



Atividade Sísmica no Distrito de Andes, Bebedouro, 2005-2006, e sua Relação com a Perfuração de Poços Tubulares

Marcelo Assumpção ⁽¹⁾

Tereza Higashi Yamabe ⁽²⁾

José Roberto Barbosa ⁽¹⁾

Afonso Emídio de Vasconcelos Lopes ⁽¹⁾

Lucas Balancin ⁽¹⁾

⁽¹⁾ IAG–USP, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, Rua do Matão 1226, São Paulo, SP, 05508-090. marcelo@iag.usp.br, jroberto@iag.usp.br

⁽²⁾ FCT-UNESP, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Rua Roberto Simonsen 305 - Presidente Prudente, SP, 19060-900. higashi@fct.unesp.br

16 de Março de 2007

Índice

	Página
Resumo	03
1. Introdução	05
2. Evolução da sismicidade de Andes, 2003-2006	10
3. Sismicidade Regional e Sismicidade Induzida	19
4- Geologia e poços tubulares profundos	26
5. Risco Sísmico e Poços Profundos	31
6. Conclusões e Recomendações	35
Referências	37
Equipe	38
Agradecimentos	39
Anexo 1. Efeitos dos maiores tremores de Andes em 2005	41
Anexo 2. Determinação de epicentros	45

Resumo

Em janeiro de 2004 pequenos tremores de terra começaram a ser sentidos no Distrito de Andes, município de Bebedouro, SP, num sítio vizinho à Fazenda Aparecida. O fato de que a Fazenda Aparecida havia perfurado dez poços no ano anterior (2003), alguns com vazões bastante altas, levantou a suspeita de que os tremores poderiam ter sido causados pela perfuração dos poços e exploração de água subterrânea. Esta atividade sísmica inicial durou até o mês de maio e julho/2004, nada ocorrendo no segundo semestre. Em dezembro de 2004 os tremores voltaram a ocorrer. Em fevereiro/2005 os tremores aumentaram em intensidade e frequência a ponto da Prefeitura de Bebedouro solicitar ajuda do IAG/USP que instalou uma rede de sismógrafos, a partir de março/2005, para estudar o fenômeno.

Até final de 2006 quase 2000 pequenos tremores foram registrados pela rede de seis estações instaladas em Andes. O pico da atividade sísmica ocorreu no final de março e início de abril/2005, com os dois maiores tremores até agora (magnitudes Richter de 2,9 e 2,8 em 30/03 e 02/04/2005, respectivamente) que causaram fortes vibrações nas casas, queda de objetos e até derrubando algumas pessoas ao chão. Não foram comprovadas rachaduras ou danos importantes em construções. A atividade voltou a diminuir substancialmente no 2o. semestre de 2005. No início de 2006 quatro novos poços foram perfurados na Fazenda Aparecida; no final de março e início de abril/2006 ocorreu um novo surto de atividade. No segundo semestre de 2006 a atividade sísmica diminuiu novamente.

Dados de poços existentes em Andes permitiram estimar as espessuras da camada superficial de arenito e a profundidade da camada de basalto (situada entre 40 e 120 m aproximadamente). Os poços mais rasos (que não perfuraram o basalto) exploram água do aquífero superficial na camada de arenito. Os poços mais profundos exploram água em aquífero fraturado confinado dentro da camada de basalto, geralmente com vazões maiores. A distribuição dos sismos mostra que eles não têm origem em uma única falha geológica principal, mas ocorrem em inúmeras pequenas fraturas, dentro da camada de basalto, distribuídas numa área de 1,5 km de largura por 5 km de extensão, centrada nos três poços de maior vazão da Fazenda Aparecida.

Um trabalho de perfilagem geofísica em seis poços da região, feito em colaboração com o IPT-SP, e com o Observatório Nacional, RJ, mostrou que a perfuração de poços tubulares profundos de Andes permite que a água do aquífero livre superficial desça pelo poço e alimente o aquífero fraturado na camada de basalto. Isto significa que, quando os poços profundos não estão sendo bombeados continuamente, a pressão da água no aquífero fraturado fica ligeiramente maior do que era antes do poço ser perfurado.

Os dados e as análises apresentadas neste relatório mostram que a atividade sísmica de Andes, desde seu início em 2004 foi efetivamente induzida pela abertura de poços tubulares profundos. As evidências são as seguintes:

- No estado de São Paulo, tremores de terra são raros, e por isso é pouco provável que ocorram, por mero acaso, sismos muito próximos de um poço recém perfurado.
- Os tremores de terra de Andes ocorrem na forma de surtos com centenas de eventos durante semanas ou meses. Embora sismos naturais também possam ocorrer nesta forma, sismos induzidos sempre ocorrem com este padrão.
- A abertura de poços tubulares profundos, na região de Andes, conecta o aquífero livre superior com o aquífero fraturado confinado na camada de basalto. Esta conexão faz aumentar ligeiramente a pressão da água no aquífero fraturado.

- Todos os surtos de atividade ocorreram no primeiro semestre quando os poços não estavam sendo bombeados, e portanto estavam permitindo que água do aquífero livre alimentasse o aquífero profundo aumentando a pressão de poro nas camadas de basalto. Maior quantidade de água nas fraturas profundas facilita o escorregamento dos blocos que já se encontravam sob pressão. Durante a estiagem, quando os poços são bombeados continuamente, a atividade sísmica se reduz substancialmente. Isto se deve ao fato de que, quando se retira água dos poços por períodos prolongados, a água que permeia as fraturas diminui, o que causa um aumento do atrito entre os blocos, “travando” o deslizamento e diminuindo a sismicidade.

- Cada surto de atividade sísmica (especialmente em 2005 e 2006 analisados com a rede sismográfica) se inicia com epicentros próximos dos três poços de maior vazão da Fazenda Aparecida e tendem a migrar para distâncias maiores. Esta evolução espaço-temporal dos epicentros é bem característica de sismicidade induzida por difusão de pressão de água em meios porosos ou fraturados.

Por outro lado, sismos induzidos necessitam de condições prévias especiais. Apenas a penetração de água em fraturas ou falhas geológicas não é normalmente suficiente para provocar deslizamento entre blocos de rocha. Para que ocorram tremores de terra, a região onde se encontram as fraturas potencialmente sísmicas já devia estar previamente num estado crítico com altas tensões (pressões) geológicas. A penetração da água em falhas e fraturas mais profundas serve como facilitador (disparador) dos tremores. Este é o motivo pelo qual tremores induzidos por poços tubulares são muito raros.

Infelizmente, não é possível prever quando a atividade sísmica cessará por completo. As tensões geológicas previamente existentes estão sendo dissipadas pela ocorrência dos tremores. Assim, há uma tendência dos tremores diminuírem em frequência e intensidade a cada novo surto, mas não se pode dizer exatamente quando a atividade irá terminar. Como foi constatado que os tremores de Andes foram disparados pela abertura de poços tubulares profundos, e que esta atividade sísmica ainda não cessou (um novo surto perto da Fazenda Aparecida iniciou-se em março de 2007), recomendamos:

- Continuação da monitoração sísmica com a rede sismográfica do IAG.

- Continuação dos estudos geofísicos em Andes para melhor entender a estrutura das camadas geológicas e as características da movimentação de água nos aquíferos, principalmente na camada de basalto.

- Estudos da relação entre poços e tremores deveriam dispor de informações detalhadas sobre o histórico de bombeamento dos poços, o que não foi inteiramente possível até o momento. Os estudos sismológicos poderiam ser aprimorados caso fosse possível acompanhar a atividade dos poços mais diretamente.

1. Introdução

1.1 Histórico

Em janeiro de 2004 pequenos tremores de terra começaram a ser sentidos no Distrito de Andes, município de Bebedouro, na região indicada na Fig. 1.1. Inicialmente apenas os moradores dos sítios Santo Antônio (Famílias Cagnin e Lombardo) sentiam os tremores e pensaram tratar-se de explosões de pedreira. Como não existem pedreiras nas proximidades desses sítios, os moradores suspeitaram então de que os tremores pudessem estar relacionados com a perfuração de poços na Fazenda Aparecida, vizinha aos sítios afetados (Fig. 1.1). O fato de que a Fazenda Aparecida havia perfurado dez poços no ano anterior, alguns com vazões bastante altas, contribuiu para os moradores de Andes acharem que a causa dos tremores era a perfuração dos poços e exploração de água subterrânea.

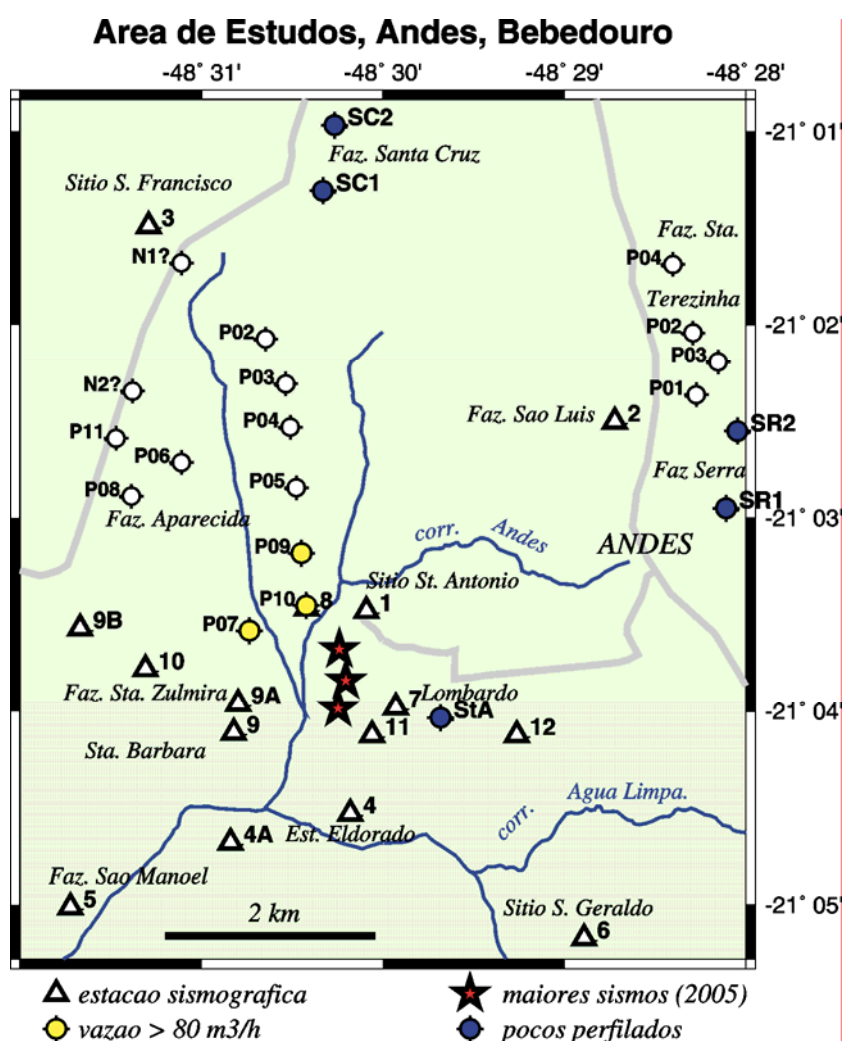


Figura 1.1. Mapa do distrito de Andes. As estrelas vermelhas são os epicentros dos três maiores sismos até 2006 (Tabela 1). Triângulos brancos são os locais ocupados por estações sísmográficas. Círculos são poços tubulares profundos (que penetraram na camada de basalto); poços amarelos têm vazões maiores que 80m³/h. Os poços da Faz. Sta. Terezinha (P01 a P04) foram abertos em 2002; os da Faz. Aparecida (P02 a P11) foram perfurados em 2003; o poço da Faz. Santa Ana (StA) foi perfurado em 2004; Os dois da Faz. Sta. Cruz (localização aproximada) e os da Faz. Serra foram perfurados em 2004. Quatro novos poços foram perfurados na Faz. Aparecida em fev./março de 2006, dois deles indicados como N1 e N2. Nos poços azuis foram feitas perfilagens térmicas para estudar a movimentação de água.

Por volta de abril de 2004, o IAG-USP e a UNESP tomaram conhecimento destes tremores, fazendo inclusive contacto com o assessor de imprensa da Prefeitura de Bebedouro (Sr. Wagner). Porém, nenhum estudo pode ser realizado em 2004 por falta de equipamento.

A atividade sísmica inicial durou até o mês de maio e julho de 2004, como esquematizado na Fig. 1.2. Em dezembro de 2004 os tremores voltaram a ocorrer. Em fevereiro de 2005 os tremores aumentaram em intensidade e frequência. A Prefeitura de Bebedouro, então, solicitou ajuda ao IAG/USP que instalou uma rede de sismógrafos para estudar essa atividade sísmica.

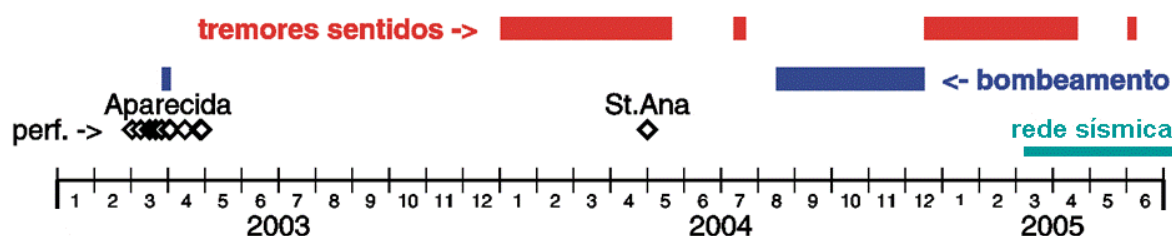


Figura 1.2. Evolução da atividade sísmica sentida pelos moradores (barra vermelha) e histórico dos poços: losangos indicam as perfurações dos poços próximos aos epicentros (Faz. Aparecida e Faz. Santa Ana); a barra azul indica o período de bombeamento contínuo para irrigação em 2005 (Faz. Aparecida). A barra verde indica a rede de sismógrafos em funcionamento na zona rural de Andes.

Várias estações sismográficas foram instaladas em Andes a partir de 08 de março. O pico da atividade sísmica ocorreu no final de março e início de abril, com os dois maiores eventos até agora (magnitudes Richter de 2,9 e 2,8 em 30/03 e 02/04, respectivamente). O IAG, juntamente com a UNESP, vem estudando tanto os aspectos sismológicos (determinação de epicentros, magnitudes, e a evolução da atividade) como aspectos hidrogeológicos de Andes usando dados de poços tubulares que exploram água subterrânea.

Neste relatório são apresentadas uma síntese da evolução da atividade sísmica de Andes, uma análise da sismicidade regional, considerações sobre a geologia da área, o mecanismo pelo qual poços tubulares poderiam provocar tremores de terra, uma discussão sobre as evidências da relação dos poços com os tremores, e recomendações finais.

1.2 Área sísmica

Quase dois mil tremores foram registrados pelas estações sismográficas de março/2005 a novembro/2006. Detalhes da evolução desta atividade estão no capítulo 2. 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 de todos os poços (tanto rasos como profundos) da região de Andes, apresentado no capítulo 4.

Tremores bem registrados em três ou mais estações podem ter o epicentro conhecido com um erro da ordem de 200 a 300m. O Anexo 2 contém os detalhes técnicos sobre os procedimentos de determinação de epicentros e profundidades dos sismos. A Fig. 1.3 mostra os mais de 1300 epicentros bem determinados. A área ativa tem uma largura de 1,5 km e uma extensão de 5 km. As profundidades focais são mais difíceis de se determinar e o erro é maior, da ordem de 300 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).

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.

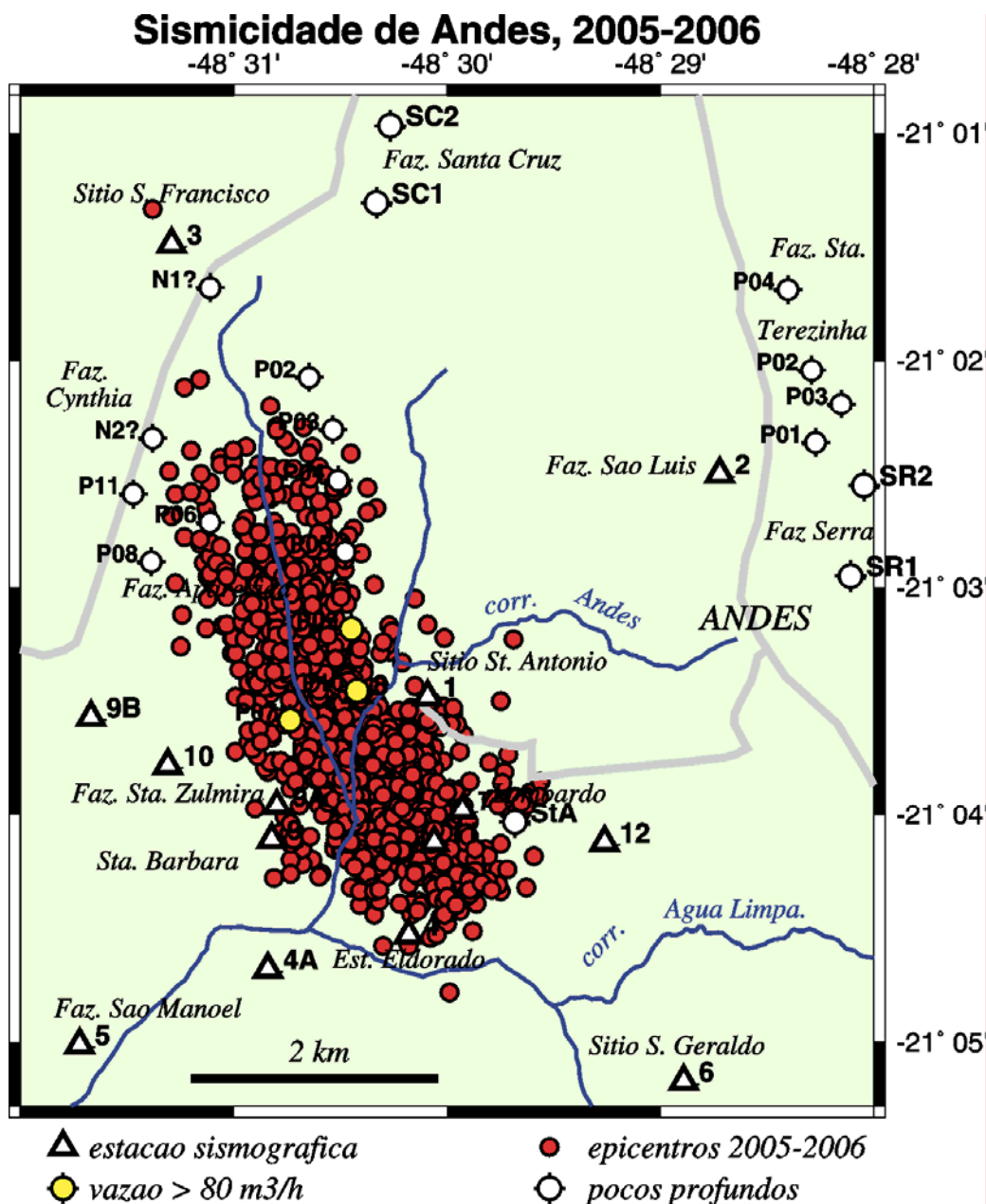


Figura 1.3. Epicentros (círculos vermelhos) de todos os eventos bem registrados de março/2005 a novembro/2006 pela rede sismográfica de Andes, composta por seis estações. Os triângulos são os locais ocupados pelas seis estações sismográficas, deslocadas durante o período de estudo. Círculos são os poços tubulares profundos (i.e., que penetraram a camada de basalto)

1.3 Perfilagem geofísica e movimentação de água dentro dos poços

Foram feitos estudos geofísicos em seis poços tubulares profundos, descritos em detalhe no relatório “Estudos Geotérmicos em Bebedouro: Implicações para Ocorrência das Atividades Sísmicas”, disponível em www.iag.usp.br/~marcelo/bebedouro. Aqui, apresentamos apenas um resumo das conclusões principais.

