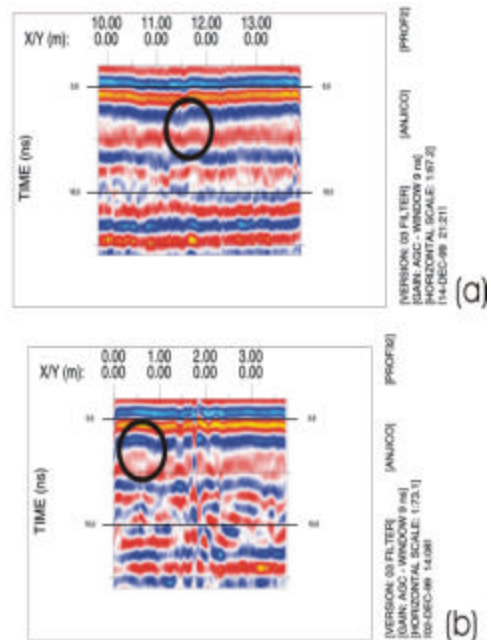


Figure 06 – 200 MHz Zoom windows of one radargram profiled at Garimpo do Angico (Salto do Jacuí, RS, Brazil). The interpreted position of the geode is at crossing line between longitudinal (a) and

transversal (b) profiles. Processing procedure include “set time zero”, “dewow”, and “filtering”.

Conclusions

GPR technique is adequate for agate geode exploration in Salto do Jacuí Mining District (RS, Brazil). However, some care must be paid in selecting EM frequency and in processing procedures. Low frequency EM, despite adequate for greater penetration, did not enable good geode resolution (EM wavelength greater than geode). On the other hand, migration is not a necessary step; migration removes hyperbola structures, and, as they are partially developed, can cause additional difficulties for interpretation.

Acknowledgments

The authors thank **FAPERGS** (Proc. N° 96/0383.2 and Proc. N° 99/0971.2) and **CNPq-PADCT** (Proc. N° 96/0383.2) for research grants.

Bibliographic references

- AGOSTINI, I. M.; FIORENTINI, J. A.; JUCHEM, P. L.; BRUM, T. M. M., 1998 *Ágata do Rio Grande do Sul*. DNPM, 272 p.
- BOSSI, J.; CAGGIANO, W. Contribuição a la geologia de los yacimientos de ametista del Departamento de Artigas (Uruguay). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, 1974, Porto Alegre, RS. *Anais....* Porto Alegre:SBG, 1974. v.3, p. 301-318.
- HEEMANN, R. **Geologia, controles e guias prospectivos dos depósitos de ágata na Região de Salto do Jacuí (RS)**. Porto Alegre, 1997. 107p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas da UFRGS.
- HIRAKATA, A. M. **Pesquisa mineral aplicada aos depósitos de ágata na Região de Salto do Jacuí (RS)**. Porto Alegre, 200. 100p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas da UFRGS.
- JOSH, S. P.; PHADKE, A. V., 1994. **The cavity minerals of the silica group occurring in the basalts of the Deccan volcanic province of India with special reference to their gemological properties and uses**. International Mineralogical Association, p. 188-189.
- SANTOS, E.L.; Maciel, L.C.; Filho, J.A.Z, 1998. **Distritos Mineiros do Estado do Rio Grande do Sul: DNPM-1? Distrito/Programa Nacional de Distritos Mineiros**.
- SAUNDERS, J. A.; HARRIS, C., 1990 **Origem-isotope zonation of agates from Karoo volcanics of the skeleton cost (Namibia)**. American Mineralogist, vol. 75 : p. 1205-1208.

GPR TECHNIQUE APPLIED TO MINERAL EXPLORATION OF GEODES IN BASALTS: amethyst geode deposits (RS, BRAZIL)

Adelir José Strieder, Debora Grala Roldão, Pablo Souto Palma and Diego Souza Pinto, MODELAGE/UFRG

Abstract

Geodes in basalts are not simply a void problem. The amethyst geodes are hosted by a massive, poorly fractured basalt. Amethyst geodes range from 0,1 to 1,0 m in diameter, and are variably filled with different paragenesis. GPR technique does permit imaging amethyst geodes and other structural features based on contrasting electrical properties of materials. GPR imaging resolution, penetration and wave propagation image features depend on EM wave frequency. High frequency EM wave (800 and 1000 MHz) has low penetration and high resolution, and they are suitable for amethyst geode detection, even the reflection and diffraction pattern produced. Low frequency EM imaging (250 MHz) imaging for amethyst geode can display reflection and diffraction pattern similar to that defined for high frequency ones, but can also image fracture systems crosscutting host basalts. These radargrams patterns can be used mainly for amethyst exploration and extraction planning.

Introduction

The mineral exploration techniques applied for geodes in basalts were ever a subject of debate. Purely geological exploration methods were tried (e.g.: Szubert et al., 1981; Correa et al., 1994), but remained on regional and semi-regional scale of investigation. Geophysical methods, mainly the electrical ones, were confronted with resolution and penetration problems due to the geodes size range (0,10 – 1,0 m of diameter).

The development of the GPR technique during the 1990-decade, mainly in Brazil, brought new perspectives on mineral exploration for geodes in basalts. Geodes in basalts are not simply a void problem. Geodes display a very large distinctive geological features: i) filling (from completely empty, to completely fulfilled), ii) composition (carbonate bearing, or quartz/chalcedony bearing), and ii) host rocks (unweathered, poorly vesicular basalts, or variably weathered, highly vesicular basalt). These features are related to different mineral district distinguished in the tholeiitic plateau basalts (Serra Geral Fm., Paraná Basin) in Rio Grande do Sul state (Brazil).

The aim of this paper is to present the results of GPR technique as applied for amethyst deposits in the Amethyst Mining District (Figure 01; Santos *et al.*, 1998). The discussion will be based on geological features of this type of ore deposit.

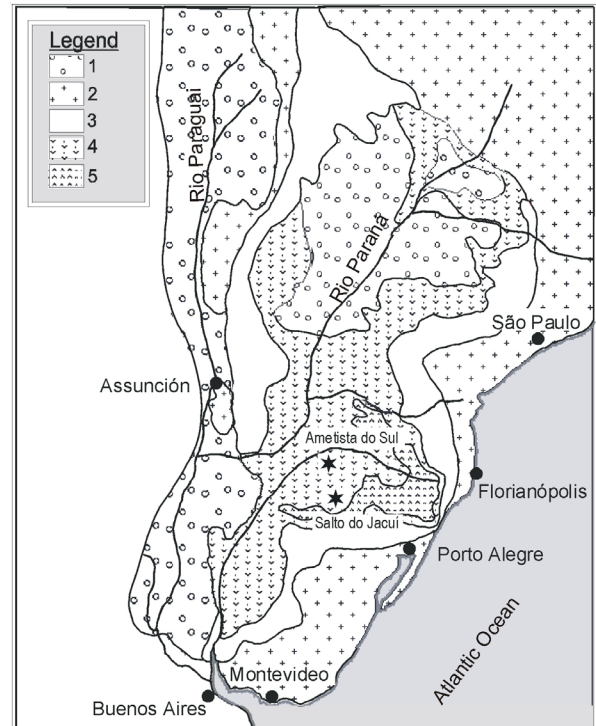


Figure 01 – Regional geological sketch for localization of Amethyst Mining District (RS, Brazil). 1- Post-volcanism sedimentary cover, 2- Paraná Basin basement, 3- Sedimentary rocks of Paraná Basin, 4- Basalts of Serra Geral Formation, and 5- Acid volcanic rocks of Serra Geral Formation.

Geological features of amethyst ore deposit

The amethyst ore is hosted in massive basalts occurring at approximately 410 m altitude in tholeiitic plateau flood basalts (Serra Geral Fm.) of Paraná Basin (Correa et al., 1994). Ore deposit scale geological features show that hosting massive basalt is emplaced between highly vesicular basalt layers (Fig. 02). The upper part of the massive basalt is very fragmented and does not host amethyst geodes. The geodes can i) be completely empty, or display a thin chalcedony and/or carbonate carapace; ii) display a thick chalcedony and quartz carapace; or iii) be completely fulfilled by quartz, or gibbsite. The geodes in the Amethyst Mining District are usually elongated in the vertical direction (0,3 to 2,0 m); horizontal diameter ranges from 0,1 to 1,0 m.

GPR Applied to Mineral Exploration

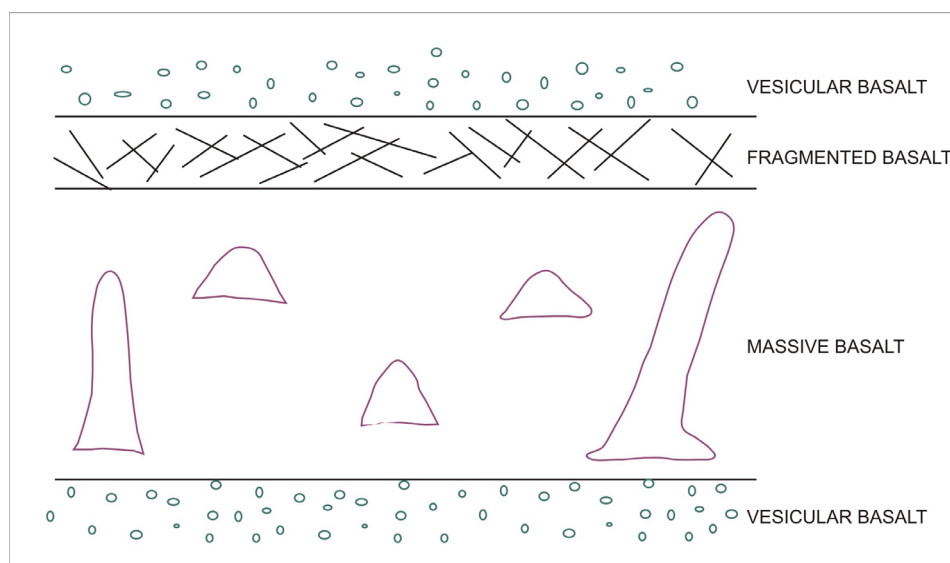


Figure 02 – Ore deposit main geological features for amethyst geodes in Amethyst Mining District (RS, Brazil).

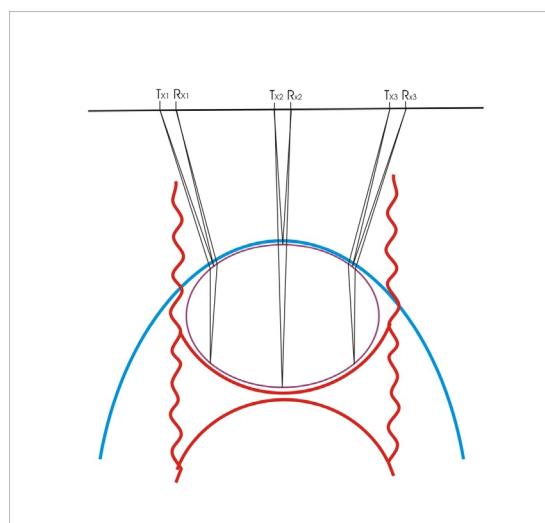
Concerns about GPR signal for amethyst geodes

The GPR technique, once deals with wave propagation phenomena in different frequencies, enables solving the resolution and penetration problems related to electrical methods (Dobrin and Savit, 1988). GPR technique does permit imaging structural features based on contrasting electrical properties of materials. GPR imaging resolution and penetration depend on EM wave frequency. The frequency parameter is specially sensible for amethyst geode signal.

The resistivity contrast between geodes and host basalts assures the application of GPR technique in any circumstance: for empty geodes (water or air filled), and for fulfilled quartz or gibbsite bearing geodes. However, in each of these cases, wave propagation velocities and reflection coefficients result in contrasting diffraction phenomena. Then, geode features are important for mineral exploration planning and interpreting, mainly for GPR technique.

High frequency EM wave (800 and 1000 MHz) has low penetration and high resolution. But, their short wavelength implies additional reflections and makes the signal interpretation more complex. Figure 03 summarizes the reflection and diffraction pattern developed for an amethyst geode which diameter is greater than the wavelength of the EM pulse. As can be seen, one can expect reflection to occur in the frontal part (basalt to geode interface), and also in the rear part (geode to basalt interface). Both parts of a geode produce different reflection pattern that can interfere each other some place.

Low frequency EM wave (250 MHz), on the other hand, displays deep penetration and low-resolution characteristics. At the same time, low frequency EM wave has a wavelength equal to or larger than the mean horizontal diameter of amethyst geodes. Then, 250 MHz GPR imaging for amethyst geode can display reflection pattern similar to that defined in figure 03 (very large geodes), or a single hyperbola (small geodes). 250 MHz GPR imaging can also show the influence of fracture systems crosscutting host basalts, and this will be an additional feature to take care in interpreting GPR images for amethyst geodes.



GPR Applied to Mineral Exploration

Figure 03 – Proposed reflection pattern developed by an amethyst geode with diameter greater than the EM wavelength.

GPR technique as applied to amethyst deposits: a preliminary discussion

GPR surveys in the Amethyst Mining District are being carried out on selected underground artesianal mines (locally named *garimpos*). These *garimpos* are mainly underground tunnels. Then, the GPR surveys are being done with shielded antennas, to avoid aerial reflections on tunnel walls. The surveying antennas are 250, 500, 800 and 1000 MHz, in order to ensure different penetration and resolution. The interpreted geodes on GPR images are marked for weekly inspection on production blocks. The procedure does permit to ascertain the quality of interpretation.

The GPR images surveyed at different *garimpos* showed all the expected reflections patterns discussed above. Figure 04 is an example 1000 MHz image, where one can identify the reflection pattern of figure 03. Figure 05 (250 MHz image), on the other hand, show an X reflection pattern due crosscutting faults; these faults displace off the host massive basalt in the production tunnel.

The weekly inspection of radargram images during 10 months is offering good results. On one hand, GPR technique is proven to be useful for amethyst geode exploration. The identification index is close to 75%; the wrongly interpreted geodes are more or less 10%, while non-identified geodes are 15%. However, as prospectors (locally named *garimpeiros*) usually say: “it is not necessary to identify precisely the geodes, but to know where they are and where they are not”. This point seems to be

enough, at a first moment, for extraction planning. Then, it is important to take into account deep penetrating EM wave (250 MHz) that can identify faults displacing geode host basalts. It is also important to point out the application of GPR tomography surveys, specially due to tunnels distribution.

Acknowledgments

The authors thank **FAPERGS** (Proc. N° 96/0383.2 and Proc. N° 99/0971.2) and **CNPq-PADCT** (Proc. N° 96/0383.2) for research grants.

Bibliographic references

- Corrêa, T.E.; Koppe, J.C.; Costa, J.F.C.; Moraes, M.A.L., 1994, Caracterização geológica e critérios de prospecção de depósitos de ametistas tipo "Alto Uruguai", RS: In: Cong. Brasileiro Geol., 38., Camburiu, SC. Anais. Camburiu:SBG, v. 2, p. 137-138.
- Dobrin, M.B. and Savit, C.H., 1988, Introduction to geophysical prospecting: 4^a ed., McGraw-Hill, Inc., New York (USA), 867p.
- Santos, E.L.; Maciel, L.C.; Filho, J.A.Z., 1998. Distritos Mineiros do Estado do Rio Grande do Sul: DNPM-1° Distrito/Programa Nacional de Distritos Mineiros.
- Szubert, E.C., 1981, Critérios de correlação entre derrames basálticos na província vulcânica mesozóica da Bacia do Paraná: Acta Geol Leopold., São Leopoldo, E.T n°13, vol.5(9), p.3-10.

GPR Applied to Mineral Exploration

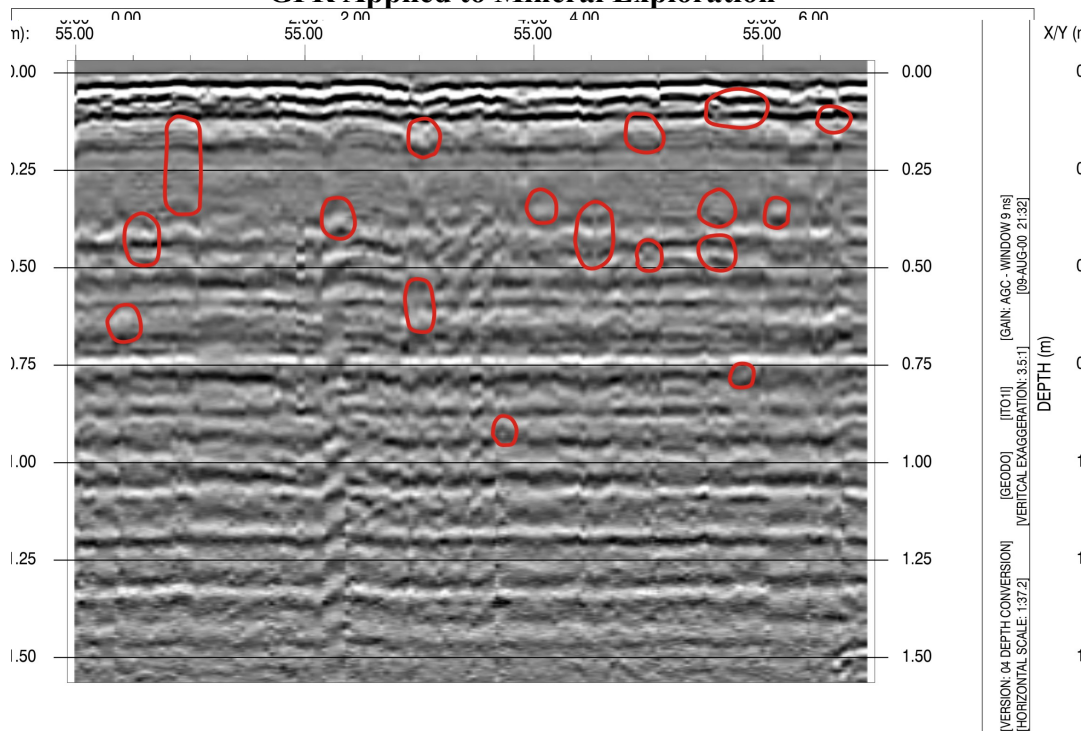


Figure 04 – 1000 MHz image radargram showing reflection pattern for amethyst geodes with diameter larger than EM wavelength. Processing procedures include set time zero, dewow, filtering and migration.

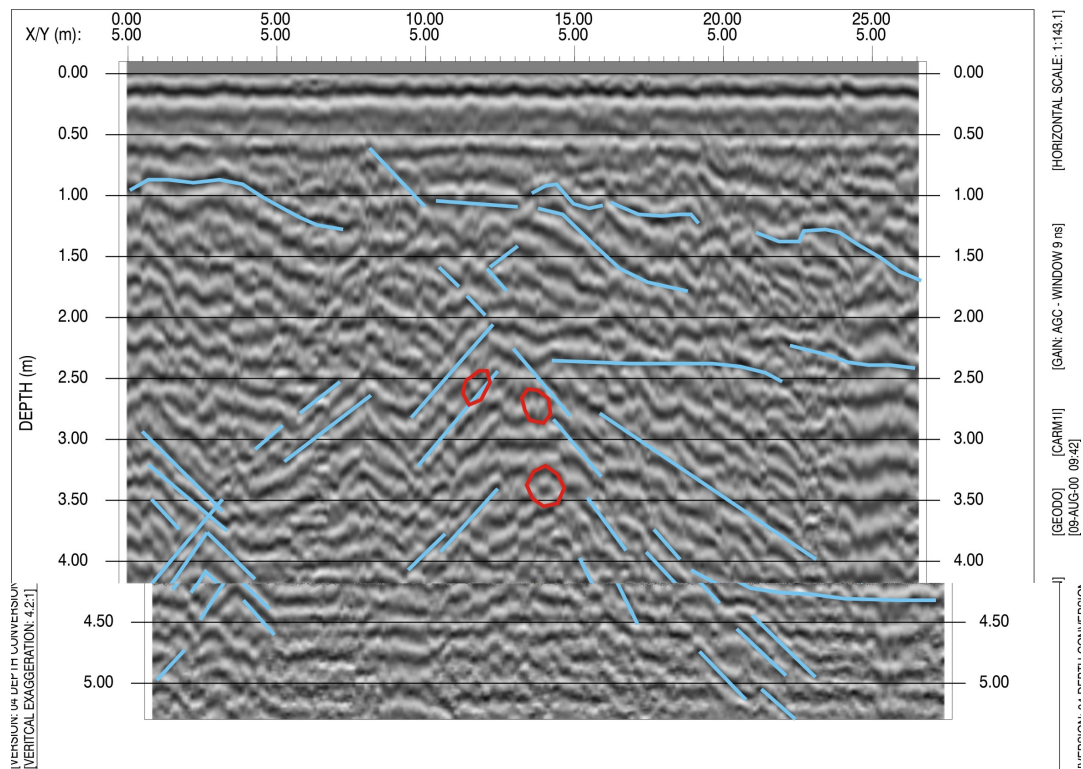


Figure 05 – 250 MHz image radargram showing crosscutting faults that displace geode host basalt. Processing procedures include set time, zero, dewow and migration.

Imageamento com GPR de fraturas em aquíferos fissurais: o caso de Equador/RN

Carlos César Nascimento da Silva^{1,2}, Pedro Xavier Neto^{1,3}, Walter Eugênio de Medeiros^{1,4}, Emanuel Ferraz Jardim de Sá^{1,4}

1-PPGG/UFRN, 2-Bolsista CAPES, 3-PETROBRAS UN-RN-CE, 4-Pesquisador CNPq

Resumo

O trabalho aqui apresentado visa indicar o GPR (*Ground Penetrating Radar*) como método de prospecção de feições geológicas em alguns terrenos cristalinos capeados por coberturas sedimentares. Em diversas porções da região NE do Brasil, a exemplo de Equador-RN, as características geológicas e climáticas favorecem o uso do GPR. Estas características se refletem basicamente sob a forma de um capeamento sedimentar pouco espesso e relativamente resistivo, o qual não interfere efetivamente na propagação das ondas eletromagnéticas geradas pelo equipamento.

Com base no truncamento de refletores subhorizontais referentes ao bandamento local, pôde-se identificar diversos sistemas de fraturas. Estes fraturamentos diferem entre si basicamente com respeito ao mergulho (desde baixo ângulo a subverticalizado) e ao tipo de conectividade.

A consistência dos resultados com GPR é atestada pelos dados dos levantamentos de eletroresistividade e VLF elaborados no mesmo local.

Introdução

O objetivo principal deste trabalho é apresentar o GPR (*Ground Penetrating Radar*) como um método geofísico capaz de imagear estruturas geológicas de substratos cristalinos sob capeamentos sedimentares. No caso em particular, tentou-se visualizar fraturas potenciais ao armazenamento de água.

É fato conhecido que a principal vocação do GPR é para meio ambiente e geotecnia. Sua aplicação em geologia ainda é secundária. Isto se deve essencialmente à presença de capeamentos condutivos cobrindo o substrato rochoso, os quais promovem a atenuação das ondas eletromagnéticas.

Contudo, na região NE do Brasil, ocorrem locais com características geológicas e climáticas que referendam o uso do GPR. Tais locais são caracterizados por: baixa pluviosidade; topografia elevada; rede de drenagem preferencialmente controlada por fraturas, associada a aluviões pouco desenvolvidos; solos resistivos (como aqueles provenientes de rochas quartzíticas) e pouco espessos. A região de Equador-RN, dentre diversas outras ao

longo de todo o Nordeste brasileiro, possui essas características

Localização da área de estudo

A área escolhida para os levantamentos geofísicos encontra-se situada nas proximidades da cidade de Equador, porção centro-sul do Estado do Rio Grande do Norte (Fig. 1).

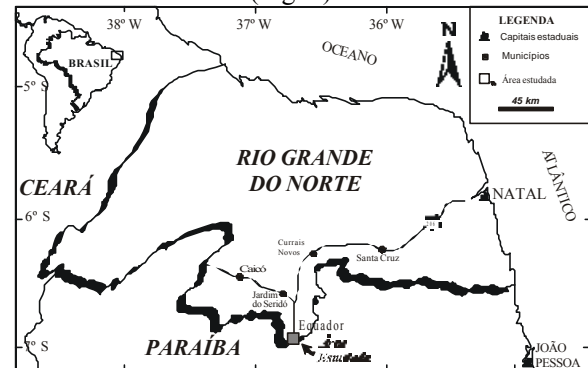


Fig. 1 – Localização geográfica da área de estudo.

