

COMPARTIMENTAÇÃO ESTRUTURAL DA BACIA DO PARANÁ: A QUESTÃO DOS LINEAMENTOS E SUA INFLUÊNCIA NA DISTRIBUIÇÃO DO SISTEMA AQUIFERO GUARANI

Ana Paula SOARES ¹, Paulo César SOARES ², Daniel Fabian BETTÚ ³, Michael HOLZ ⁴

(1) CTHIDRO, Projeto SAG, Apoio CNPq. Rua Camões, 1339. CEP 8040-180.
Curitiba, PR. Endereço eletrônico: a_p_soares@yahoo.com.

(2) Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná (UFPR). Centro Politécnico - Jardim das Américas. Caixa Postal 119. CEP 81531-990. Curitiba, PR. Endereço eletrônico: p_soares@terra.com.br.

(3) Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Paraná (UFPR). Centro Politécnico. Caixa Postal 19001. CEP 81531-990. Curitiba, PR. Endereço eletrônico: daniel_bettu@yahoo.com.br.

(4) Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Avenida Bento Gonçalves, 9500, Agronomia. Caixa Postal 15001. CEP 91501-970. Porto Alegre, RS.

Introdução
Métodos, Operações e Resultados
 Premissa e Computação dos Dados
 Lineamentos em Modelo Digital de Terreno
 Identificação dos Principais Lineamentos
 Mapa de Frequência
 Teste de Concordância
 Contorno Estrutural nas Unidades do Sistema Aquífero Guarani
 Espessura e Organização Espacial do Aquífero Guarani
 Seções Geológicas
Discussão
Conclusões
Agradecimentos
Referências Bibliográficas

RESUMO – Estudos sobre a influência da compartimentação estrutural na hidrodinâmica do Sistema Aquífero Guarani são dificultados pelas diversas interpretações de lineamentos publicadas a partir de diferentes fontes de dados, procedimentos analíticos e escalas, diversidade que gera divergências quanto à existência e o posicionamento das estruturas. No entanto, a correta identificação das estruturas é fundamental na delimitação dos compartimentos tectônicos e suas implicações hidrogeológicas. Um novo mapa de lineamentos estruturais interpretado a partir de um modelo digital de terreno teve a precisão avaliada por comparação em análise de contingência àquelas de mapas magnéticos e gravimétricos levantados com base em imagens satelitárias. A análise revelou elevada concordância das direções NW e NE entre as diferentes fontes, e muito baixa concordância das direções NNE e NNW. As direções EW e NS têm baixa concordância, possivelmente devido à elevada confusão entre lineamentos reais e artefatos. A integração dos mapas avaliados resultou num novo mapa de lineamentos, com o qual os contornos estruturais da Formação Irati foram reinterpretados num teste do reflexo destes lineamentos na configuração atual daquela unidade. Na interpolação dos contornos estruturais e espessuras das rochas do aquífero, os novos lineamentos revelaram grandes blocos tectônicos que restringem o fluxo e a formação de células hidrogeológicas.

Palavras-chave: Bacia do Paraná, compartimentação estrutural, análise de contingência, blocos tectônicos, lineamentos.

ABSTRACT – *A.P. Soares, P.C. Soares, D.F. Bettú, M. Holz – Structural compartments of the Paraná Basin: lineaments and influence on Guarani Aquifer system.* Studies on the influence of the structural setting on the hydrodynamics of the Guarani Aquifer System are biased by the different interpretations of lineaments drawn from various data sources, analytical methods and scales. The correct identification of structures is fundamental to the delimitation of tectonic blocks and their hydrological implications. A lineament map was interpreted from digital elevation modeling whose precision is assessed under contingency analysis by comparing it to remotely sensed magnetic and gravimetric maps. The analysis revealed that NW and NE lineaments are highly conformable among the different data sources, whereas NNE and NNW lineaments are, in turn, very poorly conformable. EW and NS low conformability is possibly due to artifacts being taken for real lineaments. Integration of all morphostructural maps resulted in a new one, based on which the Irati Formation contours were reinterpreted in order to test the influence of these lineaments upon present-day spatial configuration of this stratigraphic unit. When used in the interpolation of the aquifer structural contours, the new lineaments revealed large tectonic blocks that are able to restrict water flow and the formation of hydrogeological cells.

Keywords: Paraná Basin, structural compartmentation, contingency analysis, tectonic blocks, lineaments.

INTRODUÇÃO

O Sistema Aquífero Guarani tem como rochas-reservatórios depósitos triássicos e juro-cretássicos da Bacia do Chaco-Paraná correspondentes às formações

Pirambóia e Botucatu no Brasil, Misiones no Paraguai e Argentina e a Formação Taquarembó no Uruguai. O aquífero, cuja espessura varia entre 200 m e 600 m, é

semiconfinado na porção superior por derrames basálticos cretáceos da Formação Serra Geral e confinado na porção inferior por rochas siliciclásticas arenopelíticas neopermianas. Seus melhores reservatórios são formados por arenitos eólicos desérticos da Formação Botucatu, nos quais predominam registros de extensos *ergs* associados a depósitos de *wadis* (Caetano-Chang et al., 1991; Scherer, 1998) com fácies rudácea basal e depósitos lacustres. Sotopostos a estes, estão os reservatórios correspondentes à Formação Pirambóia, os quais consistem, por sua vez, em depósitos arenosos, pelíticos, areno-rudáceos, eólicos e sub-aquosos (Soares et al., 2007).

Apesar de seu alto potencial para a exploração de água subterrânea, pesquisas recentes apoiadas em análises da água de poços revelam que o Sistema

Aqüífero Guarani apresenta, na realidade, importantes variações hidroquímicas e hidrodinâmicas responsáveis por zonas onde a vazão ou potabilidade inadequadas inviabilizam seu aproveitamento (Rosa Filho et al., 2003; Gastmans & Chang, 2005; Machado, 2006). Tais situações indesejáveis tornam necessário aprofundar o conhecimento da variabilidade espacial regional do Sistema Aqüífero Guarani, sendo discutida no presente trabalho a questão da compartimentação estrutural das rochas que o compõem.

Entretanto, a delimitação de grandes compartimentos tectônicos na Bacia do Paraná (Figura 1) é dificultada pela incerteza advinda das divergências entre os mapas de lineamentos estruturais traçados pelos diferentes autores, dentre eles Soares et al. (1982), Ferreira (1982), Zálan (1986) e Artur & Soares (2002),

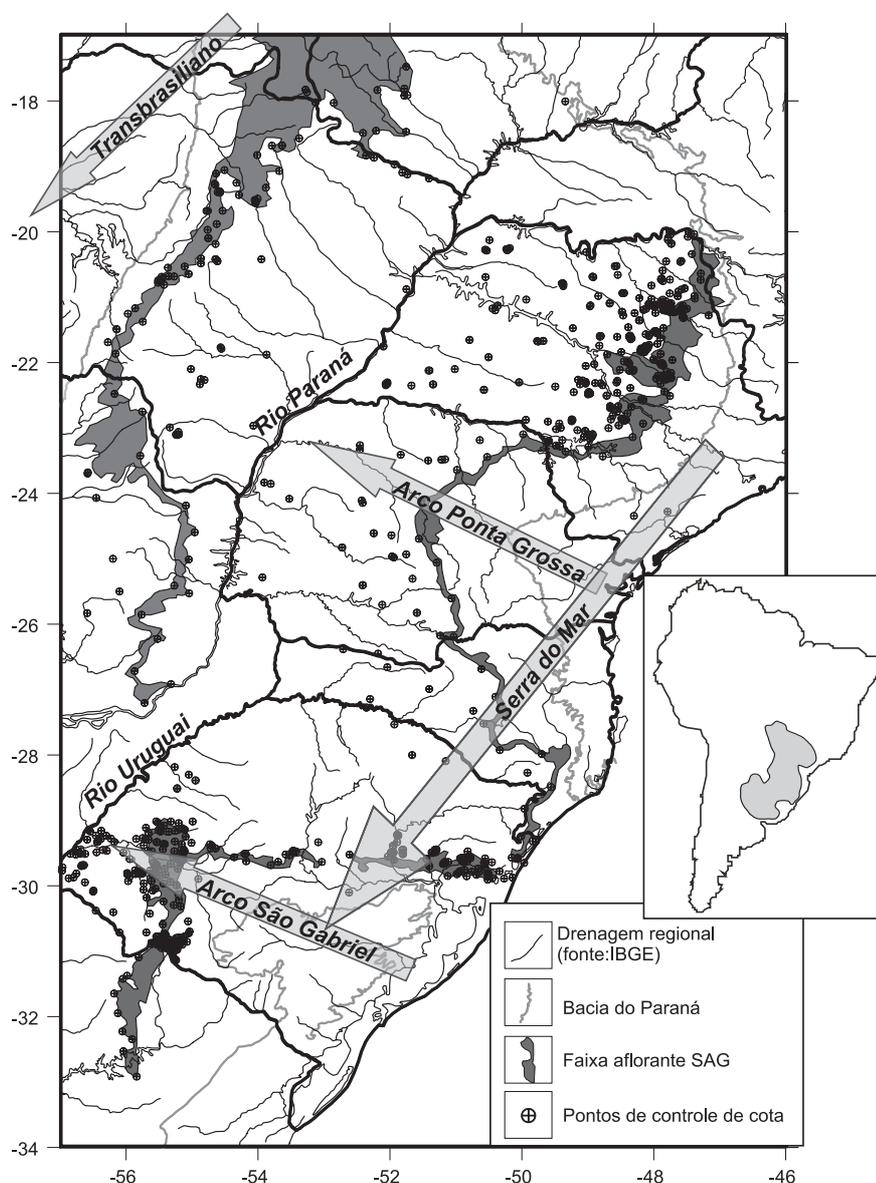


FIGURA 1. Mapa de localização da bacia do Paraná, área de estudo, poços e pontos de cota utilizados nas interpolações. Notar principais estruturas (NE e NW) que influenciam na configuração atual da bacia.

a partir de fontes de dados tão diferentes entre si como o sensoriamento remoto, a drenagem, o relevo, a gravimetria e a magnetometria (Figura 2).

