Compartimentação estrutural e conectividade hidráulica dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani: caracterização hidrogeoquímica na região central do Estado do Paraná

*Alessandra de Barros e Silva Bongioiolo¹, Ana Paula Soares²,
André Virmond Lima Bittencourt^{3,4} & Francisco José Fonseca Ferreira⁵*

Resumo A área de estudo localiza-se na porção central do Estado do Paraná, em domínios da bacia homônima, com aproximadamente 22.600 km², constituída por derrames basálticos da Formação Serra Geral, Cretáceo Inferior (Sistema Aquífero Serra Geral - SASG), os quais estão sobrepostos a arenitos fluviais e eólicos das formações Piramboia e Botucatu, Triássico/Jurássico (Sistema Aquífero Guarani - SAG). O estudo envolveu análise de agrupamento, análise fatorial, interpretação do arcabouço estrutural e análise de diagramas de Piper, além da caracterização físico-química de 45 poços completados e localizados em rochas da Formação Serra Geral, que permitiu a caracterização das águas e a identificação das áreas de maior probabilidade de conexão hidráulica dos SASG e SAG. As águas analisadas são predominantemente bicarbonatadas cálcicas, características do Sistema Aquífero Serra Geral. Apenas algumas amostras apresentam composição bicarbonatada sódica ou cálcio-magnésiana, interpretadas como reflexo de conectividade dos referidos sistemas aquíferos. Com relação à compartimentação estrutural da área de estudo e aos resultados físico-químicos, as águas bicarbonatadas sódicas são mais frequentemente observadas a nordeste. Nas demais porções da área de estudo, as águas são típicas do Sistema Aquífero Serra Geral. As menores dissimilaridades hidroquímicas estão na porção noroeste da área de estudo. Os poços anômalos em composição hidroquímica estão posicionados sobre lineamentos estruturais orientados a NW.

Palavras-chave: Sistema Aquífero Serra Geral, Sistema Aquífero Guarani, hidroquímica, conectividade, compartimentação estrutural.

Abstract *Structural compartmentalization and hydraulic connectivity between the Serra Geral and Guarani aquifer systems: a hydrogeochemical characterization in central State of Paraná.* The study area is located in central State of Paraná, in domains of the homonym basin, with approximately 22,600 km², constituted by basaltic flows of the Serra Geral Formation, Lower Cretaceous (Serra Geral Aquifer System - SGAS) which overlap eolian and fluvial sandstones of the Piramboia and Botucatu formations, Triassic/Jurassic (Guarani Aquifer System - GAS). The study involved cluster analysis, factor analysis, interpretation of the structural framework, Piper diagram analysis, and the physicochemical characterization of 45 completed wells located in the Serra Geral Formation in order to characterize groundwater and to identify areas where the aquifers are most probably connected. The groundwater samples analysed are predominantly of the calcium-bicarbonate type, which is characteristic of the Serra Geral Aquifer System. Only a few samples correspond to sodium-bicarbonate or calcium-magnesium waters, that are interpreted to result from connection between the aquifer systems. Regarding the structural compartmentalization and the physicochemical outcomes, sodium-bicarbonate waters are more frequently observed in the northeastern portions of the study area. In the remainder portions, water typically corresponds to the Serra Geral Aquifer System. The lowest hydrochemical dissimilarities are found in the northwestern portion of the study area. The wells that are anomalous in water composition are located on NW-oriented structural lineaments.

Keywords: Serra Geral Aquifer System, Guarani Aquifer System, hydrochemistry, hydraulic connection, structural compartmentalization.

INTRODUÇÃO A constatação de padrões hidroquímicos anômalos no Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), não condizentes com a composição química dos basaltos típicos, foram considerados por vários autores como indicativos de mesclagem de águas de aquíferos sotopostos, principalmente do Sistema Aquífero Guarani (SAG).

1 - Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), Brasil. E-mail: ale_barros@yahoo.com

2 - Petrobras - Petróleo Brasileiro S.A., Itajaí (SC), Brasil. E-mail: ana.paula.soares@petrobras.com.br

3 - Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas-LPH, Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), Brasil. E-mail: andre@ufpr.br

4 - Centro Universitário Positivo, Curitiba (PR), Brasil.

5 - Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada - LPGA, Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), Brasil. E-mail: francisco.ferreira@ufpr.br

Recomendações de projetos de pesquisa hidrogeológica na Bacia do Paraná, apontam para a necessidade de avaliar o papel do arcabouço estrutural no potencial de produção, no fluxo, no quimismo e na definição de estratégias de proteção ambiental do SAG (Rosa Filho *et al.* 2003). Com base nestas premissas foi selecionada uma área estruturada da porção central do Estado do Paraná (Fig. 1), no contexto do SASG, na qual se procedeu à integração de dados geológicos, topográficos, hidrogeológicos e hidroquímicos, através de técnicas estatísticas e de geoprocessamento, visando avaliar o condicionamento estrutural das variáveis hidrogeológicas e hidroquímicas. Os dados hidroquímicos, obtidos de Buchmann Filho (2002), apresentados em um diagrama de Piper, foram estatisticamente tratados e espacialmente processados no intuito de agrupá-los, caracterizar a química das águas e sugerir áreas de provável conexão hidráulica dos SASG e SAG, através do controle exercido por fraturas, as quais foram delineadas pelo arcabouço estrutural e lineamentos derivados da interpretação do Modelo Digital de Elevação SRTM-USGS (USGS 2008).

OBJETIVOS Os objetivos principais deste trabalho foram: (i) caracterizar o arcabouço estrutural da Bacia do Paraná na porção central do estado homônimo; (ii) avaliar sua influência na distribuição espacial das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), com base em dados hidroquímicos de poços completados na Formação Serra Geral; e (iii) interpretar as zonas de conectividade hidráulica dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani a partir de dados hidroquímicos e à luz da compartimentação hidrogeológica decorrente.

