



Geofísica 3D como suporte ao Diagnóstico Geoambiental integrado em área fluvial - Estudo de caso.

(A radar-estratigrafia como ferramenta de interpretação geofísica)

Celso C. Magalhães, Marco Antonio M. Cantisano, Elaine Castro - BRAIN Tecnologia Ltda, Brasil

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper was reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represents any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction, or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of The Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

This paper describes the methodology used in an area contaminated by hydrocarbon, due to a buried pipe disruption under a creek. The used technologies were GPR (Ground Penetrating Radar), 2D and 3D electrical tomography and geochemical analysis of soil and water collected in drilling wells, having as objective to define the regional geological frame and to evaluate the area affected by hydrocarbons. The gathering of these methods became possible to define and calculate the total volume of porous system with good accuracy. Additionally, the methodology proved to be an efficient and safe way for characterization, delimitation and volume calculation of the zone under influence of hydrocarbons.

Introdução

Do ponto de vista operacional e de custo, grande volume de serviço e dinheiro tem sido gasto para o estudo de áreas contaminadas por hidrocarbonetos. Com essa premissa o presente trabalho vem apresentar uma sistemática de diagnóstico definitivo, a um custo razoável e com maior eficiência e previsão para estudos desta natureza.

Geologia

Geologicamente a área de estudo é constituída por arenitos médios a grosseiros, com níveis argilosos e estratificações cruzadas de portes diversos. Sobre esta formação, erodida, se assentam, discordantemente: (1) uma **Seqüência Colúvio/Aluvionar**, constituída por sedimentos argilosos e argilo-arenosos, provenientes das bordas erodidas dos vales que conduzem ao igarapé, denominada de **Fase I**, com características típicas de entulhamento de vale e (2) uma **Seqüência Aluvionar Recente**, constituída por sedimentos arenosos e argilo-arenosos, fluviais, provenientes de montante do igarapé, denominada de **Fase II**, ou Fase de Sedimentação Atual (Figura 1).

A origem do graben, no qual se encontra o igarapé, pode ser seqüenciada em duas fases: Falhamentos transcorrentes com movimentação NE/SW, iniciaram a abertura do vale, que evoluiu com falhamentos normais, de compensação, com direções gerais aproximadamente E-W (Figura 2).

Metodologia

O presente trabalho contou com seis fases distintas, a saber: Levantamentos de Dados GPR-2D e Tomografia Elétrica 2D, para realização do arcabouço bidimensional da área, com mapeamento bidimensional de feições gerais, Levantamentos de Dados GPR-3D, Tomografia Elétrica 2D de Detalhe, Perfuração de Poços com Amostragem e Análises Geoquímicas em locais escolhidos com base no arcabouço 2D supracitado, para confecção de um mapa detalhado tridimensional, de zonas impactadas.

Com a finalidade de se definir os parâmetros de aquisição para o GPR foram realizados testes experimentais com diferentes antenas (100, 200 e 250 MHz) e diversos intervalos de traços, intervalos de tempo de gravação (comprimento do registro) e número de empilhamentos por traço. Quatro testes CMP (Common Mid Point) foram realizados, com o objetivo de definir as funções velocidades para o processamento. Esses testes orientaram a escolha dos parâmetros, tanto para o levantamento 2D quanto 3D, onde foi escolhida a antena de 200 MHz.

Os trabalhos de aquisição 2D contaram com a realização de 45 seções GPR, com controle topográfico regular por levantamento a estação total e 71 seções de Tomografia Elétrica subaquática, onde foi utilizado o arranjo Wenner.

A tomografia elétrica é uma moderna versão de aplicação do já consagrado método elétrico. Apresenta como principal vantagem à possibilidade de realizar automaticamente milhares de medições de decaimento do potencial elétrico induzido ao longo de uma seção de eletrodos dispostos sobre o terreno. Isso permite construir uma imagem elétrica contínua do subsolo, em vez de poucas e esparsas medições de seções elétricas, como são comumente oferecidas no mercado. O resultado final é uma inequívoca visão tomográfica da área assinalada, com extrema precisão e detalhamento de feições geológicas, de plumas de contaminação e de meios contaminados.

