

Influência de estruturas brasileiras na sismicidade desencadeada por reservatório na Usina Hidrelétrica de Irapé, Minas Gerais, Brasil

Influence of Brazilian structures on the reservoir induced seismicity case of Irapé Hydroelectric Plant, Minas Gerais, Brazil

Guilherme Ferreira da Silva^{1*}, José Oswaldo de Araújo Filho²,
Mônica Giannoccaro Von Huelsen³, Cristiano Naibert Chimpliganond³,
George Sand França³

RESUMO: Inaugurada em 2006, a Usina Hidrelétrica de Irapé possui a mais alta barragem do país, com 210 m, que vem sendo monitorada pelo Observatório Sismológico da Universidade de Brasília desde o começo do enchimento de seu reservatório. Apresentando sismicidade causada pelo aumento da tensão crustal logo após o início do represamento, a Sismicidade Desencadeada por Reservatório da Usina Hidrelétrica de Irapé permanece como um importante objeto de estudo para o entendimento deste fenômeno. O presente trabalho se propôs a estudar a sismicidade registrada de janeiro a maio de 2006, assim como a caracterizar a geologia ao redor da Usina Hidrelétrica de Irapé com o intuito de identificar e descrever as estruturas que permitam melhor compreender os eventos sísmicos. A orientação espacial dos eventos sísmicos obtidos pela análise das polaridades e da forma de onda condiz com aquelas dos lineamentos de relevo. As estruturas encontradas podem ser associadas a uma maior, de direção principal NE/SW, com dezenas de quilômetros, que seria responsável pela captura dos rios Jequitinhonha e Araçuaí, interpretada neste trabalho como uma estrutura relacionada a uma fase tardia do Evento Brasileiro. O diagrama de solução do mecanismo focal gerado utilizando um método de inversão da forma de onda no domínio do tempo indica que a direção dos possíveis planos de falhas está correlacionada ao principal direcionamento das estruturas rúpteis na área de trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: reativação sísmica de estruturas geológicas; estudos de sismicidade desencadeada por reservatório; Usina Hidrelétrica de Irapé.

ABSTRACT: Inaugurated in 2006, the Irapé Hydroelectric Plant has the highest dam in Brazil, with 210 m. The Seismological Observatory of the University of Brasília is monitoring this structure since the beginning of its reservoir filling. The reservoir triggered seismicity caused by the increase of crustal tension just after the start of the remains like an important object of study for understanding this phenomenon. This paper aims at studying the seismicity recorded from January to May 2006, as well as to characterize the geology around the Hydroelectric Plant Irapé in order to identify and describe the structures that help for better understanding the seismic events. The spatial orientation of the seismic events obtained by analyzing polarity and waveform is consistent with the guidance of prominent relief lineaments. These faults can be found attached to a larger structure with main NE/SW direction and tens of kilometers, which would be responsible for capturing Jequitinhonha and Araçuaí rivers. This great lineament is interpreted herein as a structure related to a late stage of the Brasileiro-Panafrican event. The solution of focal mechanism, created using an inversion method of the waveform in the time domain, indicates that the direction of the possible plans are correlated to main failure of brittle structures targeting the area of work.

KEYWORDS: seismic reactivation of geological structures; studies on reservoir triggered seismicity; Irapé Hydroelectric Plant.

¹Serviço Geológico do Brasil, Programa de Pós-graduação em Geociências Aplicadas, Universidade de Brasília – UnB, Brasília (DF), Brasil. E-mail: guilherme.ferreira@cprm.gov.br

²Instituto de Geociências, Universidade de Brasília – UnB, Brasília (DF), Brasil. E-mail: oswaldo@unb.br

³Observatório Sismológico, Universidade de Brasília – UnB, Brasília (DF), Brasil. E-mails: monisis@unb.br; naibert@unb.br; georgesand@unb.br

*Autor correspondente.

Manuscrito ID: 30095. Recebido em: 07/03/2014. Aprovado em: 11/09/2014.

INTRODUÇÃO

A sismicidade desencadeada por reservatório (SDR) é um fenômeno com influência antropogênica registrado concomitantemente e/ou posteriormente ao preenchimento de um reservatório de água (geralmente uma usina hidrelétrica – UHE), em que anteriormente havia, ou não, o registro de atividade sísmica (Simpson 1976; 1986). Este fenômeno, ainda que seja pouco compreendido a nível geral, pode ser encarado como uma resposta da crosta rasa às mudanças no campo de tensão em que se encontra submetida. Os eventos de SDR podem apresentar variação de intensidade, frequência e distribuição dos tremores de acordo com o terreno no qual o reservatório se desenvolveu. A ocorrência não pode ser prevista, embora esteja associada preferencialmente aos grandes reservatórios (Bell & Nur 1978).

A capacidade de estimar a potencialidade deste fenômeno e suas áreas mais suscetíveis antes da própria construção é de interesse para reforçar a estrutura de barramento durante sua construção, assim como para zelar pela estrutura já construída. Historicamente, os eventos de SDR podem ser desastrosos, como, por exemplo, o terremoto de *Koyna* de magnitude $M_R = 6,3$ na escala *Richter*, ocorrido em 1967, que matou 177 pessoas e deixou outras 50.000 desabrigadas (Chadha *et al.* 2008).

No Brasil, o maior evento de SDR atingiu magnitude $M_R = 4,2$, e provavelmente tal sismicidade está associada a dois reservatórios próximos: a UHEs Porto Colômbia e Volta Grande. Ambos iniciaram o represamento na primeira metade da década de 1970. O evento principal foi registrado em 1974 e danificou estruturas de diversas construções, porém não houve registro de óbito decorrente.

Apesar de este fenômeno ser recorrente em diversas barragens brasileiras e no mundo, há certa carência de estudos que verifiquem a natureza das estruturas geológicas causadoras dos sismos e a correlação destes com a estruturação pretérita impressa nas rochas. Trabalhos de compilação dos casos de SDR no Brasil (Assumpção *et al.* 2002; França *et al.* 2009) geralmente não se aprofundam nesta discussão. Ferreira *et al.* (2008a) discutiram o papel de estruturas dúcteis na geração dos sismos associados ao lineamento Pernambuco; enquanto Ferreira *et al.* (2008b) atribuem a causa do evento de SDR da UHE Castanhão a um conjunto de falhas rúpteis que cortam a estrutura.

No caso da UHE de Irapé, o monitoramento iniciou-se antes da construção do empreendimento, sendo que não houve registro de sismos antes do enchimento do reservatório. Segundo Chimpliganond *et al.* (2007), os quais primeiramente estudaram estes eventos, a UHE de Irapé apresenta sismicidade do tipo inicial, com o primeiro evento sísmico sendo registrado após o começo do enchimento do reservatório em um período de dias (Fig. 1).

Deste modo, o objetivo deste trabalho foi identificar, descrever e verificar a correlação entre as estruturas geológicas e a localização e as características dos eventos sísmicos desencadeados por um reservatório na UHE de Irapé, conferindo a hipótese de que falhas preexistentes podem ser reativadas pela mudança de direção e intensidade no campo de tensões locais, gerando os eventos de SDR.

LOCALIZAÇÃO E GEOLOGIA

A área de estudo corresponde a um retângulo de 48 x 18 km ao redor do local de influência do reservatório da UHE de Irapé, localizada no Vale do Jequitinhonha, Nordeste do Estado de Minas Gerais (Fig. 2), e compreende parte dos municípios de Berilo, Cristália, Grão Mogol, Josenópolis e Virgem da Lapa.

A região está inserida no Orógeno Araçuaí (Província Mantiqueira), definido inicialmente por Almeida (1977) como faixa móvel brasileira disposta na porção Leste do Cráton do São Francisco, sendo posteriormente assunto levantado em diversos trabalhos (Almeida *et al.* 2000; Pedrosa-Soares *et al.* 2001; 2007). Segundo Pedrosa-Soares *et al.* (2001), o Orógeno Araçuaí é resultado de colisão entre os Crátons São Francisco e Congo, de maneira que faz parte de um conjunto global de colisões continentais que dominaram o final do Neoproterozoico, durante a orogênese Brasileira-Panafricana. Ele representa um cinturão orogênico singular, caracterizado por seu confinamento à reentrância limitada pelos Crátons São Francisco e Congo (Fig. 3).

