

Sismicidade intraplaca em Pedra Preta (RN) no período de 2013 a 2014

Intraplate seismicity in Pedra Preta (RN) in the period from 2013 to 2014

Cristiane de Souza Costa¹, Joaquim Mendes Ferreira^{1,2}, Heleno Carlos de Lima Neto³,
Francisco Hilário Rego Bezerra^{1,4}, Maria Osvalneide Lucena Sousa⁴

¹Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal, RN, BR (crisgeof@gmail.com)

²Departamento de Geofísica, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal, RN, BR (joaquim@geofisica.ufrn.br)

³Universidade Potiguar - UnP, Natal, RN, BR (helenocarlos@gmail.com)

⁴Departamento de Geologia, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal, RN, BR (bezerrafh@geologia.ufrn.br, molucena@geologia.ufrn.br)

Recebido em 15 de outubro de 2016; aceito 13 de março de 2017

Resumo

A atividade sísmica em Pedra Preta (RN), localizada no Nordeste do Brasil, região de maior sismicidade intraplaca do país, teve início em dezembro de 2010. Antes disso, não havia registro de sismos na área. Durante o ano de 2013 e início de 2014, a rede sismográfica de Pedra Preta registou 273 sismos locais em 3 ou mais estações. Desses eventos foram selecionados os 50 com melhor leitura dos tempos de chegada das ondas P e S, sendo determinado o modelo de velocidades ($V_p/V_s = 1,72$ e $V_p = 5,90$ km/s) e calculados os hipocentros, com o programa HYPO71. Para a determinação do mecanismo focal composto foi realizada uma nova seleção de sismos obedecendo critérios mais restritos para os hipocentros (epicentros localizados dentro da rede com residuo médio de tempo de chegada $\leq 0,01$ s, número de observações ≥ 10 , erro médio na horizontal $< 0,1$ km, erro médio na vertical $< 0,1$ km), tendo sido selecionados por esses critérios 24 eventos. Os hipocentros desses sismos mostram que a falha sismogênica tem aproximadamente 3 km de extensão, com sismos de 2,3 a 5,8 km de profundidade. Os parâmetros da falha sismogênica foram obtidos pela combinação do método dos mínimos quadrados e do programa FPFIT (*strike* = 254° , *dip* = 67° e *rake* = -66°), caracterizando uma falha normal. Os epicentros e o mecanismo focal foram utilizados para verificar se havia ou não possível correlação com feições geológicas mapeadas na área. A conclusão é que não existem feições geológicas mapeadas que possam estar relacionadas diretamente com a atividade sísmica estudada.

Palavras-chave: Atividade sísmica; Determinação hipocentral; Mecanismo focal; Falhas sismogênicas; *Sismotectônica*.

Abstract

The seismic activity in Pedra Preta (RN), Northeast of Brazil, region of main intraplate seismicity of the country, began in December 2010. Before that year, there was no record of earthquakes in this area. During 2013 and early 2014, the seismographic network deployed in Pedra Preta registered 273 local earthquakes in 3 or more stations. Of these, 50 events with the best readings of the arrival times of the P and S waves were selected to determine velocity model ($V_p/V_s = 1.72$ and $V_p = 5.90$ km/s) and their hypocenters were calculated, with HYPO71 software. For the determination of the composed focal mechanism, it was realized a new selection with earthquakes obeying more stringent criteria for the hypocenters (epicenters located within the network with mean arrival-time residue ≤ 0.01 s, number of observations ≥ 10 , mean horizontal error < 0.1 km, mean vertical error < 0.1 km), having been selected 24 events by these criteria. The hypocenters of earthquakes show that the seismogenic fault is about 3 km long, with earthquakes between 2.3 and 5.8 km deep. The parameters of seismogenic fault were obtained by combining the method of least squares and FPFIT software (*strike* = 254° , *dip* = 67° and the *rake* = -66°), indicating a normal fault. The hypocenters and focal mechanism were used to verify if there was possible correlation with geological features mapped in the area and the conclusion is that there are no mapped geological features that may be directly related to the seismic activity studied.

Keywords: Seismic activity; Determination of hypocenters; Focal mechanism; Seismogenic faults; Seismotectonics.