Na região de Andes, há dois aquíferos principais explorados pelos poços tubulares: o aquífero no pacote sedimentar de arenito (Formação Adamantina), e o aquífero fraturado nas camadas de basalto (Formação Serra Geral). No pacote de arenito é comum a ocorrência de uma fina camada argilosa mais impermeável, que segura as águas que vêm da chuva e riachos na superfície. A maior parte dos poços rasos (que não ultrapassam a camada de basalto) apresenta cachoeiras internas mostrando que o poço, ao perfurar a camada de argila, conecta o aquífero livre superficial com a base do pacote de arenito. Poços rasos raramente apresentam vazões superiores a 20 m³/h. Os poços profundos buscam explorar a água que se encontra acumulada em camadas de basalto alterado (“inter-derrames”) ou mais fraturados, e podem ter vazões de várias dezenas de m³/h. A maior parte dos poços profundos analisados também apresenta cachoeiras indicando que a água da superfície está ajudando a alimentar o aquífero fraturado mais profundo.

Para estudar a movimentação de água dentro dos poços, perfis de temperatura foram obtidos em cinco poços do Distrito de Andes (indicados na Fig. 1.1) e um em Monte Azul Paulista (Fazenda Retiro). A Fig. 1.4 mostra que todos os poços apresentam as mesmas características: a) uma parte rasa onde o ar tem uma temperatura que varia durante o dia, uma zona de temperatura ligeiramente decrescente que indica a cachoeira, uma zona de temperatura praticamente constante indicativa de movimentação de água para baixo dentro do poço, e um intervalo final com as temperaturas aumentando rapidamente.

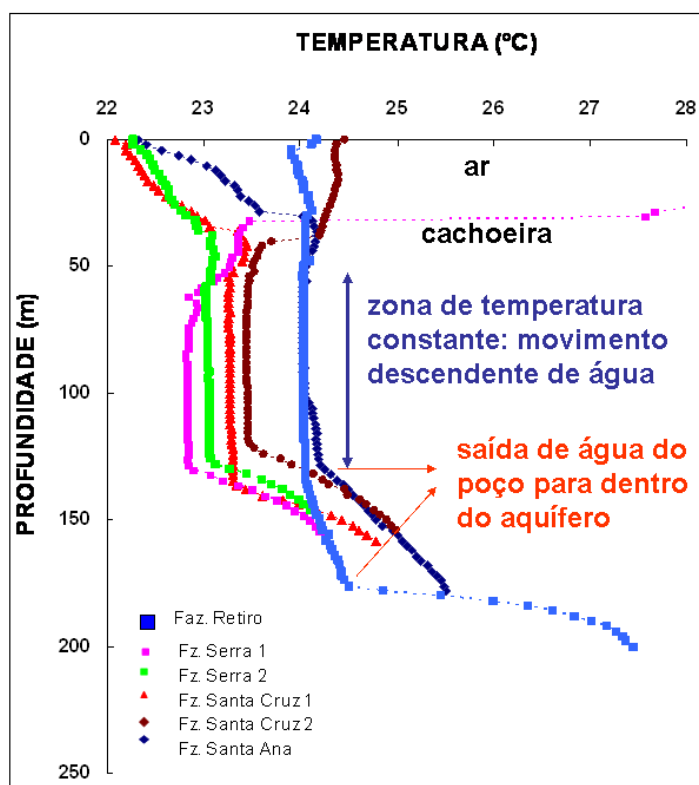


Figura 1.4. Perfilagens térmicas em poços de Andes e Monte Azul Paulista. Note que todos os poços apresentam uma zona de temperatura constante de 30-60m até 120-130m de profundidade, indicativa de movimentação descendente de água dentro do poço.

Em um poço sem movimentação de água, a temperatura deveria aumentar mais ou menos linearmente com a profundidade, numa taxa de 2° a 3°C a cada 100m por causa do calor interno da Terra. A zona de temperatura constante indica o intervalo do poço onde a água desce sem ter tempo de se aquecer pelo fluxo de calor que vem de baixo. Em todos os seis poços foi observada movimentação descendente de água, entre 30-40m e 120-170 m de profundidade.

Logo abaixo da zona de temperatura constante, a temperatura aumenta muito mais rapidamente do que o normal (i.e., bem mais do que os 2° ou 3°C a cada 100m). Este “cotovelo” na curva temperatura-profundidade indica o local onde a água sai do poço. Uma perfilagem geofísica mais completa (perfilagem gama e acústica) foi realizada no poço da Faz. Santa Ana, mostrando claramente que o local de saída da água (base da camada de temperatura constante) é exatamente a zona do aquífero fraturado do basalto. Portanto, a água proveniente do aquífero livre (arenito) desce pelo poço e penetra no aquífero fissural na camada de basalto.

Esta característica deve ser geral na região de Andes, uma vez que todos os seis poços perfilados mostraram o mesmo fenômeno. Desta maneira, constatou-se que a abertura de novos poços na região faz com que o aquífero livre no arenito seja uma recarga local para o aquífero fraturado do basalto, quando os poços não estão sendo bombeados. Isto significa que, após a abertura de um poço profundo, a pressão da água no aquífero fraturado será um pouco maior do que era antes da perfuração do poço, por causa da contribuição adicional da água do aquífero superficial.

Esta característica é importante para o entendimento e explicação do mecanismo de geração dos tremores.

2. Evolução da sismicidade de Andes, 2003-2006

2.1 Ciclos de atividade sísmica

A Fig. 2.1 abaixo sintetiza as informações sobre os períodos em que tremores foram mais sentidos, as datas de perfurações dos poços tubulares profundos (tanto na Faz. Aparecida em 2003 como na Faz. Santa Ana em 2004, e novamente na Faz. Aparecida em 2006), os períodos de bombeamento contínuo dos poços da Faz. Aparecida (segundo informações dadas pelo proprietário em 2005, e estimativas obtidas pelos vizinhos). A Fig.2.1 também mostra a quantidade de chuva mensal no município de Bebedouro para ilustrar que o bombeamento contínuo para irrigação de laranja inicia no pico da estiagem e termina nos primeiros meses da estação chuvosa. Em 2003 não houve bombeamento contínuo na Faz. Aparecida apenas testes de bombeamento logo após a perfuração dos poços.

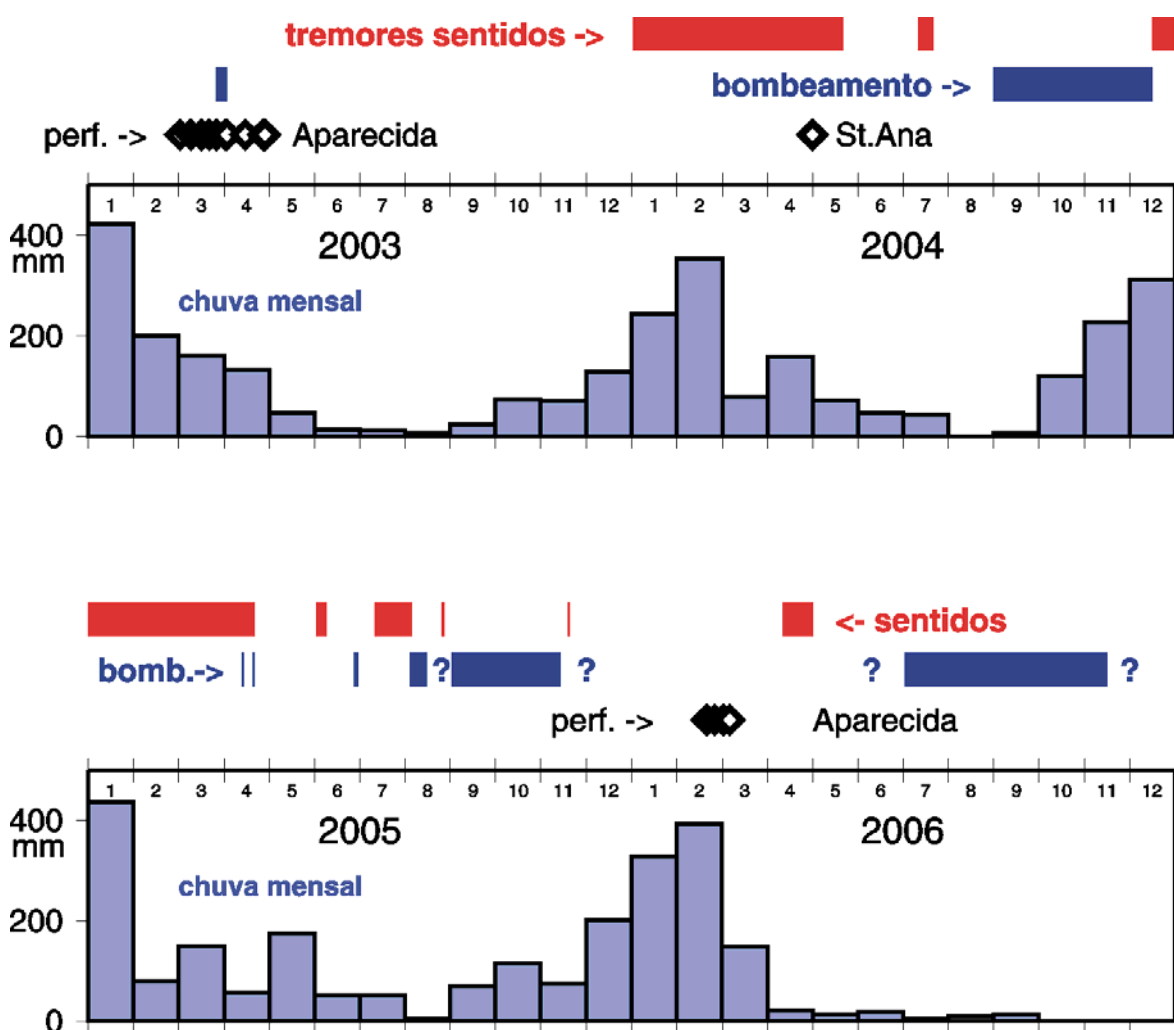


Figura 2.1 Histórico dos tremores sentidos mais fortemente (barras vermelhas), períodos de bombeamento dos poços da Fazenda Aparecida (barras azuis escuro), datas de perfuração de poços profundos (losangos), e histograma de chuva mensal no município de Bebedouro (dados até 09/2006).

2004

Embora alguns vizinhos da Fazenda Aparecida relatem que tremores de terra teriam sido sentidos já em 2003 pelos operários que perfuraram alguns dos poços na fazenda, estes relatos não foram confirmados pelo proprietário da Fazenda. Os primeiros tremores de terra (confirmados) foram sentidos em janeiro de 2004 (ou talvez em dezembro de 2003) no Sítio Santo Antônio (Sr. José e Dna. Didier Cagnin) e no sítio vizinho, da família Lombardo. As sedes destes dois sítios estão próximas das estações BEB1 e BEB7 na Fig. 1.1. Inicialmente os moradores destas propriedades pensaram tratar-se de explosões de pedreira, pois os abalos não eram muito fortes. Não existe pedreira perto desses sítios. Os moradores dos locais afetados acharam então que os tremores poderiam estar relacionados aos poços profundos perfurados em 2003, na Fazenda Aparecida, vizinha ao Sítio Santo Antônio. A atividade inicial em 2004 foi sentida naqueles dois sítios até o mês de maio aproximadamente. Na sede da Faz. Aparecida, tremores relativamente fortes (acordando pessoas durante a noite) foram sentidos no mês de julho de 2004, quando seu proprietário passava alguns dias de férias. Não há relatos de tremores sentidos de agosto a novembro de 2004, época que coincide com o bombeamento contínuo dos poços da Fazenda Aparecida para irrigação.

2005

Ao final de dezembro de 2004 os tremores voltaram a ocorrer, sendo sentidos novamente no sítio Santo Antônio (BEB1). Com o aumento de frequência e intensidade dos eventos, a partir de 25 de fevereiro de 2005, a Sra. Didier Cagnin passou a anotar os horários dos tremores. No final de fevereiro a Prefeitura de Bebedouro, através do eng. Suahil Ismael da SAAEB, solicitou ajuda ao IAG/USP que iniciou este estudo sismológico instalando as primeiras estações sismográficas no começo de março de 2005.

O período de maior atividade foi nos meses de março e abril de 2005. Os maiores tremores até agora ocorreram nos dias 11 e 30 de março, e 02 de abril de 2005 (Tabela 1) com epicentros indicados na Fig.1.1. Uma descrição dos efeitos de cada um destes eventos encontra-se no Anexo 1. Estes eventos maiores foram registrados por algumas estações sismográficas regionais operadas pela UNESP em Rio Claro, pelo IAG-USP em Valinhos, e pela Universidade de Brasília em Minas Gerais.

Tabela 1. Os três maiores eventos até fevereiro de 2007.

Data	Hora Local	Latitude(°)	Longitude(°)	Prof.* (m)	Magnitude Richter
11.03.2005	02:38:26.2	-21.064	-48.503	750	2,6
30.03.2005	08:41:13.9	-21.066	-48.504	600	2,9
02.04.2005	12:25:16.8	-21.061	-48.504	500	2,8

(*) A profundidade pode ter um erro de até ~300 m

Em 2005 os tremores passaram a ser sentidos também na Estância Eldorado (estação BEB4), onde nada havia sido percebido em 2004, indicando uma expansão da área epicentral para o sul, em relação à área epicentral de 2004. A partir de meados de abril de 2005 a atividade diminuiu, tanto em intensidade como em frequência, e poucos eventos foram sentidos em maio e junho.

De ~20 de julho a ~26 de agosto de 2005, novo surto de sismicidade voltou a afetar os moradores, principalmente da Faz. Sta.Bárbara (estação BEB9) e Estância Eldorado (BEB4). Este novo surto de tremores teve magnitudes menores do que os anteriores. Nenhum evento foi registrado pela estação de Rio Claro, a 180km de distância, o que indica que as magnitudes devem ter sido inferiores a 2,5 na escala Richter. No segundo semestre de 2005 a atividade sísmica diminuiu bastante.

Os mapas a seguir (Figs. 2.2 a 2.4) mostram a evolução espacial da atividade sísmica. Apenas eventos com erros de localização estimados em menos de 200m estão mostrados.

Em março de 2005, quando o monitoramento sísmico foi iniciado (Fig. 2.2 a), a atividade estava concentrada principalmente entre as estações BEB1, 7 e 9 e na parte sul da Faz. Aparecida. O período de maior atividade até hoje ocorreu no final de março e início de abril daquele ano. No final de abril, a frente da atividade tinha expandido, passando da linha entre as estações BEB4-BEB7 no sentido sudeste, e também avançado um pouco para norte, para dentro da Faz. Aparecida (Fig. 2.2b). A área ativa aumentou de 2km para 3 km de extensão.

Entre maio e agosto a atividade diminuiu em número de sismos, mas avançou ligeiramente na direção sul e leste (Fig. 2.2c). No segundo semestre de 2005 (Fig. 2.2d) a atividade praticamente parou – este período corresponde à época de bombeamento contínuo dos poços da Fazenda Aparecida.

2006 e a perfuração de novos poços

No início de 2006 a atividade continuava baixa (Fig. 2.2e) com os poucos epicentros localizados a sul da Faz. Aparecida. Quatro novos poços tubulares foram perfurados nesta fazenda no final de fevereiro ou início de março (não dispomos de informação precisa sobre as datas ou a localização destes poços). Em 25/03 a rede sismográfica registrou os primeiros micro-tremores na parte central da Faz. Aparecida (Fig. 2.2f), provavelmente próximos dos novos poços. Deve-se notar aqui que os epicentros dos tremores ocorridos fora da rede sismográfica não têm a mesma precisão que os epicentros anteriores de 2005 localizados dentro da rede. Por isso, os epicentros na parte central da Faz. Aparecida (Figs. 2.2f e 2.3a) têm um erro provável maior, da ordem de 300 a 400m.

No início de abril um novo surto de tremores mais fortes foi sentido em toda a região vizinha à Faz. Aparecida, atingindo um auge em 09 e 10 de abril (Figs. 2.3 a, b). Moradores da Fazenda Cynthia, vizinha do lado oeste da Faz. Aparecida, dizem que começaram a sentir os tremores “logo após” a perfuração dos novos poços. Vibrações também teriam sido sentidas ou ouvidas por funcionários da Faz. Aparecida logo em seguida à perfuração de um dos poços novos.

A Fig. 2.3c mostra claramente que a atividade entre 12 e 22 de abril se expandiu para fora da área inicial definida no começo do mês. Nos meses seguintes (Figs. 2.3d,e) a atividade se expandiu principalmente na direção sul chegando ao limite da área atingida em 2005.

Do final de agosto a meados de novembro a atividade diminuiu sensivelmente. Novamente este período corresponde à época de bombeamento contínuo dos poços da Faz. Aparecida. Os dados sismográficos posteriores a 09/11/2006 ainda não foram analisados detalhadamente.

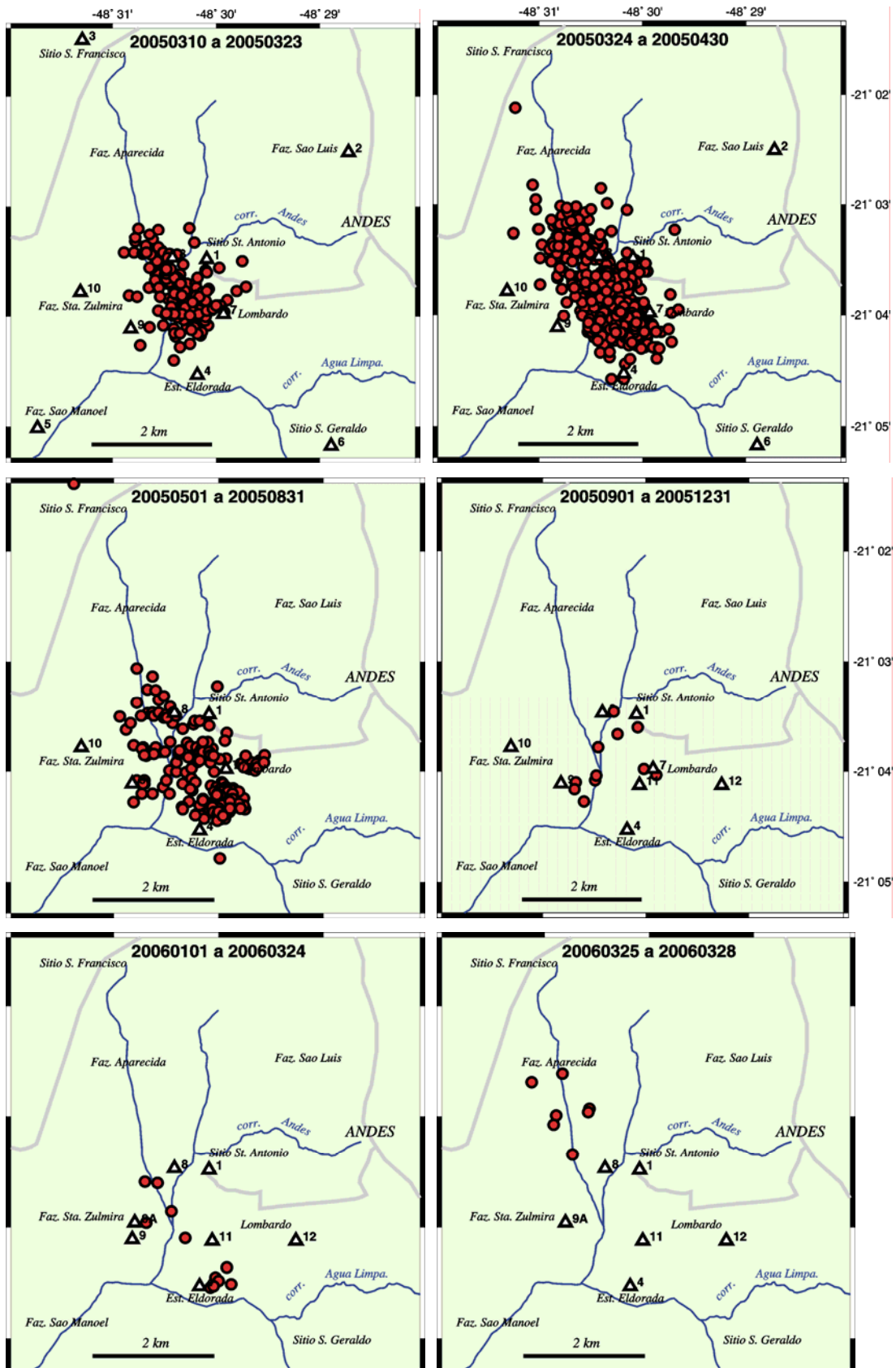


Figura 2.2. Evolução da atividade de março de 2005 a março de 2006. O período de cada mapa está no formato AAAAMMDD. a) período de 10 a 23/03/2005, início do monitoramento sismográfico, b) 24/03 a 30/04/2005 com expansão da área ativa, c) 01/05 a 31/08/2005 com a frente de atividade deslocando-se um pouco mais para sudeste, d) 01/09 a 31/12/2005 com poucos eventos durante época de bombeamento contínuo, e) 01/01 a 24/03/2006, f) 25 a 28/03/2006, primeiros eventos no meio da Faz. Aparecida, possivelmente logo após perfuração dos novos poços .

