

A UTILIZAÇÃO DE DADOS DE VÁRIOS SENSORES NA ANÁLISE DE FEIÇÕES MORFOESTRUTURAIS DE INTERESSE À PESQUISA DE PETRÓLEO

C. C. Liu e P. R. Meneses

Instituto de Pesquisas Espaciais

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

Caixa Postal 515 - 12200 - São José dos Campos, SP, Brasil

RESUMO

Este trabalho apresenta um método alternativo para detecção de anomalias morfoestruturais favoráveis a acumulação de hidrocarbonetos, através da interpretação de diferentes produtos de sensoriamento remoto. O método consiste numa sistemática análise dos elementos do relevo e da drenagem para extrair informações de significado geológico, porque supõe-se que estes elementos são largamente influenciados por fatores estruturais e litológicos. Esta pesquisa foi iniciada pela análise de imagens LANDSAT e de RADAR, das quais uma anomalia morfoestrutural foi selecionada para posteriores análises automáticas com dados LANDSAT e interpretações de fotos aéreas. Um suave anticlinal correspondente à área morfoestruturalmente anômala foi identificada pela interpretação das fotos aéreas convencionais e confirmada pelos trabalhos de campo.

ABSTRACT

This report presents an alternative method for detection of morphostructural anomalies favorable to hydrocarbon accumulation, through the interpretation of different products of remote sensing. The method consists in the systematic analysis of the elements of relief and drainage to extract geologic information, because it is supposed that these elements are largely influenced by structural and lithological factors. This research was initiated by the analysis of LANDSAT and SLAR images, from which a morphostructural anomaly was selected for further computer assisted analysis of LANDSAT data and interpretation of aerial photographs. A very gently anticlinal which corresponds to the morphostructurally anomalous area was identified by the interpretation of conventional aerial photographs and confirmed by field works.

1. INTRODUÇÃO

A retomada de pesquisas de prospecção petrolífera na Bacia do Paraná, abriu perspectivas promissoras para os estudos de aplicações de Sensoriamento Remoto de caráter estrutural regional, colocando-o em relação a métodos tradicionalmente empregados, como um método alternativo na detecção de áreas estruturalmente favoráveis à acumulação de hidrocarbonetos. Tal possibilidade ficou demonstrada através do reconhecimento de dezenas de anomalias morfoestruturais detectadas em imagens LANDSAT e de RADAR, a princípio consideradas como prováveis trapas de petróleo. Um programa sistemático, que visa o levantamento regional destas anomalias, foi efetuado pelo INPE-IPT em 1980 e pelo INPE/PAULIPETRO em 1982, na região do Planalto Ocidental Arenítico Basáltico do Estado de São Paulo, tendo-se também efetuado um estudo de avaliação sobre diferentes dados de sensoriamento remoto, em algumas áreas selecionadas (Liu et alii, 1980). Esta avaliação com diferentes níveis de sensoriamento remoto - imagens orbitais LANDSAT, imagens de

é motivo da apresentação deste trabalho, foi executado em 3 fases. A 1ª fase consistiu na detecção das anomalias morfoestruturais, através de interpretação visual de imagens LANDSAT e de RADAR. A 2ª fase, num refinamento da interpretação de anomalias de diferentes graus de estruturação (forte, moderada e fraca), através de análises automáticas de imagens LANDSAT, no analisador I-100. A 3ª fase consistiu na interpretação de fotos aéreas na escala 1:60.000, cujos resultados são mais detalhadamente discutidos neste trabalho.

A fim de se poder avaliar o desempenho da utilização de vários produtos de sensores remotos na análise de áreas morfoestruturalmente anômalas, selecionou-se, para servir de exemplo a este trabalho, a anomalia de Getulina, considerada como uma feição de fraca estruturação geológica (Figura 1).

Um estudo com estas intenções pode fornecer critérios de decisões para estipular até que grau mínimo de estruturação uma morfoes

trutura, detectada inicialmente em imagens de pequenas escala, deve ter, para que se justi

fique o processeguimento de estudos mais detalhados.

