

# POTENCIALIDADE DO SISTEMA HIDROTÉRMAL DE PARANÃ (TO)

Sebastião Peixoto Filho<sup>1</sup> & Homero Lacerda<sup>2</sup>

**Resumo** - A recarga do aquífero ocorre na Serra das Caldas, sustentada por quartzitos muito fraturados do Grupo Arai e o aquecimento da água é devido ao grau geotérmico normal. A fonte termal apresenta temperatura de 37,4 °C e vazão total de 12m<sup>3</sup>/h. O poço tubular profundo foi locado a partir de critérios geológicos e geofísicos, visando avaliar o comportamento do aquífero e apresentou vazão de 5,5m<sup>3</sup>/h com temperatura de 30,6°C. A perfilagem térmica permitiu avaliar o grau geotérmico local em 0,0239°C/m. A hidroquímica mostrou que as águas da fonte e do poço são de baixa alcalinidade. Os resultados das análises de isótopos sugerem que na fonte termal as águas tem pouca ou nenhuma mistura, sendo que a componente mais jovem é de 50 anos e outra é mais velha do que 1000 anos. O trítio no Poço Paranã é próximo de 0,8 TU, permitindo afirmar que existe uma componente mais recente com pelo menos 30 anos. A água disponível atualmente, compreendendo fonte e poço é suficiente para abastecer um empreendimento de médio porte.

**Abstract** - Recharge of the aquifer is in the Serra das Caldas ridge which is the outcrop area of intensely fractured quartzites of Arai Group. Water is heated due to the normal thermal gradient and the thermal springs are located on a ENE trending fracture that crosscuts the quartzites. Temperature in the spring is around 37.4°C and discharge is 12m<sup>3</sup>/h. The place of the well was chosen from hidrogeological and geophysical data and discharge is 5.5m<sup>3</sup>/h and temperature is 30.6°C. Thermal logging led to an evaluation of a local thermal gradient of 0,0239°C/m. The water of the spring and well are of low alkalinity. According to isotopic analyses the water of the spring has an older component with a residence time older than 1000 years and another one with a residence time older than 50 years. The water of the well is mixed and has a component with a residence time less than 30 years. The water already available is adequate for a large size recreational facility.

**Palavras-Chave** - sistema hidrotermal, isótopos, Paranã do Tocantins.

---

<sup>1</sup> Geólogo, Consultor em Hidrogeologia, rua C-267 n.º 385 Nova Suíça, Goiânia(GO) 74.280-290, fone (62)259-9695, fax (62)3942-5215, seb.pf@terra.com.br

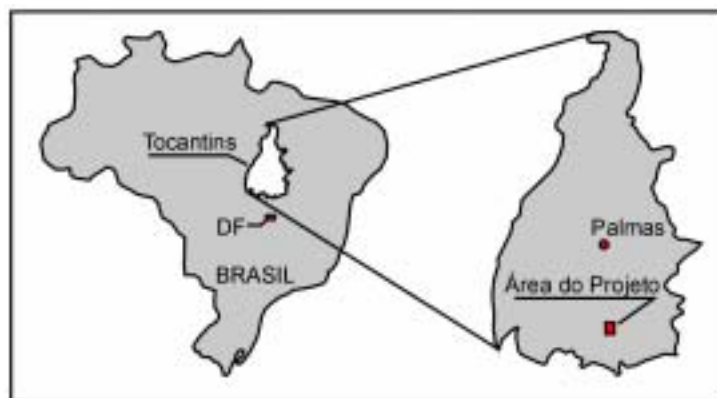
<sup>2</sup> Geólogo, Professor da Universidade Estadual de Goiás-UEG, rua T-38 n.º 898, Ap. 701, Bueno, Goiânia(GO) 74.230-070, fone (62)255-5114, homerolacerda@yahoo.com.br

## INTRODUÇÃO

Na região limítrofe entre os estados do Tocantins e de Goiás existem varias ocorrências de águas termais, dentre as quais Jaú do Tocantins e Paranã, ambas situadas no estado de Tocantins, onde as temperaturas das surgências variam de 30°C, caso da Serra da Água Morna em Paranã e 39°C em Jaú do Tocantins. Do ponto de vista hidrogeológico, uma característica comum à estes sistemas é a presença de altos topográficos mantidos por quartzitos muito fraturados dos Grupos Arai e Serra da Mesa, que atuam como zonas de recarga dos aquíferos termais.

A utilização destes importantes recursos para fins turísticos é ainda incipiente e o Governo do Estado do Tocantins realizou o projeto “Diagnóstico das Potencialidades e Mapeamento Hidrogeológico das Fontes Termais de Paranã e Jaú do Tocantins” (PEIXOTO FILHO et alii, 2004; PEIXOTO FILHO & LACERDA, 2004), tendo como objetivo fornecer as bases técnicas para a exploração sustentada destas águas termais. É importante frisar que o objetivo do trabalho foi avaliar a potencialidade do sistema hidrotermal e não executar trabalhos de captação da fonte da Fazenda Mansão das Caldas. A companhia contratada foi a CTE - Centro Tecnológico de Engenharia Ltda., o trabalho foi realizado no decorrer de 2003 e finalizado no início de 2004.

A área abordada nesta nota é a do sistema hidrotermal de Paranã, um retângulo de 1.800 km<sup>2</sup>, delimitado pelos paralelos 12° 43’ 18’’ e 13° 10’ 24’’ de latitude sul e entre os meridianos 47° 45’ 36’’ e 48° 05’ 36’’ de longitude oeste. Está localizada no município de Paranã, situado na porção sul do estado do Tocantins, distando cerca de 457 km da cidade de Palmas (Fig. 1). Está inserida na sub-bacia do rio Paranã e integra a bacia do rio Tocantins, onde o clima é do tipo tropical úmido com moderada deficiência hídrica, caracterizado por precipitação anual média da ordem de 1.420 a 1.680mm, classificado segundo KOEPPEN (1948) como do tipo Aw. A vegetação característica da área é o Cerrado ou Savana Arbórea Aberta com florestas de Matas Galerias.



**Fig. 1-** Localização da área.

O sistema hidrotermal da Serra das Caldas Paranã é aberto, sob o ponto de vista da hidrogeologia, onde ocorre recarga e descarga livremente. As fontes apresentam temperaturas de até 37,4°C e portanto o sistema pode ser classificado como de baixa entalpia pois as temperaturas das descargas de águas termais não ultrapassam a 90°C. Adotou-se, como hipótese de trabalho, que a zona de recarga ocorre nas cotas topográficas acima de 350 metros, na Serra das Caldas cuja superfície ocupa uma área de 120 km<sup>2</sup> e a taxa de recarga foi estimada em 2,5 l/s/km<sup>2</sup>. A fonte revelou vazão espontânea total de 12 m<sup>3</sup>/h. O teste de produção no poço tubular indica que sua capacidade de produção é de 5,5 m<sup>3</sup>/h, com temperatura da água de 30,6°C. As vazões disponíveis são suficientes para abastecer um empreendimento de médio porte, com possibilidade de ampliação através de perfuração de novos poços, respeitado o limite imposto pela reserva renovável.

Neste artigo o sistema hidrotermal de Paranã é apresentado sucintamente, com ênfase na sua potencialidade. O texto começa tratando do condicionamento geológico-geomorfológico do aquífero, relata a locação do poço tubular e prossegue com a abordagem do modelo hidrogeológico e potencialidade do sistema. A hidroquímica e os trabalhos com isótopos são apresentados resumidamente, de forma a complementar a abordagem do tema.

