

O CONDICIONAMENTO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NO CRISTALINO FRATURADO: REAVALIAÇÃO DA ABORDAGEM ESTRUTURAL

Emanuel Ferraz Jardim de Sá¹

Abstract - Hydrogeological prospecting in NE Brazil and other crystalline terrains is based on a structural framework which demands a significant update. In this kind of terrain, water percolation and accumulation is controlled by fractures and other discontinuities. In order to build a new conceptual model, the present contribution discusses a number of topics such as fracture geometry (including their aperture and connectivity) and chronology, as well as the crustal level of the brittle deformation, have to be placed in a regional framework while being evaluated during water well location. Different fracture systems may be present at each place, aging from the end of the Precambrian (late in the Brasiliano orogeny) to the Juro-Cretaceous rifting and continental drift, besides reactivations during Cenozoic times. As exploitable water migration and accumulation is a very young process, in due course in the uppermost crustal levels, neotectonic stress fields certainly exert an important control; these fields can be estimated on the basis of structural and seismological data, *in situ* measurements and on the morphotectonic evolution. Weathering processes can also influence “opening” of fractures and other rock discontinuities, such as foliation planes, sometimes in an anisotropic pattern which reflects a neotectonic control .

These concepts imply reformulations on the present working methodology and point to new research trends. This contribution emphasizes simple concepts and techniques, able to be incorporated in the hydrogeological prospecting across semi-arid regions.

Palavras-chave - aquíferos fissurados, critérios estruturais, reavaliação metodológica

¹ Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG), Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN); Pesquisador do CNPq; Campus 59.072-970 Natal RN; fone (84)215-3831, fax (84)215-3806, e-mail: emanuel@geologia.ufrn.br. Apoio financeiro PADCT3.

INTRODUÇÃO

Décadas de prospecção hidrogeológica no Nordeste do Brasil e em outros terrenos cristalinos conduziram a um arcabouço teórico-metodológico que é amplamente utilizado para a locação de poços, por parte de profissionais autônomos, empresas privadas e companhias governamentais. É amplamente reconhecido que, neste tipo de terreno, a percolação e acumulação de água é controlada por fraturas e outras descontinuidades no maciço rochoso, o que demanda dos profissionais uma base de conhecimentos em Geologia Estrutural. Embora trabalhados e expostos com eficiência, em especial na região Nordeste do Brasil (ver sínteses de Siqueira 1967; Costa 1965; Costa & Silva 1997), os conceitos estruturais ainda em voga no meio profissional datam das décadas de 1950-60; muito pouca pesquisa foi feita no país, visando a sua atualização.

A proposta deste trabalho é efetuar uma análise crítica dos conceitos clássicos, destacando problemas que ressaltam de imediato. Em seguida, serão discutidos conceitos modernos de Geologia Estrutural e evolução tectônica dos continentes, como base para orientar uma reformulação da metodologia e apontar linhas de pesquisa para abordar o problema da água subterrânea no cristalino. Dois aspectos são considerados básicos na linha de pensamento aqui explorada: (i) o enorme progresso ocorrido na compreensão dos processos de deformação ao longo das quatro últimas décadas, incluindo o contexto tectônico, os parâmetros ambientais e relações cronológicas, o que permite explicar, de modo adequado, situações sugeridas ou constatadas pelas estatísticas de locação; (ii) o papel de controle que deve ser exercido pelos sistemas de tensões neotectônicas, atuando em condições superficiais ou muito rasas na crosta, em consonância com o fato de que a migração e acumulação da água explotável é um processo geologicamente muito recente, em pleno curso.

