

O Sistema Aquífero Tikuna: o aquífero Cretáceo da Bacia Amazônica

Fátima Ferreira do Rosário¹, Emilio Custodio², Gerson Cardoso da Silva Jr.³

¹ Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da PETROBRAS - Petróleo Brasileiro S.A., Brasil, Av. Jequitibá, 950 – Cidade Universitária – Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, Brasil

² Universidad Politécnica de Cataluña, UPC, Jordi Girona 1-3. Campus Nord, ed. D2, Barcelona, España

³ Universidade Federal de Rio de Janeiro, Av. Athos da Silveira Ramos 274. 21941-590 Rio de Janeiro, Brasil

Mail de contacto: fatimariosario@petrobras.com.br

RESUMO

As camadas aquíferas Cretáceas do Sistema Aquífero Amazonas (SAA) formam o sistema aquífero multicamada, confinado, definido como o Sistema Aquífero Tikuna (SAT). O SAT estende-se entre o Arco de Purus e o cinturão de falhas subandinas. Utilizando um modelo numérico regional foi possível observar que este sistema aquífero é recarregado através de seus afloramentos localizados a cerca de 1000 m de altitude na região do cinturão de falhas subandinas. Nas circunvizinhanças do Arco de Iquitos o fluxo é afetado por um divisor parcial de fluxo o que resulta na subdivisão do SAT em duas sub-bacias. As águas do SAT variam de doces a salobras-salinas. Devido às camadas confinantes que se sobrepõem ao SAT, o mesmo se mantém com níveis piezométricos mais elevados do que os níveis do aquífero livre Solimões, sobreposto a este. Em função disso, um gradiente piezométrico vertical ascendente é gerado, fortemente controlado pelo aquífero que separa estes dois sistemas aquíferos.

Palabras clave: Sistema Aquífero Amazonas; Sistema Aquífero Tikuna, Sistema Aquífero Solimões, modelo numérico de fluxo regional.

RESUMEN

Las capas acuíferas cretácicas del Sistema Acuífero Amazonas (SAA) forman un sistema acuífero multicapa, confinado, que se ha definido como el Sistema Acuífero Tikuna (SAT). El SAT se extiende entre el Arco de Purus y el cinturón de fallas Subandinas. Con la ayuda de un modelo numérico regional, se pudo observar que éste se recarga a través de sus áreas de afloramiento en el borde de las fallas del cinturón Subandino, a cerca de 1000 m de altitud. Se produce una división interna parcial del flujo en las inmediaciones del Arco de Iquitos, que divide el SAT en dos sub-cuencas. Las aguas del SAT varían desde dulces a salobres - saladas. Debido a las capas de confinamiento el SAT se mantiene con niveles piezométricos mayores que los del acuífero libre Solimões sobrepuesto. Debido a esta diferencia piezométrica se genera en este sistema un gradiente piezométrico vertical ascendente, controlado por el aquífero que separa los dos acuíferos.

Palabras clave: Sistema Acuífero Amazónico; Sistema Acuífero Tikuna, Sistema Acuífero Solimões, modelo numérico de flujo regional.

Introdução

As camadas aquíferas Cretáceas do Sistema Aquífero Amazonas (SAA), de cerca de 300 m de espessura média, formam o sistema aquífero multicamada confinado, definido em Rosário (2011) como o Sistema Aquífero Tikuna (SAT). O SAA em sua porção Oeste (WSAA) carecia de estudos hidrogeológicos básicos que permitissem a ordenação e sistematização de suas unidades hidrogeológicas.

A compilação, organização e análise de dados geológicos, hidrogeológicos, geofísicos e

outros dados correlatos, como dados palinológicos e hidrológicos, publicados e outros até então inéditos foram integrados em uma base geoespacial através do sistema de informações geográficas (SIG) ARCGIS. Tal integração de dados permitiu a definição dos limites hidrogeológicos do WSAA, a identificação de suas características hidrogeológicas básicas e a definição de uma nova subunidade hidrogeológica para o SAA, o Sistema Aquífero Tikuna (SAT). Um modelo de fluxo conceitual regional foi delineado e, em sequência, este foi trasladado a um modelo

numérico de fluxo regional simplificado utilizando o código numérico Visual MODFLOW. Os resultados obtidos a partir deste modelo numérico de fluxo permitiram o entendimento do fluxo regional desenvolvido no WSAA e em especial no SAT.