MATERIAL E MÉTODOS A sequência de materiais e métodos empregada no estudo consistiu: (i) Modelo Digital de Elevação (MDE) e traçado de lineamentos de relevo visando delinear um arcabouço estrutural da área de estudo; (ii) dados hidroquímicos de 45 amostras de água do SASG (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} e SO_4^{2-}) e geração de mapas ternários dos cátions e dos ânions, a fim de avaliar suas distribuições espaciais; (iii) tratamento estatístico dos dados hidroquímicos, através de métodos de agrupamento e análise fatorial, e sua comparação ao arcabouço estrutural; e (iv) integração dos dados geológicos, estruturais e hidroquímicos através de geoprocessamento.

CONTEXTO GEOLÓGICO

Bacia do Paraná Aproximadamente elíptica, com abertura para Sudoeste e progressiva redução de mergulho das bordas para o centro, a Bacia do Paraná foi implantada na Plataforma Sul-Americana sobre um embasamento cratônico consolidado no Cambro-Ordoviciano.

No Triássico Médio, a presença de duas sub-bacias reflete um soerguimento dômico na região do Arco de Ponta Grossa e pouco mais ao Sul (Alto de Porto União). Neste período ocorre o início da desertificação com depósitos eólicos e localmente fluviais da Formação Piramboia. No Jurássico, a extensa bacia de

sedimentação fluvioeólica transformou-se progressivamente num imenso deserto superárido, com a sedimentação predominantemente eólica da Formação Botucatu.

Ao final deste ciclo, no Jurássico Superior-Cretáceo Inferior, quando ainda perduravam condições desérticas, iniciou-se a atividade vulcânica representada pelos extensos derrames de lavas basálticas da Formação Serra Geral, com intrusões em forma de diques e soleiras de diabásio ao longo de toda a seção sedimentar da bacia. O Arco de Ponta Grossa foi um elemento ativo, dada a presença dos enxames de diques de direção N45-60W cortando até mesmo os derrames basálticos.

Após o vulcanismo Serra Geral (Cretáceo Inferior), sobre uma superfície erosiva esculpida nos basaltos, teve início a sedimentação eólica da Formação Caiuá, num embaciamento situado a Noroeste do Estado do Paraná e Oeste e Sudoeste do Estado de São Paulo (Soares 1991).

Formação Serra Geral A sequência vulcânica que constitui a Formação Serra Geral foi proposta e introduzida como unidade estratigráfica por White (1908). O magmatismo Mesozoico a que estas rochas correspondem recobre mais de 1.200.000 km² nos estados ao Sul e ao centro do Brasil, alcançando ainda o Uruguai, a Argentina e o Paraguai. As espessuras totais são superiores a 1.000 m e, nos locais próximos às fraturas de efusão, chegam a 1.500 m.

No Estado do Paraná predominam rochas basálticas. Secundariamente, são registrados derrames de composição intermediária e, mais raramente, ocorrências de rochas vulcânicas de filiação ácida. O pacote vulcânico apresenta-se suportado por camadas da Formação Botucatu, sendo frequentes lentes intertrapianas de arenitos. Nas porções de topo, verificam-se, mais comumente, brechas arenosas intercaladas. Derrames de natureza basáltica são verificados na base da sequência vulcânica, seguindo-se manifestações de natureza intermediária que mantêm certa contemporaneidade com as primeiras lavas ácidas.

As principais estruturas encontradas nos derrames são contatos interderrames (fendas de grande extensão lateral), zonas de basalto vesicular amigdaloidal características de topo de derrame preenchidas principalmente por calcita, quartzo e zeólitas, tratos de basalto compacto geralmente diaclasado, característico de zonas de exclusão, e níveis de base de derrame, vesiculares ou não, com fraturas paralelas ao contato. Ocorrem também diques e *sills* de diabásio do mesmo ciclo de vulcanismo, faixas fraturadas sub-horizontais, juntas e falhas de até 2 m de espessura, diques de arenito injetado, tufos vulcânicos, lava aglomerática etc.

A composição mineralógica destas rochas compreende essencialmente plagioclásio e piroxênio, com proporções menores de magnetita. Intercrescimento micrográfico, vidro intersetal, quartzo e apatita são constituintes menores. Zeólitas, minerais de cobre, quartzo em suas variedades e argilominerais são registrados em amígdalas.

Figura 1 - Mapa da Bacia do Paraná no Brasil indicando a localização da área de estudo (esquerda) e geológico simplificado (direita).

O pacote Botucatu-Piramba Este pacote de rochas é de natureza fluvioeólica. A Formação Botucatu é constituída por arenitos avermelhados finos a médios, normalmente bimodais, quartzosos, friáveis, com grãos foscos e geralmente bem arredondados, cuja característica marcante é a presença de estratificações cruzadas, planares e acanaladas de grande porte. Tais arenitos, de origem eólica, são normalmente silicificados e representam uma fase de caráter desértico no contexto da evolução geológica regional, concomitante aos fenômenos vulcânicos que afetaram a Bacia do Paraná. A Formação Piramba é de origem fluvioeólica, constituída por sedimentos arenosos sotopostos à Formação Botucatu, sendo de ocorrência restrita. A idade do pacote é tida como triássica-jurássica.

CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO O armazenamento e a circulação da água subterrânea no Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) estão associados a descontinuidades geológicas das rochas, o que configura este reservatório como heterogêneo e anisotrópico (Rebouças 1978). Esta característica imprime uma condutividade hidráulica muito variável e de complexa avaliação.