INTRODUÇÃO

A atividade sísmica em regiões intraplaca, como o Brasil, não apresenta as mesmas condições percebidas em regiões de borda de placa, de modo que o pequeno número de eventos registrados torna o estudo nessas áreas bastante complexo. Apesar disso, muito tem sido feito no Brasil (Assumpção et al., 2014), em particular na Província Borborema (por exemplo Ferreira et al., 1998; Lima Neto et al., 2014; Oliveira et al., 2015), que é a região de maior atividade sísmica no país. Particular destaque é dado aos sismos na borda da Bacia Potiguar, abrangendo o Rio Grande do Norte e o leste do Ceará, geralmente se apresentando na forma de sequências e podendo durar de meses a alguns anos, com alguns tremores de magnitude acima de $5,0 m_R$, que causam danos em edificações e pânico e fuga das populações (Ferreira e Assumpção, 1983; Ferreira et al., 1998). Se por um lado sequências sísmicas causam transtornos sociais, por outro são uma rara oportunidade para o estudo de sua atividade.

Um dos casos mais recentes é o da sismicidade nas proximidades da cidade de Pedra Preta (RN), onde, desde dezembro de 2010, vem ocorrendo tremores de terra. A primeira campanha foi realizada em 2011, e os resultados preliminares foram publicados por Dantas et al. (2011). A atividade sísmica prosseguiu e, em outubro de 2013, houve um sismo de magnitude 3,7 na escala m_R (Assumpção, 1983) — o de maior grau até então. Isso ensejou a realização de uma nova campanha realizada nos anos 2013 e 2014.

O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados sísmológicos obtidos (hipocentros e mecanismo focal) e discutir uma possível correlação com feições geológicas mapeadas na região. Nesse aspecto, é uma importante contribuição para o entendimento da sismicidade intraplaca, área na qual é difícil estabelecer relações entre o fenômeno e suas possíveis causas.

GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO

Geologicamente, a área de estudo (Figura 1) está inserida na Província Borborema, no limite entre o embasamento e a Bacia Potiguar. Na parte sul da área, predomina o embasamento aflorante, sendo composto, essencialmente, por rochas do Brasileiro, do Neoproterozoico e do Arqueano/Paleoproterozoico, com intrusões de diques do Vulcanismo Ceará Mirim, aproximadamente entre 120 e 170 Ma. Já na parte norte, predominam rochas sedimentares da Bacia Potiguar, tanto originadas no período Cretáceo (representado pelas formações Açú e Jandaíra), quanto no Cenozoico, incluindo coberturas quaternárias (Formação Barreiras, depósitos aluvionares e depósitos de canal).

A Formação Açú é composta por arenitos variegados, folhelhos e argilitos relacionados a leques aluviais e sistemas

fluviais (CPRM, 2005). E a Formação Jandaíra inclui calcários, calcários bioclásticos e evaporitos de planície de mar e plataforma carbonática rasa (CPRM, 2005). Nota-se, ainda, no mapa da Figura 1, a presença de intrusões do Vulcanismo Macau com idade entre 40 e 18 Ma (Sial, 1976).

AQUISIÇÃO, ANÁLISE DE DADOS E MODELO DE VELOCIDADES

Conforme mencionado anteriormente, a atividade sísmica em Pedra Preta teve início em dezembro de 2010. Antes disso, não havia registro de sismos nessa área (Ferreira e Assumpção, 1983; Boletim Sísmico Brasileiro). Desde o início, o monitoramento da atividade sísmica no local, em tempo real, foi realizado pela estação sísmográfica de Riachuelo (RCBR), a aproximadamente 45 km da área epicentral. Posteriormente, o monitoramento passou a ser feito pela estação de Cabeço Preto (Cabeço Preto — ACCP, Figura 1).

Logo após a ocorrência de dois eventos fortemente sentidos em Pedra Preta em 24 e 25 de outubro de 2013, atingindo magnitude $3,0 m_R$ e $3,7 m_R$, respectivamente, pesquisadores do Laboratório Sísmológico (LabSis) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) decidiram instalar mais cinco estações (Olho D'Água do Capim — ACOC, Toco Preto — ACTP, Baixa da Beleza — ACBB, São Severino — ACSS e Riacho — ACRI) na região, que, juntamente com a ACCP, formaram uma rede local de seis estações para o estudo da atividade sísmica, cuja distribuição está apresentada na Figura 1. O Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) de Estudos Tectônicos financiou a campanha.

Cada estação foi provida de um acelerógrafo triaxial, modelo 131 A 02/3, e de um registrador DAS 130, fabricados pela Reftek e disponíveis no LabSis. As coordenadas das estações foram obtidas via equipamentos GPS, acoplados em cada uma delas, e a taxa de amostragem dos registros foi de 100 amostras por segundo.

A rede sísmográfica de Pedra Preta registrou 572 sismos locais (distância epicentral menor que 10 km) durante o período de novembro de 2013 a março de 2014, e apenas 273 sismos foram registrados em 3 ou mais estações. Esses eventos foram majoritariamente microtremores de magnitude menor que 1,0.

