

IDENTIFICAÇÃO DE CÉLULA DE FLUXO LOCAL NO AQUIFERO BOTUCATU: ESTUDO DE CASO NO VALE DO RIO TAQUARI, RS, BRASIL.

LOCAL FLOW CELL IDENTIFICATION IN BOTUCATU AQUIFER: CASE STUDY IN RIO TAQUARI VALLEY, RS, BRAZIL

Arnoldo Giardin¹; Ubiratan Faccini²

RESUMO Na região do vale do Rio Taquari, RS, Brasil, o Aquífero Botucatu, topo do Sistema Aquífero Guarani (SAG), foi investigado quanto ao modelo conceitual de circulação, por meio da integração de dados derivados da caracterização hidrogeológica de detalhe em uma ocorrência de água mineral (2 poços), do levantamento estratigráfico/estrutural em escala regional e, da reinterpretação de dados litológicos e hidroquímicos de 16 poços destinados ao abastecimento público. No sul do Brasil, a Zona de Falhas Dorsal de Canguçu, na faixa de transição dos setores leste e central do SAG, define células de fluxo alongadas segundo NE e controla a estratigrafia, suprimindo, em alguns blocos, o registro litológico da Formação Botucatu. Entretanto, um segundo sistema de falhas, orientado segundo NW, escalona o Aquífero Botucatu, preservando sua continuidade hidráulica. Nestes blocos, com base em critérios estratigráficos, texturais e hidroquímicos, foi identificada a ocorrência do Aquífero Passo das Tropas. Na área de estudo, a presença do Aquífero Passo das Tropas e, a estanqueidade gerada pelas falhas NE, aponta para modelos conceituais de circulação do SAG melhor descritos como uma composição de células de fluxo independentes para cada um dos dois aquíferos identificados. Ressalta-se, entretanto, a necessidade de detalhamento dos modelos, na escala operacional.

Palavras-chave: Sistema Aquífero Guarani, células de fluxo, hidroestratigrafia

ABSTRACT In the Rio Taquari valley region, RS, Brazil, the Botucatu Aquifer, top layer of the Guarani Aquifer System (GAS), was investigated regarding the groundwater flow conceptual model, using data generated by a detailed hydrogeological survey of a mineral water occurrence (2 wells), from a regional stratigraphic and structural survey and the reinterpretation of lithological and hydrogeochemical data from 16 wells belonging to a public water supply system. In southern Brazil, the Dorsal de Canguçu Fault System, located in the transition zone between eastern and central sectors of GAS, define northeast elongated flow cells and control the stratigraphy, suppressing the lithological record of the Botucatu Formation in some blocks. Nevertheless, a secondary fault system, trending NW, tectonically affected the Botucatu Aquifer maintaining its hydraulic connection between blocks. In one of these blocks, based on stratigraphic, textural and hydrochemical criteria, was identified the Passo das Tropas Aquifer occurrence. In the studying area, the existence of Passo das Tropas aquifer and the flow barriers represented by NE trending faults indicate a conceptual GAS groundwater flow models which can be better described as a composition of independent flow cells for each aquifer. However, there is a need for better understanding of the groundwater flow model at the operational scale.

Keywords: Guarani Aquifer System, flow cells, hydrostratigraphy

INTRODUÇÃO

As formações Botucatu e Pirambóia, e, suas equivalentes litoestratigráficas em outros países, são as principais constituintes do Sistema Aquífero Guarani (SAG), considerado um dos maiores mananciais de água subterrânea do planeta, abrangendo cerca de 1 milhão de km² em territórios do Brasil, Uruguai, Argentina e Paraguai (Fig. 01).

No Brasil, o SAG é constituído essencialmente pelos arenitos eólicos dessas formações, que ocorrem em contato direto, sendo o sistema limitado, na base, pelas rochas arenopelíticas das formações Rio do Rastro e Corumbataí e, no topo, pelos vulcanitos da Formação Serra Geral (PSAG-OEA, 2008). Entretanto, no extremo sul da Bacia do Paraná, Estado do Rio Grande do Sul (RS), o contato direto entre os aquíferos Pirambóia e Botucatu, registrado no restante

da bacia, ocorre apenas no setor Leste do Estado (Fig. 02).

Na região central do RS, a ocorrência de aquíferos relacionados às formações Santa Maria e Caturrita, abaixo do aquífero Botucatu, resulta em uma estruturação estratigráfica diferenciada do SAG na região (Fig. 03), introduzindo uma complexidade hidroestratigráfica não documentada em outras regiões do sistema. Nas zonas de transição entre os setores do SAG, no RS, as heterogeneidades estratigráficas e a influência de falhas regionais dificultam a individualização dos diversos aquíferos, induzindo à correlação de cargas hidráulicas e características químicas de águas correspondentes a blocos contendo diferentes aquíferos, ou segmentos do mesmo aquífero, sem conexão hidráulica, o que influi na modelagem de fluxo e, manejo adequado do sistema na escala de campo de poços, aqui designada escala operacional.

¹ PPGEU/UNISINOS - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, (arnoldogiardin@hotmail.com).

² PPGEU/UNISINOS - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, (ufaccini@unisinossinos.br).

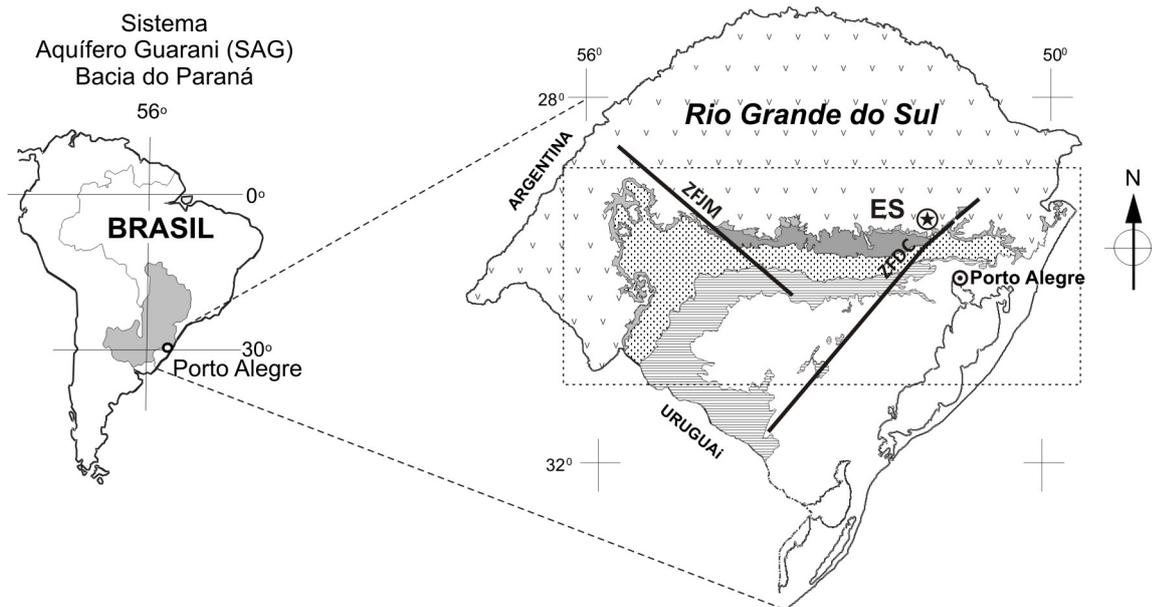


Figura 01- Localização da área de estudo (ES) e das zonas de falhas Jaguari-Mata (ZFJM) e Dorsal de Canguçu (ZFDC). O retângulo tracejado corresponde à área detalhada na figura 2.

Figure 01- Location of the study area (ES), Jaguari-Mata (ZFJM) and Dorsal de Canguçu (ZFDC) fault zones. Dashed rectangle corresponds to the area detailed in figure 2.

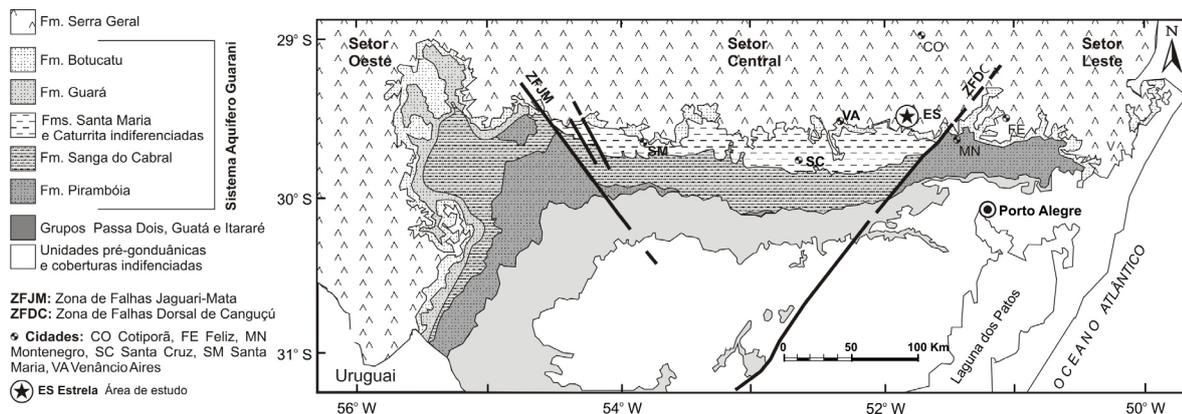


Figura 02- Localização da área de estudo (ES - ver figura01) e compartimentação estratigráfica do SAG em sua faixa de afloramento no sul da Bacia do Paraná. Modificado de Faccini et al. (2003)

Figure 02- Study area location (ES - see figure 01) and stratigraphy of GAS outcrop area, in southern Paraná Basin. Modified from Faccini et al. (2003).

