

Os Estudos de paleosismicidade como ferramenta de gestão de riscos: evidências, literatura e futuro

Surveys on paleoseismicity as risk management tools: evidence, literature and future

Los estudios de paleosismicidad como herramienta de gestión de riesgo: pruebas, literatura y futuro

Antonio Augusto Seabra Junior¹, Wilfred Brandt²

RESUMO

Este artigo trata da temática da associação de eventos tectônicos recentes no tempo geológico com a paleosismicidade, relacionados ao Cráton do São Francisco, na sua porção meridional, onde está inserida a Bacia do Rio Doce. A sismologia é uma ciência com divulgação principalmente acadêmica quando se trata da escala continental, contudo em escala local está inserida no contexto dos projetos de Engenharia, ciência esta nem sempre considerada frente à crença equivocada, de que o Brasil não é um território com riscos sísmicos. Estudos recentemente publicados indicam, para determinadas regiões brasileiras, um risco sísmico considerável. Dentre regiões de maior risco sísmico, podem-se destacar algumas partes do território mineiro, com especial atenção para o Quadrilátero Ferrífero onde começa o Alto do Rio Doce. Existe a evidente necessidade de se reforçar a rede sismológica nacional, tanto em termos de distribuição espacial, quando de precisão e tratamento de dados. É necessário que as Escolas se capacitem e criem centros de sismologia de forma a gerar uma massa crítica que consiga responder adequadamente aos riscos que se apresentam. Enquanto não se dispõe de uma estrutura e de dados adequados, a paleosismicidade desponta como um importante instrumento para o conhecimento do potencial de risco sísmico de uma dada localidade, de forma a que se possam adotar as medidas necessárias para redução da vulnerabilidade da sociedade e meio ambiente aos mesmos.

¹ Engenheiro Geólogo (UFOP), Gestor de Riscos Naturais (*GeoHazards*) da Brandt Meio Ambiente email- aseabra@brandt.com.br

² Engenheiro de Minas (UFMG), Diretor Executivo da Brandt Meio Ambiente email-wbrandt@brandt.com.br

PALAVRAS-CHAVE: Paleosismicidade, neotectônica, reativação, falhas.

ABSTRACT

This article deals with the theme of recent tectonic events considering geological time in association with Paleoseismicity related to the São Francisco Craton, in its southern portion where the Doce River Basin extends. Seismology is a Science with mostly academic disclosure when it comes to the continental scale, on a local scale otherwise it must be inserted in the context of Engineering Projects. This Science more than often is mistaken due to the belief that Brazil is not an area with imperious seismic risks. Nevertheless recently published studies indicate, for certain Brazilian regions, a quite significant seismic risk. Among regions of higher seismic risk there can be highlighted some parts of the Brazilian Minas Gerais territory with particular attention to the Iron Quadrangle, where the top of the Doce River starts. There is a clear need to strengthen the National Seismological Network, in terms of spatial distribution as well as on precision and processing of data. It's necessary for schools to enable and create Seismology Centers in order to generate a critical mass that can respond appropriately to dwelling risks. While not having a structure and adequate data Paleoseismicity arises as an important tool for the knowledge of seismic risk potential for a given locality, so that they can take the necessary measures to reduce the vulnerability of society and the environment as well.

KEYWORDS: Paleoseismicity, neotectonics, reactivation, faults.

1 - INTRODUÇÃO

Este artigo trata da temática da associação de eventos tectônicos recentes no tempo geológico com a paleosismicidade, relacionados ao Cráton do São Francisco, na sua porção meridional, onde está inserida a Bacia do Rio Doce, figura 1. A sismologia é uma ciência com divulgação principalmente acadêmica quando se trata da escala continental, contudo em escala local está inserida no contexto dos projetos de Engenharia. Em grandes empreendimentos é utilizada na maioria dos casos no país, em outros não, frente à crença equivocada, de que o Brasil não é um território com riscos sísmicos, podendo não serem plenamente considerados em função disso. Estudos recentemente publicados (Assumpção *et.al.* 2014,2015) indicam, para determinadas regiões brasileiras, um risco sísmico considerável, baseado em um mapa de Ameaça Sísmica da Aceleração de Pico no Chão, com valores maiores do que aqueles previstos e considerados nas normas técnicas até então. Dentre regiões de maior risco sísmico, podem-se destacar algumas partes do território mineiro, com especial atenção para o Quadrilátero Ferrífero onde começa o alto do Rio Doce.