O presente trabalho integra dados das 8 bacias sedimentares estudadas (Solimões e Acre no Brasil, Marañón e Ucayali no Peru, Madre de Díos e Beni na Bolívia, Oriente no Equador e Putumayo na Colômbia), define as subunidades hidrogeoestratigráficas do WSAA e identifica suas continuidades hidráulicas, organiza e analisa os parâmetros hidráulicos e dados hidrogeocímicos de cada subunidade hidrogeoestratigráfica identificada, determina os limites hidrogeológicos do WSAA, calcula sua área e integra regionalmente todos os dados adquiridos em um modelo de fluxo conceitual regional baseado nos dados geológicos, hidrogeológicos e hidroquímicos atualmente disponíveis. Este estudo provê uma nova visão sobre a hidrogeologia do WSAA e a base para que novos estudos sejam desenvolvidos.

O WSAA está localizado na porção noroeste da América do Sul e corresponde à maior porção do Sistema Aquífero Amazonas (SAA). O SAA engloba o WSAA e estende-se ainda mais a Leste, englobando também o Aquífero Alter do Chão. Esta última porção, localizada a Leste do Arco de Purus, é denominada neste trabalho como a porção Leste do SAA (ESAA) (Figura 1).

As publicações a respeito dos grandes aquíferos mundiais (Puri and Aureli, 2009; Margat, 2007; UNESCO, 2007) apresentam o SAA como um aquífero transfronteiriço, composto por duas subunidades: o Aquífero Solimões-Içá e o Aquífero Alter do Chão, sem uniformidade nos limites hidrogeológicos adotados para o SAA (Figura 2).

Estudos geológicos mostram a ocorrência de possíveis camadas aquíferas Cretáceas em subsuperfície na área de domínio do WSAA, embora estudos hidrogeológicos ainda não houvessem se debruçado sobre este tema.

Descrição geral da área e metodologia de estudo

A área de estudo é localizada na porção noroeste da América do Sul, entre as longitudes 78°W e 60°W e latitudes 3°N a 13°S (Figura 1). A topografia da área se modifica abruptamente na direção W-E, variando de altitudes ao redor de 1000 m snmm até cerca de 250 m na região Subandina. Desta última região em direção ao Leste, por uma extensão de cerca de 2700 km, as altitudes decrescem regularmente através da

planície Amazônica até atingirem altitudes em torno de 20 m snmm no limite Leste da área, definida pelo Arco de Purus (Figura 1). Os limites Norte e Sul da bacia são definidos pelos Escudos das Guianas e Brasileiro, respectivamente, onde as altitudes observadas também excedem em muito aquelas observadas na porção central da bacia.

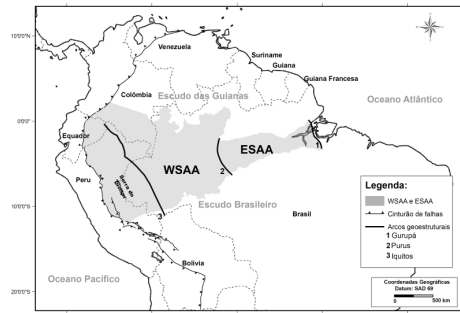


Figura 1. Localização do Sistema Aquífero Amazonas (SAA), suas porções Oeste (WSAA) e Leste (ESAA) e principais feições geotectônicas.

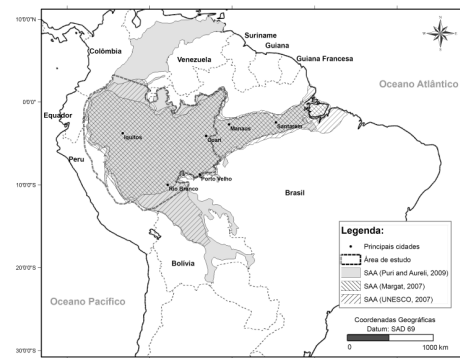


Figura 2. Localização da área de estudo e área designada para o SAA a partir de várias publicações sobre os maiores aquíferos mundiais.

