

ANÁLISE DO FRATURAMENTO NEOTECTÔNICO APLICADA À AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DA BACIA SEDIMENTAR DE RESENDE (RJ)

*Ana Paula Barroso de Albuquerque¹; Claudio Limeira Mello¹;
Tiago Carvalho Pizani¹; Gerson Cardoso da Silva Junior¹*

RESUMO

A bacia de Resende constitui uma depressão tectônica situada no sul do estado do Rio de Janeiro, preenchida por depósitos continentais terciários e quaternários. Diferentes fases tectônicas estão associadas à sua evolução, resultando em uma variedade de estruturas que afetam os pacotes deposicionais. Neste trabalho, buscou-se analisar a influência dos padrões de fraturamento neotectônicos sobre aspectos hidrogeológicos, particularmente a vazão e a capacidade específica dos poços. A metodologia adotada envolveu: confecção de mapa de lineamentos na escala 1:100.000, através da análise da rede de drenagem; levantamento de estruturas tectônicas que afetam os depósitos cenozóicos; tratamento gráfico dos dados de lineamento e de fraturamento, através de rosetas e estereogramas, respectivamente; e análise dos dados hidrogeológicos disponíveis. A análise neotectônica realizada permitiu caracterizar três padrões distintos de fraturamento: falhas NE/ENE relacionadas a um regime transcorrente sinistral E-W, afetando depósitos terciários; falhas NW/WNW associadas a um regime transcorrente dextral E-W, afetando os depósitos terciários e pleistocênicos; e falhas NE ligadas a um regime extensional NW-SE, afetando os depósitos terciários, pleistocênicos e holocênicos. Através da integração dos dados hidrogeológicos com os dados estruturais levantados, pôde-se concluir que os melhores índices hidrogeológicos estão relacionados à ocorrência expressiva de fraturamentos, preferencialmente sob influência de estruturas de direção NE-SW.

PALAVRAS-CHAVE

fraturamento, neotectônica, hidrogeologia e bacia sedimentar.

INTRODUÇÃO

A bacia sedimentar de Resende corresponde a uma depressão de origem tectônica, de idade cenozóica, alongada segundo a direção ENE-WSW, com cerca de 50 km de extensão, 5 a 6 km de largura média e espessura dos sedimentos em torno de até 550 m (Escobar *et al.*, 2000). O seu preenchimento sedimentar, predominantemente constituído por sedimentos areno-argilosos terciários, representa um importante reservatório de água subterrânea, porém longe de ter um potencial homogeneamente distribuído.

1) Departamento de Geologia, IGEO, CCMN - bloco G, sala G1-041 - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Cidade Universitária - Ilha do Fundão, Rio de Janeiro. CEP: 21.949-900, RJ - E-mail: anapaula@geologia.ufRJ.br, limeira@geologia.ufRJ.br, pizani@acd.ufRJ.br, gerson@geologia.ufRJ.br 2

A bacia de Resende está localizada no eixo de maior desenvolvimento econômico do país, que liga as suas principais metrópoles, Rio de Janeiro e São Paulo. Além disso, a região de Resende vem sofrendo um significativo incremento populacional devido à expansão do seu pólo industrial, o que resulta na execução de obras de engenharia de grande porte e em uma maior demanda no consumo de água na região.

Estando inserido no âmbito do Projeto MODESTHI (FINEP/PADCT III), voltado para a modelagem estratigráfica dos reservatórios terrígenos da bacia de Resende, sob o enfoque da Geologia de Reservatórios, o objetivo do trabalho aqui apresentado é o de analisar a influência do fraturamento neotectônico sobre aspectos hidrogeológicos. Busca-se contribuir para o refinamento do modelo hidrogeológico, e assim, para um melhor aproveitamento dos recursos hídricos subterrâneos na área de interesse.

QUADRO GEOLÓGICO

A bacia de Resende, juntamente com as demais bacias que compõem o *Rift* Continental do Sudeste do Brasil, está instalada sobre a Faixa Móvel Ribeira (figura 1). O substrato da bacia é constituído por rochas gnáissico-migmatíticas de médio a alto grau metamórfico, de idade arqueana a proterozóica, pertencentes ao Complexo Paraíba do Sul (Machado Filho *et al.*, 1983). Nas suas vizinhanças ocorrem três grandes corpos alcalinos (maciços de Itatiaia, Passa-Quatro e Morro Redondo), compostos essencialmente por nefelina-sienitos. As rochas que compõem o embasamento da bacia de Resende encontram-se cortadas por importantes falhas transcorrentes de direção E-NE, de idade cambro-ordoviciano (Hasui *et al.*, 1982).