Faz parte da proposta uma ênfase em métodos e conceitos simples, de aplicação direta e de baixo custo; abordagens sofisticadas e de custo elevado teriam escassa utilidade para a prática hidrogeológica em regiões semi-áridas e economicamente carentes. O tema é filiado a um projeto de pesquisa financiado pelo programa PADCT3, com apoio de outras entidades e conduzido por professores e pós-graduandos do Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

CONCEITOS E METODOLOGIAS CLÁSSICOS

O termo “clássico” designa a abordagem atualmente em voga, nesta e em outras regiões geologicamente similares, no país e em outros continentes. Como fontes preferenciais de informação, remetemos o leitor aos artigos acima citados (em especial o de Costa & Silva 1997).

Além de outros fatores, que não serão objeto de consideração no presente, podemos dizer que existe consenso sobre a importância das estruturas frágeis na criação de espaços nas rochas e, conseqüentemente, para a acumulação de reservas de água no cristalino; falamos aqui de *fraturas*, de um modo geral, englobando *juntas* e *falhas* (ou *zonas de falhas*), normalmente com dimensões (comprimento) que variam de métricas a dezenas de quilômetros. Dois outros tipos de estruturas ainda devem ser consideradas, pela possibilidade de proverem espaços abertos: a) diques, filões e contatos entre litologias distintas, mecanicamente contrastantes; b) planos de foliação e zonas miloníticas. Embora originalmente “fechadas”, essas estruturas podem ser “abertas” quando submetidas a processos de reativação, intemperismo e descompressão, próximo à superfície da Terra.

Em função de sua dimensão, o reconhecimento de fraturas e outras estruturas pode envolver a análise de imagens de satélite/fotografias aéreas convencionais, e/ou o estudo de afloramentos. A fotointerpretação é direcionada à localização de estruturas favoráveis - em especial, zonas de falhas ou fraturas, bem como a estabelecer seu relacionamento com possíveis fontes de recarga - coberturas e a rede de drenagem. Siqueira (1963, *in* Siqueira 1967) cunhou o conceito de *riacho-fenda*, quando uma drenagem teria seu curso controlado por uma fratura/zona de fratura, e condições de recarga periodicamente asseguradas. O conceito é amplamente utilizado na região, condicionando, até mesmo, a prática da fotointerpretação (fraturas são identificadas pelos trechos retilíneos e “cotovelos” ao longo da drenagem). Em campo, os afloramentos adjacentes devem mostrar uma boa frequência de fraturas orientadas segundo a direção fotointerpretada - o segmento retilíneo de um riacho. A reavaliação de casos de locação de poços, em andamento no âmbito desta pesquisa, mostra que a correlação de dados estruturais entre essas diferentes escalas não é uma tarefa simples (Coriolano *et al.* 2000 e neste Congresso). Finalmente, existe firme consenso, nesta região e em similares africanas (Wright & Burgess 1992) de que, na prática, a profundidade máxima para a ocorrência de fraturas abertas, com água, não ultrapassa a faixa de 60 a 100 m (segundo diferentes avaliações). Na verdade, a ocorrência de água minando a partir de fraturas, em galerias

mineiras profundas, ou as fontes termais que drenam água desde profundidades de 1 a 3 km (Berthier 1982), alertam que aquele valor é mínimo e condicionado a aspectos técnico-econômicos da sondagem.

Um ponto crítico na avaliação de terreno reside na detecção das fraturas “abertas”, mais propícias ao fluxo e acumulação de água. Neste caso, a abordagem clássica utiliza critérios inadequados e confronta seriamente com a evolução tectônica regional, incluindo a cronologia e condições crustais da deformação. Muitas vezes, os critérios propostos estão baseados em feições e estruturas relacionadas a uma etapa antiga e profunda da evolução crustal (no caso do Nordeste brasileiro, a deformação principal do terreno ocorreu, pelo menos, no final do Precambriano, normalmente em nível crustal na faixa entre 8 a 15 km de profundidade !), o que parece injustificável de vez que o fluxo e acúmulo da água normalmente explotável é um processo geologicamente recente e superficial (máximo de 0,5 a 1 km ?). Quanto às estruturas frágeis, é necessário considerar a ocorrência de sucessivos eventos de deformação, desde o final do Precambriano até os tempos atuais. A rede de fraturas presente nos terrenos cristalinos tem assim uma cronologia complexa, sendo em sua maior parte herdada dos eventos antigos, que igualmente não possuem relação direta com o campo de tensões atual. Uma revisão mais detalhada da evolução tectônica regional e suas implicações para a Hidrogeologia do cristalino no Nordeste do Brasil serão objeto de uma contribuição em paralelo neste Congresso.