Os trabalhos de aquisição 3D contaram com a realização de quatro levantamentos contíguos, o primeiro com 40 seções inline, o segundo com 50 seções inline, o terceiro com 60 seções inline e o quarto com 100 seções inline, no campo, equiespaçadas a cada 1,0 m, perfazendo um total de 3,0 ha de área coberta.

Foram também perfurados 103 poços e esta investigação direta foi dividida em duas etapas: a primeira etapa consistiu em 11 sondagens para instalação de poços de monitoramento, segundo a norma ABNT 13.895 e completados segundo a norma CETESB - 06.010 (1998).

Após a instalação dos poços e seu esgotamento foi realizada uma campanha de amostragem da água subterrânea para compostos orgânicos e inorgânicos; na segunda etapa foram feitas 92 sondagens para amostragem de solo, baseadas nos critérios e na metodologia EPA SW-846.

As análises geoquímicas seguiram os critérios definidos pela EPA e constituíram-se de: hidrocarbonetos totais de petróleo (HTP) por cromatografia gasosa/infravermelho (EPA 8015C); benzeno, tolueno, etil-benzeno e xilenos (BTEX) (EPA 8260C), hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA) (EPA 9270C), ambos por cromatografia gasosa e metais (As, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, V e Zn) por ICP (Inductively Coupled Plasma) (EPA 600).

Interpretação Radar-Estratigráfica/Estrutural 2D

Através da integração das interpretações efetuadas para as seções de GPR-2D, tomografia elétrica e sondagens podemos confirmar a evolução estrutural apresentada para área. Esta evolução se apresenta bem estruturada nas Figuras 3 e 4 (cortes AB e CD) que dispõem as estruturas em flor, que caracterizam as transcorrências na região.

Os sedimentos da Fase I ou fase de entulhamento do vale, por serem colúvio/aluvionares, são mais argilosos e, portanto, menos permeáveis. Estão distribuídos nas bordas do vale, como também preenchem sua parte central. Possuem espessuras variando, entre 2 e 6 m. e tem sua maior expressão a montante do duto.

Os sedimentos da Fase II ou fase de sedimentação aluvionar recente, são mais arenosos e, portanto, mais permeáveis. Estão presentes na calha, e se espessam em direção ao rio – Figura 3 (corte AB) - onde são mais argilosos. Possuem espessuras diversas, que são moldadas pelo relevo dos paleocanais e canais onde o igarapé se estabelece. Esses sedimentos constituem o alvo principal da investigação desse trabalho, por serem confinados e por representarem o sistema permoporoso capaz de conter e transmitir hidrocarbonetos vazados.

A interpretação das geometrias internas representadas por progradações de areia, truncamentos diversos e estratificações cruzadas, além de estruturas de preenchimento de canais, típicas, permitem caracterizar radar-estratigraficamente a fácies arenosa da fácies argilosa dentro da Fase de Sedimentação Atual, nos moldes da interpretação sismo-estratigráfica largamente utilizada na indústria do petróleo.

Sobre esse fato foi gerado o Mapa de Isópacas do Sistema Aluvionar Recente – Fase II, com os limites estruturais da seqüência, representados pela disposição das falhas normais e das falhas transcorrentes na área.

Hidrogeologia

O igarapé é resultado de uma drenagem encaixada na falésia da borda do rio. As áreas localizadas no platô onde se localiza a cidade, correspondem a extensas zonas de recarga dos aquíferos rasos sendo que a existência do igarapé proporciona o rebaixamento das linhas potenciométricas, funcionando como zona de

descarga do aquífero. Durante alguns períodos de cheia no ano, é possível que este modelo se inverta localmente, quando o nível do igarapé seria mais elevado do que a água subterrânea imediatamente próxima, nas bordas do mesmo. Por equilíbrio no balanço hídrico, é necessário que o igarapé permaneça a maior parte do ano hidrogeológico como área de descarga, uma vez que o rio é a drenagem natural das águas pluviais.