Inicialmente, foram feitas as leituras do tempo de chegada das ondas P e S, com o uso do software Compass, fornecido pelo fabricante dos registradores (Reftek). A próxima etapa foi obter um conjunto confiável de dados e, em seguida, determinar a velocidade das ondas P (V_p) e a razão entre ela e a velocidade das ondas S (V_s).

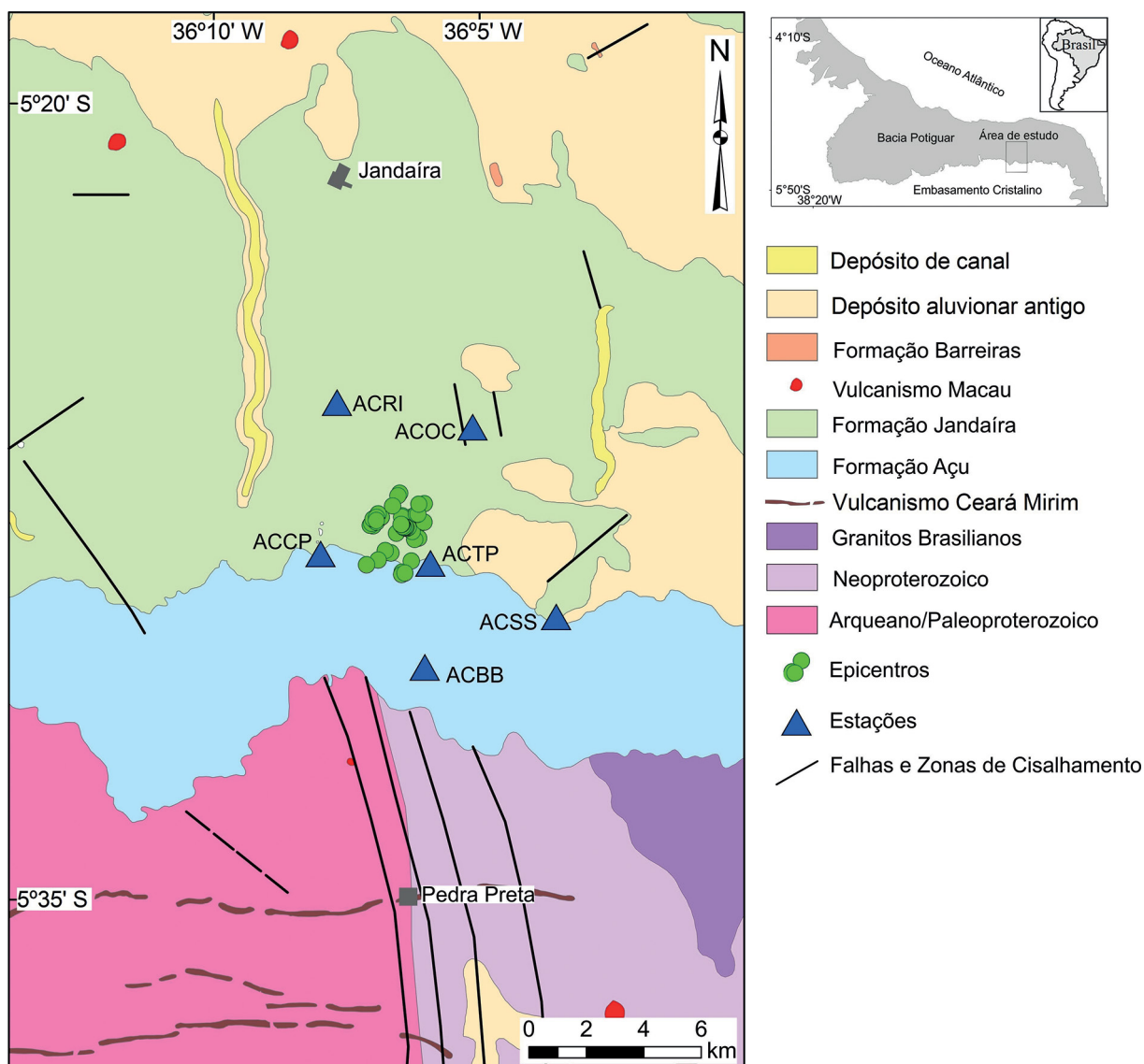
Um exemplo típico de sismograma é mostrado na Figura 2. Como se pode observar, as chegadas das ondas P e S são

bastante claras, o que é muito comum e permite boa precisão nas leituras dos tempos de chegada.