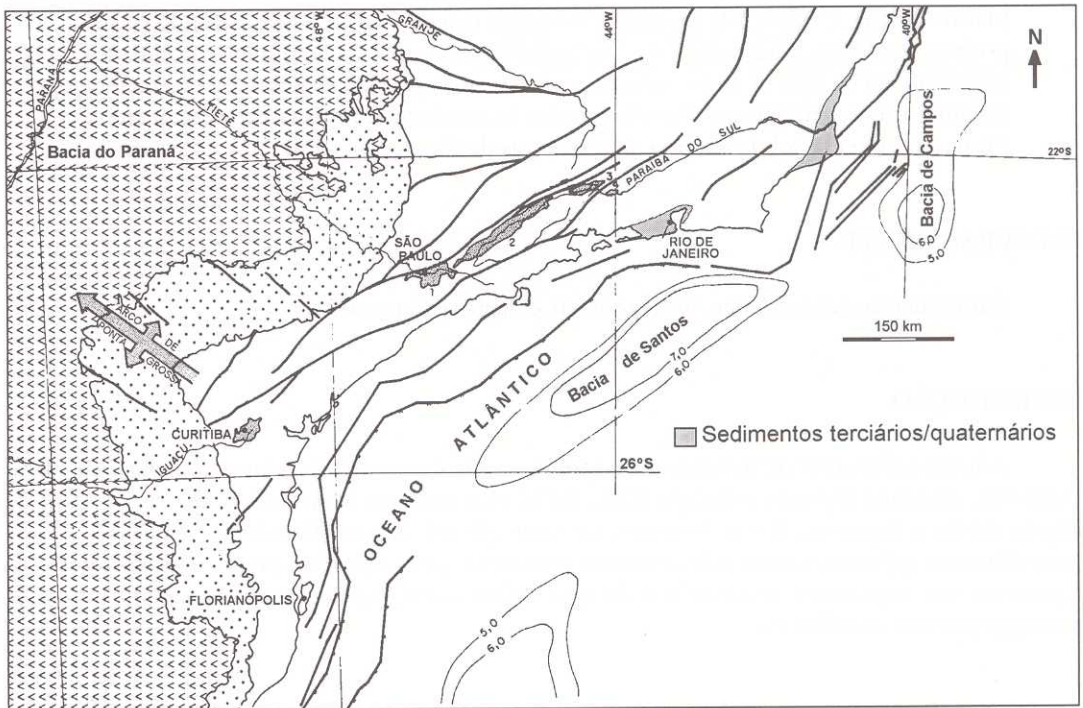


Figura 1 – Estruturação regional do Rift Continental do Sudeste do Brasil (modificado de Melo *et al.*, 1985).

O preenchimento sedimentar da bacia de Resende é composto por sedimentos terrígenos terciários recobertos por depósitos quaternários colúviais, colúvio-aluviais e de baixos terraços (Riccomini, 1989; Salvador & Riccomini, 1995 – figura 2).

A Formação Resende, com espessura aproximada de 250 m com base nos dados de poços tubulares profundos, é a principal unidade estratigráfica da bacia. Caracteriza-se por uma sucessão de camadas tabulares, predominantemente arenosas, intercaladas com camadas siltico-argilosas, depositadas em sistema fluvial entrelaçado, e depósitos rudáceos associados a leques aluviais que ocorrem principalmente junto à borda norte da bacia. A seqüência deposicional terciária é completada por uma sucessão de arenitos e pelitos depositados em um sistema fluvial meandrante, com espessura estimada em torno de 20m com base em dados de afloramento (Ramos, 2003). Riccomini (1989) denominou estes depósitos de Formação São Paulo, enquanto Ramos (2003) resgata o termo Formação Floriano, proposto por Amador (1975).

Ramos (1997) reconhece uma sucessão terciária mais antiga do que a Formação Resende, denominando-a de Formação Quatis, composta por sucessões fluviais representadas por conglomerados e arenitos que aparecem em discordância litológica sobre o embasamento.