Desta forma, o modelo conceitual observado apresenta linhas equipotenciais (elevação da carga hidráulica do aquífero raso) paralelas as bordas do igarapé, acompanhando aproximadamente as curvas topográficas do terreno. A superfície da água no interior do igarapé corresponde à própria superfície do aquífero raso naquele local, uma vez que a água subterrânea é aflorante. (Figura 5)

Como extensão da interpretação inicial pode-se antecipar que a contaminação oriunda do vazamento do duto se concentra no interior do próprio igarapé, uma vez que o transporte pela água subterrânea ocorre preferencialmente das áreas mais externas para o interior do mesmo.

O Sistema Aluvionar Recente – Detalhamento Radar-Estratigráfico 3D

Os levantamentos GPR tridimensionais realizados na área tiveram como finalidade caracterizar detalhadamente o Sistema Aluvionar Recente, que se traduz no sistema permoporoso capaz de armazenar e conduzir o óleo vazado do duto.

Tal caracterização detalhada permitiu o mapeamento da geometria externa do referido sistema, de modo a prover a precisão requerida para os cálculos volumétricos.

As Figuras 6 e 7 (cortes EF e GH) trazem uma seção inline e uma seção crossline do 3D com suas progradações de areia e seus sistemas de estruturas de crescimento recentes ligadas as paleo-calhas, esculpidas no sistema colúvio/aluvionar. Estratificações cruzadas e estruturas de preenchimento de canais são comuns nos sistemas arenosos. Destaque especial deve ser dado às estruturas em flor que denotam os falhamentos transcorrentes responsáveis pela abertura do graben do igarapé. A difração que representa o oleoduto está presente na seção da Figura 6, se bem que atenuada devido à migração nas duas direções (full migration).

O nível de amplitudes no sistema arenoso (Aluvionar Recente) – Fase II – pode ser correlacionado à presença de hidrocarbonetos no seu interior, o que reforça o contraste do sinal do GPR.

Destaque especial deve ser dado a seção GPR da Figura 7 (corte GH) com sua interpretação radar-estratigráfica, ressaltando os truncamentos das diversas radar-fácies que constituem o sistema aluvionar progradante. Tal interpretação está devidamente amarrada aos furos de sonda realizados na área, para os quais foram feitas as devidas análises granulométricas.

Com base nesta interpretação foi gerado o mapa 3D de contorno da paleo-calha sobre a qual se desenvolve os sedimentos da Fase II (Figura 8). A Figura 9 apresenta a

visualização 3D da isópaca do sistema aluvionar recente com os furos de sonda realizados.

Caracterização de Zonas Contaminadas – GPR-3D, Tomografia Elétrica, Sondagens e Geoquímica.

A Figura 10 (corte IJ) traz uma seção de tomografia elétrica, representativa da área, e suas correlações com as amostras de solo coletadas em furos de sonda. Os furos foram realizados sobre as seções de tomografia.

De modo geral, os teores de TPH decaem com a profundidade, pois, o óleo tende a se concentrar no sistema aluvionar recente – Fase II – e dentro desse sistema, as concentrações tendem a diminuir com o aumento da profundidade.

As exceções ficam por conta dos canais mais arenosos, que podem atingir profundidades em torno de 4m. Tais canais podem apresentar anomalias de resistividade correlacionadas à presença de altos teores de TPH e, devido às suas condições de alta transmissividade hidráulica tais anomalias podem se estender a maiores distâncias.

Discussão

Tomando como base o mapa de isópacas da Figura 8, com o objetivo de quantificar os volumes por faixas de concentrações de TPH, por intervalos de profundidade e também segundo suas variações faciológicas (areia/argila), estimadas com base nos poços e na interpretação GPR sísmo-estratigráfica 3D, foram elaborados mapas geoquímicos/faciológicos para cada intervalo de profundidade (0,0 a 1,0m, 1,0 a 1,5m, 1,5 a 2,0m, 2,0 a 2,5m, 2,5 a 4,0m e 4,0 a 6,0m), como o mapa ilustrado na Figura 11. Tais mapas permitiram caracterizar e quantificar a distribuição espacial do óleo vazado dentro do sistema aluvionar recente, permitindo também efetuar os cálculos volumétricos por faixa de concentração de TPH em ppm e por profundidade.

Após a realização desse trabalho de avaliação geoambiental foram realizadas análise de risco e projeto de remediação, tendo este diagnóstico como suporte.

