

ESTADO DA ARTE DO SISTEMA AQUIFERO GUARANI - SAG

Luiz Antônio de Oliveira

Prof. Dr. do Instituto de Geografia - UFU
luiz_ao@yahoo.com.br

Andréa Santos Vieira

Geógrafa, bolsista do Observatório em Saúde - UFU
andrea.vieira@yahoo.com.br

RESUMO

O principal objetivo desse trabalho é apresentar o estado da arte do Sistema Aquífero Guarani – SAG em sua área de ocorrência na América do Sul. O aquífero ocupa um área de 1.210.000 km² ao longo das Bacias do Paraná e Chaco, porção meridional da América do Sul, sendo 822.717 km² em território brasileiro. O SAG é composto principalmente por arenitos de idades triássica e jurássica. As Formações Rosário do Sul, Pirambóia e Botucatu ocorrem no Brasil, Formação Misiones no Paraguai e Argentina, Formação Buena Vista no Uruguai e Argentina e Formação Tacuarembó na Argentina. A formação Botucatu é considerado o principal aquífero em termos regionais de potencial quantitativo.

Palavras-chave: Sistema Aquífero Guarani, América do Sul, Bacias do Paraná e do Chaco.

REVIEW OF GUARANY AQUIFER SYSTEM – GAS

ABSTRACT

The main objective of this work is presented a review of The Guarany Aquifer System – GAS in the occurrency area in South America. The Aquifer occupies an area of 1,210,000 along the Paraná and Chaco Basin, southern portion of South América, being 822,717 km² in Brazilian territory. The SAG is composed mainly of sandstones by Triassic and Jurassic age. The Rosário do Sul, Pirambóia and Botucatu Formations occurs in Brazil, Misiones Formation in Paraguay and Argentina, Buena Vista Formation in Uruguay and Argentina, and Tacuarembó Formation in Argentina. The Botucatu Formation it is considered the most important aquifer in terms of regional quantitative potential.

Palavras-chave: The Guarany Aquifer System, South America, Paraná and Chaco Basins.

INTRODUÇÃO

O Sistema Aquífero Guarani é um dos mais importantes reservas de água subterrânea em território brasileiro, sendo por isso recurso estratégico para demandas futuras de água. Apesar de apresentar unidade geológica, estruturalmente o SAG é todo compartimento constituindo subsistemas aquíferos com distinção hidrodinâmica e química. Devido a complexidade do SAG em toda a sua extensão, o objetivo desse trabalho é elencar as principais informações produzidas sobre o aquífero nas suas distintas áreas de ocorrência, possibilitando uma integração e atualização dos dados produzidos sobre os parâmetros quali-quantitativos.

As formações sedimentares que compõem o SAG estão distribuídas por uma área de 1,210 milhões de km², ocupando a quase totalidade das bacias sedimentares do Paraná e Chaco-Paraná, sendo 822.717 km² em território brasileiro, 225.000 km² na Argentina, 72.000 km² no Paraguai, Araújo, França e Potter (1995), e 90.000 km² no Uruguai, Santa Ana (2004), figura 1 – Mapa de localização do SAG.

Recebido em 11/06/2010

Aprovado para publicação em 05/08/2010

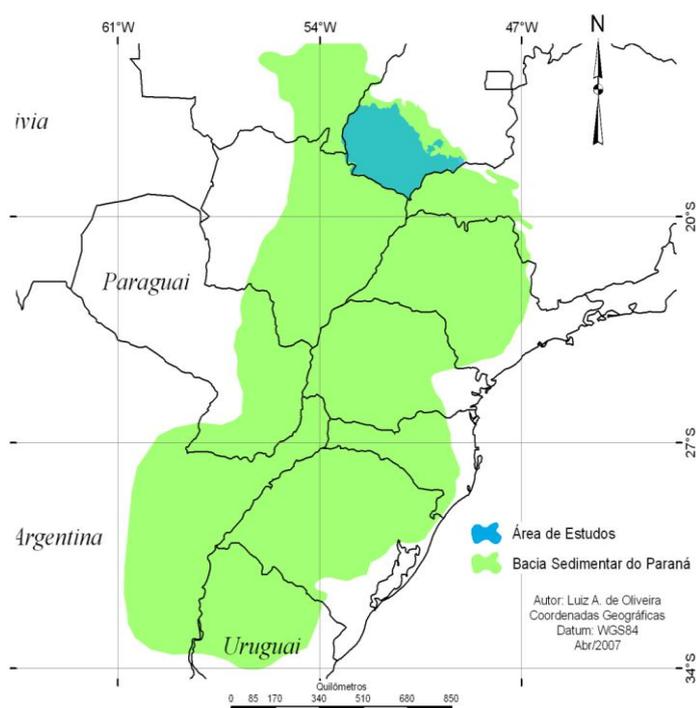


Figura 1 - Mapa de localização do SAG.

No Brasil, o aquífero se estende pelas regiões central e oeste de São Paulo (155.800 km²), Triângulo Mineiro/MG (43.642 km²), Região sul de Goiás (45.575 km²), porção sudeste de Mato Grosso (26.400 km²), Mato Grosso do Sul (213.200 km²), Paraná (131.300 km²), Santa Catarina (49.200 km²) e Rio Grande do Sul (157.600 km²).

As informações de áreas e de limites aqui apresentadas foram atualizadas com base nos trabalhos desenvolvidos por Gastmans (2007) na porção setentrional do aquífero e por Oliveira (2009) na área de ocorrência em Goiás e Minas Gerais.

A denominação de Aquífero Guarani foi sugerida pelo geólogo uruguaio Danilo Anton em homenagem à grande nação indígena Guarani, cuja população, antes da colonização europeia, se concentrava principalmente nas terras que compreendem as regiões fronteiriças entre Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai, Rocha (1996).

Para Campos (1996), o Aquífero Guarani engloba unidades geológicas confinadas, sotopostas aos basaltos, compostas por arenitos e lamitos, com aumento da proporção de argilas em direção à base do pacote sedimentar. Em termos gerais, aproximadamente 90% do SAG está confinado e o restante ocupa áreas em faixas de afloramentos, Araújo, França e Potter (1995). A porção confinada está sotoposta a espessos derrames basálticos correspondentes as Formações Serra Geral (Brasil), maior espessura de 1723 m no estado de São Paulo, Galhano (2006), Formação Alto Paraná (Paraguai), maior espessura de 700 m, Consórcio Guarani (2006) e Formação Arapey (Uruguai), maior espessura de 1023 m, Decoud e Rocha (2000). Os litotipos do Guarani compõem uma formação subterrânea, de características aquíferas, de profundidade variável que abrange a quase totalidade da Bacia Sedimentar do Paraná, Zunino e Ainchil (2000). A porção basal é constituída por arenitos de idade triássica (Formações Pirambóia, Buena Vista e Grupo Rosário do Sul), Santa Ana (2004), Azevedo *et al.*, (1985), Filho *et al.*, (2003), Araújo, França e Potter (1995;1999), Giardin e Faccini (2004). A porção superior é constituída por pacote arenoso de idade jurássica, Formações Misiones, Palmieri *et al.*, (1990), Botucatu e Tacuarembó, Araújo, França e Potter (1995;1999), Filho *et al.*, (2003).

Em território brasileiro, o aquífero engloba as Formações Rosário do Sul, Pirambóia e Botucatu, Araújo, França e Potter (1995;1999); formações Misiones no Paraguai e Argentina, Larroza, Farina e Paredes (2001), Consórcio Guarani (2006); Buena Vista no Uruguai, Decoud

e Rocha (2000), Montañó, Collazo e Decoud (1998), Santa Ana (2004); formações Tacuarembó e Buena Vista na Argentina, Zunino e Ainchil (2000).

A espessura do sistema aquífero é variável, sendo controlada pela estrutura das bacias sedimentares do Paraná e Chaco-Paraná: altos estruturais, falhamentos, depressões e bordas de bacia. A seqüência deposicional composta pelas formações Pirambóia e Botucatu possui mais de 800 m de espessura na região de Alegrete/RS e 600 m na porção leste de Campo Grande/MS, Araújo, França e Potter (1995). Em território argentino, a seqüência correspondente as Formações Tacuarembó e Buena Vista possui mais de 840 m de espessura em Tostado, Província de Santa Fé, Ainchil e Giuso (1997). O depocentro sedimentar do sistema aquífero acompanha longitudinalmente o eixo do Rio Paraná, com direção NNE-SSW, Araújo, França e Potter (1995).

