



magnitude instrumental: ● 6 ● 5 ● 4 ● < 3
○ = sentido no Brasil ● sismo historico

Sismicidade do Brasil: monitorar é imprescindível

Na matéria especial desta edição convidamos os especialistas Alberto Veloso, George Sand e Joaquim Mendes Ferreira, para abordarem a sismicidade no Brasil, como histórico, causas, monitoramento e muito mais.

Simpósio Brasileiro de Geofísica - VII SimBGf

PÁG. 5

Chamada para revisores que desejam fazer parte da Revista Brasileira de Geofísica

PÁG. 7

Monitorar é imprescindível

Por Jorge Hidenbrand

Reunindo os maiores especialistas brasileiros em Sismologia, esta edição do Boletim da SBGf premia os seus leitores com matérias de alto nível sobre tema de grande relevância para a comunidade de geocientistas brasileiros: Sismicidade do Brasil. É com o intuito de ajudar a desmitificar conceitos fundamentados no senso comum, de que, estando o território brasileiro assentado em região tectonicamente estável, não seria suscetível à ocorrência de abalos sísmicos, este Boletim publica opiniões e artigos técnicos de especialistas, que abordam o tema em profundidade, demonstrando que existem, sim, razões para nos preocuparmos com os fenômenos sísmicos. Abalos de origem tectônica não são incomuns no Brasil. O evento ocorrido na região de João Câmara, RN, em 1986, com magnitude superior a 5, que destruiu parte da cidade, é relativamente recente. Em 1955, foi detectado por estações sismográficas um terremoto de magnitude 6,2 no interior do estado do Mato Grosso, onde hoje é o município de Porto dos Gaúchos. O poder de destruição de um abalo desta magnitude é gigantesco; teria produzido grande devastação se tivesse ocorrido nos dias de hoje. Outros eventos de menor intensidade têm sido captados por nossa rede sismográfica quase que diariamente, sendo muitos de origem não tectônica, como os sismos induzidos, que também devem ser objeto de preocupação da comunidade técnico-científica e das autoridades. Grandes acumulações de água em reservatórios de hidroelétricas podem desencadear eventos de magnitude elevada, a exemplo do sismo induzido pelo reservatório de Koyna, na Índia, em 1967 (magnitude de 6,5) que levou à morte cerca de 200 pessoas. Outros exemplos poderiam ser tomados para ilustrar o desencadeamento de terremotos de origem não tectônica. A leitura dos artigos publicados neste Boletim lhes reserva informações respaldadas em pesquisas conduzidas por sismólogos brasileiros. Finalmente, nas palavras de um dos colaboradores desta edição, Prof. Alberto Veloso: “[O monitoramento sismológico] é um trabalho que não tem fim. E tem de ser assim porque os terremotos não seguem calendários, não tem local e nem hora para acontecer.” Boa leitura!

ADMINISTRAÇÃO DA SBGf

Presidente

Jorge Dagoberto Hidenbrand

Vice-presidente

Ellen Nazare de Souza Gomes

Secretário-Geral

Marco Antonio Pereira de Brito

Secretário de Finanças

Neri João Boz

Secretário de Relações Institucionais

Ricardo Augusto Rosa Fernandes

Secretário de Relações Acadêmicas

Eder Cassola Molina

Secretário de Publicações

Pedro Mário Cruz e Silva

Conselheiros

Adalene Moreira Silva

Adriana Perpétuo Socorro da Silva

Augusto Cesar Bittencourt Pires

Jessé Carvalho Costa

Luiz Fernando Santana Braga

Marco Cesar Schinelli

Maria Amélia Novais Schleicher

Renato Cordani

Rosângela Correa Maciel

Sergio Luiz Fontes

Secretários Regionais

Eliane da Costa Alves (Centro-Sul)

George Sand Leão A. de França (Centro-Oeste)

Cesar Augusto Moreira (Sul)

Marco Alberto Rodrigues (Nordeste Meridional)

Josibel Gomes Junior (Nordeste Setentrional)

Carolina Barros da Silva (Norte)

Editor-chefe da Revista Brasileira de Geofísica

Cleverson Guizan Silva

Gerente

Rosemery Gonçalves

Assistente de Diretoria

Luciene Victorino de Carvalho

Assistente Administrativo

Ivete Berlice Dias

Coordenadora de Eventos

Renata Vergasta

Assistente de Eventos

Keylla Cristina Teixeira

Editora de publicações científicas

Adriana Reis Xavier

Estagiário de Tecnologia da Informação

Gabriel Nunes Dias

BOLETIM SBGf

Editor-chefe

Renato Silveira

Edição

Thiago Felix Oliveira

Reportagem

Bruna Vaz Mattos

Tiragem: 2.500 exemplares

Distribuição restrita

Também disponível no site www.sbgf.org.br

Sociedade Brasileira de Geofísica - SBGf

Av. Rio Branco, 156 sala 2.509

20040-901 - Centro - Rio de Janeiro - RJ

Tel./Fax: (55-21) 2533-0064

sbgf@sbgf.org.br | www.facebook.com/sbgf.org

CONFIRA NESTA EDIÇÃO

3 REGIONAIS

- Regional Setentrional
- Secretaria Nordeste Setentrional promove Oficina
- Regional Nordeste Meridional
- Representante Estudantil da Nordeste Meridional é eleita

5 EVENTOS

- Simpósio Brasileiro de Geofísica - VII SimBGF
- Workshop EAGE/SBGf é sucesso de público
- VII Semana de Inverno de Geofísica na UNICAMP
- Presidente da SBGf inicia ciclo de palestras mensais

7 NOTAS

- Chamada para Revisores
- Processo Seletivo para Doutorado em Geofísica

8 ESPECIAL

Sismicidade no Brasil

8 ESPECIAL - ANEXO

Os surpreendentes terremotos intraplaca

POR ALBERTO VELOSO

12 MEMÓRIA

A Rural do Dirceu e o Jeep do Waldemar

Por Roberto Breves Viana

16 ARTIGOS TÉCNICOS

- Sismicidade Induzida por Reservatório (SIR): casos brasileiros
- Neotectônica e sismicidade no Brasil
- Terremotos no Brasil: Preparando-se para Eventos Raros
- Atividade Sísmica e sua ocorrência

Capa: Marcelo Assumpção
Catálogo Sísmico Brasileiro

FUNDO SBGf

DIAMANTE



OURO



PRATA



BRONZE



SECRETARIAS REGIONAIS

Nesta seção os associados da SBGf ficam informados sobre as ações de suas secretarias regionais e sobre os principais fatos ocorridos em diversos estados do país.

REGIONAL SETENTRIONAL

Secretaria Nordeste Setentrional promove Oficina

Foto: Josibel Oliveira



Os participantes da oficina ficaram satisfeitos com as atividades desenvolvidas. Entre os dias 29 de fevereiro e 2 de março deste ano foi realizada a 5ª mostra institucional sobre ciência e tecnologia do Instituto Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte.

Aproveitando este importante evento, a secretaria nordeste setentrional promoveu uma oficina que teve como tema: "Geofísica: aplicações, teorias e métodos". O secretário desta regional, Josibel Oliveira, ficou muito satisfeito com o resultado final da oficina e a classificou como muito bem sucedida. Muitos estudantes marcaram presença e interagiram com os pesquisadores nas atividades que foram propostas e desenvolvidas. As atividades foram conduzidas pelos seguintes pesquisadores: André Giskard (DG/UFRN), Josibel Gomes de Oliveira Júnior (DGEF/UFRN) e Mário Pereira da Silva (DGEF/UFRN).

REGIONAL NORDESTE MERIDIONAL

Representante Estudantil da Nordeste Meridional é eleita



Foto: Marcos Alberto Rodrigues Vasconcelos

Da esquerda para a direita: Lara Martin - suplente; Marcos Alberto Rodrigues Vasconcelos - secretário da regional nordeste meridional e Paloma Fontes - representante eleita.

No dia 15 de abril foi realizada a eleição para representante estudantil da secretaria regional Nordeste Meridional, que tem o professor Marcos Alberto Rodrigues Vasconcelos como secretário.

A nova representante estudantil eleita é a estudante de graduação da Universidade Federal da Bahia (UFBA), Paloma Fontes. Como suplente foi eleita a também estudante da UFBA, Lara Martin.

De acordo com o secretário da regional, Marcos Alberto, as estudantes eleitas estão muito felizes e empenhadas com a atividade que irão desempenhar e, os demais alunos da instituição, muito entusiasmados em representar a SBGf. "Os estudantes se mostraram bastante interessados em representar a sociedade aqui na UFBA e as alunas eleitas estão animadas com o cargo", finalizou Marcos.

"O que a Petrobras está fazendo para melhorar sua gestão?"

Temos feito uma série de mudanças para fortalecer a governança da companhia. Entre outras medidas, tornamos mais rigorosos os critérios de contratação e a gestão dos fornecedores. Também reformulamos o nosso Canal de Denúncia, que agora é administrado por uma empresa independente e especializada.

Você tem as perguntas. Nós temos as respostas.
petrobras.com.br/daquiapra frente

BR PETROBRAS Ministério de Minas e Energia **BRASIL** GOVERNO FEDERAL PATRIA EDUCADORA

o desafio é a nossa energia



eventos@sbgf.org.br

Patrocínio
Institucional:



UFOP

Universidade Federal
de Ouro Preto



Escola de Minas
Universidade Federal
de Ouro Preto

VII SimBGf

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA

*“Debatendo a Geofísica
sob a magia de Ouro Preto”*

25-27

OUT

2016

Ouro Preto
Minas Gerais

Parque Metalúrgico Augusto Barbosa
Centro de Artes e Convenções da UFOP



Informações: <http://simposio.sbgf.org.br>

EVENTOS

Simpósio Brasileiro de Geofísica – VII SimBGf



Save the date!

A Sétima edição do Simpósio Brasileiro de Geofísica – VII SimBGf - acontecerá nos dias 25, 26 e 27 de outubro, pela primeira vez na mágica cidade de Ouro Preto, Minas Gerais, nas instalações do Parque Metalúrgico Augusto Barbosa.

O evento é voltado principalmente para apresentações de estudantes e pesquisadores do meio acadêmico, contando também com a presença de profissionais de empresas privadas, públicas e órgãos governamentais. O objetivo é promover a discussão sobre a contribuição da geofísica para a exploração dos recursos minerais, discutir a profissão de Geofísico e sua atuação nas áreas de Prospecção de Petróleo, Exploração Mineral, Recursos Hídricos e Meio Ambiente, bem como na Geofísica Global, estimular o interesse dos alunos da Geofísica pelas áreas de atuação do profissional em Geofísica, divulgar as pesquisas realizadas nos diversos cursos de geofísica do Brasil e fomentar a interação entre os profissionais da área no país.

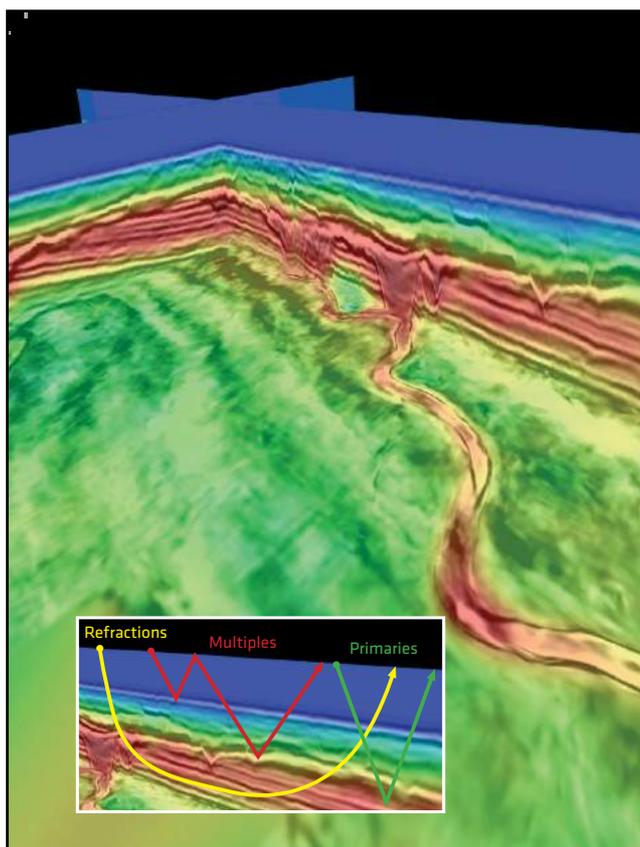
No primeiro dia serão ministrados 4 cursos com carga horária de 8 horas: Camada Equivalente Aplicada ao Processamento e Interpretação de Dados de Campos Potenciais, ministrado por Vanderlei Coelho, do Observatório Nacional; Geofísica Aplicada à Prospecção Mineral, ministrado pela prof^a. Maria Silva Barbosa, da Universidade Federal de Ouro Preto; Geofísica Aplicada à Engenharia Submarina,

ministrada pelo Prof. Arthur Ayres, da Universidade Federal Fluminense, e Processamento Sísmico, ministrado pelo geofísico Rodrigo Portugal, da Halliburton.

As apresentações técnicas estarão divididas pelas sessões de: Geofísica Global, Óleo e Gás; Geofísica Rasa; Geofísica Espacial; Ensino em Geofísica; Cartografia Geológica e Exploração Mineral. Todas serão realizadas nos dias 26 e 27/10.

Neste ano será apresentada pela primeira vez durante o SimBGf a exposição “O que é Geofísica?“, projeto que tem por objetivo divulgar a Geofísica e suas aplicações para alunos e professores das redes de ensino fundamental, médio e técnico. A Exposição é constituída de experimentos Geofísicos idealizados pelo professor Alberto Leandro de Melo, da Geofísica-UFPa, e montados pelos alunos de graduação e pós-graduação da Universidade Federal do Pará (UFPA).

Durante o VII SimBGf ainda será realizada a 38^a. Assembleia Geral Ordinária da SBGf, quando os associados efetivos adimplentes poderão se reunir com a direção da SBGf para a discussão de temas pertinentes à Ciência Geofísica e à entidade. As inscrições no *site* da SBGf estarão abertas em breve, com descontos diferenciados para associados e estudantes, ambos adimplentes. Para mais informações, acesse o *site* <http://simposio.sbgf.org.br>.



Complete Wavefield Imaging

CWI utilizes the complete wavefield uniquely recorded and identified by GeoStreamer® dual-sensor measurements.

The CWI workflow is ideally suited for shallow water environments in areas with complex geological overburdens.

Combining FWI, Wavelet Shift Tomography and SWIM (Separated Wavefield Imaging) provides superior images both in the near surface and at reservoir level, thereby de-risking prospects and increasing the accuracy of reserve estimates.

For information please contact
Stephane.Dezaunay@pgs.com
+55 21 2421 8400



A Clearer Image | www.pgs.com

EVENTOS

Workshop EAGE/SBGf é sucesso de público



Foto: Arquivo SBGf

Participantes em uma das palestras proferidas durante o evento.

Nos dias 6 e 7 de abril, no Golden Tulip Hotel, em Copacabana, Rio de Janeiro, foi realizado o “Third EAGE/SBGf Workshop on Quantitative Seismic Interpretation of Lacustrine Carbonates”, evento fruto de uma parceria entre a European Association of Geoscientists and Engineers (EAGE) com a Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGf).

O objetivo deste evento foi possibilitar o debate entre os especialistas sobre as melhores práticas atuais utilizadas pelos principais representantes técnicos da indústria de óleo e gás.



Foto: Arquivo SBGf

Participaram do evento geofísicos, geólogos e outros exploracionistas com interesse em interpretação sísmica de ambientes carbonáticos nos pré e pós-sal.

O evento foi sucesso de público, contabilizando cerca de 90 participantes, o qual contou com a presença de profissionais de diversas partes do mundo.

Estes participantes consideraram o encontro uma grande oportunidade de aprendizagem e troca de experiências com os outros profissionais que vêm superando os grandes desafios de exploração, desenvolvimento e produção de campos profundos, com reservatórios carbonáticos lacustrinos.

VII Semana de Inverno de Geofísica na UNICAMP

A VII Semana de Inverno de Geofísica será realizada, no IMECC, na UNICAMP, entre 6 e 8 de julho. Este é um evento regular do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Geofísica do Petróleo (INCT-GP/CNPq), organizado pelo Grupo de Geofísica Computacional (GGC) do IMECC/UNICAMP.

O público-alvo são estudantes em fim de graduação ou iniciando sua pós-graduação, que possuam interesse na área de Geofísica Aplicada, principalmente nos temas ligados à exploração de petróleo.

O intuito da Semana de Inverno é estimular o ingresso e divulgar a carreira de Geofísica, franqueando aos alunos de pós-graduação o acesso a temas atuais de pesquisa em Geofísica, principalmente através de cursos introdutórios e palestras com especialistas renomados na área.

Para esta edição haverá 5 minicursos, sendo 3 com a carga de 6 horas e dois com carga de 9 horas.

A lista dos minicursos e instrutores está na página de programação do evento (semanainvernogeofisica.wordpress.com). As inscrições estarão abertas a partir do dia 09 de maio.

Presidente da SBGf inicia ciclo de palestras mensais



Foto: Arquivo SBGf

Jorge Hildenbrand se apresentando na sede da SBGf.

O ciclo de palestras mensais organizado pela Regional Centro-Sul teve início no dia 4 de maio, na sede da SBGf. Por mais de uma hora Jorge Hildenbrand discorreu sobre as tecnologias e aplicações dos métodos eletromagnéticos aéreos, com foco nos sistemas heliportados operando nos domínios do tempo (HTEM) e da frequência (HEM). Com esta iniciativa a Regional Centro-Sul pretende estreitar a relação da Sociedade com seus membros, além de lhes proporcionar oportunidade para ampliar conhecimentos em áreas de seu interesse dentro da geofísica.

NOTAS

Chamada para Revisores



A qualidade e a relevância das nossas comunicações científicas sempre foram aspectos de grande importância para a Sociedade Brasileira de Geofísica. Para garantir tais destaques e mérito das nossas publicações, melhor servindo a comunidade geofísica brasileira, a SBGf convoca novos revisores para a Revista Brasileira de Geofísica (RBGf), entre os acadêmicos e profissionais da indústria da área de Geofísica e correlatas. Os interessados em colaborar conosco devem preencher os requisitos mencionados abaixo. Quem se identificar e preencher esse requisitos, favor entrar em contato conosco.

Requisitos Básicos

Possuir mestrado, doutorado, ou ser professor afiliado à uma instituição acadêmica;

Possuir reconhecida experiência em sua área de pesquisa;

Que sua área de pesquisa esteja dentro do escopo da SBGf.

Requisitos Profissionais

Possuir um bom domínio de leitura e escrita de textos técnicos em língua inglesa;

Enviar o *link* do currículo atualizado na plataforma Lattes, ou arquivo em PDF;

Enviar uma lista de áreas e sub-áreas da sua expertise/especialidade;

Enviar um breve sumário de sua experiência como revisor.
e-mail para contato: publicacoes@sbgf.org.br



A Revista Brasileira de Geofísica (RBGf) é uma publicação trimestral da Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGf), e tem como objetivo principal a divulgação nacional e internacional, especialmente em países de origem ibérica, de artigos técnicos inéditos e originais, nas áreas da Geofísica da Terra Sólida, Ciências Espaciais e Geofísica Aplicada.

As atividades editoriais são realizadas pelos Editores Associados Divisionais, Conselho Editorial, membros do Corpo Editorial e um grupo de revisores cujos nomes são periodicamente divulgados.

Os manuscritos submetidos à RBGf são analisados por pelo menos dois revisores selecionados pelos Editores e mantidos em anonimato. Por outro lado, a autoria do artigo não é divulgada aos revisores, durante a fase de revisão (Blind Review).

