

ATIVIDADE SÍSMICA NA BACIA DO PARANÁ INDUZIDA PELA PERFURAÇÃO DE POÇOS TUBULARES PROFUNDOS

Marcelo Assumpção¹; Tereza H. Yamabe²; José R. Barbosa¹,

Resumo – Atividade sísmica na forma de enxames de eventos tem ocorrido em Andes, Bebedouro, provocada pela perfuração de poços tubulares profundos de 120-200 m de profundidade. Mais de 3.000 sismos com magnitudes de até 2,9 já foram registrados pelas estações sismográficas instaladas pelo IAG/USP em março de 2005. Tremores bem registrados em três ou mais estações permitem a localização precisa dos epicentros e estes estão localizados próximos a poços com vazão de 80 a 190 m³/h. O primeiro enxame de tremores foi sentido no primeiro semestre de 2004, e, desde então, já ocorreram mais quatro enxames. Os períodos de maior atividade ocorrem na época das chuvas quando aqueles poços não são bombeados. Novas áreas epicentrais têm sido observadas na região, inclusive no município de Monte Azul Paulista, vizinho ao de Bebedouro. Registros sismográficos e levantamentos macrossísmicos indicam que essas novas áreas sísmicas também estão localizadas próximas de poços tubulares profundos de alta vazão. Estudos geofísicos realizados autorizam afirmar que alguns poços tubulares profundos, que exploram o aquífero de fraturas do basalto da Formação Serra Geral, têm provocado os tremores de terra em Andes. Um modelo para explicar a atividade sísmica induzida da região é apresentado. É possível também que chuvas intensas estejam relacionadas com períodos de maior sismicidade.

Abstract – Shallow seismic activity, as swarms of events with magnitudes up to 2.9 and intensities V MM, has been observed in the Bebedouro rural area, Northeast of São Paulo State, Brazil, since 2004. A 6-station seismographic network, installed in March 2005, has recorded more than 3,000 micro-earthquakes. The events are located near some groundwater wells (120-200m deep and water flow 80-190m³/h,) drilled in early 2003 for orange plantations irrigation. The activity occurs mostly during the rainy season when those wells are not pumped. The spatio-temporal evolution of the seismicity shows that the drilling and operation of the water-wells triggered it. There is also a possibility of the heavy summer rainfall is triggering the swarm of seismicity in Bebedouro. New epicentral areas have been observed in the neighbors regions indicating, besides seismic migration from the original epicentral area, that new wells are also provoking seismic energy liberation. All the seismic records and macroseismic data allow us to say that seismic activity in all these areas is induced by deep wells exploiting water from fractured basalt aquifer (Serra Geral Formation). A model based also on temperature and BHTV loggings to explain this seismic activity is presented.

Introdução

Tremores de terra de pequena profundidade têm ocorrido no distrito de Andes, município de Bebedouro, região nordeste do Estado de São Paulo. A atividade sísmica que teve início no final de 2003 - início de 2004 ocorre na forma de enxames de eventos de magnitudes de até 2.9 na Escala Richter e intensidades V MM. O Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG/USP) está monitorando a área através de uma rede sismográfica de 6 estações, instalada em março de 2005. O IAG, juntamente com a UNESP, com o objetivo de estudar essa atividade sísmica, tem analisado tanto os aspectos sismológicos (determinação de epicentros, magnitudes, e a evolução da atividade) como aspectos hidrogeológicos de Andes usando dados e perfisagens de poços tubulares que exploram água subterrânea e também informações pluviométricas da região (Assumpção, 2006; Assumpção & Yamabe, 2005).

Durante os períodos de alta atividade sísmica mais de 100 a 200 eventos foram registrados por dia, dezenas dos quais são sentidos pelas pessoas que moram na área epicentral. Alguns sismos de magnitude $m_b > 2.5$ são também registrados pela Estação Sismográfica de Rio Claro (Universidade Estadual Paulista, UNESP) localizada a 180km SE de Andes. Os maiores eventos são sentidos até 5 a 10 km de distância e a maioria dos epicentros está localizada próxima de poços tubulares profundos (120-200m de profundidade) perfurados no início de 2003 para explorar o aquífero de fraturas do basalto. A Figura 1 mostra a localização dos três maiores eventos registrados e dos poços tubulares que iniciaram a atividade sísmica na área de Andes. As estações sismográficas foram instaladas em locais ao redor da fazenda proprietária dos poços.



Figura 1 - Localização dos três maiores eventos registrados (estrelas em vermelho) e dos poços tubulares que iniciaram a atividade sísmica na área de Andes (círculos).