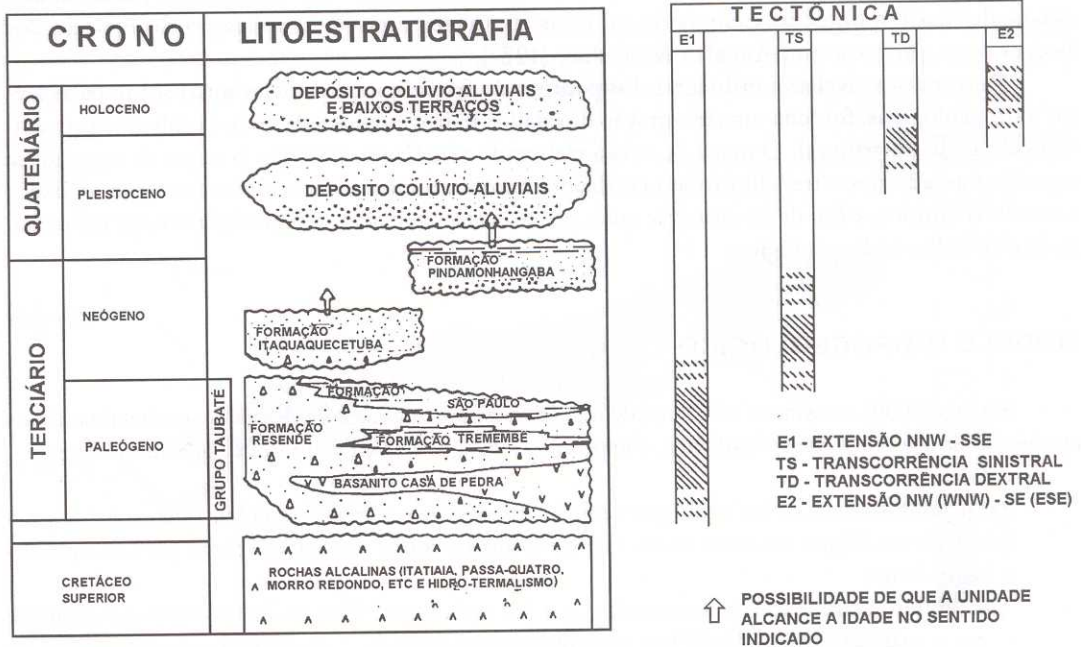


Figura 2 - Coluna estratigráfica das bacias do Rift Continental do Sudeste do Brasil e as fases tectônicas associadas (Riccomini, 1989). Na área da bacia de Resende, ocorrem os depósitos terciários da Formação Resende e Formação São Paulo (ou Floriano).

Riccomini (1989) identificou quatro fases tectônicas para as bacias do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil: a primeira fase, que originou a depressão inicial no Eoceno-Oligoceno, estaria relacionada a um campo de esforços extensionais NNW-SSE (E1) gerado a partir do basculamento termomecânico da bacia de Santos; a segunda fase, ocorrida ao final do Oligoceno, seria caracterizada por um binário de transcorrência sinistral (TS) de direção E-W; a terceira fase, pleistocênica-holocênica, corresponde a um binário de transcorrência dextral (TD) de direção E-W e quarta fase é caracterizada por um movimento distensivo de direção geral NW (WNW)-SE (ESE) (E2) ocorridos no Holoceno. Salvador & Riccomini (1995), desenvolvendo um trabalho na região do Alto

Estrutural de Queluz (RJ/SP), que individualiza a bacia de Resende da bacia de Taubaté, reconhecem ainda uma quinta e última fase tectônica para região, caracterizada por um regime compressivo E-W, associado ao campo de tensões atualmente prevalecente.

MÉTODOS

Com o objetivo de avaliar a distribuição dos fraturamentos ao longo da bacia, foi inicialmente realizado o mapa de lineamentos topográficos a partir da análise da rede de drenagem, na escala 1:100.000 a partir da análise de cartas topográficas na escala 1:50.000, em base digital. Os lineamentos identificados foram classificados, segundo sua direção, contabilizados e, posteriormente, tratados através da confecção de rosetas de frequência.

Medições sistemáticas de falhas e juntas foram feitas a partir de levantamentos estratigráficos em campo, procurando-se individualizar padrões de fraturamento segundo as unidades estratigráficas, como forma de estabelecer uma cronologia dos eventos tectônicos. Após a coleta dos dados, foi realizada uma classificação prévia das estruturas quanto ao tipo de falha, orientação e unidade estratigráfica afetada. O tratamento dos dados estruturais enfatizou o estudo dos pares falhas/estrias, de modo a obter os campos de esforços tectônicos através da aplicação do método dos diedros retos, proposto por Angelier & Mechler (1977).

