

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

DISPERSÃO DAS ONDAS DE RAYLEIGH NA PLATAFORMA SULAMERICANA

Tese Apresentada por

ANTONIO NUNO DE CASTRO SANTA ROSA

como requisito parcial à obtenção do grau em

MESTRE EM CIÊNCIAS

Na área de

GEOFÍSICA

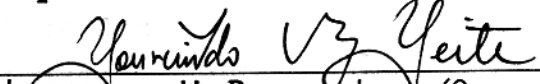
Conferido pelo Curso de Pós-Graduação em

Geociências da

Universidade Federal do Pará

Aprovado: 10.05.89

Comitê de Tese


LOURENILDO W. BARBOSA LEITE (ORIENTADOR)


KLAUS SCHIEL


JOÃO WILLY CORRÊA ROSA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO DE GEOCIÊNCIAS

REGISTRO DE TÍTULOS

ANEXO II - TÍTULOS DE MESTRE EM CIÊNCIAS

01/01/89

01/01/89

T. SANTA ROSA, Antonio Nuno de Castro
Dispersão das ondas de Rayleigh
na Plataforma Sulamericana. Belém,
UFPA/Centro de Geociências, 1989.

01/01/89

Tese apresentada ao Centro de
Geociências da Universidade Fede-
ral do Pará, para obter o grau de
Mestre em Ciências na área de Geo-
física.

1. Geofísica, 2. Sismologia. I.
Título.

Aos meus pais e irmãos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Dr. Lourenildo W. B. Leite pela orientação deste trabalho e pela grandiosa capacidade de entendimento humano.

Agradeço aos professores Dr. Klaus Schiel e João W. C. Rosa pelas sugestões dadas para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a Universidade Federal do Pará (UFPA) e ao Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte material e financeiro dados que possibilitou a realização desta tese.

Agradeço a Secretaria de Estado de Educação e Cultura do Estado do Pará (SEDUC), pela licença que me foi concedida durante o período de pós-graduação.

Agradeço à Fundação Universidade de Brasília (UNB), a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e ao Observatório Nacional (ON) pela liberação dos registros de suas estações sismológicas, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

	pág.
FIGURAS	
1. Mapa da América do Sul a distribuição de epicentros e estações sismológicas e limites de coberturas Fanerozóicas	13
2. Mapa da América do Sul com trajetórias epicentro-estação sismológicas na plataforma Sulamericana.....	15
3. (a) Sismograma da componente vertical das ondas de superfície. (b) Curva de velocidade de grupo do harmônico fundamental das ondas de Rayleigh....	23,24,27,28,29,30,31,32 33,36,37,38,39,40,41,42,43,47,48,49,50,51,52,53,54,55 e 56.
4. (a) Agrupamento das curvas de velocidade de grupo para as famílias 1,2 e 3 . (b) Curva de valores médios das três famílias.....	61,63,66

LISTA DE TABELAS.

	pág
1. Tabela de eventos selecionados.....	14
2. Tabelas de velocidade de grupo vs. período para a onda Rayleigh.....	25,34,44,45,57,58,59
3. Tabelas de velocidade de grupo vs. período dos valores médios das três famílias.....	62,64,67

TABELA DE CONTEÚDO

pág

DEDICATÓRIA	
AGRADECIMENTO.....	
LISTA DE TABELAS.....	
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	
RESUMO.....	01
ABSTRACT.....	03
1. INTRODUÇÃO	05
2. ANÁLISE DE DISPERSÃO	06
2.1 Conteúdo Espectral do Sismograma.....	06
2.2 Definição da Velocidade de Fase e de Grupo.....	07
2.3 Definição e Propriedades do Filtro Múltiplo.....	08
3. SELEÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS	10
3.1 Estações Sismográficas Utilizadas.....	10
3.2 Seleção dos Terremotos.....	12
3.3 Digitalização e Correções.....	16
3.4 Processamento dos Dados.....	17
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	22
4.1 Análise das Formas das Curvas de Dispersão.....	22
4.2 Conclusões.....	60
4.3 Perspectivas de Utilização dos Resultados.....	65
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

RESUMO

Este trabalho representa um estudo de dispersão da componente vertical da onda de superfície de Rayleigh com trajetórias na plataforma Sulamericana. Os registros utilizados são provenientes das estações localizadas no território Brasileiro; sendo a do Rio de Janeiro (RDJ), a de Brasília (BDF), a de Caicó (CAI) e a de Belém (BEB), pois estas são as únicas estações sismológicas no Brasil que têm sensores de período longo e que servem para o estudo de dispersão no intervalo de 4 a 50 segundos, aqui realizados.

Os terremotos utilizados estão localizados ao longo da parte leste da cadeia Andina e dentro da plataforma Sulamericana com trajetórias tipicamente continental. Foram selecionados 34 eventos com a utilização dos seguintes critérios práticos: a localização, a magnitude m_b e a profundidade, ocorridos durante o período de Janeiro de 1978 até Junho de 1987.

O estudo de dispersão aqui abordado significa a determinação da velocidade de grupo e das amplitudes espectrais correspondentes aos harmônicos fundamental e primeiro superior. Normalmente os harmônicos de ordem segunda ou maior são raramente disponíveis na observação. Dois tipos de medidas foram feitas: (i) velocidade de grupo vs. período e (ii) amplitude vs. período.

Os estudos de dispersão são fundamentais para determinação da estrutura da crosta e manto superior que estão diretamente relacionados com os fenômenos geológicos. Neste trabalho, regionalização é definida como a identificação das diferentes formas de curvas de dispersão, que estão relacionadas com as trajetórias epicentro-estação ao longo da plataforma

Sulamericana e que venham ter uma correlação geológica como está descrito no item 4.3 deste trabalho. A distribuição dos epicentros se faz desde o extremo sul da Argentina até o extremo norte da Venezuela, objetivando iniciar com este trabalho uma sistemática voltada aos estudos de regionalização da plataforma Sulamericana na nossa instituição.

Neste trabalho foram observados três tipos distintos de curvas em 27 trajetórias e agrupadas por famílias 1, 2 e 3 respectivamente, onde procurou-se correlacionar suas diferentes formas com a geologia regional da plataforma Sulamericana.

A obtenção da curva de dispersão foi feita através da técnica do filtro múltiplo (Dziewonski et al, 1969). Este filtro tem a propriedade de separar os harmônicos através das suas velocidades de grupo para cada frequência selecionada, e também de recuperar as amplitudes características dos harmônicos (Herrmann, 1973). O desenvolvimento teórico do filtro bem como suas limitações e forma de uso são tratados por Dziewonski et al (1972).

Como parte do trabalho há a implantação, adaptações e o desenvolvimento de parte do fluxograma do filtro múltiplo, bem como a estruturação da digitalização dos dados para o processamento e interpretação não-automática dos resultados do processamento.

ABSTRACT

This work represents a dispersion study of the vertical component of the Rayleigh wave with trajectories on the South American platform. The records used are from stations located in the Brazilian territory such as the ones from Rio de Janeiro (RDJ), Caicó (CAI), Brasília (BDF) and Belém (BEB). These are the only seismological stations in Brazil with long period sensors that can be useful for the dispersion studies in the interval 4 to 50 seconds .

The earthquakes used are localized along the eastern part of Andean mountain belt and inside the South American platform, with typically continental trajectories . 34 events were selected using the following practical criteria: the localization, the magnitude m , the depth, and that they occurred in the period of January 1978 to June 1987.

The dispersion study done here means the determination of group velocities and spectral amplitudes, corresponding to the fundamental and first higher modes. Normally the modes of second order or more are rarely observed. Two types of measurements were made : (i) group velocity versus period and (ii) spectral amplitude versus period.

Dispersion studies are important for determining the structure of the crust and upper mantle which are directly related to geological phenomena. In this work, regionalization is defined as the identification of different forms of dispersion curves and their relation to the epicenter-station trajectory on the South American platform. We also correlate them geologically, as described in item 4.3 of this work. The distribution of epicenters occurs from the extreme South of

Argentina to the extreme North of Venezuela, with the objective of initiating with this work a sistematic study of the sub-Andean area in our institution.

Three distinct types of curves were observed in 27 trajectories and grouped in three families (1,2 and 3). Their forms were compared with the regional geological features of South American platform.

The multiple filter technique was used to obtain the dispersion curves (Dziewonski et al 1969). This filter has the property of seperating the modes through their group velocities for each frequency selected and also recovers the espectral amplitudes characteristic for each harmonic (Herrmann, 1973). The theorectical development of the filter properties as well as the limitations and aplicabilities are treated by Dziewonski et al (1972).

As part of this work there was the implementation, adaptions and the layout of fluxograms of the multiple filter software, as well as the digitalization procedure for data processing and non-automatic interpretation of the results.

1. INTRODUÇÃO .

Estudos sistemáticos sobre a propagação das ondas de superfície vêm sendo feitos para diferentes regiões da Terra, com objetivo de contribuir para o modelamento da crosta e manto superior. Para se obter valores de velocidade de grupo e de amplitudes espectrais correspondentes aos harmônicos fundamental e primeiro superior, utilizou-se a técnica do filtro múltiplo introduzido por Dzierwonski et al, (1969). Os valores de velocidade de grupo representam valores médios de velocidade das ondas de Rayleigh-Z nas trajetórias epicentro-estação.

Como exemplo da aplicação desta técnica temos o trabalho de Chen (1985) que obteve curvas de dispersão (velocidade de grupo e fase vs. período) típicas para o leste e para o oeste do continente Norte Americano e procurou relacionar os resultados à geologia regional. Bhattacharya (1981) aplicou também esta técnica para algumas trajetórias típicas do continente Indiano. Hwang and Mitchell (1987), fizeram um trabalho semelhante para dados observados no continente Sulamericano para algumas trajetórias dentro da plataforma sub-Andina. Como outro exemplo importante, Santa Rosa e Leite (1988) apresentaram um trabalho para várias trajetórias na plataforma Sulamericana, obtendo diferentes padrões de curvas de dispersão e procurando relacionar os resultados com a geologia regional e com a variação horizontal da estruturação da crosta superior.

2. ANÁLISE DE DISPERSÃO.

2.1 Conteúdo Espectral do Sismograma.

Para que ondas de superfície sejam geradas é necessário um meio estratificado de camadas planas e homogêneas sobre um semi-espaco e uma superfície livre no topo. Para definir a velocidade de grupo da dispersão observada, considera-se o registro $f_1(t)$ formado de apenas um harmônico, registrado a uma distância r e azimuth θ a partir da fonte. A transformada de Fourier de $f_1(t)$ ($f_1(t)=0$ para $t < 0$), é representada por

$$F_1(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_1(t) \cdot e^{i\omega t} dt \quad (1)$$

Rescrevendo-se na forma de amplitude e fase espectrais tem-se,

$$F_1(\omega) = A_1(r, \theta, \omega) \cdot e^{i\phi_1(r, \theta, \omega)} \quad (2)$$

$F_1(r, \theta, \omega)$ representa os efeitos devido a fonte, ao meio de propagação e ao instrumento de registro. A fase pode ser expressa por várias contribuições, ou seja :

$$\phi_1(r, \theta, \omega) = k(\omega) \cdot r + \phi(\theta, r) + \psi_f(\omega) \quad (3)$$

onde ω é a frequência angular, $K(\omega)$ é o número de onda, $\psi_f(\omega)$ corresponde a fase inicial do sinal da fonte, $\psi_i(\omega)$ é o deslocamento de fase devido ao instrumento. Para simplificar a análise, considera-se deconvolvido o efeito da fonte e do instrumento, e assim, resta apenas a função transferência do meio, o que permite a análise dispersiva do mesmo, a partir da forma simples

$$F(\omega) = A(r, \theta, \omega) \cdot e^{i k(\omega) \cdot r} \quad (4)$$

A transformada inversa de Fourier representa o efeito devido a uma fonte pontual de espectro completo, isto é, a resposta ao impulso dado por,

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} A(r, \theta, w) \cdot e^{i(w \cdot t - k \cdot r)} dw. \quad (5)$$

O deslocamento do solo é representado pela combinação dos efeitos dos (M+1) harmônicos e expresso a partir da equação (5), na forma do somatório

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \sum_{j=0}^M \int_{-\infty}^{+\infty} A(w, r) \cdot e^{i(w \cdot t - k_j \cdot r)} dw. \quad (6)$$

2.2 Definição de Velocidade de Fase e de Grupo.

A velocidade de propagação de uma onda monocromática de frequência angular w , é calculada a partir do expoente da equação (5) aplicando-se a seguinte condição

$$w \cdot t - k(w) \cdot r = \text{constante},$$

onde tem-se que $K(w)$ não depende de r . Derivando-se em relação a r obtem-se,

$$w \cdot (dt/dr) - k(w) = 0,$$

definindo-se a velocidade de fase $c(w)$ para uma frequência w como sendo,

$$c(w) = (dr/dt) = w/k(w), \quad w = w_n.$$

A velocidade de grupo também é obtida a partir do termo de propagação representada pelo expoente da equação (5), fazendo-se integração nas proximidades da frequência w_n . Isto corresponde medir a contribuição da propagação simultânea das fases monocromáticas no intervalo $(w_n + e, w_n - e)$. Assim sendo, tem-se

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} A(r, \theta, w) \cdot e^{i(w \cdot t - k \cdot r)} dw, \quad e \rightarrow 0, \quad (7)$$

onde $w.t - K(w).r = \text{constante}$, por princípio. Derivando em relação a w se obtém

$$t - r \cdot (dk(w)/dw) = 0 ,$$

e a velocidade de grupo numa certa frequência w_n é

$$U(w) = r/t = (dw/dk(w)) , w = w_n . \quad (8)$$

Normalmente o grupo é a quantidade observada, e as técnicas que aplicamos foram para analisar o grupo como descrito acima.

2.3 Definição e Propriedades do Filtro Múltiplo.

O filtro múltiplo corresponde a uma janela espectral assimétrica, cuja largura pode ser feita variável no domínio da frequência. A forma utilizada aqui é dada pela função exponencial centrada em frequências seleccionadas w_n , e definidas segundo os trabalhos básicos de Dziewonski et al, (1969) e de Herrmann (1973). Ou seja,

$$H_n(w) = \begin{cases} e^{-\alpha \left(\frac{w - w_n}{w_n} \right)^2} , & |w - w_n| \leq w_c \\ 0 , & |w - w_n| > w_c \end{cases} \quad (9)$$

onde $\alpha = 16.\pi$ é o parâmetro do filtro e w_c é a largura da janela de corte do filtro ($w_c = 0.25.w_n$).

A transformada de Fourier inversa do produto do filtro (equação 9) pelo sinal (equação 7), resulta no sinal teórico filtrado $g(t,r)$, sendo que esta expressão simula a aplicação do filtro em dados observados. O resultado desta operação é

$$g(t,r) = \frac{w_n}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \sum_{j=0}^M A_j(w_n, r) \cdot e^{i(w_n.t - k_n.r)} \cdot e^{-\frac{w_n^2}{4\alpha} (t-r/U)^2} \quad (10)$$

O sinal filtrado é complexo como expresso na equação (10) e no desenvolvimento desta expressão são satisfeitas as condições de aplicabilidade do filtro. Estas são:

$$w_c \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{w_n}} > 2 \quad (\text{condição de largura da janela do filtro}),$$

e

$$\frac{\alpha}{w_n^2} \gg \frac{d^2 k}{dw_n^2} \quad (\text{condição de suavidade da curva de velocidade de grupo}).$$

A amplitude instantanea de $g(t,r)$, equação (10), tem uma envelope que a partir do seu máximo se extrai o valor da amplitude para cada harmônico. O espectro de amplitude do harmônico e a medida de velocidade de grupo são calculadas respectivamente por,

$$A(w_n, r) = T_n \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \cdot \left| g_{\text{máx}}(t, r) \right|$$

e

$$U(w_n) = \frac{r}{t_{\text{máx}}}.$$

O efeito da interferência dos harmônicos é analisado através do tempo t_d necessário para que haja uma separação entre os máximos da envelope do sinal filtrado definido por

$$t_d = T_n \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}},$$

onde $T_n = 2\pi/w_n$. Se os máximos de dois harmônicos são separados por um tempo maior que $t_d = 4 \cdot T_n$, então se considera que os harmônicos não se interferem e as velocidades de grupo para um ou mais harmônicos são determinadas.

3. SELEÇÃO e PROCESSAMENTO de DADOS .

3.1 Estações Sismográficas Utilizadas.

As estações utilizadas possuem sensores de período longo, necessários para os estudos de dispersão no intervalo de 4 a 50 segundos aqui propostos sejam realizados. As estações utilizadas estão localizadas dentro do território Brasileiro e são as seguintes: a do Rio de Janeiro (RDJ), a de Brasília (BDF) a de Caicó (CAI) e de Belém (BEB). A localização das estações em coordenadas geográficas são respectivamente dadas por:

	Latitude	Longitude
	°	°
RDJ	22 53'42'' (S)	43 13'24'' (W)
	°	°
BDF	15 39'50'' (S)	47 54'12'' (W)
	°	°
CAI	6 31'33'' (S)	37 08'16'' (W)
	°	°
BEB	1 27'00'' (S)	48 23'00'' (W).

Os valores das constantes dos sismógrafos de cada estação se encontram tabeladas abaixo. O valor máximo da curva de magnificação dos instrumentos das estações de BDF, RDJ e CAI é de 1500. Para a estação de BEB os valores máximos da curva de magnificação dos instrumentos são os seguintes: 2986 e 5897 para as componentes horizontais e vertical respectivamente. Os valores de T_s e T_g que correspondem aos períodos naturais do sismômetro e do galvanômetro e ζ^2 é o fator de acoplamento, estão tabelados abaixo.

	BDF			RDJ			CAI			BEB		
	Z	NS	EW	Z	NS	EW	Z	NS	EW	Z	NS	EW
$T_s(s)$	15	15	15	14.4	16.7	14.4	15	15	15	22	30	30
$T_g(s)$	100	100	100	80.	79.	70.	100	100	100	*	*	*
ζ^2	.05	.05	.05	.11	.09	.09	.05	.05	.05	*	*	*

A inversa da função transferência $H(w)$ utilizada para a deconvolução do efeito do instrumento de cada estação sismográfica, foi obtida através dos trabalhos de Kisslinger (1967), Chandra (1970) e Leite (1987), cuja forma é a seguinte,

$$H(w) = H_r(w) + i \cdot H_I(w)$$

$$H_r(w) = \frac{-2 \cdot w_c \cdot (\xi_1 \cdot w_s \cdot (w_s^2 - w_e^2) + \xi_s \cdot w_s \cdot (w_s^2 - w_e^2))}{K \cdot w_e^3}$$

$$H_I(w) = \frac{(w_e^2 - w_s^2) \cdot (w_s^2 - w_g^2) - 4 \cdot \xi_s \cdot \xi_1 \cdot w_s \cdot w_g \cdot (1 - \zeta^2) \cdot w_e^2}{K \cdot w_e^3},$$

onde $w_s = 2\pi/T_s$ e $w_g = 2\pi/T_g$, e ainda

$H_r(w)$: parte real da função transferência inversa;

$H_I(w)$: parte imaginária da função transferência inversa;

K : fator de amplificação estática do instrumento;

ξ, ξ_1 : coeficiente de amortecimento do galvanômetro e do sismômetro;

w_e : frequência externa;

w_s : frequência natural do sismômetro;

w_g : frequência natural do galvanômetro.

A inversa da função transferência $H(w)$ do sismógrafo de BEB é definida na forma seguinte

$$H_r(w) = \frac{-2 \cdot \xi_s \cdot w_s^2}{K \cdot w_e^2}, \quad H_I(w) = \frac{(w_e^2 - w_s^2) \cdot w_s^2}{k \cdot w_e^3}$$

onde $\xi = 0.67$ é a constante de amortecimento e que foi ajustado por Leite (1989).

3.2 Seleção dos Terremotos.

Os registros das estações RDJ, BDF e CAI são analógicos, sendo a impressão feita através do galvanômetro em papel fotográfico segundo o padrão WWSSN. A estação BEB tem os registros do tipo tinta-papel sem um galvanômetro.

Para a seleção dos eventos utilizam-se três critérios: a localização, a magnitude m e a profundidade. A localização dos epicentros é principalmente na plataforma Sulamericana e a oeste dos Andes, figura 1. A magnitude m dos terremotos é entre 4 e 6 unidades e com este critério prático se evita registros com saturação de sinal. As profundidades de foco são normalmente menor que 100 km, de modo que o sismograma apresente ondas de superfície bem desenvolvidas, para que a janela a ser digitalizada seja bem definida.

Usando-se os critérios acima, foram analisados os PDEs (Preliminary Determination of Epicenters) do período de Janeiro de 1978 a Julho de 1987. Todos os terremotos escolhidos foram registrados globalmente por mais de 20 estações, e foram selecionados 34 eventos como listados na tabela 1 e agrupados por regiões. Destacamos 27 trajetórias epicentro-estação como indicado na figura 2.

Os erros mais comuns em medidas de velocidade de grupo são devidos as incertezas nas determinações do tempo de origem e da distância epicentral. Outros efeitos podem ser causados por refrações laterais na propagação ou, até mesmo devido a utilização não própria do parâmetro do filtro múltiplo. James and Linde (1971) recomendam que na digitalização do sismograma, o eixo do tempo do sismograma seja perpendicular ao eixo do galvanômetro.

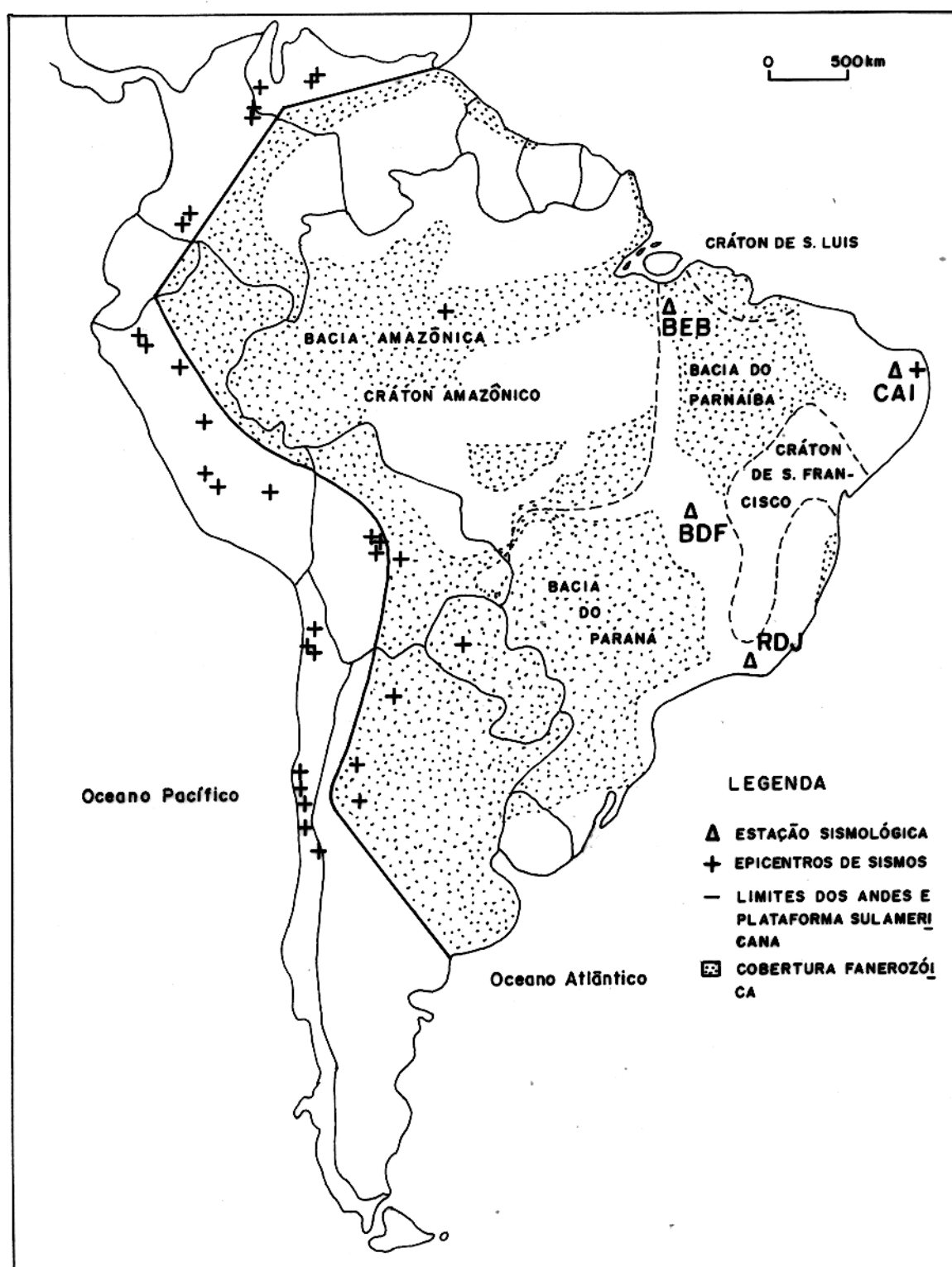


Figura 01 - Mapa da América do Sul com a distribuição de epicentros e estações sísmicas e limites de coberturas Fanerozoicas

Tabela 01 - Eventos Seleccionados (*)

DATA	TEMPO DE ORIGEM	REGIÃO	LATITUDE (GRAUS)	LONGITUDE (GRAUS)	PROF (Km)	m _b	EST.
18/04/81	00:32:39.8	Peru	13 144 S	74 376 W	38	5.3	RDJ
21/05/83	20:05:14.6	Peru	10 600 S	74 793 W	18	5.1	BDF
24/10/83	00:36:06.5	Peru	12 849 S	76 658 W	48	5.6	BDF
03/11/83	07:41:11.4	P.Equa	4 014 S	79 418 W	93	5.9	RDJ
05/06/84	04:15:24.3	N.Peru	7 819 S	76 708 W	33	5.8	RDJ
26/07/85	17:56:58.4	Peru	5 378 S	78 653 W	18	5.3	RDJ
05/04/86	20:14:28.7	Peru	13 410 S	71 785 W	51	5.3	BDF
08/08/78	02:58:36.6	N.Colo	6 963 N	72 144 W	45	5.1	RDJ
02/05/80	01:47:06.9	N.Colo	7 210 N	72 168 W	50	5.1	BDF
19/05/84	19:07:18.6	Col-Eq	0 147 N	77 122 W	23	5.7	BDF
24/4/84	14:09:45.7	N.Colo	6 689 N	71 696 W	44	5.1	RDJ
10/04/85	20:15:36.6	Colo	1 560 N	77 017 W	10	5.3	RDF, RDJ
26/11/80	17:35:39.1	Vene	8 045 N	72 441 W	40	5.0	RDJ
03/05/85	07:05:54.9	Vene	9 522 N	69 449 W	26	4.9	BDF
18/07/86	17:22:38.2	Vene	10 770 N	69 428 W	07	5.9	BDF, RDJ
05/08/83	06:21:42.7	Manaus	3 596 S	62 153 W	23	5.6	CAI
30/11/86	05:19:48.0	J.Cama	5 550 S	35 750 W	05	5.2	BDF
09/12/86	06:46:50.0	J.Cama	5 550 S	35 750 W	05	4.2	BDF
09/04/80	08:17:55.1	S.Juan	31 654 S	67 476 W	10	5.5	BDF
02/04/83	05:58:35.0	Catama	28 529 S	66 600 W	39	5.5	RDJ
14/12/85	02:51:45.7	Sal-AR	25 007 S	64 756 W	13	5.6	RDJ, BDF, CAI
12/04/85	14:34:55.7	Parag	23 944 S	60 553 W	25	5.3	BDF
22/03/85	14:02:46.9	Boliv	18 595 S	63 613 W	33	5.5	BDF, RDJ
14/05/86	04:30:25.3	Boliv	17 255 S	65 485 W	48	4.9	BDF, RDJ
19/06/86	20:33:17.1	Boliv	16 985 S	65 489 W	19	5.5	BDF, RDJ
19/06/86	21:57:24.3	Boliv	16 943 S	65 426 W	20	5.4	BDF
13/09/82	16:36:17.1	Chile	23 907 S	68 035 W	32	5.0	BDF
16/10/83	09:59:46.5	Chile	23 681 S	70 129 W	66	5.7	BDF
15/12/83	04:22:33.4	Ch-Ar	33 099 S	70 120 W	100	5.9	BDF, RDJ, CAI
03/02/84	08:29:49.3	C.Chi	29 498 S	71 260 W	49	5.6	RDJ
08/11/84	06:32:56.1	C.Chi	30 700 S	71 460 W	45	5.4	RDJ
27/01/87	07:06:51.9	Chile	32 154 S	72 082 W	35	5.0	BEB
29/01/87	17:22:39.4	C.Chi	29 765 S	71 208 W	65	5.4	RDJ, BDF
19/06/87	19:00:05.1	C-Bol	21 213 S	68 362 W	86	5.6	BDF

(*) Preliminary Determination of Epicenters (U.S. Department of the Interior/Geological Survey).