AS BASES PARA UMA REVISÃO METODOLÓGICA

Nas duas últimas décadas, o tema proposto foi abordado com crescente ênfase, especialmente em países do hemisfério norte, a partir de um número de contribuições multidisciplinares. Muitas dessas contribuições (ver revisão em Odling 1998, p.ex.) foram impulsionadas não apenas pela procura de água no cristalino, mas exatamente pelas condições opostas - rochas cristalinas “sêcas”, impermeáveis, requeridas para o armazenamento de lixo nuclear. A indústria do petróleo somou outra importante parcela de contribuições, dedicada aos problemas de porosidade e permeabilidade de reservatórios. A esses enfoques mais específicos é acrescida a expansão de conhecimentos na Geologia Estrutural, na Neotectônica e na evolução da crosta continental, de um modo mais amplo. Alguns dos tópicos desenvolvidos constituem temas de ponta, cuja aplicabilidade na prática de locação ainda não está à vista. Em consonância ao nosso objetivo, vamos nos concentrar, nesta seção, a introduzir tópicos

que nos oferecem soluções e perspectivas no sentido de otimizar a prospecção rotineira de água subterrânea no cristalino. Subsequentemente, abordaremos algumas implicações metodológicas desses conhecimentos, bem como o rumo que eles ditam para futuras pesquisas, visando consolidar e aperfeiçoar um novo modelo conceitual.

REAVLIAÇÃO DE CONCEITOS DE GEOLOGIA ESTRUTURAL.

A hidrogeologia do cristalino demanda uma renovação de conhecimentos, incorporando os modelos 3-D da geometria de sistemas de juntas e zonas de falhas, sua cinemática e o funcionamento mecanicamente integrado de sistemas complexos.

As condições externas (P,T,fluidos) que governam a deformação de minerais e rochas, ativando diferentes mecanismos, são agora bem conhecidas; conseqüentemente, o nível crustal de desenvolvimento das estruturas pode ser inferido com base nos marcadores cinemáticos impressos nas rochas. Adicionando relações de interseção mútua e sua assinatura em diferentes unidades estratigráficas, é possível elaborar uma seqüência cronológica da deformação, o que permite avaliar adequadamente o papel de cada sistema/geração de fraturas (p.ex.) no condicionamento da água subterrânea ou de outros bens econômicos.

Levando em conta que o processo de percolação e acumulação de água é geologicamente muito recente e superficial, não é possível conceber um relacionamento direto (exceto indiretamente, pela influência no intemperismo; ver adiante) com as estruturas dúcteis (dobras, foliações, zonas miloníticas) precambrianas, originadas em ambiente crustal profundo. Nesse mesmo sentido, classificações de juntas de acordo com a sua orientação em relação às estruturas dúcteis regionais são de escassa utilidade prática.

O CONTEXTO TECTÔNICO REGIONAL E SUAS IMPLICAÇÕES.

Em cada região da crosta continental, a deformação frágil pode ser caracterizada em termos geométricos e cinemáticos, compondo sucessivos eventos que podem ser alocados nos seus respectivos nichos no espaço (profundidade crustal) e (com auxílio de métodos cronoestratigráficos) no tempo. A integração de dados através de grandes regiões permite relacionar esses episódios a processos nas margens ou no interior de placas, em arranjos pretéritos (neoproterozóicos, mesozóicos) ou atuais, aos quais correspondem sistemas de tensões específicos.