O Grupo Rosário do Sul tem sua ocorrência restrita ao estado do Rio Grande do Sul. A seqüência permo-triássica é composta por depósitos continentais e compreende as Formações Sanga do Cabral, Santa Maria e Caturrita, Giardin e Faccini (2004), Lavina (1982). Estratigraficamente, o Grupo Rosário do Sul está sotoposto aos arenitos da Formação Botucatu e sobrejacente aos sedimentos da Formação Estrada Nova, Leão, Caicedo e Risso (1998). Geneticamente e temporalmente, a Formação Rosário do Sul pode ser correlacionada à Formação Pirambóia, Gamermann e Filho (1971). A Formação Sanga do Cabral integra a seqüência neopermiana-eotriássica, caracterizada por uma associação de fácies eólicas na base e depósitos aluviais de planície entrelaçada no topo, Lavina (1982), Giardin e Faccini (2004). As Formações Santa Maria e Caturrita compreendem a seqüência meso-neotriássica. A base da Formação Santa Maria é composta pelos arenitos fluviais do Membro Passo das Tropas, enquanto que o topo é formado por litofácies pelíticas (fossilíferas) de planícies de inundação do Membro Alemoa. No topo da seqüência triássica, a Formação Caturrita é constituída por arenitos de sistemas fluviais evoluindo para litofácies pelíticas de sistemas de deltas lacustres, e tendência de predomínio de arenitos na porção superior.

A Formação Buena Vista se estende pela área de influência da Bacia Chaco-Paraná no médio-norte do Uruguai e Nordeste da Argentina. De acordo com Santa Ana e Ucha (1994), a Formação Buena Vista é constituída por arenitos de granulometria variada, muito fina a média, localmente grossa a muito grossa, ocorrendo ainda níveis de ortopsefitos e arenitos conglomeráticos, além de espessos pacotes pelíticos associados aos arenitos. A maior espessura dos sedimentos relativos à formação é de 671 m, levantada no perfil do poço N08 Yx-1, localizado em Yacaré, região ocidental da bacia em território uruguaio e de 40 m de espessura em Colon na Argentina. Estratigraficamente, a Formação Buena Vista é correlacionada à Formação Sanga do Cabral (Grupo Rosário do Sul), Azevedo *et al.*, (1985).

A Formação Tacuarembó constitui a porção basal da seqüência neotriássica-eocretácea na área de influência da Bacia Chaco-Paraná que se estende pelas regiões médio-norte do Uruguai, Sudoeste do Paraguai e Nordeste da Argentina. A Formação Tacuarembó está subdividida em membros inferior e superior, Bossi (1966). De acordo com Santa Ana (2004), o membro inferior é constituído por arenitos de granulometria variada, finos a muito finos, intercalados por arenitos médios a grossos e por delgadas camadas de siltitos e pelitos argilosos arranjados em formas de estratificação cruzada acanalada de pequeno a médio porte, subordinadamente planar. O membro superior é constituído por arenitos finos a médios, bem selecionados, com estruturas de estratificação cruzada acanalada, planar e planar-tangencial, Santa Ana (2004). Ainda de acordo com o autor, os membros inferior e superior são correlacionáveis às Formações Pirambóia e Botucatu, respectivamente. Perfil geológico montado com dados de perfuração do poço N07 Px-1 de Pelado, indica espessura de 450 m para a Formação Tacuarembó.

Outras propostas litoestratigráficas redefinindo a Formação Tacuarembó foram sugeridas. Ferrando e Andreis (1996), subdividem a porção inferior desta unidade e propõem a designação de Formação Cuchilla del Ombú para um pacote de sedimentos eólicos presentes na porção basal. Por suas características litoestratigráficas, o membro superior vem sendo considerado por vários autores como uma nova unidade designada de Formação Rivera, Ferrando e Montana (1987), Montañó, Collazo e Decoud (1998), Decoud e Rocha (2000). Ferrando e Montana (1987) descrevem o Grupo Batovi Dorado composto pelas Formações

Cuchila del Ombú (basal), Tacuarembó (intermediária) e Rivera (topo). Na parte oriental do Paraguai, a Formação Misiones ocupa uma área de 67.000 km², dos quais 37.000 km² em zonas de afloramentos, conformando uma faixa de 500 km de comprimento e 60 km de largura. As maiores espessuras, em torno de 350 m, foram levantadas em perfis de poços nas cidades de Pedro Juan Caballero e Salto de Guairá, Larroza, Farina e Paredes (2001). A formação é caracterizada por duas seqüências litoestratigráficas, uma constituída por arenitos eólicos (topo) e outra por arenitos fluviais com desenvolvimento de fácies arenosas (base), PROJETO DE PROTEÇÃO AMBIENTAL E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI (2005b). A base dos sedimentos foi depositada em ambiente de planície aluvial associada a sedimentação fluvial, enquanto que os arenitos constituintes da porção superior, sugerem origem eólica, Orue (1996).

De acordo com Consórcio Guarani (2006), os litotipos são formados por um conjunto homogêneo de arenitos quartzosos, granulometria média a grossa, grãos polidos e arredondados de baixa esfericidade, matriz argilosa e hematítica, localmente silicificada. A estrutura das camadas varia de maciça, estratificação mal definida, a seções com estratificação cruzada. Em meio aos pacotes areníticos intercalam delgadas camadas de conglomerados compostos por seixos rolados, arredondados, com até 15 cm de diâmetro, compostos por quartzo, quartzitos e variedades amorfas de sílica. São sugeridos ambientes fluviais e aluviais com intercalação de episódios eólicos. Níveis conglomeráticos, com presença de ventifactos se intercalam com pacotes areníticos, Consórcio Guarani (2006). De acordo com Zunino e Ainchil (2000), a Formação Misiones que ocorre no Paraguai e no nordeste da Argentina é correlacionável aos litotipos da Formação Tacuarembó.

Os arenitos da Formação Pirambóia ocorrem nos estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul, Paraná, Santa Catarina e região norte do Rio Grande do Sul. A formação caracteriza-se por uma sedimentação arenosa flúvio-eólica ocorrida em ambiente de clima semi-árido, Filho *et al.*, (2005). O arcabouço da rocha é constituído essencialmente por minerais de sílica, correspondendo a 90% do total, e cimento a base de sílica e ou limonita quimicamente precipitada, Soares (1973). Os litotipos correspondem a arenitos finos a muito finos, siltosos, brancos e friáveis, Strugale *et al.*, (2004); arenitos avermelhados, finos a médios, sendo que nas camadas inferiores podem ocorrer arenitos grossos a conglomeráticos e arenitos argilosos, Soares e Assine (1992). A estrutura é marcada por estratificações cruzadas acanaladas, estratificações e laminações plano-paralelas.

A estrutura e o comportamento da rocha sugerem depósito em ambiente de lençóis de dunas eólicas com interdunas úmidas localmente intercaladas com depósitos fluviais, Strugale *et al.*, (2004). Na faixa de afloramentos no estado de São Paulo, Caetano-Chang (1997), descreve a Formação composta por associação de arenitos finos, subordinadamente finos a médios e arenitos finos siltosos, presentes em dunas eólicas e interdunas. Caetano-Chang e Wu (2006), descrevem a porção superior desta unidade composta por arenitos finos a muitos grossos, conglomeráticos, depositados pela interação de sistemas eólico e fluvial.

A Formação Botucatu é composta por arenitos eólicos, constituídos predominantemente por minerais de quartzo, arredondados (peito-de-pomba), granulação fina a média em meio a cimento de sílica, carbonato e ou limonita. Os arenitos estão dispostos em formas de dunas, interdunas e intertrapes entre os derrames basálticos e ainda apresentam estruturas laminares, estratificações plano-paralelas e estratificações cruzadas de baixo e alto grau e ainda acanaladas. O contato superior com os basaltos da Formação Serra Geral é concordante, sendo comum a intercalação entre camadas de arenitos (trapes) e basaltos.

