

Histórico da sismicidade no reservatório do Castanhão (CE)

Bonnie Ives de Castro Nunes (PPGG/UFRN), Aderson Farias do Nascimento (DGEF/PPGG/UFRN), Joaquim Mendes Ferreira (DGEF/PPGG/UFRN), Eduardo Alexandre de Menezes (DGEF/UFRN)

Copyright 2012, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no V Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salvador, 27 a 29 de novembro de 2012. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do V SimBGF, mas não necessariamente representa a opinião da SBGF ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGF.

Resumo

A Sismicidade Induzida por Reservatórios (SIR) têm recebido atualmente grande atenção dos geocientistas devido ao potencial em causar danos em estruturas e pessoas. A primeira observação desses eventos foi feita por Carder (1945) no Lago Mead (EUA) e o primeiro evento catastrófico ocorreu em Koyna (1967), na Índia, matando cerca de duzentas vidas. No Brasil são reportados cerca de dezenove casos. Na província Borborema (nordeste do Brasil) foram estudados dois reservatórios: Açú (RN), cuja parede mede 31 metros de altura; e Castanhão (CE), cuja parede mede 60 metros de altura. Este trabalho visa mostrar o histórico da SIR no reservatório do Castanhão de 2003 até 2010.

Introdução

A Sismicidade Induzida por Reservatório (SIR) tem recebido uma grande atenção por parte dos geocientistas principalmente devido ao seu potencial de dano em construções e perdas humanas (Gupta, 2002). O primeiro destes eventos foi observado por Carder (1945) no Lago Mead, nos Estados Unidos. Posteriormente, em 1967, na Índia, um terremoto induzido por reservatório de M 6.3, classificado como o maior até agora, causou muitos danos materiais e ceifou cerca de 200 vidas. Como outros eventos de magnitudes excedentes a M 6 e que causaram danos estruturais temos: Hsinfengkiang, China em 1962; Kariba, fronteira Zâmbia-Zimbábue em 1963; e Kremasta, Grécia em 1966 (Gupta, 2002).

A sismicidade induzida foi classificada por Talwani (1997) em duas categorias temporais:

- Sismicidade inicial: Associada com o represamento inicial ou grandes mudanças no nível do reservatório decaindo a atividade gradualmente com o passar do tempo;
- Sismicidade retardada: Ocorre após os efeitos do represamento inicial e persiste por muitos anos sem redução na frequência ou na magnitude.

No Brasil, Assumpção *et al.* (2002) mostraram que existem dezenove casos de SIR, dos quais dezesseis foram confirmados e três ainda permanecem incertos. No nordeste do Brasil, por exemplo, temos o reservatório de Açú (RN), tendo recebido bastante atenção por parte de

pesquisadores (Ferreira *et al.*, 1995; do Nascimento *et al.*, 2004a, 2004b, 2004c; Pytharouli *et al.*, 2011).

Outro açude estudado no nordeste (Ferreira *et al.*, 2008; Nunes *et al.*, 2011a e 2011b) é o localizado no Castanhão, Ceará. Este reservatório tem uma capacidade de armazenamento de 4,5 bilhões de metros cúbicos, sua lâmina d'água tem o dobro do comprimento daquela do reservatório de Açú (Castanhão: 60 metros; Açú: 31 metros) e é responsável pelo abastecimento de diversas cidades, incluindo Fortaleza, a capital cearense.

O reservatório do Castanhão está localizado na Província Borborema (Figura 1), que é dividida em dois tipos de terrenos: embasamento gnáissico-migmatítico e sequências supra-crustais de origem metavulcânica e/ou metassedimentar (Almeida *et al.*, 1977). Suas rochas mais antigas são detectadas em núcleos gnáissico-migmatíticos localizados em Serra Caiada (RN) com idade de 3,45 Ga (Dantas *et al.*, 1997).

Este trabalho tem como objetivo mostrar o histórico da atividade sísmica no reservatório do Castanhão, bem como mostrar qual o tipo de sismicidade induzida.

