

# ANÁLISE DAS FRATURAS NOS BASALTOS DE RIBEIRÃO PRETO, SP: APLICAÇÃO À ELABORAÇÃO DE MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL

Amélia João Fernandes <sup>1</sup>, Carlos Henrique Maldaner <sup>2</sup>, Alain Rouleau <sup>3</sup>

## RESUMO

A motivação que levou ao estudo da geologia física e química dos basaltos de Ribeirão Preto foi investigar a existência de recarga do Sistema Aquífero Guarani (SAG) através dos basaltos do Aquífero Serra Geral (ASG), objetivo do projeto abreviadamente denominado de FRATASG. Além de métodos hidrogeológicos, a pesquisa demandou uma investigação geológica de detalhe, a qual é essencial para a elaboração de modelos conceituais de circulação de água subterrânea em aquíferos complexos, caso dos basaltos do ASG. Assim, o estudo englobou levantamentos estruturais de detalhe e a análise de fraturas horizontais e verticais o que levou à identificação de quatro eventos tectônicos. Concluiu-se que o fluxo vertical de água subterrânea é importante até a profundidade de 10m e, secundariamente, até 25m. Há predomínio de fluxo horizontal o qual ocorre, preferencialmente ao longo de fraturas subhorizontais, presentes nos contatos entre os basalto 2 e 3 ou próximas a estes. Sugere-se que fluxo vertical mais profundo é muito localizado e deve ocorrer preferencialmente segundo a direção NE.

## ABSTRACT

The study of the physical geology and geochemistry of the basalts of Ribeirão Preto was part of a hydrogeological research that aimed at investigating the recharge of the Guarani Aquifer System (SAG) through the basalts of the Serra Geral Aquifer (ASG), a project shortly named FRATASG. Besides the hydrogeological methods, the research demanded a detailed geological investigation, essential for the elaboration of conceptual models of ground water circulation in complex aquifers, as is the case of the fractured basalts of the ASG. Thus, the study encompassed a thorough structural survey and analysis of horizontal and vertical fractures, which has resulted in the identification of four tectonic events. It was concluded that the vertical groundwater flow is important up to 10 m in depth and, secondarily, up to 25 m. Horizontal flow predominates and occurs along subhorizontal fractures, which are characteristic of the contact between basalts 2 e 3

<sup>1</sup> Amélia João Fernandes, Instituto Geológico, Av. Miguel Stefano, 3900, 04301-903, São Paulo, SP, tel. (11) 50735511 r. 2046, fax (11) 50772219, ameliaj@igeologico.sp.gov.br

<sup>2</sup> Carlos H. Maldaner, Instituto de Geociências - USP, Rua do Lago, 562, São Paulo, SP, tel. (11) 3091.4804, cmaldaner@gmail.com

<sup>3</sup> Alain Rouleau, Université du Québec a Chicoutimi, Québec, Canadá, Alain\_Rouleau@uqac.ca

and in its vicinity. It is suggested that deep vertical flow is very localized and probably occurs along the NE direction.

Palavras-Chave: Aquífero Serra Geral, modelo hidrogeológico conceitual, análise estrutural.

## 1. INTRODUÇÃO

O Instituto Geológico, em parceria com a USP - Universidade de São Paulo, USGS - Serviço Geológico dos Estados Unidos, UQAC - Universidade de Quebec em Chicoutimi, e com colaboração do IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas, ON - Observatório Nacional e COC - Universidades COC, desenvolveu estudo geológico e hidrogeológico de detalhe em área localizada no distrito de Bonfim Paulista, município de Ribeirão Preto, com o intuito de responder a seguinte questão: existe recarga do Sistema Aquífero Guarani (SAG) através dos basaltos do Aquífero Serra Geral (ASG)?

A motivação deste estudo é o fato do SAG, o mais importante e estratégico manancial de água potável do Brasil, estar sendo ameaçado, em termos de qualidade e quantidade, devido à instalação de grandes centros urbanos em áreas constituídas de basalto e próximas ao afloramento do SAG. Alguns indícios hidrogeoquímicos como concentrações elevadas de nitrato e cloreto, detectadas em poços de SAG, na área urbana de Ribeirão Preto, levantam a possibilidade desta contaminação chegar ao SAG através de fraturas transmissivas verticais do ASG. Assim, o projeto “A Formação Serra Geral como conexão hidráulica entre a superfície e o Sistema Aquífero Guarani: análise estrutural e ensaios in situ - FRATASG” realizou investigações geológicas e hidrogeológicas de detalhe para contribuir para o entendimento do fluxo vertical através dos basaltos.

Os métodos utilizados no projeto envolveram desde mapeamento geológico de detalhe e estudo das estruturas tectônicas rúpteis até ensaios hidráulicos e estudos hidroquímicos e isotópicos. Neste artigo são apresentados os resultados referentes ao levantamento estrutural de detalhe no distrito de Bonfim Paulista, além de dados coletados em região maior no município de Ribeirão Preto e arredores. Um modelo hidrogeológico conceitual, construído com base em mapeamento de detalhe, apresentado em Fernandes et al. (2010) e nos resultados do levantamento estrutural é apresentado no final do trabalho.

## 2. MÉTODOS

Os levantamentos geológicos, realizados de forma esparsa na região de Ribeirão Preto e em detalhe no distrito de Bonfim Paulista, consistiram em descrição de 50 afloramentos. Dados

estruturais foram coletados: ao longo de *scanlines* na área de Bonfim Paulista; e dados de fraturas tectônicas na região como um todo, mas com mais detalhe na área de Bonfim Paulista; em poços construídos no projeto FRATASG através da utilização de perfilagens acústicas pela ferramenta *Borehole Acoustic Televiewer* (BHTV).

O levantamento sistemático de fraturas em afloramentos de boa qualidade (pedreiras e cortes de rodovias), para caracterização de parâmetros geométricos das fraturas, tais como espaçamento, comprimento, etc, foi realizado em 12 *scanlines* horizontais (seis afloramentos e duas *scanlines* em cada um) e algumas verticais.

A determinação da natureza da fratura, se de esfriamento ou associada a tectônica baseou-se em critérios, tais como: as fraturas de resfriamento podem formar padrões e não existem orientações preferenciais (*trends*); estruturas tectônicas apresentam *trends* preferenciais às vezes muito bem marcados, em geral, são mais contínuas e podem concentrar-se em faixas estreitas que por vezes evidenciam existência de cisalhamento; fraturas tectônicas podem apresentar relações angulares persistentes, tais como as de pares conjugados, onde se identifica dois grupos principais de fraturas que mantêm ângulo aproximado de 60° ou menos entre si; estrias e *steps* (pequenos degraus perpendiculares às estrias) nas superfícies das fraturas indicam atuação de cisalhamento e de esforços tectônicos, que pode ter sido produzida por reativação de fratura formada anteriormente por resfriamento ou tectônica.

O levantamento das estruturas tectônicas na presente pesquisa teve como objetivos a determinação: dos *trends* de fraturas tectônicas mais importantes e que podem servir como conexão hidráulica entre os vários derrames e destes com o Aquífero Guarani; dos vários eventos tectônicos pós-basaltos e de sua superposição no tempo, sendo que, a princípio, o evento mais jovem determinaria a direção atual do fluxo principal de água subterrânea.

### 3. TRABALHOS ANTERIORES

Síntese da geologia da Formação Serra Geral é apresentada em Fernandes et al. (2010), cujo foco é a apresentação da estratigrafia dos basaltos de Bonfim Paulista e extrapolação da mesma para parte da região de Ribeirão Preto, bem como da sua caracterização física e química.