Na região são encontradas rochas do embasamento local (Complexo Porteirinha, arqueano) e supracrustais deformadas durante a tectônica do Brasileiro – Supergrupo Espinhaço e Grupo Macaúbas.

O Complexo Porteirinha representa o embasamento local do Orógeno Araçuaí, envolvido em tectônica de Pele Grossa, que é composto por gnaisses bandados com composição predominantemente granodiorítica, localmente migmatizados e idade Arqueana (até 3,0 Ga), contendo intercalações concordantes de anfíbolitos e de rochas metaultramáficas (serpentinó, clorita xisto e actinolita xisto). Os gnaisses bandados são injetados por plútons de composição granodiorítica, granítica e sienítica, estes últimos exibindo texturas magmáticas bem preservadas (Noce *et al.* 2007).

Localmente, o Supergrupo (SG) Espinhaço é caracterizado por um pacote de metarenitos, metapelitos e metaconglomerados, os quais somados atingem até 5.000 m de espessura. O SG Espinhaço é dividido em dois grupos e nove formações, compreendendo três ambientes distintos de sedimentação, cujas rochas mais antigas remetem a quartzitos cujo protólito foi depositado durante o Evento Extensional Estateriano, em ambiente de *rift* ensialício (Brito Neves *et al.* 1996; Chemale Jr. *et al.* 2012).

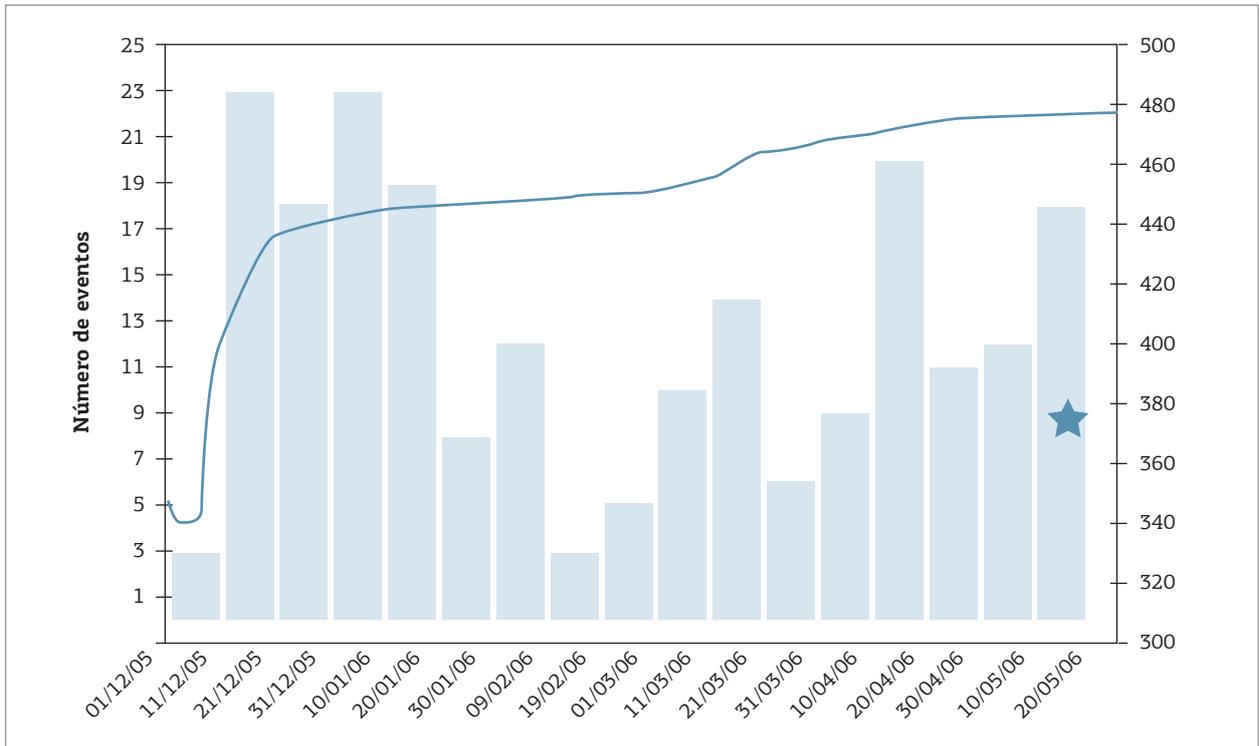


Figura 1. Histograma de distribuição temporal do registro sísmico associado à variação do nível do reservatório (modificado de Chimpliganond et al. 2007).

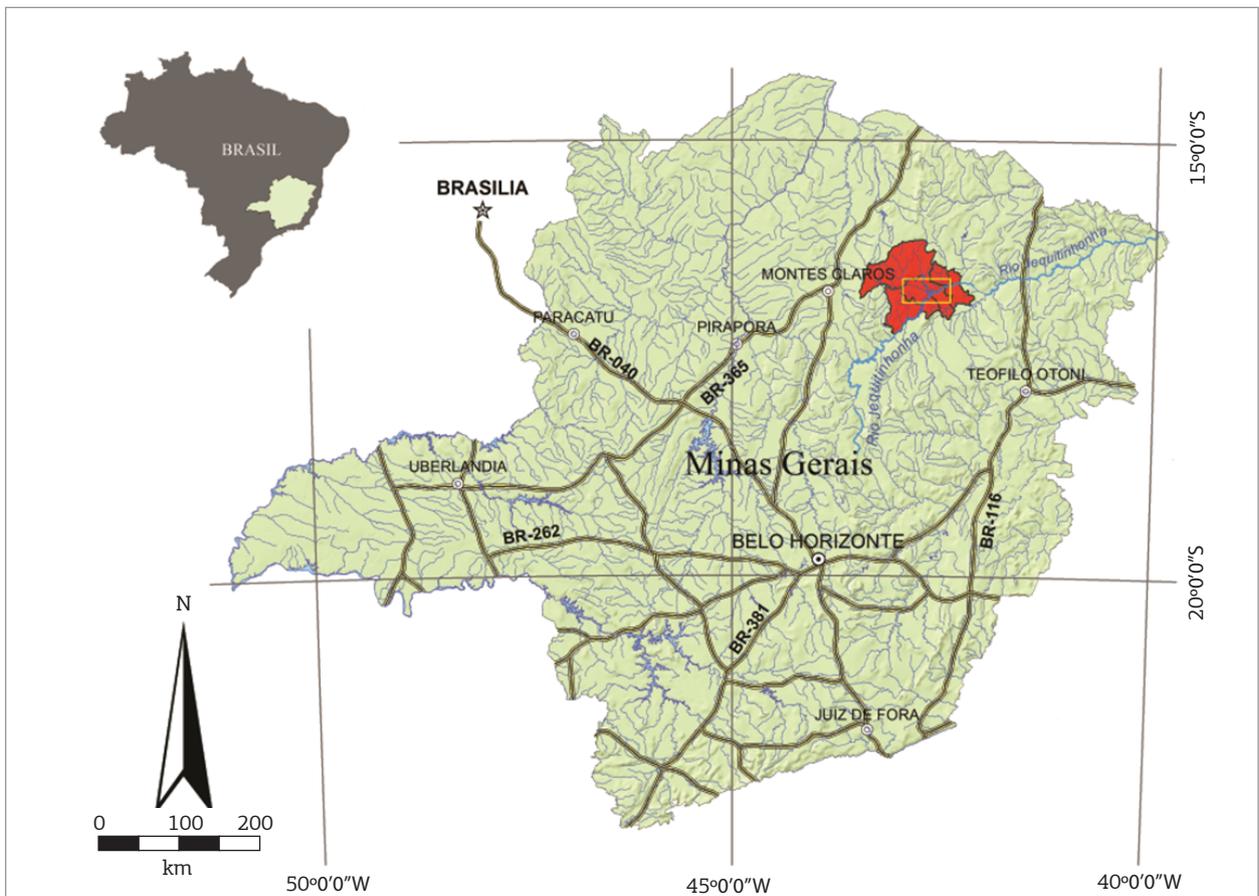


Figura 2. Localização da área de trabalho dentro do estado de Minas Gerais.

