

ESTUDO PRELIMINAR DA CONEXÃO ENTRE OS AQUÍFEROS SERRA GERAL E GUARANI COM BASE EM DADOS AEROMAGNETOMÉTRICOS E HIDROQUÍMICOS

Carlos Vieira Portela Filho¹; Francisco José Fonseca Ferreira¹; Ernani Francisco da Rosa Filho¹; Antonio Carlos Buchmann Filho¹ & Sidnei Pires Rostirolla¹

Resumo A pesquisa objetiva caracterizar através da geofísica uma área fortemente estruturada do Arco de Ponta Grossa (Bacia do Paraná), situada entre as coordenadas 23°00' - 24°00' S e 51°00' - 52°00' W, visando avaliar suas implicações na dinâmica do fluxo das águas subterrâneas. Com base no processamento dos dados aeromagnetométricos interpretou-se a trama estrutural da área, constituída por diques de doleritos de direção preferencial NW-SE, além de falhas e fraturas. Os alinhamentos obtidos foram comparados com a distribuição espacial de parâmetros hidrogeológicos (potenciometria, vazão, capacidade específica e sólidos totais dissolvidos), extraídos de 625 poços completados na Formação Serra Geral (basaltos). As estruturas magnéticas também foram cotejadas com mapas ternários de variáveis hidrogeoquímicas (dados de 58 poços que apresentaram diferenças de balanço iônico inferiores a 15%), almejando identificar zonas preferenciais de comunicação hidráulica entre os sistemas aquíferos Guarani e Serra Geral. Finalmente discute-se a influência do arcabouço estrutural-magnético na produtividade dos poços e no zoneamento hidrogeoquímico.

Abstract The geophysical characterization of a strongly structured area over the Ponta Grossa Arc in Parana Basin (delimited 23°00' - 24°00'S and 51°00 - 52°00'W) was carried out in order to evaluate its influence on ground water chemistry and flow dynamics to be studied. The local structural framework, supported by NW-SE oriented dolerite dykes, as well as faults and fractures, were interpreted from airborne magnetometric data. The lineaments were then compared with the spatial distribution of hydrogeological parameters (potentiometry, runoff, specific capacity and total dissolved solids) from 625 well drilled in within the basalt of the Serra Geral Formation. The magnetic structures were also compared with ternary diagrams of hydrochemical data from 58 wells (whose chemical analysis result show ionic balance differences under 15%) to identify main hydraulic communication zones between Guarani and Serra Geral aquifers. The influence of the structural-magnetic framework well yield and local hydrochemical zoning is discussed also.

¹ Departamento de Geologia – UFPR; Centro Politécnico, Jardim das Américas, Curitiba-PR; Caixa Postal 19001, CEP 81531-990; e-mail: lpga@geologia.ufpr.br

Palavras-chave: Geofísica; Hidrogeologia; Arco de Ponta Grossa

INTRODUÇÃO

O reconhecimento aeromagnetométrico de grandes zonas de falha de direção geral NW-SE, no sul-sudeste do Brasil, preenchidas por cerrados enxames de diques de doleritos, permitiu a proposição de uma nova configuração para o Arco de Ponta Grossa^[1,2], constituída por quatro alinhamentos estruturais: Guapiara (limite setentrional), São Jerônimo-Curiúva e Rio Alonso (região central) e Rio Piquiri (limite meridional). Os alinhamentos exibem extensões mínimas de 600 km, larguras máximas de 100 km na região central, e distribuem-se desde a margem continental contígua até pelo menos o rio Paraná. Tais estruturas de direção geral NW-SE, em conjunção com outras dispostas segundo NE-SW, E-W e N-S, contribuíram para melhorar a compreensão do arcabouço estrutural para a Bacia do Paraná, do qual decorreram interpretações atualizadas de sua evolução tectono-sedimentar^[3,4].

A proposição recente de projetos de pesquisa hidrogeológica na Bacia do Paraná^[5,6], cujo foco central é avaliar o potencial, o fluxo, o quimismo e a proteção ambiental das águas subterrâneas do Aquífero Guarani, em correspondência ao arcabouço estrutural, motivou investigar a partir de uma área fortemente estruturada as eventuais relações entre dados geofísicos, geológicos e hidrogeológicos^[7], cujos resultados preliminares são apresentados neste trabalho.

A área selecionada^[8] compreende a região de Londrina-Maringá (PR), sendo limitada pelas coordenadas geodésicas 23°00' - 24°00' de latitude sul e 51°00' - 52°00' de longitude oeste (Figuras 1a e 1b).

Contexto Geológico

A Bacia do Paraná, localizada no centro-leste da América do Sul, abrange uma área de 1.600.000 km², dos quais aproximadamente 1.000.000 km² estão situados em território brasileiro. A área restante está dividida entre a Argentina (400.000 km²), o Paraguai (100.000 km²) e o Uruguai (100.000 km²)^[9].

A geologia da área é caracterizada por sedimentos argilosos da Formação Rio do Rasto (Permiano); sedimentos arenosos, siltico-argilosos e, por vezes, conglomeráticos das formações Botucatu e Pirambóia (Triássico-Jurássico); basaltos e doleritos da Formação Serra Geral (Juro-Cretáceo) e por sedimentos arenosos dos grupos Caiuá e Bauru (Cretáceo Superior) de acordo com a Figura 2^[10].