Existe pouca informação disponível a respeito da geologia estrutural da Formação Serra Geral bem como uma análise da tectônica pós-basaltos. Os dados da literatura provem quase exclusivamente dos trabalhos sobre caracterização de fundações de barragens. Dentre estes, Bjornberg e Kutner (1983) elaboraram síntese das características estruturais das barragens em basalto no Estado de São Paulo, na qual descrevem fraturas subverticais tectônicas, no entanto o

fluxo importante de água subterrânea está associado às, assim denominadas, juntas-falha sub-horizontais. Para a região sul brasileira (bacias dos rios Iguaçu e Uruguai), no entanto, Marques Filho et al. (1981) e Bjornberg e Kutner (1983) ressaltam o controle estrutural dos rios e a ocorrência de numerosos lineamentos, além de zonas de fraturas subverticais com estrias indicando movimentação transcorrente bem como falhas normais com rejeitos de alguns metros a dezenas de metros. Estas estruturas verticais também constituem caminhos de fluxo de água subterrânea. Marques et al. (1987) descreve, na barragem de Porto Primavera, fraturas verticais de direção N45-55W com estrias indicando movimentação transcorrente em basaltos e fraturas N84E com movimentação sinistral nos arenitos Caiuá.

#### **4. GEOLOGIA DA REGIÃO DE BONFIM PAULISTA - RIBEIRÃO PRETO**

De acordo com Fernandes et al. (2010) na área de Bonfim Paulista ocorrem quatro derrames de basaltos, denominados, do mais antigo para o mais jovem, de B1, B2, B3 e B4 (Figura 1). A ocorrência de B4 é muito restrita, pois foi erodido em grande parte. B1 e B2 apresentam espessuras de, em média, 45 e 55 m, respectivamente. Todos os quatro basaltos são do tipo *sheet like lobes* e devem ter sido colocados por inflação (tipo *pahoehoe*). B1 apresenta espessa crosta vesicular superior e, assim como em B2, podem apresentar mais de um nível vesicular no topo. Colunas de resfriamento foram observadas em B2 e B3, sendo mais espetaculares em B3 devido à presença de uma camada colonada inferior (B3-C) e uma justaposta com entablamento (B3-E). B3 é o mais espesso (75 a 100 m) e contém brechas hidráulicas distribuídas em bolsões, posicionados na camada B3-C, ou ao longo de fraturas sub-horizontais que até hoje permitem circulação de fluidos (água subterrânea). B3 apresenta composição química homogênea e é perfeitamente distinguível com relação a vários óxidos (Fernandes et al. 2010).

#### **5. ANÁLISE ESTRUTURAL**

A análise estrutural em basaltos deve considerar que, nestas rochas, estão presentes fraturas cuja gênese relaciona-se ao resfriamento e, a princípio, não tem relação com esforços tectônicos. As fraturas de resfriamento são controladas pelo paleo-relevo sobre o qual a lava foi colocada e pelo mecanismo de colocação do basalto, o qual controla as dimensões e formatos dos corpos. Fernandes et al. (2010) consideram que o mecanismo de colocação dos basaltos de Bonfim Paulista/Ribeirão Preto foi de inflação no qual o derrame é alimentado por lava colocada sob crosta já solidificada de basalto, e que os derrames são do tipo *sheet-like-lobes*, ou seja são corpos tabulares de grandes dimensões. Esta crosta é rica em vesículas e sob ela ocorre basalto denso onde abundam as fraturas

verticais. A maioria destas tem sua propagação controlada pelo resfriamento que ocorre das bordas (inferior e superior) para o centro do derrame. As isotermas do derrame em resfriamento são, de um modo geral, paralelas a estes limites, os quais são próximos da horizontal. As fraturas propagam-se perpendicularmente às isotermas e, portanto, são verticais (Budkewitsch e Robin 1994). Fraturas horizontais também são comuns e formam-se, muito provavelmente, devido à contração do derrame, durante o resfriamento, sendo que o alívio de pressão, para aquelas próximas à superfície, também deve ser um fator relevante. Os níveis de basalto vesicular amidaloidal (BVA) apresentam poucas fraturas, tanto verticais como horizontais. Vale notar que nas perfilagens BHTV dos poços construídos não foi registrada nenhuma fratura (horizontal ou vertical) nos BVAs. É provável que a contração devida ao resfriamento, nestes níveis, seja acomodada pelas inúmeras descontinuidades representadas pelas vesículas, amídalas e geodos, o que inibiria a formação de fraturas.

Quando as fraturas verticais delimitam colunas, tendo em geral distribuição isotrópica (não há predomínio de algumas direções sobre outras), a gênese por resfriamento é inequívoca. Os critérios para diferenciação entre fraturas originadas por resfriamento daquelas originadas por tectônica são enumerados abaixo:

- Padrões de fraturas conjugadas em setores restritos de basalto cuja distribuição e terminações é condicionada por fraturas de resfriamento, mostrando que as primeiras são posteriores às segundas.
- Fraturas subparalelas e com *trends* bem definidos, por vezes anastomosadas, distribuídas em faixas estreitas e constituídas de segmentos de fraturas que delimitam colunas finas em B3-E.
- Fraturas subparalelas com grande densidade em faixas de largura decimétrica a métrica, e que são posteriores a fraturas de resfriamento.
- Fraturas que se propagam em camadas de arenito intertrappe, por vezes bem desenvolvidas e com *trend(s)* direcional(is) bem definido(s).

Além disto, a presença de *slickensides* com estrias de atrito e degraus perpendiculares indicam a atuação de esforços tectônicos, tanto em estruturas originalmente de resfriamento como as geradas por esforços tectônicos.

A seguir são descritas, as fraturas horizontais e depois as verticais. Com relação a estas últimas, procurou-se diferenciar as que delimitam colunas, inequivocamente relacionadas a resfriamento de lava, e as que não delimitam, bem como outras feições que indiquem origem relacionada a resfriamento ou a tectônica. Após isto são apresentados os eventos tectônicos identificados na área de estudo e, por último, o modelo conceitual de circulação de água subterrânea construído com base em feições indicativas da existência de fluxo.

