

Imageamento digital e modelagem virtual 3D de um bloco de rocha travertina

Digital imaging and 3D virtual modeling of a block of travertine rock

Victor de Albuquerque Silva¹, David Lopes de Castro^{1,2}, Anderson de Medeiros Souza², Lucila Monte Egito³,
João Andrade dos Reis Júnior¹, Francisco Pinheiro Lima-Filho^{1,2}

¹Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Caixa Postal 1596, Campus Universitário, Lagoa Nova, CEP 59078-970, Natal, RN, BR (victor.albuquerque07@gmail.com; junioreis03@yahoo.com.br)

²Departamento de Geologia, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal, RN, BR (david@geologia.ufrn.br; anderson2080@yahoo.com.br; pinheiro@geologia.ufrn.br)

³Programa de Pós-graduação em Ciências e Engenharia do Petróleo, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Campus Universitário, Lagoa Nova, CEP 59078-970, Natal, RN, BR (lucila@digicom.br)

Recebido em 06 de maio de 2013; aceito em 11 de julho de 2014

Resumo

Neste trabalho são apresentados os procedimentos metodológicos envolvidos no imageamento digital de um bloco de rocha travertina quaternária em uma escala não convencional, pesando 21,2 ton e medindo 1,60 x 1,60 x 2,70 m, que se encontra no Laboratório Experimental de Petróleo “Kelsen Valente” (LabPetro), da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). O bloco, denominado de T-Block, foi disponibilizado pela Petrobras com o objetivo de permitir o seu imageamento digital e a realização de ensaios petrofísicos por pesquisadores de universidades e centros de pesquisa brasileiros que atuam nas áreas de caracterização de reservatório. A proposta deste trabalho consiste na elaboração de um Modelo Sólido Digital, envolvendo técnicas de imageamento digital 3D das superfícies interna e externa do T-Block. Para o imageamento das superfícies externas, foi utilizada a tecnologia *Light Detection and Range* (LIDAR), enquanto que para o imageamento das superfícies internas foi utilizado o *Ground Penetrating Radar* (GPR). Além disso, foram adquiridos perfis de raios gama com um gamaespectrômetro portátil. O uso da tecnologia *Light Detection and Range* associada ao *Ground Penetrating Radar* possibilitou a identificação e mapeamento 3D de três radarfácies distintas, as quais foram correlacionadas a três fácies sedimentares identificadas: “Radarfácies Travertino em Domes”, “Radarfácies Travertino Transicional” e “Radarfácies Travertino Laminado”. Os perfis de raios gama mostraram uma baixa variação na amplitude dos valores de radioatividade, provavelmente, em razão de as camadas sedimentares perfiladas apresentarem a mesma composição mineralógica (carbonática), sem argila siliciclástica e/ou minerais radioativos, nas camadas mais pelíticas.

Palavras-chave: Modelo Sólido Digital; Travertino; GPR; *Laser Scanner* terrestre.

Abstract

Methodological procedures adopted in the digital imagery process, in a non-conventional scale, of a block of travertine rock from the quaternary age were presented on this paper. The rock, named T-Block, weighting 21.2 ton and measuring 1.60 x 1.60 x 2.70 m, was stored in the courtyard of the Laboratório Experimental de Petróleo “Kelsen Valente” (LabPetro) at the Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Petrobras, the Brazilian Petroleum Company, had sponsored its shipment from Italy to Brazil in order to perform geological studies and petrophysical essays, mainly by research groups from universities and research centers of Brazil that work in the areas of reservoir characterization and 3D digital imaging. The purpose of this work was to develop a Digital Solid Model involving 3D digital imaging techniques of internal and external surfaces of the T-Block. Light Detection and Range technology and Ground Penetrating Radar were used to capture the imaging of the external and internal surfaces, respectively. Additionally, gamma ray profiles were generated by using a portable gamma-spectrometer. The use of Light Detection and Range technology combined with Ground Penetrating Radar enabled the identification and 3D mapping of three distinct radar facies, which were correlated to the three sedimentary facies already defined: “Travertine in Domes Radarfácies”, “Transitional Travertine Radarfácies” and “Laminated Travertine Radarfácies”. The gamma ray profiles revealed slight variation, in amplitude, of the radioactivity values. This is likely due to the fact that the sedimentary layers have the same mineralogical composition, which is mainly composed of carbonate sediments, with no siliciclastic clay and/or other radioactive mineral elements inside the more pelitic layers.

Keywords: Digital Solid Model; Travertine; GPR; Terrestrial Laser Scanner.

INTRODUÇÃO

As rochas carbonáticas respondem por um número considerável de reservatórios petrolíferos, encontrados em diferentes sistemas deposicionais como, por exemplo, plataformas carbonáticas (Asprion e Aigner, 2000) e sistemas de Ilhas Barreiras (Grasmueck e Weger, 2002). Tais rochas constituem importantes reservatórios petrolíferos no cenário mundial e ganham cada dia mais relevância na indústria brasileira do petróleo por estarem associadas a novas e importantes descobertas, como as do Pré-Sal. As feições mais conspícuas desse tipo de reservatório apresentam diferentes formas, tamanhos e associações faciológicas (Olivier et al., 2003). Em razão dessas variações, há dificuldades para se caracterizar reservatórios carbonáticos, visto que tais feições, responsáveis pelo desenvolvimento de heterogeneidades deposicionais, ocorrem em escala subsísmica.

Os travertinos foram definidos por Folk (1993) e Guo e Riding (1994) como rochas calcárias originadas a partir da precipitação química de carbonatos em águas termais e que não apresentam nenhum vestígio de plantas ou animais, apenas de atividade microbiana, principalmente bactérias tolerantes ao calor, e diatomáceas. Essas rochas, apesar de pouco abundantes no registro geológico, são consideradas como importantes reservatórios.

No Laboratório Experimental de Petróleo “Kelsen Valente” (LabPetro), da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), está disponível um bloco de calcário travertino medindo 1,60 x 1,60 x 2,70 m e pesando 21,2 ton, denominado de T-Block. Esse bloco carbonático, de origem italiana, foi disponibilizado para universidades e centros de pesquisas brasileiros, que atuam nas áreas de caracterização de reservatório e imageamento digital 3D, para realizarem estudos e ensaios petrofísicos.

A proposta deste trabalho consiste na elaboração de um Modelo Sólido Digital (MSD) das superfícies interna e externa do T-Block, envolvendo técnicas de imageamento digital 3D. Para o imageamento das superfícies externas, foi utilizada a tecnologia *Light Detection and Ranging* (LIDAR), enquanto as superfícies internas foram imageadas com o *Ground Penetrating Radar* (GPR). O objetivo do imageamento digital 3D consiste na identificação e parametrização de superfícies geológicas e de fácies sedimentares que possam representar heterogeneidades deposicionais ou deformacionais.

JUSTIFICATIVA

Os depósitos sedimentares podem apresentar heterogeneidades em diferentes escalas, desde microscópicas até megascópicas, as quais resultam da variabilidade temporal e espacial dos processos que controlam tanto a geração

quanto o transporte e a deposição dos sedimentos, desde a escala de grão e fácies até o preenchimento de bacias sedimentares (Caers, 2005).

O modo como os corpos sedimentares estão distribuídos espacialmente e temporalmente configura-se um dos problemas fundamentais da Estratigrafia e Sedimentologia. As características texturais e petrográficas das rochas dependem dos processos deposicionais e diagenéticos, e são de grande importância econômica (Sawakuchi e Giannini, 2006). Por exemplo, para a modelagem de reservatórios petrolíferos, um dos grandes paradigmas é a caracterização das heterogeneidades deposicionais e petrofísicas.

Segundo Tyler e Finley (1991) apenas 34% do total de óleo contido nos reservatórios é extraído, uma parcela significativa apresenta-se economicamente ou tecnologicamente não recuperável. Isso se deve, em parte, à dificuldade de prever as heterogeneidades do reservatório nas diversas escalas. As heterogeneidades de um reservatório podem ser definidas como o resultado da variação lateral e vertical das rochas do reservatório, nas mais diversas escalas, sendo as principais relacionadas à textura dos grãos, aos processos diagenéticos e aos processos de carstificação em rochas carbonáticas. Contribuem também as feições deformacionais, como as falhas e fraturas, responsáveis pela conectividade entre os corpos ou a existência de barreiras de fluxo.

Uma forma de prever a *performance* e planejar o desenvolvimento de reservatórios petrolíferos é caracterizá-los quantitativamente, ou seja, atribuir propriedades a eles, reconhecendo informações geológicas e incertezas relativas à variabilidade espacial (Keogh et al., 2007). No entanto, os dados disponíveis nos poços são geralmente insuficientes e incompletos diante da dimensão do reservatório.

Os métodos tradicionais de descrever reservatórios, como mapas de contorno e de parâmetros, não proporcionam a representação adequada das heterogeneidades dos reservatórios. Esses métodos são baseados em dados de poços, como aqueles provenientes de ensaios petrofísicos em plugues, que geralmente são muito espaçados entre si, não sendo possível correlacionar um mesmo corpo entre dois poços, gerando assim uma incerteza que pode ter grande impacto na modelagem de reservatórios (Gauw, 2007). Dessa forma, existe a necessidade de povoar o espaço correspondente às incertezas com dados que mantenham a coerência geológica e geofísica dos modelos (Pringle et al., 2006).

Além das lacunas de informações existentes nos espaços entre poços, os dados obtidos a partir de plugues e perfis de poços são limitados no que diz respeito à representação das variações laterais das características do reservatório. Ao se gerar um modelo de reservatório, os dados adquiridos são reunidos e submetidos a um procedimento denominado de *upscaling*, que consiste em migrar de uma escala de maior detalhe para uma escala de menor detalhe (escala do reservatório). Durante a realização do *upscaling*, métodos

computacionais geostatísticos são utilizados para gerar um modelo de simulação de fluxo de reservatório.

Para que não haja lacunas de informações no modelo final, os métodos geostatísticos geram interpolações e/ou extrapolações a partir dos dados já existentes. Visando aumentar a fidelidade do modelo, tais métodos podem levar em consideração informações obtidas a partir de estudos efetuados em amostras maiores e mais representativas das heterogeneidades laterais das rochas do reservatório. Atualmente, estudos em afloramentos análogos têm desempenhado esse papel. Porém, na escala de afloramento ainda existem algumas incertezas relacionadas à variação lateral das geometrias internas das fácies sedimentares, pois essas são determinadas a partir de métodos geofísicos indiretos.

Levando em consideração as limitações, expostas acima, existentes nos estudos realizados por meio de plugues e de afloramentos análogos, a Petrobras propôs o desenvolvimento de uma metodologia de trabalho numa escala intermediária entre a escala de estudo de plugues e a escala de estudo de afloramentos análogos. Alinhado com essa proposta, o presente trabalho foi realizado para a obtenção de dados que contemplem as heterogeneidades laterais não representadas pelos plugues e que contenham maior quantidade de informações diretas que possam ser correlacionadas com as informações obtidas de forma indireta, diminuindo assim as incertezas relacionadas à variação lateral das geometrias internas das fácies sedimentares quando comparadas aos afloramentos análogos. Partindo dessa premissa, os estudos deste trabalho foram realizados no T-Block que representa a “escala intermediária”.

A metodologia apresentada no presente trabalho tem como característica principal ser não invasiva, utilizando-se o GPR, o *Laser Scanner* terrestre e o gamaespectrômetro portátil para o imageamento, em detalhe, do T-Block. Assim, foram obtidas informações sobre as variações faciológicas e sedimentológicas do bloco rochoso. Posteriormente, tais informações serão integradas e correlacionadas com os dados obtidos na etapa de estudos invasivos, que envolverão análises petrofísicas das seções fatiadas do T-Block.

OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho consiste em propor uma sistemática para elaborar um Modelo Sólido Digital que contemple as informações obtidas com o imageamento digital das superfícies, externa e interna, do T-Block (constituído de rocha travertina). Com as metodologias utilizadas neste trabalho, serão buscados parâmetros geométricos sobre as variações laterais e verticais dos estratos que estão contidos no T-Block, a fim de fornecer subsídio para a modelagem de reservatório que contenham esse tipo de rocha.

Para atingir o objetivo geral, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- traçar uma rotina metodológica para imagear e parametrizar de forma não invasiva corpos sedimentares na escala intermediária entre os afloramentos análogos a reservatórios e os plugues de poços, identificando as principais heterogeneidades, as fácies sedimentares e, quando houver, as respectivas radarfácies;
- avaliar a eficiência do GPR, com antenas de alta resolução, como uma técnica para imagear as heterogeneidades deposicionais do T-Block;
- avaliar a eficiência da tecnologia LIDAR para o imageamento em detalhe de blocos rochosos e visualização 3D, em salas de projeção 3D;
- avaliar a eficiência da perfilagem de raios gama para detectar variações faciológicas em rochas travertinas, na escala proposta.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Rochas travertinas

No presente trabalho, foram empregadas as classificações de Pedley (1990) e Ford e Pedley (1996), que consideram os travertinos como depósitos calcários de origem hidrotermal e que não contenham restos de plantas e/ou animais, sem levar em consideração seu grau de cristalização ou idade.

Segundo o *Challinor's Dictionary of Geology*, o termo “travertino” apresenta origem italiana, constituindo uma derivação de *lapis tiburtinus*, a “pedra de Tibur” (Charles Lyell apud Ford e Pedley, 1996). Outra interpretação da origem para esse nome é sugerida por Julia (1983), que propõe que o termo é derivado de Tivertino, nome antigo da atual cidade de Tivoli na Itália.

Sinônimo de travertino para alguns autores, o termo “Tufa” deriva de *tophus*, termo originado para descrever materiais porosos, tanto calcários quanto vulcânicos. Atualmente, é usado apenas para depósitos carbonáticos originados pela precipitação química de carbonato de cálcio em águas continentais segundo Ford e Pedley (1996).

Em geral, o desenvolvimento de tufas e travertinos está associado a fenômenos cársticos e controlados por fatores morfotopográficos (Ordonez et al., 1986; Heiman e Sass, 1989), hidrogeológicos (Ordonez e Garcia del Cura, 1983), hidroquímicos (Herman e Lorah, 1987; Lorah e Herman, 1988), biológicos (Weijermars et al., 1986) e climáticos (Hening et al., 1983; Pazdur et al., 1988, Magnin et al., 1991).

