

## ESTIMATIVA DOS LIMITES DE DETECTABILIDADE DE ESTAÇÕES SISMOGRÁFICAS NO BRASIL

J.M. COSTA

*Departamento de Física Teórica e Experimental  
Grupo de Geofísica - UFRN  
59000 - Natal, RN, Brasil*

C.M. SOPHIA e A.B. BUORO

*Instituto Astronômico e Geofísico - USP  
C.P. 30627, 01051 - São Paulo, SP, Brasil*

M. ASSUMPÇÃO

*Estação Sismológica de Brasília - UnB  
70910 - Brasília, DF, Brasil*

The detectability threshold  $\hat{\mu}_{50}$  and  $\hat{\mu}_{90}$ , for P and PKP waves in the distance ranges 30°-90° and 120°-170° respectively, were determined for the main seismographic stations in Brazil by analysing records of one year at each station. It is shown that the "Incremental Detection Probability" (i.e., the probability of one event being detected given its magnitude) as a function of the USGS  $m_b$  magnitude is well fit by a Gaussian cumulative distribution function. The detectability curves were fit by the maximum likelihood method associated with a probit transformation. For the P wave, differences in  $\hat{\mu}_{50}$  (the magnitude with a detection probability of 50%) of up to 1.2 magnitude units were found among the stations. The best detectability was found for the station ITR ( $\hat{\mu}_{50} = 4.73$ ).

### INTRODUÇÃO

Atualmente existem no Brasil dezenas de estações sismográficas, a maior parte sendo operadas pelo Instituto Astronômico e Geofísico da USP (IAG/USP) e pela Estação Sismológica da Universidade de Brasília (UnB). Grande parte dessas estações se destinam à monitoração de barragens e a estudos da sismicidade do Brasil. Algumas estações também fornecem dados para os centros internacionais de Sismologia (USGS e ISC), contribuindo para o cálculo dos parâmetros hipocentrais de sismos a nível mundial.

A contribuição de cada uma dessas estações depende de muitos fatores, tais como: localização da estação com respeito a fontes de ruído local e regional, efeitos de transmissão local, tipo de instrumento (Tabela 1) e eficiência operacional.

Para efeito de comparação e de levantamento do desempenho de várias estações é necessário e conveniente ter-se uma estimativa quantitativa do potencial de informações que cada estação pode fornecer.

O objetivo deste trabalho é estimar os limites de detectabilidade das principais estações sismográficas brasileiras (Fig. 1) para telessismos, usando o chamado método direto (Ringdal, 1975).

### ASPECTOS TEÓRICOS

A capacidade de detecção de uma estação, para eventos de uma determinada região, é usualmente dada em termos de sua probabilidade de detecção incre-

mental, isto é, a probabilidade de detectar um evento dada a sua magnitude. Em particular, os níveis de 50% e 90%, ou seja, as magnitudes para as quais se espera detectar 50% e 90% de todos os sismos, respectivamente, são os mais usados para caracterizar o desempenho da estação (Ringdal, 1975).

A probabilidade de detecção,  $P(m)$ , de uma estação A como função de uma magnitude real  $m$  (hipotética) foi deduzida por Ringdal (1975) e tem a seguinte distribuição:

$$P(m) = \phi \left( \frac{m - \mu_T + b_A}{(\sigma_T^2 + \sigma_A^2)^{1/2}} \right) \quad (1)$$

onde  $\phi$  é a função de distribuição Gaussiana cumulativa padrão,  $b_A$  é uma possível influência regional na magnitude,  $\sigma_A^2$  é a variância da estação,  $\mu_T$  corresponde à média da distribuição normal dos ruídos sísmicos e  $\sigma_T^2$  sua variância.