O contato basal se caracteriza por uma extensa superfície de discordância regional, com mudanças nas características entre os arenitos Botucatu e Pirambóia, Zalán *et al.*, (1988). De todas as unidades geológicas que compõem o SAG em território brasileiro, os arenitos da Formação Botucatu são os de maior distribuição espacial, ocorrendo em todos os estados de abrangência da Bacia Sedimentar do Paraná.

Detalhamento das Formações Pirambóia e Botucatu

Na porção central do estado de São Paulo, o SAG é composto pelas Formações Botucatu,

porção superior, e Pirambóia, porção basal. Os arenitos apresentam porosidade primária intersticial com predominância de condições livres na maior parte da área, ocorrendo ainda condições de confinamento e semi-confinamento. A Formação Botucatu se estende por uma área de 7.270 km² e possui espessura saturada entre 150 e 250 m, Côrrea (2000). A Formação Pirambóia possui espessura de 280 m na região de São Carlos, decaindo para 40 m rumo ao norte na região de Araraquara. As áreas de recarga, associadas às áreas de afloramento, ocorrem na porção leste e abrangem as regiões de Itirapina, São Carlos e Ibaté na porção oeste. Uma área de recarga menos expressiva localiza-se nos arredores da cidade de Bocaina, Côrrea (2000). Nas regiões de Garça e Marília (Oeste de São Paulo) o topo da Formação Botucatu está a 880 e 930 m de profundidade respectivamente. A espessura varia de 200 a 450 m, encontrando-se os menores valores de espessuras nas áreas de afloramento e os maiores em direção ao eixo da Bacia Sedimentar do Paraná, Prandi *et al.*, (2000). A diversidade do comportamento do pacote arenítico é controlada pelo Alto Estrutural de Cabrália, onde, conforme o autor, houve total arrasamento do aquífero.

No Estado do Mato Grosso do Sul, o SAG é constituído pelas formações Pirambóia e Botucatu. A unidade aquífera ocupa uma área de 213.200 km², sendo que destes, 36.000 km² representam áreas de afloramento. Os afloramentos ocorrem numa faixa de sentido NNS na porção central do Estado de Mato Grosso do Sul, com cerca de 100 km de largura no norte do estado e estreitando-se em direção ao sul, chegando a desaparecer próximo ao município de Bela Vista, Gastmans e Kiang (2005), Gastmans (2007).

No nordeste do Paraná, na região de São Jerônimo da Serra, o SAG é composto pelas Formações Pirambóia e Botucatu, Strugale *et al.*, (2004). A Formação Pirambóia possui espessura de 20m, sendo formado por arenitos siltosos, brancos e friáveis, depositados em ambiente de lençóis de dunas eólicas com interdunas úmidas localmente intercaladas com depósitos fluviais. A estrutura da rocha é marcada por estratificações e laminações plano-paralelas e estratificações cruzadas acanaladas. A Formação Botucatu é composta por arenitos finos, quartzosos, avermelhados e grãos arredondados. Apresenta estratificações cruzadas acanaladas, sendo que o pacote arenítico pode chegar até 50 m de espessura. Os afloramentos ocorrem na região descrita e regiões adjacentes de Serra do Cadeado e Rio Branco do Ivaí/PR.

Nas regiões Sul de Goiás (GO) e no Triângulo Mineiro (MG), o SAG está restrito a Formação Botucatu. No estado de Goiás, a Formação Botucatu está distribuída em uma área total de 45.575 km², sendo que 35.994,5 km² constituem a zona confinada e os 9.580,5 km² restantes, representam os afloramentos, Oliveira (2009). No município de Mineiros/GO a área de exposição ocorre em cotas altimétricas elevadas, próximas a 900 m de altitude, divisor de águas das bacias hidrográficas do Paraná (Sul) e do Araguaia (Norte). A cota altimétrica mais alta encontra-se no município de Mineiros/GO, 900 m de altitude, enquanto que a cota mais baixa, do topo do pacote arenítico, é de - 290 m em Quirinópolis/GO. Na região de Jataí/GO os afloramentos são marcados por arenitos friáveis, enquanto que na região de Mineiros, os residuais de relevo são mantidos por rochas de fácies silificadas.

Hidroquímica

Análises de dados hidrogeoquímicos evidenciam variação do quimismo entre as águas contidas nas zonas livres e confinadas do aquífero, Silva (1983), Sracek e Hirata (2002), Rosa Filho *et al.*, (1987), Souza (2004), Gastmans e Kiang (2005), Gastmans (2007), Zanatta e Coitinho (2002), Montañó, Colazzo e De Coud (1998), Oliveira (2009), De Coud e Rocha (2000), PROJETO DE PROTEÇÃO AMBIENTAL E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI (2005b), dentre outros. Nas zonas confinadas, onde o nível piezométrico do SAG é inferior à base do aquífero basáltico, ocorre a mistura de águas e conseqüente alteração química, promovida pelo aporte de fluxos descendentes contendo minerais solubilizados dos basaltos.

De modo contrário, em regiões onde o nível piezométrico do SAG é superior à base do basalto, ocorre fluxo ascendente, e as águas do SAG misturam-se às águas dos basaltos, Bittencourt *et al.*, (2003), Corrêa (2000). De acordo com Oliveira (2009) ocorre ainda alteração química das águas, promovida pela solubilização de minerais das unidades sotopostas ao SAG,

principalmente dos carbonatos da Formação Irati. Variações hidroquímicas também estão relacionadas às variações mineralógicas representativas das distintas fácies que compõem o SAG.

Citam-se ainda as variações entre as zonas de circulação estagnada de água subterrânea, aumento progressivo da concentração, e as zonas de maior fluxo, onde a velocidade de circulação inviabiliza uma maior precipitação química. Em síntese, a hidroquímica do SAG é condicionada pelos fatores ambientais relacionados à composição mineral das distintas fácies que compõem o aquífero, grau de confinamento, superfície potenciométrica, linhas de fluxo e estratigrafia. Avaliações realizadas no estado de São Paulo demonstraram que nas áreas de afloramento do aquífero há predomínio das águas bicarbonatadas magnesianas e calco-magnesianas. Nos pontos de semiconfinamento as águas são calco-magnesianas e bicarbonatadas cálcicas.

Nas proximidades da calha do Rio Paraná, porção oeste, onde o aquífero apresenta maior grau de confinamento, as águas são bicarbonatadas sódicas, enquanto que no extremo sudoeste do estado, as águas são cloro-sulfatadas sódicas, Silva (1983). Estudos realizados na região de Ribeirão Preto/SP por Sracek e Hirata (2002), demonstram evolução das águas bicarbonatadas cálcicas, nas zonas de afloramento e de baixo confinamento, para águas bicarbonatadas sódicas com concentrações de cloretos e sulfatos nas zonas de alto confinamento.

Os teores de cloretos e sulfatos podem estar relacionados a dissolução de evaporitos, halita e gipsita, presentes na Formação Pirambóia. Ainda de acordo com os autores, na zona de baixo confinamento, a ocorrência de elevadas concentrações de flúor, 13,3, mg/l, pode estar relacionada a dissolução do mineral presente no SAG ou nos basaltos sobrepostos. Dias et al (2002), dividiram as águas do estado em três famílias: a) família das águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas – que ocorrem na porção confinada do SAG, com pH variando de 5,3 a 8,5 e a temperatura de 21°C a 36°C, com 75% dos valores menores que 28°C. b) família das águas bicarbonatadas sódicas – que ocorrem na porção confinada do SAG e apresentam valores de pH predominantemente alcalino, 100% dos valores são maiores que 8,5; o resíduo seco a 180°C varia de 93 a 222 mg/l e a temperatura variando de 23°C a 34°C; c) família das águas cloro-sulfatadas cálcicas ou magnesianas – que ocorrem na porção livre do SAG, com valores de pH sempre ácido, variando de 4,8 a 7,0, com 75% dos valores menores que 6,2.

O resíduo seco a 180°C apresenta concentrações sempre menores que 157 mg/l, com 75% dos valores menores que 54 mg/L, com temperatura varia de 20°C a 27°C, com 75% dos valores menores que 24°C. Para o Estado do Paraná, Rosa Filho *et al.*, (1987) estudando o quimismo das águas subterrâneas contidas nos basaltos do Sistema Aquífero Serra Geral, observaram em vários pontos a contribuição das águas do SAG.

