



Estudo da atividade sísmica em São Caetano-PE em 2007.

Helena Carlos de Lima Neto, Joaquim Mendes Ferreira, Aderson Farias do Nascimento & Francisco Hilário Rego Bezerra.
PPGG/UFRN - Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

The seismic activity in São Caetano started in 2006 and in May 20th, 2006 a 4.0 m_b earthquake hit there. This was the largest earthquake ever reported in Pernambuco State. The seismicity studied occurred in a NE trending branch of Pernambuco Lineament.

This study shows results of a campaign done in the period from February 1th, 2007 to July 31th 2007. In this campaign up to nine three-component digital seismographic stations were deployed and the collected data was used to determine hypocenters and focal mechanism. A total of 214 earthquakes, recorded at least by three stations, were analyzed.

To determine hypocenters and time origin the HYP071 program was used assuming a half-space model with parameters: V_P (P-wave velocity) equal to 5.90 km/s and the ratio V_P/V_S 1.70, where V_S is the S-wave velocity. The earthquakes hypocentral distribution was approximately 4 km long and agrees with the NE-SW direction of the Pernambuco Lineamento branch. Hypocenters depth range from 2 to 8 km.

The composed focal mechanism was made from a group of 14 selected earthquakes. We try firstly to find the fault plane solution matching the polarity distribution at stations, using the FPFIT program. The result was 43 deg \pm 15 deg for strike, 59 deg \pm 9 deg for dip and -142 deg \pm 15 deg for rake. We also fitted a plane using the hypocentral distribution to obtain the dip and azimuth of the hypocentral distribution. The results obtained by this fit were 58 deg for the azimuth, 55 deg for the dip. The rake was then determined using FPFIT and polarities distribution, obtained a value of -155 deg for it. This result shows a mechanism of a strike-slip dextral fault with a normal component.

This expanded abstract shows, once more, that there is a good correlation between the seismic activity and geological features in the region near the Pernambuco Lineament and its NE branches.

Introdução

A atividade sísmica em São Caetano iniciou-se em 2006 e no dia 20/05/2007 ocorreu, neste município, um sismo de magnitude 4,0 m_b . Este é o sismo de maior magnitude que ocorreu no estado de Pernambuco até hoje.

Este trabalho é decorrente da análise de dados coletados durante o período de monitoramento na região que foi de 01/02/2007 até 21/07/2007. Nesse monitoramento foi utilizada uma rede sísmográfica de seis até nove estações digitais portáteis. Os dados coletados por essas estações foram analisados, objetivando a determinação dos hipocentros e do mecanismo focal composto.

A atividade sísmica na região Agreste de Pernambuco é bastante conhecida. Considerando num raio de 50 km em torno de Caruaru temos os sismos ocorridos em Santa Cruz do Capibaribe (1970), Toritama (1974), Tacaimbó (1987 e 2004), Caruaru (1967, 1984, 1991 e 2002), Belo Jardim (2004) e São Caetano (desde 2006) segundo Ferreira & Assumpção 1983, Berrocal *et al.* 1984, Ferreira *et al.* 1998 e 2008, Vasconcelos *et al.* 2008.

A atividade sísmica na região de Belo Jardim teve início em 2004 e persistiu por vários meses com magnitude máxima de 3,1 m_b no dia 1^a de junho de 2004. Esses sismos foram o primeiro enxame sísmico conhecido que ocorreu em Belo Jardim. (Vasconcelos *et al.* 2008).

Até o início da atividade sísmica em São Caetano o tremor de maior magnitude ocorrido em Pernambuco, e na região, foi o evento de Santa Cruz do Capibaribe, em 1970, de magnitude 3,9 m_b (Ferreira & Assumpção 1983).

Metodologia

Devido à participação do Laboratório Sismológico da UFRN no Projeto do Instituto do Milênio "Estudos geofísicos e tectônicos na Província Borborema, Nordeste do Brasil", foi possível contar com uma rede de sísmográfica portátil (figura 1) composta por seis estações providas de sísmômetros de período curto modelo S13J (vertical, NS e EW, em cada estação) e além de três estações *broadband* (banda larga) Modelo KS2000M. Todas as estações utilizaram o registrador SMART24(R).