Os diversos conjuntos de fraturas compõem uma trama que, a princípio, pode ter um papel apenas “passivo”, no sentido de prover espaços abertos para o movimento e acúmulo de água, em especial quando o terreno é soerguido e descomprimido. A maior ou menor “abertura” (e conseqüente favorabilidade) de cada conjunto de fraturas, na sua posição atual na crosta, não tem relação direta, *a priori*, com sua cinemática original, vigente em épocas antigas. Neste sentido e no outro extremo da escala de tempo geológico, deve ser creditada maior importância às estruturas mais jovens, aquelas que possam retratar os campos de tensões “neotectônicos”, ou de idade holocênica (ver o próximo subitem).

Os eventos de deformação frágil estão superimpostos às estruturas dúcteis do substrato cristalino, sendo que o reconhecimento dessa trama profunda, em geral creditada ao último evento orogênico regional, é também importante, embora não condicione diretamente as ocorrências de água subterrânea.

No Nordeste do Brasil, o último evento de deformação dúctil foi o Ciclo Brasileiro, ca. 600±100 Ma atrás. Com o soergimento regional e exumação do terreno, já no Cambro-Ordoviciano, estruturas frágeis tardi-brasilianas foram superpostas. A tectônica no restante do Paleozóico é pouco conhecida. A partir do Jurássico superior e até o final do Cretáceo, o processo de separação continental e criação do Oceano Atlântico imprimiu um outro conjunto de fraturas, em níveis crustais mais rasos, sendo que as estruturas mais tardias deste regime são ainda pouco conhecidas. A partir do Terciário, o regime tectônico vigente deveria ter sido similar ao atual, que tipifica as margens continentais passivas. Todavia, no Terciário superior, registra-se a interferência de um outro elemento tectônico, um domeamento associado a magmatismo intraplaca, responsável pelo soergimento do Planalto da Borborema e acompanhado por estruturas específicas. Todo esse arcabouço está ainda em processo de reconhecimento e detalhamento; versões preliminares da evolução tectônica fanerozóica podem ser encontradas em Matos (1992) e Jardim de Sá *et al.* (1999), entre outros, sendo também objeto de uma contribuição paralela a este Congresso.

NEOTECTÔNICA E A EVOLUÇÃO CRUSTAL HOLOCÊNICA.

Várias investigações confirmam o papel do campo de tensões atual (Carlsson & Olsson 1980/81, Banks *et al.* 1996, p.ex.) em ditar um ou outro comportamento (“aberto” ou “fechado”) das fraturas, com correspondente implicação na sua capacidade hídrica.

A definição temporal da neotectônica é variável, de autor e entre regiões, mas de um modo geral englobaria o período de tempo durante o qual o regime tectônico atual esteve vigente. No Nordeste do Brasil, este lapso cronológico certamente engloba o Holoceno (o que é suficiente para as nossas necessidades de prospectar água no cristalino !), sem detrimento de sua extensão a uma época mais antiga (Mioceno ?). A definição de campos de tensões com base nos dados sismológicos (a *sismotectônica*) ou de medidas diretas em poços, como disponível no Nordeste do Brasil (Ferreira *et al.* 1998), são ferramentas das mais importantes para identificar os sistemas de tensões atuais. No Nordeste setentrional, os vários tipos de dados disponíveis definem este campo de tensões em termos de compressão (σ_1) E-W e extensão (σ_3) N-S.

Dados morfotectônicos também podem ser utilizados para conhecer os sistemas de tensões recentes (Nascimento Silva & Jardim de Sá 2000 e neste Congresso). Neste sentido, a neotectônica também interfere e se reflete na rede de drenagem, nos blocos soerguidos e rebaixados e, conseqüentemente, nos processos de erosão, intemperismo e deposição de coberturas, todos os quais são fatores que influenciam no processo de locação de poços.