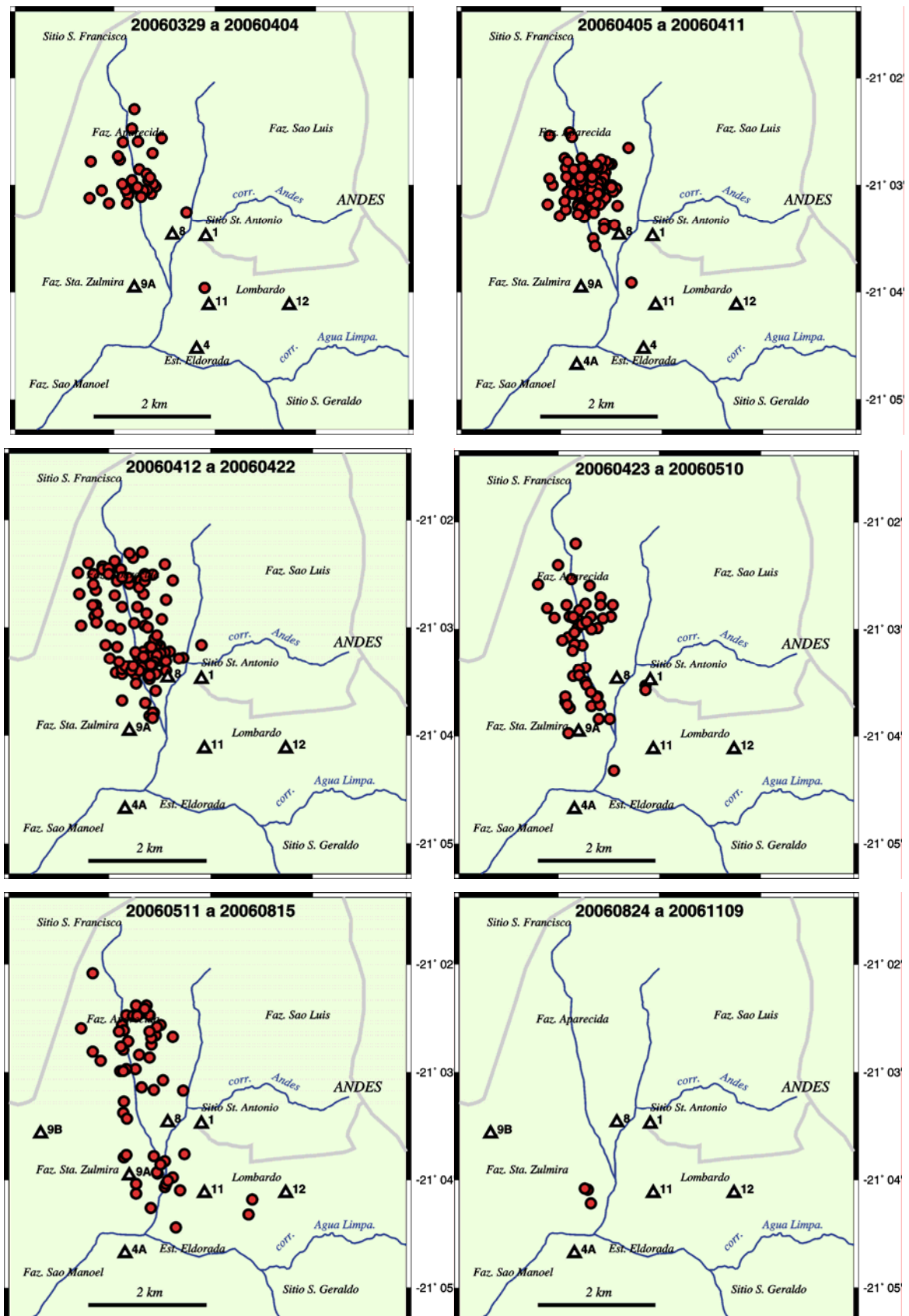


Figura 2.3. Evolução da atividade de 29/03 a 09/11/ 2006. a) 20/03 a 04/04/2006, início do surtorelacionado com os novos poço, b) 05 a 11/04/2006, auge da atividade, c) 12 a 22/04/2006 com afastamento da área ativa, d) 23/04 a 10/05/2006, e) 11/05 a 15/08/2006 com diminuição da atividade e expansão para o sul, f) 24/08 a 09/11, atividade praticamente cessa durante época de bombeamento contínuo.

2.2 Nova área ativa no Sítio Morada da Felicidade

Em agosto de 2006, tremores começaram a ser sentidos também no sítio Morada da Felicidade, alguns quilômetros a oeste da Fazenda Aparecida. A Fig. 2.4 mostra os epicentros dos eventos melhor registrados. Devido à maior distância da rede sismográfica, estes tremores são registrados mais fracamente e a determinação dos epicentros pode ter erros de várias centenas de metros. Os locais mais sentidos têm sido o sítio Morada da Felicidade.

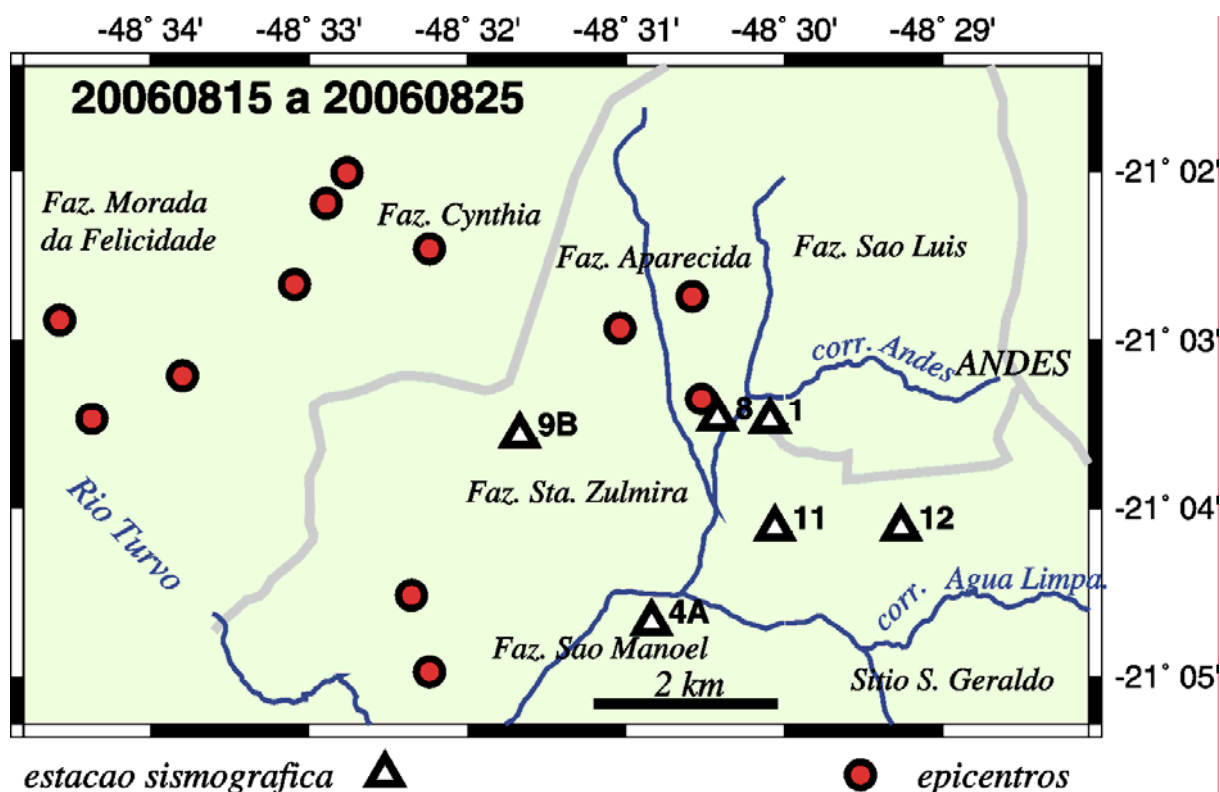


Figura 2.4. Atividade ocorrida entre 15 e 25 de agosto de 2006. Note que os tremores passaram a ocorrer ainda mais longe, agora principalmente na Fazenda Morada da Felicidade onde foram sentidos pelos moradores. Como os eventos estão longe da rede sismográfica, os epicentros podem ter erros de até ~1km.

2.3 Migração da atividade e “difusividade sísmica”

A sequência de mapas (Figs. 2.2 a 2.4) indica uma migração da atividade para áreas cada vez mais longe da área inicial. Para melhor ilustrar esta migração, a Fig. 2.5 mostra a distância de cada epicentro aos poços P07 e P10 da Faz. Aparecida ao longo de 2005. Apesar da distribuição parcialmente aleatória dos epicentros (típica de qualquer atividade sísmica, seja natural ou induzida), pode-se ver que há uma tendência das distâncias médias aumentarem com o tempo.

Esta característica já foi observada em vários outros casos de sismos induzidos por reservatórios hidrelétricos e por injeção de fluidos em poços (e.g., Rayleigh et al., 1976; Fletcher & Sykes, 1977; Talwani & Acree, 1984/85) e pode ser explicada pela difusão da pressão de água nos poros e fraturas das rochas. Em meios fraturados ou porosos uniformes, a pressão da água se dispersa segundo a lei de Darcy, pela qual a pressão exercida pela água em um local inicial (um novo reservatório ou um poço onde se injeta água) avança no meio

rochoso com a raiz quadrada do tempo. Talwani & Acree (1984/85) determinou empiricamente o que chamou de “difusividade sísmica”, ou seja a relação entre o quadrado da distância (com que a frente da atividade sísmica aumenta) e o tempo. Empiricamente, constata-se que nos casos de atividade sísmica comprovadamente induzida (por reservatórios ou por injeção de líquido pressurizado em poços) a difusividade sísmica varia entre 1 e 100 m²/s.

Os sismos de Bebedouro durante o ano de 2005 podem ser interpretados como tendo sido causados pela água proveniente do arenito que causa uma pressão adicional no aquífero fraturado no basalto. Os estudos de perfilagem térmica e geofísica efetuados em seis poços da região de Andes mostraram que todos os poços tubulares servem de conexão entre o aquífero livre superior (água acumulada na camada de arenito) e o aquífero fraturado nas camadas interderrames do basalto. A abertura de um novo poço causa um aumento imediato e localizado da pressão da água no aquífero profundo. Esta pressão se difunde para longe do poço, podendo demorar algumas semanas ou meses para atingir poucos quilômetros de distância, dependendo das características hidráulicas do sistema de fraturas que compõe o aquífero. Durante o bombeamento contínuo dos poços (quase 24 h/dia durante 4 ou 5 meses) a pressão da água diminui e os tremores cessam. A interrupção deste bombeamento contínuo equivale a gerar uma nova pressão inicial de água que inicia um novo ciclo de propagação pelo sistema de fraturas do basalto.

Desta maneira, podemos interpretar a migração da atividade sísmica em 2005 como tendo sido causada pela nova frente de pressão devido à interrupção do bombeamento em meados de dezembro de 2004. A curva contínua da Fig. 2.5 corresponde a um valor de difusividade sísmica de 0,25 m²/s. Este valor é um pouco abaixo do que tem sido relatado em outros casos, mas ainda é um valor compatível com a hipótese de difusão de pressão de água em aquíferos fraturados.

Com a abertura de quatro novos poços no início de 2006, a análise da migração em 2006 fica mais difícil. Podemos ainda ter um efeito da interrupção do bombeamento contínuo no final de 2005, e um outro efeito da abertura dos novos poços (e provável início de nova alimentação do aquífero no basalto com água proveniente do arenito). A Fig. 2.6 mostra a distribuição temporal dos eventos de 2006 e as distâncias de um ponto na parte central da Faz. Aparecida.

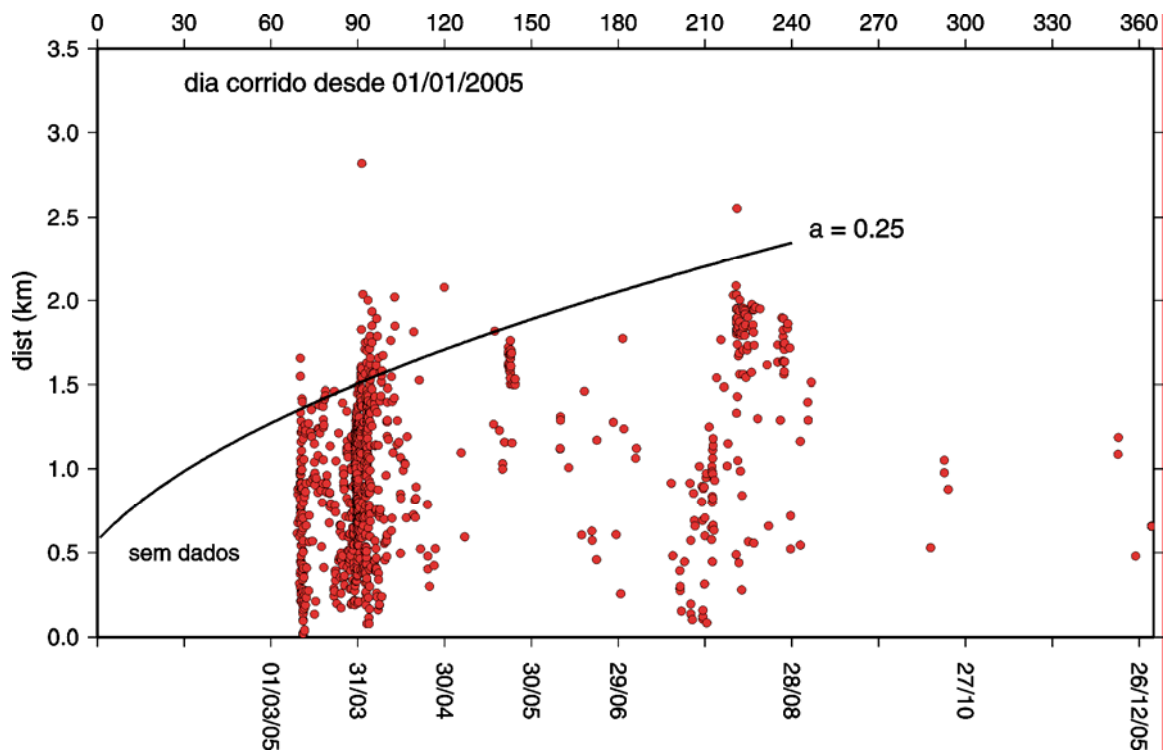


Figura 2.5. Distância de cada epicentro ao ponto médio entre os poços P07 e P10 da Faz. Aparecida durante o ano de 2005. Nota-se um forte surto de atividade no final de março e início de abril, um decréscimo da atividade de maio a meados de julho, e uma pequena reativação no final de julho e agosto. Note que em cada surto, a distância máxima dos epicentros aumenta. A curva contínua indica uma expansão do limite de distância da atividade, a partir de meados de dezembro/2004, correspondendo a uma “difusividade sísmica” de $0,25 \text{ m}^2/\text{s}$, o que seria compatível com um mecanismo de difusão de pressão de água em rochas fraturadas como ocorre com sismos induzidos por reservatórios e por injeção de água (Talwani & Acree, 1984/85). De setembro a dezembro a atividade praticamente cessou, provavelmente por causa do período de bombeamento contínuo.

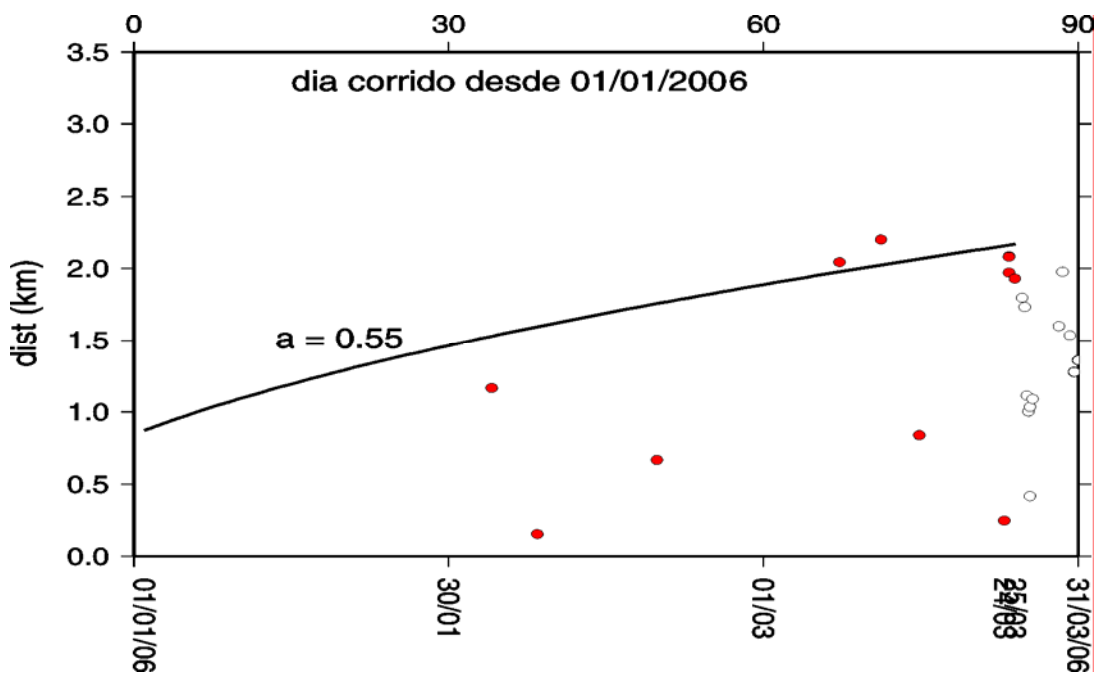


Figura 2.6. Evolução das distâncias epicentrais a partir do ponto médio entre os poços P07 e P10 no início de 2006. A curva indica a expansão da frente de atividade com uma “difusividade sísmica” de $0,55 \text{ m}^2/\text{s}$, a partir de meados de dezembro/2005, quando possivelmente deve ter terminado o bombeamento contínuo do 2o. semestre de 2005. Há uma ligeira tendência dos epicentros de março estarem mais longe (mais ao sul) do que os de fevereiro, conforme visto no mapa da Fig. 2.2. Em 25/03/2006 começou um novo surto de atividade (pontos brancos) no meio da Faz. Aparecida devido à abertura de novos poços.