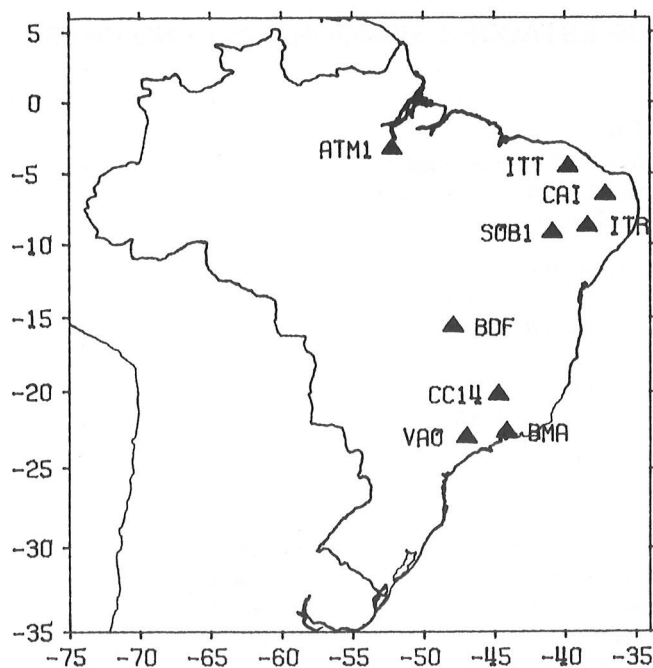
Na dedução deste modelo foram feitas as seguintes suposições:

a) A magnitude  $m_A$  da estação em questão é uma variável normal

$$m_A \sim N(m + b_A, \sigma_A^2) \quad (2)$$

b) O evento é considerado detectado na estação se  $m_A > m_T$ , onde  $m_T$  é a magnitude limite determinada pelo nível de ruído sísmico: supõe-se que  $m_T$  seja normalmente distribuída

$$m_T \sim N(\mu_T, \sigma_T^2) \quad (3)$$



**Figura 1** – Localização geográfica das principais estações sismográficas brasileiras.

A função definida na equação (1) pode ser chamada Curva de Detecção Real, uma vez que ela dá a probabilidade de detecção em função da magnitude real do evento (Ringdal, 1975). Na prática, são utilizados dois métodos que estimam a probabilidade de detecção de uma estação sismográfica: Método de Recorrência e Método Direto (Ringdal, 1975).

O Método de Recorrência é baseado na sismicidade e na detectabilidade observada. Primeiro, é estimada a sismicidade da região por extrapolação dos dados observados, utilizando-se a relação de recorrência entre magnitude e frequência:

$$N_c(m) = \exp(\alpha - \beta m) \quad (4)$$

onde,  $N_c(m)$  é o número cumulativo de eventos excedendo uma dada magnitude  $m$ , e os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  estão relacionados aos parâmetros  $a$  e  $b$  (mais comumente usados) por  $\alpha = a/\log(e)$  e  $\beta = b/\log(e)$ , respectivamente. Após estimar a relação de recorrência (4) para a sismicidade da região, comparam-se os valores estimados, através desta relação, com os observados na estação para se determinar seus limites de detecção (Pirhonen et al., 1976). Este método estima a curva (Ringdal, 1975):

$$P_1(m) = \phi\left(\frac{m - \mu_T}{\sigma_T}\right) \quad (5)$$

O Método Direto supõe a existência de um sistema de referência independente, no qual são determinadas as magnitudes de um conjunto de eventos. Este método envolve duas suposições básicas:

- (i) A magnitude do sistema de referência é normalmente distribuída com relação à magnitude real y

$$m_T \sim N(y + b_R, \sigma_R^2) \quad (6)$$

onde  $\sigma_R^2$  é a variância do sistema de referência e  $b_R$  é a influência deste sistema.

- (ii) A magnitude calculada na estação ( $m_A$ ) e a magnitude do sistema de referência ( $m_R$ ) são independentes. A curva de detecção estimada por este método é da forma

$$P_2(m) = \phi\left(\frac{m - \mu_T + b_A - b_R - \beta\sigma_R^2}{(\sigma_T^2 + \sigma_A^2 + \sigma_R^2)^{1/2}}\right) \quad (7)$$

No caso de um sistema de referência perfeito,  $b_R$  e  $\sigma_R$  são aproximadamente nulos. Então a equação (7) se reduz à curva de detecção real definida pela equação (1).