O fato de o WSAA estar localizado na porção mais remota da região Amazônica implica em ser uma das regiões mais preservadas e a mais desconhecida do ponto de vista científico em geral, incluindo o hidrogeológico. Um grande esforço foi empreendido para a obtenção de dados geológicos e hidrogeológicos sobre a região de estudo. Após uma etapa de levantamento, análise e interpretação de

informações publicadas, uma fase de compilação de informações foi iniciada onde, através de permissão para acesso aos dados da base da Empresa Brasileira de Petróleo (PETROBRAS) foram obtidos dados fundamentais.

Baseando-se em estudos anteriores realizados para outros aquíferos regionais (Welsh, 2000; Sefelnars, 2007; Vives et al., 2009) foi possível definir os limites hidrogeológicos do WSA, suas subunidades hidrogeológicas, parâmetros hidráulicos, hidrogeoquímica e modelo conceitual de fluxo regional.

O estudo foi conduzido através de uma sequência de interações de informações, primeiro em escala regional até escala de detalhe, embora o resultado final seja apresentado em escala regional. Estas interações foram iniciadas através da análise integrada das colunas geológicas das bacias sedimentares existentes na área.

O segundo passo compreendeu: organização dos dados em uma base de dados geoespacial utilizando o Sistema de Informações Geográficas (SIG) ARCGIS, interpretação e análise de cerca de 600 perfis de poço e seus respectivos perfis geofísicos, generalização dos perfis de poços e elaboração de vários perfis geológicos por toda a área utilizando o programa Visual Groundwater 3.0. O resultado foi a identificação dos limites hidrogeológicos do WSA e suas subunidades hidrogeoestratigráficas.

O terceiro passo englobou a interpretação, cálculos e tratamento gráfico de parâmetros hidráulicos, dados hidrogeoquímicos e hidrogeológicos. Os dados hidrogeoquímicos foram organizados e analisados utilizando as ferramentas clássicas. Perfis de resistividade, condutividade de fluidos e gamma-ray foram utilizados para estimar comparativamente o grau de mineralização da água subterrânea. A condutividade hidráulica e porosidade foram calculados baseados em resultados de ensaios de campo e também nas características litológicas dos estratos.

Ao redor de 200 registros de níveis piezométricos foram compilados e aproximadamente a mesma quantidade de dados de nível d'água de rios (pontos de controle) foram utilizados para a elaboração manual do mapa piezométrico regional do Sistema Aquífero Solimões (SAS).

Para o Sistema Aquífero Tikuna (SAT) foram obtidos poucos dados piezométricos, o que impossibilitou a elaboração de seu mapa piezométrico. Apesar disso, dados

piezométricos importantes foram obtidos para este sistema aquífero, corrigidos em função da salinidade. O resultado desta etapa, baseada na interpretação integrada de todos os dados analisados, foi a elaboração do modelo de fluxo conceitual regional do SAS.

O quarto passo consistiu na elaboração de um modelo numérico de fluxo utilizando o software Visual MODFLOW e outros softwares auxiliares, como o SURFER e o GLOBAL MAPPER. Foi elaborado o modelo digital do terreno (MDT) a partir do mosaico de imagens SRTM 3-arc segundos, que foi utilizado como primeira camada do modelo numérico de fluxo. Foi utilizada interpolação por krigagem para a elaboração das demais camadas do modelo numérico de fluxo (topo do aquífero e topo do SAT) a partir de dados de profundidade do topo destas camadas definidas a partir dos perfis de poço. Desta forma, esta etapa resultou na elaboração do modelo numérico de fluxo que, então, integrou todos os dados adquiridos e possibilitou a compreensão das principais feições de fluxo do SAT, a relação entre o SAT e o SAS e, conseqüentemente, o entendimento do fluxo regional no WSA.

Arcabouço geológico e modelo hidrogeológico conceitual

Desde o Cretáceo inferior as bacias estudadas vêm evoluindo de forma muito similar, resultando em depósitos sedimentares contínuos e litologicamente similares, apesar de algumas apresentarem particularidades.