Os processos de formação das tufas e travertinos são explicados detalhadamente em Ford e Pedley (1996) e de forma resumida em Sancho et al. (1997). Esse último explica como a atuação conjunta dos vários fatores já mencionados influencia a precipitação bioquímica da calcita. Tal precipitação é

regulada pelo conteúdo de CO₂, o qual é controlado fisicamente pela pressão e temperatura e bioquimicamente pela fotossíntese (Julia, 1983; Viles e Goudie, 1990).

O grau de dureza não diferencia as tufas dos travertinos, podendo haver ocorrências de tufas endurecidas e de travertinos friáveis. O principal critério de campo para diferenciar um depósito de outro é a presença de vestígios de plantas e de animais, já que tais características estão restritas às tufas (Ford e Pedley, 1996).

Laser Scanner terrestre (tecnologia Light Detection and Ranging)

Essa tecnologia utiliza um sistema óptico-mecânico composto por servomotores (direcionador), *laser* de baixa energia e baixa divergência (emissor), e sensores sensíveis (receptor), para medir propriedades de um objeto distante (Verdeyen, 1995). De forma geral, a medição da distância entre o equipamento e o alvo utiliza dois princípios básicos: tempo de ida e volta (*Time Of Flying* - TOF ou *pulse echo*), e triangulação. Para TOF, o processo de aquisição consiste basicamente em emitir um pulso de *laser* direcionado com o auxílio de espelho de varredura comandado por servomotor. Ao atingir o objeto, parte da energia é refletida para o equipamento e captada pelo sensor.

O *Laser Scanner* pode ter um sistema de coordenadas com origem no próprio equipamento ou um sistema materializado na área de aquisição, ou ainda um sistema geodésico como *Universal Transverse Mercator* (UTM) (Mônico, 2000; Scaioni, 2005).

É apresentada a seguir uma série de definições que ajudarão o leitor a melhor compreender essa tecnologia de imageamento 3D e melhor difundir a nomenclatura básica utilizada. O processo automatizado de percorrer toda ou parte da superfície externa de um objeto realizando medições é denominado de “varredura”. O produto de uma “varredura” é uma “nuvem de pontos”, que, por sua vez, é materializada por meio de um Modelo Numérico de Superfície (MNS) do objeto de estudo. A resolução (distância entre pontos) é função do projeto construtivo do equipamento (questões de fundamentação podem ser encontradas em Wutke e Centeno, 2007). A “nuvem de pontos” é um instantâneo obtido com o *software* de processamento Cyclone, com o observador posicionado próximo ao afloramento e olhando longitudinalmente. O termo “estação de coleta de dados”, ou simplesmente “estação”, corresponde ao local onde é posicionado o *Laser Scanner* para realizar todo ou parte de um trabalho. “Cena” é definida como a operação de varrer uma vez todo o, ou parte do, objeto de estudo, obtendo medidas individuais de pontos com coordenadas 3D em uma estação. Podem ser realizadas várias “cenas” em uma mesma “estação” já que o sistema de coordenadas é o mesmo,

desde que o *Laser Scanner* não seja removido. Então, o termo “imageamento” significa posicionar o *Laser Scanner* em uma “estação” com o objetivo de varrer toda ou parte da superfície do objeto e obter uma única “nuvem de pontos”, produto de uma ou mais “cenas”. A “nuvem de pontos” que modela tridimensionalmente o objeto de estudo é definida como “imageamento registrado”. O produto final de um ou mais imageamentos é uma nuvem consolidada a partir das nuvens individuais. Cada nuvem individual contém seu sistema de coordenadas local. A operação de consolidar todas as nuvens no mesmo sistema de coordenadas é denominada “registro de nuvens de pontos” (Bae e Lichti, 2008). Isso significa realizar operações matemáticas de roto-translação de eixo dos sistemas de coordenadas das “nuvens de pontos” para um mesmo sistema de referência (Scaioni, 2005), preservando a forma e as dimensões dos objetos (*Rigid body transformation*). É a operação mais importante em todo o processo (Scaioni, 2005; Elkhachy e Niemeier, 2006; Bae e Lichti, 2008). O processo de georreferenciamento é distinto do “registro”, ou seja, o “registro” consolida todos os imageamentos em um mesmo sistema de coordenadas, que pode ou não ser um sistema geodésico. Muitas aplicações não exigem o georreferenciamento. No “registro”, o princípio básico são os pontos homólogos utilizando algoritmos que viabilizam o princípio do corpo rígido (*Rigid body transformation*), mas outras abordagens têm sido propostas utilizando refletância de imagens e fotogrametria. Dessa forma, existem três formas básicas de “registro”: “povoamento de nuvens”, “fusão de nuvens” e “sobreposição de nuvens”. No “povoamento de nuvens”, um conjunto de pontos de controle (rede de controle) é definido ou materializado na área com coordenadas conhecidas dentro de um sistema de referência arbitrário ou geodésico. Cada cena, individual e isoladamente, é registrada em relação aos pontos de controle. As cenas estão “registradas” entre si apenas de forma relativa, e as nuvens apresentam-se como de fossem uma só porque estão no mesmo sistema de coordenadas. Nesse método, uma aquisição deficiente fica restrita à estação e não é transferida para os demais imageamentos. Esse método tem como maior vantagem o fato de não exigir qualquer adjacência entre nuvens, as quais podem estar a muitos quilômetros de distância. Essa forma de “registro” pode ser realizada segundo três técnicas: “registro direto”, “registro da estação” e “registro por *targets*” (alvo).

O *Laser Scanner*, além de obter valores precisos das coordenadas (x, y, e z) de cada ponto do objeto imageado, também obtém, de cada ponto adquirido, um atributo adicional, a refletância (Gordon et al., 2001; Boehler e Marbs, 2003). Essa é a intensidade da energia de retorno do *laser*. Tal atributo permite identificar diferentes feições do objeto estudado.

Ground Penetrating Radar

O método do Radar de Penetração no Solo ou Georadar (*Ground Penetrating Radar* ou GPR) consiste em um conjunto de equipamentos, metodologias e técnicas utilizado para detectar e identificar estruturas rasas em subsuperfície de forma não invasiva. Tal método baseia-se na irradiação de ondas eletromagnéticas a partir de uma antena transmissora colocada nas proximidades da superfície do terreno, as quais se propagam nos materiais da subsuperfície, podendo sofrer reflexão, refração e difração. As ondas refletidas que retornam à superfície são detectadas por uma antena receptora, e o tempo decorrido (na ordem de nanossegundo (ns)) entre o início da radiação, na antena transmissora, e a detecção da onda refletida, na antena receptora, é registrado (à semelhança do que é feito nos levantamentos com o método Sísmico de Reflexão), possibilitando que se estime as profundidades das interfaces de reflexão, desde que seja conhecida a velocidade de propagação da onda no meio investigado. As interfaces de reflexão são definidas sempre que há significativas variações nas propriedades eletromagnéticas do meio (permissividade dielétrica e condutividade elétrica) (Annan, 1996).

A velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas (V) é controlada basicamente pela constante dielétrica dos materiais (K) e pode ser estimada, em um meio não condutivo, por meio da expressão $v = c / \sqrt{k}$, sendo c igual a m/s (velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo) (Annan, 1996).

As frequências mais usadas no método GPR variam de 10 a 2.600 Megahertz (MHz). Nas aplicações desse método, devem ser observadas as características geológicas. A profundidade de penetração pode variar de menos de 1 m, dependendo da antena utilizada e das características da cobertura geológica como, por exemplo, em camadas condutoras (rica em argilas ou saturada de água salobra), até profundidades superiores a 25 m, em áreas onde ocorrem camadas sedimentares resistivas (cascalho e areias sem argila) (Beres Jr. e Haeni, 1991) ou mesmo 60 m, em areias de dunas.

A emissão e recepção de pulsos pelo sistema GPR é denominada de *Scan*. Imediatamente após a emissão do pulso, a unidade de controle inicia uma contagem de tempo (*time window range*), em nanossegundos, durante a qual registrará um número fixo de amostras (*sample number*). As amostras registradas correspondem à quantidade de energia refletida captada pela antena receptora, sendo o conjunto dessas amostras ao longo de um eixo, perpendicular à superfície de aquisição, denominado de “traço”. O tempo de abertura da “janela temporal” define a profundidade máxima alcançada na aquisição e, por isso, deve ser suficiente para que o pulso atinja a profundidade desejada e retorne (Annan, 2001).

Um “traço” pode ser representado na forma de osciloscópio (*O-scope*) ou de linha (*linescan*). No primeiro caso, as

diversas amostragens são interpoladas para gerar uma função que represente a amplitude do sinal retornado (RADAN, 2009). Já no segundo caso, os sinais obtidos durante a amostragem são codificados, interpolados e associados a uma escala radiométrica, gerando uma matriz de *pixels* que permite a visualização dos refletores sob a forma de imagem.

O registro de uma sequência de traços, convenientemente espaçados, delinea uma seção do refletor, a qual recebe o nome de radargrama. No radargrama, o eixo das abscissas representa a distância percorrida pelo sistema GPR ao longo da aquisição. Já o eixo das ordenadas representa o tempo que as ondas eletromagnéticas delongaram para atingir um refletor e retornar à antena receptora (tempo duplo de percurso). Os contornos, obtidos com o processamento do registro das reflexões, contêm informações da forma, orientação e localização das estruturas que se encontram em subsuperfície.

Gamma Ray

O método de perfilagem com *Gamma Ray* (GR) baseia-se na medição da radiação gama emitida espontaneamente pelos corpos rochosos, os quais, em sua maioria, possuem minerais que portam elementos radioativos (potássio, tório e urânio) em seus sítios cristalográficos (Sperry-Sun, 1999). Grande parte dos minerais argilosos contém uma quantidade considerável de átomos de potássio (principal gerador de radiação em argilossilicatos) em suas estruturas moleculares. Desse modo, medindo-se a quantidade de radiação gama emitida espontaneamente pela rocha, pode-se inferir a quantidade de argilossilicatos presentes nas rochas. Mediante esse raciocínio, sabe-se que rochas ricas em minerais argilosos normalmente registram altos valores de radiação, enquanto rochas com baixo teor de minerais argilosos, como arenitos não arcossianos, com alto grau de pureza, registram baixos valores de radiação (Sperry-Sun, 1999). Ressalta-se que o termo “argila” refere-se a uma faixa granulométrica específica na qual podem ser encontrados minerais livres de radioatividade. Portanto, apesar de a maioria dos minerais argilosos possuírem elementos radioativos, nem sempre rochas portadoras de argila emitem radiação.

A perfilagem de raios gama pode ser utilizada para investigar a presença de minerais radioativos, identificar litologias e calcular a argilicidade presente na amostra ou mesmo o volume das argilas. De praxe, o uso desse método em afloramentos análogos é aplicado na caracterização e correlação de fácies sedimentares (Jordan et al., 1993; Aigner et al., 1995).

É importante salientar que o método que utiliza a radiação gama (*Gamma Ray*) para realizar as contagens ou medições conta com amplificador de sinal e um detector, que pode ser um contador Geiger ou cintilômetro. Esses instrumentos registram o espectro de radiação gama total, do qual são isoladas as janelas referentes ao potássio, ao tório

e ao urânio. Assim, a partir da contagem total da radiação, é possível obter as contagens individuais para os elementos potássio-40, urânio e tório, as quais também podem ser usadas durante as análises faciológicas (North e Boering, 1999; Svendsen e Hartley, 2001).

METODOLOGIA

Imageamento digital

Aquisição dos dados

Nessa etapa do trabalho, foram realizadas aquisições com o GPR e *Laser Scanner* terrestre. A aquisição com o GPR foi feita com o objetivo de imagear eventuais variações laterais 3D das fácies sedimentares no interior do bloco.

O passo inicial para que a aquisição com GPR fosse efetuada consistiu em gerar *grids* com fita adesiva nas faces que seriam percorridas pela antena (Figura 1). Tal medida diminuiu a possibilidade de erros de aquisição, já que o objetivo era adquirir vários perfis de GPR sob a forma de *grids* 3D. Também foi feita a enumeração das faces do bloco, o que facilitou o reconhecimento espacial das faces do modelo digital.

Após a demarcação das faces do bloco, foi feita a configuração do GPR para que a aquisição pudesse ser iniciada (Tabela 1). Como a profundidade de investigação desejada era de apenas 1,60 m (espessura do bloco), foram escolhidas as antenas de 900 e 2.600 MHz, visando a um imageamento detalhado das feições geológicas existentes no T-Block e nas interfaces desejadas. *A priori*, apenas a antena de 900 MHz foi capaz de imagear o bloco de uma face a outra. Já a antena de 2.600 MHz, apesar de não ter alcançado a face oposta, forneceu produtos com uma excelente resolução. Em função



Figura 1. Grid feito com fita adesiva nas faces do T-Block para facilitar a aquisição com *Ground Penetrating Radar* e evitar erros de percurso.

dos resultados obtidos e visando elaborar um modelo que contemplasse todas as feições e as fácies sedimentares presentes no bloco, estão sendo apresentados adiante apenas os dados adquiridos com a antena de 900 MHz.

Para a aquisição dos dados de GPR, utilizou-se o sistema GPR SIR 3000 fabricado pela *Geophysical Survey Systems Inc.* (GSSI), o qual é composto pelo conjunto: unidade de controle, antenas blindadas e odômetro. A metodologia adotada para aquisição dos dados de GPR consistiu no levantamento de perfis no “modo contínuo por distância”, ou seja, o conjunto de acessórios foi deslocado ao longo do percurso desejado, efetuando a amostragem dos dados continuamente. Nesse tipo de aquisição, a utilização do odômetro permite que a distância de percurso aproximada seja mostrada, em tempo real, na unidade de controle (Figura 2). O processamento dos dados de GPR foi feito no módulo *2D-data-analysis* do *software* Reflexw 6.0 desenvolvido pela Sandmeier Scientific Software (<http://www.sandmeier-geo.de/>). Essa etapa foi realizada com o objetivo de aumentar a razão sinal-ruído, recuperar a perda da intensidade do sinal proveniente dos efeitos de propagação (absorção, dispersão e espalhamento esférico) e carregar as informações de posição nos traços.

