

Geoprocessamento multitemático e análise estrutural no Sistema Petrolífero Irati - Rio Bonito, Bacia do Paraná

Multithematic geoprocessing and structural analysis on Irati - Rio Bonito Petroleum System, Paraná Basin, Brazil

Rafael Correia de Freitas | Sidnei Pires Rostirolla | Francisco José Fonseca Ferreira

resumo

Características geológicas associadas a aspectos como rotas de migração, zonas de convergência e barreiras para fluxos, integridade da seção selante, entre outras, podem ser avaliadas com o detalhamento de informações estruturais obtidas por sensores remotos e dados levantados em campo. Neste estudo foram observadas estruturas com o uso de imagens de satélite, modelos digitais de elevação e imagens de sensores geofísicos potenciais, as quais, posteriormente, foram avaliadas através de técnicas específicas de geoprocessamento. Diversos métodos, pertinentes às análises de feições estruturais lineares, foram revisados e implementados por meio de programação computacional. Aspectos relacionados ao detalhamento de estilos estruturais, cinemáticos e dinâmicos foram observados com levantamentos de dados de campo. Para a determinação de paleotensões, também foi desenvolvido um aplicativo baseado no critério de Mohr-Coulomb. Este se mostrou bastante eficiente, principalmente devido à característica de permitir uma análise das estruturas individualmente. Tal particularidade

é especialmente importante em regiões submetidas a episódios tectônicos recorrentes, caso da Bacia do Paraná. Relações entre feições de diferentes ordens de grandeza e níveis estruturais distintos permitiram a compreensão de elementos relativos ao “envelopamento” estrutural da área de estudo. A partir da análise de feições estruturais mapeadas, foram apontados controles de acumulações, tais como o potencial de geração de armadilhas para acumulações próximas a determinadas zonas de interseção de grandes estruturas regionais e também a possibilidade de maior integridade da seção selante em estruturas vinculadas aos elementos regionais de direção NE-SW. Ainda aponta-se para a possibilidade de feições estruturais, de direção N-S, com características distensionais, estar relacionadas à ruptura da seção superior da bacia e a perda de acumulações de hidrocarbonetos por escape de fluidos.

(originais recebidos em 25.06.2005)

Palavras-chave: análise estrutural | geoprocessamento | métodos geofísico potenciais | Sistema Petrolífero Irati - Rio Bonito | Bacia do Paraná

abstract

Structural features associated with aspects like migration routes, fluid convergence and/or barriers and seal integrity, among others, may be evaluated with the aid of information obtained by remote sensing and field data. This work is focused on the analysis of the geometry of tectonic structures and their relationship with essential elements of the Irati-Rio Bonito Petroleum System, inserted in the Paraná Basin. The structural framework was outlined with satellite imagery, digital elevation models and geophysical maps. Several techniques relative to lineament analysis were reviewed and implemented by software programming. The description of structural styles, and kinematic & dynamic analysis were performed using field data obtained in key-areas. Another software was developed in order to calculate paleostress components. It computes maximum, intermediary and minor principal stress position based on Mohr-Coulomb criteria, for each fault individually. That aspect showed to be particularly important in this study due the several tectonic episodes that occurred in the Paraná Basin. The relationships among features of different magnitudes and structural levels, interpreted by integrating several remote sensors, provided the understanding of the structural envelopment in the studied area. Based on the mapped structural elements, some accumulation controls were pointed out, such as the observed potential for the development of structural traps near regional structures, and the possibility of greater seals integrity associated with NE-SW oriented structural trends. Furthermore, N-S trending elements, generated in an extensional regime, could be associated with the rupture of the upper section, thus allowing leakage of hydrocarbon accumulations.

(expanded abstract available at the end of the paper)

Keywords: *structural analysis | geoprocessing | potential geophysical methods | Irati - Rio Bonito Petroleum System | Paraná Basin*

introdução

A evolução e configuração das estruturas observadas em bacias sedimentares é reflexo direto de sua história tectônica. No caso da Bacia do Paraná, diversos eventos tectônicos e recorrentes fases de deformação geraram e reativaram es-

truturas de geometrias variadas e em diferentes magnitudes. A implicação de heranças estruturais, associadas às descontinuidades presentes no embasamento da bacia, bem como a geração de novas famílias de falhas, podem apresentar respostas diversas quanto aos aspectos associados à estruturação de sistemas petrolíferos. Desta forma, uma investigação relacionada ao comportamento estrutural em diferentes profundidades foi de fundamental importância para a compreensão destes sistemas na bacia.

O objetivo principal deste estudo reside na análise da configuração de geometrias de estruturas e suas possíveis relações com aspectos associados ao Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito (SP I-RB). A seção estudada compreende rochas devonianas até derrames basálticos jurássico-cretáceos, em uma região entre os estados do Paraná e Santa Catarina. Foram observadas estruturas através de imagens de satélite, modelos digitais de elevação e imagens obtidas a partir de sensores geofísicos potenciais, sendo posteriormente ponderadas através de técnicas específicas de geoprocessamento. Já as características relacionadas ao detalhamento de estilos estruturais, cinemáticos e dinâmicos (de grande importância para a compreensão da inter-relação e evolução das estruturas) foram observadas com levantamentos de campo em áreas-chave.

Com a análise, dimensionamento e integração de lineamentos, obtidos a partir da interpretação de imagens Landsat7 e MDE SRTM90, foram gerados mapas temáticos relacionados aos atributos diversos dos lineamentos traçados, utilizando aplicativo desenvolvido em ambiente *Visual Basic*. Através dos resultados alcançados foi possível se obter um panorama da configuração das estruturas observadas em superfície na área analisada. Análises relacionadas às dimensões fractais dos conjuntos de dados obtidos, para os dois diferentes sensores, foram também executadas através do aplicativo implementado. Destacou-se, desta forma, a possível indicação de estruturas de diferentes ordens de grandeza para os dois sensores usados.

Através de técnicas de processamento de dados gravimétricos e magnetométricos, e posterior análise, foram traçados e interpretados lineamen-

tos geofísicos para a região de estudo. Com a análise dos dois conjuntos de dados potenciais, foram elaboradas inferências quanto às diferentes profundidades estudadas através de correlações e divergências nas respostas observadas.

Mediante a associação dos conjuntos de estruturas observados com os sensores de relevo e aqueles potenciais, foi elaborado um mapa litoestrutural para a área estudada, indicando estruturas de diferentes ordens de grandeza e profundidade.

Com a análise de dados levantados em campo foram também observadas características relacionadas à geometria de estruturas. As análises de campo, como anteriormente indicado, possibilitaram também a observação de aspectos cinemáticos associados às falhas em diferentes posições estratigráficas. Para a observação de paleotensores foi utilizado o critério de ruptura de Mohr-Coulomb através de outro aplicativo implementado. Com a análise destes dados pôde-se inferir alguns aspectos relevantes à configuração e evolução estrutural na área em foco. Finalmente, com a avaliação e integração dos conjuntos de dados tratados, foram obtidos subsídios para uma discussão quanto a possíveis influências dos diversos aspectos estudados no SP I-RB.

área estudada e contexto regional

A área de estudo encontra-se totalmente inserida na entidade geotectônica Bacia do Paraná, abrangendo partes dos estados do Paraná e Santa Catarina. É limitada pelas coordenadas geográficas 25°30' a 27°00' Sul e 49°45' a 52°30' Oeste (fig. 1). A seção estratigráfica é representada por sedimentos devonianos (Formação Furnas) até derrames basálticos jurássicos-cretáceos (Formação Serra Geral). A área foi delimitada a partir de observações de alta favorabilidade, para o SP I-RB, em diversos trabalhos de avaliação deste sistema (Artur, 1998; Araújo *et al.* 2000; Bartoszeck, 2000).

O SP I-RB apresenta como rocha geradora folhelhos da Formação Irati e como possíveis reservatórios arenitos da Formação Rio Bonito. As rochas do Membro Assistência, da Formação Irati, são, segundo dados geoquímicos, as melhores geradoras de óleo da bacia (Zalán *et al.* 1990; Araújo *et al.* 2000). Apesar de boas características de geradoras, não apresentam espessura constante. Os arenitos deltaicos da Formação Rio Bonito têm excelentes características de permoporosidade e transmissibilidade (Milani *et al.* 1990).

Diversos aspectos relevantes à evolução do SP I-RB são estreitamente associados às intrusões de diabásio observadas na Bacia do Paraná (Cerqueira e Santos Neto, 1986). Araújo *et al.* (2000) qualificam o SP I-RB como um sistema petrolífero atípico devido à maturação anômala pela intrusão de *sills* de diabásio durante o vulcanismo jurássicos-cretáceos da bacia.

A reconstrução do embasamento da bacia, executada a partir de dados gravimétricos (Quintas, 1995), indica, para a área selecionada, contato entre dois diferentes blocos crustais. Este contato tem direção principal NE-SW e limita o Cinturão Ribeira ao norte e o Cráton Rio de La Plata ao sul (fig. 2a). Conforme Milani e Ramos (1998), na área selecionada o embasamento da bacia também aparece segmentado. Para estes autores, a Falha da Lancinha divide o embasamento entre a Faixa Móvel de Apiaí e o Maciço de Joinville. Ainda outro maciço, segundo estes mesmos autores, é indicado a noroeste da área de estudo (fig. 2b). Estas feições de cunho regional desempenharam papel fundamental durante a evolução da bacia, afetando de maneira direta aspectos relacionados ao condicionamento de diversas características do sistema petrolífero indicado. Além de promoverem significativas variações laterais nas espessuras dos diferentes pacotes sedimentares (observado em diferentes mapas de isópacas para a bacia) apresentam-se como condicionadoras de fluxo em células regionais.

Outros trabalhos de cunho regional apontam importantes zonas de estruturação, indicadas por grandes lineamentos, para o arcabouço da bacia (Soares *et al.* 1982; Zalán *et al.* 1990). As falhas da Lancinha (NE), Taxaquara (NE), Caçador (NW),

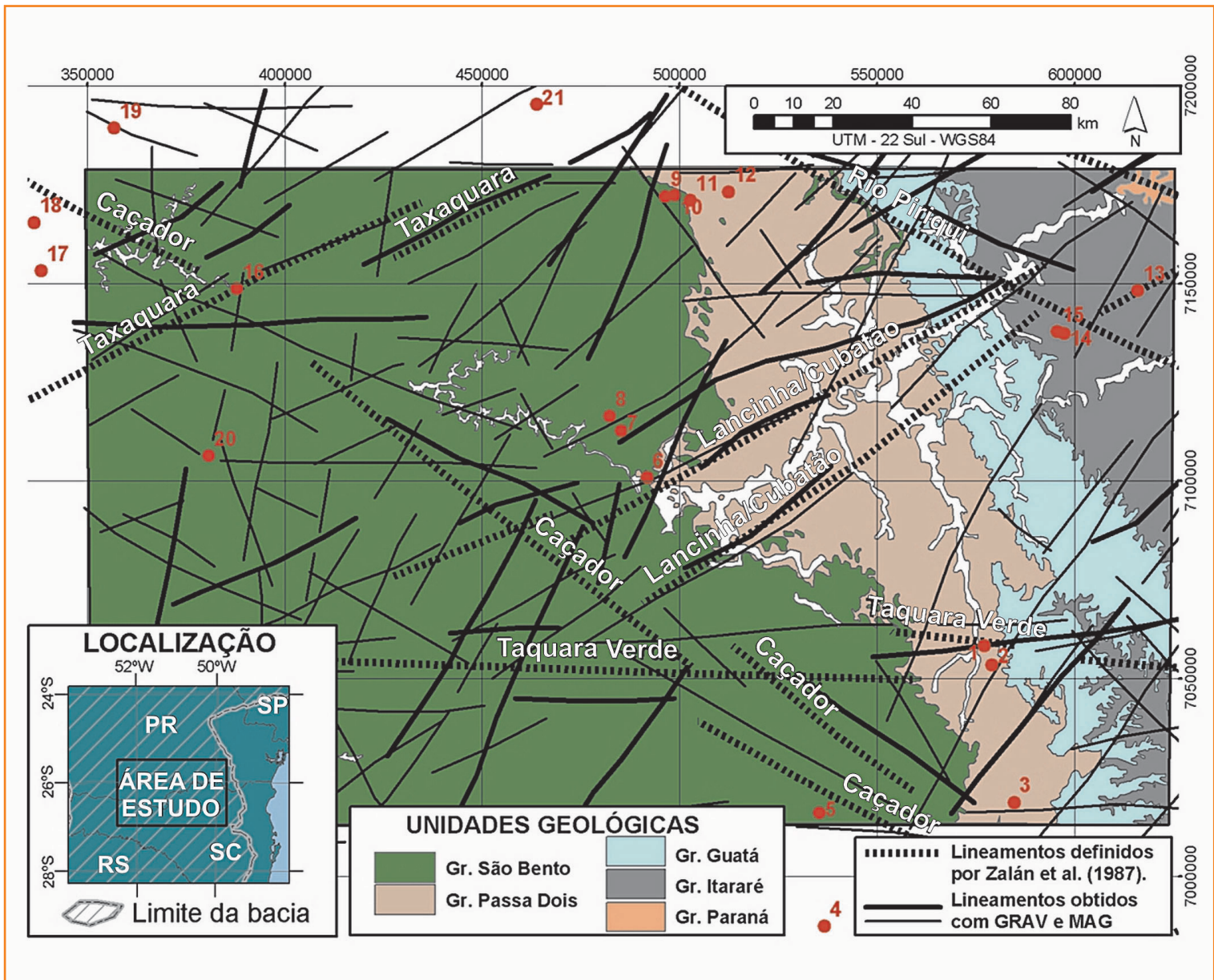


Figura 1

Localização da área estudada, contexto geológico - estrutural e pontos observados em campo.