Estudos realizados nesse contexto por Bittencourt (1978), Bittencourt *et al.* (2003), Fraga (1986, 1992), Rosa Filho *et al.* (1987) e Celligoi (1994) identificaram a tipologia da água deste aquífero como sendo bicarbonatada cálcica. Tais autores atribuem a composição bicarbonatada sódica de algumas águas captadas em poços, com profundidades máximas de 200 m, a uma mistura com as águas de aquíferos subjacentes, a exemplo do aquífero Guarani e outros paleozoicos.

O Sistema Aquífero Guarani (SAG) é um extenso reservatório de águas subterrâneas subjacente a quatro países: Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai. A espessura das camadas varia de 50 a 800 m, em profundidades que podem atingir 1800 m. Como decorrência do gradiente geotérmico, suas águas podem atingir temperaturas elevadas, em geral de 50°C a 85°C. O termo Aquífero Guarani é a denominação formal dada ao reservatório transfronteiriço de água subterrânea doce, constituído pelas formações Botucatu, Piramba e Rosário do Sul no Brasil, Buena Vista no Uruguai, Misiones no Paraguai e Tacuarembó no Uruguai e Argentina. Esta denominação unificadora foi proposta pelo geólogo uruguaio Danilo Anton em homenagem à nação Guarani.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Arcabouço estrutural A partir de dados SRTM-USGS (USGS 2008), foi gerado um modelo de elevação do terreno, do qual foram extraídos lineamentos. Com base nas direções principais, na densidade e na extensão dos lineamentos, a área foi dividida em quatro compartimentos (Fig. 2).

O mapa de lineamentos e os diagramas de roseta mostram no compartimento A predomínio de fraturas orientadas segundo N50E. No compartimento B, há duas direções principais de fraturas, N50E e N50W. O compartimento C mostra duas direções, N45-50E, mais evidente, e N50-20W, subordinada. O compartimento

D não possui direção preferencial, estando presentes tendências segundo N45E, NS, N30W e N50W.

Análise de agrupamento Análise de agrupamento permite classificar os indivíduos de uma população a partir de coeficientes de similaridade que consideram todos os atributos de cada um deles. A forma gráfica mais usada para representar a hierarquia de agrupamentos resultante é o dendograma, também chamado *tree-clustering*, no qual os grupos são formados a partir das dissimilaridades dos indivíduos.

A análise de agrupamento foi feita através de dois métodos: Ligações Singulares (*Single Linkage*) e Variâncias Mínimas (método de Ward). Os melhores resultados foram obtidos pelo método de Ward, o qual é baseado na análise de variâncias para avaliar as distâncias dos grupos, minimizando as dispersões intragrupos, sendo bastante eficiente, em que pese a tendência de criar grupos (*clusters*) pequenos. A análise permitiu encontrar a melhor forma de separar as amostras, sobre as quais foram feitas múltiplas medições, em subgrupos homogêneos. Os dados hidroquímicos utilizados (pH, STD, HCO_3^- , Cl^- , SiO_2 , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+) provêm de 45 amostras (Tab. 1). O dendograma resultante da aplicação da análise de agrupamento pelo método de Ward divide os dados em dois grandes grupos (1 e 2) 100% diferentes e internamente distintos (Fig. 3).

DISCRIMINAÇÃO DOS GRUPOS HOMOGÊNEOS

Para cada um dos grupos obteve-se até 35% de similaridade, além de mais duas classes, resultando, ao todo, quatro classes distintas com similaridades internas de até 60% (Fig. 3). Na figura 4 observa-se que a distribuição espacial das amostras dos grupos 1 e 2 é distinta. O grupo 1 (círculos) concentra-se principalmente na região NW da área estudada, associado ao compartimento A, enquanto no trato SE predomina o grupo 2 (triângulos), em correspondência aos compartimentos C e D. Nota-se, ainda, uma mistura dos grupos 1 e 2 na porção NE da área pesquisada, vinculada ao compartimento B.

Com base nas dissimilaridades de covariância das diversas variáveis, foram identificadas quatro classes (Fig. 3) de amostras com dissimilaridade de 50% (Tab. 2). Aparentemente, as classes apresentam propriedades distintas. A variável mais dissimilante dentre as classes foi o STD, seguida pelo HCO_3^- .

Na tabela 3 nota-se uma grande variação dos valores de STD em todas as classes. Na classe 1, por exemplo, o contraste dos valores mínimo e máximo é cerca de 10 vezes. Considerando que os valores dos STD são diretamente vinculados ao tempo de residência da água no aquífero, percebe-se que, salvo na classe 2, as demais possuem médias parecidas, ou seja, tempos de residência semelhantes. Entretanto, como indicado na figura 5, não há um padrão definido de distribuição espacial das classes, embora exista um predomínio da classe 1 na região centro-Norte (compartimentos A e B); da classe 2 a Noroeste (compartimento A); da classe 3 a Nordeste e Centro-Oeste (compartimentos B e D) e da classe 4 na porção Sudeste da área pesquisada (compartimentos C e D).

Análise fatorial A análise fatorial permite interpretar a estrutura de um conjunto multivariante de dados, a partir de suas matrizes de variância-covariância. Nesta técnica, podem ser utilizados dois procedimentos básicos: a análise dos componentes principais ou a análise dos fatores.

Neste estudo, utilizou-se o primeiro deles, que consiste na transformação linear das variáveis originais em outras, de modo que a primeira nova variável computada seja responsável pela maior variação possível do conjunto de dados, a segunda pela maior variação possível

Figura 2 - Modelo Digital de Elevação (painel superior), lineamentos e direções preferenciais por compartimento (painel inferior).

restante, e assim sucessivamente até que toda a variação do conjunto tenha sido explicada.

A análise dos componentes principais envolve o cálculo dos autovalores (*eigenvalues*) e dos correspondentes autovetores (*eigenvectors*) de uma matriz de variâncias-covariâncias. Em geral, as técnicas de análise fatorial servem a dois propósitos: reduzir o número de variáveis ou detectar estruturas através das quais as variáveis de um grupo possam ser classificadas.