O método utilizado para a obtenção do conjunto de dados confiáveis foi o do diagrama Wadati (Kisslinger e Engdahl, 1973), que serve como controle de qualidade dos dados e por meio do qual se pode calcular o desvio-padrão de cada leitura dos tempos de chegada — assim, as leituras que tiveram elevado desvio-padrão foram rejeitadas. Esse método permite também estabelecer a relação V_p/V_s , o que possibilitou a obtenção de um conjunto de 50 eventos com as melhores leituras, de modo que, chegou-se à relação $V_p/V_s = 1,72$. A visualização do diagrama Wadati para esses 50 eventos está disponível na Figura 3.

O modelo de velocidades escolhido foi o do semiespaço, em que os parâmetros a serem utilizados na determinação hipocentral são a razão V_p/V_s e a velocidade V_p (na prática as velocidades das ondas P e S). Esse tipo de modelo é aceitável, pois a rede apresenta estações bem próximas à área epicentral, instaladas sobre o embasamento Pré-Cambriano, constituído de rochas consolidadas e de baixa atenuação. O modelo de semiespaço tem sido utilizado desde 1986 (por exemplo Ferreira et al., 1987; Ferreira et al., 1998; Lima Neto et al., 2013; Oliveira et al., 2015).

Para a determinação hipocentral foi utilizado o programa HYPO71 (Lee e Lahr, 1975), que leva em conta o método de Geiger, determinando o hipocentro por meio de



Fonte: Modificado de Costa e Dantas (2014), Vital et al. (2012) e Angelim et al. (2006).

Figura 1. Mapa geológico da área de estudo, mostrando as estações utilizadas e os epicentros dos 50 eventos selecionados.

aproximações sucessivas; trata-se da técnica mais empregada nessa determinação. O HYPO71 é um programa robusto empregado em todos os estudos com redes locais efetuados pelo LabSis (UFRN).

Utilizando a razão $V_p/V_s = 1,72$ e se varrendo as velocidades no intervalo 5,50 a 6,40, com o auxílio do HYPO71, foi possível verificar que a velocidade que gerava menores resíduos médios na determinação hipocentral era a $V_p = 5,90$ km/s. O resíduo médio do tempo de chegada (RMS) para o conjunto de 50 eventos selecionados foi 0,0219 s.

DETERMINAÇÃO DOS HIPOCENTROS

Com o modelo e os parâmetros de velocidade mencionados anteriormente, foram calculados os hipocentros dos 50 eventos selecionados utilizando o programa HYPO71. Os valores médios das incertezas, para esses eventos, foram: 0,0219 na determinação do RMS; 0,1468 km o erro médio horizontal (ERH) na determinação do epicentro e 0,1778 km o erro médio vertical (ERZ) na determinação da profundidade focal.

A Figura 1 apresenta também a localização dos 50 eventos. Como se pode ver, os eventos estão localizados dentro da rede sismográfica, o que explica os baixos resíduos obtidos bem como os baixos valores do erro médio de localização hipocentral (ERH e ERZ).

MECANISMO FOCAL

O objetivo da determinação do mecanismo focal é conhecer os parâmetros da falha sismogênica, o que possibilita uma discussão fundamentada sobre a possível correlação entre a atividade sísmica estudada e feições geológicas mapeadas na região.

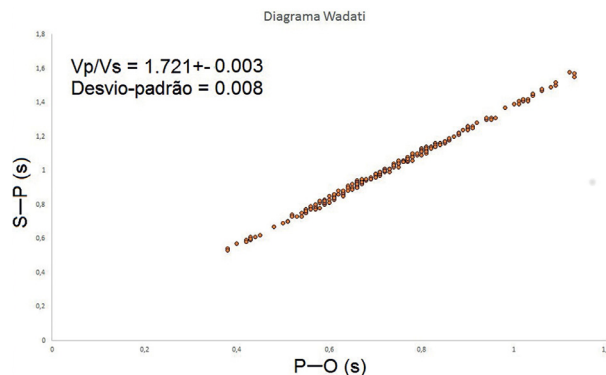


Figura 3. Gráfico do Diagrama Wadati dos 50 eventos selecionados, sendo S – P a diferença dos tempos de chegada das ondas S e P, e P – O a diferença da chegada da onda P e a hora de origem do terremoto. O coeficiente angular da reta é dado por $a = V_p/V_s - 1$.