Figure 1

Location of the studied area, geological - structural aspect and location of studied outcrops.

Rio Piquiri (NW) e Taquara Verde (E-W), constituem as principais estruturas descritas para a região estudada, porém seus comportamentos locais apresentam pouca ou nenhuma informação. Associadas a estas estruturas de caráter regional, falhas de menores ordens de grandeza caracterizam-se como estruturas trapeadoras (Rostirolla et al. 2000, 2003). Torna-se fundamental a compreensão das geometrias e dinâmica de funcionamento destas grandes estruturas, bem como sua relação espacial com fraturas de menor escala.

análise dos lineamentos obtidos com os sensores SRTM90 e Landsat7

A definição de lineamentos aqui utilizada é aquela indicada por O'Leary et al. (1976), baseada na definição original de Hobbs (1904, *apud* O'Leary, 1976). Os autores definem estes elementos como "feições mapeáveis, simples ou compostas, onde as partes estão alinhadas em uma rela-

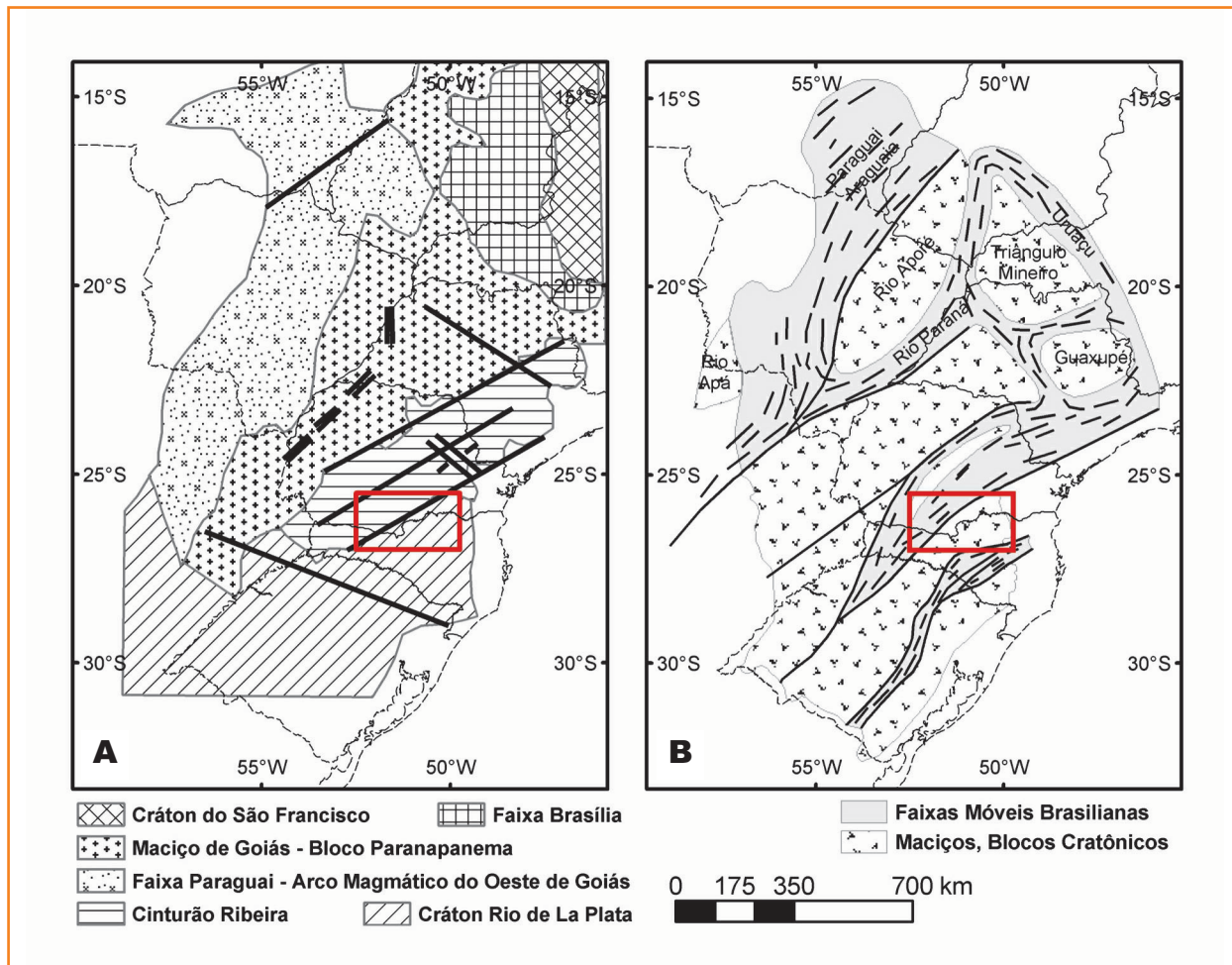


Figura 2

Localização aproximada da área de estudo em duas reconstruções do embasamento da bacia (área estudada indicada em vermelho).

a - Modificado de Quintas (1995) e

b- Modificado de Milani e Ramos (1998).

Figure 2

Two reconstructions of the basin basement (the studied area is shown in red).

a- Modified from Quintas (1995) and b- Modified from Milani and Ramos (1998).

ção retilínea ou levemente curva, e que diferem das estruturas adjacentes, provavelmente refletindo um fenômeno de subsuperfície”.

Os lineamentos foram obtidos utilizando diversas técnicas auxiliares. Para o MDE SRTM90, foram gerados mapas sombreados com iluminações nas direções NW-SE e NE-SW sobrepostos aos mapas hipsométricos. Foram também utilizadas técnicas de estereoscopia por anaglifs e ChromaDepth™ (Bailey e Clark, 1998; Freitas et al. 2004). As imagens Landsat7 foram analisadas em diversas combinações de bandas e também através do uso de apenas uma banda em escalas de cinza. Foram também utilizados diversos tipos de realce (e.g. equalização de histogramas; desvios padrão). Filtragens direcionais, utilizando-se filtros SOBEL e PREWITT também foram executadas (Madani, 2001; Freitas, 2005), buscando diminuir a tendência de feições geradas perpendicularmente à direção de insolação

nas imagens Landsat7 (Queiroz et al. 2000). Desta forma, foram traçados cerca de 33 000 lineamentos positivos e negativos com o sensor Landsat7 e aproximadamente 12 500 a partir do modelo SRTM90 (fig 3).

análises direcionais dos lineamentos

Posteriormente ao traçado dos lineamentos, através do uso do aplicativo implementado (*LinAnalyst* – Freitas et al. 2004), as feições lineares foram submetidas às diversas análises. Em um primeiro momento foram observadas as características direcionais dos dados. Análises direcionais foram executadas para todos os conjuntos de dados obtidos com Landsat7 e SRTM90, bem como com suas segmentações em regiões onde afloram rochas de diferentes idades geológicas (Mesozóico, Permiano Superior, Permiano Médio e Permiano Inferior/Carbonífero). Foram também

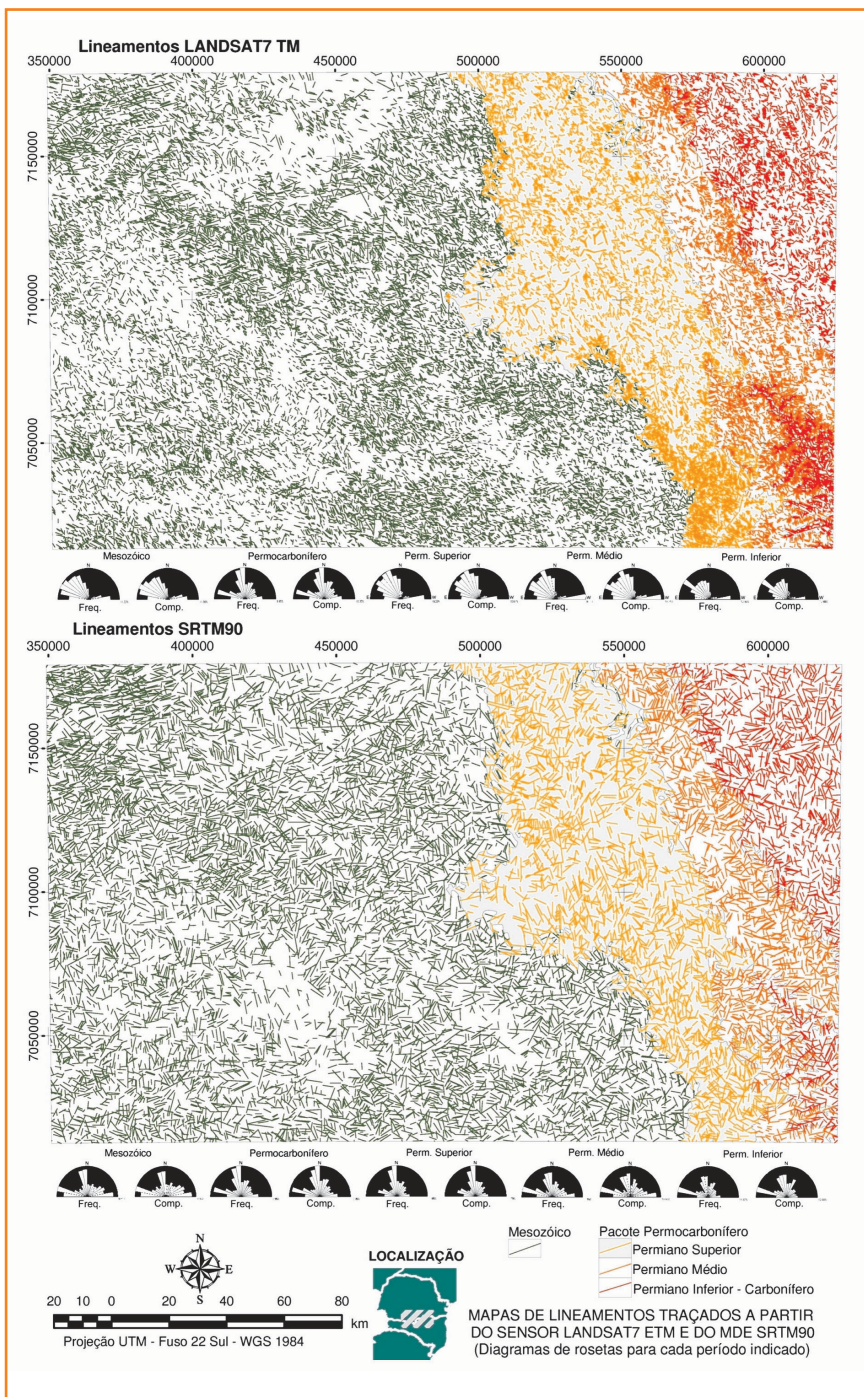


Figura 3

Mapa dos lineamentos obtidos com os sensores indicados e comportamento direcional.

Figure 3

Map of the lineaments identified with the indicated sensors and directional behavior.

executadas análises direcionais para lineamentos próximos às zonas de falhas utilizando *buffers* como limite das análises. Desta forma foram investigadas as cinco zonas de falhas indicadas no item anterior, além de outras sete, estas inferidas a partir de notável continuidade de estruturas traçadas.

Pôde-se, de maneira geral, observar que a distribuição dos grandes lineamentos, quando anali-

sada através de estruturas menores interpretadas, apresenta arranjo distinto. Estruturas regionais com determinada direção, localmente podem estar apresentando partição da deformação. Estas características denotam grande influência nos aspectos de migração, convergência e acumulações de fluidos. Grandes estruturas que, em escalas regionais devem estar associadas às longas rotas de migração, localmente podem conter estilos estruturais que sirvam como barreira para fluidos. As características de migração, convergência e retenção, entretanto, são discutidas mais criteriosamente na seqüência do texto.

A constante presença de lineamentos nas direções N-S e E-W também é um aspecto conspícuo à maioria das análises elaboradas na área estudada (fig. 3). Tais feições apresentam notadamente um padrão bastante marcante no relevo da área e podem estar associadas às estruturas distensivas, apresentando menor resistência ao intemperismo.

Altas freqüências observadas para lineamentos de pequeno comprimento, em relação aos lineamentos mais longos, podem indicar uma relação com os diferentes tipos de fraturas. Enquanto os lineamentos mais curtos estariam respondendo, por exemplo, como fraturas do Tipo I (abertura), aqueles de maiores comprimentos, normalmente de direções NW e NE, poderiam estar relacionados às fraturas do Tipo II (cisalhante).