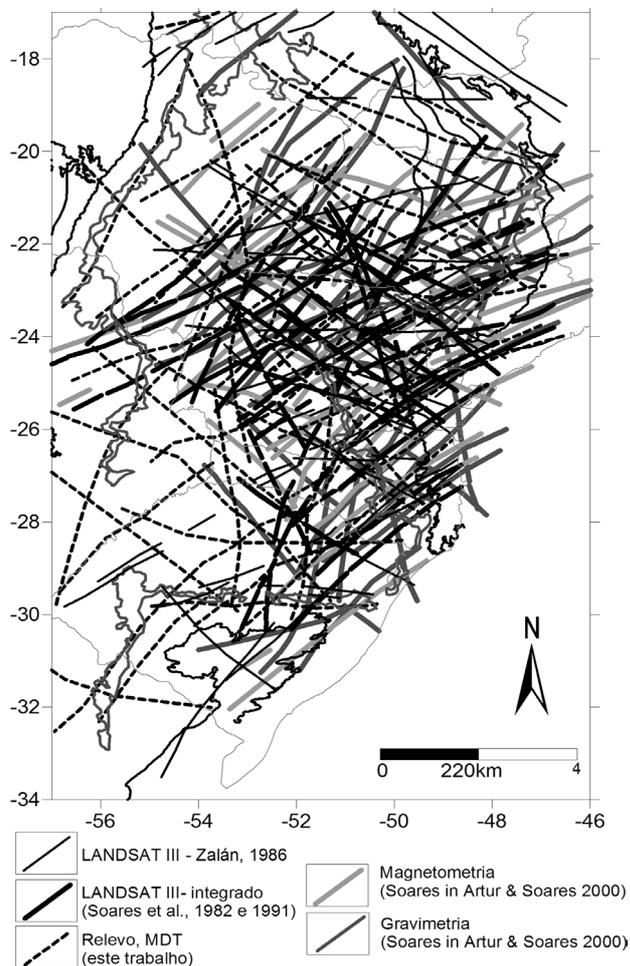


FIGURA 2. Superposição de diferentes mapas de lineamentos a partir de diferentes autores e diferentes fontes de dados. Alguns lineamentos presentes são de fontes inéditas, como J.P. Xavier (Beicip-PauliPetro, 1982) e outros traços espessos correspondem a resultados de integração.

O trabalho aqui apresentado teve como objetivo principal a delimitação, com base em lineamentos morfoestruturais e diferenças de cotas de topo e base da Formação Botucatu, dos grandes blocos estruturais da Bacia do Paraná capazes de impactar o comportamento hidrodinâmico do aquífero (Figura 3). Na delimitação dos blocos estruturais, um traçado de lineamentos a partir de um modelo digital de elevação pseudo-iluminado em diversas direções foi refinado por

operações de superposição e seleção de elementos comparados a elementos presentes em traçados obtidos das diferentes fontes de dados. Foram retrçados os lineamentos mais freqüentemente coincidentes em presença, extensão e orientação e, portanto, mais consistentes e representativos de estruturas tectônicas.

Por meio de análise de contingência, foi realizada também uma comparação entre o novo mapa de lineamentos morfoestruturais, traçado a partir do modelo digital de terreno, e os mapas apresentados por Soares et al. (1982) e Zalán et al. (1986), como mostra a Figura 4, visando determinar qual dos três obteve melhores resultados no traçado das estruturas e também em quais direções os resultados se mostram mais coincidentes.

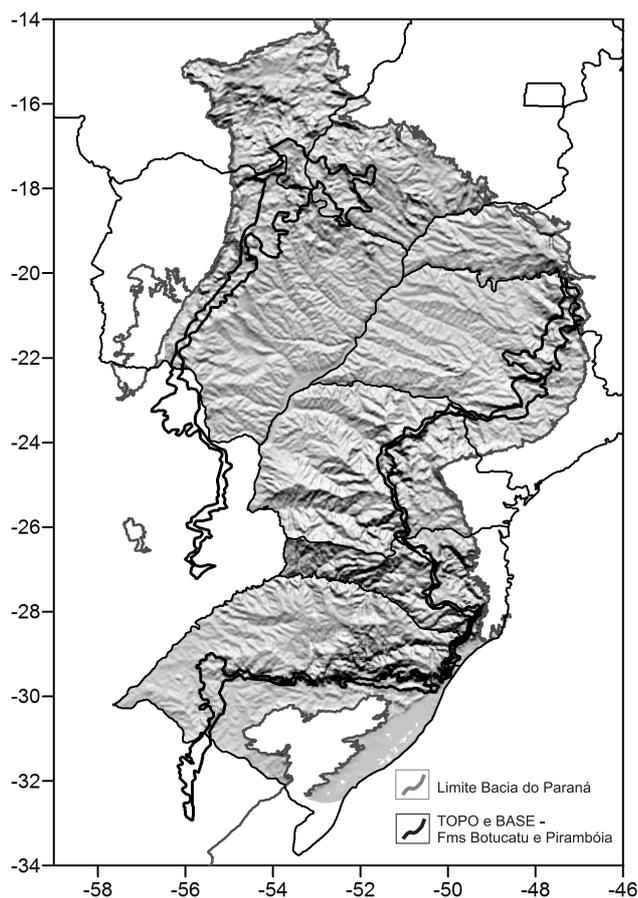


FIGURA 3. Modelo digital de terreno da área da Bacia do Paraná no Brasil, apresentada em mapa de sombreamento (Dados SRTM, NASA-USGS), mostrando a faixa de afloramento do Aquífero Guarani. Modelo utilizado no traçado dos lineamentos usados, na escala original ao milionésimo.

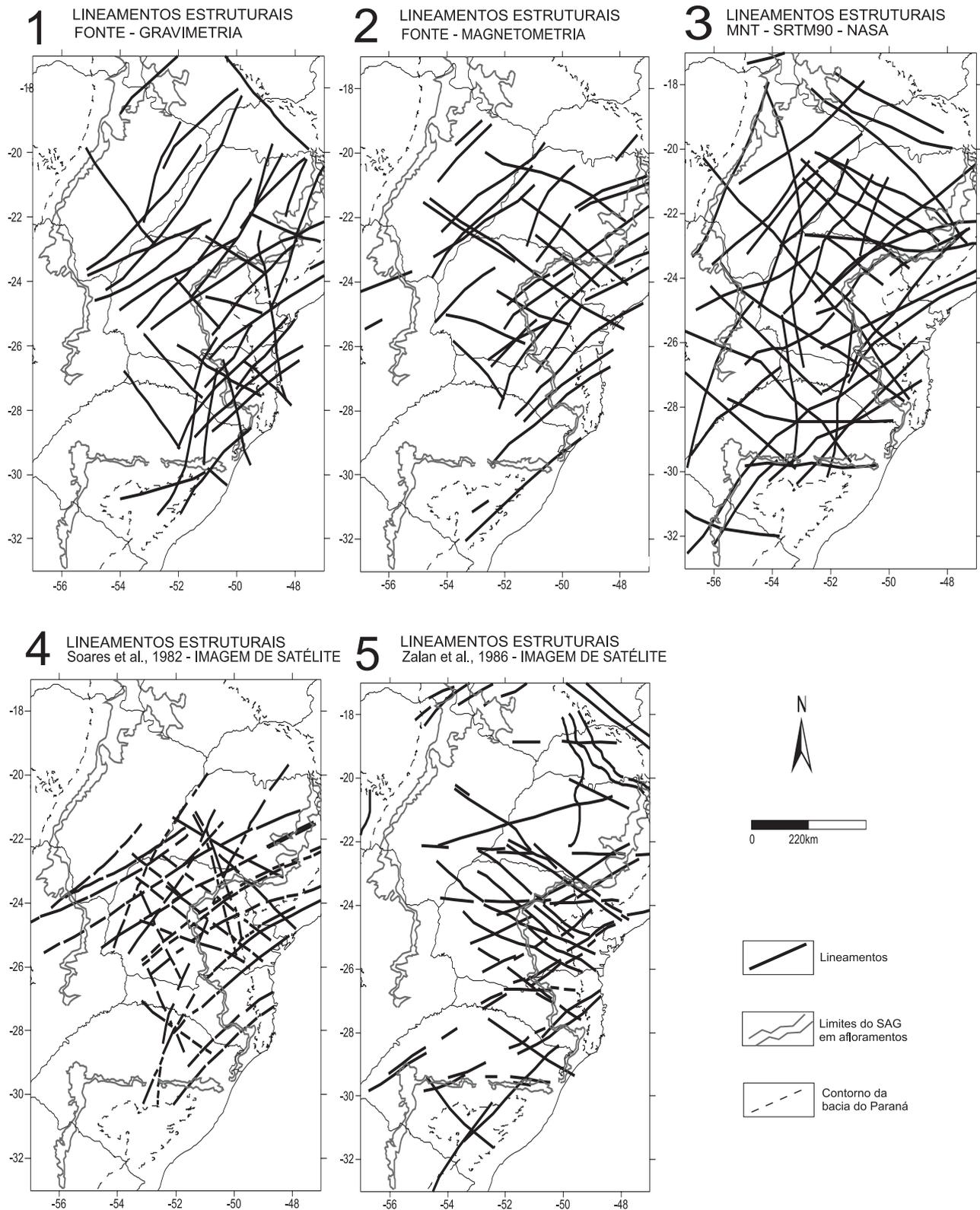


FIGURA 4. Mapas dos grandes lineamentos da Bacia do Paraná. Estruturas traçadas a partir de diferentes fontes por diferentes autores: gravimetria (1) e magnetometria (2) (Soares, inédito, em Artur & Soares, 2000); Relevo (3), MDT, este trabalho; Landsat III integrado (4) (Soares et al., 1982; Soares, 1991); Landsat III (5), Zalan et al. (1986).