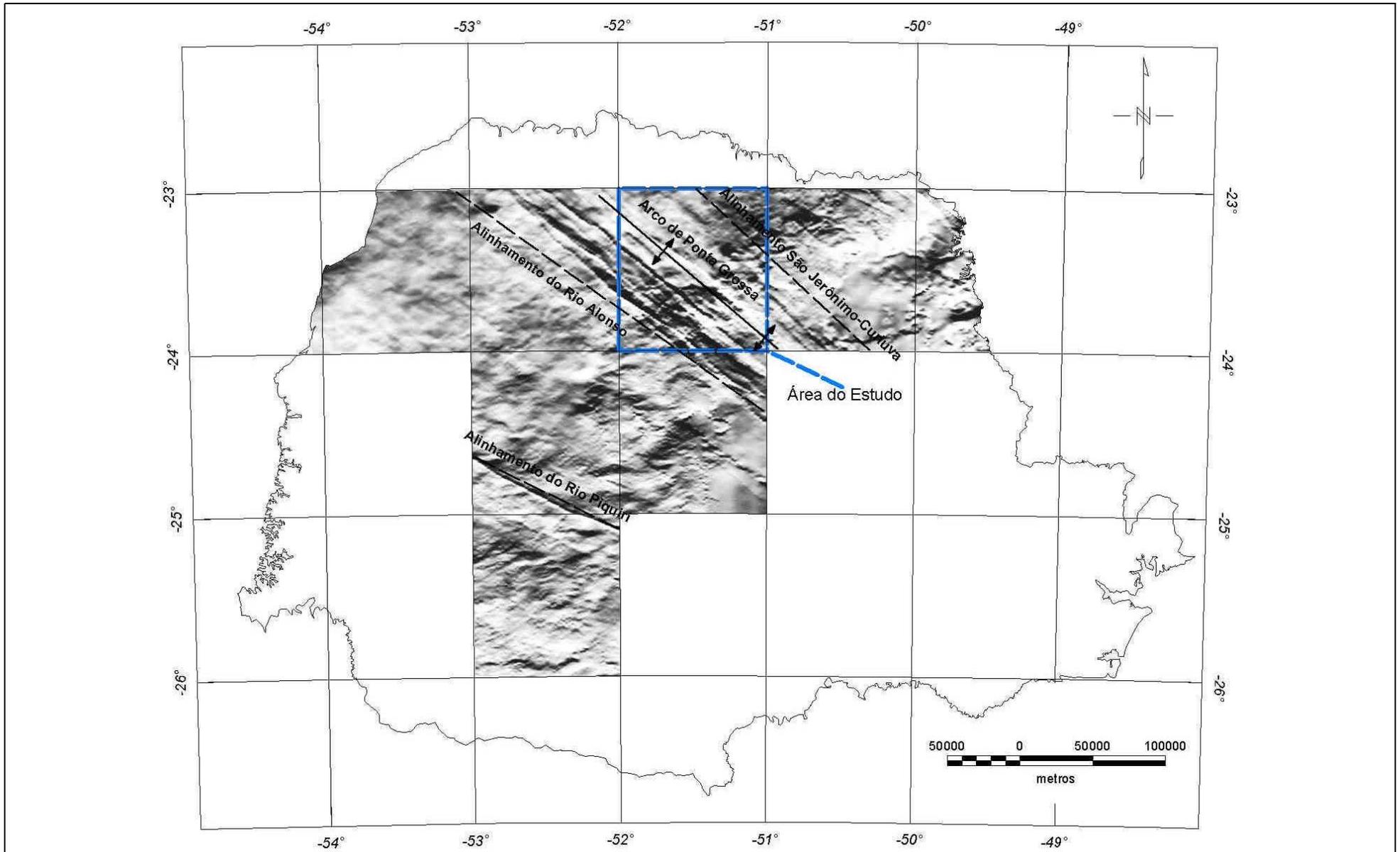


Figura 1a – Localização da área do estudo no Mapa Magnético do Estado do Paraná (parcial)^[8].

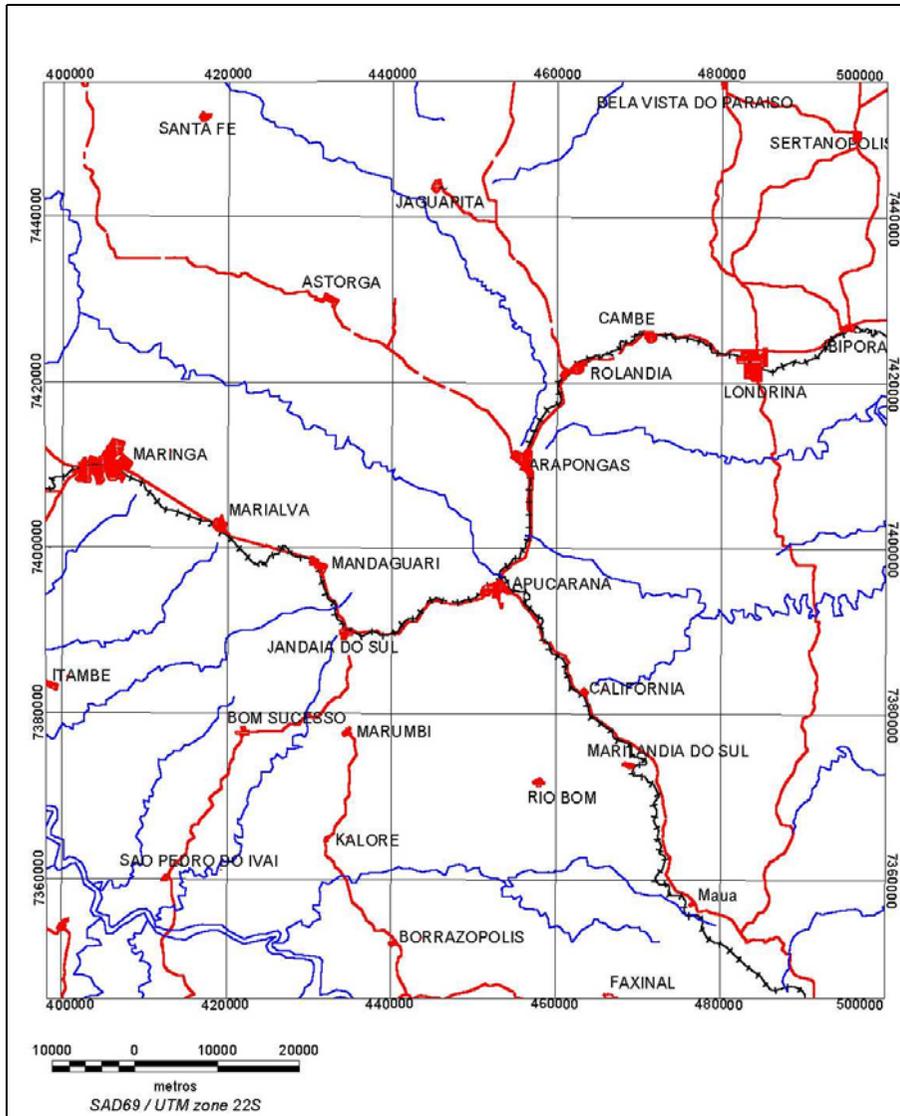


Figura 1b: Principais cidades e acessos da área do estudo.

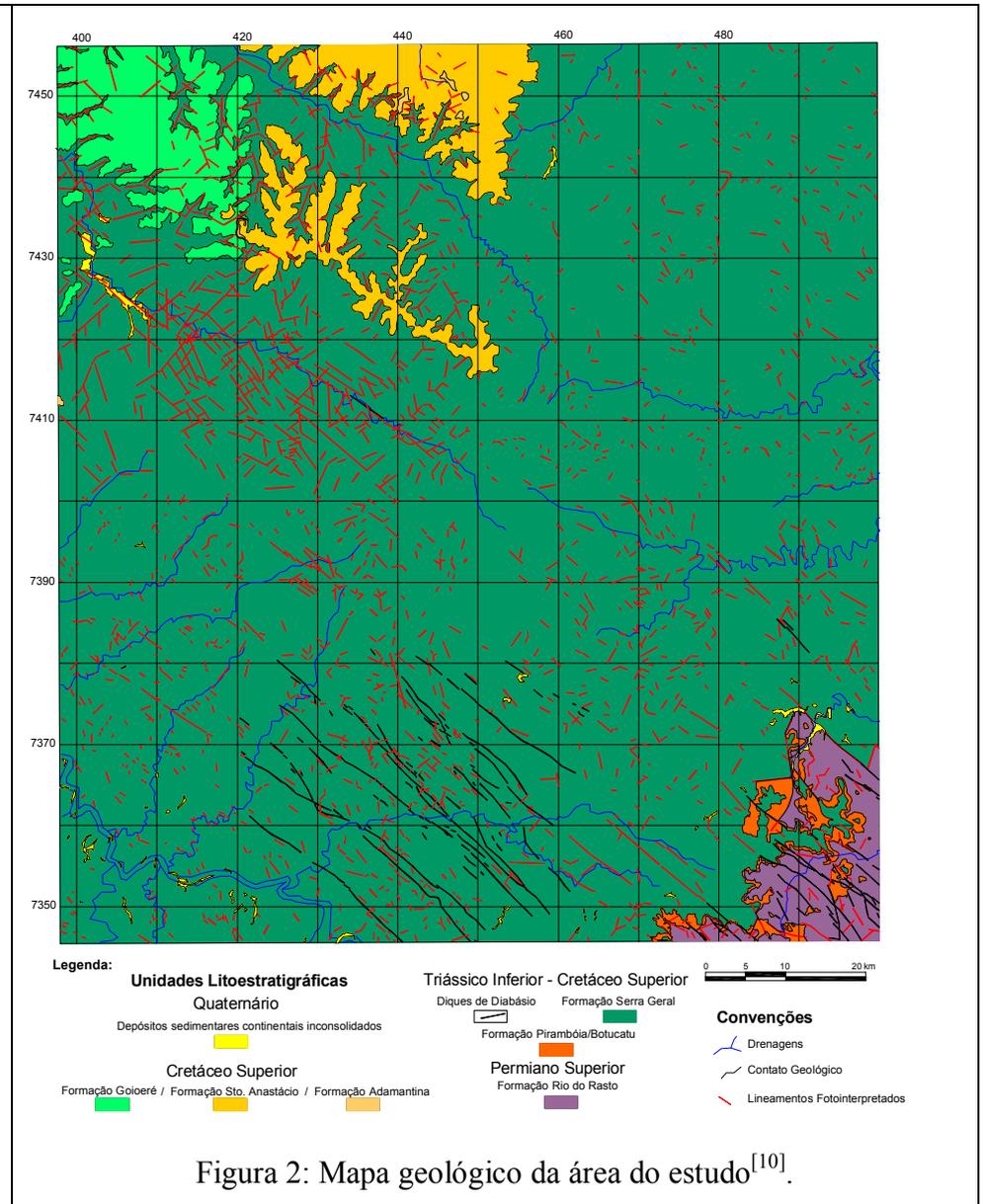


Figura 2: Mapa geológico da área do estudo^[10].