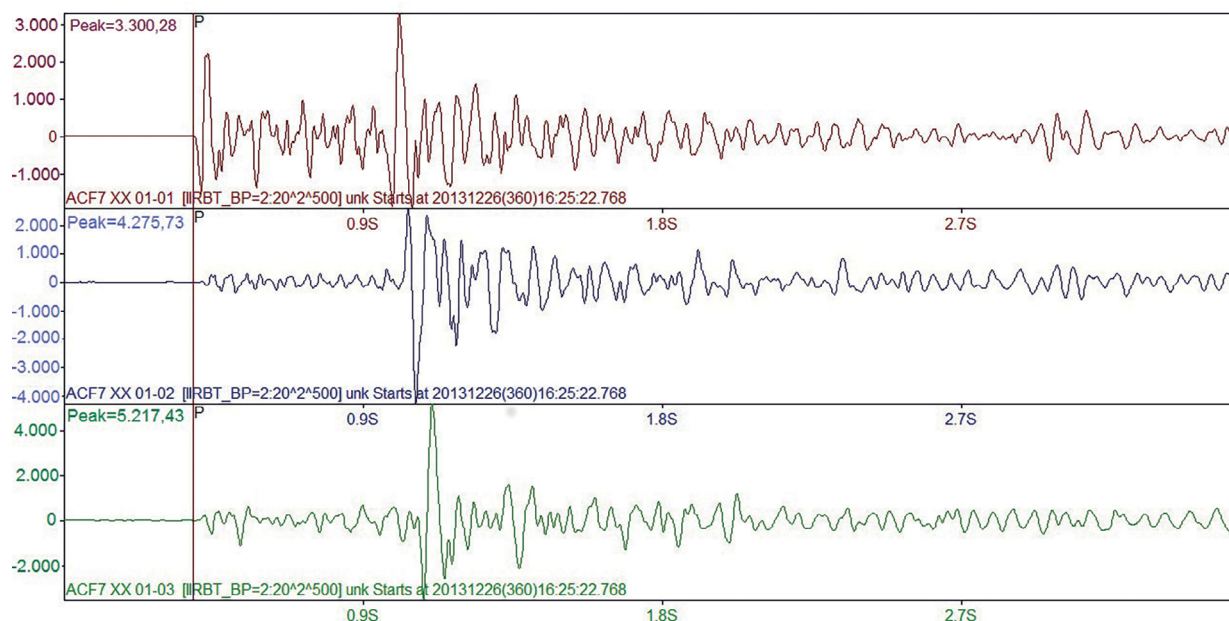


Figura 2. Sismograma registrado nas três componentes da estação ACCP com filtro passa-banda (2 a 20 Hz) e indicação da fase P.

Existem diversos métodos de se fazer isso a partir dos dados. No entanto, devido ao pequeno número de estações instaladas na campanha, optou-se pela utilização do método de determinação do mecanismo focal composto a partir da polaridade da chegada da onda P nas diversas estações, supondo que todos os eventos pertencem à mesma falha e têm o mesmo movimento. Para auxiliar na obtenção dos parâmetros, foi utilizado o programa FPFIT (Reasenber e Oppenheimer, 1985), o qual determina a solução minimizando as discrepâncias nas polaridades, supondo que o padrão de radiação seja de um duplo binário.

Para a determinação do mecanismo focal composto da atividade sísmica na região foram selecionados, dentre os 50 eventos, os que satisfaziam as condições mais restritas, no caso:

1. Gap < 180°, ou seja, os eventos devem estar dentro da rede sismográfica;
2. RMS ≤ 0,01 s;
3. número de observações ≥ 10 (leituras P + S);
4. ERH < 0,1 km; e
5. ERZ < 0,1 km.

Esses critérios serviram para assegurar que os dados a serem utilizados para a determinação do mecanismo focal fossem os de melhor qualidade possível. Nessas condições, foi possível selecionar 24 eventos. A comparação entre a qualidade média desses e dos 50 eventos iniciais pode ser verificada na Tabela 1. Como se pode notar, os erros médios dos tremores selecionados são bem menores que os do conjunto de sismos original.

O programa FPFIT pode calcular a direção (*strike*), o mergulho (*dip*) e a obliquidade (*rake*) relativos à falha

sismogênica e seu movimento. No entanto, a direção e o mergulho da falha podem ser obtidos diretamente da distribuição dos hipocentros por meio de um ajuste por mínimos quadrados. Por essa metodologia, foram determinados a direção (254°) e o mergulho (67°) da falha.

Na Figura 4 são mostrados os epicentros e os hipocentros dos 24 eventos selecionados. Os epicentros dos sismos paralelos e perpendiculares à falha são direcionados pelas setas azuis (b e c), respectivamente (Figura 4A). Os hipocentros estão em projeções verticais (Figuras 4B e 4C) de acordo com o plano determinado pelo método dos mínimos quadrados. Como se pode notar, a falha tem direção aproximada WSW e mergulho aproximado NNW.

