

# INTEGRAÇÃO DE DADOS ESTRUTURAIS, DE SENSORES REMOTOS E DE GEOFÍSICA NA PROSPECÇÃO HIDROGEOLÓGICA EM TERRENOS CRISTALINOS: ESTUDO DE CASOS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE, NORDESTE DO BRASIL

*Carlos C. Nascimento da Silva*<sup>1,2</sup>

*Ana C. F. Coriolano*<sup>1,2</sup>

*E. F. Jardim de Sá*<sup>1,3</sup>

*Walter E. de Medeiros*<sup>1,3</sup>

*Venerando E. Amaro*<sup>1</sup>

## RESUMO

A problemática da locação de poços para água em terrenos cristalinos foi abordada ao longo de diversos casos de estudo nas porções centro-leste e centro-sul do Rio Grande do Norte. Foi realizada uma análise regional a partir de produtos de sensores remotos (imagens de satélite, de radar e fotografias aéreas), identificando estruturas dúcteis e frágeis, zonas mais densamente fraturadas, bem como áreas úmidas associadas a regiões de recarga. O campo de tensões neotectônico foi identificado a partir dos eixos de compressão (E-W) e extensão (N-S). Esta configuração tectônica acarreta no funcionamento atual das estruturas E-W com cinemática extensional (maior potencial hidrogeológico), ao posto das estruturas N-S, contracionais (com menor potencial hidrogeológico). Em posição intermediária, as estruturas NW e SE funcionam atualmente com cinemática transcorrente (potencialidade hidrogeológica intermediária). Alguns casos ilustraram que a foliação (a depender da sua relação direcional com o campo de tensões neotectônico) pode funcionar no acúmulo e retenção d'água, quando estes planos encontram-se intemperizados. O imageamento do substrato a partir dos métodos geofísicos da eletroresistividade, VLF e GPR, auxilia no entendimento da geometria do aquífero, incluindo grau de fraturamento, conectividade das estruturas e sua relação com zonas de recarga locais, tais como os aluviões.

## INTRODUÇÃO

Em virtude de rochas cristalinas apresentarem porosidade intergranular extremamente baixa, a água explotável neste tipo de terreno encontra-se armazenada essencialmente ao longo de discontinuidades estruturais. Estas discontinuidades em geral correspondem a planos de fratura e, quando intemperizados, foliações. Em campo, a localização dessas estruturas,

---

1) UFRN/PPGG,

2) Bolsista CAPES,

3) Pesquisador CNPq

cesar@geologia.ufrn.br

incluindo aquelas mais favoráveis ao acúmulo d'água, é dificultada pelas coberturas que mascaram os afloramentos. Soma-se a isto a complexidade estrutural e heterogeneidade dos maciços rochosos. Estes fatores resultam em um elevado índice de erro na locação de poços para água em tais terrenos, na ordem de 30%.

Com o intuito de serem aperfeiçoados critérios adicionais àqueles já discutidos na literatura, na tentativa de melhorar o índice de acerto nas locações de poços para água, pesquisadores e alunos do Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) estão realizando estudos estruturais e geofísicos de casos selecionados, em algumas áreas no Estado do Rio Grande do Norte (Figura 1).



Figura 1 – Localização geográfica das áreas de estudo.

A metodologia usualmente empregada na locação utiliza critérios estabelecidos na década de sessenta (Siqueira 1963, 1967, Costa 1965), os quais priorizam drenagens condicionadas por zonas mais densamente fraturadas, interseções de fraturas e “fraturas de extensão” (neste último caso, referindo às fraturas transversais ao *trend* dúctil regional). Baseado nestes critérios foi estabelecido o conceito riacho-fenda (Siqueira 1963), o qual é amplamente utilizado nas locações e associa trechos retilíneos de drenagens a zonas de fraturas.

Nos trabalhos aqui descritos, a metodologia empregada foi baseada em três ferramentas distintas: (a) análise estrutural enfatizando a neotectônica, com estimativa do campo de tensões atual para cada localidade estudada, o qual indicará o comportamento (“aberto” ou “fechado”) de cada estrutura e, desta forma, o seu potencial hidrogeológico; (b) análise de produtos de sensoriamento remoto (imagens Radarsat, Landsat 5-M e fotografias aéreas) no estudo de amplas regiões e na delimitação das áreas com maior potencial hidrogeológico; (c) emprego de técnicas geofísicas permitindo o imageamento do substrato cristalino.