Na área em questão há uma bateria de nove poços, dentre os quais, aqueles que apresentam melhores vazões, são responsáveis pelo abastecimento do município de Equador-RN. Localmente, capeando as rochas quartzíticas, há uma ampla cobertura sedimentar predominantemente quartzosa, com espessura média em torno de 1 metro.

Metodologia de Trabalho

Sendo o levantamento geofísico uma tentativa de imagear fraturas, foi realizado previamente um levantamento geológico-estrutural superficial de detalhe (Nascimento da Silva e Jardim de Sá 2000). Dentre outros aspectos, foram identificados nas rochas quartzíticas da área, um bandamento de baixo ângulo para SW e fraturas dispostas segundo as direções NE, NW e E-W.

Baseado em dados geológico-estruturais e na presença de poços com bons resultados do ponto de vista da vazão ao longo de estruturas na direção NW, foi percebido que estas fraturas apresentam maior tendência a estarem saturadas em água. Em função disto, a linha de levantamento geofísico foi realizada transversalmente à estruturação NW (Fig. 2).

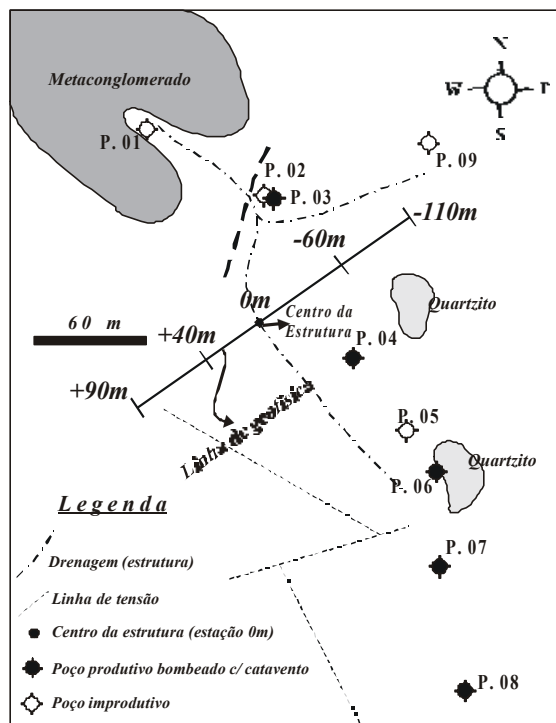


Figura 2 – Mapa de situação da linha de levantamento geofísico, transversal à estrutura/drenagem NW.

Todos os métodos utilizados (GPR, VLF e eletroresistividade) foram executados ao longo da mesma linha (vide Fig 2), de tal forma que os resultados obtidos pudessem ser comparados. Os perfis de GPR e eletroresistividade foram realizados entre as estações -60 e 40 m, enquanto que o perfil de VLF foi executado entre as estações -110 e 90 m.

Para os levantamentos geoeletricos, optou-se pelo arranjo quadripolar Schlumberger, utilizando um equipamento ABEM, modelo Terrameter SAS 300C. Foram executadas ao longo da linha de geofisica, seis sondagens distribuídas homoganeamente a uma distância de 20 metros. A abertura dos eletrodos de corrente (AB) variou de 1 a 100 m, com aberturas máximas de eletrodos de potencial (MN) de 2,5 m, respeitando sempre a relação $AB/5 \text{ MN}$. A interpretação foi realizada com base no programa computacional de Guptsarma (1982).

No método VLF, em função do fraturamento NW, optou-se por escolher a estação NAA, localizada em Cutler, Maine, nos EUA. Esta estação emite ondas eletromagnéticas na frequência de 24,0 kHz, com potência de 1.000 kw. Foi utilizado um equipamento ABEM, modelo WADI.

A profundidade de investigação do VLF em torno de 17 m pôde ser calculada pela equação de Wright (1988). Esta profundidade é compatível com a

profundidade de investigação da eletroresistividade e do GPR.

Para o caso do levantamento com o GPR, utilizou-se um sistema SIR-2, da GSSI (*Geophysical Survey Sistem Inc.*) e antenas com frequências centrais de 40, 80, 200 e 400 MHz. As duas primeiras antenas foram utilizadas no modo de coleta pontual, com pontos de medidas regularmente espaçados a cada 0,5m; as duas últimas foram utilizadas no modo de coleta contínuo. Contudo, a antena bistática com frequência nominal de 40 MHz forneceu resultados mais satisfatórios.

Resultados Obtidos

Sondagens elétricas indicam que a resistividade aparente mínima do terreno é em torno de 100 Ohm.m. Este valor apóia a utilização do GPR sem haver atenuação considerável das ondas eletromagnéticas

A Figura 3 representa a seção interpretada da função resistividade aparente, a qual foi obtida em função de SE's. Nesta, podem ser observadas diversas feições condutivas lineares correlacionadas a fraturas saturadas em água. A resistividade aparente destas feições varia de 200 a 800 Ohm.m. Uma estrutura de baixo ângulo de mergulho para 055° Az pode ser observada a partir da estação 0 m, a qual possivelmente interconecta-se com uma outra estrutura, agora verticalizada, observada próximo à estação -30 m. Uma segunda feição verticalizada ocorre próximo à estação -20 m. Tentativamente, podem ser traçadas estruturas de baixo mergulho para 235° Az ao longo de toda a seção geoeletrica.

As Figuras 4a e 4b ilustram com uma maior clareza de detalhes as feições observadas na seção geoeletrica. Estas figuras representam respectivamente os radagramas processados não interpretado e interpretado, registrados com a antena de 40 MHz. Com base em difrações foi ajustada a velocidade média de de 0,11 m/ns para a onda eletromagnética naquele substrato. Esta velocidade resulta em uma profundidade de investigação, sem perda considerável de resolução, na ordem de 24 m. Nos radagramas, a visualização de estruturas é realizada através do truncamento de refletores normalmente subhorizontalizados, os quais representam geologicamente o bandamento de baixo ângulo dos quartzitos (em torno de 10° para NW). Podem ser observados diversos sets de fraturas, dentre os quais destacam-se aqueles de baixo ângulo para 055° Az . A interconectividade deste sistema de fraturamento com feições verticalizadas ocorre ao longo de todo o radagrama. Outras feições de baixo ângulo, porém com mergulho para 235° Az , podem ser observadas; o

mergulho elevado, bem superior ao bandamento dos quartzitos, atesta a sua classificação como fraturas. Outra feição capaz de ser visualizada a partir dos radargramas é a morfologia e espessura da calha de sedimentos disposta sobre os quartzitos.

O método VLF identificou porções anômalas ao longo da linha. Estas regiões são correlatas às fraturas observadas a partir dos métodos da eletroresistividade e GPR. Foi utilizado o filtro projetado por Karous e Hjelt (1988) para serem extraídas informações mais importantes do ponto de vista interpretativo. Uma região anômala localizada nas estações -30 e 30 m, com picos positivos nas bordas foi identificada e correlacionada a fraturas.

Considerações Finais

A identificação de estruturas geológicas em terrenos cristalinos a partir do método GPR pode ser realizada sem grandes dificuldades em determinadas porções do semi-árido do NE brasileiro. Nestas regiões, condições climáticas e geológicas que favoreçam a formação de capeamentos relativamente resistivos são importantes para a boa resposta do método.

A representação dos dados sob a forma de uma imagem de alta resolução permite a definição precisa das feições geológicas em subsuperfície. A definição exata da profundidade de cada estrutura pode ser realizada a partir da definição adequada do campo de velocidades da onda eletromagnética no meio.

Ainda não é bem entendido o modo de percolação d'água ao longo de zonas fraturadas, contudo a caracterização do tipo de fratura (mergulho por exemplo), dos graus de fraturamento e interconectividade ou da relação com outras estruturas, tal como o bandamento, pode fornecer subsídios para a resolução do problema.

Ao longo dos radargramas esta caracterização pôde ser realizada a partir da análise do padrão dos marcadores e o seu truncamento por refletores, os quais normalmente representam zonas fraturadas. Neste caso em específico, fraturas tidas classicamente como impróprias à percolação de fluidos, como aquelas de baixo ângulo, apresentam um papel importante. Estas podem funcionar como condutos, os quais armazenam ou, alternativamente, interconectam a superfície (ou zona de recarga) com fraturas verticalizadas.

A morfologia da cobertura sedimentar no que diz respeito à espessura e simetria de suas bordas, muitas vezes é de fundamental importância para a recarga de fraturas. O método se mostrou eficaz na determinação destes parâmetros.

Contudo, em um trabalho sistemático, diversas frequências de antenas podem ser utilizadas: frequências mais altas são indicadas para uma maior resolução de feições próximas à superfície, como a cobertura sedimentar enquanto que as de mais baixa frequência imageiam melhor zonas fraturadas mais profundas (em torno de 25 m, por exemplo) em função da maior penetrabilidade das ondas eletromagnéticas.

A utilização de métodos auxiliares, tais como o já consagrado eletroresistividade e o VLF, atestaram os dados provenientes pelo GPR e sua eficiência na caracterização de estruturas. Mais especificamente, no caso da eletroresistividade, várias feições tanto de baixo quanto de elevado ângulo de mergulho, puderam também ser observadas. Além disto, em função do GPR ser um método geofísico não galvânico e que pode ser executado rapidamente, este se mostra bem mais eficiente do que a eletroresistividade.

Como proposta para futuros levantamentos, sugere-se testar o potencial das características de polarização da onda eletromagnética na localização de fraturas. Neste caso, a polarização pode se dar a partir de duas formas distintas: modo cross-pole, no qual as antenas receptora e transmissora são colocadas perpendicularmente entre si e modo co-pole, onde são realizados dois levantamentos ao longo da mesma linha, sendo um com as antenas dispostas paralelamente à linha, e outro, perpendicularmente.

Referências

- Nascimento da Silva e Jardim de Sá, 2000. Fracture chronology and neotectonic control of water wells location in crystalline terranes: an example from the Equador Region, Northeasternmost Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **30**(2):346-349.
- Guptsarma, D. 1982. Optimization of short digital linear filters for increased accuracy, *Geophys. Prosp.*, **30**: 501-514.
- Wright, J.L. 1988. *VLF Interpretation Manual*. 85p.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos alunos do PPGG/UFRN, Jesimael Avelino da Silva, Josibel Gomes de Oliveira Júnior e Cristina Aparecida Domingueti no auxílio de campo, bem como ao PPGG pelos equipamentos fornecidos e apoio financeiro nas diversas fases de elaboração deste trabalho.

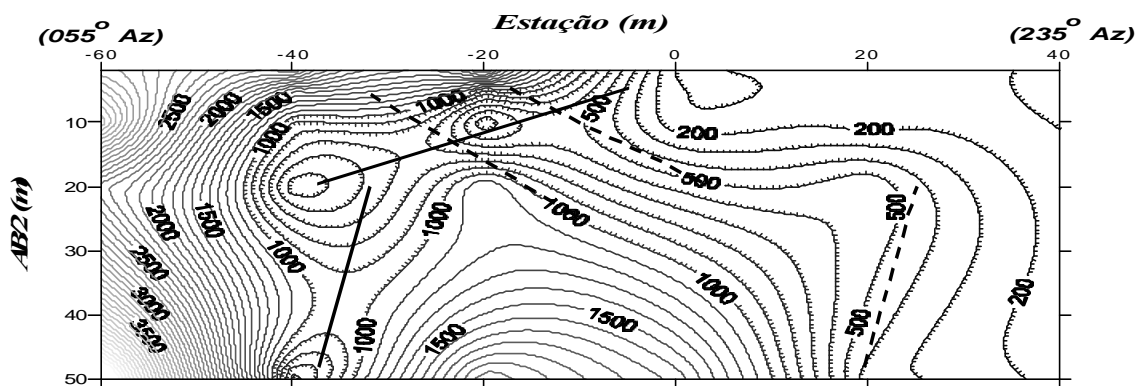


Fig. 3 – Seção geolétrica transversal à estrutura NW (valores em Ohm.m). As linhas contínuas representam estruturas condutivas facilmente perceptíveis. Em tracejado, estruturas correlacionadas com base em outros métodos.

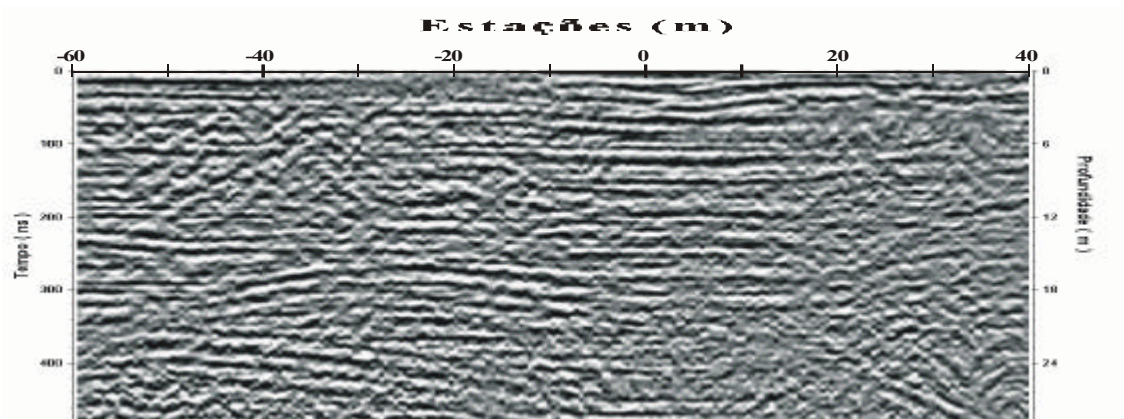


Figura 4a – Seção de GPR não interpretada – frequência de 40 Mhz

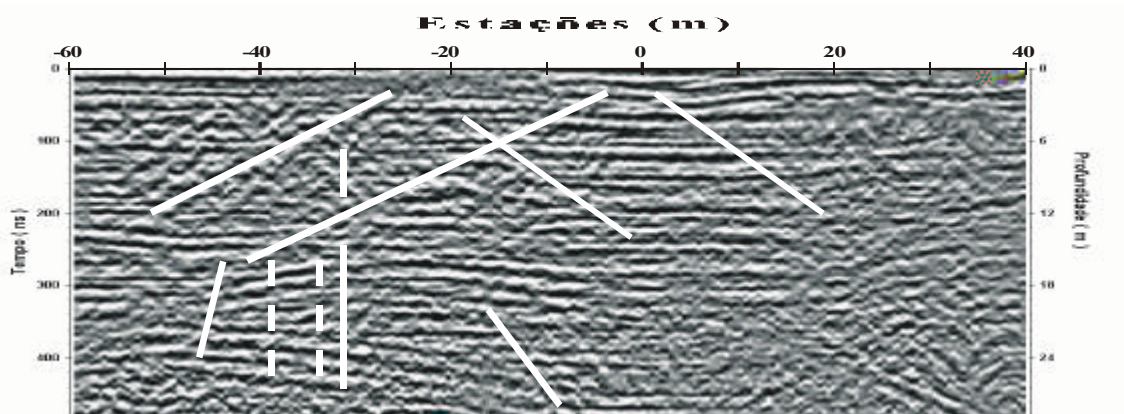


Figura 4b – Seção de GPR da figura 4a interpretada . Em contínuo, estruturas facilmente perceptíveis em tracejado, fraturas inferidas.



Levantamento Experimental GPR no Rio Taquari, Bacia do Pantanal Matogrossense

Luiz Antonio Pereira de Souza¹, Jorge Luís Porsani², Osni Corrêa de Souza³ & Leandro Moutinho⁴

¹ Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) – Email: laps@ipt.br

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

³ Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA Gado de Corte – Campo Grande/MS)

⁴ Aluno de Mestrado em Geofísica – IAG/USP

Abstract

An experimental investigation has been carried out using GPR - Ground Penetrating Radar methods in Taquari River, located in Pantanal Matogrossense Basin - Brazil, in order to understand the silting process on the river and also to map the channels along the river, that is essential to local navigation. Many GPR profiles have been carried out in Lower Taquari river, near Santa Maria and Porto Santa Luzia farms. Preliminary interpretations were encouraging, allowing to locate the channels of the river and the occurrence of very big sand deposits, showing the viability of GPR application to Taquari river sedimentation process studies. All data collected are now being analysed in order to understand the local dynamic sedimentation process, as part of a MSc. Dissertation in progress by an IAG-USP student. Results from these geophysical investigations are going to serve as guidance to multidisciplinary studies of Pantanal Program, by government of Mato Grosso do Sul State.

Introdução

A Bacia Hidrográfica do Taquari, localizada na Região Centro Oeste do Brasil, é uma das principais drenagens formadoras da Alta Bacia do Rio Paraguai. Ela abrange a região de planaltos, também denominada de Bacia do Alto Taquari e a Planície Pantaneira. A bacia tem como dreno principal o rio Taquari, cuja nascente localiza-se no Estado do Mato Grosso, no município de Alto Taquari numa altitude de 860m e, após percorrer 40km nesse Estado, chega ao Estado de Mato Grosso do Sul.

A intensificação dos processos erosivos que ocorrem na Bacia do Alto Taquari, devido à ocupação agrícola intensificada a partir da década de 70, tem sido apontada como o mais grave impacto ambiental e sócio-econômico, devido ao assoreamento e inundações do rio Taquari na Planície Pantaneira, que é representada por um leque aluvial quaternário de aproximadamente 50.000km², ocupando cerca de 36% da área total do Pantanal brasileiro.

Um dos problemas da Bacia do Alto Taquari está relacionado com os processos erosivos, que têm como causas principais o desmatamento e o desconhecimento do comportamento evolutivo dos processos erosivos em escala local e regional. Os

desmatamentos ocorrem devido à necessidade de plantio de subsistência da comunidade regional

O uso inadequado de ambientes vulneráveis a erosão intensifica os processos erosivos que evoluem na forma de voçorocas. Essas voçorocas, podem ser consideradas como o mais sério problema erosivo da região. Como consequência imediata tem-se o aumento do volume de materiais transportados e depositados nas calhas dos rios e as alterações hidrológicas.

Na Planície Pantaneira, os principais problemas estão relacionados com o assoreamento generalizado do leito do rio Taquari, na região do leque aluvial, e com as alterações hidrológicas do rio, representadas pelas mudanças de curso e o regime de inundação, que por sua vez interfere na atividade pecuária, principal atividade sócio-econômica do Pantanal.

As investigações geofísicas utilizando o método GPR - *Ground Penetrating Radar* têm como objetivos subsidiar os estudos multi disciplinares sobre a sub-componente Bacia do Taquari, do Programa Pantanal, do Governo do Estado de Mato Grosso do Sul (Araújo et. al., 1999).

Aspectos Hidrológicos

O rio Taquari tem cerca de 1000km de extensão e é um dos principais rios que cortam a bacia do pantanal matogrossense. Segundo Souza (1998), ao longo de seu curso, existem basicamente três características deposicionais em locais distintos: o primeiro local corresponde ao início dos processos deposicionais (médio Taquari), o segundo local corresponde ao ponto médio do rio entre o início da deposição e a planície pantaneira inundada (baixo Taquari) e o terceiro local corresponde à planície pantaneira constantemente inundada (baixo Taquari).

Na posição média entre o início da deposição e as áreas constantemente inundadas, o rio Taquari deixa de ser meandrante, mas ainda corre encaixado. Estas características ocorrem próximo à Fazenda Santa Maria, localizada às margens do rio Taquari e distante cerca de 160km de Coxim. Neste trecho, o rio apresenta uma energia média, e os processos erosivos não são intensos, ocorrendo principalmente a deposição dos sedimentos menos grosseiros.

A planície pantaneira, constantemente inundada, é caracterizada pelo local onde o rio Taquari deixa o seu leito, ou seja, onde o rio deixa de correr encaixado, e passa a inundar as regiões

Levantamento Experimental GPR no Rio Taquari, Bacia do Pantanal Matogrossense

vizinhas. Nas proximidades da Fazenda Porto Santa Luzia, distante cerca de 250km de Coxim, tem-se o início das inundações da planície. A partir daí, o nível da água do rio está acima do nível geral da planície de inundação. Os processos deposicionais ocorrem em função da capacidade e da competência do fluxo de água, sendo que os sedimentos mais grossos, tipo areia, permanecem em transporte no leito do rio e próximo às margens, e os sedimentos mais finos, tipo silte e argila, são transportados seguindo o fluxo das águas tanto no rio como na planície de inundação, podendo ser depositados em depressões afastadas do rio. Os freqüentes arrombamentos de margens, também conhecidos como “boca”, no entanto, permitem alterações hidrológicas do Taquari. O redirecionamento parcial do fluxo do rio, através de canais distributivos, alteram o regime de inundação e, conseqüentemente, de deposição em vastas áreas da planície de inundação. Estes processos permitem uma contínua evolução geomórfica e geológica do leque aluvial do rio Taquari.

Aquisição e Processamento dos Dados GPR

Os trabalhos de campo foram realizados na região do baixo Taquari, planície do pantanal matogrossense. Participaram deste levantamento experimental os pesquisadores do IAG/USP, IPT e EMBRAPA-MS. Os dados foram adquiridos em duas áreas distintas: uma de frente à Fazenda Santa Maria e a outra próximo à Fazenda Porto Santa Luzia. A Figura 1 mostra o mapa de localização das áreas pesquisadas.

Os dados GPR foram adquiridos na forma de perfis de reflexão, longitudinais e transversais ao rio Taquari, utilizando-se antenas com freqüências centrais em 50, 100 e 200MHz. Devido o caráter experimental desta pesquisa, vários parâmetros de campo foram testados, tais como, *stack* e o intervalo de tempo de aquisição.

Para a conversão dos perfis GPR obtidos em tempo (nanossegundos) para perfis em profundidade (metros), foi utilizada a velocidade de 0,05m/ns. O cálculo da velocidade de propagação da onda eletromagnética na água foi realizado através das medidas da profundidade do fundo do leito do rio e da leitura no radargrama do tempo duplo do sinal eletromagnético na água (Porsani, 1999). Para este trabalho, a título de ilustração, foram selecionados dois perfis GPR, um adquirido na Fazenda Santa Luzia, e o outro na Fazenda Porto Santa Luzia (**Figuras 2 e 3**).

Os perfis GPR foram posicionados utilizando-se um equipamento de GPS diferencial modelo Pro-XL fabricado pela Trimble, pertencente ao IPT.

Os dados foram adquiridos com o equipamento Sueco Ramac/GPR (Mala/ GeoScience) pertencente ao Departamento de Geofísica do IAG/USP. O equipamento foi adaptado numa embarcação alugada no local e as antenas foram colocadas em catamarãs, projetados e desenvolvidos pelos pesquisadores do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo. Alguns resultados de levantamentos GPR em lâmina d'água, podem ser encontrados em Sauck, 1998; Aquino et al 1998; Galli & Souza, 1999.

Os perfis de reflexão foram processados utilizando-se o software Gradix (Interpex). O processamento básico utilizado consistiu das seguintes etapas: i) aplicação de filtro dc (correção do *wow*, que é um ruído de baixa freqüência); ii) correção do tempo zero; iii) aplicação de ganhos no tempo (filtro do tipo SEC - *spherical exponential compensation*, linear, constante e programado); iv) aplicação de filtro do tipo passa banda e; v) aplicação de filtro espacial *moving average* (3 traços).

Discussão Preliminar dos Resultados

Os perfis apresentados neste trabalho mostram que a lâmina d'água do rio Taquari (inferior a 10m nos trechos investigados), não foi obstáculo à propagação do sinal eletromagnético emitido pelas antenas de 50, 100 e 200 MHz.

Os dois radargramas apresentados neste artigo (Figura 2 e 3) mostram imagens claras e detalhadas da superfície de fundo do rio. O primeiro refletor observado corresponde à topografia do fundo do rio; o segundo, mostrado de forma mais nítida no registro da Figura 2, corresponde à reflexão múltipla do primeiro refletor.

As reflexões rasas observadas nos perfis correspondem aos locais intensamente assoreados e referem-se aos bancos de areia, que hoje ocupam grande parte do curso do rio Taquari. As partes mais profundas correspondem aos canais recentes do rio. Estes canais são de ocorrência bastante restrita, face ao intenso processo de assoreamento que assola a região nestas últimas três décadas.

Nota-se que a penetração do sinal de radar, além do leito do rio, com as três antenas utilizadas, limitou-se a 5-6m, sem alcançar um refletor que eventualmente pudesse ser correlacionado ao embasamento local. Todavia, a boa qualidade dos registros, permite supor que o embasamento nos trechos estudados está além dos 5-6m observados.