## **GEOLOGIA**

O objetivo dos trabalhos de geologia foi definir a geometria e distribuição espacial das fraturas, às quais está relacionada a permeabilidade secundária das rochas. O trabalho em escala regional constou de fotointerpretação utilizando fotos aéreas preto e branco em escala 1/60.000 (USAF) ou 1/45.000 (PROSPEC S.A.), recobriu toda a área do projeto, totalizando 1.800 Km<sup>2</sup> e foi apresentado na escala 1/100.000. O mapeamento geológico de detalhe foi realizado na área da fonte termal, em escala 1/25.000, com utilização de fotos aéreas em escala 1/25.000 (PROSPEC S.A.). O condicionamento geológico do aquífero é apresentado a seguir, com uma síntese dos resultados obtidos nas escalas regional e de detalhe.

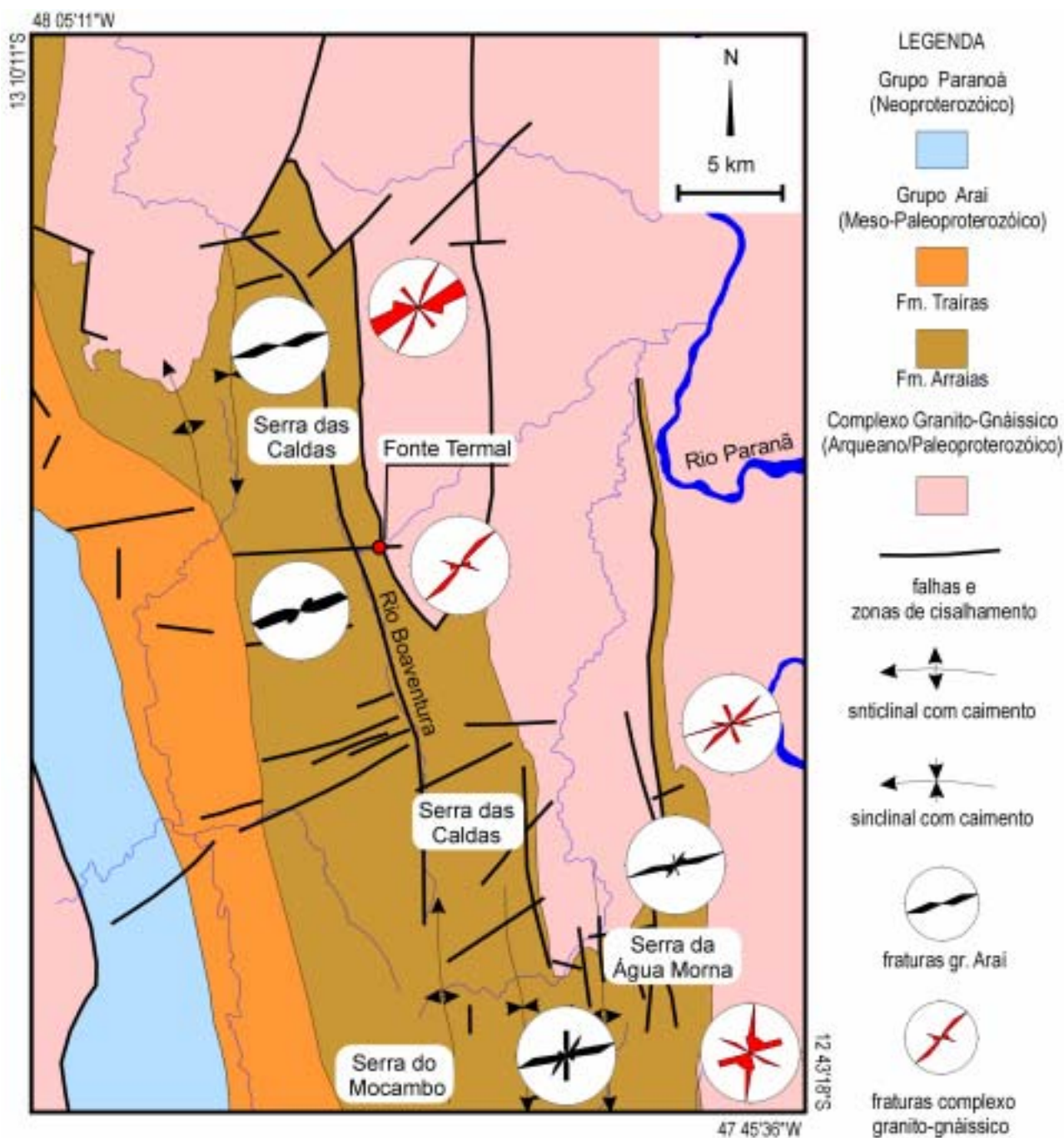
### **Estratigrafia**

O Complexo Granito Gnáissico (Arqueano-Paleoproterozóico) é formado por gnaisses, granitóides, migmatitos e rochas miloníticas.

O Grupo Araí é uma seqüência de sedimentos predominantemente detríticos, metamorfizados no fácies xistos verdes (BARBOSA et alii, 1969; ARAÚJO & ALVES, 1979) dividido em Formação Arraias (base) e Formação Traíras (topo).

A Formação Arraias é formada predominantemente por quartzitos com lentes de metaconglomerados. Esta formação aflora nas porções elevadas da região, denominadas Serra das

Caldas, Serra da Água Morna e a Serra do Mocambo (Fig. 2) e sua espessura total foi estimada em 1.080 metros por BARBOSA et alii (1969). Sua importância para este trabalho é devida ao fato de aflorar na área da fonte termal e na área de recarga do aquífero estudado.



**Fig. 2-** Esboço geológico regional da área do Paranã (PEIXOTO FILHO et alii, 2004).

A camada basal da Formação Arraias é constituída predominantemente por quartzitos, com lentes de metaconglomerados e de metavulcânicas. Na área da fonte termal da Fazenda Mansão das Caldas a camada começa com quartzitos puros geralmente finos a médios, em bancos decimétricos-métricos com estratificação cruzada plano-paralela ou, então, em bancos decimétricos sem

estratificações cruzadas. Os metaconglomerados são abundantes e aparecem a partir de 200 metros da base do Grupo Arai. A matriz geralmente é quartzo-muscovítica com clastos centimétricos a decimétricos constituídos predominantemente por quartzitos. Em direção ao topo da camada alternam-se quartzitos e conglomerados em camadas decamétricas ora predominando um grupo de rochas, ora outro. Os quartzitos feldspáticos são de ocorrência mais restrita, tem cores cinza-claro a cinza-claro-avermelhada e grão médio a grosseiro podendo ser conglomeráticos.

Em direção ao topo, a Formação Arraias contém uma unidade constituída predominantemente por metassiltitos, sobreposta por camada de quartzitos.

A Formação Traíras é predominantemente metapelítica e contém quatro unidades cuja espessura máxima total foi estimada em 930 metros por (BARBOSA et alii, 1969): metassiltitos; calcifilitos com intercalações de mármore impuros; filitos com lentes de mármore; quartzito médio; filitos e metassiltitos.

Na região estudada afloram rochas atribuídas à sequência pelito-carbonatada do Grupo Paranoá, afetada por metamorfismo no fácies xistos verdes. A estratigrafia deste grupo na área compreende: quartzitos e quartzitos rítmicos; filitos calcíticos com lentes de mármore; ritmito filito carbonoso-quartzito; filito calcífero rítmico com lentes de mármore.

## **Geologia Estrutural**

A macroestruturação da área é caracterizada por (Fig. 2): dobras de grande comprimento de onda e pequena amplitude, bem representadas na porção sul da área, na Serra do Mocambo; falhas e zonas de cisalhamento extensas, de rumo submeridiano, que ocorrem preferencialmente nos contatos entre o Complexo Granito-Gnáissico e as supracrustais dos Grupos Arai e Paranoá; falhas NE; e juntas ENE.