## ARCABOUÇO GEOLÓGICO-ESTRUTURAL

As áreas de estudo estão inseridas no domínio estrutural da Província Borborema (Almeida *et al.* 1977), a qual é representada pela seqüência metasupracrustal da Faixa Seridó (o Grupo Seridó, Jardim de Sá 1994), com *trend* geral NE, seu embasamento (o Complexo Gnáissico-Migmatítico, ou Complexo Caicó), além de granitóides pré-brasilianos e brasilianos. Eventualmente, estes litotipos encontram-se capeados por coberturas holocênicas, as quais

podem funcionar como zonas de recarga para as estruturas do embasamento cristalino. Ao longo da Costa Atlântica, ocorrem a Bacia Potiguar (a norte) e a Bacia Pernambuco-Paraíba (a leste). Geologicamente, as áreas de Santo Antônio e Serrinha encontram-se situadas no Complexo Gnáissico-Migmatítico, enquanto que a de Equador é dominada por quartzitos e micaxistos do Grupo Seridó.

No Nordeste do Brasil, durante o Fanerozóico, ocorreram diversos episódios de deformação frágil (Jardim de Sá *et al.* 1999), iniciando com o soerguimento, exumação e resfriamento da crosta, além da movimentação tardia de zonas de cisalhamento com cinemática trascorrente ao final do Ciclo Brasileiro, associado a uma compressão E-W. De acordo com Matos (1992), do Jurássico superior ao Cretáceo, o rifteamento entre a América do Sul e a África com deformação extensional ao longo do *trend* N a NW, provocou a implantação da Bacia Potiguar e outras bacias costeiras, bem como a reativação de estruturas precambrianas do embasamento. Este período é bem marcado a partir do enxame de diques de diabásio E-W do Vulcanismo Rio Ceará-Mirim. Durante o Terciário superior ao Pleistoceno, um domeamento magmático intraplaca soergueu o Planalto da Borborema, controlado por extensão principal E-W (Dantas 1998, Jardim de Sá *et al.* 1999), criando novas estruturas e reativando as pré-existentes. Para o Holoceno, a atividade sísmica em diversas regiões do Nordeste Brasileiro (tal como em João Câmara - RN) denota um campo de tensões regido por compressão E-W e extensão N-S (Assumpção 1992, Ferreira *et al.* 1998, Coriolano *et al.* 1999). Este campo de tensões atual é ainda evidenciado através da análise de marcadores estratigráficos quaternários e feições morfotectônicas (Caldas *et al.* 1997, Dantas 1998, Jardim de Sá *et al.* 1999, Coriolano *et al.* 1999).

## METODOLOGIA DE TRABALHO

A metodologia de trabalho empregada foi baseada em algumas características principais: poços locados em terrenos cristalinos, num contexto de clima semi-árido, a pequenas distâncias entre si (na ordem de poucas dezenas de metros) e que apresentassem resultados discrepantes entre si do ponto de vista de suas vazões.

Para o entendimento deste contexto, diversas ferramentas foram utilizadas. Em conjunto, elas permitem a análise superficial de amplas áreas, bem como o imageamento do substrato através de técnicas não invasivas.

## ANÁLISE ESTRUTURAL ENFATIZANDO A NEOTECTÔNICA

Entende-se que a complexidade de estruturas observadas no embasamento cristalino é resultante de diferentes períodos evolutivos (desde o final do Ciclo Brasileiro, há *ca.* 600 Ma), os quais são responsáveis tanto por gerar novas estruturas, como por reativar estruturas pré-existentes. O soerguimento e a denudação terreno, associados às mudanças na orientação dos campos de tensões vigentes para cada período (sobretudo no tardi Brasileiro, Juro-Cretáceo, Neógeno e Holoceno), ocasionaram a superposição de estruturas com orientações e cinemática distintas ou, alternativamente, a presença de uma única estrutura com sucessivas reativações.

É fato que o potencial hidrogeológico de estruturas está relacionado, dentre outros fatores, ao seu comportamento “aberto” ou “fechado”. Também é fato que o comportamento atual das estruturas não é ditado pela sua cinemática original, mas sim pela sua relação com o campo de tensões neotectônico. Esta relação indicará aquelas estruturas que estão atualmente

funcionando com cinemática extensional (potencial hidrogeológico elevado), transcorrente (potencial hidrogeológico intermediário) ou contracional (potencial hidrogeológico baixo), englobando não só fraturas, como também a foliação, como plano de anisotropia passível de acumular água em zonas intemperizadas.