Foram adquiridos 14 perfis de 2,3 m e 2 *grids* 3D, cada um com 24 seções horizontais de 1,3 m e 14 seções verticais de 2,3 m, totalizando 159 m de levantamento. As faces levantadas foram escolhidas de forma que o empilhamento das camadas pudesse ser visualizado nos perfis de GPR. Também foram adquiridas algumas seções simulando “cortes em mapa” (*timeslices*). Desse modo, as faces escolhidas para a aquisição dos *grids* 3D foram: a face 3 e a face 5 (faces opostas). A justificativa para levantar a face oposta está no fato de haver perda de resolução do sinal de GPR nos tempos mais altos, que correspondem a profundidades maiores. Por fim, foi feita a aquisição de 15 perfis na face 4 (face ortogonal às faces 3 e 5), visando gerar cortes em

Tabela 1. Parâmetros de aquisição adotados no levantamento *Ground Penetrating Radar*.

Frequência central da antena (MHz)	900	2600
Taxa de transmissão (KHz)	100	100
Amostragem	2048	2048
Formato (bit)	16	16
Janela temporal (ns)	55	20
Constante dielétrica (K)	7,5	7,5
Taxa de aquisição	32	32
Distância entre traços por metro	200	200
Filtro Passa-Alta Espacial (MHz)	225	525
Filtro Passa-Baixa (MHz)	2500	5000
Ganho	Auto	Auto
Estaqueamento	4	4

mapa que posteriormente pudessem ser utilizados em conjunto com as *timeslices* dos *grids* 3D (Figura 3).

Para gerar a geometria externa do MSD do bloco, foi utilizado o *Laser Scanner* terrestre, modelo *Scanstation2*, da Leica Geosystems. O espaçamento médio entre os pontos adquiridos nas faces do bloco foi de 3 mm. Como resultado da aquisição, foi gerada uma “nuvem” com 28.505.106 pontos, havendo recobrimento tanto das 4 faces, laterais do bloco, quanto do cenário no qual ele estava inserido. O equipamento foi estacionado e foram

efetuadas as “varreduras” em 4 posições em círculo, visando imagear o bloco com o mínimo de oclusões. Para que os dados adquiridos em diferentes “estações” pudessem ser unidos e as posições relativas reais de todos os pontos fossem preservadas, *targets* foram distribuídos em volta do pátio do LabPetro. Os *targets* consistem em alvos que são colocados em posições fixas e são imageados em todas as estações, servindo assim como pontos em comum nas diferentes cenas (Figura 4). Neste trabalho, o



Figura 2. Aquisição com a antena *Ground Penetrating Radar* de 900 MHz. As setas indicam os sentidos de aquisição vertical (A) e horizontal (B). É possível notar que o sistema GPR é constituído por unidade de controle (console), antena blindada e odômetro.

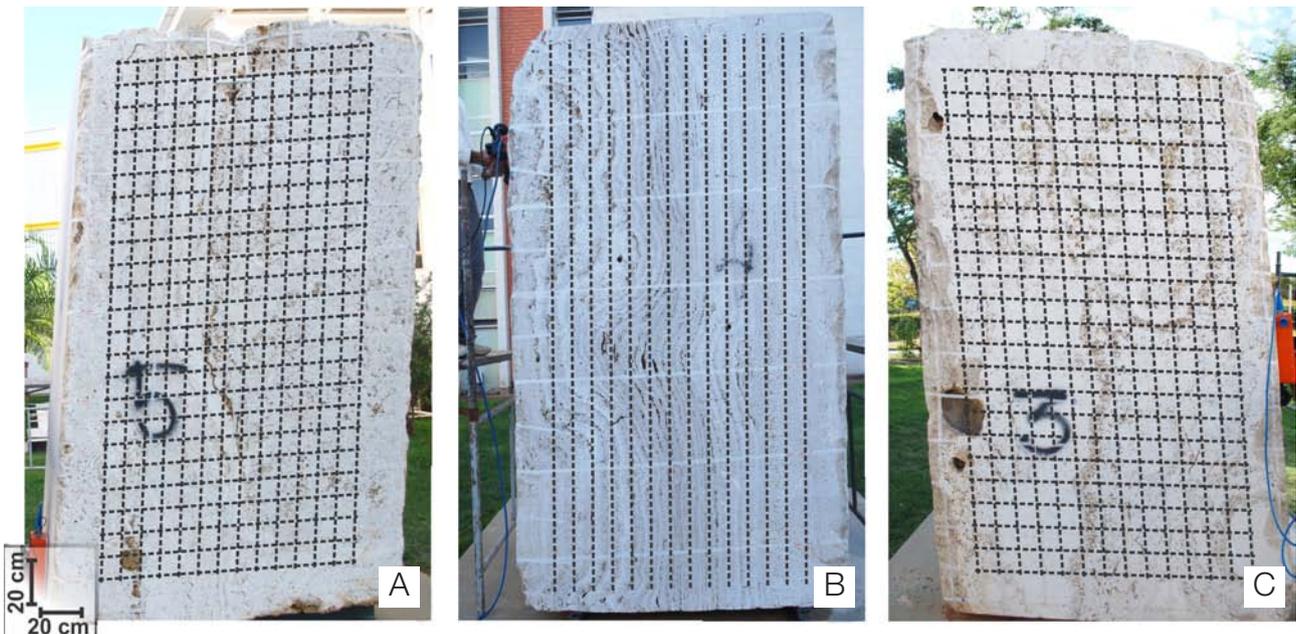


Figura 3. *Grids* de aquisição de *Ground Penetrating Radar* gerados nas faces 5 (A) e 3 (C) do bloco e perfis na face 4 (B).

imageamento com o *Laser Scanner* foi realizado seguindo as seguintes etapas:

- (1) planejamento da aquisição;
- (2) aquisição;
- (3) preparação e integração dos dados de campo;
- (4) “registro” das “nuvens de pontos”;
- (5) processamento;
- (6) controle de qualidade;
- (7) exportação.

Os dados de GR foram adquiridos com um gamaespectrômetro portátil GR-130 miniSPEC, fabricado pela Exploranium Radiation Detection Systems. Foram levantados 6 perfis de *Gamma Ray*, cada um com 1,5 m de comprimento, com leituras a cada 5 cm. Visando detectar variações entre as três fácies sedimentares presentes, os perfis foram adquiridos na face 4 do T-Blok, onde as 3 fácies sedimentares ocorriam empilhadas. Em cada perfil, as leituras foram efetuadas da base para o topo das camadas sedimentares. Com o objetivo de obter um *background* da radiação gama presente no local onde o bloco estava alojado, foi feita uma medida ao ar livre, a qual resultou em 60 CPS. É importante salientar que no trabalho aqui apresentado as medidas utilizadas foram de contagem total.

RESULTADOS

Os resultados deste trabalho foram obtidos a partir do processamento e da interpretação dos dados adquiridos na etapa de campo, já discutida no tópico da metodologia. Desse modo, tais resultados serão apresentados com os procedimentos adotados durante o processamento e a interpretação dos dados.

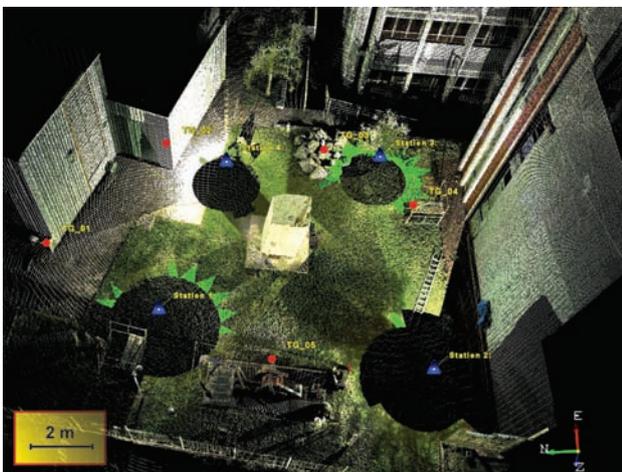


Figura 4. Nuvem de pontos do pátio do LabPetro, adquirida com *Laser Scanner*. Os triângulos em destaque indicam os locais onde o equipamento foi estacionado para a aquisição das respectivas cenas. Os círculos em destaque indicam os locais onde foram posicionados os *targets*.

Processamento dos dados

Antes de estabelecer uma sequência para o processamento dos dados, foi feita a análise dos dados brutos, visando identificar os tipos de ruído contidos nos radargramas. Foi percebida a existência de ruídos de alta e baixa frequência além de um atraso na chegada do sinal de aproximadamente 4,5 ns. A presença desses ruídos foi percebida a partir da análise do histograma de frequência, o qual apresentou dados fora da banda de sinal da frequência central da antena utilizada. Os ruídos de baixa frequência também foram percebidos visualmente nos radargramas sob a forma de refletores “espessos” (comprimento de onda elevado) (Figura 5).

Após a análise dos dados brutos, foi estabelecida a seguinte sequência de processamento: correção *time-zero* (*move start time*), *remove header gain*, DEWOW, *background removal*, filtro passa-banda (*band pass frequency*), *energy decay*, e foi realizado ainda o georreferenciamento dos traços. Esse fluxo de processamento é apresentado apenas para um dos radargramas, já que a sequência lógica de processamentos foi a mesma utilizada em todos os perfis de GPR.

Move start time

O primeiro processamento consistiu em retirar o sinal nulo proveniente do atraso na chegada do primeiro sinal de cada traço, em relação ao início do tempo de abertura da antena receptora para captação do sinal. Após a aplicação desse processamento, o primeiro sinal de cada traço é colocado no tempo zero do eixo vertical do radargrama (Figura 6).

Remove header gain

A aplicação desse filtro foi feita para evitar que o ganho utilizado durante a aquisição estivesse embutido nos dados durante a aplicação dos algoritmos de processamento (Figura 7).

Subtract-mean (DEWOW)

Esse processamento foi aplicado para remover os ruídos de baixa frequência gerados pela indução eletromagnética entre as antenas (Annan, 1996). Um exemplo claro desse tipo de ruído está demonstrado na Figura 5, enquanto que a Figura 8 apresenta o radargrama antes e depois da aplicação do DEWOW.

Background removal

Foi aplicado com o objetivo de retirar as ondas diretas (ondas que percorrem um caminho direto da antena transmissora até a receptora pelo ar ou pela superfície terrestre) que chegam com alta amplitude e com baixo tempo de percurso. O *background removal* atua calculando um

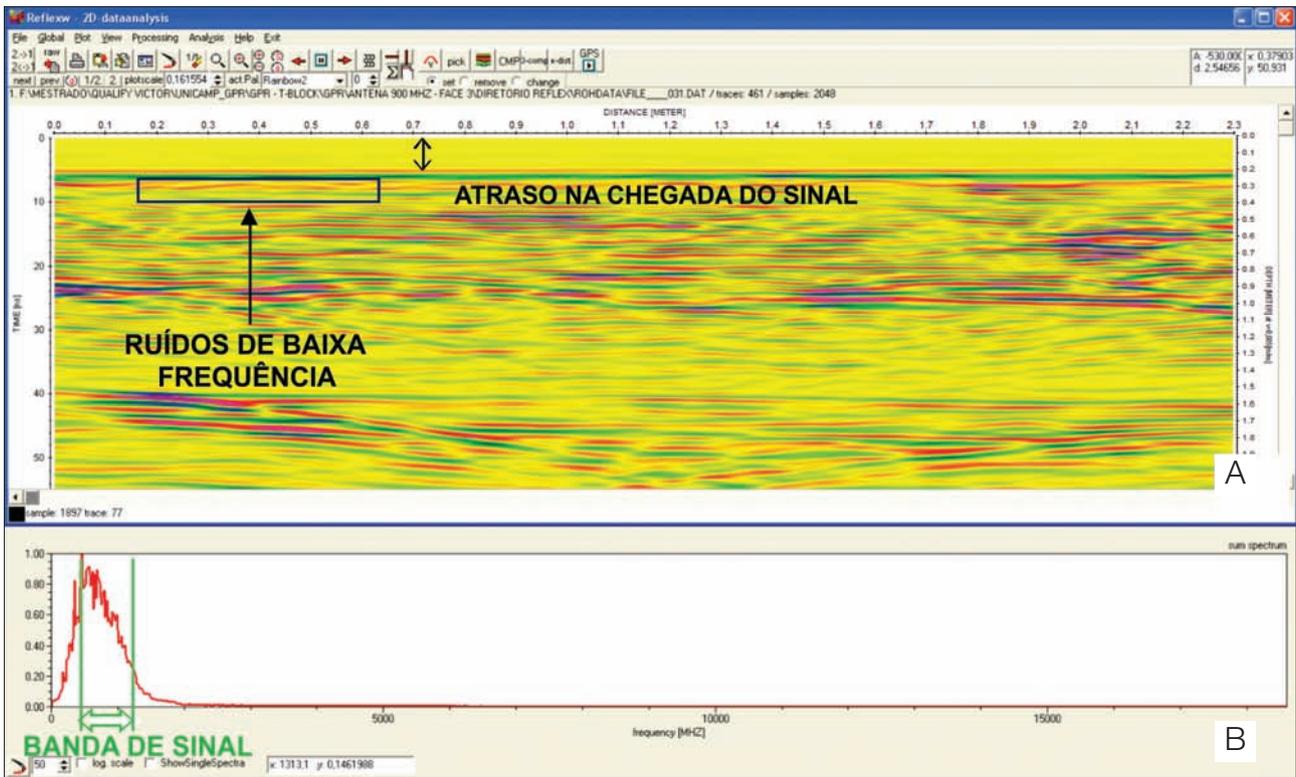


Figura 5. (A) Radargrama bruto analisado com o intuito de estabelecer uma seqüência de processamento. (B) Histograma de frequência do radargrama bruto destacando a banda de sinal da frequência central de 900 MHz. Em (B), é possível notar a existência de dados fora da banda de sinal.