Heterogeneidades estratigráficas e estruturais do SAG, em diferentes escalas, têm sido identificadas por diversos autores (Montaña *et al.*, 2002; Rosa Filho *et al.*, 2003; Faccini *et al.*, 2003; Machado, 2005; Giardin e Faccini, 2004; Soares *et al.*, 2007, 2008), repercutindo com intensidade variável na modelagem de fluxo regional do sistema (Araújo *et al.*, 1995, 1999; Campos, 1999; Machado, 2005; CPRM, 2005; PSAG-OEA, 2008). Este trabalho pretende contribuir com este tema, a partir da análise de dados produzidos na caracterização de uma ocorrência de água mineral no município de Estrela, RS (assinalada como ES na figura 01) e em le-

vantamento hidroestratigráfico regional, que possibilitaram a elaboração de um quadro da hidrogeologia da região do Vale do Rio Taquari, considerando as heterogeneidades anteriormente referidas e seus impactos na escala operacional.

Na área de estudo, situada na transição entre os setores Central e Leste do RS (Fig. 02), se destaca a influência da Zona de Falhas Dorsal de Canguçu (ZFDC) na organização estratigráfica e na compartimentação estrutural do sistema, definindo blocos improdutivos no Aquífero Botucatu e, a constituição, neste aquífero, de célula de fluxo local (bloco de aquífero cujo sistema de fluxo pode ser individualizado).

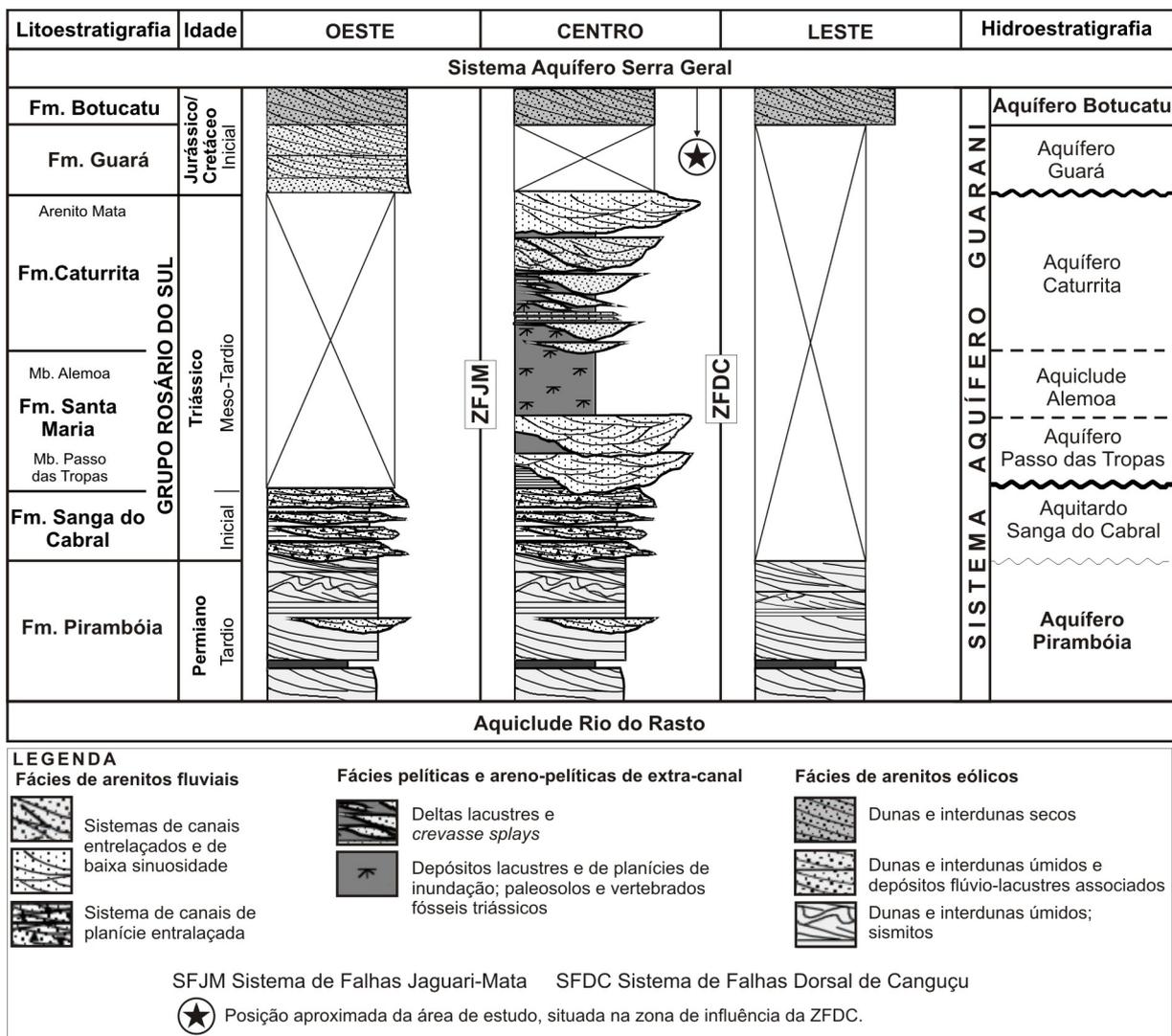


Figura 03- Estruturação hidroestratigráfica esquemática dos diferentes setores do SAG no sul da Bacia do Paraná. Modificado de Faccini et al. (2003) e Giardin e Faccini (2004). Ver figura 02.

Figure 03- Schematic hydrostratigraphy of GAS sectors in southern Paraná Basin. Modified from Faccini et al. (2003) e Giardin e Faccini (2004). See figure 02.

A investigação conduzida seguiu a abordagem metodológica referida em Giardin e Faccini (2004), com dados de levantamentos de campo em escala 1: 5.000, ensaios de bombeamento e análises laboratoriais, com o objetivo de identificar heterogeneidades relevantes para a modelagem conceitual do fluxo dos aquíferos do SAG, válida para a região estudada. A análise detalhada da área revela um comportamento hidrogeológico particular do SAG, não detectável por modelos regionais, por sabidas questões de densidade e distribuição de dados e escala de observação, mas que assume importância significativa na escala operacional (campo de poços) do sistema na região.

ABORDAGEM METODOLÓGICA

A metodologia de trabalho (Fig. 04), adaptada de Huggenberger e Aigner (1999), seguiu no sentido de

um detalhamento progressivo, partindo-se de um enquadramento da área de estudo em um contexto hidrogeológico regional, até alcançar o nível de detalhe necessário ao estabelecimento de parâmetros hidráulicos confiáveis para distinção dos aquíferos identificados.

O ponto de partida do trabalho consistiu na análise de imagens de radar e fotografias aéreas, seguida de reconhecimento geológico de campo, visando o detalhamento dos condicionantes estratigráficos e tectônicos regionais e inserção da área de estudo neste quadro.

Na sequência, dados de poços destinados ao abastecimento público e de uma ocorrência de água mineral foram coletados e interpretados à luz das informações produzidas pela geologia de campo. Dentre os poços, foram selecionados aqueles com maior volume de informações, para permitir interpretação estratigráfica e hidrogeológica confiável.