A determinação do campo de tensões neotectônico local em terrenos cristalinos é complexa. Isto se deve basicamente à ausência de marcadores cronoestratigráficos seguros, que indiquem a idade da estrutura observada. Para tanto é necessário distinguir, no universo de estruturas geradas/reativadas nos diferentes períodos tectônicos, aquelas que realmente representam o atual campo de tensões. Neste caso, diversos critérios são utilizados. Dentre estes, destacam-se os dados sísmológicos regionais, dados de *breakout* de poços para petróleo, análise morfotectônica do terreno e a análise do estilo, da geometria e da cinemática das estruturas, bem como da natureza do seu preenchimento, o qual está relacionado ao nível crustal.

## ANÁLISE DE PRODUTOS DE SENSORES REMOTOS

A função básica da interpretação de produtos de sensores remotos é a análise de amplas áreas e a delimitação daquelas regiões com potencialidade hidrogeológica mais elevada. Foram utilizadas imagens digitais do satélite Landsat 5-TM e imagens digitais Radarsat, com posterior detalhamento através de fotografias aéreas convencionais em diversas escalas.

A partir de mapas de fotolineamentos e de drenagens, é possível obter uma visão regional dos critérios utilizados na fase de locação dos poços analisados. Em muitos casos, os trechos retilíneos de riachos efetivamente correspondem, em campo, a uma zona fraturada com a mesma orientação. Em outros casos, os lineamentos correspondem apenas ao traçado da drenagem, ocasionalmente coincidindo com o *trend* da foliação das rochas. Os lineamentos são analisados, identificados e traçados sobre a imagem ou um *overlay*. No entanto, deve-se observar detalhadamente a qualificação de lineamentos utilizada em relação à fonte de extração (imagem de satélite, de radar ou fotografia aérea), a qual fornecerá feições lineares de distintas características texturais e tonais. Para o caso em questão, nas fotografias aéreas foram enfatizados os lineamentos relacionados a zonas de fraturas, conforme metodologia proposta por Strieder e Amaro (1997).

Técnicas de filtragem direcional e sombreamento objetivam realçar ou suavizar feições lineares. A análise das imagens multiespectrais do Landsat, com resolução espacial de 30 m, e Radarsat, com resolução espacial de 25 m, auxilia na detecção de zonas úmidas que podem estar associadas a zonas de fraturadas saturadas. Diversas composições coloridas podem ser geradas utilizando as imagens orbitais do Landsat 5-TM para determinar a melhor combinação de bandas ou transformações para o mapeamento dos lineamentos, bem como composições que possam realçar o quartzo (sílica) dominante nos aluviões, possibilitando a distinção de aluviões em drenagens e em micro-bacias, sendo estas uma possível zona de recarga.

*Softwares* computacionais tais como o ER-Mapper v 5.5 e o PCI v. 7.0 são utilizados para tratamento das imagens tipo Landsat e Radarsat, bem como as fotografias aéreas *escanerizadas*. A análise de imagens de satélite Landsat 5-TM auxilia principalmente na detecção de zonas úmidas que podem estar relacionadas a zonas de recarga e locais mais favoráveis à acumulação de água. Neste caso, a análise dos lineamentos sofre restrições devido à sua escala (1:250.000).

Condições atmosféricas adversas, tais como coberturas de nuvens, não afetam imagens Radarsat. Estas imagens apresentam uma elevada sensibilidade a variações morfológicas da superfície e da rugosidade do terreno. Em virtude do controle da geometria de aquisição,

pode-se trabalhar estereoscopicamente; o trabalho com imagens noturnas também é possível, em função de sua independência da iluminação solar.

## ANÁLISE GEOFÍSICA

Métodos geofísicos correspondem a técnicas não invasivas do substrato rochoso e são baseados nas mudanças das características físicas do meio analisado. Em especial, na pesquisa hidrogeológica em terrenos cristalinos, a presença da água ao longo das descontinuidades nos maciços rochosos promove um acentuado contraste no parâmetro resistividade (ou o seu inverso, condutividade). Portanto, métodos elétricos e eletromagnéticos podem ser utilizados com grande chance de sucesso.