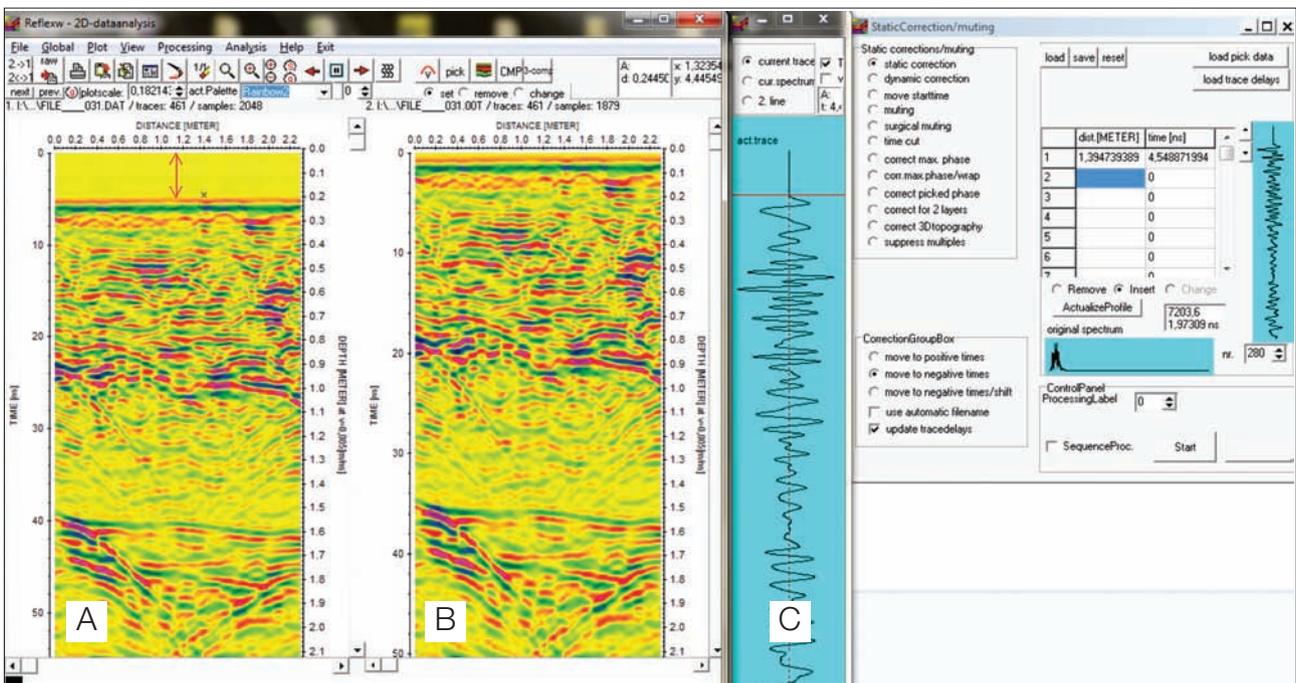


Figura 6. (A) Radargrama bruto. (B) Radargrama com correção time zero. (C) Janela da wiggle usada para marcar o início do sinal. (D) Janela de configuração do processamento.

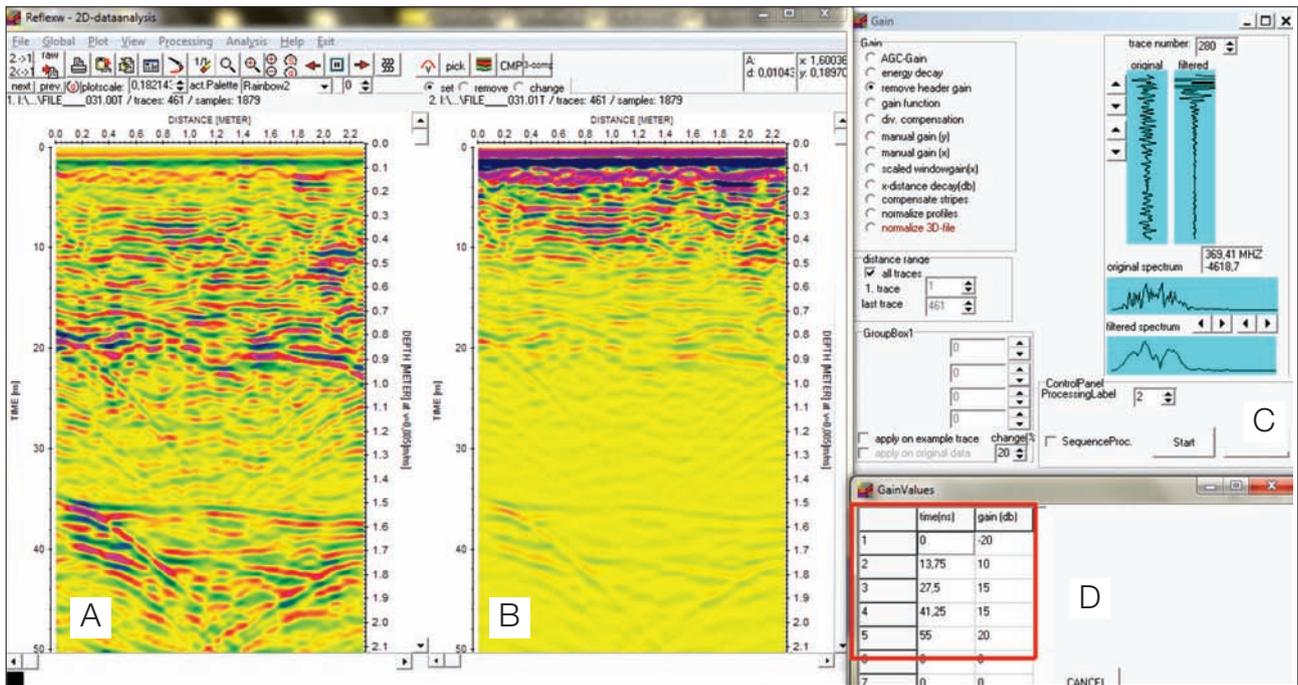


Figura 7. (A) Radargrama antes da remoção do ganho aplicado na aquisição. (B) Radargrama após a remoção do ganho aplicado na aquisição. (C) Janela de configuração do processamento. (D) Janela demonstrando os pontos de ganho aplicados na aquisição.

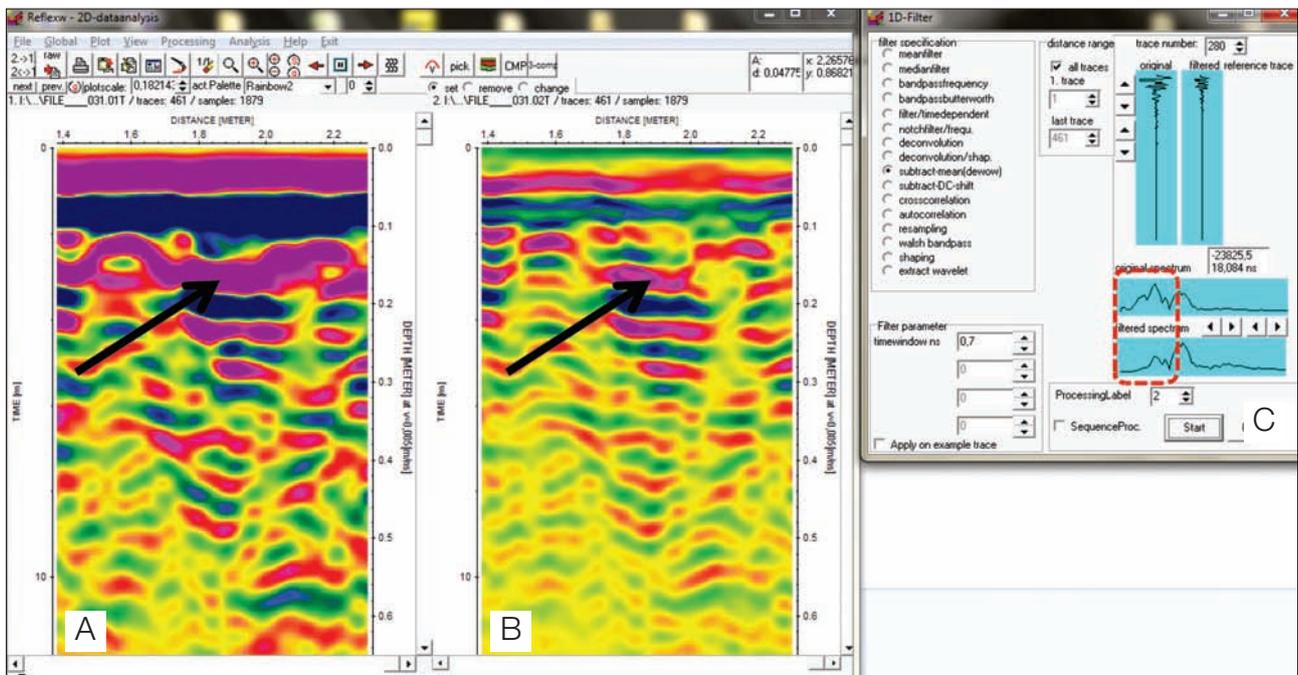


Figura 8. (A) Radargrama sem DEWOW. (B) Radargrama após a aplicação do DEWOW. (C) Janela de configuração do processamento. Em (A) e (B), as setas apontam um exemplo de um refletor com elevado comprimento de onda que foi “adelgado” pelo filtro. Em (C) o retângulo destaca o histograma de frequência antes (histograma de cima) e após o DEWOW, podendo-se notar uma significativa redução dos componentes de baixa frequência após o processamento.

traço médio para uma determinada quantidade de traços e, em seguida, é feita a subtração desse traço médio em todos os traços que fizeram parte do cálculo de média (Xavier Neto, 2006). Dessa forma, esse processamento pode retirar sinais contínuos que se prolongam por todo o radargrama, como o caso da onda aérea. No caso em questão, o cálculo do traço médio foi feito usando todos os traços. Na Figura 9, é possível visualizar a eliminação das ondas diretas nos tempos iniciais.

Band pass frequency

Foi aplicado para remover ruídos de baixa e alta frequências. Esse filtro atua no domínio da frequência removendo, em cada traço, os valores que não fazem parte da banda de sinal da frequência central da antena utilizada na aquisição. Na Figura 5, são apresentados exemplos de ruídos que podem ser removidos com a aplicação desse filtro. As frequências de entrada exigidas pelo processamento foram escolhidas a partir de uma banda de sinal que vai de 1/2 a 3/2 da frequência central da antena (Cassidy, 2009). Assim, as frequências informadas foram F1, F2, F3 e F4 (450, 500, 1.300 e 1.350 MHz). A Figura 10 apresenta o radargrama antes e depois desse processamento. Na Figura 11, é possível notar a retirada dos ruídos de alta frequência, após a aplicação do filtro trapezoidal no histograma de frequência.

Energy decay

Esse processamento foi aplicado visando recuperar a perda da intensidade do sinal proveniente dos efeitos de propagação (absorção, dispersão e espalhamento esférico). Assim, foi dado um ganho nas amplitudes de tempos maiores em cada traço do radargrama, sendo usado um *scaling value* de 0,5 para não saturar as amplitudes. Na Figura 12, é possível visualizar o resultado do ganho dado, percebe-se claramente a amplificação do sinal nos refletores mais profundos.

Georreferenciamento de traços

Uma vez que os vários radargramas representavam um posicionamento paralelo ou ortogonal entre si, foi atribuído a cada traço uma coordenada espacial (x,y,z), para posicioná-los segundo um *datum* arbitrário (Figura 13). A Figura 14 apresenta o radargrama bruto e o mesmo radargrama após a aplicação da sequência de processamento.

O processamento efetuado nos dados de *Laser Scanner* teve o objetivo de integrar num mesmo referencial todos os dados adquiridos nas quatro posições em que o equipamento foi estacionado, já que os dados gerados em cada aquisição têm origem no centro do equipamento, havendo assim quatro aquisições em posições diferentes e, conseqüentemente, quatro origens distintas. Para unir todas as aquisições em um

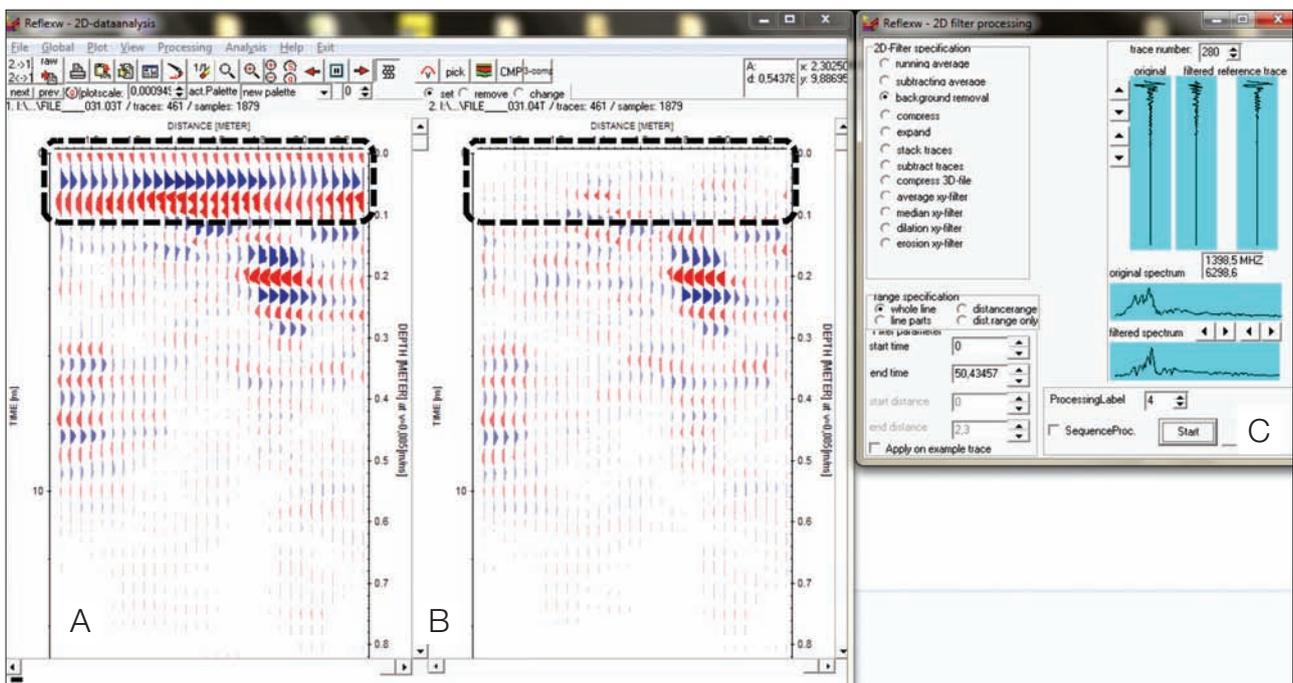


Figura 9. (A) Radargrama antes da aplicação do *background removal*. (B) Radargrama após a aplicação do *background removal*. (C) Janela de configuração do processamento. Os retângulos em (A) e (B) destacam a onda aérea que foi removida pelo processamento.