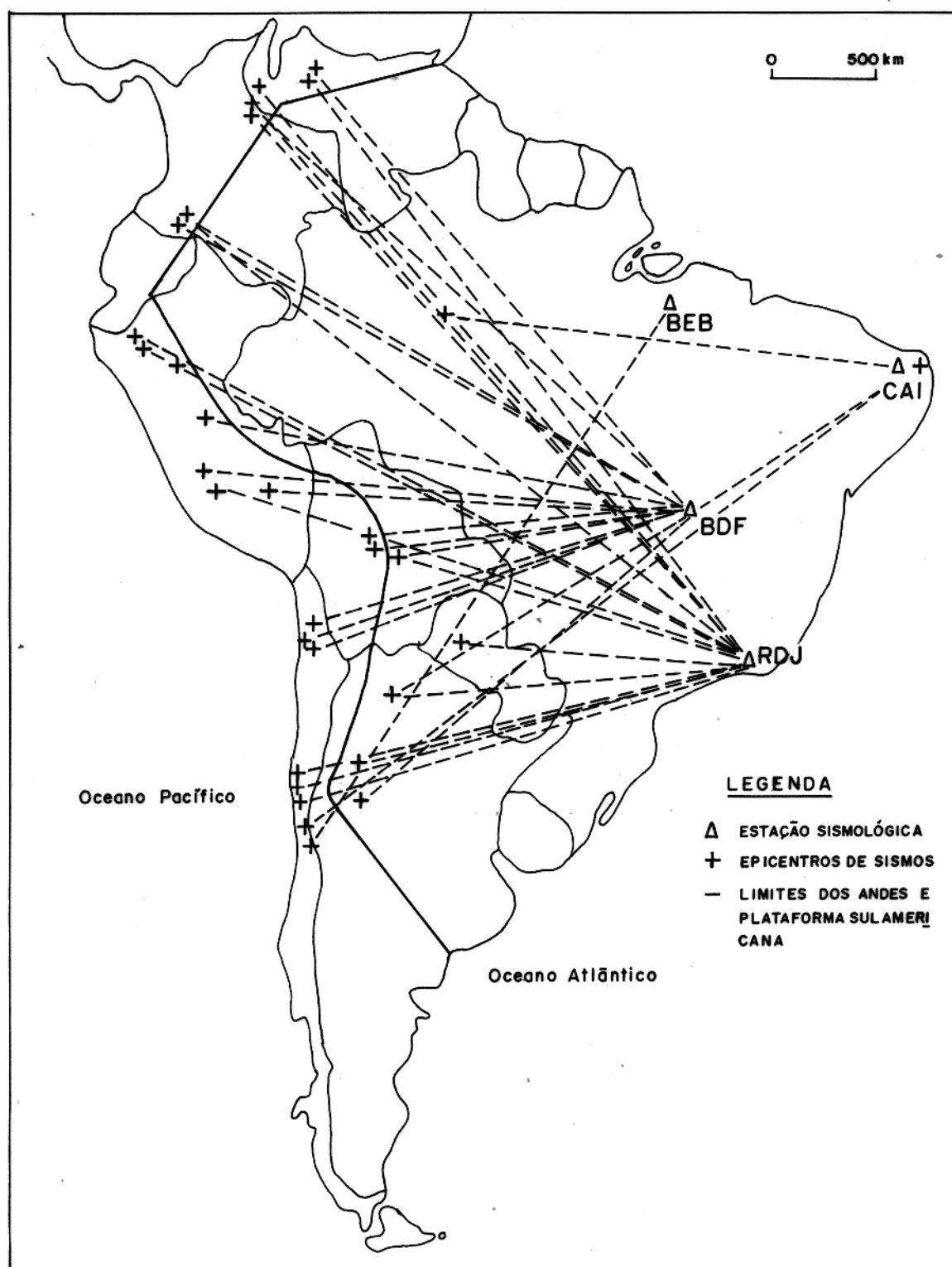


Figura O2 - Mapa com as trajetórias epicentro-estação na plataforma sulamericana.

3.3 Digitalização e Correções.

Como os dados utilizados neste estudo foram registrados em estações sismográficas que têm registradores analógicos, é necessária a digitalização dos sismogramas. Assim sendo, foram feitas ampliações fotográficas dos registros com o objetivo de melhorar a amostragem. O comprimento das janelas temporais dos sismogramas digitalizados foram entre 6 e 10 minutos, dependendo das características do sinal dispersivo das ondas de superfície para cada evento e para cada estação.

A componente utilizada neste trabalho é a vertical, representando portanto a onda de Rayleigh-Z. Com o objetivo de definir com maior exatidão a janela das ondas de superfície a ser digitalizada se determinou os tempos de chegada das ondas P e S para cada terremoto de forma automatizada. A digitalização do sismograma é feita com espaçamento irregular no eixo do tempo e posteriormente feita a interpolação linear para o espaçamento (Δt) constante. A unidade utilizada na digitalização das amplitudes do sismograma é o milímetro e posteriormente convertida para centímetro no processamento, para que as unidades do espectro seja cm.s.

A correção realizada nesta etapa é devido a variação de tempo do relógio local da estação sismográfica em relação ao horário universal.

Sendo o ΔT quantidade devido ao atraso ou adiantamento do relógio da estação sismográfica em relação ao horário universal, esta deve ser somada ao tempo de origem do sismo. A definição para esta correção é

$$\Delta T = U_t - U_1,$$

onde U = horário universal,
 t
 U_l = horário local,
 l

válidas para qualquer ponto do sismograma. Para se obter ΔT em um ponto faz-se uma interpolação linear, cuja expressão é dada por,

$$\Delta T = \left(\frac{\Delta T_f - \Delta T_i}{t_f - t_i} \right) \cdot t_d + \Delta T_i,$$

onde

ΔT_f = correção no final do sismograma.

ΔT_i = correção no início do sismograma.

t_f = tempo no final do sismograma onde se calcula ΔT_f .

t_i = tempo no início do sismograma onde se calcula ΔT_i .

t_d = tempo de origem de evento no sismograma medido a partir do tempo t_i (ponto de origem da interpolação).

A unidade de tempo normalmente usada na correção é o milésimo de segundos.

3.4 Processamento dos Dados.

Esta etapa inicia com um programa de processamento que efetua as correções da tendência linear, do nível DC, do espalhamento geométrico, cálculo da transformada de Fourier do sismograma e deconvolução do efeito do instrumento. Depois disto faz-se uso do programa de aplicação do filtro múltiplo (Herrmann, 1972). As tarefas principais se encontram comentadas em 12 itens descritos a seguir.

(1) A correção da tendência linear e do nível DC é feita através do ajuste de uma linha reta aos dados observados no sentido dos mínimos-quadrados. Os coeficientes desta reta são calculados (Davis, 1986):

$$A = \frac{\sum y_i \cdot \sum i^2 - (\sum i) \cdot \sum i \cdot y_i}{N \cdot \sum i^2 - (\sum i)^2},$$

e

$$B = \frac{N \cdot \sum i \cdot y_i - (\sum i) \cdot (\sum y_i)}{N \cdot \sum i^2 - \sum i^2},$$

onde

 y_i = Amplitudes observadas, N = números de observações.

Esta equação é aplicada para uma amostragem de tempo $\Delta T = \text{const.}$

(2) A correção do nível DC é também calculada isoladamente da correção da tendência linear, na forma simples de uma média aritmética das amplitudes observadas. Ou seja,

$$DC = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_i.$$

(3) A correção do espalhamento geométrico se faz necessária devido as diferentes distâncias epicentro-estação $\Delta(r)$ cujo efeito causa o decaimento da amplitude do sinal com a distância de forma diferencial. Assim sendo, a correção é feita para uma distância de referênciar $r = 1000 \text{ km}$ (9 graus), segundo a forma

$$A(w) = A_o(w) \cdot \left| \frac{r}{r_d} \right|^{1/2}$$

 $A(w)$ = Amplitude corrigida $A_o(w)$ = Amplitude observada.

(4) No processamento do sismograma é utilizada a escala milímetro por segundo (EMMPs) e em seguida é feita a interpolação linear para um Δt constante, procurando diminuir a contaminação por amostragem. Temos que,

$$\text{EMMPs} = \frac{\frac{L}{\text{mm}}}{\frac{L}{\text{min}} \cdot .60}$$

onde

L = comprimento da janela digitalizada em milímetro.

L = comprimento da janela em minutos.

(5) Coplementação da série temporal de modo que o número de pontos N obdeça a regra $N=2^{**}NN$, onde NN é inteiro, para obtenção da transformada de Fourier numérica. Posteriormente é feita a multiplicação pelo fator de escala.

(6) Deconvolução instrumental através de $H(w)$ que é a inversa da função transferência do instrumento. Esta multiplicada a transformada de Fourier do sismograma $F(w)$ na forma simples,

$$F(w) = H(w) \cdot F(w)$$

(7) As frequências do espectro de Fourier $w_i = n \cdot 2\pi / T$ são relacionadas por quociente não constante. O vetor de frequências centrais (w_n) do filtro são calculadas de forma que o quociente seja constante entre as frequências adjacentes $w_n = k \cdot w_{n-1}$. Assim sendo, não haverá coincidência entre os harmônicos da FFT e os do filtro ($w_i \neq w_n$), então procura-se selecionar as frequências de Fourier mais próximas possíveis das frequências centrais definidas para representar os valores.

(8) A função janela usada na filtragem tem a banda relativamente constante dada pela forma,

$$H_n(w) = \begin{cases} 0 & , w < (1-b) \cdot w_n \\ e^{-\frac{(w-w_n)^2}{w_n^2}} & , (1-b) \cdot w_n < w < (1+b) \cdot w_n \\ 0 & , w > (1+b) \cdot w_n \end{cases}$$

Fazendo $B = \ln \left| \frac{H_n(w)}{H_{e,n}(w)} \right| = \ln \left| \frac{H_n(w)}{H_{u,n}(w)} \right|$, então $\alpha = (B/b)$

com valores típicos de $\alpha = 16\pi$, $b = 0.25$ e $B = 3.15$. Então o valor inferior da banda é $w_{e,n} = (1-b)w_n$, e o superior é $w_{u,n} = (1+b)w_n$. A filtragem corresponde à multiplicação da janela espectral $H_n(w)$ pelo espectro do sinal $F(w)$. Assim temos,

$$F_n(w) = F(w) \cdot H_n(w)$$

(9) Fazendo-se a transformada inversa do sinal filtrado $F_n(w)$ obtem-se as componentes em quadratura $q_n(t)$ e em-fase $h_n(t)$, logo

$$\mathcal{F}\{F_n(w)\} = h_n(t) + i \cdot g_n(t)$$

de onde então se forma a amplitude e fase instantâneas,

$$A_n(t) = \left| h_n(t) + i q_n(t) \right|^{1/2} \quad \text{e} \quad \phi_n(t) = \tan^{-1} \left| \frac{q_n(t)}{h_n(t)} \right|$$

(10) Aplica-se o algoritmo de procura dos máximos de $A_n(t)$, definindo os valores de t_n e os valores de velocidade de grupo através da relação $U_n = r/t_n$. As distâncias entre as máximas pode ser medidas para verificar se a distância $t_d = T \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} = 4 \cdot T$ ou maior é satisfeita, recuperando-se a amplitude pela relação. Assim definida:

$$A_n = A(T, U_n) = 4 \cdot T \cdot A_n(t_{n \text{ máx}}) ; \quad t_{n \text{ máx}} = r/U_n$$

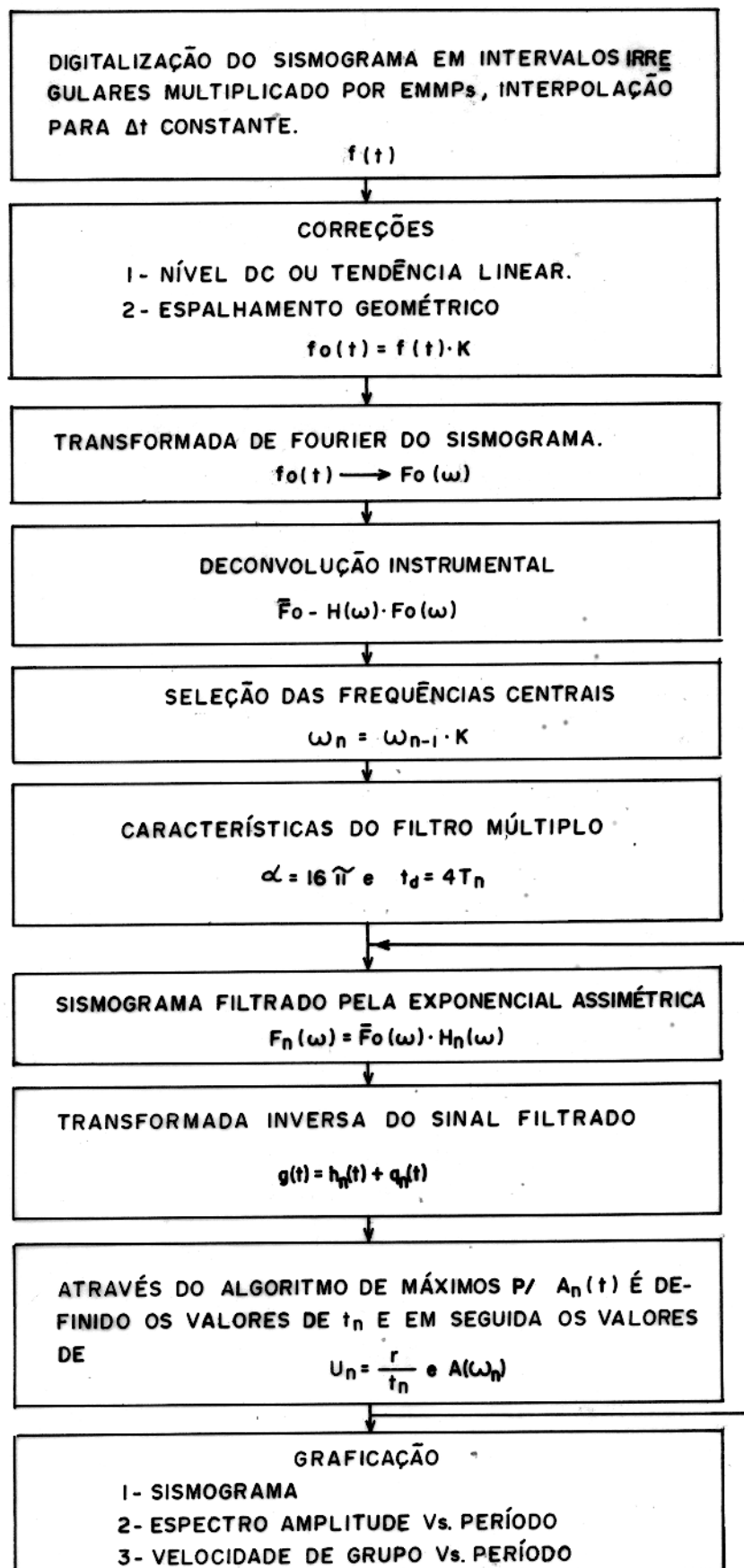


Diagrama de blocos do processamento.

(11) Repetem-se os passos (5) à (7) até que se tenha todos os valores de velocidade de grupo vs. período. Os períodos são referidos diretamente às frequências centrais (w). Recuperam-se também as amplitudes espectrais de cada harmônico registrado.

(12) Graficação da transformada de Fourier do sismograma, da amplitude espectral vs. período e da velocidade de grupo vs. período.

Para se realizar a interpretação das velocidades de grupo de forma não-automática, selecionou-se também as amplitudes correspondentes a cada valor de velocidade em cada período central selecionado, com identificação dos harmônicos fundamental e primeiro superior. Estas etapas do processamento se encontram descritas no diagrama de bloco do processamento folha 21a.

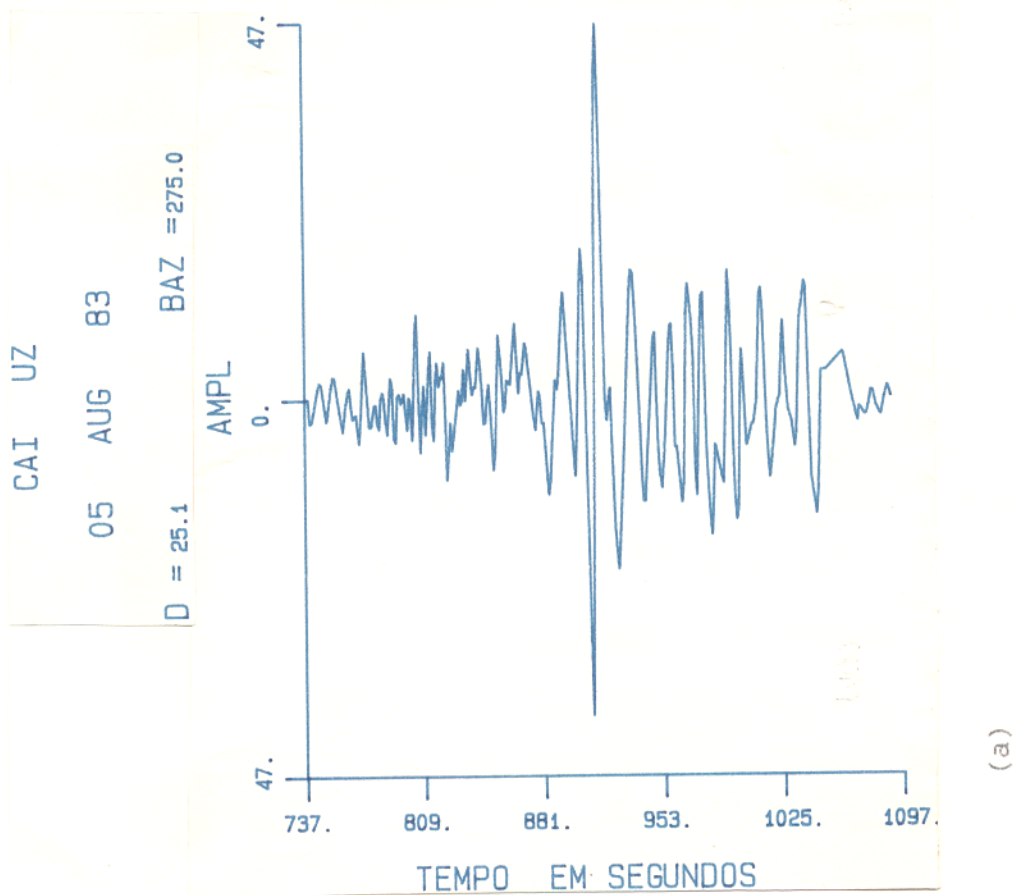
4. ANÁLISE dos RESULTADOS .

4.1 Análise das Formas das Curvas de Dispersão.

Neste estudo foram utilizados 34 terremotos e definidas 27 trajetórias epicentro-estação, sendo que cada uma destas trajetórias é representada por grupos formados de 1 a 4 terremotos. Assim sendo, foi calculada a curva média e o desvio padrão para cada grupo. Em seguida foram definidas três formas distintas de curvas, e a cada conjunto de curvas que tenha forma semelhante foi denominado de família. As figuras 3 a 29 são formadas de duas partes (a) e (b). A parte (a) mostra o sismograma com a sigla da estação, componente, data do registro distância epicentral em graus o azimuth-contrário. A parte (b) mostra as curvas de dispersão do harmônico fundamental e o primeiro superior. O eixo dos tempos do sismograma na parte (a) está relacionado com o eixo de velocidade de grupo da parte (b) através da relação $r=v.t$. As tabelas de números 2 a 8 apresentam os valores de velocidade média de grupo e o desvio padrão para as 27 trajetórias.

A trajetória Manaus a CAI (fig.3, fig.30a) mostra uma curva de dispersão descendente para períodos menores que 10 segundos, um patamar entre 10 e 18 segundos de (3.05 km/s) e ascendente para períodos maiores que 18 segundos.

A trajetória Argentina-centro a RDJ (fig.4, fig.30b) mostra uma curva de dispersão descendente para períodos menores que 7 segundos, um patamar entre 8 e 12 segundos de (2.95 km/s) e ascendente para períodos maiores que 12 segundos. O primeiro harmônico tem forma ascendente para os períodos de 4 e 10 segundos.



Trajectoria Manaus a CAI.

Ver tabela 2.

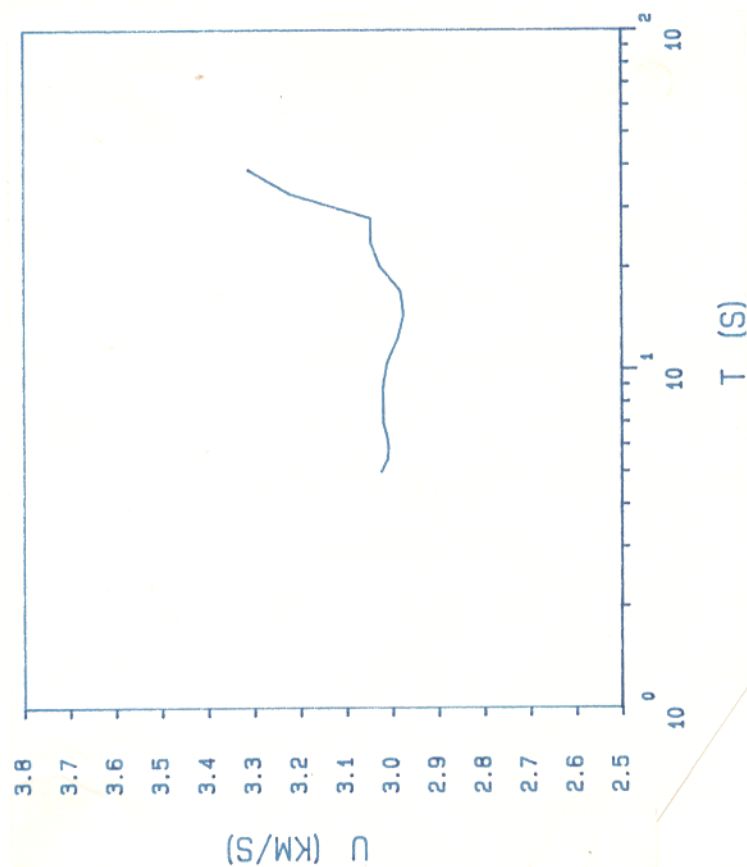


Figura 3. (a) Sismograma da componente vertical da onda de superfície observada. (b) Curva da velocidade de grupo vs. período para o harmônico fundamental da onda de Rayleigh.