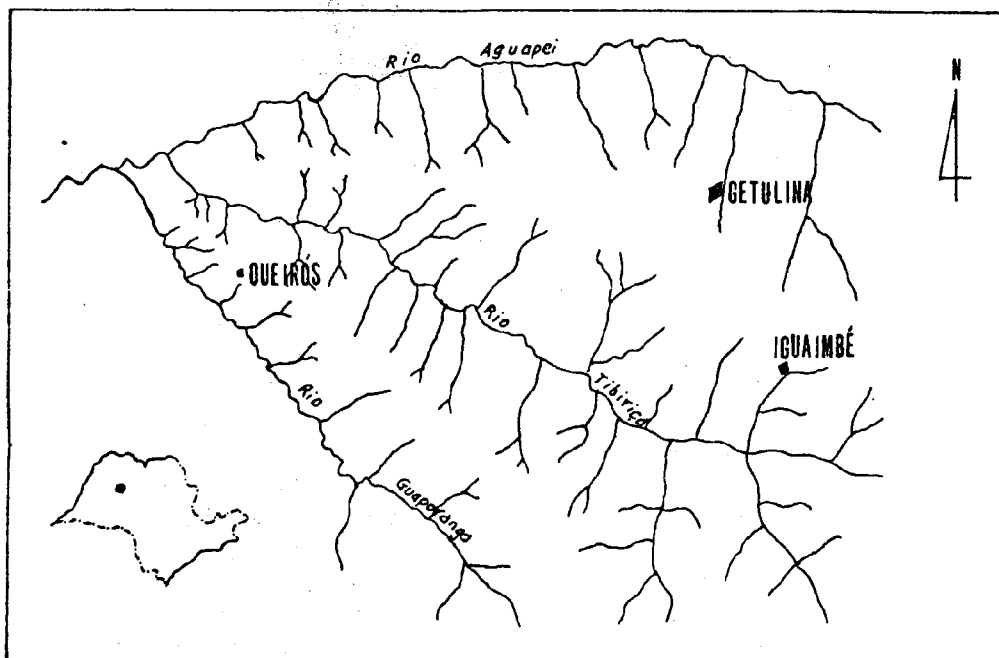


Fig. 1 - Área de estudo

2. PROCEDIMENTOS DE EXECUÇÃO DO TRABALHO

Dados MSS do LANDSAT, formatos em imagens fotográficas de papel na escala de 1:250.000 e em fitas magnéticas compatíveis com computadores, mosaícos de RADAR na escala de 1:250.000 e fotos aéreas verticais na escala de 1:60.000 constituíram os materiais utilizados na análise e na interpretação das feições morfoestruturais, da região do cretáceo Bauru, no Estado de São Paulo. Particularmente cada um destes materiais foram produzidos por sensores de diferentes sistemas de imageamento, obtidos em diferentes níveis de altitude e, portanto, com qualidades e deficiências próprias mas que no entanto podem propiciar resultados bastante satisfatório, senão excelentes, quando utilizadas em conjunto. Esta forma de procurar integrar dados de diferentes sensores parece ser bastante vantajosa em trabalhos que envolvem estudos sistemáticos de caráter regional, pois, sem dúvida, constitui um meio de extrair um maior volume possível de informações, que torna os resultados mais próximos da verdade.

Obviamente, tal integração de dados deve obedecer a uma sequência lógica de procedimentos. Considera-se que a escala em que os dados analisados se apresentam é o principal fator a ser considerado no estabelecimento desta sequência, ao lado das características intrínsecas de cada produto de sensor. No presente estudo, em função dos materiais disponíveis, dividiu-se a sequência dos trabalhos em três fases de operação.

A 1ª fase compreendeu um levantamento sistemático de anomalias morfoestruturais, através da interpretação visual de imagens em preto e branco, LANDSAT e de RADAR, na escala de 1:250.000. A interpretação destas imagens consistiu, basicamente, numa análise dos padrões anômalos da rede de drenagem com características distintas do padrão geral, considerando-se as formas anelares e radiais como as primeiras indicações de feições morfoestruturais anômalas. Nesta fase, através da análise do arranjo assimétrico da drenagem, avaliou-se a possibilidade das formas anômalas comporem altos ou baixos estruturais. Estudaram-se também as relações existentes entre estas formas anômalas e as formas associadas à estruturação linear, como lineamentos, lineações e alinhamentos de drenagem. Como consequência, sugeriu-se a existência de várias dezenas de altos e baixos estruturais na área, alguns dos quais apresentando fortes evidências de refletirem estruturas geológicas profundas e outros apresentando evidências mais fracas.