MÉTODOS, OPERAÇÕES E RESULTADOS

PREMISSA E COMPUTAÇÃO DOS DADOS

A premissa da qual partiu a presente análise é a de que um dado lineamento, sendo uma feição estrutural e não apenas um alinhamento de artefatos de imagem ou feições geomórficas, pode ser reproduzido independentemente do método de levantamento de dados empregado. Para avaliar esta reprodutibilidade como indicadora de consistência de traçado, os traços de lineamentos levantados no presente trabalho e em trabalhos anteriores a partir de fontes diversas foram distribuídos em seis classes de direções e segmentados numa malha de 3.264 células de 1/3 de grau (756 km²)

representando a extensão da área de estudo. As seis classes de direções foram as seguintes: N270-300 (WNW), N300-330 (NW), N330-360 (NNW), N0-30 (NNE), N30-60 (NE), N60-90 (ENE). Estas direções foram avaliadas em mapas de traços provenientes de diferentes autores (Figura 4), sendo que em cada célula e para cada classe de direção, foram assinaladas a ausência (0) ou presença (1) de lineamentos segundo cada método de levantamento, conforme exemplo mostrado na Figura 5.

Os valores de presença assim obtidos em cada célula para os diferentes métodos e classes de direções

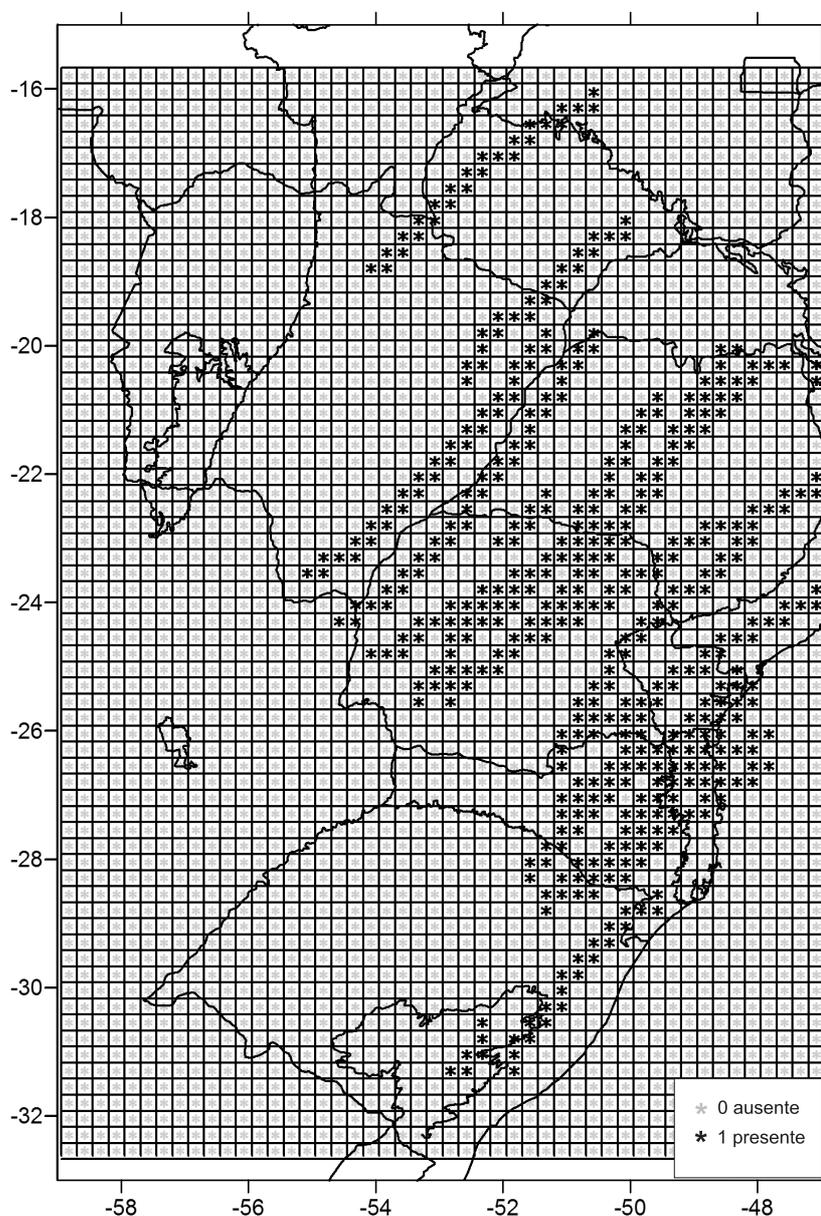


FIGURA 5. Exemplo de malha com registro de presença (1, representado em preto) ou ausência (0, representado em cinza) de lineamento na célula.

foram trabalhados como frequências. Quanto maior a frequência de um traço de lineamento numa direção numa célula, maior pode ser considerada a sua reprodutibilidade independentemente do método de obtenção e, conseqüentemente, maior a sua consistência. Interpolados com anisotropia direcional, estes resultados geraram mapas de frequências cujos valores foram admitidos como fatores de confiabilidade da presença das estruturas. Com base nestas curvas de frequência e num conjunto de matrizes interpoladas, foi possível então traçar os lineamentos mais recorrentes entre as diversas fontes de dados num novo mapa dos grandes lineamentos estruturais presentes na bacia.

LINEAMENTOS EM MODELO DIGITAL DE TERRENO

O modelo de terreno a partir do qual os lineamentos foram mapeados no presente trabalho (Figura 3) foi construído a partir de dados altimétricos levantados por interferometria de radar pela missão espacial SRTM - Shuttle Radar Topography Mission (NASA-NGA). Tais dados, originalmente levantados com *pixels* de 90 m (3 *arc sec*), tiveram a resolução espacial aqui reduzida para *pixels* de 15 m por reamostragem com interpolação por médias móveis. O modelo foi sombreado com iluminação vertical e a partir de diferentes posições do Hemisfério Norte com o *software* Surfer (Golden Software, 2000). Inicialmente, foram traçados os elementos com extensões entre 10 km e 100 km. Posteriormente, aqueles que se mostraram alinhados foram marcados como lineamentos de extensão regional. Diante da elevada densidade de elementos lineares, verifica-se uma certa dificuldade na seleção objetiva de alinhamentos, o que acarreta variações de posição e direção.

IDENTIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS LINEAMENTOS

Para a seleção dos lineamentos mais representativos das estruturas presentes na bacia, foram utilizados os lineamentos interpretados sobre mapas gravimétricos (Artur & Soares, 2002), magnetométricos (Ferreira 1982) e de sensoriamento remoto - Landsat 3 (Soares et al., 1982; Zalán et al., 1986), além dos traços identificados por modelagem digital de terreno aqui apresentados (Figura 4). Da seleção resultou um novo mapa de lineamentos morfoestruturais, o qual foi então comparado, da mesma forma, aos mapas de lineamentos apresentados por Soares et al. (1982) e Zalán et al. (1986), visando determinar qual destes três obteve melhores resultados no traçado das estruturas e também em quais direções os resultados se mostraram mais coincidentes.

A fim de prevenir divergências de traçado atribuíveis ao posicionamento geográfico das feições, especialmente daquelas identificadas a partir de imagens satelitárias, bem como divergências devidas

à diversidade de escalas e fontes de dados originalmente empregadas, os diferentes mapas de lineamentos foram georreferenciados em coordenadas geográficas, sem projeção, admitindo-se distorções não superiores a dez quilômetros. Com isso, considera-se que divergências remanescentes possam ser atribuídas a vieses de obtenção e processamento tais como iluminação e direção de varredura e limitações nas interpretações. Ajustes de traçado foram necessários em algumas áreas, especialmente nas partes marginais da bacia, como a oeste, ao sul e ao norte, às quais alguns dos traçados previamente publicados não se estenderam.

MAPA DE FREQUÊNCIA

A classificação em malha dos traços de lineamentos resultou em diferentes matrizes, uma para cada direção e fonte de dados avaliada. O somatório dos valores de presença ou ausência de traço em cada célula, para cada fonte de dados e direção, tratado como frequência, possibilitou a quantificação da consistência, ou seja, da reprodutibilidade. As matrizes finais correspondentes a cada uma das direções de avaliação, somadas às interpretações das diversas fontes, foram submetidas a interpolação por curvatura mínima, com anisotropia direcional dupla orientada segundo cada direção, o que resultou em mapas de frequência (reprodutibilidade) dos traços (Figura 6). Neles, os valores correspondem ao número de fontes de dados em que cada traço foi identificado.