### *Dobras*

As dobras que afetam as rochas do Grupo Araí são normais ou inclinadas, abertas a fechadas, com eixos apresentando caimento para o quadrante Sul e, mais raramente, constituindo braquissinclinais e braquianticlinais. No Grupo Paranoá as dobras observadas são de comprimento de onda pequeno, inferior a um quilômetro, são fechadas, com caimento duplo para os quadrantes sul e norte.

### *Zonas de Cisalhamento Submeridianas*

São acidentes tectônicos de grandes dimensões que ocorrem ao longo dos contatos entre rochas do Grupo Arai e do Complexo Granito-Gnáissico, bem como no interior da área de afloramento do Grupo Araí como no alto curso do Rio Boaventura (Fig. 2).

Nas proximidades da fonte termal da Fazenda Mansão das Caldas o contato do Complexo Granito-Gnáissico com o Grupo Araí é feito por uma zona de cisalhamento, balizada por milonitos desenvolvidos a partir das rochas do Complexo Granito-Gnáissico. No Grupo Araí, próximo ao contato com as rochas do Complexo Granito-Gnáissico existe uma zona muito fraturada concordante com a zona de cisalhamento que baliza o contato entre as duas unidades. Dentro desta zona observa-se grande número de fraturas de rumo N65W/40NE cujas características são: espaçamento centimétrico a decimétrico, chegando a obliterar o acamamento do quartzito; extensão decimétrica a métrica; fechadas ou com aberturas milimétrica-centimétrica; presença de estrias de quartzo fibroso, indicando movimento normal, de Sul para Norte. A associação espacial estreita entre estas fraturas e as os grandes acidentes tectônicos NNW sugere tratar-se de fraturas de 2ª ordem associadas a estruturas maiores, representadas por uma zona de cisalhamento de rumo NNW.

A natureza destas zonas de cisalhamento NNW não está estabelecida de forma cabal e admite-se um movimento oblíquo, com transcorrência e empurrão, de Noroeste para Sudeste com base nas evidências de repetição de camada e lineações minerais e de estiramento. As fraturas de atitudes N65W/40NE tem estrias indicativas de movimento normal de Sul para Norte e, portanto, contrárias ao movimento admitido para as estruturas maiores. Podem representar um episódio de deformação rúptil, na forma de fraturas de cisalhamento antitéticas desenvolvidas no interior de uma zona de cisalhamento maior.

#### *Falhas NE*

São fotolineamentos de rumo N35E a N45E que ocorrem tanto nas rochas do Complexo Granito-Gnáissico como nas supracrustais dos Grupos Araí e Paranoá. Nestes últimos elas não aparecem bem marcadas nas rosáceas (Fig. 2) devido à grande quantidade de juntas ENE.

As estruturas maiores são falhas de 5 a 8 quilômetros de comprimento, a exemplo das observadas no extremo noroeste da Serra das Caldas, existindo também fotolineamentos menores, sem rejeito fotogeológico.

Estruturas de mesmo rumo foram observadas apenas localmente em campo, tanto no Complexo Granito-Gnáissico como no Grupo Araí, na forma de juntas de direções variando entre N30E e N60E, subverticais ou com mergulhos superiores a 80 graus para NW.

#### *Fraturas ENE*

São, no estágio atual dos conhecimentos, as fraturas mais importantes do ponto de vista do aquífero termal pois o exutório está localizado sobre uma destas estruturas. Além disso, sua grande densidade nas rochas da Formação Arraias do Grupo Araí, alçadas topográficamente ao longo da Serra das Caldas, faz com sejam áreas favoráveis à recarga do aquífero termal.

As estruturas macroscópicas (fotointerpretadas) aparecem nas rosáceas como máximos a N75E nas rochas do Grupo Araí, onde seu comprimento médio é de 1 a 3 quilômetros e freqüentemente tem mergulho para sul, visível em fotografias aéreas graças à existência de falésias de quartzito, formadas devido ao rompimento da rocha ao longo destas discontinuidades.

No campo seu espaçamento varia de decimétrico a métrico e, localmente, a centimétrico. As atitudes medidas em campo apresentam um máximo a N69E/84SE (Fig. 3). São interpretadas como juntas, com base na ausência de rejeito cartográfico e de deslocamento em escala de afloramento.

#### *Faturas NNW*

São lineamentos quilométricos, com direção próxima de NS, que aparecem com maior destaque na parte sul da área, nas Serras do Mocambo, com rumo NS a N5E, e na Serra da Água Morna onde as direções são N15-25W (Fig. 2). Nos dois locais elas aparecem tanto no Grupo Araí como no Complexo Granito-Gnáissico.

Em campo, nas proximidades da fonte termal, foram observadas no Complexo Granito-Gnáissico, tratando-se de fraturas subverticais, geralmente preenchidas por veios de quartzo com direções em torno de N15W (Fig. 3).

#### *Faturas NW*

São bem marcadas nas rochas do Complexo Granito-Gnáissico e nas rosáceas de fraturas observam-se concentrações de direções a N65W no canto SE da região, a N75W na área da fonte termal da Fazenda Mansão das Caldas e a N35-45W e N75W no extremo NW da Serra das Caldas (Fig. 2).

No campo observou-se que constituem falhas transcorrentes sinistrais que no campo aparecem como zonas com fraturas de espaçamento centimétrico a milimétrico, direções entre N40W e N50W e mergulho superior a 70 graus para o quadrante NE. O movimento transcorrente sinistral é mostrado pelo deslocamento de veios quartzo-feldspáticos no Complexo Granito-Gnáissico e estrias de quartzo nas rochas do Grupo Araí. As fraturas tem extensão observada de 5 metros, podendo apresentar-se fechadas ou com abertura de até 5 centímetros.

## **GEOMORFOLOGIA**

A região estudada compreende dois domínios geomorfológicos bem distintos, o primeiro é formado pelas serranias que predominam na parte oeste e sul da área, onde as cotas atingem 800 a 1.100 metros e que correspondem a unidade geomorfológica “Planalto do Alto Tocantins-Paranaíba” de MAMEDE et alii (1981). Este compartimento é marcado por formas condicionadas

pela litologia e estrutura, a exemplo das numerosas cristas assimétricas sustentadas pelos quartzitos dos Grupos Araí e Paranoá. O padrão de drenagem é em treliça, com os rios maiores condicionados pelo acamamento e, em menor escala, por falhas longitudinais. As drenagens menores são notavelmente condicionadas pelo intenso fraturamento observado nas rochas dos Grupos Araí e Paranoá, cuja direção preferencial é ENE.

O segundo domínio geomorfológico é a depressão que ocupa o piso do vale do Rio Paranã, com altitudes da ordem de 280-360 metros, correspondendo ao que os autores citados denominaram “Depressão do Tocantins”. Na área do projeto é uma superfície inclinada para NE, em direção ao Rio Paranã, ao longo do qual estão as menores altitudes da região estudada. O padrão de drenagem é dendrítico embora em alguns locais existam drenagens condicionadas por falhas de rumo NE.

A fonte termal da Fazenda Mansão das Caldas está no limite entre os dois compartimentos, na borda leste da Serra das Caldas. Esta última, formada essencialmente por quartzitos muito fraturados pertencentes à Formação Arraias do Grupo Araí, representa a área de recarga do aquífero termal.

## **POÇO TUBULAR**

A perfuração do poço foi a percussão e teve como objetivos interceptar o sistema hidrotermal e definir sua capacidade de produção, observar a intensidade do fraturamento e abertura das fissuras e investigar os aportes de água termal ao longo do poço.