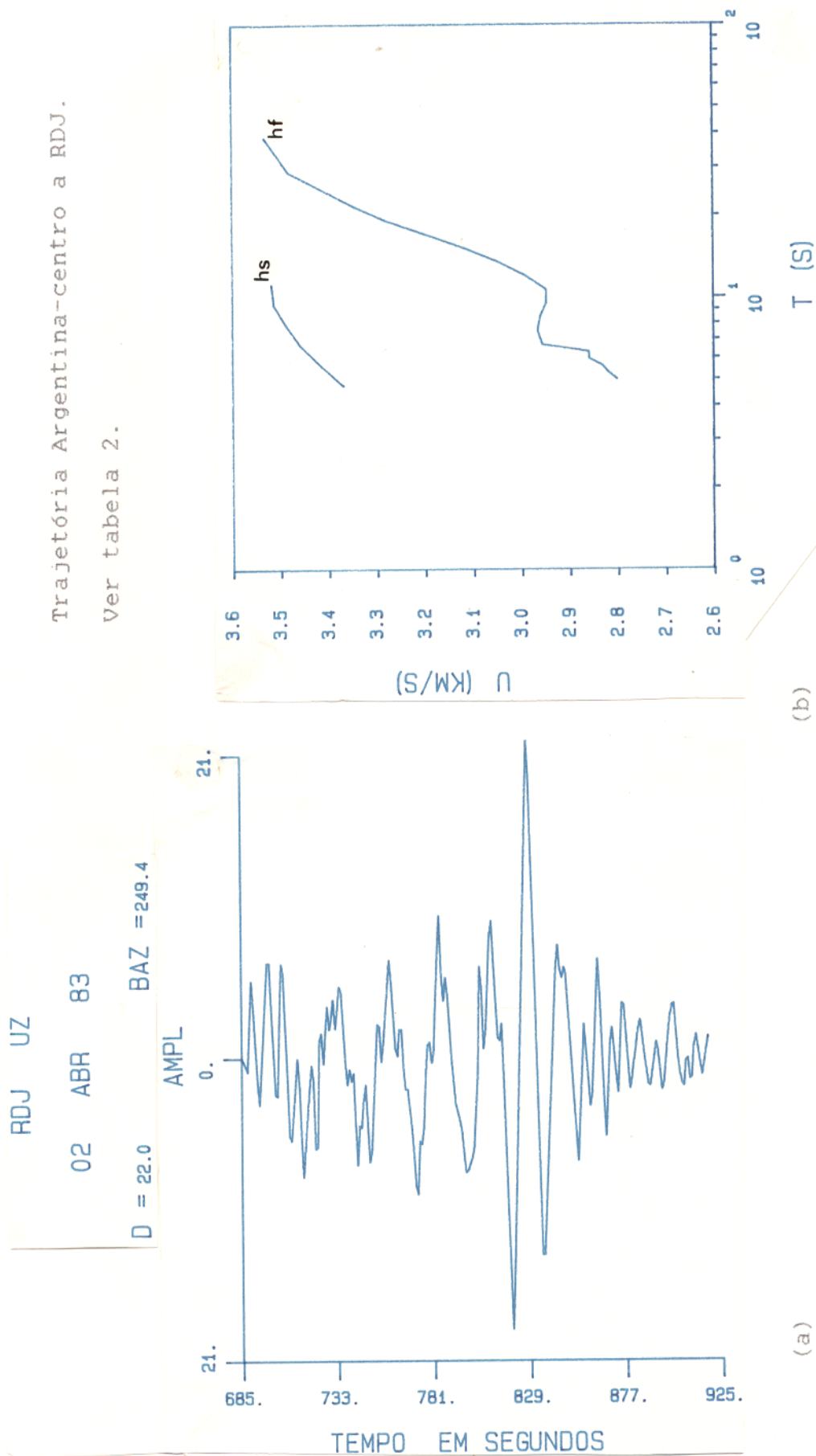


Figura 4. (a) Sismograma da componente vertical da onda de superfície observada. (b) Curva da velocidade de grupo vs. período para o harmônico fundamental (hf) e primeiro superior (hs) da onda de Rayleigh.

Tabela 02 - Velocidade de grupo vs. período para onda de Rayleigh.

Período T (s)	Manaus a CAI		Argentina-Centro a CAI		Argentina-Centro a RDJ		Argentina-norte a CAI		Argentina-Centro a BDF	
	U (km/s)	σ (Km/s)	U (Km/s)	1 σ U (km/s)	U (km/s)	σ (km/s)	U (km/s)	σ (km/s)	U (km/s)	σ (km/s)
1	-	-	-	3.276	-	-	-	-	-	-
5	3.071	-	2.800	3.367	2.754	-	2.620	-	2.620	-
6	3.058	-	2.819	3.414	2.761	-	2.620	-	2.620	-
7	3.055	-	2.832	3.457	2.885	-	2.702	-	2.702	-
8	3.061	-	2.859	3.487	2.906	-	2.737	-	2.737	-
9	3.068	-	2.860	3.512	2.937	-	2.785	-	2.785	-
10	3.068	-	2.956	3.517	2.983	-	2.794	-	2.794	-
12	3.069	-	2.966	-	3.064	-	2.917	-	2.917	-
14	3.058	-	2.959	-	3.069	-	2.958	-	2.958	-
16	3.035	-	2.946	-	3.049	-	2.930	-	2.930	-
18	3.022	-	2.948	-	3.090	-	2.946	-	2.946	-
20	3.031	-	2.992	-	3.093	-	2.973	-	2.973	-
22	3.075	-	3.048	-	3.134	-	3.189	-	3.189	-
24	3.095	-	3.118	-	3.235	-	3.193	-	3.193	-
26	3.095	-	3.199	-	3.349	-	3.297	-	3.297	-
28	3.269	-	3.281	-	3.387	-	3.309	-	3.309	-
33	3.360	-	3.344	-	3.407	-	3.310	-	3.310	-
35	-	-	3.482	-	-	-	3.431	-	3.431	-
40	-	-	3.532	-	-	-	-	-	-	-
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

U (km/s) - velocidade de grupo; σ (km/s) - desvio padrão.

A trajetória Argentina-norte a CAI (fig.5, fig.30c) mostra uma curva de dispersão descendente para períodos menores que 9 segundos, um patamar entre 10 e 18 segundos (3.06 km/s) e ascendente para períodos maiores que 20 segundos.

A trajetória Argentina-centro a BDF (fig.6, fig.31d) mostra uma curva de dispersão descendente para períodos menores que 9 segundos, um patamar entre 9 e 16 segundos (2.86 km/s) e ascendente para períodos maiores que 16 segundos.

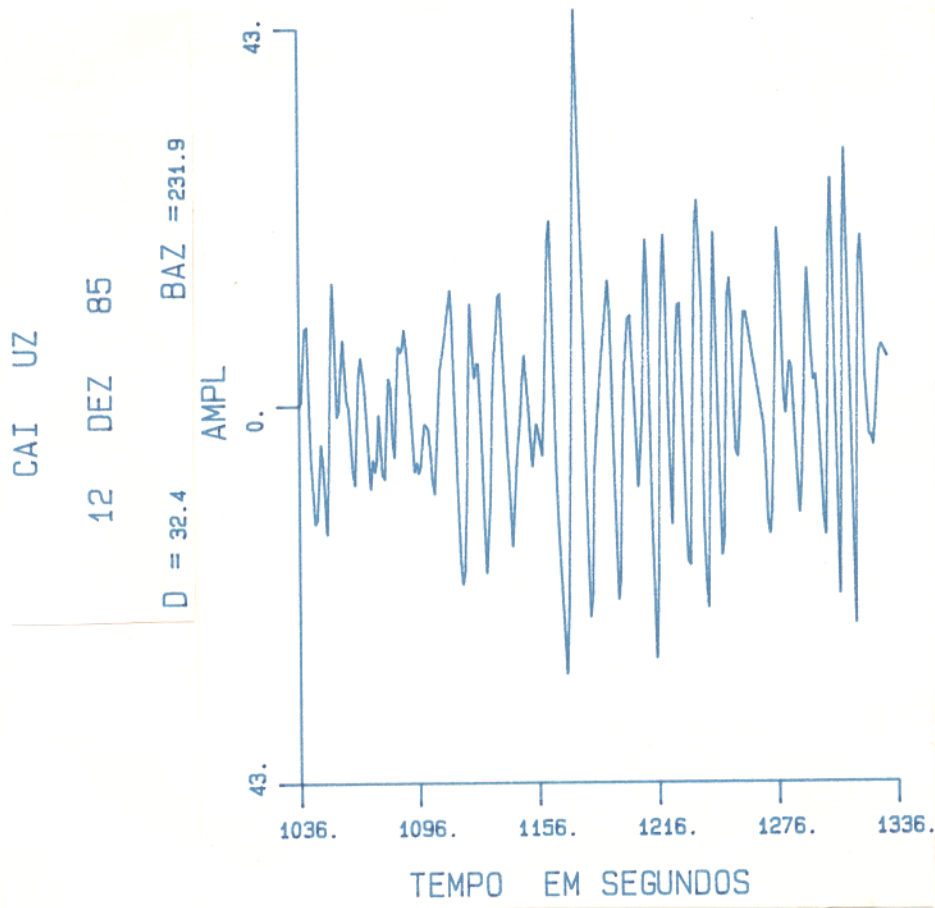
A trajetória Colômbia-nordeste a RDJ (fig.7, fig.32e) mostra uma curva de dispersão descendente para períodos menores que 8 segundos, com um máximo e um mínimo entre os períodos de 8 e 16 segundos e ascendente para períodos maiores que 16 segundos.

A trajetória Colômbia-sudoeste a BDF (fig.8, fig.32f) mostra uma curva de dispersão descendente para períodos menores que 8 segundos, um máximo e um mínimo entre 8 e 13 segundos, e ascendente para períodos maiores que 14 segundos. O primeiro harmônico tem forma ascendente contínuo entre os períodos 4 e 12 segundos.

A trajetória Colômbia-sudeste a RDJ (fig.9, fig.32g) mostra uma curva de dispersão com valores descendente para períodos menores que 9 segundos, um máximo e um mínimo entre 9 e 18 segundos e ascendente para períodos maiores que 20 segundos.

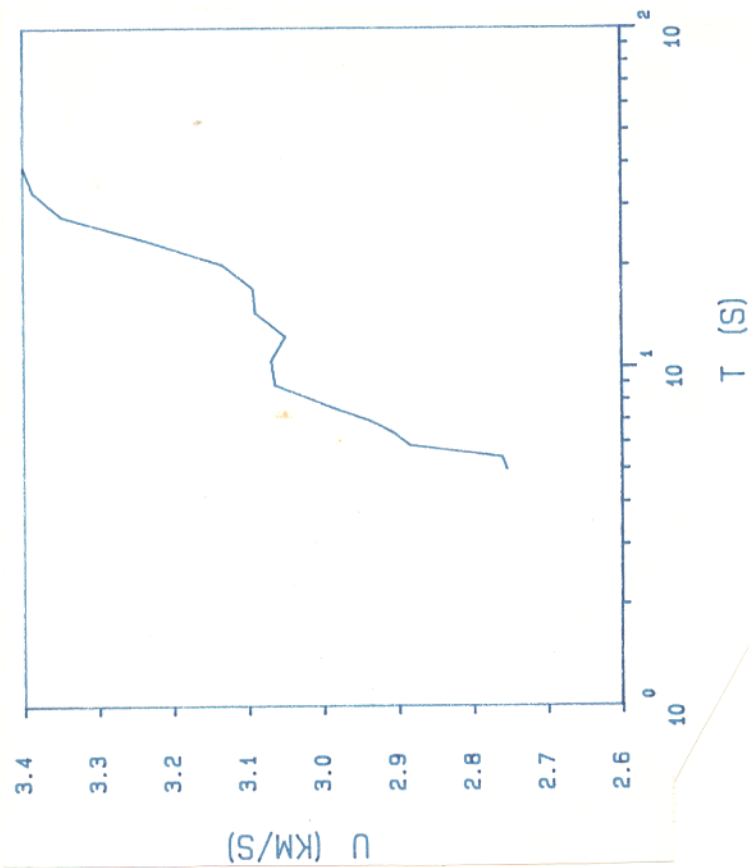
A trajetória Colômbia-nordeste a BDF (fig.10, fig.32h) mostra uma curva de dispersão descendente para períodos menores que 9 segundos, um máximo e um mínimo entre 9 e 18 segundos e ascendente para períodos maiores que 20 segundos.

A trajetória Peru-centro a BDF (fig.11, fig.30i) mostra uma curva de dispersão descendente para períodos menores que



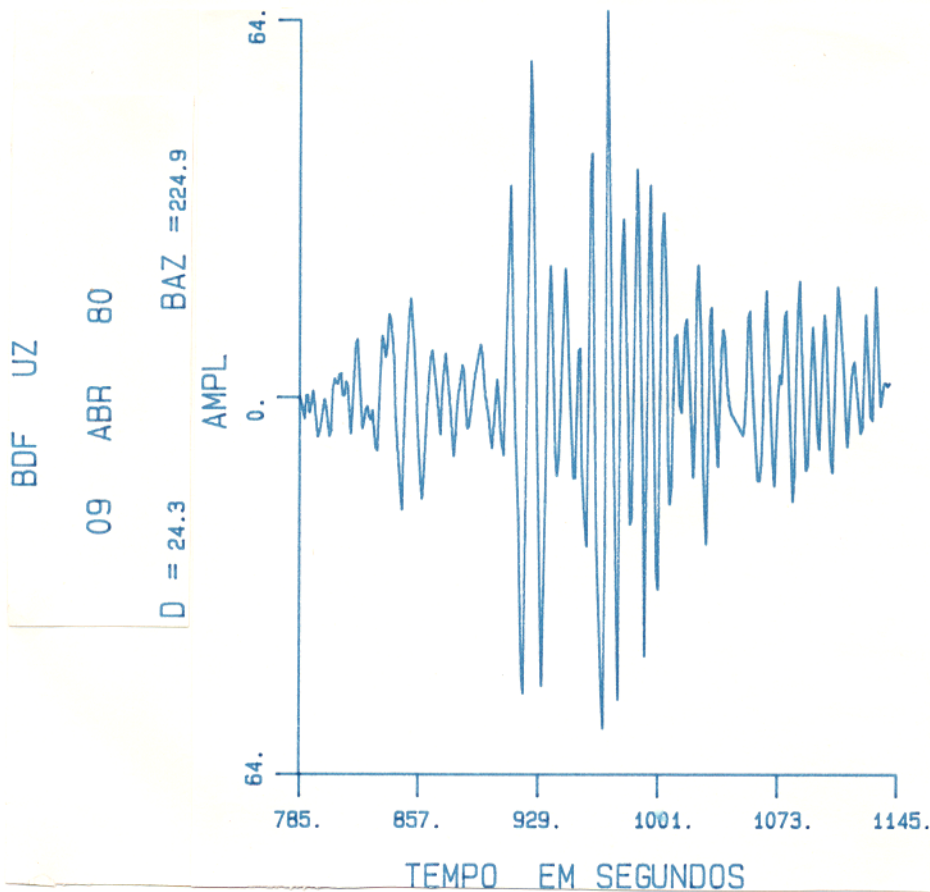
(a)

Trajectoria Argentina-norte a CAI.
Ver tabela 2.



(b)

Figura 5. (a) Sismograma da componente vertical da onda de superfície observada. (b) Curva da velocidade de grupo vs. período para o harmônico fundamental da onda de Rayleigh.



Trajetória Argentina-centro a BDF.
Ver tabela 2.

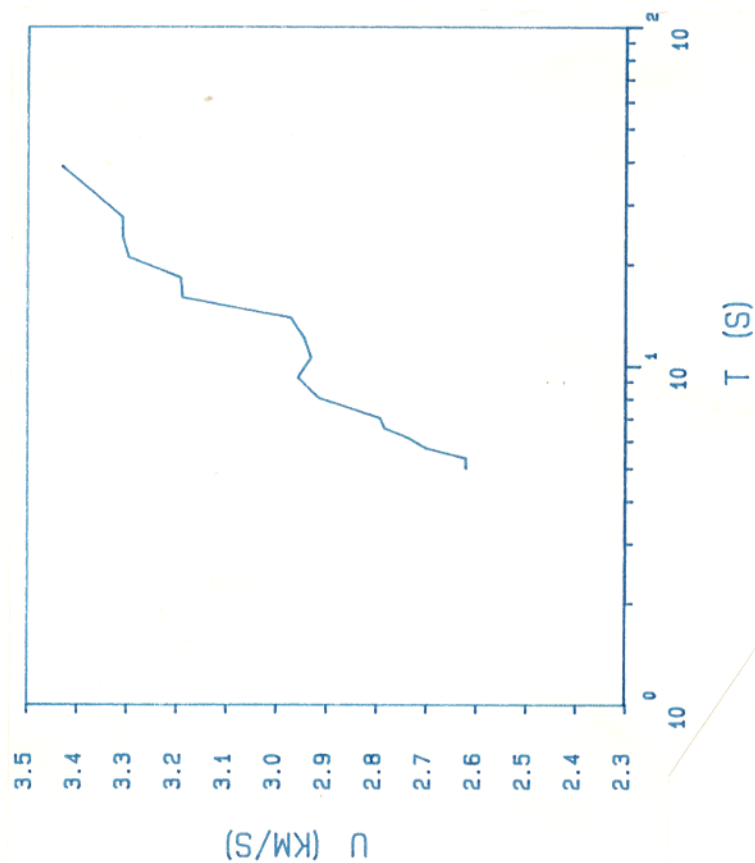


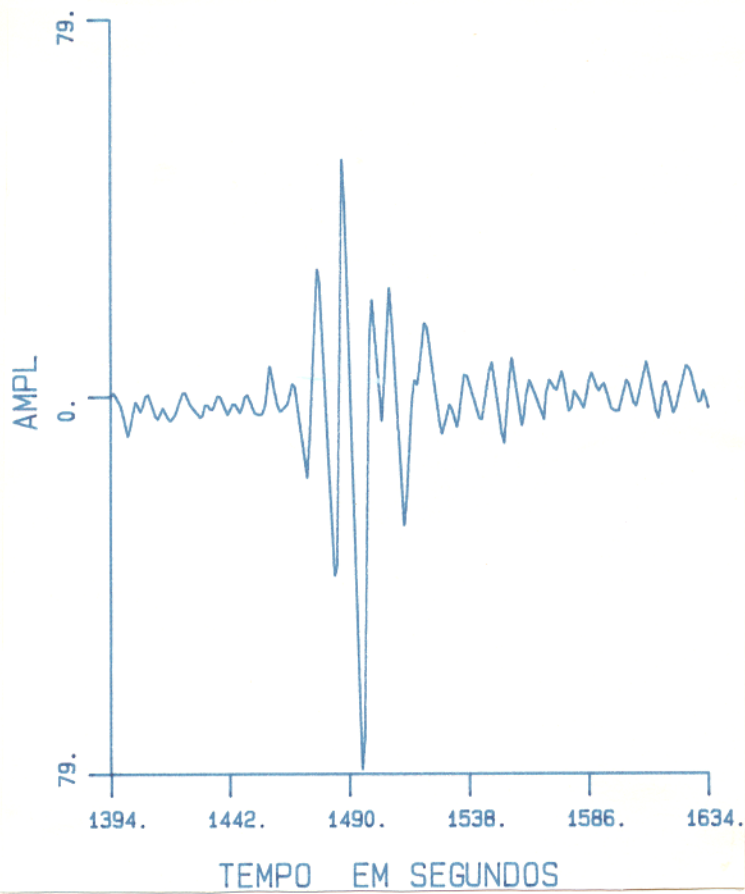
Figura 6. (a) Sismograma da componente vertical da onda de superfície observada. (b) Curva da velocidade de grupo vs. período para o harmônico fundamental da onda de Rayleigh.

RDJ UZ

24 ABR 84

D = 40.3

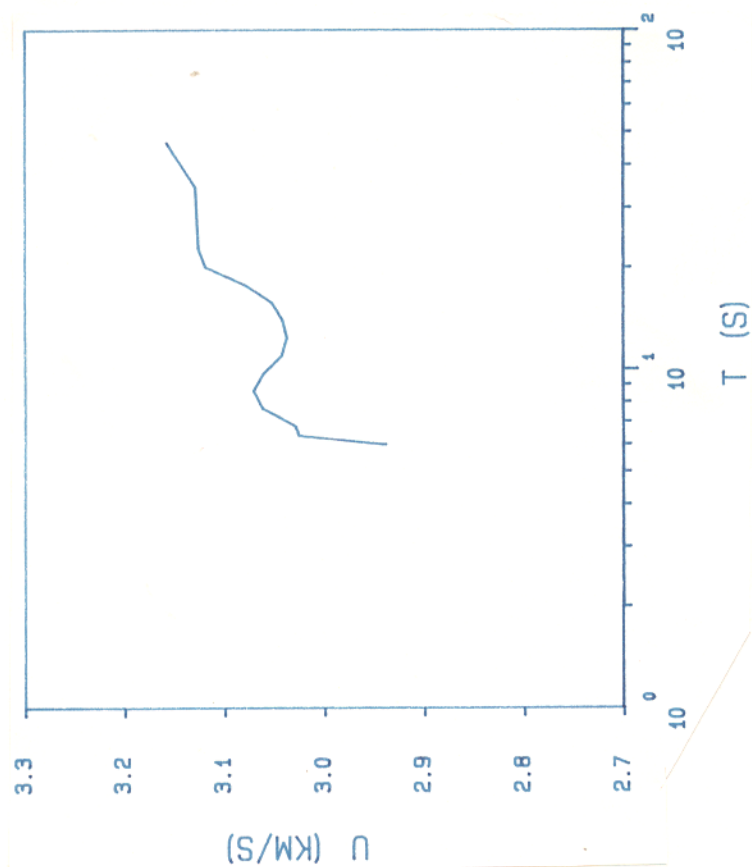
BAZ = 312.8



(a)

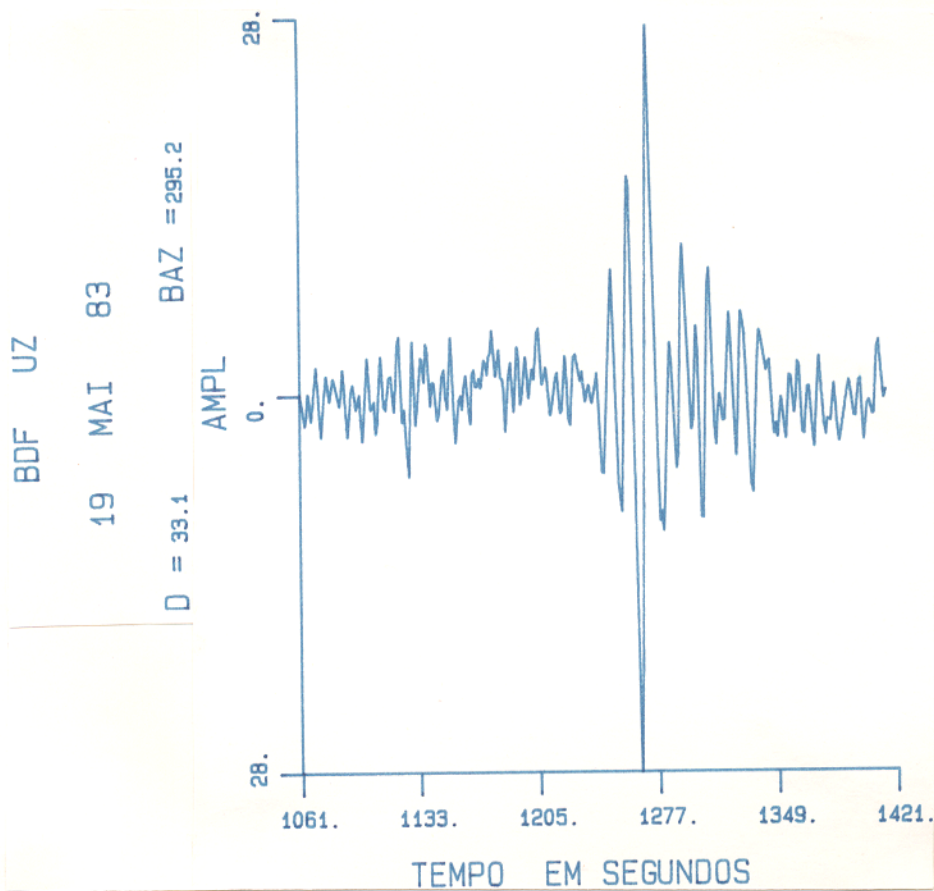
Trajectoria Colômbia-nordeste a RDJ.

Ver tabela 3.



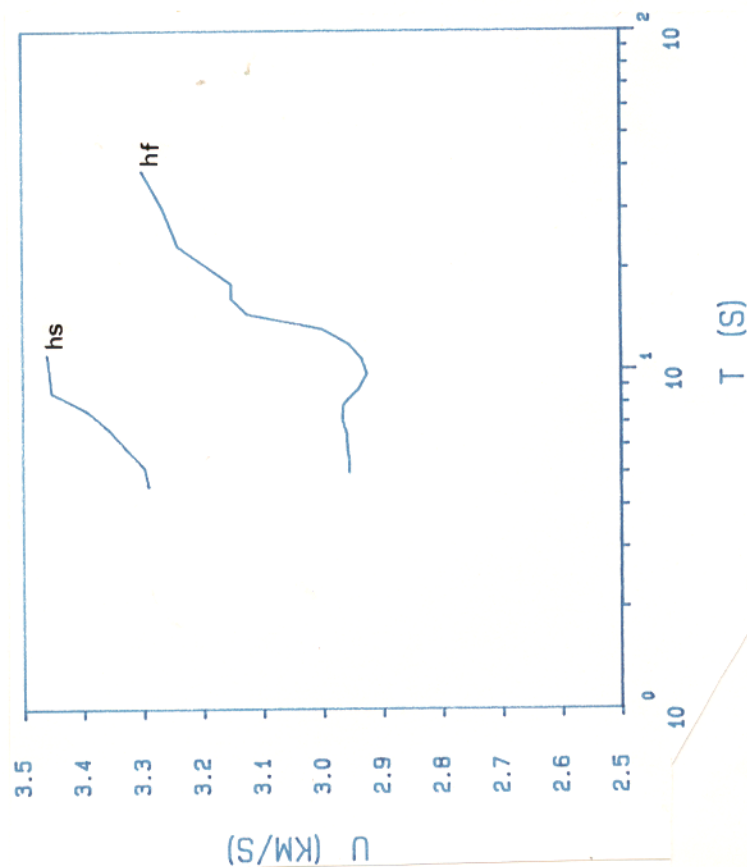
(b)

Figura 7. (a) Sismograma da componente vertical da onda de superfície observada. (b) Curva da velocidade de grupo vs. período para o harmônico fundamental da onda de Rayleigh.



(a)

Trajectoria Colômbia-sudoeste a BDF.
Ver tabela 3.