Por outro lado, os dados obtidos permitem analisar a geometria do refletor correspondente à superfície de fundo, que pode conter informações importantes sobre os tipos de sedimentos (arenosos, argilosos, etc.), contribuindo para o melhor entendimento do processo deposicional e, portanto,

Levantamento Experimental GPR no Rio Taquari, Bacia do Pantanal Matogrossense

da dinâmica atual do rio Taquari. Este estudo sobre a arquitetura deposicional dos sedimentos está em desenvolvimento, e corresponde ao trabalho de dissertação de mestrado de um aluno do IAG-USP.

Agradecimentos

Ao Sr. Hélio Silva, proprietário da Fazenda Santa Maria, pela infra-estrutura e ao Sr. José Bispo (Seu Zeca) pela hospitalidade e apoio logístico. À Dra. Maria Ribeiro Araújo (Embrapa/MS), à Dra. Naomi Ussami (IAG/USP) e ao Dr. Francisco Yukio Hiodo (IAG/USP), pelas proveitosas discussões.

Referências Bibliográficas

- Aquino, W.F.; Lopez, A G, Souza, L.A.P.; Gandolfo, O C B & Botelho, M A B. 1998. Aplicação de georadar em estudos de assoreamentos de reservatórios. II Encontro Regional de Geotecnia e Meio Ambiente/ II Workshop de Geofísica Aplicada. Rio Claro, 19-20 novembro de 1998. CDROM.
- Araújo, M. R. et. al., 1999. Estudos multidisciplinares sobre o sub-componente Bacia do Taquari, do Programa Pantanal, Governo do Estado de Mato Grosso do Sul. *Projeto de Pesquisa Embrapa-MS/IAG-USP/ IPT/UFMS*.
- Galli, V.L. & Souza, L.A.P., 1999. GPR – Exemplos de Aplicação. *Sixth International Congress of the Brazilian Geophysical Society*. CDROM.
- 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.

Sauck, W.A., 1998. Use of a Bottom-towed GPR Antenna for Investigation of a Lake Michigan Contaminant Site, 20th General Assembly of the European Geophysical Society, Hamburg, Abril 3-7, in *Annales Geophysicae*, Supplement to vol. 13, pp.102.

Souza, O.C.,1998. Modern Geomorphic Processes along the Taquari River in the Pantanal: A Model for Development of a Humid Tropical Aluvial Fan. PhD thesis, University of California, Santa Barbara, 135p.

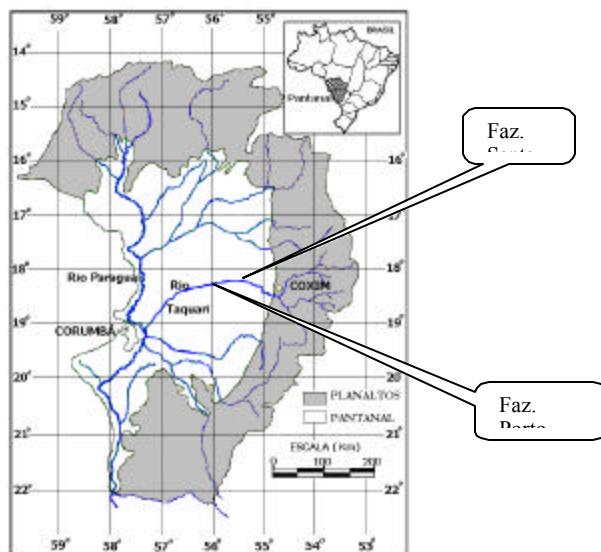


Figura 1. Mapa de localização da área de estudos no Estado de Mato Grosso do Sul (Adaptado de Souza, 1998).

Levantamento Experimental GPR no Rio Taquari, Bacia do Pantanal Matogrossense

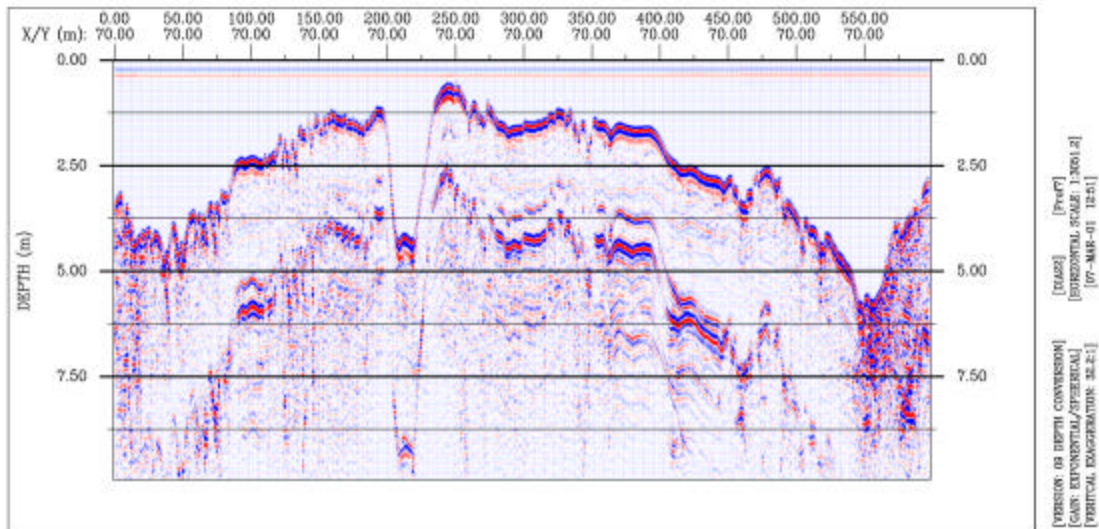


Figura 2. Perfil de reflexão em profundidade obtido com as antenas de 200MHz, adquirida próxima à Fazenda Santa Maria.

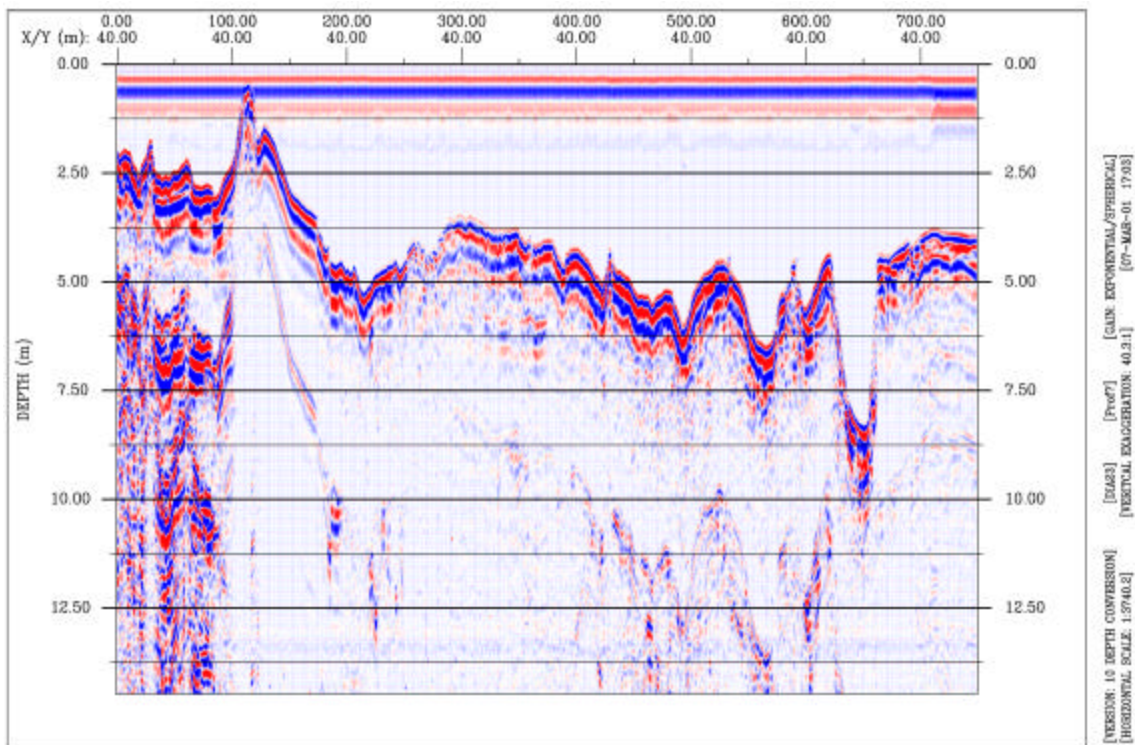


Figura 3. Perfil de reflexão em profundidade obtido com as antenas de 100MHz, adquirida próxima à Fazenda Porto Santa Luzia.



Levantamento geofísico utilizando o método GPR na Mineração Millennium (PB)

Otávio Coaracy Brasil Gandolfo, GEO-RADAR Ltda., georadar@uol.com.br

Odilon Ferreira Miranda Filho, GEO-RADAR Ltda., georadar@uol.com.br

Manoel Bezerra Marques da Silva, Millennium Inorganic Chemicals, mbezerra@mic-br.com.br

Abstract

This paper show the results of a GPR survey carried out in a excellent geological environment, allowed penetration exceeding 60 meters with 25 MHz antenna.

Several boreholes in the survey line show that the GPR data agree closely with the depth of Fm. Barreiras sediments covered by sand dunes.

Introdução

Foi realizado um levantamento geofísico utilizando o método GPR em uma área de mineração localizada no estado da Paraíba.

O objetivo do trabalho foi a identificação do contato entre os sedimentos da Fm. Barreiras, sobrepostos por areias de dunas onde se encontra o minério explorado.

Embora o contraste das propriedades eletromagnéticas das litologias favorecessem a aplicação do método, as grande profundidades de investigação exigidas constituía um desafio, pois algumas sondagens identificaram o contato a 70 metros de profundidade.

Os resultados da campanha geofísica, integrados às informações das numerosas sondagens profundas, possibilitaram uma precisa visualização da geometria do topo da Fm Barreiras e conseqüentemente, a cubagem mais correta do pacote arenoso depositado sobre este.

O método GPR

O GPR é um método de investigação por meio de ondas eletromagnéticas de altas frequências com larga aplicação em investigações rasas.

A frequência de operação é escolhida de forma a fornecer a relação mais vantajosa entre penetração e resolução. Sinais de alta frequência possibilitam alta resolução, porém baixa penetração, ocorrendo o inverso para sinais de baixa frequência.

Em condições de baixa perda, a velocidade (v) está relacionada com a parte real da constante dielétrica (K) do meio de propagação, sendo " c " a velocidade da onda eletromagnética no espaço livre (eq.1).

$$v = \frac{c}{\sqrt{K}} \quad (\text{eq.1})$$

Quanto maior for o contraste entre a constante dielétrica dos meios, mais intensa será a reflexão do sinal GPR.

A atenuação da onda está relacionada à condutividade elétrica dos materiais (σ). Litologias condutivas (argilas em geral) ocasionam forte atenuação (α) do sinal eletromagnético.

A Tabela 1 exibida a seguir apresenta alguns parâmetros relacionados às propriedades eletromagnéticas de diversos materiais geológicos.

Tabela 1 - Valores típicos de algumas propriedades eletromagnéticas de diversos tipos de materiais (modificada de Davis & Annan, 1989).

Material	K	v (m/ns)	σ (mS/m)	α (dB/m)
Ar	1	0,3	0	0
Água doce	80	0,033	0,5	0,1
Água do mar	80	0,01	30000	1000
Areia seca	3-5	0,15	0,01	0,01
Areia saturada	20-30	0,06	0,1-1	0,03-0,3
Siltes	5-30	0,07	1-100	1-100
Argilas	5-40	0,06	2-1000	1-300

Área de estudo

A área de estudo localiza-se no estado da Paraíba. Espessos pacotes arenosos, nos quais ocorrem certos minerais pesados (Ilmenita, Rutilo), atualmente são explorados pela mineração. As areias encontram-se depositadas sobre sedimentos da Fm. Barreiras que constituem a base das dunas locais.

A aplicação do método GPR em ambientes eletricamente resistivos, tais como depósitos arenosos, fornece excelentes resultados (PESTANA & BOTELHO, 1997).

A interface sedimentos arenosos/sedimentos argilosos comporta-se como um ótimo refletor para o sinal GPR em virtude da grande diferença das propriedades físicas que estes materiais exibem. Além disso as argilas, que em geral são eletricamente condutivas, provocam forte atenuação do sinal GPR.

Levantamento geofísico utilizando o método GPR na Mineração Millennium (PB)

Os sedimentos da Fm. Barreiras constituem uma camada predominantemente argilosa e que apresenta características eletromagnéticas contrastantes em relação ao pacote arenoso superior. Desta forma, o contato é passível de ser mapeado com o emprego desta metodologia geofísica.

Levantamento de campo

No levantamento de campo foi utilizado o equipamento GPR RAMAC/MALA Geoscience. Com a finalidade de atingir os objetivos propostos, alcançando as grandes profundidades de investigação necessárias para o sucesso da campanha, foi utilizada a antena de 25 MHz, a menor frequência disponível do equipamento utilizado.

Neste artigo serão apresentados dois perfis realizados na área de estudo. O espaçamento utilizado entre pontos de medida no perfil L2700 (Figura 2) foi 1 metro enquanto no perfil L2800 (Figuras3), foi de 2 metros. A leitura a cada 2 metros proporcionou maior rapidez na aquisição dos dados de campo, produzindo seções igualmente com boa resolução horizontal.

Processamento dos dados

No processamento dos dados foi utilizada as seguintes etapas: 1) edição; 2) aplicação de ganho; 3) filtragem; 4) análise de velocidades; 5) conversão tempo-profundidade.

A velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio foi determinada a partir do ensaio CMP. A correção de *nmo* (Figura 1) forneceu um valor de velocidade igual a 170 m/μs (0,17 m/ns).

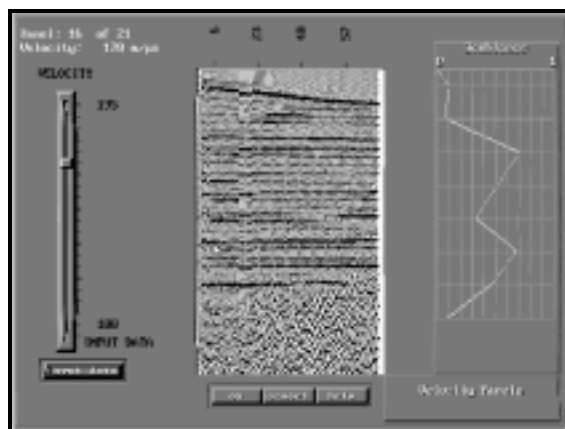


Figura 1 – Determinação da velocidade por correção de *nmo* em um ensaio CMP.

Este valor está compatível com a natureza do material encontrado em subsuperfície (areia seca, $K=3$) conforme a Tabela 1. De acordo com a eq. (1), teremos:

$$v = \frac{0,3m / ns}{\sqrt{3}} = 0,17m / ns$$

Esta velocidade foi utilizado na conversão tempo-profundidade nas seções processadas, a partir das quais foi possível estabelecer uma comparação direta com as informações disponíveis das sondagens.

Resultados

Nas seções GPR das Figuras 2 e 3 constam o posicionamento dos furos de sondagens com as respectivas profundidades do topo da Fm. Barreiras determinadas pela mesmas. O contato entre as areias das dunas e o topo dos sedimentos desta Formação, foi claramente identificado nas seções como sendo um forte refletor praticamente contínuo ao longo de toda a seção (linha pontilhada). Observou-se ainda que, abaixo deste, o sinal do GPR sofre atenuação, como era de se esperar devido à natureza predominantemente argilosa dos sedimentos que constituem a Fm. Barreiras.

As pequenas diferenças observadas entre a posição do topo do Barreiras determinada pelas sondagens diretas e pelo GPR, estão relacionadas à eventuais heterogeneidades do meio, onde devem ocorrer velocidades ligeiramente distintas da determinada (170 m/μs).

A boa qualidade dos dados permitiu ainda a identificação de alguns fortes refletores presentes nos sedimentos arenosos das dunas. Estas reflexões podem estar relacionadas à intercalações argilosas.

Em determinados locais foi verificado alguns equívocos na interpretação das sondagens, considerando as possíveis intercalações argilosas existentes no pacote arenoso como sendo os sedimentos da Fm. Barreiras, que certamente se encontram mais profundos nestes pontos, como pode ser bem visualizado na imagem da seção GPR (posição 100m da linha 2700, Figura 2).

Levantamento geofísico utilizando o método GPR na Mineração Millennium (PB)

Considerações finais

Os resultados deste levantamento mostram que o sinal GPR em condições extremamente favoráveis pode alcançar profundidades superiores a 60 metros.

Os dados apresentaram excelente concordância com as informações das sondagens, salvo pequenas exceções. Pode ser esclarecido, em certos locais, incertezas referentes à profundidade da interface geológica, objetivo do mapeamento proposto neste trabalho. Conclusões baseadas somente em furos de sondagens podem incorrer à erros na interpretação do correto posicionamento de um contato geológico.

A alta resolução do método GPR permitiu um melhor visualização do comportamento do topo da Fm. Barreiras entre dois furos adjacentes, facilitando a interpretação no momento do traçado desta interface. Foi possível, ainda, elucidar algumas informações imprecisas das sondagens profundas.

O emprego do GPR neste tipo de ambiente pode auxiliar o planejamento de futuras campanhas de sondagens, orientando locações e, possivelmente, reduzindo o número das mesmas, diminuindo custos e tempo de prospecção de uma determinada área.

Bibliografia

DAVIS, J. L., ANNAN, A. P. 1989. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, v.37, n.5, p.531-551.

PESTANA, R. C., BOTELHO M. A. B. 1997. Migração de dados de radar (GPR) com correção topográfica simultânea. *Revista Brasileira de Geofísica*, v.15, n.1, p.3-10.

Levantamento geofísico utilizando o método GPR na Mineração Millennium (PB)

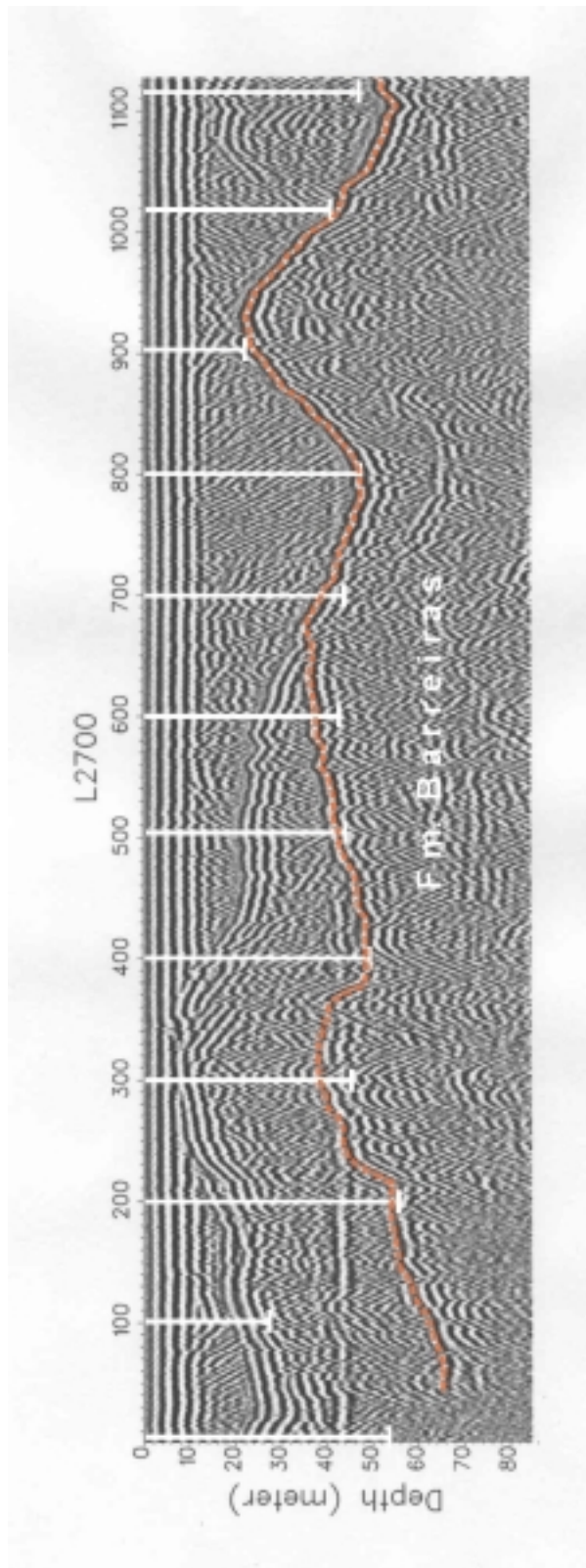


Figura 2 - Seção GPR do perfil L2700

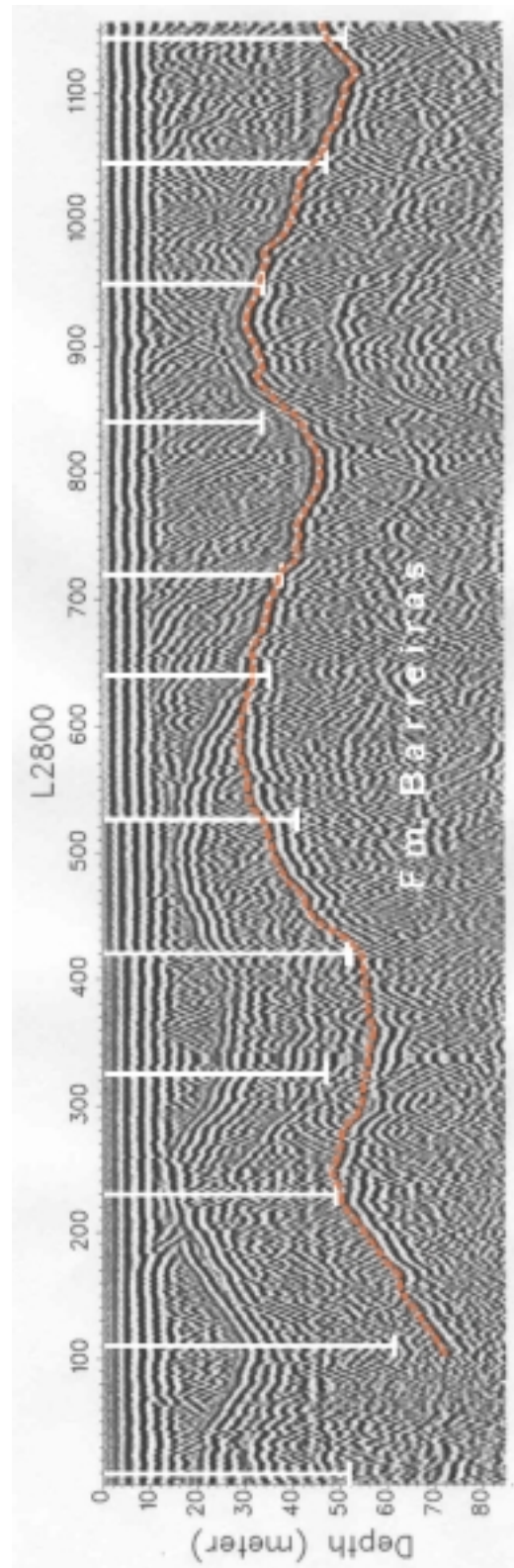


Figura 3 - Seção GPR do perfil L2800



Levantamento GPR em afloramentos turbidíticos da Bacia de Almada-BA

Marco Ceia, LENEP/UENF- Macaé-RJ, marco@lenep.uenf.br

Abel Carrasquilla, LENEP/UENF-Macaé-RJ,abel@lenep.uenf.br

Jandyr Travassos, OBSERVATÓRIO NACIONAL/MCT-Rio de Janeiro-RJ, jandyr@on.br

Abstract

In onshore Almada Basin, northeast of Brazil, sandy and/or conglomeratic turbidites and shales outcrops of Urucutuca Formation occurs. These rocks are part of an exhumed portion of the filling-section of the Almada Canyon. Such outcrops are unique examples of passive margin transgressive marine sequence turbidites in Brazil, which were sedimented during the Maastrichtian/Campanian. They are analogues to some important turbidite reservoirs of Campos Basin, which is the most productive oil basin in Brazil. To aid studies of internal geometry and facies association which will help to improve the knowledge of the properties of such kind of rocks, a GPR (Ground Penetrating Radar) survey was performed in this region. This work aims to show the first results obtained at one of the outcrops.