Buscando-se avaliar a influência dos padrões de fraturamento neotectônico sobre os aspectos hidrogeológicos, foi feita uma integração dos dados hidrogeológicos com os resultados provenientes da análise estrutural. O mapa de vazão elaborado por Castro (2000) e o mapa de capacidade específica gerado neste trabalho foram confrontados com o mapa de lineamentos e com os dados estruturais obtidos, a fim de se observar quais possíveis traços estruturais poderiam estar influenciando este índice hidrogeológico.

MODELO HIDROGEOLÓGICO

Castro (2000) reconhece três tipos de aquíferos na área da bacia de Resende, caracterizando-os em função de sua constituição litológica, composição hidroquímica e dinâmica da água subterrânea:

- (a) o aquífero livre, constituído por sedimentos arenosos e areno-argilosos quaternários, possui níveis d'água bastante rasos que contribuem como fonte de recarga para o aquífero subjacente;
- (b) aquífero sedimentar multicamadas, que é o mais importante da bacia, tanto pelo fato de ser o mais explorado como por sua abrangência espacial, é composto pelos depósitos da Formação Floriano e, predominantemente pelos depósitos da Formação Resende. Este aquífero é caracterizado como semiconfinado a confinado e as suas principais fontes de recarga são: reduzida infiltração direta pelas águas da chuva, infiltração a partir do aquífero livre, contribuição do rio Paraíba do Sul e contribuição das rochas cristalinas, que, através de fraturas, recarregam o aquífero multicamadas com a água captada fora da bacia.
- (c) o aquífero cristalino ou fissural, composto por rochas do embasamento pré-cambriano e por rochas alcalinas mesozóicas.

O mapa de vazão do aquífero sedimentar multicamadas (figura 3), produzido por Castro (2000), mostra que os valores variam muito, podendo ir de 0,8 a 53 m³/h. Esta autora associa a concentração dos valores elevados de vazão à área de maior espessura de sedimentos na bacia, verificando ainda uma tendência desses valores ocorrerem concentrados segundo um *trend* NE, no setor leste da bacia.

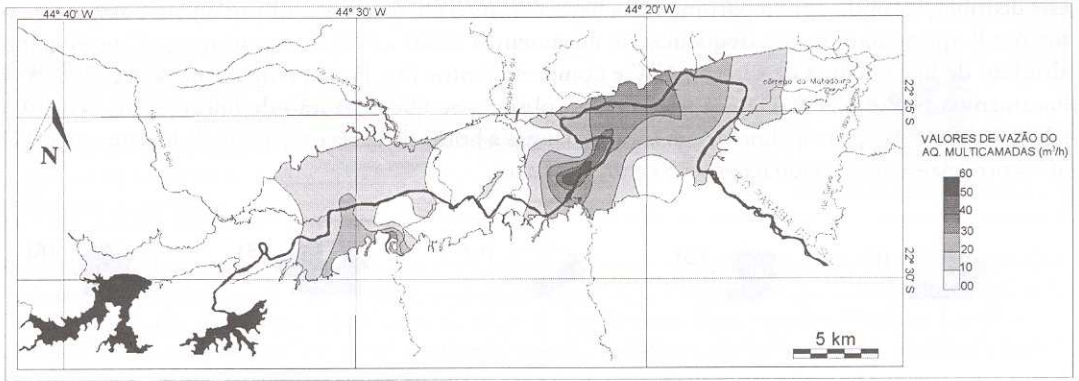


Figura 3 – Mapa de distribuição de vazões dos poços que captam água no aquífero multicamadas (Castro, 2000)

De acordo com o mapa de capacidade específica dos poços que captam água no aquífero multicamadas (figura 4), esses valores variam de 0,02 a 2,72 $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$, indicando que o potencial hidrogeológico deste aquífero não se distribui de forma homogênea ao longo da bacia. Ressalta-se ainda que as áreas com valores mais elevados de capacidades específica coincidem com as áreas de maior vazão do aquífero e, sendo assim, os poços plotados nessas regiões tendem a ser mais produtivos.