Esta contribuição é facilmente percebida, segundo os autores, pela análise dos cátions maiores, já que as relações características entre os elementos para os dois sistemas aquíferos são distintas. De acordo com Souza (2004), nas zonas de confinamento do SAG é baixa a relação entre Ca e Na. O pH da água é alcalino, determinado pela concentração de bicarbonato e carbonato, e as temperaturas são superiores a 26° C. Os menores teores de cloreto estão associados às menores temperaturas.

Comparativamente, as águas do SAG apresentam maior concentração de sulfetos e sulfatos, quando comparadas às do aquífero basáltico. Ainda de acordo com o autor, o ambiente desértico de deposição dos arenitos Botucatu/Pirambóia propiciou a deposição de precipitados salinos, incluindo os sulfatos.

No estado do Mato Grosso do Sul, Gastmans e Kiang (2005), Gastmans (2007) descrevem tendência de aumento de salinidade entre as áreas de recarga e as zonas de maior confinamento do aquífero. Nas áreas de recarga ou nas zonas de baixo confinamento, onde a espessura do basalto é pequena, as águas são bicarbonatadas cálcicas ou bicarbonatadas calco-magnesianas. Característica esta inerente às águas coletadas dos poços perfurados em basaltos e nas surgências do SAG. Nas zonas de maior confinamento, as águas evoluem de bicarbonatadas sódicas para bicarbonatadas cloretadas/sulfatadas/sódicas. Amostras de águas de poços localizados nas Formações Botucatu e Pirambóia demonstram teores elevados de

sais, provenientes da dissolução de cimento calcífero, liberando cálcio e bicarbonato para a água.

Ainda de acordo com os autores, nos poços onde ocorrem mistura de líquidos do SAG e dos basaltos, as águas são bicarbonatadas cálcicas e magnesianas, com tendência de enriquecimento em magnésio, situação também descrita por Souza (2004) e Rosa Filho *et al.*, (1987) em trabalhos realizados no estado do Paraná.

A temperatura das águas é condicionada pelo grau de confinamento do aquífero, os valores variam de 20 °C a 66,6 °C. Os valores de pH entre 4,9 a 9,2, com média de 6,9, indicam uma predominância de águas neutras a levemente ácidas, sendo que as águas mais ácidas situam-se mais próximas às zonas de recarga, enquanto que nas porções mais confinadas prevalecem as águas básicas.

No estado de Goiás a evolução nas concentrações iônicas é controlada pelo conteúdo mineralógico do próprio aquífero e ainda por águas de mistura, com forte controle das águas da Formação Irati. Com relação às atividades iônicas o controle é determinado grau de solubilidade dos minerais que os mesmos integram, obedecendo a seguinte seqüência: $(Ca;Mg)CO_3 < CaSO_4 < KCl < NaCl$, sendo que os íons monovalentes, constituintes dos minerais mais solúveis (cloretos), são os íons de maior atividade, ou seja, os mais reativos. De outro modo, as atividades iônicas dos íons bivalentes vão decaimento em direção aos sulfatos ($Ca^{2+}SO_4^{2-}$) e aos carbonatos ($Ca^{2+}, Mg^{2+}CO_3^{2-}$), nesta ordem.

Para a região de Cachoeira Dourada as altas concentrações iônicas das águas estão relacionadas à dissolução de minerais evaporíticos halita e anidrita. Esta região encontra-se na Borda da Bacia Sedimentar, limite do Aquífero Guarani no estado. O contexto geológico local indica a existência de paleoambientes de *playa lake*, propício à formação de sedimentos evaporíticos continentais, Oliveira (2009).

No estado de Santa Catarina as águas são bicarbonatadas cloretadas sódicas ou bicarbonatadas cloretadas sulfatadas sódicas. O grau de confinamento condiciona o aumento de pH, salinidade e condutividade específica, Zanatta e Coitinho (2002). Os autores relatam valores de pH entre 6 e 8, passando à alcalinas em áreas de maior confinamento. A salinidade em termos de STD chega a valores de 800 mg/l.

De acordo com Montañó, Colazzo e De Coud (1998), na região de afloramento do SAG no norte do Uruguai, as águas das Formações Rivera e Tacuarembó estão classificadas como cloretadas cálcicas e bicarbonatadas cálcicas. A concentração de Ca supera a concentração de Na e em alguns casos, valores de Mg são iguais ou superiores aos de Na. Os altos valores de Ca estão associados ao cimento ocasionalmente carbonático da Formação Tacuarembó. Em alguns casos, o bicarbonato tem domínio sobre o cloro, dando origem a águas bicarbonatadas cálcicas. O valor médio da dureza total expressa em $CaCO_3$ é de 45 mg/l e o valor médio do resíduo seco é de 120 mg/l. Na zona confinada, as águas das formações que compreendem o sistema Rivera-Tacuarembó-BuenaVista-Yaguari estão classificadas como Bicarbonatadas sódicas, com valor médio de 200 mg/l de dureza total. Na maioria dos casos há maior concentração de Na sobre o Ca.

No norte do Uruguai e na região próxima a fronteira entre Uruguai e Argentina, De Coud e Rocha (2000) analisando dados hidrogeoquímicos determinaram três classes de águas: classe 1 – águas tipo bicarbonatadas cálcicas sódicas, presentes nas zonas de aquífero livre, região de Artigas (Uruguai); classe 2 – águas tipo bicarbonatadas sódicas presentes nas zonas de aquífero confinado, regiões de Arapey, Daymán, San Nicanor e Guaviyú (Uruguai e Argentina); classe 3 – águas tipo bicarbonatadas sódica cloretadas, presentes nas zonas confinadas, regiões de Federación, Ose e Salto Grande (Argentina e Uruguai). Ainda de acordo com os autores, na área de confinamento do aquífero, a concentração do cátion Na é muito superior ao do Ca, e em menor grau o ânion HCO_3^- é superior ao íon Cl.

Em território paraguaio, as águas da Formação Misiones foram classificadas como bicarbonatadas cálcica magnésicas, PROJETO DE PROTEÇÃO AMBIENTAL E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI (2005b)

A comparação entre a composição química das águas contidas no SAG nos estados do Paraná e São Paulo, e no Uruguai, mostra claramente a existência de tipos sulfatados no estado de São Paulo, que não ocorrem no Paraná, e de tipos cloretados cálcicos no Uruguai que não ocorrem no Brasil, PROJETO DE PROTEÇÃO AMBIENTAL E GERENCIAMENTO SUSTENTÁVEL INTEGRADO DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI (2005a). Este fato demonstra claramente a variabilidade do quimismo das águas do SAG, principalmente nas zonas confinadas, o que segundo o autor, pode ser explicado por variações faciológicas ou por influência de misturas induzidas por fraturas tectônicas.

ASPECTOS HIDRODINÂMICOS DO AQUÍFERO

Os parâmetros hidrodinâmicos e os sentidos de fluxo do SAG são controlados principalmente pelas características faciológicas dos litotipos, espessura e profundidade dos pacotes sedimentares e posição em relação às áreas de recarga e de confinamento.

De acordo com Araújo, França e Potter (1995), os parâmetros hidráulicos variam espacialmente, sendo controlados principalmente pelas características faciológicas dos litotipos. Os depósitos flúvio-lacustre de idade triássica, que compõem a base do SAG, possuem porosidade média de 16% e valores de condutividade hidráulica entre 0,01 a 4,6 m/dia, enquanto que os depósitos eólicos de idade jurássica possuem porosidade média de 16% e condutividade hidráulica entre 0,2 a 4,6 m/dia.

No estado de São Paulo, análises de poços parcialmente penetrantes realizadas pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE (1974) demonstram valores de transmissividade entre 65 e 240 m²/dia, condutividade hidráulica de 3,5 m/d e coeficiente de armazenamento entre 10⁻⁵ e 10⁻³. Sracek e Hirata (2002) descrevem valores de transmissividade entre 39 e 1.035, condutividade hidráulica de 12,96 m/dia, coeficiente de armazenamento entre 4. 10⁻⁵ – 2. 10⁻⁴ e porosidade entre 10 – 15%. Para a Região de Marília e Garça os coeficientes médios de transmissividade variam de 300 a 800 m²/dia, sendo que para a região de Marília o coeficiente médio de transmissividade é de 400 m²/dia. A vazão varia de 95 a 342 m³/hora e a vazão específica entre 5,2 e 12,6 m³/h/m, Prandi *et al.*, (2000). De acordo com o autor, a heterogeneidade dos parâmetros hidráulicos dos poços está relacionado às diferentes profundidades do topo do aquífero, bem como a sua espessura, ou seja, os poços que apresentam valores superiores de coeficientes hidráulicos estão localizados em áreas onde o topo do aquífero é menos profundo e a espessura é maior. De acordo com Córrea (2000), nas bacias dos Rios Jacaré-Pepira e Jacaré-Guaçu, os parâmetros hidrodinâmicos do aquífero Botucatu são controlados pelo arqueamento estrutural do Alto do Jacaré-Guaçu. Ainda de acordo com o autor, os valores dos parâmetros abrangem uma amplitude bastante grande, sendo de 0,04 até 15,22 m³/h/m para a capacidade específica e de 17,03 a 662,98 m²/dia, com média de 118,22 m²/dia, para a transmissividade.