**Tabela 1** – Principais características das estações sismográficas brasileiras analisadas neste trabalho.

Estação	Tipo de Sismômetro	Período $T_0$ (s)	Tipo de Registro	Ganho (dB)	Amplificação em 1 Hz	Rocha de Base
BDF	Benioff (WWSSN)	1,0	Papel fotográfico	-	100 K	Quartzito
CAI	Benioff (WWSSN)	1,0	Papel fotográfico	-	100 K	Granito
VAO	Willmore MKIII A	1,0	Portacorder	84/90	16000/32000	Granito
SOB1	Willmore MKIII A	1,0	Portacorder	90/96	32600/67200	Xistos
ITT	Willmore MKII/Ranger SS.1	1,0	MEQ-800	90	20000	Granito
BMA	Willmore MKIII A	1,0	Portacorder	90/96	38080/76160	Granito
CC14	L4-C	1,0	MEQ-800	84	20000	Gnaisse
ITR	Willmore MKIII A	1,0	Portacorder	90/96	33600/67200	Gnaisse
ATM1	L4-C	1,0	MEQ-800	78	15000	Sedimento

### ESTIMATIVA DOS LIMITES DE DETECTABILIDADE

Para estimar os limites de detectabilidade das estações sismográficas brasileiras utilizou-se o Método Direto tendo como sistema de referência os boletins do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). Para isto foram analisados aproximadamente um ano de registro de cada estação. A metodologia utilizada neste trabalho, similar àquela adotada por Pirhonen et al. (1976) e Costa (1983), pode ser assim resumida:

- i) Dado pelo sistema de referência (USGS) um conjunto de eventos com suas respectivas magnitudes, seleciona-se todas aquelas com magnitude  $m_b > 4,5$  e que estejam dentro dos intervalos de distância  $30^\circ-90^\circ$  e  $120^\circ-170^\circ$  para cada estação individual. Escolheu-se o intervalo entre  $30^\circ$  e  $90^\circ$  porque é este o intervalo de distâncias tectossísmicas utilizados em estimativas de detectabilidade. O intervalo  $120^\circ-170^\circ$  foi escolhido para se verificar se a detectabilidade da onda PKP segue o mesmo comportamento da onda P. Os intervalos  $110^\circ-120^\circ$  e  $170^\circ-180^\circ$  não foram incluídos porque entre  $110^\circ$  e  $120^\circ$  o número de eventos detectados pelas estações é muito pequeno, indicando uma detectabilidade da estação muito menor do que em outras distâncias de PKP, e no intervalo  $170^\circ-180^\circ$  a amostragem é insuficiente (ocorrem poucos eventos neste intervalo) (Costa, 1983).
- ii) Para cada evento, no intervalo  $30^\circ-90^\circ$  ou  $120^\circ-170^\circ$  verifica-se se ele foi detectado ou não pela estação. Considera-se um evento detectado quando a primeira onda (P ou PKP) aparece bem nítida nos sismogramas. Nas Figs. 2a e 3a são mostrados os histogramas de algumas estações para as ondas P e PKP, onde são dados o número total de eventos do sistema de referência (USGS) e o número detectado na estação para cada classe de magnitude.
- iii) Em seguida calcula-se a percentagem em cada classe de magnitude para se ter uma estimativa das curvas de detecção da estação (Figs. 2b e 3b).
- iv) Supõe-se que a probabilidade de detecção incremental (P) da estação tem a forma de uma distribuição Gaussiana cumulativa:

$$P(m_b, \mu, \sigma) = (\sqrt{2\pi} \sigma)^{-1} \int_{-\infty}^{m_b} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{m - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] dm \quad (8)$$

onde  $\mu$  é a magnitude com 50% de probabilidade de detecção e  $\sigma^2 = \sigma_R^2 + \sigma_T^2 + \sigma_A^2$  é a variância da distribuição normal. A magnitude com a qual se espera detectar 90% dos sismos é dada

por  $\mu_{90} = \mu + 1,28\sigma$ .