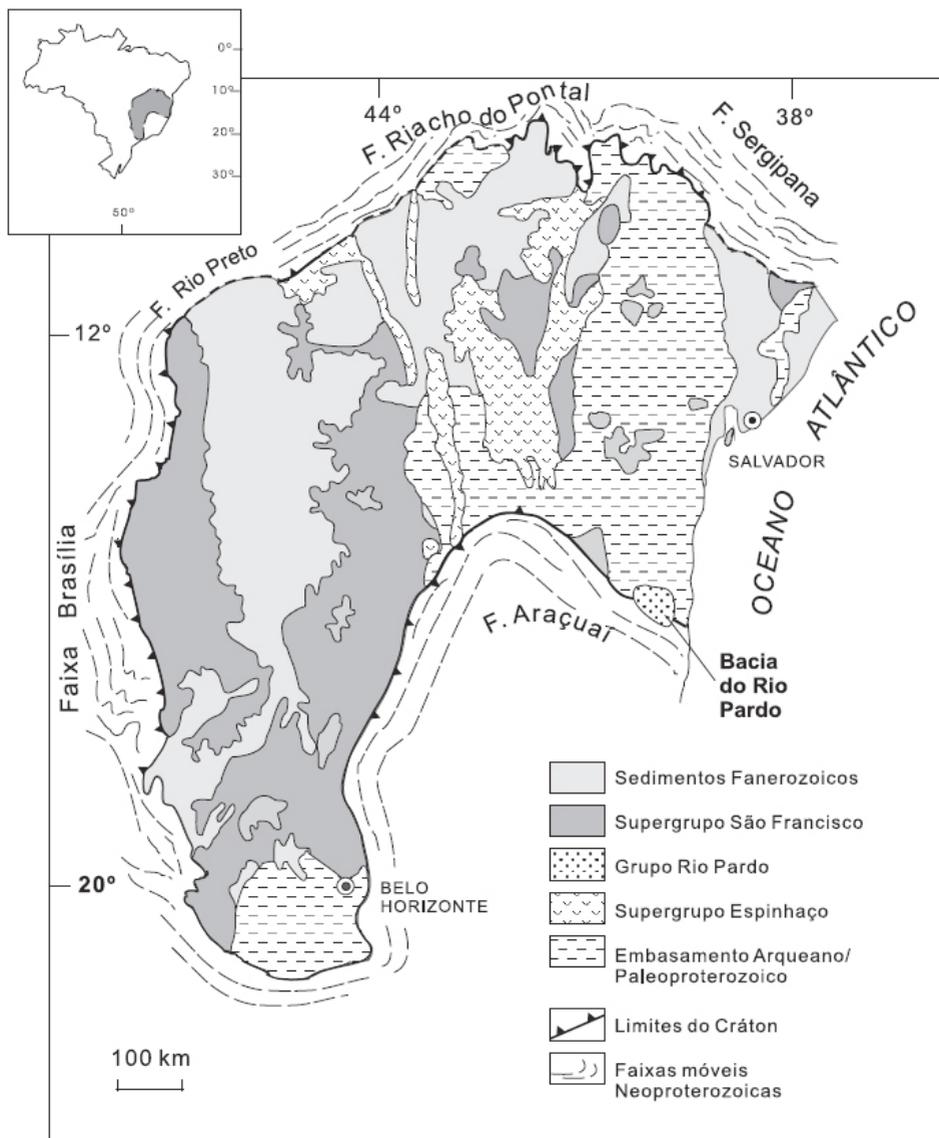


Figura 1 – Cráton do São Francisco, modificado de Alkmim et.al, 1998

Estes conhecimentos na área de sismologia recentes são relevantes para a engenharia de grandes obras, como a construção pesada, onde tem aplicação direta. A aplicação de testes e ensaios de campo para obtenção de variáveis importantes devem ser realizadas antecipadamente para mensuração do risco sísmico real ao qual estão vulneráveis as estruturas e conseqüentemente a população civil ali localizada ou em trânsito e o meio ambiente.

Neste aspecto, a paleosismicidade pode trazer importantes informações, as quais viriam auxiliar no caso do registro geológico da existência de paleotremores em áreas próximas aos empreendimentos citados. Em um país de dimensões continentais, com alto grau de intemperismo das rochas e somando aos recursos, de certa forma, escassos para evolução rápida de monitoramento e conhecimento; a paleosismicidade como etapa a ser feita em interação multidisciplinar; torna-se ferramenta, eficiente e adequada a este quadro. As interpretações paleoclimáticas, paleobotânicas, análises geomorfológicas na sucessão de imageamentos aéreos por fotos e imagens de satélite, geração de mapas litoestruturais e morfoestruturais em diversas escalas, dados de geocronologia e os métodos geofísicos aplicados caso a caso; mais todo o cabedal de especificidades técnicas das geociências, onde somamos a arqueologia; servem utilmente aos estudos de paleosismicidade e as conclusões sobre os eventos de tremores de terra ocorridos no passado.

2 - DESENVOLVIMENTO

2.1 - Os Estudos de Paleosismicidade e sua Importância na Gestão do Risco Sócio Ambiental de uma Região

A Paleosismicidade é uma derivação, e/ou ciência auxiliar na área de Tectônica/Neotectônica, que estuda os abalos sísmicos ocorridos em planos de falha existentes nos tempos pretéritos, quando ainda não haviam meios estruturados para registro dos mesmos. O espaço temporal da paleosismicidade pode ir desde eventos muito antigos, ocorridos a dezenas de milhões de anos, até eventos mais recentes, da ordem de milhares ou de apenas centenas de anos atrás.

A avaliação de planos de falha pré-existentes é uma vertente de sismologia, tectônica e geologia estrutural que deriva para a temática de paleosismicidade, onde a geologia estuda os terremotos ocorridos antes dos primeiros registros históricos, em geral abordando diretamente a falha que originou um determinado terremoto. Assim, é possível calcular as magnitudes de fenômenos que se produziram há milhares de anos e que voltarão a reproduzir no futuro novos abalos.

Os sismos ocorrem desde o início da formação da Terra, e continuarão ocorrendo ao longo de sua existência. Grande parte dos sismos tem origem nas movimentações relacionadas à tectônica de placas e seus desdobramentos ao longo da litosfera; manifestando-se na forma de abalos e tremores; erupções vulcânicas e intrusões magmáticas e rachaduras/fraturas/falhas na crosta terrestre.