Fica também clara a tendência de estruturas de direção NW, fortemente influenciadas pela insolação com origem em NE, para as interpretações a partir do sensor Landsat7. Desta forma, análises direcionais executadas a partir de estruturas interpretadas com o MDE SRTM90 são menos tendenciosas, apresentando, apesar da menor resolução, maior confiabilidade nos resultados.

análises de atributos dos lineamentos

Foram executadas investigações a partir da análise de atributos de densidade, intensidade, comprimentos e conectividade dos lineamentos

traçados (Freitas *et al.* 2004). Uma discussão mais detalhada, referente aos atributos indicados, é feita por Rohrbaugh Jr. *et al.* (2002). Para as análises foram gerados mapas de atributos com células regulares de 2, 5 e 10 km de lado, e também foram investigados aspectos utilizando filtros direcionais para as classes N-S, E-W, NE e NW. Mapas de contorno foram posteriormente gerados para observação de zonas de continuidade para os atributos analisados. Os parâmetros de análise indicados e discutidos têm importância direta na interpretação de diversos aspectos relacionados à evolução de sistemas petrolíferos. Através dos métodos de contagem indicados podem ser executadas algumas correlações:

Densidade: importante parâmetro analítico para a observação da integridade da seção analisada. Pode estar relacionada tanto às características de aumento da taxa de recuperação de hidrocarbonetos, devido ao fraturamento da rocha-reservatório, como também à integridade da seção selante.

Intensidade: tem importante papel na previsão de convergência dos fluidos. A partir de análises em fraturas superficiais pode-se obter um indicador da expressão em subsuperfície destas estruturas.

Comprimentos: nas análises por comprimentos acumulados, observa-se íntima relação ao parâmetro intensidade. Através do comprimento ponderado, pode-se indicar qual o comportamento das fraturas com relação às suas maiores ou menores continuidades. Desta forma, têm grande importância e validade nas relações de migração, uma vez que o comprimento é diretamente proporcional ao rejeito das falhas.

Conectividade: este parâmetro é relativo tanto aos aspectos para a definição de rotas de migração como para critério de definição de anisotropias locais, também relacionadas ao potencial de integridade da seção selante.

Na figura 4 demonstram-se alguns desses parâmetros, discutindo-os a partir de um mode-

lo conceitual sintético elaborado (Rostirolla *et al.* 2003). No modelo, observam-se falhas maiores, associadas ao embasamento, e falhas menores, restritas à bacia. As regiões de cruzamento de falhas de maior magnitude (regionais) podem ser relacionadas a uma maior migração de fluidos. As falhas menores, localmente cimentadas, podem ter tanto caráter de convergência como de barreira para fluxos. Nos mapas de contorno gerados para o modelo pode-se observar que o aspecto de interseção de lineamentos (conectividade) relaciona-se diretamente aos altos índices de migração vertical. A migração lateral ocorre em locais de valores baixos a moderados de intensidade e densidade de estruturas. A integridade da seção selante se reflete em baixos valores de densidade. Para maior convergência de fluidos observa-se uma relação direta entre valores moderados a altos de comprimento e intensidade de fraturas.

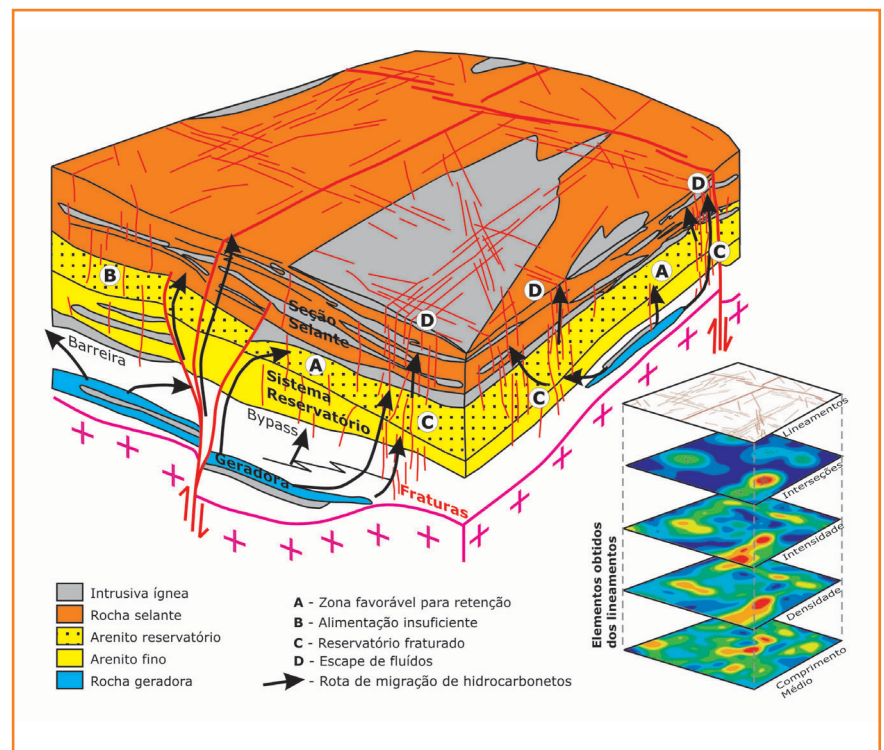
Em linhas gerais, nota-se uma associação entre as estruturas com direção NW regionais e altos valores de frequência, comprimentos parciais e totais, densidade e intensidade, enquanto as estruturas de direção NE apresentam, em superfície, uma resposta de baixos valores para estes

Figura 4

Modelo conceitual sintético de migração, fraturas associadas e parâmetros obtidos. Adaptado de Rostirolla *et al.* (2003).

Figure 4

Conceptual migration model, fractures and some parameters obtained. Modified from Rostirolla *et al.* (2003).



parâmetros, porém com comprimento médio de lineamentos maior do que daqueles das regiões adjacentes.

análises dos lineamentos utilizando dimensão fractal

Entre as técnicas fractais empregadas, a mais utilizada é aquela baseada em contagens de caixas (*box-counting*). O método consiste em analisar os objetos de interesse através da superposição de uma grade com quadrados de lado s . Os quadrados que se encontram sobrepostos a uma estrutura são então contados. O processo é repetido com a sobreposição de grades de diversos tamanhos de s . Então, o número $N(S)$ de caixas que sobrepõe lineamentos é plotado contra o tamanho do lado destas caixas em um gráfico log-log (Peitgen *et al.* 1992; Volland e Kruhl, 2004). Os pontos plotados exibem uma correlação linear caso o modelo investigado seja fractal. O coeficiente angular da reta ajustada a estes pontos representa a dimensão fractal do modelo analisado (fig. 5).

Uma análise fractal, pela técnica de contagem de caixas, foi realizada para a porção centro-sudoeste da área (fig. 6). A idéia foi comparar as respostas dadas pelos lineamentos obtidos com o MDE SRTM90 e com as imagens Land-

sat7. A área escolhida foi a região de cruzamento de estruturas regionais (Lancinha, Caçador e Taquara Verde) associadas a um baixo gravimétrico, características estas associadas aos modelos de acumulação para a bacia (Rostirolla *et al.* 2003). As análises foram executadas com o programa *LinAnalyst* utilizando caixas em proporções de 1/10; 1/20; 1/40; 1/60; 1/80; 1/100 e 1/120 do lado da área de análise, e a presença do lineamento como critério de busca.

As respostas dadas pelos dois conjuntos de dados indicaram diferentes dimensões fractais ($D_{\text{Landsat}} = 1,7903$ e $D_{\text{SRTM}} = 1,6692$), o que novamente sugere uma representação de estruturas de diferentes ordens de grandeza através das interpretações executadas para os dois diferentes sensores. Conjuntos de dados representando os mesmos eventos geológicos podem ter uma correlação na dimensão fractal aproximada até a segunda casa decimal (Volland e Kruhl, 2004), neste tipo de análise.

Outro modelo clássico de análise fractal, para lineamentos, é através da distribuição da frequência do comprimento dos traços. Os comprimentos dos lineamentos analisados são agrupados em certo número de classes; então a frequência acumulada de cada classe é plotada, também em um diagrama log-log, contra o tamanho da classe. Da mesma forma que indicado no método de contagem de caixas, a dimensão fractal é obtida pelo coeficiente angular da reta ajustada aos pontos (Gillespie *et al.* 1993; Guarnieri, 2002).

Para a mesma área (fig. 6), uma análise através do método de frequência acumulada de classes de comprimento foi executada. A análise foi elaborada com 20 classes de comprimento e as retas ajustadas indicaram uma dimensão fractal de 1,7473 para os lineamentos obtidos do sensor Landsat e 1,616 para aqueles interpretados com o MDE SRTM90 (fig. 7). Apesar do coeficiente de correlação relativamente menor, que pode estar indicando a necessidade de diversas retas ajustadas (multi-fractal?), a diferença nas respostas segue a dispersão encontrada para as análises executadas com a técnica de contagem de caixas.

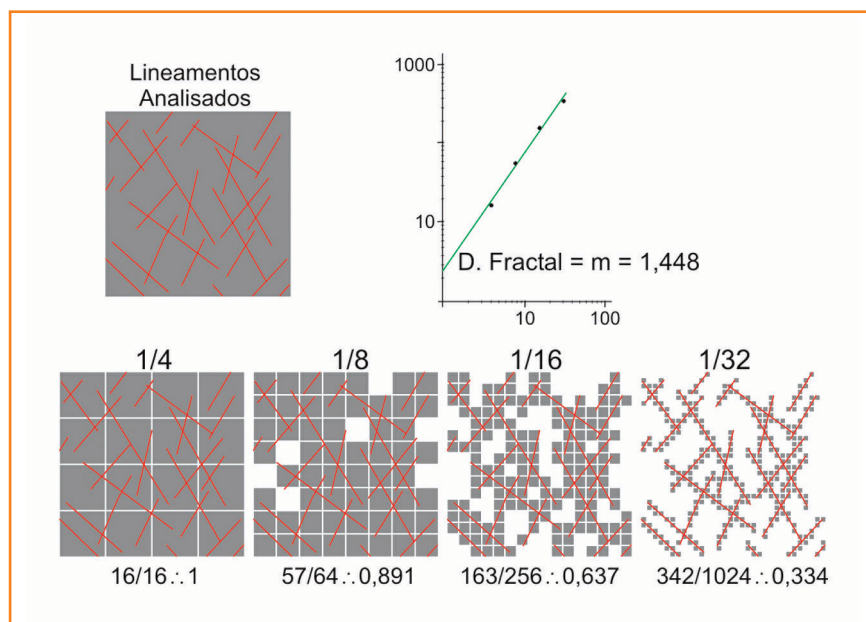
Uma adaptação do método de distribuição das frequências é indicada por Volland e Kruhl (2004). Estes autores analisaram a distribuição

Figura 5

Análise utilizando o método de contagem de caixas (*box-counting*). São mostradas quatro análises, com tamanhos de caixas indicados. No gráfico, os resultados das contagens são plotados em um diagrama log-log. A dimensão fractal é obtida através do coeficiente angular m da reta ajustada.

Figure 5

Fractal box-counting analysis method. Four cases, with specified side lengths, are shown. In the log-log diagram, the fractal dimension is obtained by the m angular coefficient of the best fitted straight line.



de freqüências em diversas direções. Através da geração de linhas de busca, com determinado espaçamento, são analisadas as distribuições dos espaçamentos entre fraturas. Para cada direção é então calculada a dimensão fractal da distribuição destes espaçamentos. Os valores são então plotados em gráficos conforme os azimutes das linhas de busca referentes às análises (fig. 8). Através do uso desta técnica podem ser detectadas anisotropias direcionais nos conjuntos de dados analisados.

Uma análise multidirecional para a distribuição de freqüências também foi executada na mesma área. As análises foram efetuadas para o comprimento médio de blocos não fraturados e também para a dimensão fractal obtida para a freqüência acumulada de comprimentos (fig. 9).

Através do gráfico obtido para o comprimento médio dos blocos não fraturados, no sensor Landsat fica clara novamente a questão da maior quantidade de lineamentos de direção NW estar influenciando esta característica. A elipse ajustada apresenta inclinação de aproximadamente 35° a partir do eixo E-W e tem seu eixo maior no quadrante NW. A maior quantidade de lineamentos com esta direção segmentam as linhas de busca gerando blocos menores na direção NE. O ângulo de inclinação indicado para a elipse é semelhante àquele da insolação nas imagens usadas. Para os lineamentos obtidos com o SRTM90 a elipse ajustada aos dados de comprimento médio tem alongamento maior na direção E-W. Tal característica indica a presença de

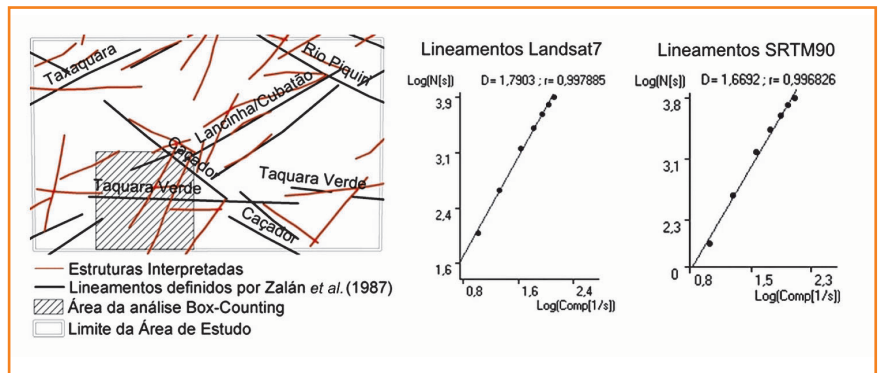


Figura 6 – Área de execução da análise box-counting e resultados plotados em diagramas log-log. Os diagramas mostram o número N de caixas com tamanho de lado s , contra $1/s$. D é dimensão fractal (coeficiente angular da reta ajustada por mínimos quadrados) e r o coeficiente de correlação.