Perfilagens térmicas e BHTV (borehole televiewer) foram realizadas em poços tubulares da região. Esses levantamentos mostraram que a maioria dos poços nesta área está agindo como condutores transportando água de aquífero superior para as fraturas do basalto em profundidades abaixo (Yamabe et al., 2006).

Metodologia

A rede sismográfica de Bebedouro está operando desde março de 2005. Mais de três mil tremores já foram registrados de março/2005 a junho/2008. A localização de algumas estações tem sido mudada durante esse período seguindo a migração dos epicentros.

Para determinar o epicentro e a profundidade de um sismo, são necessários registros em pelo menos três estações. Também é necessário conhecer as espessuras das camadas geológicas da área, e para isso foi feito um estudo com dados disponíveis de poços (tanto rasos como profundos) da região de Andes. Os poços, perfurados para irrigação, atravessam uma camada de arenito de 60-80m de espessura e exploram aquífero confinado nas zonas de fratura do basalto (Formação Serra Geral da Bacia do Paraná). Atualmente outros métodos geofísicos estão sendo realizados que permitirão conhecer a estrutura geológica com mais detalhes.

Para a localização dos eventos um modelo foi usado considerando velocidade de 2,2km/s para a onda P para a camada superior de arenito e 5,4km/s para o pacote de basalto. Correções das estações foram realizadas para compensar as diferentes espessuras da camada sedimentar. A melhor relação V_p/V_s determinada usando o diagrama de Wadati foi 1.80. Hipocentros são determinados com pelo menos três estações com um mínimo de cinco leituras de ondas P e S.

Tremores bem registrados em três ou mais estações podem ter o epicentro conhecido com um erro da ordem de 200 a 300m. As profundidades focais são mais difíceis de se determinar e o erro é maior, da ordem de 200 a 500m. A grande maioria das profundidades calculadas situa-se entre 100 e 800m, coincidindo aproximadamente com a espessura da camada de basalto (estimada em ~500m nesta região do Estado de São Paulo). Apesar da maior incerteza na determinação da profundidade focal é possível verificar que os micros tremores têm origem dentro do pacote de basalto

Mais de 3000 sismos já foram registrados entre março de 2005 e junho de 2008. A Figura 2 mostra os cerca de 3000 epicentros bem determinados entre março de 2005 até janeiro de 2008. A área ativa inicial tinha uma largura de 1,5 km e uma extensão de 5 km e tem aumentado com o

tempo. Portanto, a distribuição dos epicentros indica que os tremores não têm origem em uma única falha geológica principal, mas ocorrem em inúmeras pequenas fraturas dentro da camada de basalto.