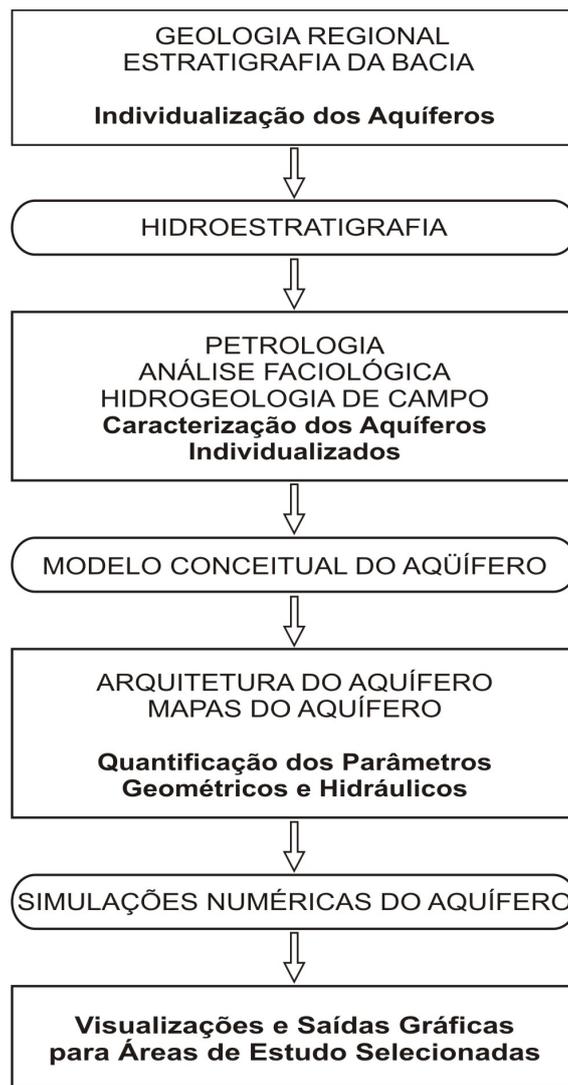


Figura 04- Metodologia empregada. Adaptada de Huggenberger e Aigner (1999).
Figure 04- Base-methodology. Adapted from Huggenberger e Aigner (1999).

Por meio de fotointerpretação, somada às informações de campo e análise de modelos numéricos de terreno em três escalas (1:5000, 1:50000 e 1:250000), foram identificadas as principais falhas na área de estudo (Fig. 05).

Seções estratigráficas foram construídas a partir dos perfis litológicos dos poços interpretados. Combinadas com a interpretação de imagens, as seções permitiram a elaboração do arcabouço estrutural e estratigráfico da área.

Reconhecidas as unidades litoestratigráficas e seus respectivos papéis hidrogeológicos, foi estabelecida a hidroestratigrafia da área.

Como constatado para outro pacote de rochas do SAG, na região de Santa Maria-RS (Faccini *et al.*; 2003 e Giardin e Faccini, 2004), mapas potenciométricos em escala regional têm resolução insuficiente para a compreensão de sistemas de fluxo locais, em áreas com elevado grau de heterogeneidade estratigráfica e estrutural, tornando-se necessário definir a potencimetria em escala operacional (campo de poços) para

a representação mais realista do fluxo local. Nessas circunstâncias, são válidas apenas as superfícies potenciométricas definidas em porções de aquífero hidráulicamente contínuas.

Na área estudada, uma vez reconhecida a organização hidroestratigráfica, a influência das falhas e as continuidades/descontinuidades hidráulicas, foram calculados, parâmetros hidráulicos do Aquífero Botucatu, os quais são válidos para o bloco que contém um poço de extração de água mineral (AM na figura 05). Um modelo conceitual do fluxo foi elaborado para o interior deste bloco, ilustrando o efeito da escala de observação na definição de direções de fluxos eventualmente discrepantes, geradas por diferentes modelos regionais (Fig. 05).

CONTEXTO GEOLÓGICO

As unidades hidrogeológicas da área estudada (Fig. 03), correspondem litoestratigraficamente, às formações Serra Geral, Botucatu e Santa Maria. A Formação Serra Geral é

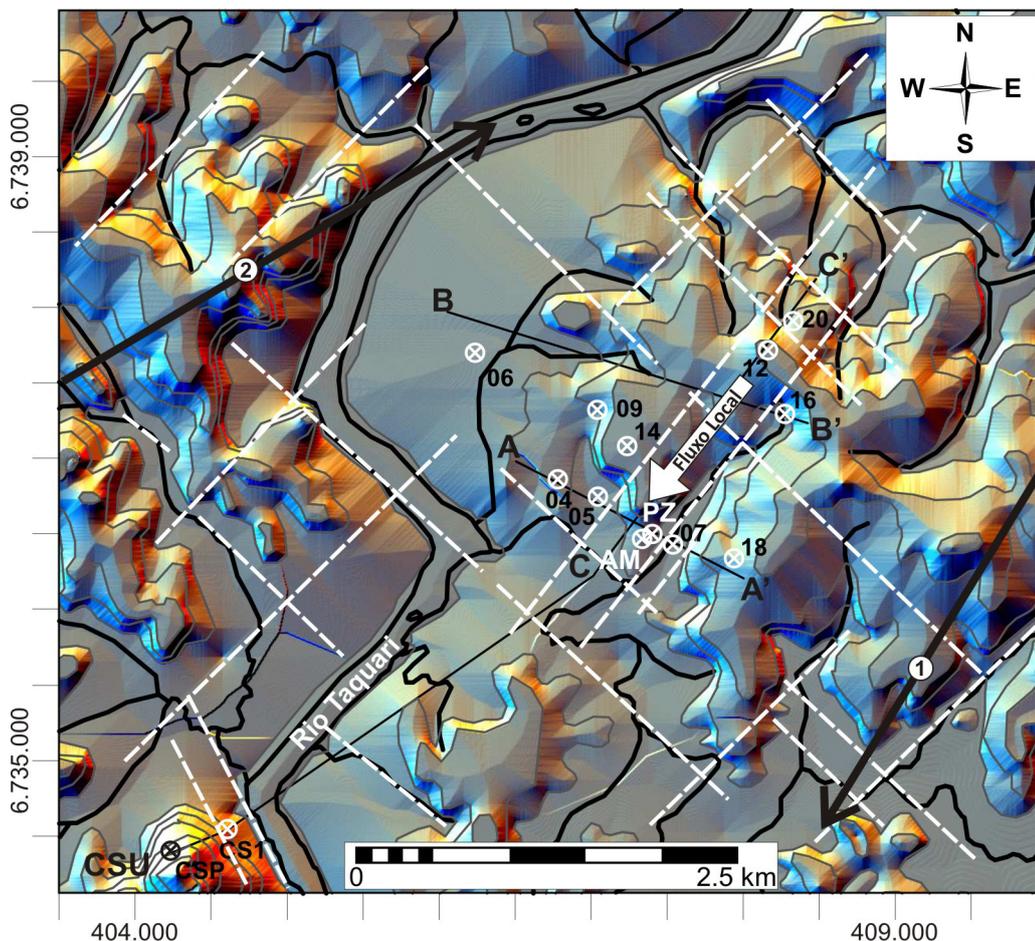


Figura 05- MNT filtrado (com falsa iluminação de NE e NW) localizando as seções hidrogeológicas (A-A', B-B' e CSU-C-C'), falhas (linhas brancas tracejadas), drenagens (linhas espessas em preto) e curvas de nível (linhas finas em cinza). A célula de circulação local no Aquífero Botucatu ocupa a região alongada segundo C-C' e contém os poços AM, PZ, 12 e 20. Setas em preto indicam diferentes direções regionais de fluxo do SAG determinadas por modelos em (1) escala de bacia (Araújo et al., 1999; Campos, 1999; Soares, 2007; PSAG-OEA, 2008) e (2) escala regional (Machado, 2005; CPRM, 2005). A seta branca indica o fluxo no interior da célula de circulação identificada. A hidroquímica dos poços AM, 12 e 20 (Tabela 4) é coerente com a direção do fluxo da água subterrânea no interior da célula e indica área de recarga (da célula de fluxo) a NE de C'. A zona de descarga da célula situa-se, provavelmente, no vale do Arroio Estrela, afluente do Rio Taquari. Os poços da CORSAN (EST) estão identificados por números; o poço de água mineral e seu piezômetro, respectivamente, pelas letras AM e PZ; CSP e CS1 assinalam o poço 01 da CORSAN e um perfil litológico de afloramento na cidade de Cruzeiro do Sul (CSU).

Figure 05- Filtered DEM (artificially illuminated from NE and NW) showing hydrogeological sections (A-A', B-B' e CSU-C-C') and faults (white dashed lines) locations. Drainages are represented by thick black lines and elevation contours by thin gray lines. The newly identified Botucatu Aquifer flow cell is located in the elongated DEM region containing AM, 12 and 20 water wells. Black arrows indicate different directions of regional flow of GAS, determined by modeling on (1) basin scale (Araújo et al. 1999; Campos, 1999; Soares, 2007; PSAG-OAS, 2008) and (2) regional scale (Machado, 2005; CPRM, 2006). The white arrow indicates the flow within the circulation cell identified. The hydrochemistry of the wells AM, 12 and 20 (Table 4) is consistent with the direction of groundwater flow within the cell and indicates the recharge area (flow cell) to NE of C'; the discharge may occur along the Arroio Estrela, a tributary of Taquari river. CORSAN (EST) water wells are identified by numbers, mineral water well and its piezometer by AM and PZ letters. CSP and CS1 refer to CORSAN 01 water well and a lithological outcrop profile in Cruzeiro do Sul city (CSU).

representada por rochas efusivas basálticas, predominantes na área, e corpos intrusivos identificados em subsuperfície.

Os arenitos eólicos da Formação Botucatu ocorrem sotopostos às efusivas da Formação Serra Geral ou afloram em áreas restritas, em altitudes variáveis entre 33 m (no acesso à cidade de Cruzeiro do Sul-RS) e 130 m (em um morro da mesma cidade, onde mantém o relevo).