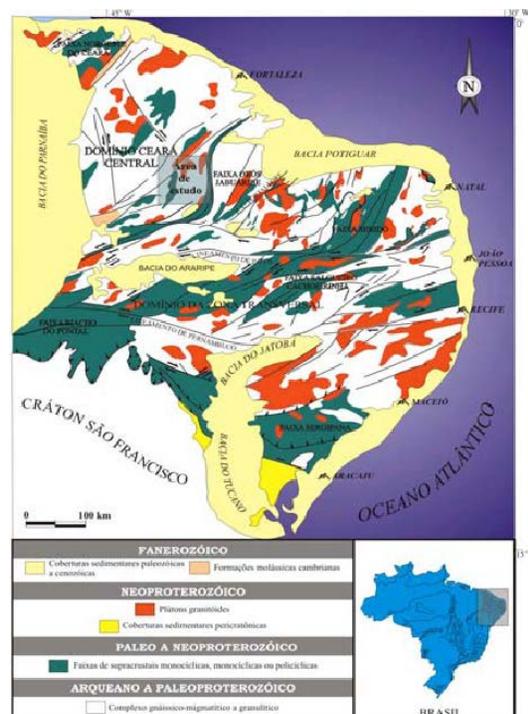


Figura 1: Representação da geologia da Província Borborema e localização da área do reservatório do Castanhão (CE) (Modificado de Camarão Junior, 2001).

Metodologia de monitoramento

O monitoramento dos eventos na fase inicial do enchimento da barragem, no período de 2003 a 2005, foi realizada utilizando-se uma estação digital com sensor triaxial (CS6B), sendo que posteriormente foram instaladas mais três estações analógicas: CS07, CS08 e CS09 (Figura 2). No ano de 2006 o monitoramento foi realizado com o uso de três estações analógicas: CS06, CS07 e CS08 (Figura 3). Em julho de 2007 foi instalada uma rede de seis estações digitais triaxiais (CSBR, CSBV, CSIL, CSLA, CSMU e CSVP) (Figura 4) que foi desativada em julho de 2008, quando esta rede foi deslocada para Sobral, onde uma grande atividade se iniciava, sendo deixada uma estação analógica para monitoramento (CS08) (Figura 5). Entre 2009 e 2010, após a ocorrência de um tremor sentido na localidade do Mineiro foi instalada uma rede digital de seis estações (CSBF, CSFS, CSGB, CSMI, CSMY e CSSF).

Para que fosse feita uma boa análise temporal da sismicidade induzida no Castanhão foi realizada uma contagem de eventos, os quais foram organizados em um histograma de atividade mensal.

Histórico da atividade sísmica no Castanhão

Período de 2003 - 2005

O primeiro evento sísmico atribuído ao reservatório do Castanhão foi registrado em 2003, quando a lâmina d'água ainda estava no entorno dos 20 metros (Ferreira, *et al.* 2008) (Figura 8). Sua magnitude alcançada foi igual a 1.4 e estava no limiar de ser sentido pela população. Devido à falta de monitoramento no período anterior ao registro desses eventos, fica impossível determinar quando esta atividade começou.

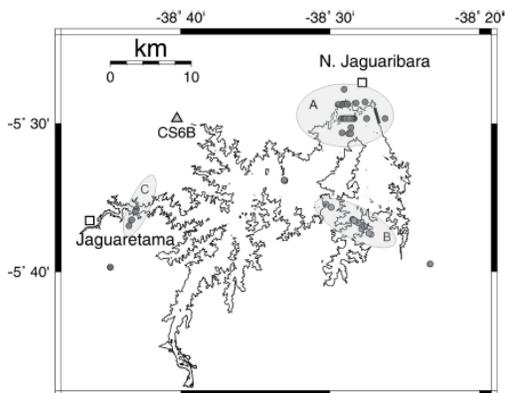


Figura 2: Mapa do reservatório do Castanhão. Os pequenos círculos cinza indicam os epicentros dos eventos ocorridos de março de 2003 a abril de 2005, registrados pela estação CS6B

(triângulo cinza). Os três principais aglomerados são indicados pelas letras A, B e C (Modificado de Ferreira *et al.*, 2008).

Podemos notar também que ao término do enchimento da barragem em março de 2004 ocorre um pico de atividade sísmica para aquele período, o que sugere ter ocorrido devido à resposta elástica do terreno. Podemos notar também que alguns desses sismos se concentram no entorno da parede do açude (Figura 3).

Os eventos localizados neste período mostram uma distribuição concentrada em três aglomerados denominados A, B e C (Figura 2).