Os resultados obtidos mostraram alto índice de concordância nas direções em torno de N45(+/-15)E, nordeste e N(45+/-15)W, noroeste, e para todas as fontes de dados empregadas, em contraste ao índice de concordância muito baixo nas direções norte-nordeste e norte-noroeste. O somatório das matrizes dos diferentes autores, para cada direção, resultou na geração de mapas de contorno de consistência dos lineamentos. Nestes mapas, o valor exibido refere-se à quantidade de fontes onde ocorrem os lineamentos em cada cela, ou seja, o contorno de valor 2, por exemplo, indica que naquele domínio foram identificados lineamentos em mais de duas fontes. A soma das matrizes das várias direções permitiu compor o mapa multidirecional de frequência de lineamentos (Figura 6).

O mapa mostra claramente a predominância dos lineamentos nas direções NW e NE. Por outro lado, traços nas demais direções são pouco frequentes. Quando combinados, os resultados ressaltam mais uma vez estas direções nordeste e noroeste. Os novos lineamentos traçados sobre os traços mais reprodutíveis são muito evidentes, em comparação a determinadas direções onde há pouca consistência. Embora haja menor consistência, os lineamentos alinhados nestas direções menos reprodutíveis, devem ser considerados.

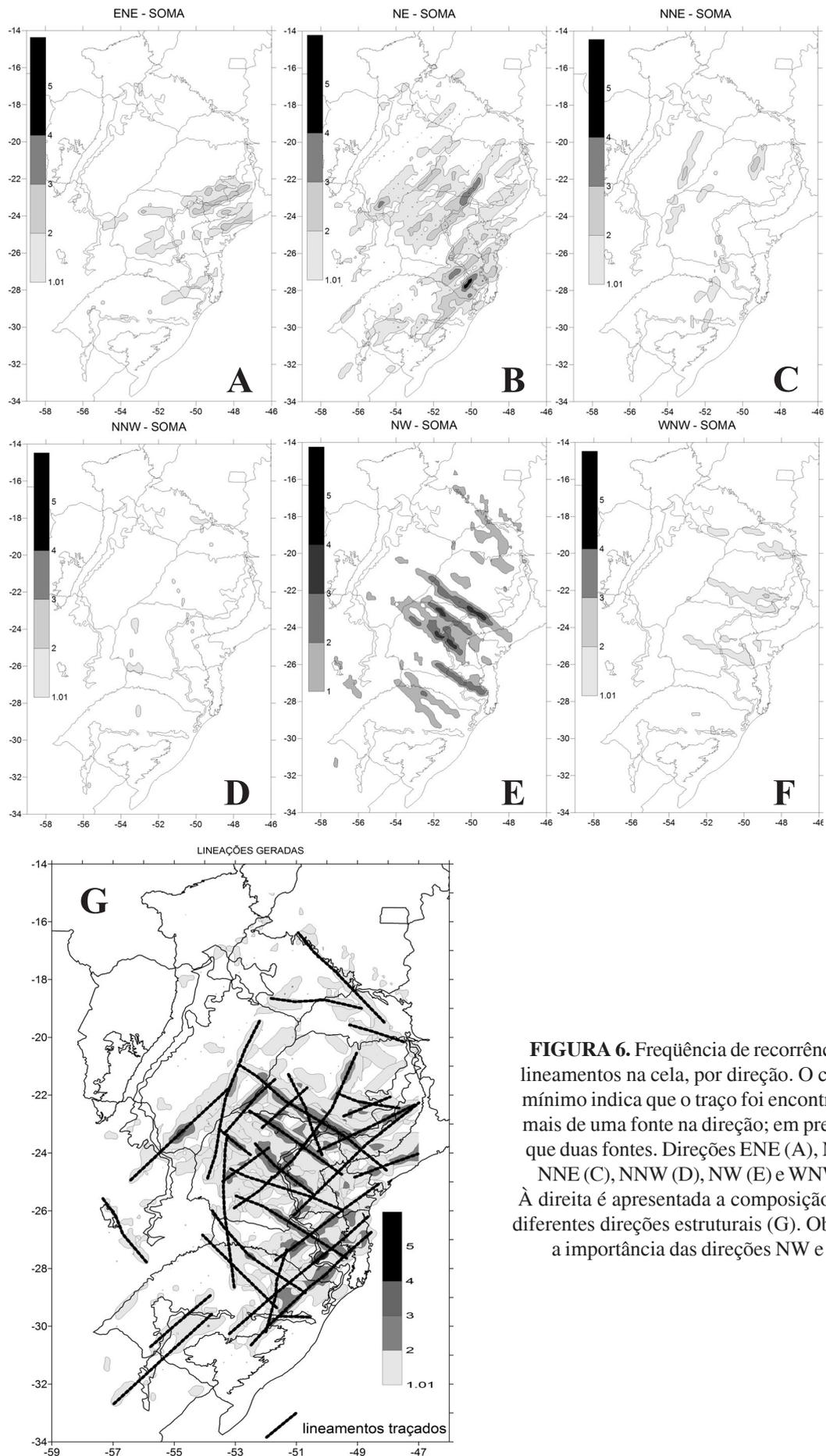


FIGURA 6. Frequência de recorrência dos lineamentos na cela, por direção. O contorno mínimo indica que o traço foi encontrado em mais de uma fonte na direção; em preto mais que duas fontes. Direções ENE (A), NE (B), NNE (C), NNW (D), NW (E) e WNW (F). À direita é apresentada a composição para as diferentes direções estruturais (G). Observa-se a importância das direções NW e NE.

TESTE DE CONCORDÂNCIA

Os lineamentos selecionados como mais consistentes e reprodutíveis tiveram o significado estrutural e a influência na compartimentação tectônica atual da bacia submetidos a um teste de concordância, no qual foram usados como linhas de quebra de interpolação (*break lines*) do contorno estrutural da base da Formação Irati. Esta unidade, um horizonte-chave, foi usada para teste por corresponder a uma superfície de afogamento originalmente horizontal. Os mesmos dados de cota foram interpolados pelo método da curvatura mínima. Comparando os dois resultados, puderam ser caracterizadas as estruturas que realmente afetam a distribuição atual desta formação (Figuras 7 e 8).

O mapa de contorno estrutural da base da Formação Irati, interpolado pelo método do inverso do quadrado da distância desconsiderando a influência dos lineamentos selecionados é mostrado na Figura 7.

Pequenas distorções na superfície são interpretadas como flexões quando comparadas com o mapa de tendência, com representação por uma superfície polinomial de sexta ordem.

Os resíduos da superfície polinomial foram contornados, agora considerando os lineamentos selecionados como interruptores de interpolação e a ponderação foi feita pelo inverso do quadrado da distância. A representação resultante mostra evidente ajuste e compartimentação de blocos na parte referente aos lineamentos. Entretanto, fica evidente a ausência de falhas que impusessem descontinuidade aos contornos a oeste da bacia, o que se reflete no adensamento de linhas e flexuras anômalas. Estas áreas estão indicadas no mapa da Figura 8, revelando a necessidade do acréscimo de novos traços. Deve-se destacar que a parte oeste da bacia não foi abordada em alguns mapas trabalhados, o que contribui para esta ausência de lineamentos.

