



Universidade de Brasília - UnB
Instituto de Geociências

***CARACTERIZAÇÃO DA SISMICIDADE INDUZIDA
NO RESERVATÓRIO DE NOVA PONTE, MINAS
GERAIS, BRASIL***

Cristiano Naibert Chimpliganond

Dissertação de Mestrado

Orientador: Prof. Dr. Vasile I. Marza

Banca Examinadora: Prof. Dr. Marcelo Assumpção
Prof. Dr. João Willy C. Rosa

Brasília

2002



*A Lúcia, Siripongse
e Mônica*

AGRADECIMENTOS

A elaboração de uma dissertação envolve orientação, incentivo e colaboração de algumas pessoas e entidades. Por isso quero registrar aqui os meus agradecimentos, pelo apoio técnico, científico e financeiro dispensados à minha pessoa, pelos colaboradores a seguir mencionados.

Ao Professor Dr. Vasile I. Marza, do Observatório Sismológico do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG/UnB), pela disponibilidade e dedicação com que me incentivou e orientou o desenvolvimento desta dissertação.

Ao Professor Dr. Marcelo Assumpção, do Departamento de Geofísica do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo (IAG/USP), ao Professor José Eduardo Soares do Observatório Sismológico e à minha esposa Mônica Von Huelsen Chimpliganond pelas sugestões e colaboração no decorrer do programa de mestrado.

Ao Observatório Sismológico, que proporcionou os meios financeiros e toda a estrutura necessária para a realização da pesquisa e, em especial ao Professor Lucas Vieira Barros, pelos dados e programas cedidos, possibilitando a execução deste trabalho.

À Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), em especial ao Geólogo Luís Carlos Gomide e ao Sr. Edílson Humberto Caliman, pelas informações fornecidas sobre a região em estudo e pela assistência aos trabalhos de campo.

A todos os amigos e funcionários do Observatório Sismológico e, em especial, a Kate Tomé de Sousa, a Rodrigo Borges de Oliveira, a Daniel de Farias Caixeta e a Edna Leoni da Cunha Camilo, que contribuíram de forma positiva com o trabalho.

RESUMO

A Sismicidade Induzida por Reservatório (SIR) em Nova Ponte tem sido estudada desde seu início (1994). A necessidade em se prestar esclarecimentos à população e autoridades locais, além do caráter científico, buscando suas origens e características, tem impulsionado estes estudos ao longo dos anos.

Neste trabalho, pretendeu-se determinar algumas características dessa SIR analisando a distribuição no espaço e, subsidiariamente, no tempo, e a variação na magnitude dos sismos no período de 1994 a 2000.

Para o estudo da variação da sismicidade, primeiramente foram localizados os eventos utilizando-se o programa HYPO71. Para tanto, desenvolveu-se um modelo local de velocidades, composto por camadas ($V_P = 5,0$ km/s e espessura de 0,3 km; $V_P = 5,7$ km/s e espessura de 5,7 km) sobre um semi-espaço infinito ($V_P = 6,1$ km/s), e uma razão $V_P/V_S = 1,70$, ambos definidos neste trabalho.

A análise da distribuição dos hipocentros foi feita em mapa e em seções verticais, separados por ano e área sísmica. Tal estudo sugeriu um comportamento hidromecânico diferenciado para as rochas em cada área.

Posteriormente foi realizada a quantificação da SIR em Nova Ponte, com o uso de relações entre a magnitude e a duração do sinal sísmico, definidos neste estudo, para duas estações sismográficas (NP3 e NP4). Assim, pelo Método da Verossimilhança, foi determinado o parâmetro b , cujo valor ($1,37 \pm 0,07$) mostrou-se superior ao b da sismicidade natural.

A caracterização espacial (e temporal) dos eventos, bem como sua quantificação, confirmam a natureza induzida da sismicidade observada em Nova Ponte.

ABSTRACT

The case of Reservoir Induced Seismicity (RIS) at Nova Ponte, Minas Gerais, Brazil has been investigated since its initiation (that is, 1994). The need to offer clarifications to the population and to the local authorities, besides the scientific aim to search for its origins and features, have motivated these studies during the time.