Neste texto tratamos da área pertencente ao domínio sul do Cráton do São Francisco, uma área; em teoria, estável. Na concepção da teoria da 'Tectônica de Placas' (Wilson, 1966), os continentes são considerados internamente estáveis e as áreas onde ocorrem os principais movimentos estão concentradas nas bordas das placas tectônicas, sendo essas as zonas consideradas 'sísmicas', figura 2. Contudo as medições geodésicas e a ocorrência/frequência de eventos sísmicos em regiões intraplacas demonstram que existem movimentações tanto verticais quanto horizontais na crosta terrestre, sendo esta uma análise recente na história da geologia, fundamentada na instrumentação que começou a percorrer todo o globo terrestre na segunda metade do Século XX. Esta rede de monitoramento mostrou um cenário em algumas partes do mundo, diferente do preconizado pelas teorias iniciais. Colocando assim áreas dantes consideradas plenamente estáveis como sujeitas a receber vibrações oriundas de abalos sísmicos, por exemplo, o Quadrilátero Ferrífero.

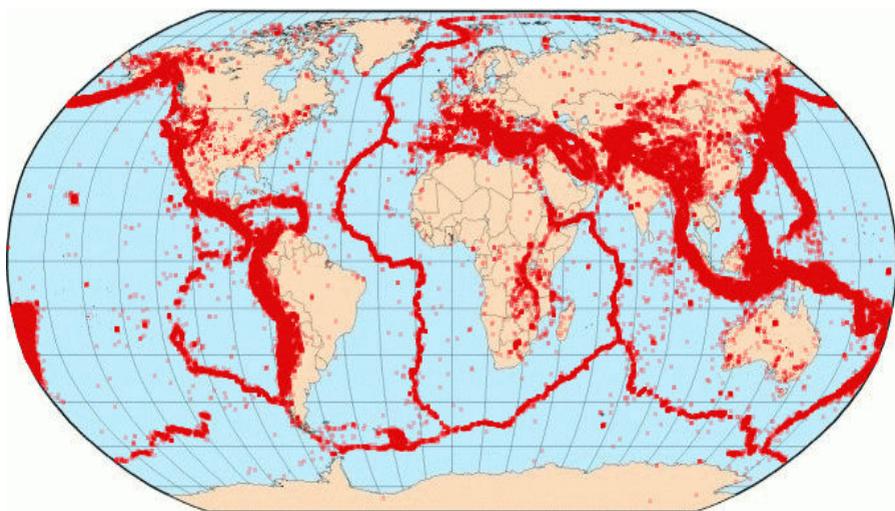


Figura 2 – Zonas Sísmicas no Globo Terrestre. Fonte: USGS

Existem muitas descrições na literatura da associação de grandes lineamentos estruturais, intrusões magmáticas volumosas e os sismos intraplacas. A explicação mecânica para este processo e seus eventos se aproxima evidentemente do conceito de zonas de fraqueza. A rigor, podemos tratar uma zona de fraqueza como uma estrutura pré-existente que foi reativada. Na região do Quadrilátero Ferrífero estes domínios com zonas de fraqueza vigentes podem estar associados a lineamentos/falhas em regiões com a presença de tectônica recente, por exemplo, intrusão de diques recentes, as bacias terciárias e suas descontinuidades e as áreas de circulação de águas quentes que obviamente guardam zonas de fragilidade notórias.

Eventos sísmicos muito antigos, da ordem de centenas de milhões de anos, podem ter menor importância em relação à previsibilidade de novos sismos, pois os sistemas de falhamento e demais anisotropias crustais decorrentes de tais eventos podem se encontrar consolidadas, com possibilidades remotas de uma reativação. Por isso, em regiões com histórico geológico antigo como é o caso de Minas Gerais, há uma tendência de que eventos significativos podem ser improváveis.

Entretanto eventos mais recentes, da ordem de poucas dezenas de milhões ou poucos milhares de anos podem estar ligados a estruturas ainda não estabilizadas, com potencial para reativação no tempo atual, vigente. Tais patamares de tempo, para terrenos como a da Bacia do Rio Doce, são geologicamente considerados recentes.

A inserção e aumento de monitoramento adequado têm mostrado que algumas estruturas desta região tem atividade constante e com alguns pulsos que poderiam gerar, sim, impactos em áreas; aqui já citadas, que poderiam colocar em risco o meio ambiente e a sociedade civil. O ajuste de uma rede sismográfica mais precisa, para determinados locais deve ser planejado. A baixa densidade de ocupação do terreno, no extenso território nacional faz com que eventos sísmicos somente sejam notados quando ocorrem próximos a zonas densamente ocupadas ou cobertas plenamente pela rede. Esforços notáveis têm sido executados pelas principais universidades e centros do país que detêm o controle desta rede. Na medida em que a rede de monitoramento brasileira é equipada, vem surgindo evidência de ocorrências diárias de sismos de magnitudes baixas e moderadas, com alguns eventos de maior relevância.

É exatamente frente a esta necessidade de ajuste de dados para este risco, onde a paleosismicidade pode ser um instrumento valioso, não apenas como um campo de atuação científica, mas como um elemento importante para a previsibilidade e preparo a eventos sísmicos de maior gravidade, reduzindo assim a vulnerabilidade da sociedade e meio ambiente ao risco sísmico.