Em Santa Catarina, os valores de capacidade específica estão entre 0,17 a 4,60 m³/h/m, vazão entre 12 e 193 m³/h, com tendência de aumento de valores nas áreas de maior espessura do aquífero, Zanatta e Coitinho (2002).

No estado do Mato Grosso do Sul, Gastmans (2007), utilizando dados da empresa de saneamento do estado, descreve vazões com um amplo range de amplitude, variando desde alguns metros/hora até 320 m³/h, sendo que a maioria das vazões está abaixo de 40 m³/h. Os valores de vazões específicas variam de 1 a 7 m³/h/m e os de transmissividades encontram-se entre 10 a 650 m²/dia.

A região de Rivera no Uruguai representa a zona de maior espessura do SAG naquele país. Os aquíferos Rivera e Cuchilla Ombu apresentaram valores de transmissividade de 150 m²/dia e capacidade específica da ordem de 3 m³/h/m, com vazões entre 50 e 110 m³/h. Na região Oeste do país, o SAG representado pelos aquíferos das Formações Tacuarembó-Buena Vista-Yaguari, ocupa uma área aproximada de 38.000 km². Nesta região, a determinação dos parâmetros hidráulicos está limitada a cidade de Artigas, onde a transmissividade medida foi de 360 m²/dia e permeabilidade de 1,27 m/dia. As vazões podem alcançar valores entre 800.000 m³/h e 1.000.000 m³/h, Montañó, Collazo e De Coud (1998).

As reservas explotáveis, que correspondem ao aporte de água que recarrega o aquífero

anualmente, foram calculadas em 166 km³/ano ou 5.000 m³/s, Batezelli *et al.*, (2005). Em área de afloramento, na porção central do estado de São Paulo, Barreto (2006) estimou que a recarga direta do sistema está em torno de 400 mm anuais e a recarga profunda entre zero e 40 mm. Na região fronteira entre Brasil e Argentina, num perímetro de 650 km² em torno das áreas municipais de Santana do Livramento/BR e Rivera/UY, a recarga do SAG ocorre de forma direta e indireta. Resultado de simulação matemática realizada por Gomez, Rodríguez e Vives (2006) indica volumes médios de recarga indireta de 1,3 mm/ano, através das fraturas de basalto, e 140,2 mm/ano nas áreas de afloramento dos arenitos, equivalendo a 0,08% e 8,55% respectivamente, da média anual de 1.639 mm estimada para a cidade de Rivera.

FLUXOS DO SISTEMA

O fluxo subterrâneo do SAG é condicionado pela presença de lineamentos estruturais, Zalán *et al.*, (1991), Fúlfaro *et al.*, (1982) e Araújo, França e Potter (1995). Os lineamentos atuam como condutos preferenciais de fluxo e em outras se manifestam como uma anisotropia na permeabilidade. A definição da geometria destas zonas é feita tendo-se como base o grau de fraturamento secundário e alguns lineamentos principais. Para interpretação hidrodinâmica, Montaño, Collazo e De Coud (1998) propõem a divisão do sistema aquífero em função do comportamento hidráulico nas zonas aflorante e confinada. No Brasil, Gilboa *et al.*, (1977) indica fluxo entre as áreas de recarga, localizadas nas zonas de afloramento em cotas altimétricas elevadas, e o eixo central da Bacia do Paraná.

O Arco de Ponta Grossa divide o SAG em dois domínios potenciométricos distintos situados ao norte e ao sul do arco, Araújo, França e Potter (1999). No compartimento setentrional as principais zonas de recarga estão associadas às áreas de afloramentos das Formações Botucatu e Pirambóia nos estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul com fluxos direcionados para oeste em ambos os estados. No Mato Grosso do Sul, Gastmans (2007) descreve duas zonas de recarga associadas ao Alto de São Gabriel do Oeste e ao sul do Mato Grosso do Sul, conformando um divisor de águas subterrâneas, de direção N-S, que drena parte das águas para oeste, em direção ao Pantanal Matogrossense.

Nas áreas de afloramento dos pacotes areníticos, a recarga ocorre diretamente por infiltração de águas meteóricas e nas zonas onde o aquífero encontra-se confinado, a recarga ocorre indiretamente, por percolação de fluxos nas descontinuidades dos basaltos sobrejacentes. Ressalta-se que a recarga indireta somente ocorre nas áreas onde a carga piezométrica do SAG é inferior à do aquífero basáltico.

Os principais aportes hídricos ocorrem ao longo das áreas de afloramento nos estados de Goiás, Mato Grosso do Sul, São Paulo, Paraná e Santa Catarina. Exutórios naturais do aquífero ocorrem nas regiões de planícies e pântanos localizadas entre os rios Uruguai e Paraná, ao sul e leste de Porto Alegre e ao longo dos rios Paraná, Pelotas e Tietê. Outra saída de água está relacionada à exploração de poços tubulares profundos distribuídos pela região Centro-Oeste de São Paulo, Vives *et al.*, (2000).

A área de recarga no estado de Santa Catarina é responsável por duas direções preferenciais de fluxo. A direção de fluxo sudoeste, coincidente com a global, controla os deslocamentos até a descarga regional encaixada no Rio Uruguai.

No Rio Grande do Sul, o fluxo direcionado para sul, à partir da cidade de Torres (RS) sofre inflexão para sudeste, sugerindo uma descarga localizada junto à linha de praia do Oceano Atlântico. Descargas localizadas, como a observada ao longo do Rio Pelotas, na região de Piratuba (SC), são sugeridas pela queda abrupta da cota potenciométrica de 650 m para 300 m em uma distância inferior a 40 km, Zanatta e Coitinho (2002).

Na Argentina e no Paraguai, as áreas de descarga são controladas pela Dorsal de Assunção. Importantes áreas de descarga ocorrem em forma de faixa que se estende desde a região de Esteros del Ibera (Argentina) até o Paraná (Brasil) passando pelo território paraguaio, Vives *et al.*, (2000).

ASPECTOS ESTRUTURAIS

Devido as suas dimensões continentais, a estrutura e o comportamento das camadas

sedimentares do SAG são heterogêneas, o que condiciona regionalmente os sentidos de fluxos e anisotropia nos parâmetros hidrodinâmicos. Estes aspectos são controlados principalmente pela espessura e profundidade dos pacotes sedimentares, posição em relação às áreas marginais e interiores da Bacia Sedimentar e aspectos estruturais

O fluxo subterrâneo do SAG é condicionado pela presença de lineamentos estruturais, Zalán *et al.*, (1991), Fúlfaro *et al.*, (1982) e Araújo, França e Potter (1995). Os lineamentos atuam como condutos preferenciais de fluxo e em outras se manifestam como uma anisotropia na permeabilidade, portanto, no zoneamento do aquífero devem-se levar em conta as alterações de transmissividade, permeabilidade e o traçado dos lineamentos estruturais, Vives *et al.*, (2000).

As duas principais direções estruturais (NW-SE e NE-SW) apresentam padrões estruturais distintos. As falhas com orientação NW foram fortemente reativadas durante a ruptura da Gondwana, no período Juro-Cretáceo, condicionando a intrusão de milhares de corpos ígneos e a extrusão de um volumoso derrame de lavas basálticas, representados pela Formação Serra Geral, em geral associados a essa direção.