Introdução

O método GPR tem sido bastante utilizado como ferramenta de imageamento de subsuperfície devido à sua alta resolução. Sua principal limitação é a pequena profundidade de investigação (no máximo algumas dezenas de metros), que em ambientes condutores é ainda mais crítico, devido a maior atenuação das ondas eletromagnéticas.

Estudos em afloramentos como o de Young et al. (1997) e o de Porsani & Rodrigues (1995) têm demonstrado a potenciabilidade deste método na descrição estratigráfica, sendo também importante na delimitação da geometria interna e no detalhamento de fácies. Tal característica nos motivou a empregá-lo no estudo dos afloramentos turbidíticos da Bacia de Almada.

Geologia da Área em Estudo

A Bacia de Almada situa-se na margem continental da Bahia entre os paralelos de 14° 15' S e 14° 55' S (Figura 1), sendo limitada ao norte pelo alto de Itacaré e ao sul pelo alto de Olivença. Inclui uma pequena porção emersa, com extensão de 200 km² e espessura máxima de sedimentos de 1800 m. Na plataforma continental sua área atinge maior expressão: cerca de 1300 km² até a cota batimétrica de 200 m, com a coluna sedimentar registrando espessuras superiores a 6000 m.

Os primeiros mapeamentos geológicos em detalhe da porção emersa da Bacia de Almada foram realizados em 1963 por uma equipe de geólogos da PETROBRÁS e uma síntese publicada por Carvalho (1965).

Nesta porção emersa, afloram turbiditos arenos-conglomeráticos e folhelhos ricos em foraminíferos planctônicos, que definem litoestratigraficamente a Fm. Urucutuca (Mesozóico/Cretáceo Superior). Estas rochas compõem uma parte exumada do Canyon de Almada, constituindo-se numa grande feição erosiva de idade pós-cenomaniana, que é bem definida sismicamente na porção marítima da bacia. Um aspecto que torna estes sedimentos interessantes é que eles são produtores de petróleo, tendo certa analogia à outras formações encontradas nas Bacia de Campos, Espírito Santo e Cumuraxatiba (Carvalho, 1965).

Estudos detalhados dos afloramentos foram realizados por Bruhn e Moraes (1989) e Mendes (1998). A Figura 1 mostra a localização dos principais afloramentos dos turbiditos canalizados da Fm. Urucutuca na porção emersa da Bacia de Almada, segundo Bruhn e Moraes (1989).

O Método GPR

O método eletromagnético GPR (“*Ground Penetrating Radar*”), também conhecido como Geo-Radar ou Radar de Penetração do Solo, começou a ser difundido a partir de 1970. Este método de imageamento da sub-superfície baseia-se principalmente na reflexão das ondas eletromagnéticas em estruturas geológicas e feições anômalas presentes em sub-superfície. Estas ondas são emitidas por uma antena transmissora e captadas por uma antena receptora, ambas dispostas na superfície do terreno. Uma série de medidas realizadas ao longo de uma linha, quando plotadas lado a lado, fornecem uma imagem de alta resolução, tanto lateral quanto vertical, sobre uma seção ao longo do perfil.

O principal parâmetro extraído do método é o coeficiente de reflexão (R). Este coeficiente relaciona as propriedades físicas do meio como a condutividade elétrica e a permissividade dielétrica. Para uma situação particular de 2 camadas o coeficiente de reflexão é dado por :

$$R = \frac{\sqrt{\sigma_1 + i\omega\epsilon_1} - \sqrt{\sigma_2 + i\omega\epsilon_2}}{\sqrt{\sigma_1 + i\omega\epsilon_1} + \sqrt{\sigma_2 + i\omega\epsilon_2}}, \quad (1)$$

GPR em Afloramentos Turbidíticos

na qual σ_1 e σ_2 são as condutividades elétricas nas camadas 1 e 2, ϵ_1 e ϵ_2 são as permissividades dielétricas das camadas 1 e 2 e ω é a frequência angular. Mais detalhes sobre o método GPR podem ser encontrados em Davis & Annan (1989) e em Oliveira Jr. (2001).

A forma de aquisição dos dados de GPR não difere muito do levantamento sísmico de reflexão convencional. Podem-se realizar levantamentos com *offset* (distância entre as antenas) fixo ou variável (CMP), sendo que este último é importante na estimativa da velocidade de propagação das ondas no meio, como também na conversão tempo x profundidade.

O processamento dos dados também é similar ao processamento sísmico convencional, resguardando-se a diferença de escala, visto que os dados GPR são adquiridos em nanosegundos, enquanto que os dados sísmicos são adquiridos em milisegundos.

Levantamento de Campo

O levantamento GPR foi realizado em 3 afloramentos na região próxima à Sambaituba. Neste trabalho apresentaremos apenas os resultados obtidos no afloramento 2 de Bruhn e Moraes (1989), (Figura 1). Uma foto deste afloramento é mostrada na Figura 2. Neste local, foram realizados um total de 8 perfis, adquiridos com a configuração *offset* fixo.

O equipamento utilizado foi um Pulse Ekko IV da Sensors & Software Inc. operando com antenas de 100 MHz. A janela de tempo e o espaçamento utilizados foram de 380 ns e 0,25 m, respectivamente, enquanto que a distância entre as antenas foi mantida em 1 m.

A topografia foi medida utilizando-se um GPS Diferencial Trimble e um clinômetro portátil para medir as inclinações do terreno. A cobertura entre os pontos GPS foi então interpolada com base nessas medições.

Para calcular as velocidades, foram levantados alguns perfis CMP nos 3 afloramentos estudados. Neste tipo de perfil foi utilizada uma separação inicial das antenas de 0,6 m, a qual foi aumentada progressivamente em espaços de 0,2 m para cada uma das antenas.

Processamento de Dados

O processamento dos dados GPR consistiu basicamente de:

- Edição de Dados (eliminação de traços repetidos, correção de *headers*, inclusão de Gaps, reposicionamento ou reversão de perfis, etc.);
- Junção perfis contínuos (*merge*);
- Ajuste do *Time-Zero*;
- Limitação das janelas de tempo;
- Análise de Velocidades;
- Aplicação de Ganhos;
- Aplicação de Filtros;
- Migração.

Para o processamento dos dados foram utilizados os programas RADAR (Sensors & Software) e SeismicUnix (CWP).

A análise de velocidades forneceu uma velocidade média para todo o conjunto de aproximadamente 0,13 m/ns, a qual foi utilizada na conversão tempo x profundidade.

A Figura 3 mostra uma seção GPR do perfil REF4, o qual foi obtido na parte superior do afloramento da Figura 2 e dista aproximadamente 3,5 m da face exposta. Nesta seção foi aplicado uma migração Stolt, um ganho tipo [tempo]^p, (tpow), e um filtro passa-banda com frequências de corte de 30-70-180-500 MHz.

Interpretação

Através do perfil REF4 completo (Figura 3) podemos notar a presença de algumas estruturas em profundidade, em especial a estrutura mais profunda que parece ser um canal, porém tal afirmação não é conclusiva devido a baixa resolução dos dados para tempos maiores que 200 ns (profundidades abaixo de 13 m).

Ainda na Figura 3, há uma falta de dados (*gap*) na distância 54-57 m, onde devido a presença de uma cerca, optou-se por evitar medidas nesta parte do perfil. A migração gera um efeito artificial nesta parte tentando preencher esse *gap*.

Na Figura 4 é mostrada uma interpretação de uma seção do perfil REF4 (pontos A e B na Figura 3). Esta seção refere-se a uma área de 20 m de comprimento por 5 m de altura que é aproximadamente a área do afloramento mostrada na Figura 2. A seção foi inclinada de 5° no sentido anti-horário de modo acompanhar a inclinação média do relevo e uma interpretação foi feita isoladamente, modificando-se o ganho de modo a auxiliar na localização dos principais refletores. Posteriormente estes foram superpostos com a Figura 2. Pode-se observar que há uma boa concordância com algumas interfaces visíveis na Figura 2.

GPR em Afloramentos Turbidíticos

Conclusão

O método GPR se mostrou bastante útil na descrição da localização dos principais refletores apresentando uma boa concordância com algumas estruturas visíveis no afloramento. Tal interpretação guarda alguma semelhança com a descrição de Bruhn e Moraes (1989) e a de Mendes (1998), porém consegue descrever outras estruturas não observadas nestes trabalhos anteriores, inclusive estruturas mais profundas que não são observadas no afloramento.

Este trabalho terá prosseguimento com uma correção topográfica e uma integração com as informações resultantes da interpretação dos outros perfis GPR neste e nos outros afloramentos estudados. Além disso, uma correlação com os resultados de outros métodos geofísicos; principalmente eletroresistividade também está planejada.

Referências Bibliográficas

Bruhn e Moraes; 1989. Turbiditos da Formação Urucutuca na Bacia de Almada, Bahia: um Laboratório de Campo para Estudo de Reservatórios Canalizados. B Geoci. PETROBRÁS, 3 (3): 235-267, jul/set.

Carvalho, K. W. B.; 1965. Geologia da Bacia Sedimentar do Rio Almada. Boletim Técnico da PETROBRÁS, Rio de Janeiro, 8 (1):5-55, jan/mar.

Davis, J.L. & Annan, A.P., 1989. Ground Penetrating Radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. Geophysical Prospecting 37, 531-551.

Mendes, M. P.; 1998. Evolução, análise estratigráfica e sistemas turbidíticos em paleocânions submarinos: exemplos de Almada (BA) e Regência (ES). Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, 229 pp.

Porsani, J.L. & Rodrigues, A.R.; 1995. O Método GPR Aplicado à Caracterização de Reservatórios: um Exemplo no Afloramento Açú – Bacia Potiguar – RN. Anais do IV Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, São Paulo, Vol. II, p. 843-845.

Oliveira Jr., J.G.; 2001. Dois testes de imageamento com GPR em problemas de controle ambiental em regiões tropicais: migração de dunas e localização de dutos de óleo enterrados. Dissertação de Mestrado. PPGG/UFRN. 86pp.

Young, R. A., Peterson, B., Slatt, R. M. Imaging of Turbidite outcrop analogs using ground penetrating radar. Proceedings of XXX Congress of the Society of Exploration Geophysicists, p.429-432.

Agradecimentos

Agradecemos a FINEP/CTPETRO pelo suporte financeiro para realização do projeto Estudo Geológico e Geofísico de Afloramentos Análogos aos Reservatórios Turbidíticos da Bacia de Campos, que possibilitou este trabalho, à ANP (PRH-20) pela bolsa de Doutorado de Marco Ceia, à UnB pelo empréstimo do equipamento utilizado e ao CNPq pelas bolsas de produtividade em pesquisa outorgadas à Abel Carrasquilla e Jandyr Travassos.

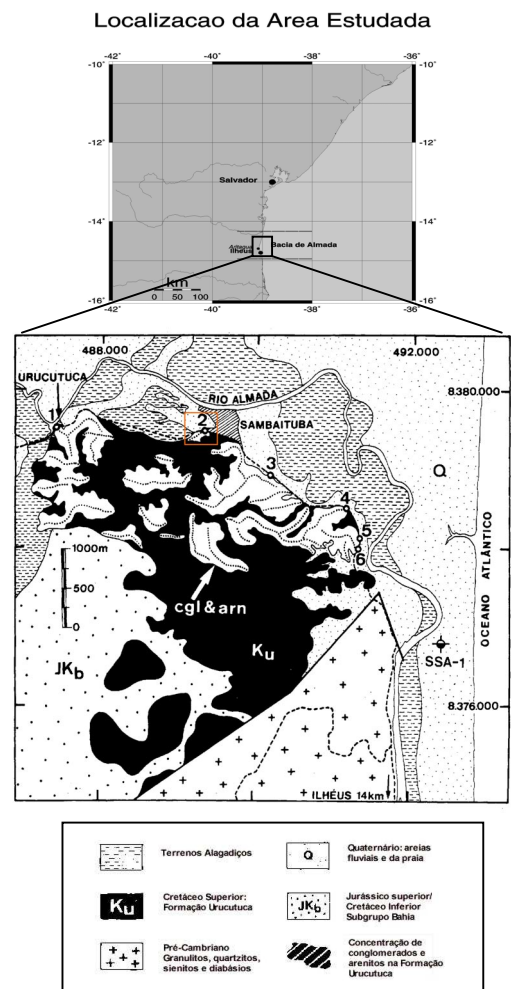


Fig. 1 - Localização da área estudada, com a geologia mostrada no painel central. Os principais afloramentos da Fm. Urucutuca (1 até 6) estão assinalados, sendo que o afloramento 2, onde o perfil GPR foi realizado aparece em destaque. Modificada de Bruhn e Moraes (1989).

GPR em Afloramentos Turbidíticos



Fig. 2 – Foto do afloramento estudado.

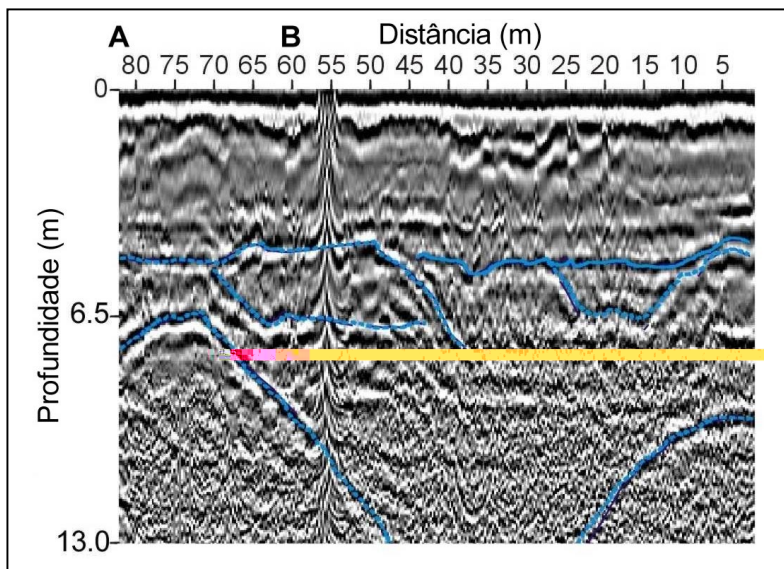


Fig. 3 –Perfil REF4 com alguns refletos mais profundos assinalados. Na posição 54 m nota-se a influência da migração sobre um “gap” na aquisição de dados entre 54-57 m.

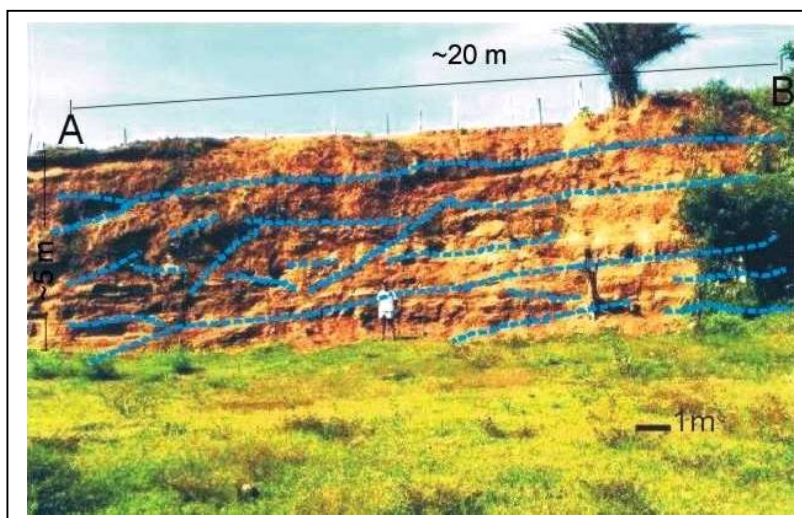


Fig. 4 – Foto do afloramento estudado superposta a interpretação da seção GPR restrita aos pontos A e B, e limitada a 5m de profundidade. Esta seção é aproximadamente leste (A) – oeste (B).



Localização de Fraturas em Rochas Graníticas, no Município de Capão Bonito-SP, Brasil

Abad Oliveira Souza Júnior¹ & Jorge Luís Porsani²

¹ Aluno de Mestrado em Geofísica no IAG/USP – Email: abad@iag.usp.br

² Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP – Email: porsani@iag.usp.br

A s ra

Ground Penetrating Radar - GPR and Resistivity methods were used with the objective to detect fracture zones and the top of fresh rock, in ornamental granite mine, located near Capão Bonito City, São Paulo State, Brazil. Eight profiles of reflections GPR and 19 WARR's Soundings were acquired using antennas of 25, 50, 100 and 200 MHz. Two vertical electrical sounding were acquired too. Analysis of GPR's profiles allowed to locate stronger dipping and sub horizontal reflectors, probably related with the fractures zones filled with water. Besides, were identified two shadow zones that can be related with intrusions of diabase's dike, and one hyperbolic reflector with a boulder. The fresh rock was identified about 23m of depth. The results obtained probably will go help the project of mine engineering looking forward to advancing of work front.

In r

Este trabalho tem como objetivos a caracterização do topo da rocha sã, localização de zonas de fraturas e possíveis juntas de alívio, estruturas comuns em maciços graníticos. Para alcançar tais objetivos foram empregados os métodos geofísicos: *Ground Penetrating Radar* - GPR e eletrorresistividade. Os dados foram adquiridos numa pedreira de granito ornamental localizada no Município de Capão Bonito - SP, pertencente à empresa SOMIBRÁS (Sociedade Brasileira de Mineração S/A). A caracterização geolétrica dos materiais de subsuperfície é importante para se discriminar, a zona de alteração da rocha, o topo da rocha sã e a localização de zonas de fraturas e juntas de alívio. O imageamento em detalhe de subsuperfície permite subsidiar os projetos de engenharia de minas, por exemplo, a cubagem do volume de solo que deverá ser retirado (conhecido como *bota fora*), a localização de zonas mais favoráveis à exploração do granito ornamental e, conseqüentemente, na cubagem da jazida explorável. Desta maneira os custos relativos a exploração da jazida poderão ser minimizados. Os dados geofísicos adquiridos estão sendo interpretados de maneira integrada, sendo comparados com informações de dados geológicos de superfície. Isto permitirá obter um modelo

geofísico que auxilie os projetos de engenharia de minas para a exploração da jazida.

Ge a a Área e Es

A área de estudos localiza-se no município de Capão Bonito, distante cerca de 350km da cidade de São Paulo – SP (F ra 1). A região esta localizada na borda da Bacia Sedimentar do Paraná, correspondendo às porções sul do Estado de São Paulo e leste do Estado do Paraná (Chiodi Filho et. al, 1983). Os dados geofísicos foram adquiridos na pedreira de granito pertencente à empresa SOMIBRÁS, situada a aproximadamente a 20km do município de Capão Bonito. A área em estudo é caracterizada principalmente por rochas graníticas e corpos granitóides, ocorrendo localmente diques de diabásio. O granito de Capão Bonito destaca-se por ser uma rocha de coloração avermelhada, com granulação grossa e isotrópica. Devido às suas características de alta homogeneidade textural e sua cor avermelhada, conferem ao granito um padrão estético apreciado internacionalmente, o que favoreceu o desenvolvimento de intensa lavra em todo o maciço, sendo exportado como rocha ornamental para a Itália e Japão, cujo nome comercial é Granito Capão Bonito ou *Rubi Red Granite*. Conforme observações de campo, na área da pedreira os corpos graníticos aparecem estruturados contendo zonas de fraturas, matacões e diques de diabásio, bem como a cabeceira do córrego dos Alves dentro da área da lavra.

Me a e A s s Da s

Neste trabalho foram utilizados os métodos geofísicos GPR e eletrorresistividade. O método GPR consiste em obter uma imagem de alta resolução da subsuperfície, através da transmissão de ondas eletromagnéticas em altas frequências por meio de uma antena transmissora colocada no terreno. As mudanças nas propriedades elétricas dos materiais de subsuperfície fazem com que parte do sinal retorne a superfície. As ondas de radar refletidas e difratadas em subsuperfície são captadas por meio de uma antena receptora, onde é registrada em função do tempo duplo, que é amplificada, digitalizada e gravada no disco rígido de um *notebook* (Porsani, 1999).

Os levantamentos geofísicos foram realizados ao longo de estradas de acesso a pedreira e na frente de lavra. Para a aquisição dos dados GPR foi utilizado o equipamento RAMAC/GPR da empresa sueca MALA - Geoscience, pertencente ao Departamento de Geofísica

do IAG/USP. Foram adquiridos oito perfis de reflexão GPR, com a técnica de afastamento constante, utilizando-se antenas de 25, 50, 100 e 200MHz, visando obter uma boa composição de sinais eletromagnéticos. Neste caso, sobre o mesmo perfil consegue-se obter uma boa penetração da onda com as antenas de 25MHz e uma boa resolução com as antenas de 200MHz. Os perfis de reflexão tiveram como objetivos a localização de zonas de fraturas, juntas de alívio e imagear o topo da rocha sã. Os dados foram adquiridos em três locais distintos, totalizando cerca de 693m de perfis GPR.

Sobre os perfis de GPR foram adquiridas 19 sondagens de velocidade do tipo WARR - *Wide Angle Refraction and Reflection* utilizando-se antenas com frequência central em 50, 100 e 200MHz. A análise das sondagens de velocidade pelo método *Semblance* permitiu calcular uma velocidade de propagação da onda EM em subsuperfície de 0,1m/ns, que é compatível com rochas graníticas (Porsani 1999). A **Figura 2** mostra uma sondagem do tipo WARR obtida com as antenas de 100MHz.

Neste trabalho serão apresentados somente dois perfis de reflexão com afastamento constante. A **Figura 3** mostra um perfil GPR de 102m, obtido com antenas de 50MHz. Este perfil foi adquirido ao longo de uma estrada na parte mais alta da pedreira, onde o manto de alteração é mais espesso. Próximo ao final deste perfil encontra-se uma nascente do córrego Alves.

A **Figura 4** mostra um perfil GPR de 62m, obtido com antenas de 100MHz. Este perfil foi adquirido na frente de lavra localizada na parte mais baixa da pedreira, onde aflora a rocha sã. Neste local o granito está bastante fraturado. Conforme observações de campo, alguns planos de fraturas apresentavam umidade.

O outro método geofísico utilizado foi o da eletrorresistividade, este método emprega uma corrente elétrica artificial que é introduzida no terreno através de dois eletrodos A e B, com o objetivo de medir o potencial gerado em outros dois eletrodos M e N (Elis, 1999). O equipamento utilizado foi um resistímetro francês marca Iris, modelo Syscal R2. Foram realizadas duas sondagens elétricas verticais com arranjo Schlumberger, AB/2 de 150m de extensão, sobre um perfil de GPR obtido ao longo da estrada.

Pr ocessamento dos Dados Geofísicos

Os dados GPR estão sendo atualmente processados com o software GRADIX da Interpex. As principais etapas utilizadas no processamento básico dos dados foram: i) correção do *wow*, i.e.,

ruído em baixa frequência, ii) correção do tempo zero, iii) aplicação de ganhos no tempo (ganho linear, esférico, exponencial e programado), iv) aplicação de filtro passa banda e v) conversão de tempo/profundidade.

A SEV está sendo modelada através do software de inversão 1D RESIXIP da Interpex, e não será apresentada neste trabalho.

Discussões e Resultados

A sondagem de velocidade do tipo WARR (**Figura 2**) esta localizada na posição de 74m do perfil GPR de 50MHz. Note a existência de dois refletores hiperbólicos, um em torno de 160ns e o outro em torno de 280ns. Na conversão tempo/profundidade ($v = 0,1m/ns$) do perfil de reflexão correspondente, estes refletores relacionam-se com alvos geológicos em 8 e 14m de profundidade, respectivamente (**Figura 3**).