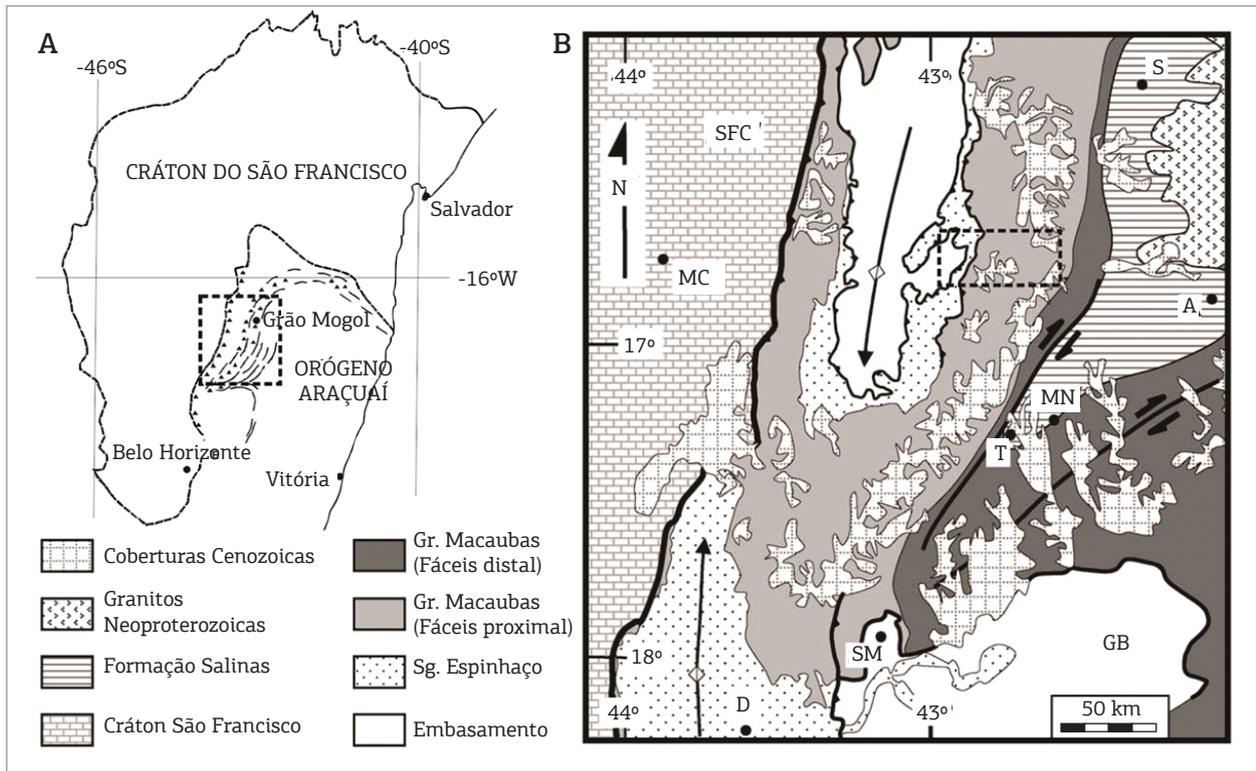


Figura 3. Localização da área de estudo dentro do Orógeno Araçuaí. (A) Contorno do Cráton do São Francisco e Orógeno Araçuaí com localização da cidade de Grão Mogol, próxima à área de estudo (modificado de Pedrosa-Soares *et al.* 2007). O destaque indica a posição estimada da Fig. 3B. (B) Destaque da área de estudo dentro da zona externa do Orógeno Araçuaí (modificada de Marshak *et al.* 2006).

O Grupo Macaúbas ocorre em discordância sobre as unidades anteriores e marca o início de uma segunda abertura conhecida como Evento Extensional Toniano, responsável pela Formação da Bacia Macaúbas, cuja abertura remete a 950 Ma (Pedrosa-Soares *et al.* 2001). Localmente, consiste em quartzitos, xistos e metadiamicritos distribuídos ao longo das Formações Rio Peixe Bravo, Nova Aurora, Chapada Acauá e Ribeirão da Folha (Lima *et al.* 2002; Babinski *et al.* 2011).

Quanto aos padrões tectônicos, Uhlein *et al.* (1998) dividem o Orógeno Araçuaí em dois domínios tectônicos: interno e externo. O domínio externo está associado às rochas de menor grau metamórfico, apresentando vergência tectônica claramente em sentido ao Cráton do São Francisco, sendo que as rochas estão dispostas entre si por uma sucessão de *nappes* e falhas contracionais. A área de estudo encontra-se envolvida neste contexto. Já em termos detalhados, Marshak *et al.* (2006) localmente dividiram o domínio tectônico externo em domínio estrutural (DE) da Serra do Espinhaço, DE Chapada Acauá e DE Turmalina (DE Oeste, DE Central e DE Leste, neste trabalho, respectivamente).

No DE da Serra do Espinhaço, os estratos do SG Espinhaço, do Grupo Macaúbas e do embasamento Arqueano foram empurrados ao Oeste numa sucessão de falhas e

dobras, levados em contato tectônico com a borda do Cráton São Francisco.

O DE Chapada Acauá apresenta rochas do Grupo Macaúbas com uma xistosidade desenvolvida com mergulho ESE e dividida entre falhas contracionais com vergência para Leste, sem inversão da estratigrafia.

Por último, o DE Turmalina engloba o vale do rio Araçuaí. Tem exposição de porções distais do Grupo Macaúbas e da Formação Salinas e apresenta padrão de falhamento disposto na direção NE, com notável rejeito direcional dextral, limitando a Formação Ribeirão da Folha à Formação Salinas.

MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo do mapeamento geológico neste trabalho é o reconhecimento e a descrição dos litotipos constituintes da região e das estruturas geológicas primárias e secundárias que poderiam interferir na sismicidade da área (principalmente de domínio rúptil). No auxílio do traçado dos contatos geológicos e lineamentos de relevo, utilizou-se como base uma imagem do satélite *Indian Resource Sat* (IRS), cujo sensor LISS III opera com quatro bandas na

faixa espectral de 0,52 – 1,70 μm e possui resolução espacial de 23 m (Silva *et al.* 2013). A cena utilizada denomina-se LIS3_20100810_333_089, datada de 10 de agosto de 2010.

O monitoramento sismológico da área de influência da UHE de Irapé teve início ainda durante a fase de obras, em 17 de setembro de 2003, com a instalação da estação IRP1, a qual operou até 17 de maio de 2005. Pelo período de dois meses consecutivos ao enchimento do reservatório, as estações IRP1, IRP2, IRP3 e IRP4 funcionaram total ou parcialmente, não havendo, nesta época, registro de sismicidade em todas as estações concomitantemente.

Os dados sismológicos foram analisados por meio do programa *Seismic Analysis Code* (Goldstein & Snoko 2005), no qual realizou-se a leitura de chegada das ondas P e S e da polaridade. A análise dos sismogramas passou por uma dupla rotina de checagem, utilizando e não utilizando filtragem de sinal. Os artifícios utilizados para simplificação da leitura consistiram nos comandos da retirada de média (“*rmean*”), retirada de tendência (“*rtrend*”) e filtro de passa alta (*high pass*), considerando frequências acima de 1 Hz (por se tratar de estações de período curto). Após esta etapa, realizou-se a inversão da forma de onda visando obter a solução de mecanismo focal.

Mesmo com porções específicas de um sismograma, é possível obter informações consideráveis sobre o evento sísmico (Sokos & Zahradník 2008). No entanto, um estudo que considere na sua modelagem todo o sinal atribuído consegue melhores respostas para as perguntas em questão, levando-se em conta fatores de complexidade indubitada, como a heterogeneidade da crosta terrestre e a relação sinal e ruído, dentre outros.

A rotina utilizada neste trabalho consiste na inversão ponto-a-ponto da forma de onda no domínio do tempo, trabalhada em linguagem FORTRAN e expressão gráfica do Matlab, denominada ISOLA e desenvolvida por Sokos & Zahradník (2008).

A rotina do ISOLA considera o modelo crustal de propagação das ondas sísmicas (fornecido pelo intérprete) e as informações dos sistemas sismográficos (resposta em frequência de sensor e digitalizador) para calcular a função de Green (Bouchon 1981). Para desenvolver essas etapas, é preciso anteriormente processar o sinal sísmico, de forma a atenuar sua complexidade para tornar a modelagem mais realista e possível, tendo em vista a dificuldade de modelar sinais com fases de alta frequência (Sokos & Zahradník 2013).

