

Modelagem da anisotropia em sistemas fraturados a partir de estudos de alta resolução na Bacia do Paraná, Brasil

Modeling of anisotropy in fractured systems by high-resolution studies in the Paraná Basin, Brazil

Ciro Jorge Appi | Sidnei Pires Rostirolla

resumo

A interpretação de dados geológicos de superfície e a integração com novos dados geofísicos de alta resolução, especialmente obtidos em subafloramentos, demonstraram a intensidade, extensão e a geometria de um complexo sistema de fraturas que afeta o Grupo Itararé na Bacia do Paraná, com potencial para utilização no desenvolvimento de modelos aplicáveis na exploração de hidrocarbonetos. Sistemas de juntas e falhas de pequena magnitude que afetam os espessos pacotes de arenitos, diamictitos e folhelhos de origem periglacial do Grupo Itararé foram imageados segundo diferentes técnicas. A arquitetura deposicional e o arcabouço estrutural foram obtidos com sísmica de alta resolução, levantamentos elétricos, eletromagnéticos, construção de perfis colunares verticais, análise estratigráfica arquitetural e mapeamento estrutural em escala de semidetalhe e detalhe. A área estudada, na porção central da Bacia do Paraná, próximo ao Parque de Vila Velha, compreende afloramentos cuja extensa exposição é contínua lateralmente e os aspectos de relevo facilitam o imageamento geofísico de seções subaflorantes. A avaliação e modelagem dos potenciais reservatórios basearam-se principalmente

na integração entre o modelo geométrico extraído das características deposicionais, como as geometrias internas e externas dos corpos de arenitos, com aqueles oriundos da análise estrutural, sendo possível mapear sistemas poligonais de fraturas que cortam camadas tabulares e lenticulares de arenitos. A geometria resultante é representada por um sistema reservatório na escala de dezenas a centenas de metros, onde a anisotropia é complexa e derivada de controles faciológicos e estruturais. Com o suporte no imageamento de alta resolução, associados às técnicas tradicionais de análise estratigráfica e estrutural, foram gerados modelos tridimensionais de reservatório.

(originais recebidos em 10.03.2004)

Palavras-chave: anisotropia | fraturas | reservatórios fraturados
Bacia do Paraná | Grupo Itararé | Permocarbonífero.

abstract

The geological interpretation of outcrops and their integration with new high-resolution geophysical data revealed the intensity, extension, and the geometry of a complex system of fractures that affected the Itararé

Group of the Paraná Basin, of potential value for the development of models with application for hydrocarbon exploration. Sets of small-displacement faults and joints that developed in the thick sequences of periglacial sandstone, diamictite and shale beds of the Itararé Group were imaged using different techniques. The depositional architecture and the structural framework were interpreted from high-resolution seismic data, electrical and electromagnetic surveying, the construction of cross sections; stratigraphic architectural analysis and structural mapping at semi detailed and detailed scales. The study area is situated in the central part of the Paraná Basin, in the proximity of the Vila Velha National Park. The extent of the exposures, their lateral continuity and the conditions of the terrain, facilitated the geophysical imaging of sub-outcrop sections. The modeling and evaluation of the potential reservoirs was mainly based on the integration between the geometric model obtained from the depositional characteristics, such as the internal and external geometry of the sandstone bodies, with those developed from the structural analysis, in order to map polygonal systems of fractures cutting tabular and lenticular sandstone bodies. The resultant geometry is represented by a reservoir system on the scale of tens to hundreds of meters where the anisotropy is complex and derived from faciological and structural controls. With the support of high-resolution imaging, associated with traditional analytical techniques of stratigraphic and structural analysis, it was possible to generate three-dimensional models of the analogue reservoir.

(expanded abstract available at the end of the paper)

Keywords: *anisotropy | fractures | fractured reservoir | Paraná Basin | Itararé Group | Permian/Carboniferous.*

introdução

A caracterização estrutural da anisotropia nos sistemas petrolíferos, em particular aquelas ligadas aos itens reservatório e selo, tem sofrido atenção crescente na indústria do petróleo. Fraturas correspondem a elementos que podem tanto prejudicar como melhorar a performance de um sistema petrolífero, tanto no momento da exploração como naquele da produção de hidrocarbonetos. É fato conhecido que muitos campos produtores contêm como reservatórios rochas naturalmente fraturadas, onde as propriedades como

intensidade, extensão e geometria do sistema de fraturas controlam a performance destes reservatórios durante a produção. Neste caso, a permeabilidade resultante passa a ser muito mais importante do que a porosidade e permeabilidade da matriz da rocha. Da mesma maneira, levando-se em conta também o fator sincronia no processo dinâmico, durante a migração dos hidrocarbonetos os sistemas de falhas e fraturas são fundamentais para proporcionar a efetiva chegada destes aos reservatórios. Por sua vez, a questão integridade das rochas selantes nos sistemas petrolíferos estão inversamente dependentes da existência destes sistemas anisotrópicos no seu interior, de maneira a não afetar a efetiva retenção do hidrocarboneto na trapa.

A Petrobras, através do Programa Tecnológico em Fronteiras Exploratórias – Profex – vem investindo em estudos de sistemas fraturados, de forma a produzir inovações e conhecimentos, propiciando também que parceiros da academia participem desta evolução tecnológica atuando nos projetos de pesquisa e desenvolvimento integrados com a indústria do petróleo. Soluções tecnológicas têm surgido destas parcerias, tal como o projeto “Modelagem de potenciais reservatórios em superfície para auxílio no modelo exploratório em subsuperfície”, desenvolvido na Universidade Federal do Paraná (UFPR). Os estudos desenvolvidos na UFPR envolveram a caracterização da anisotropia estrutural em reservatórios fraturados, tendo como alvo rochas sedimentares carboníferas e permianas da Bacia do Paraná, correlatas a reservatórios de gás existentes em subsuperfície, que foram afetadas por múltiplos eventos deformacionais. Outros objetivos incluíram também como os sistemas de fraturas podem ser modelados com propósitos exploratórios na identificação da gênese e rotas da migração e como estes eventos podem ter afetado a integridade das rochas capeadoras finas que servem de selo para este tipo de trapa.

Segundo Rostirolla *et al.* (2001), dados estruturais atualmente disponíveis sobre a Bacia do Paraná permitem uma avaliação do padrão deformacional nos sistemas fraturados, especialmente para os arenitos do Grupo Itararé e Botucatu/Pirambóia. Falhas e sistemas de juntas em

direções variadas, domos e bacias estruturais, dobras suaves e basculamentos são as estruturas tectônicas dominantes nas áreas de afloramento destas unidades, na porção centro-leste da bacia (Zalán *et al.* 1987). Grande parte da deformação rúptil tem gênese relacionada à reativação de paleoestruturas presentes no embasamento, controlando o padrão deposicional da bacia (Milani e Ramos, 1998), enquanto outros foram gerados durante a formação da bacia, hoje expostos como lineamentos de extensão regional (Soyares *et al.* 1982; Zalán *et al.* 1987, 1990; Rostirolla *et al.* 2000). Na borda leste da bacia, onde está localizada a área de estudo, podem ser observados pelo menos três eventos deformacionais que afetam as seqüências carbonífera-permiana, triássica e jurássica-cretácea. Em escala regional, compartimentos com geometria poligonal formam o arcabouço estrutural. Em escala de detalhe, a deformação rúptil, representada pela organização de zonas de falhas localizadas nas rochas sedimentares, leva à variação em unidades locais de fluxo, devido à variação da porosidade ao longo de corredores de deformação. O resultado final é uma rede de fraturas que condiciona a circulação de fluidos, resultando em distribuições diferenciadas de propriedades petrofísicas em potenciais reservatórios fraturados da Bacia do Paraná.

relevância do tema

A indústria do petróleo tem objetivado minimizar o risco tanto na exploração quanto durante o processo de exploração de hidrocarbonetos nos campos produtores. No âmbito do projeto desenvolvido em parceria entre a Petrobras e a UFPR, como apoio a trabalhos científicos e acadêmicos, alguns métodos estão sendo testados para o entendimento das heterogeneidades. Entre eles, a integração e a calibração de dados oriundos da sísmica de alta resolução, poços e afloramentos foram escolhidas como linha principal das pesquisas. Dados sísmicos tradicionais apresentam resolução abaixo da variabilidade encontrada na escala de reservatórios e poços. Além disso, a maior parte das informações advém de amostragens pontuais, não sendo portanto efi-

cazes para a determinação das heterogeneidades. O estudo de afloramentos análogos a reservatórios em subsuperfície apresenta um potencial para determinar heterogeneidades em alta resolução, em especial quando reservatórios são afetados por fraturas que podem ser obtidas em afloramentos e extrapoladas para porções mais profundas. Técnicas de imageamento de reservatórios fraturados apresentaram bons resultados no que diz respeito à representação geométrica de anisotropias. As técnicas envolvem estudos estratigráficos e estruturais de detalhe, aquisição sísmica e parametrização próprias para alta resolução, sondagens rasas para correlação com dados de afloramentos próximos e poços profundos que apresentem o mesmo intervalo amostrado, além da análise de imagens desde Landsat até microscópica, permitindo a abordagem *zoom*, principalmente no quesito geologia estrutural.

A técnica de varredura de afloramentos foi utilizada para obter a representação real de arenitos heterogêneos no Grupo Itararé, que muitas vezes pode ser considerada como um meio homogêneo nos levantamentos com baixa resolução. Isto pode ser traduzido como uma pseudofunção representativa da complexidade do reservatório. Na figura 1 ilustra-se a complexidade de reservatórios fraturados, com estruturas que certamente influenciam a circulação de fluidos.

estudo de caso

França *et al.* (1996) e Rostirolla *et al.* (2001) evidenciaram a analogia dos Arenitos Vila Velha (conforme denominação informal de Maack, 1946) com aqueles do Grupo Itararé encontrados em subsuperfície nos campos de gás. Appi e Magalhães (2000) caracterizaram, através de dados provenientes de GPR, a extensão do fraturamento no interior dos corpos arenosos do Grupo Itararé, aflorantes na área da Fazenda Rivadávia

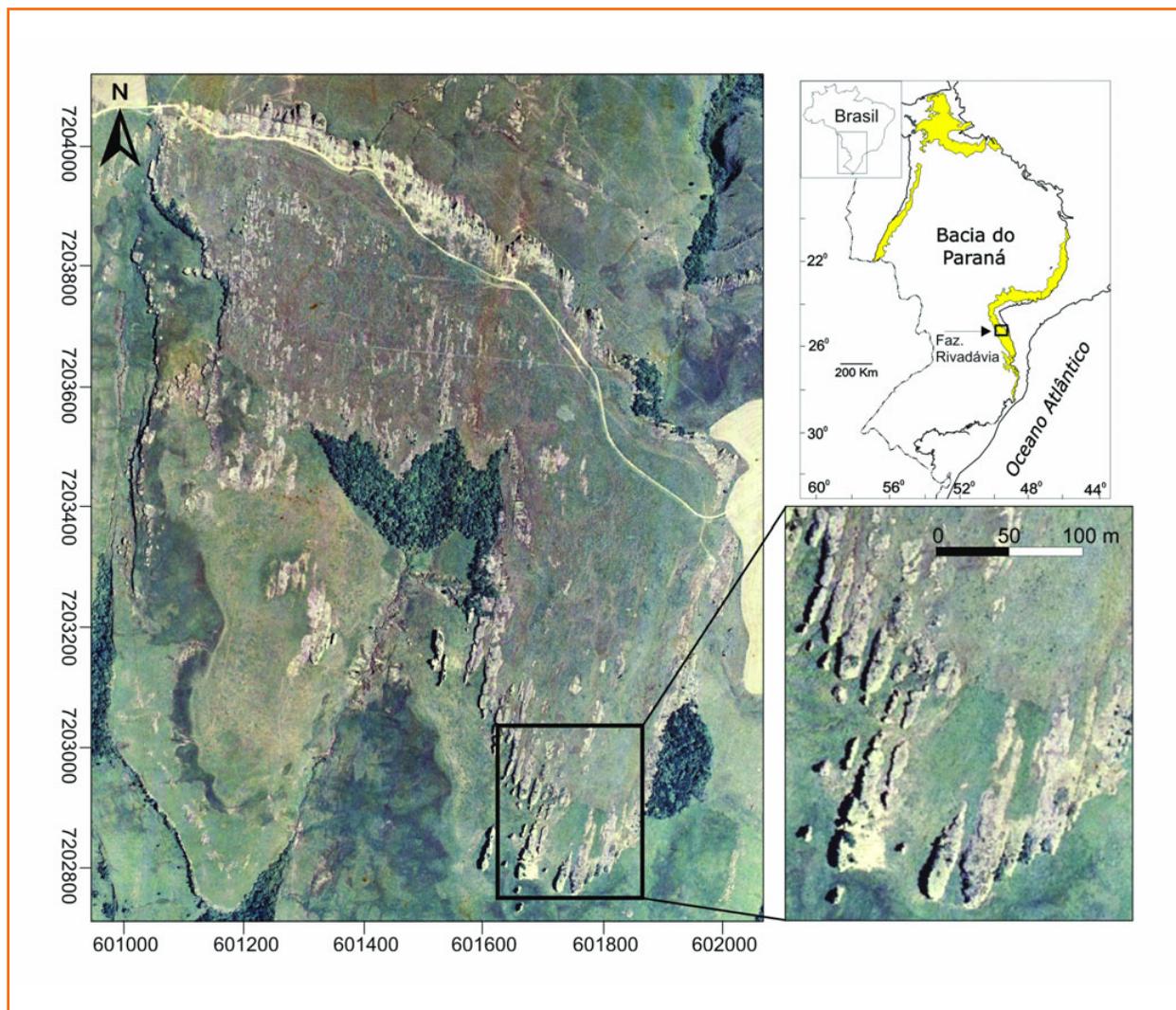
Em Rostirolla *et al.* (2001), o padrão deformacional foi definido como de falhas normais oblíquas a transtensivas, representadas em afloramentos por zonas de cisalhamento restritas ou “bandas de deformação”, com largura de milímetros a centímetros, que mostram cimentação e apresen-

Figura 1

Detalhe de foto aérea, com exemplificação das falhas e sistemas de juntas que afetam seqüências arenosas do Grupo Itararé, Bacia do Paraná.