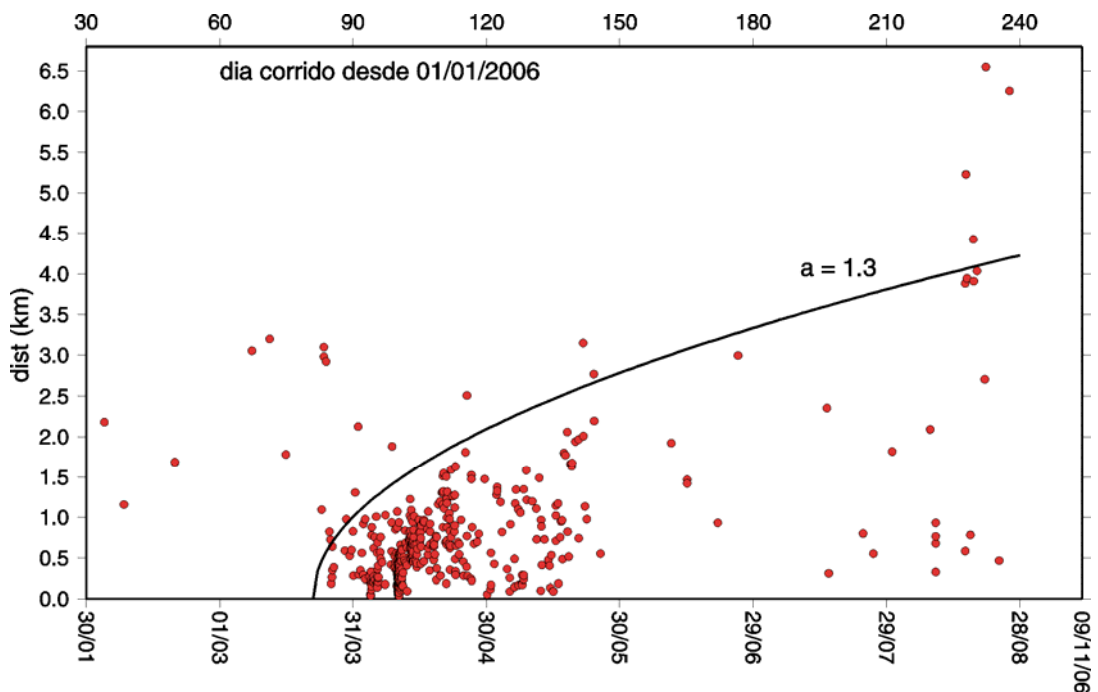


Figura 2.7. Evolução das distâncias epicentrais a partir de um ponto no meio da Faz. Aparecida (supondo que seja um dos poços novos perfurados em fevereiro ou março de 2006). A curva indica a expansão da frente de atividade com uma “difusividade sísmica” de $1,3 \text{ m}^2/\text{s}$ a partir de 22/03/2006.

3. Sismicidade Regional e Sismicidade Induzida

O Brasil é um país relativamente assísmico, onde grandes terremotos catastróficos são praticamente inexistentes, por estar localizado no interior estável da placa tectônica sul-americana, longe das suas bordas ativas. No entanto, tremores de terra de pequena e média magnitude (até 4 ou 5 na escala Richter) podem ocorrer em qualquer lugar do mundo, inclusive no interior “estável” de uma placa como no caso do Brasil. Por isso, tremores de terra no Brasil são muito mais comuns do que se pensa, e são causados por tensões existentes dentro da crosta terrestre, tensões estas de origem geológica.

3.1 Sismicidade na parte norte do Estado de São Paulo

A Fig. 3.1 mostra os epicentros dos tremores de terra conhecidos na parte norte do Estado de São Paulo, já incluindo os eventos de Bebedouro de 2005. A lista dos sismos desta figura está na Tabela 3.1. Não estão incluídos nesta lista os micro-tremores ocorridos na Faz. Boa Vista em Marcondésia (município de Monte Azul Paulista) em março de 2005.

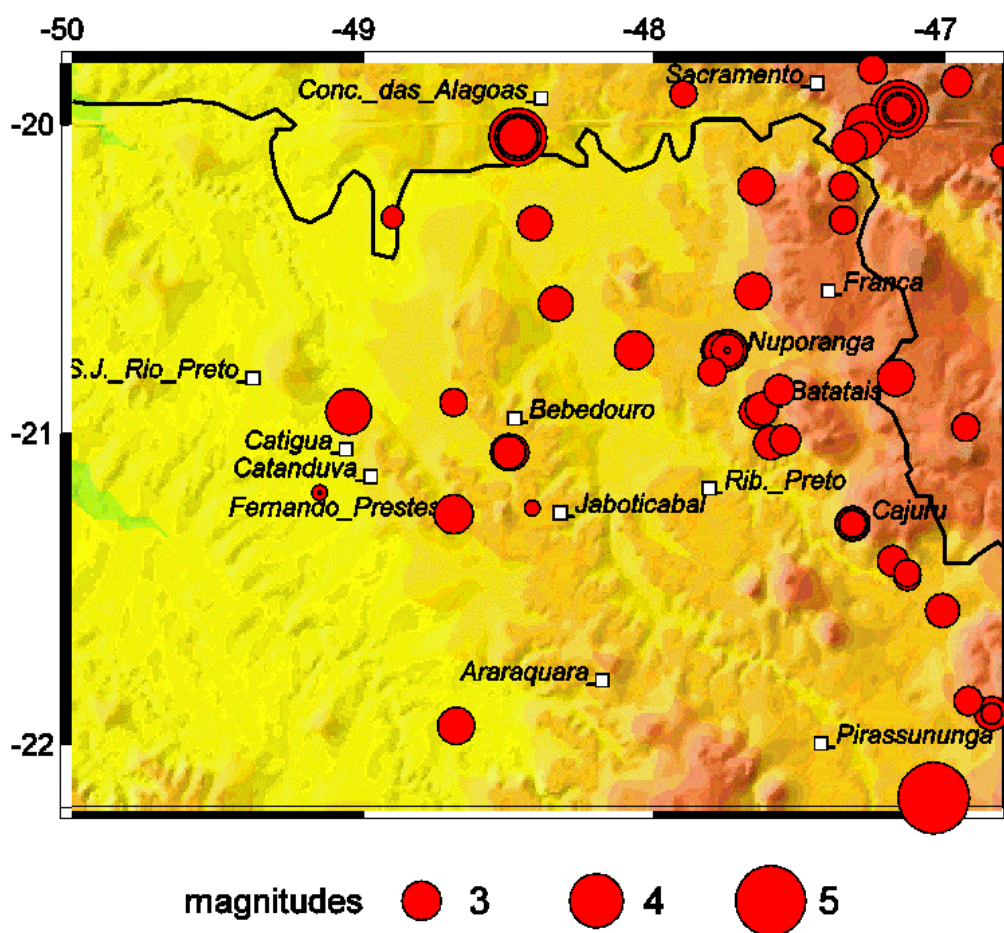


Figura 3.1. Mapa de sismos (círculos vermelhos) na região norte do Estado de São Paulo, de 1922 a 2005 (já incluindo os de Andes), conforme a Tabela 3.1 (fonte: catálogo de sismos do IAG). As cores do mapa referem-se às altitudes: amarelo são regiões mais baixas, e marrom áreas de maior altitude. A linha preta contínua é a divisa SP/MG. Quadrados brancos são cidades.

Como se observa na Fig. 3.1, tremores bem maiores do que os observados em Andes/Bebedouro têm ocorrido com certa frequência. Os maiores tremores de que se tem notícia, no Nordeste do Estado de São Paulo e vizinhanças de Minas Gerais, foram:

a) Sismo de Mogi-Guaçu de 1922, magnitude 5,1

Ocorrido em 27.01.1922 com epicentro entre Mogi-Guaçu e Pinhal (canto SE da Fig. 3.1), este foi o maior sismo conhecido na parte continental do Sudeste do Brasil. Teve magnitude Richter 5,1 m_b , provocou intensidade máxima VI MM na área epicentral (rachaduras e trincas em paredes de algumas casas) e foi sentido até mais de 300 km de distância (Assumpção et al. 1979; Berrocal et al., 1984). Foi bem sentido na cidade de São Paulo e levemente sentido até na cidade do Rio de Janeiro! Apesar da sua magnitude, não causou nenhuma vítima ou dano de maior gravidade. Este evento pode ser considerado o maior sismo "com alguma probabilidade de ocorrência" em qualquer parte da região. Acredita-se que tremores com esta magnitude ocorram na região Sudeste, em média, uma vez a cada século. Devido à data de ocorrência, não se conhece o mecanismo de falhamento deste sismo nem sua profundidade focal. Com base em relações empíricas entre intensidade máxima no epicentro e magnitude, Assumpção et al.(1979) estimaram que este tremor ocorreu a uma profundidade maior que 10km. Apesar de sua grande magnitude, este tremor ocorreu de maneira isolada sem outros tremores anteriores nem posteriores.

b) sismo de Porto-Colômbia/Volta Grande de 1974, magnitude 4,2

Este sismo foi o segundo maior tremor conhecido perto da divisa São Paulo / Minas Gerais chegando a intensidade VI-VII MM (rachaduras em algumas paredes de construções rurais). Foi um sismo induzido pelos reservatórios de Porto Colômbia e Volta Grande localizados no Rio Grande. A intensidade alta e restrita a uma única fazenda (Berrocal et al., 1984) deve-se provavelmente a uma profundidade rasa de poucos quilômetros.

c) sismo de Sacramento de 1990, magnitude 4,2

Este outro sismo importante demonstra que a área da divisa SP/MG é relativamente mais sísmica que a média da região Sudeste. Sua intensidade máxima não ultrapassou VI MM. Este sismo foi acompanhado de tremores menores por alguns meses.

A região de Bebedouro, portanto, situa-se na borda de uma zona relativamente sísmica que inclui a parte sul de Minas Gerais, parte do Triângulo Mineiro e o nordeste de São Paulo (Berrocal et al, 1984; Assumpção et al., 2004). Estes tremores se devem a tensões naturais existentes na crosta terrestre, tensões estas de origem geológica e presentes em toda a placa sul-americana. É possível que na região da divisa SP/MG haja um aumento (concentração) destas tensões geológicas intraplaca devido à menor espessura da placa sul-americana (Assumpção et al., 2004).

Apesar da grande maioria dos tremores terem origem inteiramente natural, uma pequena fração tem sido causada também por interferência humana através da construção de grandes reservatórios hidrelétricos e perfuração de poços tubulares profundos. A abertura de poços tubulares profundos e a criação de grandes represas podem alterar a pressão da água presente em fraturas a centenas ou milhares de metros de profundidades, facilitando (ou antecipando) o deslizamento entre blocos de rocha sujeitos àquelas tensões geológicas. Este tipo de fenômeno é chamado "sismicidade induzida" ou "sismicidade disparada".

3.2 Sismicidade induzida

reservatórios hidrelétricos

Na região da divisa SP/MG vários reservatórios hidrelétricos já induziram sismos, como por exemplo Volta-Grande/Porto-Colômbia (perto de Conceição das Alagoas, MG), Marimbondo (ambos no Rio Grande e mostrados na Fig. 3.1), Miranda e Nova Ponte (próximos à Uberlândia, MG). Em todo o Brasil já foram comprovados mais de 15 reservatórios hidrelétricos com sismicidade associada (Assumpção et al., 2002) e no mundo todo da ordem de 100 casos são conhecidos (Gupta, 1992).

Sabe-se que a implantação de um reservatório de água, por si só, não é capaz de provocar tremores. Sismos são induzidos apenas nos poucos casos em que as tensões naturais da crosta já se encontram bem elevadas e perto do estado crítico. Ou seja, a penetração da água em maiores profundidades, através das fraturas das rochas, apenas aumenta a pressão necessária para causar deslizamento em falhas ou fraturas já previamente sob altas tensões, prestes a se movimentar. Por isto, a grande maioria dos reservatórios hidrelétricos não causa sismicidade alguma. Por outro lado, quando as tensões naturais estão próximas do ponto crítico, pequenas variações no nível da água são suficientes para disparar tremores de terra. Como exemplo, podemos citar o reservatório de Açú (RN) onde um aumento anual de apenas 3 m no nível do reservatório, na época das chuvas, era suficiente para disparar tremores alguns meses mais tarde (Ferreira et al., 1995). A defasagem de alguns meses entre o aumento do nível d'água e os tremores é comum e se explica pelo tempo necessário para a pressão da água atingir a profundidade em que se encontram as falhas sísmicas.

poços tubulares

Outro fenômeno de interesse é a sismicidade provocada por injeção de fluidos a altas pressões em poços profundos, normalmente usada para se descartar resíduos industriais. A água injetada, sob alta pressão, pode se difundir pelas fraturas e porosidade das rochas e alcançar falhas e fraturas potencialmente sísmicas a vários quilômetros de distância. Embora relativamente comum em outras partes do mundo (e.g., Rayleigh et al. 1976; Fletcher & Sykes, 1977; Talwani & Acree, 1984/85) no Brasil não se conhece casos de sismicidade por injeção de água em poço profundos. Por outro lado, um fenômeno equivalente ocorreu com a abertura de alguns poços tubulares na cidade de Nuporanga a ~80 km de Bebedouro (Fig. 3.1). Neste caso, o poço tubular perfurado para explorar água de fraturas na camada de basalto acabou conectando uma fratura rasa com água a uma fratura seca mais profunda. A água da fratura mais rasa preencheu a fratura mais profunda facilitando o deslizamento de blocos de basalto e, assim, provocando tremores de terra (Yamabe & Hamza, 1996).

Em 1959, uma série de tremores de terra foi sentido na cidade de Fernando Prestes (Fig. 3.1), logo após a perfuração de um poço profundo. Na época, o IPT fez um estudo geológico do fenômeno e apontou a possibilidade de relação com a perfuração do poço, mas, pela falta de instrumentos apropriados, as conclusões não puderam ser definitivas (Berrocal et al., 1984). O poço perfurado em Fernando Prestes tinha 102m de profundidade, devendo ter alcançado algum aquífero fraturado na camada de basalto, após ter atravessado 50m de arenito (Formação Bauru). A vazão era de 35 m³/h. Estas características são semelhantes aos poços profundos da região de Bebedouro.

A maior parte dos tremores de terra na região da Fig. 3.1 tem origem natural. Porém, a ocorrência dos sismos induzidos por poços tubulares em Nuporanga e os casos de sismicidade induzida por reservatórios hidrelétricos no Rio Grande, coincidentemente todos

em área de basalto, indicam que a perfuração de poços tubulares em Andes para extração de água da camada de basalto tem a potencialidade de também provocar tremores de terra.

3.3 Sismos isolados e enxame de sismos

Sismos podem ocorrer como um único evento isolado (às vezes acompanhado de algumas pequenas “réplicas” ou sismos menores), ou na forma de “enxame” com uma sequência de inúmeros abalos com duração de semanas, meses ou até anos. Um exemplo típico de evento isolado foi o tremor de Mogi-Guaçu de 1922, com magnitude 5,1: não foi precedido nem seguido de nenhum outro evento menor. O sismo de Catanduva de 2001 também ocorreu como um único evento isolado. Exemplos de enxames de sismos são os eventos induzidos pelo reservatório de Volta-Grande em 1974 (perto da cidade de Conceição das Alagoas, MG, Fig. 3.1) que duraram várias semanas, e os sismos induzidos de Nuporanga que duraram vários anos. Sismos naturais, porém, também podem ocorrer na forma de enxames, como os surtos de Sacramento em 1989/90 e 1991/92, ou os de Cajuru em 1996. A sequência de eventos de um enxame não obedece a um padrão definido, e é comum que haja surtos de atividade maior e mais intensa, intercalados por períodos de menor atividade.

Sismos naturais podem ocorrer de forma isolada ou como enxames. Sismos induzidos sempre ocorrem como enxames de longa duração. Ou seja, o fato dos tremores de terra de Andes ocorrerem na forma de enxames e surtos de longa duração é compatível com a hipótese de serem induzidos, mas apenas este padrão não é suficiente para comprovar a natureza de sismos induzidos.

3.4 Risco Sísmico

Com base na sismicidade anterior da região da divisa SP/MG é possível estabelecer a estatística de tremores esperados a cada ano, conforme a magnitude. Considerando-se a parte leste mais ativa da Fig. 3.1 (com uma área de 30.000 km²) temos a seguinte estatística:

- tremores de magnitude maior ou igual a 5 ocorrem uma vez a cada 100 anos ou mais.
- magnitudes acima de 4,0 ocorrem uma vez a cada 20 anos, em média.
- magnitudes acima de 3,0 ocorrem uma vez a cada 2 anos, em média.
- magnitudes acima de 2,5 (como os maiores de Andes) devem ocorrer, em média, 1,6 vezes por ano.

Estes dados serão usados no capítulo 5 para definir a probabilidade de ocorrência de um tremor natural perto de um poço profundo qualquer.

Tabela 2. Sismos ocorridos na área da Figura 3.1.