### **Locação**

O local da fonte termal é um canhão esculpido pelo Rio Boaventura em quartzitos do Grupo Araí ao longo das juntas ENE, configurando uma área de relevo muito acidentado, de difícil acesso. Desta forma tanto os trabalhos de exploração geofísica como a locação do poço tubular foram condicionados também pelo relevo e acesso.

Foram executadas oito sondagens elétricas verticais sendo uma na margem esquerda e as demais na margem direita, compondo uma linha com espaçamento de 20 metros entre as sondagens (Fig. 4). As leituras foram efetuadas com espaçamento de 10 metros em profundidade.

No que diz respeito aos critérios hidrogeológicos, foram identificados dois elementos estruturais que podem condicionar o exutório do sistema hidrotermal, uma zona fraturada de rumo aproximadamente NS e a junta mestra ENE (Fig. 4).

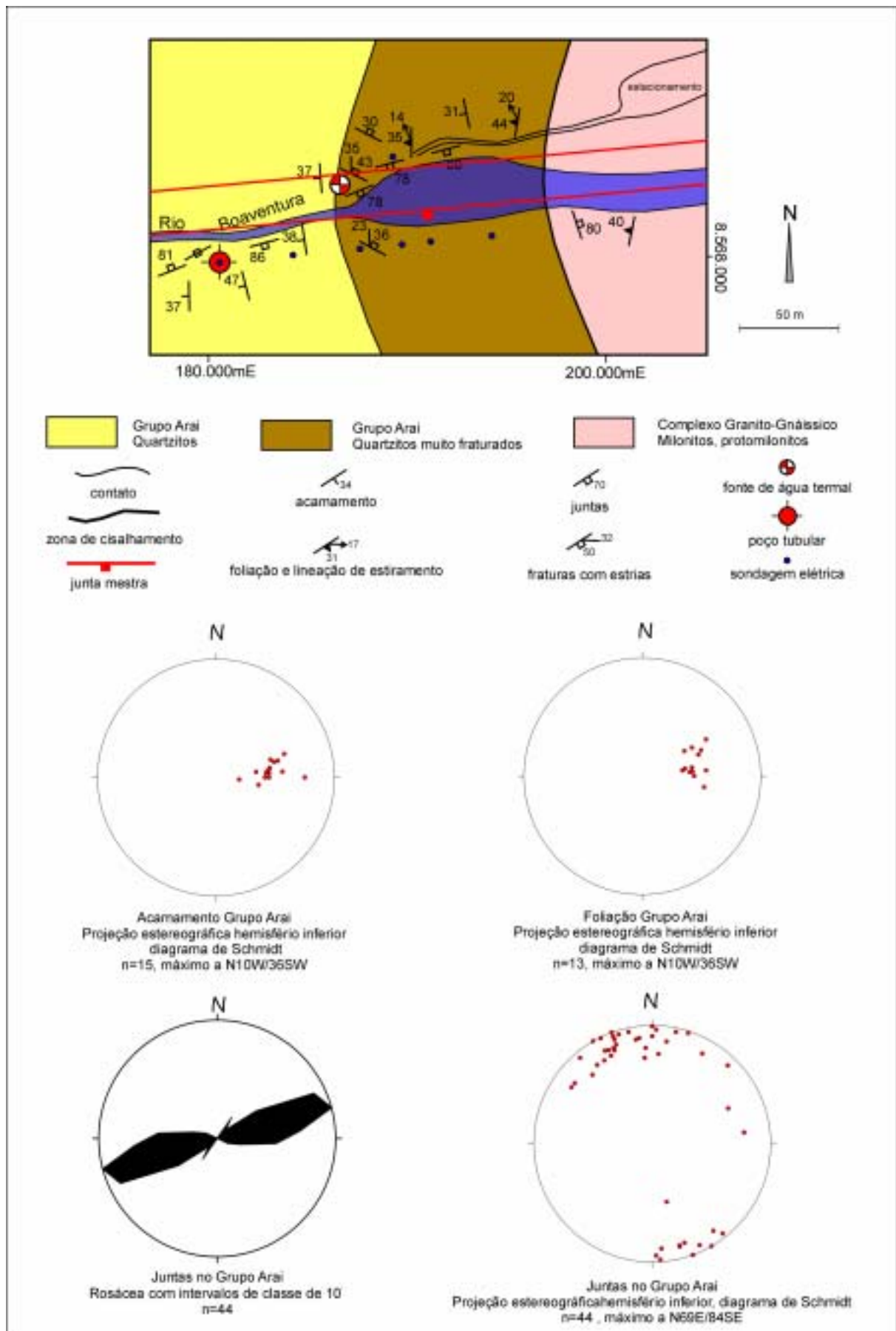
No que diz respeito a zona fraturada de rumo submeridiano observa-se que o Complexo Granito-Gnáissico aflora a leste da fonte e está representado por milonitos que balizam zonas de cisalhamento regionais de rumo próximo de NS. As rochas do Grupo Araí estão sobrepostas aos milonitos, apresentando acamamento e foliação com atitude N10W/36SW. Na base do Grupo Araí



os quartzitos contém uma faixa onde as fraturas são muito abundantes, chegando a obliterar o acamamento. As observações realizadas nas proximidades da fonte indicam que esta zona de maior fraturamento tem rumo aproximadamente NS e, portanto, é quase concordante com o acamamento. Embora esta faixa mais fraturada tenha rumo NS as fraturas observadas no seu interior tem atitudes predominantemente N65W/40NE, conforme já assinalado na abordagem da geologia estrutural.

Com relação à junta mestra ENE as observações regionais e de detalhe indicam que existe um sistema regional de fraturas de rumo ENE nas rochas dos Grupos Araí e Paranoá, conforme discutido no tópico referente à geologia estrutural. Na área da fonte termal o curso do Rio Boaventura segue uma zona com muitas fraturas ENE, designada no mapa da figura 4 como “junta mestra”.

O poço tubular foi locado de forma a interceptar ambos os elementos estruturais (Fig. 4). A locação ideal seria mais a oeste pois as estruturas favoráveis seriam interceptadas em maiores profundidades mas isto não foi possível, devido às limitações impostas pelo relevo muito acidentado da área.



**Fig. 3-** Geologia da área da fonte termal (PEIXOTO FILHO et alii, 2004).

## Perfuração

A profundidade planejada para o poço era de 300 metros, que não foi atingida pois ocorreram desmoronamentos devido ao intenso fraturamento, com riscos de aprisionamento de ferramentas. Mesmo assim, o poço de Paranã foi perfurado até a profundidade de 256,0 metros, quando os desmoronamentos tornaram-se muito frequentes. As rochas interceptadas foram: de 0,00 a 2,57 metros quartzito alterado; de 2,57 a 120,0 metros quartzito feldspático esbranquiçado, com minerais opacos; de 120,0 a 256,0 metros milonitos e gnaisses constituídos por quartzo, muscovita, biotita feldspato. A partir de 215,0 metros passou a ocorrer aprisionamento de ferramentas, o problema foi se intensificando à medida em que o poço atingia profundidades maiores e a perfuração foi paralisada em 256,0 metros.

## Testes de produção

O teste de produção foi do tipo escalonado, sem estabilização de nível, em múltiplos estágios com vazões crescentes e para mantê-las constantes foi usado Escador de Orifício Circular (Tab. 1).

**Tabela 1-** Dados dos escalões e suas respectivas características (N.E. = +0,83 m).

Escalão	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Duração (h)	N.D. Lido (m)
I	2,542	3:0	14,74
II	5,142	3:30	61,70
III	36,019	3:00	25,78
IV	7,581	1:00	120,00

A equação característica do poço para uma hora de bombeamento é  $s_w(1h) = B.Q + C.Q^n$ . A partir do teste de bombeamento foram determinados os parâmetros B, C e n de modo que tem-se como equação característica para uma hora no poço investigado:  $s_w(1h) = s_w(60') = - 0,5.Q + 0,27.Q^{2,86}$ .