Figure 1

Detail of aerial photograph, showing the fault and joint systems crossing sandstone sequences of the Itararé Group, Paraná basin.



tam características atuais de barreiras à migração de fluxo. Esta compartimentação estrutural, somada à heterogeneidade sedimentológica em lentes ou camadas tabulares, imprime uma característica de unidades de fluxo com forma de prismas retangulares, marcados por camadas cortadas por conjuntos de falhas com direção predominante NNE-SSW. Neste contexto, as falhas refletem condutos à época da formação das fraturas, embora, atualmente, constituam barreiras.

Rostirolla *et al.* (2001) concluíram que a influência na migração de fluidos em reservatórios similares às rochas estudadas deve ser resultante tanto da compartimentação estrutural como dos fatores estratigráficos, com algumas dessas fraturas atuando como zonas de fechamento lateral (possíveis *spill-points*). Esta hipótese de trabalho foi perseguida durante o presente estudo, onde se provou

que falhas de pequeno rejeito e juntas secundárias são fundamentais para o ordenamento e distribuição de fluidos em reservatórios do Grupo Itararé. Por outro lado, a difícil identificação e localização destas estruturas em subsuperfície, dada a escala reduzida, portanto não perceptível em levantamentos sísmicos convencionais, direcionou a pesquisa para trabalhos de alta resolução em seções aflorantes ou subaflorantes. Assim, foi possível inferir rotas de migração de fluidos em escala local na Bacia do Paraná e unidades de drenagem existentes nos reservatórios.

aspectos estruturais

A área selecionada para o estudo da anisotropia estrutural compreende a Fazenda Rivadávia, no centro-leste do Estado do Paraná (fig. 2). A região de Rivadávia está localizada logo a sul de

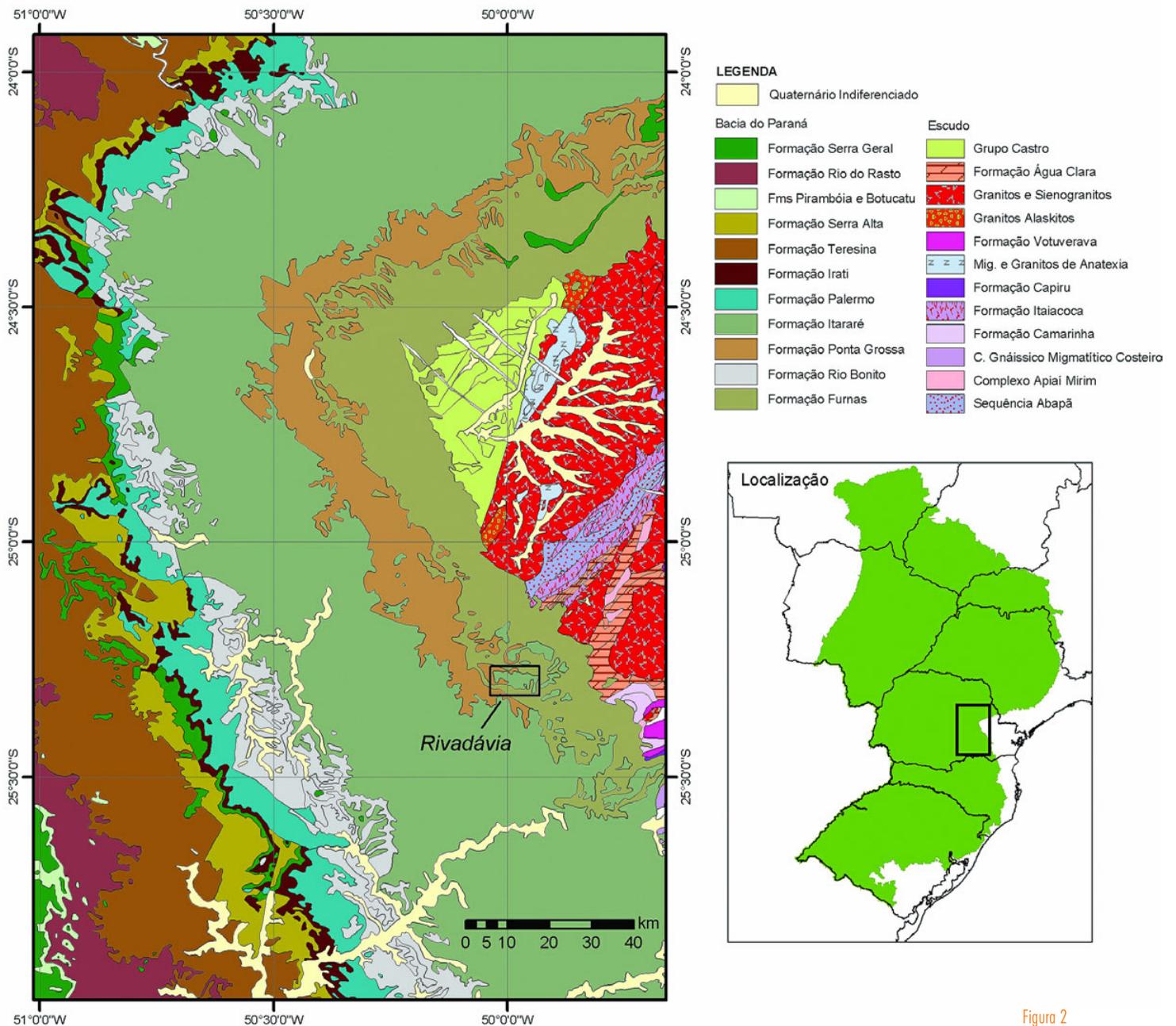


Figura 2

Localização da área de Rivadávia sobre o mapa geológico da Bacia do Paraná.

Figure 2

Location of the Rivadávia area inset on geological map of the Paraná basin.

um mosaico de grandes falhas regionais, na confluência entre dois corredores de deformação NW e NE. Sistemas de falhas retilíneas na direção NW e anastomosadas na direção NE compõem o arcabouço estrutural da região, em conjunto com segmentos menores segundo NS e EW (fig. 3). A área situa-se no flanco sul do Arco de Ponta Grossa, cujo *trend* principal é noroeste, com intrusões significativas de diques de diabásio. Ao longo do Arco de Ponta Grossa ocorrem as Zonas de Falha da Guapiara, São Jerônimo/Curiúva, Falha Curitiba/Maringá, Rio Alonzo, Cândido de Abreu/

Campo Mourão e Piquiri (Zalán *et al.* 1987). As falhas NE são igualmente reconhecidas na área de estudo, porém são menos contínuas, provavelmente por serem anteriores aos lineamentos NW. A área de estudo encontra-se entre as Zonas de Falha da Lancinha e Taxaquara (Zalán *et al.* 1987).

Segundo Rostirolla *et al.* (2001) e Trzaskos-Lipski *et al.* (2003), os principais elementos estruturais descritos na área compreendem sistemas de juntas e pequenas zonas de cisalhamento marcadas como ressaltos no relevo. As zonas de cisalhamento foram classificadas como bandas

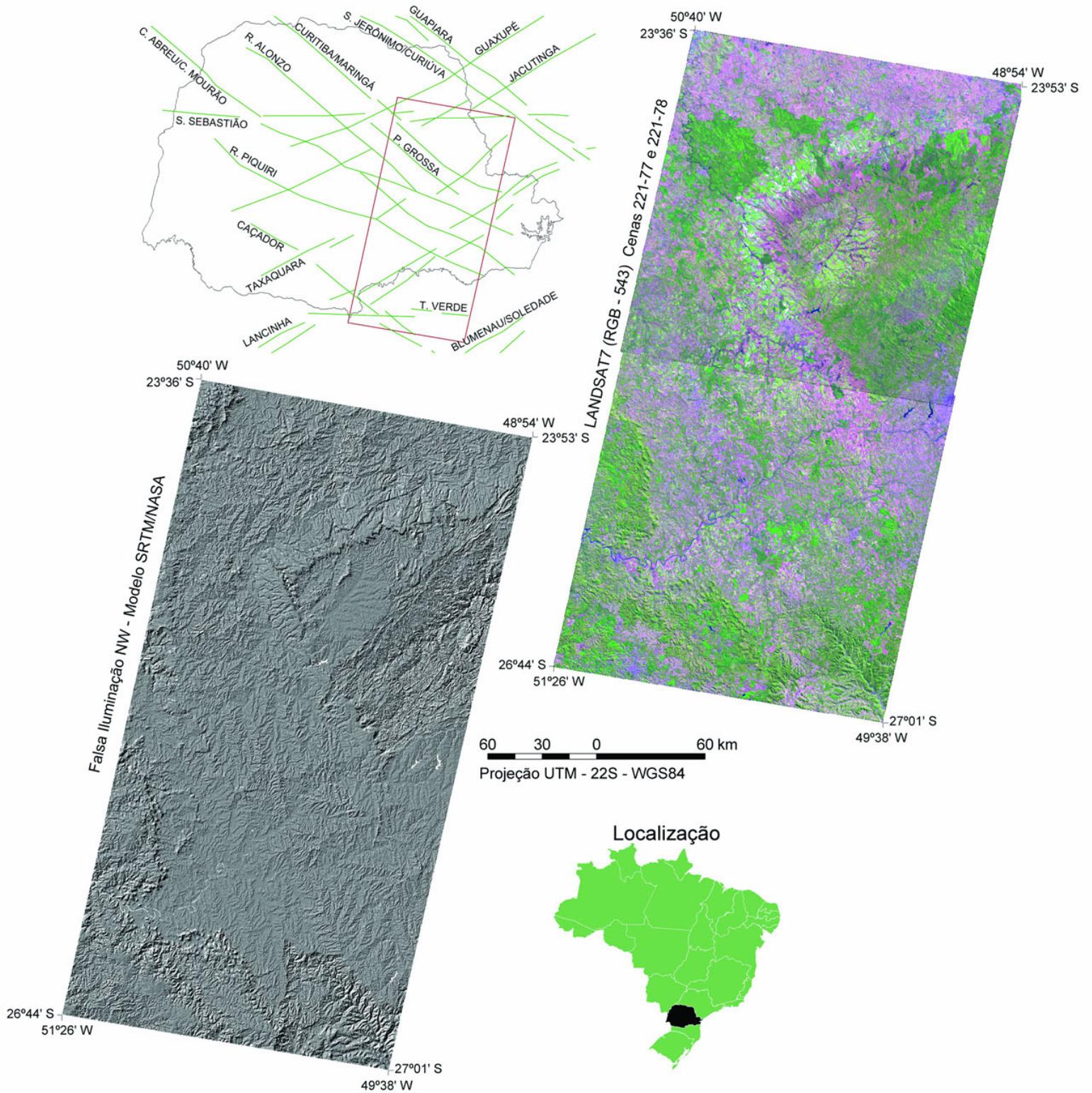


Figura 3 – Modelo digital de elevação obtido a partir de dados SRTM (esquerda) e imagem Landsat TM7 (direita) da porção central do Estado do Paraná, mostrando os compartimentos morfotectônicos. Zonas de falha a partir de Zalán et al. (1990). Note a estruturação proeminente do Arco de Ponta Grossa em ambas as imagens.

Figure 3 – Digital elevation model obtained from SRTM (left) and LANDSAT TM7 imagery (right) of the central-eastern part of the State of Paraná, showing the morphotectonic compartments. Fault zones from Zalán et al. (1990). Note the prominent structure of the Ponta Grossa arch in both images.

de deformação (*sensu* Aydin, 1978), por apresentarem características de deformação intergranular, concentrada em faixas estreitas, cerca de poucos centímetros, e com rejeito de decímetros a poucos metros. No campo, as bandas de deformação caracterizam-se por zoneamentos de óxidos e sílica, sugerindo fases distintas de precipitação associadas à circulação de fluidos meteoricos e conatos. Em lâminas petrográficas (Trzaskos-Lipski *et al.* 2003; figs. 4 e 5), as zonas cisalhadas apresentam geometria variando de retilínea a anastomosada, com espaçamento centimétrico. Em escala mesoscópica as bandas de deformação aparentam leve redução granulométrica, e em vários afloramentos configuram o padrão geométrico típico do Modelo de Riedel. Os principais indicadores cinemáticos observados em campo foram as fraturas escalonadas, movimento relativo entre blocos, pares conjugados, feições sigmoidais semelhantes a pares SC (cataclasitos SC, *sensu* Cladouhos, 1999 e Lin, 2001) e planos estriados com degraus.

A área da Fazenda Rivadávia é caracterizada por apresentar uma deformação menos intensa do que as porções centrais ao Arco de Ponta Grossa. A análise dos lineamentos traçados em imagem de satélite e modelos digitais de elevação demonstra que os *trends* de direção N-S e NW-SE se apresentam significativos, mas não chegam a definir zonas de falha com extensão regional. Análise detalhada do MDE sugere também a existência de lineamentos E-W, representados por traços curtos paralelos, com geometria em feixe. Fotointerpretação e levantamento de detalhe na área permitiram reconhecer duas famílias de fraturas, de direção N10E e N70W, ambas subverticais, com a direção N10E ocorrendo com maior frequência. É comum a ocorrência de sistemas de *horsts* e grábens ao longo dos planos N10E, limitados por planos de falha com rejeitos variando de poucos centímetros a alguns metros. Os dados estruturais meso e microscópicos encontrados indicam a existência de um evento tectônico principal, com superposição de uma reativação dos planos de falhas.