DATA		HORA			LAT.	LONG.	Localidade	estado	Io	Raio	MAGNITUDE	Comentários (fonte)	
Ano	Mês	Dia	h	min	s(UT)				MM		mb		
1922	01	27	06	50	40	-22.17	-47.04	Mogi Guaçu	SP	VI	280	5.1	maior sismo do Sudeste
1959	05	25	23	08	-	-21.26	-48.69	Fernando Prestes	SP	IV-V	-	3.0	poço artesiano?
1959	05	27	17	05	-	-21.26	-48.69	Fernando Prestes	SP	IV-V		3.0	poço artesiano?
1959	05	29	06	55	-	-21.26	-48.69	Fernando Prestes	SP	IV-V		3.0	poço artesiano?
1974	02	15	-	-	-	-20.04	-48.47	Conceição das Alagoas	MG	IV		3.0	induzido por reservatório
1974	02	24	03	19	40	-20.04	-48.47	Conceição das Alagoas	MG	VI-VII	47	4.2	induzido por reservatorio
1974	02	27	-	-	-	-20.04	-48.47	Conceição das Alagoas	MG	V		3.5	induzido por reservatorio
1974	03	01	09	-	-	-20.04	-48.47	Conceição das Alagoas	MG	IV-V		3.2	induzido por reservatorio
1974	03	02	18	15	-	-20.04	-48.47	Conceição das Alagoas	MG	V		3.5	quatro eventos
1977	09	04	15	45	-	-20.73	-47.77	Nuporanga	SP	II-IV		2.8	induzido poço artesiano
1978	03	17	20	45	-	-20.73	-47.77	Nuporanga	SP	IV		3.0	induzido poço artesiano
1978	03	18	01	30	-	-20.73	-47.77	Nuporanga	SP	IV		3.0	induzido poço artesiano
1978	07	25	-	-	-	-20.30	-48.90	Marimbondo	SP			2.0	induzido por reservatorio
1980	07	03	22	10	-	-20.07	-47.33	Jaguará	MG	IV	4	2.8	(UnB/CEMIG)
1981	03	24	22	10	03	-20.58	-48.34	Barretos	SP			2.8	(IAG,UnB)
1981	07	11	03	00	-	-20.80	-47.80	Orlândia	SP			2.4	(IAG,UnB)
1983	12	27	17	03	-	-19.90	-47.90	Uberaba	MG			2.2	(UnB)
1984	07	04	16	07	05	-20.20	-47.35	Estreito	MG	II		2.4	(UnB,IAG) sentido Faz.Pinhus
1986	02	07	01	40	48	-20.10	-46.80	Serra da Canastra	MG			2.1	(UnB) explosao ?
1988	07	19	10	30	-	-20.73	-47.75	Nuporanga	SP	IV		3.0	(TV Globo, Rib.Preto)
1988	11	10	22	36	25	-20.31	-47.35	Franca	SP			2.3	(UnB, IPT, IAG)
1989	05	23	22	57	58	-20.73	-47.75	Nuporanga	SP	IV-V	10	3.2	(IAG,UnB,IPT)
1989	06	01	21	40	-	-20.73	-48.07	Morro Agudo	SP	IV		3.0	(IAG)
1989	10	19	04	17	-	-20.73	-47.75	Nuporanga	SP	III		2.6	três tremores (Pref.Mun.)
1989	12	18	11	46	26	-19.95	-47.16	Sacramento	MG	IV		3.4	(IPT,UnB,IAG)
1990	01	19	22	05	15	-19.95	-47.16	Sacramento	MG	V-VI	40	4.2	(IPT,UnB,IAG,ON,UNESP)
1990	03	28	22	29	49	-21.90	-46.84	São João da Boa Vista	SP			2.7	(IPT,IAG)
1990	03	29	02	05	05	-21.90	-46.84	São João da Boa Vista	SP			1.9	(IPT,IAG)
1990	06	01	06	55	57	-19.95	-47.16	Sacramento	MG	II		2.6	(IAG,UnB,IPT)
1990	07	12	21	01	03	-21.86	-46.92	São João da Boa Vista	SP			2.4	(UnB, IPT, IAG)
1990	09	08	04	34	06	-20.90	-48.69	Monte Azul	SP			2.3	(IAG, IPT, UNESP)

DATA		HORA			LAT.	LONG.	Localidade	estado	Io	Raio	MAGNITUDE	Comentários (fonte)
Ano	Mês	Dia	h	min	s(UT)				MM	mb		
1991	09	06	03	35	47	-19.95	-47.16	Sacramento	MG		2.3	(UnB, IAG)
1992	03	02	06	06	37	-20.01	-47.27	Sacramento	MG	II	3.6	(IAG, UnB, IPT, UNESP)
1992	08	17	02	57	34	-20.98	-46.93	S. Sebastião d Paraiso	MG	IV	2.3	(IAG, IPT)
1992	09	13	01	10	-	-21.24	-48.42	Monte Alto	SP	IV	1.5	(IAG)
1992	10	01	15	05	53	-21.57	-47.01	São José do Rio Pardo	SP		2.7	(IAG, IPT, UnB)
1993	09	01	10	40	05	-21.45	-47.13	Sta. Rita Viterbo	SP		2.2	(IAG, IPT) explosao ?
1993	09	01	10	43	24	-21.46	-47.13	Sta. Rita Viterbo	SP		2.3	(IAG, IPT) explosao ?
1993	09	17	09	58	40	-21.41	-47.18	Sta. Rita Viterbo	SP		2.5	(IAG, IPT) explosao ?
1994	07	07	21	22	13	-19.86	-46.96	Tapira	MG		2.5	(UnB)
1995	05	26	19	43	44	-20.20	-47.65	Buritizal	SP		2.9	(UnB)
1995	05	28	09	22	59	-20.93	-47.65	Batatais	SP		2.7	(UnB)
1995	05	30	13	01	20	-20.92	-47.63	Nuporanga	SP		2.6	(UnB, IAG)
1995	06	02	09	32	11	-20.54	-47.66	Sao Jose	SP		2.9	(UnB)
1995	06	06	00	32	22	-20.32	-48.41	Guaira	SP		2.8	(UnB, IPT, IAG)
1995	06	06	17	42	04	-21.02	-47.55	Altinopolis	SP		2.5	(UnB)
1995	06	06	17	43	43	-21.03	-47.60	Altinopolis	SP		2.7	(UnB)
1995	06	08	20	00	13	-20.86	-47.57	Batatais	SP		2.5	(UnB)
1996	02	23	23	27	08	-21.94	-48.68	Bariri	SP		2.9	(IPT, UNB, IAG, COPEL)
1996	03	25	17	45	-	-20.73	-47.75	Nuporanga	SP	V	0.9	(IAG, IPT)
1996	04	09	05	17	-	-21.29	-47.32	Cajuru	SP		2.8	(IPT)
1996	05	08	19	02	13	-21.29	-47.32	Cajuru	SP	II	2.0	(IAG, IPT)
1996	05	09	05	17	02	-21.29	-47.32	Cajuru	SP	IV	2.7	(IAG, IPT, UnB)
1996	05	10	15	11	-	-21.29	-47.32	Cajuru	SP		1.6	(IPT)
1996	06	06	20	32	59	-21.29	-47.32	Cajuru	SP	III	1.4	(IAG, IPT)
1996	06	06	20	37	00	-21.29	-47.32	Cajuru	SP	III	1.9	(IAG, IPT)
1996	06	22	18	20	32	-21.29	-47.32	Cajuru	SP		1.3	(IAG, IPT)
1996	06	28	14	20	-	-21.29	-47.32	Cajuru	SP		1.4	(IPT)
1996	10	28	22	02	48	-21.29	-47.32	Cajuru	SP	IV	2.6	(IAG, IPT)
1996	12	20	03	20	02	-21.29	-47.32	Cajuru	SP	III	2.2	(IAG)
1997	01	12	05	32	37	-21.29	-47.32	Cajuru	SP	IV-V	2.3	(IAG)
1997	02	10	04	13	39	-19.82	-47.25	Araxá	MG		2.4	(UnB)
1997	07	17	16	45	45	-20.82	-47.17	Antas	SP		2.9	(UnB)
1999	04	11	20	26	50	-20.05	-47.28	Jaguarinha	MG		2.9	(IAG, UnB, IPT)


```

=====
      DATA      HORA      LAT.  LONG.  Localidade      estado  Io  Raio  MAGNITUDE  Comentários (fonte)
Ano Mês Dia h min s(UT)                                     MM      mb
-----
2000 09 28 16 04 08   -20.93 -49.05  Catiguá         SP      .  3.4   (IAG,UnB)
2004 08 06 14 00 -   -21.19 -49.15  Marapoama/Itajobi  SP  IV  1.5   (IAG) varios eventos
2004 08 21 07 10 00   -21.19 -49.15  Marapoama/Itajobi  SP      .  0.7   (IAG) varios eventos
2005 03 11 05 38 26   -21.06 -48.50  Bebedouro, Andes  SP  IV  2.6   (IAG,UNESP-RC)
2005 03 30 11 41 14   -21.06 -48.50  Bebedouro, Andes  SP   V  2.9   (IAG,UNESP-RC)
2005 04 02 15 25 17   -21.06 -48.49  Bebedouro, Andes  SP   V  2.8   (IAG,UNESP-RC)
=====

```

Legenda:

HORA = Hora de ocorrência do tremor, UT = Hora Universal = Hora de Brasília + 3h

Io = Intensidade (efeitos do tremor) na escala Mercalli Modificada

Raio = distância média até onde o tremor foi sentido

MAGNITUDE mb = magnitude na escala Richter

4- Geologia e poços tubulares profundos

A região de Andes e Bebedouro é coberta por uma camada de arenito (Formação Adamantina) com espessuras geralmente de 50 a 100m. Abaixo do arenito, encontra-se uma camada de basalto (Formação Serra Geral) com espessura de ~500m aproximadamente. O mapa da Fig. 4.1 mostra as principais unidades geológicas da região.

Poços tubulares que exploram o aquífero superior na camada de arenito raramente possuem vazões superiores a 10 m³/h. Quando se necessita de maiores vazões, por exemplo para irrigação, costuma-se explorar aquíferos fraturados na camada de basalto. Estes aquíferos costumam ocorrer nas primeiras dezenas de metros da camada de basalto, geralmente entre os últimos derrames do pacote de basalto. A água nestas fraturas ou zonas alteradas inter-derrames é acumulada lentamente por infiltração de água proveniente do aquífero superior através de fraturas.

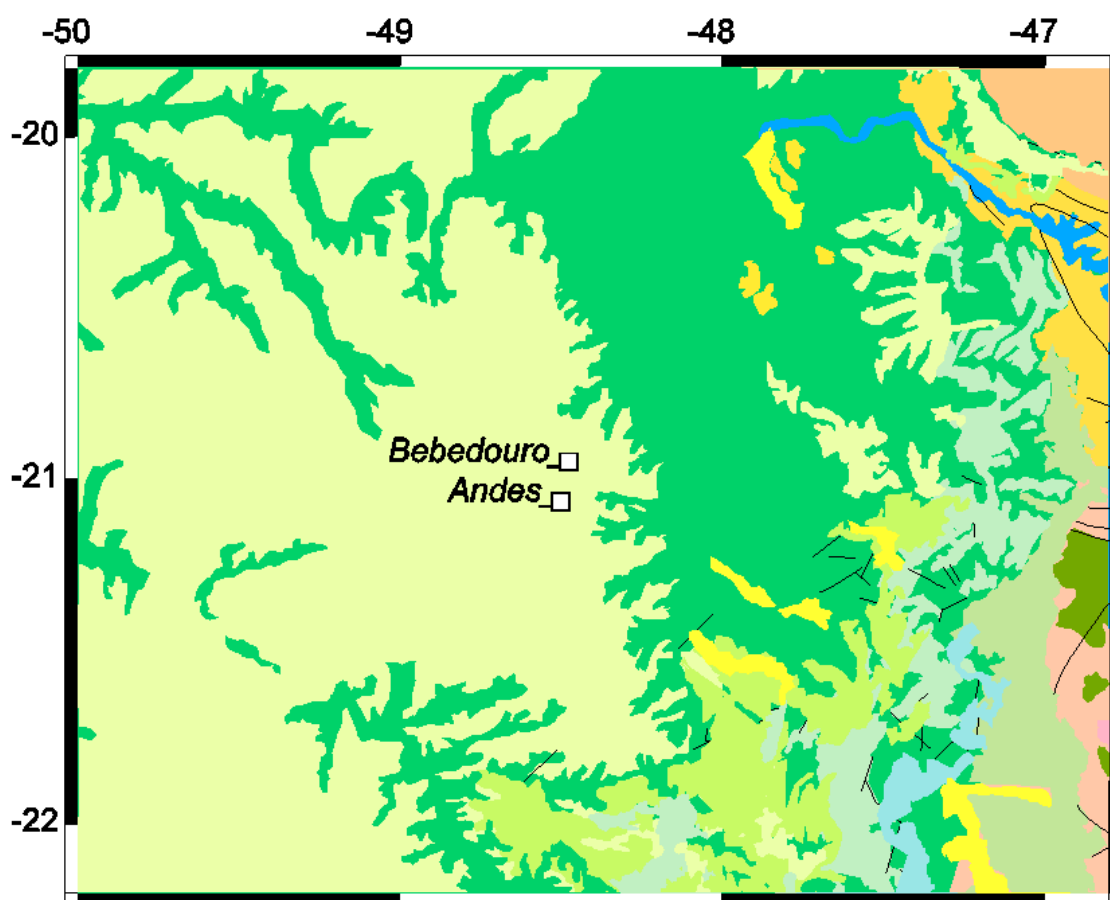


Fig. 4.1. Mapa geológico da região NE do Estado de São Paulo e divisa com Minas Gerais. A área de cor bege, onde se encontram Bebedouro e Andes, representa as rochas sedimentares do Grupo Bauru; em Bebedouro e Andes predominam os arenitos da Formação Adamantina. A área verde escuro no centro do mapa é a região de afloramento dos basaltos da Formação Serra Geral; esta camada de basalto se estende para oeste sob os sedimentos (arenitos) do Grupo Bauru. Em Bebedouro e municípios vizinhos, aquíferos fraturados nesta camada de basalto são bastante explorados.

Camadas de arenito e basalto em Andes

Na região de Andes as altitudes variam de 530 a 670m acima do nível do mar, como se vê na Fig.4.2, abaixo, obtida com dados do SRTM (Shuttle Remote Topography Mission, da NASA).

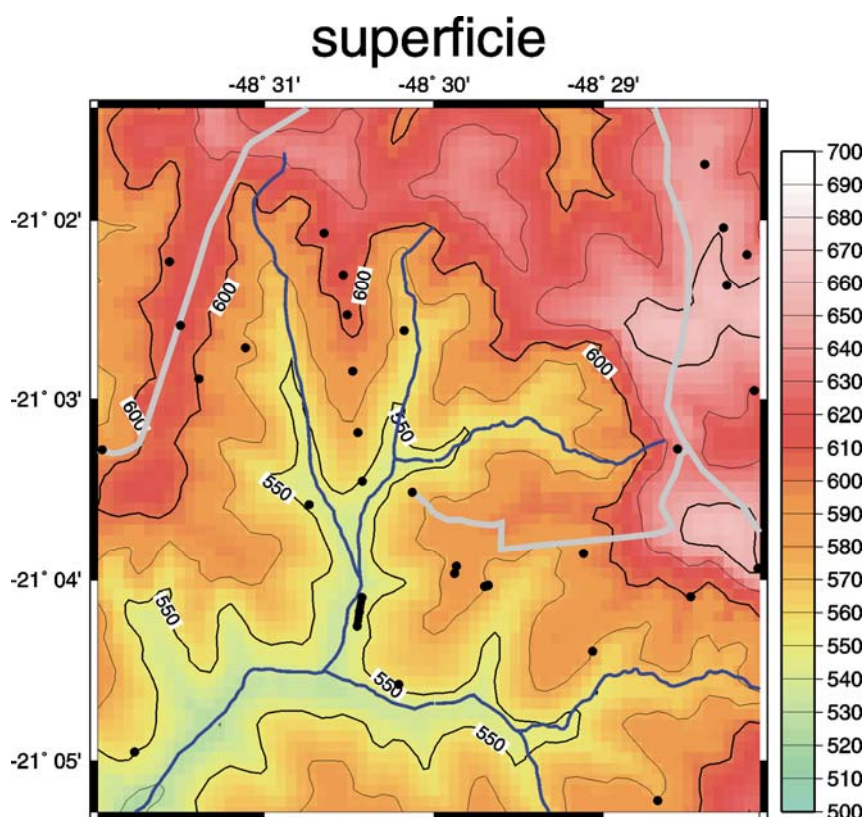


Figura 4.2. Altitudes na região de Andes, em metros acima do nível do mar. Curvas de contorno em intervalos de 25m (fonte dados do SRTM). Pontos pretos são os poços que atingiram a camada de basalto, usados para mapear o topo desta camada (Fig. 4.3). A linha NS ao lado do córrego de Andes é o levantamento de refração sísmica. Linhas cinza são as principais vias de acesso da região.

Utilizando-se as informações disponíveis de todos os poços que atingiram a camada de basalto foi possível mapear o topo desta camada. As informações sobre espessura de arenito e profundidade do basalto foram obtidas com o cadastro do DAEE (Araraquara) ou diretamente com os proprietários dos poços. As coordenadas e altitudes de cada poço usado foram estimadas de três maneiras: dados de GPS, dados de topografia SRTM, e cartas do IBGE. Os dados de GPS usados pelo IAG são compatíveis com as altitudes do modelo SRTM. As cartas topográficas do IBGE, por outro lado, dão valores 11m mais baixos, em média, do que os valores de GPS ou do SRTM. Para cada poço, foram obtidas médias de todos os valores disponíveis, corrigindo-se as altitudes das cartas do IBGE para o *datum* do SRTM. Cada tipo de medida isolada tem um erro médio de $\pm 10\text{m}$. As médias das altitudes adotadas para cada poço devem ter um erro de $\pm 5\text{m}$. Também foi feito um levantamento de refração sísmica perto do Córrego de Andes para determinação da estrutura e espessuras das camadas de arenito (pontos pt1 a pt5 na Fig. 4.3a).

As Figs. 4.3a,b mostram a altitude do topo da camada de basalto na região de Andes. O topo da camada de basalto é bem mais suave do que a superfície, e tem altitudes variando

apenas entre 490 e 520m, com uma tendência de aprofundamento para oeste. Uma feição muito interessante, que se nota nas Figs. 4.3a,b, é um afundamento do basalto próximo aos poços P07 e P10 da Faz. Aparecida. Esta feição fica mais clara na Fig. 4.5 que mostra uma projeção NS dos dados dos poços das Fazendas Santa Ana e Aparecida. Pode-se ver que os dois poços com vazões extremamente altas (P07 e P10) da Fazenda Aparecida, estão locados numa região onde o topo do basalto está mais fundo. Esta feição pode significar que a água da superfície que percola pela camada de arenito poderia se acumular nesta “baixada” contribuindo para alimentar as fraturas do basalto, ajudando a explicar as altas vazões dos poços próximos.

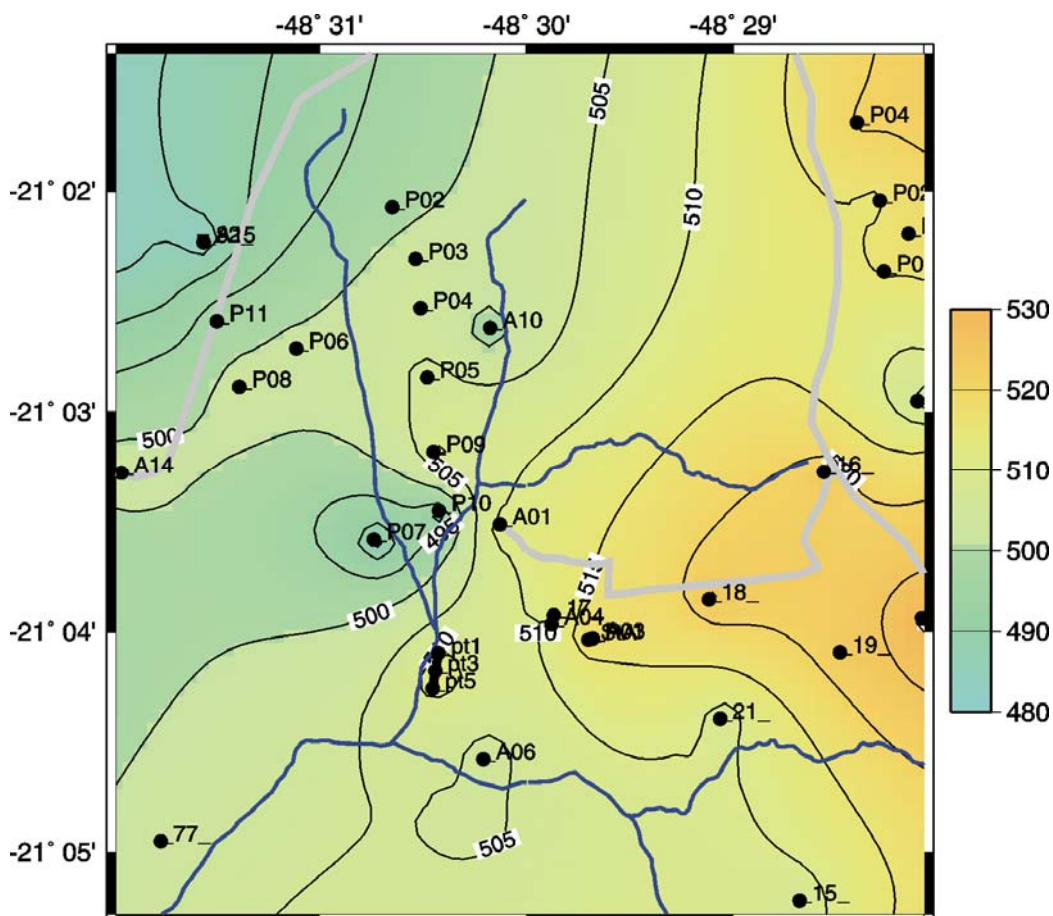


Figura 4.3a. Cota do topo do basalto (altitude acima do nível do mar) obtida por interpolação dos dados de poços de Andes (círculos pretos com identificação). Note um aprofundamento do topo do basalto próximo aos poços P07 e P10 da Faz. Aparecida.