Os perfis de reflexão GPR mostram imagens nítidas de refletores inclinados, subhorizontais e hiperbólicos. No perfil GPR de 102m (**Figura 3**), alguns refletores anômalos merecem destaque. Nos primeiros 5m de profundidade, os refletores irregulares correspondem ao capeamento do granito alterado. Entre 3 e 11m observa-se uma ausência de reflexão, denominada de zona de sombra. Esta região corresponde à intrusão de um dique de diabásio que aflora e corta o perfil GPR, conforme constatado no campo. Entre 85 e 95m, e até 5m de profundidade, observa-se a presença de um refletor inclinado, que é um indicativo da presença de fratura. De 5 a 10m de profundidade, os refletores inclinados entre 30 e 45, e entre 80 e 95m são indicativos de fraturas. Segundo a estatigrafia da rocha granítica no local investigado (Chiodi et. al., 1983), este trecho corresponde à rocha granítica alterada. Em torno de 10 e 13m de profundidade ocorrem dois fortes refletores subhorizontais, que podem estar associados com o contato entre a rocha mais alterada e a rocha granítica menos alterada, respectivamente. Este contato é favorecido por fraturas horizontais, estruturas comuns em granitos e que na área de lavra, estas fraturas estão preenchidas com água, provavelmente devido à ocorrência de uma nascente do córrego Alves, distante cerca de 100m do final do perfil. Este fato pode explicar os fortes refletores subhorizontais em torno de 10 e 13m de profundidade. Nota-se também um nítido refletor hiperbólico com vértice na posição de 52m e em torno de 10m de profundidade. Este refletor está relacionado com a presença de um matacão em subsuperfície (a velocidade de ajuste para a hipérbole é de 0,1m/ns). O refletor que ocorre em torno de 13m de profundidade apresenta uma descontinuidade entre as posições de 60 e 62,5m. Essa característica é semelhante à zona de sombra que ocorre entre 3 e 11m desse perfil, e portanto, pode ser associada com a presença de um segundo dique de diabásio que não aflora na superfície.

O refletor que está em torno de 23m de profundidade e entre 65 e 90m, também pode estar relacionado com a presença de fraturas subhorizontais preenchidas com água e demarca, provavelmente, o topo da rocha sã. Note que, a partir desta profundidade não ocorrem mais refletores, indicando que a rocha é mais homogênea e sem fraturas.

O perfil de reflexão de 62m realizado na frente de lavra, com antenas de 100 MHz (Figura 4), é caracterizado por vários refletores inclinados, variando desde a superfície até cerca de 15m de profundidade. Observa-se também um forte refletor subhorizontal em torno de 14m de profundidade. É provável que estes refletores estejam relacionados com a presença de fraturas, inclinadas e subhorizontais, preenchidas com água.

Conclusões

O método GPR permitiu localizar zonas de fraturas inclinadas e subhorizontais, até cerca de 25m de profundidade. Estas fraturas provavelmente estão preenchidas com água. Foi localizado um matacão em torno de 10m de profundidade, bem como a intrusão de um dique de diabásio, confirmado pelo reconhecimento de campo. Um segundo dique de diabásio foi inferido em torno de 13m de profundidade não aflorando na área pesquisada. O topo da rocha sã foi localizado em torno de 23m de profundidade. As informações obtidas da interpretação dos perfis GPR estão de acordo com as informações geológicas de superfície. Este

trabalho fornece informações importantes ao engenheiro de minas, permitindo um melhor planejamento quanto à exploração da jazida, no sentido de calcular o volume de rocha a ser explotável (granitos sem fraturas) e ainda, direcionar o avanço da frente de lavra.

Agradecimentos

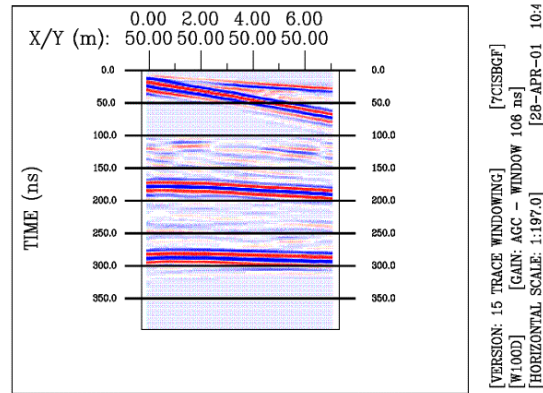
Ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado. Ao Departamento de Geofísica do IAG/USP pela infraestrutura. Ao Prof. Dr. Jorge Luís Porsani pela orientação desta pesquisa e proveitosas discussões. Ao Professor Francisco Yukio Hiodo e ao colega Jorge Eduardo da Silva pela ajuda na aquisição de dados. Ao pesquisador Marcelo Filipov pela discussão sobre a geologia da área.

Referências Bibliográficas

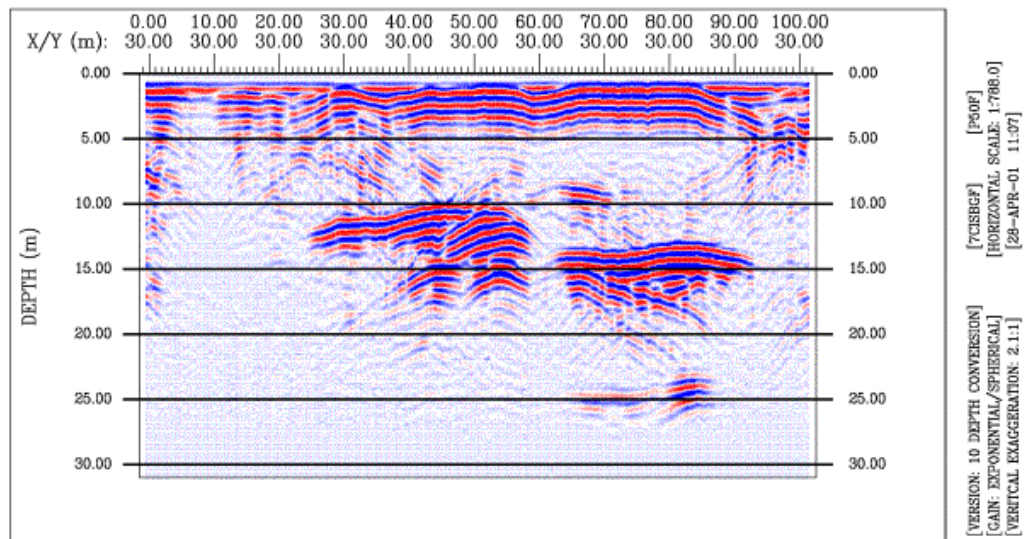
- Chiodi Filho, C. et. al., 1983. Projeto Capão Bonito. Relatório final, CPRM, volume 1, Outubro de 1983, São Paulo, 123pp.
- Elis, V.R., 1999. Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduo. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro, 264pp.
- 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, 145pp.



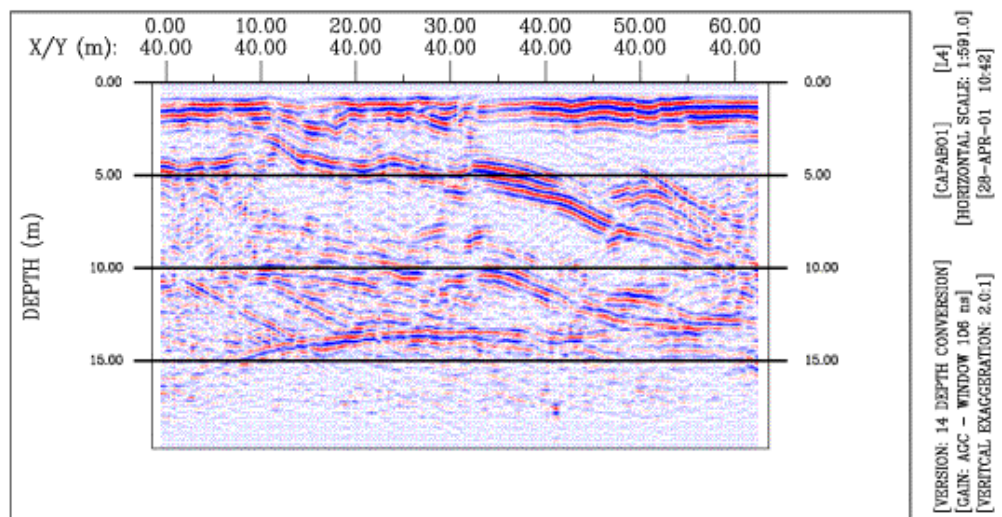
Figura 1. Mapa de localização esquemático de área de estudos.



F ra 2. Sondagem WARR adquirida com as antenas de 100MHz.



F ra 3. Perfil GPR no alto da pedra com as antenas de 50MHz.



F ra 4. Perfil GPR na frente de lava com as antenas de 100MHz.



Mapeamento de pluma contaminante de hidrocarbonetos a partir de seções GPR em um posto de abastecimento em Fortaleza - Ceará

David Lopes de Castro, Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto – UFC, david@ufc.br

Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco, LGPSR – UFC, mariano@ufc.br

Luciano Soares da Cunha, Curso de Pós-Graduação em Geologia - UFC, x7hmp@ufc.br

Rodrigo Cesar Vaz Pinto de Souza, Curso de Pós-Graduação em Geologia – UFC

Vagney Aparecido Augusto, Curso de Graduação em Geologia (bolsista PIBIC) – UFC

Abstract

The Ground Penetrating Radar (GPR) technique can be helpful in mapping sites of shallow hydrocarbon contamination (LNAPL). The radar signals are severely attenuated above LNAPL contaminated zones, allowing its detection and monitoring. During the remediation procedure of a contaminated gas station in Fortaleza, Ceará State, GPR surveys were carried out to delineate the LNAPL plume in the subsurface. The dispersion characteristics of this hydrocarbon contamination could be identified throughout the unsaturated zone above the water table.

Introdução

Tradicionalmente, o controle de plumas contaminantes de hidrocarbonetos é realizado com poços de monitoramento junto aos tanques de combustíveis. Contudo, a contaminação do subsolo por hidrocarbonetos ocorre de maneira complexa e diferenciada. A contaminação ocorre tanto no solo não saturado pela fase líquida não aquosa leve (LNAPL), quanto abaixo do nível freático pela fase líquida não aquosa pesada (DNAPL). Os hidrocarbonetos da LNAPL se dispersam através do solo de maneira uniforme e homogênea, mas podem formar concentrações nas zonas não saturadas, geralmente, acima do nível freático (Domenico & Schwartz, 1990). Enquanto isso, a DNAPL desempenha um papel especial na contaminação do meio ambiente, na medida em que ela não para sua descendência vertical no nível freático, podendo se dissolver na água subterrânea em concentrações de várias ordens de magnitude superiores aos limites tolerados para a água potável (Brewster et al., 1992; Daniels et al., 1995).

A propagação dos hidrocarbonetos em sub-superfície está também associada com fatores específicos do meio ambiente, como o índice pluviométrico, variações sazonais e o gradiente hidráulico da área. Mudanças na permeabilidade da zona não saturada podem provocar concentrações ou até mesmo trapear o material contaminante. Tal complexidade torna muito difícil estimar de forma adequada a quantidade e continuidade dos hidrocarbonetos em profundidade usando apenas os poços de monitoramento.

Ao preencher os poros do regolito acima do nível freático, a LNAPL provoca uma diminuição no contraste de permissividade relativa entre as zonas de aeração e saturada, provocando uma forte atenuação na amplitude do sinal eletromagnético (Redman et al., 1994). Tal atenuação tende a ser mais pronunciada com o aumento da frequência do sinal. As reflexões devidas ao nível freático, que normalmente são bem pronunciadas, tornam-se descontínuas ou desaparecem na presença de acumulações de hidrocarbonetos. Tais características físicas fazem com que o GPR seja uma importante ferramenta para a detecção e monitoramento de plumas contaminantes de hidrocarbonetos (e.g., Davis & Annan, 1989; Daniels et al., 1995; Carcione & Seraini, 2000).

O presente trabalho trata da aplicação do Radar de Penetração no Solo (GPR) na caracterização sub-superficial de uma pluma contaminante de hidrocarbonetos da fase líquida não-aquosa leve (LNAPL), na área de um posto de abastecimento na região metropolitana de Fortaleza. Sucessivos levantamentos GPR permitiram o acompanhamento do comportamento da pluma contaminante durante parte do processo de sua remediação, ainda em andamento.

Histórico da contaminação

O histórico da contaminação do posto de abastecimento analisado iniciou-se com o surgimento de resíduos de hidrocarbonetos presente na água captada em um poço profundo, pertencente ao prédio de apartamentos situado vizinho ao posto (Fig. 1). O poço contaminado, localizado a jusante dos tanques de armazenamento, foi abandonado em meados 1998. Posteriormente, uma quantidade expressiva de hidrocarbonetos disseminados no solo foi constatada durante a construção do Metro de Fortaleza (METROFOR) na Av. Carapinima. Com a notificação do posto pelos órgãos competentes, um processo de remediação do vazamento teve início no final do ano de 2000.

O procedimento de remediação adotado consta da instalação de novos tanques de fibra de vidro, remoção dos tanques problemáticos e descontaminação solo. Atualmente, os tanques novos estão em plena operação e os antigos estão sendo retirados. O saneamento da área impactada será orquestrado, brevemente, através

Mapeamento de Pluma Contaminante de Hidrocarbonetos com GPR

da injeção de ar comprimido no subsolo e o bombeamento do material poluente em poços de remediação na área do posto. Todo o processo vem sendo acompanhado por levantamentos com o GPR e coleta de água em piezômetros e na cava, durante a remoção dos tanques antigos.

Levantamento com Radar de Penetração no Solo

O levantamento geofísico vem sendo conduzido com um Radar de Penetração no Solo da empresa GSSI, modelo SIR-2000. Três etapas foram executadas antes e após a instalação dos novos tanques e durante a remoção dos tanques antigos. As antenas utilizadas apresentam frequências centradas em 200 e 400 MHz, visando uma profundidade de investigação de até 4,0 m. A esta profundidade se concentram os hidrocarbonetos da LNAPL, ou seja, acima do nível freático local, que varia entre 2,33 m a 2,67 m. As seções foram executadas com afastamento constante entre as antenas transmissora e receptora e com uma amostragem de 40 traços por metro. Medidas do nível estático em piezômetros e na cava dos tanques antigos permitiram estabelecer um valor médio para a constante dielétrica igual a 6, e, com isso, parametrizar as profundidades das reflexões nas seções GPR.

Na área do posto e nas avenidas circunvizinhas, foram executadas 47 seções GPR com o intuito de caracterizar a pluma contaminante em profundidade. Três seções (P1, P2 e P3 - Fig. 1) são apresentadas na Fig. 2, por descreverem bem o comportamento da contaminação em profundidade. As zonas contaminadas fornecem uma acentuada atenuação do sinal eletromagnético e estendem-se por grande parte do subsolo do posto e ao longo da Av. Carapinima. Em profundidade, a pluma apresenta-se, normalmente, posicionada acima do nível freático. Nas áreas mais contaminadas, a pluma chega a níveis muito próximos a superfície (Fig. 2). Os hidrocarbonetos da LNAPL vazaram dos tanques de armazenamento abaixo do nível freático e ascenderam por pressão hidrostática, espalhando-se, lateralmente, na zona sub-saturada.

Nos limites laterais da pluma, os hidrocarbonetos formam bolsões irregulares, devido a heterogeneidades e a anisotropia do subsolo, cuja composição, na área do posto, é representada por uma camada arenosa, de textura fina a média. Em toda a região contaminada, o refletor associado ao nível freático apresenta-se pouco marcado, difuso ou ausente (NF na Fig. 2), devido à diminuição do contraste da permissividade relativa nas áreas saturadas por hidrocarbonetos. A forte atenuação do sinal emitido mascara a resposta eletromagnética dos tanques de armazenamento, que produzem, normalmente, típicas reflexões na forma de hipérboles.

As seções P1 e P2 (Fig. 2) mostram os limites

laterais da pluma na porção noroeste do posto, com os hidrocarbonetos, possivelmente da fase vapor, ocupando as partes mais superiores do solo. Detalhes como o piso de concreto das bombas e os novos tanques podem também ser observados na seção P2. Com um revestimento de concreto de 0,5 m, a área dos novos tanques é dominada por uma zona de baixa amplitude do sinal, caracterizando, neste caso, o material estéril colocado recentemente sobre os tanques novos. Na seção P3 (Figs. 1e 2), a pluma contaminante, na área do posto próximo à Av. Treze de Maio, apresenta-se ainda bastante espessa, sugerindo a propagação da contaminação por sob esta avenida. Contudo, seções GPR realizadas ao longo desta avenida não permitiram a caracterização da pluma. Uma mudança nas características hidrogeológicas do material sob a rua pode ter dificultado a expansão da pluma nesta direção.

A interpretação das seções GPR possibilitou uma delimitação acurada da pluma contaminante sob o posto. Partindo da área dos tanques antigos (A na Fig. 1), o espalhamento dos hidrocarbonetos ocorreu em quase toda a área do posto, migrando em direção ao prédio vizinho e à Av. Carapinima. A pluma segue, preferencialmente, o sentido sul-sudeste do fluxo da água subterrânea, porém uma expressiva quantidade de hidrocarbonetos se desloca em outras direções, denotando a maior complexidade dos fatores que regem o desenvolvimento tridimensional da pluma.

Conclusões

Um processo de detecção e remediação da contaminação por hidrocarbonetos ocorrida em um posto de abastecimento em Fortaleza vem sendo acompanhado por levantamentos de GPR. O uso desta ferramenta geofísica não evasiva e de alta resolução possibilitou a identificação e delimitação da pluma contaminante em sub-superfície, mesmo em uma área de intensa ocupação urbana. A eventual presença de hidrocarbonetos após a etapa final do processo de descontaminação do subsolo poderá ser verificada em futuros levantamentos.

A distribuição espacial da contaminação demonstrou a maior complexidade dos processos migratórios dos hidrocarbonetos da LNAPL na área do posto, guiados não apenas pelo fluxo da água subterrânea. Tal característica é determinada, principalmente, pelo fato de que este tipo de contaminação ocorre na zona sub-saturada, acima do nível freático. Neste contexto, levantamentos geofísicos com GPR servem com uma importante ferramenta de investigação para a delimitação mais realística da pluma contaminante.

Mapeamento de Pluma Contaminante de Hidrocarbonetos com GPR

Agradecimentos

Este trabalho teve suporte financeiro do CTPETRO/CNPq (Projeto N^o 465569/00-5) e do PADCT III (Projeto N^o 620154/97-7). Os autores agradecem a empresa BfU do Brasil Ltda. pela cessão de alguns dados técnicos sobre o posto pesquisado.

Referências

Benson, A.K., Payne, K.L., Stubben, M.A., 1997, Mapping groundwater contamination using dc resistivity and VLF geophysical methods – A case study. *Geophysics*, **64**(1): 80-86.

Brewster, M.L., Annan, A.P., Redman, J.D., 1992, GPR monitoring of DNAPL migration in a sandy aquifer. IV International Conference on Ground Penetrating Radar, Rovaniemi – Finland, Special Paper **16**: 185-190.

Carcione, J.M. & Seraini, G., 2000, An electromagnetic modelling tool for the detection of hydrocarbons in the subsoil. *Geophys. Prosp.*, **48**(2): 231-256.

Daniels, J.J., Roger, R., Vendl, M., 1995, Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminants. *Journal of Applied Geophysics*, **33**: 195-207.

Davis, J.L., & Annan, A.P., 1989, Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophys. Prosp.*, **37**: 531-551.

Domenico, P.A. & Schwartz, F.W., 1990, Physical and chemical Hydrogeology. Wiley, New York, 824 pp.

Redman, J.D., DeRyck, S.M., Annan, A.P., 1994, Detection of LNAPL pools with GPR: theoretical modelling and surveys of a controlled spill. Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar, Ontario, 1283-1294.

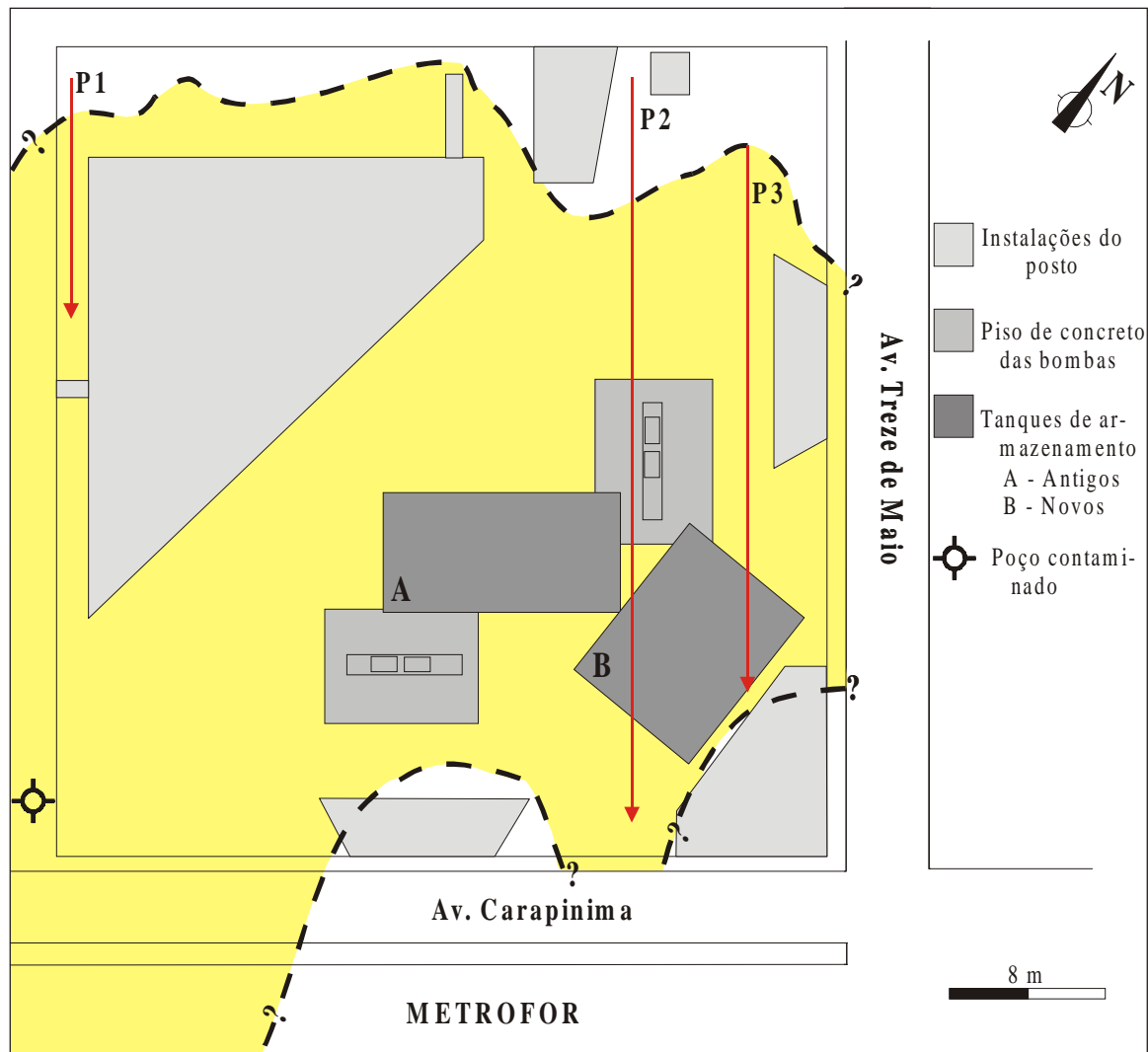


Fig. 1. Planta esquemática do posto de gasolina com histórico de contaminação e localização das seções GPR (P1, P2 e P3 – Fig. 2). A área demarcada em amarelo representa a pluma de hidrocarbonetos mapeada com uso do GPR. Adaptada da planta confeccionada pela empresa BfU do Brasil Ltda.