Os lineamentos apresentam-se parcialmente preenchidos por diques de diabásio. Já o padrão estrutural das zonas de falhas NE tem como característica principal a ocorrência de uma única falha ou zona de falha retilínea, com largura variável, geralmente sem a presença de diques de diabásio, com caráter transcorrente associado, Zalán *et al.*, (1990), figura 2.

A descarga do aquífero ao longo dos rios Paraná, Pelotas e Tietê é condicionada pelos lineamentos estruturais. O fluxo subterrâneo está influenciado por lineamentos estruturais de maior ou de menor intensidade e pelas recargas, Vives *et al.*, (2000)

O arcabouço estrutural na porção setentrional do aquífero mostra forte influência das estruturas transversais noroeste, e secundariamente os lineamentos Leste-Oeste. Aliados a estes três grandes lineamentos temos a Sutura de Três Lagoas, como um grande Horst central nas proximidades da cidade de Pereira Barreto, com dois grábens laterais, apresentando direção NNE, Gastmans (2007).

De acordo com Machado (2005), no Rio Grande do Sul foram levantados quatro grandes compartimentos estruturais. O Complexo Leste é delimitado pelo Sistema de Falhas Dorsal de Canguçu, onde ocorrem as Formações Botucatu e Pirambóia; o Compartimento Oeste é delimitado pelo Sistema de Falhas Jaguari – Mata, onde ocorrem as Formações Guará e Botucatu; o Compartimento Norte – Alto Uruguai, está sob influência norte do Sistema de Falhas – Posadas, onde os arenitos da Formação Botucatu encontram-se confinados por derrames basálticos, e o Compartimento Central – Missões, onde ocorrem as formações triássicas do aquífero.

No estado de São Paulo, Côrrea (2000) relaciona o efeito do arqueamento do Alto Estrutural do Jacaré-Guaçu na redução da espessura da Formação Botucatu na região entre os rios Jacaré-Pepira e Jacaré-Guaçu, porção central do estado. A pouca espessura do aquífero influencia os baixos valores de capacidade específica à jusante da área citada.

Na região Oeste, as variações de espessura dos basaltos, quanto dos arenitos que compõem o Aquífero Guarani, podem ser reflexos do alto estrutural de Cabralia, onde, de acordo com o autor, houve supressão total dos arenitos do aquífero, Prandi *et al.*, (2000).

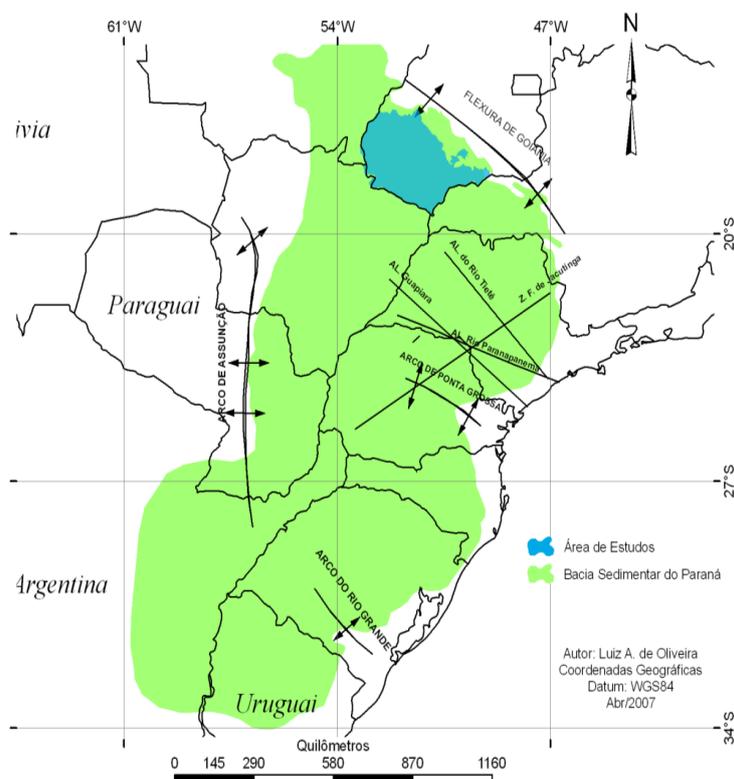
Com relação às características tectônicas e estruturais, Decoud e Rocha (2000), descrevem que na região Noroeste do Uruguai há predomínio dos lineamentos de direção NW, onde ocorrem as falhas de maior expressão regional. O abatimento dos blocos falhados no setor noroeste da Bacia (Triássico-Jurássico) permitiu a acumulação de grandes espessuras de sedimentos de ambiente desértico.

HIDROTERMALISMO

De acordo com Rabelo *et al.*, (2002), os altos gradientes de temperatura em algumas regiões da crosta estão relacionados ao calor proveniente da formação original do planeta combinado com o movimento de placas tectônicas. Nestas zonas, onde o grau geotérmico é mais

pronunciado, o hidrotermalismo está associado à existência de um sistema de falhamentos profundos que conduz a água a vários quilômetros de profundidade na crosta, onde após aquecida até o ponto de ebulição, retorna à superfície por pressão hidrostática.

As condições de circulação da água irão depender da porosidade das rochas.



Fonte: modificado do Projeto de Proteção Ambiental e Gerenciamento Sustentável Integrado do Sistema Aquífero Guarani (2005a).

Figura 2 - Arcabouço estrutural regional da Bacia do Paraná.

Quando o volume de porosidade primária ou secundária é grande, e a água preenche entre 2 a 5% do volume do maciço rochoso, tem-se formação de reservatórios geotérmicos. Teissedre, Sanches e Lopes (1982) relacionam o termalismo das águas do SAG à profundidade de confinamento. Na literatura, os diversos trabalhos relatam que as temperaturas das águas do SAG estão entre 25 a 70 °C, Rabelo *et al.*, (2002), Araújo, França e Potter (1999). O gradiente geotérmico é variável, sendo de 35°C/km, Teissedre, Sanches e Lopes (1982); 1 °C/35 m em média no estado de São Paulo, Teissedre, Sanches e Lopes (1982); 1 °C/30-35 m, Szikszay (1993); 29 °C/km, Araújo, França e Potter (1995).

Para o estado de Santa Catarina, Zanatta e Coitinho (2002), relatam que a temperatura da água do SAG aumenta, gradativamente, das áreas de recarga em direção à calha da bacia, porção confinada. O grau geotérmico aproximado é de 1 °C/35m. As temperaturas variam de 22° C nas zonas de afloramento para 48 °C nas zonas de confinamento.

Decoud e Rocha (2000), descrevem situações de hidrotermalismo no noroeste do Uruguai, onde a temperatura da água varia de 39 a 48,5 °C. A borda sudoeste da Bacia do Paraná, na região fronteira entre Argentina, Brasil e Uruguai, é o limite sul da extensão do aquífero hidrotermal profundo, Zunino e Ainchil (2000).

No litoral norte do Uruguai as temperaturas das águas variam de 33 a 45° C., com vazões surgentes de 100 m³/h. A integração da região que compreende o litoral norte uruguaio e o litoral argentino constitui o corredor de águas termais mais importante da América do Sul, (MONTAÑO, COLLAZO E DE COUD, 1998).

Na região Oeste do estado do Paraná as temperaturas variam de 26,7 a 36,5 °C, Souza (2004). Segundo Chang (2001), na região de Cianorte, a temperatura máxima registrada foi de 68 °C, medida em poço com uma profundidade de 1.565 metros. No entanto, inúmeros poços profundos produzem águas com temperaturas em torno de 40 °C.

Para o estado do Mato Grosso do Sul, Gastmasn (2007) levantaram temperaturas médias de 29,06 °C, sendo que os valores variam de 19,6 a 66,6 °C. No estado de Goiás as temperaturas das águas variam entre 26° C nas zonas de afloramento, regiões de Jataí e Mineiros e 49 ° C nas zonas de maior confinamento, Região de Quirinópolis, (OLIVEIRA, 2009).

Para Teissedre, Sanches e Lopes (1982), a temperatura da água aumenta gradativamente com a profundidade de confinamento. Esses autores definiram um gradiente geotérmico de 35 °C/Km. Em relatório elaborado por Chang (2001), relata-se gradientes geotérmicos variando de 10 a 40 °C/km, temperaturas registradas em diversos poços profundos, na faixa de 1.500 metros, apresentam valores variando de 50 a 70 °C, confirmando que altos valores de gradiente geotérmico podem ser aplicados.