A 2ª fase compreendeu uma tentativa de refinar a análise das formas dos elementos das morfoestruturas anteriormente detectadas, através de dados LANDSAT processados automaticamente no analisador multiespectral I-100. Para teste foram selecionadas várias morfoestruturas de diferentes graus de estruturação, ou seja, que possuem maior ou menor probabilidade de refletir uma estrutura geológica. É nesta fase que morfoestruturas não tão bem caracterizadas na análise visual da fase anterior venham eventualmente assumir outro grau de importância que torne justificável o prosseguimento.

mento de estudos em níveis de maior detalhe. Os estudos desta segunda fase foram feitos com fitas CCT ("Compatible Computer Tapes"), que foram sujeitas a aplicações de programas de realce por filtragens digitais bidirecionais e "contrast stretched", e com as respectivas composições coloridas, ampliadas em vídeo, na escala de 1:100.000, as quais serviram de material para a interpretação visual. Detalhes dos resultados das aplicações destes programas, no realce de morfoestruturas, podem ser vistos em Paradella et alii (1980). Em muitas das morfoestruturas que continham baixo grau de estruturação não se logrou sucesso em acrescentar outros dados que satisfizessem plenamente as exigências de tornar a área interessante à avaliação para pesquisa de petróleo.

Nota-se que estas duas primeiras fases constituem uma análise e uma interpretação de dados de caráter eminentemente morfoestrutural.

A 3ª fase compreendeu uma interpretação a nível de semidetallhe de fotos aéreas em escala de 1:60.000. Ela representa a última etapa de análise e de fotointerpretação morfoestrutural, que normalmente é realizado em processos semelhantes de pesquisas em área de interesses para prospectos de petróleo, definindo, de certa forma, os trabalhos de campo e a programação de levantamentos geofísicos subsequentes.

3. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

A análise e a interpretação dos dados LANDSAT e de RADAR na escala de 1:250.00, e das ampliações realçadas no I-100, foram baseadas em métodos estabelecidos por Soares et alii (1976, 1981, 1982). O método consiste numa análise morfoestrutural da rede de drenagem, cujo objetivo é determinar a intensidade de estruturação das formas dos seus elementos. A cada uma das formas consideradas é dado um significado geológico.

A rede de drenagem foi obtida das imagens LANDSAT e de RADAR, sendo um dado extremamente confiável, devido às excelentes qualidades destes materiais e à sua rápida execução em relação a qualquer outro material de que se dispõe. Muitos consideram esta atividade de pouco valor, sem saber que a dissidência no traçado dos cursos dos rios ou na omissões de drenagem irá influenciar de sástrosamente a interpretação estrutural.

Os elementos texturais de drenagem analisados, conjuntamente, para definir a existência de uma morfoestrutura foram:

Forma anelar, que representa o reflexo na superfície de camadas flexuradas, sendo por tanto interpretada como um traço de acamamento. Ela é a 1ª indicação que se busca nas iamgens, para identificar uma morfoestrutura.

Forma assimétrica, que fornece indicações de mergulho convergente ou divergente do acamamento (anelar) e define a morfoestrutura como um alto ou baixo estrutural.

Forma radial, que reflete o sentido geral do mergulho.

A maneira como esses elementos se encontram associados, a regularidade, linearidade, extensão, curvatura, etc. de cada um deles de finirão quão intensamente estruturados eles se encontram e, consequentemente, qual o grau de estruturação da morfoestrutura: fraca, moderada ou forte.

As imagens ainda oferecem a análise de um outro tipo de dado que, embora mais complexo em interpretação, pode ser significativo na compreensão da distribuição preferencial das morfoestruturas, dentro de um contexto regional da bacia. Eles são os lineamentos, cujas influências na configuração da morfoestrutura podem ser observadas na definição de seus limites, na orientação do seu eixo maior, ou na disposição das atitudes de acamamento.

Com relação a morfoestrutura de Getulina, a análise e a interpretação das imagens LANDSAT e de RADAR, na escala de 1:250.00, resultaram nas seguintes observações: existência de um padrão anelar com estruturação simples completa (2 anelares que dão a configuração, geralmente oval da anomalia) e intensidade de estruturação de seus elementos fraca, isto é, com formas anelares não tão bem evidenciadas; existência de um padrão radial simples completo (drenagem radial divergente para 4 quadrantes), moderadamente estruturado; existência de indicações de padrões assimétricos discordantes das indicações do mergulho de acamamento esperado.

A interpretação destes dados significa que, embora a drenagem anelar e a radial indiquem a existência de uma morfoestrutura na área, os dados de assimetria, por divergirem no sentido do mergulho ao longo da mesma anelar, tornam dubio o fato de a morfoestrutura expressar umbaixo ou um alto estrutural (Figura 2).