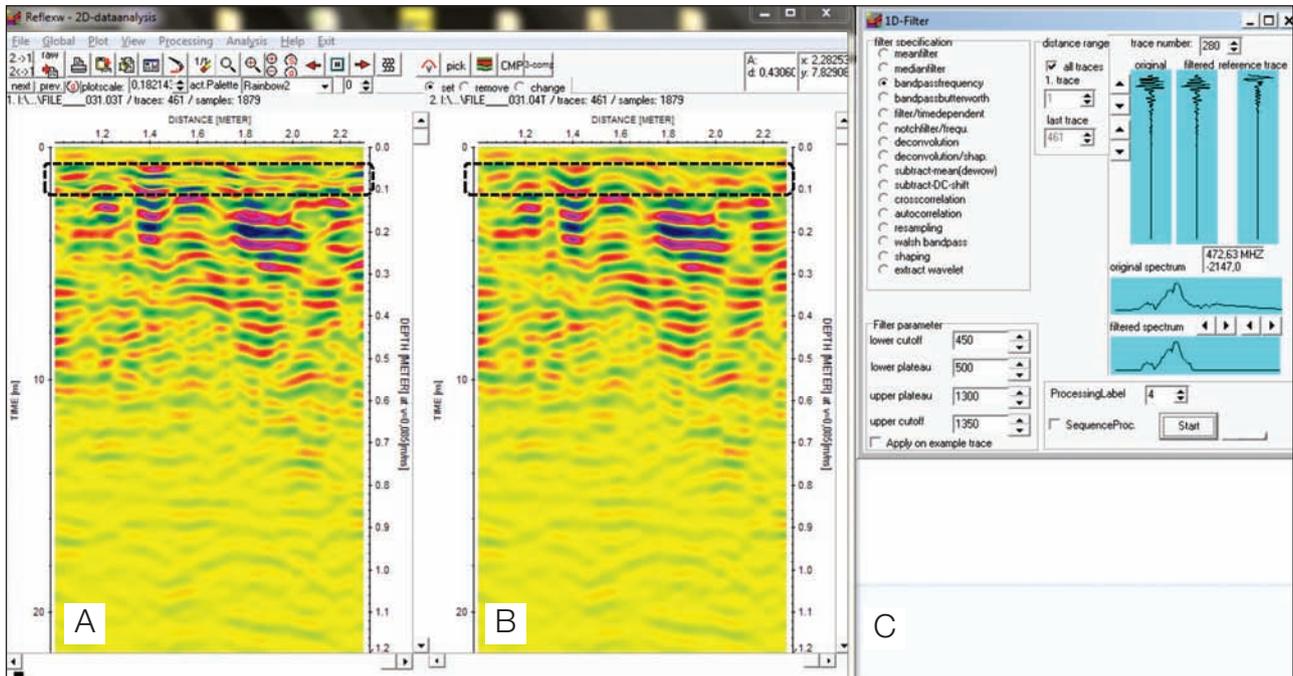


Figura 10. (A) Radargrama antes a aplicação do filtro passa-banda. (B) Radargrama após a aplicação do passa-banda. (C) Janela de configuração do processamento. Os retângulos em (A) e (B) destacam a presença de ruídos de alta frequência em (A) e sua remoção em (B).

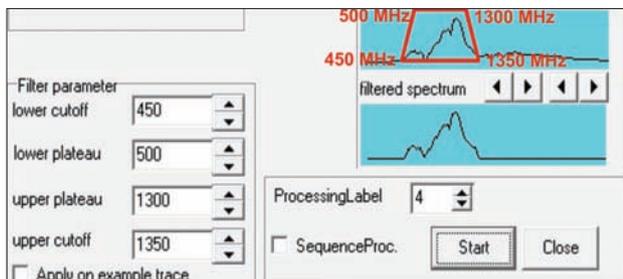


Figura 11. Histogramas de frequência antes (acima) e depois (abaixo) da aplicação do filtro passa-banda trapezoidal. O trapézio ilustra os pontos de corte total e parcial utilizados pelo filtro.

único referencial comum, os dados foram processados no *software* Cyclone 7.0, a partir de um procedimento denominado “Registro de Cenas”, o qual efetua uma translação de eixos com base nos *targets* que foram imageados. Como os *targets* permaneceram em posições fixas durante as quatro aquisições, o *software* pode utilizá-los como pontos de amarração para integrar todos os dados num mesmo referencial (Figura 15).

Nos dados adquiridos com o perfilador de raios gama, a única correção a ser efetuada relaciona-se ao efeito de *background*, entretanto nenhuma amostra ultrapassou o valor de *background* medido e, por isso, os valores resultantes da correção seriam nulos ou negativos. Como nesse método não há sentido em se falar sobre valores negativos, tal correção não foi efetuada, e o único procedimento realizado nesses dados foi organizá-los em uma planilha digital

e gerar curvas de variação da emissão de isótopos radioativos (isótopos totais).

Interpretação dos dados

O passo inicial para a interpretação dos dados consistiu no entendimento do comportamento da velocidade de propagação das ondas de radar no meio estudado, para que os dados registrados em tempo pudessem ser convertidos em profundidade, facilitando assim a correlação com as demais informações provenientes dos outros métodos utilizados.

A forma ideal para efetuar o processo de conversão de tempo em profundidade seria conhecer, de forma infinitesimal, o comportamento da velocidade de propagação das ondas ao longo de todo meio estudado, já que este possui heterogeneidades que afetam tal velocidade. Desse modo, o comportamento da velocidade de propagação seria representado por uma matriz com vários valores de velocidade, denominada “campo de velocidades”. A utilização desse campo de velocidades permitiria converter a escala de tempo em profundidade de modo que a geometria dos refletores refletisse a geometria das feições geológicas (espessuras de camadas, variações laterais e verticais de fácies).

Na falta de recursos que viabilizassem a criação de um campo de velocidades com elevada precisão, foi utilizada uma velocidade média que representasse satisfatoriamente o meio investigado, permitindo que a escala de tempo fosse convertida em profundidade com boa representatividade da realidade. Isso se deve ao fato de o bloco ser constituído exclusivamente de

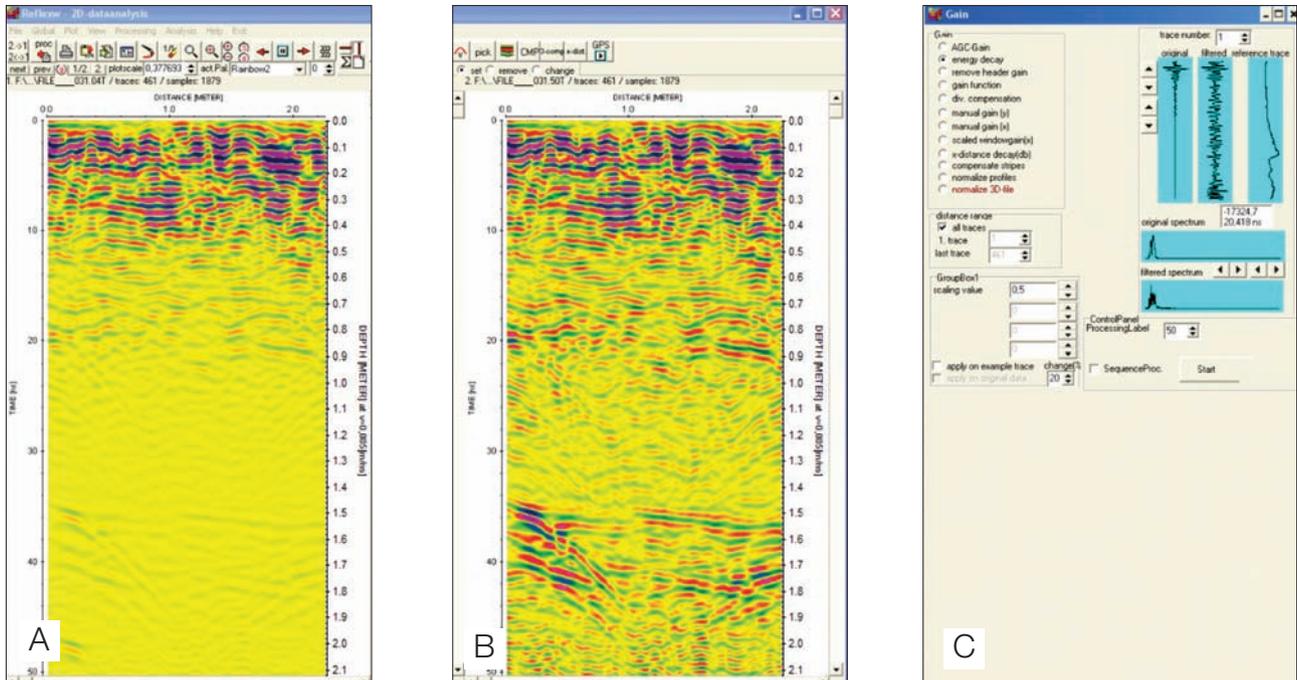


Figura 12. (A) Radargrama antes da aplicação do ganho. (B) Radargrama após a aplicação do ganho (C) Janela de configuração do processamento.

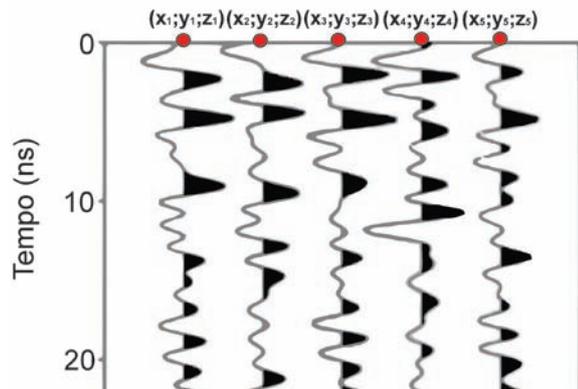


Figura 13. Ilustração da aplicação de coordenadas aos traços a partir do georreferenciamento de traços.

carbonato de cálcio e, por isso, a variação na velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas, ao longo do bloco, é tênue.

A velocidade média do meio estudado foi calculada a partir do refletor que marcou a interface bloco-ar quando as ondas eletromagnéticas ultrapassaram o bloco. Em razão da existência de variações na espessura do bloco, a profundidade de investigação considerada no cálculo foi de 1,6 m, medida no trecho escolhido para a obtenção dos parâmetros necessários para calcular a velocidade. Como o refletor correspondente dessa interface estava em 37,5 ns, a velocidade foi de 0,085 m/ns, calculada a partir da equação $v = 2 \Delta S / \Delta T$, sendo a velocidade de propagação da onda eletromagnética, ΔS o espaço percorrido pela onda, em metros, e ΔT o tempo, em nanossegundos, que a onda gastou para atingir

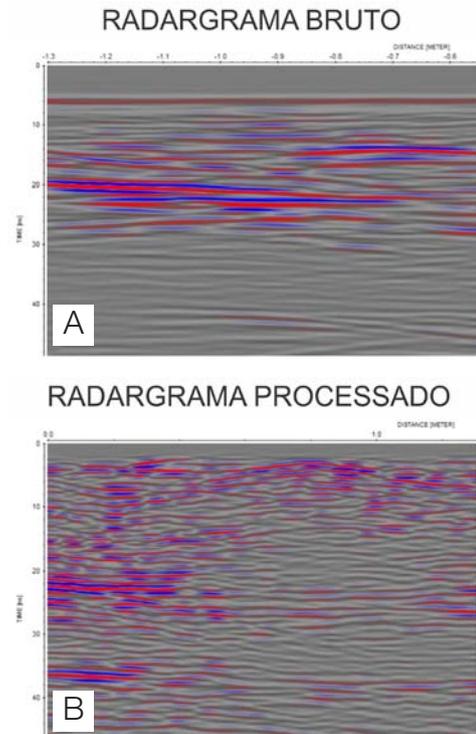


Figura 14. (A) Radargrama não processado, gerado a partir da aquisição de *Ground Penetrating Radar* com a antena 900 MHz. (B) Produto gerado a partir da sequência de processamento aplicada em (A). É possível notar que após o processamento apareceram vários refletores que estavam mascarados e a falsa impressão de horizontalização dos refletores (causada por ruídos coerentes) foi removida.

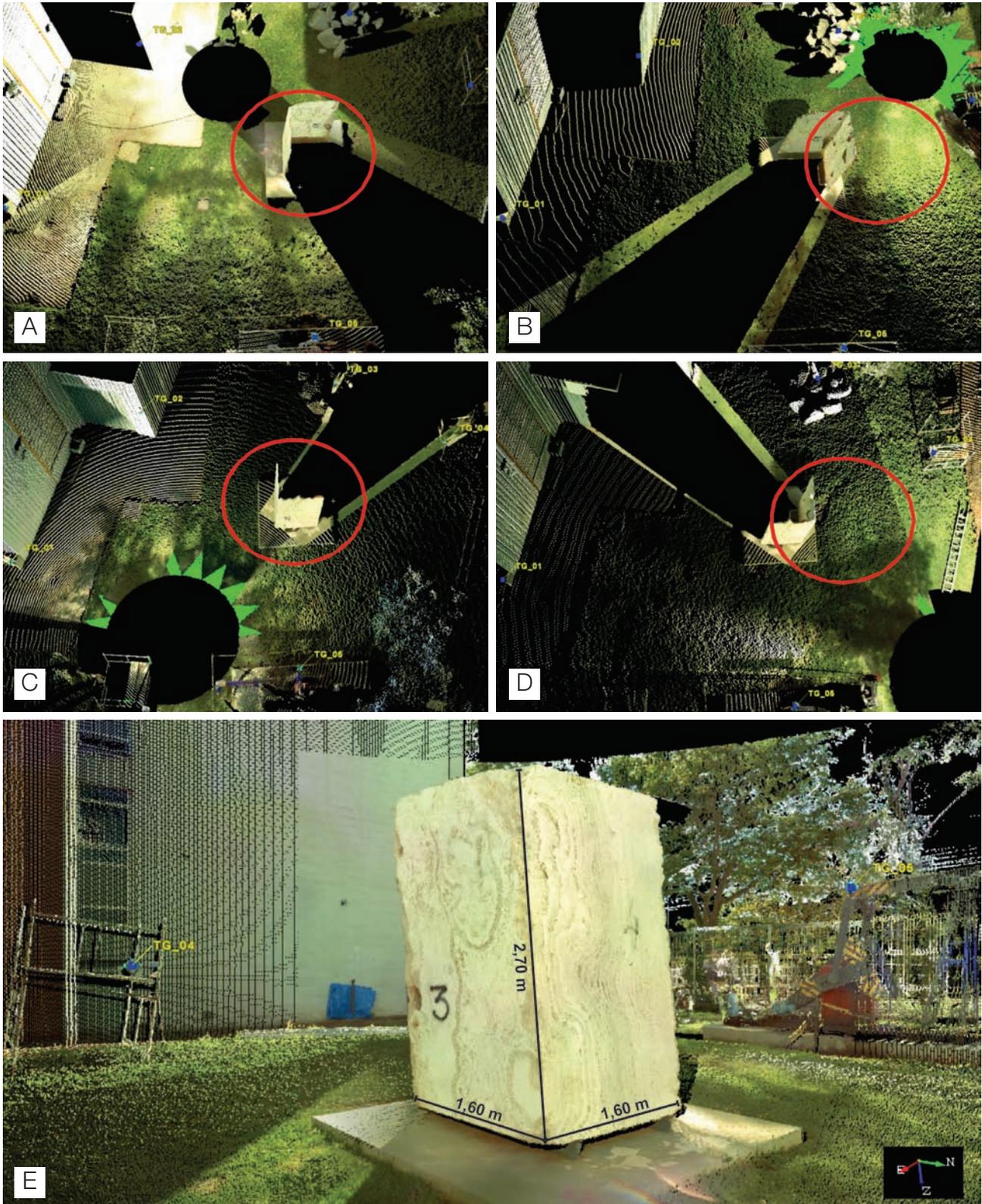


Figura 15. Em (A a D), são apresentados os produtos das aquisições realizadas nas quatro estações diferentes, estando cada aquisição referenciada em sua origem própria. Em E é apresentada a nuvem de pontos gerada a partir do Registro de Cenas. Cada ponto possui três coordenadas (X,Y,Z), além de um valor de RGB e intensidade.

o alvo e retornar até a antena receptora (tempo duplo de percurso) (Figura 16).