Gastmans (2007) estabeleceu correlação entre a temperatura das águas subterrâneas e aprofundidade do topo do aquífero, podendo esta correlação ser descrita pela fórmula ($Temp\ ^\circ C = 0,0257 \times \text{profundidade do topo SAG} + 24,172\ ^\circ C$) Hamza *et al.*, (1978), sugere que as anomalias térmicas estão relacionados a movimentos convectivos, e que gradientes de 15 a 35 °C/km são suficientes para provocar convecção no Guarani. Os mesmos autores classificaram esse aquífero como sistema geotérmico de baixa entalpia (40 a 90 °C) e calcularam a energia armazenada, por unidade de área do aquífero, de aproximadamente 280 MW ano/km².

Diante da análise das informações, a hipótese mais provável da fonte de calor que aquece as águas do aquífero está relacionado à sistemas de fraturamento e ao grau geotérmico. A ampla área de ocorrência, bem como a distribuição aleatória dos pontos de ocorrência de hidrotermalismo não obedece um padrão que poderia estar associada às estruturas.

REFERÊNCIAS

- AINCHIL, J. E.; GIUSSO, E. M. **Perforación hidrotermal profunda em Villa Elisa (e.r.). el ajuste de la factibilidad geoelectrica y los criterios interpretativos.** 1º Congreso Nacional de Hidrogeología. Bahía Blanca - Argentina. 1997. pp.97a 103..
- ARAÚJO, L. M; FRANÇA, A. B; POTTER, P. E. **Aquífero gigante do Mercosul - Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai: mapas hidrogeológicos das Formações Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones e Tucarembó.** Curitiba, UFPR/PETROBRÁS. 1999.
- ARAUJO, L. M.; FRANÇA, A. B.; POTTER, P. E. Hydrogeology of the Mercosul Aquifer System in the Paraná and Chaco-Paraná Basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget Aquifer System, USA. **Hidrogeology Journal**, 1999. 7:317-336.
- AZEVEDO, S. A. ; LAVINA, E. L. ; BARBERENA, M. C. ; FERRANDO, L. ; ANDREIS, R. R.. Evidências de correlação entre a Formação Yaguari (Membros Inferior e Superior) e as Formações Rio do Rasto e Sanga do Cabral. **Revista Pesquisas**, Porto Alegre, 1985, v. 17, p. 112-121.
- BARRETO, C. E. A. G. **Balço hídrico em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir de monitoramento hidrogeológico em bacia representativa.** Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia de São Carlos (EESC). Universidade de São Paulo. São Carlos. 2006. 231 p.
- BATEZELLI, A.; GOMES, N. S.; PERINOTTO, J. A. J. . Petrográfica e evolução diagenética dos arenitos da porção norte e nordeste da Bacia Bauru (Cretáceo Superior). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 35, n.3, 2005. p.311-322.

BITTENCOURT, A. V. L.; ROSA FILHO, E. F.; HINDI, E. C.; FILHO, A. C. B. 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** no 17/ Maio 2003. Pgs 67 – 75.

BOSSI, J. **Geología del Uruguay**. Depto. Publ. Universidad de la República. Montevideo. 1996. 469 p.

CAETANO-CHANG, M. R. **A Formação Pirambóia no centro-leste do estado de São Paulo**. Tese (Livre Docência em Geologia). Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Rio Claro, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, 1997. 196 p.

CAETANO-CHANG, M. R.; WU, F. T. Arenitos flúvio-eólicos da porção superior da Formação Pirambóia na porção centro-leste paulista. **Revista Brasileira de Geologia**, São Paulo, v.36, 2006. p 296-304.

CAMPOS, H. C. N. S. **Mapa hidrogeológico do Aquífero Guarani, escala 1:2.500.000**. Editado pela ISOMAPA – Consultoria e Projetos Ltda. São Paulo, Brasil. 1996.

CHANG, C. H. **Proteção ambiental e gerenciamento sustentável integrado do Aquífero Guarani**. São Paulo: UNESP/IGCE. Março 2001, 54 p.

CONSÓRCIO GUARANI. **Serviços de hidrogeologia geral, termalismo e modelo regional do Aquífero Guarani**. (Relatório interno) Montevideo. 2006. 197 p.

CORRÊA, U. M. P. **Estudo das águas subterrâneas das bacias hidrográficas dos rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira no estado de São Paulo**. 1st Joint World Congress on Groundwater. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas – ABAS. Fortaleza. 2000, 20 p. CD ROM.

DECOUD, P; ROCHA, L. **Aportes a la hidráulica subterránea del Acuífero Guarani en el NW del Uruguay**. 1st Joint World Congress on Groundwater. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas – ABAS. Fortaleza. 2000. 16 p. CD ROM.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE. **Estudo de águas de exploração do Aquífero Botucatu no Estado de São Paulo**. Anais 2^o Cong. 1974, 2 v.

DIAS, C. L.; SILVA, M. F. B.; CASARINI, D. C. P.; LEMOS, M. M. G. **Caracterização hidrogeoquímica e qualidade do Sistema Aquífero Guarani em poços tubulares para abastecimento público no estado de São Paulo**. In: XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas – ABAS. Florianópolis, 2002. 14 p. CDROM.

FERRANDO, L. A.; ANDREIS, R. R. **O alto de Rivera (norte de Uruguai-sul do Rio Grande do Sul): sua influência na distribuição dos depósitos associados ao glaciamento gondwânico no Uruguai**. In: XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador. Anais. Salvador (BA). 1996. v. 1. p. 232-234.

FERRANDO, L. A; MONTAÑA, J. R. **Hipótesis Preliminares sobre la evolución Paleogeográfica de la Cuenca de Paraná en el Uruguay**. Anais do III Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia. Curitiba, 1987. v.1: 393-400.

FILHO, C. V. P.; FERREIRA, F. J. F.; FILHO, E. F. R.; ROSTIROLLA, S. P. Compartimentação magnética-estrutural do Sistema Aquífero Serra Geral e sua conectividade com o Sistema Aquífero Guarani na região central do Arco de Ponta Grossa (Bacia do Paraná). **Revista Brasileira de Geociências**, 2005. 35(3):369-381.

FILHO, E. F. R; HINDI, E. C; ROSTIROLLA, S. P; FERREIRA, F. J. F; BITTENCOURT, A. V. L. Sistema Aquífero Guarani – considerações preliminares sobre a influência do Arco de Ponta Grossa no fluxo das águas subterrâneas. **Rev. Águas Subterrâneas** nº 17, 2003. pp 91-112

FÚLFARO, V. J.; SAAD, A. R.; SANTOS, M. V; VIANNA, R. B. **Compartimentação e evolução tectônica da Bacia do Paraná. Geologia da Bacia do Paraná. Reavaliação da potencialidade e prospectividade em hidrocarbonetos**. São Paulo. PAULIPETRO, 1982. 75-

115.

GALHANO, F. A. P. **Petróleo e gás na Bacia do Paraná**. Tese (Doutorado em Engenharia) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo. São Paulo, 2006 108 p.

GAMERMANN, N; FILHO, P. M. F. **Formação Rosário do Sul**. Instituto de Geologia. Dissertação (Mestrado em Geologia). Universidade Federal do Rio Grande do SUL – UFRGS.1971.

GASTMANS, D. **Hidrogeologia e hidroquímica do Sistema Aquífero Guarani na porção ocidental da Bacia Sedimentar do Paraná**. Tese (Doutorado em Geociências). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP. Rio Claro, 2007. 194 f.

GASTMANS, D; KIANG, C. H. Avaliação da hidrogeologia e hidroquímica do Sistema Aquífero Guarani (SAG) no estado de Mato Grosso do Sul. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 19, n. 1, 2005. p. 35-48.

GIARDIN, A; FACCINI, U. Complexidade hidroestratigráfica e estrutural do Sistema Aquífero Guarani: abordagem metodológica aplicada ao exemplo da área de Santa Maria-RS, Brasil. **Revista Águas Subterrâneas** n. 18, 2004. 39-54 p.

GILBOA, Y. **The groundwater resources of Uruguay**. Hydrological Sciences-Bulletin-des Sciences Hydrologiques, XXII, março/1977. Pg 115 – 126.