Em conclusão, a vazão máxima possível para esse poço é de 5,5m<sup>3</sup>/h, considerando um rebaixamento máximo disponível limitado em 40 metros, definido em função da capacidade produtiva máxima para esse poço.

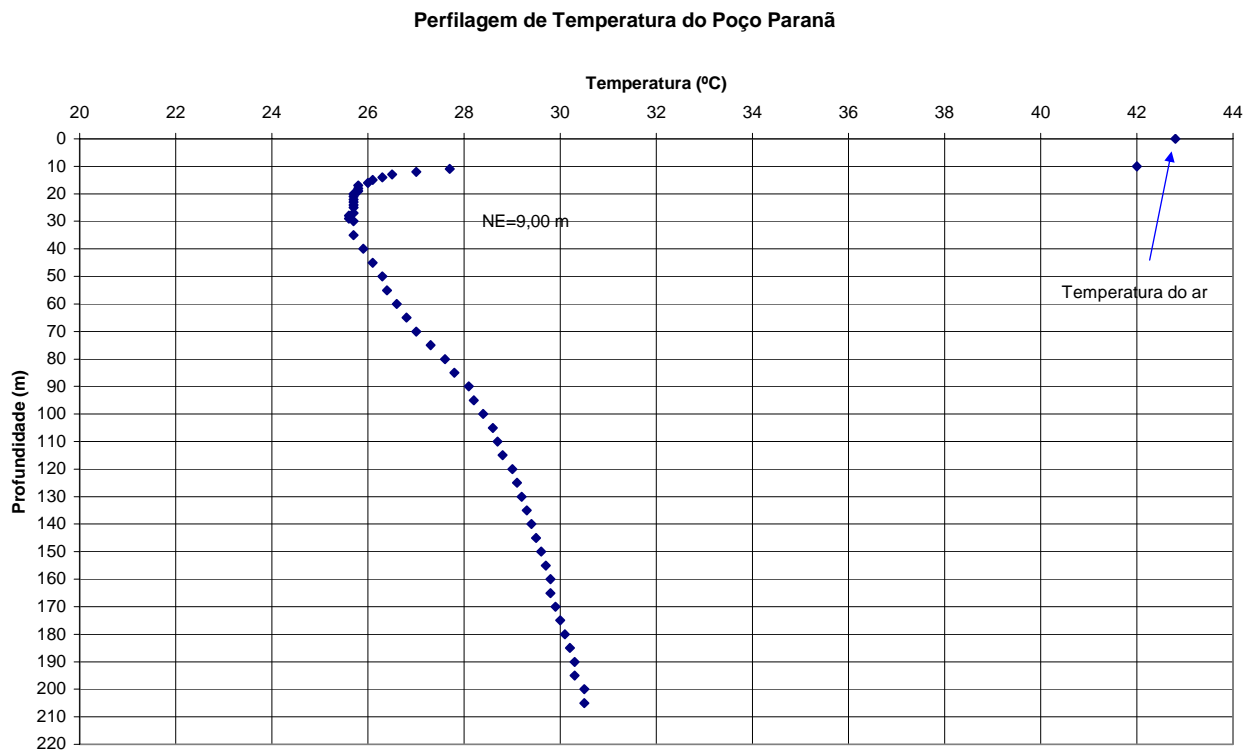
## Perfilagem Ótica

Poços tubulares profundos têm geralmente diâmetros de 100 a 450mm com profundidades da ordem de centenas de metros e, quando há interesse em visualizar seu interior, é efetuada a perfilagem ótica, que consiste em introduzir uma câmera para filmar o interior do poço. Os motivos mais frequentes para a realização deste procedimento são: suspeitas de incrustações em filtros;

rompimentos dos revestimentos; aprisionamento de ferramentas; e desmoronamento de paredes do poço. No presente estudo, o interesse foi observar a frequência e abertura das fraturas, bem como contatos litológicos. No poço de Paranã a perfilagem ótica mostrou grande incidência de fraturas abertas, constituindo-se em diversas entradas de água. A existência destas fraturas abertas é um aspecto positivo para a potencialidade do aquífero quanto a produção de água termal em novos poços.

### Perfilagem Térmica

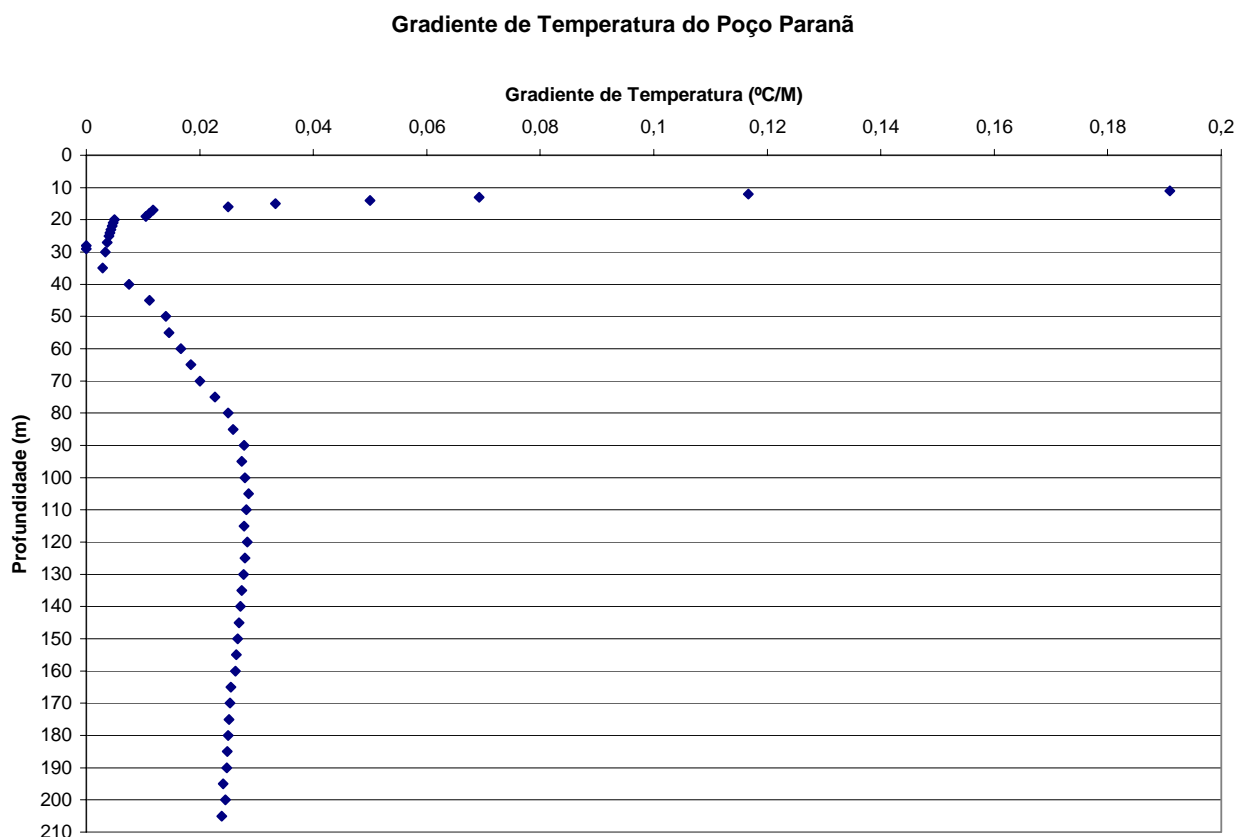
No gráfico das temperaturas em função das profundidades, observa-se que os pontos se ajustam a uma curva de tendência do tipo linear, não sendo possível individualizar zonas bem definidas de entrada de águas termais para dentro do poço (Fig. 4).