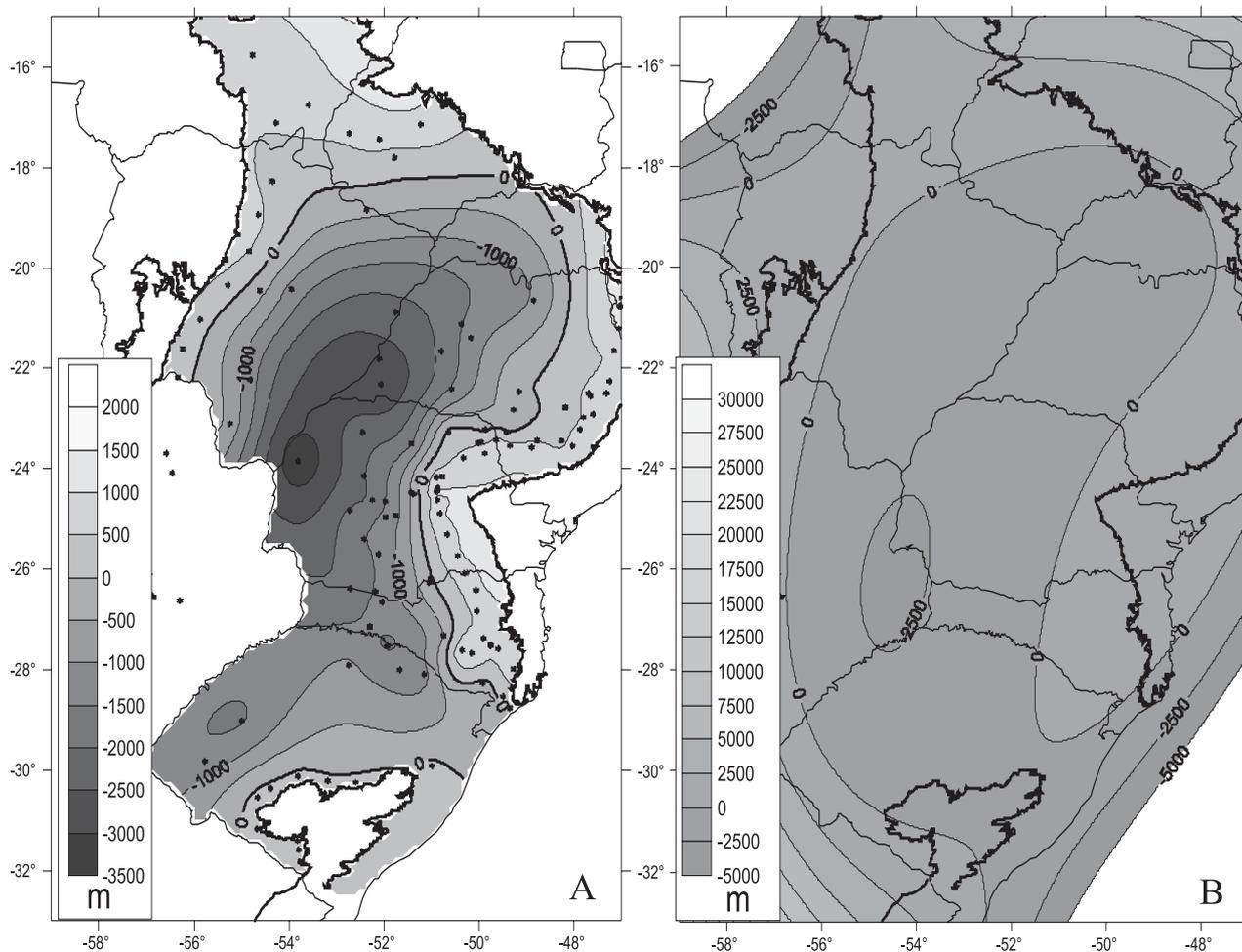


FIGURA 7. A) Mapa de contorno da base da Formação Irati com localização dos poços utilizados para interpolação com método de mínima curvatura. (B) Mapa de superfície de tendência de quarta ordem da base da Formação Irati.

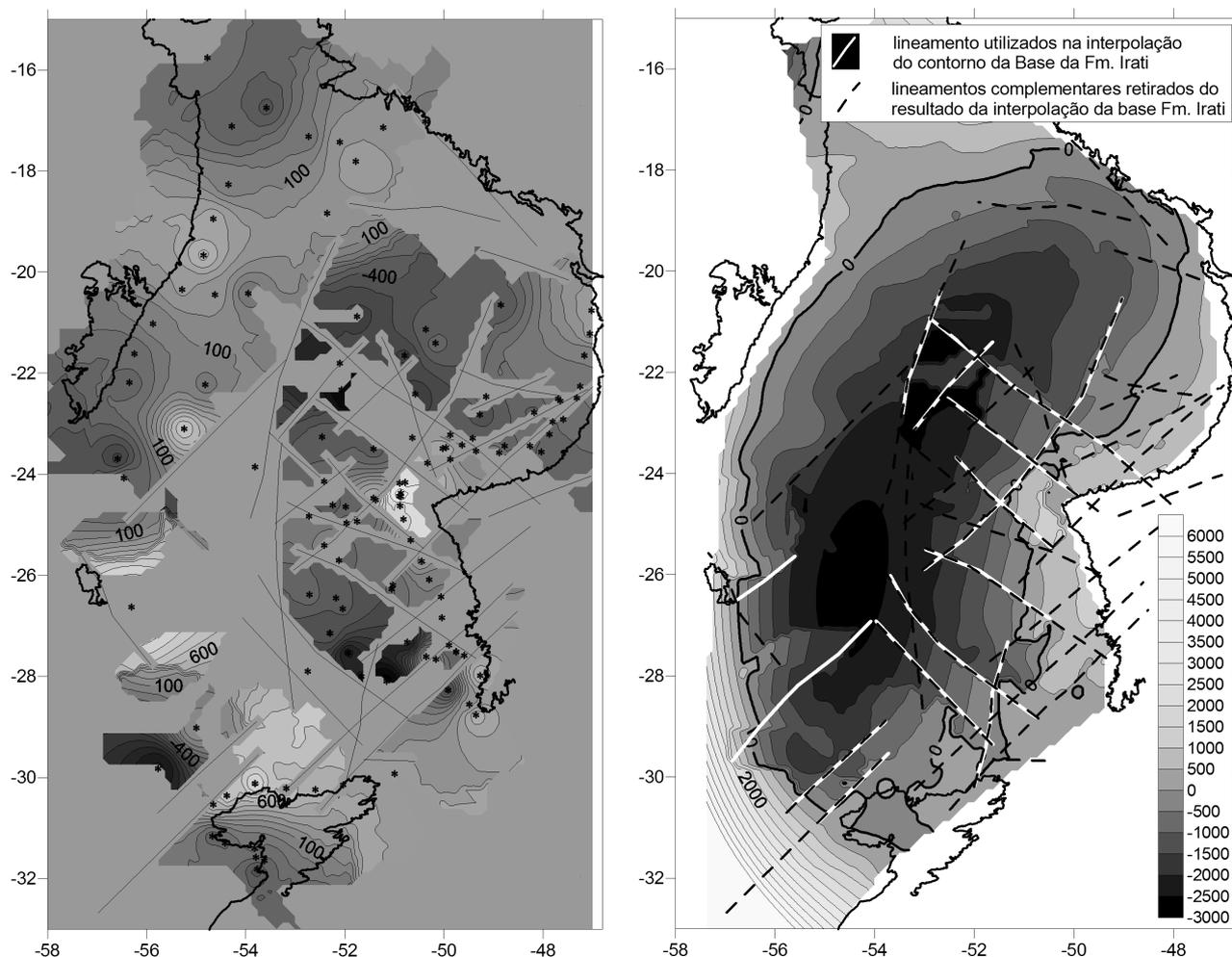


FIGURA 8. Mapas de contornos estruturais da base da Formação Irati: à esquerda, interpolação ponderada pelo inverso do quadrado da distância dos resíduos de superfície do 6° grau, com descontinuidade nos lineamentos; à direita, contorno estrutural, resultante da soma dos resíduos com a interpolação por tendência, representado apenas sobre a área de cobertura da bacia no Brasil. Algumas estruturas adicionais, não presentes em nenhum dos mapas analisados, porém evidenciadas no contorno estrutural, estão traçadas em linhas pontilhadas.

CONTORNO ESTRUTURAL NAS UNIDADES DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI

As superfícies estratigráficas identificadas como topo e base das unidades estratigráficas Pirambóia, Botucatu e unidades correlatas foram submetidas a um procedimento similar ao aplicado à Formação Irati. Os principais alinhamentos já definidos foram incluídos como controladores de interpolação. A cota das superfícies e dados de altitude obtidos em mapa e em modelo digital de terreno da faixa de afloramento foram associados.

Inicialmente, foi feita a representação numérica por meio de uma superfície polinomial de quarta ordem e calculados os resíduos, que foram interpolados pelo método do inverso do quadrado da distância. As estruturas identificadas no mapa da base da Formação Irati foram usadas como limites de interpolação (*break*

lines). Os mapas gerados foram somados aos respectivos mapas de superfície de tendência, obtendo-se o modelo espacial de representação das superfícies estratigráficas, cujos resultados são mostrados nos mapas de contorno estrutural das formações Pirambóia e Botucatu, mapa da base e de espessura do aquífero (Figuras 9, 10 e 11).

Os mapas de contorno das formações Pirambóia e Botucatu apresentam grande similaridade, o que é de se esperar, pois suas variações de espessura são bem menores que suas variações de cota. É notável, nestes mapas, a ocorrência de interrupções em alguns lineamentos, com desníveis superiores a 200 m, chegando em alguns casos a 500 m. Observam-se também o claro embaciamento e a existência de compartimentos bem definidos, especialmente na parte axial da bacia, no sudoeste de São Paulo (Pontal do Paranapanema) e oeste do Paraná (Foz do Piquiri).