O modelo crustal aplicado para a inversão da localização epicentral utilizando o Hypo71 e visando a obtenção da solução de mecanismo focal (utilizando o ISOLA) foi baseado em informações obtidas por meio de métodos geofísicos potenciais, como a profundidade de contato do embasamento com rochas supracrustais, além de informação geológica prévia, que já foi discutida. Neste modelo (Fig. 4),

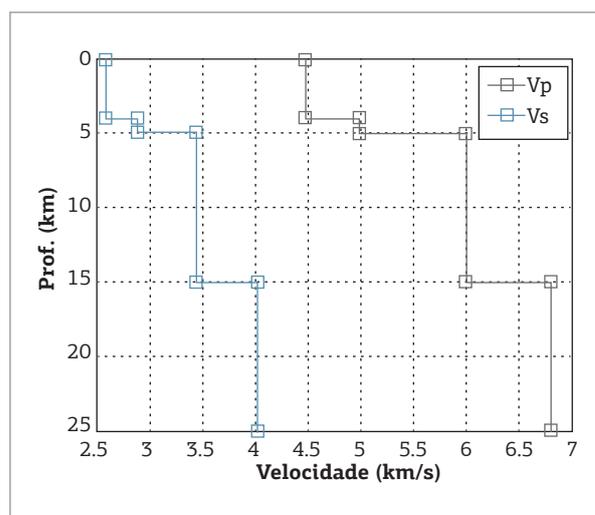


Figura 4. Modelo crustal de propagação de velocidade de onda P e S em relação à profundidade para a região da área de influência da Usina Hidrelétrica de Irapé.

é considerado um pacote de rochas metassedimentares de baixa velocidade constituído por metassedimentos do Grupo Macaúbas Distal, sobreposto a uma camada de quartzitos do SG Espinhaço e da Formação Rio Peixe Bravo. As camadas de maior profundidade, correspondentes à transição das crostas superior e inferior, foram baseadas no modelo crustal genérico gerado pelos trabalhos de Pavão *et al.* (2012) e Assumpção *et al.* (2012) e Assumpção *et al.* (2013).

ANÁLISE DA GEOLOGIA LOCAL

A UHE de Irapé foi construída em uma porção do rio Jequitinhonha, em que o vale tem a forma de “U”, com um desnível total que supera 400 m. Esta região escarpada consiste de um canhão (ou *canyon*) longo, com direção geral bem definida, composta por um lineamento geral de direção NE/SW alternado com pequenos lineamentos NW/SE e E/W. Foram descritas duas fases de deformação dúcteis e uma rúptil, tardia em termos do Ciclo Orogenético Brasileiro, sendo as três fases deformacionais somadas às principais responsáveis pela estruturação atual da crosta rasa da região, ditando inclusive a direção das zonas de cisalhamento, falhas locais e demais descontinuidades encontradas.

As rochas ao redor do reservatório da UHE de Irapé estão dispostas em um sistema de falhas contracionais de regime dúctil de direção aproximada N/S, com vergência para Oeste (sentido Cráton São Francisco; Fig. 5), desenvolvidas durante a colisão do Cráton do São Francisco com o Cráton do Congo. Foram identificadas duas fases

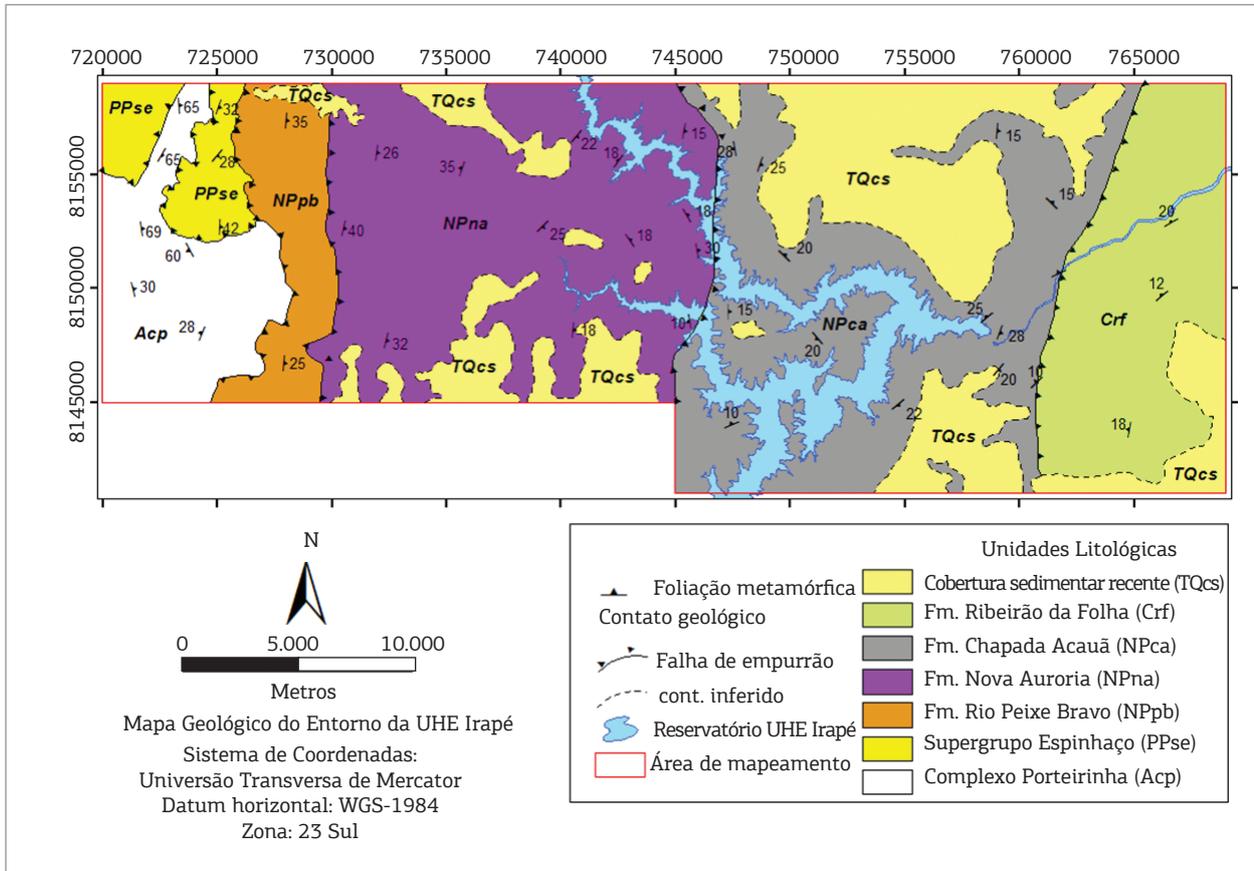


Figura 5. Mapa geológico da área de influência do reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) de Irapé. O Complexo Porteirinha, a Oeste, representa o embasamento local remobilizado, enquanto as rochas supracrustais estão dispostas em um sistema de falhas contracionais.

deformacionais de regime dúctil, concomitantes ao desenvolvimento de duas xistossidades e consequentes dobramentos. Uma foliação de mergulho baixo (S1), em geral para Leste, por vezes descreve dobras locais abertas assimétricas de primeira fase (F1), com vergência para Oeste. Uma clivagem de crenulação caracteriza a segunda geração de xistossidade (S2) de ângulo mais alto e, por vezes, dobra F1 e os veios de quartzo concordantes a ela, gerando dobras de segunda fase (F2) que podem apresentar vergência para Oeste como retroempurrões.

No campo das estruturas rúpteis, destacam-se as cinco famílias distintas de juntas encontradas, sendo que estas e outras fraturas podem ser correlacionadas aos grandes lineamentos de relevo em escala regional, que se dispõem em um padrão cruzado, sugerindo par conjugado NE/NW que marca a direção E/W como a de maior esforço regional durante a deformação, por reativação neotectônica. Os Rios Jequitinhonha e Araucaí foram captados por dois conjuntos de zonas de cisalhamento de rejeito direcional com direção NE/SW, sendo que o segundo marca melhor o traço da ruptura. Falhas extensivas normais e inversas também foram

encontradas à jusante, próximas à área da barragem, possivelmente associadas a um evento terciário descrito por Saadi & Pedrosa-Soares (1991) como responsável pela Formação do gráben de Virgem da Lapa.