Aos autores são reservados todos os direitos autorais, permanecendo aos leitores, entretanto, a permissão para citações de partes do texto e a reprodução não comercial de figuras, mapas e outras ilustrações, quando houver a devida referência ao artigo em questão.

Acesse www.rbgf.org.br

Processo Seletivo para Doutorado em Geofísica



O Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Observatório Nacional (Rio de Janeiro) está com inscrições abertas até 03 de junho de 2016 para os cursos de Doutorado, com ingresso em julho deste ano. O Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Observatório Nacional está dividido em duas linhas: Geofísica da Terra Sólida e Geofísica Aplicada. Haverá disponibilidade de bolsas da CAPES.

Maiores informações poderão ser obtidas no Edital disponível em www.on.br/dppg/geofisica/. Para esclarecimentos adicionais contacte a secretaria da Divisão de Programas de Pós-Graduação do Observatório Nacional, cujo endereço de e-mail é: dppg@on.br ou ligue para: (21) 3504-9189/ (21) 2589-7463.

Sem limites,
Sem fronteiras

Volume sísmico

Seção delgada

Reservatório de Atlanta

Testemunho

A QGEP é a única empresa brasileira independente de E&P a operar na zona de exclusão do pré-sal, na Bacia de Santos. Com uma proposta inovadora e apoio da FINEP, está desenvolvendo com sucesso o reservatório de óleo pesado (14° API) em águas ultraprofundas do Campo de Atlanta (BS-4).

queiroz galvão
EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO

www.qgeg.com.br

ESPECIAL

Sismicidade do Brasil

Na matéria especial desta edição do Boletim SBGf convidamos os especialistas Alberto Veloso, George Sand e Joaquim Mendes Ferreira para abordarem a sismicidade. Eles falaram sobre o histórico da sismicidade no Brasil, registros, causas, monitoramento e muito mais. Confira!

Rio de Janeiro

Por Bruna Vaz Mattos



Foto: Arquivo Pessoal

De acordo com o geofísico especializado em Sismicidade, **Alberto Veloso**, o Brasil nunca deixou de ter tremores de terra, e no passado eles aconteciam na mesma proporção de hoje. Com as dezenas de estações sismográficas de alta sensibilidade e monitoramento, registram-se pequenos tremores quase todos os dias. O evento com

a maior magnitude registrada no país foi 6.2 na escala Richter. Isso aconteceu em 1955, em Porto dos Gaúchos, no estado do Mato Grosso (MT). Na época, Porto dos Gaúchos era uma região pouco habitada, e caso o sismo viesse ocorrer novamente nos dias de hoje teria um impacto bastante diferente do que no ano de 1955, devido ao aumento populacional. Em 1968, outra atividade sísmica chamou a atenção dos sismógrafos: durante seis meses, devido aos abalos sísmicos, no município Dr. Severiano-Pereiro, na divisa do Rio Grande do Norte (RN) e Ceará (CE), houve fuga de pessoas e pânico, sendo necessário ao governo federal acudir a população. Novos casos, como a outra série de abalos em João Câmara, no Rio Grande do Norte, (RN), de 1986 a 1991, que destruiu a maior parte da cidade naqueles anos, aliados à necessidade do conhecimento da atividade sísmica, na época, para novas obras em execução no país (usinas nucleares e hidrelétricas) difundiram a importância da sismicidade no Brasil.

O conhecimento da sismicidade é obtido através de três tipos de registros: geológico, histórico e instrumental, sendo os dois últimos de maior importância, pois o registro geológico é feito apenas quando ocorrem grandes terremotos, que deixam marcas na superfície do terreno.

O registro histórico é feito através de depoimentos documentados em jornais, revistas e livros, de pessoas que sentiram o sismo. No Brasil eles eram pouco notados por existir quantidade menor de pessoas – os observadores sísmicos – e assim eram menos noticiados, situação agravada pelos precários meios de comunicação. Os jornais representam a principal fonte de tal informação, porém eles começaram a surgir no país somente no início do século XIX. O registro histórico brasileiro, além de muito recente, está diretamente relacionado ao seu processo irregular de ocupação territorial, com as regiões Norte e Centro Oeste ocupadas tardiamente em relação ao resto do país.

O registro instrumental, o mais recente no país, está ligado ao monitoramento sismográfico de áreas de grandes reservatórios hidrelétricos, cujas construções se deram, especialmente, no final da década de 70 e a partir do início da década de 80.

Podemos dizer que a Sismicidade está sempre ligada à tectônica de placas, no entanto, as tensões tectônicas podem ser induzidas por influência do homem. Para o professor do Observatório Sismológico da Universidade de Brasília (UnB), **George Sand**, no Brasil, os tremores desencadeados por reservatórios recebem destaque, já que o país possui



Foto: Arquivo Pessoal

grandes quantidades de barragens e tremores causados pela exploração mineral e de petróleo. “Essa atividade, em geral, tem magnitude bem menor que os tremores naturais. Pode ser devido à alteração mecânica, com o próprio peso da água, ou pode ser do ponto de vista hidráulico, por infiltração do fluido na subsuperfície, em que a água exercerá uma pressão hidrostática, empurrando o líquido através dos poros das rochas e de fraturas já existentes. Ou mesmo a combinação das duas”, explica. Explosões ou detonações programadas, como os testes nucleares, são casos de eventos não tectônicos.

Ainda há os casos incontrolláveis, como o impacto de um grande corpo celeste contra a superfície terrestre, ou a sua explosão na baixa atmosfera, que poderia ocasionar danos inimagináveis à toda a civilização. Apesar disso, fenômenos como esse são de ocorrência extremamente rara. No entanto, Alberto Veloso alerta que a queda de corpos menores já não é tão rara assim e pode provocar tremores perceptíveis às pessoas. “Estudei um destes casos acontecido em 27/08/1887 no Sudeste brasileiro e os interessados podem buscar na internet pelo título “O terremoto que veio do céu”, conta o geólogo e mestre em geofísica.

A quase totalidade dos terremotos pelo mundo tem origem tectônica, o que primariamente é devido a interação das placas. O Brasil não foge à regra. Já é possível observar pesquisadores brasileiros definindo parâmetros de falhas sismogênicas quando estudam sequências sísmicas mais duradouras em diferentes recantos do país. “Em muitas dessas ocasiões eles conseguem determinar as dimensões, o posicionamento e o tipo do falhamento que produz a sismicidade local. Isto é um avanço notável e coloca lado a lado sismólogos, geólogos e geofísicos estudando os segredos de nossos terremotos”, atesta Veloso.

A Rede Sismográfica Brasileira (RSBR) é importante por permitir ao país um monitoramento com cobertura de quase todo o território nacional, utilizando estações de banda larga e transmissão em tempo real, mapeando toda a atividade sísmica brasileira e auxiliando a defesa civil através dos riscos. De acordo com George Sand, em relação à pesquisa, a RSBR é o maior avanço que os brasilei-

ros tiveram até hoje, pois possibilitará entender o interior da terra, conhecendo sua estrutura e, esse conhecimento é importante tanto para a exploração quanto para entender a dinâmica da terra. “Outro ponto importante é que esses dados são públicos, proporcionando a criação de grupos de sismologia em todo o país, integrando e impulsionando a pesquisa”, afirma o geofísico.

Foto: Arquivo Pessoal



O geofísico **Joaquim Mendes Ferreira**, do Laboratório Sismológico da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (LabSis/UFRN), explica que a RSBR é constituída de quatro sub-redes operadas pelas instituições que a implantaram em quatro regiões:

- Observatório Sismológico da UnB - (RSCN), Região Centro-Oeste e Norte.
- Centro Sismológico da USP - (BRASIS), Região Sul e Sudeste.
- Laboratório Sismológico da UFRN - (RSISNE), Região Nordeste.
- Observatório Nacional ON-MCT (RSIS), Litoral Sul, Sudeste e parte do Nordeste.

Os dados são compartilhados por todas as instituições que podem determinar os parâmetros dos sismos, e o armazenamento geral dos dados é feito no Observatório Nacional (ON). Atualmente, a coordenação da rede é exercida por Marcelo Assumpção, da USP. Além das quatro instituições citadas, outras como a Universidade Estadual Paulista (UNESP), o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), a Universidade Federal do Pará (UFPA), a Universidade Federal da Bahia (UFBA), entre outras, se dedicam ao estudo da Sismologia. “Sempre há alunos e sempre haverá pesquisas nessa área, pois os sismos são um problema real que interessa não só pelo seu efeito direto, como também pelo conhecimento que é possível obter a partir deles”, explica Joaquim. Ainda segundo o especialista, embora cada instituição possua seus projetos, o de maior abrangência da área é o do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) de Estudos Tectônicos, coordenado por Reinhardt Fuck, da UnB.

Alberto Veloso destaca as novas estações da RSBR instaladas ao longo da costa. “Temos expressiva Sismicidade marinha frente ao litoral das regiões Sul-Sudeste e sempre foi difícil localizar estes tremores pela falta de mais sismógrafos. É de se esperar que os instrumentos instalados em algumas de nossas ilhas oceânicas também revelem dados singulares”, aponta Veloso. Os principais grupos de sismologia no país operam porções da Rede Sismográfica com total autonomia, mas isto é feito de forma integrada e os dados são intercambiados. Ele conta que esteve envolvido diretamente com a instalação de estações no Brasil e no mundo, empregando diferentes tecnologias de monitoramento, e diz que a instalação não é a parte mais complicada, ou mesmo mais dispendiosa do processo, que o difícil é manter a estação funcionando contínua e corretamente sob quaisquer circunstâncias. “É um trabalho que não tem fim. E tem de ser assim porque os terremotos não seguem calendários, não têm local e

nem hora para acontecerem. Se você deixar de registrar um evento significativo, por falha instrumental, será realmente frustrante”, explica o geofísico.

A Sismologia é uma ciência que desconhece fronteiras geográficas e por isso o intercâmbio de dados é fundamental para a sua própria existência. Com isso nascem os mais diferentes programas e ao final se consegue registrar com precisão e rapidez terremotos mundo afora. É tradição da sismologia a parceria com instituições internacionais. A sismologia da UnB, por exemplo, nasceu em meados da década de 60, oriunda de dois programas com os governos britânico e norte-americano, visando a instalação em Brasília de estações altamente modernas. Situação parecida aconteceu na UFRN, que mantém um convênio com o United States Geological Survey's (USGS)/ Earthquake Hazards Program, desde 1975, o que permitiu manter uma estação permanente no Rio Grande do Norte ativa até hoje.

Embora a Sismicidade do Brasil não possa ser comparada à dos Andes, por exemplo, por ser do tipo intraplaca, sismos tectônicos que ocorrem no interior de placas tectônicas, sendo assim, não deve ser desprezada. O caso de João Câmara completa 30 anos em 2016 e deve ser lembrado, pois foi capaz de destruir muitas edificações, causando pânico e fuga de grande parte da população da cidade. Se não é possível evitar os sismos, deve-se ao menos estudá-los para tentar mitigar o efeito dos mesmos.

Grupo de GEOFÍSICA COMPUTACIONAL



CONTATO: pmario@tecgraf.puc-rio.br | 21 99874 2888

Os surpreendentes terremotos intraplaca

Por Alberto Veloso

Geólogo e mestre em geofísica, autor dos livros “O terremoto que mexeu com o Brasil” e “Tremeu a Europa e o Brasil também”.

O Brasil é um país grande com terremotos pequenos e, evidentemente, isto é bom para todos nós. Mas a verdadeira história não termina aí. Sabemos que a baixa incidência de nossos tremores é explicada pelo Brasil estar no interior de uma placa tectônica muito extensa, portanto distante de suas bordas ativas, onde os terremotos são numerosos, grandes e bem perigosos, como no Chile e no Peru. Entretanto, muitos não sabem e outros se esquecem que as regiões intraplaca também abrigam abalos de magnitudes elevadas com potencial para grandes destruições. Alguns acontecem onde não existia qualquer histórico de sismos importantes ou mesmo nenhuma sismicidade atual.

A raridade dos sismos intraplaca mostra duas facetas: a boa é que eles acontecem só de vez em quando, a ruim é que isso complica seus estudos, já que seus períodos de retorno traduzem-se em centenas, ou milhares de anos e eventuais vestígios superficiais acabam desaparecendo. Assim, os infrequentes terremotos intraplaca acabam sendo menos compreendidos do que os corriqueiros sismos que sacodem as bordas das placas tectônicas.

Resta, então, um problema sismológico interessante e desafiador a enfrentar, justamente por aqueles que convivem com poucos sismos. Mas, se tão poucos são, por que preocupar-se com eles? Melhor lembrar alguns efeitos desses tremores:

- Tangshan, China, 28/07/1976, magnitude (M)7.8, cidade aplainada, aproximadamente 650 mil mortos;
- Bhuj/Gujarat, Índia, 26/01/2001, (M)7.6, 20 mil mortos, 15 milhões de pessoas afetadas, destruição maciça de vilas e pequenas cidades;
- New Madrid, Estados Unidos, fevereiro/1812, (M)7.5, alterações na topografia, mudanças no curso do Mississippi, cerca de 10 mortos pela baixa densidade demográfica.

E no Brasil, poderia ocorrer terremotos tão fortes assim? Seriam desastrosos?

Quanto à magnitude e considerando todo o país, os nossos sismólogos esperam a ocorrência de um sismo de magnitude ≥ 5 a cada 5 anos, em média. Para magnitude 6 o tempo estimado seria a cada meio século e, para 7 talvez a cada cinco séculos. Os dois maiores sismos registrados no Brasil (M6.2 e 6.1) aconteceram há 60 anos, com um surpreendente intervalo de apenas 28 dias, mas, desde então, nada tão grande foi detectado.

Procurando por sismos históricos - aqueles não registrados por estações sismográficas - reestudamos um tremor marinho em 1769, com magnitude estimada da ordem de 6. Outra investigação em curso está apontando, no século 19, um tremor de magnitude até um pouco superior ao anterior. Olhando mais para trás, reavivamos dados de um abalo em 1690 nas proximidades de Manaus - que ainda nem existia - e que poderia ter alcançado magnitude em torno de 7. Portanto, em períodos de nossa história, entre os séculos 17 e 19, tivemos abalos de porte, mas que, aparentemente, não produziram danos materiais acentuados, ou mesmo mortes.

Importante considerar que sismos médios e moderados também podem resultar em enormes tragédias. Em 29/02/1960, a cidade de Agadir, Marrocos, pela ação de um terremoto de M5.7 e posterior incêndio, perdeu cerca de 12 mil habitantes, um terço da população local. A razão de tanta destruição foi sua profundidade rasa, epicentro praticamente no meio da cidade dotada de construções vulneráveis a terremotos. Em 21/02/2011, a simpática Christchurch, que não está em região intraplaca, mas na altamente sísmica e rica Nova Zelândia, também pagou preço alto: 166 mortos e 100 mil edificações danificadas, embora muitas delas seguissem códigos anti-sísmicos. O tremor, além de raso e próximo do centro urbano, produziu o fenômeno liquefação, o que foi fatal para muitas construções.

Por ora, entre nós, o exemplo vem de João Câmara, no Rio Grande do Norte, cujo abalo principal M5.1, em 30/11/1986, se viu entremeado por milhares de outros menores, alguns bem significativos. Contaram-se mais de 4 mil construções danificadas e cerca de 26 mil desabrigados. Foco raso, epicentro próximo de construções frágeis, sem reforço estrutural e com telhados pesados explica muito dos danos observados - e tal padrão construtivo espalhou-se por todo o país.

Estaria o futuro nos reservando algum evento sísmico marcante?

15th International
CONGRESS OF THE



**BRAZILIAN
GEOPHYSICAL
SOCIETY
&
EXPOGEF**

31 July - 03 August | 2017
Rio de Janeiro
SulAmérica Convention Center



A Rural do Dirceu e o Jipe do Waldemar

Por Roberto Breves Vianna

Geólogo pela USP; Pós-graduado em Geofísica pela UFBA (Convênio CENAP/Petrobras); Safety Manager (Austin, Texas, EUA); Engenheiro em Segurança do Trabalho e Perito Judicial em Insalubridade e Periculosidade pela Uff

Os que trabalharam na RPBA na segunda metade da década de 60, conhecem de sobra estas estórias que vou contar e as pessoas envolvidas, mas não custa lembrá-las. Ao meu ver é uma forma de homenagear colegas tão queridos e que já não estão mais entre nós.

Conheci um dos personagens do título de uma forma inesperada e que retrata bem a personalidade do dr. Waldemar de Assis, na época responsável pelo departamento de exploração da RPBA.

Estava eu já há dois anos e tanto na Amazônia, geofísico de campo lotado na ES-2, com incursões nos rios Tapajós, Solimões, Madeira, Abacaxis, Uatumã, Nhamundá, Trombetas... enfim, um legítimo caboclo do beiradão, quando recebi a missão de viajar para a Bahia, para fazer o que acredito ter sido um teste no CENAP. A Petrobras havia decidido implantar um curso de geofísica em convênio com a Universidade Federal da Bahia (UFBA) e eu havia sido indicado como um dos possíveis alunos da primeira turma do CBAG (Curso Básico de Geofísica).

Recebi o radiograma decifrado pelo tele-teco, ainda na equipe, com tudo já programado, sem chance de alteração. Assim era naquele tempo, missões eram para ser cumpridas, sem perguntas. Comentei com o colega Lobo Leite sobre a minha viagem e como era comum naquela época de difícil comunicação, ele me pediu para levar uma encomenda e correspondência para entregar em Salvador, Bahia.

Juntei tudo na minha mucuta, embarquei no CAPET PT-AXL, apresentei-me em Belém ao Rui Bahia, fui instruído sobre o que devia fazer, e naquela noite mesmo estava à bordo do Viscount da VASP, rumo à Salvador, com direito a pousos em São Luis, Teresina, Recife, Maceió e Aracaju.

Na capital baiana, já conhecida, pois havia estagiado na RPBA no último ano de estudante, fui direto ao hotel indicado no "voucher" em meu poder, tomei um banho e fui para o CENAP. Era assim que estávamos acostumados a fazer, não podia haver perda de tempo, e quanto mais cedo nos desincumbíssemos da missão, melhor seria para todos.

Não me lembro mais do que me foi perguntado, nem do que falei à dupla Nelson/Tibana, na época responsáveis pelo CENAP. Sei apenas que entrei em um ônibus, fui para o refeitório da Jequitaiá, almocei e voltei para a entrevista, e pelo fim da tarde estava dispensado.

Lembrei-me então da encomenda do Lobo Leite, voltei ao hotel e resolvi telefonar para o dr. Waldemar, que eu não conhecia, e combinar uma forma de entregá-la. Dr. Waldemar era o chefe, imaginei que nem iria falar com ele, falaria com sua secretária e no dia seguinte levaria a encomenda e deixar com ela. Isso foi o que imaginei...

Identifiquei-me ao telefone como um geofísico da SRAZ, que tinha uma encomenda para entregar ao Dr. Waldemar. Para surpresa minha, a secretária transferiu a ligação e houve então o seguinte diálogo:

- Onde você está hospedado, meu caro colega?

- Bem, dr. Waldemar, a Petrobras me colocou no Hotel Palace na rua Chile.

- OK, passo por aí, às seis horas, depois do expediente, vou com meu jipe, me espere na porta e você vai jantar em casa. Está bem assim?

-OK, está ótimo!!

E mais não foi dito, para a minha perplexidade. Eu já estava há quase três anos em Belém e nunca havia sido convidado para ir à casa de nenhum colega, verdade seja dita, pouco parava na cidade, chegava do campo, preenchia papelada de folga e ia direto para o aeroporto, passar minhas folgas no sudeste. Mas em Salvador, no primeiro dia, logo o "big boss" me convidava para jantar e, além disso, ia me buscar no hotel!!! Me belisquei para ver se isso estava acontecendo comigo mesmo!