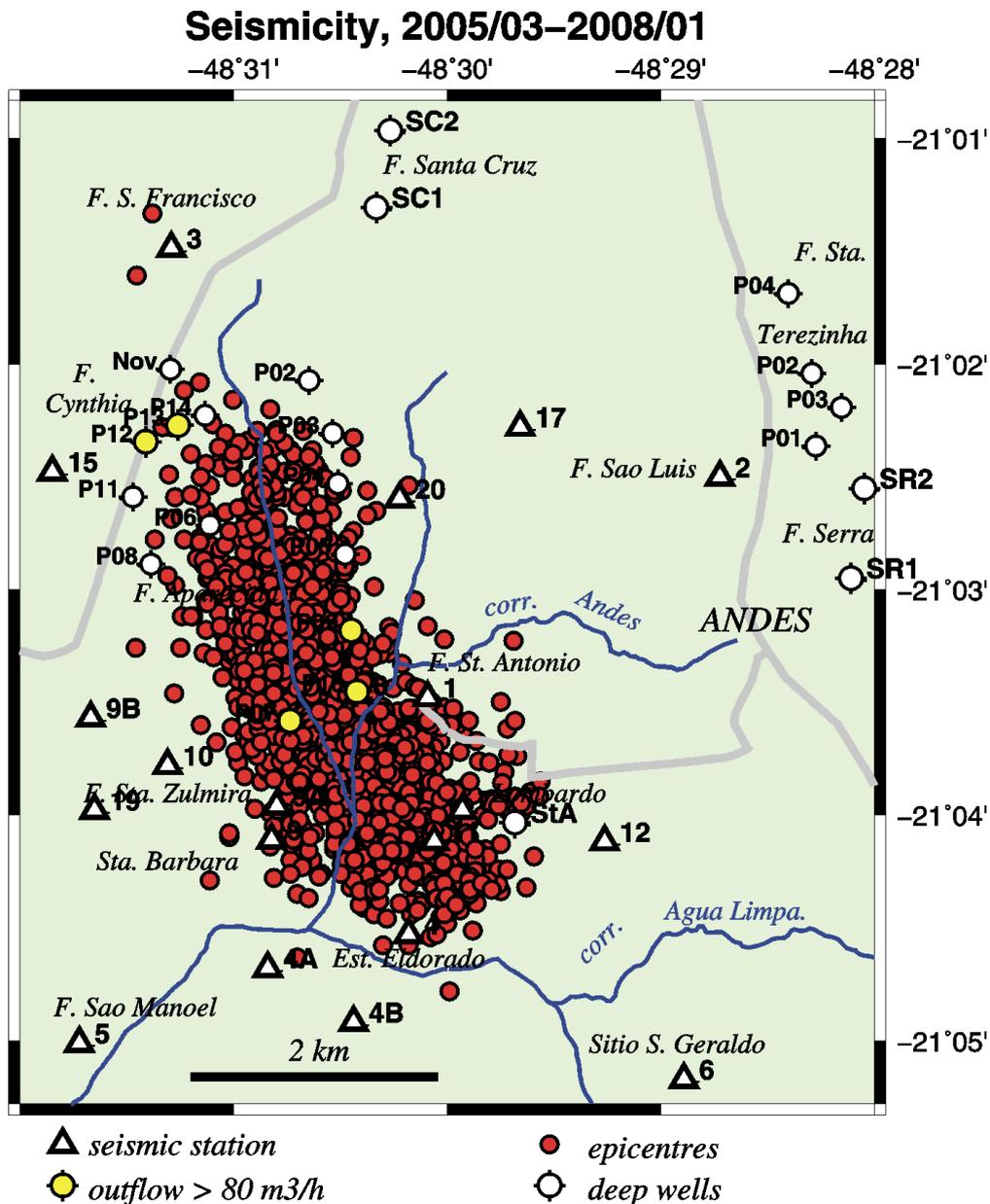


Figura 2 – Epicentros de Andes, março de 2005 a janeiro de 2008.

Discussão

A atividade sísmica em Andes, Bebedouro, ainda ocorre atualmente na forma de enxames de eventos durante a estação chuvosa, geralmente nos primeiros meses do ano e quando os poços não estão sendo bombeados. A área ativa inicial tinha uma largura de 1,5 km e uma extensão de 5 km em março de 2005. Atualmente outras áreas epicentrais estão surgindo, como a do bairro Botafogo, cerca de 6km à oeste de Andes e também no município vizinho de Monte Azul Paulista.

Desde janeiro de 2004 a atividade alterna entre períodos de alta frequência sísmica no período chuvoso com os de pouca ocorrência de tremores durante a estação de baixo índice pluviométrico, quando os poços tubulares profundos são continuamente bombeados para a irrigação da plantação de laranja, que ocorre, em geral, de agosto a dezembro. Essa alternância de atividade tem se repetido por cinco anos.

Em fevereiro de 2005 os tremores aumentaram de intensidade e frequência. Então, atendendo solicitação da Prefeitura de Bebedouro, o IAG/USP instalou a rede de sismógrafos para estudar essa atividade sísmica. A Figura 3 mostra os sismos registrados no período de 10 a 23 de março de 2005 (Assumpção & Yamabe, 2005). Observe-se que os epicentros localizam-se ao redor dos poços de maior vazão (150 e 190 m³/h), perfurados em 2003 (Fz. Aparecida) e 2004 (Fz. Santa Ana).