A análise de lâminas delgadas (Trzaskos-Lipski *et al.* 2003) possibilitou a identificação de texturas características nas bandas de deformação,



Figura 4

Fotomicrografia de uma banda de deformação caracterizada pela cominuição dos grãos (Trzaskos-Lipski *et al.* 2003).

Figure 4

Photomicrograph of a deformation band characterized by grain comminution (Trzaskos-Lipski *et al.* (2003).

associadas a fraturamento sin- e pós-evento diagenético, com cominuição de grãos (*gouge*) ao longo de planos de falhas. Ao microscópio, Trzaskos-Lipski *et al.* (2003) classificaram as bandas de deformação em dois tipos distintos: banda de deformação caracterizada pela cominuição dos grãos (BDC) e banda de deformação fraturada (BDF). Em zonas cominuídas é possível observar faixas de grão triturados de 0,5 a 2 mm de espessura. Esse tipo de banda pode ocorrer associado a zonas de microfaturas alinhadas subparalelamente à zona de cisalhamento principal, onde se nota a rotação e translação de grãos e a existência de grãos sobreviventes em meio a uma massa fina chamada de *gouge* (fig. 4). A zona central da BDC é formada por grãos de granulometria muito fina e de composição semelhante à rocha matriz. Em raros casos a zona de *gouge* apresenta-se preenchida por óxidos. A BDF é caracterizada pelo fraturamento dos grãos da matriz sem que haja necessariamente cominuição. O padrão de fraturamento segue o sistema Riedel, e em alguns grãos observa-se o deslocamento milimétrico das fraturas (fig. 5).

Segundo Trzaskos-Lipski *et al.* (2003), a direção N30E, presente ao sul da Fazenda Rivadávia, consiste em zona de falha com cisalhamento mais intenso e do tipo BDC (fig. 6). Considerando que ambas as famílias foram geradas no mesmo



Figura 5

Fotomicrografia de uma banda de deformação caracterizada pelo fraturamento grãos (Trzaskos-Lipski *et al.* 2003).

Figure 5

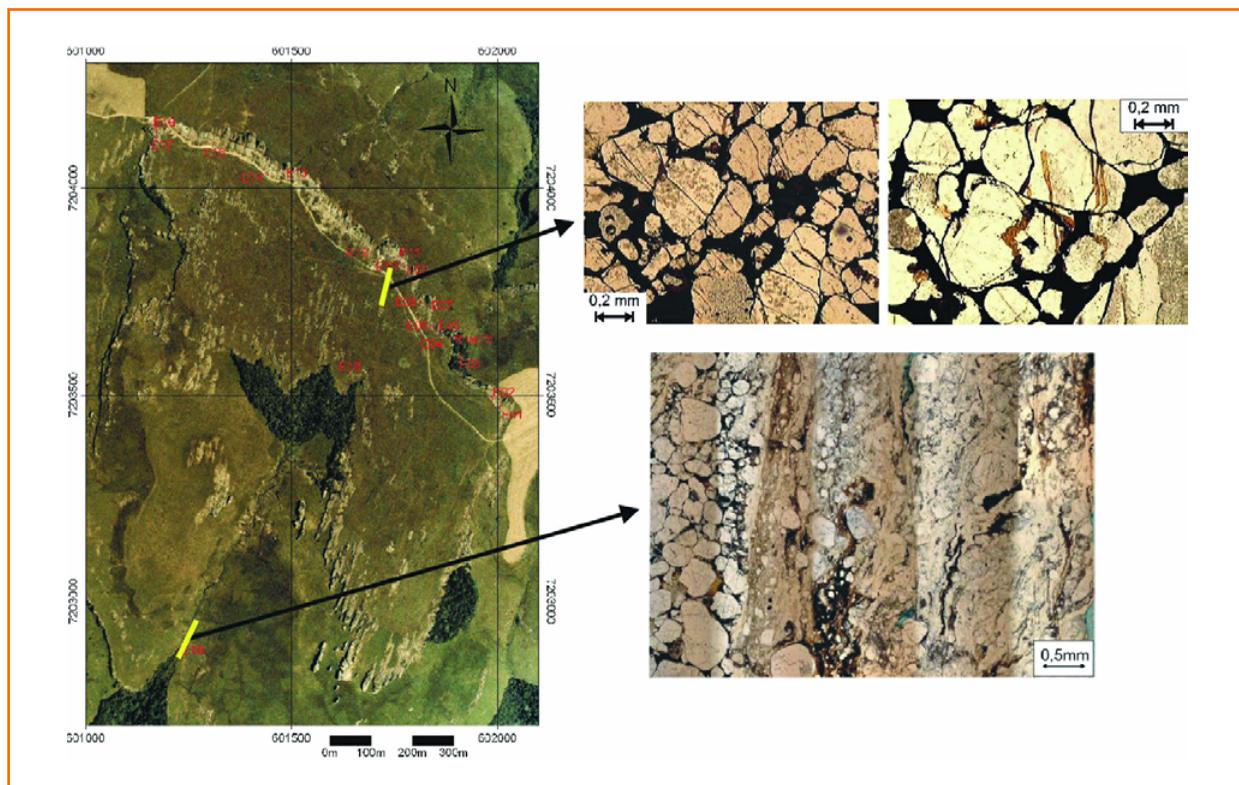
Photomicrograph of a deformation band characterized by grain fracturing (Trzaskos-Lipski *et al.* 2003).

Figura 6

Mapa de localização das estruturas observadas na área de Rivadávia e fotomicrografia dos dois tipos de bandas de deformação. A direção N10E contém bandas de deformação fraturadas e N30E bandas de deformação cominuídas (Trzaskos-Lipski et al. 2003).

Figure 6

Situation map of the structures observed in the Rivadávia region, and photomicrograph of the two types of deformation bands. The N10oE strike contains fractured deformation bands, and N30oE comminuted deformation bands (Trzaskos-Lipski et al. 2003).



evento, as fraturas N10E corresponderiam a fraturas do tipo “T” e N30E a fraturas do tipo “R” de um sistema transcorrente regional segundo N50E, cuja componente de tensão cisalhante geraria a cominuição mais acentuada dos grãos ao longo do *trend* N30E. As relações entre as fraturas e os sobrecrescimentos de quartzo demonstram um evento principal de fraturamento, com posterior processo meso a neodiagenético registrado pelo sobrecrescimento dos grãos de quartzo (fig. 7; Bocardi et al. 2003). O sobrecrescimento poderia ainda estar relacionado a intrusões de

diques mesozóicos. O sistema de fraturas anterior ao evento diagenético pode ter sido reativado por eventos tectônicos posteriores, uma vez que fraturas intergranulares são facilmente reconhecidas nas BDFs. Dessa forma, supõe-se a existência de pelo menos dois eventos tectônicos, respectivamente pré- e sin- a pós-Mesozóico.

aspectos estratigráficos

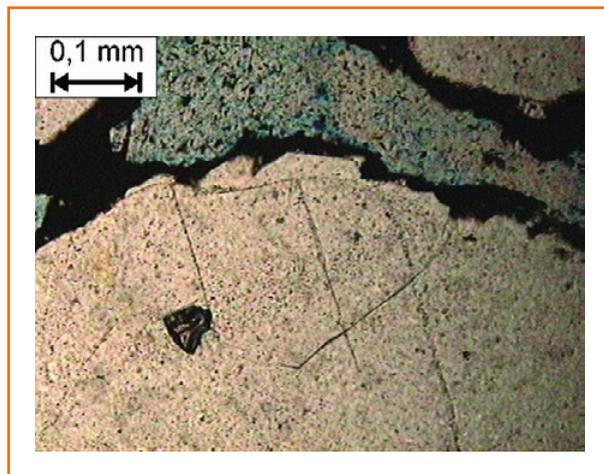
As rochas estudadas fazem parte da unidade litoestratigráfica denominada Formação Campo Mourão, pertencente ao Grupo Itararé, na Bacia do Paraná, sendo também designadas pelo sistema de “Arenitos Lapa-Vila Velha” (França et al. 1996). Segundo França e Potter (1991), o Grupo Itararé é uma unidade glaciogênica com cerca de 1 200 m de espessura, que compreende as formações Lagoa Azul, Campo Mourão, Taciba e Aquidauana. Na área dos Arenitos Lapa-Vila Velha, o Grupo Itararé é representado por arenitos e conglomerados basais da Formação Campo Mourão, sobrepostos discordantemente a folhelhos marrom-chocolate, ritmitos e diamictitos, correlatos à Formação Lagoa Azul. Os depósitos estudados compreendem rochas

Figura 7

Fotomicrografia de grãos fraturados antes do sobrecrescimento de quartzo, indicando possível evento tectônico pré diagenese.

Figure 7

Photomicrograph of fractured grains, deformed before the development of quartz overgrowths, indicating a possible tectonic event that preceded diagenesis.



sedimentares arenosas, localmente conglomeráticas e argilosas, geradas em um sistema periglacial, como resultado do degelo episódico formando um grande sistema de canais-lobos. França *et al.* (1996) descrevem os Arenitos Lapa, que ocorrem da cidade de Lapa, mais ao sul da área estudada, como um corpo de morfologia linear, alongado na direção norte-sul e encaixado em diamictitos, ritmitos e folhelhos. Segundo aqueles autores, os Arenitos Vila-Velha, aflorantes no Parque Estadual de Vila Velha, são representados por arenitos sobrepostos a ritmitos e diamictitos das formações Campo Mourão e Lagoa Azul, ou discordantemente sobre as formações Furnas e Ponta Grossa, na forma de platôs subhorizontais. A interpretação de França *et al.* (1996) considera ambos os componentes de uma mesma seqüência deposicional, com os Arenitos Lapa representando os canais e os Arenitos Vila Velha como lobos subaquosos, depositados num ambiente glacialmente induzido como descrito em França *et al.* (1996) e em Rostirolla *et al.* (2001).

A sucessão e arquitetura de fácies expostas na Fazenda Rivadávia (fig. 8) refletem deposição em ciclo transgressivo-regressivo de mais alta resolução, cujas camadas apresentam variação lateral das espessuras e texturas, representando lobos sigmoidais amalgamados. Da base para o topo, a seção inicia com arenitos grosseiros, maciços, mal selecionados e imaturos, passando de arenitos com estratificação cruzada acanalada, de escala decimétrica, para arenitos com média seleção, menos feldspáticos e com estratificações de grande porte; recobrimo estes arenitos basais ocorre uma associação arenosa, com média seleção, granocrescência ascendente, passando de laminações inclinadas tangenciais para plano-paralela e de baixo ângulo com um aumento na cimentação, que estão sobrepostos por arenitos quartzosos grossos, com laminação plano-paralela bem marcada; finalmente, no topo da seção os arenitos são muito grossos e gradam lateralmente para arenitos médios, maciços e com boa seleção, contendo níveis silicificados. A sucessão de fácies descrita representa uma parasseqüência, interna ao trato de sistemas transgressivos de França *et al.* (1996), com deposição de barras de desembocadura de ca-

nais de *outwash* na base, marinho raso na porção intermediária e fácies litorânea na porção superior, evidenciando um ciclo de arrasamento para o topo associado a processos periglaciais.

As características dos reservatórios arenosos do Grupo Itararé em subsuperfície foram analisadas por França e Potter (1991). Os melhores reservatórios situam-se no Membro Rio Segredo da Formação Taciba (8% de porosidade e 1% de matriz) e em camadas arenosas intercaladas a lamitos do Membro Tarabai da Formação Lagoa Azul (6% de porosidade e 2% de matriz). Em segunda ordem de importância estão os arenitos da Formação Campo Mourão, com 8% de porosidade e 11% de matriz. Os arenitos do Membro Cuiabá Paulista da Formação Lagoa Azul consistem em piores reservatórios, pois apresentam alto teor de matriz (45%). Valores anômalos de até 20% de porosidade e 240 mD provavelmente refletem a influência da superposição de anisotropias deposicional/diagenética e estrutural, conforme vem sendo constatado em trabalhos de campo e análises laboratoriais no âmbito dos estudos desenvolvidos na UFPR (descrição detalhada em Trzaskos-Lipksi *et al.* 2003; Vesely *et al.* 2003; Bocardi *et al.* 2003).