Considerando que amostras geoquímicas podem ser definidas como pontos num espaço n -dimensional, no qual n corresponde ao número de elementos analisados, os teores observados para cada elemento químico, ou compostos, estão vinculados às diferentes coordenadas destes pontos. Na prática, são criadas n “novas” variáveis dependentes das correlações das variáveis originais, cada uma delas caracterizada por um valor próprio, o *eigenvalue*.

A análise fatorial pelo método dos componentes principais foi aplicada nas 45 amostras estudadas, para nove variáveis: pH, STD, HCO_3^- , Cl^- , SiO_2 , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+ . Foram obtidos três fatores principais (*eigenvectors*) para cada variável (Tab. 4). Os valores assumidos pelas variáveis indicam que, para o primeiro fator principal (fator 1), STD e HCO_3^- são os componentes principais, enquanto para os fatores 2 e 3 os componentes principais são Cl^- e K^+ e STD e Cl^- , respectivamente, ou seja, a partir dos três fatores se obteve três “novas” variáveis, as quais foram espacialmente representadas por fator e agrupadas em três intervalos de classes, de modo a permitir uma visualização dos maiores e menores valores por elas assumidos.

O mapa da figura 6 (painel superior) mostra a distribuição do fator 1 segundo três classes (0-200, 200-400 e 400-605). O mapa de tendência de segunda ordem (Fig. 6, painel inferior esquerdo) indica que as amostras dispostas a NE tendem a apresentar os maiores valores (compartimento B), enquanto nos tratos NW e SE estão seus menores valores (compartimentos A e C, respectivamente). Já, no compartimento D, os valores são intermediários. No mapa de tendência de

terceira ordem (Fig. 6, painel inferior direito), nota-se que os maiores valores estão a NNE (compartimento B), os intermediários a SSE (compartimentos C e D) e os menores a NW (compartimento A).

O mapa da figura 7 (painel superior) mostra a distribuição do fator 2 segundo três classes (0-30, 30-60 e 60-100), a qual é muito semelhante àquela da figura 6. O mapa de tendência de segunda ordem (Fig. 7, painel inferior esquerdo) mostra novamente os maiores valores a NE (compartimento B) e os menores nas áreas NW e SE (compartimento A e C-D, respectivamente). No mapa de tendência de terceira ordem (Fig. 7, painel inferior direito), percebe-se também que os maiores valores se situam a NNE (compartimento B), os intermediários a SE (compartimentos C e D) e os menores a NW (compartimento A).

O mapa da figura 8 (painel superior) mostra a distribuição do fator 3 segundo três classes (0-25, 25-50 e 50-75), a qual é muito semelhante a das figuras 6 e 7. Os mapas de tendência de segunda ordem (Fig. 8, painel inferior esquerdo) e de terceira ordem (Fig. 8, painel inferior direito) mostram maiores valores a NE (compartimento B), intermediários a SE e NNE (compartimentos C e B-D, respectivamente) e os menores a NW (compartimento A).

Físico-química das águas Os resultados das 45 análises físico-químicas, apresentadas por Buchmann Filho (2002), em termos estatísticos, estão representados na tabela 5.

A temperatura da água dos poços varia de 17,0°C a 22,5°C, com valor médio de 20,6°C. O pH apresenta valor médio de 7,46, variando de 6 a 9,1. Valores acima de 8 ocorrem em 17,7% dos poços, sendo atribuídos a mistura com águas de aquíferos subjacentes, principalmente do SAG (Rosa Filho *et al.* 1987). Potenciais hidrogeniônicos (pH) superiores a 8,3 são responsáveis pela presença do íon CO_3^{2-} e, conseqüentemente, pela diminuição dos teores de Ca^{2+} , precipitado como calcita (Bittencourt *et al.* 2003).

Figura 3 - Grupos e classes de agrupamento de amostras pelo método de Ward.

Tabela 1 - Dados hidroquímicos utilizados na pesquisa.