Conclusões

A Figura 12 traz uma seqüência de fotos realizadas quando da retirada do duto, na fase de remediação, que comprovou a exatidão das predições realizadas por esse trabalho de diagnóstico, tanto para a fácies arenosa e areno/argilosas, quanto para os teores de hidrocarbonetos nele presentes.

As áreas e volumes de sólido e de óleo puderam ser calculados com precisão, para suporte dos trabalhos de engenharia e remediação que se seguiram.

Com isso pode-se concluir que os métodos GPR e Tomografia Elétrica, ao lado da avaliação geoquímica e do controle por poços, mostram-se, eficientes, rápidos e seguros na detecção de zonas impactadas por vazamentos de hidrocarbonetos, com ampliação da base de dados geológicos e ambientais através de imagens georeferenciadas. Permitindo com isso uma racionalização dos trabalhos de sondagem e das análises físico-químicas e, sobretudo, permitindo, a baixo custo,

incorporar um número de interpretações interativas e recursivas que aumentam sobremaneira a precisão da localização das zonas afetadas, assim como a precisão para os cálculos e estimativas de suas espessuras e de seus modelos de distribuição espacial, que se fazem necessários na fase de eventual remediação ou monitoramento.

A integração das ferramentas Geofísica e Geoquímica, tem se apresentado como a metodologia rasa mais precisa para a avaliação de impacto ambiental causado por acidentes envolvendo hidrocarbonetos e/ou produtos químicos, uma vez que permite visualizar o meio físico e a pluma de contaminantes em subsuperfície, através do delineamento de contrastes físico-químicos das diversas feições que os constituem.

Agradecimentos

À Brain Tecnologia Ltda. pelo apoio e incentivo.

À Hidroplan – Hidrogeologia e Planejamento Ambiental pelo Mapa Hidrogeológico.

Referências Bibliográficas

BRAIN Tecnologia Ltda (2002) Relatórios Técnicos.

DAVIS, J. L.; ANNAN, A.P.(1989) Ground Penetrating Radar for High Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. *Geophysics*, V.37,N3.pp.531-551.

FISHER, E.; MCMECHAN G. A. & ANNAN, A. P. (1992) Acquisition and Processing of Wide-Aperture Ground Penetrating Radar Data. *Geophysics*, V.57, N3. pp.495-508.

MAGALHÃES, C. C. (1998) O Ground Penetrating Radar e seu Uso na Avaliação Geológica de Sítios para Implantação de Barragens. Comitê Brasileiro Para a Construção de Hidrelétricas.



Figura 1 – Coluna Geológica

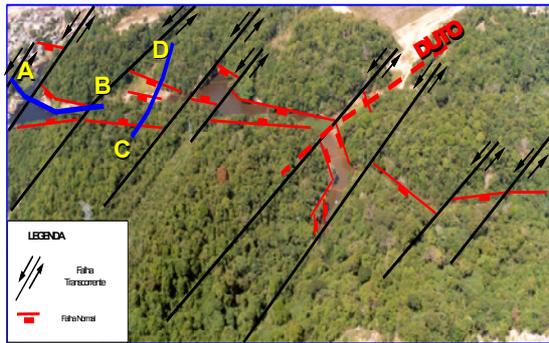


Figura 2 – Geologia estrutural da área estudada

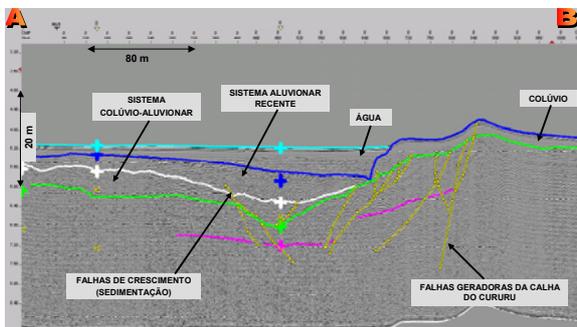


Figura 3 – Seção GPR-2D, transversal ao igarapé, apresentando a evolução estrutural da área, bem como, a interpretação radar-estratigráfica.