anisotropia estratigráfica

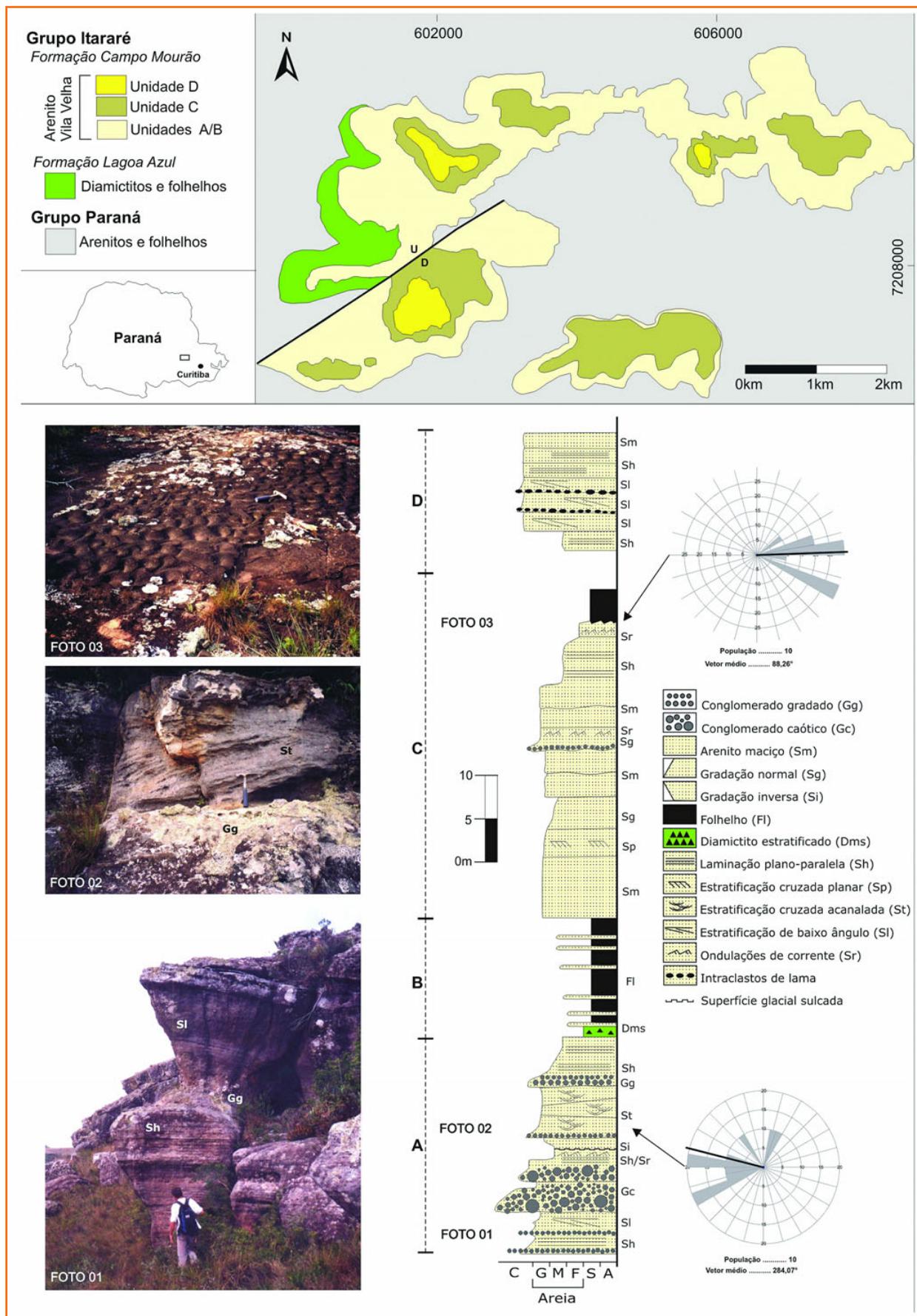
Segundo Vesely e Assine (2004), a Formação Campo Mourão é uma unidade litoestratigráfica essencialmente arenosa, e sua ocorrência em afloramentos se dá comumente na forma de escarpas pronunciadas e relativamente contínuas, de fácil reconhecimento. Em linhas gerais, a unidade é constituída de diversas fácies de arenitos, conglomerados e, em menor proporção, diamictitos, siltitos, folhelhos e ritmitos. Como as fácies basais da unidade foram depositadas sobre uma superfície discordante de perfil irregular, são comuns variações laterais de espessura devido ao eventual confinamento em paleovales ou paleocanais (França *et al.* 1996 e D'Ávila, 1999). Na parte média da Formação Campo Mourão prevalecem os arenitos, porém em íntima associação com diamictitos, folhelhos e ritmitos. De acordo com as seções levantadas, existe uma recorrência vertical de fácies de caráter cíclico, disposta em sucessões de base erosiva e com granodecrescên-

Figura 8

Arcabouço estratigráfico do arenito Vila Velha obtido a partir de perfis verticais levantados em campo (Vesely et al. 2003). Perfil de Rivadávia modificado de França et al. (1996).

Figure 8

Stratigraphic framework of the Vila Velha sandstone, obtained from vertical field sections (Vesely et al. 2003). Rivadávia section modified from França et al. (1996).



cia ascendente, fato verificado anteriormente por D'Ávila (1999) e Canuto *et al.* (2001) nas seções Lapa – São Mateus do Sul e Campo do Tenente – Mafra, respectivamente. As fácies predominantes são depósitos de *outwash* subaquosos proximais a geleiras e arenitos turbidíticos rasos e flúvio-deltaicos, comumente arranjados em conjuntos de paraseqüências. No topo da Formação Campo Mourão destaca-se um significativo intervalo argiloso marinho (folhelhos e diamictitos), cuja posição estratigráfica é equivalente à do Membro Lontras, descrito na faixa aflorante em Santa Catarina e em perfis de poços.

Os principais horizontes estratigráficos presentes na área de Vila Velha e alguns aspectos da arquitetura interna do arenito puderam ser interpretados a partir de uma seção sísmica de alta resolução na direção SE-NW (detalhe na figura 9). Os horizontes indicados pelos refletores de maior continuidade equivalem ao topo das formações Furnas, Ponta Grossa e Lagoa Azul, além de uma superfície interna na Formação Campo Mourão. Esses horizontes também puderam ser visualizados nas variações das curvas dos perfis sônico (tempo de trânsito) e raios gama (radioatividade natural) em poços profundos na bacia.

Predominam as geometrias lenticulares e sigmoides, com clinofomas e *foresets* mergulhando preferencialmente para noroeste. Feições de perfil côncavo para cima, associadas a truncamentos laterais, sugerem a presença de corpos canalizados com no máximo 100 m de largura, principalmente na parte inferior da unidade. Geometrias montiformes (*mounds*), tipicamente com base plana e topo convexo, indicam o amalgamento de lobos arenosos.

imageamento geofísico

O imageamento consistiu na geração de modelos geométricos dos corpos análogos aos sistemas reservatórios em subsuperfície, a partir de sísmica de reflexão de alta resolução e levantamentos geoeletricos. A escala de trabalho permitiu obter informações em resolução métrica a decimétrica. Com base em linhas pouco espaçadas entre si e com alta resolução vertical e horizontal, foram visualizadas as rupturas nas continuidades de refletores (fraturas ou anisotropias estruturais) e padrões geométricos típicos de sismofácies ou conjuntos de sismofácies (anisotropia estratigráfica).

A partir da concepção geológica obtida nos trabalhos de campo e imagens, foi planejado um primeiro levantamento geofísico ao longo de quatro linhas distanciadas 40 m, posteriormente com a malha sendo adensada para dez linhas paralelas e distanciadas com 10 m entre si, com aproximadamente 230 m de comprimento, e linhas diagonais com aproximadamente 670 m de comprimento (fig. 10). Para o posicionamento da malha também foi considerada a direção preferencial do sistema de fraturas observado em fotografias aéreas e em trabalhos de campo.

O desenvolvimento do modelo geométrico consiste na fase final do projeto, onde estão descritas as principais feições hidrológicas e do meio físico (reservatório). A premissa compreendeu a estimativa dos parâmetros para modelagem, que são identificados através do estudo de análogos, poços, seções sísmicas e geológicas. A informação é extrapolada para três dimensões, o que consiste na transformação do modelo qualitativo. O pro-

Figura 9

Geometria e arquitetura de fácies de lobos arenosos da Formação Campo Mourão, Arenitos Vila Velha.

Figure 9

Geometry and facies architecture of the sandy lobes of Campo Mourão Formation, Vila Velha sandstone.



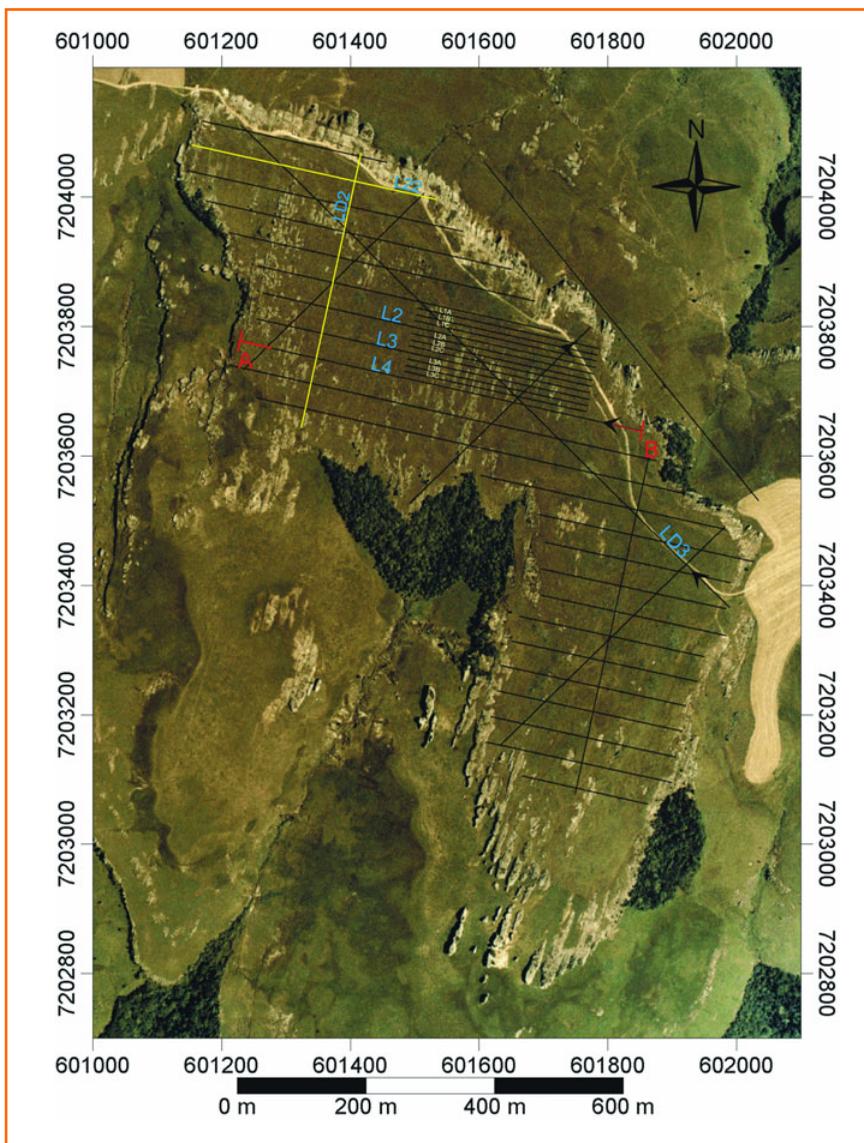


Figura 10
Planejamento para aquisição geofísica da área de Rivadavia (Projeto MODRES).

Figure 10
Planning for the geophysical surveying in the Rivadavia area, (MODRES Project).

cesso envolveu posicionar geograficamente a informação coletada em campo e seus atributos e depois estimar valores em locais não amostrados através de interpolação.

métodos geoeletricos

Levantamentos elétricos foram efetuados com o equipamento Syscal R1 Plus da *Iris Instruments*, para determinar as respostas elétricas dos arenitos fraturados de Rivadavia. Campos *et al.* (2003) desenvolveu trabalhos de campo na área, que resultaram em cerca de 5 000 m de linhas utilizando o método geoeletrico. O processamento dos dados possibilitou a montagem de modelos 2D e 3D de resistividade, onde foram mapeadas

as distribuições da resistividade elétrica aparente, de forma a detectar zonas fraturadas através da água de percolação que as tornam mais condutoras ou por porções mais resistentes associadas a condições de extrema silicificação dos arenitos.

A metodologia para eletrorresistividade utilizada em Campos *et al.* (2003) empregou uma fonte artificial de corrente introduzida no solo, cujo potencial de corrente pode ser medido através de eletrodos de medição. Conhecendo-se a corrente e os potenciais gerados, foi possível calcular as resistividades correspondentes. Para o método de eletrorresistividade, o arranjo dipolo-dipolo foi escolhido, pelo fato que este é o arranjo que responde melhor a variações laterais de resistividade.

Para ilustrar os resultados, na figura 11 apresenta-se o modelo de resistividade de uma linha obtida. Nesta figura observa-se uma camada bem resistente, limitada no topo e na base por zonas mais condutoras. A zona condutora no topo pode ser relacionada à percolação superficial de água, numa camada mais aerada e mais porosa. A zona condutora inferior pode ser relacionada ao nível freático ou à presença de material mais pelítico. Dados de testemunhos de sondagem descritos em Kraft *et al.* (2003) indicam a presença de diamictitos na profundidade de 46 m, fator este que comprova a associação entre a resposta elétrica e feições geológicas. Outro aspecto a ressaltar é a indicação de geometria lenticular da camada de arenitos.

Uma primeira aproximação obtida por Campos *et al.* (2003) resultou no bloco-diagrama com a distribuição da resistividade apresentado na figura 12, onde é possível observar que a área de estudo apresenta elevados valores de resistividade distribuídos em toda a área e que podem ser associados aos arenitos bastante silicificados. Na figura 12 apresenta-se um modelo 3D temático com a provável correlação entre os dados de resistividade e as informações litológicas. Em vermelho, a faixa de valores de resistividade associada aos arenitos descritos, em verde folhelhos e, em azul, diamictitos. O arcabouço estrutural influencia os valores de resistividade observados, devido ao grau de silicificação destas estruturas, repercutindo em zonas mais resistentes nos modelos observados. Da mesma forma identificam-se fraturas a partir de deslocamentos ou discontinuidades de zonas resistivas.