2.2 – A Paleosismicidade como Ferramenta de Análise de Risco

Em áreas com baixa densidade de monitoramento podemos fazer uso das ferramentas de paleosismicidade para estabelecer uma relação com os riscos a que estão expostos as empresas e sociedade civil ali presentes.

Na região do Platô Moeda, Itabirito; Minas Gerais, a partir de um evento de dano físico a uma barragem de rejeitos ocasionada por sismos de baixa magnitude, uma série de estudos foram desenvolvidos e uma análise multidisciplinar estabeleceram o zoneamento de risco e um plano diretor de sustentabilidade industrial e ambiental, figura 3.

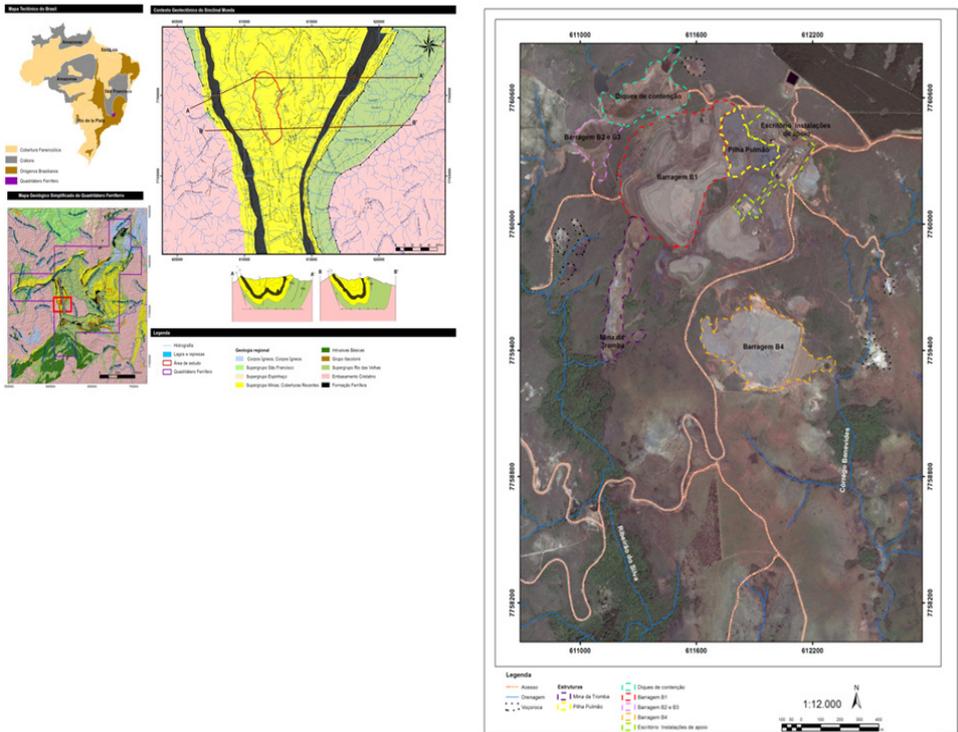


Figura 3 – Região do Platô Herculanô

No dia 05 de Abril de 2014, a barragem B4 da Herculanô Mineração e o terreno natural no seu entorno sofreram uma série de danos físicos, formados por fraturas, rachaduras, vórtex e dolinas de colapso (*sink holes*).

Nas fotos abaixo, figura 4; está um vórtex gerado a montante na barragem por onde escoaram 300.000 m³ de água e 90.000 t de rejeito. No avançar dos estudos de geologia, obras de sondagem e execução de levantamentos de eletroresistividade; descobriu-se o que seria a confirmação das nossas observações iniciais, em 19 de abril de 2014; a existência de um sistema cárstico na área.

Formado no domínio de mármore dolomíticos da Formação Fecho do Funil; este sistema cárstico mostrou-se uma zona de fragilidade

estrutural que foi traduzida para engenharia como zona de alto risco. As ocorrências de abatimentos em superfície do tipo *sinkhole* são um risco operacional hoje analisado, computado e expresso na forma de modelo de blocos tridimensional, figura 4; que tem como objetivo orientar a futura lavra de recuperação e estabilização da área; trazendo assim forte auxílio na continuidade das operações com foco na integridade e segurança de todos envolvidos.