Figure 6 – Indication of the area where the box-counting technique was applied. Diagrams show the number N of boxes with side length s , plotted versus $1/s$. D is the fractal dimension (angular coefficient of the straight line fitted by least squares method) and r is the correlation coefficient.

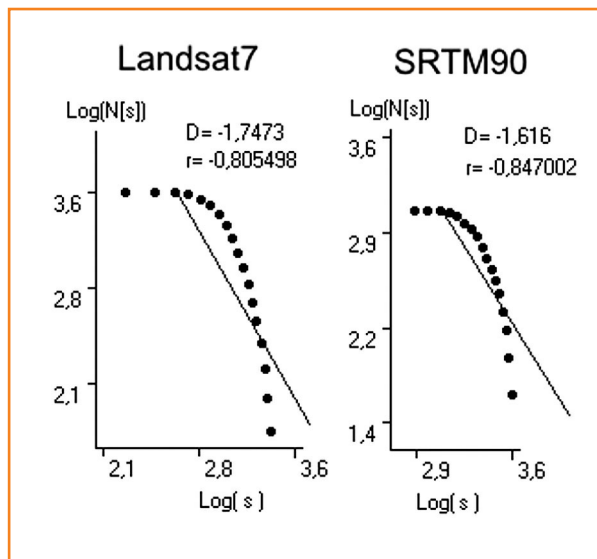


Figura 7 Dimensão fractal por classes de comprimento. No diagrama, N (freqüência acumulada de segmentos) está plotado contra s (valor médio de cada classe de comprimento). D é a dimensão fractal e r o coeficiente de correlação.

Figure 7 Fractal dimension of the lineament length classes. The frequency sum of sizes N is plotted versus the mean value of the length classes s . D is the fractal dimension and r is the correlation coefficient.

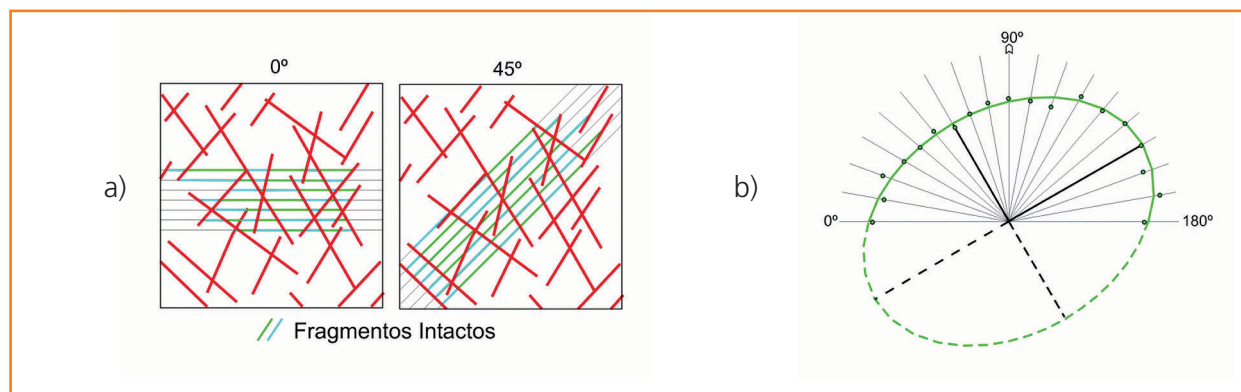


Figura 8 – Análise da dimensão fractal por linhas de busca. (a) Conjuntos de linhas de busca. (b) Elipse ajustada aos dados plotados conforme o azimute das linhas de busca.

Figure 8 – Fractal dimension obtained by scan lines. (a) Two example sets of scan lines are shown. (b) In the directional diagram an ellipse was fitted for the data plotted by azimuth.

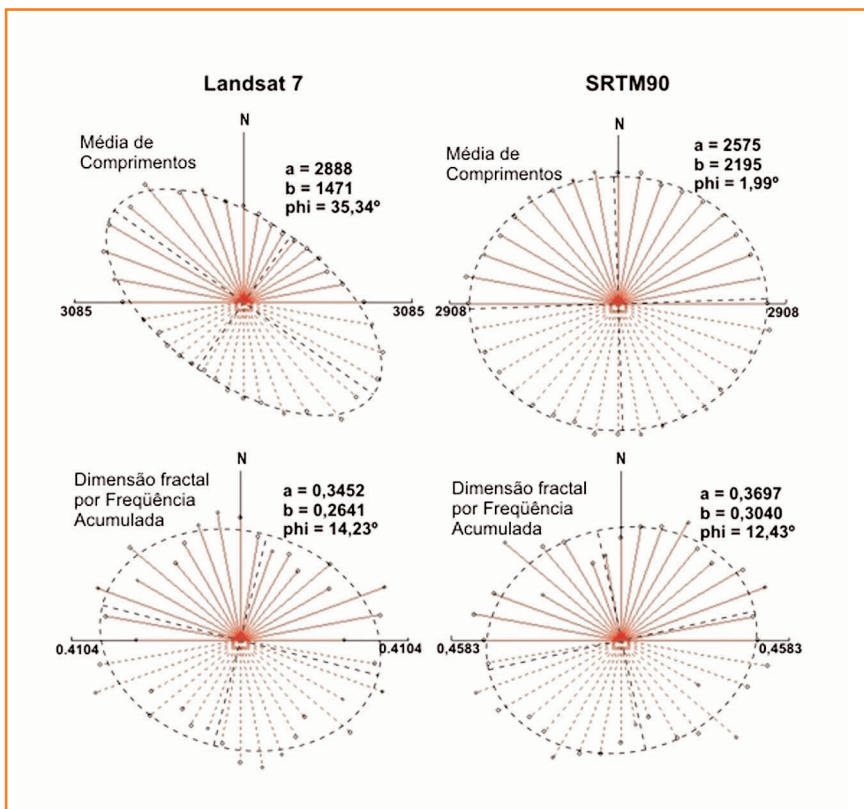


Figura 9 – Diagramas direcionais indicando o comprimento médio das linhas de busca (gráficos superiores) e a dimensão fractal para a frequência acumulada (gráficos inferiores). Os pontos indicam o valor para cada classe direcional, plotados a partir do centro do diagrama, em seu respectivo azimute. Os dados, para cada classe azimutal, foram ajustados a partir da divisão dos comprimentos em 20 classes de igual valor. Em traçado preto as elipses ajustadas pelo método dos mínimos quadrados usando a rotina em Matlab adaptada de Fitzgibbon *et al.* (1999). Para a elipse ajustada a indica o semi-eixo maior, *b* o semi-eixo menor e *phi* o ângulo de inclinação da elipse com relação ao eixo E-W.

Figure 9 – Directional diagrams for mean length (upper diagrams) and fractal dimension obtained by the sum of frequencies (lower diagrams). The points are plotted for each directional class (18 classes, separated by 10°), with the origin on the center of the diagram. The values (for each directional class) were computed by dividing the lengths in 20 sets of equal amplitude. The dark dashed ellipses are fitted by the least squares method using a Matlab routine adapted from Fitzgibbon (1999). In the fitted ellipses, *a* is the major semi-axis, *b* is the minor semi-axis and *phi* the tilt angle between the ellipse and the E-W direction.

um padrão (o que não ocorre com as médias de comprimento). Desta forma desconsidera-se o aspecto de maior presença de lineamentos NW no conjunto obtido com Landsat7.

Comparando-se os diagramas para os dados obtidos com os dois sensores pode-se observar uma inversão na inclinação dos eixos maiores. Nos dados Landsat7 o eixo encontra-se no quadrante NW e nos dados SRTM90 no quadrante NE (fig. 9), ambos, entretanto, relativamente próximos ao eixo E-W. A relação de achatamento da elipse, dada pela divisão entre os eixos maiores e menores, é de 1,216 para os dados SRTM90 e 1,307 para aqueles obtidos com Landsat7. Estas características podem estar indicando uma anisotropia direcional na região estudada. Os dois sensores, novamente, podem estar indicando estruturas de diferentes ordens de grandeza. A rotação observada nas elipses ajustadas poderia estar indicando a relação entre elementos estruturais associados (e.g., fraturas escalonadas em sistemas transcorrentes). Uma hipótese, relacionada a uma compressão com tensão principal subhorizontal de direção E-W, com transcorrências dextrais nas estruturas de direção ENE, poderia gerar estruturas escalonadas antitéticas posicionadas em direção WNW-ESE.

análise dos dados geofísicos potenciais

As informações geofísicas potenciais foram também tratadas utilizando-se técnicas específicas de processamento. Os dados magnetométricos aqui usados são parte de uma compilação envolvendo quatro diferentes levantamentos aeromagnetométricos (Bacia do Paraná 1973; Ponta Grossa – Criciúma / Área 1; Rio Iguazu; e Serra do Mar Sul). Esses dados foram tratados com filtros de continuação ascendente, pretendendo-se, desta forma, destacar estruturas relacionadas às profundidades diversas. O sinal analítico desses dados filtrados também foi gerado. Uma aplicação da técnica do espectro de potência radial, para quantificação das profundidades aproxima-

blocos com maior continuidade nesta mesma direção. A relação, entretanto, dos eixos maiores e menores da elipse ajustada é bastante próxima, fator que indica uma maior homogeneidade nas relações de comprimento e direção dos lineamentos traçados com este sensor.

Como os diagramas para dimensão fractal expressam, para cada classe azimutal, um ajuste ao conjunto de pontos apenas desta classe, em valor adimensional, tornam-se independentes de

das das anomalias foi também executada. Entretanto, devido à grande quantidade de ruídos nos dados originais, os resultados obtidos no espectro apresentaram-se incoerentes. Desta feita, foram analisados de maneira qualitativa.

Os dados gravimétricos são uma compilação de levantamentos de campo executados pela Universidade Federal do Paraná e pela Universidade de São Paulo. A partir das anomalias Bouguer e *free-air*, calculadas para cada estação, foram gerados mapas de contorno utilizando-se a técnica de krigagem, através do aplicativo GeoR (Ribeiro Jr. e Diggle, 2003), com ajuste através do método dos mínimos quadrados.

As anomalias Bouguer foram consideradas, dentre os dados obtidos, como aquelas mais representativas das estruturas relacionadas ao embasamento. A exclusão das características relacionadas à topografia, na geração destas anomalias, torna-as bastante apropriadas para investigação das características subsuperficiais. O aspecto referente à pouca densidade de estações gravimétricas, e conseqüente amostragem mais regionalizada, destaca as feições de grandes comprimentos de

onda, indicando por sua vez estruturas de maior profundidade. Da mesma forma, utilizando os dados magnetométricos com maiores continuações ascendentes, destacam-se as estruturas de maior comprimento de onda, relacionadas às maiores profundidades de investigação. Assim, as estruturas descritas como mais profundas, ou envolvendo o embasamento, foram traçadas utilizando-se simultaneamente feições magnéticas (contraste) com continuação para cima de 5 000 m e isolinhas (alinhamentos) de anomalias gravimétricas Bouguer (fig. 10). Foram também traçadas estruturas utilizando-se os mapas magnéticos com menores continuações para cima e o mapa de anomalias gravimétricas *free-air*. Estas foram denominadas estruturas subsuperficiais intermediárias.

