

COMPARTIMENTAÇÃO MAGNÉTICA-ESTRUTURAL DO SISTEMA AQUIFERO SERRA GERAL E SUA CONECTIVIDADE COM O SISTEMA AQUIFERO GUARANI NA REGIÃO CENTRAL DO ARCO DE PONTA GROSSA (BACIA DO PARANÁ)

CARLOS VIEIRA PORTELA FILHO¹, FRANCISCO JOSÉ FONSECA FERREIRA¹, ERNANI FRANCISCO DA ROSA FILHO¹ & SIDNEI PIRES ROSTIROLLA¹

Resumo A proposição recente de projetos de pesquisa hidrogeológica na Bacia do Paraná, cujo foco central é avaliar o potencial, o fluxo, o quimismo e a proteção ambiental do Sistema Aquífero Guarani (SAG), em correspondência ao arcabouço estrutural, motivou investigar uma área fortemente estruturada no centro-norte do estado do Paraná, envolvendo o Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), sobrejacente, com base na integração em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), de dados geofísicos, geológicos, topográficos, hidrogeológicos e hidroquímicos, estes últimos de poços completados no SASG. O processamento e interpretação de dados aeromagnéticos, baseados principalmente nas técnicas da fase e amplitude do sinal analítico e do gradiente horizontal, as quais realçam principalmente estruturas derivadas de fontes rasas, possibilitou refinar o padrão estrutural da região central do Arco de Ponta Grossa, permitindo, dentre outros aspectos, a proposição de três novos alinhamentos de caráter regional e com direção NW-SE, denominados Apucarana, Araongas e Maringá, além de outros com direções NE-SW e E-W. O arcabouço magnético-estrutural, assim obtido, foi cotejado com a distribuição espacial de parâmetros hidrogeológicos (potenciometria, vazão e capacidade específica) e hidroquímicos, como cátions ($\text{Na}^+ + \text{K}^+; \text{Ca}^{++}; \text{Mg}^{++}$), ânions ($\text{Cl}^-; \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{--}; \text{SO}_4^{--}$), sólidos totais dissolvidos (STD) e pH, na forma de mapas georreferenciados. Finalmente a interpretação integrada permitiu reconhecer o condicionamento das variáveis hidrogeológicas e hidroquímicas ao arcabouço estrutural, assim como revelou a conectividade dos SASG e SAG, através de diferentes taxas de mistura de suas águas. O pH e os sólidos totais dissolvidos constituíram indicadores úteis na avaliação de procedência das águas dos mencionados sistemas aquíferos.

Palavras-chave: Sistema Aquífero Guarani, Sistema Aquífero Serra Geral, Arco de Ponta Grossa, Bacia do Paraná, aeromagnetometria, lineamentos.

Abstract *MAGNETIC-STRUCTURAL COMPARTIMENTATION OF THE SERRA GERAL AQUIFER SYSTEM AND ITS CONNECTIVITY WITH THE GUARANYAQUIFER SYSTEM IN THE CENTRAL REGION OF THE PONTA GROSSA ARC (PARANÁ BASIN)* The recent proposition for research projects over the Paraná Basin area with the main purpose of evaluating the hydrogeological potential, flow patterns, chemical properties and environmental protection aspects of the Guarani Aquifer System (GAS) as conditioned by its structural framework has also led to the investigation of a highly structured area in Central-North Paraná that corresponds to the overlying Serra Geral Aquifer System (SGAS) through integration of aerogeophysical, geological, hydrogeological and hydrochemical information of wells drilled in the SGAS. Processing and interpretation of data from analytical signal and horizontal gradient techniques, which are specially useful in delineating shallow sources, allowed the regional structural patterns at Ponta Grossa Arc to be refined and three new regional NW-SE lineaments are identified: Apucarana, Araongas and Maringá. Others, NE-SW and E-W are also observed. The new magnetic-structural framework was confronted with the spatial distribution of hydrogeological (potentiometry, outflow and specific capacity) and hydrochemical parameters ($\text{Na}^+ + \text{K}^+, \text{Ca}^{++}, \text{Mg}^{++}; \text{Cl}^-, \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{--}, \text{SO}_4^{--}$; total dissolved solids and pH). The integrated interpretation allowed to recognize the regional hydrogeological and hydrochemical conditioning to the structural framework, and connection zones between SGAS and GAS as indicated by their differential water mixture rates. pH and total dissolved solids have proven to be useful indicators of water provenance

Keywords: Guarani Aquifer System, Serra Geral Aquifer System, Ponta Grossa Arc, Paraná Basin, aeromagnetometry, lineaments

INTRODUÇÃO A avaliação de dados hidroquímicos provenientes de poços completados na Formação Serra Geral, revelou que, por vezes, a composição resultante não reflete as características esperadas para estas rochas. Tais variações implicam na mistura com águas de outros aquíferos sotopostos conforme demonstrado por Bittencourt (1978), Fraga (1986, 1992), Rosa Filho *et al.* (1987) e Bittencourt *et al.* (2003), sugerindo que o Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), além de seu caráter de barreira hidráulica do Sistema Aquífero Guarani (SAG), deva ser tratado em conjunto com o SAG, em conformidade à provável conexão hidráulica e ao caráter de similaridade de alguns padrões de fluxo.

Visando contribuir para o entendimento dos mecanismos que atuam na dinâmica de fluxo do SASG, que engloba as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, Bacia do Paraná, e o seu relacionamento com os sistemas aquíferos sotopostos (principalmente o SAG), se procurou analisar o comportamento dos mesmos em uma área fortemente estruturada, situada no contexto do Arco de Ponta Grossa (Fig. 1), aonde se dispõe de uma densidade razoável de poços, decorrente da demanda de água necessária para atender importantes municípios do centro-norte do estado do Paraná, como Londrina, Maringá e Apucarana.

A pesquisa envolveu dados aeromagnéticos adquiridos du-

1 – UFPR, Departamento de Geologia, Caixa Postal 19001, Centro Politécnico, CEP 81531-980, Curitiba-PR. E-mail: cportela@petrobras.com.br; francisco.ferreira@ufpr.br; ernani@ufpr.br; rostirolla@ufpr.br.

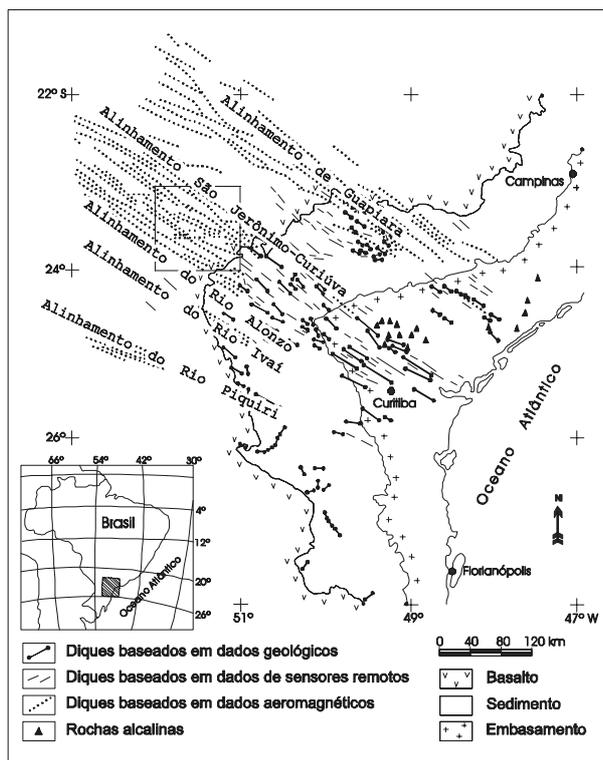


Figura 1 - Configuração do Arco de Ponta Grossa indicando a área estudada (modificado de Almeida 1983).

rante a década dos 80 (Petrobras 1981) e que haviam sido interpretados por Ferreira (1982a,b) a luz das técnicas em voga na época, das quais resultaram a atual configuração do Arco de Ponta Grossa (Fig. 1). A partir do reprocessamento destes dados, utilizando conceitos já conhecidos e que se tornaram computacionalmente mais acessíveis com a disponibilidade de *software* específicos, foi possível obter um refinamento das estruturas que constituem o arcabouço desta região, que integradas com dados geológicos, hidrogeológicos e hidroquímicos em ambiente SIG, ensejaram interpretações dos controles estruturais do fluxo e do quimismo das águas do SASG e permitiram identificar falhas e fraturas responsáveis pela conexão hidráulica com o SAG, sob condições potenciométricas favoráveis.

CONTEXTO GEOLÓGICO Considerada uma das mais proeminentes sinéclises do continente sul-americano, a Bacia do Paraná alcança atualmente uma área superior a 1.400.000 km², com lindes em tratos situados no centro-sul do Brasil, norte do Uruguai, mesopotâmia Argentina e oeste Paraguai. Seu registro estratigráfico iniciou no Neo-ordoviciano (± 450 Ma), com as primeiras incursões marinhas, passando por estágios de glaciação no Neocarbonífero e desertificação do interior continental no intervalo Triássico-Jurássico, registrando um importante evento magmático Mesozóico, até o encerramento do processo sedimentar com depósitos continentais no neo-Cretáceo (± 65 Ma). Esta história evolutiva representa um intervalo de cerca de 385 Ma, no qual estão registrados períodos descontínuos de sedimentação limitados por discordâncias regionais, relacionados a variações eustáticas do nível do mar, associada a eventos de subsidência ocorridos no continente, em resposta aos esforços orogênicos

paleozóicos na borda oeste e ao processo de abertura do oceano Atlântico Sul (Milani 1997).

O embasamento da bacia é constituído pela interação de blocos crustais que foram soldados durante o processo colisional Brasileiro, por ocasião da consolidação do Gondwana. A importância dos *trends* estruturais herdados do embasamento na evolução estratigráfica-estrutural da Bacia do Paraná foi destacada por Ferreira (1982a,b), Zalán *et al.* (1990), Soares (1991), Milani (1997), Artur (1998), Rostirolla *et al.* (2000) e Strugale (2002). Estes *trends* de estruturas que interagiram na bacia foram subdivididos por Zalán *et al.* (1990) em três grupos principais, separados por direções NW-SE, NE-SW, E-W e, secundariamente, N-S.