A técnica da eletroresistividade visa obter as variações laterais e em profundidade da função resistividade aparente. Sondagens elétricas sucessivas e equidistantes, transversais à estruturação, compõem seções geoeletricas e identificam com clareza feições condutivas com diversos mergulhos, correlacionadas a estruturas saturadas em água. Altos no embasamento e a morfologia e a espessura de aluviões também podem ser obtidos. Para tanto, foi utilizado o arranjo Schlumberger com quatro eletrodos, com abertura máxima dos eletrodos de corrente de 100 m (AB).

O método geofísico que utiliza ondas *Very Low Frequency* (VLF) é utilizado para identificar zonas fraturadas saturadas em água (“corpos condutivos”), verticalizadas. É um método que pode ser utilizado rapidamente e confirma feições observadas pelas outras técnicas utilizadas. Todavia, a direção da estrutura a ser identificada será função da estação VLF escolhida.

O método eletromagnético do *Ground Penetrating Radar* (GPR) é utilizado naqueles casos com solos ou coberturas relativamente resistivos. As ondas eletromagnéticas propagadas pelo transmissor, em diferentes intervalos de frequência (a depender da antena utilizada), são refletidas nas interfaces que apresentam contraste em suas constantes dielétricas e, ao serem captadas pelo receptor ao longo de diferentes tempos de trânsito, geram radargramas semelhantes aos sismogramas do método da sísmica de reflexão. A profundidade de investigação será função basicamente da frequência escolhida (alta frequência permite alta resolução porém menor profundidade de investigação, e vice-versa), bem como das características geoeletricas do substrato (substratos condutivos atenuam a propagação das ondas eletromagnéticas). Foram utilizadas as frequências de 400, 200, 80 e 40 MHz na tentativa de serem visualizadas diferentes estruturas, localizadas a diferentes profundidades, variando desde a superfície até em torno de 25 m.

## ANÁLISE DE CASOS

As áreas estudadas nesta pesquisa apresentam-se no mesmo contexto geológico, representando áreas do domínio das rochas do embasamento cristalino. Todavia, certas peculiaridades as tornam diferentes.

O principal critério para a diferenciação das áreas corresponde à presença de coberturas capeando o substrato cristalino. No caso da região de Santo Antônio, a presença de coberturas arenosas torna o trabalho de análise estrutural mais complicado. Por outro lado, a presença destas coberturas, servindo como zonas de recarga, eleva a potencialidade hidrogeológica da área. A região de Equador representa o oposto da região de Santo Antônio. A ausência de

coberturas sedimentares (exceto em porções específicas) torna o escoamento superficial mais acentuado e desta forma, diminui as condições de recarga das estruturas em subsuperfície. Todavia, o embasamento exposto torna possível uma análise estrutural bastante detalhada; deste modo, a identificação das estruturas com potencial hídrico elevado é facilitada. Em posição intermediária está a região de Santa Cruz. Coberturas sedimentares não tão expressivas favorecem as condições de recarga e, ao mesmo tempo, o embasamento relativamente exposto faz com que a análise estrutural possa ser realizada com bastante precisão.

Do ponto de vista geofísico e dos produtos de sensoriamento remoto, as áreas puderam ser analisadas com grande detalhe. Com relação à região de Equador, a presença do substrato subaflorante e com coberturas areno-quartzosas pouco espessas tornou possível a utilização do método geofísico GPR.

## REGIÃO DE SANTA CRUZ

Próximo ao município de Santa Cruz, na Fazenda Santa Rita, foram estudados cinco poços que apresentam resultados discrepantes em termo de produção (sendo 1 poço seco, 2 produtivos e 2 desativados), próximos a afloramentos de ortognaisses. A análise regional do terreno foi feita através de imagens Landsat e fotografias aéreas na escala de 1:70.000. Os lineamentos foram melhor destacados nas fotografias aéreas (Coriolano *et al.* 2000), onde foi observado um lineamento principal com direção ENE, na localidade onde os poços foram perfurados. Este lineamento foi interpretado como uma zona de fratura. No entanto, os fraturamentos observados em campo apresentam direção aproximadamente N-S e a foliação tem direção próxima a E-W, com mergulho para sul. Desta forma, não é possível correlacionar a estrutura observada ao modelo riacho-fenda, já que o controle local da drenagem é a foliação da rocha.