(b)

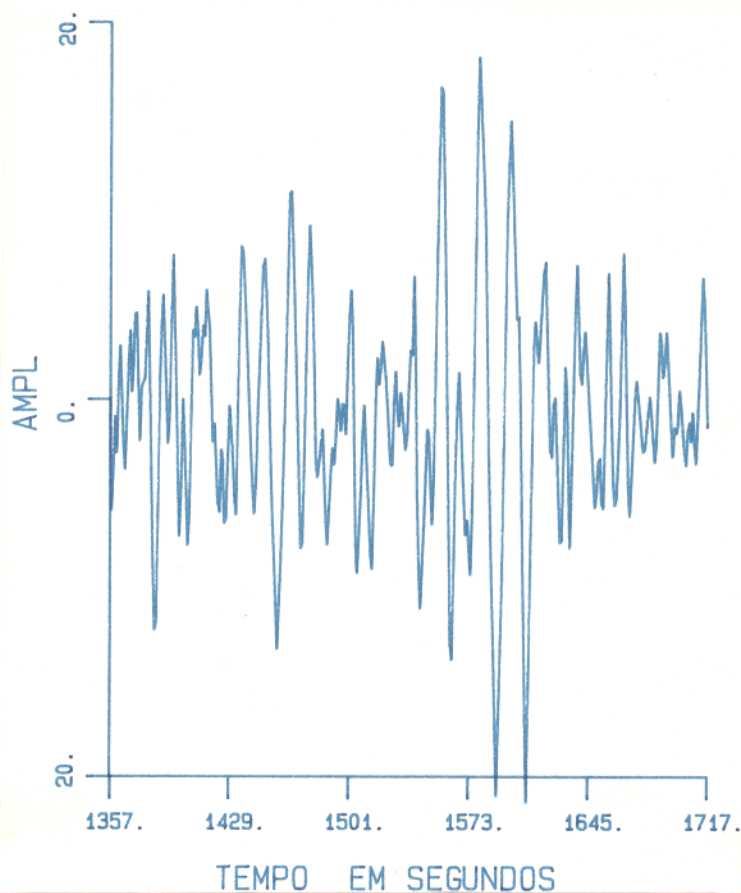
Figura 8. (a) Sismograma da componente vertical da onda de superfície observada. (b) Curva da velocidade de grupo vs. período para o harmônico fundamental (hf) e primeiro superior (hs) da onda de Rayleigh.

RDJ UZ

10 ABR 85

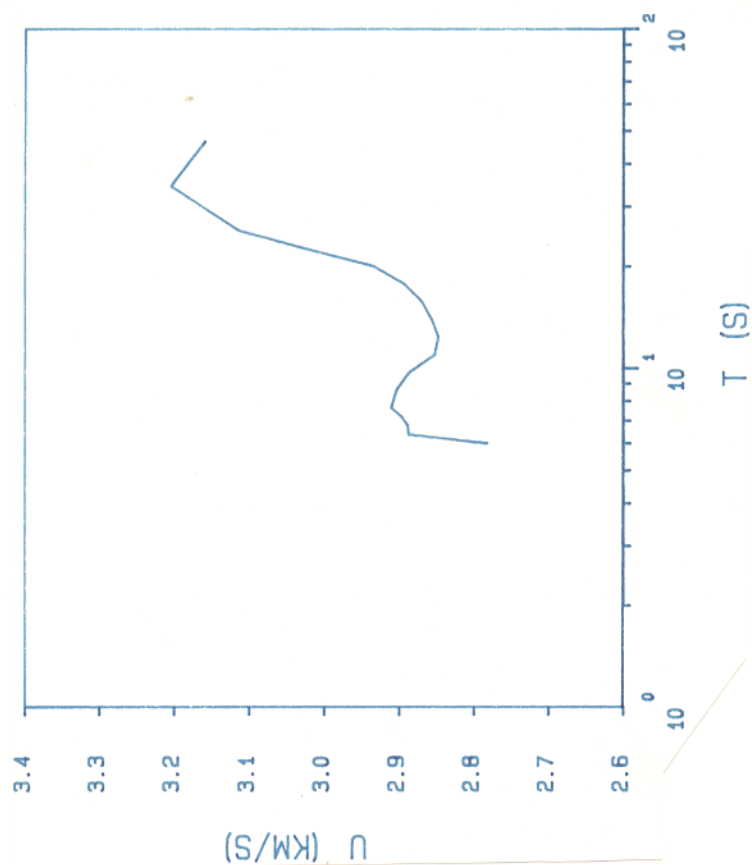
D = 40.8

BAZ = 301.5



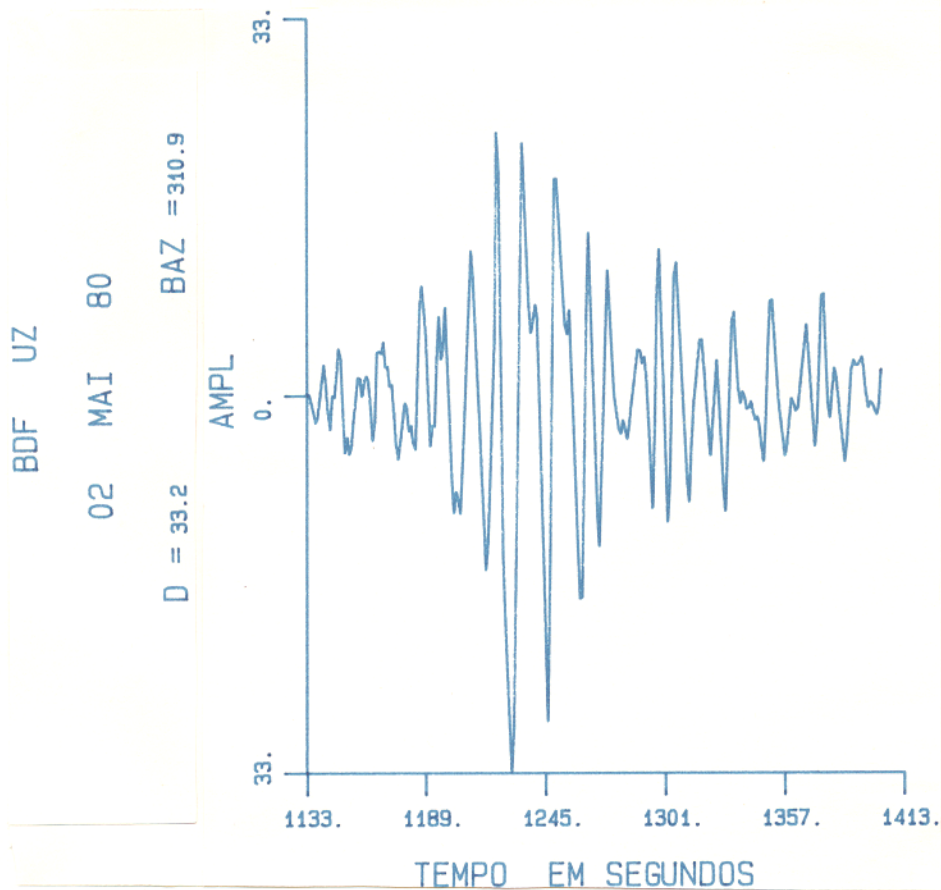
(a)

Trajectoria Colômbia-sudoeste a RDJ.
Ver tabela 3.



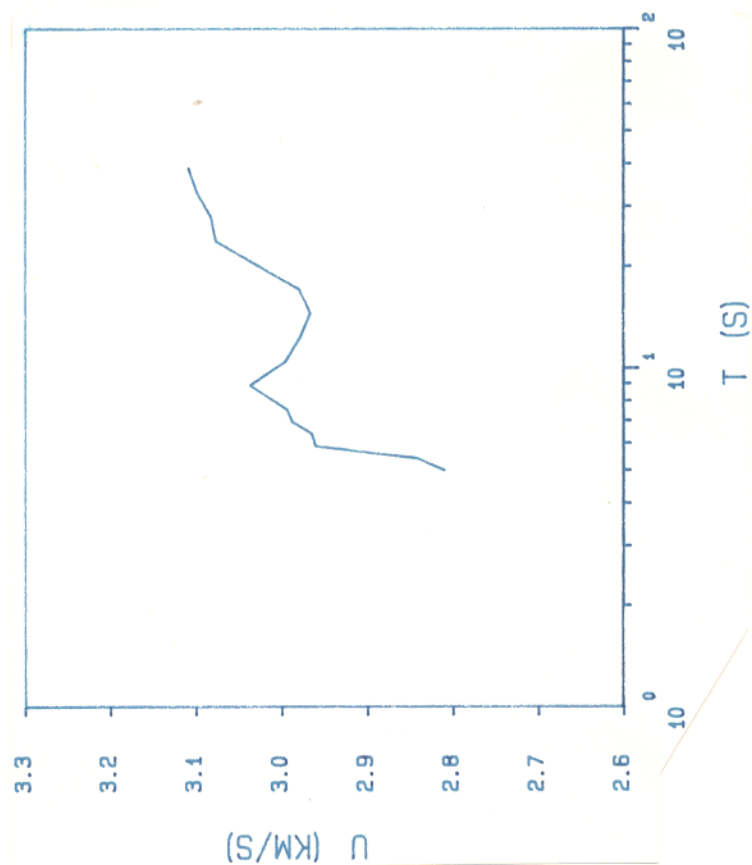
(b)

Figura 9. (a) Sismograma da componente vertical da onda de superfície observada. (b) Curva da velocidade de grupo vs. período para o harmônico fundamental da onda de Rayleigh.



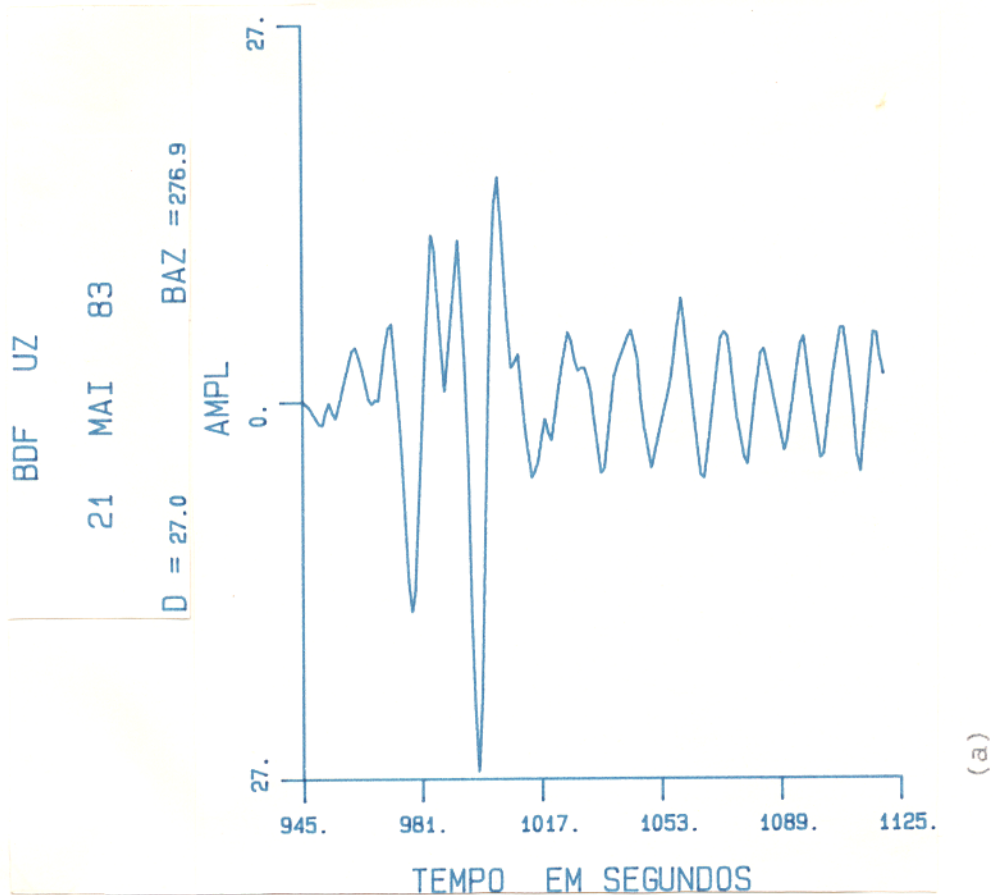
(a)

Trajectoria Colômbia-nordeste a BDF.
Ver tabela 4.



(b)

Figura 10. (a) Sismograma da componente vertical da onda de superfície observada. (b) Curva da velocidade de grupo vs. período para o harmônico fundamental da onda de Rayleigh.



Trajectoria Peru-centro a BDF.
Ver tabela 4.

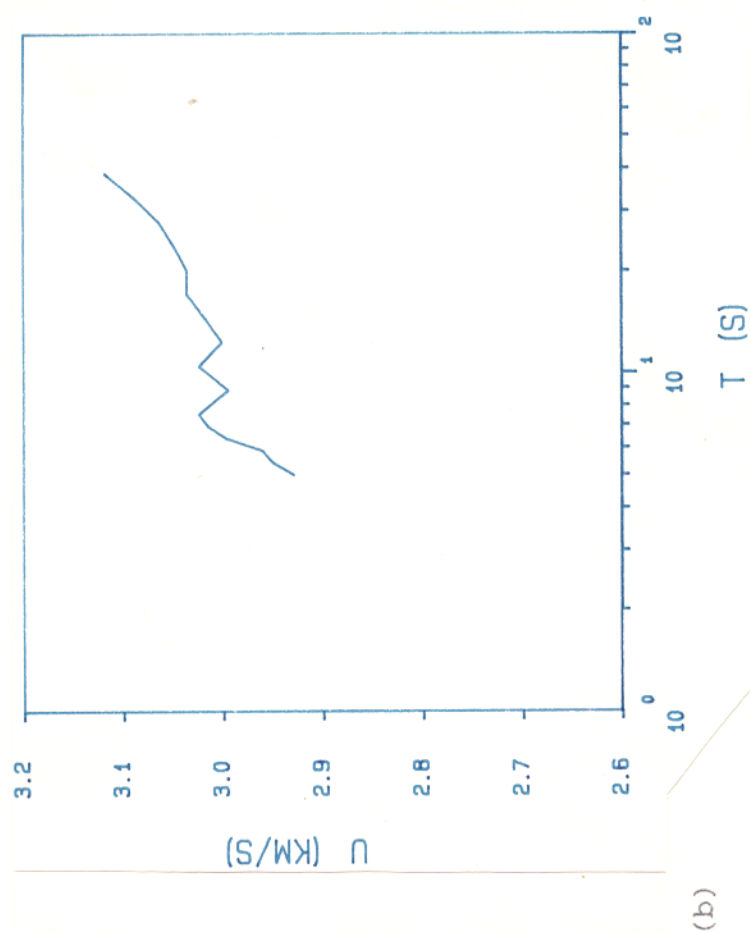


Figura 11. (a) Sismograma da componente vertical da onda de superfície observada. (b) Curva da velocidade de grupo vs. período para o harmônico fundamental da onda de Rayleigh.

Tabela 03 - Velocidade de grupo vs. período para a onda de Rayleigh.

Período T (s)	Colombia-Nordeste a RDJ		Colombia-sudoeste a BDF		Colombia-Sudoeste a BDF		Colombia-Sudoeste a RDJ	
	U (km/s)	σ (km/s)	U (km/s)	σ (km/s)	19U (km/s)	σ (km/s)	U (km/s)	σ (km/s)
1	-	-	-	-	3.261	-	-	-
5	-	-	2.984	0.026	3.829	-	-	-
6	2.938	0.098	2.985	0.027	3.297	-	2.782	-
7	3.026	0.042	2.986	0.007	3.327	-	2.888	-
8	3.029	0.049	2.988	0.053	3.355	-	2.889	-
9	2.045	0.051	2.989	0.074	3.392	-	2.897	-
10	3.082	0.05	2.989	0.071	3.452	-	2.911	-
12	3.071	0.059	2.997	0.093	3.459	-	2.903	-
14	3.06	0.05	2.993	0.008	-	-	2.886	-
16	3.042	0.053	2.968	0.073	-	-	2.852	-
18	3.037	0.053	2.954	0.072	-	-	2.847	-
20	3.042	0.051	2.964	0.089	-	-	2.857	-
22	3.053	0.047	2.986	0.135	-	-	2.870	-
24	3.08	0.062	3.030	0.140	-	-	2.894	-
26	3.119	0.093	3.155	0.158	-	-	2.935	-
28	3.126	0.100	3.181	0.078	-	-	3.029	-
33	3.127	0.074	3.181	0.059	-	-	3.114	-
35	3.129	0.076	3.270	0.091	-	-	3.205	-
40	3.134	0.096	3.295	0.082	-	-	3.158	-
45	3.158	0.144	3.330	0.071	-	-	-	-
50	-	-	-	-	-	-	-	-

U (km/s) - (velocidade de grupo; σ (km/s) - (desvio padrão.

7 segundos, um patamar entre 7 e 18 segundos (3.0 km/s) e ascendente para períodos maiores que 18 segundos.

A trajetória Peru-sul a RDJ (fig.12, fig.30j) mostra uma curva de dispersão descendente para períodos menores que 7 segundos, um patamar entre 7 e 18 segundos (2.83 km/s) e ascendente para períodos maiores que 18 segundos.

A trajetória Peru-norte a RDJ (fig.13, fig.30k) mostra uma curva de dispersão descendente para períodos menores que 10 segundos, um patamar entre 10 e 18 segundos (2.82 km/s) e ascendente para períodos maiores que 18 segundos.

A trajetória Peru-sul a BDF (fig.14, fig.30l) mostra uma curva de dispersão descendente para períodos menores que 8 segundos e um patamar entre 8 e 20 segundos (2.88 km/s) e ascendente para períodos maiores que 20 segundos.

A trajetória Venezuela-noroeste a RDJ (fig.15, fig.32m) mostra uma curva de dispersão com valores descendente para períodos menores que 7 segundos, um máximo e um mínimo entre 7 e 18 segundos e ascendente para períodos maiores que 20 segundos.

A trajetória Venezuela-Colômbia a RDJ (fig.16, fig.30n) mostra uma curva de dispersão descendente para períodos menores que 14 segundos, um patamar entre 14 e 28 segundos (3.0 km/s) e ascendente para períodos maiores que 28 segundos.

A trajetória Chile-centro a BEB (fig.17, fig.32o) mostra uma curva de dispersão descendente para períodos menores que 10 segundos, um máximo e um mínimo entre 10 e 20 segundos e ascendente para períodos maiores que 20 segundos.

A trajetória Chile-sul a BDF (fig.18, fig.31p) mostra uma curva de dispersão ascendente contínua.

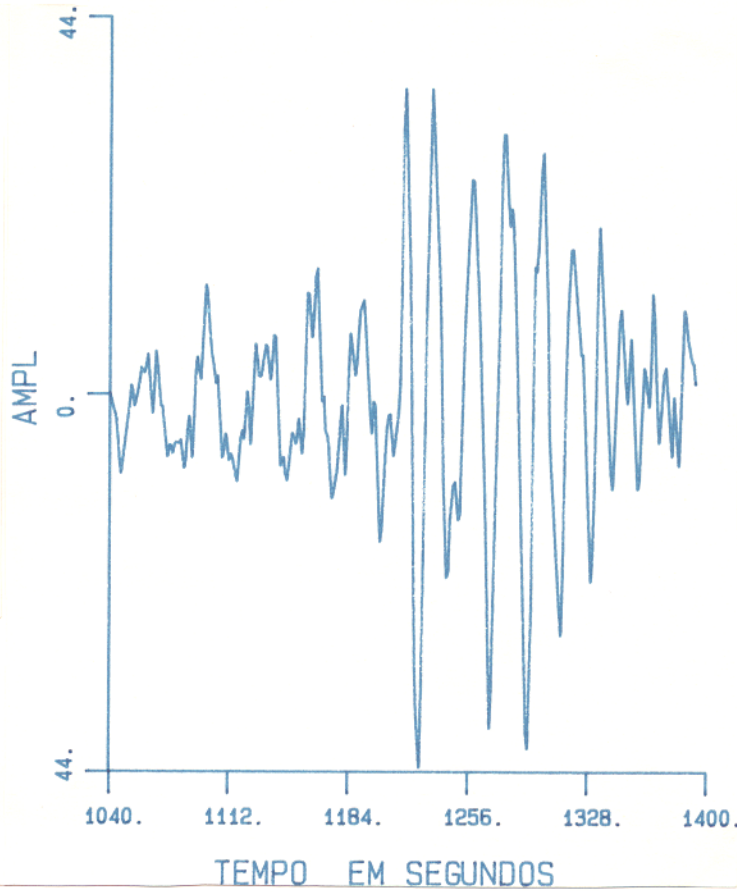
A trajetória Chile-sul a RDJ (fig.19, fig.30q) mostra uma curva de dispersão descendente para períodos menores que 8

RDJ UZ

18 ABR 81

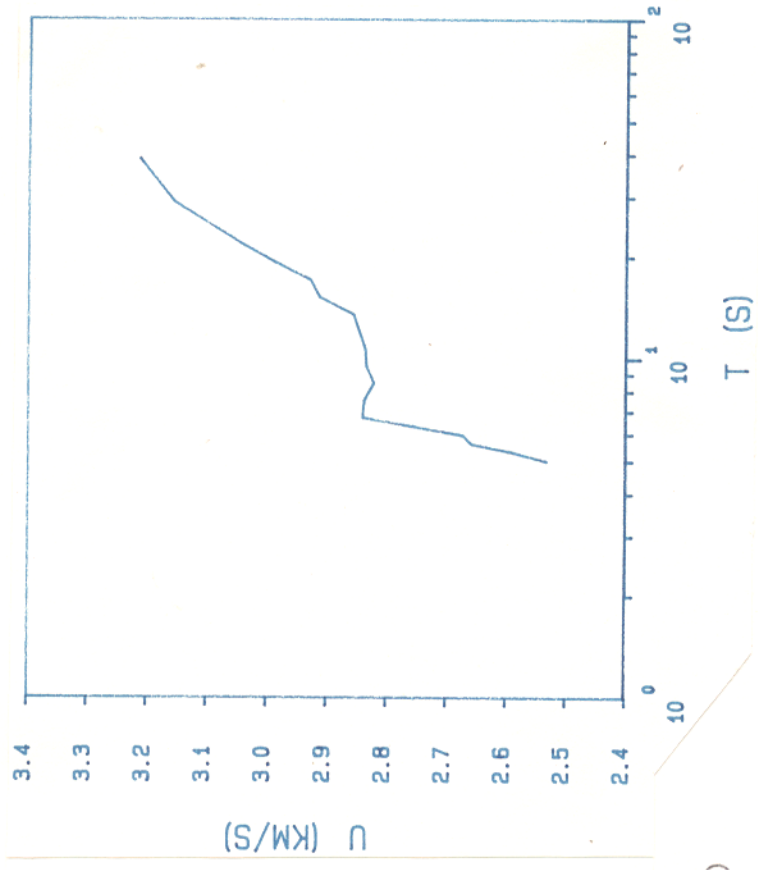
D = 31.1

BAZ = 282.1



(a)

Trajetória Peru-sul a RDJ.
Ver tabela 4.



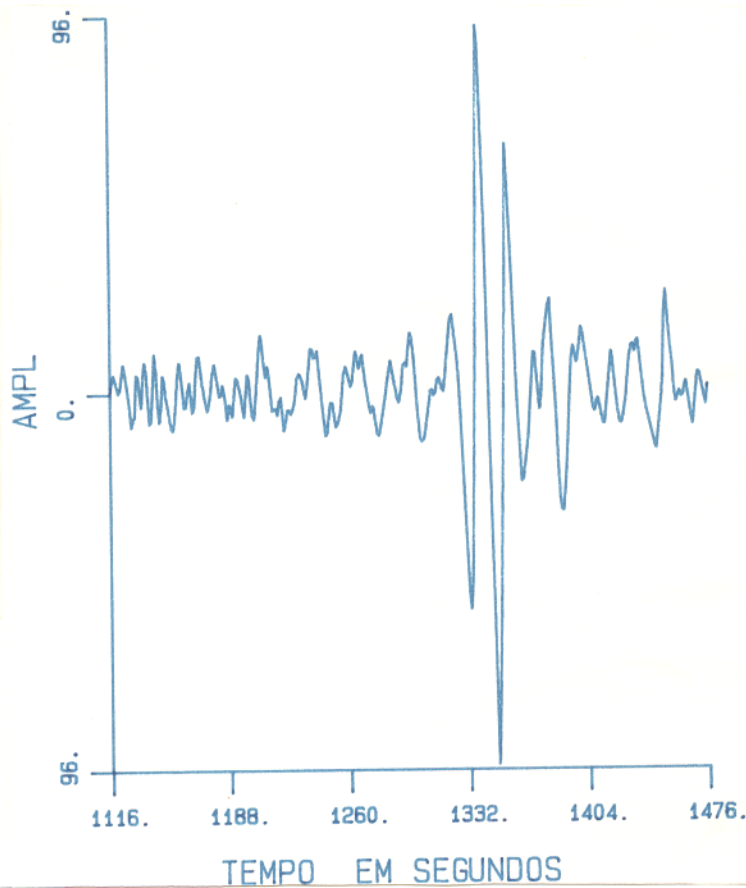
(b)

Figura 12. (a) Sismograma da componente vertical da onda de superfície observada. (b) Curva da velocidade de grupo vs. período para o harmônico fundamental da onda de Rayleigh.

RDJ UZ

05 JUN 84

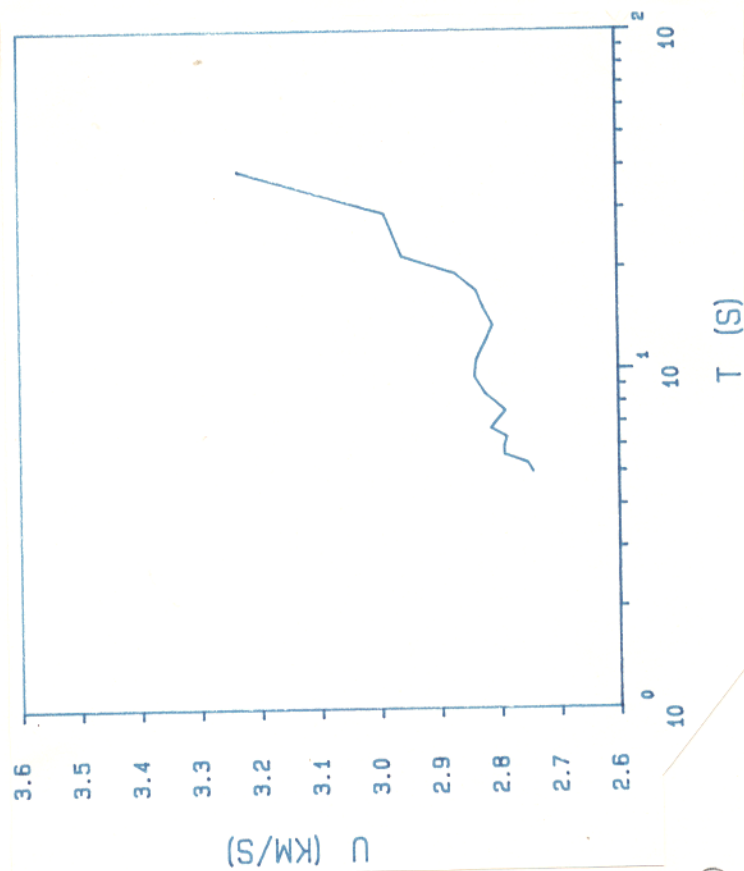
D = 35.4 BAZ = 289.1



(a)

Trajectoria Peru-norte a RDJ.