Ferreira (1982a,b) ressalta a importância das estruturas associadas ao Arco de Ponta Grossa dentre as demais que afetaram a bacia, além de atuarem como condutos para os derrames de lavas, predominantemente basálticas, da Formação Serra Geral. Tais condutos constituem extensos alinhamentos magnéticos-estruturais de direção NW-SE, rastreados desde o rio Paraná até a plataforma continental, extensões mínimas de 600 km, frequentemente preenchidos por diques de dolerito.

Geologia da área Na área estudada estão representados os litotipos incluídos nas superseqüências Gondwana I (porção superior), Gondwana III e Bauru. Na divisão em seqüências apresentada por Milani (1997) e Milani & Ramos (1998), a Formação Pirambóia assenta-se sobre a Formação Rio do Rasto, e ambas são posicionadas na Superseqüência Gondwana I. A Formação Botucatu, associada à Formação Serra Geral, integra a Superseqüência Gondwana III (Fig.2). Destas unidades a que apresenta maior extensão aflorante na área do estudo (Fig.3) é a Superseqüência Gondwana III, que engloba as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. Uma breve síntese da estratigrafia das formações indicadas no mapa geológico da Figura 3 é descrita a seguir:

FORMAÇÃO RIO DO RASTO Esta formação está inserida no Grupo Passa Dois de idade Permiana, ocorre na borda sudeste da área e é constituída essencialmente por siltitos esverdeados a arroxeados, podendo encerrar intercalações de argilitos, arenitos finos e níveis carbonáticos.

FORMAÇÕES PIRAMBÓIA E BOTUCATU A Formação Pirambóia (Grupo Passa Dois) caracteriza-se por uma sedimentação arenosa flúvio-eólica, submetida a condições de clima árido. Soares & Assine (1992) citam que esta formação é constituída principalmente por arenitos avermelhados, finos a médios, podendo ocorrer nos horizontes inferiores níveis de arenitos argilosos e também arenitos grossos a conglomeráticos. Sucedendo discordantemente a este pacote ocorrem sedimentos continentais do Grupo São Bento pertencentes à Formação Botucatu, representados em Soares & Assine (1992) e Milani (1997) por fácies eólicas associadas à geração de um extenso campo de dunas. Esta formação é representada por arenitos esbranquiçados, amarelados, avermelhados, com intercalações de finas camadas de argilitos e siltitos.

FORMAÇÃO SERRA GERAL A Formação Serra Geral é constituída, essencialmente, por basaltos toleíticos e andesitos basálticos, com riolitos e riocacitos subordinados, englobados no Membro Nova Prata (Bellieni *et al.* 1984 e Piccirillo *et al.* 1988). A espessura máxima desta cobertura atinge 900m na área de estudo, anotada em poço de pesquisa perfurado pela Superintendência dos Recur-

ros Hídricos e Meio Ambiente (Surehma), em Londrina-PR. As rochas vulcânicas aliadas aos enxames de diques subvulcânicos constituem as principais fontes responsáveis pelas anomalias do campo magnético nesta região, as quais permitem mapear estes

litotipos de forma indireta.

Os diques do Arco de Ponta Grossa representaram os principais condutos para a extrusão dos derrames da Formação Serra Geral. Possuem direção predominante NW-SE, podendo ser en-

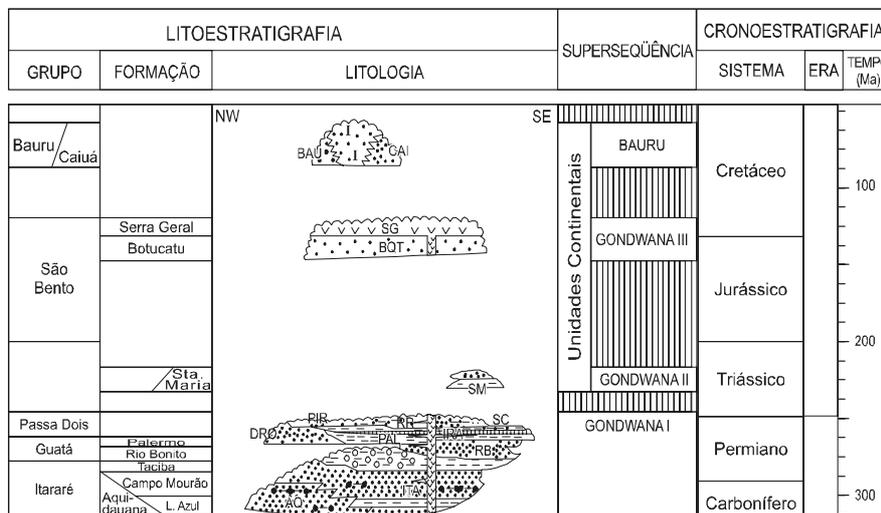


Figura 2 - Intervalo Paleozóico-Mesozóico da estratigrafia da Bacia do Paraná. Modificado de Milani & Ramos (1998).

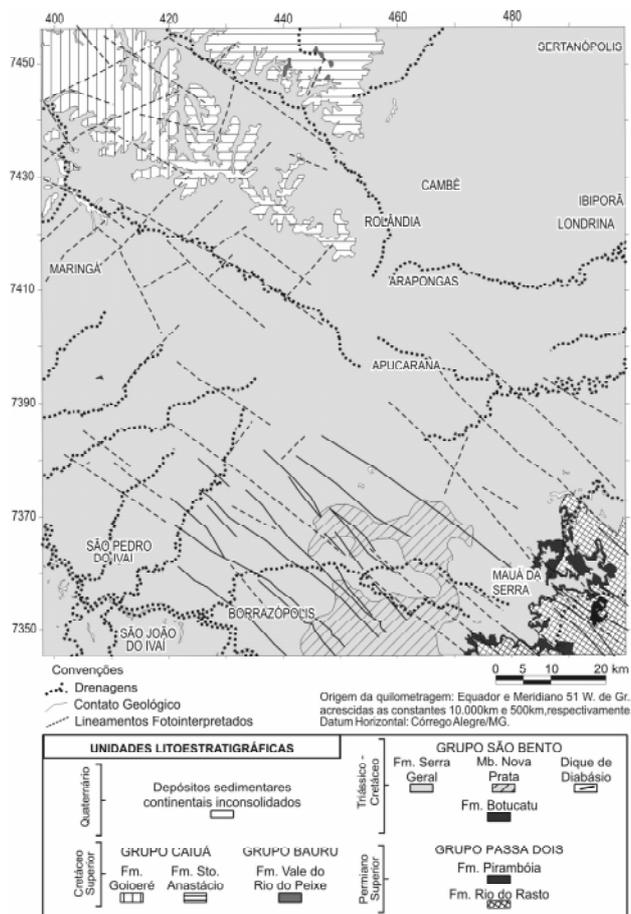


Figura 3 - Mapa geológico da área de estudo modificado de Consórcio CESP - IPT (1981).

contrados também segundo *trends* secundários (NE-SW e E-W). Tais diques são representados, predominantemente, por andesibasaltos e que de acordo com Piccirillo *et al.* (1988) são de composição química semelhante àquela das rochas vulcânicas da porção norte da bacia.

Datações recentes realizadas por Turner *et al.* (1994) através do método Ar/Ar, posicionaram o evento Serra Geral no intervalo entre 137 e 127Ma. Os diques de dolerito de direção geral NW-SE apresentaram resultados no intervalo de 134-130Ma.

Em um estudo paleomagnético extensivo dos diques de dolerito na região do Arco de Ponta Grossa, realizado em compartimentos geológicos mais antigos que a Formação Serra Geral, Raposo (1992) mostrou diferenças significativas nas direções do campo paleomagnético dos diques pertencentes a uma mesma região, sugerindo episódios distintos para a sua implantação e um intervalo de tempo suficiente para completar, pelo menos, uma variação secular. Estas variações no campo paleomagnético implicam na ocorrência de anomalias com polaridade inversa e que dificultam a interpretação do posicionamento das fontes.

FORMAÇÕES SANTO ANASTÁCIO E GOIO-ERÊ Na porção noroeste da área ocorrem, sobrepostos discordantemente aos basaltos da Formação Serra Geral, rochas siliciclásticas pertencentes ao Grupo Caiuá, cujos sedimentos foram depositados no Cretáceo Superior. A Formação Santo Anastácio apresenta aspecto maciço, enquanto que a Formação Goio-Erê exibe estratificações cruzadas. Estas duas formações são descritas por Fernandes (1992), que as caracterizou como constituídas essencialmente por arenitos quartzosos muito finos a finos.

DADOS AEROMAGNETOMÉTRICOS A área do estudo está inserida no Projeto Rio Ivaí (Petrobras 1981), o qual integra uma série de levantamentos aerogeofísicos realizados na Bacia do Paraná, principalmente durante a década dos 80. Este levantamen-

to foi executado segundo linhas espaçadas de 2.000 m na direção N-S, a uma altura média de vôo de 450 m, com amostragem em intervalos próximos de 66 m na direção das linhas de aquisição. Também foram realizadas linhas de controle espaçadas de 20.000 m, dirigidas perpendicularmente às linhas de produção.

Os dados digitais do projeto Rio Ivaí foram cedidos pela Petrobras (1981) à Universidade Federal do Paraná (UFPR) já tratados e corrigidos dos erros de posicionamento, nivelamento das linhas, deriva de vôo e remoção do IGRF – *International Geomagnetic Reference Field*.

Pré-Processamento Inicialmente os dados foram avaliados criticamente e interpolados pelo método da curvatura mínima (Briggs 1974), segundo malha regular de 500 x 500 m, selecionada após vários testes estatísticos e inspeção visual. Constatou-se que o mapa assim gerado apresentou artefatos de alta frequência ao longo das linhas de vôo e que poderiam ser amplificadas no processamento. Para remover e/ou atenuar esses ruídos, foram testadas as técnicas de micronivelamento de Minty (1991) e Geosoft (2001), optando-se pelo método bidirecional da Geosoft (2001). O mapa do campo magnético residual assim gerado é apresentado na Figura 4.