Silva (2000) realizou trabalhos de geofísica na área através dos métodos da eletroresistividade e VLF, encontrando anomalias na direção E-W. As feições observadas através de seções de resistividade aparente e de densidade de corrente ilustram o condicionamento da água subterrânea ao longo de planos da foliação mais intemperizados, com uma cobertura elúvio-aluvionar associada à drenagem local.

Neste caso, a irregularidade entre poços secos, desativados e produtivos pode estar relacionada com a quantidade de aluvião e rocha alterada que serve como área de recarga. A relação da foliação observada localmente (E-W) como campo de tensões neotectônico (compressão E-W e extensão N-S) faz com que a mesma apresente tendência à abertura. Em adição, os poços produtivos estão localizados em locais onde o intemperismo atua na foliação, aumentando a porosidade e permeabilidade da rocha e, conseqüentemente, permitindo o acúmulo de água.

## REGIÃO DE SANTO ANTÔNIO

Na região de Santo Antônio, expressivas coberturas sedimentares, areno-quartzosas em sua maioria, mascaram os afloramentos. Foi estudado o caso da Fazenda Tararaca, localizada próximo à sede municipal. Neste local há um poço locado segundo os critérios tradicionais, com exame de fotografias aéreas e localização de interseções de trechos retilíneos de drenagens.

Composições coloridas como RGB-432 e imagens Landsat 5-TM auxiliaram na detecção indireta de zonas úmidas, já que certas composições destacam bem a vegetação e, conseqüentemente, zonas com maior umidade. Outras composições, tais como RGB-532, 341 e 321,

ajudaram na detecção precisa de corpos de água, vegetação, coberturas arenosas e variações litológicas. As imagens de Radarsat desta região ajudaram na identificação de coberturas arenosas e possíveis zonas de recarga.

A análise de lineamentos foi feita em imagens Landsat 5-TM, Radarsat e fotografias aéreas. Alguns lineamentos foram melhor destacados quando aplicados filtros direcionais. No entanto, devido à escala das imagens Landsat e Radarsat, os lineamentos detectados serviram apenas para uma análise regional. Já alguns lineamentos antes não observados em fotografias aéreas convencionais, puderam ser identificados após tratamentos das mesmas através de filtragens direcionais, representando mais fielmente as estruturas de campo.

O exame mais criterioso de fotografias aéreas identificou lineamentos nas direções N-S e NE-SW (Coriolano *et al.* 2000). Em levantamentos de campo, percebeu-se que as drenagens não apresentavam espessura e largura expressivas de material aluvionar. Afloramentos indicam que o substrato é formado por ortognaisses localmente migmatizados, afetado por fraturas predominantemente na direção NW. Todavia, lineamentos na direção NE não foram identificados. Todavia, o bandamento gnáissico apresenta tal direção, com mergulho de 30° para NW. Dados geofísicos, utilizando VLF e eletroresistividade (Silva 2000), confirmam a presença de fraturamento na direção aproximadamente N-S a NW.

Desta forma, não se pôde correlacionar o fraturamento medido segundo a direção NE do riacho principal com zonas de fraturas. Com base nos dados estruturais e de fotografias aéreas, percebe-se que o modelo riacho-fenda não é bem aplicado ao caso, já que o acúmulo de água possivelmente está relacionado aos planos de foliação abertos.

## REGIÃO DE EQUADOR

Na área de Equador foi analisada a região de Caiçara, localizada a aproximadamente 2 km a oeste da sede municipal. Nesta área há diversos poços localizados em rochas quartzíticas, segundo os critérios clássicos (exame de fotografias aéreas e análise de campo segundo o modelo riacho-fenda).

A partir da análise das estruturas bem expostas na região e da interpretação de feições morfotectônicas, pôde-se determinar com relativa exatidão o campo de tensões neotectônico local (Nascimento da Silva e Jardim de Sá 2000). Apesar da complexidade estrutural representada por estruturas herdadas de tempos pré-cambrianos, tais como fraturas preenchidas por veios ácidos apresentando feições indicativas de reativação sob diferentes campos de tensões, pôde-se definir o campo de tensões neotectônico local. O abatimento do topo das serras de quartzito com *trend* NNE, segundo planos verticalizados E-W (herança de tempos tardi-brasílicos) e o preenchimento desses planos por argilo-minerais (material de baixa temperatura que indica nível crustal raso), demonstra que a direção de compressão atual é E-W e a de extensão é N-S. Este campo de tensões neotectônico local é compatível com o regional (vide Ferreira *et al.* 1998).