Correlacionando-se as estruturas obtidas com as anomalias Bouguer e os lineamentos de Zalán *et al.* (1990) observam-se algumas relações; a ZF Lancinha coincide com altos valores residuais na porção sudoeste da área e segmento, aproximadamente a partir de seu centro, uma região de baixos valores a sudeste e valores intermediários a noroeste; o Lineamento de Taxaquara correla-

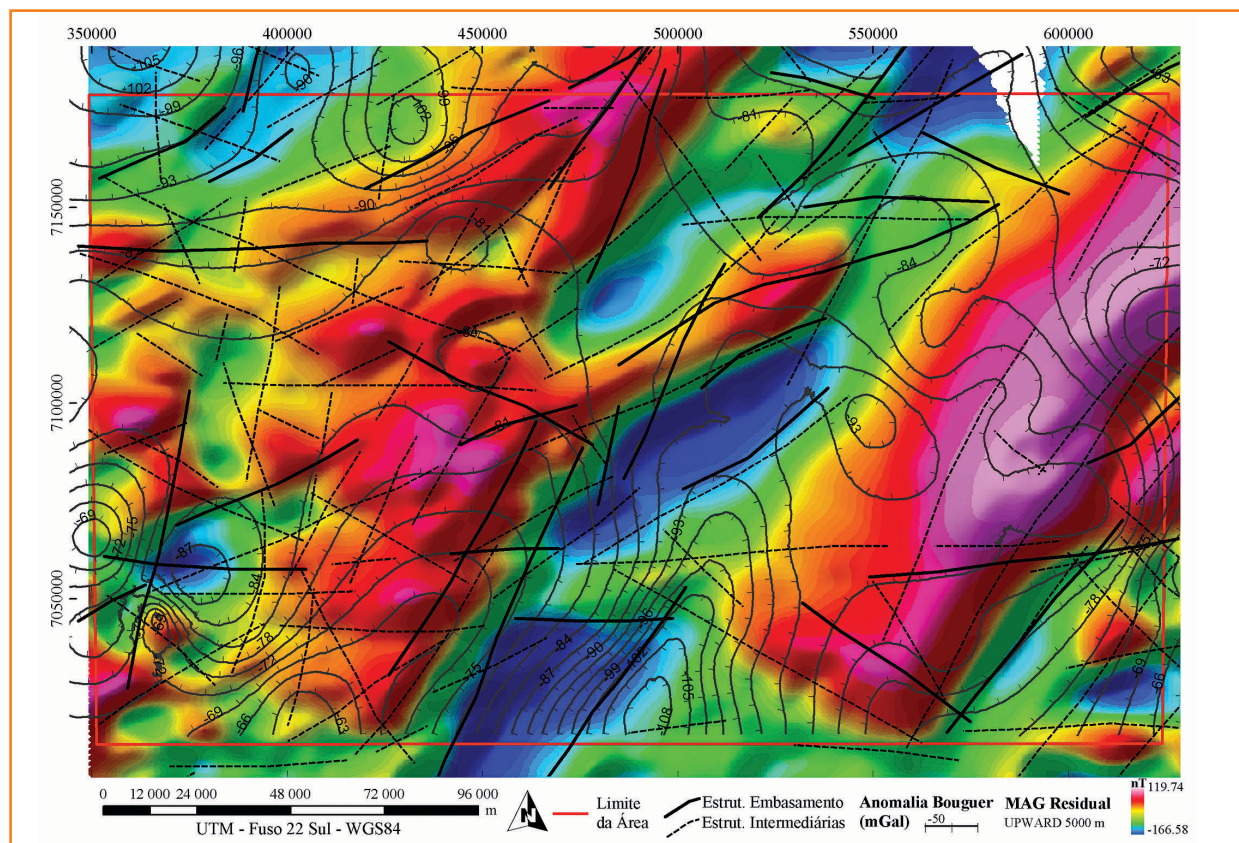


Figura 10

Sobreposição das isolinhas das anomalias Bouguer aos dados magnéticos com continuação para cima em 5 000 m. As estruturas interpretadas encontram-se indicadas.

Figure 10

Solines of Bouguer anomalies inset magnetic total field data (with 5,000 m upward continuation). Interpreted structures are shown.

ciona-se com o limiar de uma região de valores baixos e intermediários na porção noroeste da área de estudo; a ZF de Caçador também apresenta um bom ajuste com o mapa gerado, delimitando a região de altos valores da porção sudoeste da área.

A correlação com os mapas gerados para o embasamento da bacia fica mais evidente quando se nota um ajuste de dados de origens diversas. O bloco cratônico no noroeste da área estudada, indicado por Milani e Ramos (1998), está, provavelmente, associado ao baixo gravimétrico alongado na direção NE-SW (fig. 10). Aparece também ter uma correlação com o Lineamento de Taxaquara, de direção análoga.

Ainda com relação aos mapas indicados para o embasamento da bacia e também em análises de estruturas regionais, nota-se uma divergência quanto à direção de continuidade da ZF Lancinha. Para Zalán *et al.* (1990) e Quintas (1995), esta estrutura tem uma linearidade constante em sua direção NE-SW (aproximadamente N50-55E). Soares *et al.* (1982) e Milani e Ramos (1998), entretanto, indicam uma inflexão desta estrutura para uma direção NNE-SSW a partir, aproximadamente, da região central da área de estudo, na porção situada mais a sul da estrutura. Observando-se o mapa Bouguer, nota-se que existem regiões de contraste que satisfazem as duas possibilidades indicadas. Nos mapas magnetométricos pode-se notar também esta ambigüidade nos sinais residuais. Há, porém, uma clara disposição de estruturas NNE-SSW na porção centro-oeste da área que, notadamente, segmentam-na em toda sua extensão. A inflexão para a direção NNE-SSW, indicada pelos autores citados, pode então ser resultado de uma interferência destas estruturas na ZF Lancinha. A relação de continuidade observada nas análises executadas com sensores de relevo, tanto a partir das contagens de lineamentos assim como a interpretação de lineamentos, indicam uma continuidade da ZF Lancinha em sua direção NE-SW.

Notam-se, para os elementos interpretados a partir dos dados geofísicos e também com os sensores de superfície, de maneira geral, cinco direções principais de estruturas regionais na área de estudo. 1) Um padrão a aproximadamente

N60°-70°E bastante contínuo (traços longos) e penetrativo. 2) Outro de direção N30°-40°E com traçado um pouco mais segmentado. 3) Um padrão com direções NNE a NNW, anastomosado e de traçado contínuo. 4) No quadrante NW ocorrem estruturas com padrão em *relay* (estruturas com traços mais curtos e paralelos) persistentes em quase toda a área. 5) Na direção E-W ocorrem estruturas de grande continuidade, porém em faixas estruturais restritas (corredores).

Todas as direções regionais indicadas, exceto o padrão N-S, parecem ocorrer nos diversos níveis investigados (sensores de superfície e potenciais). As estruturas orientadas nesta direção ocorrem exclusivamente nas porções superficiais. Esta característica pode ser relacionada à herança de estruturas do embasamento. Sendo as estruturas N-S neoformadas, em relação às outras direções indicadas, aventa-se aqui a possibilidade de terem sua origem relacionada à flexura crustal da Placa Sul-americana, associada à subducção oceânica a oeste. A partir do início do Cenozóico este esforço poderia gerar um arqueamento progressivo da placa continental, onde as rochas das seções superiores da bacia, com características mais rúpteis, estariam sujeitas a rupturas com direção preferencial N-S, anastomosadas em mapa e contínuas por grandes distâncias. Um esboço desta hipótese é ilustrado na figura 11, onde se faz uma analogia ao perfil altimétrico para a porção meridional, correlata à área estudada do Continente Sul-americano.

Outra hipótese é que estas estruturas podem ter sua geração associada ao rifteamento cretáceo, ocorrido durante a abertura do Atlântico Sul. Seriam relacionadas ao movimento distensional e rotacional associado. Nesta hipótese ocorreria uma propagação das estruturas distensionais na direção oeste, adentrando a Placa Sul-americana. Estudando a evolução tectônica da Bacia de Santos, Macedo (1989) indica a possibilidade de grandes falhas lítricas ocorrerem durante esta fase. Estas feições estruturariam porções baixas da Bacia do Paraná que posteriormente, através de reajuste de tensões, poderiam gerar estruturas de direção N-S observadas na bacia.

Segundo Rostirolla *et al.* (2005), estruturas de direção N-S poderiam estar associadas à evolu-

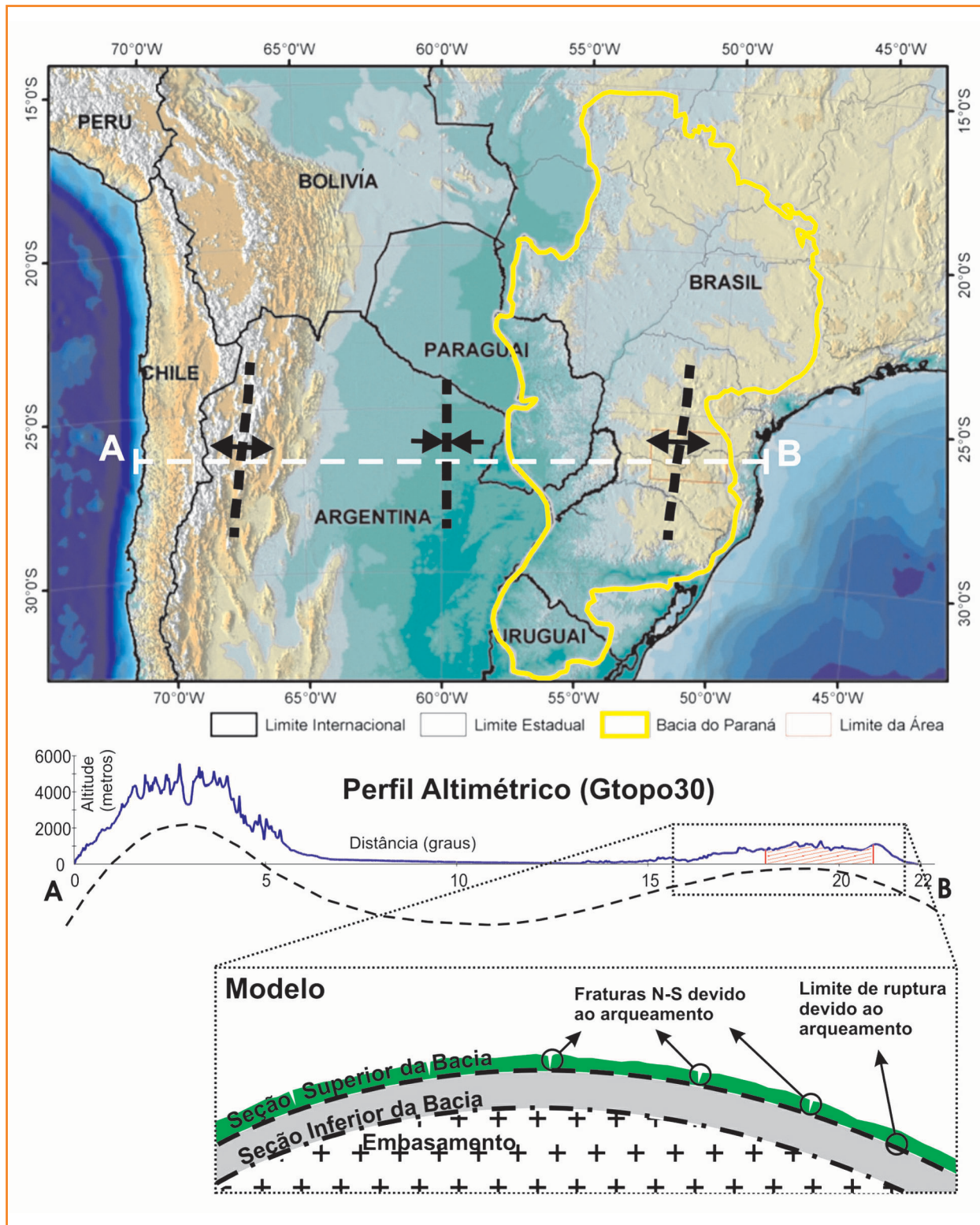


Figura 11

Modelo para geração das fraturas de direção N-S devido à flexura da Placa Sul-americana. Mais detalhes são apresentados no texto.

Figure 11

Model for N-S trending structures formed by the flexure of the South American Plate. For details see further discussion in the text.

ção cenozóica da Placa Sul-americana. Seriam estruturas frontais às tensões horizontais máximas com direção E-W e estariam balizadas por grandes eixos indicados por domínios altimétricos, alongados na direção N-S.

levantamentos de campo

Os levantamentos de campo tiveram por objetivo principal a observação de estruturas para o auxílio na compreensão da dinâmica da área es-

tudada. Através destes levantamentos foi possível observar aspectos e estilos estruturais nas diferentes unidades geológicas estudadas.

De maneira geral, os afloramentos das rochas básicas da Formação Serra Geral, diques e soleiras associados (geralmente presentes em cortes de estrada e pedreiras) são aqueles que apresentam melhor qualidade e maior quantidade de informações estruturais. Os indicadores cinemáticos, nessas rochas, são normalmente estrias e degraus associados ao crescimento de calcita fibrosa nos planos de fratura. Foram também observadas estrias e degraus associados aos óxidos de manganês e de ferro. Fraturas escalonadas e juntas plumosas também ocorrem, porém de maneira mais restrita. Preenchimentos por calcita e óxidos são comuns em fraturas sem indicação cinemática nestas rochas.

Nas unidades sedimentares os principais indicadores cinemáticos observados são fraturas escalonadas. Pares conjugados de fraturas também são estruturas relativamente comuns nessas unidades. Degráus e estrias em falhas são bastante raros e, normalmente, de difícil observação. São ainda encontrados deslocamentos de camadas. A recorrência de eventos nessas unidades, com a superimposição de estruturas, muitas vezes parece mascarar os registros estruturais.

Estruturas em flor ocorrem em diversas unidades e normalmente estão indicando regime transcorrente compressional (transpressional - falhas em flor positivas). Localmente, porém, podem representar a partição da deformação associada a sistemas transtensionais regionais.

análise dinâmica preliminar

Os dados foram agrupados segundo critérios estruturais (próximos às grandes falhas regionais) e também por unidades stratigráficas. Foram coletadas amostras em 21 pontos distintos (fig. 1), perfazendo um total de 54 indicadores. As análises de paleotensões foram executadas a partir de atitudes de estrias e degraus associados às falhas, utilizando-se o critério de Mohr-Coulomb, através do aplicativo Sigmas (Freitas *et al.* 2005).