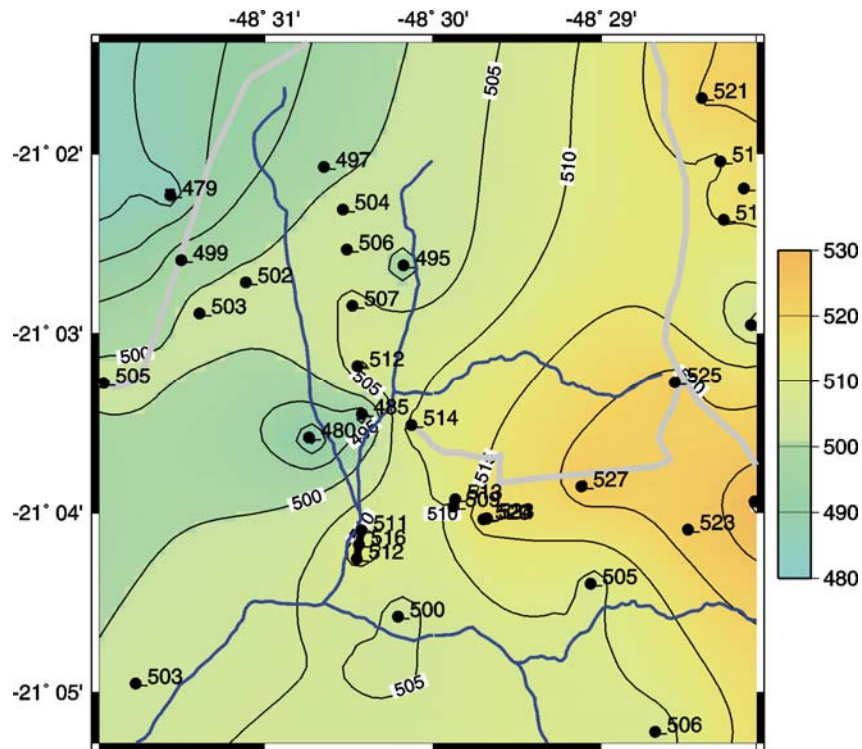


Figura 4.3b. Cota do topo do basalto obtida por interpolação dos dados de poços de Andes (círculos pretos com valor utilizado, em metros).

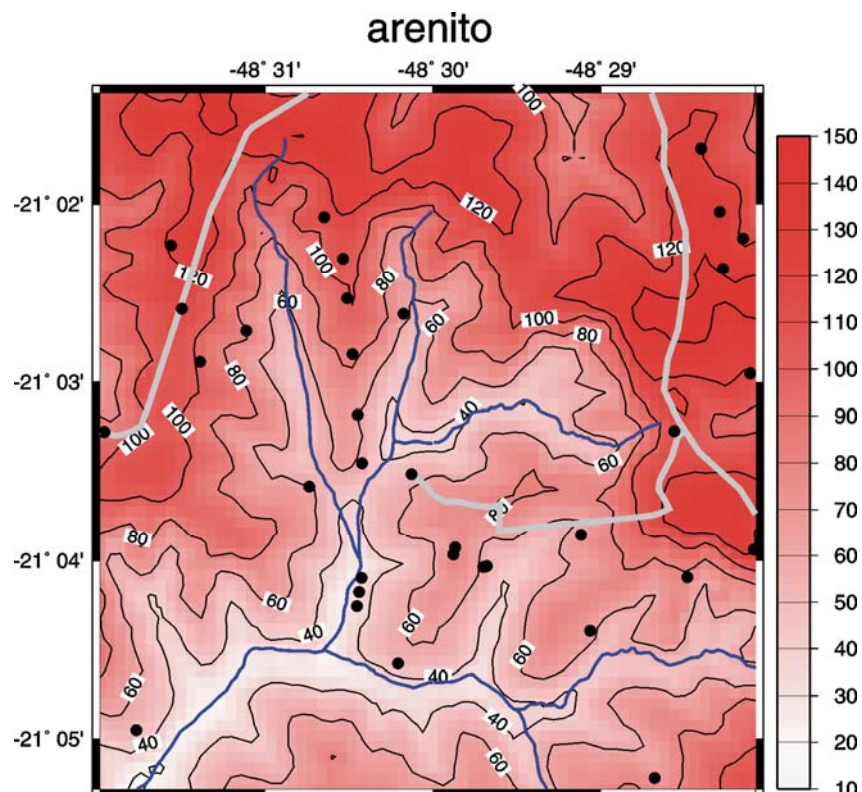


Figura 4.4. Espessura total da camada de arenito (em metros), obtida pela diferença entre as altitudes da superfície (Fig. 4.2) e as do topo do basalto (Fig. 4.3). As espessuras variam de mais de 120 m na parte mais elevada da região a menos de 30 m na parte mais baixa próxima ao Córrego de Andes.

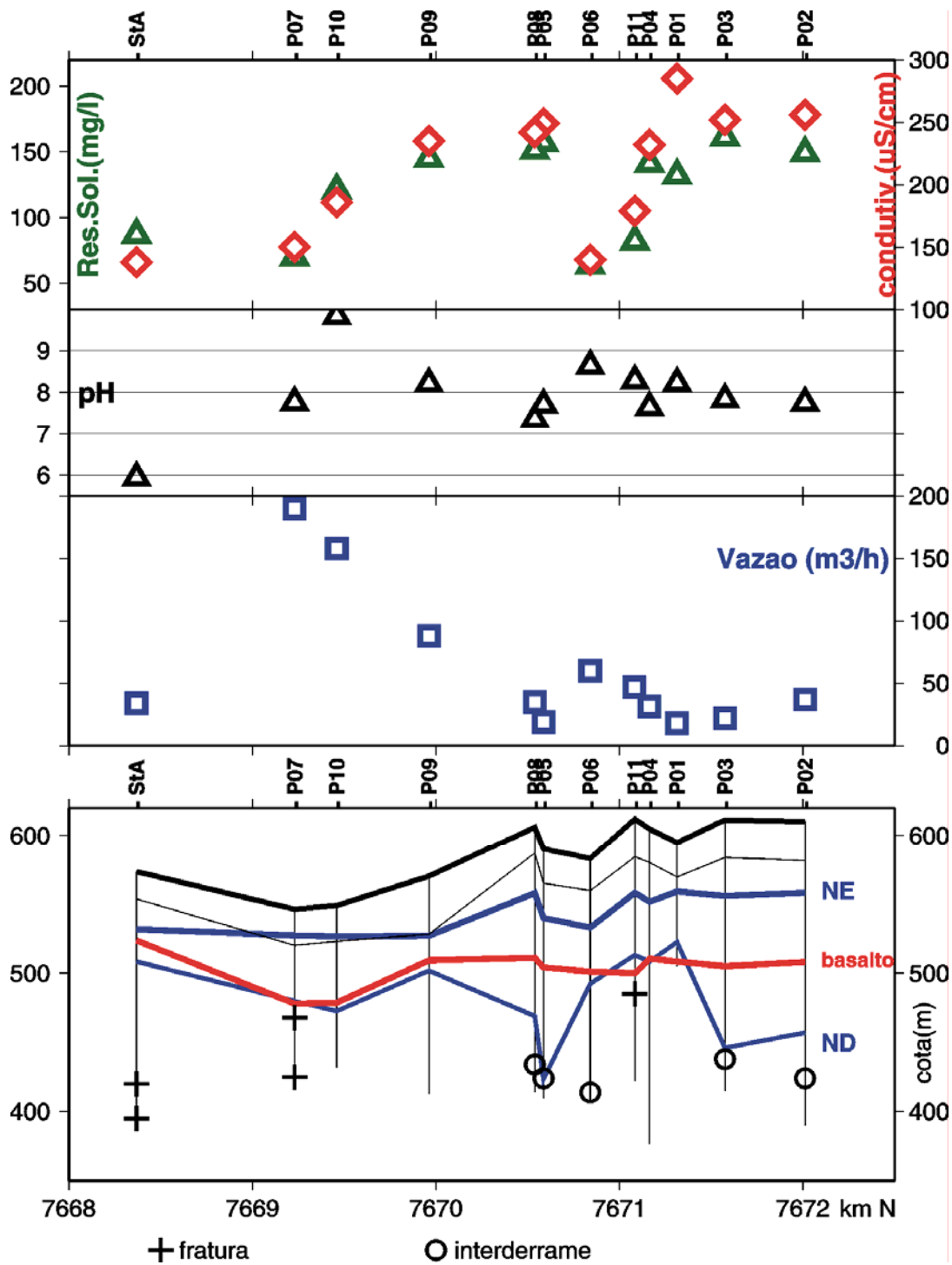


Figura 4.5. Projeção dos dados de poços da Fazenda Santa Ana (StA) e Faz. Aparecida (P01 a P11) conforme a latitude UTM (km Norte). Dados obtidos do cadastro dos poços no DAEE-Araraquara. Na parte superior estão os dados de condutividade elétrica, resíduos sólidos, PH, e vazão máxima. Na parte inferior as linhas representam a superfície (preta grossa), profundidade do solo (preta fina), Nível Estático (azul “NE”), topo do basalto (vermelha), e Nível Dinâmico (“ND”). As cruzes indicam prováveis fraturas, e os círculos indicam limites interderrames, segundo informações dos perfuradores constantes do cadastro dos poços no DAEE (dados pouco precisos).

5. Risco Sísmico e Poços Profundos

Em todos os estudos de tremores de terra induzidos, um fator muito importante é a proximidade entre os epicentros e a “causa” atribuída, seja ela um reservatório hidrelétrico, um poço profundo, ou escavação de minas.

Uma vez que sismos naturais ocorrem de maneira aleatória, e um grande número de poços tubulares profundos são perfurados todos os anos na região de Bebedouro e municípios vizinhos, é possível que sismos naturais ocorram nas proximidades de algum poço profundo meramente por acaso, sem nenhuma relação com a abertura do poço.

Neste capítulo fazemos uma análise da probabilidade de um sismo natural ocorrer por acaso próximo a um poço profundo (i.e., que tenha perfurado a camada de basalto) aberto menos de um ano antes. Para isso, é preciso estimar a quantidade de poços profundos perfurados anualmente na região de Bebedouro e vizinhanças. Podemos estimar a probabilidade (ou “risco”) de que um sismo pequeno ocorra, por acaso, na região de Bebedouro, com base na estatística de sismos vista no capítulo 3. Conhecendo-se este “risco sísmico” e o número de poços da região, podemos estimar as chances do tremor natural ocorrer perto de um poço por acaso.

Número de poços profundos perfurados por ano

Através de levantamentos junto ao DAEE-Araraquara, pesquisas com fazendeiros na região de Andes, e principalmente com informações da perfuradora Hidromap de Monte Azul, foi possível estimar o número de poços que perfuraram a camada de basalto nos últimos anos em Bebedouro e municípios vizinhos, como se vê pela Figura 5.1. Neste levantamento, os dados obtidos através da Hidromap não incluem as coordenadas do poço mas apenas o nome do município, razão pela qual muitos pontos na Figura 5.1 estão concentrados em cidades como Monte Azul, Bebedouro, Barretos, Frutal, etc.

Os dados deste levantamento (Fig. 5.1) indicam uma grande concentração de poços nos municípios de Monte Azul, Barretos, Jaboticabal e Monte Alto, provavelmente por ser a região de maior atuação da empresa Hidromap (embora ela atue até em outros estados também). Esta região com maior densidade de poços profundos, indicada pelo retângulo na Fig. 5.1, tem uma área de 3.000 km². O número de poços perfurados nesta área varia em cada ano: foram abertos 12 poços profundos em 2001; 22 em 2002; 38 em 2003; 32 em 2004; e da ordem de 10 em 2005. Para se estimar o número de poços abertos por ano, como medida conservadora, tomamos os dados do ano de 2003 quando foram perfurados 38 poços profundos (i.e., que ultrapassaram a camada de arenito e penetraram pelo menos alguns metros no basalto), conforme ilustrado na Fig. 5.2. Este número (38) supõe que todos os poços perfurados nos municípios de Barretos e Monte Azul estejam dentro do retângulo de maior densidade, o que está exagerado por não conhecermos as coordenadas exatas dos poços.

Por outro lado, nosso levantamento não é completo, pois nem todos os poços perfurados já se encontram cadastrados no DAEE, e há outras perfuradoras além da Hidromap atuando nesta parte do Estado de São Paulo. Com base neste levantamento (com dados principalmente da Hidromap) extrapolamos que na área de maior concentração de poços (retângulo entre Barretos e Jaboticabal) venham sendo perfurados ultimamente da ordem de 100 poços profundos por ano.

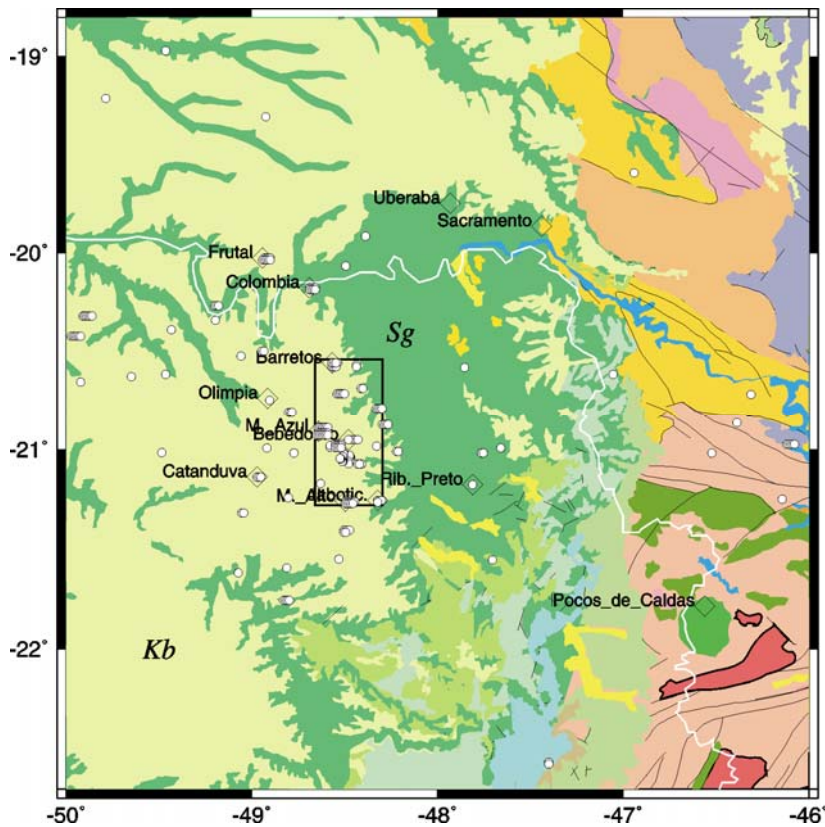


Figura 5.1. Mapa dos poços profundos (i.e., que penetraram na camada de basalto) perfurados entre 2000 e 2005. Dados principalmente do DAEE (Araraquara) e da Hidromap (Monte Azul). Círculos brancos são poços profundos, losango são cidades. Nem todos os poços têm as coordenadas conhecidas, razão pela qual muitos deles foram colocados nas sedes dos municípios. Kb = arenito do Grupo Bauru (Cretáceo), Sg = basalto Serra Geral. O retângulo que inclui Barretos, Monte Azul, e Jaboticabal, com maior densidade de poços profundos, tem uma área de 3.000 km².

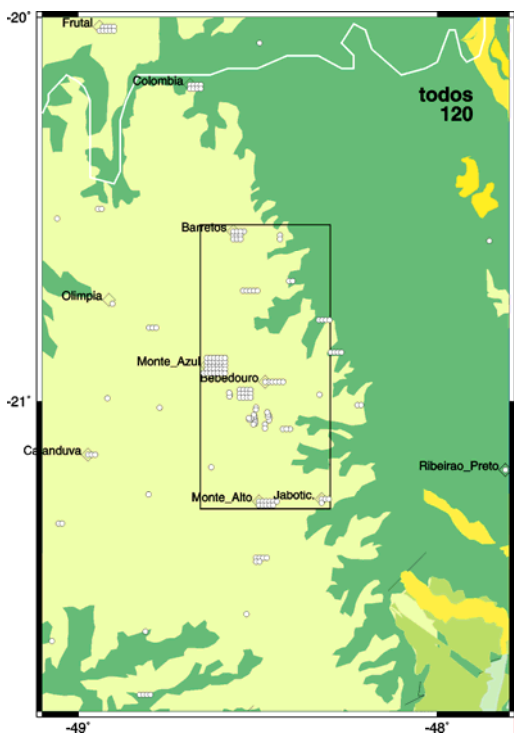


Figura 5.2. O retângulo mostra a área de maior densidade de poços profundos perfurados de 2000 a 2005, com 120 poços entre Barretos, Monte Azul, Bebedouro, Monte Alto e Jaboticabal.

O número de poços por ano, segundo nosso levantamento, foi:

Ano	Poços
2000	02
2001	12
2002	22
2003	38
2004	32
2005	~10

Proximidade de um poço profundo recente

Como desejamos estimar a probabilidade de que o surto de tremores de Andes tenha ocorrido, por acaso, próximo aos poços de maior vazão da Faz. Aparecida, perfurados pouco tempo antes, precisamos usar as características desta sismicidade para definir o que seja “próximo” e o que seja um poço “recente”.

A maior parte dos tremores de Andes têm seus epicentros a menos de 1 km dos dois poços de maior vazão da Fazenda Aparecida (P07 e P10). Os maiores tremores até agora (Figs 1.1 e 1.3) também ocorreram por volta de 1 km daqueles poços. Quando os primeiros tremores começaram a ser sentidos, em janeiro de 2004, eram percebidos apenas nos sítios da família Cagnin e da família Lombardo. Assim, definimos a proximidade como uma distância de até 1 km. Não há uma regra geral para a distância máxima que um sismo induzido possa ter da fonte indutora pois isto depende das características hidráulicas das rochas, muito variáveis, e também do estado de tensões no maciço rochoso. No caso de sismos induzidos por reservatórios hidrelétricos, a maior parte dos casos estudados ocorrem dentro do lago ou até ~5km da sua margem, embora alguns casos raros de epicentros até 20 km também tenham ocorrido (Gupta & Rastogi, 1992; Assumpção et al., 2002). Os tremores de Nuporanga (Yamabe & Hamza, 1996) ocorreram a menos de 1 km dos poços.