A Formação Santa Maria (Triássico) tem ocorrência re-

strita à região Central da faixa de afloramento da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul (Figs. 02 e 03). Os depósitos desta formação, identificados em afloramentos e poços na área, contém, na base, arenitos de canais fluviais do Membro Passo das Tropas, principal aquífero da região central do RS e, no topo, pelitos fossilíferos de planícies de inundação do Membro Alemoa (Faccini *et al.*, 2003).

A Formação Caturrita (Triássico Tardio) não foi se-

guramente identificada em poços ou afloramentos na área investigada, mas, há a possibilidade de pertencerem a esta formação os lamitos e siltitos que ocorrem sotopostos à Formação Botucatu nas imediações do poço EST-18 (Fig. 06).

CONDICIONANTES GEOLÓGICOS E HIDROESTRATIGRAFIA

Compartimentação regional

O SAG, em sua faixa aflorante no Rio Grande do Sul, encontra-se segmentado em três setores - Oeste, Central e Leste - delimitados pelas zonas de falhas Jaguari-Mata (ZFJM) a oeste e Dorsal de Canguçu (ZFDC) a leste (Figs. 02 e 03). No setor Oeste, o SAG é composto por três aquíferos (Botucatu, Guará e Pirambóia) e um aquífero (Sanga do Cabral). O Aquífero Guará ocorre sotoposto ao Botucatu e sobreposto ao aquífero Sanga do Cabral. A complexidade do SAG é máxima no setor central, onde quatro aquíferos (Botucatu, Caturrita, Passo das Tropas e Pirambóia), um aquífero (Alemoa) e um aquífero (Sanga do Cabral) estão presentes (Faccini *et al.*, 2003; Giardin e Faccini, 2004; Machado, 2005). O setor Leste apresenta menor complexidade, com os aquíferos Botucatu e Pirambóia ocorrendo em contato direto, relação de contato similar à observada no restante da bacia. As implicações decorrentes da localização da área de estudo na zona de influência da ZFDC (Fig. 03) sobre a hidrogeologia do SAG são analisadas a seguir.

Unidades hidrogeológicas na área de estudo

O Aquífero Botucatu se constitui no principal manancial de água subterrânea na região investigada. Apresenta espessuras variáveis entre 36 m e 51 m nos poços considerados neste estudo e é constituído por arenitos bimodais finos a médios, quartzosos, com coloração variável entre o róseo avermelhado e o amarelo pálido e, em afloramentos, mostra estratificações cruzadas de grande porte.

O Aquífero Passo das Tropas ocorre em um bloco penetrado pelo poço EST-06 da CORSAN e foi identificado por meio de critérios hidroestratigráficos e texturais. A sequência de litofácies atravessada por este poço (vulcanitos, lamitos, arenitos médios a grossos), corresponde litologicamente às formações Serra Geral e Santa Maria, representada por seus dois membros (Alemoa e Passo das Tropas). O mesmo empilhamento é encontrado em afloramentos nas imediações da cidade de Venâncio Aires (RS). A supressão da Formação Botucatu do registro litológico, com os vulcanitos Serra Geral, diretamente dispostos sobre os lamitos do Membro Alemoa, foi considerada típica da transição entre os segmentos Leste e Central do SAG (Figs. 02 e 03).

O Aquífero Pirambóia, correspondente aos arenitos eólicos da Formação homônima (Lavina *et al.*, 1993; Garcia *et al.*, 1999), não foi identificado nos poços analisados. Sua ocorrência em profundidade, entretanto, não pode ser descartada.

Três aquíferos são identificados na área: efusivos e intrusões de diabásio da Formação Serra Geral e lami-

tos do Membro Alemoa da Formação Santa Maria. Embora as rochas intrusivas e extrusivas da Formação Serra Geral componham uma única unidade litoestratigráfica, na área de estudo, são consideradas duas unidades hidrogeológicas de mesmo comportamento (aquicludes). O Aquífero Alemoa, cuja ocorrência é controlada por falhas, é espesso, alcançando cerca de 100 m no poço EST-06 e mais de 95 m no poço CSU-01 (Figs. 07 e 08).

A ocorrência de unidades hidroestratigráficas relacionáveis à Formação Santa Maria (Aquífero Passo das Tropas e Aquífero Alemoa) tem grande impacto no fluxo da água subterrânea da área. Seus critérios de identificação, características e influências são analisados em seções subseqüentes.

O papel das falhas e intrusões

Falhas associadas à ZFDC provocam rejeitos verticais aparentes com ordem de grandeza superior à da espessura média do Aquífero Botucatu, o que o compartimenta. A ausência da Formação Botucatu do registro estratigráfico em bloco tectonicamente definido (que contém o poço EST-06) também está associada a este sistema de falhas.

Às falhas NW estão associados rejeitos verticais aparentes menores que a espessura média do Aquífero Botucatu, fato que não compromete a continuidade hidráulica dos blocos alongados segundo NE, definidos pela ZFDC (Figuras 08 e 09).

As rochas intrusivas (diabásios) provocam um segundo nível de heterogeneidade, gerando barreiras ao fluxo da água subterrânea. Quando alterada, esta rocha se confunde com argilitos em amostras de calha, o que induz tratar-se da perfuração de sedimentos do Aquífero Alemoa (Membro Alemoa da Formação Santa Maria). Em afloramento é possível observar apófises de diabásio alterado intrudidos nos arenitos eólicos da Formação Botucatu. A ausência de corpos intrusivos nos perfis de poços disponíveis para a região não corresponde, portanto à realidade geológica local.

BASE DE DADOS UTILIZADA

Modelos Numéricos do Terreno

Foram empregados modelos numéricos do terreno (MNT) nas escalas 1: 250.000, 1: 50.000 e 1: 5.000. O MNT de menor escala, foi elaborado pela EMBRAPA (Miranda, 2005), e foi empregado (após georreferenciamento) para identificação das estruturas regionais. Os modelos em escalas maiores foram empregados para o detalhamento da interpretação estrutural (com apoio de fotogeologia) e para obtenção de coordenadas e altitudes precisas (1: 5.000). Todos os MNTs passaram por dupla filtragem linear, que lhes conferiu falsa iluminação de NW e NE, para salientar a estruturação tectônica. Na figura 05, o MNT construído a partir de cartas em escala 1: 50.000, mostra as principais direções de falhas, o controle que estas exercem sobre o curso das drenagens (com disposição treçada a sub-retangular), a posição das seções geológicas e dos poços que as originaram, os limites de uma célula de fluxo no Aquífero

Botucatu, o sentido de fluxo da água subterrânea em seu interior e também os vetores de fluxo definidos a partir de análises regionais (Machado, 2005) e de bacia (Araújo *et al.*, 1999; Campos, 1999; Soares, 2007; PSAG-OEA, 2008).

Dois conjuntos de falhas, orientadas segundo NE e NW, afetam os aquíferos. As falhas NE concentram-se entre os azimutes 030 e 035 e as NW entre 310 e 340. As primeiras são compartimentadoras enquanto que as últimas apenas escalonam os blocos. Ao caráter compartimentador do sistema de falhas associado à Zona de Falhas da Dorsal de Canguçu (NE) foi atribuído, após análise de interferência, a ocorrência de perfuração não produtiva entre dois poços produtivos observados (poço EST-07 na figura 06) e a supressão do Aquífero Botucatu no bloco que contém o poço EST-06 (Figura 07).

Indicações de campo e derivadas da interpretação de imagens sugerem fortemente que o sistema NW que afeta a área de estudo é mais jovem do que o NE.

Outras direções de falhas também ocorrem na área, não tendo sido representadas nos mapas por serem consideradas menos relevantes, bem como para evitar o excesso de informações nas imagens.

Seções Geológicas

Seções geológicas orientadas perpendicular e, paralelamente às principais direções de falhas identificadas, foram elaboradas, com o objetivo de determinar a geometria de topo (erro estimado de 2,0m para as profundidades nos poços considerados), o gradiente hidráulico e as relações entre os segmentos do SAG (Figs. 06 a 09). As seções AA' e BB' foram construídas perpendiculares às falhas da ZFDC e mostram a influência deste sistema de falhas na compartimentação do Aquífero Botucatu, no controle dos corpos intrusivos e na ocorrência da Formação Santa Maria.

A sequência atravessada pelo poço EST-06 (vulcanitos – lamitos - arenitos médios a grossos), aliada ao controle de campo, permite identificar com segurança os sedimentitos sotopostos aos vulcanitos Serra Geral como pertencentes à Formação Santa Maria (membros Alemoa e Passo das Tropas). Com base nos mesmos critérios, os pelitos presentes nos poços da seção AA' foram atribuídos ao Membro Alemoa da Formação Santa Maria.

Na seção CSU-C-C' (Fig. 08), subparalela à ZFDC, se observa um segmento do Aquífero Botucatu com poços hidráulicamente conectados (porção NE), a descontinuidade produzida por falhas existente entre os vales do Rio Taquari e do Arroio Estrela (porção central), mudanças estratigráficas e rejeitos verticais aparentes de mais de uma centena de metros (porção NW).