Ver tabela 4.



(b)

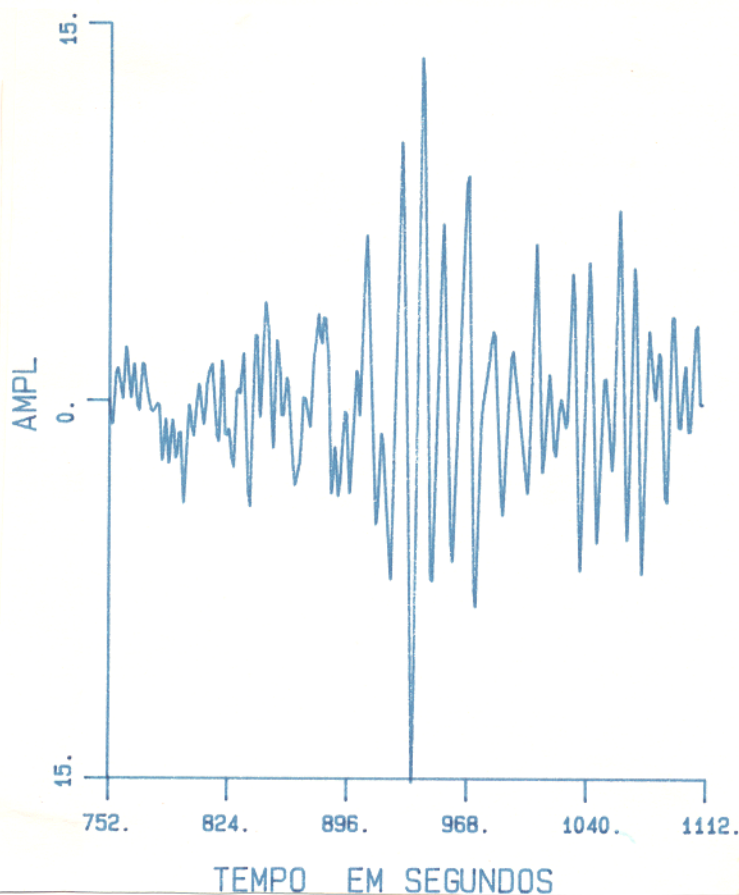
Figura 13. (a) Sismograma da componente vertical da onda de superfície observada. (b) Curva da velocidade de grupo vs. período para o harmônico fundamental da onda de Rayleigh.

BDF UZ

05 ABR 86

D = 23.6

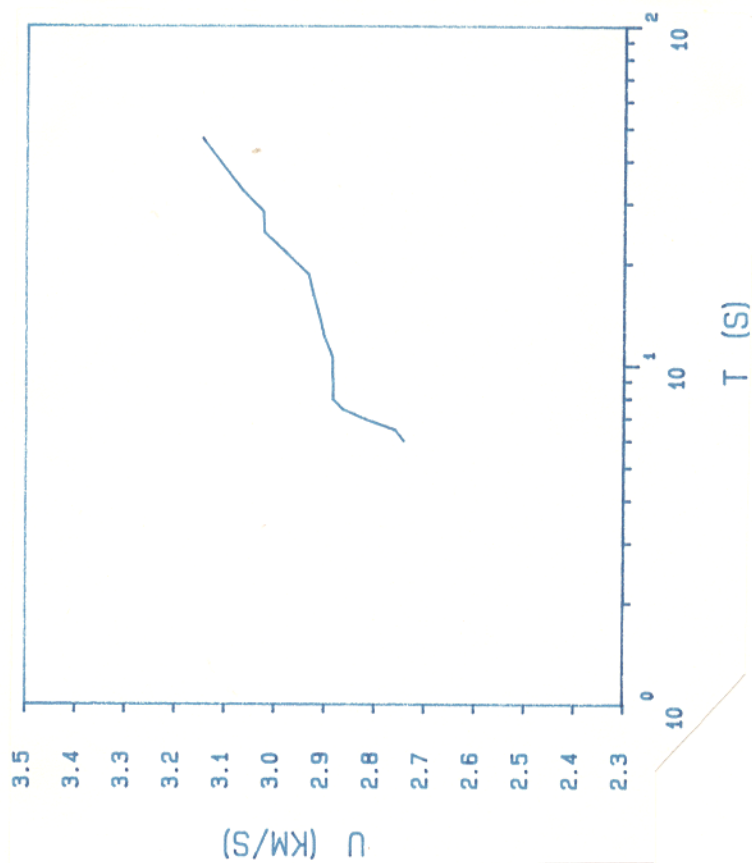
BAZ = 271.7



(a)

Trajectoria Peru-sul a BDF.

Ver tabela 5.



(b)

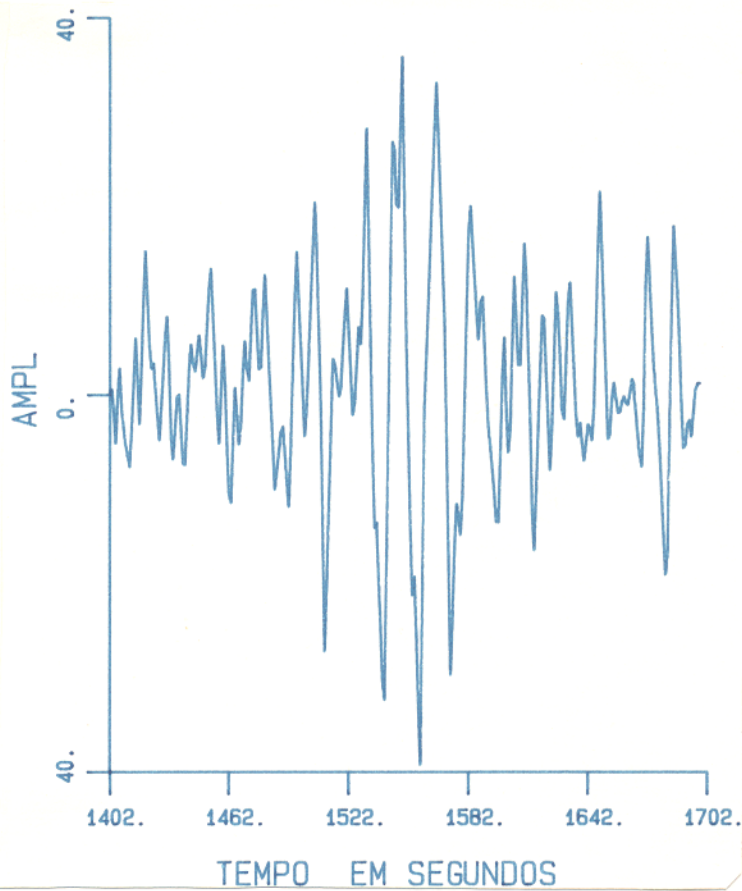
Figura 14. (a) Sismograma da componente vertical da onda de superfície observada. (b) Curva da velocidade de grupo vs. período para o harmônico fundamental da onda de Rayleigh.

RDJ UZ

18 JUL 86

D = 41.9

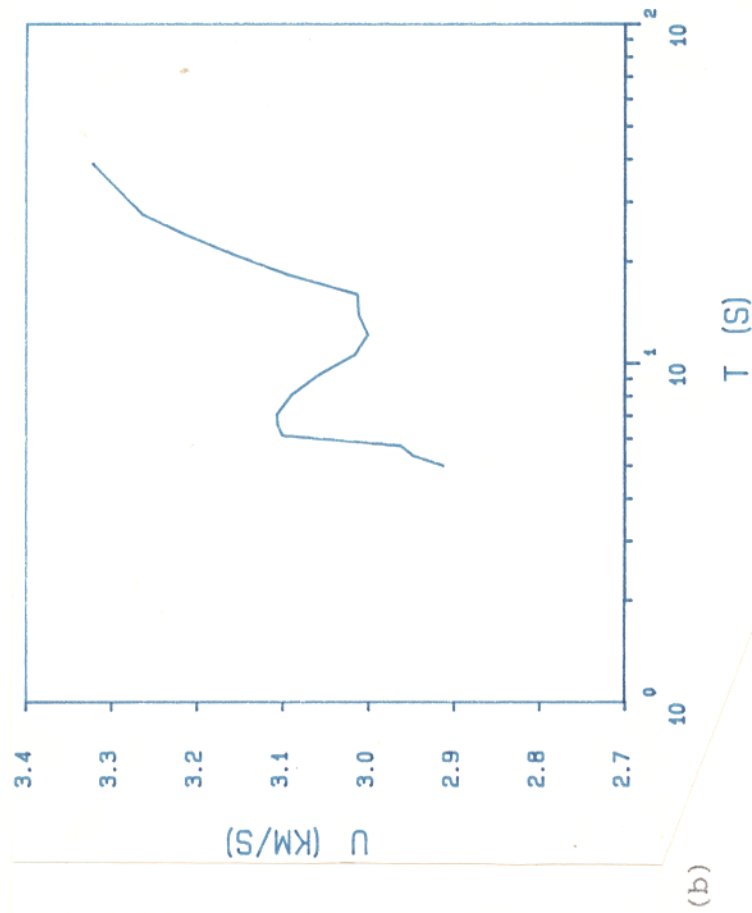
BAZ = 319.4



(a)

Trajectoria Venezuela-noroeste a RDJ.

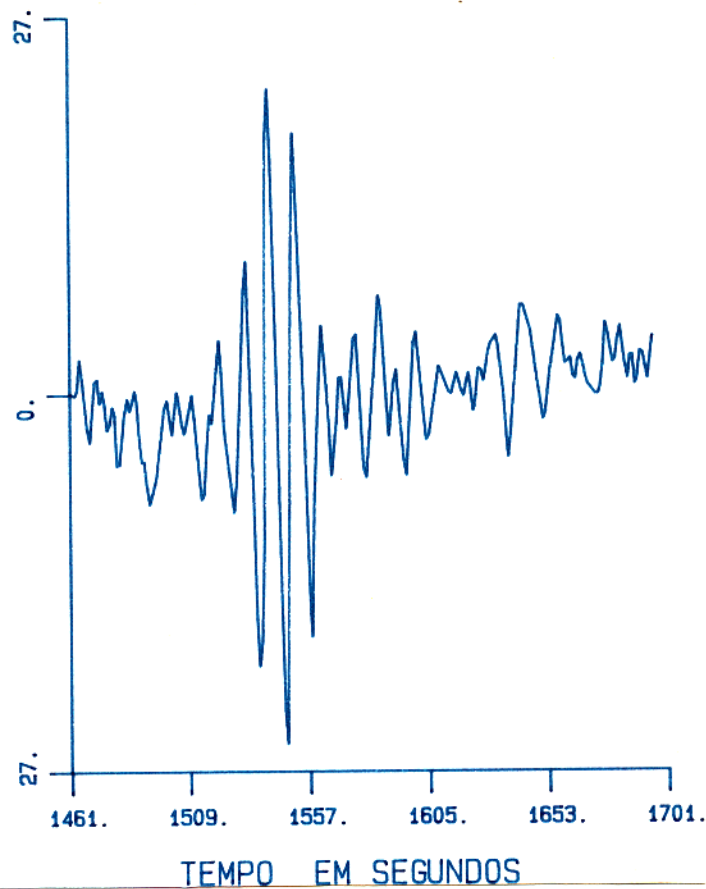
Ver tabela 5.



(b)

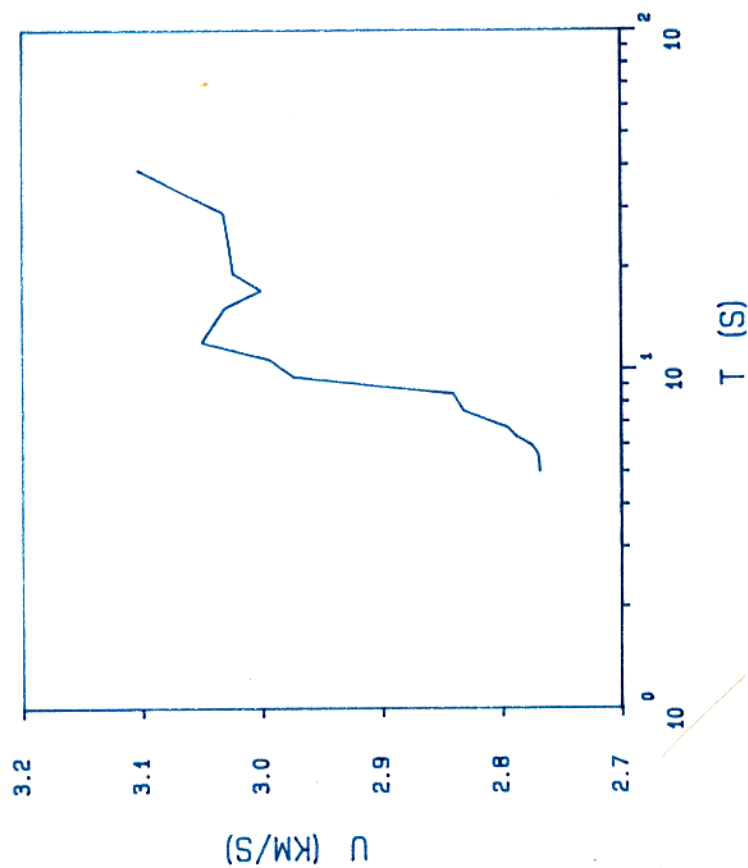
Figura 15. (a) Sismograma da componente vertical da onda de superfície observada. (b) Curva da velocidade de grupo vs. período para o harmônico fundamental da onda de Rayleigh.

RDJ UZ
26 NOV 80
D = 41.8 BAZ = 313.3
AMPL



(a)

Trajetória Venezuela-Colômbia a RDJ.
Ver tabela 5.



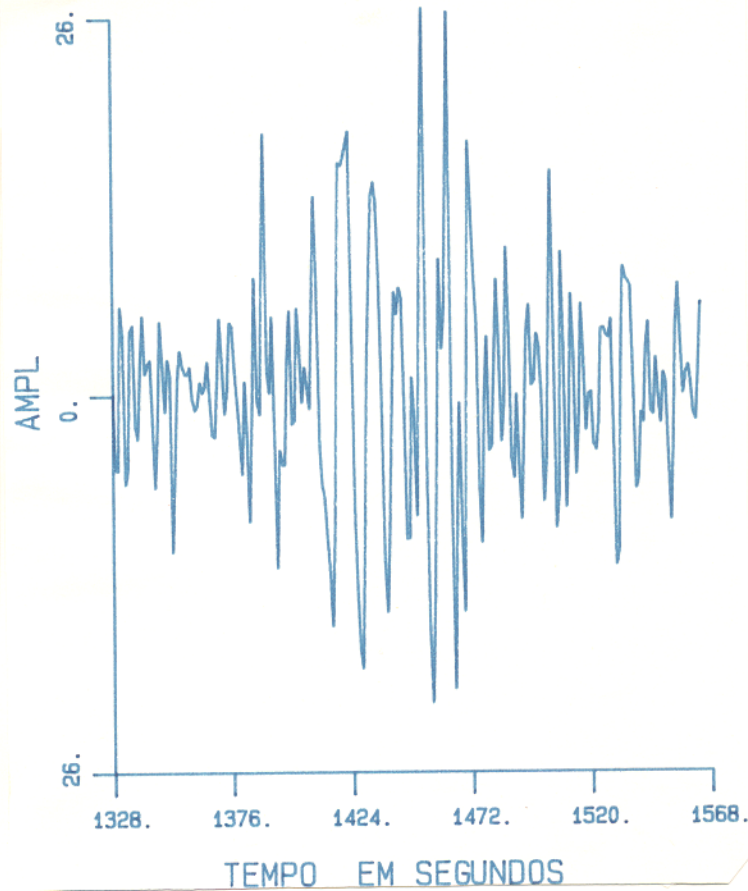
(b)

Figura 16. (a) Sismograma da componente vertical da onda de superfície observada. (b) Curva da velocidade de grupo vs. período para o harmônico fundamental da onda de Rayleigh.

BEB UZ

27 JAN 87

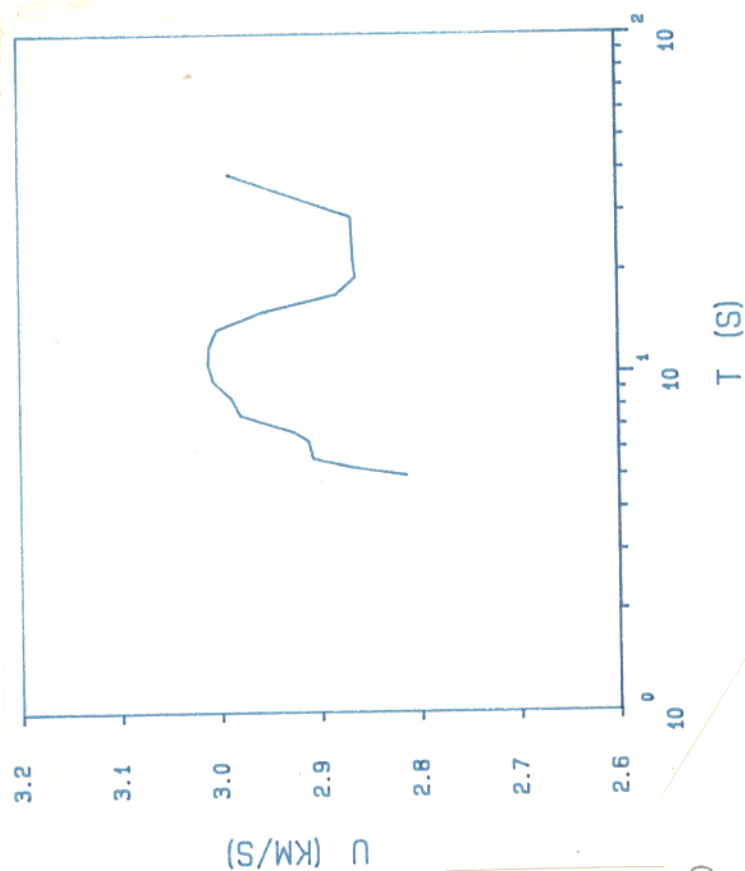
D = 38.1 BAZ = 213.8



(a)

Trajetória Chile-centro a BEB.

Ver tabela 5.



(b)

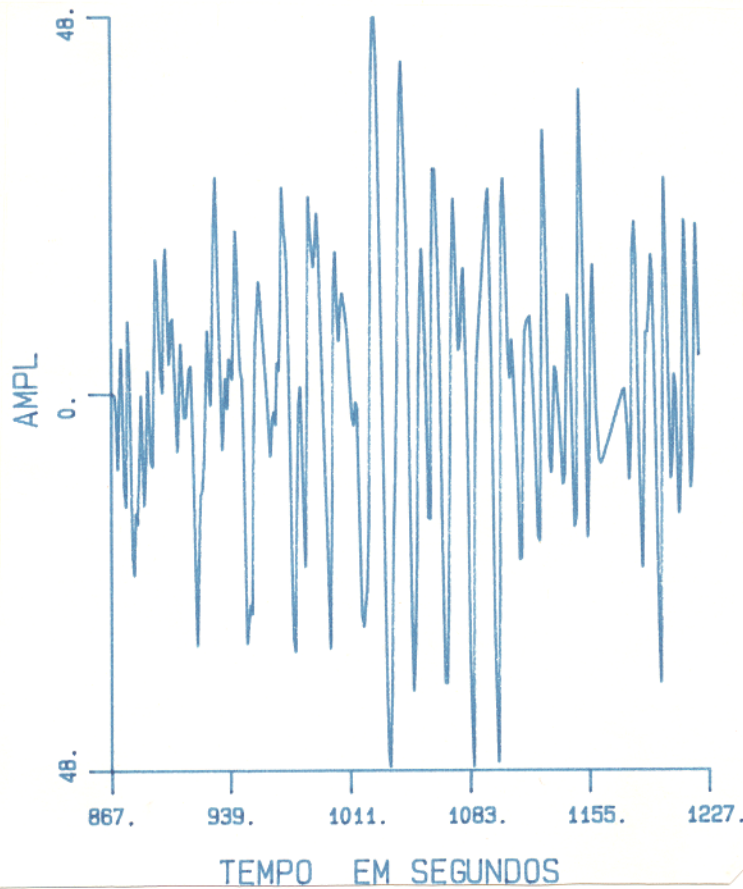
Figura 17. (a) Sismograma da componente vertical da onda de superfície observada. (b) Curva da velocidade de grupo vs. período para o harmônico fundamental da onda de Rayleigh.

BDF UZ

15 DEZ 83

D = 27.0

BAZ = 225.2



Trajetória Chile-sul a BDF.
Ver tabela 6.

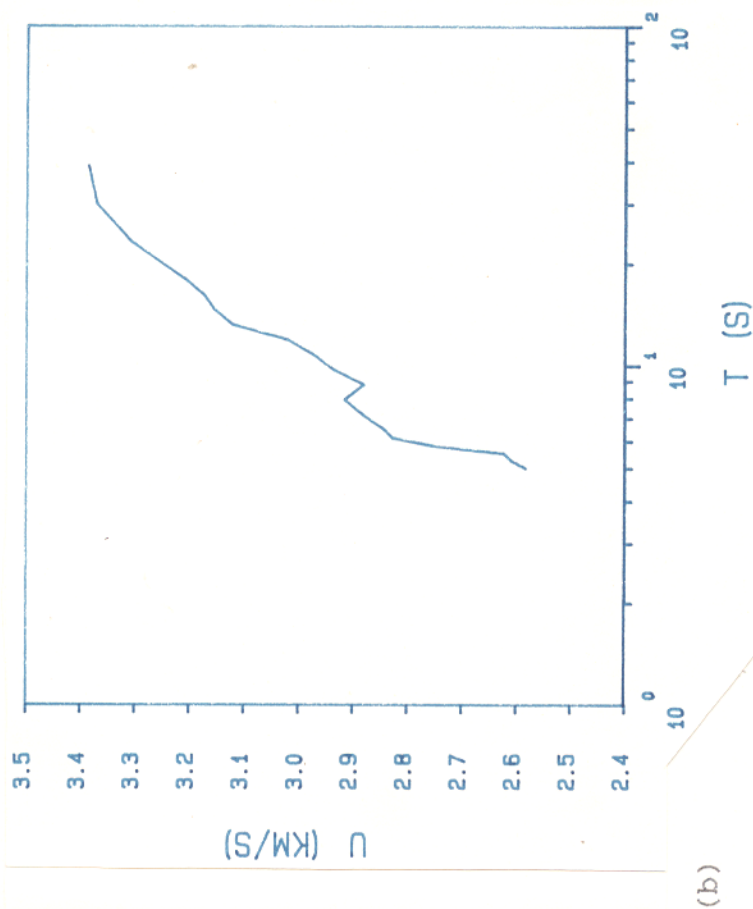
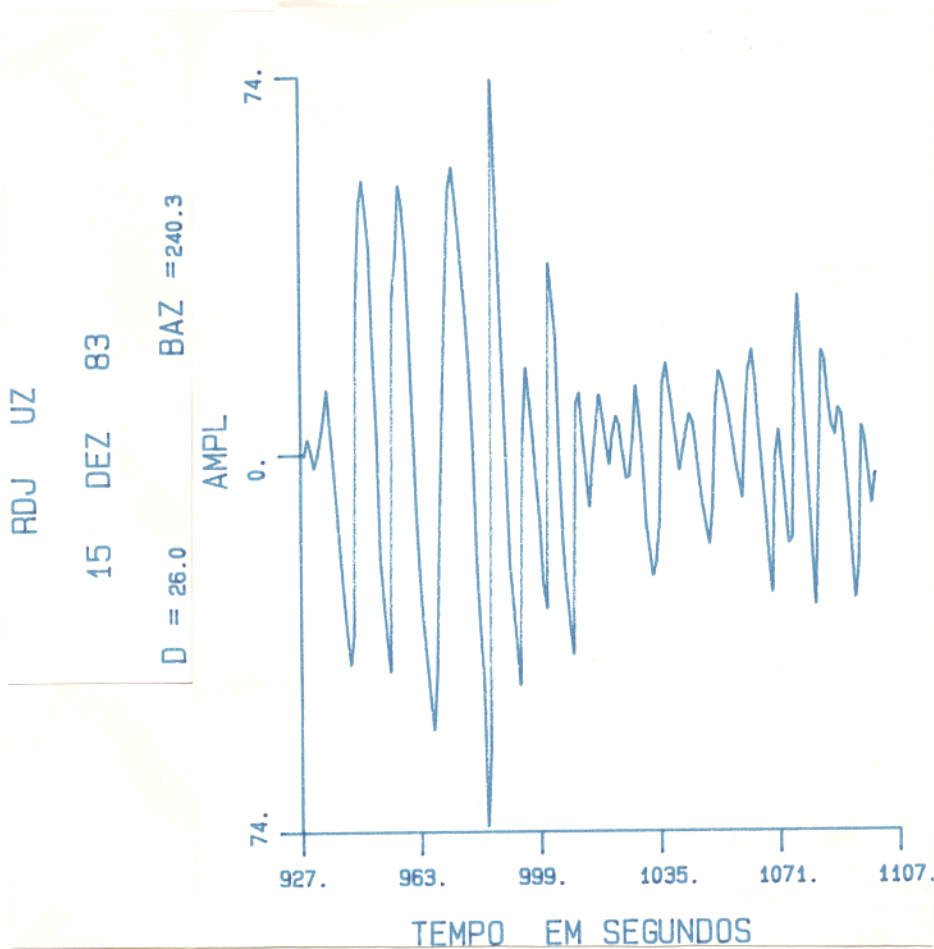


Figura 18. (a) Sismograma da componente vertical da onda de superfície observada. (b) Curva da velocidade de grupo vs. período para o harmônico fundamental da onda de Rayleigh.