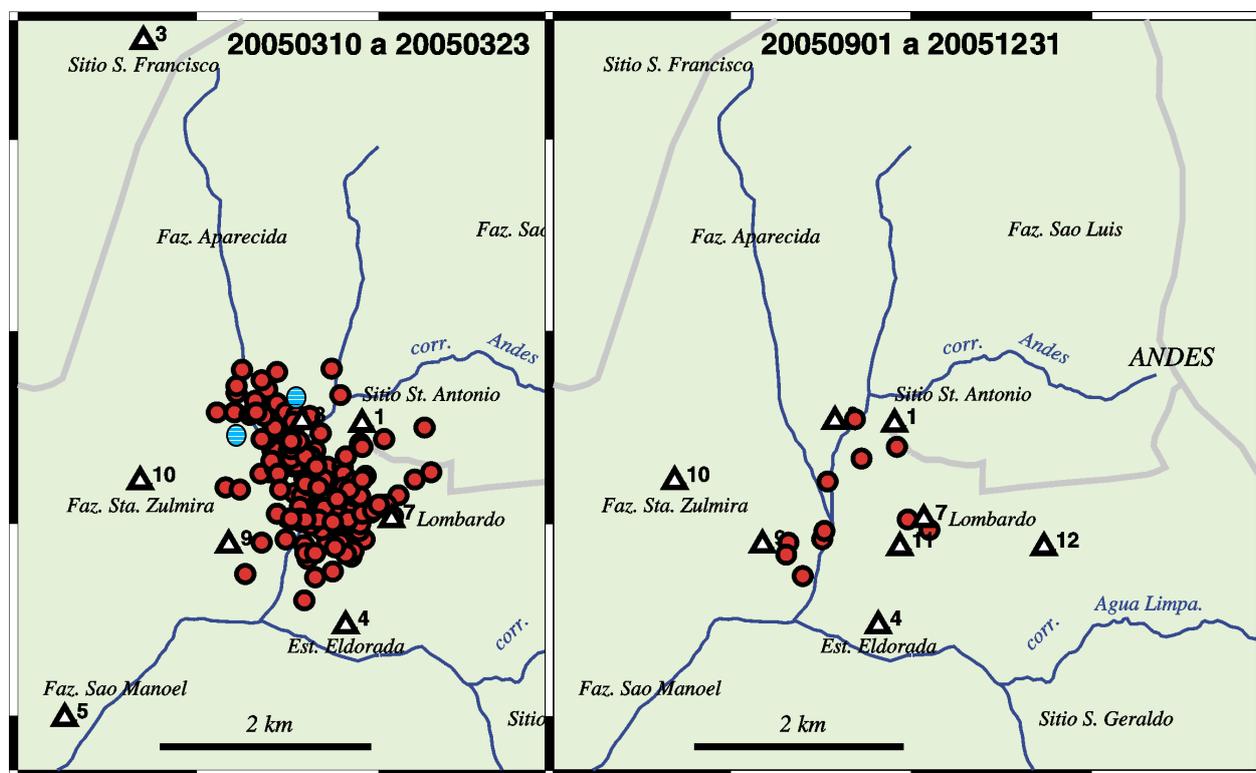


Figura 3 – Epicentros dos sismos registrados (círculos vermelhos) no período de 10-23/03/2005 (E) e de 01/09/2005 a 31/12/2005 (D) localizados nas proximidades aos poços tubulares de maior vazão (150 e 190 m³/h, círculos azuis). Em geral os poços são bombeados entre agosto e dezembro, na estação seca.

Poços adicionais foram perfurados em março de 2006, causando o terceiro enxame de sismos (Figura 4) que teve início cerca de um mês após a perfuração dos novos poços (P12-14), também indicados na Figura 1. Esta nova fase de eventos mostrou uma clara migração dos epicentros com ‘difusividade sísmica’ de cerca de 1.0m²/s, que pode ser observada nos quadros da figura abaixo. Este valor de difusividade sísmica é comparável com os observados em casos de sismicidade induzida tanto por hidrelétricas, quanto por injeção de fluidos (Talwani & Acree,.

1984/85). Também, em fevereiro daquele ano foi registrado um índice de chuva alto com excepcional volume (>170mm) concentrado em um só dia.