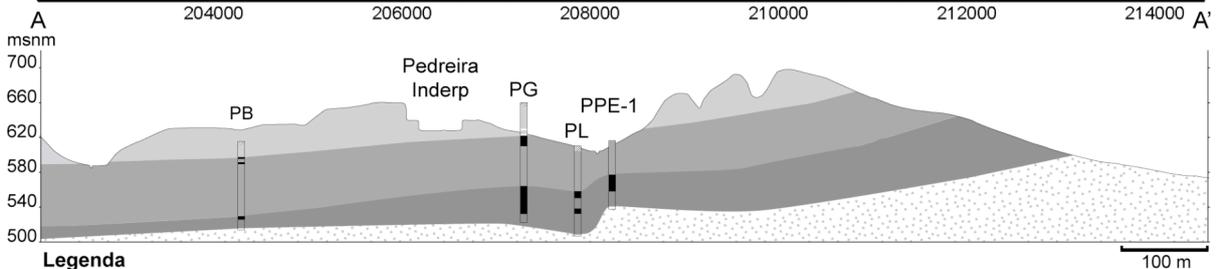
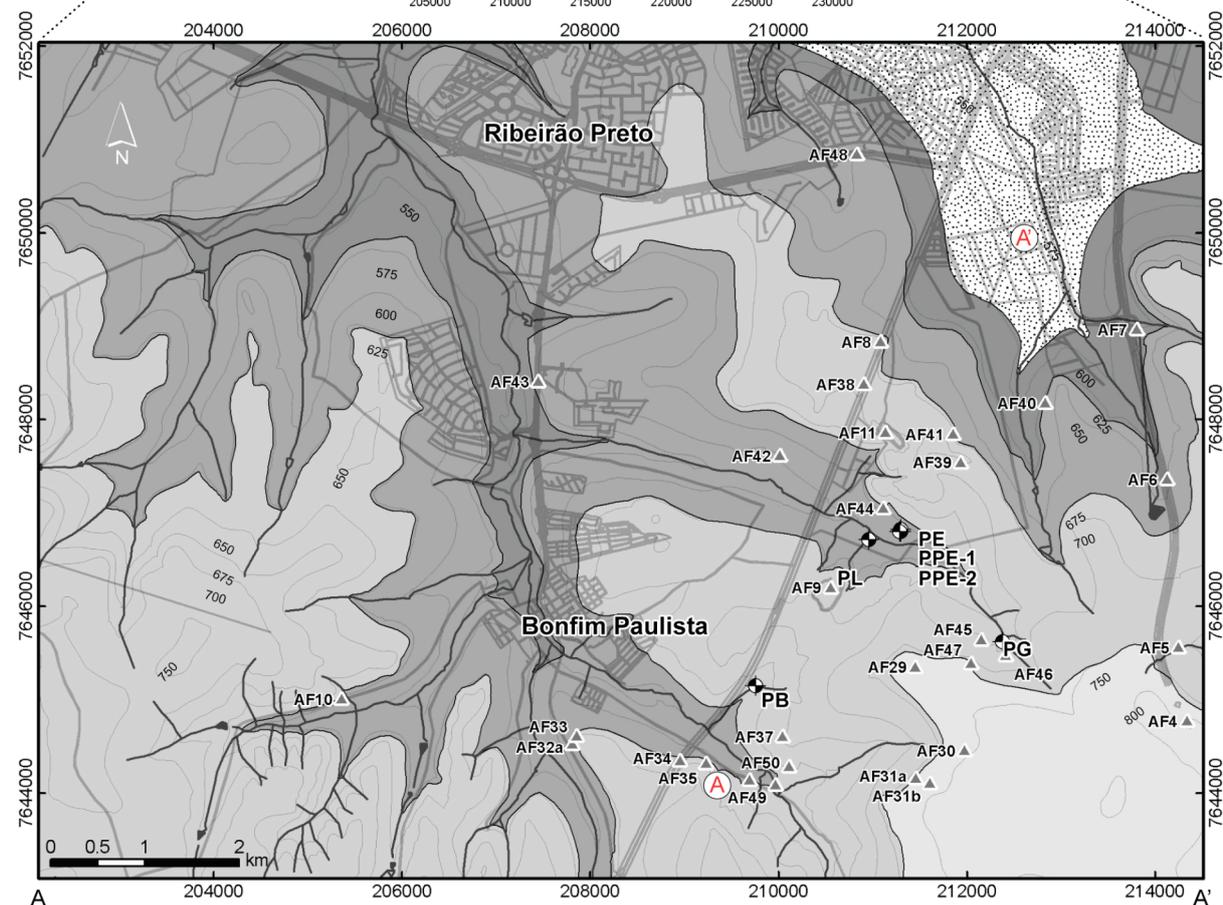
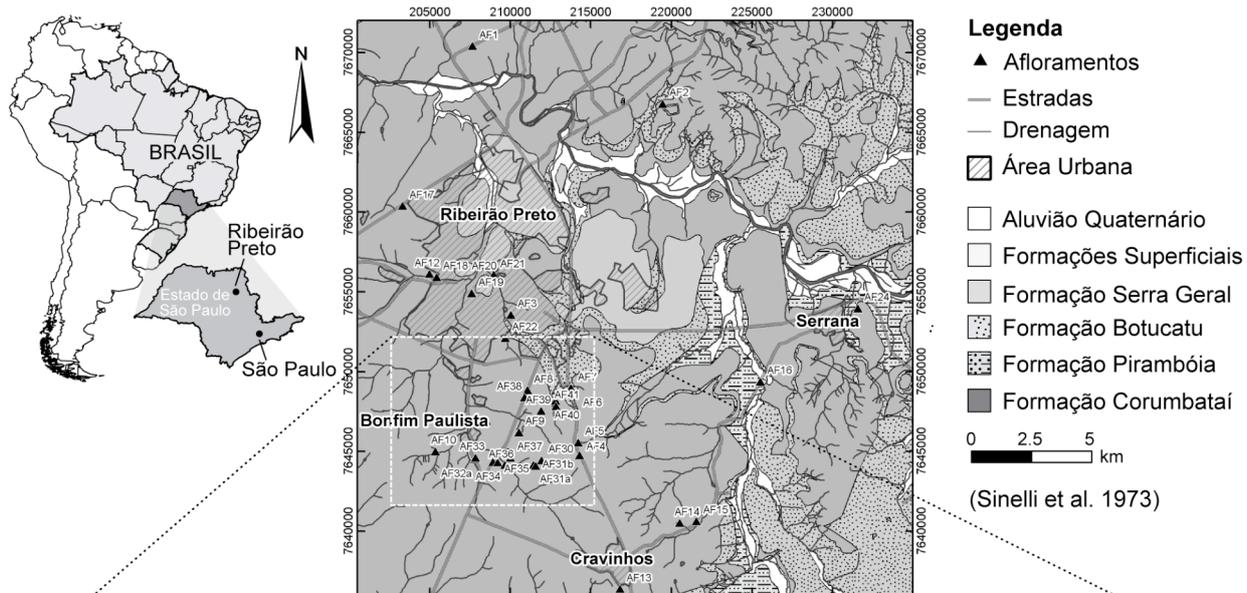


Figura 1. Mapa de localização e mapa geológico de detalhe para a área de Bonfim Paulista.

## 5.1 Fraturas horizontais

Para deixar o texto mais leve utiliza-se a expressão “fraturas horizontais”, mas de fato são sub-horizontais ou ainda de mergulhos baixos. Estas são classificáveis em fraturas de grande extensão (comprimento de dezenas ou centenas de metros) e de pequena extensão (decímetros a poucas dezenas de metros). Em B3, são acompanhadas por alteração intempérica pronunciada nos primeiros 10 m a partir da superfície do terreno. Estas fraturas, em B3-E, interceptam fraturas verticais muito alteradas que estão conectadas com a superfície. A alteração das fraturas verticais diminui abruptamente, de cima para baixo, após interceptar determinadas fraturas horizontais, indicando que o fluxo de água que se desloca para baixo, ao longo das fraturas verticais, passa a ocorrer predominantemente ao longo daquelas fraturas horizontais (Figura 2). Nos derrames B1 e B2 e mesmo em B3-C também são observadas fraturas horizontais nos primeiros metros junto à superfície, no entanto, a alteração não é tão pronunciada e os comprimentos são menores. Isto sugere que a infiltração vertical é mais importante em B3-E possivelmente devido à presença da grande quantidade de fraturas verticais que delimitam as colunas. Também se verifica um maior comprimento das fraturas horizontais em B3-E.

No basalto denso, e em profundidades um pouco maiores, as fraturas horizontais podem apresentar espaçamento decimétrico a métrico, e estão preenchidas por sílica microcristalina e calcita.

Vale notar que nas perfilagens BHTV dos poços construídos não foi registrada nenhuma fratura (horizontal ou vertical) nos BVAs. Nos afloramentos, verificou-se que, em geral, os níveis de BVA apresentam poucas e descontínuas fraturas, tanto verticais como horizontais (Figura 3). Neste níveis, existem superfícies horizontais representadas por: (1) concentração de vesículas na horizontal; (2) limites de acréscimo de material vesiculado devido a suprimento de magma, pelo mecanismo de inflação, sob a crosta solidificada; (3) fluxo horizontal de magma colocado sob ou sobre as crostas vesiculares solidificadas. Tais superfícies podem ser aproveitadas para a geração de fraturas causadas pela contração do derrame, devido ao resfriamento, ou alívio de pressão quando estes níveis estão próximos à superfície.



Figura 2. Fraturas próximas à superfície do terreno e acompanhadas por alteração intempérica pronunciada.



Figura 3. Nível de basalto vesicular BVA de B1 apresentando poucas e descontínuas fraturas, tanto verticais como horizontais. O nível de BVA é sobreposto por arenitos e peperitos da base de B2.

Algumas fraturas horizontais, ou de mergulho baixo, observadas no contato entre B2 e B3 e entre B3-C e B3-E, atingem extensão lateral mínima da ordem de centenas de metros (Figura 4). Cisalhamento ao longo destas é indicado pelo padrão lenticular e anastomosado das fraturas e pelas suas superfícies lisas, contendo estrias de atrito. Estas fraturas estão associadas a brechas compostas por fragmentos de basalto vesicular em matriz de quartzo, calcita, zeólitas, clorofeita, hidrobiotita e argilomineral ferruginoso. No contato B3-C e B3-E os fragmentos de basalto denso não contêm vesículas. As brechas ocorrem tanto em camadas adjacentes às fraturas horizontais como em bolsões próximos a elas e situados em B3-E. Um dos bolsões de brecha dispõe-se abaixo de dezenas de metros de rocha fresca, no entanto apresenta-se muito alterado. A alteração foi ocasionada pelo fluxo de líquidos hidrotermais e, posteriormente, de água subterrânea ao longo da fratura horizontal, do contato B2/B3 (Fernandes et al. 2010).