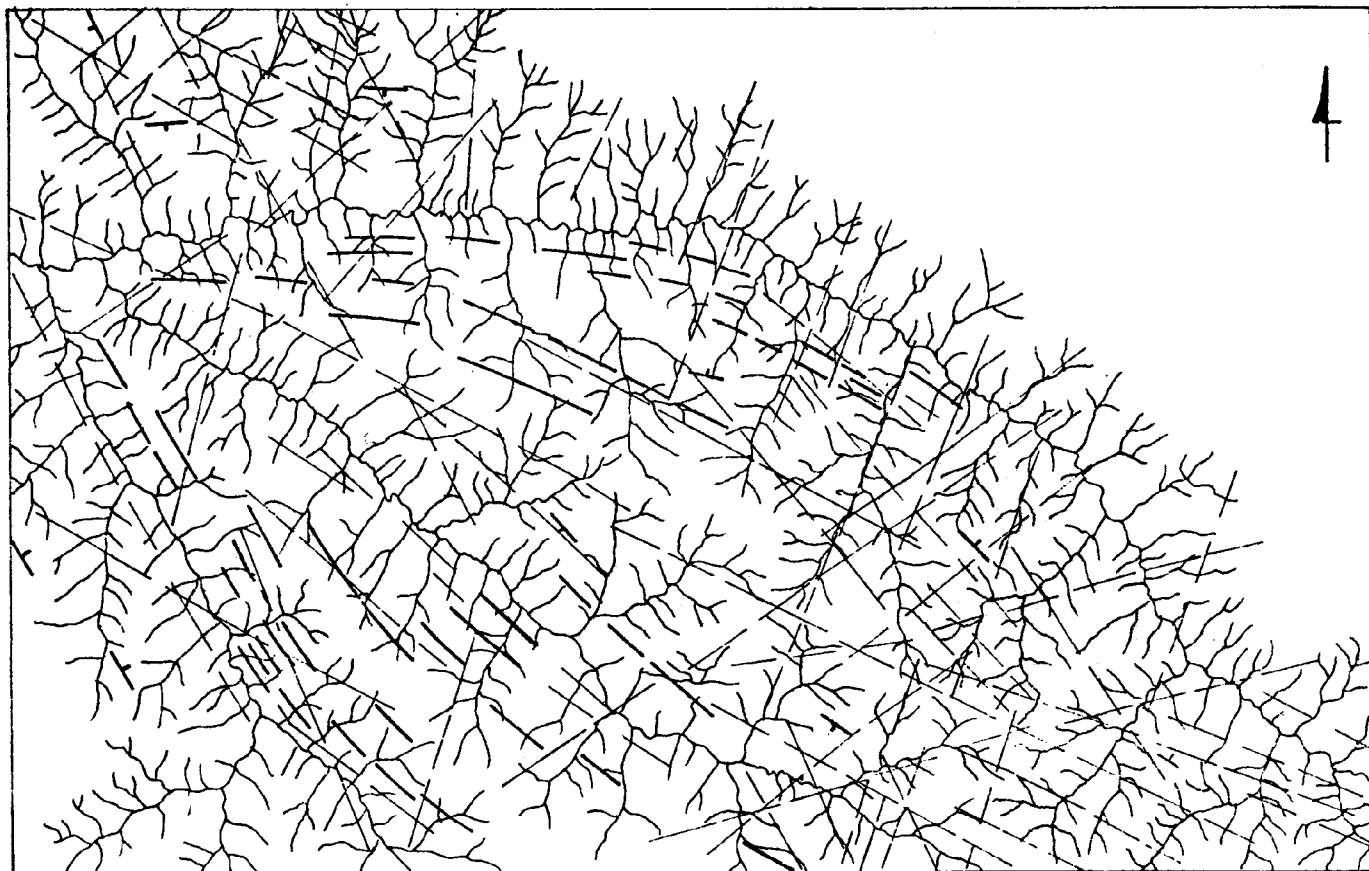


Fig. 2 - Análise morfoestrutural: traços finos - lineamentos por LANDSAT e de RADAR; traços grossos - lineamentos por imagens LANDSAT realçados no I-100; /- assimetria de drenagem (mergulhos).

Consequentemente, a área foi analisada em ampliações de composição coloridas na escala de 1:100.000 de imagens LANDSAT, realçadas por filtragens bidirecionais e "contrast stretch" no analisador multiespectral I-100. Nesta ampliação não se conseguiu melhorar o nível da drenagem extraída na escala de 1:250.000, ou adicionar novos dados como por exemplo, assimetrias de relevo que pudessem solucionar o impasse gerado pelas indicações de mergulho dado pelos modelos assimétricos da drenagem. Entretanto, um outro tipo de feição apresentou-se nas imagens realçadas. Elas se constituíam em pequenas lineações tonais de forma suavemente curvas, localizadas preferencialmente ao longo das formas anelares, numa perfeita concordância com a configuração da morfoestrutura. Isto despertou a ideia de que tais feições pudessem representar possíveis traços de acamamento, refletidos nas imagens por contrastes tonais, provocados pela ocorrência de pequenas quebras negativas de relevo onde, vegetação, diferença de umidade ou mesmo litologia pudessem ocorrer. Mais ainda, devido à distribuição e ao comportamento destas lineações (Figura 2), surgiu a expectativa de que, se realmente elas fossem reflexos de acamamento, estes seriam uniformes no sentido de mergulho, ao longo de toda a extensão da forma anelar de drenagem.