- v) O ajuste das curvas de detecção foi feito usando-se o método da máxima probabilidade associado à técnica da transformação de próbites (Finney, 1952, 1971; Costa, 1983).

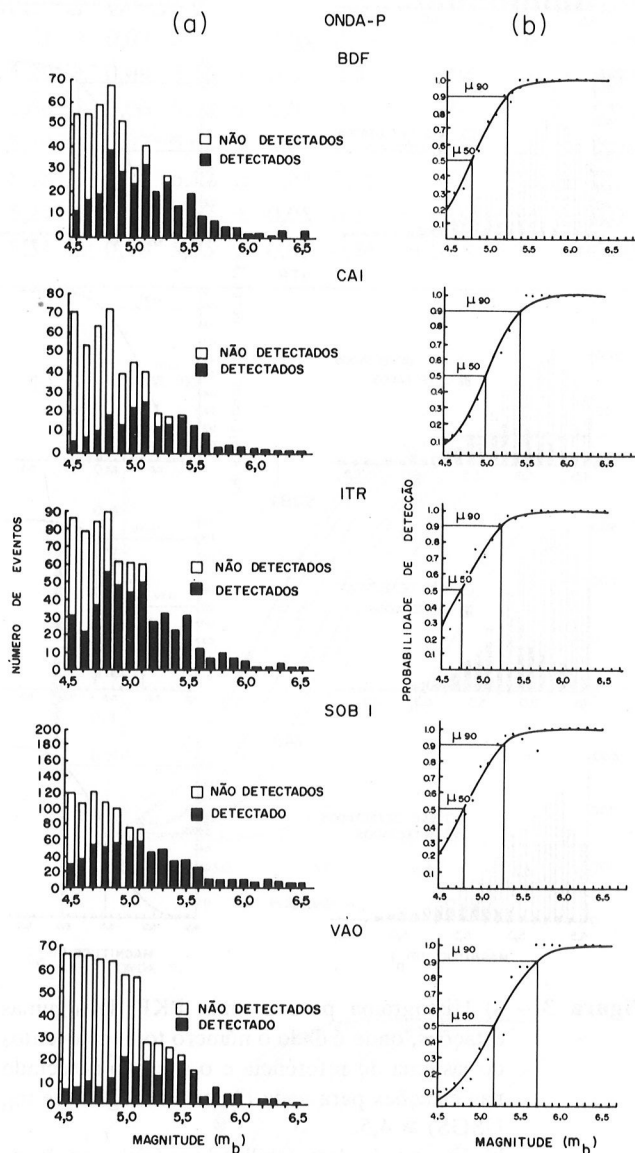
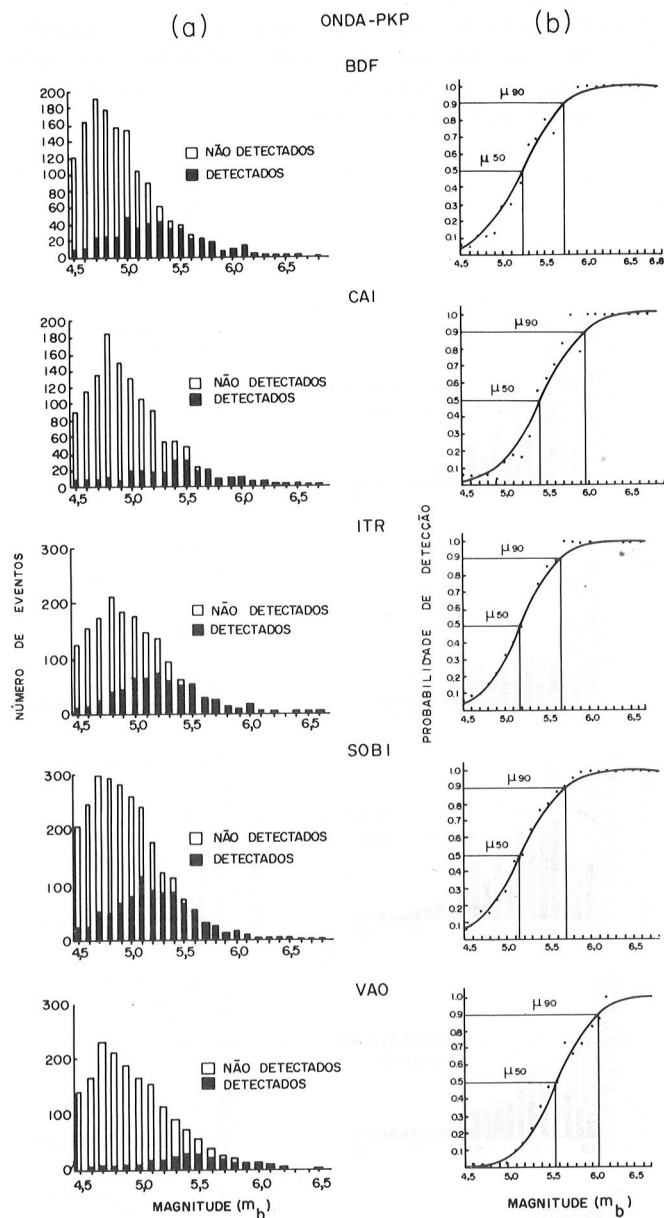