Em escala regional, os lineamentos de relevo foram agrupados respeitando-se a divisão dos domínios estruturais apresentada no tópico anterior para as estruturas de regime dúctil. Nos três domínios é possível notar certa predominância de lineamentos na direção NE/SW, aumentando suavemente o azimute da moda (apresentada em forma de histograma polar ou diagrama de rosetas) à medida que se afasta do embasamento, abarcado no DE Oeste (Fig. 6). Como direção secundária destacada, em ambos os domínios, nota-se uma preferência por estruturas de padrão E/W, ou ESE/WNW, tratando-se do DE Leste.

Em escala de afloramento, destaca-se a presença de falhas oblíquas de ângulo moderado com imbricação para Oeste. Geralmente, estão alinhadas na direção Norte-Sul ou Nordeste-Sudoeste, apresentando grande correspondência com os lineamentos de relevo. Principalmente quando estas estruturas encontram-se preenchidas por veios de quartzo,

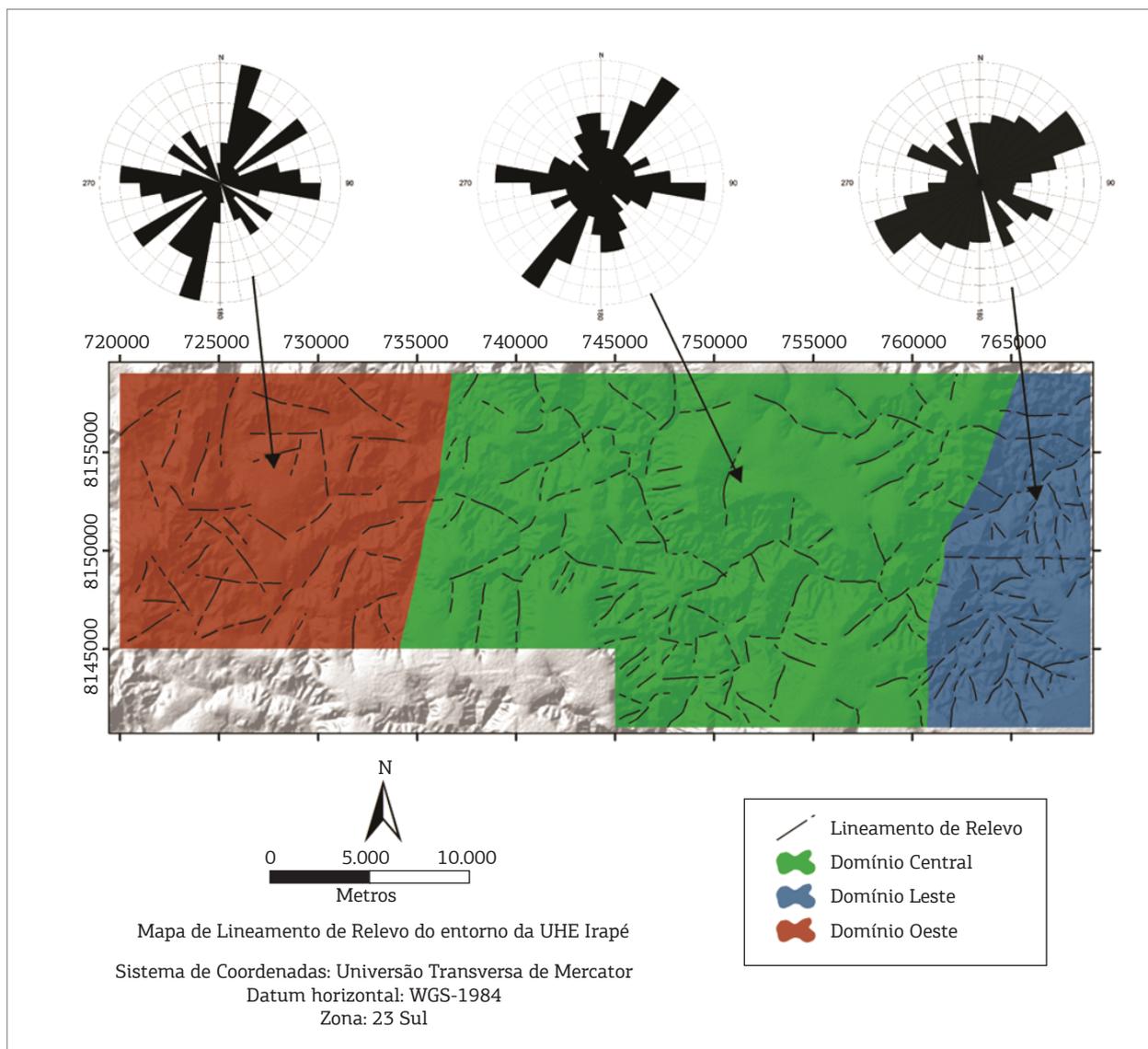


Figura 6. Mapa de lineamentos de relvô da área de influência da Usina Hidrelétrica (UHE) de Irapé. Os lineamentos foram agrupados de acordo com os DE preestabelecidos e para cada um apresenta-se um histograma polar (diagrama de rosetas) indicando a direção mais representativa. Cada setor do histograma polar tem 10° de intervalo.

é possível observar a direção marcada por estrias de falha, registrando a direção do movimento, que contém a componente normal como principal responsável por isso e também marcando a movimentação lateral.

Essas falhas são interceptadas por outras com alinhamento similar, porém com direção de mergulho opostas. As estruturas mais recentes tratam-se de falhas inversas com vergência ainda para Leste, que afetaram a rocha localmente chegando a formar brechas e *gouge* ao redor do seu traçado (Fig. 7). Tais estruturas tendem a se repetir por todos os domínios estruturais, porém são notadas próximas a regiões em que a rocha foi exposta recentemente,

como cortes de estrada ou em sítios próximos ao local de construção da barragem.

ANÁLISE DOS EVENTOS SÍSMICOS

De modo geral, os epicentros encontram-se agrupados ao redor ou sob o reservatório e, em sua grande maioria, a montante da barragem. Possuem uma tendência a se agrupar acompanhando o vale do Rio Jequitinhonha. Observando a evolução temporal, nota-se uma propensão inicial de prolongamento dos epicentros ao longo do vale do rio Itacambirucu