Através da análise de todo o conjunto de dados (fig. 12) observam-se duas concentrações

principais para as tensões calculadas. Ocorre uma grande concentração com direção NE-SW a E-W e outra de menor magnitude com direção NNW-SSE. Estas direções, indicadas como σ_1 -I e σ_1 -II, representam o reflexo de fases deformacionais *D1* e *D2* definidas por Strugale (2002) estudando o Grupo São Bento na região do Arco de Ponta Grossa. Este autor definiu, para esses eventos, idades eocretácea e neocretácea a terciária. O evento *D2* definido por esse mesmo autor apresenta, entretanto, σ_1 mais concentrado próximo à direção E-W. Os dados indicados em σ_1 -II, aqui com maior espalhamento, podem estar relacionados à rotação associada à Placa Sul-americana durante a abertura do Oceano Atlântico, ou ainda a um terceiro episódio tectônico.

Outro aspecto que pôde ser observado através desta análise efetuada é uma possível oscilação da tensão máxima principal de direção NE-SW (*D2*). Nos pontos indicados como 1, 3 e 5 (fig. 1) foram observadas falhas normais e dextrais de direção NE-SW. As tensões σ_1 calculadas para as falhas transcorrentes (pontos 3 e 5) apresentam direções NE-SW a ENE-WSW, compatível com σ_2 calculado para as falhas normais (ponto 1). As tensões σ_3 permanecem posicionadas de NNW-SSE a NW-SE (fig. 13). Estas relações podem estar indicando uma variação de σ_1 para σ_2 . Este mesmo aspecto pôde ser observado no ponto 19, onde nos mesmos planos foram observados indicadores transcorrentes e normais (fig. 14). Fatores relacionados ao reajuste de blocos, por aumento na taxa de sobrecarga, podem afetar o condicionamento das tensões. Desta forma, σ_1 se posicionaria próximo à vertical, e a tensão principal intermediária (σ_2) passaria a ocupar a posição inicial de σ_1 .

Através da divisão dos dados conforme seu posicionamento stratigráfico, foram elaborados dois diagramas para as tensões máximas, intermediárias e mínimas para as unidades paleozóicas e mesozóicas (fig. 15). A direção anteriormente indicada como σ_1 -I (*D1* com direção NNW) é observada somente nas unidades mesozóicas, enquanto nas unidades paleozóicas nota-se grande concentração para a tensão principal apenas na direção E-W a NE (σ_1 -II ou *D2*). Desta forma, infere-se que o evento indicado σ_1 -I pode

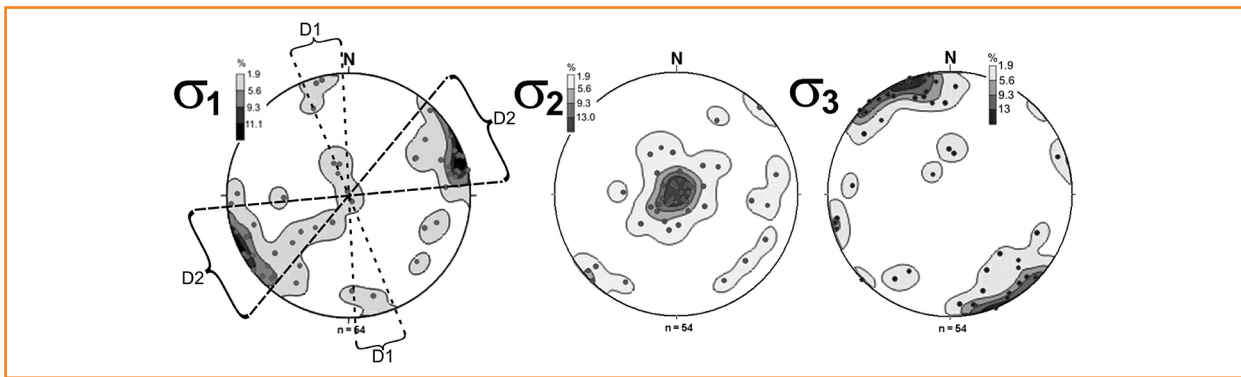


Figura 12

Tensores σ_1 , σ_2 e σ_3 calculados e indicação de duas concentrações principais observadas.

Figure 12

Calculated σ_1 , σ_2 and σ_3 tensors and the observed main concentrations.

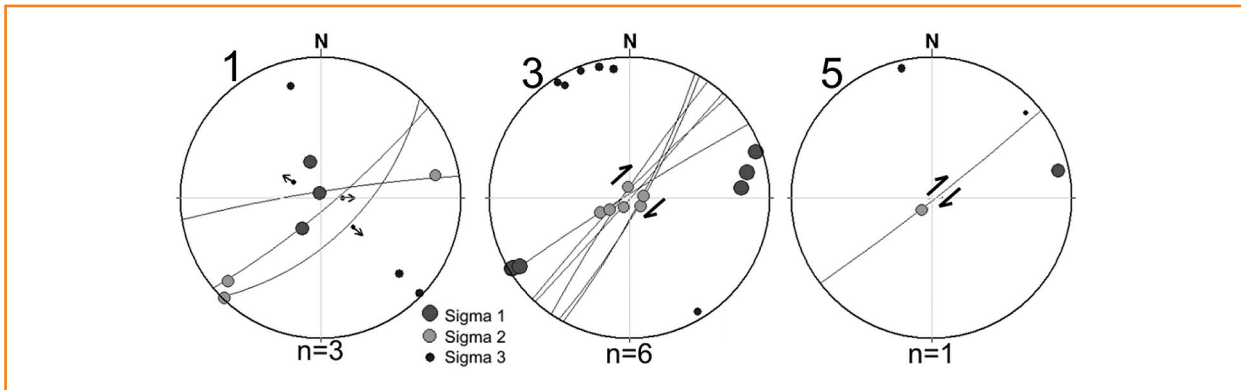


Figura 13

Tensores σ_1 , σ_2 e σ_3 calculados para os pontos indicados. Localização dos pontos na figura 1.

Figure 13

Calculated σ_1 , σ_2 and σ_3 tensors for indicated outcrops. The location of those outcrops is shown on figure 1.



Figura 14

Possível variação entre as tensões principais σ_1 e σ_2 – ponto 19.

Figure 14

Possible variation between the principal stresses σ_1 and σ_2 – Outcrop 19.

ter influência mais sutil que σ_1 -II, estruturando, na área de estudo, mais intensamente apenas a porção superior, mais rúptil, da seção sedimentar.

implicações das análises executadas no SP I-RB

Através das análises indicadas no capítulo anterior, por meio de técnicas diversas, foi observado que as respostas obtidas a partir dos lineamentos com os sensores Landsat7 e SRTM90 representam diferentes implicações quando comparados. Devido às diferentes resoluções das ima-

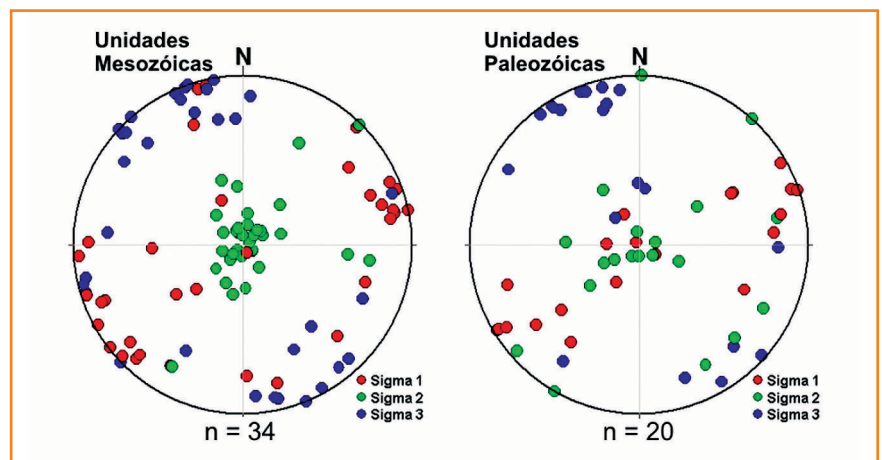


Figura 15 – Tensões σ_1 , σ_2 e σ_3 calculadas para os dados obtidos nas unidades mesozóicas e paleozóicas.

Figure 15 – Calculated σ_1 , σ_2 and σ_3 tensors for outcrops in mesozoic and paleozoic units.

gens SRTM e Landsat7, os resultados obtidos foram considerados como representativos de ordens de grandeza distintas. O MDE SRTM é mais sensível às estruturas de maiores ordens de grandeza (1ª e 2ª ordens), enquanto as imagens Landsat7 apresentam maior detalhamento de feições de menores ordens (2ª e 3ª ordens), porém relacionadas aos mesmos sistemas tectônicos, relativos a cada fase deformacional. A percepção do intérprete para o traçado das feições é condicionada pela resolução, e os elementos morfotectônicos representam, desta maneira, a partição da deformação em várias escalas. Através destas características, e ainda com as feições estruturais obtidas com os dados geofísicos, foi então elaborado o mapa litoestrutural na escala 1:500.000 da área estudada.

A importância dessas feições, indicadas em diferentes ordens de grandeza, tem relação direta com os aspectos de migração e convergência de fluidos, bem como para a integridade da seção selante. Os atributos geométricos e também direcionais, calculados para os lineamentos obtidos com os diferentes sensores, representam desta forma níveis distintos de relação aos parâmetros analisados para o SP I-RB.

Como os modelos pressupõem que estruturas de maior ordem de grandeza são relacionadas às células de fluxo regionais (Rostirolla *et al.* 2003), as estruturas apontadas como envolvendo o embasamento, e intermediárias (estas últimas em caráter mais restrito), seriam responsáveis por grandes volumes de migração. Esta característica é apontada principalmente para compartimentos regionais, com geometrias aproximadamente retangulares. São limitadas por grandes estruturas de direções NE e NW como direções principais. Rostirolla *et al.* (2003) apontam como exemplos de limites para estes compartimentos regionais, na Bacia do Paraná, as zonas de falha Lancinha, Guaxupé e Jacutinga (NE) e os lineamentos (de direção NW) Rio Piquirí e Candido de Abreu. Para a área estudada, além dos lineamentos regionais NE e NW apontados, parecem também exercer influência significativa na compartimentação do arcabouço estrutural feições regionais de direção E-W e NNE. Este aspecto fica bastante claro quando se observa a sobreposição das

estruturas, obtidas com os sensores geofísicos, às isolitas das formações Rio Bonito e Irati, e também ao volume de hidrocarbonetos migrado pelo efeito das intrusões ígneas (fig. 16). As estruturas de direção E-W apresentam pequenos rejeitos verticais associados, e devido a isto podem apresentar um papel de menor importância na migração de hidrocarbonetos. Entretanto essas mesmas estruturas podem ter importância fundamental como destruidoras de acumulações formadas previamente ou como condutos de caráter local.

Nota-se que as estruturas de direção E-W estão segmentando diferentes compartimentos nos dados de isolitas e de volume migrado de hidrocarbonetos (fig. 16). Grandes lineamentos com direção NNE também aparecem como controle regional na segmentação de diferentes domínios nos mapas indicados.

Já as estruturas de menores ordens de grandeza, indicadas principalmente pelos sensores de superfície SRTM90 e Landsat7, podem estar associadas às convergências e/ou barreiras para fluxos. Estas características apresentam, entretanto, caráter localizado. Desta forma, através de análises com os mapas de atributos gerados, como demonstrado a seguir, pode-se indicar algumas correlações prospectivas regionalmente. Sensores remotos de maiores resoluções devem ser utilizados para a delimitação mais detalhada de possíveis prospectos, através da geração de mapas de atributos com células de busca de menores dimensões.

Através dos mapas de atributos das feições lineares, observam-se para a porção centro-sudoeste da área regiões com características propícias para a convergência de fluxo. Zonas de baixa intensidade de estruturas, coincidentes com altos valores de comprimento médio dos traços responderiam aos possíveis alvos prospectivos quando próximos aos altos de conectividade e densidade. Migrações laterais, próximas aos condutos regionais, podem estar alimentando regiões de maior integridade na área. Os poços pioneiros 1-TP 0001 SC e 1-TP 0002 SC, localizados nesta região, apresentaram indícios de gás e óleo, corroborando desta forma o modelo utilizado (fig. 17).