AEROMAGNETOMETRIA

Os dados aeromagnetométricos utilizados foram levantados no ano de 1981 através do consórcio CESP/IPT (Paulipetro). Pertencem ao Projeto Aerogeofísico Rio Ivaí, cujos dados foram tomados a uma altura média de 450 metros, espaçamento aproximado de 2000 metros entre as linhas de vôo e direção norte-sul. Os dados digitais foram cedidos à UFPR pela Petrobrás, no formato de arquivo *.xyz e foram previamente processados quanto ao posicionamento, correção da variação diurna, remoção do campo principal da Terra (*IGRF – International Geomagnetic Reference Field*) e nivelamento dos dados.

Métodos

Inicialmente os dados originais foram avaliados criticamente e interpolados pelo método da mínima curvatura^[11], segundo malhas regulares de 750 x 750m, selecionada após vários testes estatísticos e inspeção visual. Constatou-se que o mapa assim gerado apresentou alguns artefatos ao longo das linhas de vôo (N-S). Para remover e/ou atenuar esses ruídos, foram testadas diversas técnicas de micronivelamento^[12], optando-se pelo método bidirecional^[13]. A partir da malha micronivelada foi aplicado o filtro de redução ao pólo com o objetivo de posicionar as anomalias diretamente sobre as fontes.

Gradiente Horizontal, Amplitude e Fase do Sinal Analítico

Desde o início dos anos 70 foram desenvolvidos métodos baseados nos gradientes (derivadas) horizontais e vertical, os quais constituem ferramentas importantes para a determinação de parâmetros geométricos como a localização (mapeamento), limites e profundidades dos corpos causadores de anomalias de campos potenciais (magnético e gravimétrico)^[14].

O gradiente horizontal de ordem zero é o vetor resultante da combinação das primeiras derivadas horizontais nas direções x e y, dado pela equação abaixo:

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

onde $G_x = dG/dx$ e $G_y = dG/dy$ correspondem às derivadas horizontais da anomalia G do campo magnético. O gradiente horizontal, em geral, indica mudanças abruptas do campo magnético, facilitando o mapeamento.

O sinal analítico é uma função complexa, também muito empregado no mapeamento magnético^[15,16]. Uma das principais vantagens deste método, além de demarcar os limites do corpo, é que os resultados independem da direção da magnetização. Em outras palavras, um corpo com

uma determinada geometria e contraste de susceptibilidade magnética mostra o mesmo sinal analítico em qualquer latitude da Terra.

A amplitude do sinal analítico^[17,18] de ordem zero (simples), é representada pela seguinte equação:

$$|A(x,y)| = [(G_x)^2 + (G_y)^2 + (G_z)^2]^{1/2} \quad (2)$$

onde $G_z = dG/dz$ é a primeira derivada vertical de G e G_x e G_y já foram definidos.

A fase do sinal do sinal analítico de ordem zero, utilizada para melhor delinear as fontes magnéticas rasas (alta frequência espacial), é definida pelo ângulo formado entre os vetores imaginário e real do sinal analítico da mesma ordem, ou seja, representa o quociente resultante da primeira derivada vertical pelo gradiente horizontal:

$$\Phi(x,y) = \arctg(G_z)/[(G_x)^2 + (G_y)^2]^{1/2} \quad (3)$$

HIDROGEOLOGIA

Os dados hidrogeológicos foram cedidos à UFPR pela Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (Sudhersa-PR), oriundos de 625 poços perfurados no período de 1961 a 1995. Para o presente estudo foram considerados apenas os poços completados na Formação Serra Geral, tendo-se processado os dados das seguintes variáveis: potenciometria, vazões, capacidade específica e sólidos totais dissolvidos (STD), além de cátions ($Na^+ + K^+$; Ca^{++} ; Mg^{++}) e ânions (Cl^- ; $HCO_3^- + CO_3^{--}$; SO_4^{--}).

Métodos

Inicialmente procedeu-se uma análise crítica e estatística, eliminando os dados espúrios e padronizando as unidades. Em seguida os dados foram interpolados pelo método da curvatura mínima^[11], através de células quadradas de 6000 x 6000 metros. Com base neste procedimento foram gerados mapas de contorno das seguintes variáveis: potenciometria, vazão, capacidade específica, sólidos totais dissolvidos. Também foram elaborados mapas de composições ternárias para os cátions ($Na^+ + K^+$; Ca^{++} ; Mg^{++}) e ânions (Cl^- ; $HCO_3^- + CO_3^{--}$; SO_4^{--}), proveniente de 58 poços que apresentaram análises químicas com diferenças de balanço iônico inferiores a 15%^[19].

RESULTADOS OBTIDOS

Aeromagnetometria A partir da malha reduzida ao pólo (Figura 3), foram gerados os seguintes mapas: amplitude do sinal analítico (Figura 4), fase do sinal analítico (Figura 5) e gradiente horizontal (Figura 6). Os dois últimos mapas foram interpretados qualitativamente,

produzindo-se cartas de alinhamentos da fase do sinal analítico e do gradiente horizontal (Figuras 7 e 8), onde se observa a predominância da direção NW-SE, seguida das NE-SW, E-W e N-S, nesta ordem. A partir da análise dos mapas da fase do sinal analítico e do gradiente horizontal, foram interpretadas as principais anomalias correspondentes a diques de dolerito (Figura 9).

Na tentativa de simplificar o arcabouço estrutural-magnético da área foi produzido o mapa da Figura 10, reflexo das principais tendências e continuidades dos alinhamentos e diques, onde a espessura de cada domínio está relacionada com a quantidade de estruturas associadas a um mesmo *trend*. Neste mapa pode-se facilmente correlacionar as principais estruturas de direção NW-SE com os alinhamentos constituintes do Arco de Ponta Grossa^[1,2] (Figura 1), além do reconhecimento de outro, situado a sul desta megaestrutura, o qual intercepta em sua extremidade NW a cidade de Maringá, denominado neste trabalho de Alinhamento de Maringá (Figura 10).

Hidrogeologia

A partir do conjunto dos dados de 625 poços, foram gerados os seguintes mapas: potenciométrico (Figura 11), de vazões (Figura 12), da capacidade específica (Figura 13) e de sólidos totais dissolvidos (Figura 14). Com base nos dados hidrogeoquímicos balanceados iônicamente^[19], foram produzidos mapas ternários dos cátions $\text{Na}^+ + \text{K}^+$; Ca^{++} ; Mg^{++} (Figura 15) e dos ânions Cl^- ; $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{--}$; SO_4^- (Figura 16), representando os campos de forma georreferenciada. Em todos estes mapas foi superposto o arcabouço estrutural-magnético simplificado da Figura 10 e a localização dos poços.

DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

O mapa da superfície potenciométrica (Figura 11), mostra uma forte tendência de sudeste para noroeste, com as cotas mais elevadas (± 760 metros), situadas no quadrante SE, as quais decaem gradativamente até atingirem as cotas da ordem de ± 500 metros 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^[20]. A partir deste alto central, a superfície potenciométrica decresce gradativamente também nos sentidos NE e SW, atingindo as menores cotas em seus respectivos extremos ($\pm 350\text{m}$).

Nos mapas de vazões e da capacidade específica (Figuras 12 e 13) observa-se áreas de alta produtividade, aparentemente confinadas em compartimentos limitados por estruturas NW-SE e NE-SW, sugerindo tratos de circulação restrita. A moldura estrutural-magnética sobreposta a estes mapas mostra que as áreas de maior produtividade estão respectivamente controladas pelo Alinhamento São Jerônimo-Curiúva, sobretudo os núcleos em torno de Londrina, onde existem mais dados, e pelo eixo do Arco de Ponta Grossa onde a densidade de diques de dolerito é maior.