Os sedimentos Cretáceos desta porção foram depositados sobre sequências sedimentares do Paleozóico ou do Mesozóico superior, compostos principalmente por evaporitos e rochas carbonáticas finas, rochas do embasamento cristalino e rochas ígneas intrudidas e extrudidas da fase diastrófica ocorrida durante o Mesozóico, que afetou principalmente as bacias do Acre e Solimões. Neste tempo, um mosaico de ambientes sedimentares, variando do fluvial ao marinho raso, foram estabelecidos nesta região, de acordo com o sistema de paleo-drenagem do Amazonas na direção E-W. Os depósitos sedimentares resultantes são compostos predominantemente por arenitos médios a grossos intercalados principalmente com argilitos e em menor proporção ocorrem intercalações com conglomerados e siltitos. Os depósitos Cretáceos ocorrem desde o Arco de Purus até o cinturão de falhas subandinas entre cerca de 250 a 750 m de profundidade e variam entre 250 m a 700 m de espessura (média 300 m). O Cretáceo foi um período de relativa

estabilidade tectônica até que devido ao deslocamento para Oeste da Placa Tectônica Sul Americana o processo de subducção da margem pacífica desta Placa (re)ativou o Arco de Iquitos.

Durante o Mioceno, quando a elevação da Cordilheira Andina finalmente interceptou o sistema de drenagem do paleo-Rio Amazonas, instalou-se um grande sistema lagunar na região entre a proto-Cordilheira Andina e o Arco de Purus (Lago Pebas). O Arco de Purus atuou como uma barreira geológica à sedimentação Terciária para o Leste. Neste ambiente fluvial meandrante-lagunar foram depositados os sedimentos predominantemente argilosos das Formações Terciárias. Em geral, os depósitos Terciários mostram uma sequência gradacional, onde as camadas superiores possuem um caráter areno-argiloso e as seqüências basais são quase que essencialmente argilosas.

Na porção estudada os depósitos Quaternários são muito similares às seqüências Terciárias superiores. Baseado nas similaridades das características hidrogeológicas resultantes das similaridades litológicas citadas anteriormente, os depósitos Quaternários e Terciários superiores foram considerados como uma só unidade.

Resultados

As seqüências Cretáceas e Terciárias, além de serem internamente litologicamente muito semelhantes e muito distintas entre elas, são contínuas ao longo da porção estudada.

A continuidade das seqüências Cretáceas é dada através das Formações Cretáceas das bacias estudadas.

Até então ainda não havia sido definida uma subunidade hidrogeostratigráfica para o Cretáceo do WSAA. Esta nova subunidade recebeu o nome de Sistema Aquífero Tikuna, em homenagem aos indígenas que habitam às margens do Rio Solimões.

A subunidade hidrogeostratigráfica Terciária do WSAA, similarmente ao que ocorre com a subunidade Cretácea, é formada por um conjunto de Formações Terciárias. Uma vez que a maior proporção desta subunidade hidrogeostratigráfica é formada pela Formação Solimões, decidiu-se manter a denominação de Sistema Aquífero Solimões (SAS).

As camadas superficiais do SAS são principalmente areno-argilosas, contrastando com suas camadas basais essencialmente argilosas. Esta constatação levou à subdivisão do SAS em um aquífero superior, o Aquífero Solimões, e em um aquífero basal.

O SAS possui uma espessura média de 250 m, apesar de poder atingir até cerca de 2 km de espessura nas proximidades do cinturão de falhas subandinas. Nas proximidades do Arco de Purus esta camada vai adelgaçando para Leste até desaparecer.

A espessura média do Aquífero Solimões é de cerca de 50 m apesar de poder atingir até cerca de 150 m de espessura em alguns locais. O Aquífero Solimões é explotado em várias pequenas cidades da Amazônia Ocidental através de poços rasos, e alguns poucos poços mais profundos, tanto para uso residencial como industrial. Os níveis piezométricos deste aquífero são geralmente rasos, de alguns poucos metros a cerca de 20 m de profundidade, em média. Tanto instalações sanitárias inapropriadas como a disposição de resíduos sem controle são fontes para sua contaminação.