Na seção CC' (Fig. 09) é possível traçar uma superfície potenciométrica com gradiente constante entre os poços EST-20 e AM a despeito da presença de falhas NW. As cargas potenciométricas dos poços considerados nesta seção não foram medidas no mesmo dia, mas num período não superior a 30 dias, com o conjunto de poços em repouso.

As falhas relacionadas à ZFDC (com azimutes entre 030 e 035) foram consideradas compartimentadoras do Aquífero Botucatu. Estas falhas, em aparente conjugação com dois conjuntos de falhas NW (azimutes variando entre 310 e 340) observáveis nas seções AA' e BB' (Figs. 06 e 07), estão relacionadas à definição de um bloco improdutivo do SAG (Fig. 06) e à supressão do Aquífero Botucatu do registro litológico (Fig. 07). Ao conjunto das falhas NW, com azimutes entre 310 e 315, foi atribuído o efeito de escalonar o aquífero, sem compartimentá-lo

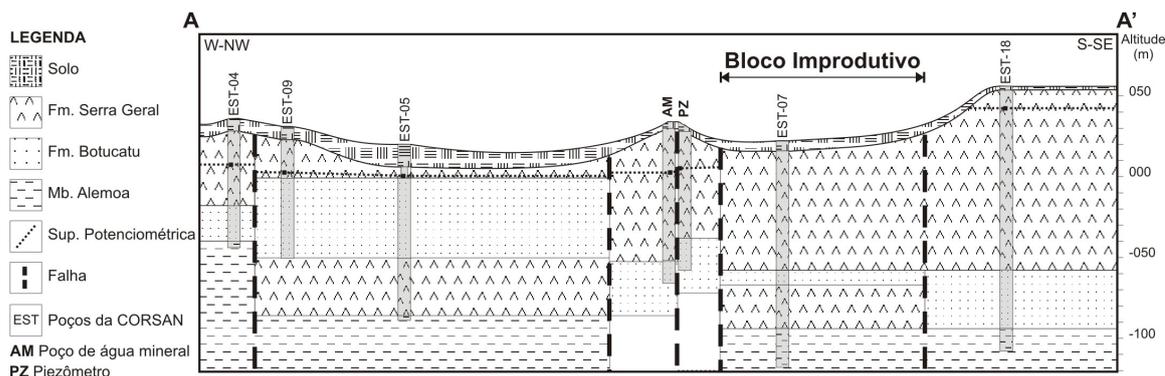


Figura 06- Seção A-A' mostrando o bloco improdutivo e a influência das falhas da ZFDC na compartimentação do aquífero. Os siltitos e arenitos sotopostos aos vulcanitos Serra Geral foram interpretados como pertencendo ao Membro Alemoa da Formação Santa Maria (localização na figura 07).

Figure 06- Section A-A' showing the influence of ZFDC faults: aquifer compartmentation. Siltstones and sandstones beneath Serra Geral volcanics were interpreted as belonging to Alemoa Member, Santa Maria Formation. See figure 07 for location.

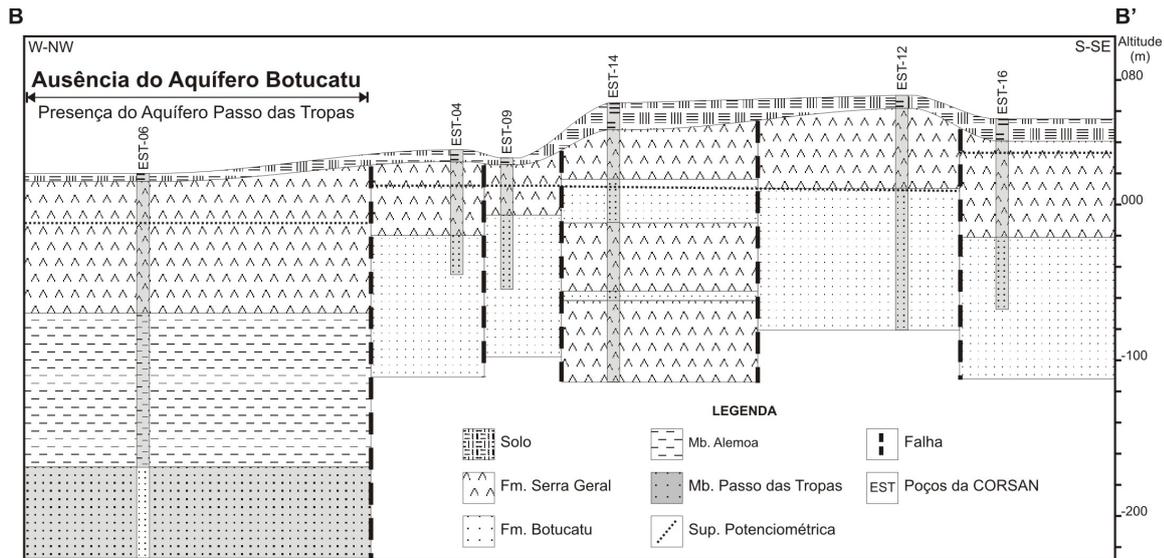


Figura 07- Seção B-B' ao norte da Seção A-A' onde se observa compartimentação e controle estratigráfico produzido pelas falhas NE da ZFDC. No bloco NW, com o poço EST-06 ao centro, os vulcanitos Serra Geral estão diretamente dispostos sobre o Membro Alemoa da Formação Santa Maria. Ver figura 07 para localização. Ver figura 05 para localização.

Figure 07- Section B-B' northward from A-A': compartmentation and stratigraphic control generated by NE ZFDC faults. In NW block, containing the EST-06 water well, Serra Geral volcanics lies directly on Alemoa

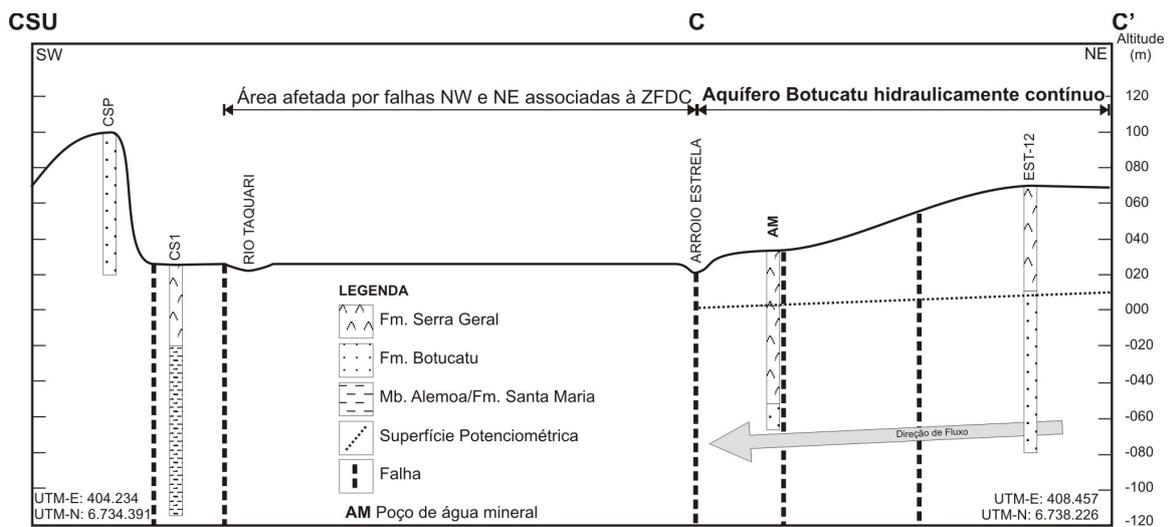


Figura 08- Seção CSU-C-C': efeito conjugado dos sistemas de falhas NW e NE originando blocos falhados do Aquífero Botucatu hidraulicamente conectados e com rejeitos verticais aparentes menores que a espessura do aquífero entre C-C'; intenso fraturamento (falhas NE e NW) entre o Arroio Estrela e o Rio Taquari; supressão erosiva/não deposição da Formação Botucatu no perfil litológico do poço CSU-01; e rejeitos verticais aparentes maiores que a espessura do aquífero nas imediações de CSU-P. Ver figura 05 para localização.

Figure 08- Section CSU-C-C': combined NW and NE fault systems effect. Hydraulically connected faulted aquifer blocks showing vertical apparent displacement smaller than the aquifer thickness in C-C' segment; intense fracturing between Rio Taquari and Arroio Estrela area; erosional or non-depositional suppression of Botucatu Formation in CSU-01 lithological profile; and vertical apparent displacement greater than the aquifer thickness near CSU-P. See figure 05 for location.