This work has aimed at determining some characteristics of this RIS analyzing the special distribution and, in subsidiary, the temporal one, together with the magnitude changes in the seismicity during the period 1994-2000.

For a thorough study of the seismicity variations, first were relocalized the events using the computer package HYPO71. For this, it has been worked out a local velocity model composed by two layers ($V_p=5.0$ km/s and thickness of 0.3 km; $V_p=5.7$ km/s and thickness 5.7 km/s) overlaying a half-space ($V_p=6.1$ km/s) and a V_p/V_s ratio of 1.70, all defined in this study.

The analysis of the space-time hypocentral distribution has been done using epicentral maps and vertical cross-sections for different seismogenic areas in consecutive yearly time-windows. In such a way it was inferred the differential hydro-mechanical behavior of the rocks in each area.

Next, it has been done a uniform size quantification of the RIS at Nova Ponte, through the development and calibration of magnitude duration scales for two selected seismographic stations (NP3 and NP4). Moreover, based on these consistent magnitude determinations it was computed (using the method of maximum likelihood) the b-parameter of the frequency-magnitude distribution for this earthquake population, whose value (1.37 ± 0.07) has proved to be higher than the corresponding b-value for the natural seismicity in the neighboring area.

Both the space and time traits of the seismic events, as well as their size quantification, inferred in this study, do validate and bring new insights on the observed reservoir induced seismicity at Nova Ponte.

SUMÁRIO

	Página
Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Sumário	iv
Lista de Figuras.....	viii
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Fotos.....	iv

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1 Introdução	1
----------------------	---

CAPÍTULO 2

Sismicidade Induzida com ênfase no caso de Nova Ponte/MG

2.1 Introdução	3
2.2 Sismicidade Induzida por Reservatório (SIR)	3
2.2.1 Mecanismos e Características da SIR	4
2.2.2 Casos Mundiais e Brasileiros da SIR	9
2.2.3 A Sismicidade Induzida no Reservatório de Nova Ponte	10

CAPÍTULO 3

Aspectos Geológicos da região da UHE Nova Ponte/MG

3.1 Introdução	21
3.2 Localização e Aspectos Geológicos.....	21
3.2.1 A Faixa Brasília	23
3.2.2 Bacia do Paraná.....	30
3.2.3 Coberturas Detríticas Recentes.....	32

CAPÍTULO 4

A Rede Sismográfica de Nova Ponte

4.1 Introdução	33
4.2 Monitoramento pré-enchimento.....	34
4.3 Distribuição Espacial das Estações Sismográficas	34
4.4 Instrumentação das Estações.....	37
4.5 Coordenadas das Estações	41

CAPÍTULO 5

Distribuição Espacial da SIR em Nova Ponte/MG

5.1 Introdução	47
5.2 Banco de dados de leituras das ondas P e S.....	48
5.3 Modelo de Velocidades.....	50

5.3.1 Razão V_p/V_s	50
5.3.2 Determinação do modelo de velocidades.....	53
5.4 Relocalização Hipocentral	54
5.5 Distribuição Espacial da SIR em Nova Ponte.....	56

CAPÍTULO 6

Quantificação da SIR em Nova Ponte

6.1 Introdução	85
6.2 Magnitude de duração.....	86
6.2.1 Ondas de Cauda	86
6.2.2 Magnitude baseada na Duração	88
6.3 Quantificação dos Sismos Induzidos em Nova Ponte.....	90
6.3.1 Magnitude Regional e sua aplicação na área em estudo.....	92
6.3.2 Cálculo da magnitude de duração para NP3	94
6.3.3 Cálculo da magnitude de duração para NP4	99
6.4 Parâmetro b	103
6.4.1 Cálculo do Parâmetro b para a SIR de Nova Ponte	105

CAPÍTULO 7

Conclusão

7.1 Conclusão e Discursões.....	113
---------------------------------	-----

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	116
---------------------------------	-----

APÊNDICES

Apêndice A: Modelo de Velocidades	121
Apêndice B: Resultados do HYPO71	122
Apêndice C: Exemplos de registros de eventos sísmicos das áreas 1 e 2.....	133

CAPÍTULO 1

Introdução

O fenômeno da sismicidade induzida por reservatórios (SIR) foi observado primeiramente na década de 30 do século vinte, mas seu estudo se intensificou a partir dos anos 60, após a ocorrência de sismos de magnitudes consideráveis em várias partes do mundo. Os impactos ambiental, social e econômico da SIR, aliados ao interesse científico em compreender a natureza deste fenômeno, impulsionaram os estudos sobre este tipo de atividade sísmica. No Brasil, este tema passou a ser alvo dos pesquisadores no início da década de 70, com a ocorrência de um evento de magnitude 3,7, no Reservatório de Carmo do Cajuru (MG).