Durante o período de monitoramento ocorreram três mudanças na configuração da distribuição das estações inicialmente o monitoramento foi realizado com seis estações digitais de período curto. No dia 20/03/2007 ocorreu um sismo de magnitude 3,7 m_b e no início do mês de abril mais três estações com sísmômetro do tipo banda larga (*broadband*) foram instaladas. A partir do dia 18 de junho de 2007 esta rede voltou a operar com seis estações digitais até 31/07 de 2007.

Neste estudo foram utilizados os sismos que tiveram distância epicentral mínima de até 10 km e foram registrados em pelo menos três estações. O programa SAC (Tapley W.C. & J.E. Tull, 1991) foi utilizado para fazer a leitura dos tempos de chegada e as polaridades das ondas P e S.

Os hipocentros foram determinados com o programa HYPO71 (Lee & Lahr, 1975) que tem sido utilizado com sucesso no estudo da sismicidade no Nordeste do Brasil (Ferreira *et al.*, 1987, 1995, 1998 e 2008; Nascimento, 1997; França *et al.* 2004; Lima Neto 2009).

A solução do mecanismo focal composto proposta neste estudo, a partir do primeiro movimento da onda P, foi obtida com auxílio do programa FPFIT (Reasenberg & Oppenheimer, 1985), considerando a distribuição dos hipocentros. O FPFIT considera que o padrão de radiação é do tipo duplo-binário sem momento e busca numa malha de solução uma média ponderada de discrepâncias nas polaridades, considerando a variância estimada dos dados e a amplitude da radiação da onda P (Reasenberg & Oppenheimer, 1985).



Figura 1- Estação SOJO. O sismômetro encontra-se dentro do recipiente azul. O registrador encontra-se dentro da caixa cinza.

Hipocentros

Antes de usar o HYPO71 (Lee & Lahr, 1975) num modelo de semi-espaco, necessita-se determinar, inicialmente, os valores da velocidade das ondas P (V_P) e a razão entre as velocidades das ondas P e S ($k = V_P/V_S$). O modelo do semi-espaco foi adotado para este estudo, pois o mesmo tem sido usado com êxito no estudo da atividade sísmica do Nordeste do Brasil (Ferreira *et al.*, 1987, 1995, 1998 e 2008; Takeya *et al.* 1989; França *et al.* 2004).

O modelo de velocidades foi obtido de forma conjunta, considerando o Diagrama Wadati (figura 2) como critério de consistência dos dados e escolhendo o conjunto de parâmetros com maior quantidade de sismos que tivessem as menores médias de erros. Isto foi feito variando a velocidade da onda P (V_P) de 5,0 km/s a 6,4 km/s e a razão V_P/V_S de 1,60 até 1,74. Os valores médios do erro quadrático médio, a média do erro horizontal e a média do erro vertical foram calculadas com auxílio do programa HYPO71. O melhor modelo encontrado de forma conjunta foi: $V_P = 5,90$ km/s e $V_P/V_S = 1,70$.

Neste estudo o programa HYPO71 (Lee & Lahr, 1975) foi utilizado para calcular os hipocentros, com os parâmetros que foram encontrados na escolha do modelo de velocidades (modelo do semi-espaco, $k = V_P/V_S = 1,70$ e $V_P = 5,90$ km/s).

A figura 3 mostra as estações que foram utilizadas neste estudo e a localização dos epicentros dos sismos ocorridos durante o período de monitoramento.

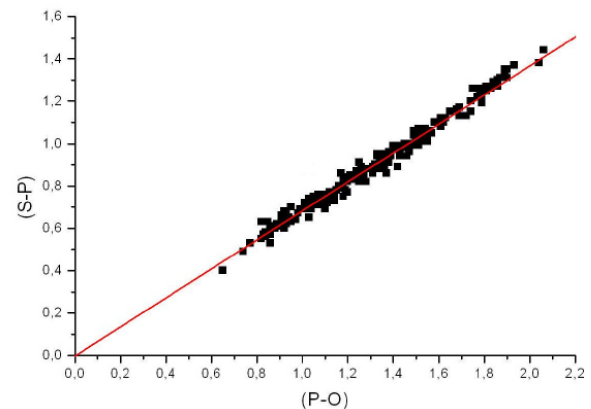


Figura 2- Diagrama Wadati dos sismos selecionados para a obtenção dos parâmetros do modelo de velocidades. (P-O) é a diferença entre o tempo de chegada da onda P e a hora de origem. (S-P) é a diferença entre o tempo de chegada da onda S e da onda P.