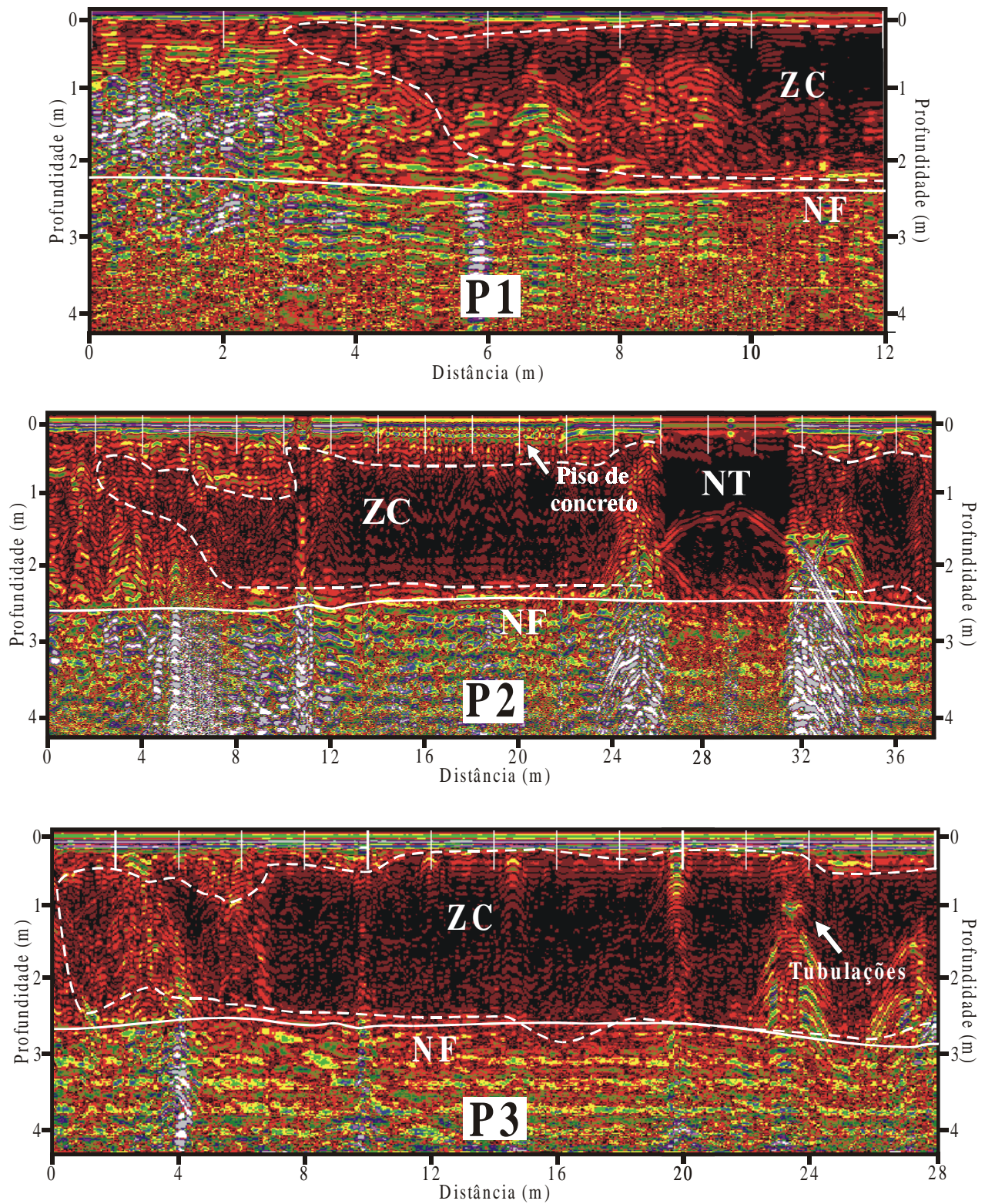


Fig. 2. Seções GPR P1, P2 e P3 levantadas no posto de abastecimento com histórico de contaminação por hidrocarbonetos. Frequência centrada em 400 MHz. NF: Nível freático; NT: Novos tanques; ZC: Zona contaminada.



Resultados da utilização de GPR na localização de cavidades (pockets) no pegmatito de Morro Redondo, Coronel Murta, MG.

Paulo Roberto Antunes Aranha, Departamento de Geologia, IGC-UFMG, aranha@dedalus.lcc.ufmg.br
Marco Antônio Barsotelli Botelho, CPGG, UFBA, botelho@cpgg.ufba.br

Abstract

The GPR method was used to identify pockets inside an underground mine, which was mined before by artisan miners, at Morro Redondo, pegmatite deposit in Minas Gerais State (Brazil). This work points out the difficulties to interpret the GPR data due to the presence of tunnels and the irregularities of walls, and by the use of unshield antennas. The method was able to show the contacts between the pegmatite vein and surrounding rocks (schist), and also had a marginal results, which was the localization of previously unknown tunnels and galleries placed in the lower parts of the pegmatite body.

Introdução

A metodologia geofísica utilizada na última década para investigar a subsuperfície rasa, e que tem proporcionado bons resultados, por revelar um alto grau de detalhes das estruturas da subsuperfície, é o GPR - Ground Penetrating Radar - (Holub & Dumitrescu, 1994; Mellet, 1995; e outros). O levantamento geofísico na mina de pegmatito em Morro Redondo, município de Coronel Murta, MG, empregou o GPR para a identificação de cavidades (pockets) e de feições geológicas tais como fraturas e contatos. O trabalho de Botelho et al (1999) mostra bem a potencialidade do GPR para detectar fraturas em rochas cristalinas, e os trabalhos de Botelho and Mufti (1998), Botelho et al (1996) mostram a efetividade de GPR na detecção de cavidades em rochas carbonáticas. Os perfis foram obtidos ao longo de linhas marcadas no interior da mina, ao longo das paredes e dos pisos das galerias existentes. As antenas utilizadas foram de 100, 200 e 400 MHz. O objetivo desta pesquisa foi investigar as bordas do corpo de pegmatito e principalmente o interior deste corpo, em suas porções onde acreditamos não terem sido escavados previamente, na busca dos bolsões que contém as druzas dos cristais semi-preciosos.

A mina foi anteriormente lavrada por garimpeiros, que abriram diversos túneis na encosta do morro e cortaram o pegmatito com galerias em diversos níveis. Nesta época foram encontrados cavidades decimétricas a métricas com gemas de boa qualidade: turmalinas, cristal de quartzo e citrino. A BLM mineração Ltda, que possui o alvará de

pesquisa da área, executou trabalhos de mapeamento e de pesquisa na área. Devido à extensão do processo de garimpagem, e também ao processo de lavra executado pelos garimpeiros, que inclui corte e aterro, nem todos os túneis e galerias da mina foram corretamente localizados.

No modelo geológico proposto para a área (Luís Menezes, comunicação verbal) o pegmatito está verticalizado, apresentando o contato, também vertical, com a rocha encaixante - xisto. A espessura varia de 15 a 30m, com profundidade máxima estimada dentre 100 e 150m. O pegmatito apresenta zoneamento típico (mural, externa, interna e quartzo), e três linhas de substituição de mineralização. Estas linhas, às vezes, se juntam duas a duas ao longo do pegmatito, vertical e horizontalmente.

Parâmetros de Aquisição em Campo dos dados de GPR

Para a execução dos perfis no interior da mina foram observados alguns aspectos relevantes que poderiam influenciar na qualidade dos dados, dentre eles a proximidade com fiação elétrica, a largura do piso, as irregularidades do piso e das paredes. Os parâmetros definidos para o levantamento foram: antenas: 100, 200 e 400 MHz; janela de tempo (função da antena escolhida, no equipamento Ramac); intervalo de amostragem temporal: aproximadamente 10 vezes a frequência central da antena; espaçamento entre as estações: 0,10 m para a antena de 100 MHz e de 0,05m para as outras antenas; distância entre as antenas: 0,6m para a antena de 200 e de 400 MHz e 1,0 m para a antena de 100 MHz.; a orientação das antenas: é normalmente perpendicular à direção do linha, entretanto em alguns locais devido à largura e altura dos túneis foi necessário redirecionar as antenas para posição paralela à direção da linha.

O controle da aquisição dos dados, foi realizada com uma trena para efetuar a marcação das distâncias tanto nas paredes quanto no piso. Para a obtenção da velocidade de propagação da onda eletromagnética nas rochas e no entulho dos pisos foram realizados sondagens de tipo CMP nos pisos e nas paredes da mina.

Processamento dos Dados

O processamento dos dados foi realizado com o programa Gradix, onde se envolveu a edição de dados; dewowing - retirada de ruídos de baixa

Aplicação de GPR em pegmatitos

frequência (< 20 MHz); localização do tempo “zero” nos traços de radar; filtragem passa-banda, onde foram utilizados os filtros gaussiano e butterworth separadamente em alguns perfis para realçar feições de interesse; conversão tempo x profundidade, a partir da interpretação da velocidade no perfil CMP. A velocidade de propagação da onda EM variou de 90 a 130 m/ μ s, a menor velocidade foi encontrada em alguns pontos nas paredes da mina. Este pontos estão localizados nos contatos entre as paredes das galerias (pockets) já encontrados e abertos. A variação de velocidade está relacionada com as mudanças nas características da rocha pegmatítica em função do contato com as cavidades, principalmente pela percolação de fluidos, e também com o fraturamento das paredes, associado ao alívio de tensão devido a abertura de túneis. O mapa da mina utilizado para a marcação das linhas, não possibilitou a sua utilização para a correção da topografia dos pisos ou das paredes, devido às suas imprecisões. Desse modo os radargramas não apresentam correções de topografia.

Para a conversão das seções (x, t) em perfis de profundidade (x, z) foram utilizadas as velocidades nas paredes ou pisos, através da análise da CMP realizada no local. Foram ainda realizadas migrações em alguns radargramas usando campos de velocidades constantes.

Discussão e Interpretação dos Resultados

Nos radargramas foram identificados alguns refletores que indicam variação litológica brusca, fraturas/falhamentos ou heterogeneidades localizados, que gerem difração.

O radargrama ilustrando a Figura 1, foi obtido do levantamento no piso da galeria de acesso ao salão onde no passado se descobriu um grande bolsão de quartzo, o citado radargrama apresenta uma hipérbole bem definida entre as distâncias 13,5 e 14,5m, na profundidade de 1,2m. Esta anomalia, inicialmente interpretada como uma cavidade (pocket), após a execução de furo de prospecção foi relacionada à reflexão no topo de uma outra galeria num plano inferior, posicionada transversalmente ao perfil, a qual era até então desconhecida.

O radargrama da figura 2, é proveniente de um levantamento executado na parede de uma galeria, o qual apresenta algumas reflexões contínuas e descontínuas. O principal refletor, ligeiramente curvado, cujo ápice se encontra na posição 4 - 5,5 m, na profundidade de 7,5 m, a princípio foi identificado como uma anomalia, com possibilidade de ser uma cavidade. Após o desmonte da parede verificou-se que se tratava de outra galeria situada num plano a 2 m também acima do plano onde registrou-se o

perfil. Nesta área foram encontrados, durante o desmonte, pequenas cavidades (pockets) com dimensões variando entre 20 -30 cm, a maioria sem mineralização.

No radargrama da figura 3, executado no piso da galeria paralela ao salão de quartzo, apresentou refletores horizontalizados com amplitudes fortes. O refletor localizado na parte direita e a 4 m de profundidade, está correlacionado com uma galeria em plano inferior, posicionada longitudinalmente à galeria superior. Um outro refletor forte que aparece no início do radargrama (11 m de profundidade) é o contato entre o pegmatito e o xisto.

Na figura 4, o radargrama obtido pelo perfil realizado no piso da galeria de acesso entre os salões de quartzo e turmalina, apresenta refletores horizontalizados. O principal refletor, a 10m de profundidade, foi inicialmente correlacionado como uma anomalia proveniente de reflexão da parede superior de uma grande cavidade. No entanto, após a sondagem constatou-se tratar do contato entre o pegmatito e o xisto. No radargrama percebe-se também a influência do material inconsolidado no piso (entulho) no sinal do GPR, mudando o padrão de reflexão.

O radargrama da figura 5, obtido na parte superior da galeria paralela ao salão de quartzo, foi realizado ao longo de uma "linha" de mineralização. Neste, são visíveis pequena hipérboles nas posições 1,5 m(0,6m de profundidade), 6 m (1,2 m prof.) e 11 m (1,0 m prof.). Estas foram correlacionadas com pequenas anomalias - cavidades. Outras pequenas hipérboles são observadas na figura, pelo aspecto de não-continuidade que apresentam sugere-se que sejam causadas pelas variações no posicionamento das antenas em função das irregularidades das paredes.

A figura 6, referente ao radargrama obtido no piso do salão de quartzo, apresenta refletores inclinados e na parte direita pode-se inferir a presença de descontinuidades em função de fraturas. A presença de uma discreta diferenciação lateral no padrão da reflexão a partir de 15 m de profundidade é observada. Os dados de furo de sonda (F1 e F2) indicam uma variação lateral de material, em F1 tem-se o xisto a uma profundidade de 15 m e em F2 tem-se o xisto a uma profundidade maior – 22 m.

As anomalias decorrentes de pequenas cavidades os quais constituem corpos difratores, têm a forma de hipérboles nos radargramas (Fig. 05). As galerias com dimensões métricas e decamétricas podem apresentar reverberação da onda no seu interior, gerando

Aplicação de GPR em pegmatitos

múltiplas reflexões, além das reflexões mais fortes provenientes de suas paredes (Fig. 02).

Conclusões

O método GPR se mostrou adequado para a identificação de cavidades maiores no pegmatito, embora não tenha sido localizada, ainda, nenhuma cavidade mineralizada, apenas as galerias desconhecidas, até então. A presença das galerias dificultam a interpretação de dados provenientes das áreas entre os mesmos, isto devido a geração de várias reflexões fortes.

O método foi capaz de localizar galerias vazias, parcialmente e completamente soterradas por entulhos. A presença de camadas de entulho no piso, as vezes com espessura superior a 2,0m, prejudicou o acoplamento das antenas e gerou distorções nos refletores subjacentes.

A utilização de antena não blindada se mostrou eficiente, mesmo na presença materiais fontes de ruídos: fios, equipamentos, etc.

A identificação de contatos geológicos, pegmatito/xisto, possibilitou o refinamento do modelo geológico inicialmente proposto para a jazida, o que referenciou as mudanças na forma de atuação da pesquisa e da lavra.

Referências:

Botelho, M.A.B., Cerqueira Neto, J.X. e Aranha, P.R., 1999, Estudos sobre a economicidade de jazidas de rochas ornamentais empregando o Geo-radar (GPR). 6º Cong. Intern. da SBGf, Rio de Janeiro – Rj. sbgf. 241.pdf.

Botelho, M.A.B., and Mufti, I.R., 1998, Exploitation of limestone quarries in Brazil with depth migrated ground-penetrating radar data. 68th Ann. Meeting of SEG, New Orleans, Louisiana, v.I: 836-839.

Botelho, M.A.B.; Araújo, F.F.S. e Vicente, H.F., 1996, Detecção de cavernas e estruturas de dissolução em rochas carbonáticas usando radar (GPR). XXXIX Congr. Bras. Geol. Anais, 388-390.

Holub, P. & Dumitrescu, T. (1994). Détection des vaités à l'aide de mesures eléctriques et du géoradar dans une galerie d'amenée d'eau. **Journal of Applied Geophysics**, v.31, p.185-195.

Mellet, J.S. (1995). Ground penetrating radar applications in engineering, environmental manegement, and geology. **Journal of Applied Geophysics**, v.33, p.157-166.

Agradecimentos

Agradecemos à BLM Mineração Ltda. a disponibilização dos dados geofísicos e geológicos para a utilização neste trabalho.

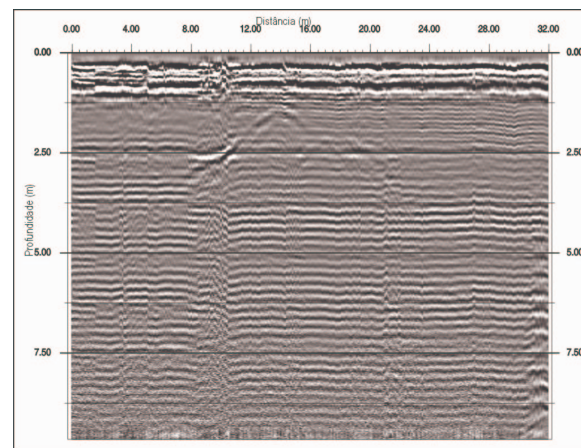


Figura 1 - Radargrama obtido com antena de 200 MHz, no piso da galeria de acesso ao salão de quartzo

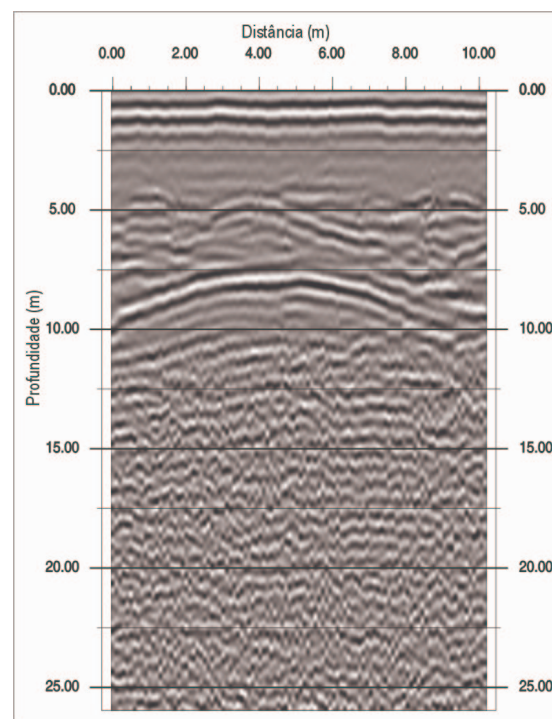


Figura 2 - Radargrama obtido com antena de 100 MHz, na parede da galeria, ponto 5.

Aplicação de GPR em pegmatitos

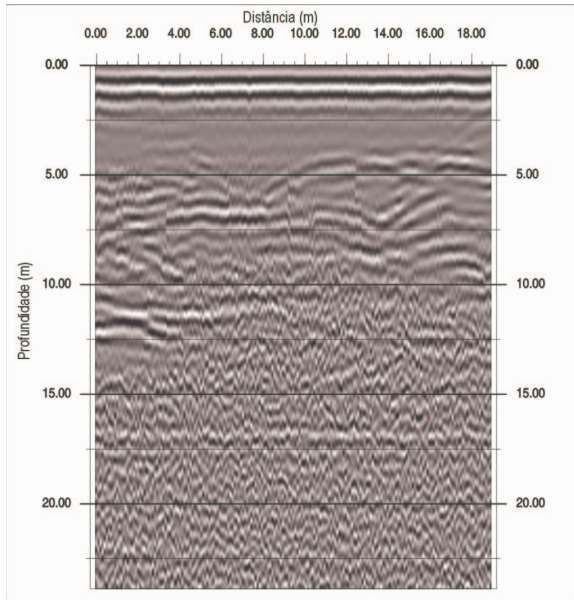


Figura 3 - Radargrama obtido com antena de 100 MHz, no piso da galeria paralela ao salão de quartzo.

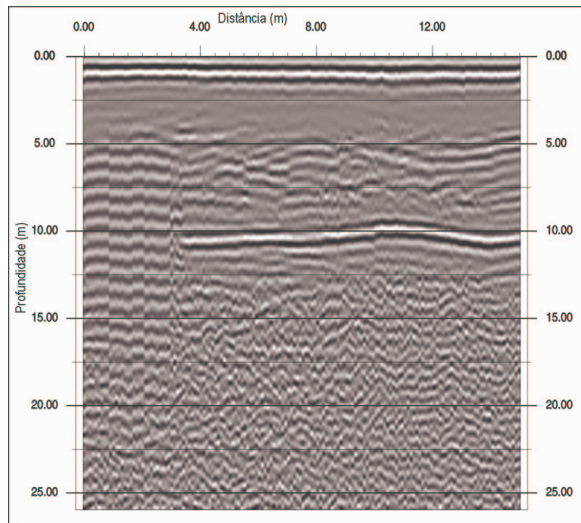


Figura 4 - Radargrama obtido com antena de 100 MHz, no piso da galeria entre os salões de quartzo e turmalina.

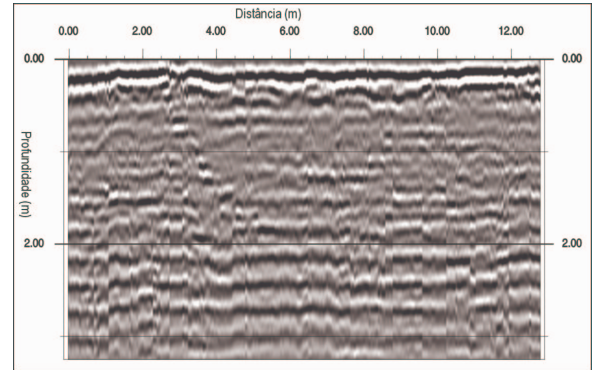


Figura 5 - Radargrama obtido com antena de 400 MHz, na parte alta da parede da galeria paralela ao salão de quartzo.

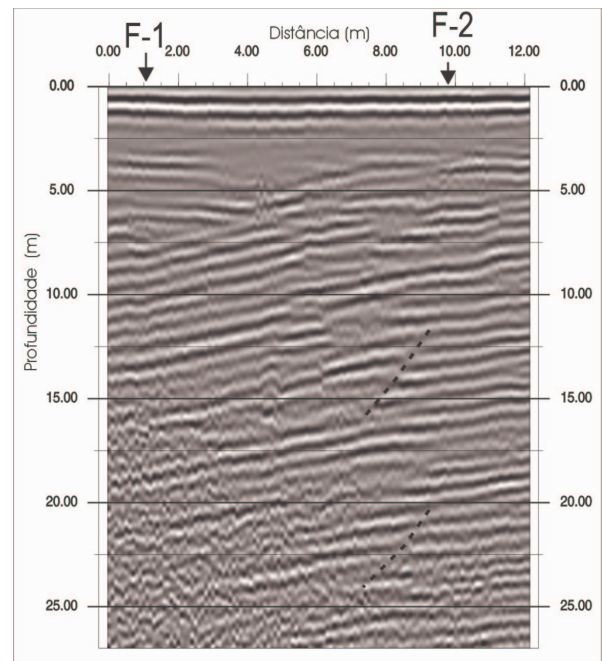


Figura 6 - Radargrama obtido com antena de 100 MHz, no piso do salão de quartzo. As linhas tracejadas indicam as fraturas. F-1 e F-2 indicam as posições dos furos de sonda.



Uso do GPR na caracterização interna de feições geológicas cenozóicas no litoral centro-oeste do Ceará, Brasil

David Lopes de Castro, Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto – UFC, david@ufc.br

Silvana Diene Sousa Barros, Doutorado em Geociências/NEG-LABISE/ UFPE, sbarros@npd.ufpe.br

Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco, Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto – UFC, mariano@ufc.br

Alcides Nóbrega Sial, Departamento de Geologia - NEG-LABISE/ UFPE, ans@npd.ufpe.br

Antenor Guimarães Júnior, Curso de Graduação em Geologia – UFC

Rogério Monnerat Baptista Filho, Curso de Graduação em Geologia – UFC, monnerat@secrel.com.br

Abstract

Ground Penetrating Radar (GPR) profiles have been recorded in the coastal region of Lagoinha, in Ceará State, NE Brazil, to investigate internal structures and facies of the partially buried sedimentary units. GPR profiles show reflection patterns which can be assigned to the lithified sandstones of Barreiras Formation (Tertiary) and beach rocks (Quaternary). Furthermore, vibra-cores were collected to correlate GPR reflections with changes in subsurface lithologies.

Introdução

As regiões litorâneas concentram importantes registros dos processos geodinâmicos mais recentes da escala do tempo geológico. Tais registros, impressos nas unidades e estruturas geológicas aflorantes, contêm informações sobre os ambientes de formação, esforços tectônicos, variações relativas do nível do mar e as dinâmicas costeiras pretérita e atual. Inserida neste contexto, a região de Lagoinha no litoral oeste do Ceará reúne um impressionante conjunto de elementos geológicos, cujo mapeamento e interpretação fornecem subsídios para o entendimento dos processos evolutivos do litoral cearense e nordestino setentrional.

Nesta região, o uso do Radar de Penetração do Solo (*Ground Penetrating Radar* – GPR) possibilitou um imageamento de alta resolução das feições geológicas locais, que se encontram, parcialmente, soterradas pela intensa sedimentação eólica costeira. A resposta positiva deste método eletromagnético decorre da presença de um forte contraste das propriedades elétricas do meio, como é o caso das areias das dunas, mais resistivas, e do seu substrato, formado por sedimentos mais areno-argilosos e saturados da Formação Barreira e, localmente, dos arenitos de praia (*beach rocks*), que na região encontram-se na forma de extensos cordões paralelos a linha de costa. O GPR já vem sendo utilizado com sucesso em diversas regiões costeiras do mundo para estudos sedimentológicos e estruturais (e.g., Sabadia et al., 1997; Mello et al., 1999; Van Dam & Schlager, 2000).

Aspectos Geológicos

As coberturas cenozóicas que afloram na região de Lagoinha – CE são representadas pelos sedimentos terciários da Formação Barreiras e quaternários litificados (*beach rocks* e eolianitos), parcialmente recobertos pelas areias das paleodunas e dunas costeiras.