A deformação neotectônica vai gerar estruturas novas em marcadores (rochas, unidades litoestratigráficas) recentes ou mesmo neoterciários (a Formação Barreiras, p.ex.). No cristalino precambriano, a geração de novas fraturas parece ser bastante restrita ao nível da superfície atual, como no caso da Falha Sísmica de Samambaia, em João Câmara, RN; Coriolano *et al.* 1997). Uma situação mais comum, no embasamento cristalino, será a reativação da trama de fraturas pré-existente (cambrianas, jurocretáceas, terciárias), como já foi demonstrado em sítios localizados, com auxílio de marcadores muito rasos (precipitados minerais ou preenchimentos por cascalho; Coriolano *et al.* 1997; Menezes & Jardim de Sá 1999). O tipo de reativação em cada fratura será função da sua orientação em relação ao elipsóide de tensões local; se não conhecido, este último pode ser estimado a partir do sistema de tensões regionalmente ativo.

IMPLICAÇÕES PARA A HIDROGEOLOGIA DO CRISTALINO

A partir do último parágrafo, esta seção de implicações deve iniciar considerando o modo de reativação neotectônica da trama de fraturas pré-existentes. Vários trabalhos (Carlsson & Olsson 1980/81, Banks *et al.* 1996 e outros) reportam resultados consistentes, nos quais as fraturas orientadas em baixo ângulo (subparalelas) ao eixo de

compressão principal (ou extensão mínima) σ_1 são aquelas mais “abertas” (funcionam como juntas de extensão) e, assim, com maior potencial hídrico; em situação oposta, situam-se as fraturas em forte ângulo com σ_1 (corresponderiam a fraturas “fechadas”, com forte componente de compressão), podendo-se visualizar as várias situações “intermediárias” possíveis, equivalentes a fraturas de cisalhamento ou fraturas híbridas. Esta regra oferece, pelo menos à primeira vista, uma relação simples, fundamentada e útil, para avaliação do potencial hídrico das fraturas no cristalino. Também fica claro a inexistência de uma relação direta entre fraturas precambrianas ou cretáceas (juntas de extensão preenchidas por veios ácidos, de quartzo ou diabásio), e seu comportamento atual “aberto” ou “fechado”.

No Nordeste Setentrional, a coincidência da direção de extensão principal, horizontal NNE a N-S, em tempos tardi-Brasilianos, no Cretáceo inferior-médio e no Holoceno, condicionando o funcionamento de fraturas E-W como estruturas de extensão, mais “abertas”, deve ser considerada como uma ocorrência fortuita. A distinção entre fraturas “antigas” e “jovens” pode ser esboçada com critérios de campo, o que permite uma avaliação mais adequada do seu significado tectônico e potencial hídrico. Em terrenos cristalinos, a determinação dos sistemas de tensões atuais (neotectônicos), em escala local, sofre severas restrições pela escassez de marcadores apropriados; dados morfotectônicos e o exame detalhado do fraturamento (com atenção a estrias argilosas, p.ex.; Coriolano *et al.* 1997; Nascimento Silva & Jardim de Sá 2000), podem fornecer indicações a serem cruzadas com os sistemas de tensões regionais, resultando em aproximações que parecem aceitáveis para a presente finalidade.

A geometria dos sistemas de fraturas deve ser estudada em cada localidade, aqui incluída a sua classificação em conjuntos com idade similar ou distinta, e cinemática própria. O padrão tridimensional resultante tem implicações no tocante às possibilidades de interseções mútuas e conectividade do sistema. Pela multiplicidade e interconexão das fraturas presentes (tipos T, R, R', P), zonas de falhas (embora equiparáveis às fraturas de cisalhamento, teoricamente fechadas) podem ser tão (ou mais) interessantes quanto um sistema de juntas de extensão paralelas, estruturas abertas mas que não necessariamente se interconectam (a não ser através de outros tipos de fraturas). O funcionamento penecontemporâneo de fraturas de cisalhamento conjugadas (ou reativação simultânea de quaisquer fraturas oblíquas entre si) pode resultar na “abertura” alternada de segmentos desses planos de cisalhamento, que de outro modo são usualmente referidos como “fechados”; as aberturas em dominó e *pull-apart* estão

enquadradas nesta categoria. Todos esses aspectos podem ser tratados no trabalho normal de locação, provido um conhecimento adequado da matéria.