Continuidade Hidráulica

A análise do MNT em escala 1: 250.000 e dos mapas regionais existentes permitiu a identificação de grandes lineamentos na área de estudo. Estes lineamentos, investigados em escala de maior detalhe e considerando-se as informações estratigráficas extraídas dos poços, foram

então caracterizados como falhas (rejeitos verticais aparentes de dezenas de metros). Duas destas falhas, orientadas para NE e definidoras de um alto do relevo onde se situa o poço AM, foram consideradas compartimentadoras do fluxo, após integração das informações estruturais, estratigráficas e da análise de interferência (o poço AM foi

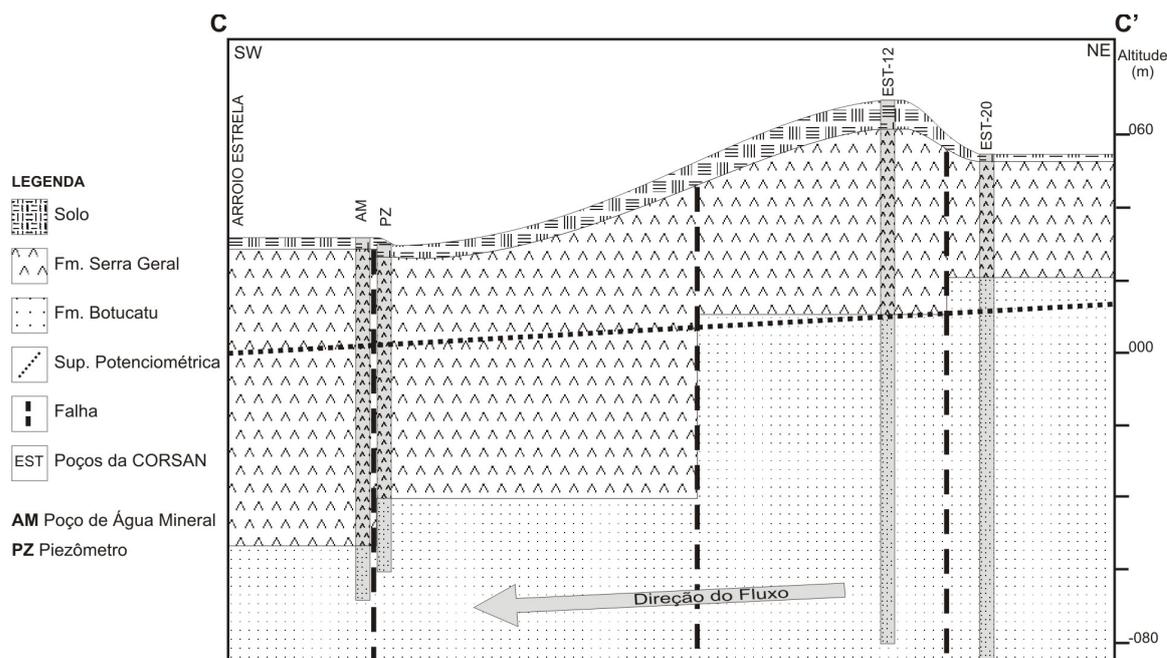


Figura 09- Seção C-C': efeito das falhas NW dando origem a blocos falhados do Aquífero Botucatu hidráulicamente conectados e com rejeitos verticais aparentes menores que a espessura do aquífero. Ver figura 05 para localização.

Figure 09- Section C-C': NW fault system effect: hydraulically connected faulted aquifer blocks showing vertical apparent movement smaller than the aquifer thickness. See figure 05 for location.

submetido a bombeamento durante 30 horas, com observação de níveis nos poços da Tabela 01 e no piezômetro PZ.

Dentre os poços observados, apenas o piezômetro sofreu rebaixamento, os demais (poços da CORSAN) apresentaram recuperação centimétrica dos níveis de água, interpretadas como decorrência de um repouso de apenas 24h após longo período de extração (Tabela 2).

Os poços EST-12 e 20 não foram monitorados durante a análise de interferência, tendo sido mantidos em operação à vazão constante durante o bombeamento e a recuperação de nível de S. Este regime operacional somado à distância existente entre o mais próximo deles (EST-12) e S (1493 m) e ao fato de que historicamente (fase de pesquisa da água mineral) não foi identificada influência do bombeamento dos poços do sistema público no poço de água mineral e em seu piezômetro, permite abstrair sua influência.

A tabela 03 contém os valores de transmissividade, armazenamento e condutividade hidráulica, válidos para o Aquífero Botucatu nas imediações do poço AM, calculados pelo método de Theis, considerando-se penetração parcial e espessura de aquífero de 43,5 m (médias das espessuras atravessadas pelos poços EST-18 e EST-15).

Hidroquímica

Com base nos dados dos poços da CORSAN, foi possível estabelecer um padrão hidroquímico para o Aquífero Botucatu na área de estudo e uma diferenciação de suas águas com aquelas captadas do Aquífero Passo das Tropas pelo poço EST-06 (Figs. 10 a 12 e Tabela 4).

O Aquífero Botucatu apresenta águas bicarbonatadas cálcicas, com pH próximo da neutralidade (6,9), sólidos totais dissolvidos e alcalinidade total menores e dureza maior que a água bicarbonatada sódica do Aquífero Passo das Tropas captada por EST-06, que mostra pH próximo de 10 (9,9).

A diferenciação hidroquímica entre as águas dos aquíferos Botucatu e Passo das Tropas ora identificada, coincide com aquela referida por Machado (1994) para a área de Santa Maria e pode vir a se constituir em critério de identificação da proveniência de águas subterrâneas nestas duas regiões (Santa Maria e Vale do Taquari).

Alcalinidade total, dureza e pH formam um conjunto de parâmetros hidroquímicos de fácil obtenção e que possibilitam diferenciar as águas dos aquíferos Triássico (Passo das Tropas) e Eocretácico (Botucatu), servindo este conjunto de parâmetros para avaliar a possibilidade de existência de mistura de águas destes dois aquíferos em outros poços da região dos quais não se tenha informação estratigráfica.

Dinâmica local do Aquífero Botucatu

As cargas hidráulicas dos poços EST-20, EST-12, O e S, os quais se encontram em um mesmo bloco de aquífero limitado por falhas NE (azimutes entre 030 e 035), definem um gradiente hidráulico constante e igual a $7,14 \times 10^{-3}$ (Fig. 09). Esta constância sugere que existe conexão hidráulica entre eles e que as falhas NW (azimutes entre 310 e 315) não compartimentam o aquífero; ao contrário das falhas NE identificadas como compartimentadoras. Outra evidência da existência de fluxo de NE para SW neste bloco

Tabela 01- Níveis de água observados nos poços da CORSAN com bombeamento do poço AM.

Poço EST-	Distância de AM (m)	Nível de Água (cota)	
		Inicial (m)	Final (m)
04	578,76	7,70	7,97
05	410,76	0,29	0,44
07	200,73	-	-
09	533,20	2,34	3,55
14	852,77	9,00	9,20
18	608,00	42,30	42,30

Tabela 02 – Níveis, rebaixamentos e capacidades específicas.

Poço AM		
NE (m)	Rebaixamento=L (m)	Vazão média =Qm (m ³ /s)
2,30	35,31	1,37680 x 10 ⁻²
Piezômetro (PZ)		
NE (m)	Distância (m)	Rebaixamento=L (m)
5,35	38,31	24,54

Tabela 03: Parâmetros calculados para o Aquífero Botucatu com base no teste do poço AM.

Transmissividade	6,95833 x 10 ⁻⁴ m ² /s
Coefficiente de Armazenamento	1,810 x 10 ⁻⁸
Espessura do Aquífero	36 m a 51 m
Condutividade Hidráulica*	1,59962 x 10 ⁻⁵ m/s
Gradiente Hidráulico (EST-20 - S)	7,104 X 10 ⁻³

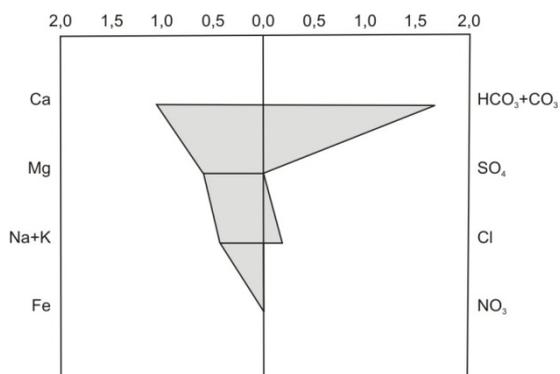


Figura 10- Diagrama de Stiff para medianas dos valores do Aquífero Botucatu.

Figure 10- Stiff diagram for Botucatu Aquifer median hydrochemical values.

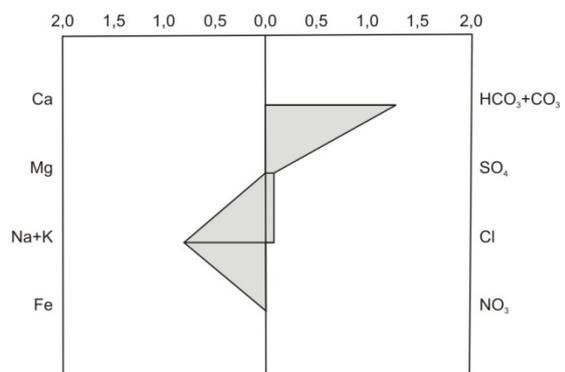


Figura 11- Diagrama de Stiff para água do poço EST-06 (Aquífero Passo das Tropas).