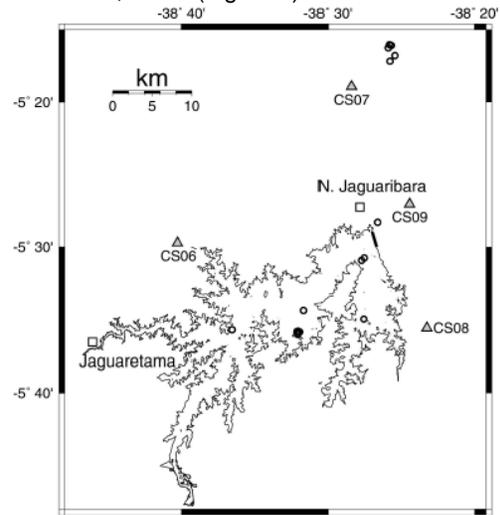


Figura 3: Epicentros determinados pela rede de quatro estações instaladas entre 8 de abril e 26 de junho de 2004. Os pequenos círculos indicam os epicentros. Os triângulos indicam a localização das estações.

Período de 2006 - 2008

A Figura 4 mostra os eventos localizados na área da barragem do Castanhão no período de 2006 a 2008. Podemos notar que o evento 1 e 2 ocorreram praticamente no mesmo local, bem no meio do reservatório enquanto que os eventos 3 (M 2.3) e 4 ocorreram bem próximos à parede da barragem. O evento 3 é particularmente importante, pois foi o primeiro sentido pela população. Ele ocorreu no dia 10 de julho de 2007 às 6:29 h (horário local). Os eventos 5 e 6, de magnitude menor que 2.0, ocorreram às margens do reservatório entre os dias 22 de junho e 10 de julho.

Devido à ocorrência desses dois eventos próximos à parede da barragem, uma rede foi instalada em agosto de 2007. A Figura 5 mostra o quanto a atividade no Castanhão ocorre de forma difusa, sendo os sismos espalhados por várias regiões do reservatório.

Observando a Figura 8 vemos que neste período a atividade sísmica ocorria de forma periódica com pequenos picos em fevereiro, junho e dezembro de 2006; e com picos maiores em agosto de 2007, fevereiro e

junho de 2008. A estrela representa o evento de agosto de 10 de julho de 2007.

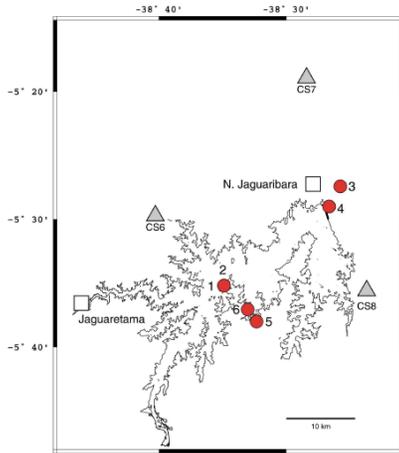


Figura 4: Reservatório da Barragem do Castanhão e rede de monitoramento (estações CS06, CS07 e CS08). Os epicentros mostrados (círculos numerados) são dos únicos eventos registrados concomitantemente pelas três estações em 2006. Os eventos 5 e 6 ocorreram ambos no dia 08/11/2006 e tiveram magnitude 2.0 e 1.3, respectivamente.

2.0, ocorrido às 18:12 h (horário local), foi sentido num raio de 5 km em torno da localidade de Mineiro (Figura 6). Foi sentida uma forte vibração no local, bem como vibração em alumínio e móveis, porém sem efeito nas edificações.

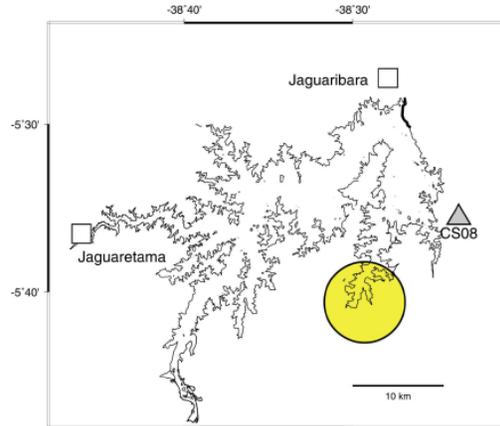


Figura 6: Mapa de localização da área epicentral (círculo amarelo). O triângulo cinza denota a estação sismográfica CS08.