O ponto em que se chegou a interpretação dos dados analisados com as imagens LANDSAT e de RADAR parecia justificar plenamente a continuidade do estudo a níveis de fotos aéreas. Julgou-se, porém, necessário realizar novamente uma completa análise da drenagem e do relevo, como foi executado com as imagens. Isto resultou na aplicação de dois métodos de análise para a interpretação morfoestrutural da anomalia de Getulina. No primeiro método, a drenagem e o relevo foram analisados com o objetivo de determinar o padrão estrutural, independentemente de considerações do substrato litológico.

Novamente, a rede de drenagem foi extraída com o máximo de detalhe permitido e analisada, principalmente, nas suas propriedades de forma assimétrica, formas anômalas, elementos lineares e tropia, a fim de se determinar o seu conteúdo estrutural. Ela foi acompanhada de uma análise semelhante para as formas de relevo, devido a associação íntima que, normalmente, espera-se que aconteça entre as formas de relevo e as de drenagem, de áreas estruturalmente afetadas. A combinação destas análises foi convergida para uma interpretação que possibilitasse definir a anomalia de Getulina como uma estrutura do tipo domo ou anticlinal.

O segundo método de investigação foi proposto em decorrência dos resultados obtidos com a análise anterior, confirmados também pelas análises realizadas com as imagens LANDSAT e de RADAR. Como o estudo das formas de drenagem ou de relevo não demonstraram resultados satisfatórios para uma definição segura e conclusiva da anomalia, como sendo um alto estrutural, partiu-se para uma fotoanálise direcionada tão somente para a interpretação do comportamento do substrato litológico. Tal consideração deve-se à suposição de que baixos mergulhos de acamamento (inferiores e 1 grau) teria esta anomalia, o que explicaria não se ter encontrado nas formas de relevo e de drenagem, uma intensidade de estruturação que permitissem defini-la como estrutura domica ou depressiva.

Esta fotoanálise baseou-se em traçar nas fotos uma subdivisão da Formação Bauru, em tantas unidades de mapeamento quanto possível. Considerando-se as condições desfavoráveis existentes na área, tais como uso intenso do solo e alteração profunda das rochas, muito comum nos sedimentos Bauru, esta subdivisão pôde ser realizada apenas a partir da análise de quebras negativas de relevo e de ocasionais linhas de contrastes tonais, associadas a sutis quebras negativas. A análise estereoscópica destas feições demonstrou que camadas sedimentares quase horizontais distribuíam-se por toda a área de anomalia. Essas pequenas quebras topográficas, que demarcam trechos de horizontes litológicos, alguns aflorantes, são na maioria das vezes, somente notadas em visão estereoscópica de fotos, em virtude do exagero vertical, podendo mesmo passarem desapercibidas nos controles de campo.

Unicamente pela análise destas feições fotogeológicas, vários horizontes litológicos puderam ser inferidos. Baseando-se na semelhança dos elementos de análise fotogeológica, uniformidade de expressão, relação entre quebras negativas e continuidade dos elementos fotogeológicos, quatro horizontes foram selecionados, expressando uma possível subdivisão da Formação Bauru em quatro camadas A, B, C e D, o que resultou na elaboração de um mapa fotogeológico (Figura 3).

4. INFERÊNCIA ESTRUTURAL

A ausência de outras informações estruturais que pudessem descrever a configuração estrutural de anomalia de Getulina, levou à proposição da realizar uma subdivisão da Formação Bauru em várias unidades de mapeamento, a fim de, através do comportamento de suas distribuições e interações, investigar

a configuração estrutural que a área poderia apresentar.

Os três principais rios - Feio, Tibiriçá e Guaporanga - que penetram toda a área de estudo têm os leitos de seus canais praticamente no mesmo nível topográfico. Se os estratos fossem totalmente horizontalizados, era de se esperar encontrar igual número ou igual posicionamento topográfico das quatro unidades subdivididas, junto aos canais dos três rios. Na hipótese de os estratos mostrarem-se uniformemente inclinados para S ou para N, esperar-se-ia encontrar, com maior probabilidade, considerando-se a atual morfologia da área, uma mais completa exposição das quatro unidades, ao longo dos rios Aguapeí (norte) e Guaporanga (sul). Os desenhos da Figura 4 ilustram, esquematicamente as três hipóteses.