A hipótese aventada para a origem destas estruturas no contato B2/B3 e B3-E/B3-C é a seguinte:

- B3 foi colocado sobre uma superfície com paleo-relevo, o que ocasionou isotermas de resfriamento onduladas e, conseqüentemente, o “contato” também ondulado entre B3-E e B3-C.
- Os fluidos que originaram as brechas migraram de áreas de maior pressão para áreas de menor pressão, dentro do nível B3-C, acumulando-se em bolsões e ao longo do contato B3-C/B3-E. É provável que estas áreas de menor pressão correspondam a locais com menor espessura de B3-E sobre B3-C (ou seja, onde a espessura do derrame é menor).

- A grande pressão de fluidos hidrotermais nos locais de acúmulo de fluidos (atuais bolsões de brechas) levou a fraturamento hidráulico. A ocorrência de fraturamento hidráulico ao longo de descontinuidades pré-existentes horizontais, ou de mergulho baixo, (contatos B3-C e B3-E e B2/B3) indica a existência de esforço compressivo horizontal naquela época.
- Com a geração destas fraturas, ortogonais ao esforço mínimo principal ( $\sigma_3$ ), mais fluidos migraram para estes locais, posteriormente cristalizando-se aí.
- O esforço máximo horizontal, possivelmente atuando em conjunto com o fluxo plástico e o peso de B3-E (com pelo menos 60 m de espessura) e o mergulho de algumas destas fraturas, além da presença de líquidos percolantes, propiciou o cisalhamento ao longo das estruturas. Estas feições, portanto, seriam resultado da soma de causas tectônicas e atectônicas.

As fraturas horizontais de grande extensão, conspícuas mas pouco frequentes na área de estudo são as feições mais importantes para o fluxo de água subterrânea, como indicado pelas freqüentes saídas de água a elas associadas e verificadas em afloramentos (Figura 4).

## 5.2 Fraturas verticais

As fraturas verticais dos basaltos podem ser divididas em dois tipos: as que delimitam e as que não delimitam colunas. Destas últimas, são consideradas como possivelmente tectônicas aquelas que seguem os critérios enumerados anteriormente (início do item “Análise estrutural”).

Além da coleta de dados estruturais em afloramentos, a qual incluiu o método de levantamento de fraturas ao longo de *scanlines*, também se dispõe de fraturas identificadas ao longo de perfilagens acústicas em cinco poços construídos no Projeto FRATASG, permitindo visualização e elaboração de estereogramas das fraturas que cortam os basaltos em profundidade (Figura 5).

Nenhuma fratura foi registrada pelo BHTV nos intervalos constituídos por BVA ou por arenito, indicando que nestes poços não foi interceptada nenhuma fratura tectônica de maior importância. A seguir são descritas as fraturas verticais observadas em cada um dos derrames mapeados e também no afloramento da Formação Botucatu mais próximo da região de estudo, localizado em Altinópolis, e em dois corpos de arenitos intertrappe. Após isto serão descritos os eventos tectônicos que afetam os basaltos de Ribeirão Preto.

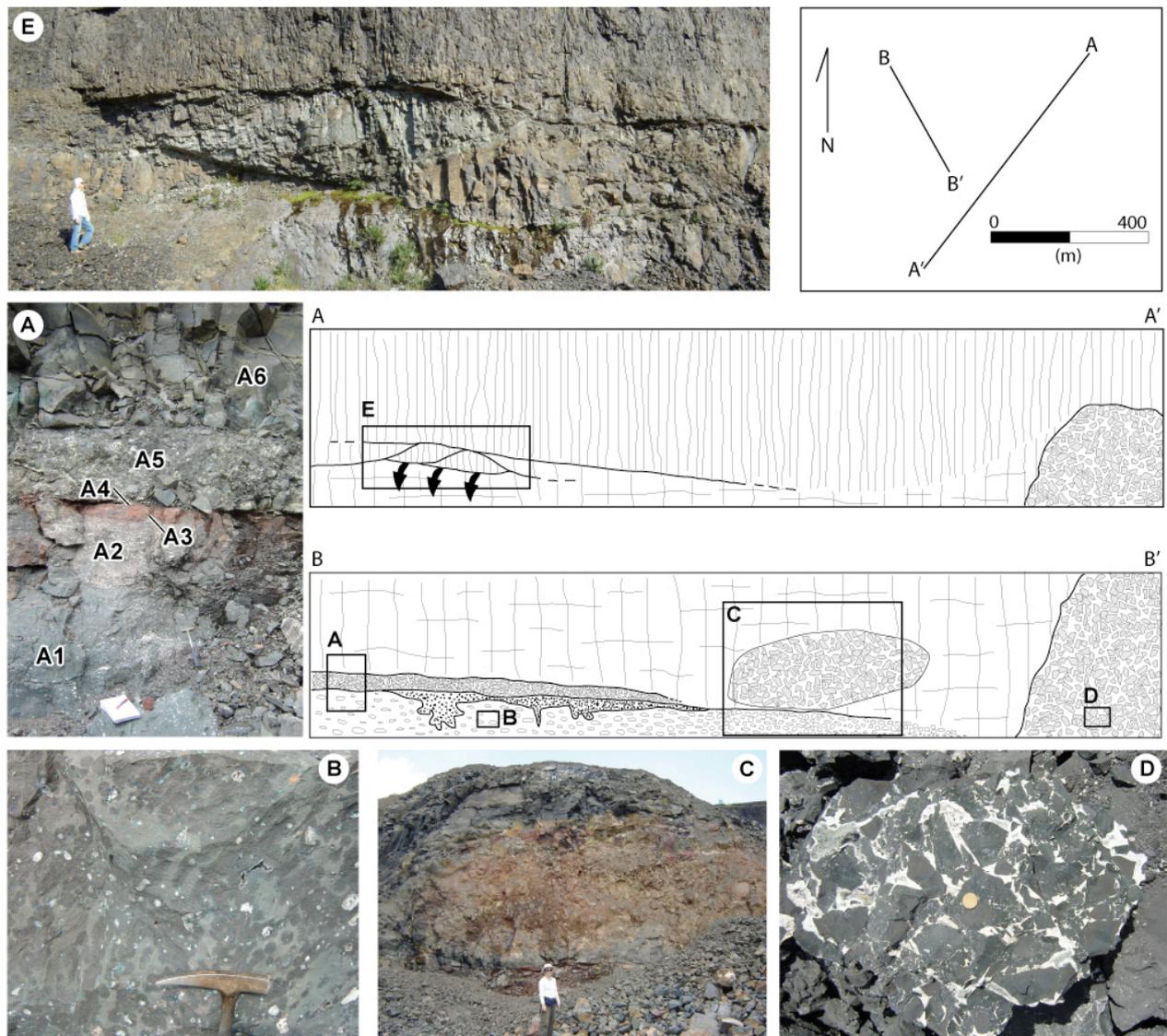


Figura 4. Croqui de parte do AF 11. **(A)** Contato B2/B3. (A1) Basalto vesicular da porção superior de B2 (B2-VA); (A2) brecha de fragmentos de B2-VA em matriz de arenitos de coloração avermelhada; (A3) Arenito pouco espesso de cor avermelhada; (A4) Fratura sub-horizantal; (A5) brecha, de 80 cm de espessura, com fragmentos de B3-VA em matriz branca (detalhes no texto); (A6) B3 com vesículas achatadas e amídalas, ambas milimétricas, esparsas. **(B)** B2-VA de colorações variadas resultantes de processos de alteração causados por circulação heterogênea, tanto de líquidos hidrotermais, oriundos de B3, como de líquidos já mais frios (água subterrânea), produzindo alteração intempérica (detalhes no texto). **(C)** Bolsão de brecha alterado na base de B3c, imediatamente acima de fraturas subhorizontais localizadas entre B2 e B3. **(D)** Brecha em bolsão na base de B3. **(E)** Fraturas subhorizontais, no contato entre B3-C e B3-E, configurando uma zona de cisalhamento. Notar presença de vegetação, acompanhada por saída de água, na fratura mais inferior.