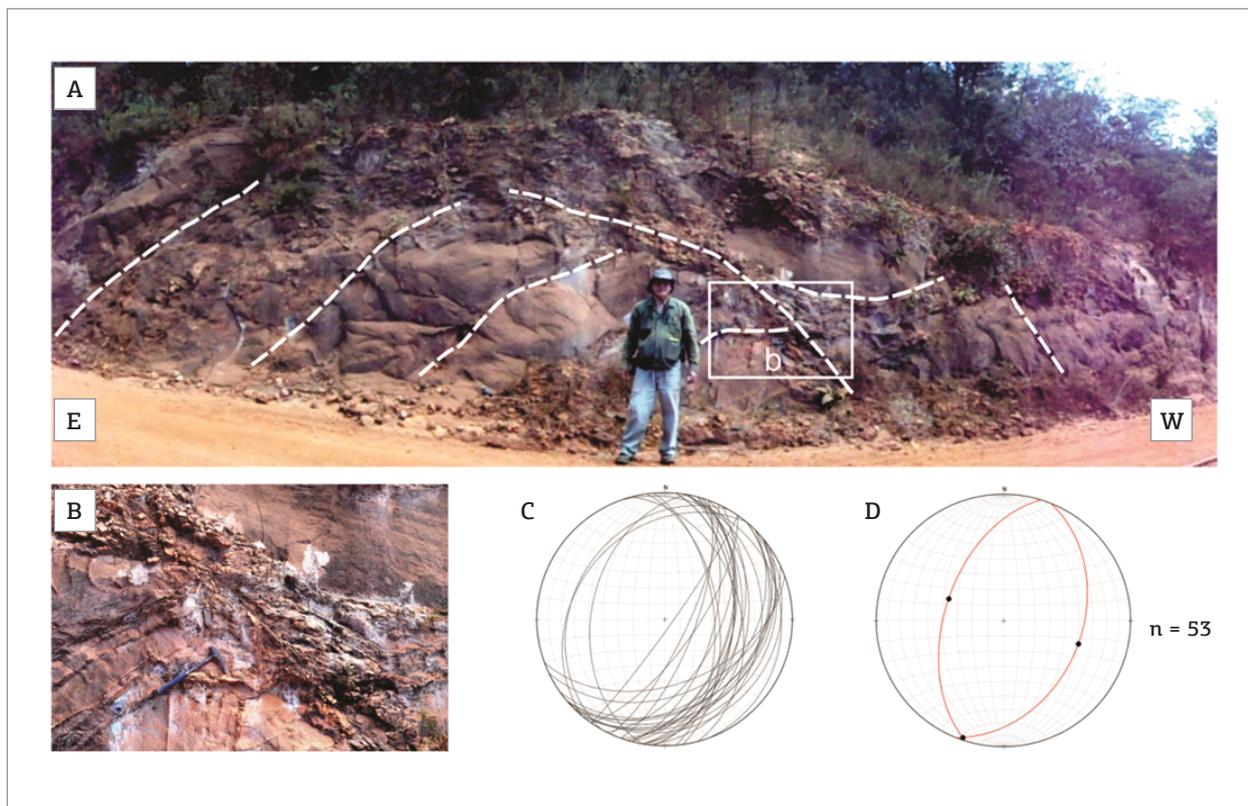


Figura 7. Afloramento de filito da Formação Nova Aurora em que se pode notar a relação entre as estruturas deformacionais de regime rúptil. (A) Disposição geral das estruturas em escala de afloramento; (B) Detalhe para interseção de falhas, sendo que a falha inversa teve tensão suficiente para brechamento e cominuição da rocha adjacente; (C) Esterograma dos planos de falha no afloramento em questão; (D) Planos de ajuste médio para falhas obtido em estereograma por meio de artifício de autovalores.

(braço norte do reservatório), porém, com a passagem do tempo, fica claro o surgimento de mais epicentros alinhados com o braço do rio Jequitinhonha, sugerindo um alinhamento de direção NE/SW (Fig. 8).

O sismo principal registrado durante o período de tempo analisado ocorreu em 14 de maio de 2006, às 14:07:46 horas (UTC) e atingiu 3,0 de magnitude de duração. O evento foi sentido por moradores do distrito de Lelivédia e por operários da UHE de Irapé, que fora inaugurada em dezembro de 2005. O mesmo foi registrado pelas três estações operantes da rede sismográfica da UHE de Irapé, sendo que houve uma réplica deste evento algumas horas depois, com localização epicentral semelhante ao primeiro e também registrado pelas três estações.

Em função de sua maior relevância, tendo seu epicentro localizado há pouco mais de 1.000 m da barragem e sendo o de maior magnitude dentre os sismos registrados, o mesmo foi escolhido como estudo de caso em uma tentativa de abarcar informações sobre a sua natureza e conseqüente características.

Dificuldades atribuídas a uma baixa razão sinal/ruído e à localização da estação IRP4 (instalada sobre um bloco

de rocha solto) fizeram com que o sismograma obtido não possuísse um bom ajuste para os parâmetros utilizados na inversão (Fig. 9). Portanto, escolheu-se não levar em conta a estação IRP4 na inversão (uma vez que neste caso estaria se modelando basicamente ruído e sinal de baixa qualidade).

A solução de mecanismo focal adotada como saída principal do ISOLA é aquela que apresenta maior correlação entre o sinal sintético e o registrado. Nota-se que, portanto, por mais que seja uma tentativa de modelagem inversa do problema para se chegar a uma solução viável, a coerência estatística deve sempre ser considerada.

Os planos nodais apresentados são fruto de uma média entre as diversas soluções encontradas, situadas em relação à variação da posição dos eixos de compressão (P) e tração (T). É importante verificar se os planos nodais são coerentes em relação a toda informação possível de polaridade de onda P, pois de tal modo tem-se maior confiança na veracidade dos dados apresentados. De posse desta afirmação, verificou-se que o resultado encontra-se compatível com o que foi verificado nos sismogramas (Fig. 10).

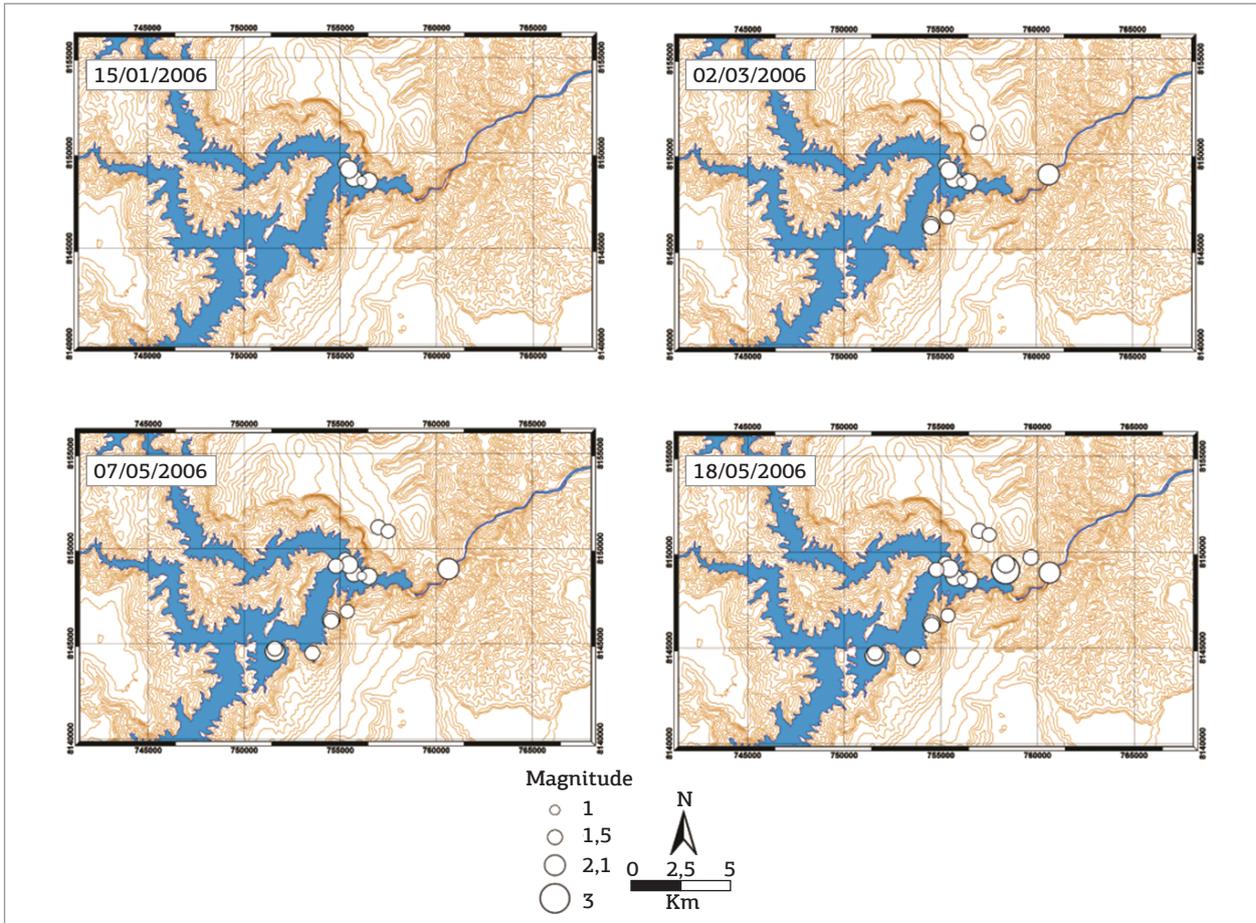


Figura 8. Evolução temporal da sismicidade desencadeada na Usina Hidrelétrica (UHE) de Irapé. A circunferência representa a magnitude de duração calculada para cada evento.