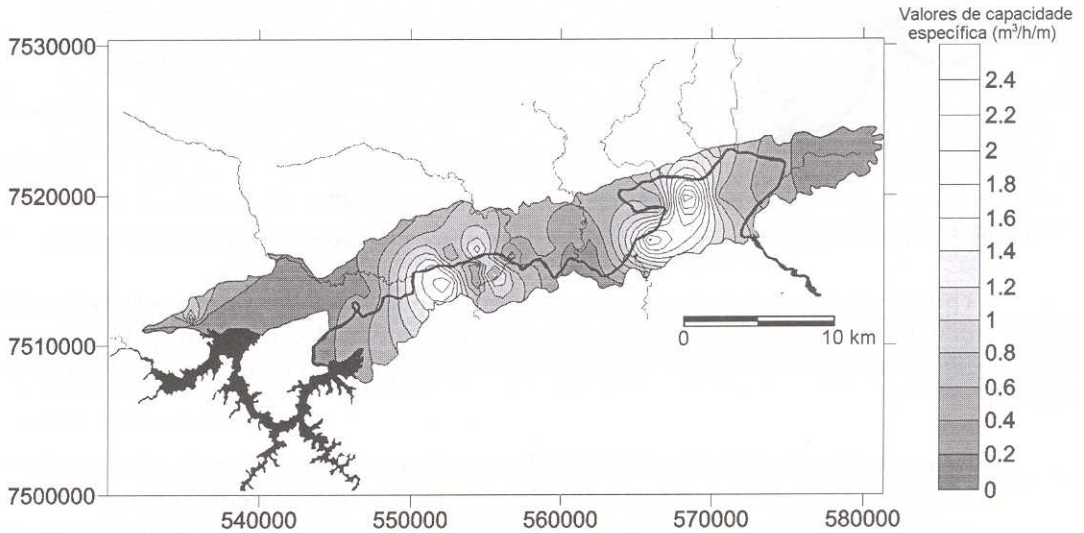


Figura 4 - Mapa de capacidade específica dos poços que captam água no aquífero sedimentar multicamadas.

ANÁLISE NEOTECTÔNICA

A investigação neotectônica realizada tomou como base inicial a ordenação estratigráfica dos depósitos cenozóicos, tendo como referência a coluna estratigráfica apresentada por Riccomini (1989). Estes foram subdivididos em três unidades principais, duas de idade terciária, correspondendo às formações Resende e Floriano (ou São Paulo), além de uma sucessão de depósitos colúvio-aluviais quaternários.

A análise dos padrões de fraturamento neotectônicos foi iniciada pela avaliação da distribuição de lineamentos, reconhecidos ao longo da bacia e adjacências (figura 4). Tomando-se como referência

esta distribuição, pôde-se compartimentar a bacia em cinco compartimentos principais: compartimentos A e B apresentam maior freqüência de lineamentos NNE a NE; compartimento C predomínio absoluto de lineamentos de direção NW e compartimentos D e E apresentam maior freqüência de lineamentos NW e NNW. De um modo geral, observa-se que o padrão de lineamentos NE-SW e ENE-WSW ocorre principalmente em áreas próximas à borda da bacia e o padrão de lineamentos NW-SE ocorre mais concentrado na porção central da bacia.