Logo uma rede foi instalada naquela região, onde foi possível localizar vários eventos ocorridos dentro e fora da rede. Os eventos da Figura 7 foram registrados em pelo menos três estações e foram localizados utilizando o programa HYPO71. Podemos notar que ao menos três aglomerados (A, B e C) foram observados, estando dois deles dentro da rede.

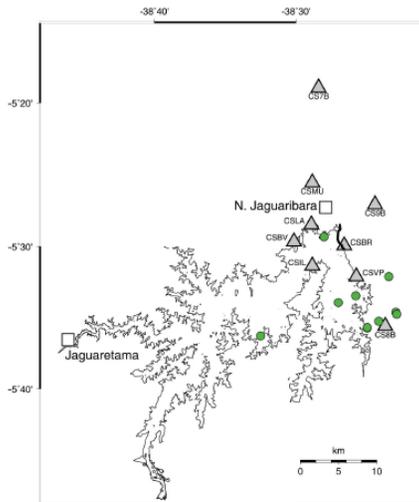


Figura 5: Atividade sísmica na região do Castanhão em 2007. Os triângulos cinza mostram as estações sismográficas (configuração inicial da rede em julho de 2007). Os círculos verdes mostram a posição dos epicentros dos sismos melhor localizados. A estação digital CS8B operou no mesmo local da estação analógica CS08.

Período de 2009 - 2010.

Desde o início de 2009 a atividade sísmica esteve intensa na região do Castanhão. Vários tremores com magnitude acima de 1.5 foram sentidos pela população. No dia 26 de agosto de 2009 um evento de magnitude

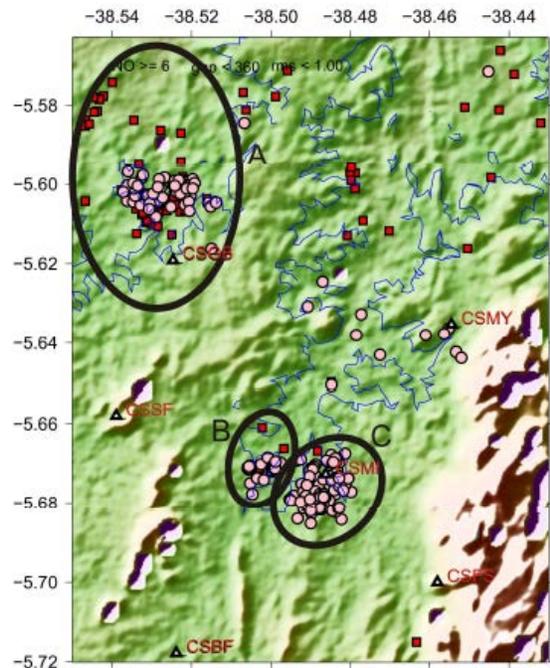


Figura 7: Mapa de localização epicentral. Os epicentros são denotados em função da profundidade h: pequenos círculos rosa, h < 1,3 km; pequenos quadrados vermelhos, h > 1,3 km. A

localização das estações é mostrada pelos triângulos. A linha azul é o limite da área do reservatório. A, B e C denotam os 3 aglomerados principais.

Analisando a Figura 8 notamos um grande pico de atividade em julho de 2010. Este pico está associado ao aglomerado A e consta de 193 eventos.

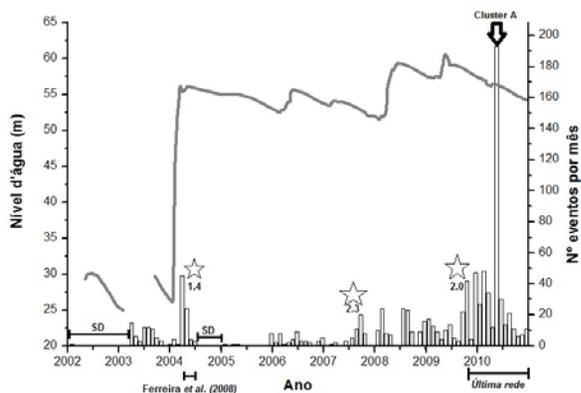


Figura 8: Histograma da atividade sísmica no reservatório do Castanhão entre 2002 e 2010; e o gráfico com o nível d'água alcançado. Os resultados da contagem dos eventos relacionados ao período chamado *Última rede* foram feitos com a rede instalada na época. As estrelas são relacionadas com os eventos mais importantes registrados na região.