Após todos os dados terem sido devidamente tratados, os mesmos foram analisados e interpretados segundo critérios geológicos e geofísicos. Inicialmente, os radargramas adquiridos nas regiões mais próximas às bordas das faces do bloco foram colocados lado a lado com os dados de *Laser Scanner* (Figura 17). Assim, os padrões de resposta encontrados nos radargramas puderam ser correlacionados com as fácies sedimentares, vistas na nuvem de pontos. A partir dessa correlação, três radarfácies distintas foram identificadas, sendo denominadas de “Radarfácies Travertino Laminado”, “Radarfácies Travertino em Domos” e “Radarfácies Travertino Transicional”. A “Radarfácies Travertino Laminado” é representada por um padrão de resposta de baixa amplitude, apresentando o aspecto de um sinal limpo com refletores plano-paralelos. A “Radarfácies Travertino em Domos” é representada por refletores de alta amplitude, limitados por grandes refletores curvos de alta amplitude, apresentando uma aparência mais rugosa, na paleta de cores utilizada. Por fim, a “Radarfácies Travertino Transicional” é encontrada entre as duas outras radarfácies e apresenta tanto refletores com baixa amplitude quanto refletores com amplitude intermediária, podendo haver também alguns refletores com alta amplitude, além de refletores suavemente curvados a plano-paralelos (Figura 17). É importante salientar que durante a aquisição dos dados foi feita a identificação, em mesoescala, das fácies sedimentares encontradas no bloco. Foram encontradas três fácies sedimentares, sendo elas denominadas de “Travertino em Domos”,

“Travertino Transicional” e “Travertino Laminado”. Uma análise visual mostra que as fácies “Travertino em Domos” e “Travertino Transicional”, aparentemente, apresentam maior porosidade relativa, que pode estar associada a uma alta permeabilidade, do que a fácies “Travertino Laminado”. Entretanto, ressalta-se a existência de *vugs* nas três fácies sedimentares.

A partir da correlação das fácies sedimentares com suas respectivas radarfácies, foi feita uma análise da variação da constante dielétrica (K) e da velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas (V) ao longo do bloco (Figura 18). A análise demonstrou que o conjunto das fácies/radarfácies “Travertino em Domos” e “Travertino Transicional” apresentou valores de K mais baixos e de V mais altos que na fácies/radarfície “Travertino Laminado”, corroborando com a ideia de que as fácies “Travertino em Domos” e “Travertino Transicional” são mais porosas que a fácies “Travertino Laminado”, já que o aumento de espaços vazios preenchidos com ar tende a diminuir o valor de K e, conseqüentemente, aumentar o valor de V .

Ao se analisar os perfis de GR, notou-se que seus valores não apresentaram uma variação significativa; além disso, nenhuma das medidas ultrapassou o valor de *background* mensurado. Provavelmente, isso ocorre pelo fato de as fácies encontradas serem constituídas apenas por minerais carbonáticos, os quais não emitem espontaneamente radiação gama. Apesar de os valores medidos não apresentarem variação significativa entre as fácies distintas, foi possível notar que as medidas efetuadas próximas às bordas apresentaram valores mais próximos ao *background*, sendo esse considerado como “efeito de borda” (Figura 19).

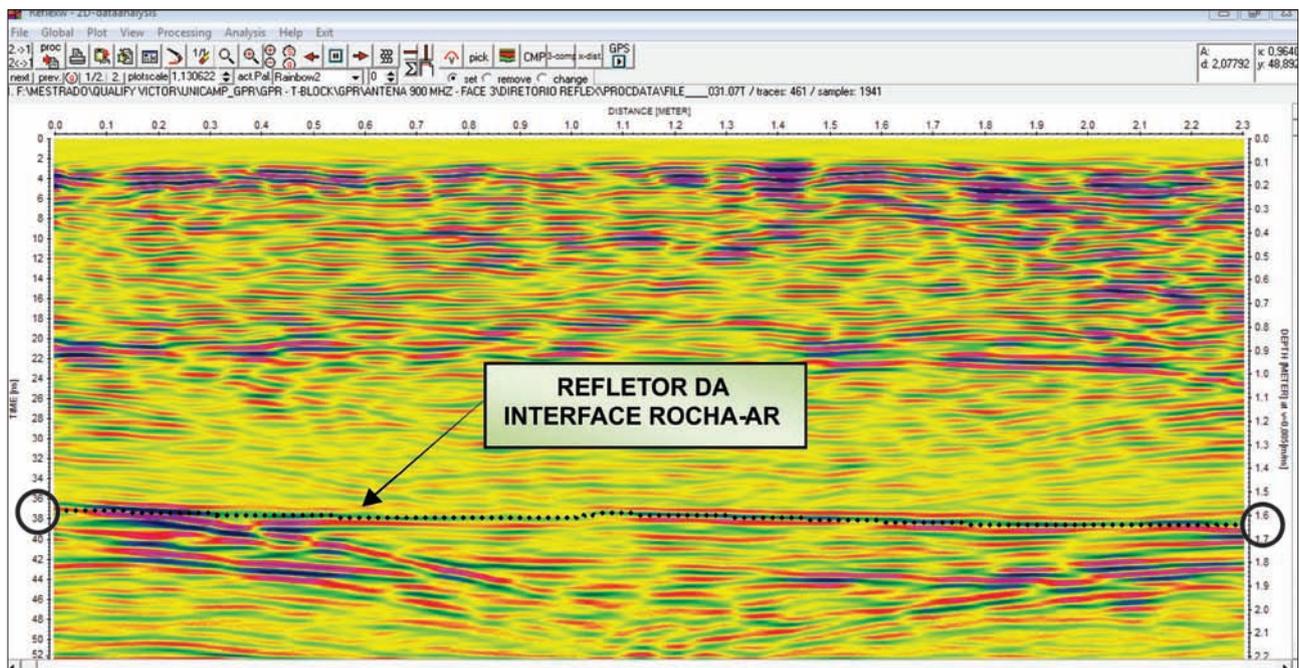


Figura 16. Refletor da interface rocha-ar interpretado no radargrama. O eixo vertical à esquerda da imagem indica os valores de tempo duplo, enquanto o eixo vertical à direita da imagem indica os respectivos valores de profundidade calculados para cada tempo duplo a partir da velocidade de 0,085 m/ns.

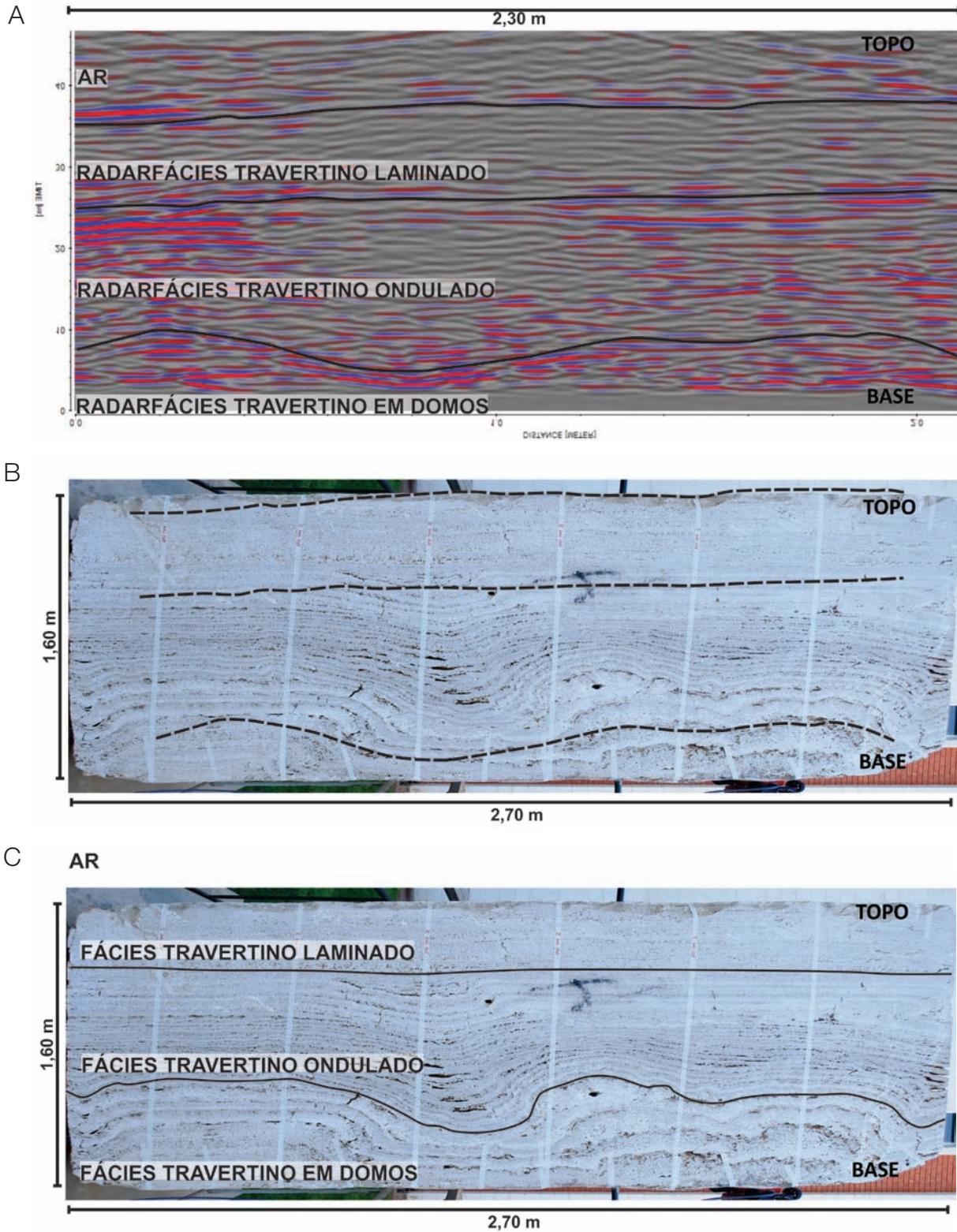


Figura 17. (A) Interpretação do radargrama adquirido com a antena de 900 MHz, próximo à face 4 do T-Block. (B) Interpretação apresentada em (A) projetada na face 4 do T-Block. (C) Interpretação das fácies sedimentares feita na face 4 do bloco. É possível notar que há uma boa correlação entre as radarfácies e as fácies sedimentares. Nota-se que o bloco está posicionado com o topo e base invertidos.

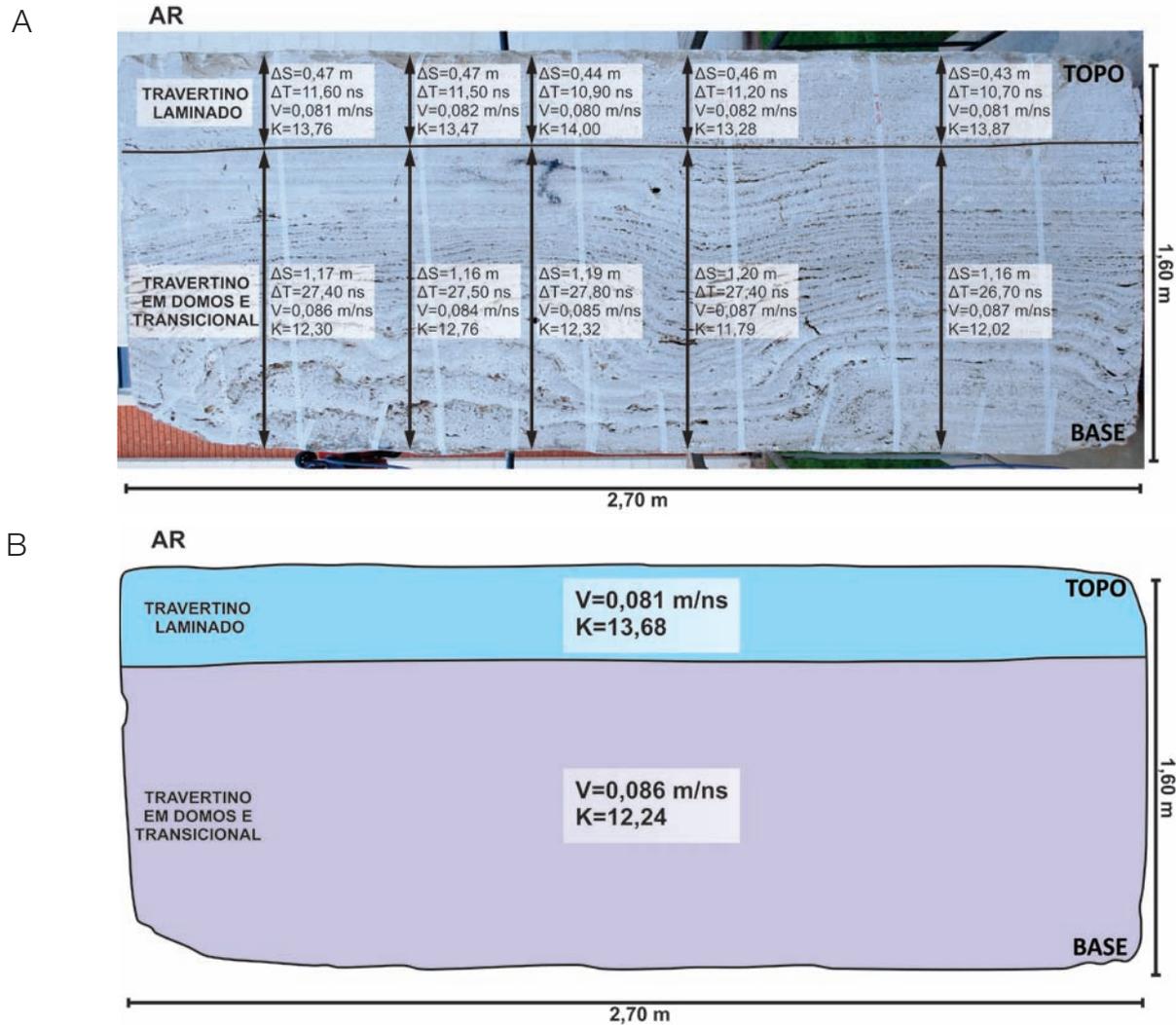


Figura 18. (A) Valores de profundidade (ΔS), tempo duplo (ΔT), velocidade (V) e constante dielétrica (K) medidos (ΔS e ΔT) e calculados (V e K) em algumas posições escolhidas ao longo do bloco. (B) Valores médios de velocidade (V) e constante dielétrica (K) calculados para o conjunto fácies/radarfácies “Travertino em Domos” e “Travertino Transicional” e para as fácies/radarfácies “Travertino Laminado”.