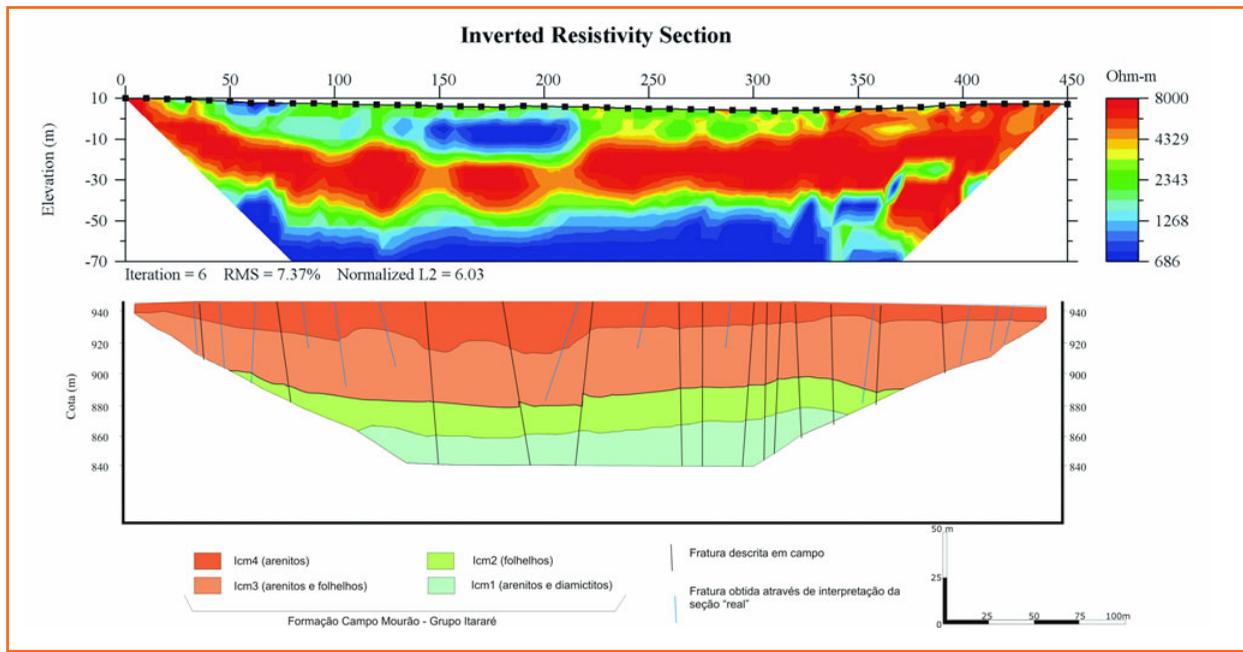


Figura 11

Correlação entre a resposta geoeétrica do modelo de resistividade e informações geológicas e estruturais da área estudada (Campos et al. 2003).

Figure 11

Correlation between the geo-electrical response to the resistivity model and the geological information from the area (Campos et al. 2003).

métodos sísmicos

A aquisição e processamento de dados sísmicos de alta resolução estão detalhados em Lonardelli et al. (2003). O sistema de aquisição utilizado no levantamento sísmico compõe-se de três unidades Geode (72 canais) de fabricação Geometrics. No primeiro teste, utilizou-se a fonte tipo rifle (Betsy) para arranjos de extensão de até 200 m, objetivando investigar profundidade desta ordem. O sismógrafo apresenta alcance dinâmico de 144 dB,

bandwidth que vai de 1.75 Hz a 20 kHz e conversão A/D de 24 bits. Sobre as linhas adquiridas foram realizados testes de refração, ruído (*pseudo-walkaway*), além dos ensaios normais de reflexão.

O tratamento dos dados de refração seguiu o procedimento usual e foi feito através do pacote Seismager/2D (OYO Corporation), utilizando tanto o método recíproco como o de tomografia, com a obtenção de resultados muito similares em ambos. Com os dados adquiridos através do *Pseudo-Walkaway Noise Test* e do *Walkaway*

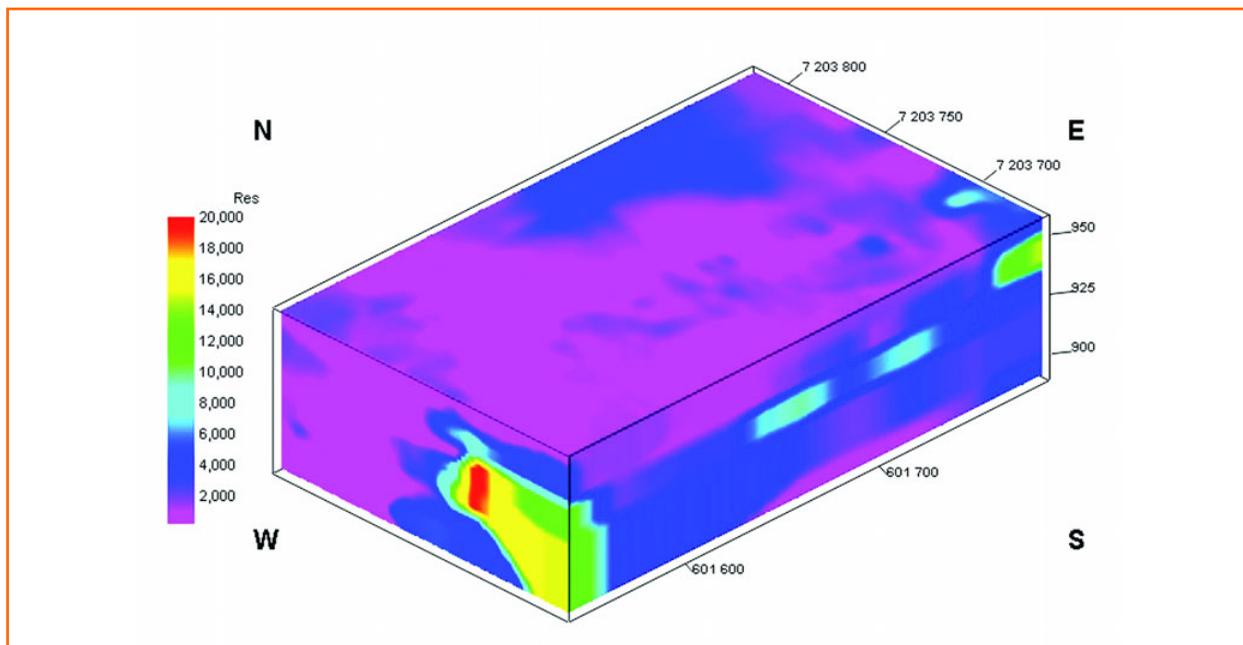


Figura 12

Bloco-diagrama de resistividade na área de Rivadavia (Campos et al. 2003).

Figure 12

Block diagram showing resistivity in the Rivadavia area (Campos et al. 2003).

Noise Test, foi possível determinar os parâmetros de aquisição tais como: tempo de registro (RL) de 250 a 300 ms, intervalo de amostragem (SI) de 0.125 ms, arranjo das estações de geofones com intervalo de 4 m, de modo a obter a melhor razão sinal/ruído no registro. Este espaçamento coincide com a resolução horizontal que se quer em subsuperfície, em torno de 2 m, que é metade do espaçamento entre geofones. No caso da Rivadávia, a gama de freqüências preservada vai de 50 Hz a 500 Hz, sendo estas as freqüências de corte. Em seguida, aplicou-se a equalização de amplitude dos traços.

Bartozseck *et al.* (2003) discute a geração de seções sísmicas obtidas na Fazenda Rivadávia, utilizando a técnica de empilhamento por pontos de profundidade comum (*cdp stack*), onde foram realizados alguns procedimentos para realçar os refletores de interesse. Este processamento pós-empilhamento (*post-stack processing*) consistiu em eliminar os eventos de alto ângulo através do recurso *dip-filter*, filtrando velocidades entre 800 a 4 000 m/s. Seguido por procedimento de deconvolução e filtragem de freqüências visando eliminar os eventos repetidos e as baixas e altas freqüências remanescentes ou geradas pelo processamento. Na figura 13 está representada uma visualização em três dimensões das seções sísmicas processadas.

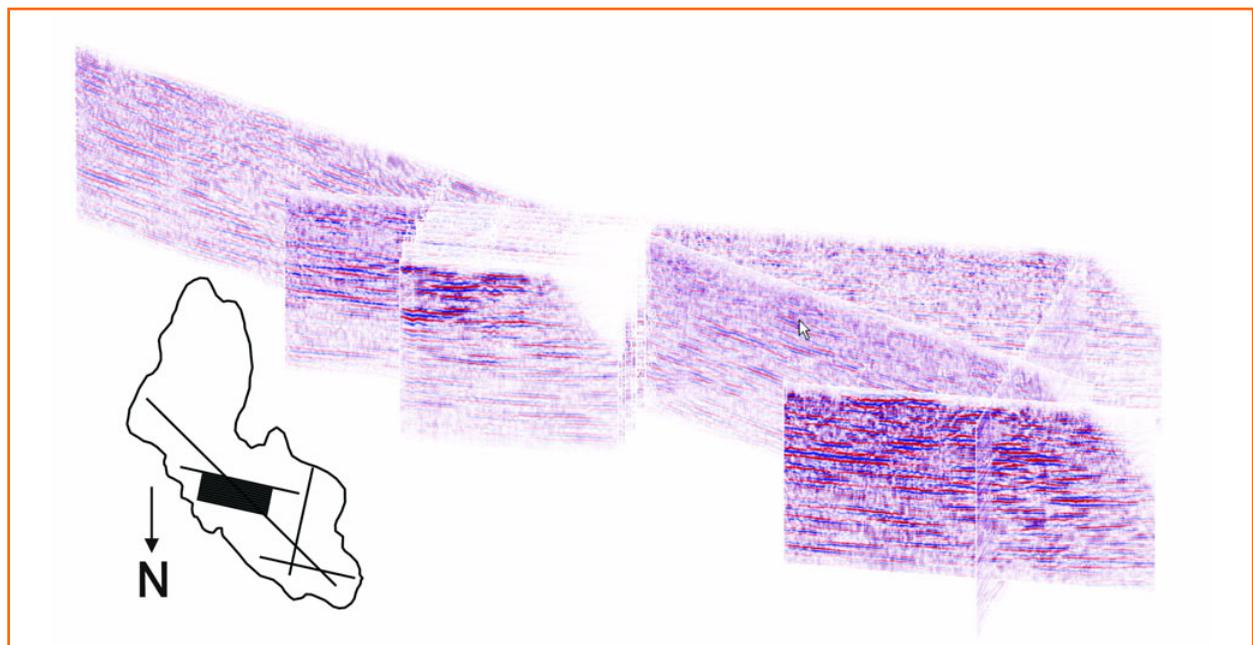
Em Bartozseck *et al.* (2003), as seções de maior comprimento foram utilizadas para o melhor entendimento estratigráfico das feições devido à maior extensão e por apresentar continuidade nas feições sísmicas. As linhas de menor comprimento foram adquiridas em uma posição no campo onde existem muitas fraturas e boa exposição rochosa. Estas linhas curtas estão dispostas de forma paralela e equidistante. As seções sísmicas 2D foram transformadas em arquivos-texto para a transformação em volume ou cubo sísmico, com a distribuição das informações de amplitudes. O cubo sísmico (pseudo-3D, obtido através de interpolação; fig. 14) foi construído visando observar a continuidade dos refletores em direções diferentes das seções 2D adquiridas. Foi observada forte tendência ao longo do eixo de levantamento das seções sísmicas. Pode-se observar, na figura 15, uma fatia das amplitudes referente a 10 ms, que ainda é possível visualizar a influência da distribuição dos pontos de entrada nas seções sísmicas, que apresentam direção em torno de N70-80W. Foram geradas fatias a cada milissegundo, com a mesma escala de cor, de acordo com os limites de cada fatia. Pode-se visualizar, nestes painéis de profundidade, a ocorrência de fatias com valores de amplitude predominantemente positivas e negativas, que representam intervalos em tempo relativos às dife-

Figura 13

Visualização geral de algumas seções sísmicas na área de Rivadávia (Bartozseck *et al.* 2003).

Figure 13

General view of some seismic sections in the Rivadávia area (Bartozseck *et al.* 2003).



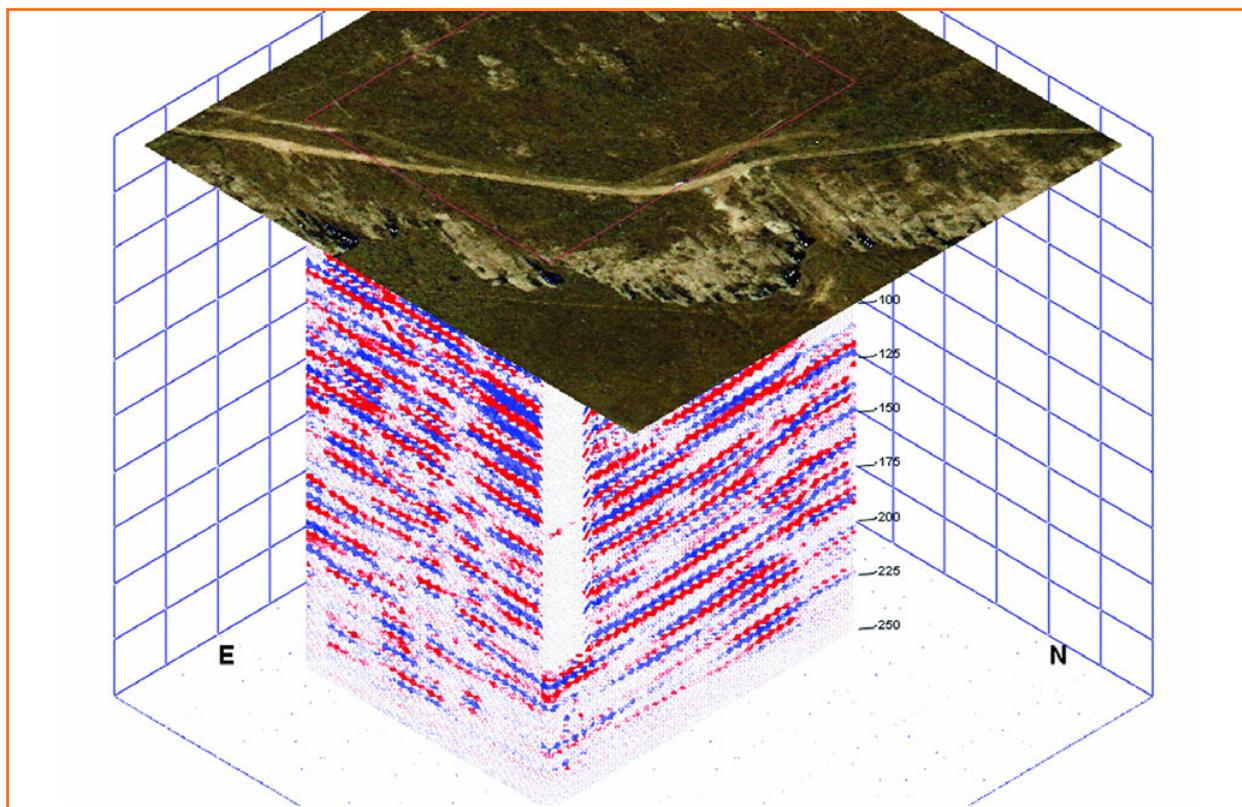


Figura 14

Cubo sísmico e foto aérea da área de Rivadavia. As feições estruturais observadas no campo e seus traçados na foto aérea podem ser mesclados com dados sísmicos (Bartoszeck et al. 2003).