**Figura 4** - Perfilagem térmica do poço tubular.

O gradiente geotérmico no início da perfilagem variou de valores de 0,2 decrescendo até 0,00 °C/m na profundidade de 30 metros, depois passou a subir e chegou ao máximo de 0,0287 °C na profundidade de 105 metros de profundidade. No trecho de 105 a 125 metros de profundidade o gradiente geotérmico manteve-se praticamente estabilizado próximo de 0,028°C/m, que corresponde a um aumento de 1°C de temperatura a cada 35,00 metros de profundidade. Depois decresceu novamente constantemente até a profundidade de 220 metros, registrando 0,0239°C/m. (Fig. 5).

Este gradiente é inferior ao gradiente termal de Caldas Novas (PEIXOTO FILHO, 2000) e Jaú do Tocantins (PEIXOTO FILHO & LACERDA, 2004) que é de 0,04 °C/m.



**Figura 5-** Gradiente de temperatura do poço tubular.

## **HIDROGEOLOGIA DO SISTEMA HIDROTÉRMAL DA SERRA DAS CALDAS**

Para a gestão da exploração das águas termais é importante conhecer a recarga, o fluxo natural de água e calor e a descarga hidrotermal ou variação nas reservas de água e calor. Se o potencial do aquífero não é bem conhecido, a descarga (retirada de água e calor do sistema) pode ultrapassar a recarga (entrada de água e calor no sistema) passando-se de um processo de exploração racional para a super exploração.

Sob o ponto de vista da hidrogeologia a região estudada pode ser dividida em dois domínios: Sistema Aquífero de Relevo Plano; e Sistema Aquífero da Serra das Caldas. O Sistema Aquífero de Relevo Plano está inserido na Depressão do Tocantins, cujas altitudes são de 280 a 360 metros, onde afloram rochas do Complexo Granito-Gnáissico, que constituem o embasamento dos Grupos Araí e Paranoá. Neste sistema as águas circulam a pequenas profundidades e praticamente não sofrem influências do Grau Geotérmico e o nível de base é o rio Boa Ventura.

O outro sistema aquífero, objeto desta nota, é denominado aqui Sistema Aquífero da Serra das Caldas e está associado ao Planalto do Alto Tocantins-Paranaíba, representado pela Serra das Caldas, onde ocorrem quartzitos da Formação Arraias do Grupo Arai. Estas elevações se estendem desde a porção sul até o norte da área, atingindo altitudes máximas da ordem de 1.100 metros. A associação das características geológicas e geomorfológicas já descritas facilitam a circulação das águas em profundidade, dando origem ao Sistema Hidrotermal da Serra das Caldas.

### **Recarga**

Admite-se que a recarga ocorre na Serra das Caldas onde as águas pluviais, infiltradas no regolito precipitadas diretamente nos quartzitos, se infiltram nas fraturas destas rochas, constituindo recarga do tipo difusa. Essa hipótese pode ser provavelmente estendida para toda a grande dorsal morfológica da Serra das Caldas, com quase 40 km de comprimento. A zona de recarga do sistema aquífero termal da Serras das Caldas pode ser delimitada espacialmente pelas ocorrências de quartzitos (Formação Arraias do Grupo Arai), com altitudes superiores a 350 metros, obtidas pela superposição dos mapas geológico e topográfico 1/100.000. Usando tais critérios delimitou-se a área de recarga abrangendo 120 km<sup>2</sup>.

### **Circulação ou percolação profunda do sistema aquífero.**

As águas da chuva após sua precipitação e infiltração nas fissuras, são submetidas aos gradientes hidráulicos associados aos termais, que possibilitam a circulação desde a superfície até grandes profundidades. O calor para o aquecimento da água termal está associado ao grau geotérmico normal e conseqüentemente o aquecimento da água é proporcional a profundidade de circulação.

A circulação ascendente da água aquecida transporta calor, aquecendo apenas as paredes do maciço rochoso. O arrefecimento da água ascendente é atenuado, pois as paredes das rochas se encontram aquecidas, permitindo a chegada da água até a superfície, ainda com temperaturas elevadas.

### **Sistema aquífero**

O sistema aquífero hidrotermal da Serra das Caldas constitui-se de um arranjo tridimensional de estruturas geológicas (fraturas, falhas, e outras discontinuidades) capazes de permitir a recarga e a circulação da água em fase contínua, fornecendo um controle da pressão, com movimentação sub-superficial lenta, regida pela lei de fluxo das águas subterrâneas.

### *Descarga ou exutório*

Neste texto o que está designado como “fonte termal” é uma surgência que deságua imediatamente no rio Boa Ventura, onde a temperatura medida com termômetro de precisão é de

37,4°C e apresentando vazão de 12m<sup>3</sup>/h. Nas proximidades desta fonte em uma área de 200 m<sup>2</sup>, existem outras surgências com vazões menores cujas temperaturas são de 28,0°C a 30,6°C.

Além da fonte termal acrescenta-se o poço tubular profundo, que pode produzir uma vazão de 5,5m<sup>3</sup>/h com temperatura de 30,6°C.

A vazão da fonte termal foi determinada a vazão total utilizando um vertedouro triangular e o modelo de Gourley:

$$Q = 1,32tg \frac{\alpha}{2} h^{2,47}$$

O vertedouro é do tipo triangular cujo ângulo do vértice é de 90° graus. A carga hidráulica (h) é a altura desde o vértice até o nível da água que passa sobre o vertedouro. A medição na fonte da fazenda Poços de Caldas em 16/09/2003 revelou uma vazão de 12.000 l/h. Conforme já assinalado na abordagem do teste de produção a vazão do poço tubular foi 5,5 m<sup>3</sup>/h.

## Potencialidades

As reservas de águas subterrâneas podem ser classificadas em: reserva reguladora ou renovável; reserva permanente; reserva total; e reserva de exploração ou recurso. A *reserva reguladora* ou renovável representa a quantidade de água que escoam livremente pelo aquífero por recarga natural. *Reserva permanente* representa as águas acumuladas nos aquíferos que não escoam e não variam em função do escoamento natural. Havendo uma estiagem longa, as águas das reservas renováveis escoarão para as drenagens até cessar o escoamento, restando apenas a reserva permanente. *Reserva total* representa a soma das reserva renovável e permanente. A *reserva de exploração* ou recurso disponível, representa o percentual da reserva total que se pretende lavar.

A dimensão espacial do aquífero na horizontal abrange uma área de 120 km<sup>2</sup>, enquanto que na vertical as informações de geologia de superfície indicam que os quartzitos atingem profundidades quilométricas. Utilizando-se as informações sobre as temperaturas das águas em superfície e o geotermômetro (sílica), estima-se que a circulação da água deve alcançar a profundidade de pelo menos 1,2km, compatível com as informações geológicas.

Quanto ao coeficiente de armazenamento, foram utilizados os parâmetros obtidos para as fraturas do Aquífero de Caldas Novas (Goiás), onde existe uma grande rede de poços. Neste local o coeficiente varia de 0,00058 a 0,35, com mediana de 0,059 (PEIXOTO FILHO, 2000). Utilizando esses parâmetros para a área de Paranã é possível então estimar as reservas permanentes, que podem oscilar amplamente entre um mínimo de 0,083 bilhões de m<sup>3</sup> e um máximo de 50,4 bilhões de m<sup>3</sup>, com o valor da mediana de 8,496 bilhões de m<sup>3</sup>.