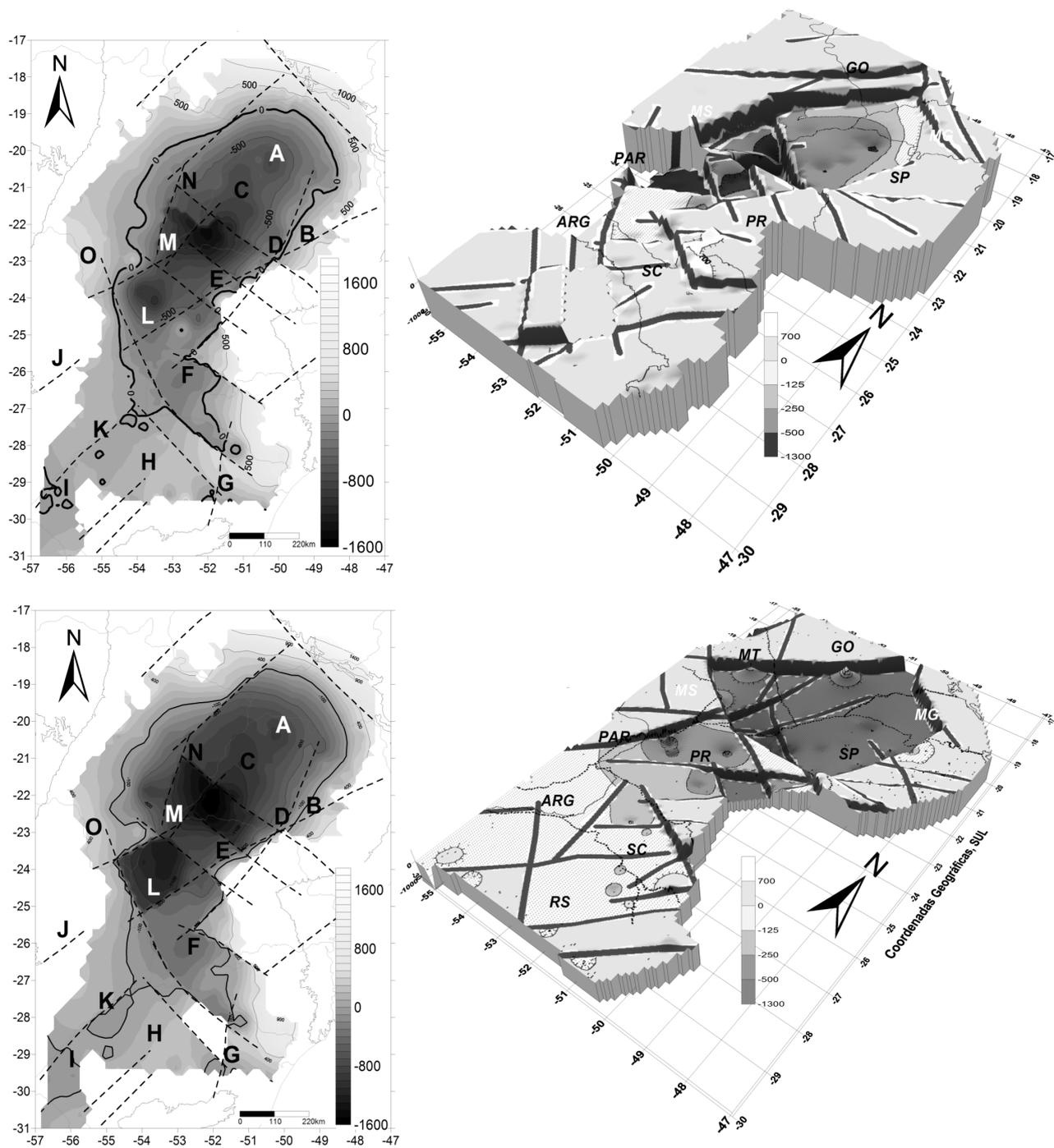


FIGURA 9. Mapa de contorno estrutural do topo das formações Botucatu (acima à esquerda) e Pirambóia (abaixo à esquerda). Localização de 17 sítios estruturalmente diferenciados, denominados de A – O. À direita representação 3D dos mapas de contorno estrutural das formações Botucatu e Pirambóia. Notar os grandes rejeitos.

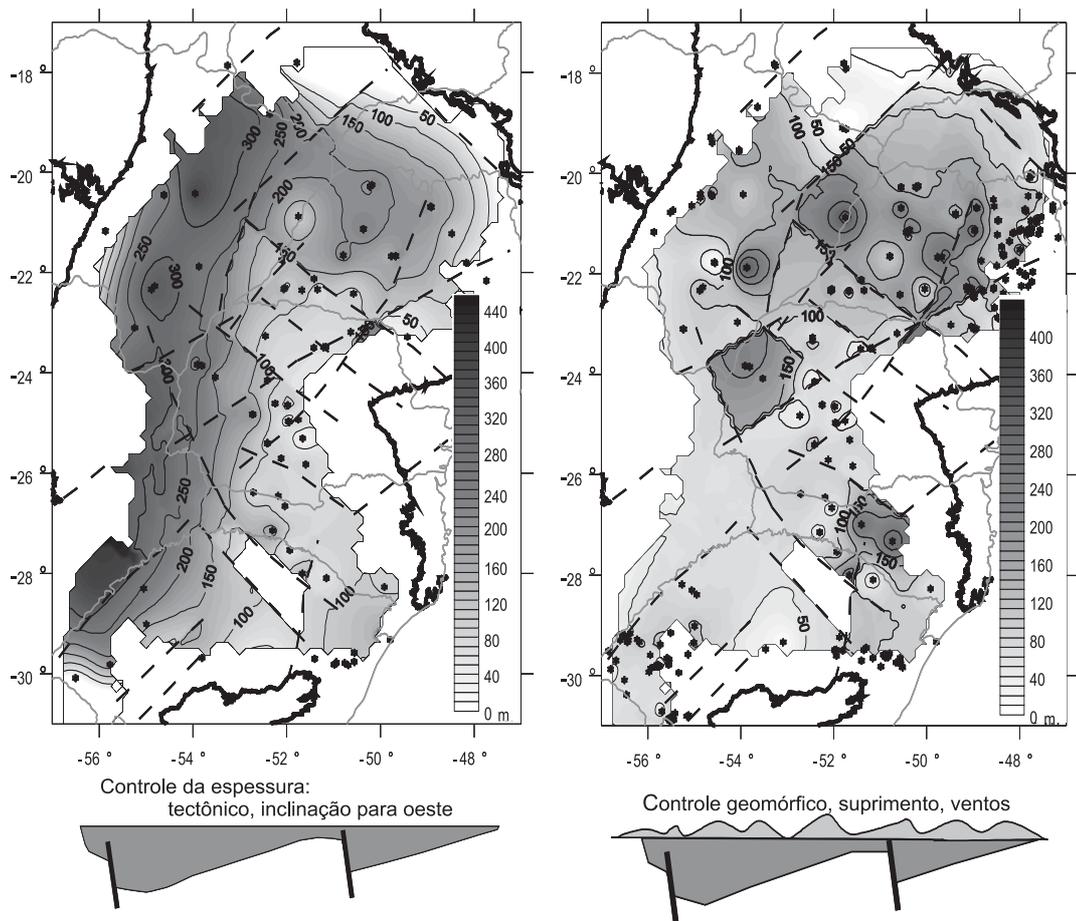


FIGURA 10. Mapa de espessura das formações Pirambóia (à esquerda) e Botucatu (à direita) interpolados com o método IQD e usando as *breaklines* como interruptores de interpolação. Notar o maior controle das estruturas na espessura da Formação Pirambóia. Na Formação Botucatu também existe um controle regional, mas notar a grande variação local das espessuras, devida ao controle geomórfico (observar o esquema abaixo dos mapas).

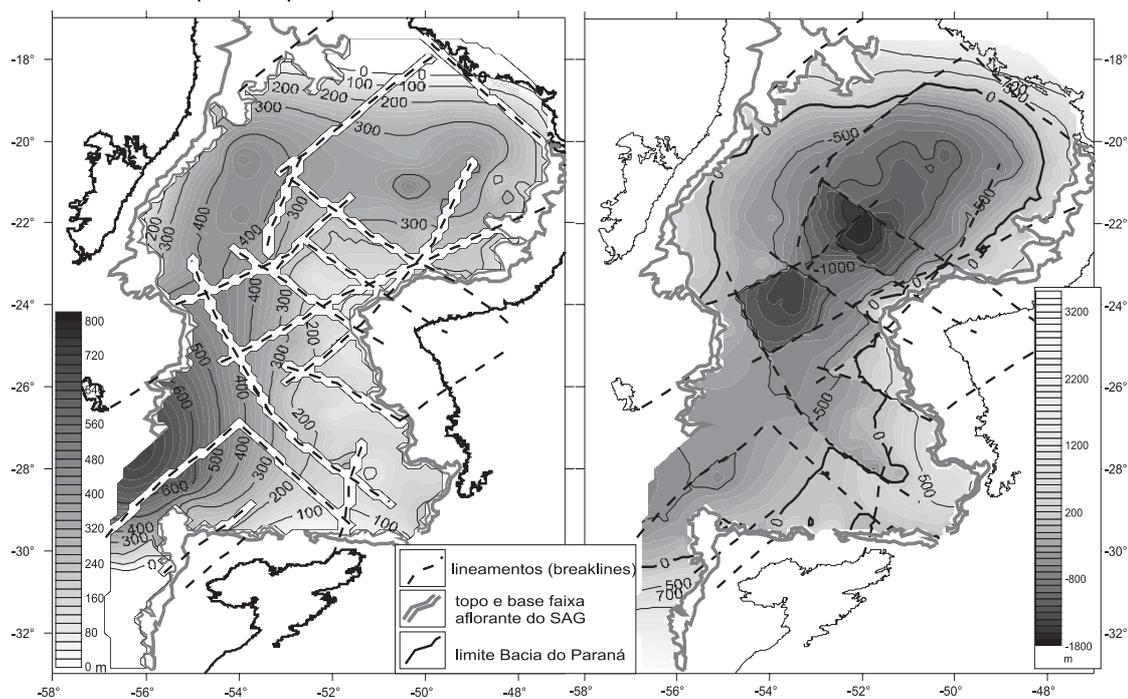


FIGURA 11. Mapa de espessura total do Sistema Aquífero Guarani (à esquerda) e contorno estrutural da base, em metros (à direita). Principais compartimentos estruturais: A a M.

ESPESSURA E ORGANIZAÇÃO ESPACIAL DO AQUÍFERO GUARANI

Os mapas de espessura das formações Pirambóia e Botucatu mostram uma importante feição que é a zona de pequena espessura das duas unidades do sistema aquífero na região do atual Arco de Ponta Grossa, controlada por falhas NW, a qual indica um possível controle tectônico na deposição das formações Pirambóia e Botucatu (Figura 10). As porções axial e oeste da Bacia do Paraná se notabilizam pela maior espessura da Formação Pirambóia. Outras três regiões com espessuras maiores são marcantes: uma correspondendo a grande parte do estado de São Paulo, uma no leste de Santa Catarina e outra no oeste do Paraná, esta última delimitada por falhas.

A representação espacial da espessura total do Sistema Aquífero Guarani (Figura 11), incluindo as unidades Pirambóia e Botucatu e suas correlatas Santa Maria e Guará, no Rio Grande do Sul, Misiones no Paraguai e Taquarembó no Uruguai e na Argentina, foi feita por subtração dos modelos digitais dos mapas de contorno do topo da Formação Botucatu e da base da Formação Pirambóia. De forma similar ao aplicado à Formação Irati, os valores foram interpolados usando lineamentos como linhas de quebra, ou seja, linhas de falha.