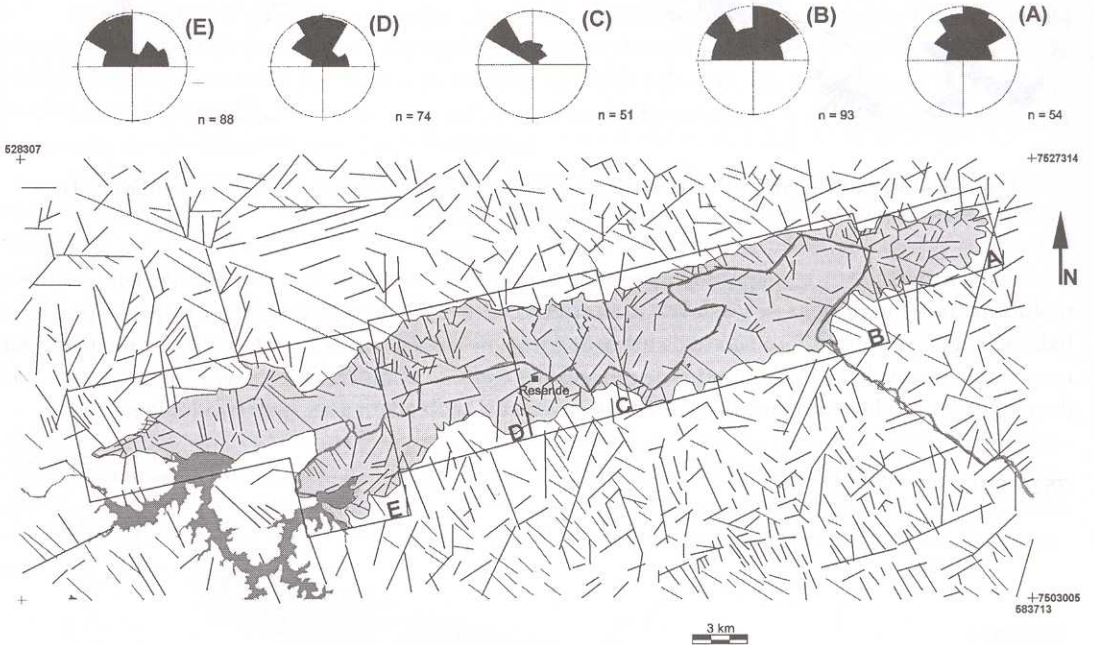


Figura 5 – Mapa de lineamentos da bacia de Resende e adjacências, com base na rede de drenagem.

Os padrões de lineamentos estruturais reconhecidos podem ser diretamente correlacionados às estruturas tectônicas observadas em campo. Foram identificados três principais estilos de fraturamento tectônicos afetando os depósitos terciários e quaternários da bacia sedimentar de Resende:

- **Falhas de direção NE-SW e ENE-WSW, normais e normais sinistrais**, afetam os depósitos terciários da bacia e estão relacionadas a um **regime transcorrente sinistral E-W**. Na seção estratigráfica apresentada na figura 6, observa-se que esse padrão de fraturamento deforma os sedimentos terciários da Formação Resende, mas não afeta os sedimentos quaternários.
- **Falhas NNW-SSE e N-S, normais e normais sinistrais, e falhas NW-SE, normais dextrais**, que afetam os depósitos terciários e pleistocênicos da bacia, são compatíveis com um **regime transcorrente dextral E-W**. Na seção estratigráfica apresentada na figura 7, podem ser observados falhamentos normais e estruturas do tipo em flor afetando os depósitos pleistocênicos (cascalheira) que recobrem os sedimentos da Formação Floriano ou São Paulo.
- **Falhas NE-SW, normais**, afetam os depósitos terciários, pleistocênicos e holocênicos da bacia e indicam um **regime extensional NW-SE**. Também na seção estratigráfica apresentada na figura 7 observa-se esse padrão de falhamento afetando a cobertura sedimentar quaternária.

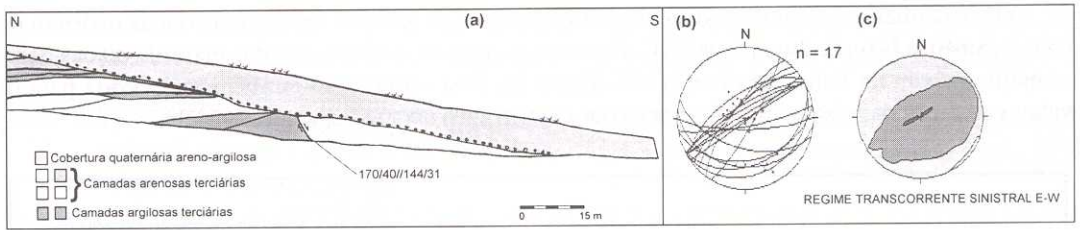


Figura 6 – (a) Reconstituição estratigráfica do afloramento localizado na estrada para o aterro sanitário de Quatis, a aproximadamente 1 km do viaduto da Ferrovia do Aço. Observa-se uma falha de direção ENE-WSW afetando os depósitos da Formação Resende. (b) Projeção estereográfica (Schmidt-Lambert, hemisfério inferior) dos planos de falhas normais, normais sinistrais e sinistrais normais medidos e (c) o resultado da aplicação do método dos diedros retos.