Trajectoria Chile-sul a RDJ.
Ver tabela 6.

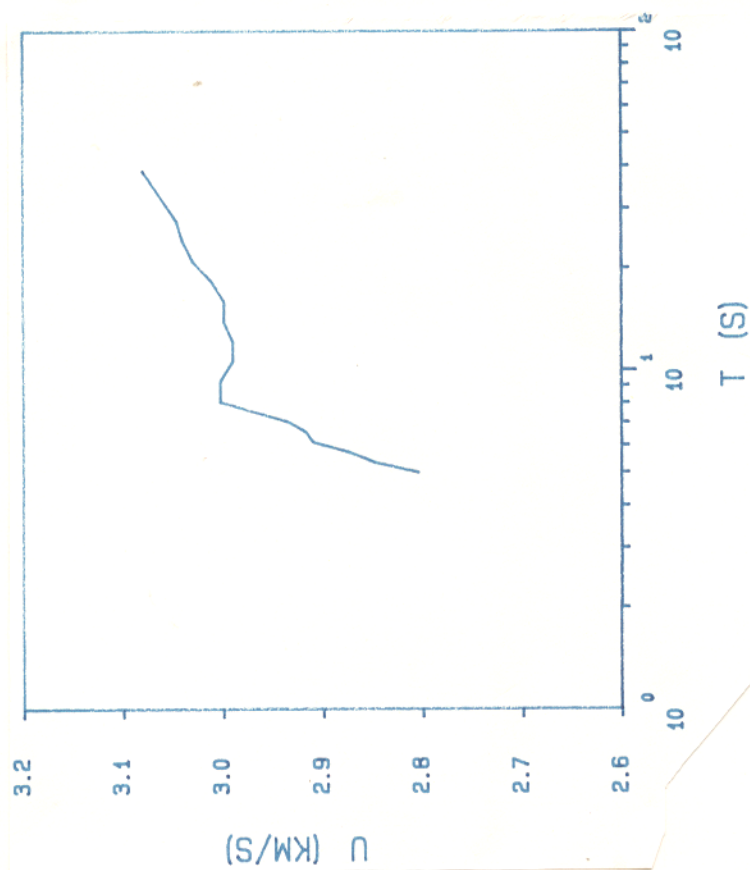


Figura 19. (a) Sismograma da componente vertical da onda de superfície observada. (b) Curva da velocidade de grupo vs. período para o harmônico fundamental da onda de Rayleigh.

Tabela 04 - Velocidade de grupo vs. período para a onda de Rayleigh.

Período T (s)	Colômbia-Nordeste a BDF		Perú-Centro a BDF		Perú-Sul a RDJ		Perú-Norte a BDJ	
	U (km/s)	σ (km/s)	U (km/s)	σ (km/s)	U (km/s)	σ (km/s)	U (km/s)	σ (km/s)
4	-	-	-	-	-	-	-	-
5	2.810	-	2.929	-	2.532	-	-	-
6	2.843	-	2.950	-	2.587	-	2.743	0.091
7	2.961	-	2.961	-	2.659	-	2.753	0.097
8	2.965	-	2.997	-	2.673	-	2.792	0.132
9	2.988	-	3.015	-	2.756	-	2.786	0.133
10	2.994	-	3.024	-	2.841	-	2.814	0.144
12	3.037	-	2.994	-	2.837	-	2.788	0.116
14	2.995	-	3.024	-	2.821	-	2.823	0.151
16	2.978	-	3.00	-	2.835	-	2.841	0.154
18	2.966	-	3.018	-	2.837	-	2.836	0.147
20	2.980	-	3.036	-	2.847	-	2.821	0.138
22	3.027	-	3.036	-	2.857	-	2.808	0.130
24	3.077	-	3.049	-	2.914	-	2.825	0.127
26	3.083	-	3.064	-	2.929	-	2.837	0.147
28	3.099	-	3.089	-	2.987	-	2.872	0.202
33	3.109	-	3.118	-	3.039	-	2.960	0.174
35	-	-	-	-	3.156	-	2.989	0.209
40	-	-	-	-	3.219	-	3.233	0.156
45	-	-	-	-	-	-	-	-
50	-	-	-	-	-	-	-	-

U (km/s) - velocidade de grupo; σ (km/s) - desvio padrão.

Tabela 05 - Velocidade de grupo vs. período para a onda de Rayleigh.

Período T (s)	Peru-Sul a BDF		Venezuela-Noroeste a RDJ		Venezuela-Colômbia a RDJ		Chile-Centro a BEB	
	U (km/s)	σ (km/s)	U (km/s)	σ (km/s)	U (km/s)	σ (km/s)	U (km/s)	σ (km/s)
4	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	2.912	-	2.768	-	2.813	-
6	2.741	0.207	2.948	-	2.769	-	2.810	-
7	2.759	0.188	2.963	-	2.770	-	2.907	-
8	2.816	0.123	3.101	-	2.775	-	2.909	-
9	2.864	0.088	3.106	-	2.788	-	2.911	-
10	2.885	0.085	3.107	-	2.795	-	2.925	-
12	2.884	0.093	3.089	-	2.832	-	2.979	-
14	2.885	0.07	3.057	-	2.841	-	2.988	-
16	2.902	0.057	3.015	-	2.974	-	3.006	-
18	2.912	0.068	3.000	-	2.994	-	3.011	-
20	2.924	0.082	3.012	-	3.050	-	3.009	-
22	2.934	0.058	3.013	-	3.040	-	3.001	-
24	2.978	0.034	3.095	-	3.038	-	2.956	-
26	3.023	0.059	3.158	-	3.026	-	2.881	-
28	3.025	0.057	3.215	-	3.024	-	2.862	-
33	3.067	0.089	3.264	-	3.026	-	2.865	-
35	3.147	0.117	3.322	-	3.032	-	2.867	-
40	-	-	-	-	3.103	-	2.989	-
45	-	-	-	-	-	-	-	-
50	-	-	-	-	-	-	-	-

U (km/s) - velocidade de grupo; σ (km/s) - desvio padrão.

segundos, um patamar entre 8 e 20 segundos de (3.0 km/s) e ascendente para períodos maiores que 20 segundos.

A trajetória Chile-centro a BDF (fig.20, fig.31r) mostra uma curva de dispersão ascendente contínua.

A trajetória Chile-Centro a RDJ (fig.21, fig.30s) mostra uma curva de dispersão descendente para períodos menores que 8 segundos, um patamar entre 8 e 14 segundos (2.94 km/s) e ascendente para períodos maiores que 14 segundos.

A trajetória Chile-norte a BDF (fig.22, fig.31t) mostra uma curva de dispersão ascendente contínua.

A trajetória Brasil-nordeste a BDF (fig.23, fig.30u) mostra uma curva de dispersão descendente para períodos menores que 7 segundos, um patamar entre 7 e 12 segundos (2.8 km/s) e ascendente para períodos maiores que 14 segundos.

A trajetória Venezuela-noroeste a BDF (fig.24, fig.32v) mostra uma curva de dispersão descendente para períodos menores que 6 segundos, um máximo e um mínimo entre 7 e 14 segundos e ascendente para períodos maiores que 14 segundos.

A trajetória Bolívia-centro a BDF (fig.25, fig.31x) mostra uma curva de dispersão ascendente contínua.

A trajetória Bolívia-centro a RDJ (fig.26, fig.31y) mostra uma curva de dispersão ascendente contínua.

A trajetória Paraguai-centro a BDF (fig.27, fig.31z) mostra uma curva de dispersão ascendente contínua.

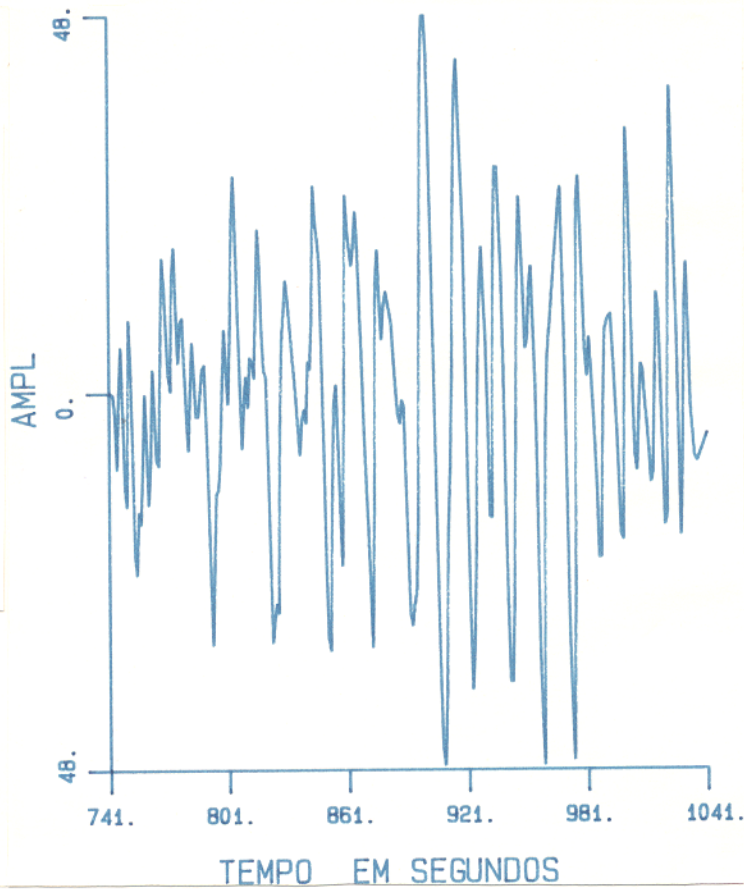
A trajetória Argentina-norte a BDF (fig.28, fig.31w) mostra uma curva de dispersão ascendente contínua.

A trajetória Argentina-norte a RDJ (fig.29, fig.30wj) mostra uma curva de dispersão descendente para períodos menores que 7 segundos, um patamar entre 8 e 12 segundos (2.9 km/s) e ascendente para períodos maiores que 14 segundos.

BDF UZ

29 JAN 87

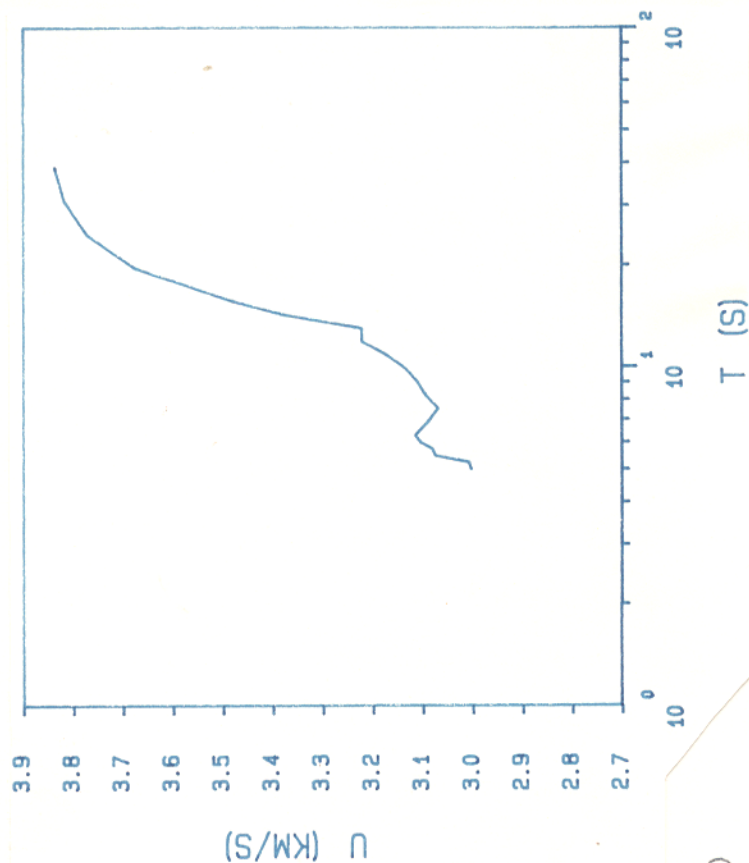
D = 26.0 BAZ = 232.7



(a)

Trajectoria Chile-centro a BDF.

Ver tabela 6.



(b)

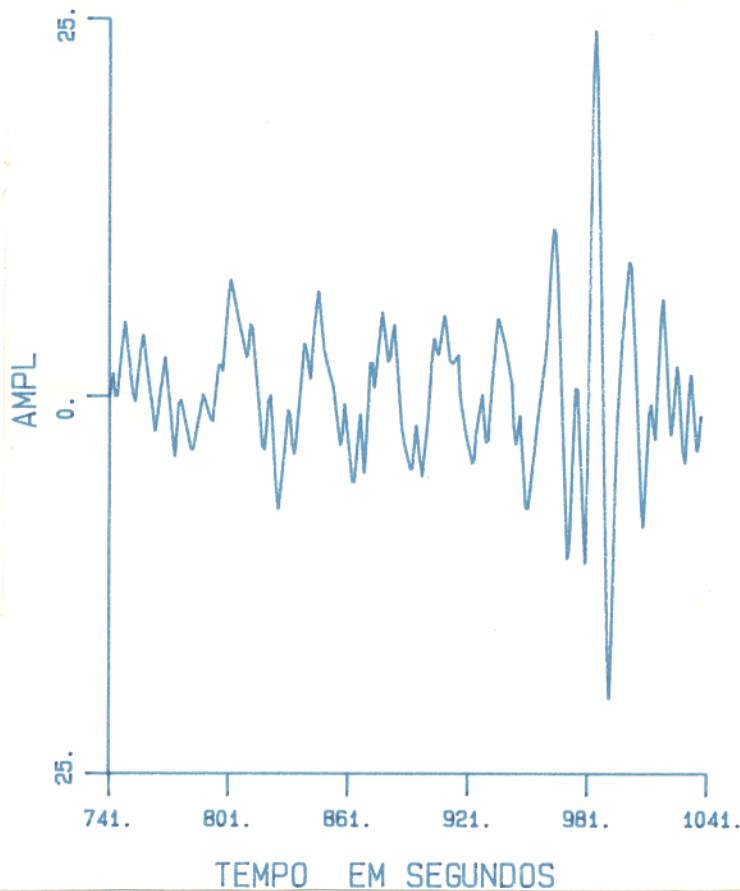
Figura 20. (a) Sismograma da componente vertical da onda de superfície observada. (b) Curva da velocidade de grupo vs. período para o harmônico fundamental da onda de Rayleigh.

RDJ UZ

29 JAN 87

D = 26.2

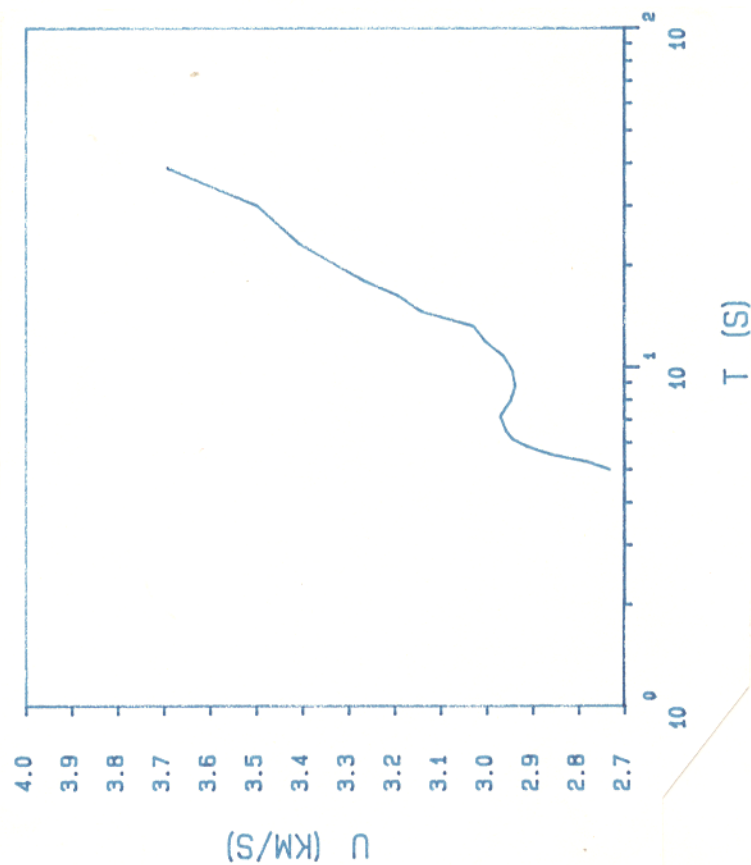
BAZ = 248.1



(a)

Trajectoria Chile-centro a RDJ.

Ver tabela 6.



(b)

Figura 21. (a) Sismograma da componente vertical da onda de superfície observada. (b) Curva da velocidade de grupo vs. período para o harmônico fundamental da onda de Rayleigh.

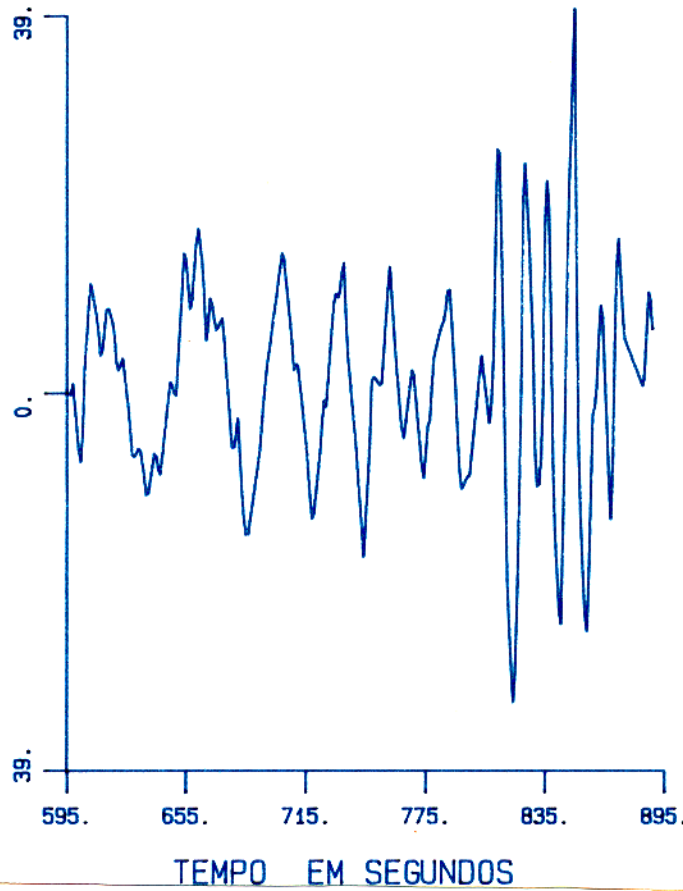
BDF UZ

19 JUN 87

D = 20.6

BAZ = 250.6

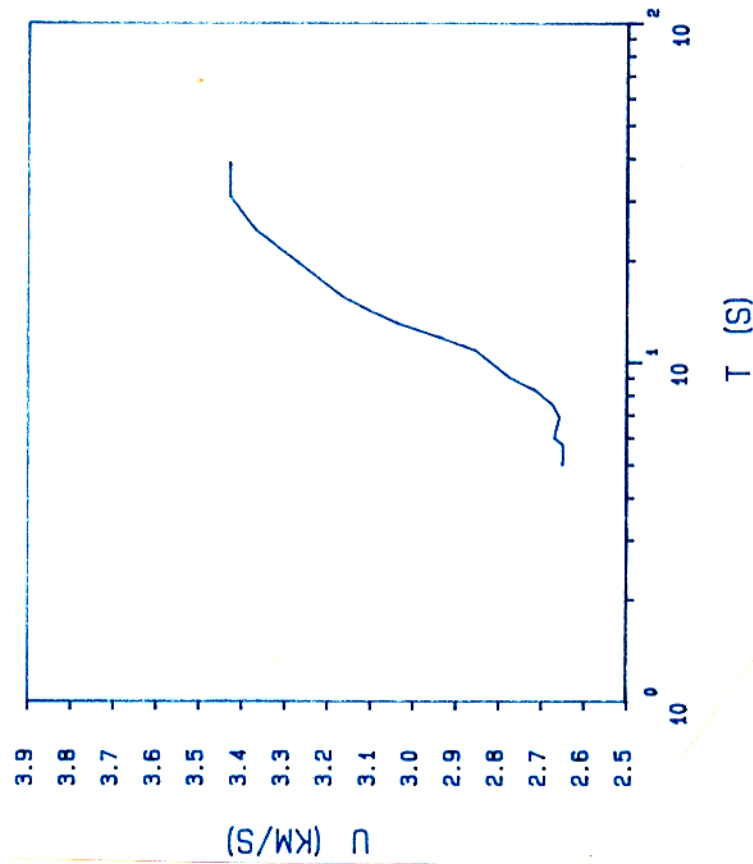
AMPL



(a)

Trajetória Chile-norte a BDF.

Ver tabela 7.



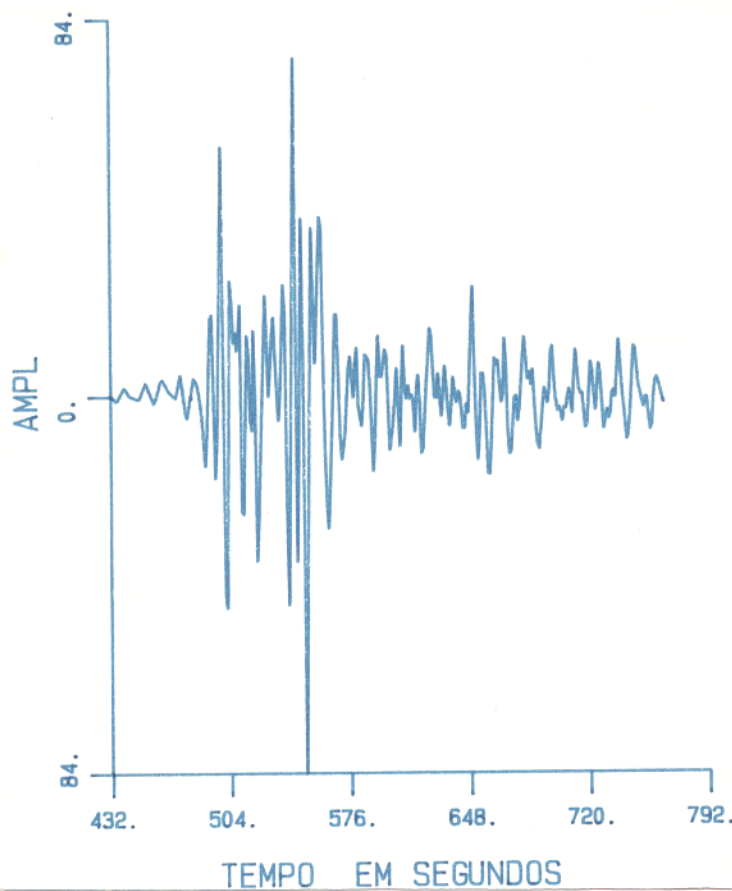
(b)

Figura 22. (a) Sismograma da componente vertical da onda de superfície observada. (b) Curva da velocidade de grupo vs. período para o harmônico fundamental da onda de Rayleigh.

BDF UZ

30 NOV 86

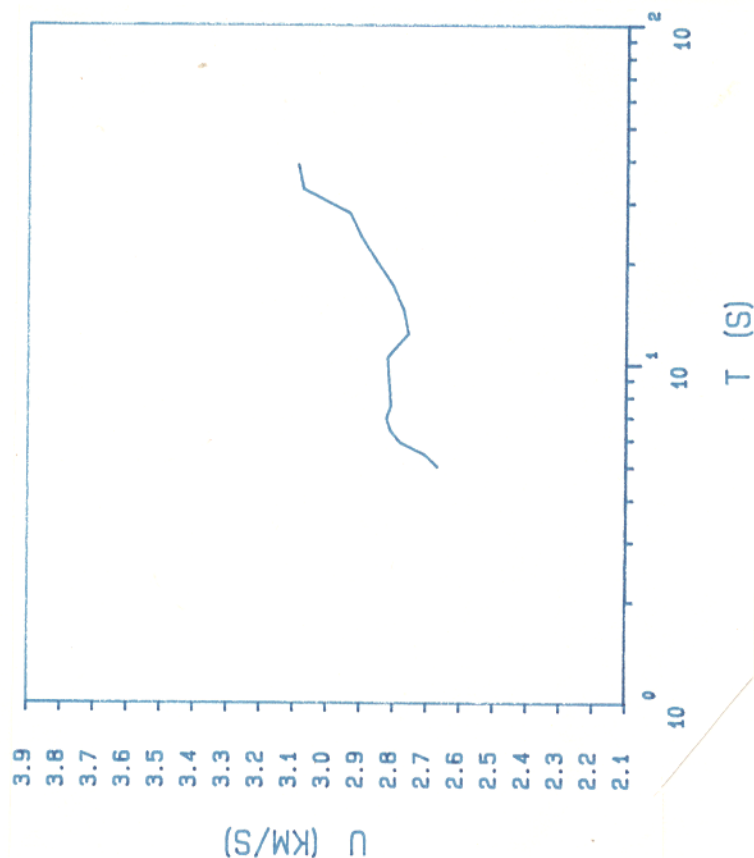
D = 15.2 BAZ = 51.1



(a)

Trajetória Brasil-nordeste a BDF.

Ver tabela 7.



(b)

Figura 23. (a) Sismograma da componente vertical da onda de superfície observada. (b) Curva da velocidade de grupo vs. período para o harmônico fundamental da onda de Rayleigh.