Observa-se a tendência das camadas dos blocos altos a serem menos espessas, possivelmente devido ao controle tectônico durante a deposição. Entretanto, a tectônica posterior foi mais efetiva, se superpondo e predominando na configuração dos compartimentos até o isolamento destes, como pode ser visto nas seções geológicas (Figura 12), construídas a partir dos mapas de contorno das unidades e do topo do relevo.

No mapa de espessura do sistema aquífero, a contribuição da unidade Pirambóia é fundamental, pois representa cerca de três vezes a espessura da unidade Botucatu. Nota-se uma alongada faixa NNE de maior espessura ao longo da calha da bacia, característica da unidade Pirambóia, chegando a 350 m, especialmente no Estado de São Paulo, onde também ocorre um embaciamento de maior espessura na direção Leste-Oeste (Sub-bacia de São Paulo). Os lineamentos não apresentam contribuição significativa na geometria. Entretanto, deve ser ressaltado que em pacotes de grande espessura os pequenos deslocamentos não são aparentes.

Na parte sudoeste da bacia, no Paraguai e Argentina, os procedimentos extrapolaram valores de forma incorreta, estimando espessuras crescentes a oeste, superiores a 600 m, quando sabe-se que os valores ali não ultrapassam os 300 m (260 m no poço Texaco Mallorquin-1, no Paraguai). Algumas áreas se caracterizam por terem espessuras anômalas relativamente pequenas, a principal delas a sudeste da bacia,

com espessura em torno de 200 m de espessura e alta variabilidade.

No mapa de contorno da base do sistema, fica evidente a compartimentação e o papel dos lineamentos na sua definição enquanto falhas com rejeitos significativos. Os diferentes compartimentos foram designados por letras, possivelmente correspondendo a sítios semiconfinados ou, ao menos, com restrição de fluxo, estando a base situada a cerca de 1800 m abaixo do nível do mar. O mapa de espessura mostra três regiões que se destacam em grande parte do Estado de São Paulo, oeste do Paraná e leste de Santa Catarina. Os alinhamentos que limitam o Arco de Ponta Grossa também delimitam uma região de menor espessura.

Os mapas de contornos estruturais das duas unidades são semelhantes e revelam blocos altos e baixos que compartimentam o aquífero. Quatorze blocos foram delimitados preliminarmente e designados por letras. O bloco A corresponde a um embaciamento a nordeste da bacia; B a um homoclinal no leste; C a homoclinal com espessamento, a nordeste; D a um homoclinal com caimento e espessamento a oeste na sub-bacia de São Paulo; E ao flanco norte, bastante falhado, do Arco de Ponta Grossa, com caimento a noroeste e espessamento a norte; F ao flanco sul, também bastante falhado, com caimento e espessamento a oeste; G apresenta várias falhas orientadas a nordeste, espessamento e caimento variável para oeste, leste e sul; H, no interior do Rio Grande do Sul, no flanco Norte do Arco de São Gabriel, com espessamento e caimento a oeste e noroeste; I, representando a charneira deste arco para Sul, com caimento e espessamento a oeste e a sudoeste, enquanto que o bloco J representa um homoclinal na parte oeste da bacia. Os blocos K, L, M e N, situados na parte axial da bacia, são interceptados por lineamentos NE. Os dois blocos mais baixos, M e L, estão situados no oeste do Paraná e no sudoeste de São Paulo.

SEÇÕES GEOLÓGICAS

Para visualização das relações espaciais entre as unidades componentes do Sistema Aquífero Guarani, foram construídas duas seções que cruzam a bacia (Figura 12), sobrepondo as superfícies modeladas. Estas seções foram construídas com corte automático dos mapas de contorno pelo aplicativo Surfer (Golden Software, 2000), a partir dos mapas de contorno das unidades e do topo do relevo; nelas é possível visualizar num plano vertical a compartimentação do aquífero em blocos estruturais. Observa-se que nos blocos mais baixos as unidades estão em contato lateral com o aquífero representado pela Formação Rio do Rastro, formando assim células isoladas delimitadas por falhas, onde se dá a restrição do fluxo.

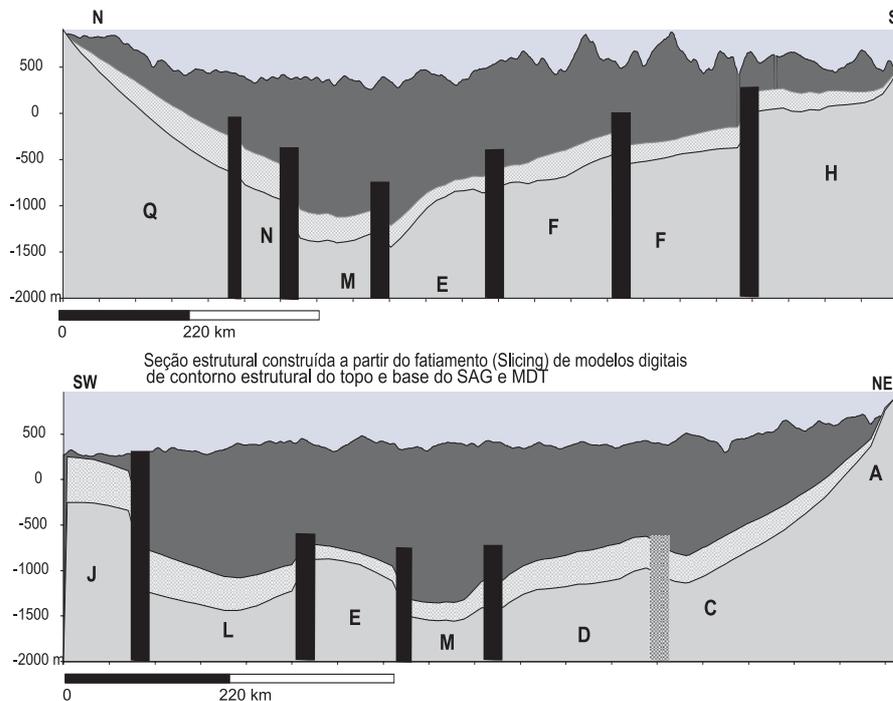
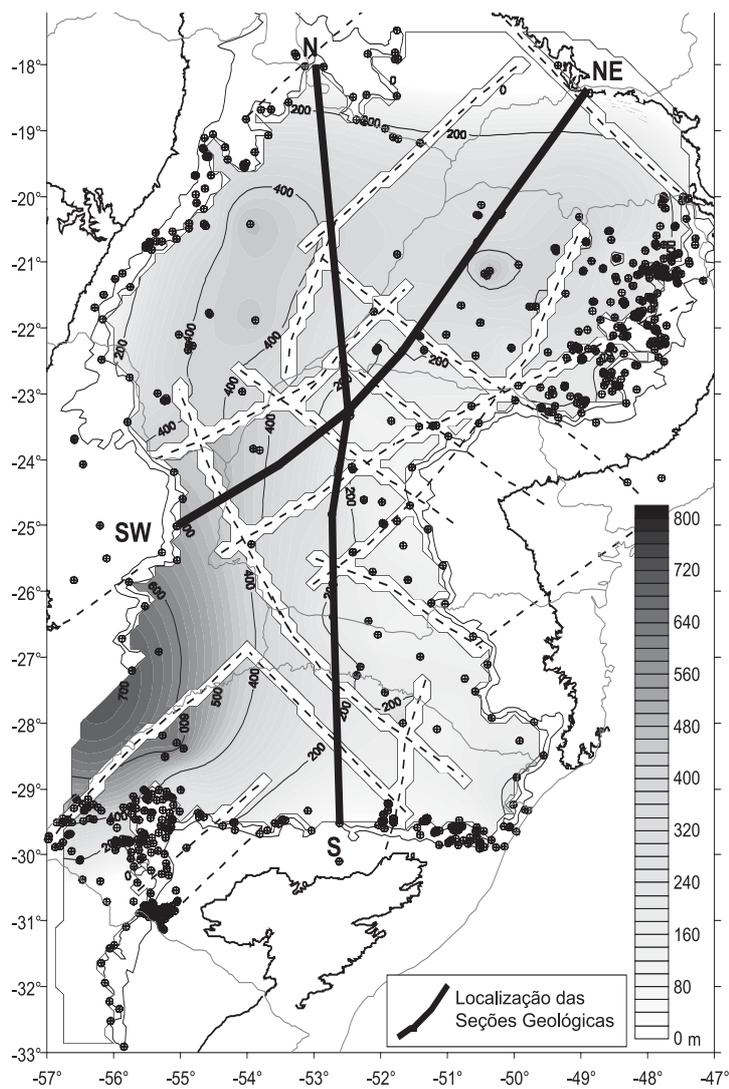


FIGURA 12. Seções geológicas N-S e SW-NE do Sistema Aquífero Guarani. Observar o rejeito entre blocos estruturais (designações conforme mapa, Figura 9) e o isolamento de alguns deles, identificados principalmente na seção SW-NE.