Figure 11- Stiff diagram for EST-06 water well (Passo das Tropas Aquifer).

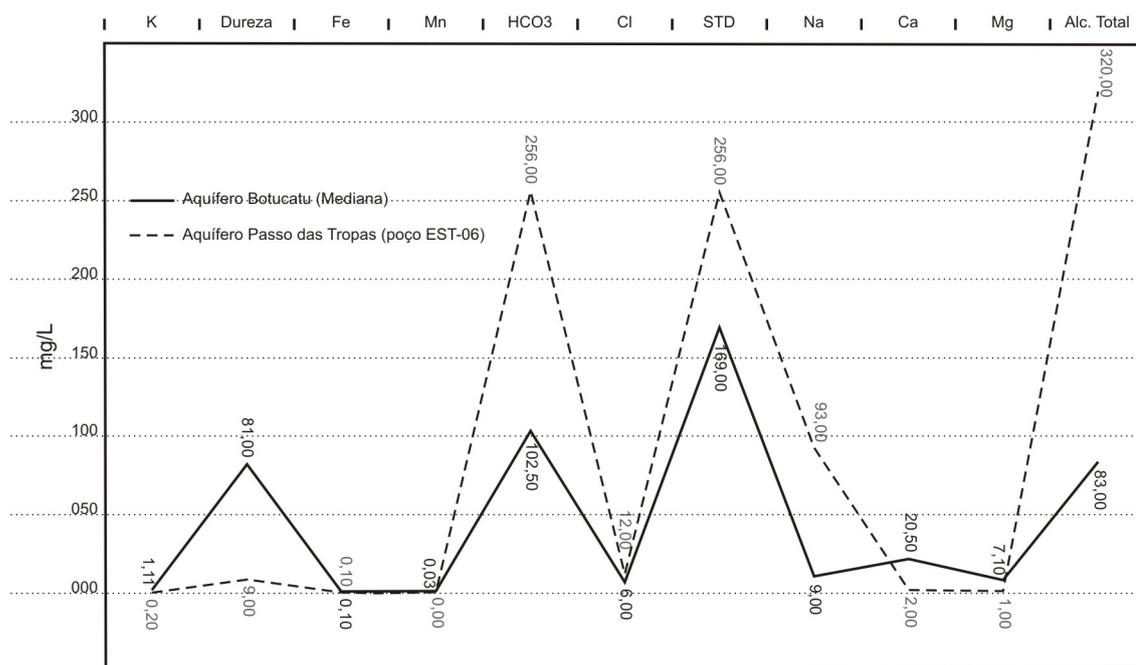


Figura 12- Diferenciação hidroquímica entre dos aquíferos Botucatu (mediana das análises) e Passo das Tropas (poço EST-06). A mediana do pH nas análises das águas do Aquífero Botucatu é 6,9 e o pH da água de EST-06 (Aquífero Passo das Tropas) é 9,9.

Figure 12- Botucatu (median analytical values) and Passo das Tropas (EST-06 water well) hydrochemical differentiation. Median pH for Botucatu Aquifer is 6,9 and EST-06 water (Passo das Tropas aquifer) pH is 9,9.

Tabela 04: Parâmetros hidroquímicos de poços da área de estudo.

Poço	Cor	Turbidez	pH	K	Dureza	Fe Total	Mn	HCO ₃	Cl	STD	Na	Ca	Mg	Alc. Total
02	2	1,1	6,5	0,001	69	0,001	0,001	96,4	11,0	157,4	11,7	18,6	3,4	79
03	3	0,5	7,1	0,001	72	0,100	0,001	83,0	7,7	131,7	10,0	20,8	10,7	68
04	0	0,2	6,5	0,001	75	0,001	0,001	80,0	12,0	181,3	11,0	21,6	0,8	66
05	3	0,9	7,5	0,001	110	0,100	0,070	134,0	22,0	185,5	10,0	28,7	9,7	110
09	3	0,4	6,6	0,001	65	0,100	0,150	68,3	9,0	156,0	8,0	15,2	7,1	56
10	3	0,3	6,8	1,0	82	0,100	0,001	98,8	5,0	206,0	9,0	18,0	8,9	81
11	3	0,7	6,9	0,7	85	0,200	0,030	102,5	6,0	180,8	5,0	19,2	9,5	84
E	5	0,5	6,6	2,2	62	0,100	0,030	76,9	4,0	141,0	6,0	14,8	6,3	63
14	5	0,6	6,6	2,1	75	0,300	0,030	79,3	7,0	166,3	8,0	19,2	7,1	65
15	3	0,2	7,2	1,5	96	0,400	0,030	115,9	11,0	191,9	13,0	23,5	8,9	95
16	3	2,0	7,8	0,1	110	0,100	0,001	151,3	3,0	198,8	12,0	35,6	5,3	124
08	3	0,9	7,2	1,5	78	0,100	0,030	121,0	5,0	167,4	10,0	20,5	6,4	99
18	3	3,2	7,0	1,8	81	0,200	0,070	100,0	3,0	169,0	6,0	20,0	7,0	82
12	3	0,4	6,9	2,2	78	0,001	0,001	104,0	6,0	139,0	6,0	17,0	8,0	85
20	2	0,6	6,4	2,6	85	0,100	0,001	121,0	2,0	151,0	8,0	21,0	8,0	99
21	2	0,8	7,6	1,8	122	0,001	0,030	121,0	9,0	191,0	9,0	29,0	12,0	99
EST-06	2	0,9	9,90	0,2	9	0,100	0,000	256,00	12,00	256,00	16,5	2,00	1,00	320
AM	0	0,0	7,93	1,11	98,5	0,110	0,001	135,71	3,25	178,47	93,00	25,65	4,39	

Tabela 04 (Continuação)
Estatísticas (exceto poço EST-06)

Valor Máximo	5,0	3,2	7,9	2,6	122,0	0,4	0,15	151,3	22,0	206,0	16,5	35,6	12,0	124,0
Média	2,7	0,8	7,0	1,1	84,9	0,1	0,03	105,2	7,4	170,2	9,4	21,7	7,3	84,7
Mediana	3,0	0,6	6,9	1,1	81,0	0,1	0,03	102,5	6,0	169,0	9,0	20,5	7,1	83,0
Mínimo	0,0	0,0	6,4	0,0	62,0	0,0	0,00	68,3	2,0	131,7	5,0	14,8	0,8	56,0
Desvio Padrão	1,3	0,8	0,5	0,9	17,0	0,1	0,04	23,5	4,9	21,8	3,0	5,4	2,8	18,7

de aquífero é fornecida pela consistência verificada nos resultados da hidroquímica (Tabela 4). As concentrações dos principais parâmetros hidroquímicos (Dureza, Na, Ca e STD) e pH aumentam em direção à jusante do fluxo.

A conjugação dos efeitos dos dois sistemas de falhas – compartimentação produzida pelas falhas NE e o escalonamento como efeito das falhas NW – define o fluxo no interior do bloco do Aquífero Botucatu que contém o poço AM; de NE para NW.

A porosidade do Aquífero Botucatu, na área de estudo, não foi diretamente estimada, mas os valores obtidos por geofísica de poço, para a porosidade efetiva no poço da Cia Estadual de Silos e Armazéns – CESA - em Caxias do Sul, variaram entre 15% e 18%, não havendo nenhuma indicação de que a porosidade do aquífero no Vale do Rio Taquari se encontre fora desta faixa de valores.

A velocidade do fluxo da água subterrânea (V), no bloco de aquífero que contém o poço AM, foi estimada em 0,0595 m/dia, ou 21,74 m/ano, com base nessa porosidade presumida.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O objetivo primário da investigação hidrogeológica (na escala de campo de poços), de áreas similares à do presente estudo, deve ser a definição da continuidade hidráulica e física dos aquíferos, como já sugerido pelos trabalhos de Montañó *et al.* (2002) e Rosa Filho *et al.* (2003). A conexão hidráulica entre porções de aquífero, seccionadas por falhas, pode ser estabelecida por mapeamento potenciométrico na mesma escala da área investigada, pela análise de interferência entre poços e pela identificação de gradiente hidráulico constante entre poços situados em um mesmo bloco de aquífero.

Modelagens de fluxo (conceituais ou matemáticas) dependem intrinsecamente da escala de observação e da correspondente densidade de dados considerada. Desta forma é compreensível que modelos em diferentes escalas: de bacia, regionais e escala de campo de poços, cheguem a resultados não necessariamente coincidentes.

A identificação do Aquífero Passo das Tropas – que, juntamente com o Aquífero Botucatu, compõe o SAG na área de Estrela-RS - com base em critérios estratigráficos e hidroquímicos, mostrou o potencial da metodologia empregada na investigação de aquíferos em áreas de elevada complexidade, com informações derivadas

de várias fontes e adquiridas com diferentes densidades.