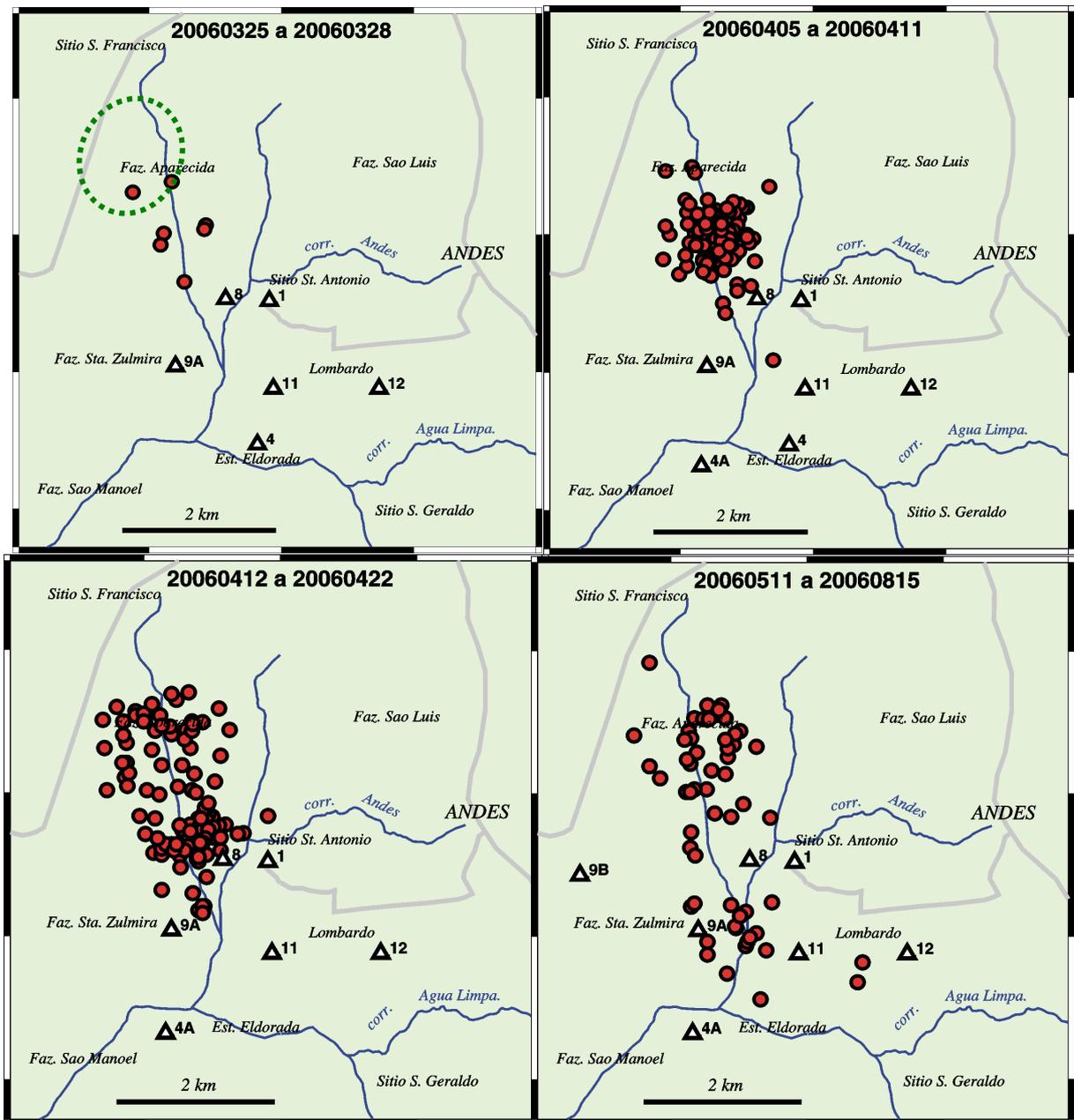


Figura 4 – (ES) Primeiros eventos em área anteriormente sem tremores, próximos dos poços novos, perfurados em março de 2006 (área pontilhada). (DS) Epicentros dos sismos ocorridos entre 05/04/2006 a 11/04/2006. (EI) Epicentros dos sismos ocorridos entre 12/04/2006 a 22/04/2006. (DI) Epicentros dos sismos ocorridos entre 11/05/2006 a 15/08/2006.

O quarto enxame ocorreu de dezembro de 2006 a maio de 2007. A Figura 4 mostra a atividade sísmica registrada pela rede sísmográfica local, entre 01/06/2007 a 31/07/2007, indicando uma nova área epicentral, no povoado de Botafogo. Um poço de 140m de profundidade e vazão de

60m³/h está relacionado com esta nova área de sismos, bem sentidos pela população residente nesta área.

O gradiente geotérmico regional no Estado de São Paulo varia entre 20 a 30°C/km (Hamza et al., 1979; Hurter & Pollack, 1996). Movimentos de água subterrânea através de camadas permeáveis ou de fraturas nas rochas podem induzir alterações locais no campo termal. Em alguns casos específicos também a perfuração de poços profundos podem provocar movimentos de água dentro dos poços e, então, induzir alterações locais na distribuição de temperatura.