Processamento A partir da malha micronivelada do campo magnético anômalo foram aplicados os filtros do gradiente horizontal total, amplitude e fase do sinal analítico. Tais atributos foram manipulados na forma de mapas, objetivando a interpretação de anomalias, associadas à falhas e diques, realçadas através destas técnicas.

GRADIENTE HORIZONTAL TOTAL O gradiente horizontal total

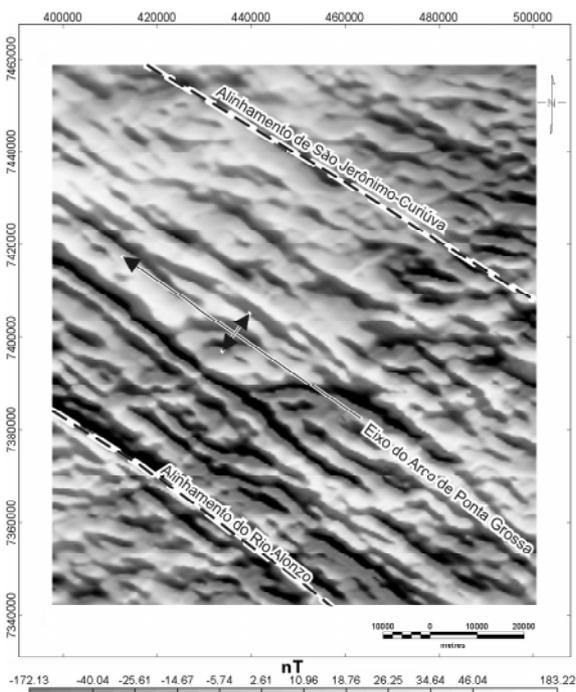


Figura 4 - Mapa do campo magnético residual micronivelado pelo método bidirecional (Geosoft 2001) e pseudoiluminado segundo N45E.

(h) de ordem zero é o vetor resultante das combinações das primeiras derivadas horizontais nas direções x e y, (Equação 1)

$$h(x,y) = [(M_x)^2 + (M_y)^2]^{1/2} \quad (1)$$

onde $M_x = \partial M / \partial x$ e $M_y = \partial M / \partial y$ correspondem às derivadas horizontais da anomalia M do campo magnético.

Este processo envolve uma transformação de fase e um realce das altas frequências. Milligan & Gunn (1997) comprovam que a transformação de fase ressalta os picos das anomalias, localizadas aproximadamente sobre as bordas de corpos espessos, e o realce da alta frequência proporciona um estreitamento destes picos para aumentar a definição das bordas dos corpos. Nesta análise, foram utilizadas apenas duas ordens de derivação, pois a aplicação de derivadas de ordem maior resultou em mapas muito ruidosos. A Figura 5 mostra o mapa do gradiente horizontal de ordem zero.

SINAL ANALÍTICO O método do sinal analítico envolve os gradientes (derivadas) horizontais e vertical de anomalias de campos potenciais. A noção de sinal analítico foi definida inicialmente por Nabighian (1972, 1974) como um “campo complexo derivado de um campo potencial”. Este método não requer um conhecimento prévio da direção de magnetização e não necessita do processamento de redução ao pólo como confirmado por Hsu *et al.* (1998).

A função amplitude do sinal analítico (A), ou seu valor absoluto, pode ser expressa por um vetor adição de duas componentes reais nas direções x e y e uma componente imaginária na direção z (Equação 2):

$$|A(x,y)| = [(M_x)^2 + (M_y)^2 + (M_z)^2]^{1/2} \quad (2)$$

onde M é a anomalia do campo potencial, $M_z = \partial M / \partial z$ é a primeira derivada vertical, $M_x = \partial M / \partial x$ e $M_y = \partial M / \partial y$ são as primeiras derivadas horizontais segundo as direções x e y, respectivamente.

As amplitudes de enésima ordem de derivação podem ser expressas igualmente em termos da derivada vertical (Equação 3), ou da

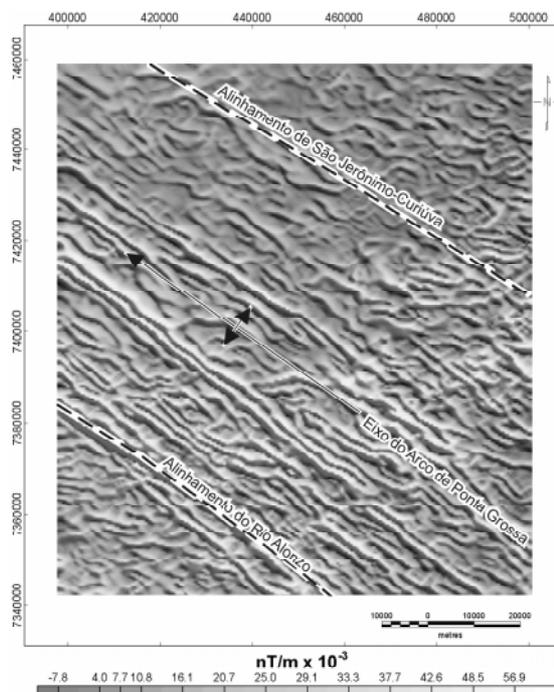


Figura 5 - Mapa do gradiente horizontal total de ordem zero (pseudoiluminado segundo N45E).

horizontal (Equação 4), de acordo com Debeglia & Coppel (1997):

$$|A(x,y)| = [(\partial M_n^z/\partial x)^2 + (\partial M_n^z/\partial y)^2 + (\partial M_n^z/\partial z)^2]^{1/2} \quad (3)$$

$$|A(x,y)| = [(\partial M_n^h/\partial x)^2 + (\partial M_n^h/\partial y)^2 + (\partial M_n^h/\partial z)^2]^{1/2} \quad (4)$$

A fase do sinal analítico é uma extensão da teoria proposta por Nabighian (1984). Thurston & Smith (1997), demonstraram que a fase permite a estimativa do mergulho e do contraste de susceptibilidade das fontes causadoras das anomalias.

A fase do sinal analítico (\tilde{O}) é definida pelo ângulo formado entre os vetores imaginário e real do sinal analítico da mesma ordem, ou seja, representa o quociente da primeira derivada vertical pelo gradiente horizontal (Equação 5):

$$\tilde{O}(x,y) = \arctg(M_y)/[(M_x)^2 + (M_y)^2]^{1/2} \quad (5)$$

Da mesma forma que no processamento do gradiente horizontal total, foram utilizadas apenas duas ordens de derivação nos mapas gerados para a amplitude e a fase do sinal analítico, devido à amplificação do ruído. As Figuras 6 e 7 representam, respectivamente, os mapas da amplitude e da fase do sinal analítico de ordem zero.

DECONVOLUÇÃO DE EULER A deconvolução de Euler (Thompson 1982) é comumente empregada na interpretação magnética, porque requer pouco conhecimento *a priori* sobre a geometria da fonte magnética e não necessita de informação a respeito do vetor magnetização.

O método é baseado na aplicação da equação homogênea de Euler, através de uma janela móvel para um dado índice estrutural h . Considerando campos potenciais, podemos escrever a equação de Euler da seguinte forma (Equação 6):

$$(x - x_o) \frac{\partial T}{\partial x} + (y - y_o) \frac{\partial T}{\partial y} + (z - z_o) \frac{\partial T}{\partial z} = \eta(B - T) \quad (6)$$

onde (x_o, y_o, z_o) representam a posição da fonte magnética, cujo campo total T é medido em (x,y,z) , B é o valor regional do campo e h é o índice estrutural.

A aplicação do método foi realizada com o programa *Gridepht* da Geosoft (1994). Para o cálculo se adotou o índice estrutural $h=1$ (modelo de dique) e erros de no máximo 10% para o posicionamento e profundidade das fontes.

O cálculo de profundidade das fontes magnéticas apresentou valores distribuídos desde a superfície até 4.500m, porém só foram encontrados resultados com bons ajustes até os 3.000m. A maior concentração de estruturas ocorreu no intervalo entre 450 e 1.250m (Figs. 8 e 9).

MODELO DIGITAL DE TERRENO A partir da carta topográfica vetorizada da Folha Londrina (IBGE 1977), na escala 1:250.000, foi gerado um modelo digital de terreno (MDT) no programa Oasis Montaj 5.0, interpolado através do método da curvatura mínima e com células de 600 x 600m (Fig. 10).

O traçado dos alinhamentos de relevo teve por finalidade aferir as estruturas obtidas através do método magnético, além de suprir a dificuldade de identificação das estruturas de direção N-S, mascaradas por artefatos segundo a direção do levantamento e pelo micronivelamento.

ARCABOUÇO MAGNÉTICO-ESTRUTURAL Para determinar as principais estruturas e sintetizá-las em um arcabouço magnético-estrutural, foram interpretados os mapas do gradiente horizontal total, da amplitude e da fase do sinal analítico de ordens zero e um, das tendências em profundidade das fontes magnéticas (Fig. 8), acrescido das feições reveladas pelo MDT (Fig. 10). Na análise

do MDT, foi constatada que a direção N-S também apresenta grande importância na área e a mesma não foi contemplada pela interpretação geofísica, pois é paralela a orientação das linhas de vôo,

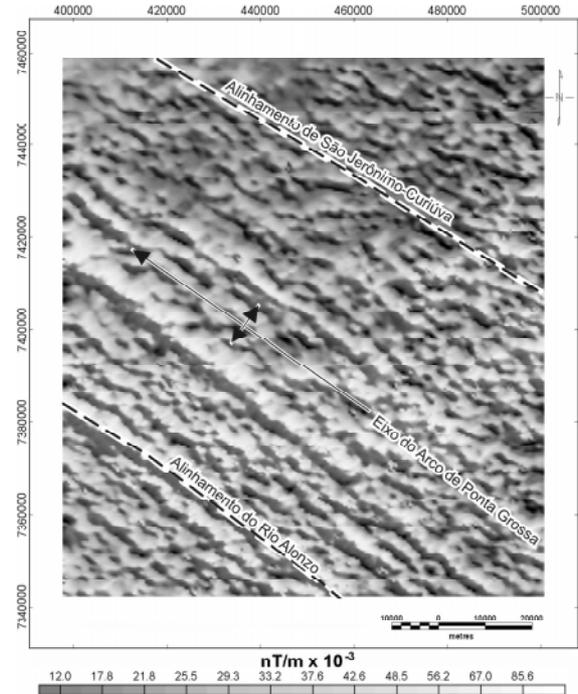


Figura 6 - Mapa da amplitude do sinal analítico de ordem zero (pseudocolorido segundo N45E).