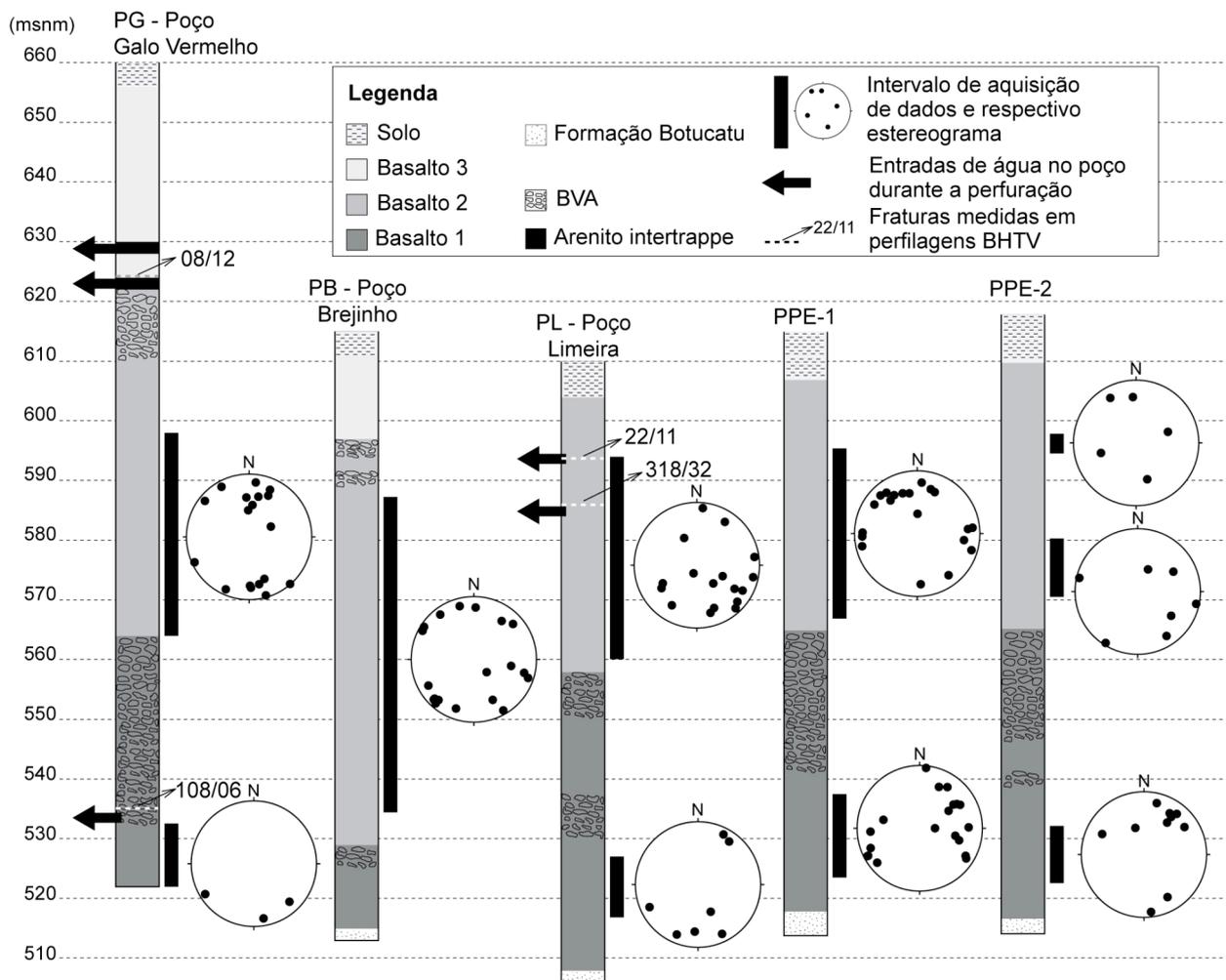


Figura 5. Perfis litológicos dos cinco poços construídos no Projeto FRATASG. Os estereogramas representam as fraturas visualizadas em perfilagens acústicas realizadas pela ferramenta BHTV (*Borehole Acoustic Televierer*). Também são representadas as entradas de água detectadas durante a perfuração dos poços e as fraturas a elas associadas (notação rumo do mergulho).

### 5.2.1 Basalto 1

B1 não apresenta colunas, sendo que as fraturas presentes tendem a ser contínuas e planas ou onduladas. Parte destas fraturas de superfície planar corta também o nível B1-VA, sugerindo se tratarem de fraturas não relacionadas ao resfriamento e, por isto, tectônicas. O preenchimento de algumas fraturas por zeólita, sílica microcristalina e quartzo em cristais pontiagudos, semelhante ao dos geodos evidencia atividade hidrotermal importante após o fraturamento. *Slickensides* em parte das fraturas fraturas verticais, e subordinadamente de mergulho médio, evidencia atividade tectônica que gerou ou reativou tais fraturas.

Próximo a Serrana, além de não terem sido observadas colunas em B1, parte das fraturas presentes são bastante contínuas na vertical (20 m ou mais) e constituem faixas centimétricas de fraturas subparalelas de direções N60-80E e N60-75W, que cortam também a porção vesicular de B1. Fraturas de direção N10-35E e EW, também estão presentes. A porção vesicular também é

cortada por fraturas planas e contínuas de direções N30-80E (predominante) e N65W (subordinada).

### **5.2.2 Basalto 2**

No B2 podem ser observadas porções com colunas de seção decimétrica e porções sem colunas mas com fraturas contínuas (vários metros de exposição lateral) e de superfícies planas ou um pouco onduladas.

Nas porções de B2 sem colunas algumas fraturas apresentam *trends* direcionais específicos, por vezes formando padrões de fraturas conjugadas. Muitas fraturas apresentam *slickensides*, indicando movimentação tectônica que pode ser sincrônica ou posterior à geração de tais fraturas (ver item “Eventos tectônicos”). A existência de vários grupos de conjugados, indicando campos de esforços distintos tratados mais adiante, sugere que pelo menos aqueles posteriores às fraturas de resfriamento sejam de origem tectônica.

O revestimento de fraturas é uma feição comum e consiste, principalmente, de duas películas escuras de celadonita e sílica microcristalina, sobre o basalto, separadas entre si por uma película branca de calcita e calcedônia fibrosa. Vidro basáltico preto também pode revestir as fraturas.

### **5.2.3 Basalto 3**

Com relação às fraturas que delimitam colunas, B3 é caracterizado, de acordo com Fernandes et al. (2010) por duas porções distintas:

(1) Uma inferior, com espessuras estimadas de 15 a 20 m, onde as colunas apresentam seção basal decimétrica (os lados das colunas medem desde 10 cm a até 75 cm e o diâmetro varia de 50 a 160 cm). É compatível com o que é descrito na literatura como colonada, sendo denominada de B3-C por Fernandes et al. (2010).

(2) Uma superior e bem mais espessa (pelo menos 60 m), onde as colunas são mais finas. É compatível com o que é descrito na literatura como entablamento, sendo denominada de B3-E por Fernandes et al. (2010). B3-E apresenta colunas de primeira (nem sempre presentes) e de segunda ordem, com lados de cerca de 15 a 30 cm e de 5 a 10 cm, respectivamente, sendo que estas ordens também devem corresponder à cronologia relativa de sua formação.

Devido às espessuras de B3, entre 75 e 105 m, e ao diâmetro das colunas do entablamento, em média menor que 20 cm, é possível sugerir, com base em Budkewitsch e Robin (1994), que B3 tenha se solidificado em um período de tempo da ordem de 2 anos (Fernandes et al. 2010). Se, no entanto, considerarmos o diâmetro das fraturas de primeira ordem, o tempo requerido para o resfriamento será maior.