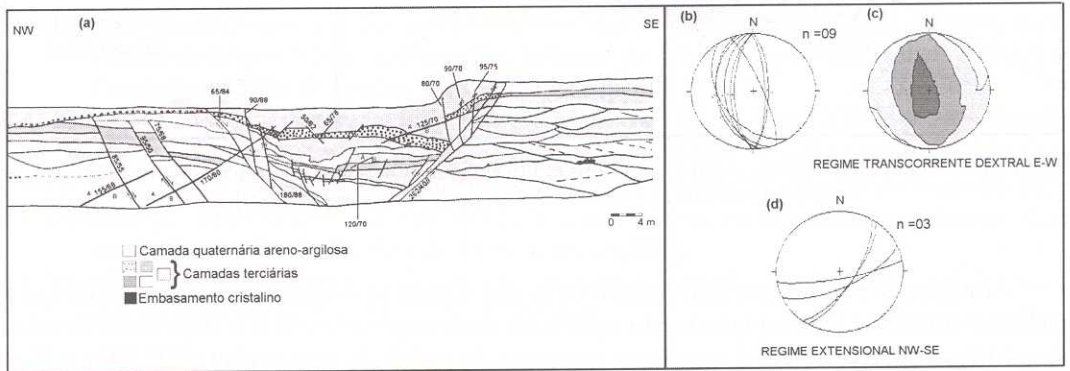


Figura 7 – (a) Reconstituição estratigráfica dos depósitos da Formação Floriano, localizados ao lado da Rádio Agulhas Negras AM/Real FM. (b) Projeção estereográfica (Schmidt-Lambert, hemisfério inferior) e o resultado da aplicação do método dos diedros reto (c) dos planos de falhas NW-SE, normais, normais sinistrais, sinistrais normais e normais dextrais. (d) Projeção estereográfica (Schmidt-Lambert, hemisfério inferior) dos planos de falhas normais NE-SW.

Com base nos padrões de fraturamento que afetam os depósitos cenozóicos da bacia sedimentar de Resende, pôde-se reconhecer três fases tectônicas passíveis de correlação com os eventos evolutivos do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB), segundo Riccomini (1989) e Salvador & Riccomini (1995):

- o evento tectônico mais antigo que pôde ser reconhecido está associado a uma fase de transcorrência sinistral E-W, relacionando-se à segunda fase tectônica do RCSB;
- o segundo evento tectônico identificado afeta os sedimentos terciários e pleistocênicos da bacia, relacionando-se a um regime transcorrente dextral E-W. Corresponde à terceira fase tectônica reconhecida para o RCSB;
- o evento tectônico mais recente, que afeta os depósitos terciários, pleistocênicos e holocênicos da bacia de Resende, aponta um regime extensional NW-SE, correlacionável à quarta fase tectônica do RCSB.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Comparando-se o mapa de vazão do aquífero sedimentar multicamadas (Castro, 2000) com o mapa de lineamentos, observou-se que os valores mais elevados ocorrem nos compartimentos B e D da bacia, que são os compartimentos que apresentam maior espessura de sedimentos (Escobar *et*

al., 2000) e também a maior densidade de fraturamentos. As maiores vazões registradas ocorrem no compartimento B segundo um *trend* NE. Destaca-se que esse alinhamento das maiores vazões ocorre muito próximo a falhas de direção NE (figura 8). Esta observação também se aplica para os valores de capacidade específica dos poços que captam água no aquífero multicamadas.

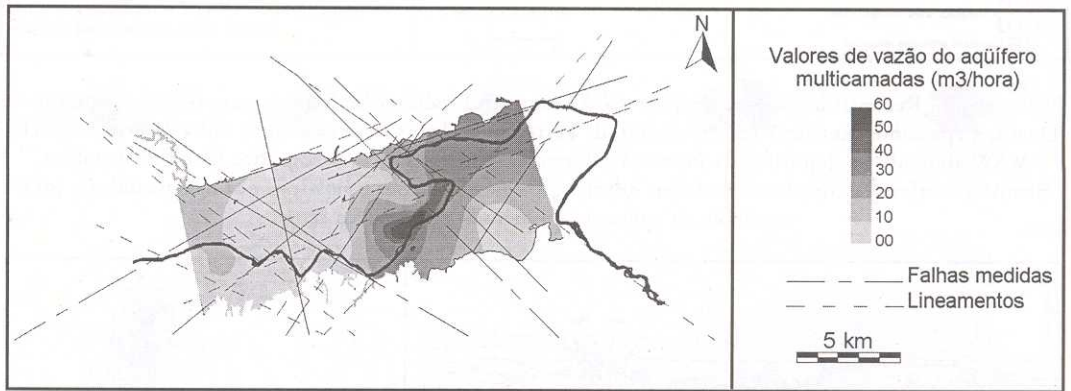


Figura 8 – Detalhe do mapa de vazão do aquífero multicamadas mostrando o compartimento B sobreposto ao mapa de falhas da bacia de Resende (Albuquerque, 2001).