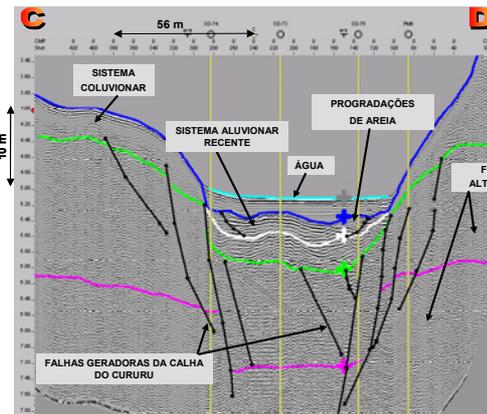


Figura 4 – Seção GPR-2D, transversal ao igarapé, apresentando a evolução estrutural da área, bem como, a progradação da areia dentro da Sequência Aluvionar Recente (Fase II).

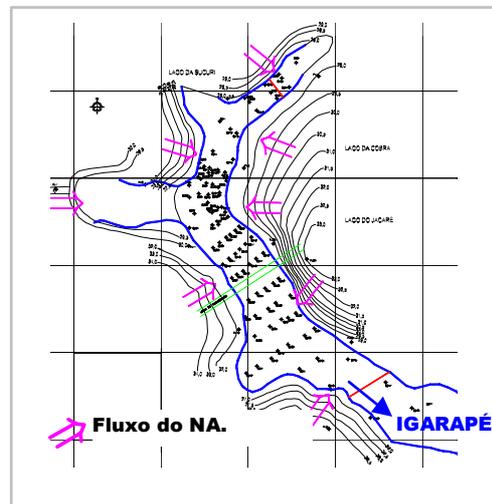


Figura 5 – Mapa Potenciométrico.

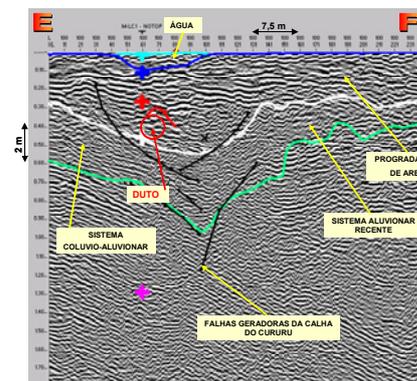


Figura 6 – Seção Inline de GPR-3D apresentando estrutura em flor que denota os falhamentos transcorrentes responsáveis pela abertura do graben, bem como, a localização do duto e as progradações de areia nos sedimentos da Fase II.

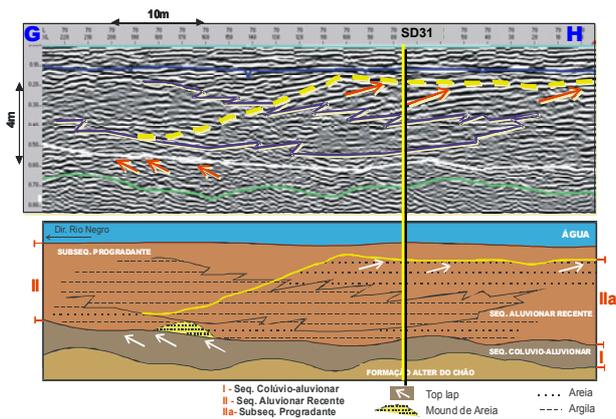


Figura 7 – Seção Crossline de GPR-3D apresentando a desenho esquemático da interpretação radar-estratigráfica onde pode ser observado em detalhe as progradações de areia e as radar-fácies estudadas.