Entre o eixo do Arco de Ponta Grossa e o Alinhamento de Maringá, observa-se altas capacidades específicas que não correspondem a vazões muito 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.

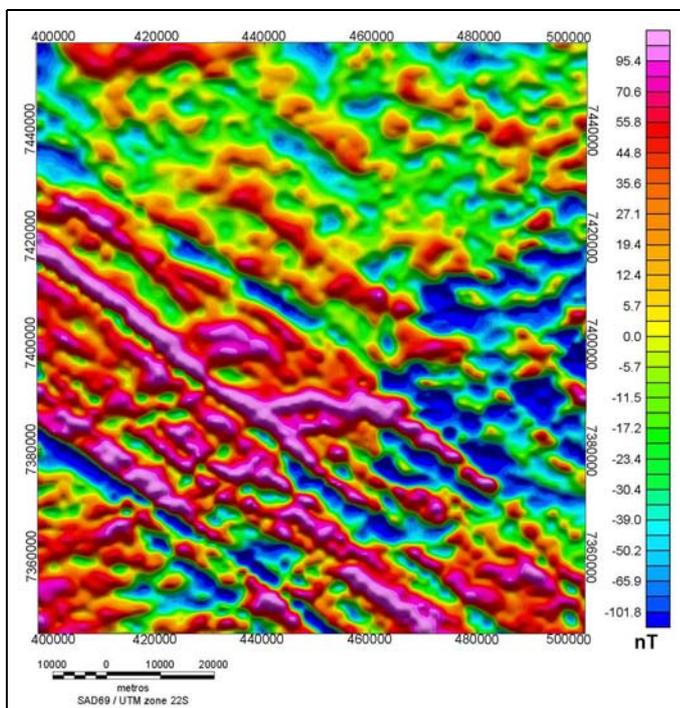


Figura 3 - Mapa de anomalias magnéticas reduzido ao pólo

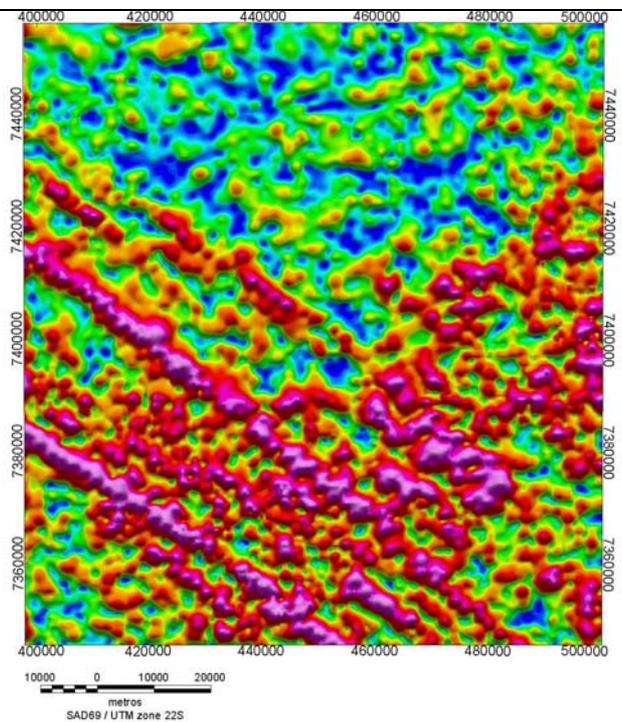


Figura 4 - Mapa da amplitude do sinal analítico de ordem zero.

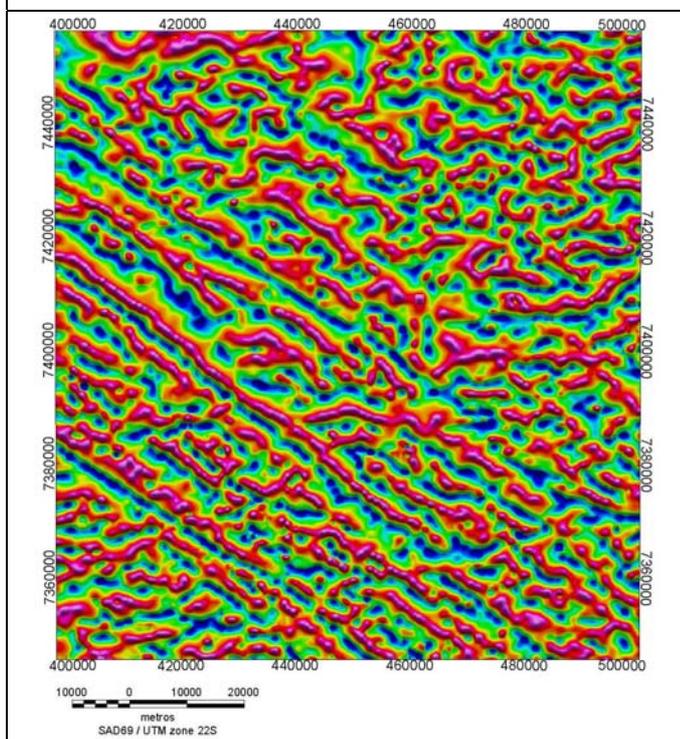


Figura 5 - Mapa da fase do sinal analítico de ordem zero.

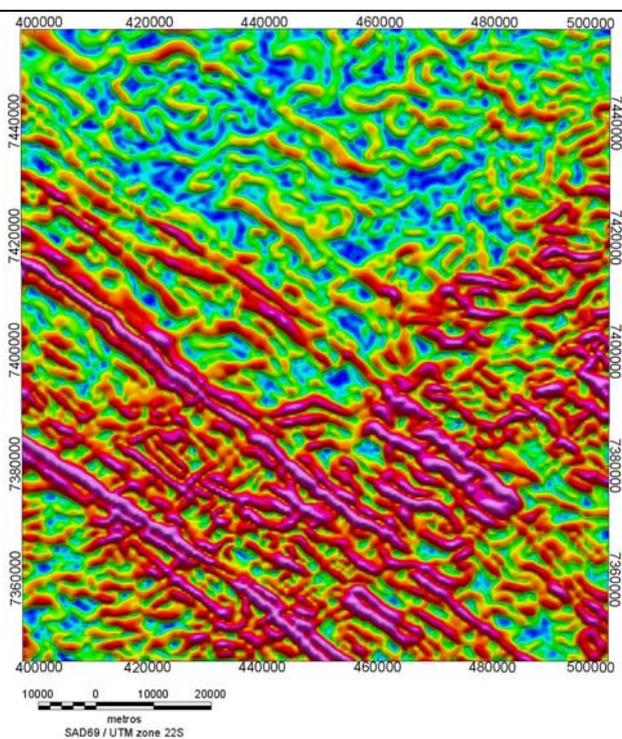


Figura 6 - Mapa do gradiente horizontal de ordem zero.

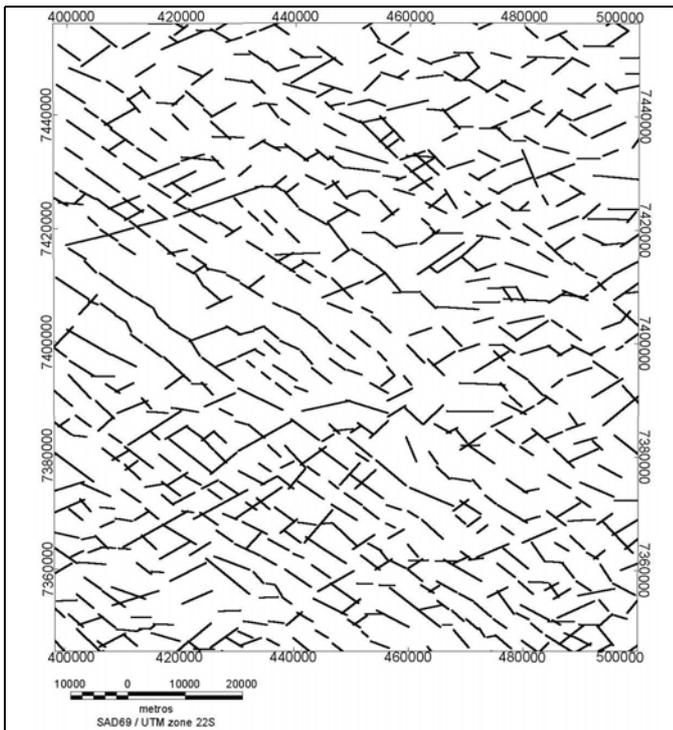


Figura 7 - Mapa dos alinhamentos da fase do sinal analítico de ordem zero.