Figura 2 – a) Histograma para a onda P de algumas estações, onde é dado o número total de eventos do sistema de referência e o número detectado nas estações para cada classe de magnitude  $m_b$  (USGS)  $\geq 4,5$ .

b) Curvas de detectabilidade teórica para onda P, onde os pontos são as percentagens observadas em cada classe de magnitude;  $\mu_{50}$  e  $\mu_{90}$  são as magnitudes com 50% e 90% de probabilidade de detecção.



**Figura 3** – a) Histograma para a onda PKP de algumas estações, onde é dado o número total de eventos do sistema de referência e o número detectado nas estações para cada classe de magnitude  $m_b$  (USGS)  $\geq 4,5$ .

b) Curvas de detectabilidade teórica para onda PKP, onde os pontos são as percentagens observadas em cada classe de magnitude;  $\mu_{50}$  e  $\mu_{90}$  são as magnitudes com 50% e 90% de probabilidade de detecção.

## RESULTADOS OBTIDOS

Na Tabela 2 estão resumidas as estimativas dos limites de detectabilidade ( $\hat{\mu}_{50}$  e  $\hat{\mu}_{90}$ ), para as ondas P e PKP, das principais estações sismográficas brasileiras. Para a onda P a diferença entre o maior (CC14,  $\hat{\mu}_{50} = 5,95$ ) e o menor (ITR,  $\hat{\mu}_{50} = 4,73$ ) valor para  $\hat{\mu}_{50}$  é de 1,2 unidades de magnitude. A baixa detectabilidade da

estação Carmo do Cajurú (CC14) deve-se ao fato desta estação operar com filtro fechado (5 a 30 Hz) e baixa amplificação. Apesar dos testes de ruído sísmico feitos antes da instalação da estação Barra Mansa (BMA) em solo firme terem sido favoráveis à instalação naquele local, a sua detectabilidade para telessismos durante o período analisado é relativamente pequena ( $\hat{\mu}_{50} = 5,35$ ). Intemperismo da rocha base ou problemas técnicos de instalação, são fatores que podem ter influenciado no baixo rendimento desta estação.