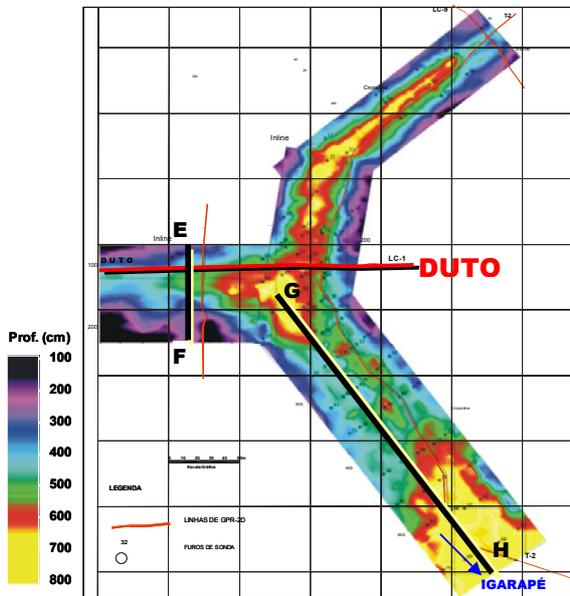


Figura 8 – Mapa 3D de contorno da paleo-calha sobre a qual se depositam os sedimentos da Fase II (Seqüência Aluvionar Recente).

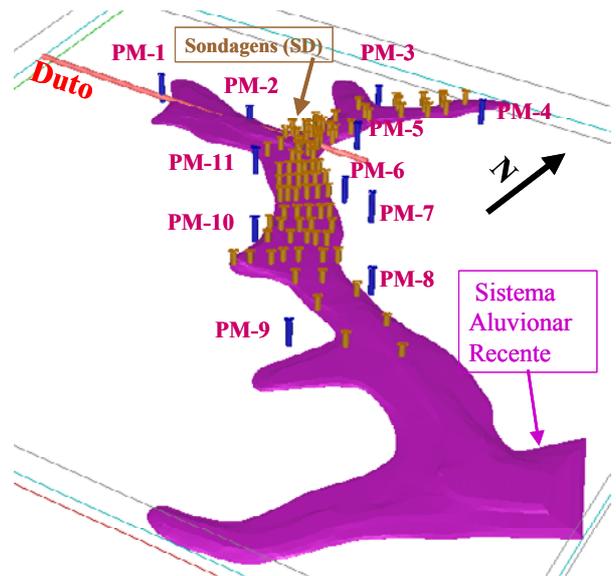


Figura 9 – Mapa tridimensional da Seqüência Aluvionar Recente.

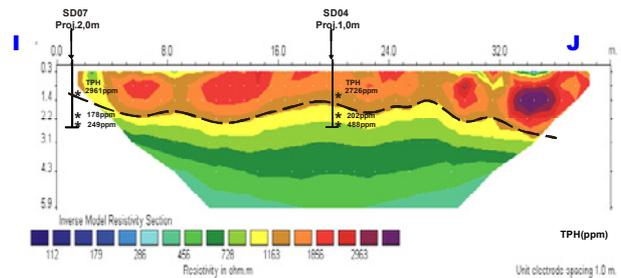


Figura 10 – Seção de Tomografia Elétrica apresentando na sua parte superior os sedimentos da Fase II, bem como, a correlação com a geoquímica apresentada pelas amostras coletadas nas sondagens efetuadas.