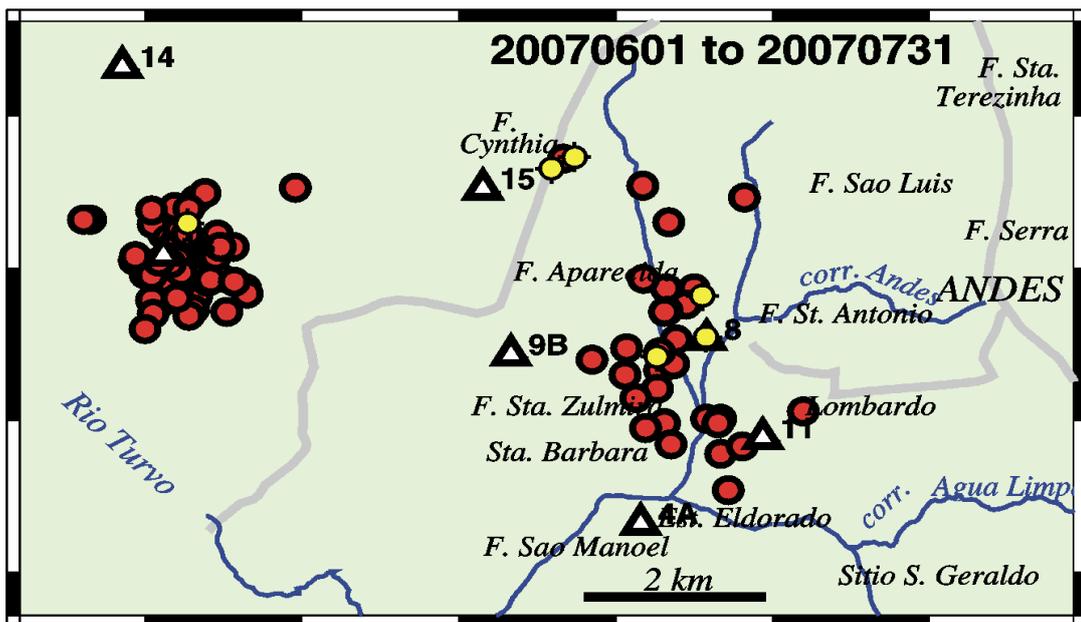


Figura 5 – Nova área epicentral, cerca de 6km à oeste da área original. O poço relacionado com essa atividade sísmica (círculo amarelo à esquerda) foi perfurado no final de 2006.

Perfilagens térmicas (Figura 6b e 6c) efetuadas dentro de poços na região de Andes, indicados pelos círculos em azul na Figura 6 a, mostraram tais alterações (Yamabe et al., 2006). Em geral os perfis térmicos mostraram duas importantes características, uma zona superior com temperatura quase constante (ZTC) e outra com altos valores de gradiente térmico (ZGT).

Ressalte-se que exatamente em torno da profundidade onde o perfil térmico indica um ‘cotovelo’ ligando as duas zonas, os dados BHTV mostraram uma camada de basalto alterado e fraturado. A ZTC indica que a água está fluindo poço abaixo a partir do aquífero superior na profundidade em torno de 20-30m até a profundidade em torno de 125m, onde a água deixa o poço através das fraturas do basalto. A ZGT abaixo dos 125m indica tão somente que a rocha está recuperando a temperatura natural.

Na maioria desses poços é possível ouvir o som de queda d'água, indicando que a entrada da água no poço, originada do aquífero superior, está localizada acima do nível da água dentro do poço.