Os dados hipocentrais revelam uma falha sismogênica de aproximadamente 3 km de extensão. Os hipocentros mais rasos (2,3 a 3,7 km) estão na parte superior, enquanto os mais profundos (3,8 a 5,8 km), distribuem-se ao longo de toda a falha.

Para determinar o tipo do movimento, foi utilizado o programa FPFIT, que calculou o *rake* com os valores da direção e do mergulho fixos. O valor obtido foi -66°, o que implica um movimento de falha normal.

O mecanismo focal é apresentado na Figura 5, na qual é possível verificar um pequeno número de polaridades

Tabela 1. Comparação dos valores de RMS, ERH e ERZ entre o conjunto inicial de dados (50 eventos) e os 24 sismos selecionados para a determinação do mecanismo focal.

Eventos	RMS (s)	ERH (km)	ERZ (km)
50	0,0219	0,1468	0,1778
24	0,0066	0,0367	0,0542

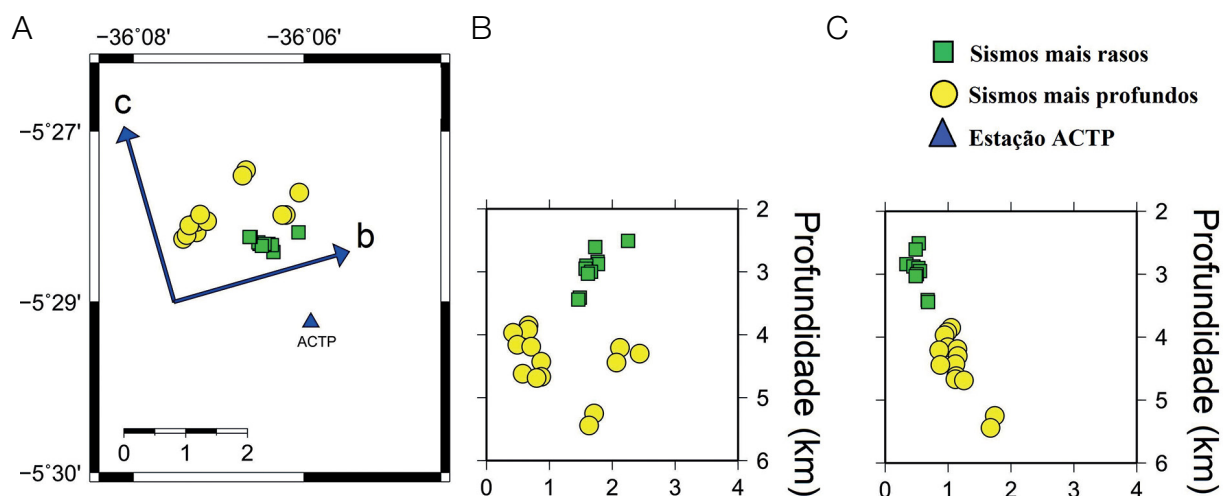


Figura 4. (A) Mapa dos epicentros dos 24 eventos para a determinação do mecanismo focal. As setas azuis indicam as direções das projeções (b e c); (B) projeção dos hipocentros em plano vertical paralelo à direção do plano de falha; (C) projeção dos hipocentros em plano vertical perpendicular à direção do plano de falha.

discrepantes — entre elas, as que ocorrem nas regiões afastadas dos planos nodais podem ser explicadas.

Dessa forma, podemos afirmar que a atividade sísmica em Pedra Preta, ocorrida em 2013 e 2014, deu-se em uma falha normal, de direção 254° e mergulho 67° , sob a ação de tensões tectônicas, aproximadamente com o eixo T (tração) NNW.

DISCUSSÕES E CONCLUSÃO

A atividade sísmica em Pedra Preta de 2013 e 2014 é mais um caso de atividade sísmica intraplaca na Província Borborema e, particularmente, na borda da Bacia Potiguar. Ela ocorreu em uma área onde não se conhecia atividade sísmica antes de 2010 e, desde então, foram registrados diversos surtos de maior atividade, entre eles o objeto deste estudo.

No presente trabalho foram obtidos, com boa precisão, os hipocentros dos sismos e foi determinado o mecanismo focal composto dessa atividade. Os dados, por sua qualidade, permitem que a discussão de uma possível correlação com feições geológicas mapeadas na região possa ser feita com respaldo técnico.