Poço	Município	Localidade	Prof. (m)	N (22J UTM)	E (22J UTM)	Alt. (m)	AFQ	Temp.	pH	STD	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻
1	Boa Esperança do Iguaçu	Sede municipal	100	7318005	336679	500		22,00	7,20	52,00	32,00	2,00	32,00	8,32	1,26	2,66	0,80	0,00
2	Campina da Lagoa	Santo Rei	81	7269735	353715		19/9/1989		7,80	120,00	57,00	1,00	31,00	13,52	4,51	4,60	0,40	
3	Campina da Lagoa	Sales Oliveira	81	7264954	321220	420			7,20	94,00	36,00	1,00	23,00	10,41	1,48	3,04	0,60	0,00
4	Campina da Lagoa	Herveira	80	7277432	324829	550		22,00	7,70	113,00	58,00	0,00	20,00	12,69	3,23	7,30	0,50	0,00
5	Campina da Lagoa	Sede municipal	150	7279131	318139	780		20,00	7,40	174,00	86,00	0,00	23,00	18,93	6,25	10,20	1,00	0,00
6	Goio-Erê	Rancho Alegre	150	7311472	300008	460		22,00	6,90	117,00	55,00	1,00	22,00	11,41	1,36	10,00	0,55	0,00
7	Janiópolis	Bredópolis	63	7340043	312379	520		22,50	6,20	69,00	20,00	1,00	15,00	3,80	1,07	1,45	2,95	
8	Juranda	Sede municipal	80	7297651	313137	520		22,00	7,00	120,00	45,00	1,00	34,00	9,96	2,04	7,52	0,42	
9	Juranda	Primavera	100	7306203	303918		25/9/1989		6,00	37,00	8,00	1,00	10,60	1,52	0,66	0,60	0,10	
10	Juranda	Rio Verde	100	7292466	309714		24/3/1988		6,80	100,00	18,00	1,00	10,00	2,48	1,68	1,39	0,50	
11	Mamborê	Guarani	69	7293989	340534	620			7,10	83,00	29,00	1,00	20,00	5,32	2,55	1,91	1,00	
12	Mamborê	Água Grande	100	7306848	335032		1/10/1987	20,00	6,70	86,00	27,00	1,00	25,00	4,60	2,67	1,00	1,92	
13	Mamborê	Cajarana	73	7319828	337335	650		22,00	7,80	187,00	38,00	1,00	52,20	8,20	2,58	2,67	1,85	
14	Mamborê	Lajeado	54	7304570	337624	600		22,00	6,60	70,00	38,00	1,00	36,50	7,85	3,26	2,36	0,89	
15	Moreira Sales	Paraná do Oeste	120	7331800	308400		4/12/1978	22,00	7,70	179,00	92,00	1,00	32,00	28,82	1,16	9,10	2,20	2,30
16	Nova Cantu	Geremia Lunardelli	42	7280912	335196	500		18,50	8,00	138,00	72,00	3,00	25,00	16,57	6,05	4,68	0,75	
17	Palmital	Sede municipal	103	7246450	378150	800		19,00	6,80	90,00	51,00	2,00	11,00	12,29	2,82	5,85	0,58	0,00
18	Palmital	Alta da Balsa	70	7236627	368620	560	7/10/1991		8,40	112,00	55,00	1,00	20,50	8,40	1,70	21,00	0,40	6,00
19	Campo Mourão	Martinópolis	45	7335512	328880	540		20,00	7,00	23,00	11,00	1,00	15,00	2,20	0,97	1,00	0,70	0,00
20	Pitanga	São Manoel	70	7245829	402231	910	20/5/1991		7,40	115,00	81,00	0,00	42,00	18,60	4,60	6,10	0,80	0,00
21	Pitanga	Mato Rico	66	7262645	384835	800			8,00	149,00	127,00	2,00	25,00	28,54	9,65	11,74	0,54	
22	Barboza Ferraz	Ourlândia	72	7340678	383686	540		21,00	7,50	267,00	180,00	2,00	23,00	28,38	20,57	14,40	0,30	
23	Barboza Ferraz	Tereza Breda	36	7330188	399720	420		20,50	8,40	337,00	233,00	1,00	25,00	12,09	29,67	27,25	0,45	
24	Barboza Ferraz	Bourbônia	120	7324581	378851	600		19,00	7,30	118,00	69,00	1,00	22,00	16,21	4,25	5,20	0,65	
25	Campo Mourão	KM 128	84	7344651	348074	560		21,00	7,50	193,00	67,00	1,00	3,75	14,99	0,94	14,25	0,57	1,00
26	Campo Mourão	Faz. Boa Esperança	48	7335268	376839	600		21,00	7,30	210,00	115,00	1,00	25,00	25,70	5,54	20,65	0,57	0,00
27	Campo Mourão	C. Ruamourense	60	7339073	359151	560		20,00	7,50	50,00	23,00	1,00	20,00	3,29	2,12	2,00	0,45	0,00
28	Campo Mourão	Piquirivai	65	7328014	348788	660		22,00	7,30	94,00	37,00	1,00	28,00	8,24	2,55	2,72	0,88	0,00
29	Campo Mourão	Luiziana	93	7312260	366776	675			7,55	134,00	81,00	1,00	32,00	16,45	2,01	11,00	0,45	0,00
30	Campo Mourão	Guarujá	96	7337351	359225	560		22,00	9,10	69,00	58,00	1,00	18,80	2,37	0,77	33,00	0,14	0,70
31	Grandes Rios	Sede municipal	150	7329600	448200	670		21,00	7,90	178,00	105,00	3,00	34,00	23,62	3,56	15,77	1,00	0,00

Continua

Tabela 1 continuação

Poço	Município	Localidade	Prof. (m)	N (22J UTM)	E (22J UTM)	Alt. (m)	AFQ	Temp.	pH	STD	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻
32	Iretama	Sede municipal	120	7299490	387600			20,00	7,95	157,00	80,00	3,50	36,00	19,86	5,25	0,28	0,51	0,00
33	Jardim Alegre	Lidianópolis	95	7334900	434200		31/5/1979	20,00	7,30	73,00	44,50	3,00	38,40	9,60	2,91	3,91	1,07	0,00
34	Jardim Alegre	Sede municipal	152	7326550	430200	760		22,00	7,90	95,00	58,00	1,00	18,00	12,09	3,36	5,79	0,40	0,00
35	Jardim Alegre	Sede municipal	90	7325900	430100	760			8,40	163,00	47,00	3,00	35,00	5,60	0,22	27,02	0,50	2,00
36	Jardim Alegre	Sede municipal	130	7327142	430586	720		20,00	7,45	93,00	27,00	4,00	20,00	7,12	3,01	1,90	0,70	0,50
37	Luiziana	Sede municipal	93	7313563	368033		29/9/1982		7,30	120,00	56,00	1,00	22,00	15,57	1,55	5,64	0,28	
38	Lunardelli	Água Feia	52	7331159	411654		11/3/1992		7,80	252,00	170,00	4,00	43,30	32,90	15,33	15,00	0,50	6,00
39	Manoel Ribas	Santa Mariana Sul	146	7299180	436215	800		21,50	7,60	115,00	44,00	1,00	31,50	6,93	0,83	12,15	0,23	
40	Pitanga	Cataporanga	150	7288451	404773	600			7,30	126,00	81,00	2,00	25,00	15,41	3,86	11,89	0,43	
41	Pitanga	Vila Nova	27	7286475	418208	780		18,00	6,90	147,00	70,00	14,00	25,00	15,85	5,12	9,12	1,37	
42	Pitanga	Boa Ventura	30	7248739	436979	840		17,00	7,10	102,00	44,00	5,00	25,00	10,77	1,26	7,89	0,63	
43	São João do Ivaí	Godoy Moreira	300	7323239	414242	440		22,00	8,20	284,00	186,00	1,00	96,00	31,95	11,04	31,10	0,45	
44	Ivaiporã	Arianha	150	7303600	439600	600		20,00	8,20	135,00	81,00	1,00	27,00	19,81	1,38	11,70	1,00	1,00
45	Ivaiporã	Arapuá	150	7311700	430050	663		20,00	7,30	123,00	55,00	2,00	17,00	13,01	2,18	9,00	0,69	1,00