Em Lagoinha, o topo da Formação Barreiras é marcado por uma camada argilo-arenosa com níveis conglomeráticos, capeados discordantemente por sedimentos eólicos recentes. Na costa, estes depósitos terciários de composição variada ocorrem na forma de falésias ativas ou fósseis de até dezenas de metros de altura, retrabalhados pela dinâmica costeira.

Os *beach rocks* são depósitos praias litificados mediante cimento carbonático, cuja cimentação ainda é um ponto de grande discussão. No geral, estão dispostos paralelamente a linha de costa, podendo formar cordões de até poucos quilômetros de extensão ou como pontos isolados. No Ceará, ocorrem geralmente na zona de intermaré, associados à desembocadura de rios e riachos e apresentam espessuras de poucos metros (Maia et al., 1997). Pelo seu posicionamento na interação dos ambientes fluvial e marinho e pela presença de sistemas de fraturamento, os *beach rocks* tornam-se um ótimo marcador das flutuações do nível do mar, bem como da tectônica recente.

Por fim, a sedimentação eólica local configura-se em campos de paleodunas e dunas, recobrindo as unidades sedimentares mais antigas. Em geral, as dunas recentes exibem areias quartzosas, de granulação fina a média e coloração esbranquiçada, enquanto as paleodunas apresentam tons amarelados a avermelhados e estão fixadas por processos pedogenéticos e cobertura vegetal (Brandão, 1995).

Levantamento do Radar de Penetração no Solo

O levantamento GPR foi conduzido com um equipamento da GSSI modelo SIR-2000, perfazendo um total de mais de 2.000 m levantados em 38 seções GPR. As antenas utilizadas apresentam frequências centradas em 200 e 400 MHz, permitindo profundidades de in-

Uso do GPR no litoral do Ceará

investigação de até 12 m sobre os cordões de dunas recentes. As seções foram executadas com afastamento constante entre as antenas transmissora e receptora e com uma amostragem de 40 traços por metro.

Uma seção com família de ponto médio comum (*Common Mid Point* – CMP) foi realizada para determinar as velocidades médias de propagação das ondas eletromagnéticas no substrato arenoso. Valores próximos a 0,09 m/ns foram obtidos para a cobertura sedimentar mais rasa, que associados a observações diretas em falésias e 06 furos de sondagem, com um equipamento *vibracore*, permitiram a parametrização das profundidades investigadas pelo GPR. Em áreas com relevo mais acentuado, foram efetuadas correções topográficas nas seções GPR com uma mira à laser.

Uma primeira área-alvo, detalhada com o GPR, localiza-se a leste da cidade de Lagoinha e é marcada por um extenso cordão de *beach rocks* paralelo à linha de costa e, parcialmente, soterrado por sedimentos praias recentes. Estes arenitos litificados são caracterizados por fortes refletores plano-paralelos, com mergulho suave para o oceano ou, por vezes, mais inclinados, descrevendo estratificações cruzadas (Fig. 1). Em profundidade, os *beach rocks* formam pequenos bancos isolados nos seus limites laterais, evoluindo para extensas seqüências estratigráficas contínuas, nas partes mais centrais do cordão. Suas espessuras variam entre 1,5 e 3 m, podendo atingir até 6,5 m, na sua porção frontal. Ao longo de um riacho seco, pode-se acompanhar a seqüência de *beach rocks* por mais de 150 m para dentro do continente. O topo desta seqüência encontra-se a uma profundidade média de 1,0 m sob as areias de praia recentes (Fig. 1).

A interpretação sismoestratigráfica da seção GPR da Fig. 1 permite individualizar unidades distintas dentro deste pacote sedimentar. Em direção ao oceano, percebe-se uma inclinação dos refletores, sugerindo o basculamento dos estratos mais antigos e a deposição de uma seqüência sobrejacente. A frente dos cordões de *beach rocks* é sempre marcada por uma interrupção abrupta de seus refletores, que localiza-se, normalmente, entre 10 a 15 m da linha de praia atual.

A segunda situação geológica investigada com o GPR é caracterizada pelos sedimentos areno-argilosos parcialmente consolidados da Formação Barreiras, capeados por uma fina camada de areias dunares. Um nível conglomerático lateritizado marca o topo do pacote sedimentar terciário, muito bem definido nas seções GPR por uma seqüência de fortes reflexões (Fig. 2). Neste contato, as águas pluviais, que infiltram-se nos níveis superiores mais arenosos, acumulam-se nas camadas mais argilosas e impermeáveis da Formação Barreiras, gerando um expressivo aumento na permissividade relativa dos sedimentos. O paleorelevo,

observado nas seções GPR, mostra-se bastante acidentado, recortado por um paleo sistema de drenagem, com mergulho suave das camadas areno-argilosas da Formação Barreiras em direção ao oceano (Fig. 2). Estes paleo-canais são antigos níveis de terraços aluvionares constituídos por sedimentos conglomeráticos, lateritizados e imaturos decorrentes do caráter temporário de períodos chuvosos pretéritos.

Mais para leste, os arenitos litificados da Formação Barreiras são recobertos discordantemente por uma expressiva duna fixa. Uma malha de seções GPR permitiu a reconstituição tridimensional do paleorelevo terciário, que neste local apresenta uma suave elevação em direção ao mar. Estratificações internas nestas dunas indicam uma sedimentação preferencial na direção NE-SW.

Conclusões

O expressivo contraste das propriedades elétricas apresentado entre os sedimentos litificados terciários (Formação Barreiras) e quaternários (*beach rocks*) e os sedimentos eólicos sotopostos garantiu o sucesso da aplicação do método GPR na região de Lagoinha, Ceará. A topografia de topo da Formação Barreiras mostrou-se bastante irregular, recortada por estreitos paleo-canais da drenagem pretérita e mergulhando suavemente ora para o continente ora para o oceano.

Na região de Lagoinha, os cordões de *beach rocks* formam extensas seqüências paralelas a linha de praia e adentrando centenas de metros para o continente. Com poucos metros de espessura, os *beach rocks* estão, parcialmente, capeados pelas areias de praia. Apresentam um solapamento de sua porção frontal, indicando possíveis movimentos extensionais quaternários.

Agradecimentos

Este projeto foi financiado pela Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), Projeto Nº 030/010. Os Autores agradecem ao Laboratório de Geologia Marinha da Universidade Federal do Ceará pelo suporte nos furos de sondagem.

Referências

- Brandão, F.L., 1995, Projeto SINFOR: Mapa geológico da região metropolitana de Fortaleza. Texto Explicativo. Série Cartas Temáticas, 34p.
- Maia, L.P., Sabadia, J.A.B., Freire, G.S. & Raventos, J.S., 1997, Caracterização geoquímica e diagenética da cimentação carbonática dos beachrocks e eolianitos da região costeira do Ceará. XVII Simp.

Uso do GPR no litoral do Ceará

Geol. Nordeste, Resumos Expandidos, **15**: 177-181.
Mello, G.A., Franco, H.A. & Troian, F.L., 1999, Uso de Radar (GPR) na caracterização de ambiente deposicional em zona costeira. VI Congresso Internacional de Geofísica da SBGf, Resumos Expandidos, CD-ROM, 4p.
Sabadia, J.A.B., Alarcón, J., Bagán, L., Bautista, R., Busquet, E., Hellín, C., Himi, M., Lázaro, R., Pinto, V., Rivero, L., Vilas, M., Zarranz, A. & Posantí,

A.C., 1997, Uso de métodos não destrutivos (eletrorresistividade e georadar) na definição dos materiais constituintes da planície de inundação do rio Besòs, Barcelona-Espanha. XVII Simp. Geol. Nordeste, Resumos Expandidos, **15**: 358-360.

Van Dam, R. & Schlager, W., 2000, Identifying causes of ground-penetrating radar using time-domain reflectometry and sedimentological analyses. *Sedimentology*, **47**: 435-449.

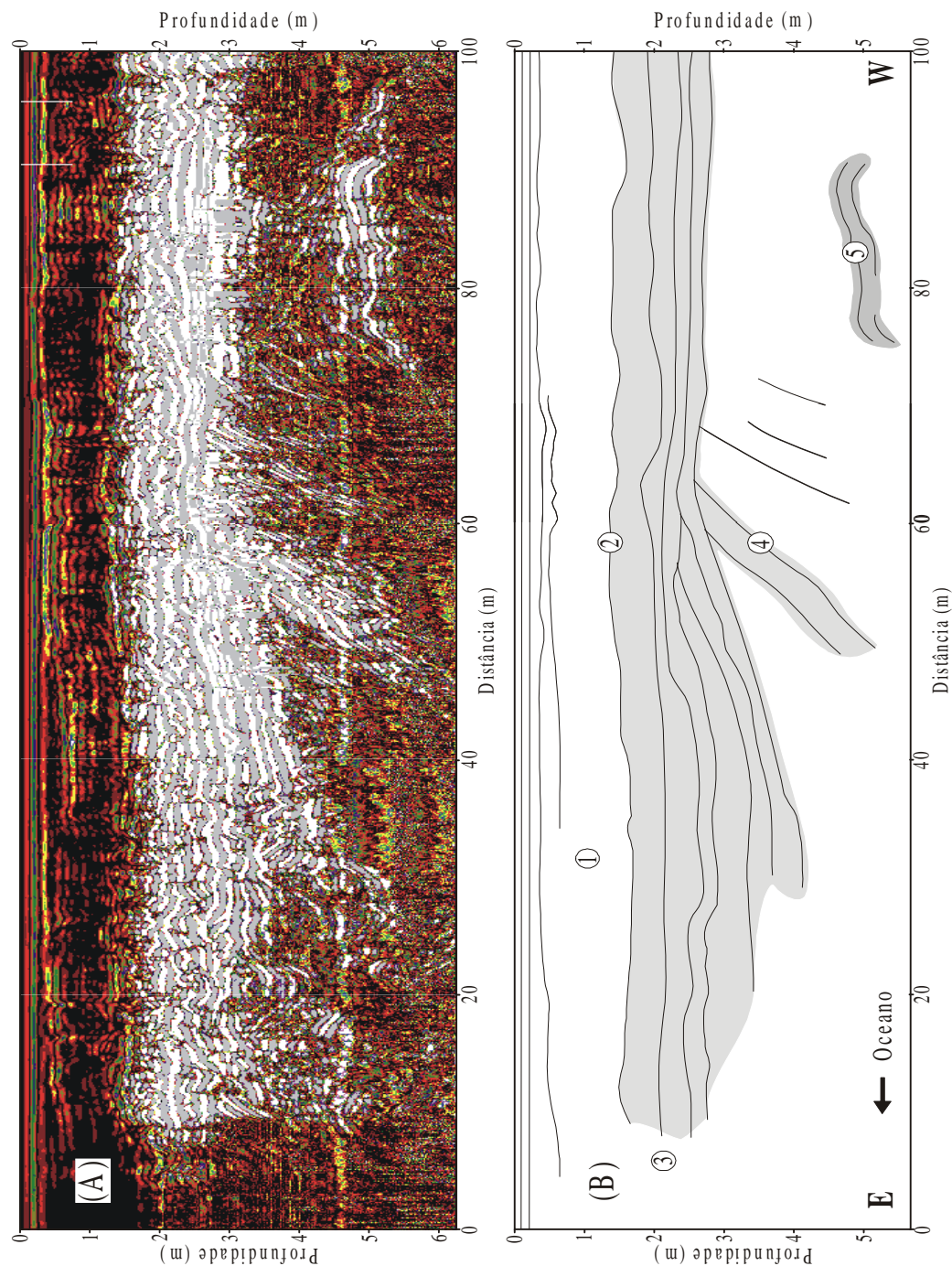


Fig. 1. Seção GPR ao longo de um riacho seco na região de Lagoinha (A) e sua interpretação (B). Frequência central: 200 MHz. (1) sedimentos arenosos inconsolidados; (2) topo e (3) frente do cordão de beach rocks; (4) estratificações cruzadas na base dos beach rocks; (5) uma provável sequência mais antiga de beach rocks.

Uso do GPR no litoral do Ceará

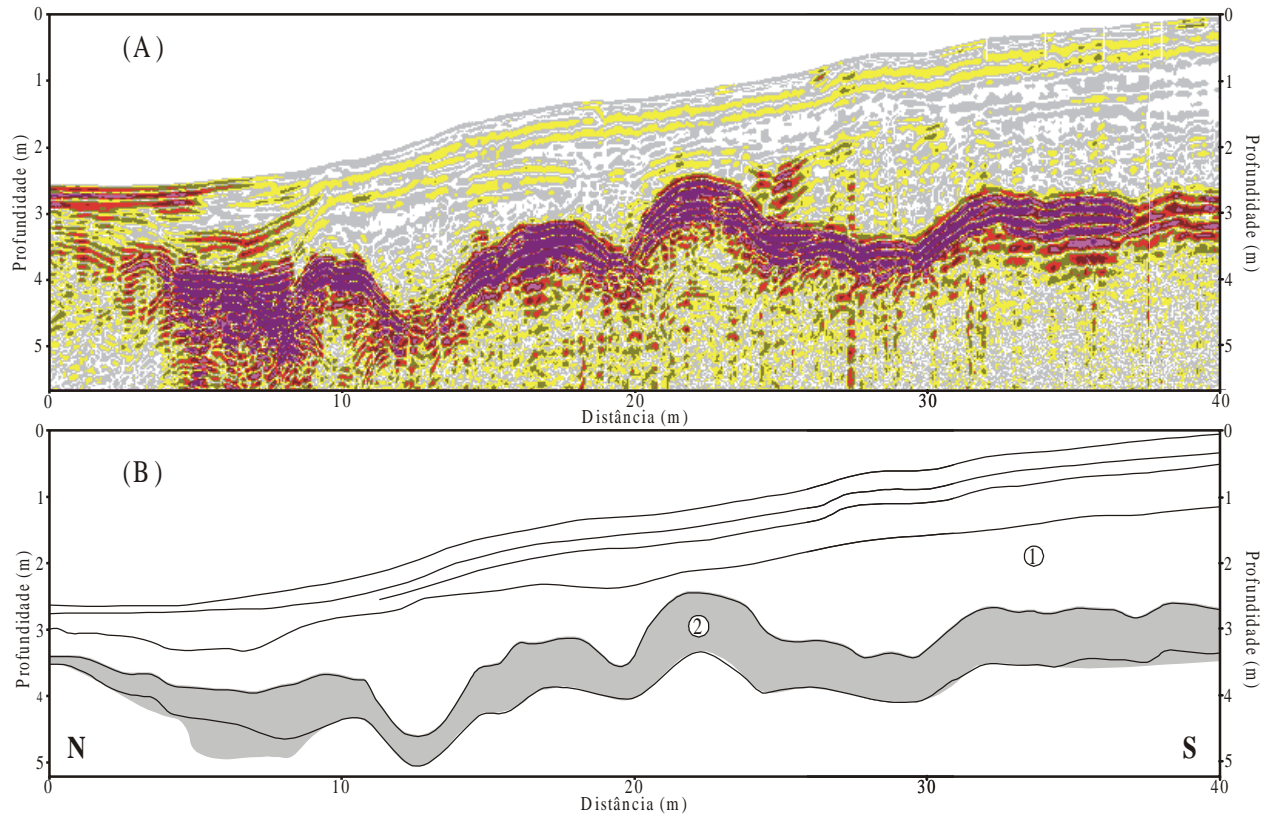


Fig. 2. Seção GPR sobre uma duna fixa a oeste de Lagoinha (A) e sua interpretação (B). Frequência central: 200 MHz. (1) sedimentos arenosos inconsolidados; (2) seqüência superior da Formação Barreiras, recortada por paleocanais estreitos.

Utilização de GPR e eletrorresistividade para mapeamento de dutos decorrentes de piping, Gouveia, MG.

Leonardo Morato, *Graduação em Geologia, IGC-UFMG, leonardo_morato@starmedia.com*

Paulo Roberto Antunes Aranha, *Departamento de Geologia, IGC-UFMG, aranha@igc.ufmg.br*

Marcos Antônio Timbó Elmiro, *Departamento de Cartografia, IGC-UFMG, mtimbo@igc.ufmg.br*

Cristina Helena Ribeiro Rocha Augustin, *CPMTC, IGC-UFMG, chaugust@igc.ufmg.br*

A s r a

A piping system was recognized using different geophysical methodologies to access the subsurficial distribution of its channels. The responses of three antennas (100, 200, and 400 MHz) of the ground-penetrating radar (GPR) method were compared, as well as resistivity profiles obtained with different electrode arrays (Cacau, Wenner, and dipole-dipole). The best GPR results were obtained with the 100 MHz antennas, which was used to achieve five profiles to demarcate the path of the pipe. The pipe was well identified by using the Cacau (with fixed electrodes with offset of 40 meters) and Wenner arrays, and all the other profiles has indicated a second pipe unrelated to the main pipe.

In r

Dentre os métodos geofísicos aplicados para obter informações sobre a estrutura da subsuperfície, o método eletromagnético GPR (*ground-penetrating radar*) tem sido usado com crescente frequência, em várias áreas das geociências (*e.g.* Holub & Dumitrescu, 1994, Mellet, 1995, Aranha *et al.*, 1999). O radar é sensível à variações na composição dos fluidos intersticiais das rochas e às suas mudanças estruturais, e é aplicável em profundidades entre 1 e 20 metros, dependendo da condutividade do terreno.

O método GPR foi usado para mapear a distribuição espacial de um sistema de dutos resultante de processo de *piping*, nos arredores do município de Gouveia, Minas Gerais (Brasil), onde se têm a ocorrência de várias voçorocas (Augustin, 1995). Este processo consiste no carreamento dos finos em subsuperfície provocado pela água, através de caminhos preferenciais.

Os dutos (*pipes*) estão localizados em mantos de alteração de rochas granito-gnáissicas do embasamento cristalino, abaixo de uma inflexão do terreno, apresentando uma declividade menor. Acima desta inflexão, ocorre o ravinamento na vertente. Na porção superior do duto, houve o colapso do teto (Fig. 1), revelando o duto com um diâmetro de cerca de 1 metro e à uma profundidade de cerca de 2,5 metros (em seu ponto central). Os dutos se estendem por quase 10 metros, até a base da vertente.

Os perfis com GPR (radargramas) permitiram ainda a comparação de dados obtidos com outro método geofísico: a eletrorresistividade. Este método



Figura 1 – Fotografia da vertente apresentando a abertura do duto na superfície.

também possui diversas aplicações (*e.g.* Shettigara & Adams, 1989, Apparao *et al.*, 1992, Mezzano *et al.*, 1996). A utilização de métodos elétricos neste aspecto já foi testada em situações semelhantes (*e.g.* Matias, 1993). Seções de pseudo-profundidade usando três arranjos de eletrodos diferentes foram obtidas e a correta localização dos dutos pode ser confirmada no radargrama (Fig. 2).

Par e r s e a G P R

Para determinar a distribuição dos canais de *piping*, cinco seções foram determinadas, paralelas à drenagem da base da vertente e espaçadas de 2 em 2 metros. Cada linha tem cerca de 35 metros de comprimento e foram enumeradas de cima para baixo, com a linha 1 sendo portanto a mais próxima à abertura. Olhando-se para o topo da vertente, os perfis começam à esquerda (0 metros), e, à linha 1, a abertura do *piping* está aproximadamente aos 15 metros.

Para comparação de dados, foram realizados três perfis com as antenas de 100, 200 e 400 MHz, verificando-se qual antena e também qual espaçamento entre cada estação de leitura seria o mais apropriado.

A linha usada com base para as comparações foi a linha 3 (o perfil central). Nesta linha foram testadas as variações das respostas com a antena de 100 MHz, usando-se espaçamentos diferentes. Foram obtidos radargramas com espaçamentos de 1,0 m, 0,50 e 0,25 m. Os levantamentos com esta antena se mostraram eficazes na determinação dos dutos, e ela foi usada

Ma ea n e s e rren es e piping

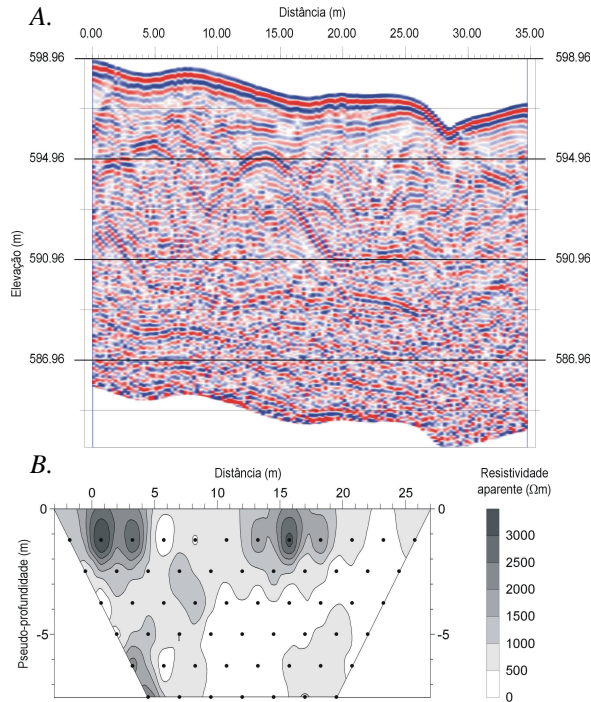


Figura 2 – Correlação entre dados obtidos na linha 3 por: A., GPR (antenas de 100 MHz); B., eletrorresistividade (arranjo Cacau com *offset* de 40m).

nas demais linhas com espaçamento de 0,20 m. As antenas de 200 e 400 MHz foram usadas somente nas linhas 1, 3 e 5, com espaçamento entre estações de 0,10 m.

Se es e e r rres s v a e

Foram também realizadas nesta área levantamentos de eletrorresistividade, visando principalmente comparar arranjos diversos usados na obtenção de seções de pseudo-profundidade. Utilizou-se os arranjos Cacau (Nery & Aranha, 1995), Wenner e dipolo-dipolo, executados sobre a linha 3 dos levantamentos de GPR, e dispendo de 15 eletrodos para cada arranjo.

Para o arranjo Cacau, são usados dois eletrodos fixos (um de corrente e outro de potencial) muito afastados do conjunto de estações. Neste conjunto são dispostos os outros 13 eletrodos, e uma estação é marcada entre dois eletrodos conectados a cada leitura. Para este arranjo, foram feitas duas seções, variando-se a distância entre os eletrodos fixos e o conjunto de eletrodos de estações (*offset*). Na primeira seção, os eletrodos fixos foram posicionados a 20 m do primeiro e último eletrodos do conjunto de estações. Na segunda, eles foram posicionados a 40m.

É uma premissa deste arranjo que este par de eletrodos deva ficar a uma grande distância dos demais, sendo que a influência desta distância será observada entre estas duas seções. Os demais eletrodos (das estações) estão dispostos com intervalos de 2,5 m, sendo o primeiro colocado 3 m antes do início das linhas de GPR.

Os arranjos Wenner e dipolo-dipolo utilizaram os 15 eletrodos dispostos em intervalos de 2,5 m, sendo o primeiro colocado 5,5 m antes do início das linhas de GPR.

Pr essa n e n e r r e a s r e s a s

Para os radargramas, a análise de velocidades através de um perfil de ponto médio comum (CMP) apontou uma velocidade média para a onda eletromagnética no substrato de 86 m/is, usada como velocidade constante para a conversão tempo \times profundidade. No caso dos radargramas obtidos com as antenas de 200 e 400 MHz, foi necessária a remoção dos ruídos de fundo (*background*) que estavam sobressaindo sobre os resultados. Na maioria dos radargramas foi aplicado o filtro gaussiano, com suavização. Em apenas duas seções (linha 3 com antena de 200 MHz e na linha 1 com antena de 400 MHz) o filtro passa-banda *butterworth* foi empregado em substituição ao gaussiano.

Em quase todos os radargramas é possível observar reflexões no formato de hipérbolas bem delineadas (Fig. 3). Estas feições indicam os canais do *piping*, e permitem mapear a estrutura pelas diversas seções (Fig. 4).