A água do Aquífero Solimões é do tipo Na-K-HCO₃ e possui condutividade elétrica variando entre 38 e 180 μ S/cm. O pH de suas águas pode variar de ácido na Bacia Maraón (mediana 5,8), a básico na Bacia Maraón (mediana 9). Para este aquífero foram encontradas concentrações de sílica variando entre 8 e 62 mg/L (mediana 40 mg/L) e concentrações de ferro total de 0,1 mg/L (mediana). A temperatura de suas águas fica ao redor de 28°C.

Dados piezométricos do Aquífero Solimões, juntamente com dados do nível d'água dos principais rios da região obtidos através de imagens SRTM 3-arc segundos foram usados como pontos de controle e permitiram a elaboração manual do mapa piezométrico regional do Aquífero Solimões (Figura 3). Isto foi possível pelo fato de que o Aquífero Solimões encontra-se muito bem conectado aos corpos de água superficiais.

Dados dos parâmetros hidráulicos para o Aquífero Solimões são muito escassos e indicam que sua condutividade hidráulica horizontal pode variar de valores negligenciáveis até cerca de 20 m/d.

As camadas do Sistema Aquífero Tikuna (SAT) variam entre cerca de 300 m e 700 m de espessura. Nas bacias subandinas as camadas do SAT estão associadas a reservatórios petrolíferos.

A porosidade total do SAT é de cerca de 0,20 e sua condutividade hidráulica horizontal varia entre 0,01 m/d a 1,7 m/d (média de 0,26 m/d) (Yinfu et al, 2010; Mathalone e Montoya, 1995).

Este sistema aquífero é explotado através de poços rasos nas regiões de seus

afloramentos, contudo não há evidências de sua utilização em outras áreas. O SAT contém água doce nas proximidades de seus afloramentos, porém nas regiões mais internas das Bacias Oriente, Ucayali, Maraón e Solimões é formado por água salobra a salina, eventualmente formando salmouras.

Os limites hidrogeológicos do WSAA são formados pelo Arco de Purus a Leste, pelas áreas cratônicas (Escudos das Guianas e Brasileiro) juntamente com divisórias de fluxo a Norte e Sul e pelo cinturão de falhas subandinas a Oeste (Figuras 1 e 3).

A elaboração do modelo de fluxo regional do WSAA (Figura 4) permitiu a visualização e integração gráfica das principais feições que controlam e influenciam no fluxo regional deste grande sistema aquífero. Tanto no modelo conceitual gráfico como no modelo numérico de fluxo elaborado o SAS é representado, do topo para a base, pelas duas primeiras camadas do modelo. A primeira refere-se ao Aquífero Solimões e a camada imediatamente abaixo deste é o aquífero basal do SAS. O Aquífero Solimões está restrito aos primeiros 50 m do WSAA, é recarregado diretamente pela chuva e encontra-se intimamente conectado aos corpos de água superficiais.

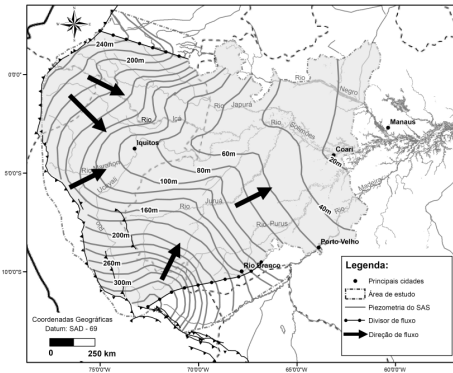


Figura 3. Mapa piezométrico do Aquífero Solimões.

O aquífero basal do SAS confina o SAT subjacente em praticamente toda a sua extensão, exceto por duas áreas onde o SAT aflora: porções do cinturão de falhas subandinas e da Serra do Divisor e algumas porções vizinhas a esta Serra. As zonas de recarga do SAT estão localizadas em seus afloramentos que ocorrem em altitudes de cerca de 1000 m snmm na região do cinturão de falhas

subandinas. Na Serra do Divisor, a cerca de 300 m de altitude, este sistema aquífero também é aflorante, contudo provavelmente trata-se de uma zona de descarga parcial, como sugere a antiga sondagem surgente chamada pelos locais de "Buraco da Central". Nas proximidades deste local algumas fontes também são encontradas. Estas podem estar atuando também como pontos de descarga local, mas o que parece mais provável é que atuem como pontos de descarga do aquífero mais profundo através de fraturas.