A estação de Serra (SOB1), localizada próxima à barragem de Sobradinho na Bahia, funciona com filtro aberto e, em geral, sua detectabilidade é menor no primeiro semestre do ano. Neste período devido a abertura das comportas da barragem o nível de ruído sísmico aumenta e o ganho da estação é reduzido de 96 db para 90 db. A diferença no limite de detectabilidade ( $\mu_{50}$ ) do semestre em que a estação opera com 90 db é de aproximadamente 0,3 unidades de magnitude. A estação Itaparica (ITR), funciona com as mesmas características de SOB1. A estação Valinhos (VAO), localizada próxima a diversas fontes de ruído cultural (rodovias, fábrica, etc.) apresenta uma detectabilidade pequena ( $\hat{\mu}_{50} = 5,19$ ) comparada às de outras estações com características instrumentais semelhantes.

O limite de detectabilidade para a onda P ( $\mu_{50} = 5,01$ ) da estação de Caicó está próximo da média das estações brasileiras analisadas ( $\mu_{50} = 5,12$ ), (Fig. 4), mas é maior do que se esperava para esta estação. A estação CAI situava-se anteriormente a 10 km de Natal, próxima ao litoral. Naquela localização (denominada NAT), operava com um ganho muito baixo (25K) e o seu limite de detectabilidade  $\mu_{50}$  era 0,2 unidades maior que o atual (Costa, 1983). Testes efetuados antes da instalação de CAI indicaram que o nível de ruído sísmico na área era bastante baixo e se esperava que CAI viesse a operar com um rendimento igual ou mesmo superior a BDF. Apesar de operar com um ganho nominal de 100K, igual a BDF, o nível de ruído nos sismogramas de CAI é visivelmente superior ao de BDF, motivo pelo qual  $\mu_{50}$  de CAI é 0,2 unidades maior do que o de BDF. Problemas técnicos na construção de CAI podem também ter contribuído para seu menor rendimento. Os pilares acoplados à rocha e que servem de base para os sismômetros podem não ter sido bem construídos (concretados de uma única vez) e as bases para os registradores e galvanômetros não são desacopladas da casa como acontece com BDF.

A média dos limites de detectabilidade ( $\bar{\mu}_{50} = 5,12$ ) para as estações brasileiras está próxima daquela encontrada por Pirhonen et al. (1976) para estações na Fenoscândia ( $\bar{\mu}_{50} = 5,0$ ) e é menor do que a encontrada por Ringdal et al. (1977) ( $\bar{\mu}_{50} = 5,3$ ) para 478 estações distribuídas no mundo inteiro. Essa comparação é aproximada porque as estimativas feitas por estes autores foram baseadas nas magnitudes  $m_b$  fornecidas pelo ISC que são, em geral, um pouco menores ou iguais às do USGS (Costa, 1983).

**Tabela 2** – Estimativa dos limites de detectabilidade  $\mu_{50}$  e  $\mu_{90}$  para as ondas P e PKP de estações sismográficas brasileiras. Os valores da estação ATM1 são preliminares (dois meses de registro).