Na figura 3 os triângulos vermelhos representam as estações digitais com sismômetro de período curto (modelo S13J), o triângulo verde representa uma estação analógica e os triângulos amarelos representam as estações digitais com sismômetro banda larga modelo KS2000M. Os epicentros são indicados por pequenos círculos (profundidade $h \leq 4$ km), pequenos quadrados ($4 < h \leq 6$ km) e pequenos triângulos ($6 \text{ km} < h \leq 8$ km).

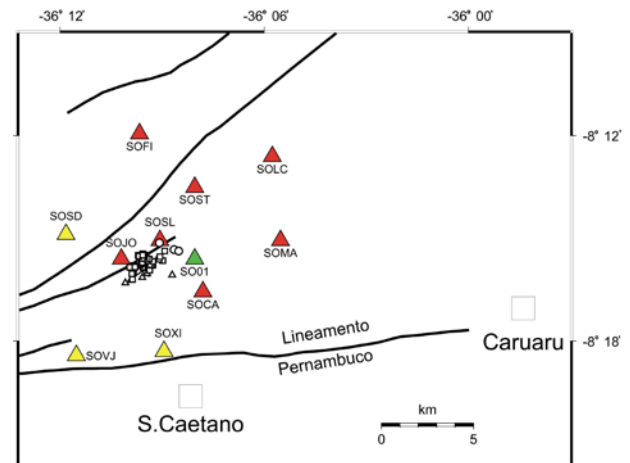


Figura 3- Distribuição espacial dos sismos ocorridos durante o período de monitoramento e que foram registrados em pelo menos 5 estações e com $rms \leq 0,03s$.

Na figura 4 são mostrados os eventos da figura 3 em escala ampliada. De acordo com essa figura os sismos apresentam uma distribuição predominante aproximadamente NE-SW e uma clara correlação espacial com uma das ramificações para nordeste do Lineamento Pernambuco. Para se visualizar melhor a situação existente e tentar determinar com segurança a direção do plano de falha foram feitas duas projeções:

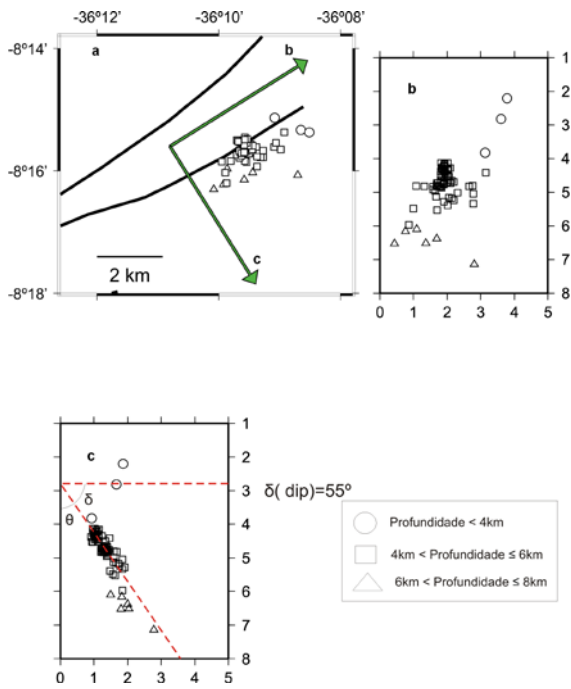


Figura 4- Mapa (a) e projeção dos sismos da figura 3 em planos verticais paralelo (b) e perpendicular (c) à direção da falha. O mergulho (*dip*) indicado foi obtido para os 14 sismos selecionados da figura 5.