A principal zona de descarga do WSAA está localizada no Arco de Purus, onde o SAT surge em superfície e se converte no aquífero livre Alter do Chão.

Utilizando um modelo numérico de fluxo simplificado composto por 3 camadas com células regulares de 10 km x 10 km, de diferenças finitas e densidade homogênea (água doce), foi possível a simulação preliminar de várias hipóteses de funcionamento do WSAA (Figura 5). Como resultado, as principais feições com relação às zonas de recarga e descarga e direção de fluxo puderam ser analisadas. Os resultados obtidos se ajustam bem ao modelo conceitual proposto. Contudo, alguns aspectos novos foram indicados através do modelo numérico de fluxo. Foi possível observar que o SAT é afetado pela existência de um divisor de fluxo parcial de direção quase N-S, localizado nas proximidades do Arco de Iquitos. Como consequência, o SAT é dividido em duas subbacias. A subbacia Oeste possui um padrão de fluxo radial que se inicia nas áreas de recarga localizadas no cinturão de falhas subandinas e termina nas zonas de descarga da Serra do Divisor. A subbacia Leste é maior do que a subbacia Oeste e sua direção de fluxo principal é W-E, iniciando nas zonas de recarga situadas nos extremos noroeste e sudoeste do cinturão de falhas subandinas e cuja principal área de descarga está localizada no Arco de Purus.

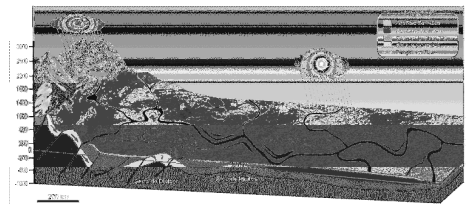


Figura 4. Modelo hidrogeológico conceitual de fluxo no WSAA.

Conforme mostrado através do modelo numérico (Figura 5), o confinamento imposto

pelo aquífero basal do SAS e as zonas de recarga topograficamente muito elevadas mantêm o nível piezométrico do SAT acima do SAS, o que gera um gradiente piezométrico ascendente a partir do SAT para o SAS e que, em algumas áreas, pode ser maior do que 100 m de diferença piezométrica. Registros de poços exploratórios de petróleo na região documentam estas notáveis condições de confinamento impostas ao SAT.

Discussão

Os resultados hidrogeológicos obtidos são preliminares. Eles são o que se pode obter razoavelmente a partir dos dados escassos e pobremente distribuídos de uma área muito grande, praticamente desabitada; contudo, utilizando de forma hábil os dados geológicos disponíveis, resultados preliminares importantes puderam ser alcançados. Desta forma, as principais contribuições aportadas se referem à compilação, análise e interpretação de dados públicos e alguns dados confidenciais aos quais se obteve acesso, através de permissão, e formulação de um modelo hidrogeológico conceitual validado através da modelagem numérica preliminar. Os resultados do modelo numérico foram apresentados de forma a auxiliar o modelo conceitual proposto, embora este primeiro não seja aqui desenvolvido. Este modelo é composto por um aquífero livre, um aquífero (que funciona quase como um aquífero) e um aquífero confinado, o qual é recarregado em alguns pontos da região subandina e descarga mais a Leste, na região do Arco de Purus.

O uso do nível d'água dos principais rios como pontos de controle para a elaboração do mapa piezométrico do aquífero livre Solimões é uma aproximação da superfície freática real, levando-se em consideração a boa conexão hidráulica rios-aquífero. Tal aproximação é mais realista quanto mais próximos estão os rios uns dos outros.

O modelo numérico resultante é muito sensível a mudanças nas condições de contorno e nos parâmetros hidráulicos, conforme discutido em Rosário (2011). Este fato indica a consistência dos resultados. Conforme mencionado, os primeiros resultados do modelo indicaram algumas anomalias com respeito ao que era esperado. Pesquisas complementares de dados confirmaram que tais anomalias eram devido a situações reais, contribuindo desta forma como uma validação indireta do modelo numérico. Os resultados do modelo numérico de fluxo regional foram muito importantes na definição da Serra do Divisor como uma área de descarga parcial

do WSAA, na identificação de um divisor de fluxo parcial nas proximidades do Arco de Iquitos e na confirmação das condições de confinamento impostas pelo aquífero basal do SAS sobre o SAT.