Figure 14

Seismic cube and aerial photograph of the Rivadavia area. The structural features observed in outcrops and its interpretation from photographs can be integrated with seismic data (Bartoszeck et al. 2003).

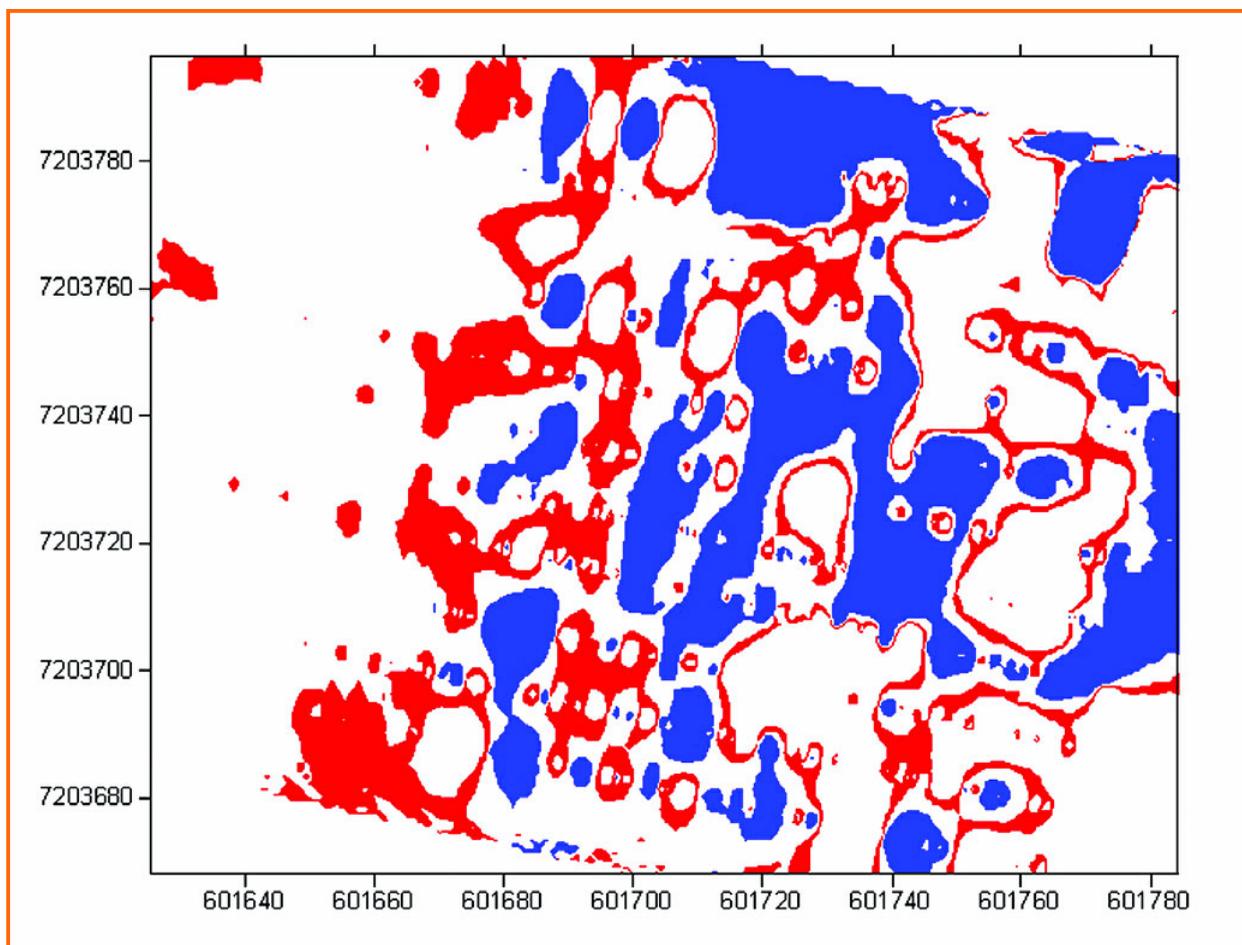


Figura 15

Fatia sísmica (10 m) mostrando as anisotropias estruturais ao longo da direção N10E e a tendência induzida pelo levantamento ao longo de linhas N70W (Bartoszeck et al. 2003).

Figure 15

Seismic section (10 m) showing the structural anisotropies along the N10E strike and the trend induced by the addition of N70W lines (Bartoszeck et al. 2003).

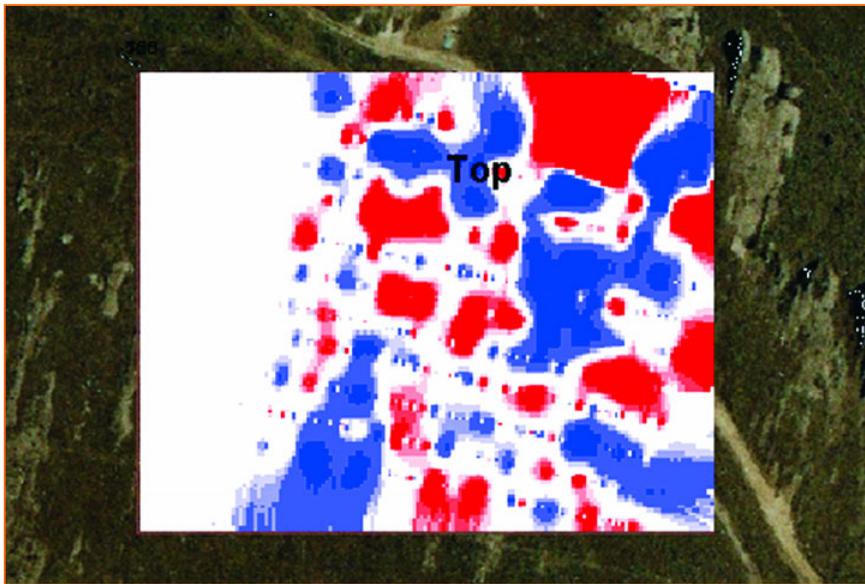


Figura 16 – Fatia de 46 ms sobreposta à foto aérea. Notar a distribuição das amplitudes condicionada à principal direção dos lineamentos estruturais observados na foto aérea (Bartoszeck et al. 2003).

Figure 16 – Section of 46 ms superimposed on the aerial photograph. Note the amplitude conditioned by the strike of the main lineaments observed in the aerial photograph (Bartoszeck et al. 2003).

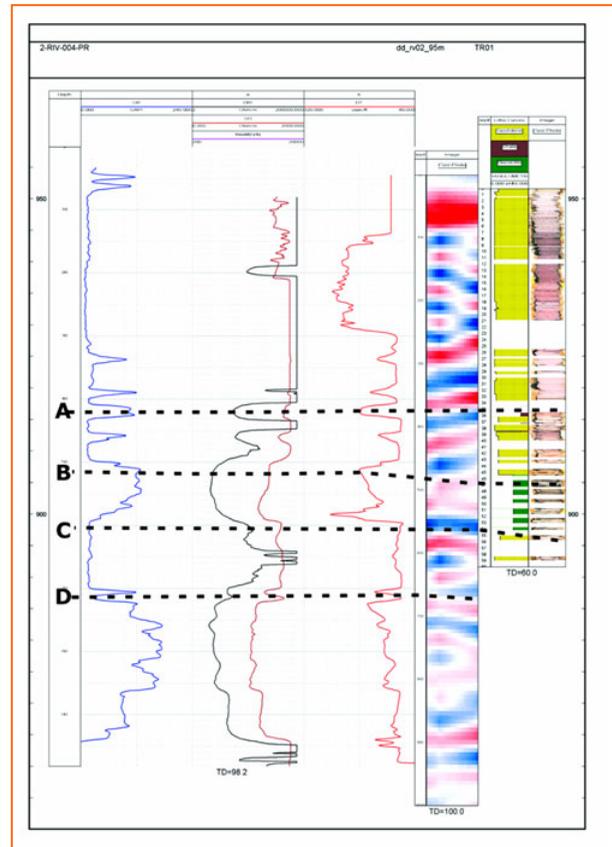


Figura 17 – Correlação entre dados sísmicos, perfis granulométrico e litológico, e perfilagem geofísica (Kraft et al. 2003).

Figure 17 – Correlation between seismic data, granulometric and lithological sections, and geophysical logs (Kraft et al. 2003).

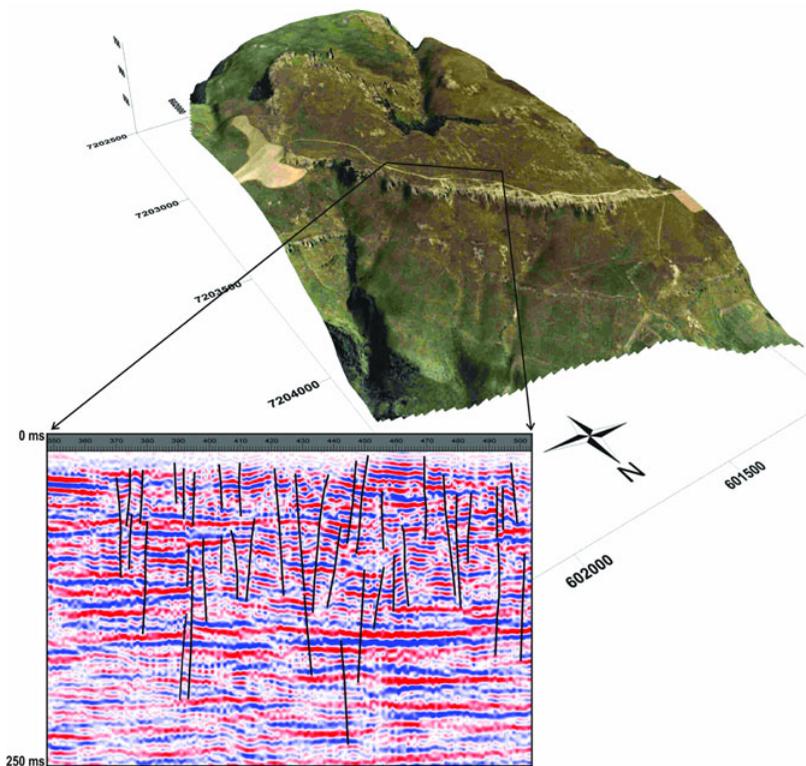


Figura 18 – Modelo digital de elevação (visão de NE para SW), com ênfase para a linha sísmica onde podem ser visualizadas e mapeadas as feições estruturais observadas no modelo digital de elevação.

Figure 18 – Digital elevation model (view from NE to SW), highlighting the seismic section where this can be seen and mapped from the structural elements observed in the digital elevation model.

rentes camadas na área. Observa-se, também, que algumas anomalias são persistentes em praticamente todas as profundidades, resultado provavelmente de feições geológicas específicas. As feições estruturais observadas no campo e seus traçados na foto aérea podem ser mesclados com o cubo sísmico (fig. 16). Este artifício facilita a interpretação das fatias em tempo e o entendimento das seções sísmicas.

Poços sintéticos construídos a partir de seções colunares em afloramentos (Kraft et al. 2003) foram utilizados para a correlação com dados sísmicos e perfis elétricos (fig. 17). A correlação entre os dados de sondagens rasas e campo reflete variações na impedância acústica, coincidentes com a variação granulométrica e cimentação. Observa-se uma inversão dos valores de velocidade de propagação, devido ao grau de al-

teração observado na seção imageada, no máximo até 200 m de profundidade. Folhelhos desenvolvem velocidades menores do que arenitos, que apresentam cimentação pronunciada e são poupados da alteração intempélica.