Com base nas séries temporais de precipitação de 20 anos, usando o balanço hídrico de THORNTHWAITE & MATHER (1955) e analisando as curvas de recessão do trecho estudado da bacia do rio Paranã, estação Montante da Barra do Palma, no período de novembro de 1977 a dezembro de 2001 (DNAEE/ANA, 1982) verificou-se que a recarga estimada com 50% de probabilidade foi de 7,93 l/s/km<sup>2</sup>. Para uma confiança de 80% de probabilidade, essa recarga é de 2,5 l/s/km<sup>2</sup>. A área da zona de recarga foi delimitada em 120 km<sup>2</sup> e conseqüentemente as reservas renováveis do Sistema Hidrotermal da Serra das Caldas são da ordem de grandeza de 300l/s ou 1080 m<sup>3</sup>/h.

Desta reserva, nem toda água infiltrada atinge as grandes profundidades, apenas uma parcela atinge as grandes profundidades. Na área há uma vazão 17,5m<sup>3</sup>/h com temperatura de 35,26°C, disponível para abastecer um empreendimento de médio porte, contabilizadas a vazão de 12m<sup>3</sup>/h de água com temperatura 37,4°C da fonte da Fazenda Mansão das Caldas e a vazão de 5,5m<sup>3</sup>/h com temperatura de 30,6°C, do poço tubular. Um exemplo de empreendimento utilizando água com temperatura de 29°C está no Município de Lagoa Santa (GO).

## **HIDROQUÍMICA**

A hidroquímica fornece informações sobre a interação água/rocha, origem e qualidade das águas quanto a sua potabilidade química e demais usos. A interação água/rocha depende de vários fatores interrelacionados: temperatura; pH; íons dissolvidos; estabilidade química dos minerais contidos nos tipos litológicos; e tempo de residência da água na rocha. Neste trabalho o interesse maior da hidroquímica foi reconstituir o trajeto das águas desde a recarga até o exutório, uma vez que águas termais circulam por distâncias longas durante grandes períodos de tempo, percolando eventualmente vários tipos litológicos. A amostragem e as determinações *in loco* foram feitas na fonte termal e no poço tubular. As análises químicas completas foram feitas no Laboratório Hidroserv e as análises físico-químicas no Laboratório Aqualit e Laboratório da Universidade de Berlim.

### **Qualidades das águas da fonte Fazenda Mansão das Caldas**

Os resultados de análise físico-química indicaram: pH ácido, variando de 5,26 a 5,60; dureza 8,0 a 12,0 mg/LCaCO<sub>3</sub>; a alcalinidade de 10 a 15 mg/L mg/L e sólidos totais dissolvidos são baixos, próximos de 9,0 mg/L e condutividade elétrica de 20 a 25,5 µS/cm; teor de cálcio de 1,62 a 2,45mg/L; teor de magnésio varia de 0,68 a 3,91mg/L. Os fluoretos estão ausentes e de acordo com o Código de Águas Minerais, a água pode ser classificada como mineral devido a temperatura. Os teores de sílcio variam de 9,56 a 11,8 mg/L, valores coerentes com a temperatura da água (FOURNIER *et alli*, 1974). Estas características são indicativas de pequena interação entre



água/rocha, reforçando a hipótese apresentada para o modelo geológico, segundo o qual estas águas termais circularam por quartzitos com lentes de metaconglomerados.

### Qualidade das águas do poço tubular

As análises das águas do poço tubular indicaram: temperatura de 30,6°C, que varia durante o bombeamento podendo atingir 33°C; pH varia de 5,4 a 6,08; dureza total baixa de 11,0mg/LCaCO<sub>3</sub>; e condutividade elétrica de 29,4 a 33,3 μS/cm; teor de cálcio de 0,89 a 2,45 mg/L; teor de magnésio de 1,0 a 5,59 mg/L. Esta água contém 0,12 mg/L de fluoreto e, de acordo com o Código de Águas Minerais, pode ser classificada como água mineral.

Concluindo, as águas do poço tubular podem ser consideradas de baixa mineralização, porém muito mais mineralizadas do que as águas da fonte termal da fazenda Mansão das Caldas. Suas características físico-químicas mostram que interação água/rocha foram inexpressivas.

### ISÓTOPOS

O trabalho com isótopos em hidrogeologia permite investigar a origem e condições climáticas da recarga (<sup>18</sup>O e <sup>2</sup>H), idade da água (<sup>3</sup>H e <sup>14</sup>C/<sup>12</sup>C) e vegetação à época da infiltração (<sup>13</sup>C). É óbvio que, quanto maior o conhecimento da hidrogeologia do aquífero, melhor será a interpretação dos resultados relativos aos isótopos. A amostragem foi feita na fonte da fazenda Mansão das Caldas e no poço tubular profundo, sendo que no poço não foi analisado <sup>13</sup>C/<sup>14</sup>C. As análises dos isótopos estáveis <sup>18</sup>O e <sup>2</sup>H e dos isótopos radioativos <sup>3</sup>H (Trítio) e <sup>13</sup>C/<sup>14</sup>C foram feitas no Laboratório Hydroisotop, na Alemanha (Tab. 2).

**Tabela 2-** Resultados das análises de isótopos (Laboratório Hydroisotop).

Amostra	δ <sup>18</sup> O‰	δ <sup>2</sup> H‰	<sup>3</sup> H (T.U.)	(δ <sup>13</sup> C-DIC)‰	<sup>14</sup> C (PmC)
Fonte Termal	-6,37	-43,2	<0.6	-19,6	90.2 ± 0.6 %
Poço	-6,37	-42,1	0.8 ± 0.8	-	-

### Oxigênio 18 (<sup>18</sup>O) e Deutério (<sup>2</sup>H)

Através da correlação entre <sup>18</sup>O e <sup>2</sup>H pode-se caracterizar uma água como de origem meteórica, tomando-se como referência o campo da *Global Meteoric Water Line (GMWL)*. Além disto é possível inferir as temperaturas e altitudes do local da precipitação, uma vez que as chuvas precipitadas em regiões frias ou de altitudes elevadas apresentam teores de <sup>18</sup>O e <sup>2</sup>H menores do que aquelas precipitadas em ambientes quentes ou altitudes menores.

Os resultados da análise de isótopos  $^{18}\text{O}$  e  $^2\text{H}$  da amostra (Tab. 2) estão alinhados com a *GMWL*, levando-se em conta o erro analítico tolerado, indicando que a água é de origem meteórica. Os valores de  $^{18}\text{O}$  e  $^2\text{H}$  da amostra sugerem que à época da precipitação, as condições meteorológicas da região eram semelhantes as atuais. Os resultados analíticos indicam também que os teores de  $^{18}\text{O}$  e  $^2\text{H}$  não foram influenciados por reações químicas na interação água/rocha.

### **Trítio ( $^3\text{H}$ )**

O trítio é um isótopo do elemento hidrogênio que, tem sido liberado por testes nucleares e há evidências de sua entrada no ciclo da água subterrânea global com um pico na década de 1950 e outro na década de 1960. O limite de detecção do trítio é de 0,6 TU, a interpretação é feita a partir do conhecimento da curva de decaimento do trítio e a curva de entrada de trítio devido aos testes nucleares, sendo que a entrada foi muito menor no hemisfério sul (atualmente 0,3 T.U) do que no hemisfério norte (0,6 T.U.). Devido ao decaimento do trítio, cuja meia vida é de 12,33 anos, o teor de trítio na água da chuva está decrescendo, aproximando-se do nível natural, faltando poucas unidades de trítio (T.U) para atingi-lo. A simples presença de trítio nas águas subterrâneas já indica que houve recarga de águas com menos de 50 anos de idade.