A dimensão e forma das fraturas, incluindo o seu provável nível de interseção pela superfície do terreno, também constituem aspectos geométricos importantes (com especial atenção para as zonas de maior porte), a serem avaliados. Usualmente, as fraturas correspondem a uma seção elíptica com eixo maior subhorizontal (Davison 1994; Nicol *et al.* 1996, p.ex.); a depender do nível de erosão atual, uma fratura pode se expor na sua dimensão máxima aproximada (se o corte corresponde à parte mediana), ou pode aumentar (corte no topo) ou diminuir (corte na porção inferior) em profundidade. Em geral, uma avaliação rigorosa deste efeito só pode ser obtida com métodos geofísicos.

Ao longo da trama de fraturas, o escoamento de água obedece a gradientes de pressão, quer sejam de origem (neo)tectônica, de gravidade (mais importante para a água escoando ao longo de fraturas de mergulho médio a forte) e do peso da coluna de rocha (neste caso, com maior importância para o escoamento em fraturas de baixo a médio ângulo); a combinação dessas possibilidades, em cada sítio, pode imprimir uma anisotropia de escoamento ao longo do maciço rochoso. O predomínio dos dois últimos fatores condicionaria linhas de fluxo com forte mergulho (ou forte *rake* no plano de uma fratura) enquanto que, na dominância do primeiro fator, o gradiente criado pode ser subhorizontal (ou de baixo *rake*); num sistema de falhas transcorrentes, p.ex., poderia ser instalado um fluxo a partir dos sítios de transpressão, em direção aos espaços abertos, em transtração. A efetividade desses padrões de fluxo também depende da rugosidade (e tipos de preenchimentos) das várias fraturas em cada local.

Em virtude dos múltiplos fatores envolvidos e a dificuldade de obter parâmetros simples, este último tópico é impraticável de ser abordado num trabalho de campo “normal”.

Um outro aspecto importante a ser reavaliado é a “abertura” de fraturas e outras discontinuidades, mais acentuado próximo à superfície (< 60 m, p.ex.). As explicações que nos parecem convincentes, na literatura (Avias 1982, p.ex.) e nos casos práticos até aqui tratados, incluem: a) o papel do intemperismo, “abrindo” os vários planos de discontinuidade, incluindo foliações proeminentes; b) o alívio de carga (descompressão) com a exumação rápida do terreno (também criando fraturas de baixo ângulo, abertas) e/ou a expansão superficial no topo de amplas áreas dômicas. No Nordeste do Brasil, a pronunciada dissecação do Planalto da Borborema constitui um cenário possível deste fator combinado (caso b). A presença de tensões diferenciais no plano horizontal (o que

pode ser avaliado pelas estruturas observadas em campo) pode introduzir um componente de anisotropia, realçando a “abertura”, por intemperismo e/ou relaxamento, de planos com orientação adequada. Todavia, atuando isoladamente, ambos os fatores acima referidos poderiam “abrir” planos em orientações variadas.

O trabalho de locação de um poço inicia com uma avaliação do terreno através de fotografias aéreas e (mais recentemente) imagens de satélite. No momento, as imagens usualmente comercializadas (e mais baratas) mostram restrições pela pequena escala; por outro lado, elas permitem tratamentos computacionais que podem, ao menos em parte dos casos, realçar condições de maior ou menor umidade ao longo de trechos de riachos. O confronto de lineamentos fotointerpretados com a realidade de terreno em geral fornece resultados discrepantes, a exemplo da discriminação errônea entre fraturas, zonas miloníticas e traços de foliação, o que todavia pode ser sanado com alguma prática do geólogo.