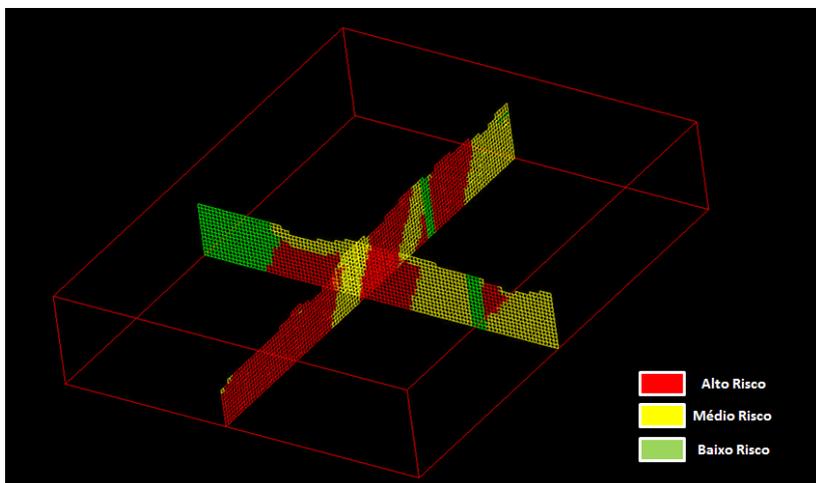


Figura 4 – Modelo de Risco Geológico

As evidências morfológicas e hidroquímicas encontrados ao longo das sucessivas etapas de trabalho sugerem que a dissolução dos dolomitos e mármore ocorreram através processos hipogênicos como a oxidação de sulfetos e alteração de carbonatos de manganês (rodocrosita ?). Estes processos formaram uma rede de canais subterrâneos com áreas de vazio da ordem de dezenas de m², onde a zona vadosa está associada diretamente aos vazios e também a áreas formadas por um tipo manganésífero, ‘borra de café’, onde a drenância é elevada, figura 5. A abrangência deste sistema na área da Herculano Mineração é de cerca de 4 km², onde foram encontrados e mapeados vazios e estruturas encobertas pela atividade industrial, tais como dolinas e sumidouros. Provavelmente estes canais subterrâneos representam um sistema único, atualmente segmentado por sucessivas fases de erosão e recobrimento, a fase epigenética.

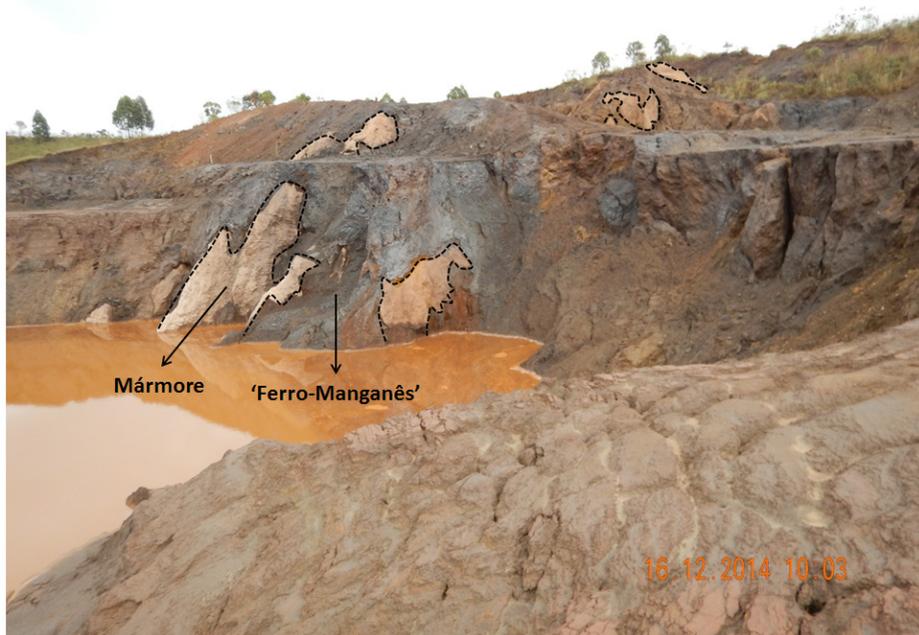


Figura 5 – Mármore Dolomítico na área do vórtex

O sistema cárstico do 'Platô Herculano' representa um trecho de um sistema único de galerias que foi segmentado pela denudação da superfície. Este fato caracteriza este carste como de evolução bimodal, ou seja, tem origem hipogênica e uma etapa posterior epigênica. Este sistema constitui um modelo tridimensional onde o formato das galerias pode se alterar abruptamente em termos da parede e teto, gerando desta forma grandes variações no volume e podendo as junções entre os condutos ser irregulares. Se tomarmos a classificação de Palmer (1991) este sistema corresponde a um arranjo ramiforme com alguns setores espongiiformes e reticulados.

A interrupção dos condutos pode se dar em geral por erosão e abatimento que geram o recobrimento por sedimentação. As galerias deste sistema foram geradas após a alteração hipogênica dos mármores e dolomitos para o 'ferro-manganês'; constituindo a principal fase de

espeleogênese do sistema. Essa fase não aparenta ter qualquer relação com a superfície atual do terreno. Foram encontradas paleomesas que representam a superfície final de erosão e também da evolução epigenética do sistema cárstico; considerando que o material que constitui as mesas são os sedimentos das Bacias Terciárias, esta fase epigenética está colocada entre o final do evento terciário e os tempos atuais. Na figura 6 abaixo as fotos destes ‘morros testemunhos’.



Figura 6 – Paleosuperfícies de Erosão

A localização onde elas foram encontradas estão em um *horst* cercado pelos vales dos ribeirões Silva e Benevides, figura 7. As evidências de rebaixamento rápido das cabeceiras dos ribeirões citados incluem declividades abruptas com centenas de metros de desnível, figura 7; e capturas recentes de drenagem com reorientação de cursos d'água, figura 8; completando esse quadro de atividades recentes soma-se a presença de fonte notável de água quente na Fonte Itabirito – BONAQUA. Todas estas evidências encontradas denotam a natureza juvenil da paisagem local.