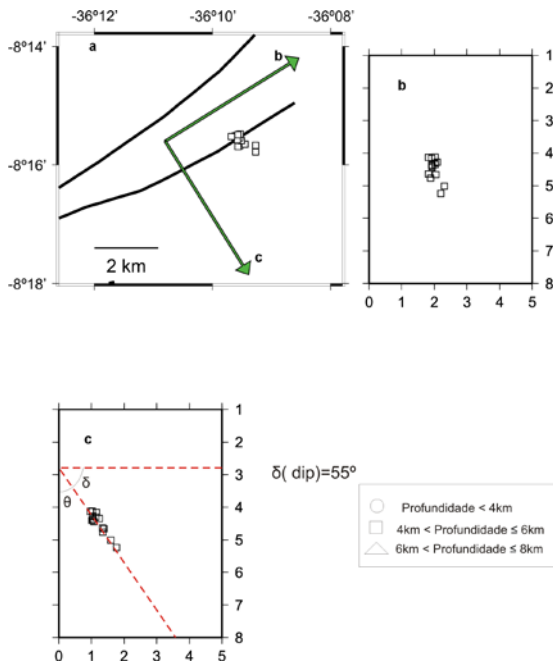


Figura 5- Sismos selecionados para determinação do mecanismo focal composto. Os 14 sismo selecionados possuem $rms \leq 0.01$ s, $erh \leq 0,1$ km, $erz \leq 0,1$ km, $gap \leq 180^\circ$ e $NQ \geq 10$ observações. Para esses eventos o mergulho (*dip*) determinado foi de 55° .

uma projeção vertical num plano paralelo à falha mapeada e uma projeção vertical no plano perpendicular a essa mesma falha.

A figura 4.a mostra a distribuição dos sismos no plano cartográfico, as setas verdes b e c indicam, respectivamente, a direção da projeção vertical no plano paralelo a falha e no plano vertical perpendicular a falha. O ponto central para essas projeções está na origem das setas b e c. A figura 4.b mostra a projeção vertical no plano paralelo à falha mapeada e a figura 4.c mostram a projeção vertical no plano perpendicular a essa falha.

Mecanismo focal

A solução proposta neste estudo, para o mecanismo focal composto, levou em consideração a distribuição dos hipocentros (o mergulho e o azimute) e foi obtida com auxílio do programa PPFIT. Só foram utilizadas as polaridades de excelente qualidade das ondas P registradas (P0) de 14 eventos selecionados.(figura 5).

Desse modo, baseando-se na solução encontrada a partir da geometria, o mergulho foi fixado em 55° para os 14 eventos selecionados (figura 5). O azimute foi fixado em 58° de acordo com a direção da ramificação para nordeste do Lineamento Pernambuco onde os hipocentros estão agrupados. Baseado na existência de estações com alternância de polaridades, o *rake* foi fixado em -155° . O mecanismo focal proposto é de um plano de falha na direção aproximada NE-SW, com movimento transcorrente dextral e com uma forte componente normal (figura 6).

STRIKE	DIP	RAKE
58	55	-155
313	70	-38

$V_{pe} = 5.90$

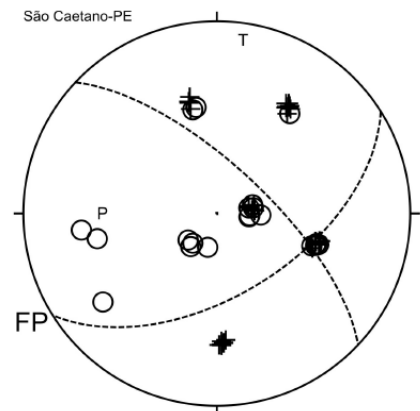


Figura 6- Mecanismo focal composto para os 14 eventos selecionados. Hemisfério inferior, projeção de igual área. Cruzes e círculos representam os primeiros movimentos compressivos e dilatacionais, respectivamente. P e T São os eixos de compressão e dilatação, respectivamente. FP indica o plano de falha.

Para se ter uma melhor visualização da alternância de polaridades, foi criada a figura 7. Na figura 7a estão representadas as polaridades positivas e na figura 7b as polaridades negativas.