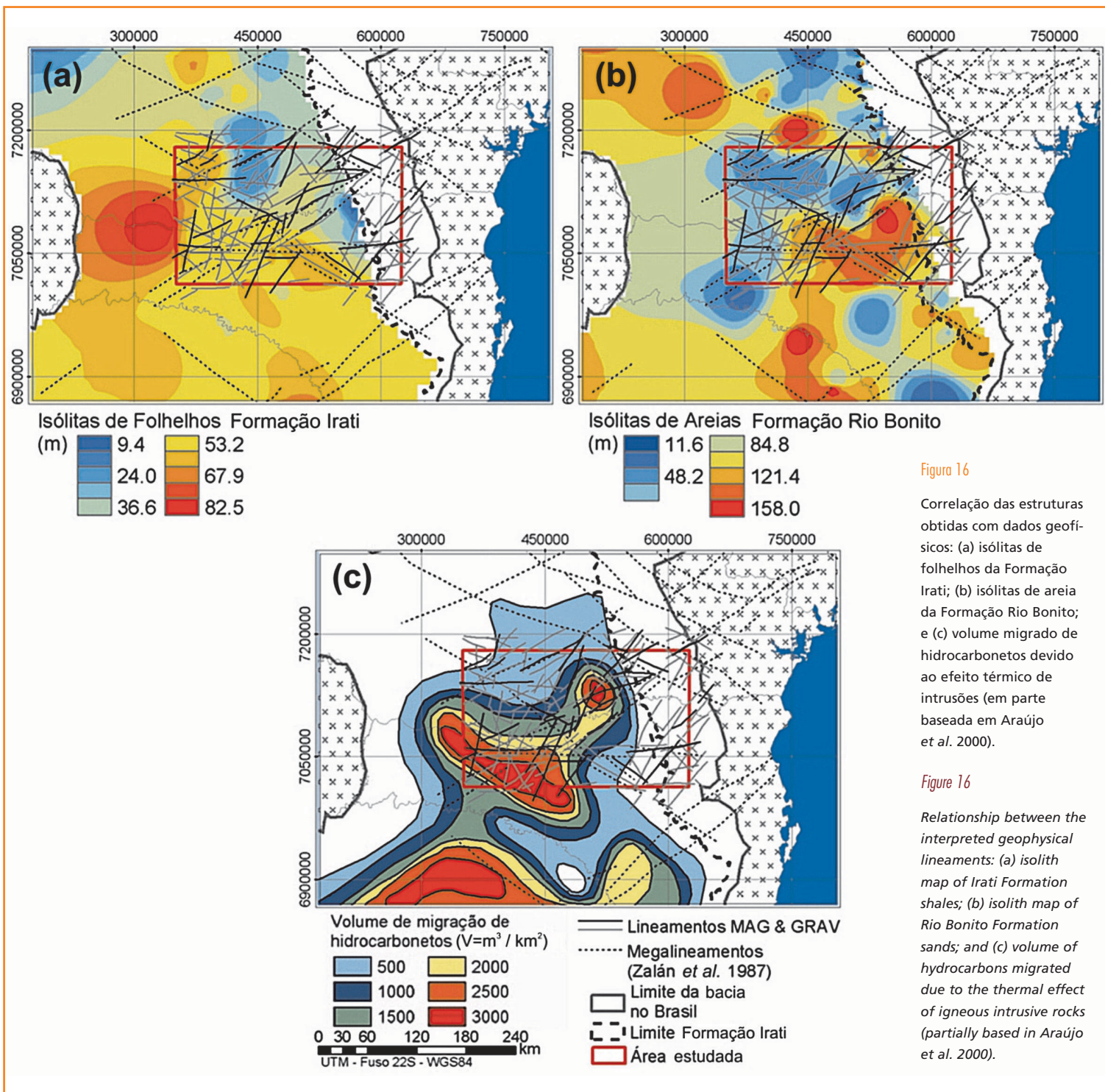


Figura 16

Correlação das estruturas obtidas com dados geofísicos: (a) isólitas de folhelhos da Formação Irati; (b) isólitas de areia da Formação Rio Bonito; e (c) volume migrado de hidrocarbonetos devido ao efeito térmico de intrusões (em parte baseada em Araújo et al. 2000).

Figure 16

Relationship between the interpreted geophysical lineaments: (a) isolith map of Irati Formation shales; (b) isolith map of Rio Bonito Formation sands; and (c) volume of hydrocarbons migrated due to the thermal effect of igneous intrusive rocks (partially based in Araújo et al. 2000).

Ainda com a investigação de parâmetros de lineamentos observou-se, para as estruturas regionais de direção NW, maiores valores de frequência, comprimentos parciais e totais, densidade e intensidade. Já as estruturas de direção NE apresentam em superfície uma resposta de baixos valores para estes parâmetros, porém com compri-

mento médio de lineamentos maior do que daqueles das regiões adjacentes. Estes aspectos podem indicar um maior sucesso prospectivo às estruturas de direção regional NE, principalmente quando se referindo ao aspecto de maior integridade de selos. Neste caso, blocos adjacentes às falhas de direção NE tenderiam a sofrer alimenta-

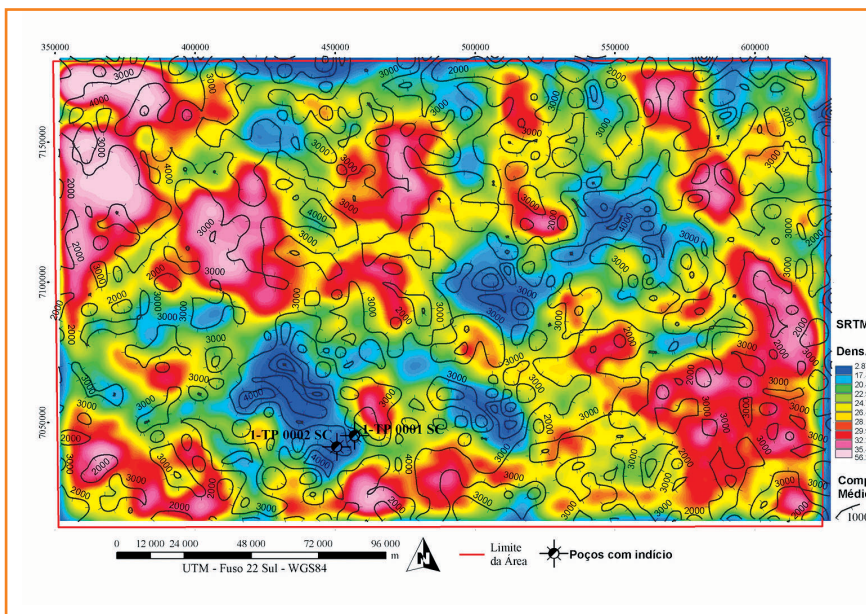


Figura 17

Correlação entre atributos de densidade e comprimento médio de estruturas. Poços com indicio de gás e óleo indicados.

Figure 17

Density and mean size of interpreted linear features. Wells with gas and oil shows have been indicated.

ção lateral a partir de falhas nesta mesma direção, ocasionando sítios de acumulações com maiores probabilidades de retenção e preservação.

Estruturas geradas contemporaneamente aos momentos críticos do SP I-RB apresentam importante papel na migração. Devido ao cataclasmamento, e conseqüente geração de vazios associados à permeabilidade secundária, estas estruturas se definem como rotas de migração. Entretanto, através de cimentação posterior estas mesmas estruturas seriam barreiras aos fluxos de hidrocarbonetos (Aydin, 2000; Magnavita, 2000; Rostirolla *et al.* 2003). Além da característica indicada, de posterior geração de barreiras a partir de condutos, as falhas cimentadas podem apresentar características de convergência de fluidos em zonas laterais ou adjacentes às suas superfícies. Desta forma, os mapas de atributos gerados para os lineamentos devem ser analisados de maneira criteriosa, preferencialmente com trabalhos estruturais de detalhe e semidetalhe associados.

Através de uma análise detalhada no Alto Estrutural de Quatiguá, região onde afloram as formações Irati e Rio Bonito, Rostirolla *et al.* (2000) observaram dois momentos principais para a geração de estruturas trapeadoras. O primeiro evento tem caráter transcorrente compressional, associado à Orogenia La Ventana, e se posiciona no final do Permiano. Seriam formadas, então, estruturas em flor positivas. O segun-

do evento indicado pelos autores, de idade cretácea, apresenta comportamento transtensional e afetaria as estruturas inicialmente formadas, promovendo um rearranjo de suas características geométricas originais. No primeiro caso, as armadilhas estariam posicionadas de maneira mais centralizada à estrutura. Já naquelas afetadas pelo segundo evento os prospectos estariam também posicionados mais afastados da raiz da estrutura.

Estruturas em flor positivas, observadas na área de estudo, têm, desta forma, grande importância na configuração de armadilhas para hidrocarbonetos. Estruturas observadas na área de estudo configuraram-se, normalmente, correlatas às estruturas do segundo evento indicado pelos autores supracitados.

No SP I-RB a migração de fluidos da rocha geradora até o respectivo reservatório, posicionado estratigraficamente abaixo dos folhelhos geradores, em condições normais, ocorre através do aumento na pressão de fluidos no momento da geração. Aspectos relacionados às falhas normais têm então importância direta nas relações de posicionamento estratigráfico lateral entre as formações Irati e Rio Bonito. Já que a geradora se posiciona estratigraficamente acima do reservatório, a migração, nestes casos, seria auxiliada através da condição de lateralização das referidas unidades. A importância dos rejeitos associadas ao posicionamento lateral destas unidades foi discutida por Strugale (2002). A migração, associada às falhas com grandes rejeitos verticais teve, segundo este autor, influência direta na migração secundária ascendente para abastecimento de arenitos da Formação Pirambóia (Grupo São Bento). Estas estruturas, associadas ao evento tectônico distensivo eocretáceo, apresentariam, segundo o autor, maiores rejeitos na região próxima ao Arco de Ponta Grossa e estariam associadas às falhas de direção NW.

As estruturas de direção N-S apresentariam, conforme os modelos indicados, caráter distensional associado. Falhas normais podem estar associadas a estas estruturas, apresentando as mesmas características de posicionamento estratigráfico privilegiado com relação à migração lateral de fluidos. O aspecto distensional também poderia estar relacionado às características de

ruptura da seção sedimentar superior afetada (inclusive seção selante), com escape vertical e, desta forma, perda de fluidos associados. A percolação de águas superficiais, através dessas estruturas, também poderia afetar eventuais acumulações de hidrocarbonetos por degradação.

conclusões

Através da interpretação e integração dos diversos resultados obtidos, foram observadas, no Sistema Petrolífero Irati - Rio Bonito, importantes relações nas suas características de reservatório com os dados estruturais estudados:

- Estruturas de subsuperfície (intermediárias e envolvendo o embasamento) e correspondentes zonas de falhas superficiais apresentam um comportamento direcional por vezes divergente. As estruturas de maior ordem podem estar afetando células de fluxo regionais, enquanto as estruturas de menor ordem estariam relacionadas às barreiras e/ou convergência de fluidos em unidades de fluxo locais.
- As estruturas regionais de direção NE apresentam, para os lineamentos de superfície, respostas associadas às menores frequências, comprimentos parciais e totais, densidade e intensidade, quando comparadas às estruturas de direção NW. Estas relações podem indicar uma maior integridade das trapas associadas às zonas de falha de direção NE.
- Estruturas traçadas a partir dos sensores Landsat7 e SRTM demonstram divergências observadas através dos mapas de atributos gerados e também distintas dimensões fractais. Estas incompatibilidades podem estar associadas às diferentes ordens de grandeza representadas pelos lineamentos interpretados com os dois sensores, indicando uma possível participação da deformação.
- Zonas de baixa intensidade de estruturas, coincidentes com altos valores de comprimento médio dos traços responderiam a possíveis

alvos prospectivos quando próximos a altos de conectividade e densidade. A migração lateral, próxima aos condutos regionais, pode estar alimentando regiões de maior integridade na área. Os poços pioneiros 1-TP 0001 SC e 1-TP 0002 SC, localizados em regiões análogas a estas características, apresentaram indícios de gás e óleo, corroborando, desta forma, o modelo utilizado.

- Caso realmente geradas a partir do arqueamento regional indicado, ou por outros tipos de esforços distensivos, as falhas de direção N-S podem estar associadas aos escapes de hidrocarbonetos por condutos verticais gerados em suas formações, bem como fraturamento da seção selante e destruição de acumulações supostamente formadas em período anterior.
- Feições estruturais distensionais, associadas aos rejeitos verticais, apresentam características essenciais no auxílio à migração de fluidos através da lateralização entre as formações Rio Bonito e Irati. Mapeamentos estruturais de detalhe devem ser executados para a detecção destas estruturas.
- Estudos de detalhe também devem ser executados para a localização de estruturas em flor. Trapas estruturais devem estar associadas preferencialmente a estas estruturas. A recente constatação de uma ocorrência de óleo na região de Joaquim Távora, próximo ao Alto Estrutural de Quatiguá, região onde Rostrolla *et al.* (2000) descreveram estruturas acumuladoras de óleo, pode comprovar o potencial destas feições como principais trapeadoras da bacia.

agradecimentos

À Prof. Dra. Márcia Quintas pela disponibilização dos dados gravimétricos utilizados e ao Prof. Msc. Fernando Mancini pela discussão e revisão; ao Dr. Eugênio V. dos Santos Neto e ao outro revisor anônimo pelas críticas e sugestões

apontadas. Rafael Correia de Freitas agradece a concessão de bolsa pela Petrobras (via FUNPAR – Fundação da Universidade Federal do Paraná) e ao Laboratório de Análise de Bacias e Petrofísica (LABAP) - Departamento de Geologia / Universidade Federal do Paraná (DEGEOL/UFPR) pela infra-estrutura. Sidnei Pires Rostirolla agradece à concessão de bolsa de pesquisa processo CNPq 350905/99-1.

referências bibliográficas

ARAÚJO, L. M.; TRIGÜIS, J. A.; CERQUEIRA, J. R.; FREITAS, L. C. S. **The atypical Permian Petroleum System of the Paraná Basin, Brazil**. Tulsa, Okla. : American Association of Petroleum Geologist, 2000. p. 377-402. (AAPG. Memoir, 73).