Na linha 1 não há hipérbolas bem nítidas em nenhum dos radargramas, mas a posição do *pipe* pode ser estimada em função da proximidade desta seção com a abertura da cavidade. Nos radargramas desta linha é possível notar reflexões com curvatura descontinuada que poderiam ser interpretadas como o duto. Os demais radargramas para as outras linhas

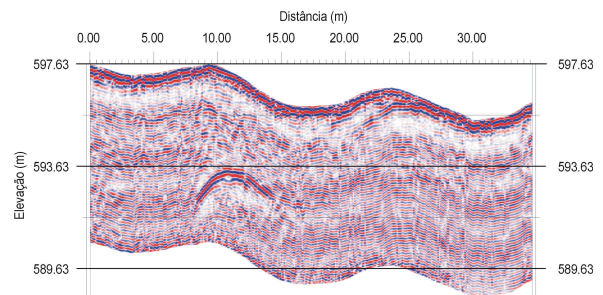


Figura 3 – Radargrama da linha 5, obtido com antenas de 200 MHz. Nota-se uma hipérbole na posição 10 m na altitude 593 m.

Ma ea en e s e rren es e *piring*

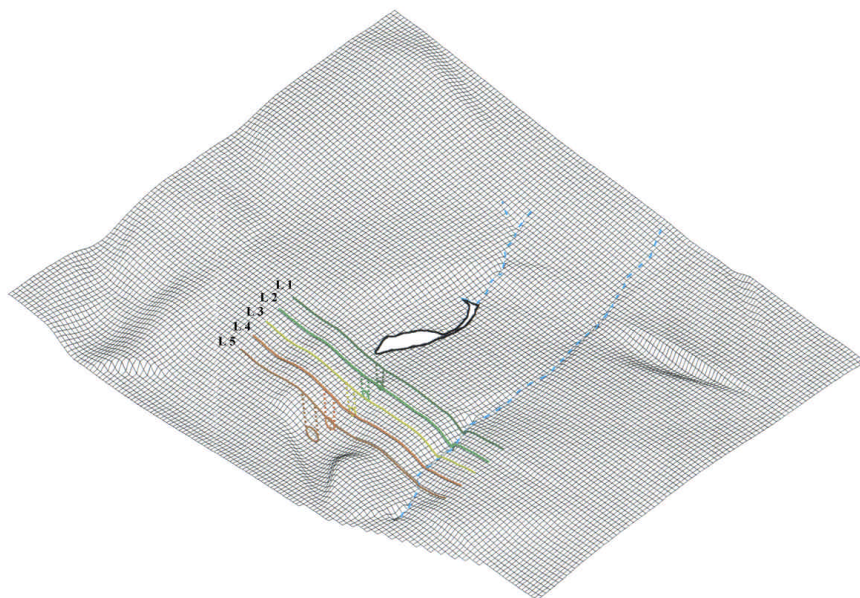


Figura 4. – Modelo da vertente com o posicionamento das linhas em relação à abertura do duto, e das seção do duto atravessadas por cada perfil.

apresentam hipérbolas bem distintas, a uma profundidade de cerca de 2,5 metros. A altura dos dutos foi inferida pela diferença entre as reflexões no topo e na base, que é de aproximadamente 1 m. Nas linhas 4 e 5 o duto alarga-se, chegando a 2 m de largura e 1,5 m de altura.

Todos os perfis de pseudo-profundidade indicaram pontos próximos à superfície com valores de resistividade aparente elevados, variando apenas a localização. Os arranjos Cacau (com eletrodos fixos a 20 m) e dipolo-dipolo marcaram os picos de resistividade que podem ser relacionados com o *pipe* a 10 metros do início das linhas de GPR. Para os arranjos Wenner e Cacau (com eletrodos a 40 m), o pico se encontra por volta dos 16 metros, mais próximo da localização dos dutos nos radargramas (Fig. 2). O arranjo Wenner ainda situou este pico relativamente mais profundo que os demais arranjos.

D s s e n s es

O primeiro teste efetuado com o método GPR foi sobre a variação de espaçamento com as antenas de 100 MHz. Para uma distância de 1 metro entre as estações, o perfil obtido não teve resolução para mostrar as feições de detalhe, como os dutos. Por outro lado, as reflexões contínuas foram ressaltadas, podendo no entanto constituir um efeito artificial deste espaçamento. Com espaçamentos inferiores a 0,5 m, as hipérbolas se tornaram mais nítidas. O espaçamento ideal foi de 0,2 m para estas antenas.

Os levantamentos com as antenas de 100 e 200 MHz obtiveram os melhores radargramas para identificação do duto. Outras feições, entretanto, foram ressaltadas nas antenas de 200 e 400 MHz. É o caso de fraturas e contatos litológicos. As antenas de 400 MHz especialmente distinguem bem dois horizontes do solo, entre as distâncias de 0 e 23 m (Fig. 5). Esta variação também é qualitativamente apresentada nas seções de eletroresistividade, com o material coluvionar apresentando resistividade aparente relativamente mais alta (Fig. 2B).

As seções de eletroresistividade que melhor localizaram o duto foram as obtidas com os arranjos Cacau e Wenner. A metodologia Cacau se mostrou eficiente com eletrodos fixos a uma distância dez vezes superior àquela entre eletrodos de estações.

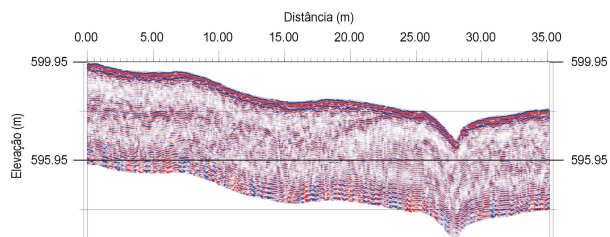


Figura 5. – Radargrama da linha 1, obtido com antenas de 400 MHz. Um refletor é visível entre 0 e 23 metros, com profundidade de aproximadamente 2 metros, dirigindo-se para a superfície nos últimos 5 metros.

Ma ea en e s e rren es e p i p i n g

Distâncias menores deslocaram lateralmente o duto, problema também ocorrido com o arranjo dipolo-dipolo.

Re er n as

- Apparao, A., Rao, T.G., Sastry, R.S. & Sarma, V.S. (1992). Depth of detection of buried conductive targets with different electrodes arrays in resistivity prospecting. *Geophysical prospecting*, v.40, n.7, p. 749-760.
- Aranha, P.R.A., Augustin, C.H.R.R. & Botelho, M.A.B. (1999). The use of ground penetrating radar (GPR) to access subsurface structures near a hollow with gully, Gouveia-MG. *In: Regional Conference on Geomorphology, 1999, Rio de Janeiro. Anais da Conferência Reginal em Geomorfologia*. Rio de Janeiro: União da Geomorfologia Brasileira, v.1, p. 67.
- Augustin, C. H. R. R. (1995). Geoökologische Studien in Südlichen Espinhaçoerge bei Gouveia, Minas Gerais, Brasilen unter besonderer Berücksichtigung der Landschaftentwicklung. Tese de Doutorado, Universidade de Frankfurt. 121 p.
- Holub, P. & Dumitrescu, T. (1994). Détection des vaités à l'aide de mesures électriques et du géoradar dans une galerie d'amenée d'eau. *Journal of Applied Geophysics*, v.31, p.185-195.
- Matias, M.J.S. (1993). Detecção e discriminação de cavidades subterrâneas por métodos tripotenciais eléctricos – estudo experimental. *Geotecnica*, v.68, p. 31-43.
- Mellet, J.S. (1995). Ground penetrating radar applications in engineering, environmental management, and geology. *Journal of Applied Geophysics*, v.33, p.157-166.
- Mezzano, A., Aranha, P.R.A., Bueno, G.T., Belém, R. & Augustin, C.H.R.R. (1996). Uso de dados geofísicos em estudos geomorfológicos no município de Gouveia e Datas, Serra do Espinhaço, MG. *In: Simpósio Nacional de Geomorfologia, I, 1996, Uberlândia. Anais...* Belo Horizonte, v. I, p. 340.
- Nery, A.C.F. & Aranha, P.R.A. (1995). Uma nova metodologia em prospecção geoelétrica: Metodologia Cacao. *In: Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 4, 1995, Rio de Janeiro. Anais...* Rio de Janeiro, v. II, p. 996.
- Shettigara, V.K. & Adams, W.M. (1989). Detection of lateral variations in geological structures using electrical resistivity gradient profiling. *Geophysical prospecting*, v.37(3), p. 293-310.

A ra e en s

Esta pesquisa integra o Programa "Pólo de Integração da UFMG no Vale do Jequitinhonha - 2000" – FINEP/UFMG, e é apoiada pelo Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). A cooperação dos habitantes do município de Gouveia (MG) é reconhecida aqui com gratidão.



UTILIZAÇÃO DO GPR NA INVESTIGAÇÃO DA ESTRATIGRAFIA DA REGIÃO COSTEIRA DE ITAIPUAÇÚ – MARICÁ (RJ)

*Alípio José Pereira, PETROBRAS S.A., Brasil; Luiz A..P. Gambôa, PETROBRAS S.A., Brasil;
Maria Augusta M. da Silva, UFF, Brasil; Ariovaldo da Costa, PETROBRAS S.A., Brasil;
Amilsom R. Rodrigues PETROBRAS S.A., Brasil*

Resumo

O principal objetivo deste estudo é o de investigar a estratigrafia Quaternária costeira, num trecho da região da praia de Itaipuaçú, município de Maricá, Estado do Rio de Janeiro, utilizando como ferramenta básica o GPR (Radar de Penetração no Solo). A praia de Itaipuaçú possui um arco praial de aproximadamente 10 Km de extensão, e é caracterizada por um perfil refletivo, com ondas de alta energia e principalmente pela característica textural das areias (muito grossas, arredondadas) formadas por quartzo puro transparente, o que destoa do padrão das outras praias que formam o litoral leste do Estado do Rio de Janeiro. A planície costeira no local do estudo tem cerca de 550 metros de largura, e possui um campo de dunas no topo do cordão litorâneo (mais jovem), uma planície na retaguarda desse cordão, e um segundo cordão (mais antigo), nas proximidades do embasamento cristalino que forma as escarpas da área. A coleta de dados com o GPR foi realizada em um trecho sobre o cordão litorâneo mais jovem, constando da montagem de uma malha de 100 x 100 metros em 3D. Realizou-se também uma linha regional perpendicular à praia, atravessando toda planície costeira. Foram também realizados dois furos de sondagem com o intuito de identificar a litologia referente às reflexões observadas nos registros do GPR. Os resultados indicam que o pacote sedimentar de 13 metros de espessura observado nos registros da malha 3D, é formado basicamente por estratos

horizontais e subhorizontais, embora sejam vistos estratos com forte inclinação ($30^0/40^0$), mergulhando para o mar. No cordão litorâneo mais antigo a espessura sedimentar é menor e o contato com o embasamento ocorre a 3 metros de profundidade. Um forte refletor presente ao longo de quase todo perfil regional identifica o topo do lençol freático, sendo que sobre o cordão litorâneo mais jovem, ele aparece a 4 metros de profundidade, enquanto que a partir do reverso do cordão arenoso mais jovem, o refletor está a 1 metro de profundidade.

Introdução

Ao estudar a estratigrafia das regiões costeiras, buscamos no tempo e no espaço reconstruir eventos referentes aos avanços e recuos das linhas de costas, devido principalmente as variações do nível do mar, uma vez que os registros desses eventos podem ser preservados nos pacotes sedimentares. Normalmente em estudos desta natureza, é comum a investigação através da abertura de trincheiras, do aproveitamento de canais naturais (inlets) existentes nas restingas e de perfurações. A utilização do GPR como ferramenta no imageamento dessas feições, abre uma oportunidade de se pesquisar e adquirir informações tridimensionais de maneira ágil, barata (se comparada à sísmica convencional) e de grande qualidade na definição de estruturas. Cada vez mais esse tipo de aquisição vem sendo utilizado em diversos segmentos da pesquisa, como na estratigrafia (Oliveira Junior J.G. de et

al, 2000), geotecnia (BasileV. et al, 2000) e geologia ambiental (Birben R. et al, 2000).

O GPR é um equipamento composto basicamente por uma unidade controladora e duas antenas (transmissora e receptora) responsáveis pela emissão e recepção do pulso eletromagnético que ao viajar pelo subsolo encontra diferentes meios com diferentes impedâncias eletromagnéticas, propiciando que a onda seja parcialmente transmitida e parcialmente refletida. A utilização do GPR, além da facilidade do manuseio do equipamento, possibilita uma razoável penetração (aproximadamente 13/14 metros) com excelente definição das camadas, ajudando no entendimento da geometria dos corpos arenosos que compõem os cordões litorâneos.

A escolha da praia de Itaipuaçu (Figura 1), deve-se ao fato de não existirem trabalhos voltados para o estudo da estratigrafia local, contribuindo assim para o entendimento da evolução dessa planície costeira. Além disso, a praia de Itaipuaçu é sem dúvida uma das poucas praias da porção leste do Estado do Rio de Janeiro que ainda mantém relativamente preservadas suas condições naturais.

Metodologia

Foi demarcada uma linha regional de aproximadamente 550 metros, perpendicular à praia e a partir desta, cruzando a planície costeira, e uma malha de 100 x 100 metros no cordão litorâneo mais jovem. O espaço delimitado de 100 x 100 metros foi dividido em 11 linhas paralelas e 11 linhas perpendiculares à praia com espaçamento de 10 metros entre elas, possibilitando ao final do levantamento a montagem de uma malha em 3D (Figura 2), e, portanto a visualização dos diferentes refletores.

A malha tridimensional pôde ser construída de duas maneiras; utilizando-se as linhas perpendiculares e outra com as linhas paralelas à linha de praia sobre o cordão litorâneo. O processamento foi realizado nos laboratórios do CENPES – PETROBRÁS, e constou da aplicação de filtros para a retirada de ruídos, da migração e correção topográfica. Paralelamente, foram efetuados dois furos de sondagem com trado manual, alcançando a profundidade de 13 metros, no cordão litorâneo mais jovem, e 6 metros de profundidade no trecho entre os dois cordões arenosos.

O GPR utilizado foi o modelo SIR-2000 da GSSI (Geophysical Survey Systems Incorporated), de propriedade da PETROBRAS S.A., que consiste de uma unidade controladora digital e duas antenas (transmissora e receptora) de 200 Mhz blindadas, além do odômetro conectado a antena receptora para aferição da distância percorrida pelas antenas. O método de aquisição usado foi o “survey wheel”, no qual os disparos são comandados pôr uma roda medidora acoplada ao conjunto e que foi ajustada para disparar a cada 5 cm. A topografia da área necessária para o ajuste dos dados perfilados com o GPR, foi levantada utilizando-se o método das balizas de Emery (1961).

Resultados

A perspectiva da boa penetração da onda eletromagnética em terrenos arenosos (baixa condutividade), pôde ser observada por ocasião da aquisição, constatando-se assim, que a utilização do GPR, além de ágil é extremamente valiosa para estudos desta natureza. Foi possível imagear refletores até 12/13 metros de profundidade na sucessão de camadas predominantemente de

areias claras, arredondadas, bem selecionadas (conforme furo de sondagem), representativas de ambientes pretéritos desenvolvidos em função das variações do nível do mar nessa região.

Na malha 3D, pôde ser notada a predominância de refletores horizontais e subhorizontais, embora existam camadas inclinadas com $30^{\circ}/40^{\circ}$, a partir das camadas mais superficiais até 6/7 metros de profundidade, mergulhando para o mar, próximas do cordão arenoso mais jovem, e estratos com inclinações mais suaves ($15^{\circ}/20^{\circ}$), entre 2 e 4 metros de profundidade, com a mesma direção, próximos da escarpa de tempestade no limite da praia. O refletor a 4 metros de profundidade, observado em toda a malha 3D, corresponde ao topo do lençol freático, aparecendo bem mais raso (aproximadamente 1 metro) sobre o cordão litorâneo mais antigo, na direção do continente. As fortes reflexões à esquerda da malha 3D (Figura 2), em torno de 5/6 metros de

profundidade, sugerem o contato dos sedimentos com o embasamento, enquanto que na retaguarda do cordão litorâneo mais antigo, esse contato é observado a 3 metros (Figura 3) do cordão litorâneo mais jovem, os estratos seguem a inclinação atual da duna, com forte mergulho na direção do continente (superior a 50°).

Referências

- Basile V., Carozzo M.T., Negri S., Nuzzo L., Quarta T., Villani, A.V., 2000 - A Ground Penetrating Radar Survey for Archaeological Investigation in an Urban Area – (Lecce, Italy). *Journal of Applied Geophysics*, 44, 15-32.
- Birken R., Versteeg R., 2000- Use of Four-Dimension Ground Penetrating Radar and Advanced Visualization Methods to Determine Subsurface Fluid Migration. *Journal of Appl. Geoph.*, 43, 215-226.

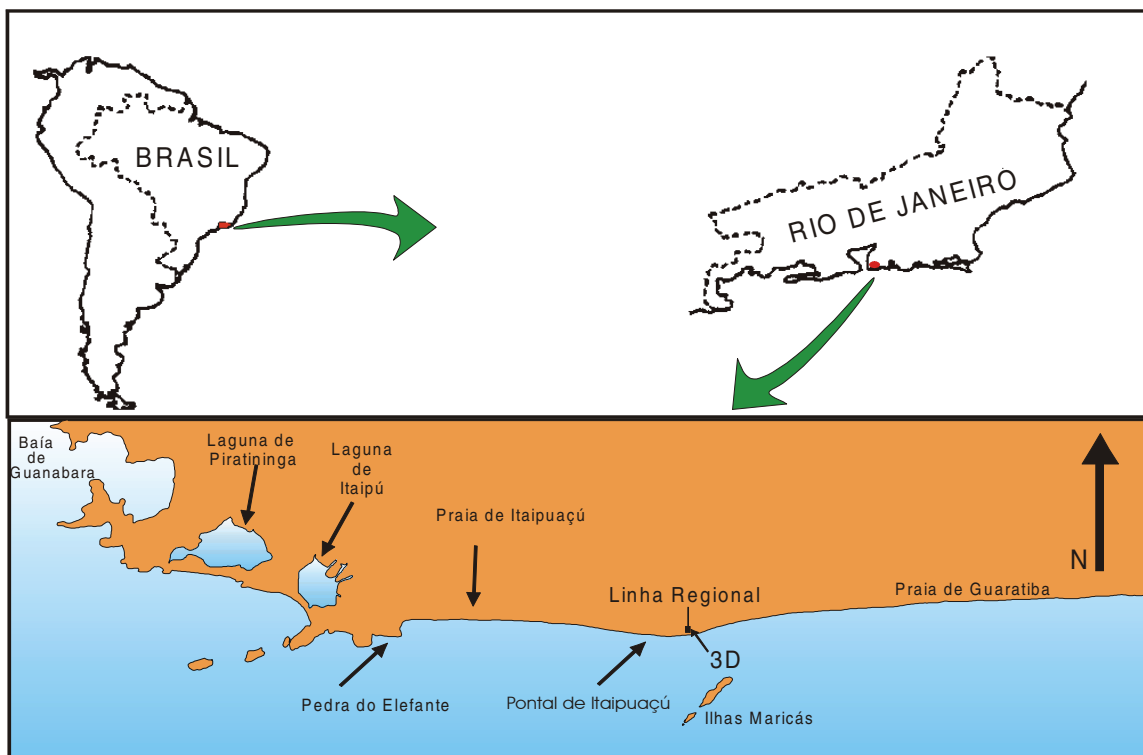


Figura 1 – Localização da área de estudo.

Emery, K. O., 1961 – A Simple Method of Measuring Beaches Profiles. *Limnology and Oceanography*, 6. 90-93.

Oliveira Junior J.G. de, Medeiros W.E. de, Vital H., 2000 – Uso do Radar Penetrante no

Solo para Caracterização de Estruturas Internas de Dunas no Município de São Bento do Norte (RN). *Simpósio Brasileiro Sobre Praias Arenosas (SC – Brasil)*.

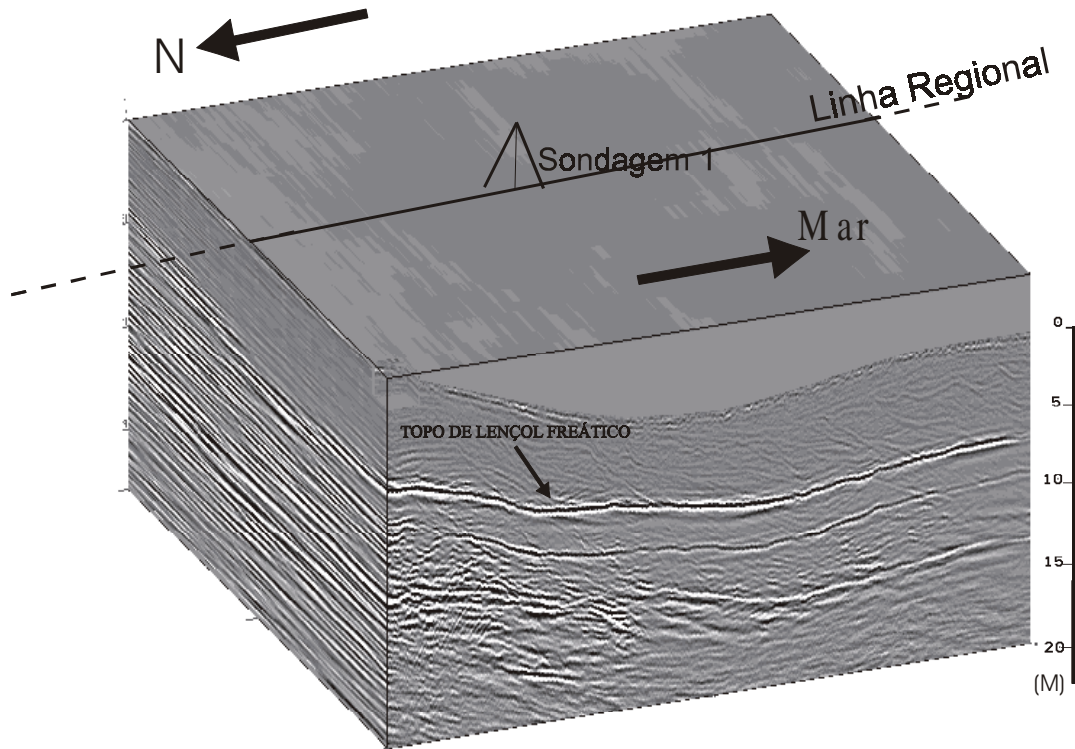


Figura 2- Bloco 3D relativo ao levantamento com o GPR sob a Praia - Itaipuaçu/RJ

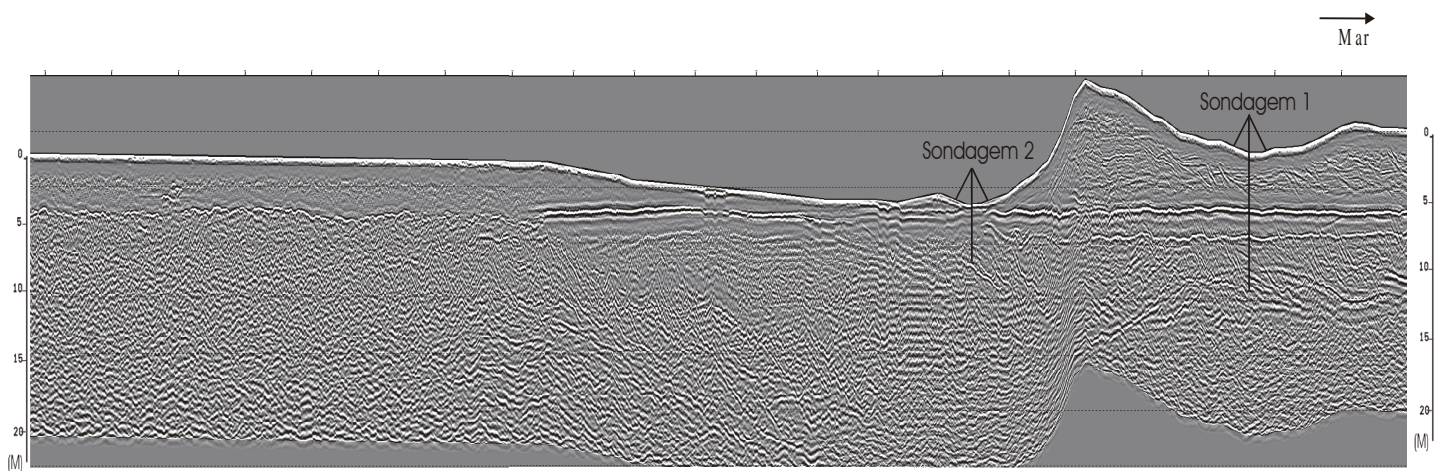


Figura 3 - linha GPR regional com 540 metros de extensão - Itaipuaçu/RJ