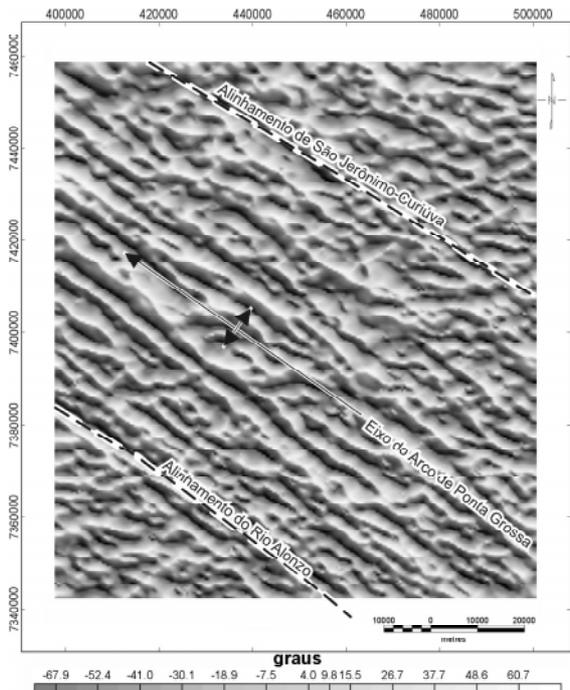


Figura 7 - Mapa da fase do sinal analítico de ordem zero (pseudocolorido segundo N45E).

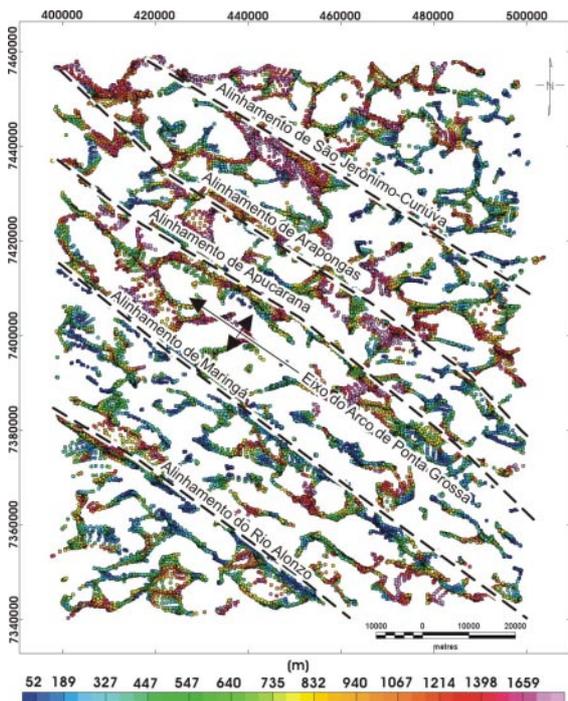


Figura 8 - Mapa de profundidades das fontes magnéticas.

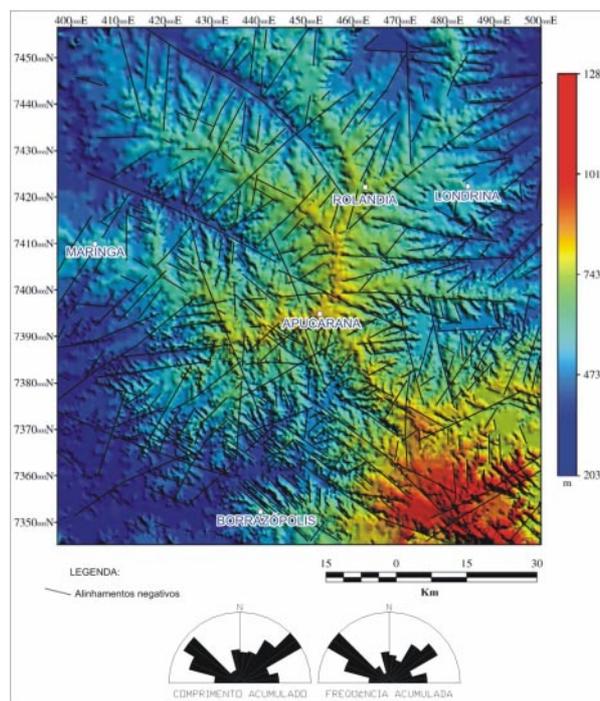


Figura 10 - Alinhamentos estruturais extraídos do MDT e diagrama de rosetas revelando as principais tendências da área.

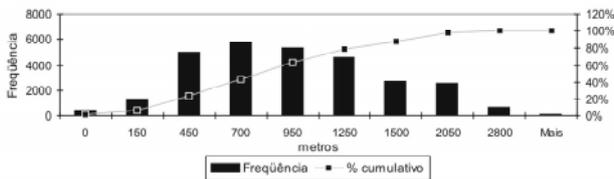


Figura 9 - Histograma de frequência da distribuição de profundidades das fontes magnéticas.

além da eliminação de sinais decorrentes do micronivelamento.

Os alinhamentos observados não estão relacionados a uma única estrutura ou dique, mas a um somatório de fontes em virtude da altura de aquisição dos dados e da magnetização dos corpos, conforme também observado no trabalho de Ussami *et al.* (1991), e dessa forma refletem os principais domínios estruturais da região central do Arco de Ponta Grossa (Fig. 11), os quais estão relacionados com a evolução tectônica da Bacia do Paraná. A Figura 11, portanto, exprime as principais tendências e continuidades dos alinhamentos e diques, onde a espessura de cada domínio está relacionada principalmente às estruturas do gradiente horizontal total, as quais delimitam aquelas da amplitude do sinal analítico, vinculadas a um mesmo *trend*. Ainda neste mapa pode-se facilmente correlacionar as principais estruturas de direção NW-SE com os alinhamentos do Arco de Ponta Grossa, onde foi possível identificar outras feições importantes no contexto deste arco, caracterizadas também pela persistência em profundidade das fontes. Dessa maneira, além das estruturas descritas anteriormente em Ferreira (1982a,b), foram reconhecidas outras três de caráter regional, denominadas por Portela Filho (2003) de alinhamentos de Maringá, Apucarana e Araçongas.

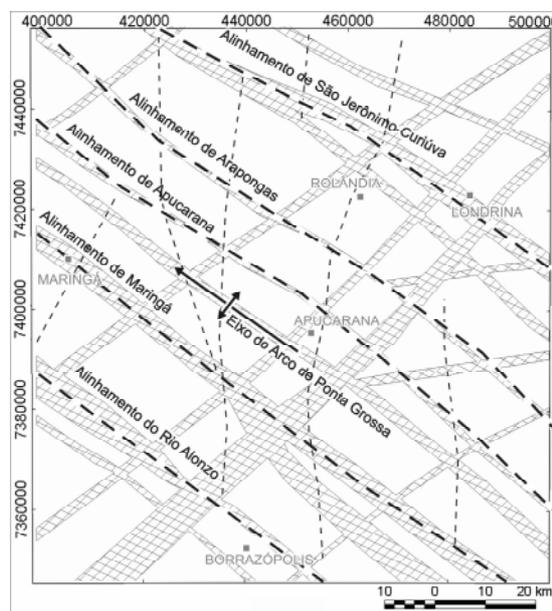


Figura 11 - Arcabouço magnético-estrutural simplificado da região central do Arco de Ponta Grossa.

SISTEMAS AQUÍFEROS GUARANI E SERRA GERAL O Sistema Aquífero Guarani (SAG) é considerado um dos maiores reservatórios de água subterrânea do mundo, que abrange unidades areníticas do Triássico (formações Pirambóia e Rosário do Sul, no Brasil, e Buena Vista no Uruguai) e do Jurássico (formações

Botucatu no Brasil, Misiones no Paraguai e Taquarembó no Uruguai e na Argentina). Em poços profundos é possível a extração por unidade de captação de até 1.000.000 L/h, por vezes sob condições de confinamento e que se encontram subjacente a um conjunto de rochas magmáticas (essencialmente basaltos e diques de dolerito da Formação Serra Geral) as quais constituem, por sua vez, o SASG, cujas espessuras oscilam entre 200 e 1000m.

Em várias regiões do sul e do sudeste do Brasil, assim como na Argentina e no Uruguai, existe o fenômeno da surgência natural, inclusive com a temperatura da água atingindo até 65° C como identificado por Rosa Filho *et al.* (2000).

Quanto ao comportamento estrutural do SAG, Araújo *et al.* (1995) avaliou que diversos fatores influenciaram a atual configuração, como os depocentros de lavas da Formação Serra Geral, a ativação regional de sistemas de falhas, os soerguimentos das bordas da bacia e dos arcos de Ponta Grossa, Campo Grande, Rio Grande e Sinclinal de Torres.

O Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) é fissural e abrange todo o sul-sudeste do Brasil, inclusive países vizinhos (Uruguai, Paraguai e Argentina). Conforme Rebouças (1978) está sob condições hidrogeológicas heterogêneas e anisotrópicas. O modo de ocorrência da água subterrânea do SASG está condicionado tanto a fatores genéticos do pacote basáltico (*intertrapp*, amígdalas, vesículas e dijunções), quanto à presença de estruturas (falhas, fraturas e diques de dolerito) que condicionam a circulação das águas nestas rochas. O conjunto destes fatores aumenta a capacidade de armazenamento de água. A recarga principal ocorre por pluviometria, principalmente em áreas com desenvolvido manto de alteração, topografia pouco acidentada e considerável cobertura de mata nativa. Localmente, onde há condições potenciométricas e estruturais favoráveis, pode ocorrer recarga ascendente a partir do SAG. A tipologia das águas do SASG é bicarbonatada cálcica, decorrente da ação intempérica dos basaltos típicos.