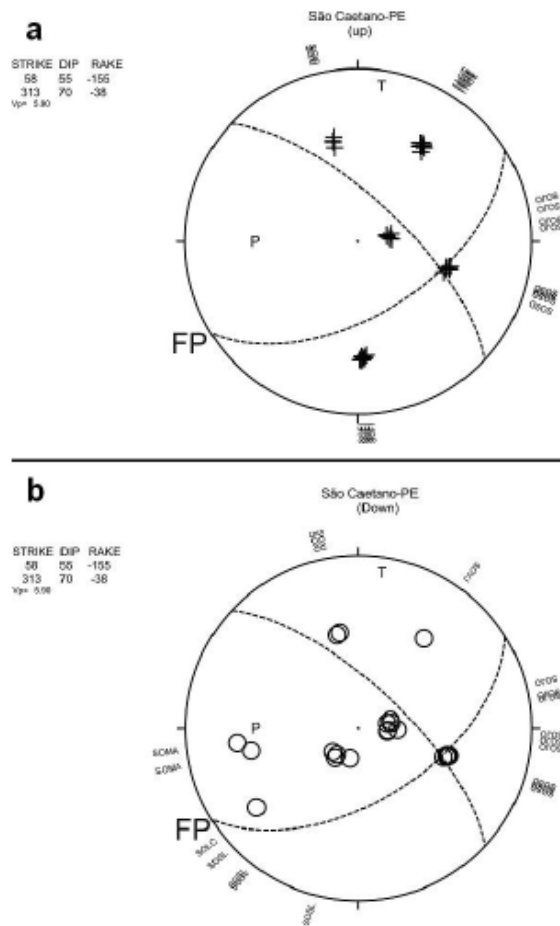


Figura 7- Visualização da alternância de polaridades do mecanismo focal da figura 6, mostrando as polaridades separadamente. Na figura 7.a estão representadas as polaridades positivas e na figura 7.b as polaridades negativas. FP indica o plano de falha.

Discussão

A atividade sísmica em São Caetano mostrou a existência de uma zona sísmogênica de aproximadamente 4 km de extensão com profundidade variando entre 2 e 8 km.

Após a determinação hipocentral ficou perceptível uma clara correlação espacial entre a sísmica na região de São Caetano com feições geológicas mapeadas. A principal feição geológica da região é o Lineamento Pernambuco, e os sismos registrados durante o período de estudo se encontram relacionados com uma ramificação para nordeste desse lineamento. Esse tipo de correlação entre feições geológicas superficiais e sísmica no Nordeste brasileiro, que é uma região intraplaca, nem sempre se verifica. A direção do plano de falha foi determinada através da geometria da distribuição hipocentral que está correlacionada com a feição geológica superficial mapeada na área de estudo. O mergulho foi obtido graças à geometria dos

hipocentros que foram vistos num plano vertical perpendicular a falha. Os valores da direção e do mergulho foram 58° e 55° , respectivamente, para os 14 sismos utilizados.

O mecanismo focal composto encontrado para os 14 sismos selecionados de São Caetano foi do tipo transcorrente dextral com uma forte componente normal. A atividade sísmica em São Caetano ficou concentrada numa ramificação para nordeste do Lineamento Pernambuco. Na carta geológica de Belo Jardim (CPRM-2008), essa ramificação para nordeste aparece mapeada e constando como uma zona de cisalhamento transcorrente sinistral, com foliações verticais e com mergulho para a direção SE. O movimento atual é de falhamento transcorrente dextral com mergulho para SE.

Considerações Finais

Refinamentos quanto ao número de observações, *gap* e erros máximos permitidos, mostram que a distribuição epicentral apresentou uma direção preferencial NE-SW, numa extensão de aproximadamente 4 Km (figura 4. a). Para os eventos utilizados no mecanismo focal composto (figura 5. a) os sismos foram localizados numa faixa de 900 m.

Um fato marcante é que essa correlação entre feições geológicas superficiais e sísmica é rara de ocorrer no Nordeste brasileiro, em geral, mas é uma regra ao longo do Lineamento Pernambuco e suas ramificações para nordeste como em Caruaru (Ferreira *et al.*, 1998 e 2008) e Belo Jardim (Vasconcelos *et al.*, 2008) sendo a atividade sísmica em São Caetano mais um caso desse tipo de correlação.

A direção e o mergulho do plano de falha foram determinados, a partir da distribuição hipocentros, utilizando a geometria, para um conjunto de 14 eventos (Figura 5). O mecanismo focal, para esses sismos foi proposto, encontrando-se os valores para o azimute, mergulho e rake, respectivamente: 58° , 55° e -155° . Esse resultado mostra um mecanismo focal, com falha orientada na direção NE-SW, com movimento transcorrente dextral e uma forte componente normal.