Para os sólidos totais dissolvidos (STD), os valores variam de 23 a 337 mg/L, sendo a média igual a 103,29 mg/L. Em cerca de 40% das amostras, o teor varia de 100 a 150 mg/L. A presença dos componentes dissolvidos está diretamente ligada ao tempo de residência da água no aquífero. Daí a variação de 15 vezes dos limites mínimo e máximo, ressalvadas as possíveis zonas de conexão dos SASG e SAG.

Os teores de SiO₂ dissolvida variam de 3,75 a 96 mg/L, sendo o teor médio igual a 27,02 mg/L. Em 60% das amostras, o teor varia de 10 a 25 mg/L. A solubilidade da sílica é diretamente proporcional à temperatura. Todavia, a temperaturas em torno de 20°C, por fatores cinéticos, são comuns teores em sílica superiores ao equilíbrio com o quartzo (cerca de 10 ppm), como na maioria das águas em questão. Em todo caso, sabe-se que a solubilidade da sílica é função não apenas da temperatura, mas também do pH, apesar deste último influenciar mais sensivelmente apenas a valores mais elevados (pH > 9), segundo Fritz (1981).

HCO₃⁻ é o ânion mais abundante nas águas dos 45 poços estudados. A concentração média é de 67,72 mg/L, variando de 8 a 233 mg/L. Em 84,44% das amostras, a concentração é inferior a 100 mg/L. Esta é uma característica bastante comum em se tratando de águas continentais relativamente diluídas. O caráter bicarbonatado é diretamente influenciado pelo equilíbrio do sistema CO₂-H₂O vigente nas áreas próximas às de recarga e também pelas reações de hidrólise dos silicatos das rochas efusivas. Uma relação linear dos teores em bicarbonatos com a salinidade foi observada por Bittencourt (1978) em águas da Formação Serra Geral. As águas com teores mais baixos deste ânion são aquelas de recarga mais recente.

A concentração de Cl⁻ apresenta teor médio de 1,81 mg/L, variando de 0,01 a 14 mg/L. Em 60% das amostras, o teor em cloretos é de 1 mg/L. Tal fato corrobora o observado por Bittencourt (1978) em águas da bacia do rio Ivaí, podendo ser atribuído ao baixo teor em Cl⁻ dos basaltos e ao pequeno aporte cíclico por veiculação atmosférica, ou também ao arredondamento dos valores obtidos nas análises, visto que os valores costumemente observados para o Cl⁻ são iguais a 1 mg/L.

O teor médio em SO₄²⁻ é de 0,82 mg/L, variando de 0,1 a 6 mg/L. Predominam teores muito baixos, embora dentre as 45 amostras avaliadas apenas 25 apresentem resultados analíticos para este ânion. Os baixos teores de SO₄²⁻ nas águas do SASG refletem a mesma ordem de grandeza das rochas efusivas da Bacia do Paraná, as quais são muito pobres em sulfatos e outras formas de enxofre. Teores mais elevados, onde presentes, são atribuídos à contaminação por águas oriundas de aquíferos subjacentes.

O teor médio em Ca²⁺ é de 13,38 mg/L com valores, respectivamente, máximo e mínimo de 32,9 e 1,52 mg/L. Em 86,66% das amostras, os dados são inferiores a 25 mg/L. A calcita é a grande controladora dos teores neste cátion nas águas alcalinas.

O teor médio em Mg²⁺ é de 4,24 mg/L, com variação de 0,22 a 29,67 mg/L. Em 88,88% das águas

Figura 4 - Distribuição espacial das amostras dos grupos 1 (círculos) e 2 (triângulos) na área de estudo.

estudadas, os teores situam-se abaixo de 7 mg/L. A contribuição deste íon se deve, sobretudo, à presença de minerais ferromagnesianos nos basaltos.

Quanto ao Na^+ , o teor médio é de 9,21 mg/L. Em mais de 84,44% das amostras os teores são inferiores a 15 mg/L, estando os valores mínimo e máximo entre 0,28 e 33 mg/L, respectivamente.

O K^+ apresenta teor médio de 0,74 mg/L, com mínimo e máximo de 0,1 a 2,75 mg/L respectivamente, sendo que 88% das amostras apresentam valores inferiores a 1 mg/L.

CARACTERIZAÇÃO GERAL DAS ÁGUAS O diagrama de Piper (Fig. 9), construído com base nas análises

Figura 5 - Distribuição espacial das classes de agrupamento (método de Ward com 50% de dissimilaridade).

Tabela 2 - Teores médios por classe de agrupamento.

Classe	pH	STD	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
1	7,41	143	70,9	1	30,4	12,8	4,4	9,59	0,85
2	7,49	96,3	48,4	1	21,8	9,55	2,1	9,52	0,68
3	7,61	141,8	71,6	2	30,17	15,1	4,6	8,8	0,7
4	7,34	132,6	79,11	3,7	23	16,5	5,8	8,6	0,6

Tabela 3 - Valores de STD por classe de agrupamento a 50% de dissimilaridade interna.