Hidrogeologia e Hidroquímica Os dados hidrogeológicos foram cedidos pela Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (Sudersa-PR), oriundos de 625 poços perfurados no período de 1961 a 1995. Para o presente estudo considerou-se apenas os poços completados na Formação Serra Geral. Inicialmente procedeu-se uma análise crítica e estatística dos dados (Tabela 1), eliminando os dados espúrios e padronizando as unidades.

Em seguida os dados foram interpolados pelo método da curvatura mínima (Briggs 1974), através de células quadradas de 5000 x 5000 m. Com base neste procedimento foram gerados mapas de contorno das seguintes variáveis: potencimetria, vazão, capacidade específica, pH e sólidos totais dissolvidos (STD).

Também foram elaborados mapas ternários dos cátions (Mg^{++} ; Ca^{++} ; $Na^{+} + K^{+}$) e dos ânions (SO_4^{--} ; $HCO_3^{-} + CO_3^{--}$; Cl^{-}), provenientes de 57 poços selecionados por Buchmann (2002) e que apresentaram análises químicas com diferenças de balanço iônico inferiores a 15%. A pequena quantidade de dados hidroquímicos restringiu a distância de interpolação, impedindo previsões em toda a área do estudo.

Os mapas ternários são comumente empregados na análise de dados gamaespectrométricos e de imagens de satélite (fusão de bandas), onde são relacionados em uma só carta três *grids*. Estes *grids* são identificados de maneira que cada um deles está associado a um dos extremos de uma escala de cor *R* (*red*), *G* (*green*), *B* (*blue*).

A seguir serão descritos os dados obtidos através da análise

Tabela 1 - Estatísticas dos parâmetros de interesse das águas subterrâneas da área de estudo.

Estatísticas	Potencimetria (m)	Vazão (m ³ /h)	Capacidade Específica (m ³ /h/m)	pH	STD
máximo	862,10	185,00	42,50	9,90	518,00
mínimo	312,00	0,25	0,01	5,70	11,00
média	523,92	18,69	1,82	7,40	161,01
desvio-padrão	98,2	24,77	3,74	0,72	82,44

estatística e os mapas das mencionadas variáveis, em conjunto com o arcabouço magnético-estrutural simplificado da Figura 11.

O mapa da superfície potenciométrica (Fig. 12) mostra uma forte tendência de sudeste para noroeste, com as cotas mais elevadas (± 850 m) situadas no quadrante SE, as quais decaem gradativamente até atingirem valores da ordem de ± 400 m no extremo NW, portanto mergulhando para o interior da bacia. Esta configuração coincide com o eixo do Arco de Ponta Grossa, o qual está em conformidade com a topografia, denotando um comportamento de aquífero livre, também observado por Fraga (1986). A partir deste alto central, a superfície potenciométrica decresce gradativamente também nos sentidos NE e SW, atingindo as menores cotas em seus respectivos extremos (± 350 m).

Um perfil de direção SW-NE (Fig. 12), permitiu relacionar a superfície potenciométrica e a topografia da área (Fig. 13A). Nota-se que a superfície potenciométrica normalmente apresenta variações locais, as quais não seguem a tendência geral da topografia da área. As maiores diferenças entre as superfícies potenciométrica e altimétrica são encontradas na porção central da área, o que deve estar refletindo uma situação de maior controle estrutural determinada pela presença de diques e falhas encontrados em maior número no contexto da região central do Arco de Ponta Grossa.

Nota-se uma boa correspondência entre os sólidos totais dissolvidos (STD) e as vazões (Fig. 13B), estando os picos mais elevados dos primeiros associados a quedas das últimas. Nestes locais, devido à circulação restrita e/ou contribuição do SAG, os valores de STD são elevados e, por acumulação, reduzem os espaços dos condutos de água, principalmente quando bombeados.

Nos mapas de vazão e capacidade específica (Figs. 14 e 15), observa-se uma compartimentação regional balizada pelo eixo do Arco de Ponta Grossa, onde a norte desta estrutura as magnitudes de tais variáveis são mais elevadas, em contraste com a porção sul. Na análise em escala de maior detalhe, nota-se áreas com altas produtividades, aparentemente confinadas em compartimentos balizados por estruturas NW-SE e NE-SW. A moldura magnética-estrutural sobreposta a estes mapas mostra que as áreas de maior produtividade estão respectivamente controladas pelo Alinhamento São Jerônimo-Curiúva, sobretudo os núcleos a norte de Londrina, onde existem mais dados, e pelos alinhamentos de Arapongas e Apucarana, próximos do eixo do arco, onde a densidade de diques de dolerito é maior. Na porção central da área a ocorrência de valores anômalos de capacidade específica foi constatada justamente sobre alinhamentos de direção NW-SE.

Entre o eixo do Arco de Ponta Grossa e o Alinhamento de Maringá, observam-se valores altos de capacidade específica que não correspondem a vazões elevadas. Como esta área apresenta uma maior estruturação derivada da sua posição em relação ao eixo do Arco de Ponta Grossa, é provável que a circulação aí seja mais complexa.

O mapa de contorno dos sólidos totais dissolvidos (Fig. 16),

exibe claramente três áreas de maior concentração, respectivamente a nordeste do Alinhamento São Jerônimo-Curiúva, no extremo noroeste da região entre os alinhamentos de Maringá e Apucarana, e a sudoeste do Alinhamento do Rio Alonzo, denotando influência das estruturas associadas ao Arco de Ponta Grossa na distribuição dos teores. Altos valores de STD denotam águas com maior tempo de residência no aquífero, mas também podem estar entremeadas com água proveniente de outros reservatórios.

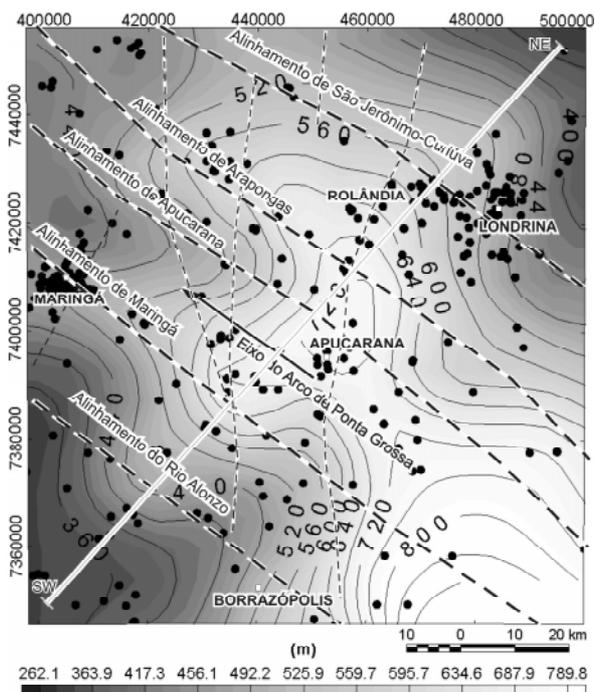


Figura 12 - Mapa potenciométrico do Sistema Aquífero Serra Geral indicando a localização do perfil SW-NE.

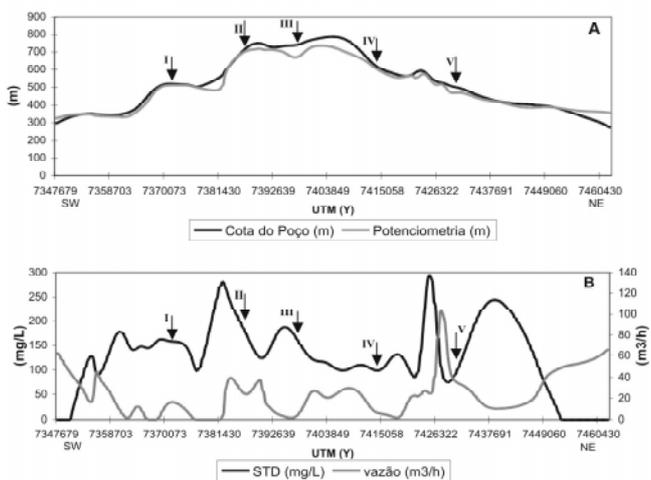


Figura 13 - Correlação entre potencimetria e topografia (A) e entre sólidos totais dissolvidos e vazões (B) ao longo do perfil SW-NE indicado na Fig. 12 (I – Alinhamento do Rio Alonzo, II – Alinhamento de Maringá, III – Alinhamento de Apucarana, IV – Alinhamento de Arapongas, V – Alinhamento de São Jerônimo Curiúva).

A análise conjunta dos três últimos mapas revela que as áreas com elevadas vazões e capacidades específicas coincidem com aquelas de menores teores de STD. Ao mesmo tempo existem tratos com altas capacidades específicas e vazões baixas que estão aparentemente relacionados com concentrações mais elevadas.

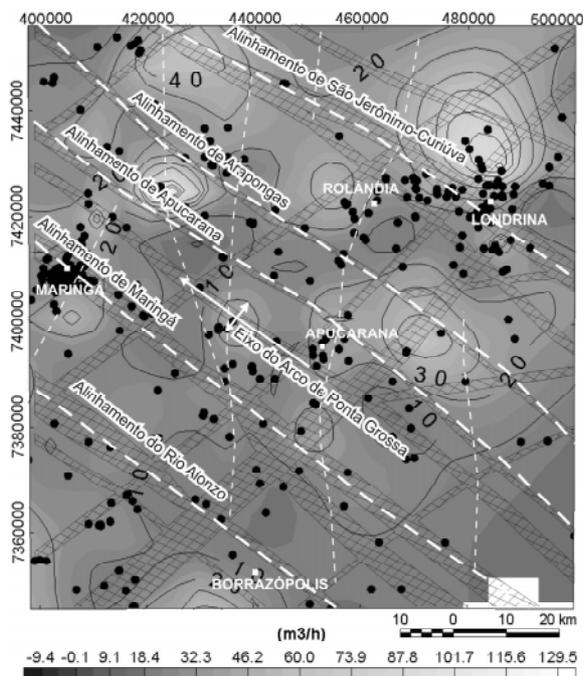


Figura 14 - Mapa de vazões e o arcabouço magnético-estrutural simplificado.