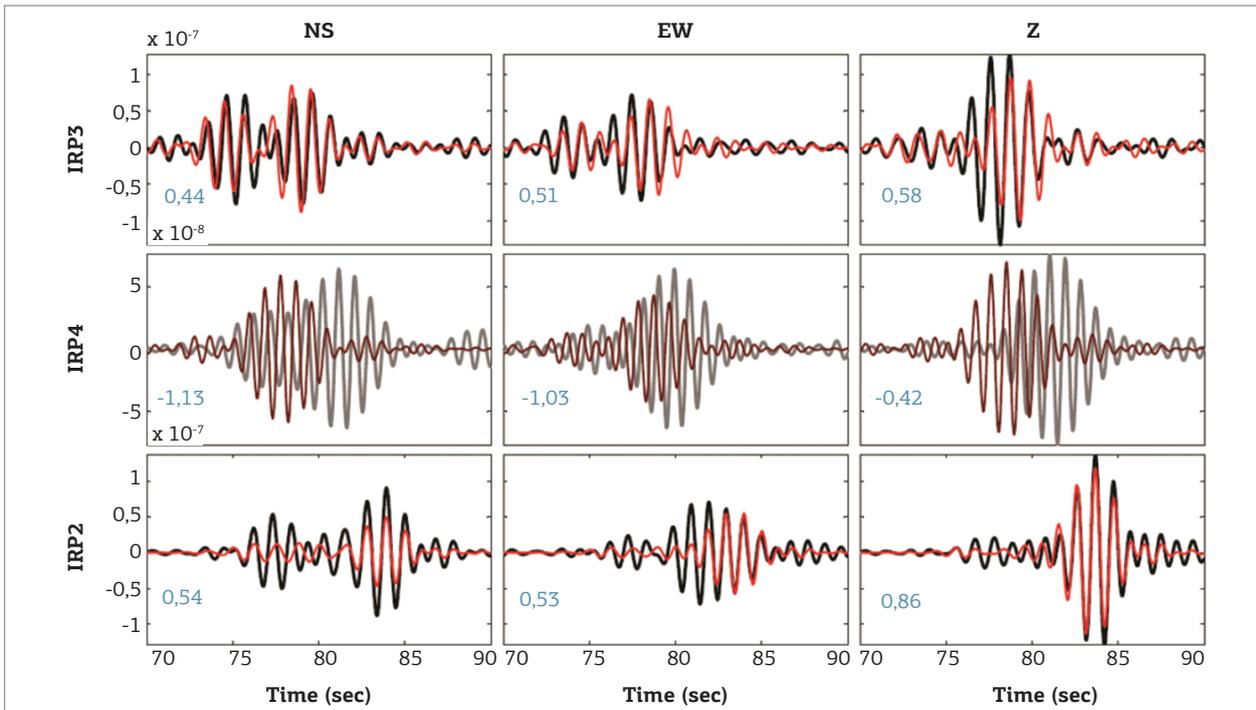


Figura 9. Gráfico de ajuste das curvas dos sinais sintético (vermelho) e real (preto) no domínio do tempo. Os números azuis correspondem à correlação entre ambos, dentro de cada componente analisada. O sinal de coloração acinzentada indica que a estação em questão não foi utilizada para a inversão.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O diagrama de solução de mecanismo focal encontrado mostra dois planos nodais que são interpretados como possíveis falhas geradoras do principal evento sísmico. Estes planos, perpendiculares entre si, apresentam mergulhos em quadrantes opostos (segundo e quarto

quadrante) e direção próxima a N30E. Nos demais resultados, a tendência de estruturas na direção NE é evidente. As falhas rúpteis, tratadas nos estereogramas, consistem de planos de descontinuidades não “soldados” por veios de quartzo, que influenciaram a SDR neste caso, observando também a tendência linear da ocorrência dos epicentros (Fig. 11).

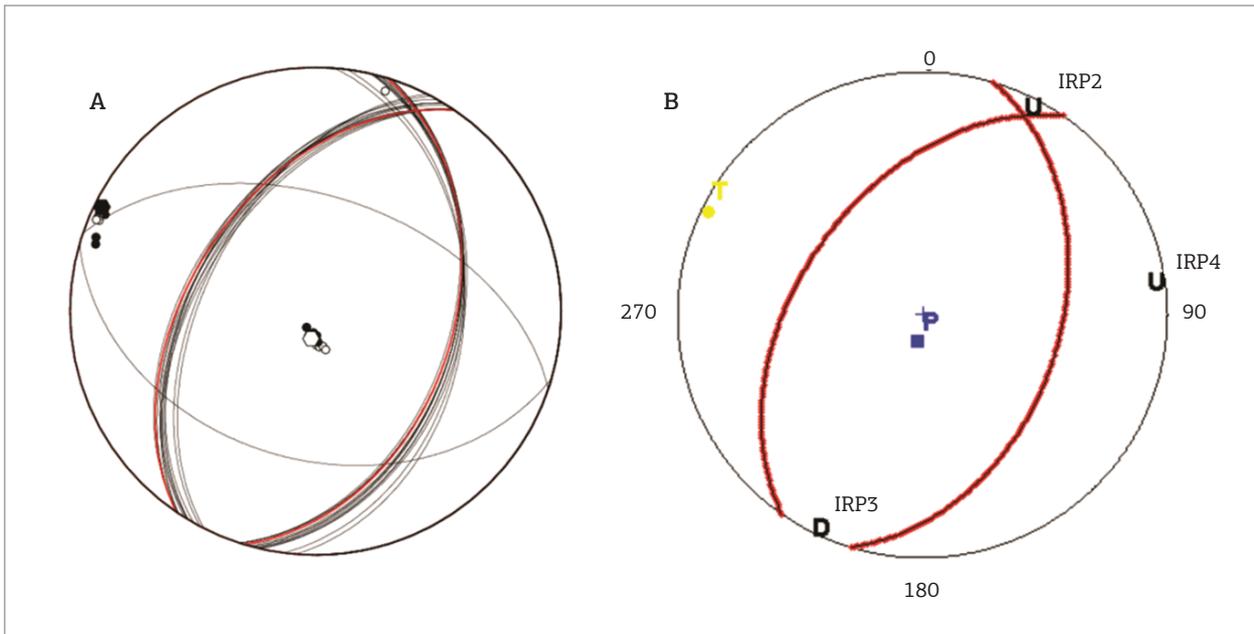


Figura 10. Diagramas de ajuste dos planos nodais. (A) Variação dos planos nodais da solução em função da posição dos eixos P e T; (B) Verificação das polaridades de onda P em função da sua posição em relação aos planos nodais e aos eixos de tensão.

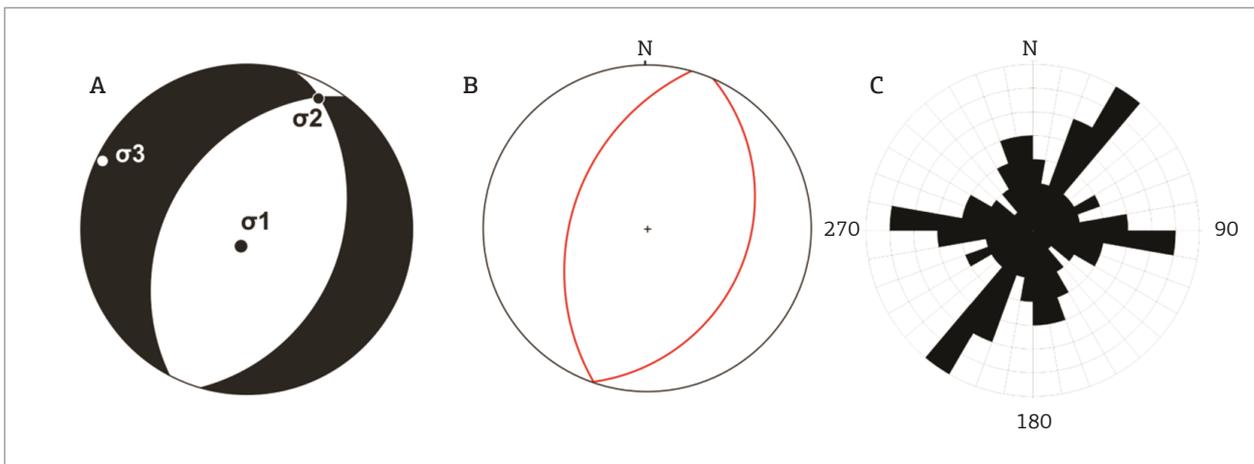


Figura 11. Diagramas do resultado de sismicidade e estruturação geológica e geofísica da crosta, nos quais nota-se a repetição de uma tendência estrutural na direção NE/SW. (A) Diagrama de mecanismo focal com posicionamento de eixos de tensão. A direção de máxima compressão (σ_1) é praticamente vertical, refletindo em planos nodais correspondentes a falhas normais com pouquíssima contribuição de movimentos laterais. A direção aproximada dos planos nodais é de N30E. (B) Diagrama dos planos de ajuste para as falhas rúpteis encontradas próximas à região da barragem. Direção aproximada dos planos de falha N20E. (C) Diagrama de roseta dos lineamentos de relevo extraídos para o domínio estrutural central, em que estão os epicentros. A direção da moda dos lineamentos de relevo é de N40E.