ARTUR, P. C. **Paleolineamentos na Bacia do Paraná: Favorabilidade para acumulação de petróleo**. Curitiba : Universidade Federal do Paraná, 1998. 202p. Dissertação (Mestrado).

AYDIN, A. Fractures, faults and hydrocarbon entrapment, migration and flow. **Marine and Petroleum Geology**, Amsterdam, v. 17, n. 7, p. 797-814, Aug. 2000.

BARTOSZECK, M. K. Análise de dados georreferenciados para prospecção de hidrocarbonetos na Bacia do Paraná, In : EVENTO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 8., 2000, Curitiba. **Anais...** Curitiba : Universidade Federal do Paraná, 2000.

BAILEY, M.; CLARK, D. Using ChromaDepth to obtain inexpensive single-image stereovision for scientific visualization. **Journal of Graphics Tools**, Wellesley, v. 3, n. 3, p. 1-9, 1998.

CERQUEIRA, J. R.; SANTOS NETO, E. V. Papel das intrusões de diabásio no processo de geração de hidrocarbonetos na Bacia do Paraná. In : Congresso Brasileiro de Petróleo, 3., 1986, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro : Instituto Brasileiro de Petróleo/PETROBRAS, 1986. 15 p. TT-73.

FREITAS, R. C. de. **Análise estrutural multitemática**

do Sistema Petrolífero Irati – Rio Bonito, Bacia do Paraná. Curitiba : Universidade Federal do Paraná, 2005. 98 p. Dissertação (Mestrado).

FREITAS, R. C. de; ROSTIROLLA, S. P.; MANCINI, F. Auxílio computacional na análise de lineamentos obtidos por sensores remotos. In : CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 42., 2004, Araxá. **Anais...** Araxá : Sociedade Brasileira de Geologia, 2004. 1 CD-ROM.

FREITAS, R. C. de; ROSTIROLLA, S. P.; FREITAS, D. C. Desenvolvimento de um aplicativo para determinação de paleotensões pelo critério de Mohr-Coulomb. In : SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 10., 2005, Curitiba. **Resumos Expandidos...** Curitiba : Sociedade Brasileira de Geologia, 2005.

FITZGIBBON, A.; PILU M.; FISHER, R. B. Direct least square fitting of ellipses. **Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 21, n. 5, p. 476-480, 1999.

GILLESPIE, P. A.; HOWARD, C. B.; WALSH, J. J.; WATTERSON, J. Measurement and characterization of spatial distributions of fractures. **Tectonophysics**, Amsterdam, v. 226, n. 1-4, p. 113-141, Nov. 1993.

GUARNIERI, P. Regional strain derived from fractal analysis applied to strike-slip fault systems in NW Sicily. **Chaos, Solitons and Fractals**, v. 14, n. 1, p. 71-76, Jul. 2002.

MACEDO, J. M. Evolução tectônica da Bacia de Santos e áreas continentais adjacentes. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 3, p.159-173, 1989.

MAGNAVITA, L. P. Deformation mechanisms in porous sandstones: implications for development of fault seal and migration paths in the Recôncavo Basin, Brazil. In: MELLO, M. R.; KATZ, B. J. (Eds). **Petroleum systems of South Atlantic margins**. Tulsa. Okla.: American Association of Petroleum Geologists, 2000. p. 195-212. (American Association of Petroleum Geologists. Memoir, 73).

MADANI, A. A. Selection of the optimum LANDSAT TM bands for automatic lineaments extraction, Wadi Natash area, South Eastern Desert, Egypt. In: ASIAN CONFERENCE ON REMOTE SENSING, 22., 2001,

- Singapore. **Proceedings...** Singapore: National Univeristy of Singapore, 2001.
- MILANI, E. J.; KINOSHITA, E. M.; ARAÚJO, L. M.; CUNHA, P. R. C. Bacia do Paraná: possibilidades petrolíferas da calha central. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 4, n. 1, p. 21-34, 1990.
- MILANI, E. J.; 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.
- O'LEARY, D. W.; FRIEDMAN, J. D.; POHN, H. A. Lineament, linear lineation: some proposed new standards for old terms. **Geological Society of America Bulletin**, Boulder, Colo., v. 87, p. 1463-1469, 1976.
- PEITGEN, H. O.; JÜRGENS, H.; SAUPE, D. **Fractals for the classroom**, part 1. New York : Springer, 1992.
- QUEIROZ, C. L.; MENESES, P. R.; JOST, H. Lineamentos em imagens de sensores remotos e seu significado estrutural nos terrenos granito-greenstone belt de Orixás (GO). **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 30, n. 4, p. 655-662, 2000.
- QUINTAS, M. C. L. **O embasamento da Bacia do Paraná** : reconstrução geofísica do seu arcabouço. São Paulo : Universidade de São Paulo, 1995. 213 p. Tese (Doutorado).
- RIBEIRO JR., P. J.; DIGGLE, P. J. **The geoR package**. Version 1.3-14, Set. 2003, Disponível em: < <http://www.est.ufpr.br/geoR> >. Acesso em: 09 set. 2003.
- ROHRBAUGHT Jr., M. B.; DUNNE, W. M.; MAULDON, M. Estimating fracture trace intensity, density, and mean length using circular scan lines and windows. **American Association of Petroleum Geologists. Bulletin**, Tulsa, Okla., v. 86, n. 12, p. 2089-2104, Dec. 2002.
- 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.
- ROSTIROLLA, S. P.; APPI, C. J.; 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, 9., 2003, Búzios, 2003. **Boletim de resumos...** Búzios : [s.n.], 2003. p. 358-360.
- ROSTIROLLA, S. P.; MANCINI, F.; RIGOTI, A. Reativação de Megalineamentos na Evolução Fanerozóica da Placa Sul-Americana. In : SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 10., 2005, Curitiba. **Resumos Expandidos**. Curitiba : Sociedade Brasileira de Geologia, 2005.
- SOARES, P. C.; BARCELLOS, P. E.; CSORDAS, S. M. **Análise, interpretação e integração de lineamentos a partir de imagens (Radar-Landsat) e suas relações com a tectônica da Bacia do Paraná**. São Paulo : PAULIPETRO, 1982. 1 v. Relatório. Consórcio CESP/ IPT.
- STRUGALE, M. **Arcabouço e evolução estrutural do Arco de Ponta Grossa no Grupo São Bento (Mesozóico)** : implicações na hidrodinâmica do Sistema Aquífero Guarani e na migração de hidrocarbonetos na Bacia do Paraná. Curitiba : Universidade Federal do Paraná, 2002. 124 p. Dissertação (Mestrado).
- VOLLAND, S.; KRUHL, J. H. Anisotropy quantification: the application of fractal geometry methods on tectonic fracture patterns of a Hercynian fault zone in NW Sardinia. **Journal of Structural Geology**, v. 26, n. 8, p. 1499-1510, Aug. 2004.
- ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; 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, Okla.: American Association of Petroleum Geologists, 1990. p. 681-708. (American Association of Petroleum Geologists. Memoir, 51).

expanded abstract

The tectonic events that occurred in the Paraná Basin have generated and reactivated various structures of several geometries and orders of magnitude. Structural heritage related to basement discontinuities and new forms of fault families can bring different responses about petroleum system elements. Thus, the observation of structural aspects in distinct depth levels is fundamental to understand the systems present in this basin. To investigate those different structural levels Landsat7 satellite imagery and SRTM90 DEM dataset were analyzed with detailed surface mapping. Gravimetric and magnetic data were used for the subsurface investigation.

Initially, lineaments were obtained by the interpretation of Landsat and SRTM, by using filtering methods, enhancements and stereovision, such as anaglyphs for the SRTM data and SOBEL directional filtering for Landsat imagery. Afterwards, the lineaments obtained were studied with several techniques, including directional analysis, features counting (carried out with the division of the area in regular cells) and quantification of fractal dimension in a selected area. Those studies were made with the aid of a developed software (Freitas, 2005), focused on the support of lineament analysis.

From the aspects obtained by the lineament countings, some correlations were made:

Lineament Density: important analytical parameter of the seal integrity. Otherwise, it may be associated with the increase of hydrocarbon recovery.

Lineament Intensity: related with aspects of fluid convergence. Through the observation of surface structures, estimations of their underground expression can be estimated.

Lineament Length: the sum of the lengths is correlated with the intensity parameter. Weighted length is associated with fractures continuity. Thus, it has a great importance on migration relationships.

Connectivity: associated with the migration routes and local anisotropy criteria definition. Also, connectivity is related with seal section integrity.

The geophysical data were processed by using different techniques. Upward and analytical signal filtering was performed on the magnetic data. Upward

continuations were made with several altitudes, with the purpose of studying different dip anomalies. The gravimetric field data used has a poor sampling. Therefore the generated Bouguer anomalies - with large wave lengths - were interpreted as the better basement indicator.

The integrated analysis of the data obtained from Landsat7 imagery, SRTM90 DEM data, gravimetric and magnetic maps let to the following observations. The geometry of the Cratonic block defined by Milani and Ramos (1998) - located in the northwest portion of the area and elongated in the NE-SW direction - have similar geometry to a gravimetric low observed in the same area. This structure also shows a possible correlation with the regional Taxaquara Lineament (Zalán et al. 1990).

The divergence concerning the Lancinha Fault Zone direction has already been studied. Some authors (Zalán et al. 1990; Quintas, 1995) indicate to this fault zone is a continuous NE-SW trend, while others (Soares et al. 1982; Milani and Ramos, 1998) point out an inflection to a NNE-SSW trend near the center of the study area. The NE-SW continuity was outlined using surface and geophysical sensors. The inflection mentioned before could have resulted from the interference of the NNE-SSW trending structures that cut the Lancinha Fault Zone in the same area where the inflection is indicated.

Four regional trends were observed in the studied area by analyzing both surface and geophysical data. 1) A N60°-70°E direction, with long linear traces and widely spread. 2) A N30°-40°E trend with segmented traces. 3) In the NW quadrant, structures in relay occur with strong intensity. 4) E-W trending lineaments with broad continuity are restricted to some structural corridors. A NNE to NNW trend, anastomosed and with wide continuity is observed only with surface sensors. Thus, this trend was associated with neoformed and shallower structures, relative to the plate flexure and with axes oriented near the N-S direction.

Field studies were focused on kinematics data that would provide a dynamic analysis. Some assumptions were made with the aid of the developed software for paleostress computation (Freitas et al. 2005), using Mohr-Coulomb criteria. Two main stress concentrations were observed. One oriented in the NE-SW to E-W directions, and a second trending NNW-SSE. Those directions can refer to **D1** and **D2** deformation events defined by Strugale (2002) with Neo-Cretaceous and Neo-Cretaceous to Tertiary ages,

respectively. A possible variation in the NE-SW oriented (**D2**) stress component was also observed. These changes may be related to block adjustments due to the growth of overload rates. The major principal stress, which initially is positioned horizontally, changes to a vertical position, while the intermediary principal stress occupies the original horizontal position of the major principal stress.

Some relations between the studied structural aspects and the Irati-Rio Bonito Petroleum System were observed:

- *The NE regional trend may be related to structural traps with greater sealing section integrity.*
- *Features interpreted with Landsat7 and SRTM90 show different responses in the analysis performed. Different orders of magnitude can be demonstrated by the interpreted structures, thus indicating a possible partition of deformation.*
- *Areas with low structure intensity and associated with highs of mean length traces are indicated as prospective targets when they occur near connectivity and density highs. Migration near regional pathways can supply areas of major integrity. Within the studied area two wells (1-TP 0001SC and 1-TP 0002SC) located in a region owing these pointed characteristics of intensity, length, connectivity and density have gas and oil shows, thus contributing to the suggested model.*
- *If it has been actually generated by extensional stresses, the N-S structural trend may be related to hydrocarbon losses by vertical pathways. Previously formed traps could also have been destroyed by these structures.*
- *Extensional features with vertical displacements play an important role in hydrocarbon migration. This characteristic leads to the lateral positioning of Irati and Rio Bonito formations, thus allowing the lateral migration between source and reservoir rocks.*
- *Detailed studies need to be carried out in order to detect flower structures observed in the study area. A recent discovery of oil occurrence in Joaquim Távora district, near the Quatiguá Structural High, region where Rostirolla et al. (2000) depicted traps in flower structures can corroborate the potential of these features as one of the most important traps of the basin.*

autor principal



Rafael Correia de Freitas

Laboratório de Análise de Bacias e Petrofísica

Centro Politécnico

Departamento de Geologia

Universidade Federal do Paraná

e-mail: rcdfreitas@click21.com.br

Rafael Correia de Freitas graduou-se em Geologia pela Universidade Federal do Paraná em 2003. Em 2005 obteve o título de mestre em Geologia Exploratória, também pela UFPR, em dissertação sobre aspectos estruturais associados ao Sistema Petrolífero Irati - Rio Bonito (Bacia do Paraná). Atua em projetos de pesquisa em bacias sedimentares paleozóicas Sul-americanas, vinculado ao Laboratório de Análise de Bacias e Petrofísica (LABAP - UFPR), com enfoque em geologia estrutural, geofísica e sensoriamento.