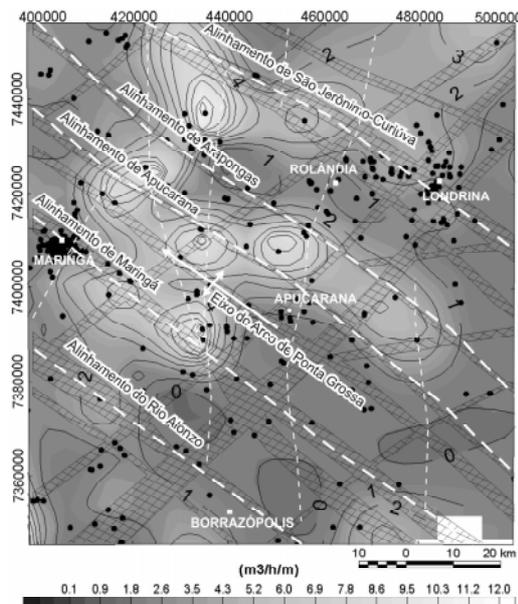


Figura 15 - Mapa da capacidade específica e o arcabouço magnético-estrutural simplificado.

das de sólidos totais dissolvidos.

O mapa do potencial hidrogeniônico (Fig. 17) foi gerado a partir dos dados de 507 poços, mais concentrados principalmente em torno das cidades de Londrina e Maringá. Neste mapa pode-se observar que os valores alcalinos se dispõem segundo as principais direções estruturais, e que as maiores concentrações normalmente estão nos cruzamentos destas tendências. Tais tendências foram encontradas principalmente: (i) ao sul de Londrina, no cruzamento entre o Alinhamento São Jerônimo-Curiúva e uma megaestrutura de direção NE-SW; (ii) no eixo do Arco de Ponta Grossa e no Alinhamento de Maringá, ao interceptar a mesma megaestrutura de direção NE-SW, além de outra mais a noroeste; (iii) ao norte de Maringá e oeste de Borraçópolis, relacionado ao eixo do Arco de Ponta Grossa e ao Alinhamento do Rio Alonzo, respectivamente. Para o SASG, os valores alcalinos do pH são comumente atribuídos a águas subterrâneas com influência do SAG sotoposto.

Os dados hidroquímicos dos cátions e dos ânions (Buchmann 2002) foram agrupados na Tabela 2, mostrando os principais elementos descritivos de sua distribuição.

Os dados químicos analisados revelam comportamento semelhantes aqueles descritos por Fraga (1986), Rosa Filho *et al.* (1987) e Bittencourt *et al.* (2003), com exceção dos cátions sódio e potássio que se encontram acima dos valores médios esperados para o SASG

Com o diagrama de Piper (Fig. 18), construído a partir dos dados de poços completados na Formação Serra Geral, foram caracterizadas as águas subterrâneas do SASG. Nos poços analisados são identificadas predominantemente águas bicarbonatadas cálcicas, mas também podem ser constatadas tendências para águas bicarbonatadas cálcio sódicas a cálcio magnesianas e bicarbonatadas sódicas.

Perfazendo 56% das amostras analisadas, as águas bicarbonatadas cálcicas se caracterizam por apresentar teores médios de cálcio mais elevados (20 mg/L), profundidade média da entrada d'água de 60m, e valores de pH próximos da neutralidade. Nestas águas são encontrados valores médios de sólidos totais dissolvidos em torno de 123 mg/L.

As águas bicarbonatadas sódicas, características de conexão com o SAG, representam 19,5% do universo de amostras, pH maiores que 8, sólidos totais dissolvidos com valores médios de 180 mg/L, e as profundidades das entradas d'água são superiores a 80 m.

As águas bicarbonatadas cálcio magnesianas (10,5%), apresentam profundidade média da entrada d'água de 25 m, pH em torno de 6,7 e sólidos totais dissolvidos médios de 78 mg/L. Para Bittencourt *et al.* (2003), teores maiores de magnésio podem se relacionar perfeitamente com o SASG

É ainda importante ressaltar que os poços com maiores profundidades médias de entrada d'água apresentaram tendência para águas bicarbonatadas sódicas, enquanto aqueles com tendências para águas bicarbonatadas cálcio-magnesianas indicaram contri-

Tabela 2 - Estatísticas dos cátions e dos ânions das águas subterrâneas da área do estudo.

Estatísticas	Elementos Maiores (mg/L)						
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻ + CO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻
máximo	140,84	46,55	87,27	3,25	201	23	34
mínimo	0,9	0,07	0,4	0,1	4	0	0
média	16,44	3,77	14,65	0,91	69,82	3,31	2,76
desvio padrão	19,4	6,28	18,17	0,81	42,25	4,44	5,64

buições a menores profundidades médias.

Nas águas bicarbonatadas cálcio sódicas (10,5%), a profundidade média das entradas d'água é de 73 m, o pH assume valores próximos de 8, e os sólidos totais dissolvidos variam em torno de

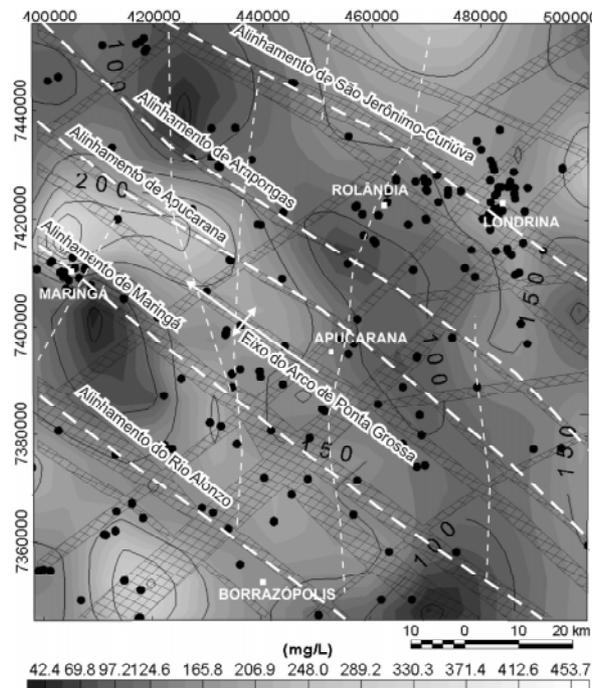


Figura 16 - Mapa de sólidos totais dissolvidos e o arcabouço magnético-estrutural simplificado.

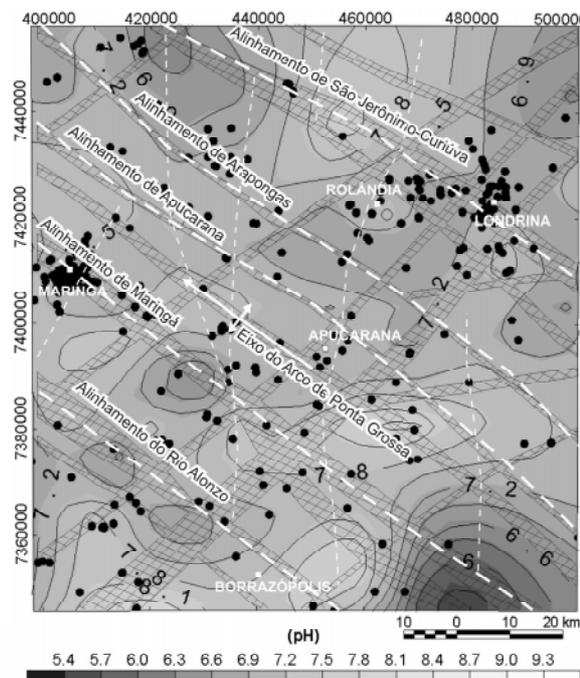


Figura 17 - Mapa do potencial hidrogeniônico (pH) e o arcabouço magnético-estrutural simplificado.

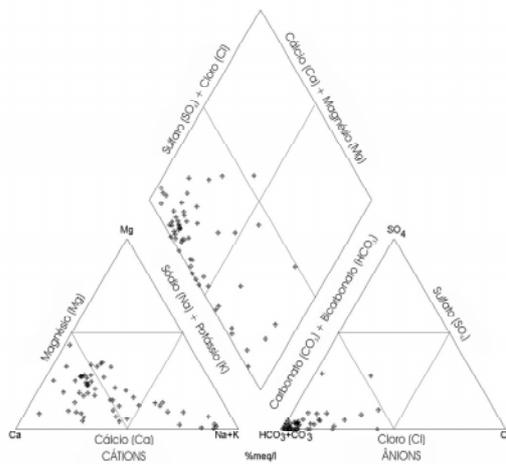


Figura 18 - Diagramas de Piper do SASG na região central do Arco de Ponta Grossa.

170 mg/L. Ainda são observadas duas amostras no campo de águas bicarbonatadas sódio cálcicas (3,5%), as quais apresentam pH francamente alcalino.

Segundo Rosa Filho *et al.* (1987) a influência de águas do SAG em fontes naturais e poços perfurados na Formação Serra Geral, é caracterizada por teores maiores de sódio, pH alcalinos e, em alguns casos, pelas temperaturas elevadas.

Bittencourt *et al.* (2003), analisaram o quimismo das águas subterrâneas da bacia do rio Piquiri, onde obtiveram resultados semelhantes aos obtidos neste trabalho para a região central do Arco de Ponta Grossa. Para estes autores, o aumento da alcalinidade das águas reflete-se no incremento dos teores de sódio decorrente da insolubilização do cálcio e também do magnésio.