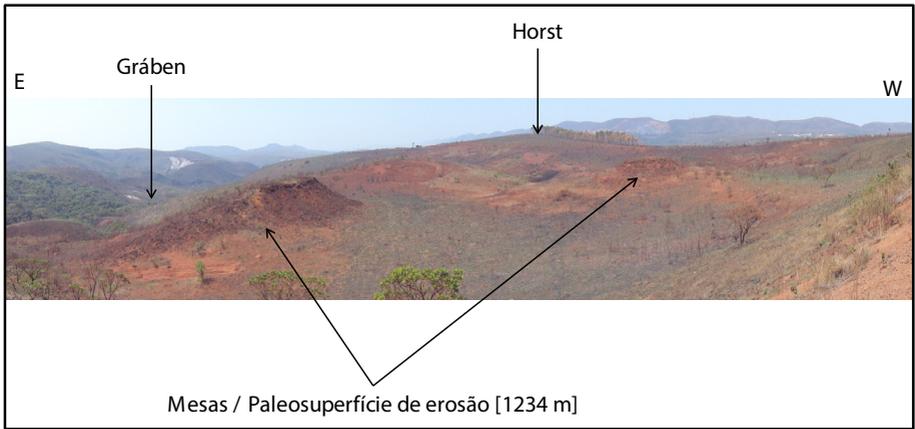


Figura 7 – Horst Benevides

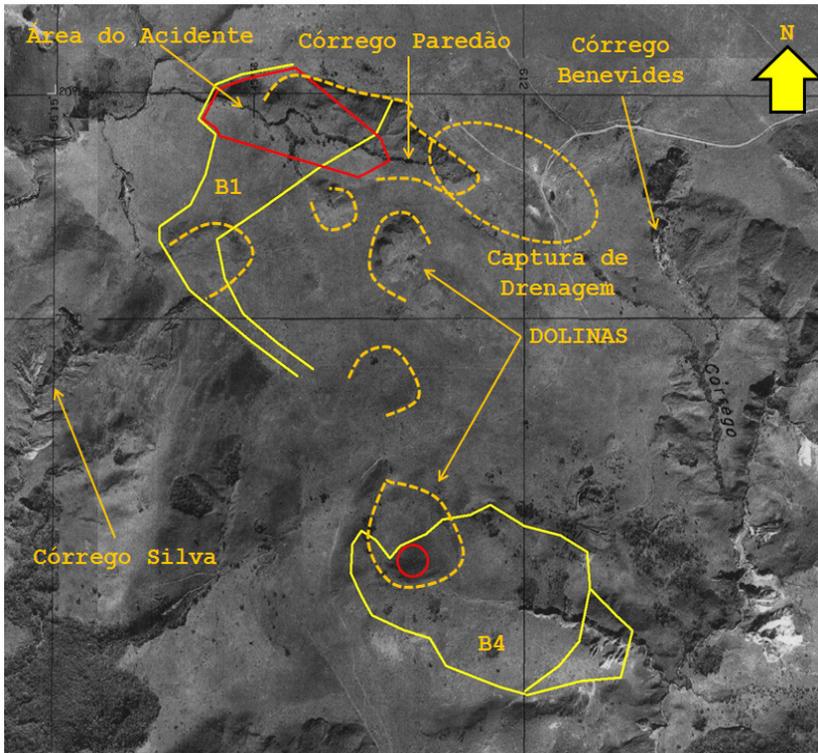


Figura 8 – Captura de drenagem na cabeceira do Benevides

Para completar todo este quadro jovem da área foram encontradas prováveis intrusões ácidas cortando argilitos e arenitos nas Bacias Terciárias, figura 9. Tal fato avançará para trabalhos de datação geocronológica e análise em detalhe da natureza petrográfica destas intrusões.

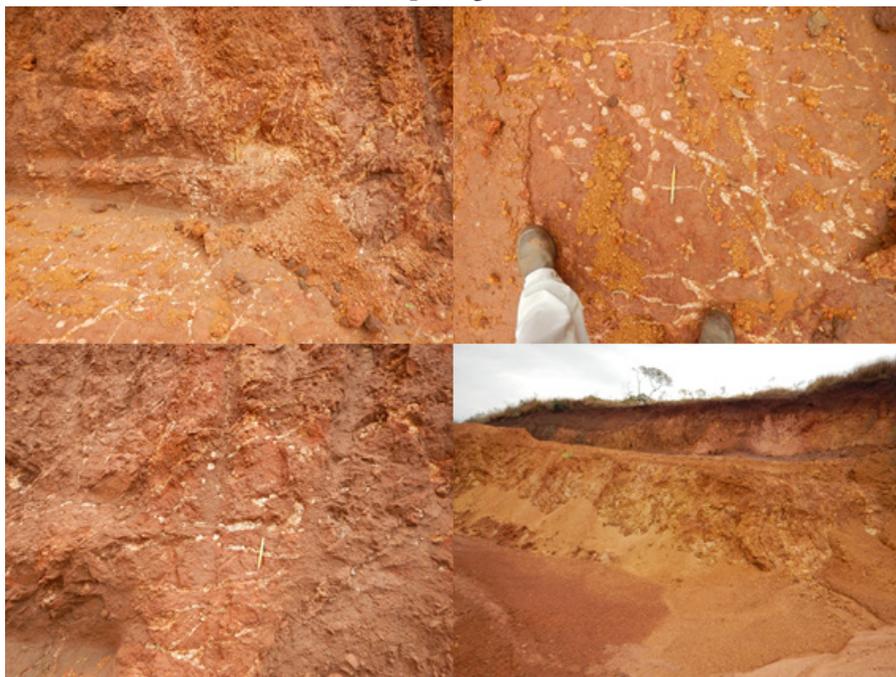


Figura 9 – Prováveis intrusões nas Bacias Terciárias

Todo este contexto avaliado denota um quadro tectônico ativo em período pós Terciário; sendo talvez a evolução de paisagem mais dramática e catastrófica próxima dos tempos atuais. Em outra vertente estas evidências montam um conjunto que deve ser avaliado com imenso cuidado na sua ocupação, com o passado de chave para o presente; a probabilidade de ocorrência de eventos similares e ou repetidos, como estes observados no registro geológico, pode existir. Não sem mistério antes e durante os eventos de danos gerados na barragem B4, foram registrados na RSBR [Rede de Sismográfica Brasileira] cinco [5] tremores de terra subsequentes, sendo que o mais forte atingiu 2.9 mr, figura 10. A coincidência de data e horário