De forma geral, as seções sísmicas de alta resolução apresentam boa qualidade de imageamento até 250 ms, onde se pode observar a geometria externa dos corpos e as discontinuidades de refletores, indicativas dos falhamentos observados em campo (fig. 18). A integração dos dados de campo, modelo digital de elevação e seções sísmicas se mostrou uma ferramenta adequada para o entendimento das anisotropias dos análogos de reservatório. Na seção em destaque na figura 18 nota-se um refletor mais contínuo em torno de 140 a 150 ms, correspondente ao topo da Formação Ponta Grossa. Acima deste refletor, as geometrias representam corpos menos contínuos lateralmente, lenticulares e com cliniformas, indicando transporte sedimentar para WNW, relativos às formações Lagoa Azul e Campo Mourão do Grupo Itararé. Neste, as discontinuidades tectônicas são mais evidentes na seção sísmica, observando-se claramente a continuidade das feições morfoestruturais observadas no modelo digital de elevação.

implicações para o estudo da integridade do selo

O modelo discutido apresenta aplicação imediata no estudo de seções-reservatório. No entanto, as questões levantadas são pertinentes e aplicáveis ao estudo de sistemas petrolíferos. Três aspectos relevantes podem ser destacados: (i) quanto ao condicionamento do fluxo de fluidos nas zonas internas aos reservatórios; (ii) quanto às características de impedância de seções selantes (*sensu* Demaison e Huizinga, 1994; fig. 19) e (iii) quanto à integridade da seção sedimentar estudada, incluindo reservatório, selo e potencial de retenção/trapa. O presente estudo, portanto, não se restringe apenas à identificação de anisotropia em escala de reservatório, mas avança na determinação da integridade da seção selante, posicionamento das zonas de convergência (ou divergência) de fluxo em bacias e como predizer a migração e retenção de hidrocarbonetos.

A seção carbonífera-permiana da Bacia do Paraná é composta por unidades essencialmente argilosas (subordinadamente arenitos e conglomerados), que representam rochas selantes em vários níveis estratigráficos. A ocorrência de fra-

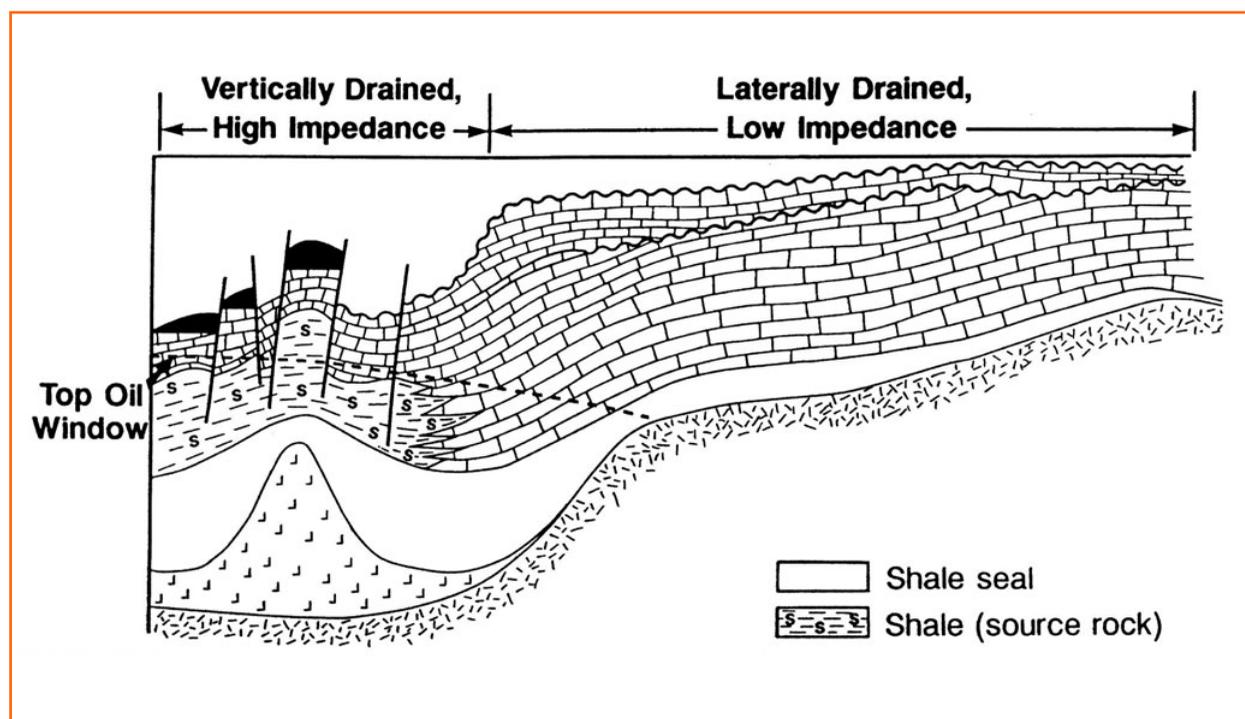


Figura 19

Seção esquemática com indicação de zonas com alta e baixa impedância em sistemas petrolíferos, devido à presença ou ausência de selo, respectivamente (Demaison e Huizinga, 1994). O modelo pode ser adaptado para zonas com diferentes graus e magnitudes de fraturamento.

Figure 19

Schematic section showing the high and low impedance zones in petroleum systems in function of the presence or absence of seal rocks, respectively (Demaison and Huizinga, 1994). The model can be adapted to high and low fracture zones.

Figura 20

Folhelhos e ritmitos turbidíticos da Formação Rio do Sul, com fraturas descontínuas em níveis arenosos (A) e fraturas Riedel escalonadas indicando cinemática anti-horária (B).

Figure 20

Shale and turbiditic rhythmite beds of the Rio do Sul Formation, with discontinuous fractures in sandy zones (A) and en echelon Riedel fractures indicative of a counterclockwise kinematic (B).

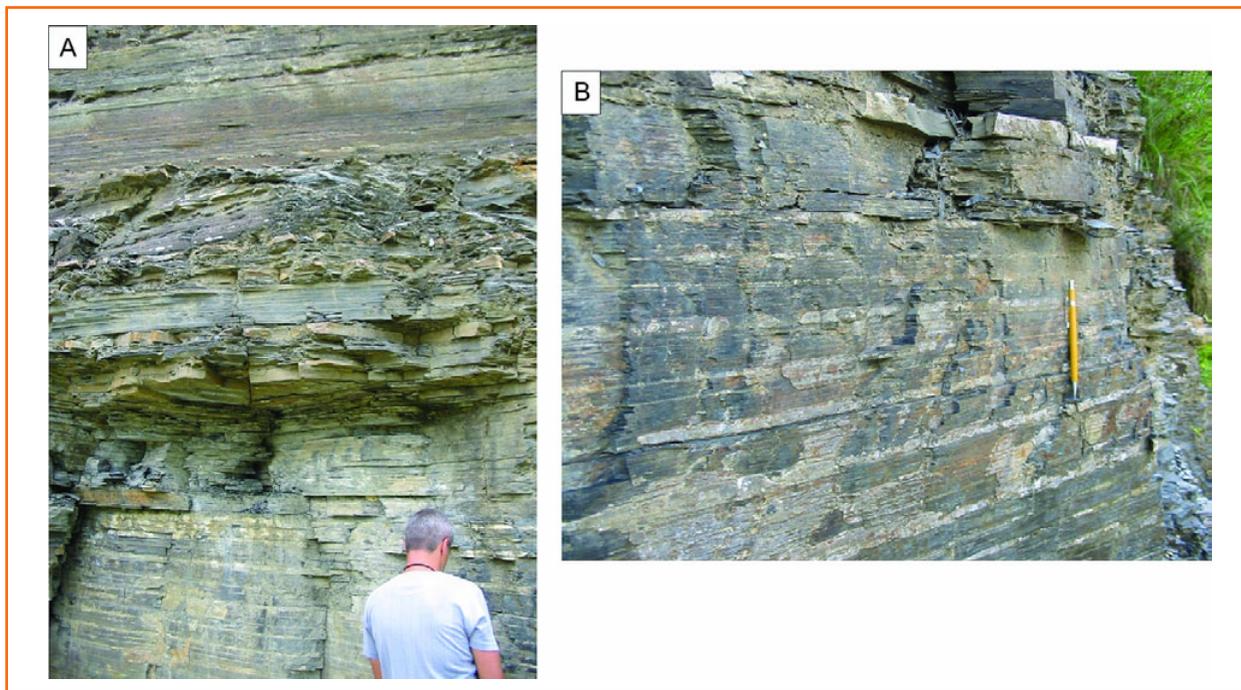


Figura 21

Zona de falha anastomosada, com destaque para a continuidade das fraturas, afetando a integridade do selo.

Figure 21

Anastomosed fault zone, showing the vertical continuity of fractures that modify the seal integrity.

turas constitui aspecto paradoxal na exploração desta seção, uma vez que as mesmas melhoram a performance dos reservatórios, mas diminuem a efetividade das rochas selantes. Em bacias em que a deformação é controlada por falhas sub-verticais, como é o caso da Bacia do Paraná, os mesmos sistemas de falhas afetam os níveis reservatório e selo, e este efeito paradoxal é ampliado. Assim, considera-se que em zonas de falha regionais para onde há convergência de gás a retenção é mais efetiva somente onde as con-

dições de integridade do selo sejam restritivas ao escape. Isto direciona o modelo para a determinação de alvos exploratórios para alguma distância das falhas de maior magnitude, onde haveria maior probabilidade de preservação da integridade do selo.

Na área da Fazenda Rivadávia já foram erodidas as rochas selantes capeadoras dos arenitos-reservatório. Contudo, em subsuperfície, unidades correlatas, essencialmente argilosas, ocorrem como níveis capeadores, englobando tanto a porção superior da Formação Campo Mourão como as formações Taciba (ou Rio do Sul, em alguns setores da bacia), Palermo, Irati e Serra Alta, sobrepostas. De todo modo, seções pelíticas em posição estratigráfica acima dos intervalos arenosos estão também sujeitas ao fraturamento observado na seção reservatório.

Em folhelhos escuros aflorantes, normalmente as fraturas apresentam padrão descontínuo na vertical, em *relay*, e muitas vezes não cortam os níveis arenosos. Isto evidencia a refração gerada pelo contraste litológico das sucessões de fácies. Na figura 20, são retratadas fácies com caráter selante razoável, com possibilidade de níveis onde haverá uma concentração menor de fraturas. Em sítios distantes de grandes zonas de

falha e com seções espessas de unidades selantes, observou-se que as fraturas tendem a apresentar pouca continuidade lateral e vertical. Quando a unidade selante apresenta grande homogeneidade litológica, as fraturas tendem a mostrar maior continuidade vertical. Por outro lado, níveis selantes com intercalações arenosas tendem a apresentar fraturas descontínuas, em função do contraste reológico entre fácies.

Regiões marcadas pelo cruzamento de grandes zonas de falha assinalam a perda da efetividade dos níveis selantes por favorecerem o escape vertical. Na figura 21 mostram-se folhelhos da Formação Rio do Sul aflorando no cruzamento de grandes zonas de falha. A direção N40W, observada na figura, é marcada por padrões anastomosados, com fraturas de grande continuidade vertical, exemplificando como zonas de falha induzem à perda da integridade de unidades selantes.

considerações finais

A integração de dados geológicos (estratigráficos e estruturais) e geofísicos (sísmicos e elétricos) foi utilizada para demonstrar como atributos de reservatórios e selos podem ser usados para caracterizar heterogeneidades e prever o desempenho de sistemas petrolíferos. Os exemplos utilizados compreendem situações particulares na Bacia do Paraná, mas podem ser utilizados em bacias com história tectônica diversa. As implicações do estudo para a geologia de reservatórios são de que sistemas de falhas de segunda ordem, tal como aquelas mapeadas na Fazenda Rivadávia, consistem em estruturas de magnitude local, porém de importância fundamental no controle na circulação de fluidos em reservatórios arenosos. Zonas de falhas regionais provavelmente influenciam a migração em escala de sistema petrolífero, enquanto sistemas de juntas ou pequenas falhas induzem a movimentação seletiva de hidrocarbonetos na escala de reservatório e selo, o que pode influenciar tanto na produção quanto na avaliação de sucesso exploratório em áreas de fronteira.

O ponto principal neste estudo consiste em enfatizar como a análise de falhas de menor magnitude pode influenciar no processo exploratório e nas correlações entre eventos geológicos. O mesmo sistema reservatório pode ser assumido como um sistema de lentes isoladas com anisotropia principalmente horizontal ou um sistema de camadas extremamente seccionadas por falhas subverticais, que causam uma anisotropia também subvertical. A correlação resultante do fraturamento é radicalmente diferente da solução derivada de interpretações estritamente estratigráficas ou faciológicas. A integração de estruturas falhadas complexas pode, em muitos casos, reduzir a conectividade e subestimar o potencial de uma acumulação, o que leva a uma avaliação incompleta do potencial de produção e reservas.

Há um consenso de que o gás gerado a partir dos folhelhos devonianos da Formação Ponta Grossa pode alcançar os reservatórios do Grupo Itararé através de falhas regionais ou de sistemas de juntas (Milani e Catto 1998; Zalán *et al.* 1990). Nesse modelo, a convergência de hidrocarbonetos em direção às zonas de baixa pressão na Bacia fica prejudicada caso não ocorram falhas indutoras do fluxo. Embora seja relativamente comum a detecção de gás em vários poços na Bacia, ainda não foi encontrada uma acumulação comercial em que a pressão seja constante por longo tempo. A influência de fraturas provavelmente apresenta papel preponderante neste processo hidrodinâmico. O entendimento da anisotropia em reservatórios fraturados, através do estudo de afloramentos e subafloramentos, consiste portanto em desenvolvimento tecnológico importante para o sucesso exploratório, já que pode produzir modelos para a migração, retenção e produção de hidrocarbonetos.

referências bibliográficas

- APPI, C. J.; MAGALHÃES, C. **Desenvolvimento de ferramenta GPR para imageamento de reservatórios petrolíferos**. Rio de Janeiro-Petrobras/Cenpes/Brain 2000. 50 f. Relatório Interno.
- AYDIN, A. Small faults formed as deformation bands in Sandstone. **Pageoph**, Basel, v. 116, p. 913-930, 1978.