Os poços perfurados no extremo noroeste da área, estão próximos do contato com o Grupo Caiuá. Em seis poços inseridos neste contexto, foi constatado que a razão Na⁺/K⁺ assume valores menores que um, caracterizando a influência de litotipos do Grupo Caiuá (sistema aquífero sobrejacente), de acordo com Bittencourt (1978 e 1993). Nas águas relacionadas aos basaltos, tal razão varia entre 2,02 e 18,02 e em poços sobre o Grupo Caiuá este índice oscila entre 0,27 e 1,58, onde os valores mais elevados são atribuídos por Bittencourt *et al.* (2003) a contaminação por águas dos basaltos.

As razões Na⁺/Ca⁺⁺ mostram valores acima de um em quase todas as águas subterrâneas bicarbonatadas sódicas e bicarbonatadas sódio cálcicas. Apenas uma amostra de água bicarbonatada sódica apresenta razão Na⁺/Ca⁺⁺ menor que 1, além do pH igual a 5,8. Nesta amostra a razão Na⁺/K⁺ é menor que um, indicando influências do aquífero sobrejacente.

Na tentativa de avaliar a distribuição espacial das fácies hidroquímicas antes descritas, apesar da insuficiência de dados iônicamente balanceados, foi utilizado o modelo ternário da Figura 19, cuja escala de cor associa os vértices do triângulo R-G-B aos cátions (Mg⁺⁺; Ca⁺⁺; Na⁺ + K⁺) e aos ânions (SO₄⁻; HCO₃⁻ + CO₃⁻; Cl⁻), de modo semelhante ao empregado nos diagramas ternários de Piper. Para a geração dos mapas ternários das Figuras 20 e 21, as unidades dos cátions e dos ânions foram convertidas para meq/L. Dessa maneira as cores estão relacionadas aos campos de classificação química das águas, permitindo uma análise georreferenciada da distribuição do quimismo do SASG e a locali-

zação de *trends* e/ou áreas de conexão hidráulica com o SAG subjacente. Logicamente, uma interpretação consistente destes mapas deve levar em conta a precisão do posicionamento dos dados e a qualidade das análises hidroquímicas.

Nestes mapas (Figs. 20 e 21), podem ser identificadas áreas de maior ou menor contribuição do SAG, as quais normalmente caracterizam-se por apresentar teores de sódio mais elevados, em relação aos demais cátions.

Como observado na análise do diagrama de Piper (Fig. 18), a tendência predominante de distribuição dos cátions e dos ânions nas águas subterrâneas é bicarbonatada cálcica, mas também ocorrem águas de composição bicarbonatada cálcio-magnesianas e cálcio-sódica, além de bicarbonatada sódica.

No mapa dos ânions (Fig. 20), observa-se que a composição predominante é bicarbonatada. Também é possível visualizar áreas onde as cores indicam tendências para tipos de águas cloradas e sulfatadas, representativas de variações menores dentro do campo das águas bicarbonatadas.

Na região circundante ao Alinhamento de Maringá, observa-se que a tendência das águas é predominantemente bicarbonatada sódica (Figs. 20 e 21), revelando a importância desta estrutura de direção NW-SE na conexão entre os sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani. Os poços com estas características foram perfurados ao longo do alinhamento e próximos de intersecções com estruturas de direção NE-SW.

Outro local de contribuição de águas bicarbonatadas sódicas ocorre próximo da cidade de Londrina, onde altos valores de sódio coincidem com o cruzamento de estruturas NE-SW com o Alinhamento São Jerônimo-Curiúva, e, mais a sul, no cruzamento de uma megaestrutura NE-SW com outra de direção aproximada E-W.

De acordo com o observado anteriormente, as águas que possuem influências do SAG normalmente apresentam caráter alcalino. É interessante observar a correspondência entre tratos mais alcalinos indicados no mapa do pH (Fig. 17), com áreas de composição bicarbonatada sódica e sódio cálcica. Dessa maneira, o mapa do potencial hidrogeniônico pode ser utilizado para indicar áreas com maior favorabilidade de conexão entre os sistemas aquíferos. Um exemplo ocorre no prolongamento NW do Alinhamento de Maringá, onde, apesar da ausência de outros dados hidroquímicos, o mapa do pH revela altos valores, sugerindo a presença de águas

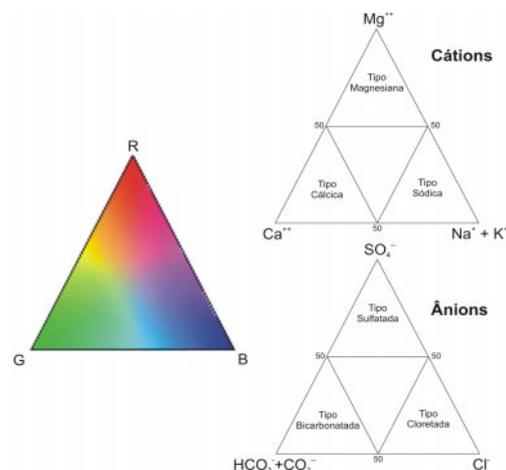


Figura 19 - Comparação entre o modelo triangular RGB e os diagramas de Piper para cátions e ânions.

bicarbonatadas sódicas provenientes da conexão entre o SAG e o SASG

Tendências para águas bicarbonatadas cálcio magnesianas foram encontradas próximas aos alinhamentos de Apucarana e Arapongas. Nesta área, a distribuição das águas não exibe um padrão bem definido de ocorrência.

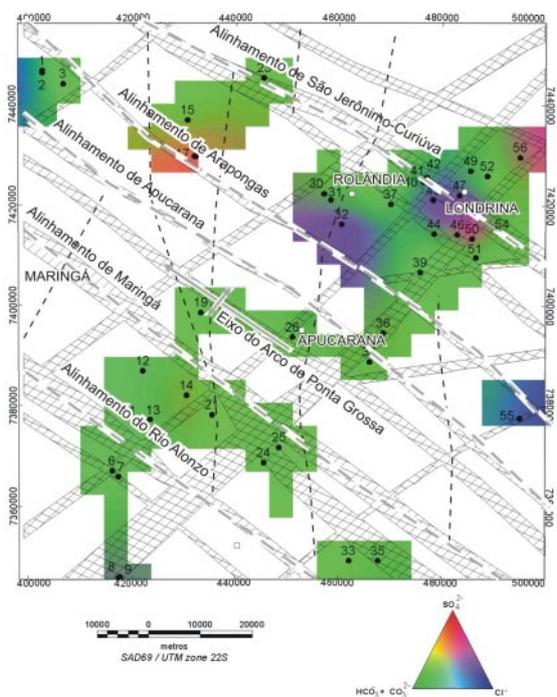


Figura 20 - Mapa ternário dos ânions e o arcabouço magnético-estrutural simplificado.

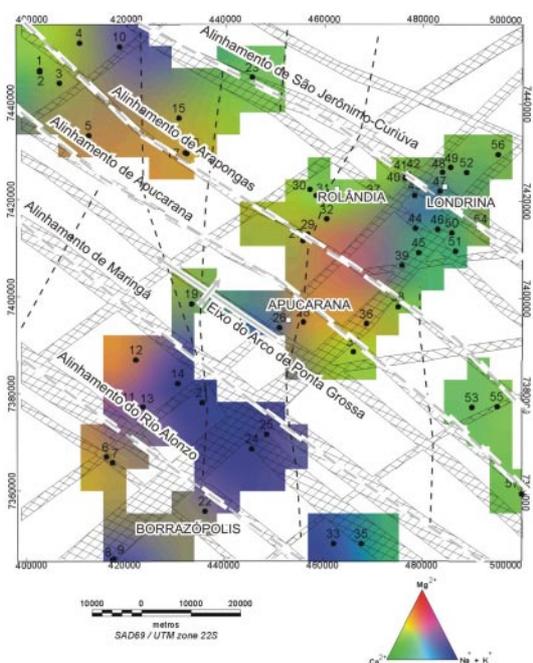


Figura 21 - Mapa ternário dos cátions e o arcabouço magnético-estrutural simplificado.

CONCLUSÕES A utilização de técnicas modernas de processamento de dados aeromagnéticos, como gradiente horizontal, amplitude e fase do sinal analítico e deconvolução de Euler, em regiões fortemente magnetizadas, se mostraram eficazes no delineamento do arcabouço magnético-estrutural e nas estimativas de profundidades das fontes da região central do Arco de Ponta Grossa.

A interpretação dos mapas magnéticos permitiu refinar a megaestruturação da região central do Arco de Ponta Grossa, por meio da proposição de novos alinhamentos, segundo a direção NW-SE, como os de Apucarana, Arapongas e Maringá.

Em relação ao comportamento das águas subterrâneas, o trabalho procurou demonstrar, apesar de seu caráter regional e à luz dos dados disponíveis, que a distribuição espacial dos parâmetros hidrogeológicos do Sistema Aquífero Serra Geral, como potencimetria, vazão, capacidade específica, potencial hidrogeniônico (pH) e sólidos totais dissolvidos (STD), está condicionada pela trama magnética-estrutural proposta. Desta forma observou-se que a superfície potenciométrica, em geral, acompanha o relevo, sugerindo um comportamento de aquífero livre, mergulhando para o interior da bacia, e que os maiores contrastes ocorrem no ápice do Arco de Ponta Grossa, denotando o controle estrutural.

Os mapas de vazão e capacidade específica mostraram que as áreas de maior produtividade são condicionadas por compartimentos balizados por estruturas segundo as direções NW-SE e NE-SW. Tais áreas coincidem com baixos teores de STD. Já os tratos de maiores concentrações de STD, igualmente vinculados a grandes estruturas, sugerem maior tempo de residência das águas ou contribuição de outros aquíferos sotopostos como o SAG

A distribuição espacial do pH indica, do mesmo modo, um condicionamento estrutural, onde as áreas alcalinas, normalmente, apresentam afinidade com águas do SAG, enquanto tendências à neutralidade são características do SASG. Desta forma na ausência de outros dados hidroquímicos, o pH pode ser um indicativo da conexão entre os mencionados sistemas aquíferos.