Com o objetivo de identificar a relação entre o enchimento de um lago e a ocorrência de sismicidade, a instalação de estações sismográficas na área do reservatório é de vital importância. A auscultação sísmica fornece subsídios para inferir a influência do lago nas condições tectônicas da região.

A área do Reservatório de Nova Ponte é monitorada instrumentalmente desde 1989 e, logo após seu enchimento (1993), começou a apresentar sismicidade induzida. Desde então, a região vem sendo tema para vários estudos.

O presente trabalho tem por objetivo principal caracterizar a sismicidade induzida em Nova Ponte no período entre 1994 e 2000.

Para tanto esta dissertação apresentará, no Capítulo 2, um breve embasamento teórico sobre os mecanismos causadores de SIR e suas características, exemplos de casos mundiais e brasileiros. Também são apresentados, com maior detalhe, os resultados dos estudos já realizados em Nova Ponte.

Para melhor compreender a ocorrência dos sismos induzidos na região de Nova Ponte, é apresentada, no Capítulo 3, a ambiência geotectônica particular na qual se encontra o reservatório, no limite entre a Província Tocantins e a Bacia do Paraná.

O Capítulo 4 apresenta as características da instrumentação e geometria da rede sismográfica de Nova Ponte durante o período em estudo. Estas descrições são de grande

importância no processo de determinação hipocentral uniforme dos eventos e na elaboração das relações de magnitude local que serão realizados neste trabalho.

Na caracterização da SIR em Nova Ponte, as informações sobre a localização hipocentral e a magnitude dos eventos são fundamentais (Capítulos 5 e 6).

O Capítulo 5 destaca a distribuição espacial, e secundariamente temporal. Obteve-se um alinhamento de epicentros coincidentes com direções de planos de fraqueza identificados no estudo geológico da região (Capítulo 3). Outro destaque é a variação da profundidade focal no espaço e no tempo, a qual sugere ou um processo de difusão da água em profundidade, ou a liberação de tensões em diversas regiões da crosta ou ainda uma especificação geotectônica da área.

Em termos de magnitude dos eventos de Nova Ponte, no Capítulo 6, foi calculado o parâmetro b , cujo valor enfatizou a caracterização de SIR.

Por fim, no Capítulo 7 encontram-se as discussões e conclusões obtidas nesta pesquisa.

CAPÍTULO 2

Sismicidade Induzida com ênfase no caso de Nova Ponte/MG

2.1 – Introdução

A maneira com que as tensões crustais, presentes em certa região, são liberadas na forma de sismos pode ser modificada pela ação humana, produzindo o que chamamos de sismicidade induzida. Esta influência antrópica pode se dar por meio de algumas atividades como: mineração subterrânea profunda ou a céu aberto em grande escala; injeção de fluido sob alta pressão em mineração de dissolução, disposição de resíduos tóxicos, geração de energia geotermal, e prospecção secundária de petróleo; extração de fluidos; grandes explosões nucleares subterrâneas; e enchimento de reservatórios de água.

Devido à sua correlação com estes grandes projetos de engenharia, a sismicidade induzida tem implicações sócio-econômicas significantes. Dentre estas atividades, o enchimento de grandes reservatórios é a que concentra maior interesse. Isto é devido ao fato de grandes lagos serem produzidos em todo o mundo. Além disso, os sismos por eles induzidos apresentam magnitudes superiores às observadas para as demais formas de indução.

O fenômeno da sismicidade induzida por reservatório (SIR) tem sido observado e estudado, desde a 4^a. década do século XX, em várias partes do mundo, inclusive no Brasil. Neste capítulo serão abordados aspectos gerais sobre as características e mecanismos da SIR. Também serão apresentadas algumas informações sobre a SIR no mundo, no Brasil e especificamente em Nova Ponte.