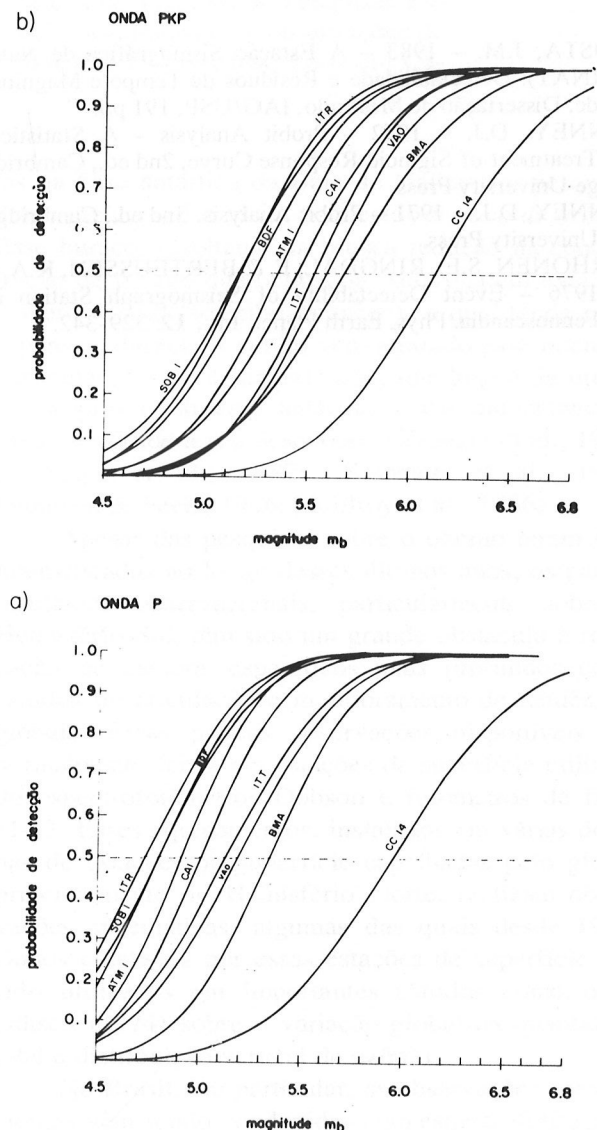
Estação	Coordenadas Geográficas		Onda P ( $30^{\circ} \leq \Delta \leq 90^{\circ}$ )			Onda PKP ( $120^{\circ} \leq \Delta \leq 170^{\circ}$ )		
	Latitude	Longitude	$\mu_{50} = \mu$	$\sigma$	$\mu_{90}$	$\mu_{50}$	$\sigma$	$\mu_{90}$
BDF	15,66 S	47,90 W	4,81 ± 0,02	0,35 ± 0,09	5,26 ± 0,04	5,24 ± 0,02	0,39 ± 0,05	5,74 ± 0,04
CAI	6,53 S	37,14 W	5,01 ± 0,02	0,33 ± 0,08	5,43 ± 0,05	5,45 ± 0,03	0,41 ± 0,06	5,97 ± 0,05
VAO	23,03 S	46,97 W	5,19 ± 0,03	0,41 ± 0,08	5,71 ± 0,07	5,59 ± 0,03	0,38 ± 0,06	6,08 ± 0,05
SOB1	9,21 S	40,89 W	4,80 ± 0,02	0,39 ± 0,06	5,29 ± 0,03	5,16 ± 0,01	0,42 ± 0,04	5,70 ± 0,03
ITT	4,56 S	39,78 W	5,13 ± 0,03	0,41 ± 0,08	5,66 ± 0,06	5,54 ± 0,03	0,35 ± 0,05	5,99 ± 0,05
BMA	22,59 S	44,15 W	5,35 ± 0,04	0,35 ± 0,09	5,79 ± 0,07	5,68 ± 0,04	0,46 ± 0,07	6,26 ± 0,08
CC14	20,24 S	44,72 W	5,95 ± 0,09	0,49 ± 0,11	6,58 ± 0,16	6,12 ± 0,07	0,45 ± 0,09	6,70 ± 0,12
ITR	8,76 S	38,42 W	4,73 ± 0,02	0,37 ± 0,08	5,21 ± 0,04	5,17 ± 0,05	0,37 ± 0,05	5,65 ± 0,09
ATM1	3,29 S	52,22 W	4,91 ± 0,05	0,31 ± 0,18	5,31 ± 0,10	5,35 ± 0,05	0,36 ± 0,11	5,81 ± 0,09

Da análise do teste do Qui-quadrado (Tabela 3) verifica-se que a Probabilidade de Detecção Incremental (P) das estações se ajusta muito bem, na maioria dos casos, a uma distribuição cumulativa Gaussiana, sendo que esse ajuste, em geral, é melhor para a onda P. Os casos em que os ajustes das curvas de detecção não foram tão bons, podem ser devidos a problemas técnicos de instalação e manutenção das várias estações, erros na análise dos sismogramas ou inhomogeneidades dos dados. Os sismogramas foram analisados por diferentes pessoas e uma onda P ou PKP pode ter sido considerada detectada quando o sinal não estava bem claro. No caso da onda PKP também pode acontecer de ter sido considerada detectada quando na verdade era um de seus diferentes ramos.