Conclusões

Apesar de poucos registros anteriores a 2003, podemos sugerir que a atividade sísmica do Castanhão ocorre devido a um caso de sismicidade induzida por reservatório (SIR), pois durante o período anterior no qual a região foi monitorada nenhum dos eventos registrados estava associado ao local. Note que mesmo em períodos onde apenas uma estação monitorava, temos o aparecimento da atividade durante seu enchimento. Porém, devido à falta de registros anteriores, é impossível determinar quando esta atividade começou. Ainda em 2004, praticamente no mesmo período em que a barragem alcança o nível de sangradouro, é observado um grande pico de atividade que sugere ter sido devido à resposta inicial elástica do terreno.

Durante os diversos períodos de monitoramento da barragem observamos que sua atividade ocorre de forma difusa sendo por várias vezes observadas em aglomerados. Porém, apesar de serem sentidos pela população, a grande maioria dos eventos registrados tem magnitude menor de 2.0.

Podemos notar também que inicialmente (2002) a atividade sísmica no Castanhão se concentrava no entorno da parede da barragem, tendo ocorrido em 2009 uma grande atividade em uma das suas margens, mostrando que sua atividade migrou com o tempo.

Agradecimentos

Somos gratos ao CNPq pela bolsa concedida a B. I. C. Nunes. Ao DNOCS pelo apoio ao monitoramento. Aos projetos do Milênio e INCT-ET pelo apoio ao trabalho de campo. Finalmente, ao PEGBr pelo empréstimo dos equipamentos.

Referências

- Almeida, F. F. M. de (04 co-autores), 1977. Províncias estruturais brasileiras. Atas VIII Simp. Geol. Nordeste, 1, 363-391 pp.
- Assumpção, M. (08 co-autores), 2002. Reservoir-induced Seismicity in Brazil. Pure appl. Geophys. 159. 597 - 617.
- Camarão Junior, L. F., 2001. Tectônica Rúptil e Sismicidade na Área de Inundação do Açude do Castanhão (CE): Implicações para o Risco Sísmico. Dissertação de Mestrado, PPGG-UFRN, Natal-RN, 98 pp.
- Carder, D. S., 1945. Seismoc investigations in the Boulder Dam area, 1940 - 1944, and the influence of reservoir loading on earthquake activity. Bul. Seismol. Soc. Am. 35, 175 - 192.
- 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.
- Dantas et al. (03 co-autores), 1997. Arcabouço cronoestratigráfico do Maciço Caldas Brandão - RN - Província Borborema - NE do Brasil. In: Simp. Geol. Nordeste, Fortaleza, Ceará. Resumo expandido, 20 - 23 pp.
- do Nascimento, A.F., Lunn, R.J.&Cowie, P.A., 2004a. Modelling the heterogeneous hydraulic properties of faults using constraints from Reservoir Induced Seismicity, Geophys. J. Int., 160, 249-262.
- do Nascimento, A.F., Lunn, R.J.&Cowie, P.A., 2004b. Numerical modelling of pore pressure diffusion in a reservoir-induced seismicity site in NE Brazil, Geophys. J. Int., accepted for publication.
- do Nascimento, A.F., Cowie, P.A., Lunn R.J. & Pearce, R.G., 2004c. Spatio-temporal evolution of induced seismicity at Açu reservoir, NE Brazil, Geophys. J. Int, 158, 1041-1052.
- Ferreira, J.M., França, G.S., Vilar, C.S., do Nascimento, A.F., Bezerra, F.H.R., Assumpção, M., 2008. Induced seismicity in the Castanhão reservoir, NE Brazil - Preliminary results. Tectonophysics, 456, 103-110.
- Nunes, B. I. C., et al. (05 co-autores). Reservoir-induced Seismicity at Castanhão (NE Brazil). In: 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Resumo expandido.

Pytharouli, S. I. (2011). Microseismicity illuminates opens fractures in the shallow crust. *Geophys. Res. Lett.* 38. L2402.

Talwani, P., 1997. On the Nature of Reservoir-induced Seismicity. *Pure appl. geophys.* 150, 473 - 492.