Entretanto, nenhuma dessas situações parece ocorrer, como ficou demonstrado com a interpretação do mapa fotogeológico (Figura 3). Ao longo do rio Tibiriçá, em posição central na área, encontram-se, em maior extensão, as quatro unidades subdivididas da Formação Bauru. As unidades mais inferiores, "camadas A e B", que fotogeologicamente estariam mais bem expostas ao longo do rio Tibiriçá, somente são traçadas em pequenas extensão ao longo dos rios Aguapeí e Guaporanga. Para a análise desta situação elaborou-se, a partir da distribuição fotogeológica das unidades e com o auxílio das cartas topográficas na escala de 1:50.000, a interpretação de um perfil fotogeológico (linha AA' no mapa geológico - Figura 3). Deste perfil, um suave anticlinal pôde ser inferido, com seu eixo situando-se aproximadamente ao longo do rio Tibiriçá, e com seus flancos mergulhando suavemente para NE e SW, em cerca de menos de 1 grau (Figura 5).

Um rápido trabalho de campo foi então realizado para confrontar os dados da fotointerpretação. Cerca de 40 afloramentos, possíveis de exame, foram analisados; felizmente, como estavam distribuídos por toda a área, eles permitiram retratar litologicamente todas as 4 unidades de mapeamento individualizadas e estabelecer uma coluna litoestratigráfica (Figura 6). Aparentemente foi possível estabelecer uma correspondência das unidades fotogeológicas, com as unidades de campo, de certa forma confirmando-se a interpretação dada à morfoestrutura.

Contudo, em razão da quase horizontalidade das camadas, superfícies de acamamento irregulares pelas condições de preservação dos afloramentos, atitudes de acamamento não puderam ser medidas com segurança.