O problema da correlação entre sismicidade e feições geológicas de sismos intraplaca não é simples. Muito já foi discutido sobre isso e há tentativas de explicações gerais (e.g. Sykes, 1978; Talwani, 2014); mas, na prática, cada caso é um caso.

Alguns autores mostraram que, na Província Borborema, há bons exemplos de correlação e de não correlação, sendo a não correlação mais frequente (Ferreira et al., 1998; Bezerra et al., 2011). Outro resultado importante obtido tem relação

com a reativação de grandes zonas de cisalhamento. Ficou demonstrado que o Lineamento Pernambuco está reativado em alguns trechos (Ferreira et al., 1998, 2008; Lima Neto et al., 2013). No entanto, não há evidências de que o Lineamento Sobral-Pedro II esteja reativado (Oliveira et al., 2015).

No caso da atividade sísmica estudada, conforme se verifica na Figura 1, não há falhas mapeadas na área epicentral que possam estar diretamente correlacionadas à atividade sísmica. Considerando que os sismos ocorrem em zonas de fraqueza sob a ação de esforços tectônicos adequadamente orientados (Sykes, 1978), podemos discutir possíveis fontes de zonas de fraqueza na região.

Ao Sul, onde se encontra Pedra Preta, existe uma zona de cisalhamento que deve se prolongar para Norte, passando pela área epicentral. Nesse caso, a atividade sísmica estaria sobre uma zona de cisalhamento, embora a falha sismogênica seja praticamente perpendicular a ela e o movimento atual seja de falha normal.

Outras possíveis contribuições para a existência de uma zona de fraqueza na região podem estar associadas aos processos de implantação dos diques do Vulcanismo Ceará Mirim, da formação da Bacia Potiguar e, mais recentemente, do Vulcanismo Macau presente na região.

Assim, não é possível correlacionar diretamente a atividade sísmica às feições geológicas mapeadas, embora haja na região várias feições cuja gênese pode estar associada à zona de fraqueza crustal responsável pelos sismos. Novos estudos geológicos e geofísicos podem esclarecer melhor a tectônica atual em Pedra Preta.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao revisor Marcelo Assumpção e ao revisor anônimo pelas sugestões e críticas positivas, o que melhorou muito o nosso trabalho. Ao técnico Eduardo Alexandre Santos de Menezes, pelo trabalho de campo. Este estudo foi patrocinado pelo Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq) por meio do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Estudos Geotectônicos (INCT-ET). Cristiane de Souza Costa agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela sua bolsa de mestrado, e Joaquim Mendes Ferreira e Francisco Hilário Rego Bezerra agradecem ao CNPq por suas bolsas de pesquisa.

REFERÊNCIAS

Angelim, L. D. A., Nesi, J. R., Torres, H. H. F., Medeiros, V. C., Santos, C. A., Veiga Júnior, J. P., Mendes, V. A. (2006). *Mapa Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte*. Escala 1:500.000. Programa Geologia do Brasil-PGB. 2 mapas 21 × 29,7 cm. Recife: CPRM.

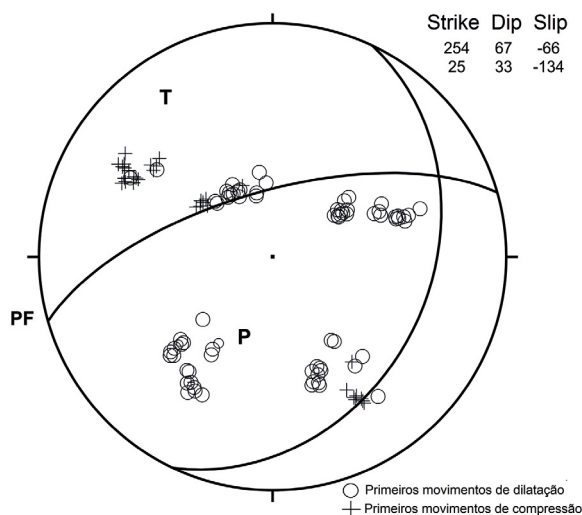


Figura 5. Mecanismo focal composto para os 24 eventos selecionados. T: eixo de dilatação; PF: plano de falha; P: eixo de compressão.