DISCUSSÃO

A reprodutibilidade dos traços de lineamentos obtidos a partir de diferentes fontes de dados é bem consistente nas direções NE e NW, estando cada um destes representado em mais de duas das fontes de dados na maioria das células nas quais o terreno foi dividido. Em algumas das células, um mesmo lineamento foi identificado em três ou quatro das fontes, coincidência esta em parte favorecida pela tolerância considerada. Estas direções estruturais são aquelas já bem conhecidas no registro da evolução da bacia, representando a forte estruturação NE do embasamento, no flanco leste, e a orientação NW dos diques de diabásio relacionados à ruptura continental. Todos estes alinhamentos permaneceram tectonicamente ativos em diversas fases da evolução da bacia (Artur & Soares, 2002), tendo os últimos movimentos ocorrido no Cenozóico, com soerguimento dos arcos transversais à bacia (Ponta Grossa, São Gabriel, Assunção) e das serras marginais (Serra do Mar e Serra do Pantanal).

A baixa consistência das direções dos demais lineamentos pode ter diversas causas: deficiência no procedimento de análise, artefatos ou obscurecimento nos métodos de coleta de dados empregados, sutileza dos indicadores alinhados ou pouca movimentação tectônica. No caso das direções ENE-WSW e WNW-ESE, ou seja, entre N60E e N120E, estão incluídas duas importantes direções estruturais, previamente designadas Piquiri, N65(+/-10)W, e Pitanga, N60(+/-10)E. Nestas, a baixa reprodutibilidade pode ser atribuída a deficiência no procedimento de análise, pois a direção modal se divide entre esta classe e duas outras vizinhas, que englobam as direções modais próximas designadas Ivaí, N45(+/-10)W, e Paraná, N30(+/-20)E. Estas direções correspondem ainda a artefatos presentes nos diferentes mapas, pois coincidem com E-W, direção de varredura das imagens de satélite e de interpolação dos dados gravimétricos e aeromagnetométricos. E-W corresponde à Direção Paranapanema (Soares, 1991) e a estruturas tênues com pouca movimentação, apesar de reconhecidas no Quaternário.

São estruturas que não correspondem a limites de blocos crustais nem a fraturas profundas preenchidas por intrusões.

Alguns lineamentos, ainda que regionalmente importantes, não aparecem no mapa final do trabalho por uma questão de processamento, que ressaltou as estruturas mais consistentes, do ponto de vista de haver sido identificadas por mais de um procedimento. Este é o caso do lineamento de direção NW que ocorre na porção central do estado do RS, representado por Zalan et al. (1986) (Figura 4, Mapa 5) e que controla a sedimentação e registro de unidades mesozóicas no RS.

Já os traços nas direções NNW-SSE e NNE-SSW, identificados também em apenas uma ou duas das fontes de dados e, com pouquíssimas exceções, em mais de duas, têm relação com a natureza de cada levantamento, sendo influenciadas pela geometria e pelo método de aquisição, ou mesmo por limitações dos métodos utilizados, por serem muito próximas a N-S, coincidindo com a órbita dos satélites e as linhas de vôo dos levantamentos aeromagnetométricos (Ferreira, 1982). Além disto, as fraturas conhecidas nesta direção têm pouca expressão, apesar de serem significativas no Paraná, correspondendo às direções Goioxin, N(15+/-10)W, e Itapirapui, N-S.

Conforme destacado no “Teste de Concordância”, os lineamentos selecionados, quando usados para interromper a interpolação da posição espacial de superfícies estratigráficas, se revelaram importantes elementos estruturais, com rejeitos superiores a 500 m na Formação Irati. Este fato já era observado em mapa interpolado manualmente (Soares, 1991). Cerca de doze estruturas podem ser consideradas importantes interruptores da continuidade das camadas; em sua maioria são de direções noroeste e nordeste, localizadas no flanco leste da bacia, e já bastante conhecidas na literatura. Novas estruturas no flanco oeste e na parte central foram discriminadas como importantes elementos estruturais adicionais.

CONCLUSÕES

A superfície gerada para representar a base da Formação Irati mostra o forte condicionamento estrutural desta unidade aos lineamentos mapeados. As estruturas que influenciam significativamente a organização espacial atual da Formação Irati foram selecionadas como importantes na composição do novo mapa de lineamentos. A comparação entre os mapas das Figuras 7 e 8 mostra que as estruturas mapeadas segmentaram a Formação Irati em grandes blocos

tectônicos, principalmente por lineamentos de direção noroeste, com os maiores deslocamentos relativos na região do Arco de Ponta Grossa.

Os resultados da análise de contingência revelaram que as direções NW e NE apresentaram alto índice de concordância entre as diversas fontes. Nas direções NNE e NNW estes índices são muito baixos. As direções E-W e N-S apresentaram também baixos índices, possivelmente relacionados à dificuldade na

discriminação entre lineamentos reais e artefatos produzidos pela geometria da aquisição. Baixos valores das probabilidades são devidos ao fato de que na maior parte da área não existem alinhamentos, razão pela qual optou-se por calcular a chance (índice de concórdância) contando apenas os elementos traçados.

A partir dos mapas de lineamentos gerados e das seções geológicas, verifica-se que a compartimentação estrutural do Sistema Aquífero Guarani dispõe as rochas em blocos tectônicos limitados por falhas, as quais certamente influenciam a sua hidrodinâmica. Com efeito, verifica-se que alguns destes blocos são limitados por falhas com aproximadamente 100 m de rejeito. Tendo o aquífero, em geral, espessura inferior a 100 m, pode-se concluir que tais falhas restringem o fluxo de água, delimitando células com diferentes tempos de

residência e mineralização, o que acarreta, entre outras conseqüências, salinização e fechamento de poros. A presença de depósitos fluviais em poços próximos à calha da bacia e zonas de maior espessura pode corresponder ao embaciamento ou zoneamento faciológico.

Outra importante constatação é a espessura relativamente pequena da Formação Pirambóia como um alto sindeposicional a sul e sobre o atual arco de Ponta Grossa, o que pode indicar condicionamento da deposição a um paleorelevo.

O Aquífero Guarani corresponde a um conjunto de sistemas com muitas direções principais de correntes de circulação de fluidos. Tendo mapeadas as principais estruturas do aquífero, podemos caracterizar, regionalmente, a compartimentação estrutural das formações que o compõe e seu efeito no sistema.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pelo CNPq através de financiamento a pesquisa (Projeto SAG – Processo 47398004-5). Ana Paula Soares agradece ao CNPq por Bolsa de Doutorado (Processo 40885/2003-0). Michael Holz agradece ao CNPq por Bolsa de Produtividade em Pesquisa (Processo 30266604-4).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARTUR, P.C. & SOARES, P.C. Paleoestruturas e petróleo na bacia do Paraná, Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 32, n. 4, p. 433-448, 2002.
2. CAETANO-CHANG, M.R.; WU, F.T.; BRIGHETTI, J.M.P. Caracterização eólica de arenitos da Formação Pirambóia, proximidades de São Pedro. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 2, 1991, São Paulo. **Atas...** Rio Claro: Sociedade Brasileira de Geologia, 1991, v. 2, p. 53-58.
3. FERREIRA, F.J.F. **Geologia da Bacia do Paraná - Alinhamentos estruturais-magnéticos da região centro-oriental da Bacia do Paraná e seu significado tectônico**. IPT, Relatório Técnico, p. 143-166, 1982.
4. FÚLFARO, V.J.; SAAD, A.R.; SANTOS, M.V.; VIANNA, R.B. Compartimentação e evolução tectônica da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 12, n. 4, p. 590-611, 1982.
5. GASTMANS, D. & CHANG, H.K. Avaliação da Hidrogeologia e Hidroquímica do Sistema Aquífero Guarani (SAG) no Estado do Mato Grosso do Sul. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 19, n. 1, p. 35-48, 2005.
6. GOLDEN SOFTWARE. **Surfer 8 – Surfer Mapping system**. Golden Co., 2000.
7. MACHADO, J.L.F. **Compartimentação Espacial e Arca-bouço Hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul**. São Leopoldo, 2006. 130 p. Tese (Doutorado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, UNISINOS.
8. ROSA FILHO, E.F.; HINDI, E.C.; ROSTIROLLA, S.P.; FERREIRA, F.J.F.; BITTENCOURT, A.V.L. Sistema Aquífero Guarani – Considerações preliminares sobre a influência do Arco de Ponta Grossa no fluxo das águas subterrâneas. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 17, p. 91-112, 2003.
9. SCHERER, C.M.S. **Análise Estratigráfica e Litológica da Formação Botucatu (Eocretáceo da Bacia do Paraná) no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 1998. 230 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
10. SOARES, A.P.; SOARES, P.C.; HOLZ, M. Heterogeneidades hidroestratigráficas do sistema Aquífero Guarani. (submetido a **Revista Brasileira de Geociências - Set/2007**).
11. SOARES, P.C. **Tectônica sinsedimentar cíclica na Bacia do Paraná - Controles**. Curitiba, 1991. 148 p. Tese (Professor Titular) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná.
12. 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: Relatório RT-342/82 - PAULIPETRO - Consórcio CESP/IPT, 1982.
13. XAVIER, J.P. **Structural study in the Paraná Basin, Brazil**. Mapa não publicado, PAULIPETRO / BEICIP. São Paulo, 1982.
14. ZALÁN, P.V.; CONCEIÇÃO, J.C.J.; WOLFF, S.; ASTOLFI, M.A.M.; VIEIRA, I.S.; APPI, V.T.; NETO, E.V.S.; CERQUEIRA, J.R.; ZANOTTO, O.A.; PAUMER, M.L. **Análise da Bacia do Paraná**. Rio de Janeiro: PETROBRAS, DEPEX/CENPES, Relatório Interno, 5 v., 1986.

*Manuscrito Recebido em: 11 de outubro de 2007
Revisado e Aceito em: 14 de janeiro de 2008*