dos eventos registrados pelas estações sismográficas e os danos identificados foram sentidos por mais de 200 trabalhadores que se encontravam no dia dentro da área da empresa. Diversos danos estruturais e materiais dos eventos foram observados pelas pessoas: objetos caindo de prateleiras, sensação dos prédios balançando até cerâmicas estourando no piso dos escritórios, mas o mais marcante foi à abertura do vórtex a montante na barragem e os sistemas de rachaduras e *sinkholes*. As análises de forma de onda, entre outras avaliações feitas com os dados; permitiram aos pesquisadores do IAG – USP, Assumpção *et al.*, determinar quê tanto a onda P como a S, registradas na estação BSCB, têm chegadas bem nítidas e impulsivas. A onda S tem maior amplitude na componente transversal. Essas são características de ondas geradas por sismo, i.e., por deslocamento abrupto em falha geológica, a alta correlação das formas de onda indica tratar-se de mesmo mecanismo de falhamento. Vibrações causadas por desmoronamentos geralmente são constituídas de ondas de superfície, com ondas P e S quase imperceptíveis. Essas características mostram que os abatimentos foram consequência de sismos naturais, ou seja, que os sismos não foram resultantes do abatimento de teto de cavernas, como se poderia supor, mas sim, sua causa.

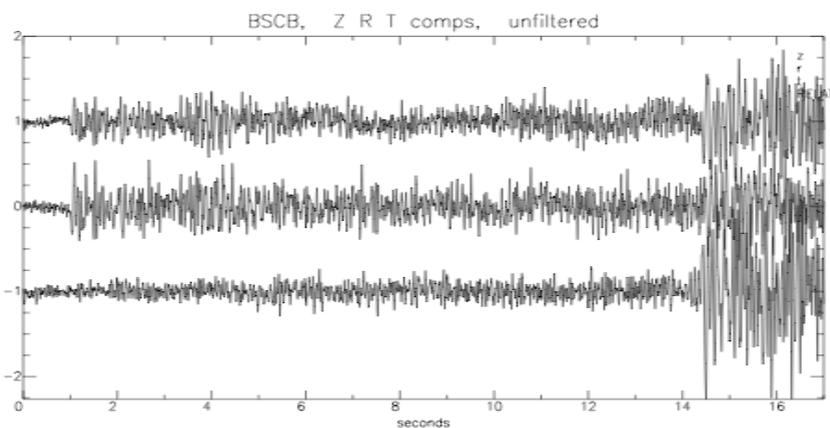


Figura 10 – Registro sismográfico dos eventos ocorridos em 05 de abril de 2014

2.3 – Evidências de Atividade Geológica Recente na Bacia do Rio Doce

Os estudos desenvolvidos por Riccomini (1989), Mello (1997), Castro (2001, 2006), Maizatto (2001), Saadi *et al.* (2002), Lipski *et al.* (2002) e Castro e Braga (2008); reúnem com primor inúmeras evidências da atividade geológica recente na região do Cráton do São Francisco Meridional.

As superfícies de erosão recentes, as estruturas tectônicas reativadas pelo paleocampo de tensões e pelo campo vigente, a geração de diversos depósitos sedimentares recentes e as modificações significativas de relevo causadas por diversos agentes da geodinâmica superficial colocam esta região, pelo menos no que tange a crosta terrestre rasa, como ativa geodinamicamente. Em Castro e Braga (2008) foram mostradas seções de levantamento sísmico que mostraram a deformação recente dos sedimentos lacustrinos em Lagoas do Parque do Rio Doce, figura 11. O rejeito do plano de falha atinge cerca de 20 metros na seção levantada e sua orientação é compatível com as estruturas mapeadas como lineamentos estruturais notáveis da área. Tais fatos merecem luz e evolução de investimentos nas diversas

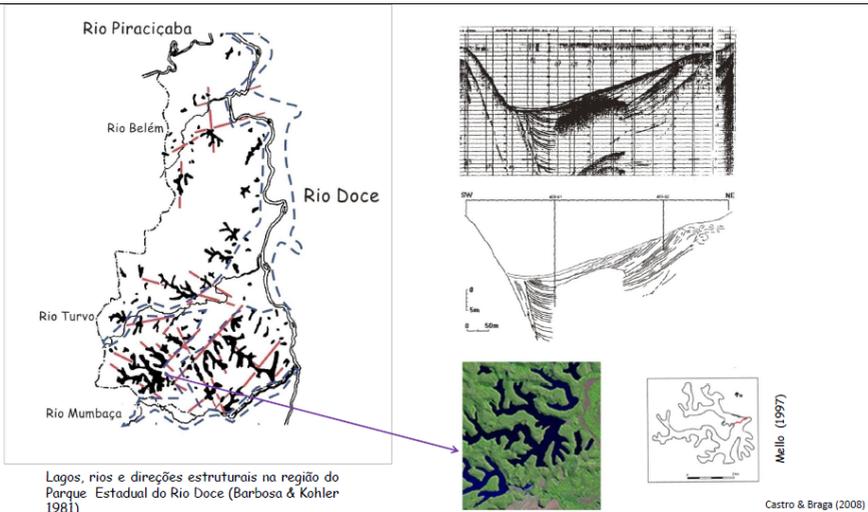


Figura 11 – Castro e Braga (2008): Deformação, estrutura do tipo anticlinal de *roll over*, em sedimentos lacustres recentes