Antes das seis não podia fazer o chefe esperar, então lá estava eu na calçada da rua Chile, quando se aproximou um jipe novinho em folha, pintura brilhando, capota encerada e um senhor simpático de óculos na direção. Parou do meu lado e perguntou, com sotaque mineiro: - Vianna?

Bem, não havia dúvidas que era o dr. Waldemar mesmo!! Conheci naquele momento dois personagens interessantíssimos. O jipe de ferro e aço e pisantes de borracha e o dr. Waldemar, de carne e osso e um coração maior do que o peito!

Ele me deixou logo à vontade, foi perguntando sobre nosso trabalho na Amazônia, quis saber como estava de saúde o Lobo Leite, que era seu parente por parte da esposa. Acho que não ficou muito tranquilo ao saber que eu já tinha sido premiado com três malárias... mas disse que o colega estava bem, pouco saía da balsa, onde as camas tinham mosquiteiro e a probabilidade de contrair a doença era remota...foi uma mentirinha inocente, para tranquilizar o chefe.

Abro aqui um parêntese para dizer a vocês que na minha adolescência/juventude eu era vidrado em mecânica de veículos, aí incluídos motos, carros, jipes e até caminhões. Eu trabalhei como aprendiz de mecânica em uma oficina perto de casa, sabia desmontar (e montar perfeitamente) carburador, bomba de gasolina, distribuidor, fazia regulagem de motores e sabia até mesmo mexer em caixa de direção, caixa de marchas, embreagem e diferencial. Quando entrei na Petrobras, acho que era o único geólogo a ter carteira de motorista profissional. Daí ter-me apaixonado de imediato pelo jipe do dr. Waldemar,

o motor rodava macio, marcha lenta muito bem regulada, embreagem sem tranco, enfim, um brinco como dizíamos em nosso jargão. O dr. Waldemar, que tinha um carinho especial pelo jipinho, gostou do que eu disse e passou a discorrer sobre o tratamento especial que dava a ele. Garagem coberta, sombra no estacionamento da Jequitaia... enfim, um desbunde.

Bem, chegamos ao seu apartamento, se não me engano era no bairro do Canela, próximo ao Campo Grande. O jantar foi agradabilíssimo, tanto o dr. Waldemar quanto a esposa me deixaram à vontade. Entreguei a encomenda, fizeram muitas perguntas, afinal eu tive um tratamento de rei. Eu, um geofísico B, pouco mais que um estagiário!!! Foi uma experiência memorável. Após o jantar, o dr. Waldemar insistiu em me levar de volta ao hotel, enfim um perfeito cavalheiro.

Isso aconteceu lá pelo início de 1965. Tempos depois, eu frequentei o CBAG em 1966/1967, e fui ao final do curso transferido para a RPBA, em 1968.

Agora, falemos do outro personagem, Dirceu Cesar Leite.

Dirceu já tinha passado pela SRAZ e deixado estórias por lá. A mais citada foi uma excursão no campo, no estado do Acre, na região do rio Moa, onde Dirceu era chefe de uma TG. Uma comitiva com *big bosses* do Rio de Janeiro e Belém, onde pontificavam a presença de Walter Link, Richard Blankenagel, Phillipe Paris, Jarbas Passarinho e outros figurões, viajou para Cruzeiro do Sul, com o objetivo de conhecer o trabalho das equipes de geologia de superfície. Dizem as más línguas que o encarregado de preparar o roteiro da viagem por rio e terra, que não era outro senão Dirceu, resolveu programar uma verdadeira marcha forçada pela selva, com direito a navegação pelo rio Moa e caminhadas noturnas para ver se os visitantes aguentariam. Quem conta muito bem este episódio é o colega geólogo Francisco Bezerra, no texto "Um Superintendente Destemido", relatado no livro "Aventuras de um Geólogo Pioneiro na Amazônia". De qualquer maneira, a excursão ficou nos anais da estória e, ao que parece, os gringos penduraram a gravata, mas o major Passarinho aguentou firme...

Dirceu, na época da minha estória, estava em Salvador e algumas já havia aprontado...

Uma das mais badaladas, foi seu retorno do campo, de folga. A previsão de chegada em casa era para o almoço, mas nada dele aparecer. A família ficou preocupada, foi confirmada a saída do campo, mas nada do Dirceu chegar. Contatos com a Polícia Rodoviária descartaram a possibilidade de acidente. E assim se passaram três dias, a família sem notícias, todo mundo procurando o Dirceu na Bahia, quando no quarto dia aparece ele, lampeiro e sorridente, como se nada houvesse acontecido.

Bem, sua versão foi a seguinte. Já estava chegando a Salvador, quando ali em Água Comprida encontrou um grupo de estudantes pedindo carona. Conversa vai, conversa vem, eram estudantes cario-

cas que pretendiam ir à Salvador, onde iriam tratar de arranjar dinheiro para comprar passagem de ônibus para o Rio de Janeiro. Dirceu se apiedou dos "meninos" e resolveu levá-los para casa, a 1.600km de distância... E se assim pensou, assim o fez, dois dias para ir, dois dias para voltar e sua boa ação foi cumprida... Há versões desencontradas do episódio, alguém falando que eram "meninos e meninas", mas eu paro por aqui...dá para aquilatar bem o enorme coração do Dirceu.

Na ocasião eu estava recém-casado e morava em um apartamento no Loteamento Clemente Mariani, um local extremamente apazível, principalmente pela visão maravilhosa que tínhamos ao regressar para casa, no entardecer. No final do Corredor da Vitória começava a Ladeira da Barra, e ao descê-la, um dos mais lindos pôr-do-sol do mundo ficava ao nosso dispôr. Só quem viu pode aquilatar o quão belo era, olhar as águas da Baía de Todos os Santos refletindo o brilho do sol em suas águas azuis. Bonito demais para expressar em palavras!!

Mas havia outros atrativos. Um deles era ver a casa que Dirceu havia construído no terreno onde pontificava a mansão do ex-ministro Clemente Mariani. Dirceu havia iniciado uma reforma para ampliar a casa e após algum tempo a prefeitura embargou as obras. Motivo? Na visão dos engenheiros da prefeitura, estava sendo construído um túnel por baixo da mansão, mas Dirceu jurava que era só um buraquinho de nada... enfim, prevaleceu a lei do quem pode mais, manda mais e a obra foi embargada.

Interessante também era a ideia do Diceu, quanto à condução de energia elétrica da rede local para o quadro de disjuntores. Dirceu usou fios de cobre desencapados, porque alegava ele que fios encapados roubavam energia... Isso durou até que alguém desavisado encostou nos fios, sofreu um choque tremendo e quase morreu. Só então instalaram-se fios desencapados...

Uma característica do Dirceu era ser amigo de todo mundo e isso incluía desde os chefões até os peões menos qualificados. Ele não fazia distinção, era tudo amigo. Lembro-me de uma festa na casa do Zé Adriano Lopes (Formigão), meu vizinho, na Av. Antonio Carlos Magalhães. A festa estava muito boa, rolando um som muito bacana, quando de repente um trator começou a trabalhar, do outro lado da avenida. Não precisa dizer que o silencioso do trator não funcionava, o barulho era ensurdecedor. Dirceu falou, "deixa comigo", atravessou a rua e logo depois o barulho acabou, para alívio de todos. E lá vem Dirceu, conversando animadamente com o tratorista, levou-o até um barril de chopp, deu um copo a ele e disse: - fique à vontade!!!

Problema resolvido, à maneira do Dirceu...um coração de ouro também.

Mas há também um outro personagem de ferro e aço nesta estória e vou mencioná-lo agora.

Na Jequitaia todos conheciam a Rural do Dirceu. Principalmente pelo barulho, quando chegava,

MEMÓRIA DA GEOFÍSICA

porque Dirceu dizia que o silencioso "roubava potência do motor", e fazia questão de tê-lo sempre esburacado. Além disso, era difícil definir o ano de fabricação, tais as mudanças na aparência do carro. Dirceu achava que porca e parafuso podiam muito bem ser substituídos por arame e da palavra passava à ação, os dois parachoques eram presos com arame bem à vista. A grade do radiador era mista, à esquerda era da Rural 59 (importada) e da direita da Rural 63 (fabricada no Brasil). Para abrir as portas, só por dentro, as maçanetas externas não funcionavam. A razão, segundo o Dirceu, era "segurança". Isto dizia ele, porque eu acho que não existiria na Bahia ladrão de carro que se aventurasse a roubar semelhante troféu...

Quem se interessasse em abrir o cofre do motor iria ver muita peça amarrada com arame, a começar da caixa de direção, que segundo Dirceu, assim ficava mais macia. Lembro a vocês que na época nem pensar em direção hidráulica. A bateria era também amarrada, ficava mais fácil tirar em caso de pane...

Muitas vezes, à caminho do CENAP eu via a via crucis do Dirceu em ligar o motor e até parava para ajudar. Motor de arranque não funcionava, pois a bateria vivia descarregada. Como a casa do Dirceu ficava em uma descida, o carro já era estacionado em posição estratégica, de manhã era só tirar as pedras que serviam de freio de mão, dar um tombo, correr atrás do carro, abrir a porta, pular dentro, engatar uma segunda e a Rural, aos trancos e barrancos, finalmente funcionava. Era divertido ver como nosso amigo se virava. Na volta, sempre havia pessoas de bom coração que se prestavam ao favor de "dar um tombo"...

Mas o que era mais intrigante para uma pessoa, digamos assim, um tanto quanto negligente com seu carro, era o extremo cuidado que Dirceu tinha pelo jipe do Waldemar. Na época, o óleo do cárter e do filtro de óleo era trocado a cada 1500 km. Dirceu e Waldemar foram colegas em Ouro Preto e o Dirceu sempre verificava no estacionamento da Jequitiaia, o selo que os postos de gasolina colavam no parabrisas dos carros, onde ficava marcada a quilometragem exata para nova troca. E Dirceu sempre alertava o dr. Waldemar. Mais do que isso, Dirceu se prontificava a levar o jipe para o posto, na data apazada, dizia ele para preservar o patrimônio do chefe.

Tanta displicência com sua Rural e tamanho cuidado com o jipe do Waldemar despertaram minha curiosidade. Comentei o fato com o Lúcio Victoria, na época meu chefe direto, eu, ele e o Jaime Paulino, fazíamos parte do chamado "Grupo de Integração do Tucano". Nome tão pomposo apenas para nomear uma equipe responsável pela reinterpretação das linhas sísmicas detonadas na bacia e fazer uma programação para futuros trabalhos.

Lúcio também achou estranho e combinamos, na próxima troca de óleo, discretamente seguir o Dirceu, na sua ida ao posto.

E então descobrimos o motivo real de tamanho cuidado. Dirceu levava o jipe ao posto, onde já ti-

nha guardadinha uma lata de cinco litros, vazia. Ele mesmo abria o cárter, escorria o óleo e guardava na lata. Depois, abria o filtro de óleo, tirava o elemento filtrante e o litro de óleo que ali era colocado e separava. Concluída a troca, com óleo novo, de preferência Castrol multiviscoso, Dirceu retornava ao estacionamento e dizia ao dr. Waldemar: - Missão cumprida, chefe. Não aceitava agradecimentos, dizia que gostava tanto do jipe quanto o chefe, fazia aquilo por gosto.

Bem, mas não era só por isso... O óleo guardado na lata era transferido para o cárter da Rural, o elemento do filtro de óleo também, e dessa forma Dirceu assegurava, grátis, ou como se diz hoje 0800, a cada 1500 km do Waldemar a troca de óleo de sua possante Rural...

Curta a SBGf
no facebook!



www.facebook.com/sbgf.org

GEO
hub

Uma empresa brasileira fornecedora
de serviços e produtos no setor de
óleo & gás e mineração.

- > Extensivo Banco de Dados de Sísmica e Poços
- > Gerenciamento de Dados de E&P
- > Projeto de Aquisição Sísmica
- > Interpretação Geológica e Geofísica
- > Avaliação de Prospectos e Reservas
- > Estudos Multiclientes
- > Sistema de Gestão de Conteúdo Local - ginlocal
- > Portal de informação E&P - geopost

www.geohub.com.br

+55 21 3535 - 9664 / contato@geohub.com.br

Fundo SBGf 2015



O Fundo da SBGf visa ampliar as ações de promoção da geofísica no Brasil. Através do Fundo, instituições e empresas podem contribuir com recursos financeiros que serão utilizados no desenvolvimento de profissionais e disseminação do conhecimento no setor.

As empresas que fizerem parte desse empreendimento farão contribuições anuais. Em contrapartida, se tornarão associados corporativos da SBGf, além de receberem uma série de benefícios, como publicação de anúncios, franquia de anuidade para seus funcionários e exposição da marca do site e no newsletter digital.

Para outras informações sobre o Fundo SBGf envie mensagens para sbgf@sbgf.org.br ou acesse sbgf.org.br.

Diamante



PETROBRAS

Ouro



Prata



Bronze



Sismicidade Induzida por Reservatório (SIR): casos brasileiros

Por Lucas Vieira Barros - Observatório Sismológico da Universidade de Brasília (lucas.v.barros@gmail.com)

Marcelo Assumpção - Centro de Sismologia da Universidade de São Paulo (marcelo@iag.usp.br)

Luiz Carlos Ribotta - Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo

Vinicius Martins Ferreira - Geociências Aplicadas da UnB (vinicius2002@gmail.com)

Introdução

Os recentes acontecimentos em Mariana/MG, dado à sua importância para segurança de barragens, reacenderam no Brasil as discussões sobre o fenômeno da Sismicidade Induzida por Reservatórios (SIR) artificiais, bem como pelo estabelecimento de medidas mitigadoras do risco a que estão sujeitas áreas onde são estabelecidas grandes obras de geoengenharia. O fenômeno da SIR foi observado pela primeira vez há cerca de oito décadas. Contatou-se que algumas obras de geoengenharia podem influir na maneira como os esforços crustais são liberados na forma de terremotos. O enchimento de grandes reservatórios, a exploração de minas subterrâneas, a injeção de fluidos sob alta pressão em poços profundos, a remoção de fluidos na exploração de petróleo e os efeitos posteriores a grandes explosões nucleares podem provocar uma categoria especial de terremotos denominada terremotos induzidos ou terremotos desencadeados. Este fenômeno tem recebido diferentes denominações: sismicidade induzida pelo homem (man made earthquake), sismicidade induzida, sismicidade artificial ou sismicidade desencadeada. Algumas dessas denominações passam a impressão errônea de que atividades humanas são a causa principal dos terremotos. Deve ficar claro, no entanto, que a ação humana sobre o ambiente físico, na produção de grandes obras de geoengenharia, apenas dispara o processo de liberação de esforços já existentes nesses locais.

Para Simpson (1986), as denominações sismicidade desencadeada e/ou sismicidade artificial parecem ser as mais apropriadas para expressar a natureza de disparo da ação do homem sobre a natureza. Talwani (1995) distingue apenas duas denominações: sismicidade induzida (induced seismicity), quando a sismicidade resulta de uma variação substancial nos esforços e/ou na pressão nos poros; e sismicidade desencadeada (triggered seismicity), quando a crosta está suficientemente próxima do estado de ruptura devido a processos tectônicos naturais, e, portanto, uma pequena variação nos esforços e/ou na pressão nos poros desencadeia os terremotos. Para Klose (2013) a distinção fundamental entre terremoto desencadeado e induzido é que o primeiro poderia acontecer normalmente em algum tempo futuro, já um terremoto induzido poderia não acontecer no futuro sem a presença da obra de geoengenharia. Neste texto será usado indistintamente o termo sismicidade induzida significando ambos os casos, mesmo porque, na prática, é extremamente difícil separá-los.

Por estar relacionado com grandes obras de geoengenharia, o fenômeno da SIR pode apresentar grandes impactos sociais, econômicos, ambientais, jurídicos etc., já que os locais de ocorrência estão quase sempre próximos de construções sensíveis e também de áreas povoadas. Terremotos induzidos com grandes magnitudes já ocorreram, produzindo mortes e severos danos às construções. O sismo induzido pelo Reservatório de Koyna, Índia, em 1967 (magnitude de 6,5), causou 200 mortos, 1.500 feridos e extensos danos à estrutura da barragem e em cidades vizinhas (Gupta, 1976, 1992). Terremotos nos reservatórios Kremasta (Grécia), de magnitude 6,3, de Hsinfengkiang (China), magnitude 6,1, de Oroville (Califórnia) 5,9, também produziram danos significa-

tivos em áreas populosas nas imediações desses reservatórios. A maior magnitude pode ter sido em Wenchuan, em 12 de maio de 2008, induzido pelo reservatório de Zipingpu. Esse terremoto, com magnitude de 7,9 Mw, de acordo com o relatório do governo chinês, foi o mais destrutivo nos últimos 35 anos na China; causou 68712 mortes, centenas de milhares feridos e 17921 desaparecidos. Entretanto, esse é um caso muito controverso (Deng et al., 2010) com evidências de que esse terremoto pode não ter sido induzido ou desencadeado.

Dois fatores principais podem contribuir para o surgimento ou ausência de sismicidade pós-enchimento de um reservatório. O crescimento do esforço vertical, devido à carga do reservatório, e uma redução no esforço efetivo, devido ao aumento da pressão nos poros, podem modificar o estado dos esforços na região do reservatório. Se as variações nos esforços são suficientes ou não para mobilizar estruturas sismogênicas na área vai depender de uma complexa interação entre os esforços induzidos com as tensões preexistentes (próximos ao reservatório) e das condições geológicas e hidrogeológicas na área do reservatório. Os efeitos combinados do crescimento no esforço vertical e da pressão nos poros têm uma grande tendência a aumentar a atividade sísmica em regiões onde o esforço compressional máximo é vertical (falhamento normal). Em regiões onde o esforço compressivo mínimo é vertical (falha reversa), o crescimento do esforço vertical devido ao carregamento tem um efeito mínimo. Para todos os terremotos induzidos por grandes reservatórios, o sistema de esforços, determinados a partir da solução do plano de falha, está de acordo com o campo dos esforços preexistentes na região do reservatório (Snow, 1972).

Terremotos induzidos foram pela primeira vez associados ao enchimento inicial do Lago Mead (EUA) nos anos 30 (Carter, 1945), mas somente na década de 60, após a ocorrência de magnitudes superiores a 6,0, um grande interesse foi dedicado ao campo da sismicidade induzida (por exemplo, Simpson, 1976 e 1986 e Gupta, 1992). Neste sentido, na primeira metade da década de 1970, foram realizadas reuniões, simpósios, etc., em diferentes partes do mundo, todos enfocando o tema. No Brasil o interesse pelo estudo da SIR surgiu com a ocorrência de um sismo de magnitude 3,7 e intensidade V-VI (MM) no reservatório de Carmo do Cajuru/MG. Hoje são conhecidos cerca de 120 casos de SIR no mundo, dos quais 27 são no Brasil (Assumpção, 2015; Klose, 2013; Barros e Fontenele 2012 e Gupta, 2002).

Tipos de terremotos induzidos

Cinco tipos principais de atividades humanas podem afetar o ambiente sismotectônico em suas áreas de influência, através de mudanças no nível da sismicidade local :

- (i) Atividades de mineração e pedreiras;
- (ii) Injeção profunda de fluidos sob alta pressão;
- (iii) Extração de líquidos;
- (iv) Explosões subterrâneas; e
- (v) Enchimento de reservatórios artificiais na construção de barragens.