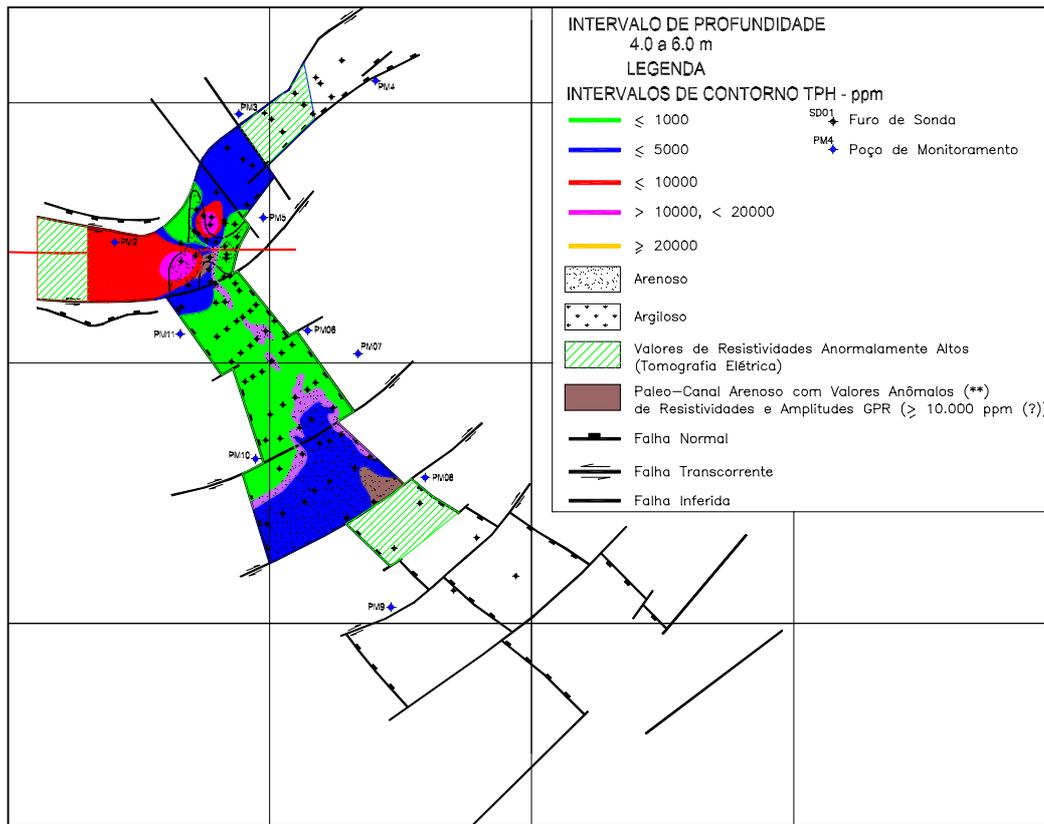


Figura 11 – Mapa de correlação da sedimentologia (predominância de argila e areia) com os valores de TPH das amostras coletadas no intervalo de 2,5 a 4,0m.

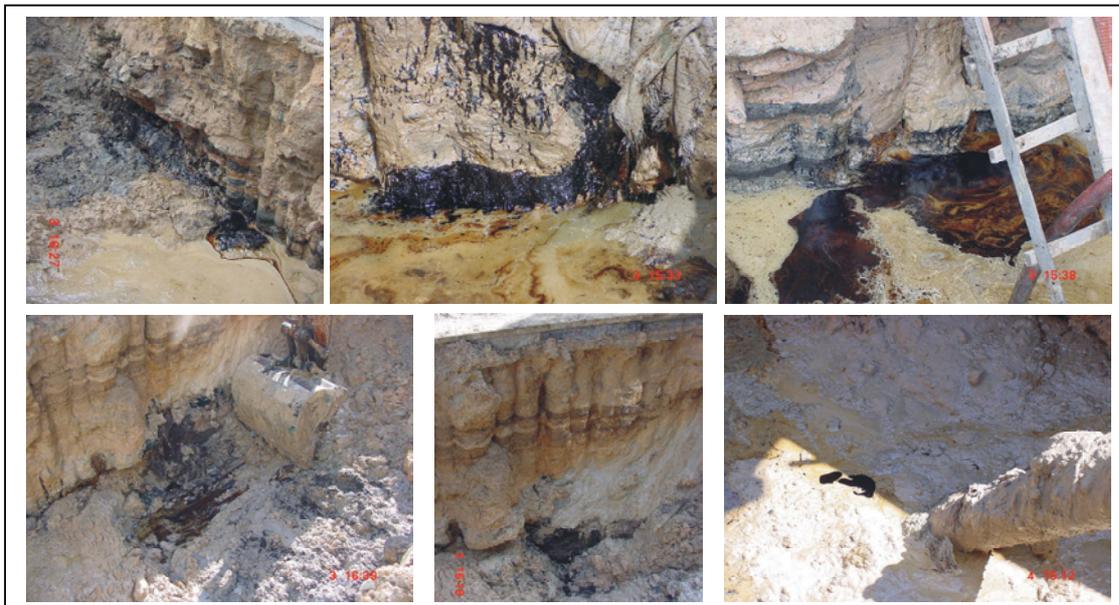


Figura 12 – Fotos retiradas, quando da execução de retirada do duto, no local determinado como fonte do hidrocarboneto. Notar a presença de grande quantidade de hidrocarboneto nos intervalos arenosos constituintes da Fase II em contra partida dos sedimentos argilo-arenosos constituintes da Fase I.