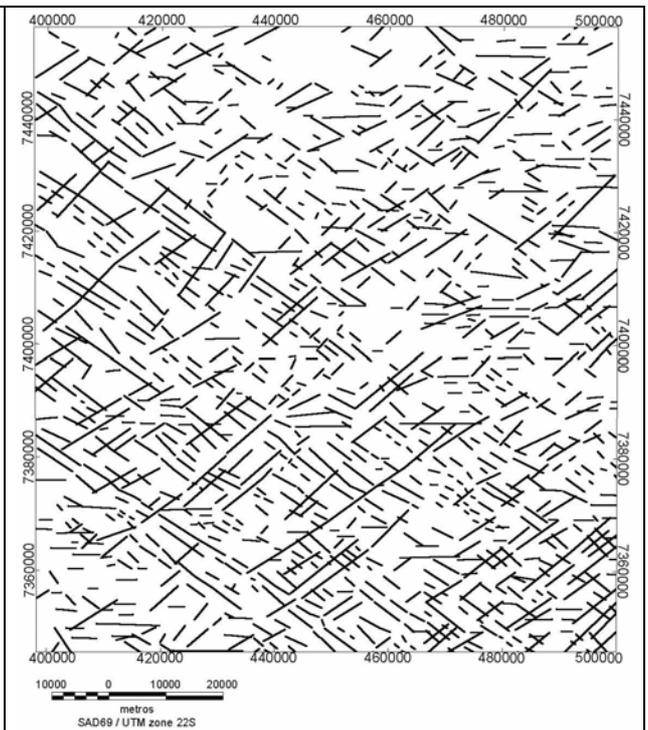


Figura 8 - Mapa dos alinhamentos do gradiente horizontal de ordem zero.

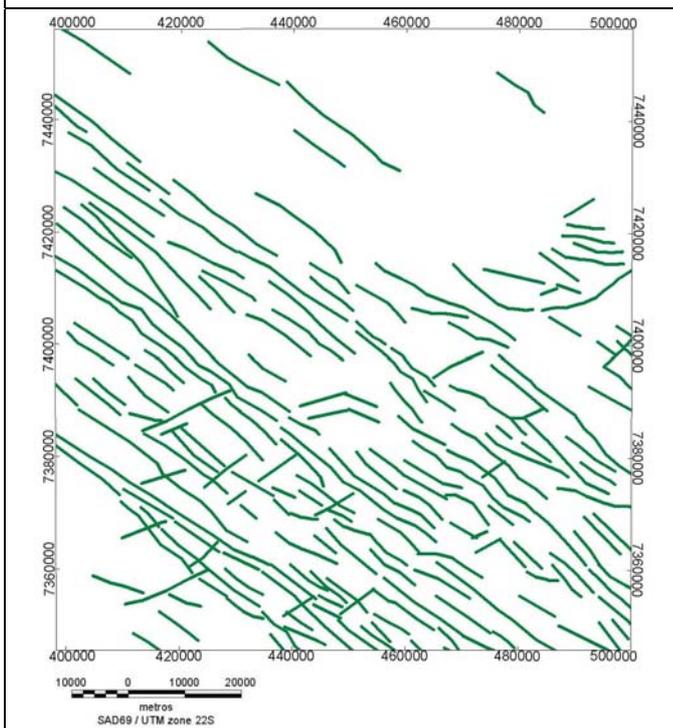


Figura 9 - Mapa de diques interpretados através dos dados aeromagnetométricos.

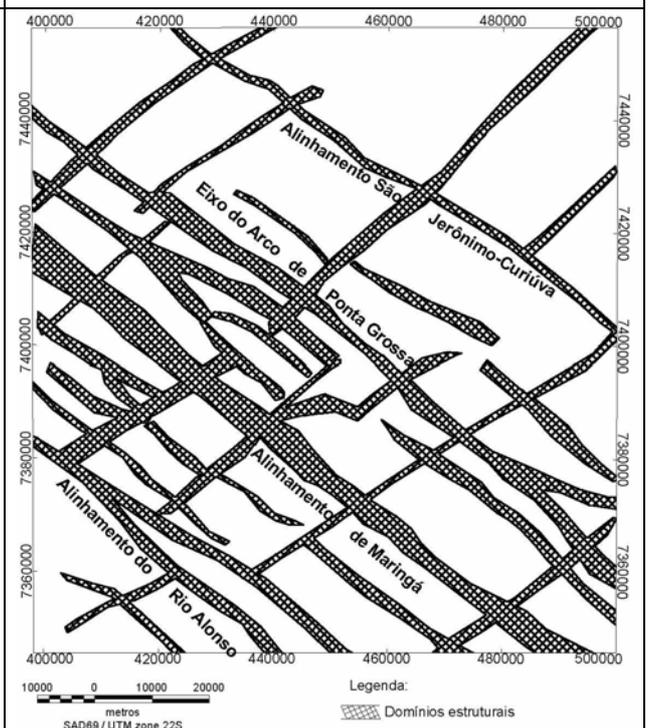


Figura 10 - Mapa do arcabouço estrutural-magnético simplificado.

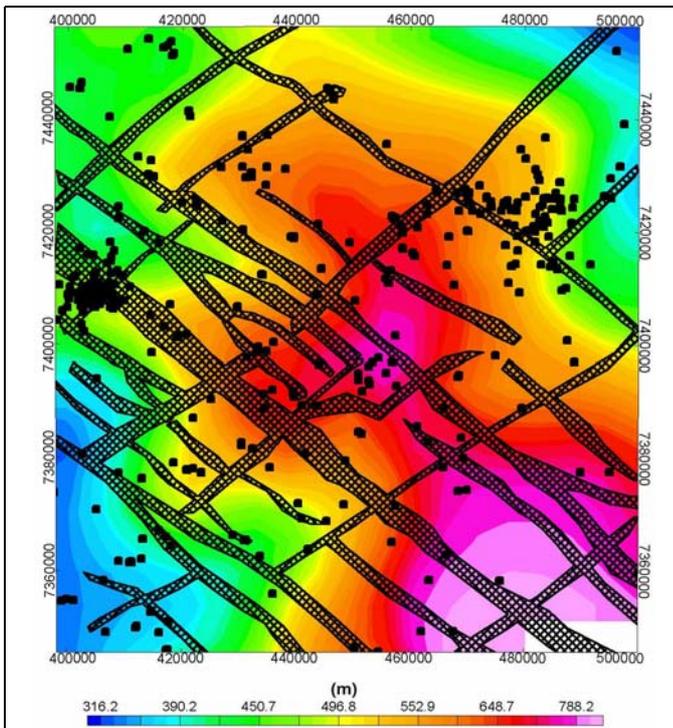


Figura 11 - Mapa potenciométrico e o arcabouço estrutural-magnético simplificado.