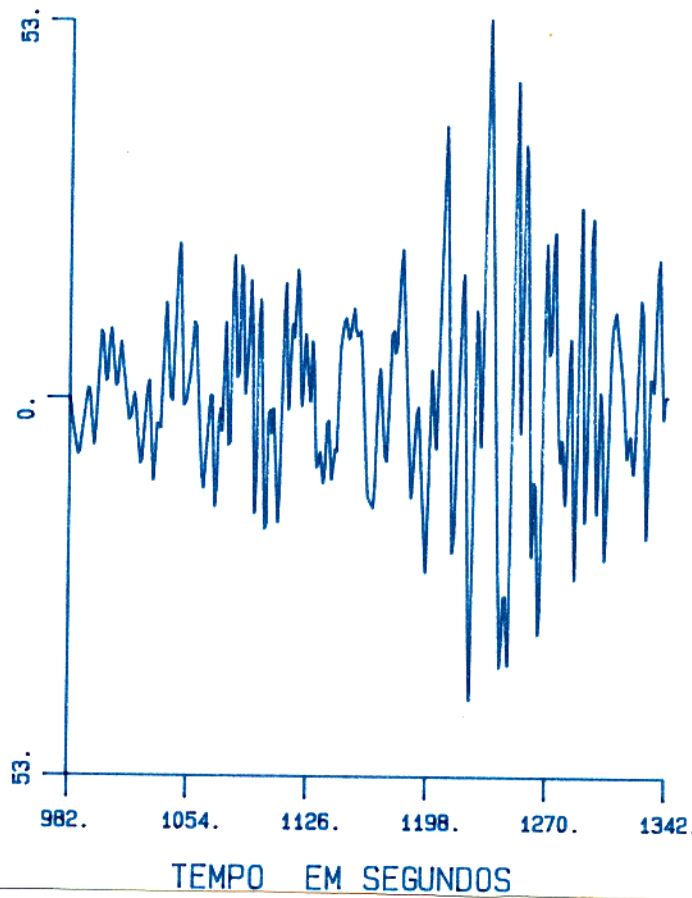
BDF UZ

18 JUL 86

D = 33.8

BAZ = 318.9

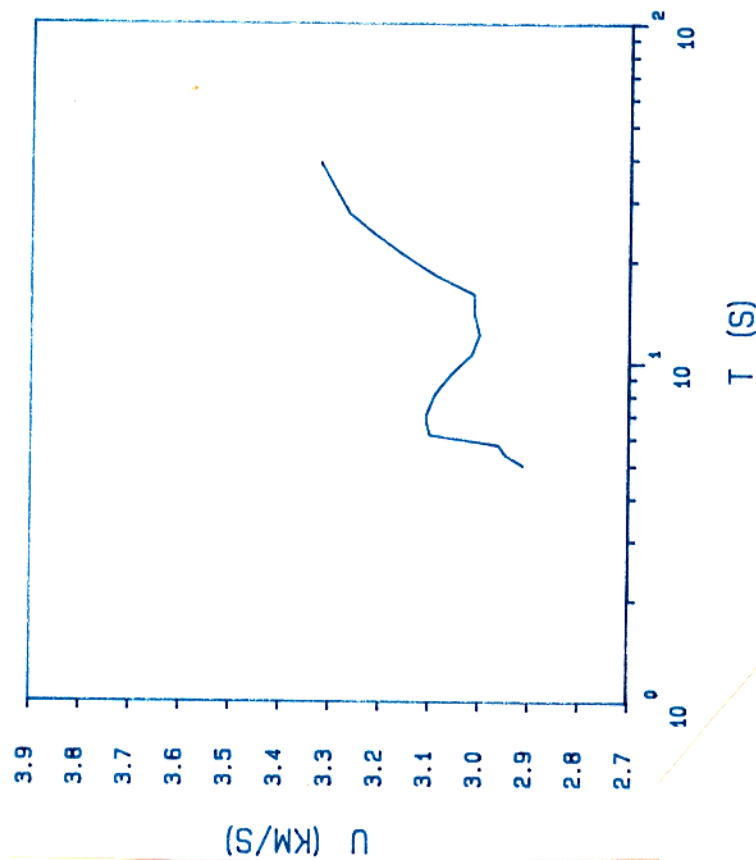
AMPL



(a)

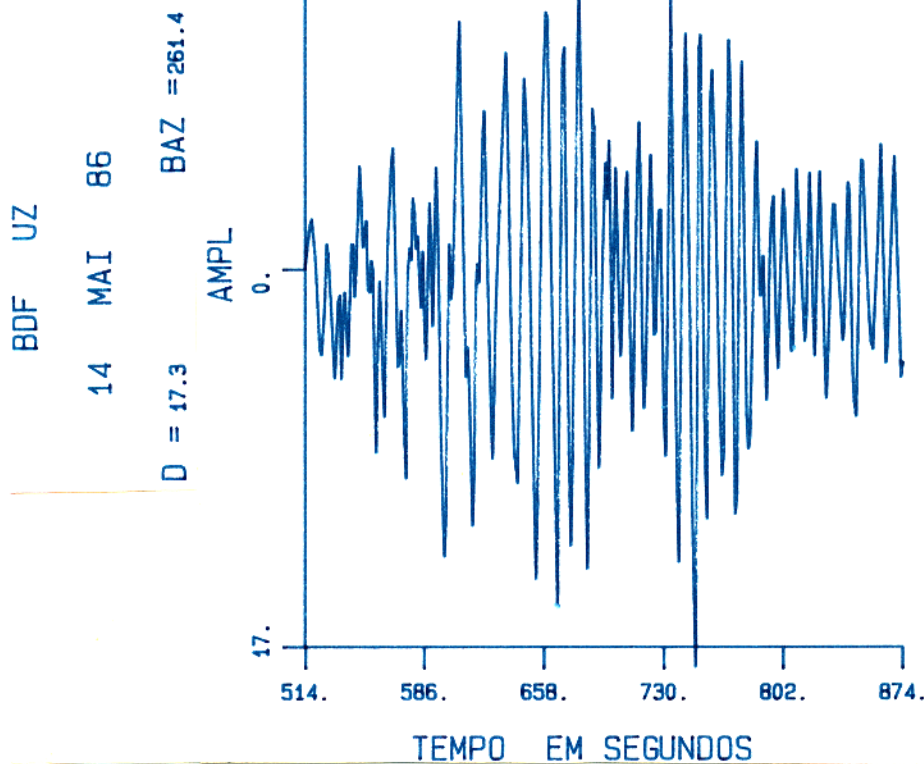
Trajectoria Venezuela-noroeste a BDF.

Ver tabela 7.



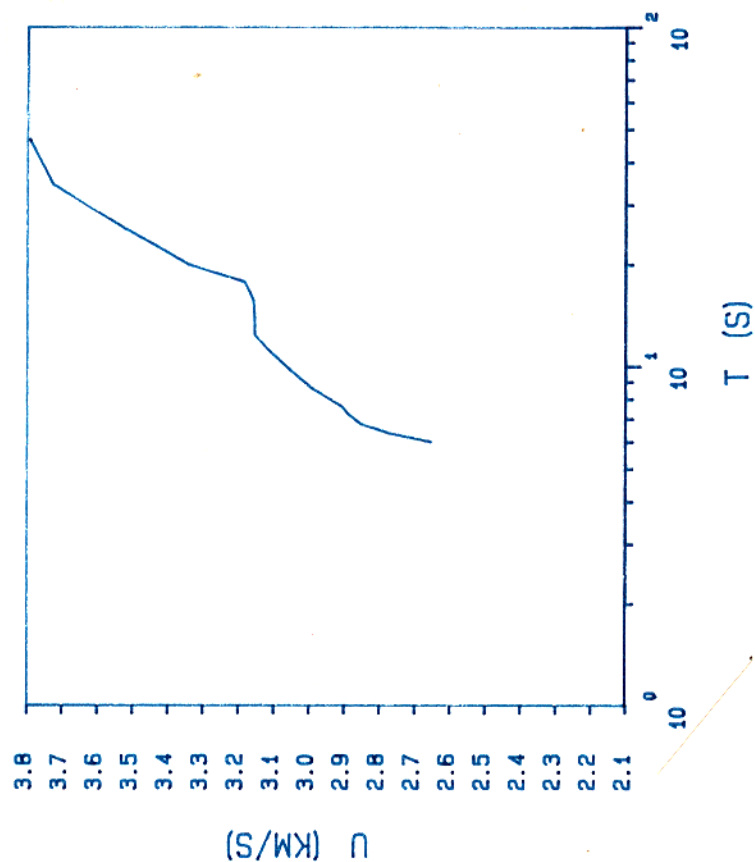
(b)

Figura 24. (a) Sismograma da componente vertical da onda de superfície observada. (b) Curva da velocidade de grupo vs. período para o harmônico fundamental da onda de Rayleigh.



(a)

Trajectoria Bolívia-centro a BDF.
Ver tabela 7.



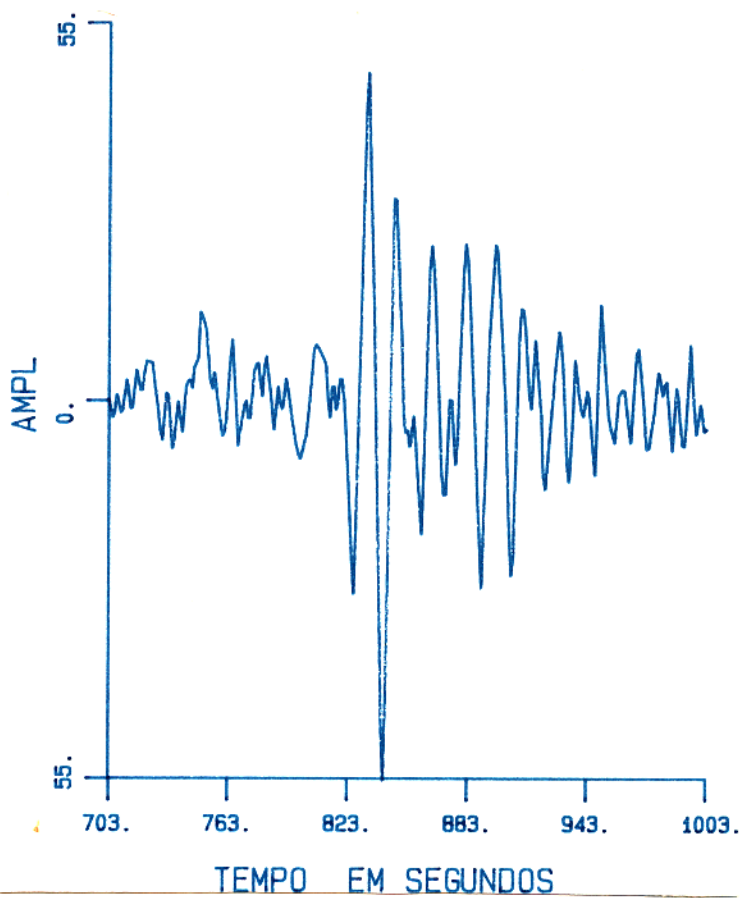
(b)

Figura 25. (a) Sismograma da componente vertical da onda de superfície observada. (b) Curva da velocidade de grupo vs. período para o harmônico fundamental da onda de Rayleigh.

RDJ UZ

19 JUN 86

D = 21.7 BAZ = 280.7



Trajectoria Bolívia-centro a DRJ.

Ver tabela 7.

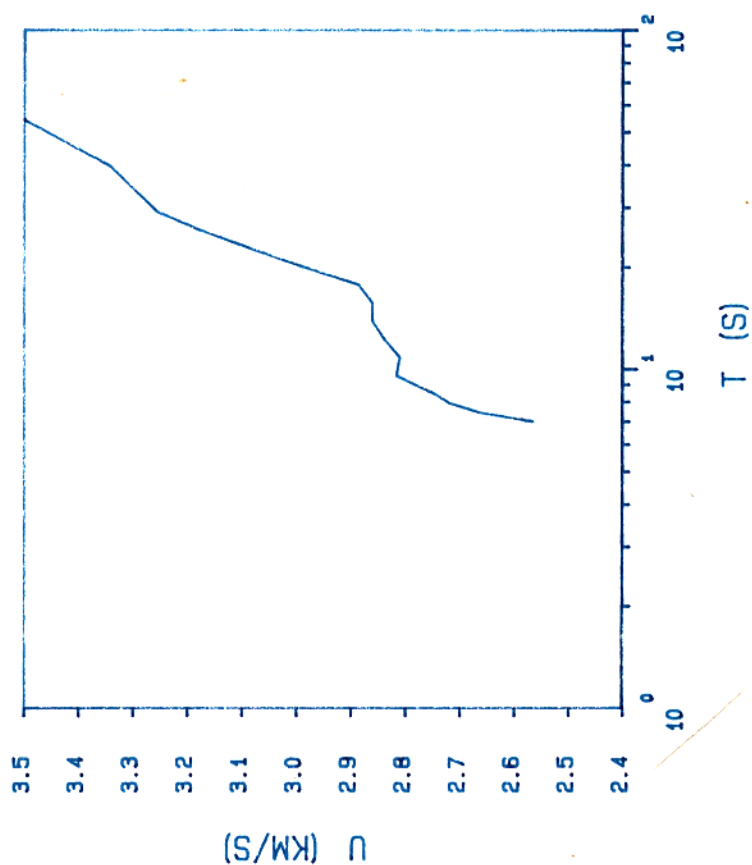


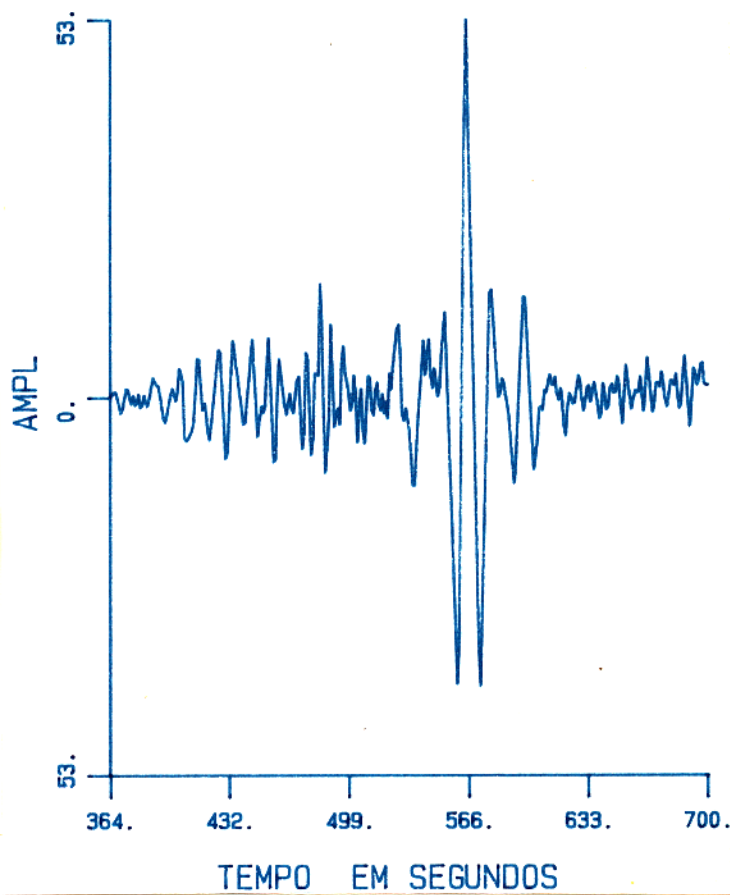
Figura 26. (a) Sismograma da componente vertical da onda de superfície observada. (b) Curva da velocidade de grupo vs. período para o harmônico fundamental da onda de Rayleigh.

BDF UZ

12 ABR 85

D = 14.9

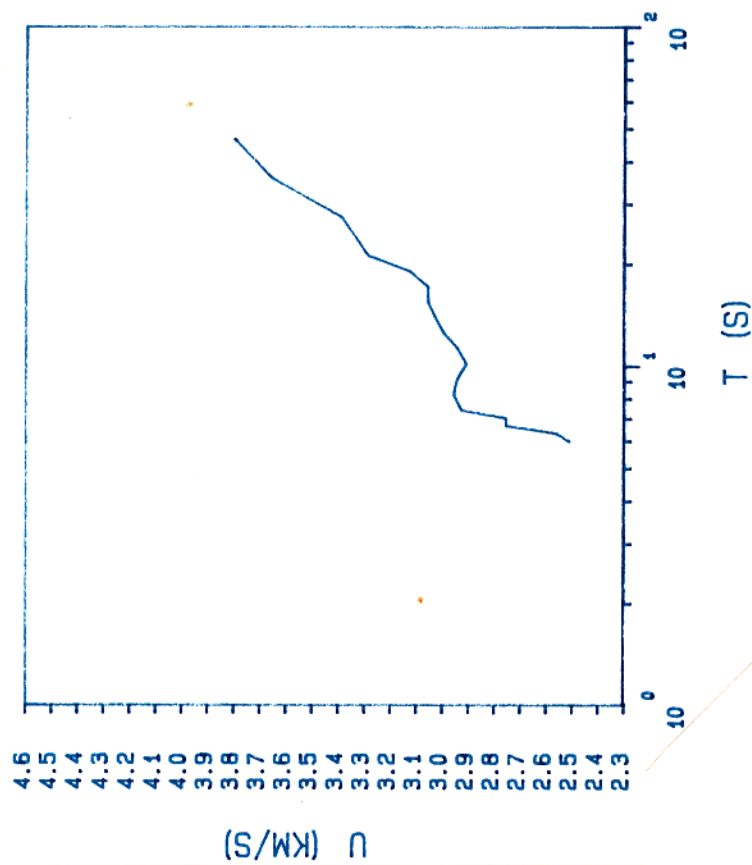
BAZ = 233.2



(a)

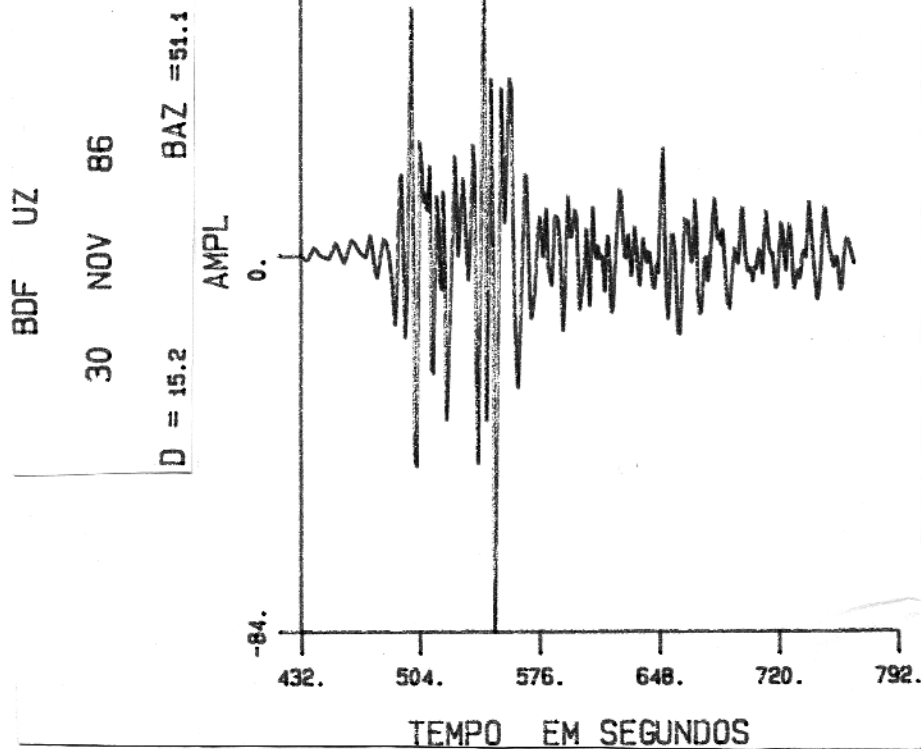
Trajectoria Paraguai-centro a BDF.

Ver tabela 8.



(b)

Figura 27. (a) Sismograma da componente vertical da onda de superfície observada. (b) Curva da velocidade de grupo vs. período para o harmônico fundamental da onda de Rayleigh.



Trajectoria Argentina-norte a BDF.
Ver tabela 8.

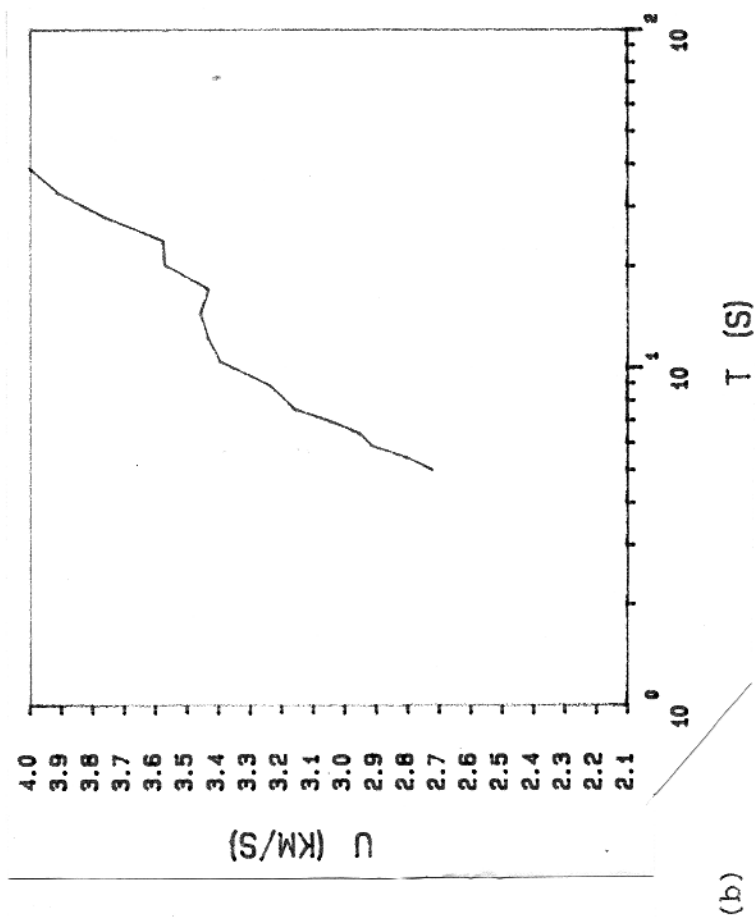


Figura 28. (a) Sismograma da componente vertical da onda de superfície observada. (b) Curva da velocidade de grupo vs. período para o harmônico fundamental da onda de Rayleigh.

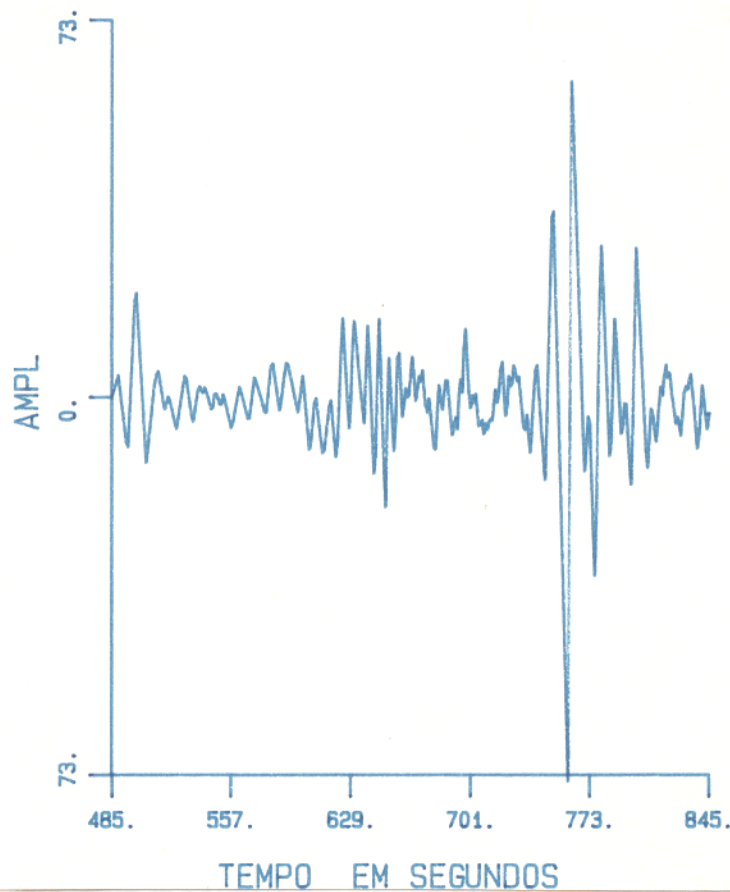
RDJ UZ

14 DEZ 85

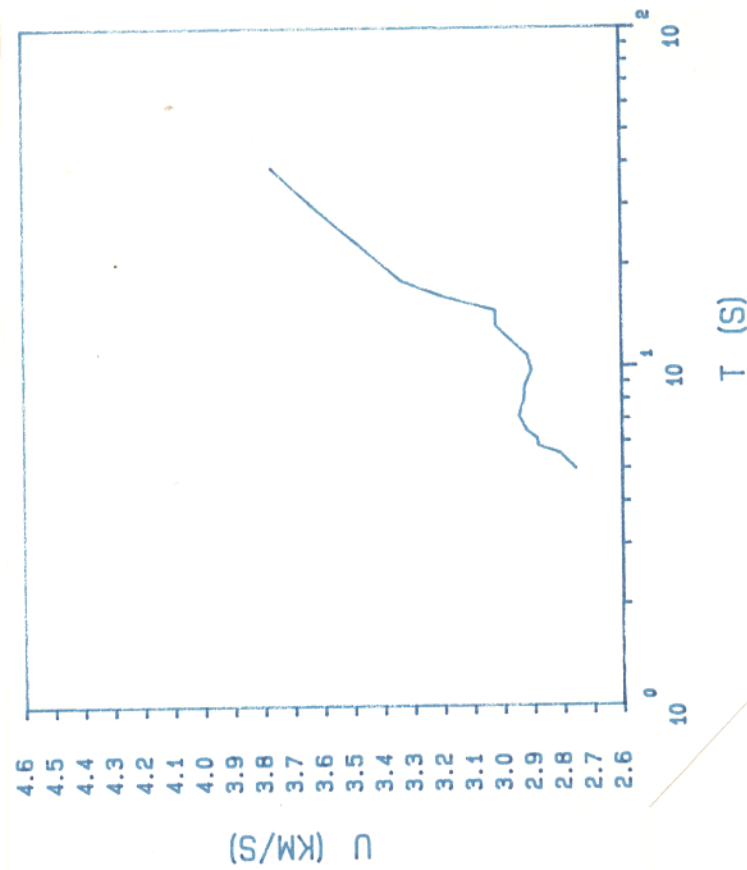
D = 19.9 BAZ = 258.6

Trajectoria Argentina-norte a RDJ.

Ver tabela 8.



(a)



(b)

Figura 29. (a) Sismograma da componente vertical da onda de superfície observada. (b) Curva da velocidade de grupo vs. período para o harmônico fundamental da onda de Rayleigh.