Parâmetro	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Casos	16	10	10	9
Mínimo	37	23	73	52
Máximo	337	120	252	267
Média	143	96,3	141,8	132,667
Variância	7035,47	1077,34	2842,4	3494
Desvio Padrão	83,8	32,8	53,3	59,1

Tabela 4 - Eigenvalues (entre parêntesis) e eigenvectors por variável.

	Principais componentes		
	Fator 1 (eigenvector 1)	Fator 2 (eigenvector 2)	Fator 3 (eigenvector 3)
pH	0,645776	-0,47163	-0,17598
STD	(0,921553)	0,174263	(0,033144)
HCO ₃ ⁻	(0,964351)	0,102867	0,105817
Cl	0,066478	(0,508212)	(0,548721)
SiO ₂	0,537458	0,217529	-0,59335
Ca ²⁺	0,763235	0,318845	-0,06753
Mg ²⁺	0,782022	0,142064	0,315199
Na ⁺	0,743305	-0,38298	-0,03751
K ⁺	-0,24291	(0,723332)	-0,39686

da tabela 1 mostra a influência dos macroconstituintes iônicos e pode evidenciar processos de mistura de águas. Na figura 9 as amostras estão dispostas segundo as classes definidas na figura 3, indicando que todas são bicarbonatadas.

Quarenta das amostras estudadas (88,8%) são águas de composição bicarbonatada cálcica, portanto coerente ao arcabouço químico-mineralógico do SASG. A maior abundância em cálcio, presente sobretudo na forma Ca²⁺, reflete a maior facilidade com que este elemento é removido dos plagioclásios e dos minerais ferromagnesianos dos basaltos, salientada em trabalhos como o de Levi & Melfi (1972) e em

estudos experimentais de alteração intempérica em rochas básicas da Bacia do Paraná descritos em Hyppolito (1972).

A solubilidade do Ca²⁺ em águas naturais está relacionada à presença de espécies carbônicas dissolvidas, tais como H₂CO₃, HCO₃⁻ e CO₃²⁻. Sabe-se que a presença dominante de um destes compostos está ligada ao potencial hidrogeniônico (pH). Na faixa de valores de pH observada, próxima à neutralidade, predomina o HCO₃⁻, gerado por decomposição do H₂CO₃ ou por hidrólise de silicatos do basalto. Daí a natureza cálcica das águas bicarbonatadas estudadas. Apenas uma amostra (2,2%), proveniente do poço 23, revela caráter sódio-magnésiano.

As amostras de águas bicarbonatadas sódicas, coletadas em quatro poços da área de estudo (18, 30, 35 e 39), representam 8,8% do universo amostral. Em três delas, o pH é maior que 8 (18, 30 e 35), o que as caracteriza como alcalinas. Todos os quatro poços apresentam uma relação Na⁺/Ca²⁺ maior que 1,75, ao contrário do restante das amostras onde tal esta relação é menor que 1. Ambos os parâmetros (pH > 8 e Na⁺/Ca²⁺ > 1) podem sugerir contribuição do SASG (e.g. Bittencourt *et al.* 2003, Portela Filho 2003).

A presença de águas bicarbonatadas sódicas está em nítido desequilíbrio com o que se espera de um aquífero suportado por rochas basálticas. São águas cujo quimismo foi formatado provavelmente em ambiente externo ao SASG. Em águas superficiais, a presença do

Tabela 5 - Sumário estatístico das amostras por variável.

Variável	Casos	Mínimo	Máximo	Médio	Desvio padrão
Temperatura (°C)	32	17	22,5	20,68	1,37
pH	45	6	9,1	7,46	0,59
STD	45	23	337	130,28	64,71
HCO ₃	45	8	233	67,72	47,8
Cl ⁻	45	0	14	1,81	2,15
SiO ₂	45	3,75	96	27,01	14,09
Ca ²⁺	45	1,52	32,9	13,38	8,29
Mg ²⁺	45	0,22	29,67	4,24	5,47
Na ⁺	45	0,28	33	9,21	8,31
K ⁺	45	0,1	2,95	0,74	0,54
SO ₄ ²⁻	25	0	6	0,82	1,68

Figura 6 - Distribuição espacial dos valores do fator 1 (painel superior) e mapas de superfície de tendência de segunda ordem (painel inferior esquerdo) e de terceira ordem (painel inferior direito).

sódio é frequentemente atribuída à contaminação antrópica, que pode ter ocorrido em alguns poços pouco profundos, tendo a água residido por pouco tempo no aquífero. Na maioria dos casos, é o ambiente alcalino que eleva a relação $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$, pela insolubilização do cálcio e também do magnésio. Em confinamento, o ambiente do SAG é típico de tais condições, num contexto em que não se pode descartar a influência de unidades aquíferas paleozoicas subjacentes também alcançadas por estruturas tectônicas.

As amostras dos poços 18, 30, 35 e 39 (Fig. 1) exibem composição bicarbonatada sódico-potássica, e

apenas uma delas, proveniente do poço 23, revela caráter sódio-magnésiano, portanto sugestivas de conectividade dos SASG e SAG. Apesar das amostras anteriores se situarem em compartimentos distintos, conforme a figura 2 (18 - compartimento D; 30 - compartimento A; 23, 35 e 39 - compartimento B), elas parecem denotar controle estrutural segundo tendências NW.

CONCLUSÕES No presente estudo, foram identificados alguns padrões preferenciais de fraturamento, reunidos em quatro compartimentos estruturais. Nestes compartimentos, foi possível correlacionar grupos de

Figura 7 - Distribuição espacial dos valores do fator 2 (painel superior) e mapas de superfície de tendência de segunda ordem (painel inferior esquerdo) e de terceira ordem (painel inferior direito).