Os quatro primeiros tipos de atividades, geralmente, induzem a pequenos sismos, com magnitudes não superiores a 5,0 na Escala Richter. Entretanto, relativamente ao tipo (iv), alguns testes nucleares realizados na década de 60, com potência da ordem de dezenas de megatons, produziram sismos artificiais de magnitudes da ordem de 7. Os sismos induzidos por reservatórios, embora sejam geralmente de pequenas magnitudes, podem, às vezes, atingir magnitudes moderadas (entre 5 e 6,5 na Escala Richter). Sismos dessa magnitude podem produzir efeitos macrossísmicos expressivos, com vítimas humanas e prejuízos materiais consideráveis, gerando, portanto, um impacto ambiental e social muito grande (Marza et al., 1999a). Aqui apenas o caso (v) será estudado.

Sismicidade Induzida por Reservatório (SIR)

Este é o tipo mais comum de sismicidade induzida e também o menos entendido. A massa de água do reservatório representa uma carga adicional que causa um crescimento significativo nas tensões que atuam sobre as rochas abaixo do reservatório enquanto o crescimento na pressão nos poros pode ser gerado de duas maneiras: diretamente, através da infiltração da água do reservatório, e indiretamente, por meio do fechamento dos poros e fraturas saturadas abaixo do reservatório. O carregamento superficial produzido por cada metro de água é de 0,1 bar ou cerca de 20 bares num reservatório do porte do reservatório de Itaipu Binacional (com uma altura de aproximadamente 200 m, em sua parte mais profunda, onde, geralmente os sismos são mais frequentes).

Mesmo que o peso da água em reservatórios seja insuficiente para fraturar as rochas do embasamento, a coluna d'água exercerá uma pressão hidrostática, empurrando o líquido através dos poros das rochas e de fraturas preexistentes. O efeito da pressão pode levar meses ou mesmo anos para alcançar distâncias não muito longas, dependendo da permeabilidade do solo e das condições de fraturamento das rochas. Quando a água alcança zonas mais fraturadas, o esforço tectônico efetivo é reduzido facilitando o deslocamento de blocos falhados (veja seção 5).

A SIR é, portanto, um fenômeno dinâmico resultante da interação complexa das novas forças induzidas pelo lago, que passam a interferir sobre o regime de forças naturais previamente existentes. Não se sabe ao certo se o reservatório apenas antecipa a ocorrência de terremotos que viriam a ocorrer de qualquer maneira ou se pode também alterar a magnitude destes.

Características da SIR

Muitos casos conhecidos de SIR exibem um conjunto de características comuns, especialmente durante a fase inicial de enchimento do reservatório, quando, geralmente, os sismos induzidos começam a acontecer.

Relação entre o reservatório e a sismicidade

Tem sido observado no fenômeno da SIR que a profundidade da coluna d'água é mais importante do que o volume total do reservatório e que a atividade sísmica induzida é mais comum em reservatórios com profundidade maior ou igual a 100 m (Simpson, 1976). Contudo, isto certamente não é uma condição necessária e suficiente; existem muitos reservatórios com altura superior a 100 m que nunca apresentaram SIR, como, por exemplo, os Reservatórios de Itaipu/PR (196 m) e de São Simão/MG (128 m), e outros com altura bem inferior a 100 m em que foi observada SIR, como os casos de Carmo do Cajuru/MG (20 m) e Balbina/AM (35 m) (Veloso e Assumpção, 1989). De fato, a Figura 1 mostra que a magnitude dos maiores terremotos induzidos não aumenta com a altura da barragem ou com o volume do reservatório (Simpson, 1976; Awad & Mizoue, 1995).

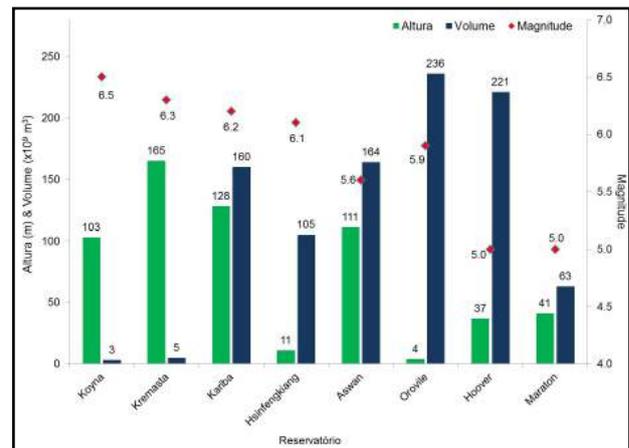


Fig.1 – Relação entre as magnitudes, volumes e alturas de reservatórios para os casos mais importantes de SIR no mundo.

Em muitos casos de SIR, a atividade começa logo após o enchimento do reservatório e acompanha o aumento do nível da água. A maioria dos eventos principais ocorre próximo ou quando o reservatório atinge a sua cota máxima. Outra característica da SIR é que estes eventos tendem a ser muito rasos, como sugerido pela rápida atenuação na intensidade a partir de epicentros de grandes terremotos induzidos, assim como pelos sons audíveis a partir do epicentro de pequenos sismos.

Resposta sísmica de reservatórios

A resposta sísmica de um reservatório foi dividida por Simpson (1986) e Talwani (1995) em duas categorias, dependendo do padrão espacial e temporal da SIR: (i) sismicidade inicial e (ii) sismicidade de estado estável. O primeiro caso está relacionado com a resposta transitória do reservatório, i.e, com o enchimento inicial ou com grandes variações no nível da água do reservatório, sendo observada mais frequentemente. O segundo caso - resposta atrasada - ocorre quando o reservatório, após certo tempo de seu enchimento, atinge a condição de estado estacionário, apresentando uma sismicidade associada mais duradoura. Este tipo é menos frequente.

O estado de sismicidade inicial é atribuído à resposta poro-elástica do reservatório, e é caracterizado por um crescimento na sismicidade à medida que o nível da água sobe, seguido por uma estabilização; algumas vezes os sismos cessam debaixo do reservatório à medida que se espalham por sua periferia. Com o tempo, há uma redução no número e na magnitude dos sismos e a sismicidade retorna ao nível anterior ao pré-enchimento, indicando que cessaram os efeitos poro-elásticos do reservatório. Normalmente, o sismo principal ocorre após o total enchimento do reservatório. A sismicidade inicial resulta tanto de efeitos instantâneos (carregamento devido ao enchimento e descarregamento devido ao esvaziamento da massa de água) como de efeitos atrasados de difusão da pressão de água nos poros e fraturas das rochas. A demora entre o início do enchimento e o sismo principal varia de meses a anos, podendo chegar a até três anos.

Os dois tipos de SIR – inicial e de estado estável ou resposta atrasada – descrevem situações ideais. Os casos reais são, geralmente, mais complexos, mas, por conveniência taxonômica, são usados aqui como referência estes dois gêneros da SIR. No Brasil cerca de 3/4 dos casos de SIR são do tipo inicial.

Fatores que controlam a SIR

A SIR é controlada por três fatores principais: i) Esforços pré-existent na área do reservatório; ii) As condições geológicas e hidrogeológicas e, iii) As características do reservatório.

ARTIGO TÉCNICO

Esforços preexistentes

A literatura tem mostrado que pequenos reservatórios já induziram terremotos que liberam esforços, com magnitudes que excederam em muito o somatório de todos os efeitos adicionais devido ao lago (veja, por exemplo, o caso de Carmo do Cajuru – altura 20m e volume 0,2 km³). Isso deixa claro que esforços pre-existentes são determinantes no processo de ruptura e, portanto, na magnitude das energias liberadas.

A taxa de acumulação de deformação é também um parâmetro importante na caracterização do estado tectônico (Lomnitz, 1974). Em áreas de alta sismicidade e alta taxa de acumulação de deformação, como bordas de placas, por exemplo, as variações nos esforços induzidos pelo reservatório podem ser pequenas, se comparadas com as variações naturais nos esforços. Dessa forma, embora o reservatório possa causar uma pequena variação no regime sísmico, serão pequenos os seus efeitos sobre o nível total da sismicidade nessas regiões. Em áreas onde há uma acumulação moderada de deformação (regiões de baixa sismicidade natural ou áreas adjacentes às regiões de alta sismicidade) as variações nos esforços devido ao reservatório podem ser significativas se comparadas com a taxa de variação dos esforços a partir de processos naturais. Neste caso, os efeitos na sismicidade serão mais óbvios do que em áreas de alta acumulação de deformação. Assim, a possibilidade de um reservatório aumentar a sismicidade depende das características temporais e espaciais do campo dos esforços presentes em sua área de influência.

Condições geológicas e hidrogeológicas

As propriedades hidromecânicas das rochas relacionadas ao fenômeno da SIR foram discutidas por Snow (1972), Brace (1974), Howells (1974), Bell & Nur (1978) e Do Nascimento (2002). A despeito dos estudos realizados em laboratório sobre estas propriedades, pouco se avançou, especialmente devido às grandes dificuldades de ordem prática para se mapear uma imensa quantidade de rochas abaixo e nas vizinhanças de um reservatório quanto à porosidade, permeabilidade, existência de falhas, fissuras etc., nas profundidades de sismos induzidos (Assumpção et al., 2002). Desta forma, pouco se sabe sobre a permeabilidade em zonas de falhas e sobre a pressão nos poros a essas profundidades. Aliado a essas limitações de conhecimentos, poucos são os dados disponíveis sobre o estado dos esforços tectônicos em áreas de reservatórios. No entanto, sabe-se que a permeabilidade, que determina a velocidade de difusão da pressão de fluido, controla o volume de rochas afetadas, podendo ser um dos fatores mais importantes na mudança do nível da sismicidade nas vizinhanças de um reservatório (Do Nascimento, 2002).

A existência de fraturas e falhas, além de gerar uma zona de fraqueza devido à baixa resistência à ruptura, facilita a penetração do líquido até as zonas mais profundas e distantes do reservatório, aumentando a pressão nos poros. Assim, dependendo da orientação dos esforços naturais em relação ao sistema de falha, um pequeno efeito do reservatório pode ser suficiente para desencadear sismos (Assumpção et al., 2002).

O reservatório

O reservatório basicamente afeta o ambiente tectônico, geológico e hidrogeológico de duas maneiras: aumentando os esforços verticais, por meio de seu próprio peso, e por meio do aumento da pressão da água que se infiltra através dos poros, fraturas e falhas. Variações sazonais no nível da água do reservatório podem disparar sismicidade. Veja, por exemplo, o caso do reservatório de Miranda/MG, onde uma variação rápida de 3,4 m no nível da água do reservatório (esvaziamento, em 20 dias), disparou um sismo de magnitude 3,3 e MMI VI (Barros e Caixeta, 2003).

A SIR no Brasil

Os estudos sobre SIR no país se iniciaram em 1972 em decorrência de um sismo de magnitude 3,7 e intensidade VI (MM) no reservatório de Carmo do Cajuru/MG. Se expandiram com a ocorrência do maior sismo induzido por reservatório no Brasil, em 1974 magnitude 4,2 mb MMI VI – VII, que ocorreu na região dos reservatórios vizinhos de Volta Grande/MG (CEMIG) e Porto Colômbia/SP (FURNAS), os quais iniciaram os respectivos enchimentos em abril e setembro de 1973 (Velo, 1992-a). Grupos de pesquisas do Observatório Sismológico da Universidade de Brasília, Instituto de Astronomia e Geofísica da Universidade de São Paulo (IAG/USP) e Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) com o apoio das Companhias Energéticas (CEMIG, ELETRONORTE, FURNAS, ITAIPU Binacional, ELETROSUL e CESP) passaram então a dedicar a partir de então mais atenção ao assunto, principalmente a partir da segunda metade da década de 1970, quando se iniciou a instrumentação de reservatórios, com a instalação de sismógrafos e, em alguns casos, também de acelerógrafos. Carmo do Cajuru foi o primeiro reservatório a ser instrumentalizado. Em julho de 1975 uma rede local de cinco estações portáteis foi instalada, e até hoje continua em operação uma estação sismográfica na área deste reservatório.

Além do grande sismo de 1974, outro de magnitude 4,0 e intensidade MM VI ocorreu no reservatório de Nova Ponte em 1998. Outros vinte sismos induzidos por reservatórios com magnitudes maiores ou iguais a 3 já ocorreram no Brasil e milhares de microtremores foram registrados (Chimpliganond, 2002). Comprovadamente, o país apresenta 27 casos de SIR (Berrocal et al., 1984; Marza et al., 1997 e 1999 a-b; Velo, 1991, 1992 a-b, Velo e Assumpção, 1989, Assumpção et al., 2002, Barros, 2001 e 2008; Ribotta et al., 2006 a-b e 2008, Barros et al. (2015)). Também existem casos de sismos disparados por poços artesianos (veja, por exemplo, Yamabe & Hamza, 1996; Assumpção et al., 2010) e, pelo menos, dois casos de sismos induzidos por minas (minas de Caraíba, BA, e Morro Velho, MG, Relatório nº 169 do Convênio FUB/CEMIG, 2001).

A Figura 2 mostra um mapa de localização de todos os casos de SIR no Brasil sobrepostos à sismicidade natural para sismos de magnitudes 3,0. Além desses vinte e sete casos comprovados, existem outros dois classificados como duvidosos: nos reservatórios de Peti e Três Marias, ambos localizados em Minas Gerais, devido, principalmente, à ausência de monitoramento pré e pós-enchimento do lago (Velo et al., 1987).

De acordo com a classificação apresentada na seção 4, verifica-se que, dos 27 casos de SIR comprovados, 22 são do tipo inicial (81,5%) e os demais cinco casos (18,5%) são do tipo sismicidade de estado estável ou atrasada, sendo que seis casos apresentam mais de um sismo principal, manifestando-se como SIR de tipo “ciclo repetitivo”.

Discussão e Conclusões

Até hoje no Brasil, nenhum evento de origem induzida ocasionou dano às obras civis das barragens ou aos respectivos equipamentos eletromecânicos. O fato de os casos de SIR apresentarem um nível modesto, porém, não é argumento suficiente para minimizar por completo esse tipo de perigo. Pelo contrário, um país com pouco conhecimento sismológico e que ainda necessita implantar grandes projetos de infraestrutura, o que inclui a construção de novas barragens de grande e médio portes, não pode ficar alheio ao problema representado pela SIR.

De acordo com Assumpção et al.(2002), os estudos sobre SIR no mundo têm mostrado que somente uma pequena porcentagem de reservatórios gera SIR. A existência de dezenas de milhares de reservatórios em todo o mundo que não têm causado nenhuma sismicidade observável indica que a probabilidade de um reservatório induzir sismicidade é muito baixa e, além disto, que condições muito especiais são necessárias para a ocorrência de SIR. Entretanto, se pensarmos em termos de Brasil, isto não é verdade, pois a probabilidade de ocorrência de SIR é expressiva, especialmente em se tratando de grandes reservatórios $H > 100$ m, cuja probabilidade é cerca de 50% de chance.

Embora a probabilidade de ocorrência de SIR seja maior para reservatórios maiores, parece não existir relação direta entre o tamanho do reservatório e o tamanho do terremoto induzido (veja Fig. 1). No Brasil existem casos de grandes reservatórios assísmicos e outros com pequenas magnitudes, e pequenos reservatórios induzindo sismos com magnitudes próximas de 4. Carmo do Cajuru, com 20 m e 0,2 km³ apresentou três eventos de ~3,5M). Contudo, para Close, (2013) a magnitude aumenta com a área afetada e a área afetada depende das dimensões da obra de geoengenharia. O que nos parece correto admitir é que as magnitudes observadas dependem do potencial da estrutura sismogênica existente dentro ou nas proximidades do lago, que será ativada pelo reservatório. Isto explica a expectativa de que o maior terremoto desencadeado em uma dada região não pode superar o maior terremoto natural esperado, pois quem determina a máxima magnitude possível para a SIR é o potencial da estrutura sismogênica presente na área.

Os efeitos do reservatório (o peso da água e a pressão nos poros em profundidade) no campo de esforços tectônicos são pequenos, comparativamente com os esforços liberados por alguns grandes terremotos induzidos por reservatório. Isto implica que a SIR somente pode ocorrer se a área já estiver submetida a esforços tectônicos quase críticos. Por esta razão, alguns autores preferem o termo Sismicidade Disparada, ao invés de Sismicidade Induzida, já que é necessário um esforço próximo do crítico para a ocorrência de tremores de terra.

A identificação de casos de SIR é feita de forma indireta, observando-se mudanças no nível da sismicidade devidas à formação do lago. Em regiões sísmicas, como por exemplo, na faixa Sísmica Goiás-Tocantins, é difícil discriminar sismos naturais de sismos induzidos, já que ambos são tectônicos e com semelhantes padrões de formas de ondas.

Portanto, em regiões sísmicas, sismos induzidos podem ser confundidos com sismos naturais, acarretando uma subestimação do número de casos de reservatórios com SIR. Dado essas dificuldades, a identificação de sismos induzidos depende de respostas positivas para as seguintes indagações (Dahm et al., 2010): 1. É o primeiro evento conhecido na região? 2. Os eventos começaram somente após o enchimento do lago? 3. Existe uma clara correlação entre o lago e a sismicidade? 4. Estão os epicentros dentro do lago ou a pouca distância de sua periferia (por exemplo, 5km)? 6. Os epicentros são rasos e especialmente relacionados com a região afetada pelo reservatório? 7. O enchimento do lago pode causar mudanças significativas no esforço e na pressão do fluido capazes de afetar o ambiente sismotectônico? Para responder essas questões é necessário conhecer a sismicidade prévia na área. Isso somente é possível com no mínimo uma estação local de três componentes, pelo menos três anos antes do enchimento do lago. Durante e após o seu enchimento colocar mais duas estações para detectar e localizar possível microsismicidade.

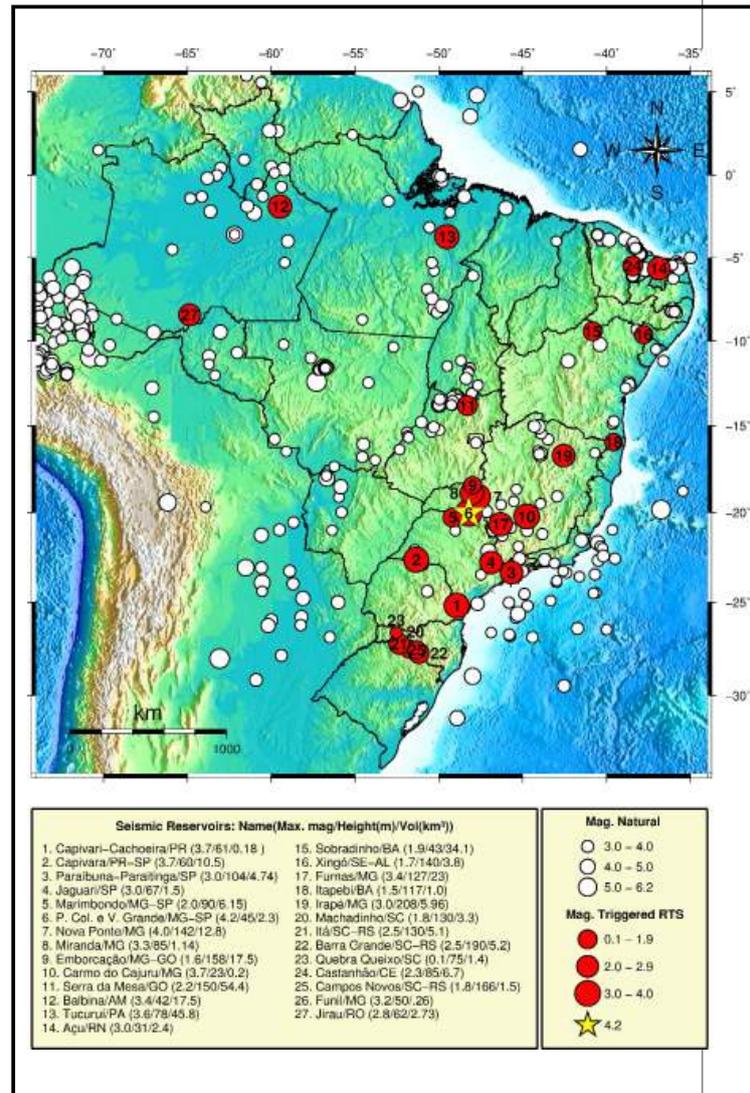


Fig.2 – Mapa com a distribuição geográfica dos casos de SIR no Brasil, círculos vermelhos, juntamente com a distribuição da sismicidade natural, círculos brancos. Os números indicam os casos de SIR com correspondência na Tabela abaixo, com o nome do reservatório (máxima magnitude observada, altura da barragem (m) e volume (km³)). Os tamanhos dos círculos estão de acordo com a magnitude. A estrela amarela representa o sismo induzido de maior magnitude observada.