Integrando-se os dados estruturais com os dados hidrogeológicos, pôde-se constatar que as melhores condições para exploração são registradas nos compartimentos B e D da bacia. Acredita-se que isto esteja relacionado à ocorrência expressiva do padrão de fraturamento NE-SW e NW-SE nestes compartimentos, o que ocasionaria um aumento da conectividade hidráulica do aquífero.

Diante do quadro estrutural e hidrogeológico analisado, considera-se que sejam as estruturas geradas pelo evento extensional NW-SE aquelas que tenham o principal papel no controle dos melhores índices hidrogeológicos, por se tratarem de estruturas eminentemente distensivas e de idade recente (holocênicas). Isto parece ser confirmado quando são considerados os dados hidrogeológicos no aquífero cristalino, onde o potencial hídrico está diretamente associado ao fraturamento: os valores mais elevados de capacidade específica neste caso estão associados a estruturas NE-SW.

Os resultados apresentados neste trabalho ressaltam a importância dos estudos neotectônicos para o refinamento de modelos hidrogeológicos em situações geológicas semelhantes às da bacia de Resende, ou seja, para o estudo de aquíferos sedimentares em bacias com maior complexidade tectônica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, A.P.B. 2001. Análise dos Padrões de Fraturamento Neotectônico e a sua possível Aplicação na Avaliação Hidrogeológica da Bacia Sedimentar de Resende (RJ). Instituto de Geociências, Universidade federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Dissertação de graduação em Geologia, 61p.
- ANGELIER, J. & MECHLER, P. 1977. Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en seismologie: la méthode de dièdres droits. *Bull. Soc. Géol. France*, 7:1309-1318.
- ESCOBAR, I. P., DIAS, F.J.S.S., DIAS, A.C., SOARES, A.J.C. 2000. Crystalline Basement Map of the Resende Basin: a contribution to groundwater investigation using gravimetry. In: Anais do Congresso Internacional de Geologia, 31º, Rio de Janeiro, cd-rom.

- CASTRO, F. G. 2000. *Caracterização Hidrogeológica e Hidroquímica da Bacia Sedimentar de Resende (RJ)*. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 130p.
- HASUI, Y.; ALMEIDA, F.F.M.; MIOTO, J.A.; MELO, M.S. 1982. Geologia, tectônica, geomorfologia e sismologia regionais de interesse às usinas nucleares da Praia de Itaorna. São Paulo, IPT. 159p. (IPT. Monografias, 6).
- MACHADO FILHO, L.; RIBEIRO, M.W.; GONZALEZ, S.R.; SCHENINI, C.A.; SANTOS NETO, A.; PALMEIRA, R.G.B.; PIRES, J.L.; TEIXEIRA, W. & CASTRO, H.E.F. 1983. In: Projeto RADAMBRASIL. Folhas SF-23/24, Rio de Janeiro/Vitória, 1. Geologia, Rio de Janeiro, MME, p.27-304.
- MELO, M.S.; RICCOMINI, C.; HASUI, Y.; ALMEIDA, F.F.M. de; COIMBRA, A.M. 1985. Geologia e Evolução do Sistema de Bacias Tafrogênicas Continentais do Sudeste do Brasil. *Rev. bras. Geoci.*, 15 (3): 193-201.
- RAMOS, R.R.C. 2003. *Sistemas Aluviais Terciários da Bacia de Resende, Estado do Rio de Janeiro, Brasil: Análise de Fácies e Revisão Estratigráfica*. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 256p.
- RAMOS, R.R.C. 1997. *Estratigrafia da Sucessão Sedimentar Terciária da Bacia de Resende, entre Resende e Quatis (RJ), com Ênfase na Caracterização das Litofácies, Ciclicidade e Paleocorrentes*. Instituto de Geociências, Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado. 209p.
- RICCOMINI, C. 1989. *O Rift Continental do Sudeste do Brasil*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 256p.
- SALVADOR, E.D. & RICCOMINI, C. 1995. Neotectônica da Região do Alto Estrutural de Queluz (SP-RJ, Brasil). *Rev. bras. Geoci.*, 25 (3):151-164.