GOMEZ, A. A.; RODRIGUEZ, L. B.; VIVES, L. F. Finite difference model for evaluating the recharge of the Guaraní Aquifer System on the uruguayanbrazilian border. **Mecânica Computacional Vol. XXV**, Santa Fé, Argentina. 2006. pp 1479 – 1496.

HAMZA, V.M.; ESTON, S.M.; ARAÚJO, R.L.C. **Geothermal energy prospects Hidrogeologia da Região de Ribeirão Preto (S.P.)**. I Cong. Bras. in Brazil: A preliminary analisys. Pure and Applied Geophysics, v.117, 1978. p.180-196.

LARROZA, F; FARIÑA, S. L.; PAREDES, J. L. **Consideraciones preliminares del Acuífero Guaraní em el Paraguay Oriental**. II Simposio Paraguayo de Geología y III Simposio Paraguayo de Aguas Subterrâneas y Perforación de Pozos. Assunción, Paraguay, 27 al 30 de Noviembre de 2001.

LAVINA, E. L. C. **Paleontología, estratigrafía e bioestratigrafía da Formação Sanga do Cabral (Triássico inferior do Grupo Rosario do Sul), na Folha de Catuçaba, Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Geociências). Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências. Porto Alegre 1982,

LEÃO, M. I; CAICEDO, N. O. L; RISSO, A. **Hidrogeologia da Bacia do Rio Taquari/Antas-RS**. X congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Associação Brasileira de Águas Subterrâneas – ABAS. São Paulo. Anais v.1, 1998. 17 p. CDROM

MACHADO, J. L. F. **Compartimentação espacial e arcabouço hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul**. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Programa de Pós-Graduação em Geologia. (Tese de Doutorado). São Leopoldo. 2005. 237 p.

MONTAÑO, J; COLLAZO, M. P; De COULD, P. **Característica de la evolucion del Sistema Acuífero Guarani en el Uruguay**. X congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Associação Brasileira de Águas Subterrâneas – ABAS. São Paulo, 1998. Anais v.1, 19 p. CDROM

OLIVEIRA, L. A. **O Sistema Aquífero Guarani no estado de Goiás: distribuição, caracterização hidrodinâmica, hidroquímica, composição isotópica e CFCs**. Tese (Doutorado em Geologia). Universidade de Brasília, Instituto de Geociências. Brasília 2009, 188 p.

ORUE, D. **Síntesis da geologia do Paraguai Oriental, com ênfase para o magmatismo alcalino associado**. Dissertação (Mestrado em Geologia), Universidade de São Paulo. São Paulo,1996. 163 p.

PALMIERI, J.; FULFARO, V.; ALVARENGA, J. **República del Paraguay. Mapa Geológico 1:1.000.000**. Gobierno de la República del Paraguay, Comisión Nacional de Desarrollo

Regional Integrado del Chaco Paraguayo y Departamento de Cooperación Técnica para el Desarrollo de la Organización de las Naciones Unidas. Asunción. 1990.

PRANDI, E. C.; FILHO, J. A. O.; POLEGATO, J. C.; SILVA, L. A. **Aspectos do Aquífero Guarani na região de Marília – SP**. 1st Joint World Congress on Groundwater. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas – ABAS. Fortaleza, 2000. 8 p. CD ROM.

PROJETO DE PROTEÇÃO AMBIENTAL E GERENCIAMENTO SUSTENTÁVEL INTEGRADO DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI. **Caracterização Física e Inventário de Poços**. 2005a, 94p. <Disponível em http://www.ana.gov.br/guarani/gestao/gest_cbasico.htm>. Acessado em 12/02/2008.

PROJETO DE PROTEÇÃO AMBIENTAL E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI. Projeto Piloto: Itapúa (Paraguay). (Relatório interno). Montivideo. 12 p. 2005b

RABELO, J. L.; OLIVEIRA, J. N.; REZENDE, R. J.; WENDLAND, E. **Aproveitamento da energia geotérmica do Sistema Aquífero Guarani - estudo de caso**. In: XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas – ABAS. Florianópolis, 2000. 13 p. CDROM.

ROCHA, G. A. **Mega reservatório de água subterrânea do cone sul: bases para uma política de desenvolvimento e gestão**. Contribuição ao seminário internacional "Aquífero Gigante do Mercosul". Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 1996

ROSA FILHO, E. F.; SALAMUNI, R.; BITTENCOURT, A. V. L. Contribuição ao estudo das águas subterrâneas nos basaltos no Estado do Paraná. **Boletim Paranaense de Geociências**, n 37, 1987. p. 22-52.

SANTA ANA, H. B. A. **Análise tectono-estratigráfica das seqüências permotriássica e jurocretácea da bacia chacoparanense uruguiaia (“cuenca norte”)**. Tese (Doutorado em geociências). Universidade Estadual Paulista. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro, 2004. 274 p

SANTA ANA, H.; UCHA N. **Exploration perspectives and hydrocarbon potential of the uruguayan sedimentary basins**. Montevideo, ANCAP, 1994. 98p. (informe interno)

SILVA, R. B. G. **Estudo Hidroquímico e isotópico do Aquífero Botucatu no Estado de São Paulo**. Tese (Doutorado em Geologia). Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo. São Paulo. 1983. 133p.

SOARES, P. C. **O Mesozóico gonduânico no Estado de São Paulo**. Tese (Doutorado em Ciências), Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, Universidade Estadual Paulista. 1973. 152p.

SOARES, P. C.; ASSINE M. L. A seqüência Triássico – Jurássica da Bacia do Paraná. **Acta Geológica Leopoldinensia**, 1992. **36**:137 – 138.

SOUZA, A. A. **Caracterização da Bacia do Rio Iguaçu, a jusante do município de Reserva do Iguaçu, como área de descarga do Aquífero Guarani**. Dissertação (Mestrado em Ciências). Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2004. 92 p.

SRACEK, O.; HIRATA, R. Geochemical and Stable Isotopic Evolution of the Guarani Aquifer System in the State of São Paulo, Brazil. **Hydrogeology Journal**, 2002. N. 10, 643 – 655.

STRUGALE, M; ROSTIROLLA, S. P; MANCINI, F; FILHO, C. V. P. Compartimentação estrutural das formações Pirambóia e Botucatu na região de São Jerônimo da Serra, estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**. 2004. 34(3):303-316.

SZIKSZAY, M. 1993. Geoquímica das águas. **Boletim IG**, São Paulo, n. 5, 1993.

TEISSEDRE, J. M.; SANCHES, J. L.; LOPES, M. F. C. **Geometria e condições de exploração do Aquífero Botucatu no estado de São Paulo**. *Anais 2o Cong. Bras. Águas Subterrâneas*, Salvador: 53 – 63. 1982.

VIVES, L; CAMPOS, H; CANDELA, L; GUARRACINO, L. **Premodelo de flujo del Acuífero Guaraní**. 1st Joint World Congress on Groundwater. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas – ABAS. Fortaleza. 2000. 22 p. CD ROM.

ZALÁN, P. V., WOLFF, S., CONCEIÇÃO, J. C., ASTOLFI, M.A.M., VIEIRA, I. S., APPI, V. T., ZANOTTO, O. A., MARQUES, A. **Tectonics and sedimentation of the Paraná basin**. In: SIMPÓSIO DO GONDWANA. São Paulo. *Anais...* São Paulo: [s. n.]. 1988

ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; Appi, V. T.; ZANOTTO, O. A.; MARQUES, A. **Tectonics and sedimentations of the Paraná Basin. Gondwana Seven Proceedings**. Seventh International Gondwana Symposium. Inst. Geoc. USP, São Paulo, 1991.

ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; Appi, V. T.; ZANOTTO, O. A.; MARQUES, A. 1990. A Bacia do Paraná. *In: RAJA GABAGLIA, G.P. MILANI, E.J. (Ed). Origem e evolução de bacias sedimentares*. Rio de Janeiro: Petrobrás. P.135-168.

ZANATTA, L. C.; COITINHO, J. B. L. 2002. Utilização de poços profundos no Aquífero Guarani para abastecimento público em Santa Catarina. XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas – ABAS. Florianópolis. 16 p. CDROM.

ZUNINO, E; AINCHIL, J. 2000. Evaluación geofísica del Acuífero Guarani en la Argentina. 1st Joint World Congress on Groundwater. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas – ABAS. Fortaleza. 16 p. CD ROM.