As fraturas que delimitam colunas no B3-C são preenchidas por vidro basáltico preto, sílica microcristalina, calcita e pirita.

Fraturas que não delimitam colunas em B3 foram observadas com clareza na forma de padrões conjugados como de domínio nítido de determinadas direções com densidades muito elevadas, em que o espaçamento chega a ser centimétrico (AF8). As fraturas conjugadas R e R' correspondem às direções N85-80W e N35E, respectivamente, observando-se também a direção Y, em torno de N70-75W. Isto indica a atuação de evento tectônico com  $\sigma_1 \sim N65E$  (Figura 6). Esforços também foram deduzidos pelo método dos diedros retos com base na presença de *slickensides*.

Na *scanline* AF8 – 2AH, realizada do lado oeste do AF8, onde ocorre B3-C, nota-se um domínio nítido de fraturas NW, com um máximo no intervalo N45-70W (densidade de 4/m em média para a direção N60W; o espaçamento na porção central da SL, para esta direção, é centimétrico) e concentrações também elevadas em torno de N30-45W e N70-80W. É possível que o intervalo N45-70W esteja relacionado a um evento com  $\sigma_1$  em torno de EW (compatível com o evento de esforço máximo médio de N80E), e os grupos de fraturas N35W e N77W (com densidade um pouco menor) poderiam se relacionar a eventos com  $\sigma_1$  em torno de NS, e  $s_1$  em torno de ENE (compatível com os conjugados com  $\sigma_1 \sim N65E$ ), respectivamente.

A existência de zonas de fraturas, constituídas da união de segmentos das fraturas que delimitam as colunas finas de B3-E, é uma evidência da retomada destas por esforços tectônicos. Tais zonas de fraturas são de espessura centimétrica a alguns decímetros, e constituem-se por várias fraturas subparalelas e anastomosadas, com espaçamento milimétrico a centimétrico entre si (AF8, AF11, AF14 e AF41). Estas zonas de fraturas apresentam-se fortemente alteradas a argilominerais ocre, são de grande continuidade, apresentam *trends* preferenciais, e suas superfícies são muito rugosas. O *trend* direcional comum a todos estes é NNW (NS a N45W); no AF14 predominam os intervalos N20-30E e N50-60E e no AF11 a direção EW também é importante. No AF41, a direção N45W é subparalela a encosta retilínea, paralela a lineamentos de direção NW, muito provavelmente controlada por estruturas tectônicas.

#### **5.2.4 Basalto 4**

B4 aflora em uma área pequena da região estudada e não há dados suficientes para realizar análise de suas estruturas.

### 5.2.5 Fraturas verticais em arenitos

Com relação à área de estudo, os afloramentos mais próximos da Formação Botucatu situam-se na região de Altinópolis, onde fraturas foram observadas na gruta Itambé (AF23). As suas direções predominantes são em torno de EW, subparalela ao alongamento da gruta, e NS. Considera-se que é possível que a caverna tenha se desenvolvido nesta direção devido à presença de fraturas extensionais ao redor de EW, que condicionariam o fluxo principal de água no presente.

Fraturas também foram medidas em arenitos intertrappe em Bonfim Paulista, no contato entre B2 e B3 (AF33), e próximo a Araraquara. Neste caso, fraturas N20E, N78E e no intervalo N66-83W cortam a porção mais endurecida do arenito e do basalto sobreposto. Esta porção mais endurecida é avermelhada e corresponde ao nível onde houve depósito de hidróxidos de Fe que coincide com o contato entre as rochas e o local de fluxo preferencial de água subterrânea no passado recente. Em Bonfim Paulista as fraturas estão intervalo NS-N55E, com predomínio da direção N30E. Estas direções de fraturas são coerentes tanto com o eENE como com o eNS, e como não há nenhum indicador de sentido de movimento, esta questão fica em aberto.

### 5.3 Eventos tectônicos pós-basaltos

Assim, com base nas fraturas conjugadas e nos *slickensides*, foi realizada a investigação do posicionamento das direções de esforços associadas à geração e reativação de pequenas falhas, tendo sido identificados pelo menos quatro eventos tectônicos pós-basaltos, com campos de esforços distintos que foram ordenados cronologicamente da seguinte maneira: eENE-EW, eNW, eNS e eNE, sendo que não se sabe a idade relativa entre estes dois últimos. O ordenamento cronológico baseou-se principalmente nas relações de terminação de fraturas, em geral quando estas apresentavam um padrão tectônico definido de fraturas conjugadas. Foram consideradas mais antigas as fraturas, em geral, mais longas, e que condicionam as terminações de outras fraturas, sendo estas mais jovens. Os eventos são todos transcorrentes (falhas subverticais com estrias subhorizontais ou de caimento baixo) e na denominação, por exemplo, eNW, a letra “e” refere-se a “evento”, enquanto “NW” indica a direção aproximada do esforço máximo principal ( $\sigma_1$ ). Estruturas relacionadas aos eventos eENE-EW e eNS foram identificadas, respectivamente, em 7 e 5 afloramentos, tendo sido medidas no total 63 e 61 fraturas; por outro lado, estruturas relacionadas aos eventos eNW e eNE foram identificadas cada um em 3 afloramentos, tendo sido medidas no total 21 e 20 fraturas. Isto indica que eENE-EW e eNS tiveram atuação mais intensa que eNW e eNE. A direção de  $\sigma_1$  para o eENE varia entre N85E e N60E (Figura 6), para eNS, entre N5E e N30E, para eNW, entre N45W e N60W, para eNE,  $\sigma_1$  está ao redor de N30E em dois casos (AF11

e AF22) e N45E (AF8). A presença de poucas estruturas relacionadas a eNE, pode ser um indício de que ele é o mais jovem e, portanto, teria atuado por um período de tempo menor gerando, assim, menos estruturas. Isto está de acordo com a orientação de esforço máximo horizontal (SHmax) identificado para o sul do Cráton do São Francisco que é ENE.

A mesma ordem cronológica relativa de eventos é identificada em Campinas (Fernandes e Amaral 2002, Fernandes e Melo 2005) e parcialmente em outras regiões do Estado de São Paulo (Riccomini 1997, Salvador e Riccomini 1995, Hiruma et al. 2001). Ângulo entre conjugados (R e R') menores que 60°, e ocorrência de fraturas extensionais, sugerem que os eventos eNE, eNW e eNE foram trans-extensionais.

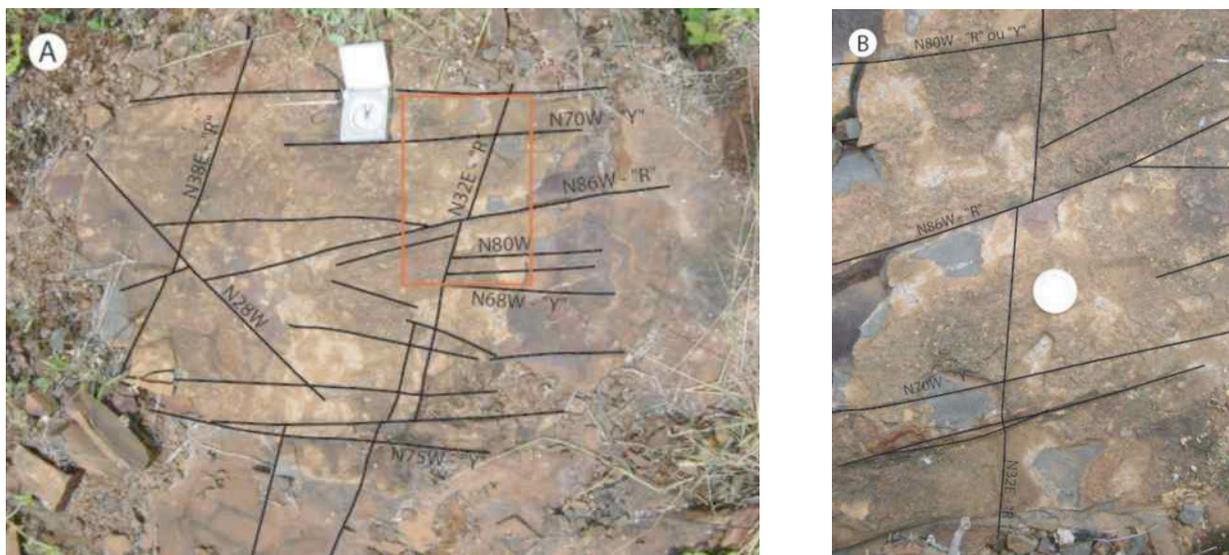


Figura 6. Fraturas conjugadas, R e R', e fraturas Y relacionadas ao evento eNE (B) corresponde ao detalhe destacado em vermelho no (A). A orientação de  $s_1$  para estes conjugados está ao redor de N80E (AF8).