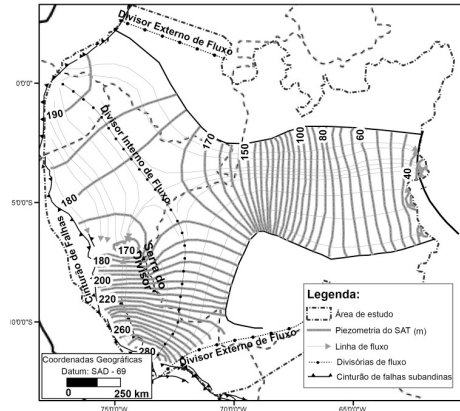


Figura 5. Resultado da simulação de fluxo no SAT através do modelo numérico de fluxo.

Um dos resultados mais pobres refere-se aos dados hidrogeocímicos e à qualidade da água e não permitem a identificação da origem da salinidade da água do SAT.

Dados hidráulicos apontam para tempos de fluxo da água subterrânea no SAT de até ou inclusive superiores a 1 milhão de anos.

Conclusões

O presente trabalho é baseado em dados disponíveis os quais, embora algumas vezes escassos, outras vezes muito espalhados e outras, concentrados em pequenas áreas, permitiram a identificação dos limites hidrogeológicos do WSAA, a definição de suas subunidades regionais, de suas principais feições hidrogeológicas, de suas características hidrogeológicas básicas, incluindo suas características hidráulicas e hidroquímicas, assim como o padrão do sistema de fluxo regional do WSAA.

Dados provenientes da atividade exploratória de petróleo constituíram a maior parte dos dados geológicos e hidrogeológicos usados para interpretar e estimar as propriedades hidrogeológicas regionais do WSAA. A base de dados do SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas) coordenada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) também proveu dados importantes, principalmente sobre o Aquífero Solimões.

A continuidade e homogeneidade das sequências Terciárias e Cretáceas foram confirmadas tanto em escalas de bacia como em escala de poço. Este tipo de abordagem foi muito útil e proveu as principais evidências de que o WSAA é um sistema aquífero multicamada transfronteiriço formado por sequências sedimentares Cretáceas e Terciárias.

O fato das sequências Cretáceas (principalmente arenosas) e Terciárias (principalmente areno-argilosas e argilosas) serem muito distintas entre elas ajudou muito na separação destas duas subunidades durante as análises dos perfis litológicos e dos perfis geofísicos de poço. Além disso, tais distinções influenciaram diretamente no ponto de vista hidrogeológico.

A definição dos limites hidrogeológicos do WSAA foi auxiliada pela presença de 3 principais feições geológicas: os Escudos das Guianas e Brasileiro que definem a posição da maior extensão dos limites Norte e Sul do WSAA e o cinturão de falhas subandinas que define seu limite hidrogeológico Oeste.

Não obstante, a definição completa dos limites hidrogeológicos Norte e Sul somente ocorreu após a elaboração do mapa piezométrico do Aquífero Solimões, quando dois divisores de fluxo foram identificados, complementando e fechando os limites Norte e Sul já parcialmente definidos pelas regiões cratônicas. Baseado nos limites hidrogeológicos definidos para o WSAA, parece que o SAA é um dos maiores sistemas aquíferos do mundo, compreendendo uma área total de $2,7 \times 10^6 \text{ km}^2$. Os limites hidrogeológicos definidos para o WSAA coincidem regularmente bem com os contornos propostos em Margat (2007), resultando em uma área de $2,0 \times 10^6 \text{ km}^2$. O SAS cobre uma área similar à área total do WSAA e o TAS possui uma área menor, de $1,5 \times 10^6 \text{ km}^2$.