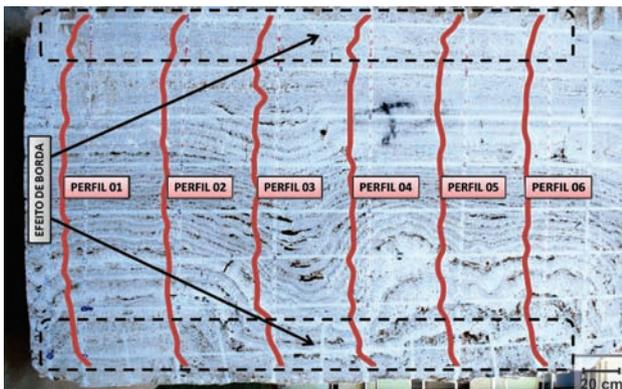


Figura 19. Perfis *Gamma Ray* posicionados em seus respectivos locais de aquisição. É possível notar o efeito de borda evidenciado a partir do aumento nos valores mensurados próximos às bordas do bloco, onde os valores se aproximam do valor de *background*.

DISCUSSÕES

Com a identificação dos diferentes padrões de resposta, nos perfis de GPR adquiridos próximos a borda das faces do T-Block, os radargramas foram importados no *software* OpendTect 4.4.0. Nesse *software*, todos os radargramas puderam ser posicionados e visualizados lado a lado, permitindo assim que as variações laterais das radarfácies fossem interpretadas num ambiente 3D (Figura 20). Essa interpretação teve como produto a identificação de superfícies limitantes que podem ser correlacionadas às discontinuidades geológicas, como o limite de fácies sedimentares. Foram interpretadas três superfícies limitantes: a primeira representou o topo da “Radarfácies Travertino em Domos” (Figura 21A), a segunda o topo da “Radarfácies Travertino Transicional” (Figura 21B) e a terceira representou o refletor gerado

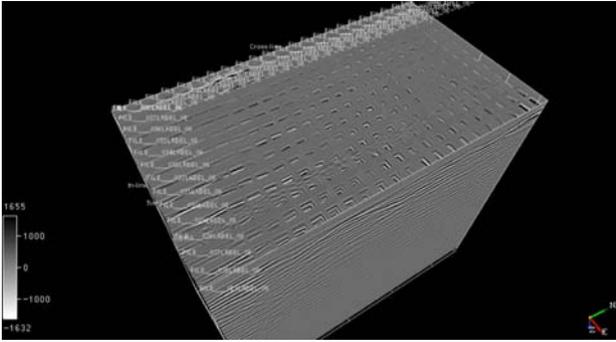


Figura 20. Grid de radargamas importado no OpendTect. A paleta de cores no canto inferior esquerdo da imagem representa a variação da amplitude dos refletores.

pele contato entre a face 5 do bloco e o ar (Figura 21C). Na superfície do topo da “Radarfácies Travertino em Domos” foi possível notar que existe uma boa correlação entre o topo dos domos e suas projeções na face 3 (Figura 22). Considerando que T-Block seja parte de um reservatório, pode-se sugerir que as fácies “Travertino Transicional” e “Travertino em Domos” apresentam forte potencial para armazenar hidrocarbonetos (rochas reservatório), enquanto a fácies “Travertino Laminado” pode atuar como uma rocha selante.

A utilização integrada de dados adquiridos com o *Laser Scanner* terrestre, GPR e o perfilador de raios gama minimiza a possibilidade de erros e facilita o processo

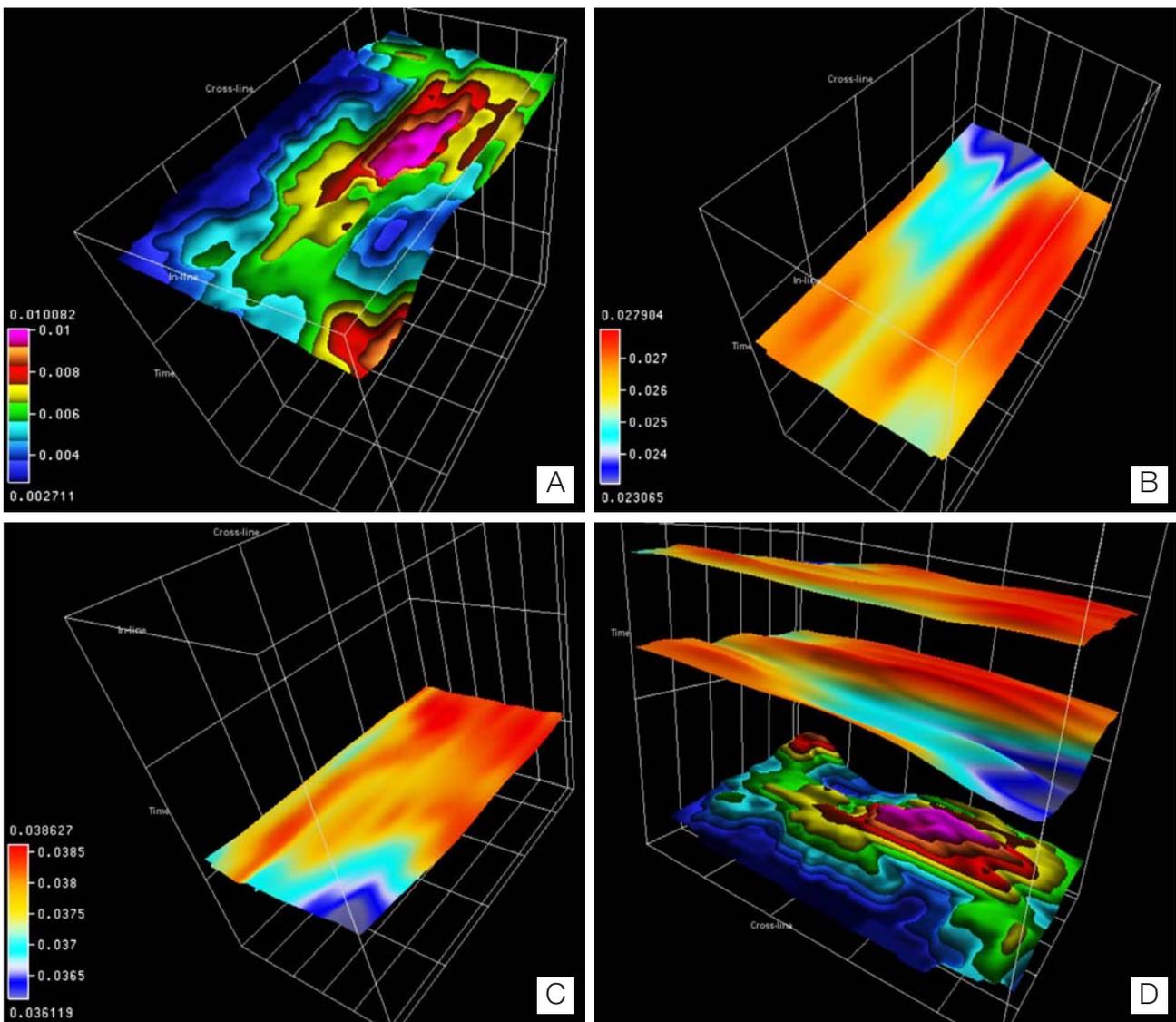


Figura 21. (A) Superfície gerada pela interpretação do topo da “Radarfácies Travertino em Domos” (posicionamento estratigráfico invertido). (B) Superfície gerada pela interpretação do topo da “Radarfácies Travertino Transicional” (posicionamento estratigráfico invertido). (C) Superfície gerada pela interpretação do contato do ar com a face 5 do bloco (posicionamento estratigráfico invertido). (D) Superfícies demonstradas em (A a C), empilhadas na posição estratigráfica de deposição. As paletas de cores representam a variação da profundidade (z).

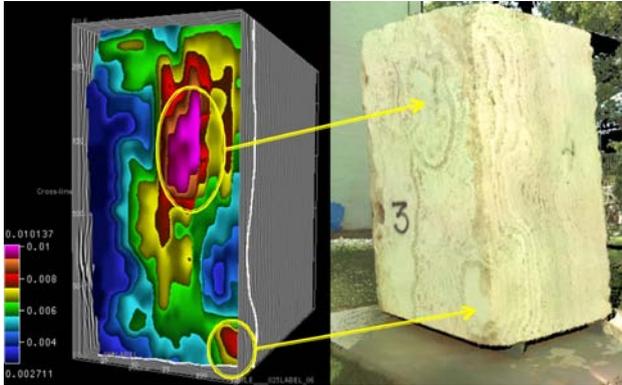


Figura 22. Correlação entre o topo dos domos e suas projeções na face 3 do bloco. A paleta de cores no canto inferior esquerdo da imagem representa a variação da profundidade (z).

interpretativo. Na escala de trabalho utilizada neste artigo, o tipo, a quantidade e a qualidade das informações obtidas propiciaram a boa correlação com as informações indiretas disponíveis e a geração de um Modelo Sólido Digital. Desse modo, foi possível obter parâmetros geológicos quantitativos em 3D da superfície do bloco, como geometria de camadas e distribuição lateral e vertical das fácies sedimentares. Esses parâmetros foram fundamentais para dar consistência ao modelo de distribuição interna das fácies, pois tanto no processamento quanto na interpretação dos dados de GPR já era possível ter uma boa noção de como estavam organizadas as fácies no espaço 3D. Isso permitiu que se utilizassem processamentos digitais adequados e ainda facilitou a correlação entre as radarfácies e as fácies sedimentares.

Apesar de a antena de 2.600 MHz ter apresentado melhor resolução durante o imageamento 3D, sua profundidade de investigação não foi suficiente para atravessar o bloco de uma face a outra, além de não ter evidenciando nenhuma feição adicional as que já haviam sido identificadas com a antena de 900 MHz (Figura 23). Dessa forma, os radargramas gerados pela antena de 900 MHz foram escolhidos para gerar o modelo 3D final.

CONCLUSÕES

O uso conjunto do GPR e do *Laser Scanner* permitiu gerar um Modelo Sólido Digital com um grau de confiança satisfatório em razão da alta densidade de dados e da alta representatividade das informações geológicas expostas em 3D nas faces do bloco, adquirida por meio da tecnologia LIDAR, possibilitando assim uma boa previsibilidade das variações geológicas internas investigadas com o GPR.

A utilização do GPR se mostrou adequada para o estudo das geometrias internas em rochas travertinas

na escala proposta. A partir da aquisição, do processamento e da interpretação dos radargramas, três radarfácies distintas foram encontradas e espacializadas em 3D, as quais foram denominadas de “Radarfácies Travertino Laminado”, “Radarfácies Travertino em Domos” e “Radarfácies Travertino Transicional”. Essas radarfácies são correlatas às fácies sedimentares “Travertino Laminado”, “Travertino em Domos” e “Travertino Transicional”, respectivamente.

O imageamento interno com GPR também se mostrou adequado para a identificação das variações faciológicas em mesoescala, além de permitir a identificação de geometrias e heterogeneidades com as antenas de 900 MHz. O uso dessa frequência de aquisição permitiu a visualização das feições geológicas com excelente nível de detalhe. A integração de todos os radargramas em um mesmo ambiente 3D, no *software* OpendTect, facilitou a identificação das variações laterais e das superfícies limitantes das radarfácies, além de sua correlação com as fácies sedimentares.

A análise das superfícies limitantes permitiu a identificação de duas regiões dômicas no topo da “Radarfácies Travertino em Domos”, as quais representam os domos encontrados na fácies “Travertino em Domos”.

Os dados obtidos durante a perfilagem de raios gama mostraram baixa variação na amplitude dos valores de radioatividade, provavelmente, devido ao fato de as camadas sedimentares perfiladas apresentarem uma composição monomineralógica, sendo compostas por sedimentos carbonáticos, com ausência de argila siliciclástica nas camadas mais pelíticas ou de outro mineral portador de elementos radioativos. Variação dos valores de GR na região limítrofe do bloco foi atribuída ao “efeito de borda”.

A aquisição com *Laser Scanner* terrestre disponibilizou informações especiais georreferenciadas da superfície do bloco (X, Y, Z), além de valores de variação de intensidade de retorno do *laser* e dados RGB, com alta resolução (3 x 3 mm). Esse modelo realístico 3D, que também contempla a interpretação dos radargramas, está pronto para ser exibido em salas de realidade virtual fornecendo dados 3D, aos geólogos e engenheiros de reservatório, da distribuição da porosidade e das heterogeneidades presentes nesse tipo de rocha imageada.