O tempo entre a abertura do poço e o início de tremores também pode variar. No caso de Andes, os primeiros tremores confirmados (janeiro/2004) começaram 8 a 9 meses após a abertura dos poços (embora haja rumores, não confirmados, de que os próprios operários que perfuravam os poços já tivessem sentido alguns tremores). No caso de sismos induzidos por reservatórios hidrelétricos, uma boa parte dos casos começa logo nos primeiros meses após o enchimento do lago, e outros casos podem demorar alguns anos; as maiores magnitudes tendem a ocorrer após alguns anos do enchimento (Assumpção et al., 2002). Para a estimativa deste capítulo, definiremos como “poço recente” aquele perfurado há menos de um ano.

Probabilidade de um epicentro qualquer cair perto de um poço recente

Supondo que um tremor de terra natural tenha ocorrido dentro do retângulo de 3.000km², podemos estimar a probabilidade de que o epicentro esteja a menos de 1 km de algum poço profundo recente pela razão entre as pequenas áreas circulares em volta de todos os poços perfurados anualmente ($100 \cdot \pi \cdot 1 \text{ km}^2$) e a área total do retângulo (3.000 km²), o que dá uma probabilidade de 10% aproximadamente.

Probabilidade de que um poço perfurado venha a ter, por acaso, um sismo próximo durante o ano seguinte

Com base na sismicidade anterior da região da divisa SP/MG, conforme visto na seção 3.1, é possível estabelecer a estatística de tremores esperados a cada ano, conforme a magnitude. A região da divisa SP/MG, mais ativa e com uma área de 30.000 km² (Fig. 3.1) tem a seguinte estatística:

- tremores de magnitude maior ou igual a 5 ocorrem uma vez a cada 100 anos ou mais.
- magnitudes acima de 4,0 ocorrem uma vez a cada 20 anos, em média.
- magnitudes acima de 3,0 ocorrem uma vez a cada 2 anos, em média.
- magnitudes acima de 2,5 (como os maiores de Andes) em média 1,6 vezes por ano.

Portanto, a probabilidade de que um tremor de magnitude 2,5 (ou maior) ocorra a menos de 1km de um poço qualquer, durante um ano, é de

$$1,6 \cdot (\pi \cdot 1 \text{ km}^2) / 30.000 \text{ km}^2 = 1,67 \cdot 10^{-4}$$

Nosso levantamento de dados junto ao cadastro do DAEE e Hidromap mostraram perto de 150 poços profundos perfurados de 1999 a 2005. Supondo que nos últimos 20 ou 30 anos tenham sido perfurados na região NE do Estado de São Paulo da ordem de 1000 poços profundos, a probabilidade de que um sismo natural ocorra por acaso perto de qualquer um deles seria da ordem de 17%, ou seja 1/6. Esta probabilidade equivale, por exemplo, a tirar o número 6 num lance de dados.

Conclusões

Todas estas estimativas de probabilidade são bastante aproximadas devido à falta de informações sobre perfuração de poços profundos, uma vez que poucos são registrados no DAEE. Os valores obtidos acima (10% ou 17%) indicam que, do ponto de vista estatístico, é possível que um tremor natural ocorra por acaso perto de algum poço profundo, mas é pouco provável. Ou seja, a proximidade de um surto sísmico perto de um poço recém perfurado não é, por si só, prova de que haja alguma relação de causa e efeito, mas sugere que estudos locais devam ser realizados para esclarecer melhor o fenômeno.

6. Conclusões e Recomendações

Nos casos de sismos induzidos por alguma atividade humana (por exemplo, hidrelétricas, poços profundos, ou mineração) não existe um método “direto” de comprovação da causa e efeito. Ou seja, não existe uma diferença intrínseca entre um tremor natural e um induzido; ambos são da mesma natureza. Qualquer tremor de terra é resultado de um deslizamento repentino (com duração de apenas alguns décimos de segundo para magnitudes de até 3) em alguma fratura geológica. Este deslizamento é causado por tensões (pressões) geológicas existentes na crosta terrestre. Por isto, a atribuição de uma causa indutora é sempre feita pela análise de várias evidências indiretas.

Os dados e as análises apresentadas nos itens anteriores deste relatório mostram que a atividade sísmica de Andes, desde seu início em 2004 foi efetivamente induzida pela abertura de poços tubulares profundos. As evidências são as seguintes:

- a) No estado de São Paulo, tremores de terra são raros, e por isso é pouco provável que ocorram, por mero acaso, sismos muito próximos de um poço recém perfurado.
- b) Os tremores de terra de Andes ocorrem na forma de surtos com centenas de eventos durante semanas ou meses. Embora sismos naturais também possam ocorrer nesta forma, sismos induzidos sempre ocorrem com este padrão.
- c) A abertura de poços tubulares profundos, na região de Andes, conecta o aquífero livre superior com o aquífero fraturado confinado na camada de basalto. Esta conexão faz aumentar ligeiramente a pressão da água no aquífero fraturado.
- d) Todos os surtos de atividade ocorreram no primeiro semestre quando os poços não estavam sendo bombeados, e portanto estavam permitindo que água do aquífero livre alimentasse o aquífero profundo aumentando a pressão de poro nas camadas de basalto. Maior quantidade de água nas fraturas profundas facilita o escorregamento dos blocos que já se encontravam sob pressão. Durante a estiagem, quando os poços são bombeados continuamente, a atividade sísmica se reduz substancialmente. Isto se deve ao fato de que, quando se retira água dos poços por períodos prolongados, a água que permeia as fraturas diminui, o que causa um aumento do atrito entre os blocos, “travando”o deslizamento e diminuindo a sismicidade.
- e) Cada surto de atividade sísmica (especialmente em 2005 e 2006 analisados com dados da rede sismográfica) se inicia com epicentros próximos dos três poços de maior vazão da Fazenda Aparecida e tendem a migrar para distâncias maiores. Esta evolução espaço-temporal dos epicentros é bem característica de sismicidade induzida por difusão de pressão de água em meios porosos ou fraturados.

Por outro lado, sismos induzidos necessitam de condições prévias especiais. Apenas a penetração de água em fraturas ou falhas geológicas não é normalmente suficiente para provocar deslizamento entre blocos de rocha. Para que ocorram tremores de terra, a região onde se encontram as fraturas potencialmente sísmicas já deve estar previamente num estado crítico com altas tensões (pressões) geológicas. A penetração da água em falhas e fraturas mais profundas serve como facilitador (disparador) dos tremores. Este é o motivo pelo qual tremores induzidos (seja por reservatórios ou por poços tubulares) são muito raros.

Infelizmente, não é possível prever quando a atividade sísmica cessará por completo. As tensões geológicas previamente existentes estão sendo dissipadas pela ocorrência dos tremores. Assim, há uma tendência dos tremores diminuírem em frequência e intensidade a cada novo surto, mas não se pode dizer exatamente quando a atividade irá terminar. Como foi constatado que os tremores de Andes foram disparados pela abertura de poços tubulares profundos, e que esta atividade sísmica ainda não cessou (um novo surto perto da Fazenda Aparecida iniciou-se em março de 2007), recomendamos:

- a) Continuação da monitoração sísmica com a rede sismográfica do IAG.
- b) Continuação dos estudos geofísicos em Andes para melhor entender a estrutura das camadas geológicas e as características da movimentação de água nos aquíferos, principalmente na camada de basalto.
- c) Idealmente, estudos da relação entre poços e tremores deveriam dispor de informações detalhadas sobre o histórico de bombeamento dos poços, o que não foi inteiramente possível até o momento. Os estudos sismológicos poderiam ser aprimorados caso fosse possível acompanhar a atividade dos poços mais diretamente.

IAG-USP, São Paulo, 16 de março de 2007.

Referências

- Assumpção, M., Dias Neto, C.M., Ortega, R. & França, H., 1979. O terremoto de São Paulo de 1922. *Atas 2º Simp.Reg.Geol.*, Rio Claro, SP, 1, 321-329.
- Assumpção, M.; Marza, V.; Barros, L.; Chimpliganond, C.; Soares, J.E.; Carvalho, J., Caixeta, D., Amorim, A. & Cabral, E., 2002. Reservoir induced seismicity in Brazil. *Pure Appl. Geophys.*, 159, 597-617.
- Assumpção, M., M. Schimmel, C. Escalante, M. Rocha, J.R. Barbosa & Lucas V. Barros, 2004. Intraplate seismicity in SE Brazil: Stress concentration in lithospheric thin spots. *Geophysical J. Int.*, 159, 390-399.
- Berrocal, J., M. Assumpção, R. Antezana, C.M. Dias Neto, R. Ortega, H. França & J. Veloso, 1984. Sismicidade do Brasil. *IAG-USP/CNEN*, São Paulo, 320 pp.
- Gupta, H.K., B.K. Rastogi & H. Narain, 1972a. Common features of the reservoir-associated seismic activities. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 62, 481-492.
- Gupta, H.K., B.K. Rastogi & H. Narain, 1972b. Some discriminatory characteristics of earthquakes near Kariba, Kremasta, and Koyna artificial lakes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 62, 493-507.
- Gupta 1992, 1992. Reservoir-Induced Earthquakes. *Developments in Geotechnical Engineering*, 64, Elsevier, 364pp.
- Ferreira, J.M., R.T. Oliveira, M. Assumpção, J.A.M. Moreira, R.G. Pearce & M. Takeya, 1995. Correlation of seismicity and water level in the Açú reservoir - an example from NE Brazil. *Bull.Seism.Soc.Am.*, 85(5), 1483-1489.
- Fletcher, J.B. & L.R. Sykes, 1977. Earthquakes related to hydraulic and natural seismic activity in western New York state. *J.Geophys.Res.*, 82, 3767-3780.
- Rayleigh, C.B., J.H. Healy & J.D. Bredehoeft.,1976. An experiment in earthquake control at Rangely, Colorado. *Science*, 191, 1230-1236.
- Talwani, P. & S. Acree, 1984/85. Pore pressure diffusion and the mechanism of reservoir-induced seismicity. *Pure and Appl. Geophys.*, 122, 947-965.
- Yamabe, T.H. & Hamza, V. M., 1996. Geothermal investigation in an area of induced seismic activity, Northern São Paulo State, Brazil. *Tectonophysics*, 253, 209-225.

Equipe

Os trabalhos de monitoramento sísmico e os estudos da relação entre a sismicidade e a abertura dos poços profundos vêm sendo realizados pela seguinte equipe do Departamento de Geofísica do IAG-USP.

Pessoal Técnico

Luiz Galhardo: instalação das primeiras estações e da telemetria em março de 2005, manutenção e reparo de equipamentos.

Célia Fernandes e Dênis Schramm: instalação das primeiras estações em março de 2005.

José Roberto Barbosa: instalação e manutenção das demais estações, acompanhamento geral de todos os trabalhos de campo, entrevistas com moradores de Andes sobre os efeitos dos tremores, análise de sismogramas, determinação de epicentros e magnitudes.

Professores

Marcelo Assumpção: coordenação geral dos trabalhos, determinação de epicentros e magnitudes, estudos da relação entre abertura de poços e sismicidade, interpretação dos dados.

Terza Higashi Yamabe: Estudo hidrogeológico, perfilagem geotérmica, levantamento de poços regionais, estudos da relação entre abertura de poços e sismicidade, interpretação dos dados.

Renato Prado: Levantamento geofísico com refração sísmica em 2006.

Alunos de pós-graduação.

Afonso E.V. Lopes: trabalho de campo, desenvolvimento de programas para análise de dados, determinação de epicentros e magnitudes.

Marcelo Bianchi: trabalho de campo, preparação do sistema linux para operação e coleta de dados nas estações.

Alunos de Graduação

Lucas Balancin: trabalho de campo, leitura de dados e determinação de epicentros.

Luiz Cláudio M. de Souza: análise de sismos distantes registrados na rede sismográfica de Andes, análise do perfil de refração sísmica.

Agradecimentos

Os trabalhos de campo não poderiam ter sido realizados sem a ajuda inestimável da família Cagnin e da família Lombardo, desde a escolha de locais para instalação das estações, acompanhamento dos trabalhos sismológicos, visitas aos vários sítios e fazendas da região de Andes, e apoio geral aos trabalhos de campo.

Toda a população de Andes sempre colaborou para facilitar nosso trabalho e fornecer informações que ajudam nossas pesquisas. Em especial, agradecemos aos proprietários das fazendas onde instamos nossos equipamentos pela permissão de uso e apoio à operação das estações.

A prefeitura de Bebedouro, através do eng. Suhail (SAAEB), deu todo o apoio necessário aos trabalhos de campo durante o primeiro ano das pesquisas, tanto custeando as despesas de campo como fornecendo informações sobre poços de Bebedouro.

O eng. agrônomo Claudinei nos levou em visita à Fazenda Aparecida, em abril de 2005, explicando todo o sistema de irrigação dos laranjais e fornecendo dados dos poços perfurados em 2003. Em visita ao escritório de Ribeirão Preto, em maio de 2005, o eng. Dinei e o Sr. Paulo Rodas (proprietário da Fazenda Aparecida) nos explicaram a operação de bombeamento dos poços fornecendo mais alguns dados sobre os poços, assim como mapas topográficos e levantamentos geológico-geofísicos feitos na fazenda alguns anos antes.

O geólogo José Luiz Galvão de Mendonça e colegas do DAEE de Araraquara, pelo acesso aos dados cadastrais de poços tubulares de Bebedouro e municípios vizinhos, assim como ao Dr. Elcio Silveira, Diretor do Serviço de Águas Subterrâneas, DAEE/SP pelo apoio geral aos nossos trabalhos e discussões sobre hidro-geologia.

Os geólogos Adalberto e Wilson Iyomasa (IPT-São Paulo) discutiram nossos dados iniciais e as características de aquíferos fraturados em camadas interderrames de basalto da Bacia do Paraná. Os geólogos Carlos Alberto Birelli e o técnico Martini (IPT-SP) realizaram as perfilagens gama e acústica (BHTV) no poço da Faz. Santa Ana e ajudaram na sua interpretação.

O geólogo Luis Spiller (Geominas) nos colocou a par das características hidro-geológicas de poços da região de Bebedouro e municípios vizinhos, e discutiu o andamento e as estratégias das nossas pesquisas.

O Prof. Chang Hung Kiang (UNESP, Rio Claro), o Prof. Ricardo Hirata (Inst. de Geociências, USP), e a Dra. Amélia Fernandes (Instituto Geológico, SMA-SP) nos ajudaram a entender melhor várias questões hidrogeológicas de aquíferos fraturados, propriedades das águas subterrâneas, e operação de poços tubulares.

O Prof. João Carlos Dourado (UNESP, Rio Claro) colaborou com os registros e dados de magnitude dos maiores sismos registrados pela estação sismográfica de Rio Claro. O Prof. Joaquim Ferreira da UFRN emprestou um registrador sismográfico RefTek que esteve em operação na estação BEB1 durante todo o período. A Profa. Edna Facincani (UFMS, Aquidauana) emprestou um sismógrafo que operou na estação BEB5 nos primeiros meses dos trabalhos. O Prof. Jesús Berrocal (IAG-USP) emprestou equipamentos para a rede sismográfica de Andes e discutiu o andamento dos trabalhos e a interpretação dos resultados.

O Srs. Valdir Turco (Faz. Santa Ana), Cláudio e Guilherme Fonseca (Faz. Serra), Patrícia Matarazzo (Faz. Santa Cruz), Francisco Junqueira (Faz. Retiro) tiveram colaboração importante em nossos trabalhos permitindo a perfilagem geofísica de poços em suas fazendas. Em especial, o Sr. Valdir Turco retirou a bomba instalada em seu poço para que pudéssemos fazer as perfilagens geofísicas.

O Prof. Valyia Hamza (Observatório Nacional, Rio de Janeiro) colaborou nas medidas e interpretação das perfilagens geotérmicas dos seis poços de Andes e Monte Azul realizadas em setembro de 2005.

A Hidromap, Monte Azul, nos forneceu informações importantes sobre poços profundos perfurados nos últimos anos, constituindo dados fundamentais para os estudos de estatística e probabilidade descritos no Capítulo 5. A Padre Cícero, Monte Azul, também nos recebeu em visita de em 2005 quando foram fornecidas informações sobre alguns poços da Faz. Aparecida e da Faz. Retiro.

Marcelo Machado, de Andes, colaborou com os dados de pluviosidade da Casa da Agricultura de Bebedouro. Antônio Carlos Rocha, da Tribuna Regional, forneceu fotos sobre os efeitos dos tremores.

ANEXO 1. Efeitos dos maiores tremores de Andes em 2005.

O tremor da madrugada de 11/03/2005

Um tremor relativamente forte ocorreu às 02h 38min (hora local) da madrugada do dia 11/03. Os maiores efeitos deste tremor, além de chacoalhar bastante as casas (fazendo barulho em portas, janelas e telhados, e acordando as pessoas) foi a queda de alguns objetos de prateleiras no sítio da família Lombardo, e o desligamento de um transformador na Faz. Sta. Zulmira. O Sr. Ângelo Padovan estava andando num trator, ~1 km a SE do epicentro, e sentiu o chão vibrar.

Não estando acostumadas a tremores de terra, as pessoas afetadas, obviamente, ficaram muito apreensivas e nervosas, principalmente pela grande sequência de pequenos abalos durante toda a madrugada. Muitas ligações telefônicas foram feitas ao hotel de Bebedouro onde se encontrava o técnico do IAG, Sr. José Roberto Barbosa, que trabalhava em Andes na época instalando mais estações. Muitos choravam querendo chamar a polícia. Uma delegação de moradores foi até Bebedouro, ainda de madrugada, comunicar a ocorrência e pedir ajuda ao técnico do IAG.

As Figs. A1.1 e A1.2 abaixo mostram os registros deste sismo em algumas estações da rede sismográfica. Nota-se que os registros duraram pouco mais de 10 s nas estações. As pessoas devem ter sentido as vibrações do tremor por alguns poucos segundos apenas. A magnitude deste evento foi calculada em 2,6 na escala Richter.

Nestes dias, quando o número de tremores era muito frequente, na Estância Eldorado, e em alguns outros sítios, os moradores dormiam fora de casa, alguns dentro do carro, com medo de tremores mais fortes.

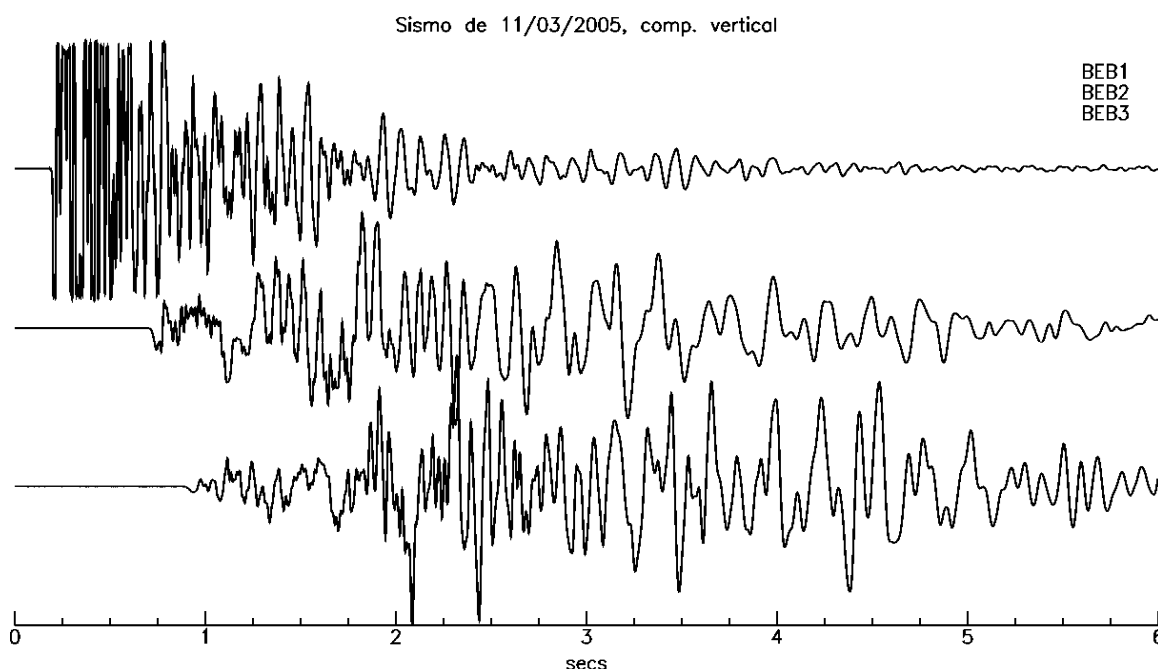


Fig. A1.1. Registro do abalo de 11/03 às 02:38 (Hora local) nas estações BEB1, BEB2 e BEB3. A escala de tempo refere-se à hora de origem do evento. Note que as vibrações foram maiores na estação BEB1, mais próxima (Sítio Sto. Antônio, Sr. José Cagnin) saturando a escala do registrador. A diferença de tempo entre as chegadas em cada estação serve para se determinar a localização do epicentro.