Os valores de  $\sigma$  obtidos neste trabalho são todos maiores que 0,3 unidades de magnitudes  $m_b$  ( $\bar{\sigma} = 0,39$ ). Este dado não reflete incertezas nos valores de  $m_b$  e representa o espalhamento inerente às determinações de  $m_b$  devido a inhomogeneidade da terra e ao padrão de radiação dos terremotos (Pirhonen et al., 1976).

**Tabela 3** – Teste do Qui-quadrado do modelo Gaussiano.

Estação	Onda P			Onda PKP		
	$\chi^2$	$\nu$	$P(\chi^2)$	$\chi^2$	$\nu$	$P(\chi^2)$
BDF	16,40	13	99%	8,98	16	90%
CAI	0,84	11	99%	25,73	15	5%
VAO	10,96	12	55%	6,35	12	90%
SOB1	1,81	15	99%	17,39	17	45%
ITT	3,16	12	99%	9,89	13	75%
BMA	6,46	8	60%	14,79	12	25%
CC14	1,46	3	60%	6,43	4	25%
ITR	6,03	14	96%	3,28	15	99%
ATM1	0,10	3	99%	3,85	5	60%



**Figura 4** – Curvas de detectabilidade de todas as estações.

## CONCLUSÕES

Analisando dados das principais estações sismográficas brasileiras foi mostrado que a probabilidade de detecção incremental das ondas P ( $30^{\circ} \leq \Delta \leq 90^{\circ}$ ) e PKP ( $120^{\circ} \leq \Delta \leq 170^{\circ}$ ) destas estações como função das magnitudes  $m_b$  (USGS) obedece a uma função de distribuição cumulativa Gaussiana.

A média dos limites de detectabilidade das estações sismográficas brasileiras está próxima à média encontrada para estações do mundo inteiro.

A detectabilidade das estações aumenta, em geral, quanto mais afastadas estão de fontes de ruídos naturais (litoral) e culturais (fábricas, rodovias, ferrovias, etc.). Aquelas estações que mesmo afastadas de

fonte de ruído continuam apresentando um rendimento baixo, podem ter sido afetadas por problemas de instalação ou uso de filtros mais apropriados para sismos locais do que para telessismos.

## AGRADECIMENTOS

O autor J.M. Costa agradece ao PICD/CAPES pelo auxílio financeiro recebido durante o curso de mestrado realizado no IAG/USP. Os autores C.M. Sophia e A.B. Buoro agradecem à FAPESP pela concessão da bolsa de Iniciação Científica. Os autores, em geral, agradecem a todos os responsáveis pelas estações sismográficas analisadas. Agradecemos também ao Prof. J. Berrocal pela idéia inicial deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- COSTA, J.M. – 1983 – A Estação Sismográfica de Natal (NAT): Detectabilidade e Resíduos de Tempo e Magnitude. Dissertação de Mestrado, IAG/USP, 191 pp.
- FINNEY, D.J. – 1952 – Probit Analysis - A Statistical Treatment of Sigmoid Response Curve. 2nd ed., Cambridge University Press.
- FINNEY, D.J. – 1971 – Probit Analysis. 3rd ed., Cambridge University Press.
- PIRHONEN, S.E., RINGDAL, F. & BERTEUSSEN, K.A. – 1976 – Event Detectability of Seismograph Station in Fennoscandia. *Phys. Earth Planet. Int.*, **12**: 329-342.
- RINGDAL, F. – 1975 – On the Estimation of Seismic Detection Threshold. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **65**: 1631-1642.
- RINGDAL, F., HUSEBYE, E.S. & FYEN, J. – 1977 – Earthquake Detectability Estimates for 478 Globally Distributed Seismograph Station. *Phys. Earth Planet. Int.*, **15**: 24-32.

Versão original recebida em Mar./88

Versão final, em Nov./88