Como o reservatório se encontra sobre uma região intensamente deformada pelo ciclo Brasileiro e por fases posteriores, levanta-se a suposição de que a estruturação geológica da crosta rasa local seja de maior importância nestes casos do que quando se trata de barragens construídas em regiões de geologia muito simples, como naquelas de bacias sedimentares profundas. Tal constatação permite supor que quanto maior a complexidade das estruturas do “maciço rochoso” em que é construído o empreendimento, maior a participação destas estruturas preexistentes na geração dos eventos sísmicos.

É importante também compreender que os eventos de SDR tendem a ocorrer em profundidades relativamente rasas, portanto a presença de estruturas geológicas rasas influencia na dissipação da tensão adicionada; do mesmo modo que a ausência de tais estruturas poderia forçar a criação de novas

falhas, se as condições geomecânicas forem favoráveis a tal condição por causa dos valores de tensão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro por meio do projeto de pesquisa 481178/2010-4, viabilizando as etapas finais da pesquisa e os últimos trabalhos de campo. Agradecimentos também ao Observatório Sismológico (SIS), na pessoa do professor Lucas Vieira Barros, pelo apoio aos trabalhos de campo e à Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), pela concessão dos dados sismológicos e suporte nas atividades de campo.

REFERÊNCIAS

- Almeida F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, **7**:349-364.
- Almeida F.F.M., Brito Neves B.B., Carneiro C.D.R. 2000. The origin and Evolution of South American Platform. *Earth-Science Reviews*, **50**:77-111.
- Assumpção M., Bianchi M., Julià J., Dias F.L., França G.S., Nascimento R., Drouet S., Pavão C.G., Albuquerque D.F., Lopes A.V. 2013. Crustal Thickness Map of Brazil: Data Compilation and Main Features. *Journal of South American Earth Sciences*, **74**:85.
- Assumpção M., Feng M., Tassara A., Julià J. 2012. Models of crustal thickness for South America from seismic refraction, receiver functions and surface wave tomography. *Tectonophysics*, **609**:82-96.
- 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 and Applied Geophysics*, **159**(1):597-617.
- Babinski M., Pedrosa-Soares A.C., Trindade R.I.F., Martins M., Noce C.M., Liu D. 2011. The Neoproterozoic Macaúbas Group (Araçuaí orogen, SE Brazil) with emphasis on the diamictite formations. *The Geological Record of Neoproterozoic Glaciations*, **36**:523-534.
- Bell M.L. & Nur A. 1978. Strength changes due to reservoir-induced pore pressure and stresses, and application to Lake Oroville. *Journal of Geophysics Research*, **87**(44):69-83.
- Bouchon M. 1981. A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media. *Bulletin of Seismological Society of America*, **71**:959-971.
- Brito Neves B.B., Sá J.M., Nilson A.A., Botelho N.F. 1996. A Tafrogênese Estateriana nos Blocos Paleoproterozóicos da América do Sul e Processos Subsequentes. *Geonomos*, **3**:1-21.
- Chadha R.K., Kuempel H.J., Shekar M. 2008. Reservoir Triggered Seismicity (RTS) and well water level response in the Koyna-Warna region, India. *Tectonophysics*, **456**(1-2):94-102.
- Chemale F., Dussin I.A., Alkmim F.F., Martins M.S., Queiroga G., Armstrong R., Santos M.N. 2012. Unravelling a Proterozoic basin history through detrital zircon geochronology: The case of the Espinhaço Supergroup, Minas Gerais, Brazil. *Gondwana Research*, **22**:200-206.
- Chimpliganond C.N., França G.S., Bandeira A.E., Bevilacqua L.A. 2007. Reservoir-Triggered Seismicity at the Highest Brazilian Dam. AGU – Meeting of Americas. *AGU 2007 Joint Assembly*, Acapulco. AGU 2007 Joint Assembly.
- Ferreira J.M., Bezerra F.H.R., Sousa M.O.L., Nascimento A.F., Sá J.M., França G.S. 2008a. The role of precambrian mylonitic belts and present-day stress field in the cosismic reactivation of the Pernambuco lineament, Brazil. *Tectonophysics*, **456**:111-126.
- Ferreira J.M., França G.S., Vilar C.S., Nascimento A.F., Bezerra F.H.R., Assumpção M. 2008b. Induced Seismicity in the Castanhão Reservoir, NE Brazil – Preliminary results. *Tectonophysics*, **456**:103-110.
- França G.S., Von Huelsen M.G., Assumpção M., Ribotta L.C., Chimpliganond C.N. 2009. Update of the reservoir induced seismicity of Brazil – 2008. In: 23 Congresso de Grandes Barragens, Brasília. *Brazilian International Symposium on Dams and Reservoirs for Multiple purposes*, 2009. v. 1, p. 6.
- Golstein P. & Snoke A. 2005. “Sac Availability for the Iris Community” Incorporated Institutions for Seismology Data Management Center Electronic Newsletter. Disponível em: <<http://www.iris.edu/news/newsletter/vol7no1/page1.htm>>. Acesso em: 15 dez 2013.
- Lima S.A.A., Martins-Neto M.A., Pedrosa-Soares A.C., Cordani U.G., Nutman A. 2002. A Formação Salinas na Área-Tipo, NE de Minas Gerais: uma proposta de revisão da estratigrafia da Faixa Araçuaí com base em evidências sedimentares, metamórficas e idades U-Pb SHRIMP. *Revista Brasileira de Geociências*, **34**(4):491-500.
- Marshak S., Alkmim F.F., Whittington A., Pedrosa-Soares A.C. 2006. Extensional collapse in the Neoproterozoic Araçuaí orogen, eastern Brazil: a setting for reactivation of asymmetric crenulation cleavage. *Journal of Structural Geology*, **28**(1):129-147.
- Noce C.M., Pedrosa-Soares A.C., Silva L.C., Alkmim F.F. 2007. O embasamento arqueano e paleoproterozóico do Orógeno Araçuaí. *Geonomos*, **15**:17-23.

- Pavão C.G., França G.S., Marotta G.S., Meneses P.H., Neto G.B.S., Roig H.L. 2012. Spatial Interpolation Applied a Crustal Thickness in Brazil. *Journal of Geographic Information System*, **4**:142-152.
- Pedrosa-Soares A.C., Noce C.M., Alkmim F.F., Silva L.C., Babinski M., Cordani U., Castañeda C. 2007. Orógeno Araçuaí: Síntese de Conhecimento 30 Anos após Almeida 1977. *Geonomos*, **15**(1):1-16.
- Pedrosa-Soares A.C., Noce C.M., Wiedemann C., Pinto C.P. 2001. The Araçuaí-West Congo Orogen in Brazil: an overview of a confined orogen formed during Gondwanaland Assembly. *Precambrian Research*, **110**:307-323.
- Saadi A., Pedrosa-Soares A.C. 1991. Um gráben cenozóico no médio Jequitinhonha, Minas Gerais. In: *Simpósio de Neotectônica e Sedimentação*, SBG-MG/CEMIG. v. 11, p. 101-124.
- Silva C.B., Ponzoni C.J., Santos S.B. 2013. Comparação entre dados dos sensores LISS-III/Resourcemat-1 e ETM+/Landsat 7. In: *Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil.
- Simpson D.W. 1976. Seismicity changes associated with reservoir loading. *Engineering Geology*, **10**(2446):123-150.
- Simpson D.W. 1986. Triggered Earthquakes. *Annual Review Earth Planetary Sciences*, **14**:21-42.
- Sokos E.N. & Zahradník J. 2008. ISOLA a Fortran code and a Matlab GUI to Perform multiple-point source inversion of seismic data. *Computer & Geosciences*, **34**(8):967-977.
- Sokos E.N. & Zahradník J. 2013. Evaluating Centroid-Moment-Tensor Uncertainty in the New Version of ISOLA Programa. *Seismological Research Letters*, **84**(4):656-665.
- Uhlein A., Trompette R.R., Egydio-Silva M. 1998. Proterozoic Rifting and Closure, SE Border of the São Francisco Craton, Brazil. *Journal South American Earth Sciences*, **11**(2):191-203.

Arquivo digital disponível on-line no site www.sbgeo.org.br