Os resultados alcançados podem ser melhorados tanto na determinação hipocentral quanto na determinação do mecanismo focal, considerando-se a qualidade dos dados, obtidos com sismômetros triaxiais com relógios controlados por GPS. Técnicas como de posicionamento relativo de eventos, e determinação de mecanismo focal utilizando outros parâmetros além da polaridade da onda P podem ser usados. Ainda podem ser realizados estudos de anisotropia sísmica na propagação da onda S, estudo do processo de nucleação dos sismos, determinação dos parâmetros de fonte e inversão de momento tensor.

Referências

Berrocal, J., Assumpção, M., Antezana, R., Dias Neto, C.M. Ortega, R., França, H. & Veloso, J.A. 1984. Sismicidade do Brasil, IAG - Universidade de São Paulo, 420 pp.

CPRM. 2008. (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) - Carta Geológica de Belo Jardim - PE, escala 1: 100.000).

Ferreira, J.M. & Assumpção, M. 1983. Sismicidade do Nordeste do Brasil. *Rev Bras. Geofís.*, 1: 67-88.

Ferreira, J.M., Takeia, M., Costa, J.M., Moreira, J.A., Assumpção, M., Veloso, J.A.V. & Pearce, R.G. 1987. A continuing intraplate earthquake sequence near João Câmara, Northeastern Brazil – Preliminary results. *Gephys.Res.Lett.*, 14: 1402-1405.

Ferreira, J.M., Assumpção, M., Costa, J.M., Moreira, J.A.M., Pearce, R.G. & Takeya, M.K. 1995. Correlation of seismicity and water level in the Açú reservior- an example from Northeast Brazil. *Bull. Seism.Soc, Am*, 85: 1483-1489.

Ferreira, J.M., Oliveira, R.T., Takeya, M.K. & Assumpção, M. 1998. Superposition of local and regional stress in northeast Brazil: evidence from focal mechanism around the Potiguar marginal basin. *Geophys. J. Int.*, 134: 341-355.

Ferreira, J.M., Bezerra, F.H.R., Souza, M.O.L., do Nascimento, A.F., Martins Sá, J., França, G.S. 2008. The role of precambrian mylonitic na present day stress field in the coseismic reactivation of the Pernambuco Lineament, Brazil. *Tectonophysics.* 456:111-126.

França, G.S., Ferreira, J.M., Takeya, M.K. 2004. Seismic Activity in Senador Sá – CE, Brazil, 1997-1998. *Rev. Brás. Geofís.*, 22(2): 115-125.

Lee, W.H.K. & Lahr, J.C. 1975. HYPO71 (revised): a computer program for determining hypocenter, magnitude and first motion pattern of local earthquakes. *U.S. Geol. Surv. Open File Rep.* 75-311, 114 pp.

Reasenber, P. & D. Oppenheimer. 1985. FPFIT, FPLOT and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions. *U.S. Geol. Surv. Open File Rep.* 85-739, 109 pp.

Takeya, M.K., Ferreira, J.M., Pearce, R.P., Assumpção, M., Costa, J.M. & Sophia C.M. 1989. The 1986-1987 intraplate earthquakes sequence near João Câmara, northeast Brazil- evolution of seismicity. *Tectonophysics*, 167: 117-131.

Tapley W.C. & Tull. J.E. 1991. SAC-Seismic Analysis Code, USER MANUAL, livermore National Laboratory 413 pp.

Vasconcelos, A.E.L., Assumpção, M., do Nascimento, A.F., Ferreira, J.M., Menezes, E.A.S., Barbosa, J.R. 2008. Intraplate earthquake swarm in Belo Jardim, NE Brazil: reactivation of a major Neoproterozoic shear zone (Pernambuco Lineament). Submitted to *Geophysical Journal International*.

Agradecimentos

Os Autores agradecem aos técnicos da UFRN Eduardo Alexandre e Carlos Alberto dos Anjos pela instalação, operação e manutenção da rede de estações em São Caetano-PE. Ao Dr. Marcelo Assumpção, do IAG/USP, pela ajuda na confecção dos mecanismos focais. Ao Dr. Reinhardt Fuck, coordenador do Projeto Instituto do Milênio, pelo apoio constante.