As fraturas são, em princípio, as estruturas de maior potencial hídrico. Todavia, é comum que as zonas miloníticas exibam estágios ou reativações tardias de natureza cataclástica, engendrando uma trama de fraturas com maior favorabilidade; no caso de foliações, os trechos adjacentes a riachos favorecem o intemperismo das rochas e conseqüentemente a “abertura” desses planos. Uma situação mais complexa, a ser tratada caso a caso, é a mudança, por vezes radical, entre o contexto estrutural fotointerpretado (p.ex., uma zona de fratura em fotografia aérea 1:40.000, cuja direção geral tem baixo potencial de “abertura”) e aquele presente na escala dos afloramentos em torno do poço (aonde a trama de fraturamento pode incluir sistemas “abertos”, bem desenvolvidos apenas em escala mesoscópica). Deste modo, o estudo de campo é uma etapa imprescindível na pesquisa de água subterrânea.

NOVOS TRENDS PARA A PESQUISA HIDROGEOLÓGICA NO CRISTALINO

Estudos sofisticados do fraturamento e do fluxo de água nessas estruturas, no campo, em laboratório e mediante modelizações matemáticas, encabeçam o avanço do conhecimento neste ramo da Hidrogeologia (Banks *et al.* 1996, Odling 1998). Em contraste, a proposta deste trabalho é discutir abordagens que possam ser incorporadas ao trabalho prático da locação de poços, que exige rapidez e baixo custo, sem perder de vista as limitações das condições de trabalho e os recursos humanos disponíveis. É necessário que os órgãos e empresas atuantes no setor encontrem os seus caminhos para alavancar progressos numa sistemática cuja base teórica já está francamente

defasada; esperamos que os órgãos governamentais exerçam a liderança que lhes cabe nesse processo. Qualquer avanço metodológico requer a aquisição e prática de novos conhecimentos ou ferramentas de trabalho; não existe exceção a esta regra. É necessário promover a interação entre hidrogeólogos de cristalino, com prática de campo, e os geólogos estruturais que desejam lidar com temas aplicados. O material aqui exposto constitui um conjunto de prognósticos, ou um modelo conceitual simplificado e preliminar, a ser testado em situações práticas - inicialmente locações e poços já executados, para teste e seleção de hipóteses, com posterior consolidação em programas de sondagens piloto, planejadas consoante aos princípios desenvolvidos. Trata-se de um trabalho de longo prazo, iniciado há dois anos no âmbito do nosso Programa de Pesquisa e Pós-Graduação - o PPGG/UFRN. Já constatamos dificuldades insuspeitadas quanto à qualidade/utilidade dos arquivos de dados, o que está reduzindo drasticamente a dimensão estatística de nossa amostragem. A opção alternativa é um estudo detalhado de casos bem documentados/documentáveis, alguns dos quais estão sendo apresentados neste Congresso.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece às discussões, ensinamentos e dados obtidos junto a colegas hidrogeólogos (Dr. Waldir D. Costa & Silva, UFPE e visitante na UFRN; Elmo M. Figueiredo, antiga CDM/RN), pesquisadores (Dr. Walter E. Medeiros) e alunos do PPGG (Carlos Cesar N. Silva, Ana Catarina F. Coriolano, Jesimael A. Souza), nestes últimos anos. O programa PADCT3 concedeu apoio financeiro a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Avias, J.V. (1982) Sur la methodologie d'étude de la decompression superficielle, morphologique et tectonique des milieux fissurés. Application à la recherche et à l'exploitation des aquifères de ces milieux, *in* Colloque Les Milieux Discontinus en Hydrogéologie. Orléans, Documents BRGM, 45: 47-51.
- Banks, D., Odling, N., Skarphagen, H., Rohr-Torp, E. (1996) Permeability and stress in crystalline rocks. *Terra Nova*, 8: 223-235.
- Berthier, F. (1982) Circulations profondes en milieu fissuré de socle. Cas des anomalies minérales du Cézallier (Massif Central Français) - implications, *in* Colloque Les Milieux Discontinus en Hydrogéologie. Orléans, Documents BRGM, 45: 83-95.