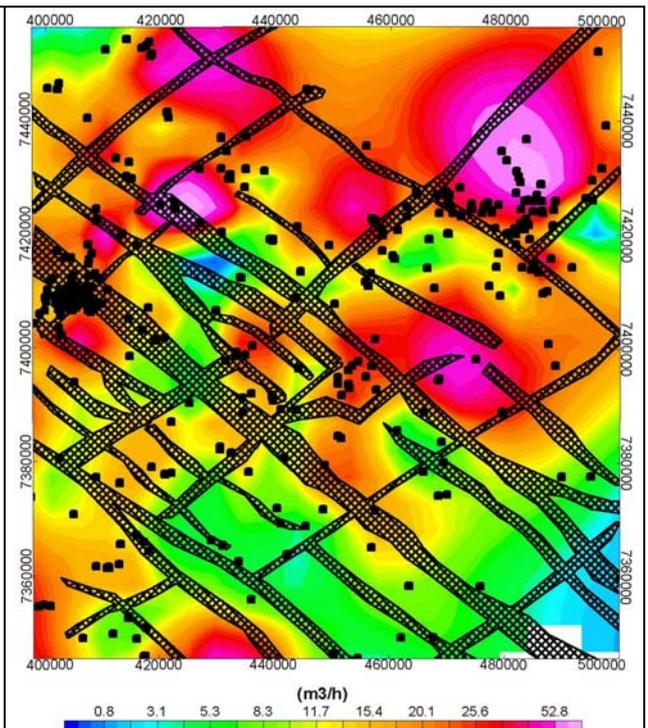


Figura 12 - Mapa das vazões e o arcabouço estrutural-magnético simplificado.

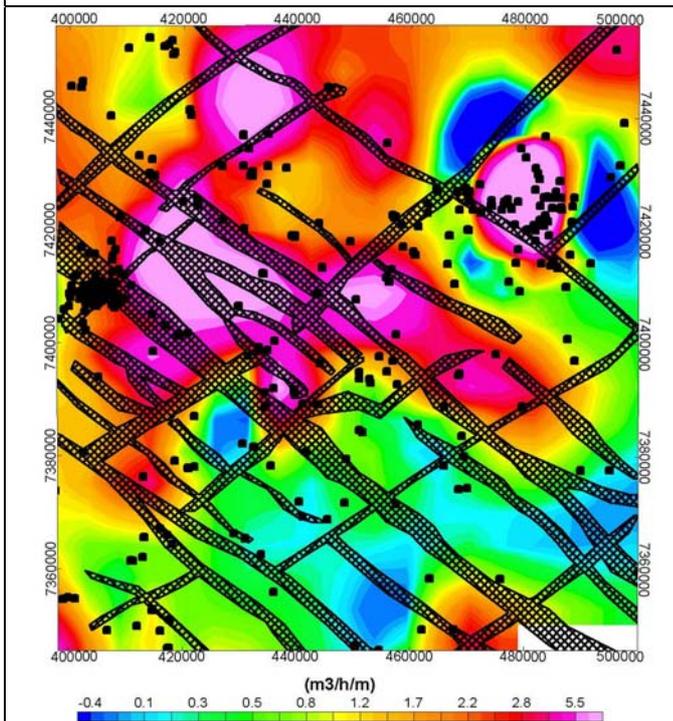


Figura 13 - Mapa da capacidade específica e o arcabouço estrutural-magnético simplificado.

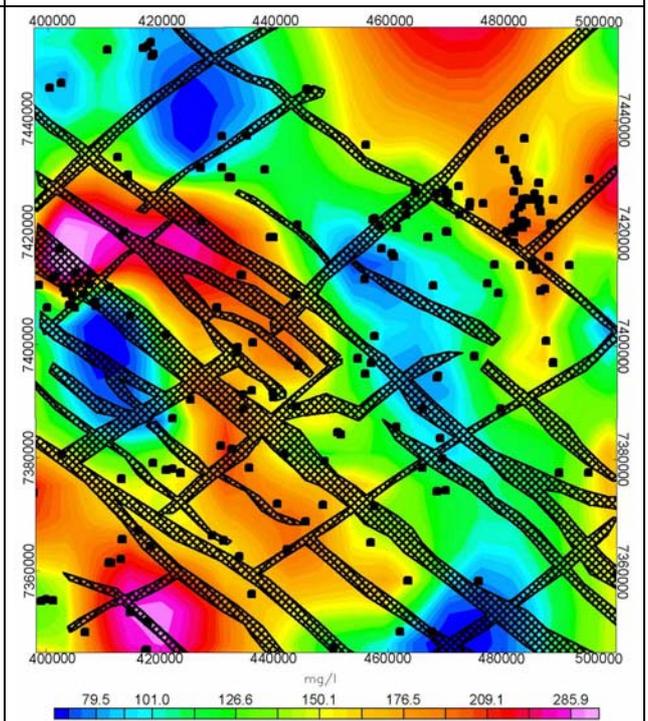


Figura 14 - Mapa de sólidos totais dissolvidos (STD) e o arcabouço estrutural-magnético simplificado.

O mapa de contorno dos sólidos totais dissolvidos (Figura 14), exibe claramente três áreas de maiores concentrações, respectivamente a nordeste do Alinhamento São Jerônimo-Curiúva, no extremo NW da região entre o eixo do Arco de Ponta Grossa e o Alinhamento de Maringá e a SW do Alinhamento do Rio Alonso, denotando a influência das estruturas associadas ao Arco de Ponta Grossa na distribuição dos teores.

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

Os dados hidroquímicos foram agrupados na Tabela 1, mostrando os principais elementos descritivos de sua distribuição.

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

Tabela 1- Características químicas das águas subterrâneas da área do estudo.

Os dados químicos analisados revelam um comportamento semelhante àqueles descritos por outros autores ^[21], com exceção dos cátions sódio e potássio que se encontram acima da média esperada para o Aquífero Serra Geral.

A Figura 15 mostra a classificação das fácies hidrogeoquímicas características da Formação Serra Geral ^[22], a qual foi dividida nos seguintes grupos:

- Grupo (I) de águas HCO₃⁻Ca⁺⁺: esta fácies é a que melhor representa as características do Aquífero Serra Geral;
- Grupo (II) de águas HCO₃⁻Na⁺: esta fácies apresenta composição distinta dos derrames da Bacia do Paraná, e parece estar relacionada às do Aquífero Guarani, devendo representar áreas onde existe a conexão hidráulica entre os dois aquíferos;
- Grupo (III) de águas HCO₃⁻Ca⁺⁺Mg⁺⁺: representa uma fácies do Aquífero Serra Geral com maior concentração de sais, característica de áreas com grau de confinamento maior distantes das zonas de recarga.