áreas que possui: geologia estrutural e tectônica, geocronologia, geomorfologia, paleosismicidade, paleoclimatologia, paleobotânica, arqueologia entre outras várias vertentes das Ciências que possam vir a contribuir no conhecimento e desdobramentos dos eventos de Geologia Histórica Recente.

Estudos recentes na região liderados por estes autores indicam evidência de eventos como quedas de blocos em cavernas, alterações de relevo e inversão drenagem e reativações de sistemas de falhas e fraturas. Até mesmo desaparecimento de culturas, observados em ocorrências arqueológicas nas regiões cársticas de Minas Gerais podem estar associadas a questões desta natureza.

Evidentemente, é muito cedo para se falar em alguma correlação que ainda necessitam de mais estudos. Mas é certo que os mínimos indícios apontam para um novo e fascinante campo de estudos, o da paleosismicidade, associada à evolução cárstica e humana, em regiões como Lagoa Santa e Januária. Existe aí uma boa possibilidade de se conjugar várias ciências, em uma visão sistêmica, buscando o maior conhecimento da ocupação humana na região, e dos fatores que a influenciaram, fatores estes que podem a qualquer momento, se tornarem importantes também para resiliência da sociedade atual.

3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Brasil tem tradição recente em sismologia, devido à falsa crença de que não está em território sísmicamente ativo. Os conhecimentos atuais demonstram o contrário, e demandam um importante esforço no sentido de se cobrir esta deficiência que torna a sociedade e o meio ambiente vulneráveis aos riscos sísmicos atualmente conhecidos.

Existe a evidente necessidade de se reforçar a rede sismológica nacional, tanto em termos de distribuição espacial, quanto de precisão e tratamento de dados. É necessário que as Escolas se capacitem e criem centros de sismologia de forma a gerar uma massa crítica que consiga responder adequadamente aos riscos que se apresentam.

Esta estruturação demanda muitos recursos financeiros e humanos, mas principalmente, demanda tempo.

Enquanto não se dispõe de uma estrutura e de dados adequados, a paleosismicidade desponta como um importante instrumento para o conhecimento do potencial de risco sísmico de uma dada localidade, de forma a que se possam adotar as medidas necessárias para redução da vulnerabilidade da sociedade e do meio ambiente aos mesmos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Castro P.T.A. 2001. Origem e evolução dos lagos do médio rio Doce: perspectiva geológica. Disponível em: www.degeo.ufop.br/intranet/Graduação/disciplinas/estratigrafia/perd.htm. Acessado em 29/05/2011.

Castro P.T.A., Braga S C M. Evidências de tectonismo cenozóico no alto e médio vale do rio Doce (MG), com base em geomorfologia fluvial. 2008, 44 Congresso Brasileiro de Geologia.

da Silva C.M.T., Alkmim F.F., Pedrosa Soares A.C. Geometria e evolução do feixe de zonas de cisalhamento Manhuaçu – Santa Margarida, Orógeno Araçuaí, MG. 2009. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 62(1):23-34.

Leeder M., Gawthorpe R. 1987. Sedimentary models for tilt-block/half-graben basins. In: Continental Extensional Tectonics, edited by M. P. Coward and J.F. Dewey and P.L. Hancock. Spec. Publ. Geol. Soc. Am., 28, pages 139-152.

Lipski, M.; Endo, I.; Castro, P.T.A; Trzaskos – Lipski, B. 2002. Evolução neotectônica no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais a partir da análise de paleotensão. (Inédito).

Maizatto J.R. 2001. Análise bioestratigráfica, paleoecológica e sedimentológica das bacias terciárias do Gandarela e Fonseca – Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais, com base nos aspectos palinológicos e sedimentares. Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Tese de Doutorado 249p.

Mello C.L. 1997. Sedimentação e Tectônica Cenozoicas no Médio Vale do rio Doce (MG, Sudeste do Brasil) e suas implicações na Evolução de um Sistema de Lagos, Programa de Pós- Graduação em Geologia Sedimentar, Universidades de São Paulo, Tese de Doutorado, 275p.

Riccomini C., 1989, O Rift Continental do Sudeste do Brasil: Instituto de Geociências/ Universidade de São Paulo, São Paulo Tese de Doutorado, 256p.

Saadi A., Machette M.N., Haller K.M., Dart R.L., Bradley L., de Souza A.M.P.D. 2002. Map and Database of Quaternary Faults and Lineaments in Brazil. USGS, Open-File Report 02-2030, Denver, 68p.

Bases de mapas obtidas em: <http://neotec.rc.unesp.br/neotec>. Acesso em dezembro de 2015.