A SIR é um dentre outros fatores que podem afetar a segurança de uma barragem. No Brasil, felizmente, os sismos até agora registrados atingiram magnitudes reduzidas e as acelerações alcançadas não foram suficientes para produzir nenhum dano às estruturas das barragens, embora suas intensidades máximas, em alguns casos, já tenham atingido os valores de acelerações máximas estabelecidas em sismos de projetos, como é o caso daqueles sismos que produziram $I_0 = VI$ (MM). É importante lembrar ainda uma particularidade da SIR no Brasil: apesar de estar associada, em muitos casos (aproximadamente 22%), com reservatórios de baixa profundidade (menor que 50 m) ou pequeno volume (menor que 1 km³), nestes a respectiva SIR pode ser bastante expressiva (mag. ≥ 3); de forma inversa, alguns reservatórios grandes (profundidade maior que 100 m ou volume maior que 1 km³) podem ter uma SIR inexpressiva (mag. ≤ 2).

A despeito do progresso obtido em explicar a SIR, ainda não é possível prever a ocorrência de sismicidade induzida em futuros reservatórios, devido a dificuldades práticas de se fazer o mapeamento preciso de um grande volume de rochas localizadas abaixo

ARTIGO TÉCNICO

do reservatório e, portanto, de conhecer parâmetros-chave como esforços locais, permeabilidade das massas de rochas e geometria do sistema de fraturas. De um ponto de vista prático, estudos estatísticos de casos prévios podem ser úteis no estudo de avaliação do risco sísmico em futuros reservatórios. Neste aspecto, compilações completas de casos mundiais ocorridos, incluindo comportamento espacial/temporal, podem contribuir para uma melhor avaliação do risco sísmico de futuros reservatórios (Assumpção et al, 2002).

As máximas magnitudes esperadas para um terremoto em uma dada área de barragens devem ser uma preocupação para os engenheiros de segurança de barragens. A maior magnitude observada até hoje no mundo foi M6.5 e no Brasil M4.2. Entretanto, terremotos maiores podem acontecer, aumentando ainda mais o risco de danos às barragens, sendo que esses danos são funções não só da magnitude, mas de uma conjunção de fatores que podem convergir para efeitos danosos. Por exemplo, pequenos tremores de terra associados ao fenômeno de liquefação podem produzir danos significativos à estrutura de uma barragem.

Não existe uma relação clara entre sismicidade natural e risco de SIR. No NE e SE do Brasil observa-se SIR em áreas de expressiva sismicidade natural. Entretanto, no sul existem vários casos, numa região completamente assísmica como é a bacia do Paraná.

É clara a relação entre tamanho do reservatório e o potencial de induzir sismicidade (Tabela 1, Fig. 3). Considerando todos os tamanhos de magnitudes, a chance de um reservatório com altura acima de 100 m induzir SIR, no Brasil, é 50%. Muito alto. Então não é correto dizer que a probabilidade de um reservatório induzir SIR é desprezível! Esta porcentagem diminuiria se considerássemos apenas aquelas magnitude, por exemplo, acima de 3.

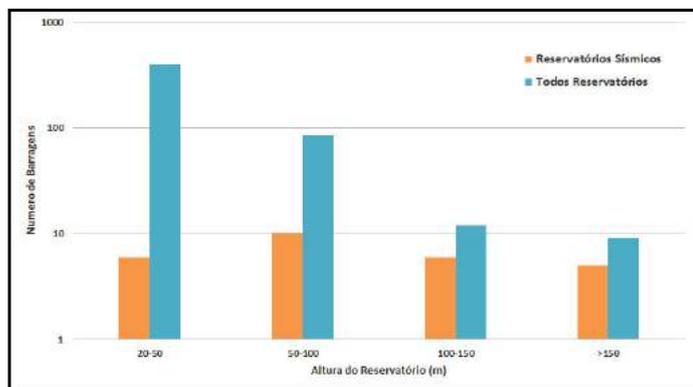


Fig.3 - Relação entre os casos de SIR observados no Brasil e o número total de reservatórios para quatro faixas de alturas. De 20 -50m, 50-100, 100-150 e > 150m. Gráfico Lin x Log. Fonte Comitê Brasileiro de Barragens.

Agradecimentos

Agradecemos às empresas energéticas CEMIG, CHESF, CESP, CEST, COPEL, ELETRONORTE, ELETROSUL, ENERPEIXE, FURNAS, INVESTCO, ITAIPU Binacional, Itaipu Geração de Energia, TRACTBEL e Norte Energia pela valiosa contribuição ao conhecimento da sismicidade brasileira, tanto natural quanto induzida por reservatórios a partir de estações e redes sismográficas instaladas em áreas de suas barragens.

Referências bibliográficas

Assumpção, M., Marza, V. L., Barros, L. V., Chimpliganond, C.N., Soares, J.E., Carvalho, J. M., Caixeta, D.F., Amorim, A. & Cabral, E. 2002. Reservoir induced seismicity in Brazil, *Pure Appl. Geophys.*, 159, 597-617.

Assumpção, M., T. H. Yamabe, J. R. Barbosa, V. Hamza, A. E. V. Lopes, L. Balancin, & M. B. Bianchi, 2010. Seismic activity triggered by water wells in the Paraná Basin, Brazil, *Water Resour. Res.*, 46, W07527, doi:10.1029/2009WR008048.

Assumpção, M., 2014. Monitoramento Sismológico do Reservatório Hidrelétrico de Agua Vermelha, SP/MG: Avaliação da Potencialidade de Ocorrência de Sismos Induzidos - Relatório Técnico Centro de Sismologia do IAG-USP, 29 p.

Awad, M. & Mizoue, M., 1995. Earthquake Activity in the Aswan Region, Egypt. Pageoph: 69 Birkhauser Verlag, Basel, p. 145.

Barros, L.V., Assumpção, M., Quintero, R. e Caixeta D.F., 2009. The intraplate Porto dos Gaúchos seismic zone in the Amazon craton - Brazil, *Tectonophysics* (Amsterdam), Holand, v. 469, 37-47.

Barros, L.V. & Fontenele, D.P., 2012. Sismicidade Induzida por Reservatório no Brasil e o Programa de Monitoramento Sismológico do Reservatório de Estreito. Cap. 4, 33-57. Estreito o novo cenário da água, Organização Ana Luiza Coelho Neto, Rio de Janeiro 2012 E-Papers.

Barros, L.V. & Ferreira, V.M., 2006. Focal mechanism to Furnas reservoir induced seismicity detected in Areado-MG in 2003-2004. In: 2º Simpósio Brasileiro de Geofísica da SBGf, Natal/RN, 21-23 de set., 6p.

Barros, L.V., Caixeta, D.F., Chimpliganond, C.N., Fontenele, D.P., 2005. Evolution of the Areado/MG seismic sequence - started in January, 2004. 9th Int. Cong. of the SBGf, 11- 14 September, Salvador -BA, 6p.

Barros, L.V. e Caixeta, D. F., 2003. - Induced Seismicity at Miranda Reservoir - A fine example of immediate seismic response. 8th Int. Cong. of the Brazilian Geophys. Soc., Rio de Janeiro/RJ, 5p.

Bell, M. Lee & Nur, A. Strength Changes Due to Reservoir-Induced Pore Pressure and Stresses and Application to Lake Oroville. *Journal of Geophysical Research*. California, Vol. 83, No. B9, p. 4469-4483, Sep. 10, 1978.

Berrocal, J.; Fernandes, C., 1996. Estudo de Sismicidade Induzida Na Área dos Reservatórios Hidroelétricos da Chesf. In: Sessão Regular da Academia Brasileira de Ciências: Ciências da Terra e o meio ambiente. An. Acad. bras. Ci. São Paulo, SP, Brasil. v. 68. p. 613-620.

Brace, W. F., 1974. Experimental Studies of Seismic Behavior of Rocks Under Crustal Conditions. *Eng. Geol.*, 8: 109 - 127.

Carder, D.S., 1945. Seismic Investig. in the Boulder Area, 1940-1944, and the Influence of Reservoir Loading Earthquake Activity. *Bull. Seism., Soc. Am.*, 35: 175-192.

Chen Houquin, Xu Zeping and Li Ming, China Inst. of Water Resources and Hydropower Research, Beijing, China.

Chimpliganond, C.N., 2002. Caracterização da Sismicidade Induzida no Reservatório de Nova Ponte/MG, Brasil. Dissertação de Mestrado, IG-UnB.

Dahm, T., Hainzl, S., Becker, D., Bisschoff, M., Cesca, S., Dost, B., Fritschen, R., Kuhn, D., Lasocki, S., Klose, C. D., Meier, T., Ohmberger, M., Rivalta, E., Shapiro, S., Wegler, U. (2010): How to discriminate induced, triggered and natural seismicity, *Proceedings of the Workshop Induced seismicity : November 15 - 17, 2010, Luxembourg, Grand-Duchy of Luxembourg*, (Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, 30), Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, 69-76.

Deng, K., Zhou, S., Wang, R., Robinson, R. Zhao, and Cheng, W. 2010. Evidence that the 2008 Mw 7.9 Wenchuan Earthquake Could Not Have Been Induced by the Zipingpu Reservoir. *BSSA*, Vol. 100, No. 5B, pp. 2805-2814, November 2010, doi: 10.1785/0120090222.

Do Nascimento, A.F., 2002. The role of pore pressure diffusion in a reservoir-induced seismicity site in NE Brazil. Tese de doutorado, Univ. de Edimburgo, 203 p.

Ferreira, J. M., Oliveira, R. T., Assumpção, M., Moreira, J. A. M., Pearch, R. G., Takeya, M. K., 1995. Correlation of seismicity and water level in

the Açú reservoir – an example from northeast Brazil. *Bull. Seism. Soc. of Am.* v. 85, 1483-1489.

Gomide, L. C., 1999. Nature and History of Reservoir Induced Seismicity in Brazil. Dissertação de Mestrado Univ. South Caroline, USA.

Gupta, H. K., 1992. Reservoir Induced Earthquakes. *Developments in Geotechnical Engineering*. Amsterdam - London - New York - Tokyo: Elsevier Scientific Publishing Company, 64, 243-250.

Gupta, H. K. & Rastogi, B. K., 1976. Dams Earthquakes. *Develop. in Geotechnical Engineering*, Amsterdam-Oxford- New York: Elsevier Scientific Publishing Company.

Gupta, H. K., 2002. "A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India." *Earth-Science Reviews* 58 279-310.

Howells, D.A., 1974. Mechanical properties of rock at the depth of earthquake initiation. *Eng. Geol.*, 8: 129 - 134.

Judd (Ed.) *Eng. Geol & Induced Seismicity*, Special Issue, pp. 212, 1974.

Klose, C.D., 2013. Mechanical and statistical evidence of the causality of human-made mass shifts on the Earth's upper crust and the occurrence of earthquakes. *J Seismol* (2013) 17:109-135, DOI 10.1007/s10950-012-9321-8.

Lomnitz, C., 1974. Earthquakes and reservoir impounding: State of the Art, *Eng. Geol.* 8: 191-198.

Marza, V., Barros, L., Soares, J.E., Carvalho, J., Fontenele, D., Chimpliganond, C., Caixeta, D., Gomes, I.P., Furtado, G.O., Carim, A.L., Souza, G.F., Calimam, E. H. & Barros, J., 1999. Aspectos da Sismicidade Induzida por Reservatórios no Brasil. *Sem. Nac. de G. B. Belo Horizonte - MG*, Anais Vol. I, 199-211, 22- 26 de março.

Marza, V., Barros, L.V.; Chimpliganond, C.; Soares, J.E.; Carvalho, J.M. & Caixeta, D.F., 1999b. Precursory Seismicity Pattern Associated to the Nova Ponte (MG) Reservoir Induced Main shock of 1998 May (mr = 4.0). *Proc. 6th Int. Cong. of the Braz. Geophys. Soc.*, 15-19 Aug/99, Rio de Janeiro/RJ, Brazil.

Marza, V. Veloso, J.A.V., Carvalho, J. M.; Barros, L.V., & Gomide, L. C., 1997. Reservoir Induced Seismicity at Nova Ponte (MG): Revisited. *5th Intern. Cong. SBGf*, 968-971.

Mendiguren, J.A., 1980. A Procedure to Resolve Areas of Different Source Mechanisms When Using the Method of Composite Nodal Plane Solution, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 70, 985-998.

Relatório Técnico nº 169, Convênio FUB/CEMIG, SIS/UnB, pp 44, 2001.

Ribotta, L. C., Mioto, J. A. e Regina, J.V.M., 2006a. Sismicidade na área do reservatório de Itá, SC/RS. *Anais do II Simpósio Brasileiro de Geofísica da SBGf*, Natal/RN.

Ribotta, L. C., Mioto, J. A. e Regina, J.V. M., 2006b. Sismicidade na área do reservatório de Machadinho, SC/RS. *Anais do XLIII Cong. Brasileiro de Geologia*, Aracaju, SE.

Ribotta, L. C., Mioto, J. A., Manuzzi, J. L., Carvalho, A. M. B. e Vinciprova, G., 2008. Sismicidade na área do reservatório de Barra Grande, SC/RS. *Anais do III Simpósio Brasileiro de Geofísica*, Belém, PA.

Ribotta, L.C., 1989. Aspectos da sismicidade na área do reservatório de Paraibuna/Paraitinga. *Dissertação de Mestrado*, IAG-USP.

Sbar, M.L., Sykes, L.R., 1973. Contemporary compressive stress and seismicity in eastern North America: an example of intraplate tectonics. *Geol. Soc. Am. Bull.* 84,1861-1882.

Simpson, D.W., 1986. Triggered Earthquakes. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* New York, 14:21-42.

Simpson, D. W., 1976. Seismicity Changes Associated with Reservoir Loading. *Engineering Geology*, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, p. 123-150.

Snow, D. J., 1972. Geodynamics of seismic reservoirs, *Proc. Symp. on Percolation through Fissured Rocks*, Dtsch. Gps, Stuttgart, p. 1-19.

Talwani, P., 2000. Seismogenic Properties of the Crust Inferred From, Recent Studies of Reservoir Induced Seismicity - Application to Koyna,

Current Science.

Veloso, J. A. V., 1992a. Terremotos induzidos pelo homem. *Ciênc. Hoje*, 14: 66-72. Veloso, J.A.V., 1992b. Cases of RIS in the Brazilian Amazon Area. In *Proc. Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, Spain, Vol. I, 269-273.

Veloso, J.A.V., Carvalho, J.M., Fernandes, E.P.; Blum, M.L.B. & Araujo, D.P., 1991. Microearthquakes and the Balbina Lake, a Possible Case of Induced Seismicity in the Amazon Area, *Proc. 2th Intern. Cong. of the Braz Geophys. Soc. (Salvador, Brazil)*, vol. II, 508-512.

Veloso, J. A. V. & Assumpção, M., 1989. Reservatórios sísmicos e assísmicos: uma experiência no estudo de SIR no Brasil, *4th Int. Cong. Braz. de Geophys.* Rio de Janeiro.

Veloso, J. A. V. Data on natural and Induced Seismicity in Brazil. *UNDP/UNDRO/USSR Training Seminar on Engineering Aspects of earthquake Risk Mitigation*, Dushanbe, p. 17-28, Oct. 1988.

Veloso, J.A.V., Assumpção, M., Gonçalves, E.S., Reis, J.C., Duarte, V.M. & Mota, C.G. B., 1987. Registro de sismicidade induzida em reservatórios da CEMIG e FURNAS. *Anais do 5º Cong. Bras. de Geol. de Eng.*, São Paulo, 135-146. Viotti, C. B,

Veloso J.A V., & Gomide L. C., 1997. Induced seismicity at Cajuru Reservoir, Minas Gerais - Brazil, *Proc. 19th Intl. Congress on Large Dams*, Florence Italy, 1211-1225.

Viotti, C.B., Gomide, L.C. & Brito, S.N.A., 1995. Induced Seismicity in CEMIG's Reservoir Minas Gerais - Brazil. *Proc. ISORIS'95*, Nov. 1-5, Beijing, 205-212.

Yamabe, T. H., 1999. Estudos Geofísicos para Explicar a Sismicidade Induzida e Orientar a Exploração de Água Subterrânea em Nuporanga - SP. *Tese de Doutorado*, IAG/USP.

Yamabe, T. H. & Hamza, V. M., 1996. Geothermal Investigations in an Area of Induced Seismic Activity, Northern São Paulo State, Brazil. *Tectonophysics*, v. 253, 209-225.

INVISION
geophysics

TOCANDO O INVISÍVEL

TECNOLOGIA GEOFÍSICA APLICADA AO E&P

- Processamento sísmico
- Pré-condicionamento
- Caracterização de reservatório
- Inversão sísmica

EQUIPE ESPECIALIZADA EM PROJETOS DE P&DI

www.invisiongeo.com.br

Neotectônica e sismicidade no Brasil

Por Francisco Hilario Bezerra - Departamento de Geologia - UFRN (bezerrafh@geologia.ufrn.br)

Joaquim Mendes Ferreira - Departamento de Geofísica - UFRN (joaquim@geofisica.ufrn.br)

Aderson Farias do Nascimento - Departamento de Geofísica - UFRN (aderson@geofisica.ufrn.br)

Resumo

Os estudos que identificam falhas ativas no Brasil são cada vez mais numerosos. Estudos neotectônicos e paleossismológicos têm sido empregados para estender o registro instrumental e histórico de sismos no tempo geológico. Estes estudos têm determinado alguns parâmetros importantes na avaliação do risco sísmico, como a identificação de falhas que se movimentaram nos últimos 10.000 anos, a recorrência de falhamentos e as magnitudes máximas alcançadas em algumas regiões. Exemplos das regiões costeiras do Nordeste, da Serra do Mar e da Amazônia indicam a existência de falhas ativas com períodos de recorrência maiores do que o limite de tempo possível de identificar por levantamentos instrumentais e históricos. Observam-se também paleomagnitudes maiores do que aquelas registradas na sismicidade atual e eventos com efeitos secundários como liquefação de solo.

Paleossismologia em Regiões Intraplaca

É crescente o número de estudos que identificam falhas ativas em regiões intraplaca. Contudo, existem algumas lacunas científicas: (1) a maioria dos sismos intraplaca ocorre em áreas inesperadas, em alguns casos consideradas assísmicas ou de baixa sismicidade (Crone et al., 2003); (2) a ocorrência de sismos intraplaca não reflete o comportamento de longa duração de falhas ativas (Stein et al., 2009); (3) os modelos clássicos desenvolvidos para algumas áreas bem conhecidas, como a região de Nova Madri na parte central dos Estados Unidos, são de difícil aplicação em outros continentes (Bezerra et al., 2011); e (4) apesar de algumas falhas ativas apresentarem características que podem ser associadas com feições conhecidas da geologia de superfície, esta associação tem pouca utilidade prática, pois áreas intraplaca possuem muitas dessas estruturas, das quais poucas são ativas (Stein & Liu, 2009).