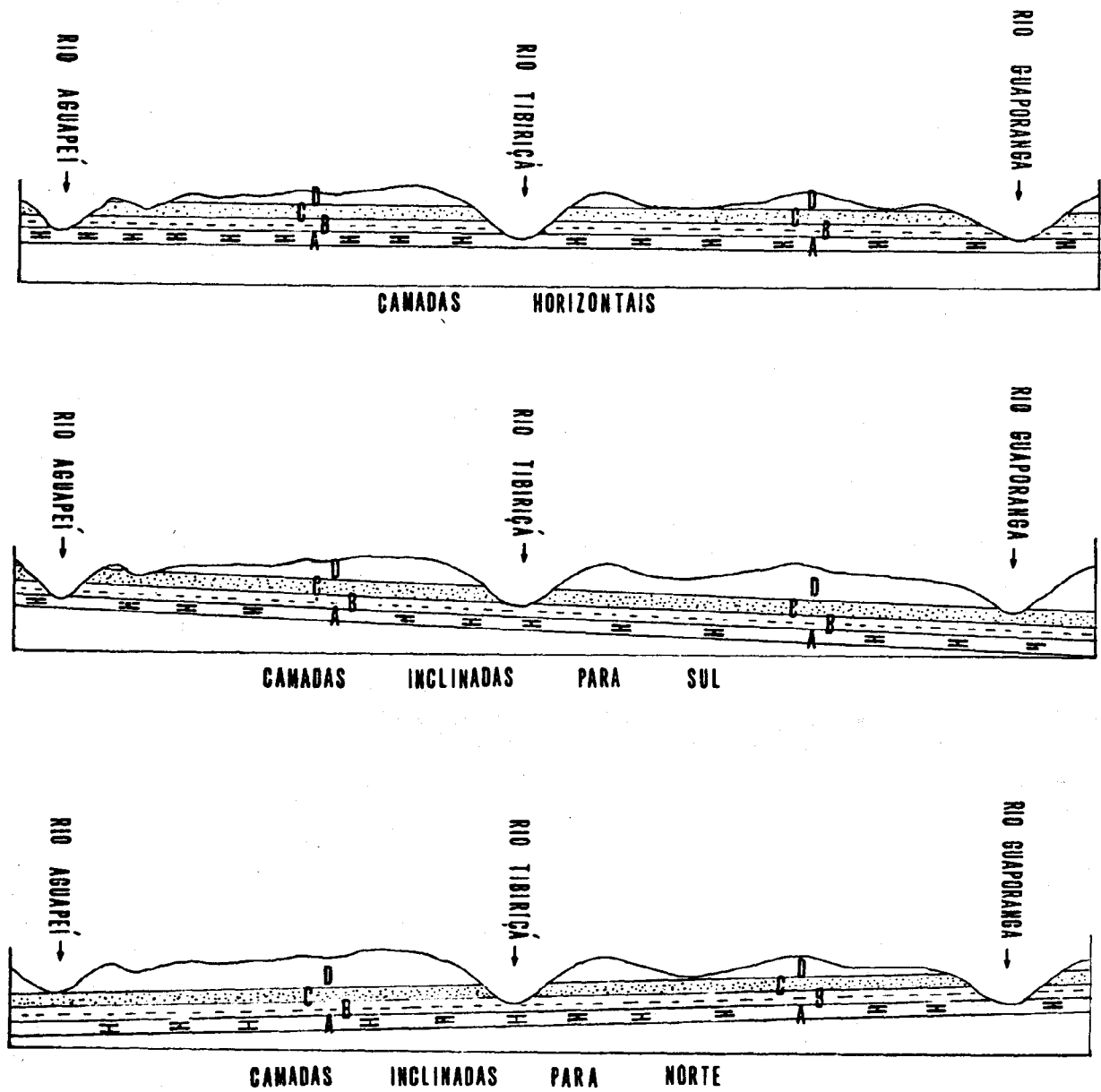


Fig. 4 - Comportamento hipotético da inclinação dos estratos, em função do número de camadas expostas nos vales dos rios.

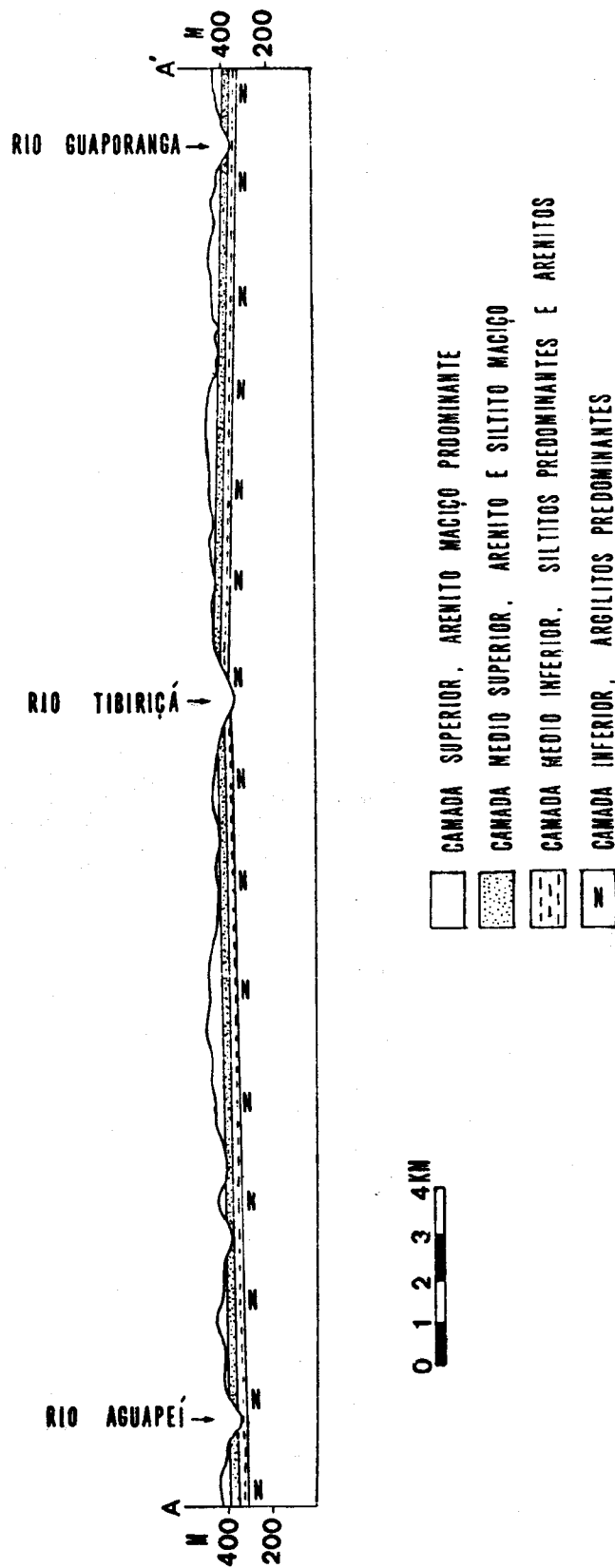
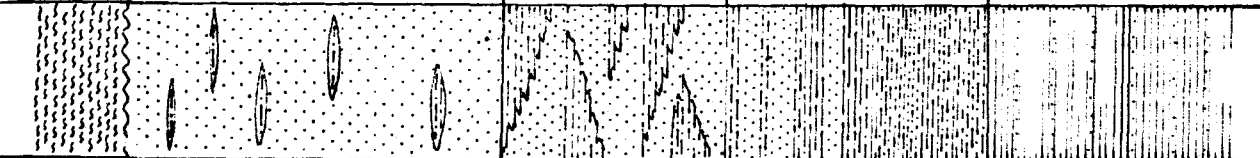


Fig. 5 - Perfil geológico da anomalia de Getulina.