- Assumpção, M. (1983). A regional magnitude scale for Brazil. *Bulletin of the Seismological*, 73, 237-246.
- Assumpção, M., Ferreira, J. M., Barros, L., Bezerra, F., França, G., Barbosa, J. R., Menezes, E., Ribotta, L. C., Pirchiner, M., Nascimento, A. F., Dourado, J. C. (2014). Intraplate seismicity in Brazil. In: P. Talwani (Ed.), *Intraplate Earthquakes* (50-71). Cambridge: Cambridge University Press.
- Bezerra, F. H. R., Nascimento, A. F., Ferreira, J. M., Nogueira, F. C., Fuck, R. A., Neves, B. B. B., Sousa, M. O. L. (2011). Review of active faults in the Borborema Province, Intraplate South America – Integration of seismological and paleoseismological data. *Tectonophysics*, 510, 269-290.
- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) (2005). *Diagnóstico do município de Pedra Preta. Projeto cadastro de fonte de abastecimento por água subterrânea Estado do Rio Grande do Norte*. Rio Grande do Norte: PRODEEM/CPRM.
- Costa, A. P., Dantas, A. R. (2014). *Lajes. Folha SB.24-X-D-VI. Estado do Rio Grande do Norte. Carta Geológica e de Recursos Minerais*. Escala 1:100.000. Programa Geologia do Brasil-PGB. 1 mapa colorido, 90 × 70 cm. Recife: CPRM.
- Dantas, R. R. S., Lima Neto, H. C., Ferreira, J. M., Nascimento, A. F., Assumpção, M. S., Bezerra, F. H., Costa, N. P. (2011). Atividade sísmica em Pedra Preta-RN em 2010. *12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society* (319). Rio de Janeiro: SBGF.
- Ferreira, J. M.; Assumpção, M. (1983). Sismicidade do Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 1, 67-88.
- Ferreira, J. M., Bezerra, F. H. R., Sousa, M. O. L., Nascimento, A. F., Sá, J. M., França, G. S. (2008). The role of Precambrian mylonitic belts and present-day stress field in the coseismic reactivation of the Pernambuco lineament, Brazil. *Tectonophysics*, 456, 111-126.
- Ferreira, J. M., Oliveira, T., Takeya, M. K., Assumpção, M. (1998). Superposition of local and regional stresses in northeast Brazil: evidence from focal mechanisms around the Potiguar marginal basin. *Geophysical Journal International*, 134(2), 341-355.
- Ferreira, J. M., Takeya, M., Costa, J. M., Moreira, J. A. M., Assumpção, M., Veloso, J. A. V., Pearce, R. G. (1987). A continuing intraplate earthquake sequence near João Câmara, northeastern Brazil. Preliminary results. *Geophysical Research Letters*, 14(10), 1042-1045.
- Kisslinger, C., Engdahl, E. R. (1973). The interpretation of the Wadati diagram with relaxed assumptions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 63(5), 1723-1736.
- Lee, W. H. K., Lahr, J. C. (1975). HYPO71 (revised): a computer program for determining hypocenter, magnitude and first motion pattern of local earthquakes. *United States Geological Survey. Open File Report*, 75-311.
- Lima Neto, H. C., Ferreira, J. M., Bezerra, F. H. R., Assumpção, M., 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*, 633, 211-220.
- Lima Neto, H. C., Ferreira, J. M., Bezerra, F. H. R., Assumpção, M., 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*, 608, 804-811.
- Oliveira, P. H. S., Ferreira, J. M., Bezerra, F. H. R., Assumpção, M., Nascimento, A. F., Sousa, M. O. L., Menezes, E. A. S. (2015). Influence of the continental margin on the stress field and seismicity in the intraplate Acaraú Seismic Zone, NE Brazil. *Geophysical Journal International*, 202, 25-34.
- Reasenber, P., Oppenheimer, D. (1985). FPFIT, FPLOT and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions. *United States Geological Survey Open File Report*, 85-739.
- Rede Sismográfica Brasileira. Boletim Sísmico Brasileiro. Acesso em 15 de julho de 2016, <http://www.rsbr.gov.br/boletim_sb.html>.
- Sial, A. N. (1976). The post-Paleozoic vulcanism of Northeast Brazil and its tectonic significance. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 48, 299-312.
- Sykes, L. R. (1978). Intraplate seismicity, reactivation of preexisting zones of weakness, alkaline magmatism, and other tectonism postdating continental fragmentation. *Review of Geophysics and Space Physics*, 16(4), 621-688.
- Talwani, P. (2014). Unified model for intraplate earthquakes Intraplate earthquakes. In: P. Talwani (Ed.), *Intraplate Earthquakes* (275-302). Cambridge: Cambridge University Press.
- Vital, H., Tabosa, W. F., Farias, P. R. C., Lima, Z. M. C., Araújo, P. C., Silva, D. R. V. (2012). *Carta Geológica 1:100.000 - Folha Jandaira - SB-24-X-D-III*. Recife: CPRM; Programa Geologia do Brasil-PGB.