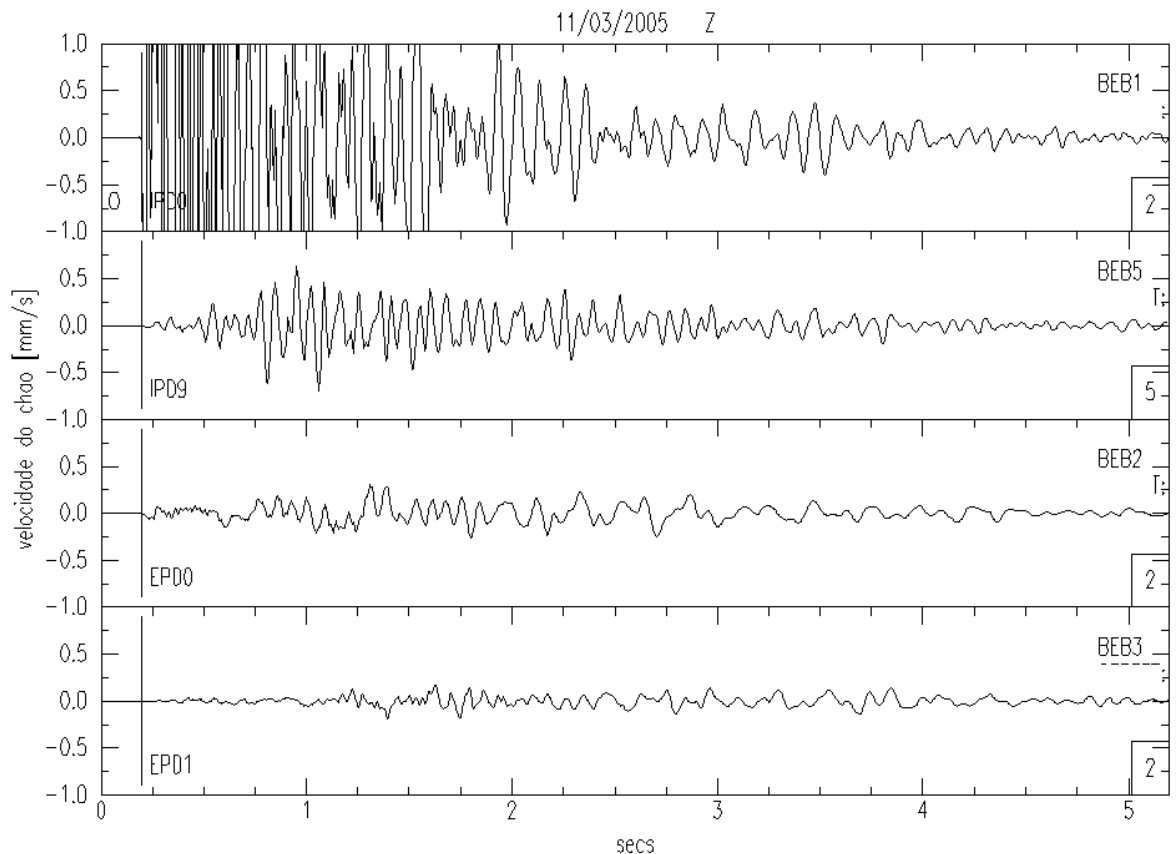


Fig. A1.2. Sismogramas do evento de 11/03/2005, ordenados por distância epicentral. Os sismogramas estão alinhados pela primeira chegada (onda P). As amplitudes referem-se à velocidade domovimento do chão, em mm/s, também chamada de “velocidade de partícula”.

O abalo do dia 30/03/2005

O maior tremor até o momento ocorreu no dia 30/03, uma quarta feira, às 08h 41min (hora local), com magnitude 2,9 na escala Richter. Na casa dos Cagnin, chegou a balançar quadros na parede da sala. Na Estância Eldorado, os moradores atribuem a este sismo uma pequena trinca observada em uma parede. Este tremor foi bem sentido na Escola de Andes, a 3,5 km de distância, assustando os alunos e interrompendo as aulas. O tremor chegou a ser sentido ligeiramente na cidade de Bebedouro (bairros de Franciscano, Pedro Maia, Souza Lima, São Fernando e São Paulo), e talvez até na cidade de Monte Azul.

A Fig. A1.3 mostra os registros deste evento nas estações da rede local. As estações mais próximas saturaram, mas uma estimativa de extrapolar as vibrações, com base em eventos um pouco menores, indicam que as vibrações do solo podem ter atingido níveis da ordem de 100 mm/s (velocidade de partícula).

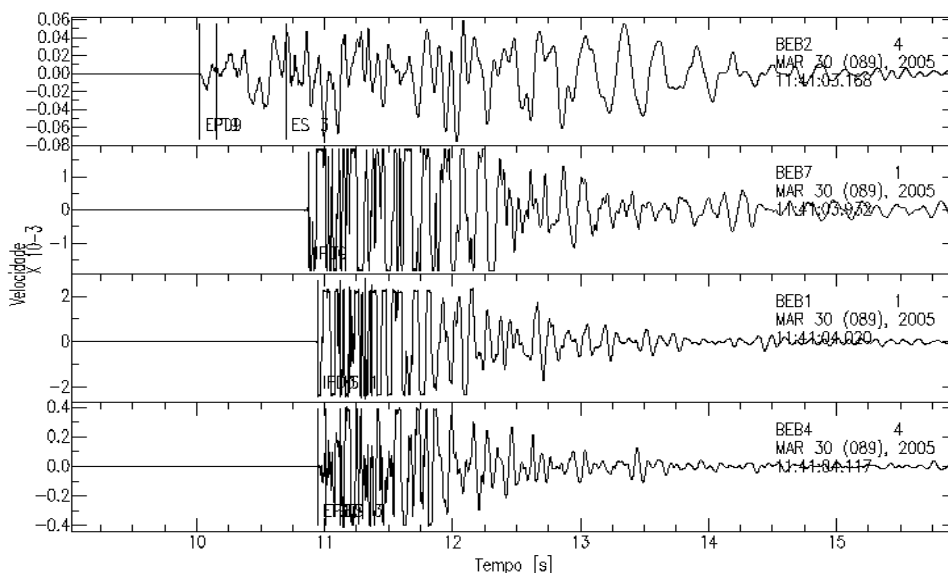


Fig. A1.3. Registros do maior evento ocorrido em 30/03/2005 com magnitude 2,9. Os sismogramas não estão na mesma escala de tempo (a estação BEB2 está mais longe do epicentro). Note que os registros saturaram nas estações mais próximas, principalmente BEB1 e BEB7.

A Fig. A1.4 abaixo compara os registros dos tremores do dia 11 e 30/03 na estação de Rio Claro, operada pela UNESP, 180 km a SE de Bebedouro

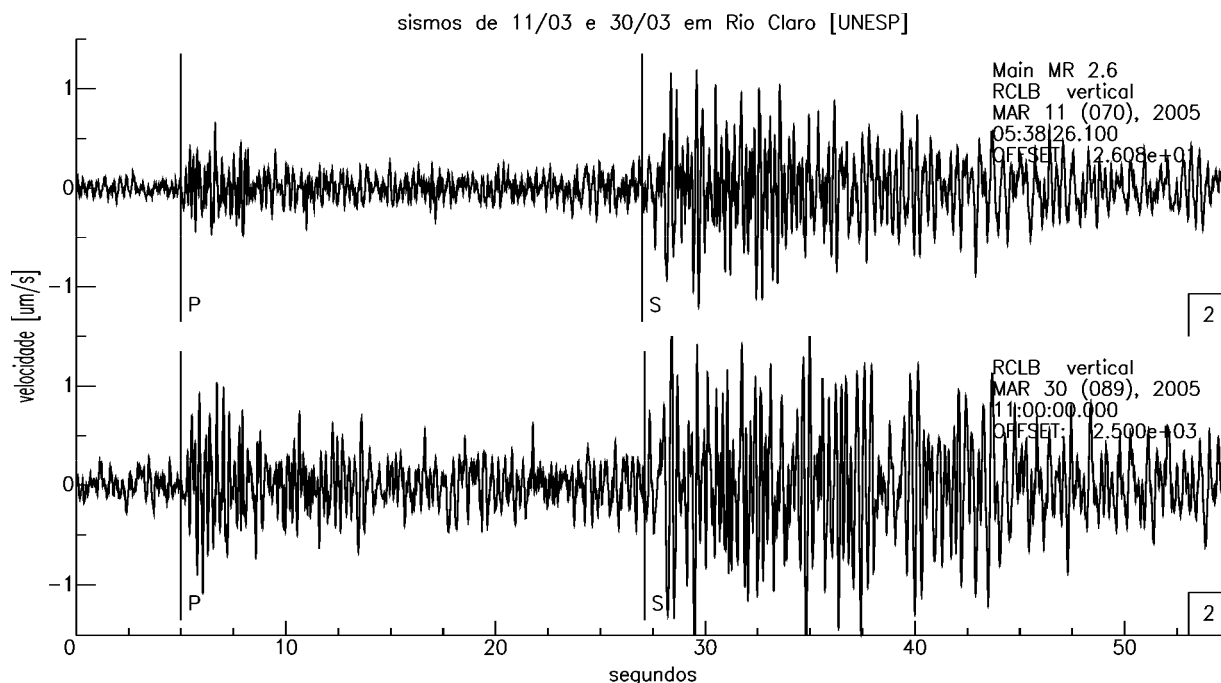


Fig. A1.4. Sismogramas dos sismos de 11 e 30/03 registrados na estação de Rio Claro (UNESP). A marca “P” indica o primeiro grupo de ondas sísmicas (longitudinais), e “S” as ondas transversais.

O abalo do dia 02/04/2005

Outro abalo grande ocorreu no dia 02/04, um sábado, às 12h25min com magnitude 2,8 e epicentro mais próximo da estação BEB1 no Sítio Sto. Antônio. Neste sítio, o abalo derrubou ao chão a Sra. Didier Cagnin que estava sentada num pequeno banquinho. O Sr. José Cagnin, que estava na cozinha no momento do abalo, também escorregou e caiu ao chão. Objetos caíram de prateleiras. Os quadros pendurados na parede da sala voltaram a balançar, ficando desalinhados, e assim foram deixados a partir deste dia (Fig. A1.5). Na casa da família Lombardo (estação BEB7) as portas de um armário da cozinha se abriram. Em Andes, a 3,5 km do epicentro, garrafas tremeram em um bar.



Fig. A1.5. Quadros deslocados na parede da sala na sede do Sítio Santo Antônio, perto da estação BEB1, pelo tremor de 02/04/2005. (Foto de Antônio Carlos Rocha, Tribuna Regional).

ANEXO 2. Determinação de epicentros

Os epicentros e as profundidades foram determinados a partir dos tempos de chegada das ondas sísmicas P (longitudinal) e S (transversal), observados nos sismogramas, e um modelo da velocidade de propagação destas ondas nas camadas geológicas da área. O Anexo 1 mostra alguns exemplos de sismogramas. As ondas S foram lidas preferencialmente nas componentes horizontais.

Para o modelo de velocidade, foi usada uma camada de arenito de espessura entre 50 e 80m, abaixo das estações, conforme o mapa da Fig. 4.4. A velocidade da onda P na camada de arenito foi de 2200 m/s, obtida com um perfil de refração sísmica realizado na área epicentral (ver Capítulo 4). Abaixo do arenito, foi usada uma velocidade da onda P de 5500 m/s para a camada de basalto. A relação entre as velocidades P e S foi de $V_p/V_s=1,78$ (constante para as duas camadas), determinada com o diagrama de Wadati. A velocidade da camada de basalto (parâmetro que mais influi nas localizações epicentrais) foi determinada por tentativa e erro: vários valores foram testados para ver qual resultava em epicentros com melhores ajustes nos tempos observados. O valor de 5500 m/s é compatível com o resultado deste teste e o perfil de refrações sísmica. Foi usado um modelo de velocidade de referência com espessura de 60m para o arenito, e correções de tempo para cada estação para levar em conta as diferentes espessuras desta camada. A tabela A2 mostra as coordenadas das estações, as espessuras da camada de arenito e os atrasos da onda P esperados em cada estação.

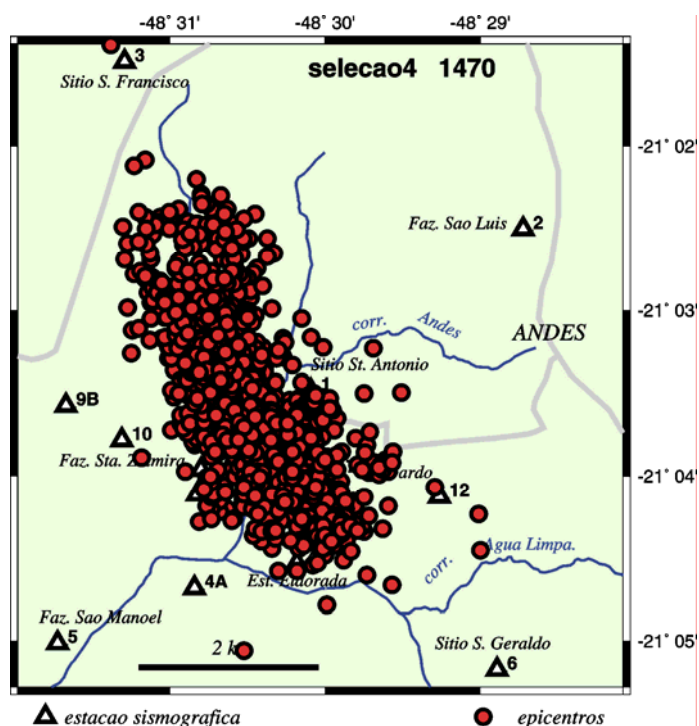
Tabela A2. Coordenadas das estações, altitudes (m), espessuras da camada de arenito (m) e atraso esperado da onda P (ms) em relação a uma espessura de 60m.

<u>Estação</u>	<u>latitude</u>	<u>longitude</u>	<u>UTM N</u>	<u>UTM E</u>	<u>alt.</u>	<u>espessura(m)</u>	<u>atraso (ms)</u>
BEB1	-21.05796	-48.50149	7669403	759628	563	52	-4
BEB2	-21.04165	-48.47871	7671172	762025	656	141	38
BEB3	-21.02490	-48.52150	7673097	757605	638	147	41
BEB4	-21.07545	-48.50306	7667468	759435	552	56	-2
BEB4A	-21.07800	-48.51399	7667204	758294	553	36	-11
BEB5	-21.08353	-48.52875	7666616	756750	540	42	-8
BEB6	-21.08624	-48.48145	7666238	761661	582	74	7
BEB7	-21.06628	-48.49887	7668477	759886	579	70	5
BEB8	-21.05783	-48.50698	7669426	759058	548	57	-1
BEB9	-21.06845	-48.51372	7668261	758339	567	58	-1
BEB9A	-21.06597	-48.51326	7668535	758391	554	57	-1
BEB9B	-21.05957	-48.52779	7669268	756891	604	107	22
BEB10	-21.06296	-48.52183	7668882	757505	584	94	16
BEB11	-21.06863	-48.50100	7668220	759661	564	57	-1
BEB12	-21.06861	-48.48762	7668201	761052	578	61	0

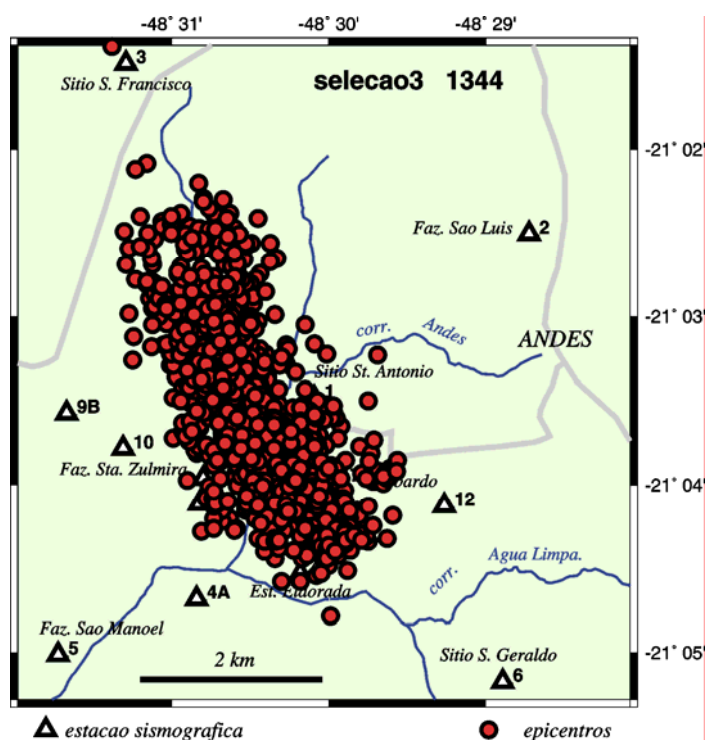
Foi usado o programa clássico de determinação hipocentral HYPO71 (Lee & Lahr, 1973). Cada hipocentro é determinado iterativamente a partir de uma localização inicial, tomada como o centro da área ativa de março e abril de 2005. A profundidade inicial foi de 0,5 km. Para os eventos com apenas 3 ou 4 leituras (P ou S), i.e., registrados por apenas duas ou três estações, a profundidade foi fixada em 0,5 km.

Tremores bem registrados em 3 ou mais estações podem ter o epicentro determinado 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 300 a 500m. A grande maioria das profundidades situa-se entre 100 e 800m, coincidindo aproximadamente com a espessura da camada de basalto.

Mais de 1600 eventos foram localizados até novembro de 2006. Os mapas abaixo mostram os epicentros registrados com dois tipos de seleção de qualidade.



1470 epicentros selecionados com: $NO=4$ & $RMS \leq 0.02s$,
ou $NO \geq 5$ & $RMS \leq 0.04s$, ou $NO \geq 7$ & $RMS \leq 0.08s$.



1344 epicentros selecionados com: $NO=4$ & $RMS \leq 0.01s$,
ou $NO \geq 5$ & $RMS \leq 0.03s$.

Fig. A2.1. Mapas de epicentros com dois tipos de seleção de qualidade: NO = número de leituras (P ou S), RMS = resíduo médio entre os valores observados e os calculados para os tempos de chegada. Os dados do mapa de baixo, com a “seleção 3” de qualidade, mais rigorosa, foram usados no capítulo 2 para estudar as migrações da atividade sísmica.