CONCLUSÕES

No Vale do Rio Taquari, proximidades de Estrela-RS, falhas NE associadas à ZFDC compartimentam o SAG e estão relacionadas à definição de uma área improdutiva do SAG, à supressão local do Aquífero Botucatu do registro litológico e à ocorrência do Aquífero Passo das Tropas. Falhas NW produzem rejeitos verticais aparentes menores que a espessura do aquífero sem comprometer o fluxo.

As compartimentações e as descontinuidades de fluxo identificadas neste trabalho indicam que estudos futuros dos aquíferos do SAG na região, em áreas com as mesmas características, devem priorizar a determinação da continuidade lateral e conectividade das unidades hidroestratigráficas, como premissa para a definição das condições de fluxo. Este procedimento visa evitar o equívoco comum de interpretar como correlacionáveis, cargas hidráulicas e características químicas de águas correspondentes a blocos tectonicamente definidos, contendo diferentes aquíferos, ou segmentos do mesmo aquífero sem conexão hidráulica.

Na área de estudo, foi possível definir gradiente hidráulico e parâmetros hidrodinâmicos para um bloco do Aquífero Botucatu (que contém os poços S, O, EST-12 e EST-20) alongado segundo azimutes entre 030 e 035. Para este bloco, sugere-se que a recarga se dá a nordeste do poço EST-20 (presumidamente através de um conjunto de falhas com azimute 310 situado aproximadamente 6 km a nordeste do poço AM). Quanto a descarga ocorre, possivelmente, a sul do poço AM, no trecho do Arroio Estrela, controlado por falha com azimute 315 (Fig. 09). O fluxo identificado no interior da célula de circulação do Aquífero Botucatu tem direção paralela às falhas NE e sentido NE para NW.

O levantamento estratigráfico regional, combinado com a interpretação dos perfis litológicos dos poços, permitiu concluir que o potencial de produção de água subterrânea, na região, está subestimado, pois corpos intrusivos (diabásios) alterados são tomados por sedimentitos da Formação Rio do Rasto (base do SAG), sendo, em consequência, desconsiderada a presença do Aquífero Passo das Tropas.

As águas dos aquíferos Botucatu e Passo das Tropas podem ser hidroquimicamente diferenciadas, as primeiras sendo bicarbonatadas cálcicas e as últimas sódicas. Dentre

outros parâmetros, alcalinidade total, dureza e pH (Fig. 12 e Tabela 04) diferem significativamente nas duas águas.

A hidroquímica do bloco de Aquífero Botucatu que contém o poço AM indica que suas águas são relativamente jovens, provavelmente parte de um sistema de circulação que poderia ser denominado de célula independente no interior do SAG. As concentrações dos principais parâmetros hidroquímicos aumentam em direção da jusante do fluxo e são coerentes com esta conclusão. As águas desta célula, com base nos parâmetros hidrodinâmicos calculados (velocidade de fluxo de 21,74 m/ano) e nas posições presumidas das áreas de recarga e descarga sugerem tempo de residência da ordem de centenas de anos.

Considerando que os resultados obtidos na escala op-

eracional, indicam a existência de sistemas de circulação independentes no interior de segmentos do SAG situados no extremo sul da Bacia do Paraná, sugere-se que, nestas áreas, o mapeamento dos limites do sistema de fluxo deve preceder o estabelecimento da distribuição de cargas hidráulicas. A modelagem de fluxo dos aquíferos, nestas áreas, pode ser conceitualmente definida como uma matriz de células de circulação, que apresentam grau variável de conectividade hidráulica. A identificação de descontinuidades desta natureza indica que os estudos futuros devem priorizar a determinação da continuidade lateral e conectividade das unidades hidroestratigráficas, como premissa para a definição das condições de fluxo dos aquíferos do SAG na região.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, L. M.; FRANÇA, A. B. & POTTER, P. E. Aquífero Gigante do Mercosul no Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai: mapas hidrogeológicos das formações Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones e Tacuarembó. Universidade Federal do Paraná (UFPR) e PETROBRÁS S.A., 16p. e Anexos, 1995.
- ARAÚJO, 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. **Hydrogeology Journal**, 7- p. 317-336, 1999.
- BRADBURY, K. R.; MULDOON, M. A.; ZAPOROZEC, A.; LEVY, J. Delineation of wellhead protection areas in fractured rocks. USA: OGWDW/EPA, 1991. 144 p.
- CAMPOS, H. C. N. S. 1999. Modelación conceptual y matemática del Acuífero Guaraní, Cono Sur. Mapa Hidrogeológico do Aquífero Guaraní. **Acta Geológica Leopoldensia**, 23(4): 3-50, 1999.
- CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul** 1:750.000. CPRM, Porto Alegre-RS, 2005.
- FACCINI, U. F.; GIARDIN, A.; MACHADO, J. L. F. Heterogeneidades litofaciológicas e hidroestratigrafia do Sistema Aquífero Guaraní na região central do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. in: PAIM, P. S. G; FACCINI, U.F.; NETTO, R.G. (Ed.). **Geometria, arquitetura e heterogeneidades de corpos sedimentares**. 1 ed. São Leopoldo: UNISINOS, 2003. Cap. 3.1. p. 147-173.
- GARCIA, A. J. V.; FACCINI, U. F.; LAVINA, E. L. C.; ZERFASS, H.; SUSZCZYNSKI, A. M. Geometry, architecture and porosity distribution in Mesozoic sandstones in Southern Paraná Basin, Brazil: reservoir/aquífer potential in Mercosul context. *In: GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA ANNUAL MEETING*, P124., 1999, Denver-CO-USA. **Annals**. Denver-CO-USA: Geological Society of America, 1999.
- GIARDIN, A.; FACCINI, U. F. Complexidade hidroestratigráfica e estrutural do Sistema Aquífero Guaraní na região central do Rio Grande do Sul: abordagem metodológica aplicada ao exemplo da área de Santa Maria - RS, Brasil. **Revista Águas Subterrâneas**, São Paulo, n. 18, p. 39-54, 2004.
- HUGGENBERGER, P.; AIGNER, T. Introduction to the special issue on aquifer-sedimentology: problems, perspectives and modern approaches. **Sedimentary Geology**, Amsterdam, v. 129, n. 3, p. 179-186, 1999.
- PSAG-OEA. Projeto para a Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guaraní. II Congresso Aquífero Guaraní. Workshops Temáticos: **Conclusões e recomendações**. Ribeirão Preto (SP), 2008. Disponível em: http://www.ambiente.sp.gov.br/2_con_aqu_gua_02_02_09.pdf. Acesso em: 16 jun. 2010.
- LAVINA E.L.C.; FACCINI, U.F.; RIBEIRO, H.J.S. A Formação Pirambóia (Permo-Triássico) no Estado do Rio Grande do Sul. **Acta Geológica Leopoldensia**, São Leopoldo, v. XVI, n. 38, p. 179-197, 1993.
- MACHADO J.L.F. **Mapa Hidrogeológico da Folha de Santa Maria, RS**. Rio de Janeiro: CPRM, 1994. 1: 100 000.
- MACHADO, J.L.F. **Compartimentação Espacial e Arcabouço Hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guaraní no Rio Grande do Sul**. São Leopoldo, 2005. 238 f. Tese de Doutorado - PPGeo/UNISINOS, UNISINOS.
- MIRANDA, E. E. DE (COORD.). **Brasil em Relevô**. Disponível em: <http://www.relevobr.cnpem.embrapa.br> Acesso em: 23 mai. 2006.
- MONTAÑO J.; ROSA FILHO. E.F.; HINDI E.C.; CICALESE-MONTAÑO M.; URTASUN S.G. Importância de las estructuras geológicas em el modelo conceptual del Sistema Acuífero Guaraní - Área Uruguaya. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 16, p. 111-119, 2002.
- ROSA FILHO, E.F.; HINDI, E.C.; ROSTIROLLA, S.P.; FERREIRA, F.J.F.; BITTENCOURT, A.V. L. Sistema Aquífero Guaraní - considerações preliminares sobre a influência do Arco de Ponta Grossa no fluxo das águas subterrâneas. **Águas**

Subterrâneas, São Paulo, v. 17, p. 91-111, 2003.
SOARES, A. P.; SOARES, P. C.; BETTÚ, D. F.; HOLTZ, M. Variabilidade espacial no Sistema Aquífero Guarani: controles estruturais e estratigráficos. **Águas Subterrâneas**, v.21, 52 n.1, p.51-64, 2007.
SOARES, A. P.; SOARES, P. C.; HOLTZ, M. Heterogeneidades hidroestratigráficas no Sistema Aquífero Guarani. *Revista Brasileira de Geociências*. 38(4): 598-617, 2008.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPQ pelo suporte financeiro a este trabalho (Projeto Universal 485983/2007-9 e Bolsa de produtividade e Pesquisa (Processo 309475/2007-4), à CORSAN pela disponibilização de dados e auxílio financeiro e aos revisores anônimos, cujas críticas e sugestões aperfeiçoaram em muito a versão final deste trabalho.