## 6. MODELO CONCEITUAL DE FLUXO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NOS BASALTOS DE BONFIM PAULISTA

O mapeamento e estabelecimento da estratigrafia dos basaltos em Bonfim Paulista (apresentado em Fernandes et al. 2010) e a descrição detalhada de estruturas e determinação dos eventos tectônicos, para a mesma área, apresentados neste trabalho, permitem apontar quais são os prováveis caminhos preferenciais de circulação de água subterrânea nos basaltos e, conseqüentemente, a elaboração de modelo conceitual fluxo.

A seguir são descritas as estruturas que tem o potencial de controlar fluxos verticais mais profundos e por isso conectar o SAG com a superfície, passando pelos basaltos.

A infiltração e fluxo vertical ao longo de fraturas que delimitam colunas estende-se até cerca de 10 m, como mostrado pela alteração ao longo destas estruturas. Por outro lado, fraturas e zonas

de fraturas provavelmente tectônicas, apresentam alteração até, pelo menos, 25 m de profundidade (Figuras 7 e 8). Tal fluxo vertical é diminuído ou barrado por fraturas horizontais que também apresentam forte alteração e que ocorrem com mais frequência até 10 m de profundidade. É interessante observar que fraturas sub-horizontais com alteração pronunciada são típicas de B3-E, possivelmente porque a grande quantidade de fraturas de resfriamento presentes permite uma infiltração mais profunda e conseqüentemente uma alteração mais intensa em profundidades de até 10 m. Tal fluxo pode ser permitido devido a dois fatores: as fraturas apresentam maior abertura causada pela sua orientação com relação ao campo de esforços tectônicos de um evento recente (Quaternário) ou atual ou devido a um desconfinamento lateral relacionado a taludes (encostas de maior declive). Assim, é de se esperar que a direção de fraturas com alteração seja controlada pela conformação das curvas de nível (fraturas paralelas às curvas abririam por desconcompressão lateral).



Figuras 7 e 8. Fraturas e zonas de fraturas verticais, provavelmente tectônicas, apresentam alteração (cor ocre na foto 3) até, pelo menos, 25 m de profundidade.

A hipótese do desconfinamento lateral, controlado pela direção de talude próximo, foi avaliada para os afloramentos de Bonfim Paulista, concluindo-se que, as direções N40-90E e N5-40W, respectivamente, tem sua maior permeabilidade controlada mais provavelmente por campo de esforços tectônicos.

Outras feições consideradas diagnósticas de ocorrência de fluxo de água controlado de forma mais intensa por uma dada direção são:

- Braço principal e secundário da Gruta Itambé, segundo as direções N79E e N12E, respectivamente. A gruta é formada por *piping* e supõe-se que a direção ao longo da qual este ocorre é controlado por uma direção preferencial de fluxo. É importante lembrar que a orientação do SHmax atual identificado para o sul do Cráton do São Francisco é ENE e que seria de se esperar que as fratura atualmente mais abertas são paralelas à esta direção.

- Fraturas, principalmente de mergulho médio, em mina d'água no município de Araraquara, de direção N16-33E e N52-72E . O mergulho médio sugere se tratarem de pequenas “falhas” normais, as quais teriam sido geradas pela atuação de  $\sigma_1$  de mesmas direções e em dois eventos distintos.
- Falhas normais de direção N25E (AF7) e N50E (AF8). Os eventos tectônicos da área de estudo são transcorrentes e a ocorrência de falhas normais mostra que determinados eventos foram acompanhados por extensão. A direção das falhas normais indica que os eventos eENE e eNNE são trans-extensionais, pelo menos em determinadas regiões e, possivelmente geraram fraturas mais abertas de mesma direção que as falhas normais, ou seja, NNE e ENE.
- N74E, N59E, N79W, fraturas medidas no AF47 junto ao poço de basalto produtivo. Este é o critério menos seguro para determinação de direção de fraturas abertas, pois a produção do poço pode se dever a fratura sub-horizontal.

Assim, conclui-se que as direções ENE a EW e NNE parecem ser caminhos preferenciais para o fluxo vertical. Isto pode ser uma evidência de que eventos quaternários também desempenhem papel importante na circulação atual de água subterrânea. A previsão do fluxo preferencial fica, portanto, condicionada a uma análise estrutural que identifique as zonas de fraturas mais proeminentes em áreas específicas de interesse.

Apesar de fraturas verticais terem potencial para controlar o fluxo, este, na maior parte dos casos deve ser barrado pelas camadas de BVA, as quais apresentam poucas e ou descontínuas fraturas verticais ou horizontais. Isto foi verificado em afloramentos e nas perfilagens acústicas dos poços construídos. Assim, na área estudada, os caminhos preferenciais de fluxo são indubitavelmente fraturas sub-horizontais, por vezes com extensão mínima de várias centenas de metros, onde foram observadas saídas de água (Figura 9). Fraturas deste tipo, com fluxo de água subterrânea intenso, podem ocorrer até profundidades de 45 m, como observado para a fratura que ocorre no contato B2/B3 (AF11) e descrita acima. A presença destas fraturas sub-horizontais mais extensas, na área de estudo, não é generalizada e está associada a elevada pressão de fluidos em B3, e esta última aparece em locais específicos do derrame, muito provavelmente em locais onde B3 é menos espesso. A abertura atual destas fraturas, por outro lado, deve estar sendo controlada também por alívio de pressão devido à denudação e, assim, não devem ocorrer em profundidades elevadas.

B2 também apresenta fraturas sub-horizontais associadas a ligeiros aumentos nos volumes de água verificados durante a perfuração dos poços PL e PG. No PL ocorrem em profundidades aproximadas de 16 e 25 m (Figura 3), sendo que entre 19 e 26 m de profundidade ocorrem fraturas de direção N23-69E com mergulhos de variam de 32° a 62°; a mais espessa, neste trecho da perfilagem tem atitude N48E/32NW. Apesar do mergulho baixo, novamente verificamos indícios de fraturas de direção NE serem mais transmissivas. No B1 do poço PG ocorre uma entrada de água profunda de pouca vazão associada a uma fratura sub-horizontal localizada em 125,2 m. Este tipo

de ocorrência nesta profundidade não é comum. No PG há outra entrada de água associada a fratura horizontal situada em contato B3/arenito intertrappe em 36 m de profundidade (Figura 5). Todas estas fraturas sub-horizontais em B2 e B1 parecem ser menos transmissivas que as observadas em B3 no AF11 (Figura 4), pois as vazões a elas associadas são baixas.

A Figura 10 apresenta um esquema do modelo conceitual de fluxo de água subterrânea nos basaltos de Bonfim Paulista baseado nos dados apresentados acima.



Figura 9. Fraturas sub-horizontais, por vezes com extensão mínima de várias centenas de metros, onde foram observadas saídas de água (AF11).

## 7. CONCLUSÕES

O fluxo de água subterrânea desde a superfície até 10 m de profundidade é controlado por: fraturas que delimitam colunas e fraturas horizontais, principalmente em B3-E. Isto é evidenciado pela profunda alteração ao longo destas estruturas. Fraturas e zonas de fraturas provavelmente tectônicas, permitem o fluxo vertical (demonstrado por sua alteração) até, pelo menos, 25 m de profundidade. Isto pode ser controlado ou por desconfinamento lateral (controlado pela direção de talude próximo) ou por campo de esforços de eventos tectônicos quaternários. Existem indicativos de que as direções N40-90E e N5-40W são controladas por este segundo fator.