A descrição de uma nova subunidade do SAA, o Sistema Aquífero Tikuna, provê uma nova abordagem para a explicação de alguns aspectos do Aquífero Alter do Chão, a porção aflorante do SAT, explicando, por exemplo, a ocorrência de água salobra na cidade de Iranduba. Esta nova subunidade hidrogeoestratigráfica modifica, a partir deste momento, a idéia de que o SAA é composto somente pelos Aquíferos Solimões e Alter do Chão e também estende a área coberta pelo Aquífero Solimões e adiciona a definição do aquífero do SAS.

A condutividade hidráulica e porosidade do SAT indicam que este é um bom reservatório de água e apesar de preenchido principalmente por

água salobra a salina, que limita seu uso, pesquisas futuras podem ser desenvolvidas para identificar outros usos possíveis.

O aquífero Solimões parece conter água doce em toda a sua extensão. As condutividades hidráulicas e porosidades variáveis deste aquífero devem-se, provavelmente, ao retrabalhamento de seus depósitos pela água superficial. A água subterrânea flui regionalmente de Oeste para Leste, controlada pela topografia e pela rede hidrográfica, que interagem intimamente.

Embora os processos que atuam sobre o WSAA sejam mais complexos do que o que pode ser representado em um modelo conceitual regional, a elaboração de um modelo conceitual foi essencial para a integração e visualização dos dados, auxiliando no entendimento do sistema de fluxo como um todo. Os resultados do modelo numérico de fluxo foram valiosos na definição da Serra do Divisor como uma área de descarga, na identificação do divisor de fluxo existente nas proximidades do Arco de Iquitos e na confirmação das condições de confinamento impostas pelo aquífero basal do SAS sobre o SAT

Este modelo conceitual de fluxo regional para o WSAA, embora tenha sido gerado a partir de exaustiva compilação e integração de dados em diversos formatos, escalas e temas, os autores estão cientes de suas limitações, uma vez que os dados são escassos e não estão homogeneamente distribuídos por toda a área de domínio. Mesmo assim, os resultados obtidos mostram boa concordância com as mais notáveis feições hidrogeológicas regionais da área e com os dados reais.

Agradecimentos

Os autores agradecem à PETROBRAS S/A pelo patrocínio desta pesquisa, à Universidade Politécnica da Catalunha pela orientação acadêmica e esforço no desenvolvimento deste projeto em suas instalações e pelo apoio técnico de seus pesquisadores (em parte apoiado pelo projeto MICINN CGL-2009-12910-C03-01 sobre procesos de recarga e descarga de aquíferos), e à Universidade Federal do Rio de Janeiro por aceitar e orientar este desenvolvimento.

Referências

Margat, J., 2007. Great aquifer systems in the world. In: *Aquifer Systems Management: Darcy's Legacy in a World of Impending Water Shortage*. Chery, L. e de Marsily, G. (eds) p. 107-113.

- Mathalone, J.M.P. e Montoya R., M., 1995. Petroleum geology of the sub-Andean basins of Peru, in A. J. Tankard, R. Suárez S. e H.J. Welsink, Petroleum basins of South America: AAPG Memoir 62, p. 423-444.
- Puri, S. e Aureli, A., 2009. Atlas of transboundary aquifers. Global maps, regional cooperation and local inventories, UNESCO.
- Rosário, F. F., 2011. O sistema aquífero cretáceo multicamada Tikuna: subunidade do sistema aquífero Amazonas. Tese do Programa de Pós-graduação em Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 185 p.
- Sefelnars, A.M., 2007. Development of groundwater flow model for water resources management in the development areas of the western desert, Egypt. Dissertation Faculty of Natural Sciences III, Martin Luther University.
- UNESCO, 2007. Sistemas aquíferos transfronterizos en las Américas – Evaluación preliminar.
- Vives, L., Rodríguez, L., Gómez, A., Cota, S.D.S., 2009. Avance del conocimiento del sistema aquífero Guaraní. Modelo numérico regional. Aportes de La hidrogeología al conocimiento de los recursos hídricos. p. 513-521.
- Welsh, W.D., 2000. GABFLOW: A steady state groundwater flow model of the Great Artesian Basin. Bureau of Rural Sciences, Canberra.
- Yinfu, X., Jihancheng, Yongdi, S., Ying, H. 2010. Petroleum geology and exploration potential of the Oriente-Marañón Basin. Petrol. Explor. Develop., v. 37, n.1 p. 51-56.