Fotografias aéreas na escala original 1:25.000 foram *escaneirizadas* e tratadas no programa ER-Mapper v. 5.5, utilizando transformações de tal forma a serem acentuadas as feições estruturais. A complexidade estrutural constatada em campo também é observada nas imagens, sendo que as feições dúcteis (representando a foliação regional, zonas de cisalhamento e regiões dobradas) puderam ser separadas daquelas frágeis (em geral, planos de falhas e fraturas). O *trend* dúctil regional ocorre segundo a direção NNE, enquanto que planos de falhas ocorrem ao longo de todo os quadrantes, sobretudo nas direções E-W e NW.

O uso dos métodos geofísicos da eletroresistividade, VLF e GPR, transversais à estruturação NW segundo a qual foram localizados os poços na região, permitiu o imageamento detalhado do substrato. Seções de resistividade aparente ilustram feições de baixo ângulo de mergulho para NE, interconectadas com feições verticalizadas em profundidade. As estruturas verticalizadas podem ser observadas por seções de densidade de corrente a partir do método VLF. O método GPR, com antena de 80 MHz, identificou as zonas fraturadas com grande detalhe, tanto de baixo ângulo quanto aquelas verticalizadas. Como a espessura do aluvião associado à drenagem é importante, já que ele pode servir como zona de recarga, foram utilizadas as frequências de 200 e 400 MHz na tentativa de determinar a sua morfologia. A primeira frequência mostrou-se mais eficiente.

De posse destes dados, verificou-se a associação da rede de drenagem segundo zonas fraturadas, as quais podem se apresentar como superfícies aproximadamente planares, interconectadas com feições verticalizadas em profundidade. Do ponto de vista hidrogeológico, as estruturas E-W apresentam maior potencialidade, funcionando atualmente como fraturas abertas. Feições NW ou SE estão funcionando com cinemática de cisalhamento. Todavia, o seu potencial pode ser elevado naquelas regiões com alta conectividade, principalmente quando associadas ao sistema E-W. Com menor potencial, as feições com direção N-S (tal como a foliação) funcionam como estruturas fechadas e, portanto, apresentam menor potencialidade hidrogeológica.

## RESULTADOS OBTIDOS

O uso de sensores orbitais, tais como imagens de satélite Landsat 5-TM e Radarsat, devidamente processadas, pode determinar zonas com potenciais hídricos distintos e a consequente delimitação das áreas com potenciais mais elevados. A definição de zonas de recarga mais expressivas ou regiões mais densamente fraturadas (rede de drenagem), por exemplo, está diretamente relacionada à produtividade dos poços a serem localizados. No entanto, levando-se em consideração que a locação de poços em terrenos cristalinos obedece a uma escala de maior detalhe, deve-se procurar fazer um detalhamento posterior de áreas com potencial hidrogeológico provavelmente mais elevado (verificado em uma análise regional), através de fotografias aéreas e, em seguida, com estudo de campo.

Para as áreas analisadas, o campo de tensões neotectônico local é representado pela direção de compressão E-W e extensão N-S. Este campo de tensões promove maior potencial hídrico para as estruturas E-W, intermediário para as NW e SE, e menor para as estruturas N-S. Contudo, deve ser levado em conta não apenas o comportamento atual das estruturas, mas também o grau de interconectividade e relação com zonas de recarga, de toda a estruturação dúctil ou frágil observada. A correlação do campo de tensões neotectônico local das áreas analisadas com o campo de tensões neotectônico regional não representa uma situação geral. Sabe-se que anisotropias locais, tais como modificações topográficas, contatos geológicos ou zonas de falha ou cisalhamento, podem promover modificações nas direções de compressão e extensão regionais. Portanto, para cada área, na medida do possível, deve-se determinar o seu campo de tensões neotectônico. Na falta de feições que possibilitem tal identificação, é utilizada a informação regional.

A correlação das estruturas observadas em superfície com aquelas em profundidade pôde ser realizada, com boa resolução, através dos métodos geofísicos da eletroresistividade,

VLF e GPR. O uso de métodos geofísicos é importante sobretudo naqueles locais nos quais não é possível realizar uma análise superficial criteriosa em função da falta de afloramentos. O método da eletroresistividade mostra-se eficiente na determinação de estruturas com diversos ângulos de mergulho, também atestado pelos radargramas do GPR. Este último representa um grande avanço na definição das características do aquífero fissural, incluindo mergulho de fraturas, grau de interconectividade e dimensões das estruturas. Todavia, a presença de coberturas condutivas pode inviabilizar o seu uso. O método do VLF mostrou-se eficaz na determinação de zonas verticalizadas. Contudo, em função do seu uso estar restrito à relação existente entre direção de fraturamento e estação de ondas VLF, o seu uso deve ser realizado em paralelo com outros métodos.