águas do SASG conectadas a águas do SAG. Apesar da inexistência de relações das regiões com maior intensidade de lineamentos verticais e o volume de água produzido por poços (p. ex. na região de Dourados - MS), os resultados aqui obtidos permitem distinguir grupos de águas com base nas suas características físico-químicas correlacionadas à compartimentação estrutural, como segue:

Compartimento estrutural A:

- predominância de fraturas de direção NE;
- associado ao Grupo 1 e às classes 1 e 2 de Wards, cuja análise fatorial registra os menores valores de dissimilaridade;
- a composição hidroquímica dominante é bicarbonatada cálcica (exceto poço 30);

Figura 8 - Distribuição espacial dos valores do fator 3 (painel superior) e mapas de superfície de tendência de segunda ordem (painel inferior esquerdo) e de terceira ordem (painel inferior direito).

Compartimento estrutural B:

- ocorrência de fraturas de direções NW e NE subordinadas;
- vinculado ao Grupo 2, classe 2 de Wards, com análise fatorial indicando os maiores valores de dissimilaridade;
- apresenta amostras de composição bicarbonatada sódica (poços 23, 35 e 39);

- está localizado próximo ao contato da Formação Serra Geral com as formações Botucatu/Pirambóia.

Compartimento estrutural C:

- predominância de fraturas de direções NE com tendências NW subordinadas;

Figura 9 - Macroconstituintes iônicos por classe de agrupamento (Fig. 3): classe 1 (círculo), classe 2 (quadrado), classe 3 (losango) e classe 4 (triângulo).

- associado ao Grupo 2, classe 4 de Wards. A análise fatorial é pouco representativa em função do número restrito de poços.

Compartimento estrutural D:

- ocorrência de fraturas de direções variadas;
- relacionado ao Grupo 2, classes 3 e 4 de Wards, com valores intermediários de dissimilaridade dados pela análise fatorial;
- a composição hidroquímica predominante é bicarbonatada cálcica (exceto poço 18).

Por fim, nota-se que as águas de cinco poços, apesar de situados em compartimentos estruturais distintos, exibem composição bicarbonatada sódica (18, 30, 35 e 39) e cálcio-magnésiana (23). Cabe salientar que três deles (23, 35 e 39) estão incluídos no compartimento estrutural B, o qual parece apresentar maior

probabilidade de conexão hidráulica dos SASG e SAG em função da predominância do fraturamento NW e das menores espessuras dos basaltos decorrentes de sua proximidade da borda erosiva da bacia, apesar das análises estatísticas relacionarem a este compartimento os menores teores em STD e HCO_3^- observados.

Agradecimentos Os autores agradecem a Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar), a Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (Suderhsa) e ao Geólogo Antonio Carlos Buchmann Filho, pela cessão dos dados hidrogeológicos e hidroquímicos. ABSB agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela bolsa de mestrado. FJFF agradece ao CNPq pelo auxílio financeiro (contrato nº 470689/2004-8) e pela bolsa de Produtividade em Pesquisa (contrato nº 305810/2010-3).

Referências

- Bittencourt A.V.L. 1978. *Sólidos hidrotransportados na bacia hidrográfica do rio Ivaí: Aplicação de balanços hidrogeoquímicos na compreensão da evolução de processos da dinâmica externa*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 201 p.
- 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. *Águas Subterrâneas*, **17**:67-75.
- Buchmann Filho A.C. 2002. *Caracterização das Águas do Sistema Aquífero Serra Geral no Estado do Paraná*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 180 p.
- Celligoi A. 1994. Aspectos hidrogeoquímicos da Formação Serra Geral em Londrina - PR. In: ABAS, Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 8, *Anais*, p. 425-433.
- 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, São Paulo, 177 p.
- 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, São Paulo, 178 p.
- Fritz B. 1981. Étude thermodynamique et modélisation des reactions hydrothermales et diagénétiques. *Sciences Géologiques Mémoire*, **65**:167-174.
- Hypolito R. 1972. *Estudo experimental de alteração intempérica de diabásios*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 103 p.
- Levi F., Melfi A.J. 1972. Geochemical and mineralogical studies on the first stages of wethering of basic and related rocks. *Rev. Bras. Geoc.*, **2**:1-7.
- Portela Filho C.V. 2003. *Condicionamento estrutural magnético do Sistema Aquífero Serra Geral na região central do Arco de Ponta Grossa (Bacia do Paraná) e sua conectividade com o Sistema Aquífero Guarani*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geologia Exploratória, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 184 p.
- Rebouças A.C. 1978. Potencialidades hidrogeológicas dos basaltos da Bacia do Paraná no Brasil. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 30, *Anais*, p. 2.963-1.976.
- Rosa Filho E.F., Salamuni R., Bittencourt A.V.L. 1987. Contribuição ao estudo das águas subterrâneas nos basaltos no Estado do Paraná. *Boletim Paranaense de Geociências*, **37**:22-52.
- Rosa Filho E.F. da, Hindi E.C., Rostirolla S.P., Ferreira F.J.F., Bittencourt A.V.L. 2003. Sistema Aquífero Guarani - Considerações preliminares sobre a influência do Arco de Ponta Grossa no fluxo das águas subterrâneas. *Águas Subterrâneas*, **17**:91-111.
- Soares P.C. 1991. *Tectônica Sinsedimentar Cíclica na Bacia do Paraná: Controles*. Tese de Titularidade, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 148 p.
- USGS 2008. *Shuttle Radar Topography Mission*. Disponível em: <http://www.srtm.usgs.gov>. Acessado em: 13/10/2009.
- White I.C. 1908. *Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra do Brasil*. Rio de Janeiro, DNPM, Relatório final, 617 p.

Manuscrito ID 17362

Submetido em 26 de abril de 2010

Aceito em 04 de outubro de 2011