- Carlsson, A. & Olsson, T. (1980/81) Caractéristiques de fracture et propriétés hydrauliques d'une région au sous-sol cristallin en Suède (i). Bull. B.R.G.M. 2, III, (3): 215-233.
- Coriolano, A.C.F., Jardim de Sá, E.F., Cowie, P.A., Amaral, C.A. (1997) Estruturas frágeis no substrato da região de João Câmara (RN): correlação com a Falha Sísmica de Samambaia ? XVII Simp. Geol. Nordeste, Fortaleza - CE, Vol., Res. Expandidos: 325-329.
- Coriolano, A.C.F., Jardim de Sá, E.F., Nascimento Silva, C.C. (2000) Structural and neotectonic criteria for location of water wells in semi-arid crystalline terrains: a preliminary approach in the eastern domain of Rio Grande do Norte State, Northeast Brazil. Rev. Bras. Geoc., no prelo.
- Costa, W.D. (1965) Análise dos fatores que influenciam na hidrogeologia do cristalino. Rev. Água Subterrânea, Recife, 1 (4): 14-47.
- Costa & Silva, W.D. & Silva, A.B. (1997) Hidrogeologia dos meios anisotrópicos, in Feitosa, F.A.C. & Manoel Filho, J., eds., Hidrogeologia: conceitos e aplicações. CPRM, LABHID-UFPE: 133-174.
- Davison, I. (1994) Linked fault systems; extensional, strike-slip and contractional, *in* Hancock, P.L., ed., Continental deformation. Pergamon Press: 121-142.
- Ferreira, J.M., Oliveira, R.T., Takeya, M.K., Assumpção, M. (1998) Superposition of local and regional stresses in Northeast Brazil: evidence from focal mechanisms around the Potiguar marginal basin. Geophys. Jour. Int., 134: 341-355.
- Jardim de Sá, E.F., Matos, R.M.D., Morais Neto, J.M., Saadi, A., Pessoa Neto, O.C. (1999) Epirogenia cenozóica na Província Borborema: síntese e discussão sobre os modelos de deformação associados. VII Simp. Nac. Est. Tect., Lençóis, Bol. Res. Exp.: 58 - 61.
- Matos, R. M. D. (1992) The Northeast Brazilian Rift System. Tectonics, 1 (4): 766-791.
- Menezes, M.R.F. & Jardim de Sá, E.F. (1999) Caracterização do fraturamento neotectônico em rochas cristalinas: o exemplo da Grota da Ferveadeira, Santana do Matos, RN. VII Simp. Nac. Est. Tect., Lençóis, Bol. Res. Exp.: 62-66.
- Nascimento Silva, C.C. & Jardim de Sá, E.F. (2000) Fracture chronology and neotectonic control in the location of water wells in crystalline terrains: an example from the Equador region, northeasternmost Brazil. Rev. Bras. Geoc., no prelo.
- Nicol, A.; Watterson, J.; Walsh, J.J.; Childs, C. (1996) The shapes, major axis orientations and displacement patterns of fault surfaces. Jour. Structural Geol., 18: 235-248.

- Odling, N. (1998) Fluid flow in fractured rocks at shallow levels in the Earth's crust: an overview, *in* Deformation enhanced melt segregation and metamorphic fluid transport. Miner. Soc. Series Books.
- Siqueira, L. (1967) Contribuição da geologia à pesquisa de água subterrânea no cristalino. *Rev. Água Subterrânea, Recife*, 2 (9): 1-29.
- Wright, E.P. & Burgess, W.G. (1992) The hydrogeology of crystalline basement aquifers in Africa. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.*, 66: 264p.