- BARTOSZECK, M. K.; KRAFT, R. P.; ROSTIROLLA, S. P.; CAMPOS, A. F.; APPI, C. J. Integração de dados geofísicos e geológicos como ferramenta auxiliar na modelagem de reservatórios em superfície. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE GEOFÍSICA, 8., 2003, Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2003.
- BOCARDI, L. B.; FERNANDES, L. A.; VESELY, F. F.; ROSTIROLLA, S. P.; APPI, C. J. Petrographic and diagenetic aspects of the Lapa and Vila Velha sandstones, Itararé Group, Paraná Basin, Brazil. In: LATIN AMERICAN CONGRESS OF SEDIMENTOLOGY, 3., 2003, Belém. **Abstract Book...** Belém: UFPA/MPEG, 2003, p. 197-198.
- CAMPOS, A. F.; RIGOTI, A.; ROSTIROLLA, S. P.; APPI, C. J.; KRAFT, R. P.; BARTOSZECK, M. K. Eletroresistividade como apoio à caracterização de arenitos fraturados. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE GEOFÍSICA, 8., 2003, Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2003.
- CANUTO, J. R.; SANTOS, P. R.; ROCHA-CAMPOS, A. C. Estratigrafia de seqüências do Subgrupo Itararé (Neopaleozóico) no leste da Bacia do Paraná, nas regiões sul do Paraná e norte de Santa Catarina, Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 31, n. 1, p. 107-116, mar. 2001.
- CLADOUHOS, T. T. A kinematic model for deformation within brittle shear zones. **Journal of Structural Geology**, Oxford, v. 21, p. 437-448. 1999
- D'ÁVILA, R. S. F. **Análise de fácies e estratigrafia física do arenito Lapa, Grupo Itararé, Bacia do Paraná, Brasil**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999, Dissertação (Mestrado).
- DEMAISON, G.; HUIZINGA, B. J. Genetic classification of petroleum systems using three factors: charge, migration and entrapment. **AAPG Memoir** 60, p. 73-89, 1994.
- FRANÇA, A. B.; POTTER, P. E. Stratigraphy and reservoir potential of glacial deposits of the Itararé Group (carboniferous-Permian), Paraná Basin, Brazil. **AAPG Bulletin**, Okla, v.75, n.1, p.62-85. 1991.
- _____; WINTER, R. B.; ASSINE, M. L. Arenitos Lapa-Vila Velha: Um modelo de sistemas subaquosos canal-lobos sob influência glacial, Grupo Itararé (C-P), Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.26, n.1, p.43-56. 1996
- KRAFT, R. P.; ROSTIROLLA, S. P.; RIGOTI, A.; APPI, C. J.; BARTOSZECK, M. K.; CAMPOS, A. F.; LONARDELLI, J. N. Correlações geofísicas e geológicas para a compreensão da distribuição de propriedades petrofísicas em reservatórios análogos. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE GEOFÍSICA, 8., 2003, Rio de Janeiro. **[Trabalhos apresentados...]** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2003. Divulgado em meio digital.
- LIN, A. S-C fabrics developed in cataclastic rocks from the Nojima Fault Zone, Japan and their implications for tectonics history. **Journal of Structural Geology**, Oxford, v. 23, p. 1167-178, 2001.
- LONARDELLI, J. N.; RIGOTI, A.; ROSTIROLLA, S. P.; APPI, C. J.; BRUNETTA, R. Ensaio sísmico de reflexão rasa em rochas fraturadas do grupo Itararé. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE GEOFÍSICA, 8., 2003, Rio de Janeiro. **[Trabalhos apresentados...]** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2003. Divulgado em meio digital.
- MAACK, R. **Geologia e geografia da região de Vila Velha, Estado do Paraná e considerações sobre a glaciação carbonífera no Brasil**. Curitiba: Museu Paranaense, 1946. 305 p., il. (Arquivos do Museu Paranaense, 5).
- MILANI, E. J.; CATTO, E. Petroleum geology of the Paraná Basin, Brazil. In: AAPG INTERNATIONAL CONFERENCE & EXHIBITION, 1998, Rio de Janeiro. **Abstracts...** Tulsa, Okla.: American Association of Petroleum Geologists, 1998. 1 CD-ROM.
- _____; RAMOS, V. A. Orogenias paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 28, n. 4, p. 473-484, 1998.
- MODRES 2002/2004: modelagem de potenciais reservatórios fraturados em superfície para auxílio no modelo exploratório em subsuperfície, Projeto CTPetro. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2004. Patrocinado pela FINEP e PETROBRAS.
- ROSTIROLLA, S. P.; ASSINE, M. I.; FERNANDES, L. A.; ARTHUR, P. C. Reativação de paleolineamentos durante a evolução da Bacia do Paraná: o exemplo do Alto Estrutural de Quatiguá. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 31, p. 639-648, 2000.

_____; APPI, C. J.; MANCINI, F.; KRAFT, R. P.; BARTOSZECK, M. K. Fraturas controladoras da migração de fluidos nos Arenitos Vila Velha, Grupo Itararé, Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 31, p. 349-356, 2001.

_____; _____; VESELY, F. F.; TRZASKO-LIPSKI, B.; MANCINI, F.; KRAFT, R. P. Análise preliminar das rotas de migração de gás no Sistema Petrolífero Ponta Grossa – Itararé (!) na Bacia do Paraná. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS – SNET, 9., 2003, Búzios, 2003. **Anais...** Búzios, RJ: [s.n.], 2003. p. 358.

SOARES, P. C.; BARCELLOS, P. E.; CSORDAS, S. M. **Análise, interpretação e integração de lineamentos à partir de imagens (Radar-Landsat) e suas relações com a tectônica da Bacia do Paraná.** São Paulo: [s.n.], 1982. Relatório RT-342/82, Paulipetro. Consórcio CESP/IPT.

TRZASKOS-LIPSKI, B.; ROSTIROLLA, S. P.; VESELY, F. F.; BOCARDI, L.; MANCINI, F.; APPI, C. J. Microtectônica e sua importância no estudo da circulação de fluidos em reservatórios fraturados do Grupo Itararé – Bacia do Paraná. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS – SNET, 9., 2003, Búzios. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, p. 361.

VESELY, F. F.; TRZASKOS-LIPSKI, B.; KRAFT, R. P.; ROSTIROLLA, S. P.; APPI, C. J. Facies architecture of a Permian sandstone reservoir analogue, Paraná Basin, Brazil. In: LATIN AMERICAN CONGRESS OF SEDIMENTOLOGY, 3., 2003, Belém. **Abstract Book...** Paraná, UFPA/MPEG, p. 67-69.

_____.; ASSINE, M. L. Seqüências e tratos de sistemas deposicionais do Grupo Itararé, norte do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 34. No prelo.

ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T. Tectônica e sedimentação da Bacia do Paraná. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 3., 1987, Curitiba. **Atas...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, v. 1, p. 441-473.

_____.; _____; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; APPI, V. T.; NETO, E. V. S.; CERQUEIRA, J. R.; MARQUES, A. The Paraná Basin, Brazil. In: LEIGHTON, M. W.; KOLATA, D. R.; OLTZ, D.

F.; EIDEL, J. J. **Interior cratonic basins.** Tulsa: AAPG Memoir 51, 1990. p. 681-708.

expanded abstract

The main purpose of the study is the characterization of structural and stratigraphic anisotropy and high-resolution imaging of Itararé Formation sandstone beds (Paraná Basin) that correlate with known subsurface gas reservoirs. The work is based on geological and geophysical data obtained from outcrops exposed near the city of Ponta Grossa, State of Paraná, southern Brazil.

The rocks of the sedimentary sequence here exposed belong to the Vila Velha Sandstone (Maack, 1947), an informal unit of the Itararé Group, the general stratigraphy and structural geology of which were described in França et al. (1996) and Rostirolla et al. (2001), respectively. The observed deformation pattern consists of faults and joints systems that induced modifications to the stratigraphically controlled reservoir architecture. Such modifications resulted in a fracture framework that possibly controls the fluid percolation and the distribution of petrophysical properties throughout fractured potential reservoirs. As a secondary goal aimed at future hydrocarbon exploration of the Basin the application of reservoir modeling to the dynamics of the Devonian-Carboniferous petroleum system was examined, including the integrity of seal rocks, migration and retention subsystems.

We assume that heterogeneities in hydrocarbon-bearing sections require the integration of geological and geophysical methods, when the most suitable seismic-well-outcrop combination is to be found. Our model considers that control on fluid migration in analogous reservoirs must be related to both the structural and stratigraphic framework. Together with architectural and stratigraphic elements, small faults and secondary joints are essential to the distribution of fluids. Local migration paths and drainage units in reservoirs of the Paraná Basin could then be inferred. The studies, carried out on outcrops that are analogous to subsurface reservoirs, were developed to demonstrate how high-resolution imaging might be used as an auxiliary method in petroleum exploration. The application of reservoir imaging techniques gave results on the geometric representation of anisotropy. Our research also involved detailed descriptive and kinematic structural analysis, stratigraphic analysis, seismic data collection and shallow geo-electrical surveying for the correlation of outcrops with subsurface data.

The main structural elements consist of fracture systems and a concentration of centimetric to deci-

metric shear zones along narrow deformation bands. These shear zones are characterized by the presence of oxide and silica zoning, which denotes distinct precipitation events related to percolation of connate and meteoric fluids.

Descriptive thin section analysis revealed a straight to anastomosed geometry, with grain comminution. Analysis of lineaments interpreted from Landsat TM7 images and digital elevation models revealed prominent N10°-30°E to N40°-50°W trends, in addition to secondary E-W lineaments.

In stratigraphic terms, the sedimentary section is positioned at the base of Campo Mourão Formation (Permo-carboniferous) that was deposited during a periglacial period by outwash, deltaic and turbidite processes. In the area of the Vila Velha National Park, the sandstone and conglomerate beds of Campo Mourão Formation rest unconformably over chocolate-brown shale, rythmite and diamictite beds of the Lagoa Azul Formation. However, these may directly overlie the Devonian section (Ponta Grossa or Furnas formations), locally. In general, these deposits consist of massive sandstone beds or units of laminated sandstone, locally with conglomeratic or muddy zones, interpreted to have formed in a sub-aqueous channel-lobe system. The architectural section observed in small escarpments in the Rivadavia area reflects a vertical transgressive-regressive episode, with deposition of bodies with tabular to lenticular geometry.

The sedimentary sequence is essentially a sandstone unit of the Campo Mourão Formation, deposited over paleochannel-related unconformities. The stratigraphic zones in Vila Velha region and aspects of the internal architecture of the sandstones were interpreted from high-resolution seismic sections, the reflectors being marked by the limits of the Furnas, Ponta Grossa and Lagoa Azul formations, as well as by the internal surfaces of the Campo Mourão Formation. These zones could also be seen in shallow electrical profiles the identification and position of which was confirmed from logs of deep wells. In terms of seismofacies, the Campo Mourão Formation differs from the other units of the Itararé Group in its greater structural complexity and reflector segmentation. Lenticular and sigmoidal geometries prevail, with clinoforms and foresets that mainly dip NW. Mounds, typically flat at the base and convex at the top suggest the amalgamation of sandstone lobes.

Resistivity field data was used to determine the geo-electrical responses to stratigraphical and struc-

tural features. A fairly resistant layer is clearly delimited at the top and at the base of conductive zones. The basal conductive zone can be related to the local water table level or to the presence of more pelitic material. Drilling logs show the presence of a diamictite zone confirming the correlation of geo-electrical response with geological features. The lenticular geometry of the sandstone layers was also noted, with fractures inducing small displacements or discontinuities in resistive zones.

Reflection seismic data were also acquired and processed, with good results up to 250 ms. Seismic cubes were constructed and stratigraphic and structural elements were modeled. When combined with outcrop data and aerial photographs, the seismic cubes were found to reflect variations in acoustic impedance that matched the structural and facies variations.

The integration of geological and geophysical data demonstrates how reservoir features can be used to delineate heterogeneities and predict the controls on petroleum system dynamics. The examples given herein are specific to the hydrologically mature conditions of the Paraná Basin. However, they can also be applied to basins having different tectonic histories. The implication of this study in reservoir geology is that despite being local structures, second order faults and joints mapped in the Vila Velha Sandstone must exert a fundamental control over the movement of fluids in reservoirs and seals throughout the entire basin.

autor author



Ciro Jorge Appi

Centro de Pesquisas da Petrobras (Cenpes)

P & D de Exploração

e-mail: appi@cenpes.petrobras.com.br

Ciro Jorge Appi nasceu em 31 de janeiro de 1953 em Joaçaba, Santa Catarina, graduou-se em Geologia em 1976 pela Universidade Federal do Paraná, Mestre em Ciências pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, em 1990, e Doutor pela Università Degli Studi di Parma, Itália, em 1995. MBA pela Fundação Getúlio Vargas em 1999. Ingressou na Petrobras em 1977, no então Distrito de Exploração e Produção da Bacia Potiguar - Diguar, em Natal - RN, como Geólogo de Poço. Em 1979, foi transferido para o Laboratório Central de Exploração - Lacex, em Botafogo - RJ, e em 1983 para a Divisão de Geologia e Engenharia de Reservatórios - Diger, no Centro de Pesquisas da Petrobras - Cenpes. Em 1989, foi chefe do Setor de Estratigrafia da Divisão de Exploração - Divex; em 1995, foi chefe do Setor de Geofísica - Segef e, posteriormente, do Setor de Geofísica e Estratigrafia - Segest. Em 1997, passou a gerenciar o Programa Tecnológico em Fronteiras Exploratórias - Profex.