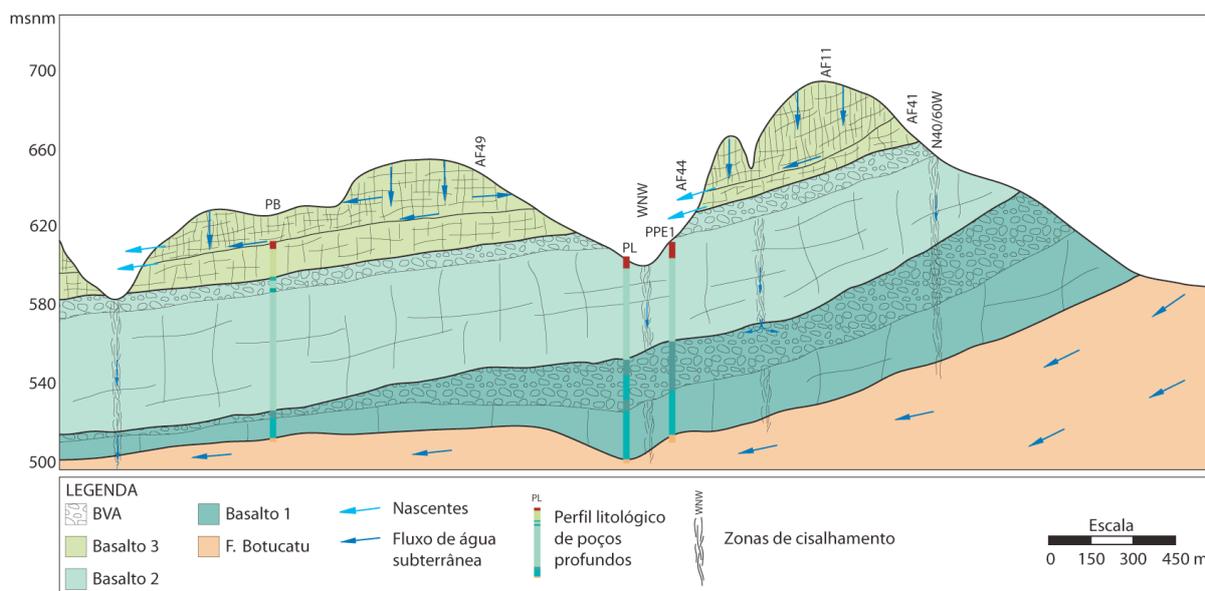


Figura 10. Seção AA' (ver Figura 1 para localização) mostrando esquematicamente os principais caminhos de circulação de água nos derrames basálticos da região de Ribeirão Preto (SP). Supõe-se que o fluxo vertical atingindo o nível vesicular (BVA) de B1 pode ocorrer localmente ao longo de zonas de fraturas subverticais, apesar de não terem sido interceptadas com os poços construídos no projeto FRATASG. Abaixo do BVA de B1, é provável que este fluxo vertical nas zonas de fraturas não ocorra, mas ele pode existir muito localmente em zonas de fraturas de maior envergadura e posicionadas favoravelmente com relação ao campo de esforços atual.

Outras feições consideradas diagnósticas de ocorrência de fluxo de água controlado de forma mais intensa por uma dada direção são: (1) braço principal e secundário da Gruta Itambé, segundo as direções N79E e N12E, respectivamente; (2) pequenas falhas normais, de direção N15-35E e N50-70E, em mina d'água no município de Araraquara (SP) e em afloramentos sugerindo a existência de fraturas mais abertas de mesmas direções; fraturas NE e N80W junto a poço de basalto produtivo.

Assim, conclui-se que as direções ENE a EW e NNE parecem ser caminhos preferenciais para o fluxo vertical. Isto pode ser uma evidência de que eventos quaternários também desempenhem papel importante na circulação atual de água subterrânea. A previsão do fluxo preferencial fica, portanto, condicionada a uma análise estrutural que identifique as zonas de fraturas mais proeminentes em áreas específicas de interesse.

Apesar de fraturas verticais terem potencial para controlar o fluxo, este, na maior parte dos casos deve ser barrado pelas camadas de BVA, as quais apresentam poucas e ou descontínuas fraturas verticais ou horizontais. Isto foi verificado em afloramentos e nas perfilagens acústicas dos poços construídos. Assim, na área estudada, os caminhos preferenciais de fluxo são indubitavelmente fraturas sub-horizontais, por vezes com extensão mínima de várias centenas de metros, e que ocorrem nos contatos B2/B3 e B3-C/B3-E. Fraturas deste tipo, com fluxo de água subterrânea intenso, podem ocorrer até profundidades de 45 m. A presença destas fraturas sub-

horizontais mais extensas, na área de estudo, não é generalizada e está associada a elevada pressão de fluidos em B3, e esta última aparece em locais específicos do derrame, muito provavelmente em locais onde B3 é menos espesso. A abertura atual destas fraturas, por outro lado, deve estar sendo controlada também por alívio de pressão devido à denudação e, assim, não devem ocorrer em profundidades elevadas.

B2 também apresenta fraturas sub-horizontais associadas a ligeiros aumentos nos volumes de água verificados durante a perfuração dos poços PL e PG. No PL ocorrem em profundidades aproximadas de 16 e 25 m. Todas estas fraturas sub-horizontais em B2 e B1 parecem ser menos transmissivas que as observadas em B3 no AF11, pois as vazões a elas associadas são baixas.

Assim, o fluxo vertical através dos basaltos, está restrito aos primeiros 25 m de profundidade, e é possível que ocorra também de forma bastante localizada e preferencialmente ao longo das direções NE.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- Bjornberg, A.J.S.. Sedimentos pós-cretácicos do leste do Estado de São Paulo. Tese (Livre-Docência) - Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo. 133 p, 1965.
- Budkewitsch, P. e Robin, P. Y. Modelling the evolution of columnar joints. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 59:33, 219-239, 1994.
- Fernandes AJ, Maldaner CH, Azevedo Sobrinho JM, Nogueira Pressinotti MM, Wahnfried I. 2010. Estratigrafia dos derrames de basaltos da Formação Serra Geral (Ribeirão Preto – SP) baseada na geologia física, petrografia e geoquímica. *Revista Geologia USP*, aceito para publicação.
- Fernandes, A.J. e Amaral, G. 2002. Cenozoic tectonic events at the border of the Parana Basin, São Paulo, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 14(8):911-931.
- Fernandes, AJ, Mello, CL (2005) Coberturas cenozóicas e estruturas deformadoras na Depressão Periférica Paulista, Campinas, São Paulo. *Revista do Instituto Geológico*, 25:49 – 66.
- Hiruma, S.T.; Riccomini, C.; Modenesi-Gauttieri, M.C. 2001. Neotectônica no Planalto de Campos do Jordão, SP. *Revista Brasileira de Geociências*, 31(3): 375-384.
- Marques DJ, Magalhães FS, Serra Júnior E (1987) Análise das feições estruturais do maciço rochoso nas fundações da barragem de Porto Primavera. V Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, São Paulo, ABGE, vol 1: 197-209.
- Marques Filho PL, Correia PC, Levis P, Andrade CAV (1981) Características usuais e aspectos peculiares do manto de alteração e transição solo-rocha em basaltos. *Anais do III Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia*, Itapema – SG, ABGE, vol.2:53-72.
- Riccomini, C 1997. Considerações sobre a posição estratigráfica e tectonismo deformador da Formação Itaqueri na porção centro-leste do Estado de São Paulo. São Paulo: *Revista do Instituto Geológico*, 18(1/2):41-48.
- Salvador, E.D. e Riccomini, C. 1995. Neotectônica da Região do Alto Estrutural de Queluz (SP-RJ, Brasil). *Revista Brasileira de Geociências*, 25: 151-164.
- Sinelli O (coord.) (1973) Mapa geológico do nordeste do Estado de São Paulo. Escala 1:50.000 - Folhas de Serrana, Ribeirão Preto, Cravinhos e Bonfim Paulista. Convênio CNEC/FFCL-Ribeirão Preto-USP.