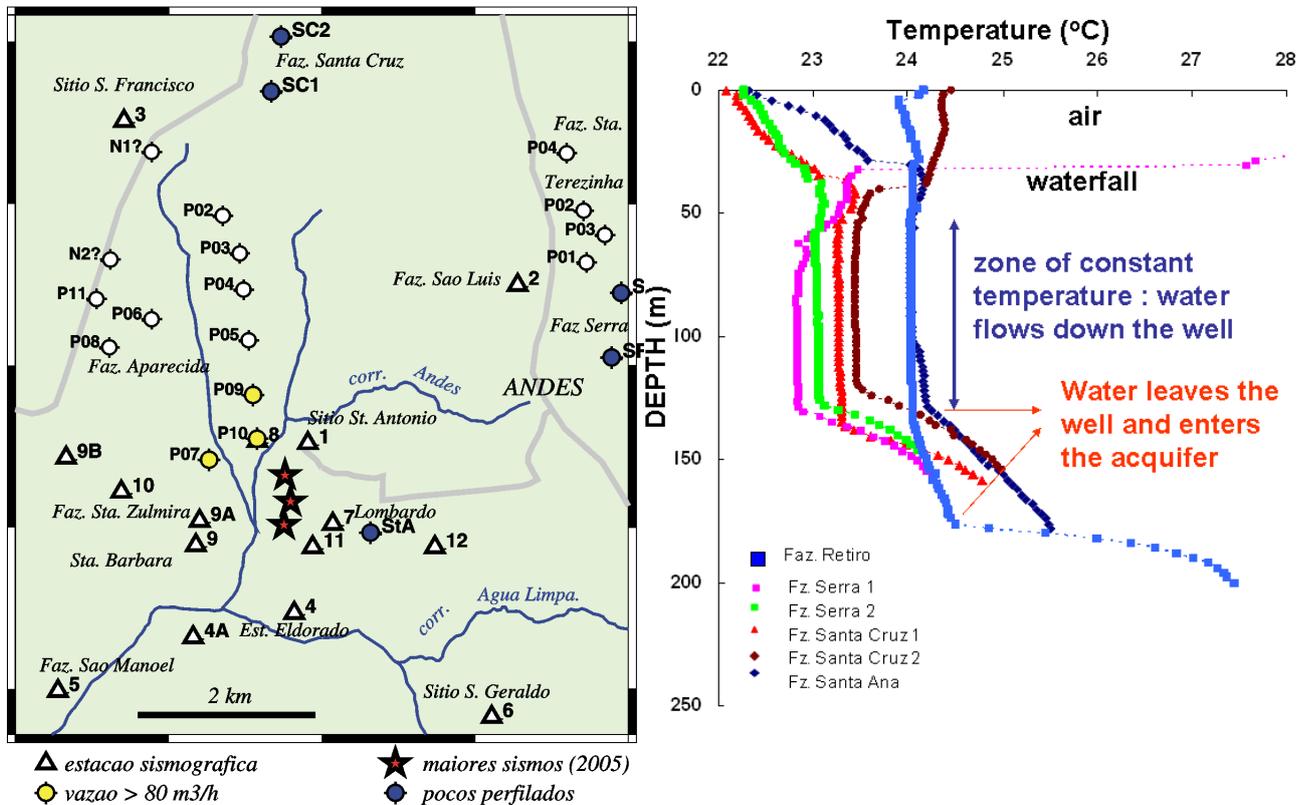


Figura 6 – (E) Área epicentral original, mostrando as estações sismográficas (triângulos). Estrelas são os eventos m_b 2.6-2.9 ocorridos em Março/Abril de 2005 (os maiores atéo momento 15/07/2008). Círculos são os poços que exploram o aquífero de fraturas do basalto. Círculos em amarelo inidcam poços com fluxo $>80\text{m}^3/\text{h}$ (Assumpção & Yamabe, 2005). Estudos geotérmicos foram realizados nos poços indicados pelos círculos em azul. (D) Perfis térmicos obtidos nos poços indicados pelos círculos em azul no quadro à esquerda. As medidas de temperatura indicadas pelo símbolo quadrado azul foram obtidas na perfilagem realizada em poço de Monte Azul Paulista, município vizinho a Bebedouro.

Portanto, o mecanismo de indução de sismos na região pode ser a comunicação entre o aquífero sedimentar superior e as fraturas no basalto em profundidades abaixo. A perfuração dos poços tubulares profundos é que possibilitou essa comunicação. A pressão adicional (provavelmente em torno de 1 a 5m da coluna de água) agindo sobre a zona fraturada, previamente sob esforços críticos, pode ser o mecanismo iniciador dos sismos. Num processo reverso, durante a estação seca, quando os poços são continuamente bombeados, a redução da pressão dos poros no aquífero confinado faz diminuir a atividade sísmica.

Conclusão

É possível que tão altas vazões como as apresentadas pelos poços tubulares em Andes (150-190m³/h), que exploram o aquífero de fraturas do basalto, sejam indicativas de alta concentração de fraturas no basalto na área epicentral. A concentração de fraturas pode indicar que a rocha estava previamente sujeita a grandes esforços. A perfuração de poços permitiu a comunicação entre o aquífero superior e as zonas fraturadas do basalto, que aumentou a pressão dos poros e facilitou o deslocamento sísmico através da pressão adicional da coluna d'água. Por outro lado, quando os poços são bombeados a água é retirada, fazendo decrescer a pressão dos poros. É bastante conhecido o fato de que fluidos são relacionados com muitos processos de falhas e geração de terremotos, tais como os casos bem estudados de sismicidade induzida por reservatórios e injeção de fluidos em poços profundos.

Os cinco ciclos de tremores em Andes confirmam que a atividade sísmica local ocorre principalmente durante o primeiro semestre quando os poços não são bombeados e praticamente nenhuma sismicidade ocorre durante a estação seca, quando os poços são continuamente bombeados. Além disso, 3-4 poços foram perfurados em março de 2006 e o terceiro enxame, localizado próximo desses novos poços, confirmam fortemente que a perfuração de poços para explorar o aquífero de fraturas são os causadores dos tremores em Andes.

Novas áreas sísmicas na vizinhança de Andes, inclusive no município de Monte Azul Paulista, também parecem estar relacionadas com a perfuração de poços tubulares profundos de alta vazão.

Entretanto, casos de sismicidade possivelmente 'provocada' pela chuva ou recarga sazonal da água subterrânea têm sido recentemente propostos (Hainzl et al., 2006, Kraft et al., 2006, Saar & Manga, 2003, Ogasawara et al., 2002, Betim, M., 1999, entre outros autores).