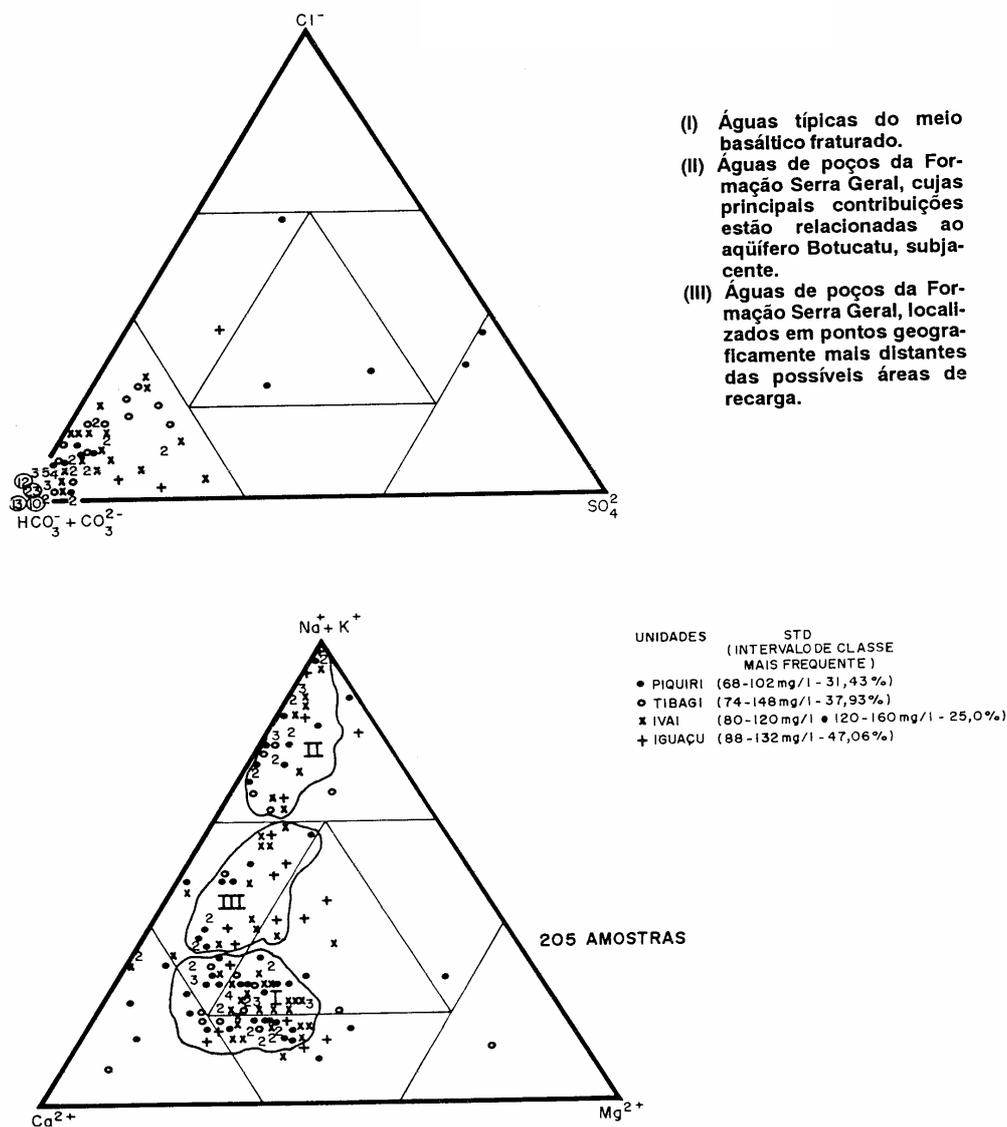


Figura 15 – Classificação química das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral no estado do Paraná^[22].

Os mapas ternários das Figuras 16 e 17, foram elaborados na tentativa de observar a distribuição espacial das fácies antes descritas, apesar da insuficiência de dados. Nestes mapas podem ser identificadas áreas de maior ou menor contribuição do Sistema Aquífero Guarani, as quais normalmente caracterizam-se por apresentar teores de sódio mais potássio elevados, em relação aos demais cátions, além de diferenciarem-se na porcentagem de ânions.

Na área da pesquisa a tendência predominante de distribuição dos cátions e ânions nas águas subterrâneas varia de bicarbonatada cálcica à bicarbonatada cálcio-magnésiana.

Na porção meridional do Alinhamento de Maringá observa-se águas de composição bicarbonatada sódica, enquanto à norte a composição grada para sulfatada sódica, indicando uma

forte influência do cruzamento deste alinhamento com estruturas de direção NE-SW na compartimentação e conseqüente conexão hidráulica com águas do Aquífero Guarani.

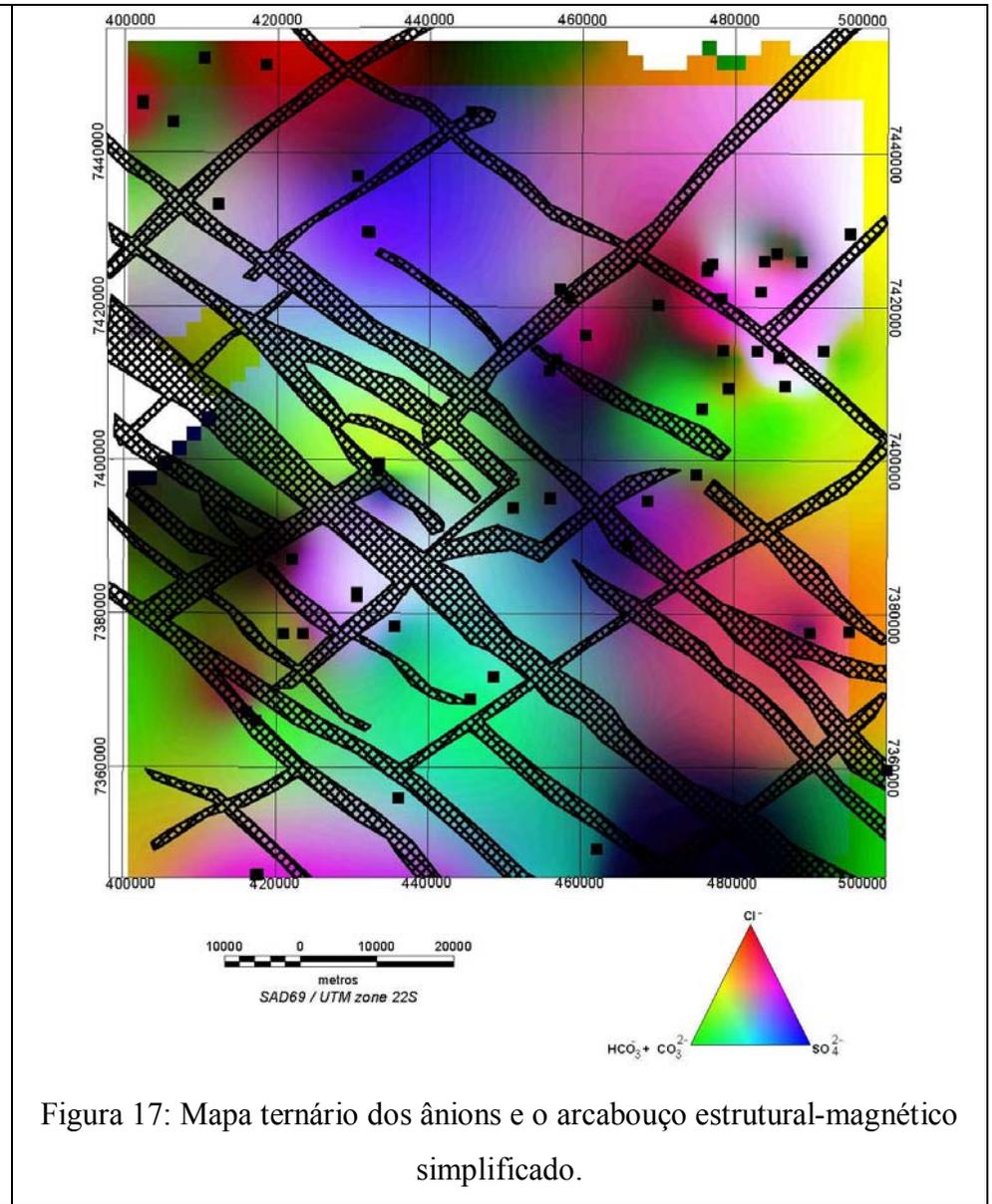
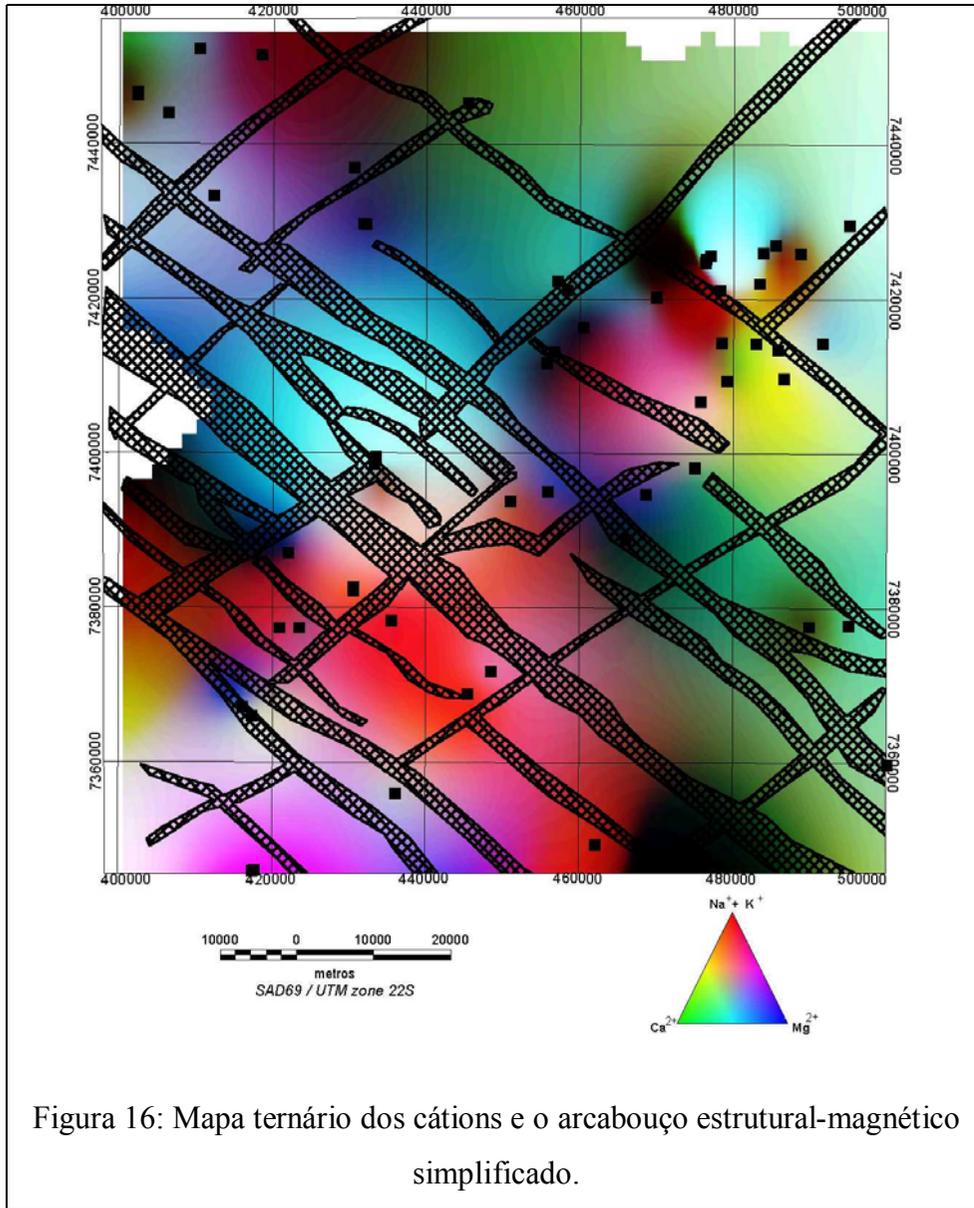
No extremo NW da área, entre o eixo do Arco de Ponta Grossa e o Alinhamento São Jerônimo-Curiúva, observa-se uma tendência para águas sulfatadas magnesianas, e na porção SE entre as mesmas estruturas, região de Londrina, a composição das águas tendem para bicarbonatadas cálcicas a sódicas. Nota-se, neste caso, que a compartimentação parece estar sendo condicionada por uma megaestrutura de direção NE-SW.