A recorrência de falhas ativas está entre 10.000 e 100.000 (e.g., Crone et al., 2003). Entretanto, em algumas zonas sismogênicas esta recorrência pode chegar a apenas 250-400 anos para rejeitos de 5-10 m (Kenner & Segall, 2000). Mas em todas as projeções, a recorrência de falhas ativas em áreas intraplaca está acima do limite de tempo medido pelos levantamentos instrumentais e na maioria dos casos, está acima do tempo de povoamento de áreas como o Brasil (Figura 1). Este fator tem repercussão direta na análise do risco sísmico, no número de falhas ativas mapeadas, na sua localização e na magnitude dos sismos associados.



Fig.1 - Mapa do América do Sul com as localidades citadas no texto. A área em verde afastada dos Andes (branco) corresponde à região intraplaca. A elipse representa a área afetada pelo sismo do Amazonas em 1690 (Veloso, 2015).

A relação entre a magnitude e o registro geológico é outro fator importante. No catálogo histórico de Wells & Coppersmith (1994), a magnitude mínima associada com falhas de superfície de sismos normais é $M_s = 5,2$; esta magnitude sobe para $M_s = 5,8$ para sismos de falhas transcorrentes.

A liquefação é um fenômeno importante associado às falhas ativas. Ela é provocada pelo aumento da pressão de fluidos causado pela passagem de ondas sísmicas, no qual sedimentos perdem a coesão e se comportam como líquidos. A magnitude mínima para a geração de liquefação em sismos rasos é de $m_b = 4,5$, mas ela se torna frequente a partir de magnitudes $m_b = 5,5$ (Obermeier, 1996). Enquanto as rupturas de superfície se concentram na área da falha, a liquefação pode atingir toda a área epicentral (Figura 2).

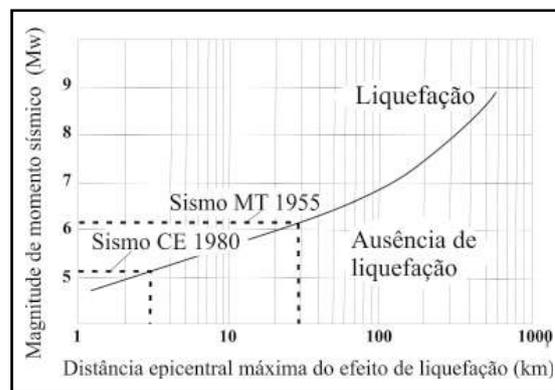


Fig.2 - Relação entre área afetada por liquefação e magnitude (adaptado de Obermeier, 1996), mostrando a área potencialmente afetada por liquefação em alguns sismos importantes.

A identificação de falhas que se movimentaram nos últimos 10.000 anos é um passo importante na identificação de falhas ativas e sua correlação com o registro sismológico tem implicações para o risco sísmico (U.S. Regulatory Commission, 1982). Este é o período de tempo considerado em estudos paleossismológicos, onde se faz uma correlação direta entre sismicidade atual e paleossismicidade (McCalpin & Nelson, 1996). Entretanto, em análises sobre o comportamento de falhas sismogênicas, este período tem sido cada vez mais estendido em estudos neotectônicos para 100.000 anos ou mais.

Sismicidade Histórica e Instrumental - Neotectônica

Poucos sismos registrados instrumentalmente no Brasil devem ter produzidos rupturas de superfície. O sismo de Porto dos Gaúchos (MT) de 6,2 m_b em 1955 (Assumpção et al., 2014), o maior registrado no Brasil, provavelmente produziu ruptura de superfície. Por outro lado, sismos como aquele de Pacajus (CE) de $m_b = 5,2$ em 1980 e de João Câmara (RN) de $m_b = 5,1$ em 1986 ocorreram no limiar de geração de ruptura de superfície. As rupturas de superfície dos sismos acima nunca foram encontradas, pela ausência de estudos neotectônicos (MT) ou pela não ocorrência das mesmas (CE, RN).

O maior sismo histórico do Brasil foi provavelmente o de Manaus de 1690, cujos efeitos foram sentidos numa área elíptica com 2.000 km de comprimento ao longo do Rio Amazonas e uma largura de 1.250 km entre Roraima e o Mato Grosso (Figura

1). Este sismo, de acordo com registos históricos, causou queda de paredões, abertura de lagoas, destruição de bosques com queda de árvores e liquefação do solo (Velooso, 2015).

As descrições acima indicam que poucos eventos registrados de forma instrumental e histórica no Brasil produziram estruturas permanentes na natureza que possam vir a ser identificadas em estudos futuros. Da mesma forma, uma grande quantidade de sismos ocorreu no Quaternário tardio em território Brasileiro, mas só uma pequena fração foi registrada. Entretanto, esta fração é expressiva e estende o registro paleossismológico para locais ainda considerados assísmicos.

Falhas Ativas no Brasil

A identificação de falhas que afetam depósitos sedimentares quaternários e, em alguns casos, depósitos sedimentares holocênicos tem aumentado significativamente no Brasil. Nós descrevemos abaixo exemplos de três regiões e suas possíveis relações com a sismicidade atual.

No Nordeste do Brasil as falhas neotectônicas são descritas principalmente nas bacias marginais. A maioria das falhas neotectônicas afetam depósitos sedimentares quaternários, alguns com idades inferiores a 100.000 anos. Sismos têm uma recorrência de ~15 anos para $M_s = 4$ nessas áreas. Entretanto, dados paleossismológicos de ruptura de superfície indicam recorrência de 15.8 ka para sismos de $M_w = 5.5$ em algumas falhas e recorrência de liquefação de 24.000 anos para sismos de $M_s = 5.5 - 6.0$ em sedimentos quaternários na Bacia Potiguar (Bezerra et al., 2011). Dados de sismicidade induzida indicam que são necessários apenas 0,5 kPa para reativar algumas falhas e que as mesmas estão no limite de ruptura (Do Nascimento et al., 2004). Estes dados indicam que magnitudes maiores que as atuais são esperadas para várias falhas. Esta região tem a maior concentração de levantamentos com redes sismográficas locais, que permitem a comparação entre eventos, mecanismos focais e geologia (Ferreira et al., 1998).

Além disso, a correlação de estudos neotectônicos com estudos sismológicos instrumentais indica que algumas falhas são reativação de estruturas existentes no embasamento cristalino. São exemplos o caso da Falha de Samambaia em João Câmara (Figura 3), e do Lineamento Pernambuco. Entretanto, na maioria dos casos esta relação entre sismicidade e geologia de superfície não foi encontrada (Bezerra et al., 2011).

Na região da Serra do Mar onde ocorre a Faixa Ribeira, sudeste do Brasil, foram identificadas inúmeras falhas neotectônicas, muitas das quais afetam depósitos do Quaternário tardio. Diversas destas falhas reativam estruturas da trama de direção ENE-NE do embasamento cristalino, como zonas de cisalhamento dúctil (e.g., Riccomini & Assumpção, 1999; Morales et al., 2014).

Na região da Faixa Ribeira, muitos estudos apontam para uma importante atividade neotectônica (Riccomini & Assumpção, 1999). Entretanto, esta atividade não encontra correspondência, do ponto de vista de intensidade de eventos, no registro instrumental e histórico. Hipóteses relacionadas a uma possível migração sísmica, a exemplo do que já foi sugerido para a região de Nova Madri, nos Estados Unidos (Stein & Liu, 2009), já foram propostas para esta região. Mas alternativas relacionadas com o grande período de recorrência de algumas falhas não devem ser descartadas.

Apesar do difícil acesso e de a maioria das exposições do registro do Quaternário estar restrita aos bancos de rios, diversos trabalhos vem mostrando evidências de deformação neotectônica na região Amazônica. Nesta região, um grande número de falhas

que afetam depósitos do Quaternário tardio e controlam estruturas atuais, como rios e lagos, é visto em imagens de satélite.

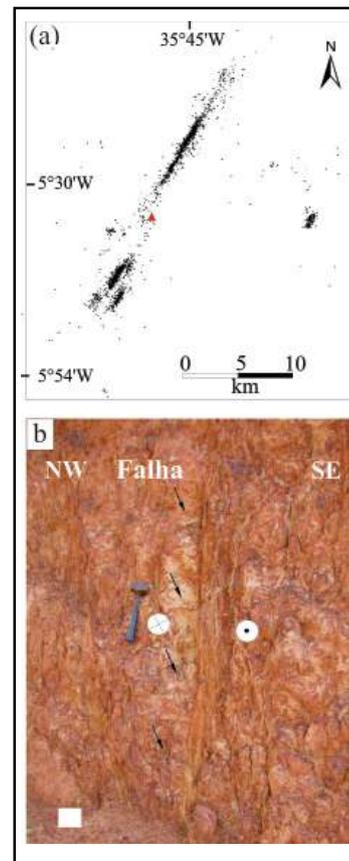


Fig.3 – Falha de Samambaia (RN): (a) epicentros da sequência de 1986-1994 com visão perpendicular ao plano de falha; (b) visão em perfil de falha (paleoruptura de superfície) na área epicentral afetando sedimentos quaternários tardios.

A sedimentação ampla no final do Pleistoceno e no Holoceno na Amazônia foi, em parte, condicionada por falhas ativas, que também controlam parte do relevo (e.g., Rossetti, 2014). Entretanto, a correlação com a sismicidade atual nem sempre é possível, pois, ao contrário da região Nordeste, levantamentos instrumentais de áreas epicentrais com redes locais nem sempre foram feitos na Amazônia.

Nem toda a sismicidade observada no Brasil deve ter explicações em processos superficiais. Em vários casos, processos mais amplos associados à litosfera fraca podem determinar a maior ou menor incidência de tremores (Assumpção et al., 2014).

Concluimos que as explicações para a sismicidade atual e para a crescente paleossismicidade identificada no Brasil têm muitas causas e muitos estudos são ainda necessários. O presente trabalho reafirma resultados de estudos prévios que registram atividade neotectônica em praticamente todo o Brasil (e.g., Riccomini & Assumpção, 1999; Bezerra et al., 2014; Morales et al., 2014; Rossetti, 2014). Muitas das falhas mapeadas afetam depósitos sedimentares quaternários tardios e têm, portanto, importantes implicações para o risco sísmico.

Referências

ASSUMPÇÃO M, FERREIRA JM, BARROS LV, BEZERRA H, FRANCA G, BARBOSA J, MENEZES E, RIBOTTA, L, PIRCHINER M, NASCIMENTO A, DOURADO J. 2014. Intraplate seismicity in Brazil. In: Pradeep Talwani P (Ed.). Intraplate Earthquake. Cambridge: Cambridge University Press, p. 50-71.

ARTIGO TÉCNICO

BEZERRA, FHR, DO NASCIMENTO A, FERREIRA JM, NOGUEIRA FC, FUCK RA, NEVES BBB, SOUSA, MOL. 2011. Review of active faults in the Borborema Province, Intraplate South America Integration of seismological and paleoseismological data. *Tectonophysics*, 510: 269–290.

CRONE AJ, DE MARTINI, PM, MACHETTE MN, OKURA K, PRESCOTT JR. 2003. Paleoseismicity of two historically Quiescent Faults in Australia: Implications for Fault Behavior in Stable Continental Regions. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 93, 1913–1934.

DO NASCIMENTO AF, COWIE PA, LUNN RJ, PEARCE RG. 2004. Spatio-temporal evolution of induced seismicity at Acu reservoir, NE Brazil. *Geoph. J. Int.* 158: 1041–1052.

FERREIRA JM, OLIVEIRA RT, ASSUMPÇÃO M. 1988. Superposition of local and regional stresses in northeast Brazil: evidence from focal mechanisms around the Potiguar marginal basin. *Geophy. J. Intern.*, 134, 341–355.

KENNER S & SEGALL P. 2000. A Mechanical Model for Intraplate Earthquakes: Application to the New Madrid Seismic Zone. *Science*, 289, 2329–2332.

MCCALPIN JP & NELSON, AR. 1996. Introduction to Paleoseismology. In: McCapin, JP (Ed.). *Paleoseismology*. Academic Press, London, 1–25.

MORALES N & 24 CO-AUTORES. 2014. Projeto Mapa Neotectônico do Brasil: Caracterização da Deformação Neotectônica do Território Brasileiro. *Anais do 47º Congresso Brasileiro de Geologia*. Anais.. Salvador, pg. 74.

OBERMEIER SF. 1996. Use of liquefaction-induced features for paleoseismic analysis – an overview of how their regional distribution and properties of source sediment can be used to infer the location and strength of Holocene paleo-earthquakes. *Eng. Geol.*, 44, 1–76.

RICCOMINI C & ASSUMPÇÃO M. 1999. Quaternary tectonics in Brazil. *Episodes*, 22: 221–225.

ROSSETTI DF. 2015. The role of tectonics in the late Quaternary evolution of Brazil's Amazonian landscape *Earth-Science Reviews*, 139, 362–389.

STEIN S & LIU M. 2009. Long aftershock sequence within continents and implications for earthquake hazard assessment. *Nature* 462, 87–89.

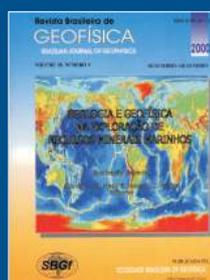
U.S. Nuclear Regulatory Commission. 1982. Appendix A: seismic and geologic siting criteria for nuclear power plants. Code of Fed. Reg. 10, Chap. 1, Part 100 (App A, 10, CFR 100).

VELOSO JAV. 2015. *Tremeu a Europa e o Brasil também*. Chiado Editora. Lisboa, p. 186.

WELLS D & COPPERSMITH KJ, 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 974–1002.

Atualize seu cadastro
no site
www.sbgf.org.br

RBGf Revista Brasileira de Geofísica Brazilian Journal of Geophysics



Modelos de capas
publicadas da
*Revista Brasileira
de Geofísica*

Com 32 anos de existência, a Revista Brasileira de Geofísica (Brazilian Journal of Geophysics - RBGf) possui um sistema eletrônico de submissão. Os interessados na submissão de artigos e que queiram ser avisados da publicação de novas edições devem efetuar um cadastro no site www.rbgf.org.br, identificando-se como autor e/ou leitor da RBGf.

Além disso, visando a internacionalização da revista e o aumento da visibilidade dos artigos produzidos pelos autores nacionais, a RBGf passou a adotar o idioma inglês como língua oficial de seus artigos, atendendo a um anseio de nossa comunidade científica.

Desse modo, ao elaborar o artigo que será submetido à RBGf, verifique se sua instituição de ensino superior implementa programas de incentivo à publicação qualificada de artigos científicos de autoria de docentes, técnicos e discentes. Em geral, estes programas incluem o pagamento de serviço de tradução e/ou edição de artigos científicos para a língua inglesa.

Novas instruções aos autores contemplando as atuais regras para submissão *online* e preparação do manuscrito estão disponíveis em www.rbgf.org.br.



Terremotos no Brasil: Preparando-se para Eventos Raros

Por Marcelo Assumpção - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, USP (marcelo@iag.usp.br)

Marlon Pirchiner - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, USP

João Carlos Dourado - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP - (jdourado@rc.unesp.br)

Lucas Vieira Barros - Observatório Sismológico, UnB (lucas.v.barros@gmail.com)

Tremores de terra no Brasil

Sabe-se que o Brasil, por estar no meio de uma placa tectônica, longe das suas bordas, é uma região muito mais estável do que países andinos como Chile, Peru, Equador e Colômbia (Fig. 1). Estes países estão na borda da Placa Sul-Americana onde o contato com outra placa em movimento (placa de Nazca) deforma a crosta e armazena tensões numa velocidade muito mais rápida do que no interior das placas, tensões estas liberadas repentinamente na forma de terremotos. No Brasil, ocorre um sismo de magnitude 5 a cada cinco anos, em média. Na região andina, sismos de magnitude 5 ocorrem em média duas vezes por semana. Isto dá uma ideia de quanto o Brasil é mais estável comparado às regiões mais ativas.

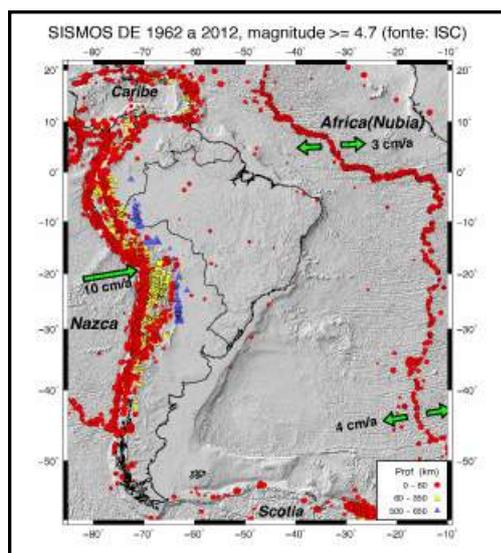


Fig.1 – Sismicidade da Placa Sul-Americana. Sismos do catálogo EHB do ISC (International Seismological Centre, UK) com magnitudes $\geq 4,7$. Círculos vermelhos são sismos rasos (profundidade focal < 60 km), quadrados amarelos são intermediários, e triângulos azuis são sismos entre 500 e 650 km de profundidade. Setas verdes mostram o movimento relativo da Placa de Nazca e o afastamento da placa Africana na dorsal meso-oceânica.

Por outro lado, a Figura 2 mostra que sismos pequenos a moderados não são tão raros no Brasil. Sismos de magnitude 5 têm potencial para causar danos sérios em casas fracas, se o foco do sismo tiver uma profundidade rasa e ocorrer próximo a regiões habitadas. Foi o que ocorreu em 09/12/2007 no município de Itacarambi, norte de Minas Gerais, quando um tremor de magnitude 4,7 derrubou várias casas de construção precária e matou uma criança. O mapa da Figura 2 mostra todos os tremores já catalogados no Brasil. Inclui sismos antigos estudados apenas através de relatos históricos assim como sismos recentes detectados por sismógrafos. Naturalmente já ocorreu um número bem maior de tremores no Brasil que não foram

sentidos por terem ocorrido em regiões desabitadas ou que não foram detectados em estações sismográficas por serem pequenos. É por isso que a região Sudeste, com maior densidade populacional e estações sismográficas operando há mais tempo, parece ser mais ativa do que a região Amazônica (Fig. 2).

O maior sismo do Brasil ocorreu no norte do Mato Grosso em 31/01/1955, a 1 hora da madrugada, com magnitude 6,2 (Figura 2). Em Cuiabá, distante mais de 350 km do epicentro, várias pessoas acordaram com as vibrações sísmicas e saíram às ruas assustadas. A região epicentral (entre Porto dos Gaúchos e Sinop, MT) era desabitada na época. Uma repetição deste terremoto hoje certamente causaria sérios danos na área epicentral. Como comparação, o sismo de L'Aquila, Itália, em abril de 2009 com magnitude 6,3, causou muita destruição matando quase 300 pessoas. Em todo o Brasil, acredita-se que ocorram dois sismos por século de magnitude 6 ou maior. (Nos Andes, magnitudes 6 ocorrem uma vez por mês). Ou seja, embora o Brasil tenha uma atividade sísmica muito baixa comparada a outros países de borda de placa, não somos totalmente imunes a tremores. O risco sísmico no Brasil é muito baixo, mas não é nulo!