Camada superior (camada D no mapa fotogeológico): arenitos predominantes, finos a muito finos, espessamente acamados (30 cm - 1 m) a maciços (1 m), de cores amarelo-alaranjada a amarelo amarronzada, friável, profundamente intemperizada, afossilífera, localmente com estratificação cruzada, em geral intercalado com lentes onduladas de siltitos estratificados, cinza-amarronzado a amarelo-acinzentado. Espessura desconhecida.

Camada média superior (camada C no mapa fotogeológico): arenitos muito finos, espessamente acamados a maciços, de cores amarelo-alaranjada a amarelo-amarronzado e siltitos cinza-amarelado a cinza-amarronzado, com mudanças horizontais de um para outro em distâncias pequenas. Espessura aproximada de 30 m.

Camada média inferior (camada B no mapa fotogeológico): siltitos maciços a espessamente acamados estratificados ou não, amarelo a cinza-amarronzada - predominam na parte inferior; arenitos muito finos, espessamente acamados, intercalados frequentemente com os siltitos na parte superior. Espessura aproximada de 35 m.

Camada inferior (camada A no mapa fotogeológico): argilitos predominantes, cinza a cinza-amarronzados macios profundamente intemperizados, maciços (1 m) a espessamente acamados (30 cm a 1 m) estratificados, afossilíferos, ocasionalmente intercalados com arenitos muito finos, fina (1-3 cm) a medianamente acamados (10 - 30 cm), friáveis, cinza-amarelado. Os planos de acamamento são ondulados e facilmente rompem-se por causa do intemperismo profundo. Espessura desconhecida.

Fig. 6 - Coluna litoestratigráfica.

5. CONCLUSÕES

Já é bastante aceita a utilização de dados de sensoriamento remoto no levantamento das características estruturais regionais de anomalias morfoestruturais, que se supõe re apresentar possíveis áreas favoráveis a trapas de hidrocarbonetos. Também muito já foi feito a nível de semidetalhe, com fotos aéreas, nas áreas morfoestruturais que demonstravam ser as mais promissoras. Porém, quase nenhum teste foi ainda posto em prática para se avaliar a importância de morfoestruturas com fraca intensidade de estruturação, colocadas numa escala secundária de prioridade, à pesquisa de petróleo. Este constitui o objetivo final do trabalho apresentado, cujos resultados permitiram concluir que, mesmo sendo poucas e fracas as evidências estruturais de uma suposta morfoestrutura detectada inicialmente nas imagens LANDSAT e de RADAR, elas são suficientes para justificar a continuidade de análise e interpretações geológicas a níveis de detalhe. Em áreas semelhantes às de características do cretáceo Bauru, recomenda-se que as interpretações de fotos aéreas sejam realizadas da maneira apresentada neste trabalho, pois outros métodos de interpretação podem não oferecer bons resultados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- LIU, C.C.; MENESES, P.R.; PARADELLA, W.D.
Análise de fotos áreas das anomalias morfológicas de Getulina e Iacanga. Projeto Planalto Arenítico-Basáltico. São Paulo, IPI, 1980. v. 3, part. 3. (Relatório BP003/79).
- PARADELLA, W.R.; MENESES, P.R.; LIU, C.C.
Análise de anomalias morfológicas através do analisador image-100; Projeto Planalto Arenítico-Basáltico. São Paulo, IPT, 1980. v. 2, p. 2 (Relatório BP-003/79).
- SOARES, P.C.; MATTOS, J.T.; BALIEIRO, M.G.; BARCELLOS, P.F.; MENESES, P.R.; GUERRA, S.M.S.; CSORDAS, S.M. Análise Morfoestrutural Regional com Imagens de Radar e LANDSAT na Bacia do Paraná. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3., Curitiba, 1981. *Anais*. Curitiba, SBG, 1981, v.1, p. 201-216.
- SOARES, P.C.; MENESES, P.R.; MATTOS, J.T.; BALIEIRO, M.G.; CSORDAS, S.M.; MARCELLOS, P.E. Aplicação da análise morfoestrutural regional com imagens LANDSAT e RADAR, na região do Planalto Ocidental do Estado de São Paulo. Convênio INPE/PAULIPETRO. São José dos Campos, INPE, 1982, no prelo.