A metodologia proposta neste trabalho para o imageamento digital 3D de um bloco de rocha travertina, com 20 toneladas, que corresponde a uma escala intermediária entre os dados obtidos no reservatório e em plugues, se mostrou adequada para a elaboração de Modelos Sólidos Digitais. Ela abre novas perspectivas para o uso de ferramentas geofísicas associadas à tecnologia LIDAR (*Laser Scanner*) para a elaboração de modelos virtuais 3D. Com essa associação de técnicas,

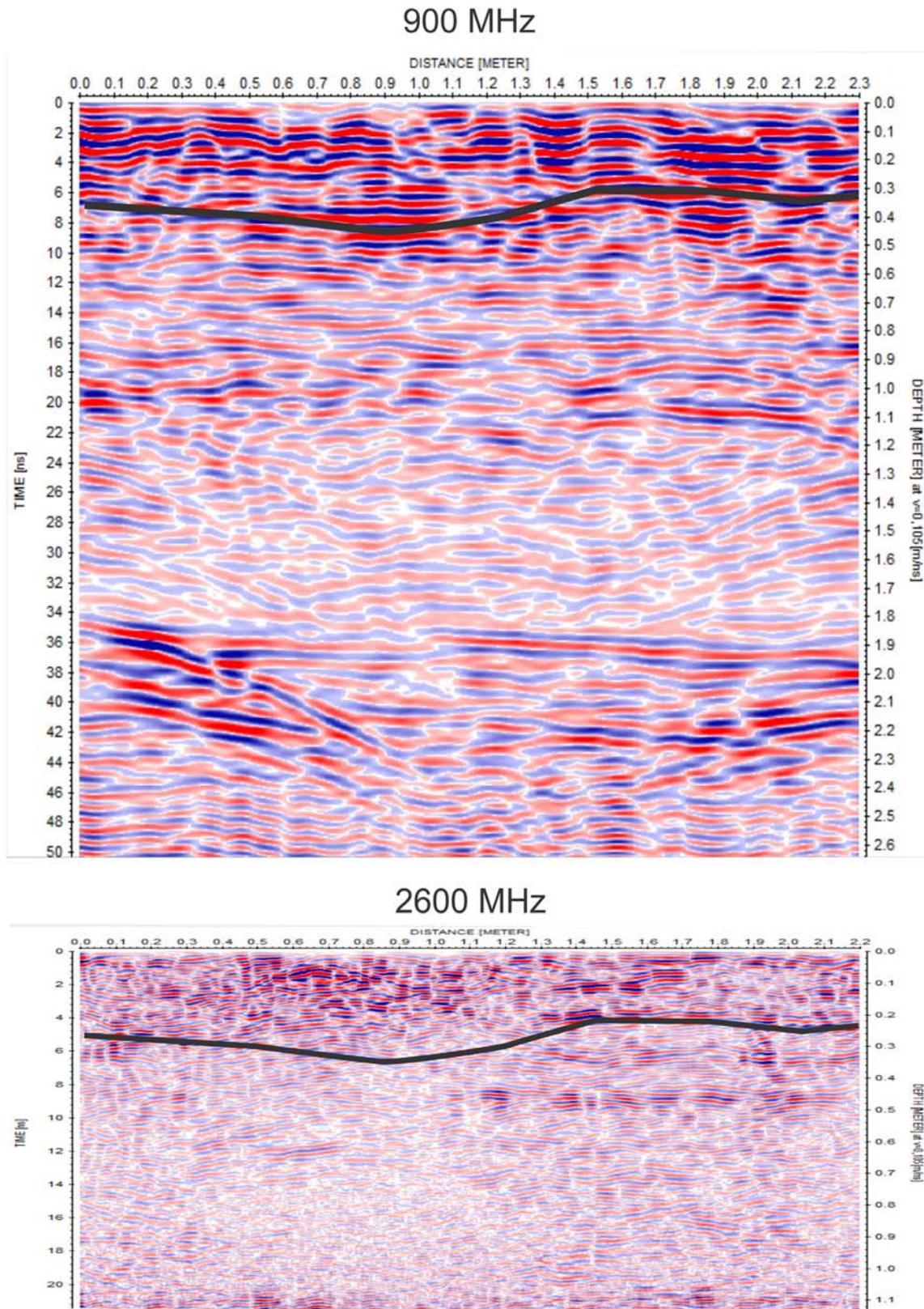


Figura 23. Radargramas obtidos a partir das aquisições com as antenas de 900 MHz e 2.600 MHz, com o refletor do topo da “Radarfácies Travertino em Domos” interpretado em ambos. É possível notar que a profundidade de investigação da antena de 2.600 MHz não ultrapassa 1,2 m enquanto a espessura média do bloco é de 1,75 m.

é possível a caracterização de “blocos” rochosos em uma escala pouco usual (convencional), intermediária entre o plugue e o afloramento análogo a reservatório, de forma não invasiva, capaz de detectar fácies sedimentares com diferentes valores de porosidade e permeabilidade, em uma fase inicial de estudos, antes do seu corte e medição das suas propriedades petrofísicas.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são devidos à Petrobras, por meio da Rede de Caracterização e Modelagem Geológica de Reservatórios (CARMOD), pelo financiamento desta pesquisa, e à ANP PRH-22, pela bolsa de estudos do primeiro autor. DLC é bolsista PQ do CNPq e JARJ bolsista da CAPES. Os autores agradecem ainda à empresa dGB Earth Sciences pela concessão de uma licença educacional do *software* OpendTect v 4.2.

REFERÊNCIAS

- Aigner, T., Schauer, M., Junghans, W. D., Reinhardt, L. (1995). Outcrop gamma-ray logging and its applications examples from the German Triassic. *Sedimentary Geology*, 100(1), 47- 61.
- Annan, A. P. (1996). Transmission dispersion and GPR. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 1(2), 125-136.
- Annan, A. P. (2001). *Ground Penetrating Radar Workshop Notes*. Canada: Sensors & Software.
- Asprion, U., Aigner, T. (2000). An initial attempt to map carbonate buildups using ground-penetrating radar: an example from the Upper Jurassic of SW Germany. *Facies*, 42(1), 245-252.
- Bae, K., Lichti, D. D. (2008). A method for automated registration of unorganized point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 63(1), 36-54.
- Beres Jr., M., Haeni, F. P. (1991). Application of ground-penetrating-radar methods in hydrogeologic studies. *Ground Water*, 29(3), 375-386.
- Boehler, W., Marbs, A. (2003). *Investigating Laser Scanner Accuracy*. I3mainz. Institute for Spatial Information and Surveying Technology, FH Mainz University of Applied Sciences, Mainz, Germany. Disponível em: <http://www.group.slac.stanford.edu/met/align/Laser_Scanner/laserscanner_accuracy.pdf>. Acesso em: 01 janeiro 2007.
- Caers, J. (2005). *Petroleum Geostatistics* (vii, 88p). Richardson, Texas: Society of Petroleum Engineers.
- Cassidy, N. J. (2009). Ground Penetrating Radar data processing, modelling and analysis. In: H. M. Jol (Ed.), *Ground Penetrating Radar Theory and Applications* (141-176). New York: Elsevier.
- Elkhrachy, I., Niemeier, W. (2006). Optimization and strength aspects for geo-referencing data with terrestrial laser scanner system. *3rd IAG/12th FIG Symposium*, Baden, Austria. Disponível em: <http://www.fig.net/commission6/baden_2006/PDF/LS1/Elkhrachy.pdf>. Acesso em: 01 janeiro 2013.
- Folk, R. L. (1993). SEM imaging of bacteria and nanobacteria in carbonate sediments and rocks. *Journal of Sedimentary Petrology*, 63(5), 990-999.
- Ford, T. D., Pedley, H. M. (1996). A review of tufa and travertine deposits of the world. *Earth-Science Reviews*, 41(3-4), 117-175.
- Gauw, D. S. (2007). *Estudo integrado de análogo a reservatórios petrolíferos fluviais: caracterização, parametrização e modelagem tridimensional de depósitos recentes do Rio Assu (Rio Grande do Norte/Brasil)*. Dissertação (Mestrado). Natal, RN: Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Gordon, S., Lichti, D., Stewart, M. (2001). Application of a high-resolution, ground-based laser scanner for deformation measurements. *The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurement*, 23-32. California, USA.
- Grasmueck, M., Weger, R. (2002). 3D GPR reveals complex internal structure of Pleistocene oolitic sandbar. *Lead Edge*, 21(7), 634-639.
- Guo, L., Riding, R. (1994). Origin and diagenesis of Quaternary travertine shrub fabrics, Rapolano Terme, central Italy. *Sedimentology*, 41(3), 499-520.
- Heimann, A., Sass, E. (1989). Travertines in the northern Hula Valley, Israel. *Sedimentology*, 36(1), 95-108.
- Henning, G. J., Grun, R., Brunnacker, K. (1983). Speleothems, travertines and paleoclimates. *Quaternary Research*, 20(1), 1-29.
- Herman, L. S., Lorah, M. M. (1987). CO₂ outgassing and calcite precipitation in Falling Spring Creek, Virginia, U.S.A. *Chemical Geology*, 62(3-4), 251-262.
- Jordan, D. W., Slatt, R. M., Gillespie, R. H., D'Agostino, A. E., Stone, C. G. (1993). Gamma-ray logging of outcrops by a truck-mounted sonde. *AAPG Bulletin*, 77(1), 118-123.
- Julia, R. (1983). Travertines. In: P. A. Scholle, D. G. Bebout, C. H. Moore (Eds.), *Carbonate depositional environments* (v. 33, 6472). American Association of Petroleum Geologists Memoir.

- Keogh, K. J., Martinius, A. W., Osland, R. (2007). The development of fluvial stochastic modeling in the Norwegian oil industry: A historical review, subsurface implementation and future directions. *Sedimentary Geology*, 202(1/2), 249-268.
- Lorah, M. M., Herman, J. S. (1988). The chemical evolution of a travertine-depositing stream: Geochemical processes and mass transfer reactions. *Water Resources Researches*, 24(9), 1541-1552.
- Magnin, F., Guendon, J. L., Vaudour, J., Martin, P. (1991). Lestravertins; accumulatioes carbonatées associes aux systems karstiques, sequences sedimentaires et paleoenvironments quaternaires. *Bulletin de la Societé Geologique de France*, 162, 585-594.
- Mônico, J. F. G. (2000). *Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: descrição, fundamentos e aplicações*. São Paulo: Editora Unesp.
- North, C. P., Boering, M. (1999). Spectral gamma-ray logging for facies discrimination in mixed fluvial-eolian successions: A cautionary tale. *AAPG Bulletin*, 83(1), 155-169.
- Olivier, N., Hantzpergue, P., Gaillard, C., Pittet, B., Leinfelder, R., Schmid, D. U., Werner, W. (2003). Microbialite morphology, structure and growth: a model of the Upper Jurassic reefs of the Chay Peninsula (western France). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 193(3), 383-404.
- Ordonez, S., Garcia Del Cura, M. A. (1983). Recent and Tertiary fluvial carbonates in Central Spain. In: J. D. Collinson, J. Lewin (Eds.), *Ancient and Modern Fluvial Systems* (v. 6, 485-497). International Association Sedimentology, Special Publication.
- Ordonez, S., Gonzales-Martin, J. A., Garcia Del Cura, M. A. (1986). Sedimentación carbonática actual y paractual en las Lagunas de Ruidera. *Revista de Materiales y Procesos Geológicos*, 4, 229-255.
- Pazdur, A., Pazdur, M. F., Starkel, L., Szu Le, J. (1988). Stable isotopes of Holocene calcareous tufa in southern Poland as paleoclimatic indicators. *Quaternary Research*, 30(2), 177-189.
- Pedley, H. M. (1990). Classification and environmental models of cool freshwater tufas. *Sedimentary Geology*, 68(1), 143-154.
- Pringle, J. K., Howell, J. A., Hodgetts, D., Westerman, A. R., Hodgson, D. (2006). Virtual outcrop models of petroleum reservoir analogues: a review of the current state-of-the-art. *EAGE, First Break*, 24(3), 33-42.
- RADAN Manual*. (2009). Geophysical Survey Systems, Inc. (GSSI), Salem, New Hampshire.
- Sancho, C., Peña, J. I., Melendez, A. (1997). Controls on Holocene and present-day travertine formation in the Guadalaviar River (Iberian Chain, NE Spain). *Zeitschrift für Geomorphologie*, 41(3), 289-307.
- Sawakuchi, A. O., Giannini, P. C. (2006). Complexidade em sistemas deposicionais. *Revista Brasileira de Geociências*, 36(2), 347-358.
- Scaioni, M. (2005). *Direct georeferencing of TLS in surveying of complex sites*. Italia. Disponível em: <<http://www.commission5.isprs.org/3darch05/pdf/23.pdf>>. Acesso em 19 abril de 2007.
- Sperry-Sun, Training Department (1999). *Formation Evaluation Fundamentals – Gamma*. A Halliburton Company. Short Course Notes.
- Svendsen, J. B., Hartley, N. R. (2001). Comparison between outcrop-spectral gamma ray logging and whole rock geochemistry: implications for quantitative reservoir characterization in continental sequences. *Marine and Petroleum Geology*, 18, 657-670.
- Tyler, N., Finley, R. J. (1991). Architectural controls on the recovery of hydrocarbons from sandstone reservoir. In: A. D. Miall, N. Tyler (Eds.), *The three-dimensional facies architecture of terrigenous clastic sediments and its implications for hydrocarbon discovery and recovery*. Concepts in Sedimentology and Paleontology (v. 3, 1-15). Tulsa: SEPM.
- Verdeyen, J. T. (1995). *Laser Electronics*. 3. ed. New Jersey: Prentice Hall.
- Viles, H. A., Goudie, A. S. (1990). Tufas, travertines and allied carbonate deposits. *Progress in Physical Geography*, 14(1), 19-41.
- Weijermars, R., Mulder-Blanken, C. W., Wiegers, I. (1986). Growth rate observation from the moss-built Checa travertin e terrace central Spain. *Geological Magazine*, 123, 279-286.
- Wutke, J. D., Centeno, J. A. S. (2007). Métodos para avaliação da resolução de sistemas de varredura a laser terrestre. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 13(1), 151-164.
- Xavier Neto, P. (2006). *Processamento e interpretação de dados 2D e 3D de GPR: aplicações no imageamento de feições cársticas e estruturas de dissolução no campo de petróleo de Fazenda Belém – CE*. Tese (Doutorado). Natal, RN: Universidade Federal do Rio Grande do Norte.