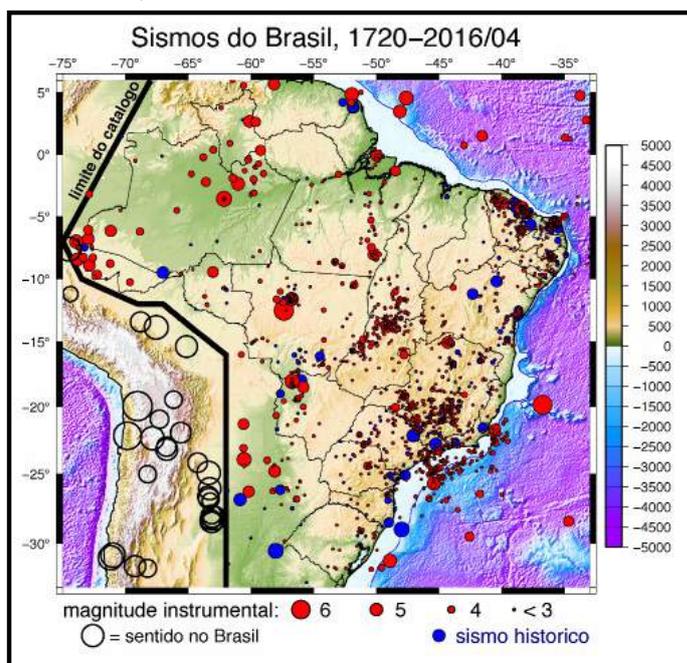


Fig. 2 – Catálogo Sísmico Brasileiro. Apenas sismos rasos (prof. < 50 km) estão mostrados - os sismos profundos do Acre não estão incluídos no mapa. Círculos azuis são epicentros de sismos históricos com magnitudes estimadas pelos efeitos macrosísmicos. Círculos vermelhos são epicentros de sismos registrados por estações sismográficas. A região Sudeste, com maior densidade populacional e estações sismográficas há mais tempo, tem sido melhor amostrada comparativamente a regiões mais remotas como a Amazônia. Círculos vazios nos Andes são epicentros de terremotos cujas ondas fizeram oscilar prédios altos em algumas cidades do Brasil.

ARTIGO TÉCNICO

Sismicidade Intraplaca e Geologia

Sismos fortes, embora raros, podem ocorrer no interior de placas tectônicas causando muitos danos. A necessidade de se prevenir contra sismos intraplaca (por exemplo com código de construção anti-sísmica) depende do nível de probabilidade destes fenômenos raros. Supondo que os tremores no Brasil possam ocorrer aleatoriamente em qualquer lugar, o histórico de sismos brasileiros indica que a chance de provocarem acelerações do chão superiores a 5% de g (g = aceleração da gravidade = $9,8 \text{ m/s}^2$, comumente usada como medida da aceleração máxima das vibrações sísmicas) numa localidade qualquer (Brasília, por exemplo) é de uma vez a cada 1000 anos. Vibrações desta ordem provocam trincas em paredes). No entanto, a Fig. 2 mostra que os tremores não são aleatórios e há regiões mais ativas (como Ceará, Rio Grande do Norte, Sul de Minas, Pantanal, etc.) e outras bem mais calmas (como no meio das Bacias do Paraná e da Parnaíba).

Como mencionado, a Fig. 2 tem um viés de amostragem. Por exemplo, há mais relatos de tremores antigos na região Sudeste do que na Amazônia. Na Fig. 3 este viés foi eliminado usando-se o catálogo “uniforme” onde apenas os sismos mais recentes (com igual chance de serem detectados em qualquer lugar do Brasil) são representados. A Fig. 3 é uma tentativa de mostrar quais são as áreas de maior e de menor atividade sísmica no Brasil e sua possível relação com as principais províncias geológicas.

As relações entre sismos e estruturas geológicas em regiões intraplaca são mais complexas do que se poderia imaginar, e há pouco consenso sobre as causas da distribuição dos sismos. A Figura 3, por exemplo, mostra que não há uma relação muito óbvia entre áreas mais ativas e as províncias geológicas no Brasil: áreas cratônicas tendem a ser menos sísmicas (estatisticamente), como mostrado por Assumpção et al.(2014) e Agurto-Detzel et al.(2015), mas há focos de sismicidade no meio de crátons. O sismo de Itacarambi, MG, de 2007 ocorreu bem no meio do cráton do São Francisco, e o maior sismo conhecido no Brasil (Porto dos Gauchos, MT, 1955) ocorreu no cráton Amazônico.

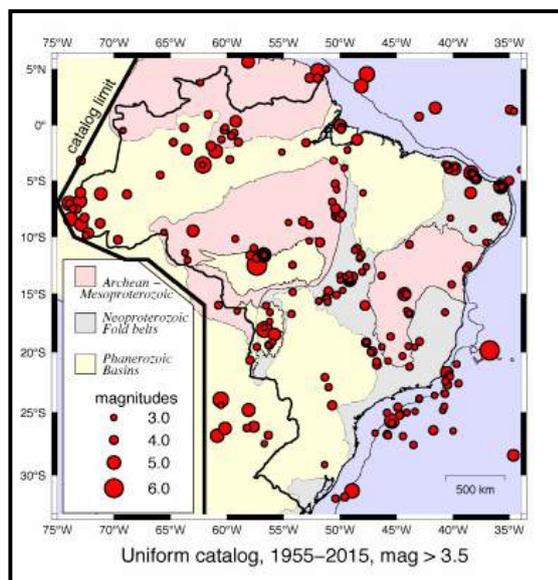


Fig. 3 - Catálogo uniforme, filtrado conforme detectabilidade: magnitudes > 6 desde 1940; acima de 5 desde 1962, e acima de 3,5 desde 1980. O mapa mostra as áreas de concentração de sismos e as áreas mais assísmicas, de maneira mais correta.

Embora os sismos intraplaca ocorram principalmente na crosta superior (a grande maioria dos sismos no Brasil têm foco mais raso que 10 km) as causas podem ser bem mais profundas. Vários modelos têm sido propostos para explicar a concentração de sismos em certas regiões intraplaca baseados no conceito de zonas de fraqueza e concentração de tensões (e.g., Talwani, 2014). Entre os mecanismos que podem concentrar tensões na parte superior da crosta estão:

a) afinamentos da litosfera (e.g., Assumpção et al., 2004; Azevedo et al., 2015) que tornam o manto litosférico mais fraco diminuindo sua capacidade de suportar as tensões intraplaca regionais. Estas tensões acabam se concentrando na parte frágil da crosta superior.

b) efeitos de flexura devidos a carga de sedimentos ou a cargas internas da litosfera. Por exemplo, na faixa sísmica Goiás-Tocantins, região central do Brasil onde a crosta é mais fina, Assumpção & Sacek (2013) sugeriram que o manto mais raso (e mais pesado) age como uma carga interna flexionando a placa para baixo causando tensões compressivas na parte superior da crosta.

Por outro lado, correlações diretas da sismicidade intraplaca com feições mapeáveis em superfície, como falhas geológicas e feições neotectônicas, têm se mostrado mais difíceis de interpretar. Por exemplo, o lineamento de Pernambuco, uma zona de cisalhamento várias vezes movimentada lateralmente desde o Brasiliano, é hoje uma feição sísmicamente ativa sob esforços de tração N-S, sendo palco de pequenos falhamentos que podem ser normais ou transcorrentes dependendo da orientação do ramo do lineamento em relação às tensões regionais (e.g., Lima Neto et al., 2013; 2014). O Lineamento de Pernambuco, no entanto, é exceção. O Lineamento de Patos, apenas 100 km ao norte, não mostra qualquer atividade sísmica, e a grande maioria dos tremores de terra no Brasil ocorrem sem nenhuma relação direta com feições mapeáveis em superfície (Assumpção et al., 2014; Oliveira et al., 2015).

Proposta para o novo mapa de ameaça sísmica no Brasil

No Brasil já existe uma norma sísmica da ABNT (NBR-15421/2006), baseada nos resultados do projeto mundial GSHAP (Global Seismic Hazard Assessment Program) apresentados por Shedlock & Tanner (1999) e reproduzidos na Fig. 4. Aqui usaremos o termo “ameaça” sísmica (em inglês “seismic hazard”) como sinônimo de “perigo” sísmico, que trata das chances de ocorrerem um evento natural potencialmente “perigoso”. O termo “risco” é tecnicamente o resultado do produto da ameaça pela “vulnerabilidade”, a qual retrata o potencial de danos (fragilidade das construções, número provável de vítimas, etc.). Uma área muito sísmica pode ter um alto grau de ameaça sísmica mas, se for desabitada, o risco sísmico será quase nulo. Por outro lado, sismos pequenos têm baixo grau de ameaça, mas se ocorrerem em locais com construções muito precárias o risco pode ser grande.

Mapas de ameaça sísmica mostram os níveis de movimentação do chão para uma certa probabilidade de ocorrência (ou período de retorno). O grau de movimentação do chão (por exemplo, “Peak Ground Acceleration”, PGA), em qualquer ponto do mapa, pode ser devido a um tremor pequeno ocorrendo próximo do local ou a um tremor grande distante.

As probabilidades de ocorrência dos movimentos do chão dependem 1) da frequência anual de sismos de cada magnitude (chamada “relação magnitude-frequência de Gutenberg-Richter”), e b) de relações empíricas que prevêem as acelerações esperadas em função da magnitude e distância epicentral (“Ground Motion Prediction Equations”, GMPE). Para o cálculo da frequência de sismos (taxa anual de ocorrência), supõe-se que eles continuarão ocorrendo nas mesmas zonas sísmicas como observado até agora.

A maioria dos sismólogos acredita que áreas de maior atividade sísmica nas últimas décadas e séculos devem ser locais mais prováveis para a rara ocorrência de um terremoto grande no futuro. Mas há quem discorde. Por exemplo, a área de Porto dos Gaúchos, no norte do Mato Grosso, que já teve sismos de magnitude 6 e onde continuam ocorrendo pequenos tremores ainda hoje (Figs. 2 e 3), em vez de ser uma zona de maior perigo, poderia ser um local onde as tensões já foram liberadas pelo terremoto de 1955. Por isso, talvez o próximo “grande” terremoto brasileiro poderia ocorrer numa outra área sem muita atividade sísmica atualmente, mas com muita tensão geológica acumulada e ainda não liberada. Esta situação de incerteza sismológica não é exclusividade do Brasil, onde as pesquisas geofísicas são muito recentes e os levantamentos geológicos incompletos, mas ocorre também em outros países com levantamentos geológico-geofísicos bem mais detalhados. Uma discussão mais ampla de como lidar com essas incertezas foi apresentada por Assumpção (2011). Apesar destas discussões, a abordagem mais tradicional e padrão na construção de mapas de ameaça sísmica é supor que os tremores continuarão ocorrendo nas mesmas zonas sísmicas como observado no passado.

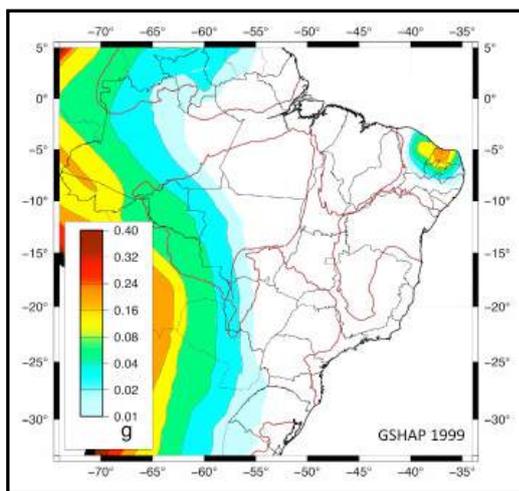


Fig. 4 – Mapa de Ameaça Sísmica (“Seismic Hazard”) do projeto GSHAP (Global Seismic Hazard Assessment Project; Shedlock & Tanner, 1999) usado como base para a norma sísmica brasileira, NBR-15421/2006. As cores indicam as acelerações máximas horizontais (PGA, Peak Ground Acceleration) em frações de g (aceleração da gravidade) com probabilidades de 10% de serem excedidas em 50 anos (i.e., com períodos de retorno de 475 anos). Linhas finas pretas são os estados, e vermelhas os limites das principais províncias geológicas do Brasil.

A norma atual NBR-15421/2006 prevê na maior parte do Brasil acelerações menores do que 2,5%g (para locais em rocha), com exceção de Ceará e Rio Grande do Norte, onde acelerações poderiam chegar a 5%g (Fig. 4). Na parte oeste do Brasil, a influência da sismicidade andina poderia provocar acelerações até superiores a 10% g, como

no Acre. Estes valores referem-se a períodos de retorno de 475 anos (probabilidade de excedência de 10% em 50 anos). Por exemplo, o mapa da Fig. 4 indica para a cidade de Caruaru, PE, uma aceleração de 0,02 g. Isso significa que nesta cidade ocorreriam vibrações sísmicas com acelerações de 2% de g, ou maior, uma vez a cada 475 anos em média. Num período de 50 anos, há uma chance de 10% de ocorrer acelerações $\geq 2\%$ g. Se construirmos uma casa com vida útil de 50 anos, projetada para resistir a vibrações de até 2%g, significa que há 90% de segurança de que ela não sofra nada num período de 50 anos.

Estudos mais detalhados da sismicidade do Brasil nos últimos anos sugerem que várias outras zonas sísmicas (como a região de Porto dos Gaúchos, norte de Mato Grosso) não foram consideradas adequadamente no projeto GSHAP e acabaram não sendo representadas no mapa da ABNT. Por esta razão um grande esforço vem sendo feito pela comunidade sismológica do Brasil (envolvendo USP, UnB, UNESP, ON, UFRN, IPT, e PUC-RJ) para atualizar nosso mapa de ameaça sísmica. Serão apresentados aqui alguns resultados preliminares.

Delimitação de zonas sísmicas

Como o conhecimento da sismicidade intraplaca ainda é incompleto e modelos diferentes são discutidos na literatura, a delimitação das “zonas sísmicas” não é uma tarefa trivial e fácil. Para lidar com essas incertezas epistêmicas (falta de conhecimento da natureza) a melhor estratégia é levar em conta vários modelos alternativos, cada um com um peso num esquema de árvore lógica, ou cenários possíveis. A Fig. 5 mostra três modelos independentes de zonas sísmicas, cada um proposto por um autor deste artigo (A - Assumpção; B - Barros; D - Dourado). Nesta figura, apresenta-se também o mapa de ameaça sísmica que resultaria de cada modelo de zoneamento sísmico. Nesta abordagem, a sismicidade é considerada uniforme dentro de cada “zona sísmica”. Isto é, calcula-se uma relação frequência-magnitude para os tremores dentro da zona (taxa anual de ocorrência = número de sismos por ano), e supõe-se que no futuro qualquer ponto dentro da zona tem a mesma probabilidade de ocorrência de sismos. Desta maneira, zonas sísmicas mais estreitas podem concentrar a ameaça sísmica (superestimando a ameaça), e zonas mais largas podem “diluir” e subestimar a ameaça sísmica.

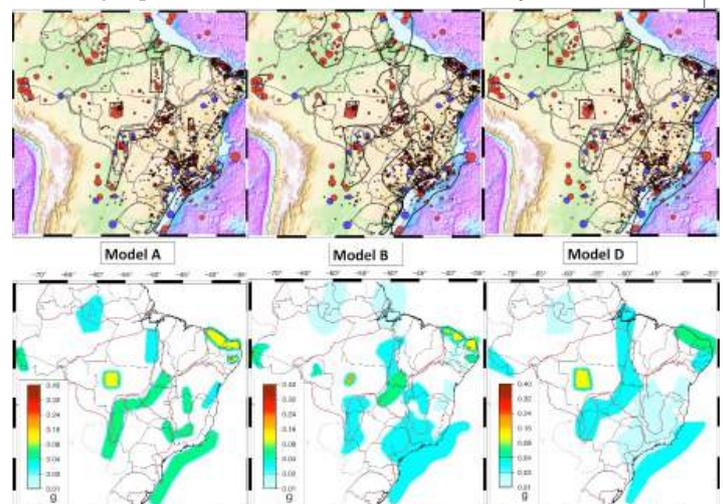


Fig. 5 – Parte superior: três modelos de zonas sísmicas, segundo três especialistas diferentes. Parte inferior: mapa de ameaça sísmica resultante para cada modelo, com as acelerações (PGA) esperadas para 10% de probabilidade em 50 anos.

ARTIGO TÉCNICO

Em vez de zonas sísmicas em áreas definidas por um “expert”, pode-se modelar a ocorrência dos sismos ponto a ponto usando a própria distribuição dos epicentros. Define-se uma grade de pontos cobrindo todo o país e calcula-se o número médio de sismos em torno de cada ponto. Agora, a taxa anual é definida como número de sismos por ano e por km². A Fig. 6 mostra um modelo onde a taxa de sismicidade em torno de cada ponto é calculada com a média de sismos ocorridos em um raio que depende da magnitude (método de Woo, 1996). Esta técnica é também chamada de “suavização”, pois as taxas de ocorrência de sismos não caem abruptamente nas bordas das zonas sísmicas definidas por áreas.

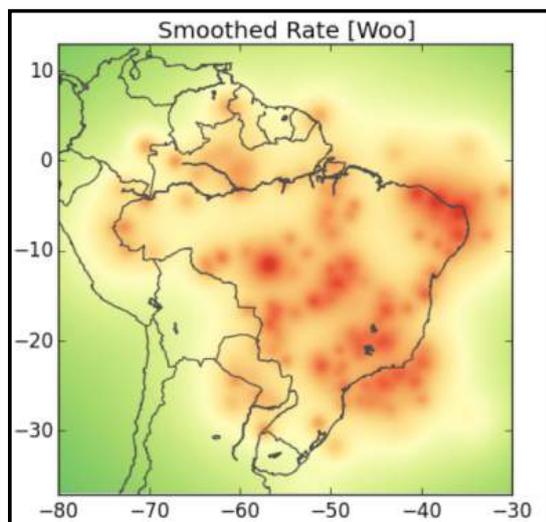


Fig. 6 – Taxa anual de sismicidade (número de sismos por ano por km²) segundo o método de suavização de Woo (1996).

Mapa de ameaça sísmica (“Seismic Hazard”)

Para construção de mapas de ameaça sísmica, inicialmente o catálogo de sismos do Brasil foi depurado eliminando sismos precursoros e réplicas. Isso é necessário pois o cálculo das probabilidades de ocorrência supõe que os tremores ocorram aleatoriamente sem que haja dependência de sismos anteriores, i.e., que seguem uma distribuição de Poisson. Isso significa que o mapa final de ameaça sísmica refere-se apenas ao sismo principal de cada sequência e não leva em conta os efeitos das possíveis réplicas.

Para cálculo das taxas de ocorrência (número de sismos/ano ou sismos/ano/km²) foram estimados os períodos de completude do catálogo sísmico. Isto é, para cada nível de magnitude, estimou-se a partir de quando o catálogo estaria completo. Isso varia em cada região do Brasil: no Sudeste e Nordeste, onde a densidade populacional é maior, o catálogo está completo há mais tempo (por exemplo desde 1960 para magnitude acima de 3,5); já para a Amazônia o catálogo está completo há menos tempo (desde 1980 para magnitudes acima de 3,5).

As taxas de ocorrência de sismos, para cada magnitude, foram calculadas para os três modelos de zonas de área (Fig. 5). Também foram usados três métodos diferentes de zonas pontuais (ou “métodos de suavização”): Frankel (1995) com raio de busca uniforme de 110km, Woo (1996) com raio variando com a magnitude (Fig. 6), e Helmstetter & Werner (2012) onde o raio de busca depende também da densidade de dados. Na árvore lógica, foram atribuídos pesos iguais aos três modelos de zonas por área, e

pesos de 21%, 32% e 47%, respectivamente, para os três métodos de zonas pontuais suavizadas (valores derivados da capacidade de cada modelo de explicar a distribuição dos sismos). O conjunto de modelos suavizados (pontuais) teve peso de 70% (é menos subjetivo do que a definição de áreas por “especialistas”) e o conjunto dos três modelos de zonas por área teve peso de 30%.