Com isto, entende-se que a integração de dados de geologia estrutural à luz dos novos conhecimentos, de produtos de sensores remotos e do imageamento do substrato cristalino a partir de métodos geofísicos, representa um avanço na pesquisa hidrogeológica de terrenos cristalinos. Todas estas feições podem ser traduzidas na prática em locações mais precisas de poços para água, com índices de erro inferiores aos atuais.

## AGRADECIMENTOS

Os autores fazem os agradecimentos ao Geólogo Jesimael Avelino da Silva, aos alunos Josibel Gomes de Oliveira Júnior, Cristina Aparecida Domingueti, Pedro Xavier Neto e Maria da Guia Lima, bem como ao FINEP/CNPq/PADCT/CAPES pelo apoio financeiro e bolsas de estudo. Ao Projeto Brasil-Canadá pelo treinamento no Radarsat.

## REFERÊNCIAS

- Almeida, F.F.M; Hasui, Y; Brito Neves, B.B.; Fuck, R.A. 1977. Províncias estruturais brasileiras. In: Simp. Geol. Nordeste, 7, Campina Grande-PB, 363-391.
- Assumpção, M. 1992. The regional intraplate stress field in South America. *Journal Geophysical Research*, 97(138): 11889-11903.
- Caldas, L.H., Coriolano, A.C., Dantas, E.P., Jardim de Sá, E.F. 1997. Os beachrocks no litoral do Rio Grande do Norte: potencial como marcadores neotectônicos. In: Simp. Geol. Nordeste, 17, Fortaleza-CE, resumos expandidos, 15:369-376.
- 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.* 30(2):350-352.
- Coriolano, A.C.F., Lucena, L.F., Jardim de Sá, E.F., Saadi, A. 1999. A deformação quaternária no litoral oriental do Rio Grande do Norte. In: Simp. Nac. Estudos Tectônicos, 7, Lençóis-BA, resumos expandidos, 67-70.
- Costa, W.D. 1965. Análise dos fatores que influenciam na hidrogeologia do cristalino. *Rev. Água Subterrânea*, Recife-PE, 1(4):14-47.
- Dantas, E.P. 1998. *Gravimetria e sensoriamento remoto: uma aplicação ao estudo da tectônica recente entre Macau e São Bento do Norte (RN)*. Dissertação de Mestrado, UFRN-CCET-PPGG, 98p.

- 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. *Geophysics*, 134:341-355.
- Jardim de Sá, E. F. 2000. O condicionamento de água subterrânea no cristalino fraturado: reavaliação da abordagem estrutural. In: Congresso Mundial Integrado de Águas Subterrâneas, 1, Fortaleza-CE, CD-Rom, Abas192.
- Jardim de Sá, E.F. 1994. *A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e o seu significado geodinâmico na cadeia Brasileira/Pan-Africana*. Tese de doutorado, UnB, IGeo, Brasília-DF, 804p.
- 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. In: Simp. Nac. Estudos Tectônicos, 7, Lençóis-BA, *resumos expandidos*, 58-61.
- Matos, R. M. D. 1992. The Northeast Brazilian Rife System. *Tectonics*, 1(4):766-791.
- 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. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(2):346-349.
- Silva, J. A. 2000. *Estruturas de acumulação de água em rochas cristalinas: estudo geofísico e geológico de casos no Estado do Rio Grande do Norte*. Dissertação de Mestrado, UFRN/CCET/PPGG. 92p.
- Siqueira, L. 1967. Contribuição da geologia à pesquisa de água subterrânea no cristalino. *Rev. Água Subterrânea*, Recife-PE, 2(9):1-29.
- Siqueira, L. 1963. Contribuição da Geologia à Pesquisa de Água Subterrânea no Cristalino. SUDENE, Recife-PE. 51p.
- Strieder, A. J. & Amaro, V. E. 1997. Estruturas de Lineamentos Extraídos de Imagens de Sensores Remotos. EGATEA. *Revista de Escola de Engenharia*, Porto Alegre-RS, 4(25):109- 117.