O limite de detecção do laboratório utilizado é de 0,6 T.U., adequado para o hemisfério norte, onde o valor atual está em torno de 0,6 T.U. Isto significa que valores compreendidos entre 0,3 e 0,6 embora não detectados pelo laboratório utilizado, teriam um significado hidrogeológico, indicando uma componente mais jovem.

Na fonte da fazenda Mansão das Caldas o trítio está ausente, feita a ressalva do limite de detecção, significando que não há misturas com águas recentes e neste caso, a idade mínima da componente mais recente seria superior a 50 anos.

O trítio na água do Poço é próximo de 0,8 TU, o que permite concluir que existe uma componente mais recente, com pelo menos 30 anos (mistura de água superficial). Esta interpretação é suportada pela perfilagem ótica do poço, que mostrou a existência de inúmeras fraturas produtoras com águas superficiais.

### **Carbono 14 ( $^{14}\text{C}$ ) e Carbono 13 ( $^{13}\text{C}$ )**

O  $^{13}\text{C}$  é enriquecido pelas plantas dependendo de seu metabolismo e conseqüentemente, a razão isotópica de  $^{13}\text{C}$  ( $\delta^{13}\text{C}$ -DIC) fornece indicações sobre a natureza das formações vegetais existentes à época da infiltração.

Na amostra analisada a razão isotópica de  $^{13}\text{C}$  é de  $-19,6\text{‰}$ , indicando que a vegetação na época da infiltração era um cerrado, semelhante a vegetação atual. Para efeito de comparação, a razão isotópica de  $^{13}\text{C}$  em uma água infiltrada na floresta amazônica é de aproximadamente  $-8,0\text{‰}$  de  $^{13}\text{C}$ .

Com relação ao  $^{14}\text{C}$ , na presente interpretação foi assumido que este isótopo entrou no aquífero com 100% pmC (porcentagem de Carbono moderno). Na amostra analisada obteve-se um resultado de  $90,2\pm 0,6\%$  pmC, indicando que nas águas termais da fonte da Fazenda Mansão das Caldas existe uma componente mais antiga, cuja idade pode atingir mais de 1000 anos.

## CONCLUSÃO

A fonte termal da Fazenda Mansão das Caldas está situada na borda leste da Serra das Caldas, sustentada por quartzitos e metaconglomerados, em local onde estas rochas estão truncadas por uma fratura ENE e afetadas por zona de cisalhamento submeridiana, indicando assim o controle lito-estrutural da surgência. O quartzitos e metaconglomerados que sustentam a Serra das Caldas estão intensamente afetados por fraturas de rumo predominantemente ENE e admite-se que as águas pluviais, precipitadas no regolito ou diretamente nas fraturas dos quartzitos, se infiltram ao longo da serra constituindo uma área de recarga do tipo difusa. A taxa de recarga da sub-bacia do Rio Santa Tereza a montante da estação Colonha foi calculada em  $2,5 \text{ l/s/km}^2$ , com uma confiança de 80%. Esta taxa foi aplicada para a área de recarga do sistema hidrotermal cuja extensão é de  $120 \text{ km}^2$ . Admite-se que as fraturas ENE e aquelas associadas às zonas de cisalhamento submeridianas, abundantes nos quartzitos, constituam os condutos favoráveis a circulação da água termal em subsuperfície.

O poço tubular atingiu profundidade de 256,0 metros e foi locado utilizando-se critérios hidrogeológicos complementados com investigação geofísica através de sondagens elétricas verticais. O teste de produção indicou uma vazão de  $5.500 \text{ l/h}$  operando em um regime de 18 horas/dia, com temperatura da água de  $30,6^\circ\text{C}$ . A perfilagem ótica mostrou grande incidência de fraturas abertas, constituindo importantes entradas de águas para o poço e apontando positivamente para a potencialidade do aquífero quanto a produção de água termal em novos poços. A perfilagem térmica mostrou que o incremento de temperatura em função da profundidade é linear, não sendo possível individualizar zonas bem definidas de entrada de águas termais. O gradiente geotérmico local foi avaliado em  $0,028^\circ\text{C/m}$ , próximo do gradiente termal predominante em Caldas Novas (GO).

As características hidroquímicas das águas, principalmente a baixa mineralização e baixa alcalinidade indicam que as águas circularam por rochas silicáticas, o que está coerente com as características hidrogeológicas do sistema.

Determinações dos isótopos  $^{18}\text{O}$  e  $^2\text{H}$  indicam que a água termal tem origem meteórica. A dosagem do  $^3\text{H}$  indica a existência de componente mais recente na fonte é estimada em 50 anos, enquanto os resultados de  $^{14}\text{C}$  apontam uma componente mais antiga, cuja idade pode atingir mais de 1000 anos. Com respeito à água do Poço existe uma componente mais recente, com pelo menos 30 anos, interpretação suportada pela observação de fraturas produtoras superficiais na perfilagem ótica.

A partir dos dados referentes à recarga do sistema, admite-se que a reserva renovável da Serras das Caldas, para uma confiança de 80% que o evento volte a ocorrer, é da ordem de 1080m<sup>3</sup>/h. Desta reserva há uma vazão disponível de 17,5m<sup>3</sup>/h com temperatura de 35°C, contabilizadas as vazões da fonte da Fazenda Mansão das Caldas e do poço tubular, suficiente para abastecer um empreendimento de médio porte.

## AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seu agradecimento ao Governo do Estado do Tocantins, na pessoa de Belisário Franco Neto, Diretor de Meio Ambiente e Recursos Hídricos na Secretaria de Planejamento e Meio Ambiente-SEPLAN do Estado do Tocantins, pela autorização para publicação dos dados. Agradecem também a CTE-Centro Tecnológico de Engenharia Ltda., na pessoa de Fausto N. M. Sarmiento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BARBOSA, O. *et alii* (1969). *Projeto Brasília-Goiás: Geologia e Inventário dos Recursos Minerais*. Goiânia: DNPM/PROSPEC, 225p.
- [2] DNAEE/ANA (1982). *Sistema de dados hidroclimatológicos*. Disponível em <http://www.ana.gov.br>, acesso em agosto de 2003.
- [3] FOURNIER, R. O; WHITE D. E & TRUESDELL, A. H. (1974). Geochemical indicators of subsurface temperature: Part 1, basic assumptions. U. S. Geol. Survey, vol. 2 nº3:259-262.
- [4] KOEPPEN, W. (1948). *Climatología*. Cidade do México: Fondo de Cultura econômica, 466p.
- [5] MAMEDE, L. *et alli* (1981). Geomorfologia. In: *Projeto Radambrasil Vol. 25*. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia, p.301-376.
- [6] PEIXOTO FILHO, S (2000). *Contribuição à Gestão do aquífero termal de Caldas Novas/Rio Quente-GO*. Recife: UFPe, dissertação de mestrado em Hidrogeologia, 183p. (inédito).
- [7] PEIXOTO FILHO, S. *et alli* (2004). *Diagnóstico das potencialidades e mapeamento hidrogeológico das fontes termais de Jaú do Tocantins*. Palmas: Secretaria do Planejamento do Estado do Tocantins, (relatório inédito).
- [8] PEIXOTO FILHO, S. e LACERDA, Homero (2004). Potencialidade do sistema hidrotermal de Jaú do Tocantins (TO). Anais do III Simpósio de Recursos Hídricos do Centro-Oeste, Goiânia.
- [9] THORNTHWAITE, C.W & MATHER, J. R. (1955). *The water balance*. Centerton: Publications in Climatology, 8(1), 104p.