Portanto, considerando o que segue:

- 1) A chuva é responsável pela recarga da água subterrânea;
- 2) A fonte das quedas d'água observadas nos poços em Andes, tanto nos rasos quanto nos profundos, é o aquífero sedimentar superior, que é rapidamente recarregado pela chuva;
- 3) Em geral os enxames sísmicos têm ocorrido cerca de um mês após períodos de chuvas mais pesadas, há uma possibilidade para que também a chuva esteja colaborando para o 'gatilho' da sismicidade ser acionado, através dos poços tubulares perfurados até as fraturas do basalto.

Casos anteriores de sismicidade induzida por poços tubulares profundos foram observados em Nuporanga, (Yamabe & Hamza, 1996) e em Presidente Prudente (Yamabe, 1999), respectivamente nas porções nordeste e central norte da Bacia do Paraná. Em ambos os casos os eventos sísmicos também ocorreram na camada do basalto da Formação Serra Geral. O presente caso indica que a

probabilidade de poços tubulares profundos provocarem sismos pode ser muito maior do que imaginado até agora. O que farão doravante as comunidades, tanto científica quanto a relacionada com a exploração de água subterrânea?

Referências bibliográficas

Assumpção, M.; Yamabe, T.H.; Barbosa, J.R.; Balancin, L. & Lopes, A., 2007. Seismic Activity Induced by Water Wells Exploring a Fractured Aquifer in the Paraná Basin, Brazil. *AGU Joint Assembly, Acapulco-Mexico, abstracts*.

Assumpção, M. 2006. Os novos tremores de terra de abril/2006 em Bebedouro, distrito de Andes. (Relatório não publicado: www.iag.usp.br/~marcelo/bebedouro)

Assumpção, M. & Yamabe, T.H. 2005. Atividade sísmica no Distrito de Andes, Bebedouro, e a possível relação com perfuração de poços tubulares. (Relatório não publicado: www.iag.usp.br/~marcelo/bebedouro)

Betim, M., 1999. Statistical investigation on possible seasonality of seismic activity and rainfall-induced earthquakes in Balkan area. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 114, 119-127.

Hainzl, S.; Kraft, T.; Wassermann, J.; Igel, H. and Schmedes, E., 2006. Evidence for rainfall-triggered earthquake activity., *Geophys. Res. Lett.*, 33, L19303, doi:10.1029/2006GL027642.

Hamza, V.M., Eston, S.M. & Araújo, R.L.C., 1979, Geothermal energy prospects in Brazil: A preliminary analysis. *Pure and Applied Geophysics*, 117(1/2), 180-195.

Hurter, S. & Pollack, H., 1996. Terrestrial heat flow in the Paraná Basin, SE Brazil. *J. Geophysical Res.*, 101 (84), 8659-8671.

Kraft, T.; Wassermann, J.; Schmedes, E. and Igel, H., 2006. Meteorological triggering of earthquake swarms at Mt. Hochstaufen, SE-Germany. *Tectonophysics* 424, 245-258.

Ogasawara, H.; Fujimori, K.; Koizumi, N.; Hirano, N.; Fujiwara, S.; Otsuka, S.; Nakao, S.; Nishigami, K.; Taniguchi, K.; Iio, Y.; Nishida, R.; Oike, K.; Tanaka, Y., 2002. Microseismicity induced by heavy rainfall around flooded vertical ore veins. *PAGEOPH* 159, 91-109.

Saar, M.O. & Manga, M., 2003. Seismicity induced by seasonal groundwater recharge at Mt. Hood, Oregon. *Earth and Planetary Science Letters* 214, 605-618.

Talwani, P. & Acree, S. 1984/85. Pore pressure diffusion and mechanism of reservoir-induced seismicity *Pure and Applied Geophysics*, 122 (6), 947-965.

Yamabe, T.H., 1999. Estudos geofísicos para explicar a sismicidade induzida e orientar a exploração de água subterrânea em Nuporanga-SP. *Tese de Doutorado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, USP, São Paulo.*

Yamabe, T.H.; Hamza, V.M.; Assumpção, M. & Birelli, C.A. 2006. Movimentos de água subterrânea relacionados com a atividade sísmica em Bebedouro (SP): inferências com geotermia. *II Simpósio Regional de Geofísica. Natal/RN.*

Yamabe, T.H. & Hamza, V.M., 1996. Geothermal Investigation in an area of induced seismic activity, Northern São Paulo State, Brazil. *Tectonophysics*, 253, p.209-225.