Os dados hidroquímicos, representados na forma de diagramas de Piper, mostraram que as águas características do SASG são predominantemente bicarbonatadas cálcicas (56%) e bicarbonatadas cálcio magnesianas (10,5%), confirmando estudos anteriores. Já as áreas dominadas por águas bicarbonatadas sódicas (19,5%), bicarbonatadas sódio cálcicas (3,5%) e bicarbonatadas cálcio sódicas (10,5%), por outro lado, são resultantes de conexão com o SAG, evidenciando diferentes taxas de mistura com águas do SASG.

A distribuição georreferenciada das variáveis hidroquímicas, indicada pelos mapas ternários coloridos dos cátions e dos ânions, mostra com clareza o condicionamento a grandes estruturas e compartimentos, mesmo considerando o número restrito de amostras. Nestes mapas, são indicadas as áreas de predominância das águas características do SASG, assim como aquelas de conexão com o SAG, ressaltando-se um trato localizado entre os alinhamentos do Rio Alonzo e Maringá (cor azul), sudoeste da área, no mapa dos cátions. As evidências hidroquímicas conduzem a que se caracterize um sistema aquífero híbrido, com taxas variadas de mesclagem das águas do SASG e do SAG.

Finalmente, considera-se que os métodos utilizados e os

resultados apresentados poderão ter desdobramentos importantes para a exploração sustentável de águas subterrâneas em áreas fortemente estruturadas dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani.

Agradecimentos Os autores agradecem a Petróleo Brasileiro

S.A. (Petrobras) pela cessão dos dados aeromagnetométricos, à Superintendência de Recursos Hídricos e Saneamento do Paraná (Suderhsa-PR) pela cessão dos dados hidrogeológicos, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo incentivo na forma de bolsa de mestrado e aos revisores da RBG pelas sugestões ao manuscrito.

Referências

- Almeida F.F.M. de 1983. Relações tectônicas das rochas alcalinas mesozóicas da região meridional da Plataforma Sul-Americana. *Rev. Bras. Geoc.*, **13**:139-158.
- Araújo L.M., França A.B., Potter P.E. 1995. Aquífero gigante do mercosul no Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai: mapas hidrogeológicos das formações Botucatu, Buena Vista, Misiones e Tacuarembó. *UFPR/Petrobras*, 16 pp., 9 mapas.
- Artur P. C. 1998. *Paleolineamentos na Bacia do Paraná: favorabilidade para a acumulação de hidrocarbonetos*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná. 202 p.
- Belliemi G., Brotzu P., Comin-Chiaramonti P., Ernesto M., Melfi A.J., Pacca I.G. e Piccirillo E.M. 1984. Flood basalt to rhyolite suites in the southern Paraná plateau (Brazil): paleomagnetism, petrogenesis and geodynamic implications. *Journal of Petrology*, **25**:579-618.
- Bittencourt A.V.L. 1978. *Sólidos hidrotransportados na bacia hidrográfica do rio Ivaí: aplicação de balanço hidrogeoquímico na compreensão da evolução de processos da dinâmica externa*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, USP.
- Bittencourt A.V.L. 1993. Sobre a quantificação do intemperismo na bacia do rio Piquiri-PR. *Bol. Paran. Geoc.*, **41**:35-51.
- Bittencourt A.V.L., Rosa Filho E. F., Hindi E. C., Buchmann Filho A. C. 2003. A influência dos basaltos e de misturas com águas de aquíferos sotopostos nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral na bacia do rio Piquiri, Paraná – BR. *Rev. Águas Subterrâneas*, **17**:67-76.
- Briggs I.C. 1974. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, **39**:39-48.
- Buchmann Filho A. C. 2002. *Caracterização das águas do Sistema Aquífero Serra Geral no estado do Paraná*. Dissertação de mestrado. Curso de Pós-graduação em Geologia, UFPR, 150 p.
- Consórcio CESP-IPT 1981. Mapa geológico integrado do bloco SF-22-U (ACS-74). Escala 1:250000.
- Debeglia N. & Coppel J. 1997. Automatic 3-d interpretation of potential field data using analytic signal derivatives. *Geophysics*, **62**:87-96.
- Fernandes L.A. 1992. *A cobertura cretácea suprabasáltica no Paraná e Pontal do Paranapanema (SP): os grupos Bauru e Caiuá*. Dissertação de Mestrado. IG/USP.
- Ferreira F.J.F. 1982a. Alinhamentos estruturais–magnéticos da região centro-oriental da bacia do Paraná: reavaliação da potencialidade e prospectividade em hidrocarbonetos. Consórcio CESP-IPT, p.144-166.
- Ferreira F.J.F. 1982b. *Integração de dados aeromagnéticos e geológicos: configuração e evolução tectônica do arco de Ponta Grossa*. Dissertação de Mestrado. IG/USP, 170 p.
- Fraga C.G. 1986. *Introdução ao zoneamento do Sistema Aquífero Serra Geral no estado do Paraná*. Dissertação de Mestrado, IG/USP, 125 p.
- Fraga C. G. 1992. *Origem de fluoretos em águas subterrâneas dos sistemas aquíferos Botucatu e Serra Geral*. Tese de Doutorado, IG/USP, 177 p.
- Geosoft 1994. Griddepth: 3-D Euler deconvolution of potential data field. Geosoft Technical Note, 29p.
- Geosoft 2001. Microlevelling using bi-directional gridding. Geosoft Technical Note, 2 p.
- Hsu S. -K., Coppens D., Shyu C. -T. 1998. Depth to magnetic source using the generalized analytical signal. *Geophysics*, **63**:1947-1957.
- IBGE 1977. Carta topográfica de Londrina SF-22-Y-D. Escala 1:250.000.
- Milani E.J. 1997. *Evolução tectono-estratigráfica da bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica sul-ocidental*. Tese de Doutorado. IG/UFRGS, 254 p.
- Milani E.J. & Ramos V.A. 1998. Orogenias paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da bacia do Paraná. *Rev. Bras. Geoc.*, **28**:473-484.
- Milligan P.R. & Gunn P.J. 1997. Enhancement and presentation of airborne geophysical data. AGSO J. Australian Geol. Geoph., **17**:63-75.
- Minty B.R.S. 1991. Simple micro-levelling for aeromagnetic data. *Exploration Geophysics*, **22**:591-592.
- Nabighian M.N. 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, **37**:507-517.
- Nabighian M.N. 1974. Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. *Geophysics*, **39**:85-92.
- Nabighian M.N. 1984. Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert Transform: fundamental relations. *Geophysics*, **49**:780-786.
- Piccirillo E.M., Chiaramonti-Comin P., Melfi A.J., Stofla D., Bellieni G., Marques L.S., Giaretta A., Nardy A.J.R., Pinese J.P.P., Raposo M. I.B., Roisenberg A. 1988. Petrochemistry of continental flood basalt-rhyolite suites and related intrusives from the Paraná basin (Brazil). In: E.M. Piccirillo & A.J. Melfi (eds) *The mesozoic flood volcanism of the Parana basin – petrogenetic and geophysical aspects*. USP, Inst. Astron. Geof., pp.: 107-156.
- Petrobras 1981. Projeto Aerogeofísico Rio Ivaí: Consórcio CESP-IPT, Paulipetro (dados digitais).
- Portela Filho C.V. 2003. *Condicionamento estrutural-magnético do Sistema Aquífero Serra Geral da região central do Arco de Ponta Grossa e sua conectividade com o Sistema Aquífero Guarani*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia, UFPR, 128p.
- Raposo M.I.B. 1992. *Paleomagnetismo do enxame de diques do arco de Ponta Grossa*. Tese de Doutorado. Inst. Astron. Geof./USP, 104 p.
- Rebouças A.C. 1978. Potencialidades hidrogeológicas dos basaltos da bacia do Paraná no Brasil. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 30, *Anais*, p.

- 1963-1976.
- Rosa Filho E.F., Salamuni R., Bittencourt A.V.L. 1987. Contribuição ao estudo das águas subterrâneas nos basaltos do estado do Paraná. *Bol. Paran. Geoc.*, **37**:22-52.
- Rosa Filho E.F., Hindi E.C., Giusti D.A., Mantovani L.E. 2000. Usos potenciais do hidrotermalismo do Sistema Aquífero Guarani. *Bol. Paran. Geoc.*, **48**:63-69.
- Rostirolla S.P., Assine M.L., Fernandez L.A., Artur P.C. 2000. Reativação de paleolineamentos durante a evolução da bacia do Paraná: o exemplo do alto estrutural do Quatiguá. *Rev. Bras. Geoc.*, **30**:639-648.
- Soares P.C. 1991. *Tectônica sinsedimentar cíclica na bacia do Paraná: controles*. Tese de Titular. Universidade Federal do Paraná, 148 p.
- Soares P. C. & Assine M. L. 1992. A seqüência Triássico – Jurássica da bacia do Paraná. *Acta Geológica Leopoldinensia*, **36**:137 – 138.
- Strugale M. 2002. *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*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, 124 p.
- Turner S., Regelous M., Kelley S., Hawkesworth S., E Mantovani M.M.S. 1994. Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision 40Ar-39Ar geochronology. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **124**:333-348.
- Thompson D.T. 1982. Eulph: a new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, **47**:31-37.
- Thurston J.B. & Smith R.S. 1997. Automatic conversion of magnetic data to depth, dip, and susceptibility contrast using SPI (TM) method. *Geophysics*, **62**:807-813.
- Ussami N., Kolisnyk A., Raposo M.I.B., Ferreira F.J.F., Molina E.C., Ernesto M. 1991. Detectabilidade magnética de diques do arco de Ponta Grossa: um estudo integrado de magnetometria terrestre/aérea e magnetismo de rocha. *Rev. Bras. Geoc.*, **21**:317-327.
- Zalán P.V., Wolf S., Conceição J. C. J., Astolfi M. A. M., Vieira I. S., Appi V. T., Neto e. V. S., Cerqueira J. R., Marques A. 1990. The Paraná basin, Brazil. In: Leighton et al. (coords), Interior Cratonic Basins. *AAPG Memoir*, **51**:681-708.

Manuscrito A-1544

Recebido em 21 de setembro de 2004

Revisão dos autores em 18 de julho de 2005

Revisão aceita em 25 de julho de 2005