O trabalho procurou demonstrar, apesar de seu caráter preliminar e regional, que os parâmetros hidrogeológicos avaliados estão controlados pela trama estrutural, interpretada a partir do processamento de dados aeromagnetométricos. As evidências conduzem a que se caracterize o sistema como uma mistura de diferentes proporções de águas dos aquíferos Guarani e Serra Geral.

Considera-se que a metodologia apresentada poderá ter implicações importantes para a exploração de águas subterrâneas em áreas fortemente estruturadas dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Prof. Dr. André Virmond Lima Bittencourt pela revisão crítica do texto e à Petróleo Brasileiro S.A – Petrobrás e à Superintendência de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Estado do Paraná – Sudhersa a cessão dos dados aeromagnetométricos e hidrogeológicos, respectivamente.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ferreira, F. J. F. 1982. *Integração de Dados Aeromagnéticos e Geológicos: Configuração e Evolução Tectônica do Arco de Ponta Grossa*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (USP) 170 p. (inédito).
- [2] Ferreira, F. J. F. 1982b. Alinhamentos Estruturais – Magnéticos da Região Centro-oriental da Bacia do Paraná – Reavaliação da Potencialidade e Prospectividade em Hidrocarbonetos. Consórcio CESP-IPT, p.144-166.
- [3] Zálan, 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: Interior cratonic Basins, Leighton *et al.* (coords). AAPG Memoir 51; p. 681-708.
- [4] Milani, E. J. 1997. *Evolução Tectono-Estratigráfica da Bacia do Paraná e seu Relacionamento com a Geodinâmica Fanerozóica Sul-ocidental*. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) 254 p. (inédito).
- [5] Rosa Filho, E. F. da (coordenador) 2001. Proteção Ambiental e Gerenciamento Sustentável Integrado do Sistema Aquífero Guarani, Argentina-Brasil-Paraguai-Uruguai. Expansão e Consolidação da Base Atual de Conhecimento Básico (submetido ao GEF/Banco Mundial/OEA).
- [6] Rosa Filho, E. F. da (coordenador) 2002. Fatores Controladores da Hidrodinâmica do Sistema Aquífero Guarani no Estado do Paraná. Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná – UFPR (submetido ao CNPQ).
- [7] Portela Filho, C.V. *Caracterização Geofísico-Estrutural da Região de Londrina – Maringá (PR) e suas Implicações para a Exploração de Águas Subterrâneas*. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná – UFPR (em andamento)
- [8] Ferreira, F. J. F & Portela Filho, C. V. 2000. Mapa Magnético do Estado do Paraná (parcial). Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada (LPGA), Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná – UFPR (inédito)
- [9] Northfleet, A. R., Medeiros, R. A., Mühlmann, H. 1969. Reavaliação dos dados geológicos da Bacia do Paraná. Boletim Técnico da Petrobrás, Rio de Janeiro 12 (3): p. 291-346.
- [10] Mapa Geológico Integrado do Bloco SF-22-U (ACS-74). 1981. Consórcio CESP-IPT, escala 1:250000.
- [11] Briggs, I. C. 1974. Machine contouring using minimum-curvature. *Geophysics*, 39, p. 39-48
- [12] Minty, B. R. S. 1991. Simple micro-levelling for aeromagnetical data. *Exploration Geophysics*, 22, p. 591-592.

- [13] Geosoft 2001. Microlevelling using bi-directional gridding. Geosoft Technical Note, 2p.
- [14] Hsu, S. -K.; Sibuet, J. -C.; Shyu, C. -T. 1996. High-resolution detection of geologic boundaries from potential field anomalies: an enhanced analytic signal. *Geophysics*, 61, p. 373-386.
- [15] Hsu, S. -K.; Coppens, D.; Shyu, C. -T. 1998. Depth to magnetic source using the generalized analytical signal. *Geophysics*, 63, p. 1947-1957.
- [16] Bastani, M.; Pedersen, L. B. 2001. Automatic interpretation of magnetic dike parameters using the analytical signal technique. *Geophysics*, 66, p. 551-561.
- [17] 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, p. 507-517.
- [18] Nabighian, M. N. 1974. Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. *Geophysics*, 39, p. 85-92.
- [19] Buchmann Filho, A. C. *Caracterização das Águas do Sistema Aquífero Serra Geral no Estado do Paraná*. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná – UFPR (em andamento)
- [20] Rebouças, A. C. 1976. *Recursos Hídricos Subterrâneos da Bacia do Paraná – Análise de Pré- viabilidade*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (USP) 143 p. (circulação restrita).
- [21] Fraga, C. G. 1986. *Introdução ao Zoneamento do Sistema Aquífero Serra Geral no Estado do Paraná*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (USP) 125 p.
- [22] Fraga, C. G. 1992. *Origem de Fluoretos em Águas Subterrâneas dos Sistemas Aquíferos Botucatu e Serra Geral*. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (USP) 177 p. (inédito).