Para cada modelo de taxa de ocorrência, foram usadas as acelerações previstas pela GMPE de Silva et al.(2002). Para o mapa de ameaça sísmica final, tomou-se a média ponderada dos valores de aceleração para cada um dos seis ramos da árvore lógica. As figuras 7a,b mostram as acelerações de pico (PGA), em local de rocha, com probabilidade de excedência de 10% e 2% durante 50 anos (correspondentes a períodos de retorno de 475 e 1475 anos, respectivamente).

Pode-se ver na Fig. 7a que há várias regiões do Brasil com aceleração esperada acima de 3% (com período de retorno de ~500 anos), preenchendo boa parte da área vazia do mapa GSHAP (Fig. 4) usado na norma da ABNT. Este mapa preliminar ainda não leva em conta possíveis efeitos da sismicidade Andina, como se vê no mapa GSHAP (Fig. 4), o que deverá ser tratado na versão final.

Uma observação importante é que, aparentemente, boa parte das barragens de rejeito no Brasil são projetadas para acelerações de 3% ou 5% g. A extensão das áreas verdes da Fig. 7 sugere que estes valores precisariam ser revistos.

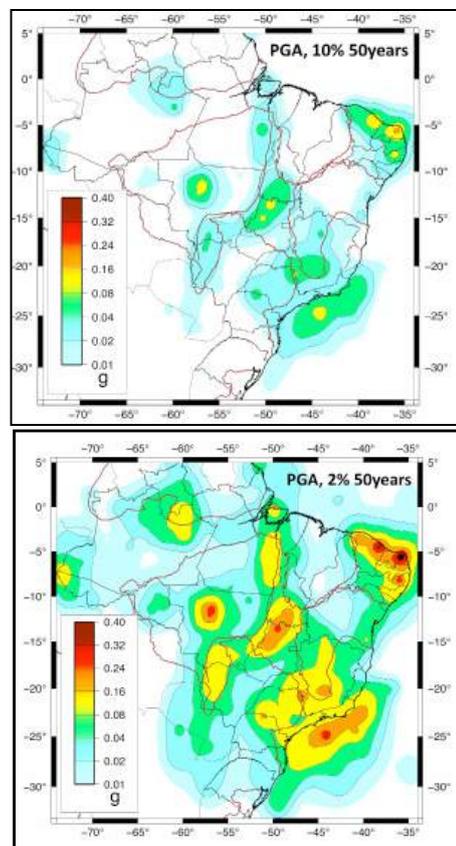


Fig. 7 – Mapas de Ameaça Sísmica (“Seismic Hazard Maps”) para aceleração de pico (PGA) em rocha, para probabilidades de 10% (a) e 2% (b) de excedência em 50 anos, correspondendo a períodos de retorno de 475 e 1475 anos, respectivamente. Cores são PGA em frações de g. Áreas verdes correspondem a PGA entre 4% e 8% g (equivalente a intensidades ~VI na escala Mercalli Modificada, podendo causar trincas em paredes), áreas amarelas entre 8% e 16% g (intensidades ~VII MM podendo causar rachaduras em paredes e desabamento de casas fracas).

Como lidar com eventos extremos e raros?

A principal diferença entre sismicidade de borda de placa (como nos Andes) e sismicidade intraplaca (como no Brasil), não é o nível das tensões geológicas existentes na litosfera (como se poderia pensar), mas a taxa de acúmulo de deformação e liberação em terremotos. Não há evidências de diferenças significativas nas magnitudes das tensões medidas na crosta. Pelo contrário, há indicações de que os sismos intraplaca liberam tensões um pouco maiores do que os sismos interplaca, na média. Isso implica em que terremotos grandes (magnitude 7, por exemplo) são apenas em bmenos frequentes no interior das placas, mas não necessariamente impossíveis. Terremotos fortes intraplaca (magnitudes 6 a 7) são eventos muito raros, mas possíveis.

Uma das grandes dificuldades de lidar com eventos muito raros (ou eventos extremos), é que o pouco que se conhece do passado recente não é garantia de padrão para o futuro. Isso ocorreu com o mega-terremoto e tsunami da Sumatra de dezembro de 2004 (que atingiu vários países matando 300.000 pessoas). Não se tinha conhecimento de nenhum outro tsunami antigo parecido no oceano Índico. Um fenômeno que se repete a cada 300 ou 500 anos, em média, pode não ter registros históricos que sejam úteis. Mesmo no Japão, que conta com registros históricos muito antigos e um conhecimento geofísico bastante detalhado de todo o país, os sismólogos não achavam possível ocorrer uma ruptura tão extensa para que um terremoto atingisse magnitude 9, como o de Fukushima em 2011. O histórico incompleto de terremotos passados e os estudos da sismicidade atual nem sempre evitam surpresas.

Sabe-se hoje que sismos de magnitude 5 a 6 podem ocorrer em qualquer região do planeta, mesmo no meio de uma placa tectônica e longe das suas bordas mais ativas. O tremor de magnitude 5,8 em 23/08/2011 na Virgínia, costa leste dos Estados Unidos, é outro exemplo recente. Não havia naquele estado nenhum registro histórico de tremores com magnitude acima de 5 (o último que provocou algum dano ocorreu em 1875 com magnitude 4,8). No Brasil, há dados históricos sugerindo que um terremoto de magnitude ~7 pode ter ocorrido na Amazônia em 1690 (Veloso, 2013).

A melhor maneira de se lidar com eventos muito raros, mas de consequências potencialmente catastróficas, é tentar quantificar as probabilidades (“ameaça”), como nos mapas da Figura 7, e levar em conta nos estudos de risco. Nestes mapas estão contempladas as contribuições à ameaça sísmica de sismos até magnitude 7 (uma ocorrência no Brasil a cada 500 ou 1000 anos), embora a contribuição principal venha de magnitudes na faixa de 5 a 6. A probabilidade que deve ser usada em grandes obras de engenharia (10% ou 2% em 50 anos, ou qualquer outro nível) depende do tipo de construção e principalmente das consequências (o que importa no final é o risco, e não apenas a ameaça). Para usinas nucleares, por exemplo, a prática internacional é adotar níveis de aceleração com períodos de retorno entre 10.000 e 100.000 anos. Naturalmente, maior segurança implica em maiores custos, o que se traduz em energia mais cara (no caso de usinas elétricas), ou menor competitividade no caso da mineração. O grau (e custo) da segurança que se deve adotar é uma decisão da sociedade. A ciência procura avaliar as probabilidades de

eventos extremos (ameaça), e a tecnologia procura otimizar os custos para melhorar a segurança. Mas o ponto de equilíbrio entre risco e custo é sempre uma decisão política da sociedade.

Conclusões

A atividade sísmica no Brasil é reconhecidamente baixa. Sismos médios e moderados (magnitudes até 5 ou 6) podem ocorrer em qualquer região mas com probabilidades até agora consideradas suficientemente remotas podendo ser desprezadas na maioria dos projetos de edificações e obras de engenharia. Apenas instalações críticas, como usinas e reatores nucleares, e barragens hidrelétricas, têm feito uso sistemático de análises sismológicas específicas. Por outro lado, os estudos recentes de ameaça sísmica no Brasil e os resultados preliminares apresentados aqui mostram que a norma sísmica atual precisaria ser revisada contemplando acelerações de até 5% ou mais em áreas anteriormente consideradas como “zona 0” sem perigo apreciável. Eventos extremos, por mais improváveis que possam parecer, costumam causar surpresas.

Referências

- Agurto-Detzel, H., M. Assumpção, M.B. Bianchi, & M. Pirchiner, 2015. Intraplate seismicity in mid-plate South America: correlations with geophysical lithospheric parameters. Geological Society, London, Special Publications on “Seismicity, Fault Rupture and Earthquake Hazards in Slowly Deforming Regions”, 432, published on November 2, 2015, doi: 10.1144/SP432.5.
- 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, doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02357.x
- Assumpção, M., 2011. Terremotos e a convivência com as incertezas da natureza. *Revista USP* no.91, 76-89, Universidade de São Paulo, ISSN 0103-9989.
- Assumpção, M., V. Sacek, 2013. Intra-plate seismicity and flexural stresses in Central Brazil. *Geophys. Res. Lett.*, 40, 487-491, doi:10.1002/grl.50142, 2013.
- Assumpção, M., J. Ferreira, L. Barros, F.H. Bezerra, G.S. França, J.R. Barbosa, E. Menezes, L.C. Ribotta, M. Pirchiner, A. Nascimento, & J.C. Dourado, 2014. Intraplate Seismicity in Brazil. In: P. Talwani (ed.) *Intraplate Earthquakes*, chapter 3, Cambridge UP, Cambridge, 50-71. ISBN 978-1-107-04038-0.
- Azevedo, P.A., M.P. Rocha, J.E.P. Soares, & R.A. Fuck, 2015. Thin lithosphere between the Amazonian and São Francisco cratons, in central Brazil, revealed by seismic P-wave tomography. *Geophys. J. Int.*, 201, 61-69.
- Frankel, A., 1995. Mapping seismic hazard in the central and eastern United States. *Seism. Res. Lett.*, 66, 8-21.
- Helmstetter, A. & M.J. Werner, 2012. Adaptive spatiotemporal smoothing of seismicity for long-term earthquake forecasts in California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 102, 2518-2529.
- Lima Neto, H.C., Ferreira, J.M., Bezerra, F.H.R., Assumpção, M., do Nascimento, A.F., Sousa, M.O.L., Menezes, E.A.S., 2013. Upper crustal earthquake swarms in São Caetano: Reactivation of the Pernambuco shear zone and trending branches in intraplate Brazil. *Tectonophysics*, 608, 804-811. doi: 10.1016/j.tecto.2013.08.001
- Lima Neto, H.C., Ferreira, J.M., Bezerra, F.H.R., Assumpção, M., do Nascimento, A.F., Sousa, M.O.L., Menezes, E.A.S., 2014. Earthquake sequences in the southern block of the Pernambuco Lineament, NE Brazil: stress field and seismotectonic implications. *Tectonophysics*, 633, 211-220. Doi: 10.1016/j.tecto.2014.07.010

Atividade Sísmica e sua ocorrência

Jesus Berrocal - (berrocal@berrocal.com.br)

Introdução

O nível de atividade sísmica no Brasil, pelo menos desde épocas históricas, sempre foi o mesmo que na atualidade. Continua ocorrendo atividade sísmica da mesma forma que antigamente, com um nível muito baixo se comparado à regiões tectonicamente ativas, como a Região Andina, onde existe um processo de subducção de placas tectônicas. O Brasil se encontra numa região intraplaca, que é mais estável do ponto de vista tectônico.

O que ocorre é que esse aumento de atividade sísmica é aparente, provocado pelo maior interesse que atualmente existe pelos grupos de sismologia, que foram criados desde a década de 70 em algumas universidades do país, tais como nas de São Paulo, Brasília, Rio Grande do Norte e no Observatório Nacional, do Rio de Janeiro, entre outras. Esses grupos operam atualmente a Rede Sismográfica Brasileira, com mais de 80 estações sismográficas de alta sensibilidade, e publicam continuamente, nos seus *sites* da internet, dados dos sismos registrados nessas estações, como no Boletim Sísmico Brasileiro, elaborado pelo grupo do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG/USP).

Por outro lado, os meios de comunicação estão mais atentos que antigamente às ocorrências sísmicas sentidas pela população. Existe a possibilidade de que sismos de pequena magnitude e de foco muito superficial, acionados pela presença de água de chuva ou de lagos, estejam associados à ocorrência de desabamentos de encostas, os quais podem provocar efeitos catastróficos.

Atividade sísmica não ligada à tectônica

Existem alguns sismos que podem ser causados por outros motivos que por efeitos tectônicos, entre os quais podemos mencionar deslizamentos de terra, explosões em minas ou explosões em testes nucleares. Os sismos induzidos pelos reservatórios hidrelétricos, a maioria de magnitude moderada, têm também origem tectônica porque liberam energia acumulada em alguma época a processos tectônicos antigos ou presentes.

Atividade sísmica ligada à tectônica no Brasil

Em princípio, a grande maioria dos sismos que ocorrem no Brasil está associada a algum tipo de falha geológica que é ativada, ou reativada, através da liberação de energia acumulada por algum processo tectônico. Esse acúmulo de energia pode ser residual de processos tectônicos de eras geológicas antigas ou provocado pelo atual deslocamento da placa Sul Americana. No extremo ocidental do Brasil estão localizados os epicentros de sismos profundos que são provocados pela subducção da placa de Nazca sob a placa Sul Americana.

Importância da Rede Sismológica Sismográfica do Brasil

Em primeiro lugar a importância dessa rede é obter o conhecimento do nível real da atividade sísmica que

ocorre no território brasileiro. Esse conhecimento permitirá determinar com mais precisão o risco sísmico dos locais onde existem ou serão construídas obras de engenharia importantes como usinas nucleares ou reservatórios hidrelétricos.

Além disso, os dados de telessismos registrados na rede permitirão a aplicação de métodos sismológicos modernos como tomografia sísmica, função do receptor, entre outros, que permitirão a determinação da estrutura da crosta e da litosfera, o que será útil para a localização de regiões favoráveis para a concentração de riquezas naturais.

A Rede Sismográfica do Brasil

A Rede Sismográfica do Brasil (ver Figura 1) é uma das maiores contribuições da Petrobras à comunidade geocientífica brasileira através da Rede de Estudos Geotectônicos Petrobrás-Universidades (RGEOTEC). Atualmente com 82 estações, essa rede deverá, no futuro, ser expandida para atingir seus objetivos mencionados anteriormente. Esta rede já tem uma excelente qualidade, compatível com as melhores redes sismográficas internacionais

Atualmente são os grupos sismológicos das Universidades de São Paulo (BRASIS), Brasília (RSCN), Rio Grande do Norte (RSISNE) e do Observatório Nacional (RSIS) que participam na Rede Sismográfica do Brasil, cuja entidade máxima deliberativa é o Comitê Gestor constituído pelos Coordenadores dessas redes.

De acordo com os estatutos dessa rede, as informações adquiridas pelas estações sismográficas, serão de propriedade da Rede Sismográfica Brasileira e serão armazenadas na sede do Observatório Nacional, que implantará uma estrutura para recepção, armazenamento e divulgação destas informações. Com estas características, essa rede contribuirá para o desenvolvimento da sismologia brasileira a níveis de primeiro mundo.



Fig.1 – Distribuição das estações da Rede Sismográfica do Brasil, segundo o mapa apresentado no *site* www.rsbr.gov.br

Oportunidade para alunos interessados em sismicidade Sismologia

Embora o nível de atividade sísmica não seja tão expressivo no território nacional, atualmente a Sismologia não utiliza somente dados de sismos próximos e locais. A Rede Sismográfica Brasileira está constituída por sismógrafos de alta sensibilidade e de banda de operação bastante ampla (banda larga entre 1/30 s até 120 s) que permite utilizar os dados de sismos distantes para estudar a estrutura interna de nosso planeta. Atualmente, os sismólogos também estão aproveitando a vibrações sísmicas naturais do meio ambiente para estudar a estrutura das camadas mais superficiais da Terra. Há projetos de pesquisa nessas áreas desenvolvidos, principalmente nas Universidades de São Paulo, de Rio Grande do Norte e de Brasília.

As instituições brasileiras e os convênios com as congêneres do exterior

Existem projetos conjuntos entre membros dos grupos sismológicos, principalmente os grupos do IAG/USP e do Instituto de Geociências da UFRN, com grupos da América do Norte e da Europa.

Conclusão

Podemos mencionar alguns dados históricos relacionados à implantação e desenvolvimento da Sismologia no Brasil, em homenagem às instituições e aos pesquisadores ligados com esses fatos. A primeira estação sismográfica que operou no Brasil foi instalada em 1906 no Observatório Nacional, no Rio de Janeiro, com um sismógrafo de banda larga e baixa sensibilidade, que registrava, principalmente sismos distantes de magnitude significativa. A segunda iniciativa nesse sentido foi efetuada pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), que na década de 1960, instalou uma Rede Mundial de aproximadamente 120 sistemas sismográficos padronizados (3 sismógrafos de período curto e 3 sismógrafos de período longo) de alta sensibilidade, utilizando os avanços tecnológicos dessa época, e com registro em papel fotográfico; um desses sistemas padronizado foi instalada em Natal, RN, o qual era operado pela Marinha Brasileira, sem compromisso para utilizar os dados registrados e que enviava os registros para serem analisados na sede do USGS nos Estados Unidos.

O primeiro projeto que iniciou a implantação da Sismologia no Brasil começou em 1966 com a Expedição Sismológica Experimental, organizada pela Universidade de Edimburgo, Grã Bretanha, quando foi instalado um sistema sismográfico tipo arranjo com 18 sismógrafos de alta sensibilidade e de período curto, com seus dados transmitidos via UHF e com registro simultâneo em fita magnética de 24 canais. Esse arranjo (South American Array System-SAAS) foi implantado nos arredores de Brasília, em colaboração com o Departamento de Geociências da Universidade de Brasília. Esse estágio experimental foi muito bem sucedido, de modo que foi decidido a implantação

de um SAAS permanente, financiado principalmente pelo Instituto Britânico de Ciências Geológicas e com a participação da UNESCO, do CNPq, do Centro Regional de Sismologia de América do Sul (CERESIS) e da UnB. O arranjo SAAS permanente foi instalado no início da década de 1970, que foi quando foi criado também o Serviço Sismológico da UnB, que deu início ao desenvolvimento da Sismologia no Brasil posterior e dos outros grupos sismológicos mencionados neste documento.





FUNDAÇÃO GORCEIX
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA DO PETRÓLEO





Área de Atuação	Geologia do Petróleo
Sistemas Petrolíferos	Remasterização de Dados Sísmicos
Vetorização	Linhas Sísmicas
Rede de Dados Geofísicos	RDG

CONTATO: Fundação Gorceix - DEPETRO
Rua Carlos Walter Marinho Campos, nº57, Vila Itacolomy
CEP:35400-000 Ouro Preto - Minas Gerais - Brasil
Telefones: (31) 3559 - 7100/ 3559 - 7144

2016

▶ **SIMEXMIN Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral**
 15 a 18 de maio – Ouro Preto, Minas Gerais - MG
 Informações: www.adimb.com.br/simexmin2016/simexmin/

▶ **78th EAGE Conference & Exhibition 2016**
 30 de maio a 2 de junho - Vienna - Austria
 Informações: www.eage.org/event

▶ **ASEG PESA AIG 2016 - 25th International Geophysical Conference & Exhibition**
 21 a 24 de Agosto – Adelaide – Austrália
 Informações: www.conference.aseg.org.au

▶ **35TH International Geological Congress 2016**
 27 de agosto a 4 de setembro - Cape Town – África do Sul
 Informações: www.35igc.org

▶ **SEG Annual Meeting**
 16 a 21 de outubro - Dallas - Estados Unidos
 Informações: www.seg.org/web/annual-meeting-2016/

▶ **Rio Oil & Gas 2016 Expo and Conference**
 24 a 27 de outubro - Rio de Janeiro - RJ
 Informações: www.rioilgas.com.br/

▶ **VII Simpósio Brasileiro de Geofísica**
 25 a 27 de outubro de 2016 - Ouro Preto - MG.
 Informações: sbgf.org.br/simposio



IN EVERY IMAGE
WITH CCG SUBSURFACE IMAGING

Exceptional People - Remarkable Technology - Outstanding Service

cgg.com/SI