Tabela 06 - Velocidade de grupo vs. período para a onda de Rayleigh.

Período T (s)	Chile-Sul a BDF		Chile-Sul a RDJ		Chile-Centro a RDF		Chile-Centro a RDJ	
	U (km/s)	σ (km/s)	U (km/s)	σ (km/s)	U (km/s)	σ (km/s)	U (km/s)	σ (km/s)
4	-	-	-	-	-	-	-	-
5	2.582	-	2.804	-	3.002	-	2.732	0.022
6	2.609	-	2.848	-	3.008	-	2.781	0.027
7	2.623	-	2.874	-	3.075	-	2.861	0.035
8	2.755	-	2.910	-	3.081	-	2.911	0.037
9	2.828	-	2.917	-	3.105	-	2.944	0.043
10	2.841	-	2.935	-	3.115	-	2.958	0.029
12	2.882	-	3.003	-	3.088	-	2.971	0.041
14	2.916	-	3.002	-	3.068	-	2.947	0.005
16	2.879	-	2.989	-	3.095	-	2.937	0.008
18	2.936	-	2.989	-	3.111	-	2.944	0.007
20	2.973	-	3.999	-	3.135	-	2.964	0.006
22	3.021	-	2.993	-	3.173	-	3.004	0.004
24	3.122	-	3.011	-	3.222	-	3.029	0.025
26	3.155	-	3.030	-	3.292	-	3.144	0.047
28	3.175	-	3.040	-	3.376	-	3.191	0.014
33	3.209	-	3.046	-	3.478	-	3.266	0.032
35	3.308	-	3.080	-	3.676	-	3.408	0.060
40	3.371	-	-	-	3.772	-	3.498	0.100
45	3.386	-	-	-	3.817	-	3.692	0.035
50	-	-	-	-	3.837	-	-	-

U(km/s) - velocidade de grupo; σ (km/s) - desvio padrão.

Tabela 07 - Velocidade de grupo vs. período para a onda de Rayleigh.

Período	Chile-Norte a DDF		Brasil-Nordeste a BDF		Venezuela-Noroeste a BDF		Bolívia-Centro a BDF	
	T (s)	U (km/s)	σ (km/s)	U (km/s)	σ (km/s)	U (km/s)	σ (km/s)	U (km/s)
4		-	-	-	-	-	-	-
5		2.652	0.185	2.667	0.137	2.531	0.355	-
6		2.650	0.216	2.707	0.158	2.553	0.353	2.653
7		2.652	0.203	2.782	0.221	2.590	0.324	2.777
8		2.653	0.204	2.811	0.109	2.656	0.394	2.854
9		2.673	0.133	2.822	0.255	2.687	0.408	2.887
10		2.668	0.085	2.807	0.262	2.686	0.410	2.909
12		2.658	0.076	2.815	0.254	2.677	0.440	2.992
14		2.678	0.039	2.820	0.290	2.697	0.397	3.052
16		2.716	0.046	2.755	0.244	2.679	0.368	3.107
18		2.778	0.049	2.772	0.276	2.668	0.347	3.154
20		2.818	0.074	2.804	0.285	2.656	0.351	3.155
22		2.857	0.085	2.853	0.296	2.648	0.380	3.159
24		2.942	0.059	2.900	0.292	2.668	0.406	3.183
26		3.037	0.054	2.935	0.269	2.695	0.425	3.344
28		3.106	0.058	3.076	0.363	2.732	0.447	3.431
33		3.167	0.053	3.091	0.412	2.775	0.393	3.522
35		3.269	0.056	-	-	2.834	0.648	3.737
40		3.372	0.107	-	-	2.900	0.716	3.793
45		3.431	0.116	-	-	2.934	0.602	-
50		3.473	0.140	-	-	-	-	-

U (km/s) - velocidade de grupo; σ (km/s) - desvio padrão.

Tabela 08 - Velocidade de grupo vs. período para a onda de Rayleigh.

Período T (s)	Bolívia-Centro a RDJ		Paraguai-Centro a BDF		Argentina-Norte a BDF		Argentina-Norte a RDJ	
	U (km/s)	σ (km/s)	U (km/s)	σ (km/s)	U (km/s)	σ (km/s)	U (km/s)	σ (km/s)
4	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	2.721	-	2.756	-
6	-	-	2.510	-	2.802	-	2.784	-
7	2.565	0.120	2.560	-	2.915	-	2.809	-
8	2.665	0.142	2.756	-	2.952	-	2.882	-
9	2.719	0.161	2.798	-	3.043	-	2.886	-
10	2.746	0.162	2.927	-	3.158	-	2.920	-
12	2.817	0.152	2.958	-	3.237	-	2.947	-
14	2.809	0.142	2.942	-	3.395	-	2.928	-
16	2.839	0.103	2.906	-	3.434	-	2.924	-
18	2.861	0.105	2.942	-	3.457	-	2.901	-
20	2.861	0.067	2.995	-	3.428	-	2.916	-
22	2.886	0.040	3.028	-	3.570	-	2.971	-
24	2.990	0.011	3.056	-	3.575	-	3.023	-
26	3.086	0.082	3.056	-	3.762	-	3.023	-
28	3.178	0.062	3.125	-	3.910	-	3.207	-
33	3.256	0.040	3.286	-	4.0	-	3.337	-
35	3.343	0.058	3.389	-	-	-	3.484	-
40	3.549	0.010	3.656	-	-	-	3.633	-
45	-	-	3.799	-	-	-	3.769	-
50	-	-	-	-	-	-	-	-

U(km/s) - velocidade de grupo; σ (km/s) - desvio padrão.

4.2 Conclusões.

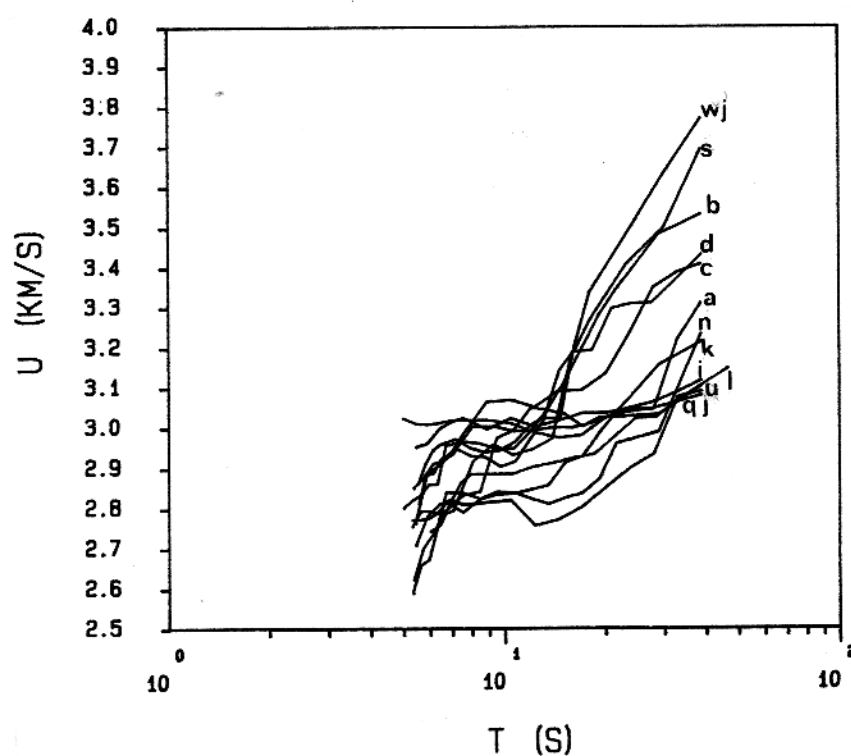
As curvas de dispersão são agrupadas em três famílias com características distintas, sendo que na primeira foram agrupadas 13 curvas de dispersão com forma semelhante; na segunda família foram agrupadas 7, curvas e na terceira também foram agrupadas 7 curvas de dispersão. As figuras 30,31 e 32 correspondem respectivamente às famílias 1,2 e 3 com o agrupamento das curvas de dispersão na parte (a) e a curva de valor médio na parte (b) das figuras. Em seguida, são apresentadas as tabelas 9,10 e 11 com os valores médios de velocidade de grupo e o desvio padrão.

A primeira família contém curvas de dispersão caracterizadas por valores de velocidade de grupo descendente para períodos menores que 7 segundos, um patamar entre 8 e 20 segundos (2.83 a 3.06 km/s) e ascendente para períodos maiores que 20 segundos. Observou-se que as trajetórias epicentro-estação que se enquadram neste grupo são: Manaus a CAI, Argentina-centro a RDJ, Argentina-norte a CAI, Argentina-centro a BDF, Peru-centro a BDF, Peru-sul a RDJ, Peru-norte a BDF, Peru-sul a BDF, Venezuela-Colômbia a RDJ, Chile-sul a RDJ, Chile-centro a RDJ, Brasil-nordeste a BDF e Argentina-norte a RDJ.

A segunda família contém curvas de dispersão caracterizadas por valores de velocidade de grupo ascendente contínuo. Observou-se que as trajetórias neste grupo são: Paraguai-centro a BDF, Chile-sul a BDF, Chile-centro a BDF, Bolívia-centro a BDF, Bolívia-centro a RDJ e Argentina-norte a BDF.

A terceira família contém curvas de dispersão caracterizadas por um mínimo no intervalo entre os períodos de 7 e 18

a)



b)

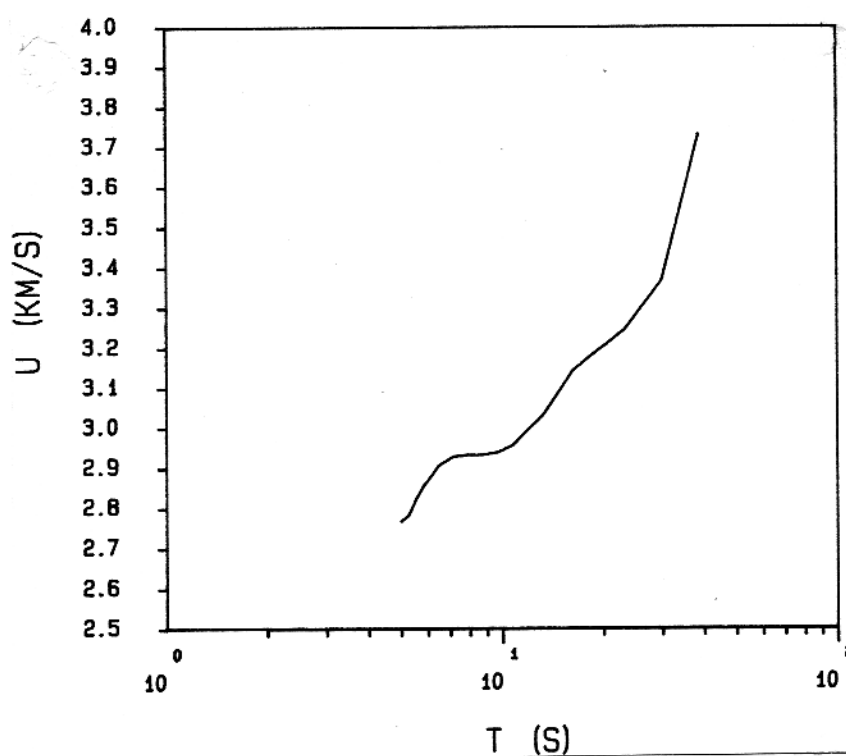


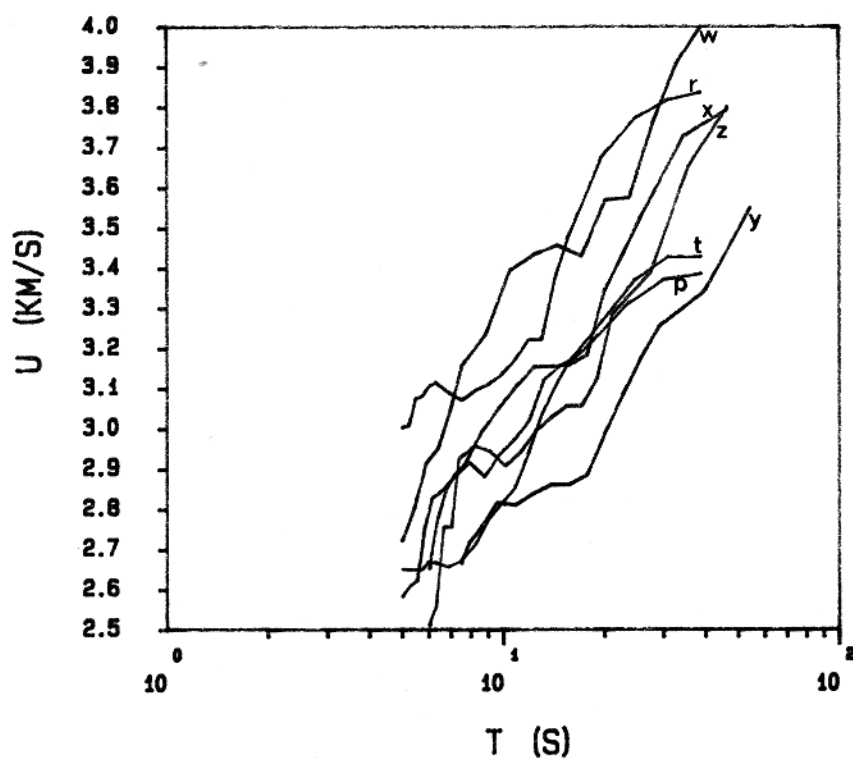
Figura 30. (a) Agrupamento das curvas de velocidade grupo para a primeira família, (b) curva de valores médios. As trajetórias são do tipo mista (cratônica-sedimentos).

Tabela 09 - Velocidade de grupo vs. período dos valores médios da primeira família.

T(s)	U(km/s)	Nº	σ (km/s)
5	2.766	11	0.137
6	2.782	13	0.118
7	2.823	13	0.102
8	2.856	13	0.101
9	2.879	13	0.091
10	2.906	13	0.087
12	2.929	13	0.089
14	2.933	13	0.086
16	2.932	13	0.080
18	2.939	13	0.084
20	2.957	13	0.087
22	2.995	13	0.106
24	3.031	13	0.109
26	3.086	13	0.148
28	3.142	13	0.152
30	3.173	12	0.145
35	3.245	9	0.191
40	3.368	6	0.194
45	3.730	2	0.038

T(s) - período; U(km/s) - velocidade de grupo
 σ (km/s) - desvio padrão da amostragem.

a)



b)

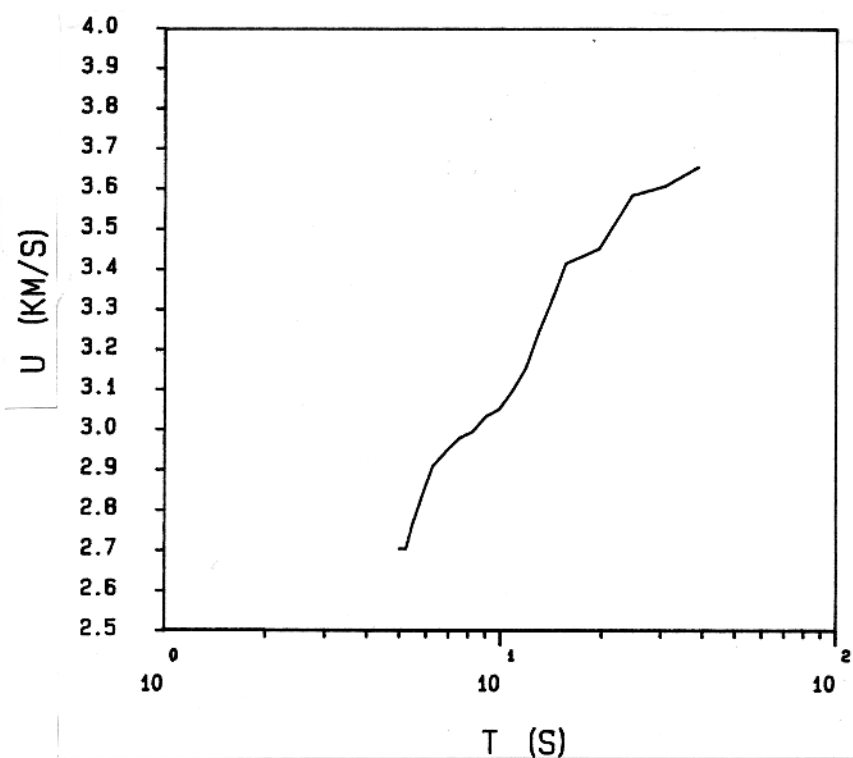


Figura 31. (a) Agrupamento das curvas de velocidade grupo para a segunda família, (b) curva de valores médios. As trajetórias têm maior percurso em regiões cratônicas.

Tabela 11 - Velocidade de grupo vs. período dos valores médios da terceira família.

T(s)	U(km/s)	Nº	σ (km/s)
5	2.810	5	0.153
6	2.837	7	0.155
7	2.903	7	0.134
8	2.933	7	0.131
9	2.946	7	0.125
10	2.953	7	0.126
12	2.964	7	0.130
14	2.953	7	0.117
16	2.934	7	0.118
18	2.926	7	0.119
20	2.931	7	0.125
22	2.942	7	0.131
24	2.971	7	0.141
26	3.003	7	0.160
28	3.034	7	0.163
30	3.062	7	0.162
35	3.104	6	0.189
40	3.095	5	0.137
45	3.140	3	0.162

T(s) - período; U(km/s) - velocidade de grupo
 σ (km/s) - desvio padrão da amostragem.

segundos. As trajetórias que fazem parte deste grupo são: Colômbia-nordeste a RDJ, Colômbia-sudoeste a BDF, Colômbia-sudoeste a RDJ, Colômbia-nordeste a BDF, Venezuela-noroeste a BDF, Chile-centro a BEB e Venezuela-noroeste a BDF.

Fazendo a superposição das figuras 1 e 2, observou-se que a primeira família se caracteriza por trajetórias epicentro-estação que têm sedimentos e regiões cratônicas no percurso, definindo-se como trajetória mista. A segunda família se caracteriza por trajetórias que apresentam um maior percurso em regiões cratônicas e uma menor parte do percurso em sedimentos. A terceira família tem suas trajetórias com maior percurso em sedimentos, cortando em sua grande extensão as bacias sedimentares do Amazonas e do Paraná.

4.3 Perspectivas de Utilização dos Resultados.

As perspectivas de utilização dos resultados obtidos em trabalhos posteriores estão definidos na estruturação dos assuntos de pesquisa sobre ondas de superfície do Projeto Sismologia em desenvolvimento na UFPa. Isto significa a continuação do processamento de maior número de dados para medidas de velocidades de grupo e fase, e a recuperação das amplitudes dos harmônicos em cada trajetória epicentro-estação na plataforma Sulamericana. Consequentemente a inversão das curvas de velocidade de grupo e de fase para obter o modelo de velocidades em subsuperfície. Isto torna possível usar as amplitudes espectrais, correspondentes aos harmônicos em propagação para medidas de atenuação γ (T) e inversão ao fator de qualidade $Q(z)$ (Russel e Herrmann, 1986).

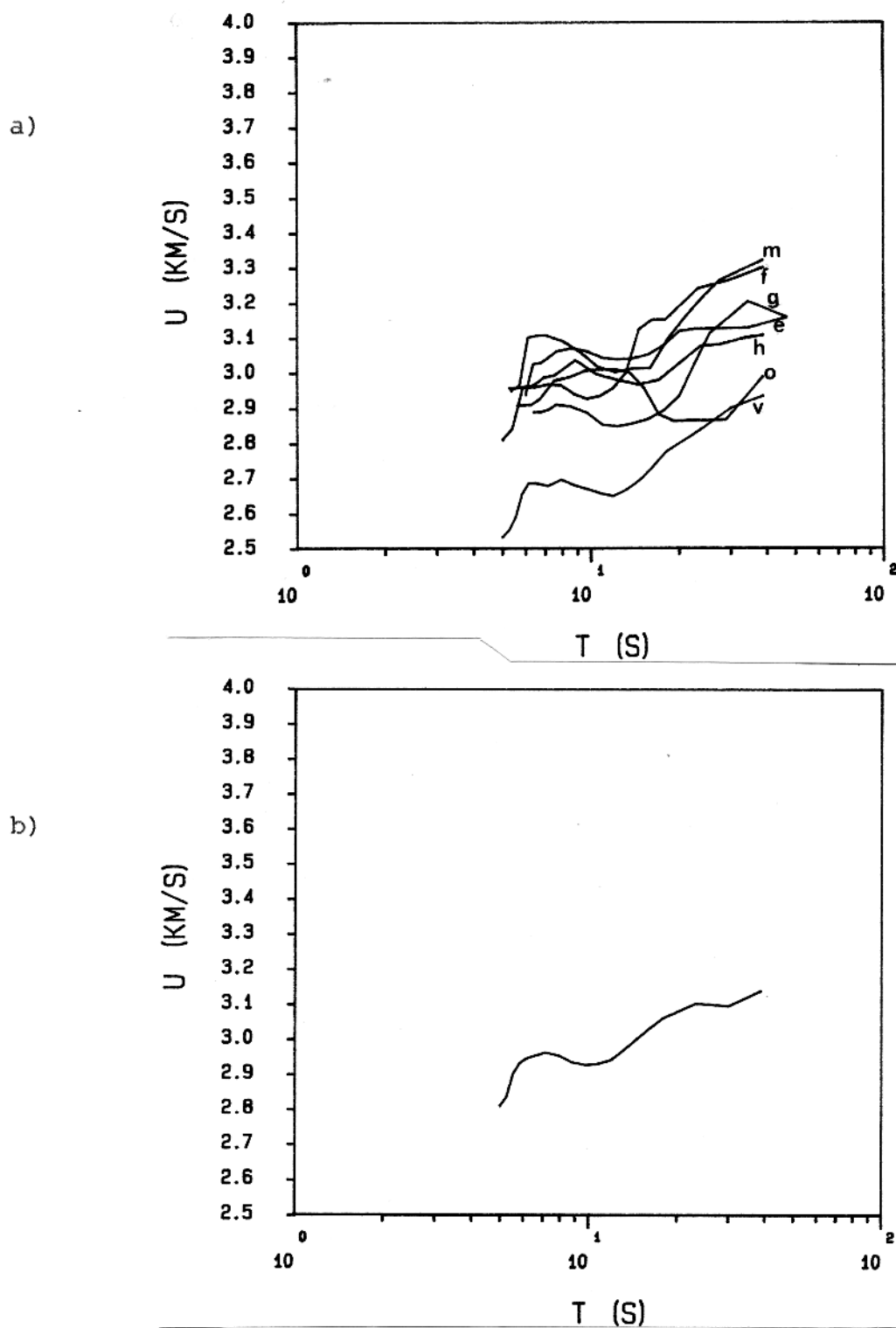


Figura 32. (a) Agrupamento das curvas de velocidade grupo para a terceira família, (b) curva de valores médios. As trajetórias têm maior percurso em sedimentos (Andinos, Amazônico, Paraná).

Tabela 10 - Velocidade de grupo vs. período dos valores médios da segunda família.

T(s)	U(km/s)	Nº	σ (km/s)
5	2.701	4	0.159
6	2.703	6	0.161
7	2.728	7	0.181
8	2.816	7	0.144
9	2.864	7	0.148
10	2.909	7	0.166
12	2.947	7	0.173
14	2.98	7	0.210
16	2.996	7	0.220
18	3.034	7	0.211
20	3.052	7	0.192
22	3.098	7	0.222
24	3.155	7	0.194
26	3.247	7	0.236
28	3.318	7	0.264
30	3.416	7	0.268
35	3.452	6	0.180
40	3.585	6	0.171
45	3.608	4	0.200
50	3.655	2	0.182

T(s) - período; U(km/s) - velocidade de grupo
 σ (km/s) - desvio padrão da amostragem.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .

- BHATTACHARYA, S.N.-1981- Observation and inversion of surface wave group velocities across central India. Bull. Seism. Soc. Am., 71 (5): 1489-1501.
- CHANDRA, U.-1970- Analysis of body-wave spectra for earthquake energy determination. Bull. Seism. Soc. Am., 60: 539-563.
- CHEN, J. J.-1985- Lateral variation of surface wave velocity and a structure beneath north American. Ph.D. Dissertation. St. Louis, St. Louis University, USA. 50 p.
- DAVIS, J. C. -1986- Statistics and data analysis in geology. New York, Wiley. V.1.
- DZIEWONSKI, A. M; BLOCH, S. and LANDISMAN, M.-1969- A technique for the analysis of transient seismic signal. Bull. Seism. Soc. Am., 59 (1): 427-444.
- DZIEWONSKI, A.M.; MILLS, J.; BLOCH, S. -1972- Residual dispersion measurements a new method of surface-wave analysis. Bull. Seism. Soc. Am., 62: 129-139.
- HERRMANN, R.B.-1972- Computer programs in earthquake Seismology. St. Louis., Saint Louis University. Department of Earth and Atmospheric Sciences, V. 1.
- HERRMANN, R.B. -1973- Some aspects of band-pass filtering of surface waves. Bull. Seism. Am., 63 (2): 665-671.
- HWANG, H.J. and MITCHELL, B. J. -1987- Shear velocities, Q_B , and the frequency dependence of Q_B in stable and tectonically active regions from surface wave Observations. Geophys.J.R. Astr. Soc., 90: 575-613.
- JAMES, D. E. and LINDE, L. T. -1971- A Source of major error in the digital analysis of world wide standard station seismograms. Bull. Seism. Soc. Am., 61: 723-28.

- KISSLINGER, C. -1967- Seismological instrumentation. Toquio, International Institute of Seismology and Earthquake Engineering. V. 1.
- LEITE, L. W. B. -1987- Sismologia I, Análise de dados. (Monografia do Curso). Belém, URPa-CG, Departamento de Geofísica. V. 5.
- LEITE, L.W.B. -1989- Relatório do projeto de calibração da estação sismológica e serviços de apoio. Belém, UFPa-CG, Departamento de Geofísica. 45 p.
- RUSSEL, D. and HERRMANN, R. B. -1986- Surface inversion of velocity. St. Louis, St. Louis University, U.S.A.. 60 p.
- SANTA ROSA, A. N. C.; LEITE, L. W. B. -1988- Medidas de dispersão das ondas de superfície de Rayleigh na plataforma Sulamericana. In : XXXV Congresso Bras. Geol. Belém, V.4, p.1500-1509 .