2.2 - Sismicidade Induzida por Reservatório (SIR)

O tipo mais comum de sismicidade induzida está relacionado ao enchimento de reservatórios de água, sejam para a produção de energia elétrica, irrigação, usinas nucleares,

ou outra finalidade. Vários fatores condicionam a ocorrência da SIR (Simpson, 1976): tamanho/peso do reservatório, condições dos esforços tectônicos pré-existent na região, características geológicas e hidromecânicas da área, interação construtiva entre a orientação dos esforços tectônicos, variação do nível de água (N.A.) do lago e a carga adicional causada pelo reservatório.

A SIR resulta de um ou vários fatores combinados, como o peso suplementar da água do lago, o aumento da pressão intersticial (pressão de poros) e o alívio de esforço causado pela percolação da água nas microfraturas da rocha (Kisslinger, 1976).

Apesar do primeiro caso relatado de SIR ter ocorrido no final da década de 30, somente na década de 60 este assunto teve maior atenção, por parte dos cientistas, com a ocorrência de tremores induzidos com magnitudes superiores a 5,5 (Simpson, 1986).

Nos últimos 30 anos os diversos estudos sobre SIR em todo o mundo têm mostrado que apenas uma pequena porcentagem dos reservatórios induz sismicidade. Baecher & Keeney (1982) estimaram que reservatórios com profundidade superior a 30 metros têm 10% de probabilidade de causar SIR com magnitude superior a 3. Mas, sob condições especiais [reservatórios muito grandes (profundidade acima de 100 metros e/ou volume superior a 1 km³), regime de tensão e condições geológicas apropriadas] esta probabilidade pode ser superior a 50%.

Ao longo desses anos, observou-se que a SIR somente irá ocorrer se na região as tensões tectônicas estiverem próximas do limite de resistência da rocha, pois o efeito do reservatório neste campo de tensões é pequeno comparado à energia liberada pelos maiores sismos induzidos (Assumpção *et al.*, 2002).

O fato de uma região não apresentar sismicidade natural não implica em menor risco de ocorrência de SIR, e o maior sismo induzido possível não pode exceder o maior sismo natural possível na região (Assumpção *et al.*, 2002).

2.2.1 – Mecanismos e Características da SIR

Em muitos locais na crosta as rochas estão num estado de tensão quase crítico, onde pequenos esforços ou variações na pressão de poro podem induzir sismos. O enchimento de

um reservatório de água produz variações no campo de esforços nas proximidades do lago, produzindo SIR.

A SIR é causada por falhamento em um plano de fraqueza pré-existente. O fraturamento da rocha seca pode ser expresso pela Lei de Coulomb (Figura 2.1a), onde:

$$\tau = \tau_0 + \mu \sigma_n$$

sendo que τ é a tensão cisalhante necessária para ruptura em um plano, τ_0 é a resistência inerente do material, μ é o coeficiente de fricção da superfície, e σ_n é a tensão normal ao plano.

A rocha, sob o efeito das tensões principais σ_1 , σ_2 e σ_3 , sofrerá fraturamento num plano contendo a tensão intermediária (σ_2) a um ângulo α com a direção de σ_3 (Figura 2.1b). O círculo de Mohr fornece os diversos valores de σ_n e τ para os planos que fazem ângulos α com a direção de σ_3 , para um dado conjunto de tensões principais σ_1 e σ_3 (Figura 2.1b). Combinando-se a Lei de Coulomb e o círculo de Mohr (Figura 2.1c), pode-se determinar os valores do par σ_1 e σ_3 necessários para o falhamento (círculo tangente ao envelope de fraturamento) e a orientação α do plano ao longo do qual este se processará.

Com o enchimento do lago as rochas estarão sujeitas a uma pressão intersticial P , e a tensão principal efetiva resultará da subtração da pressão de poro (P) da tensão elástica (σ_n) (Simpson, 1986). Assim, o critério de fraturamento para rocha molhada pode ser escrito da seguinte maneira:

$$\tau = \tau_0 + \mu(\sigma_n - P)$$

Considerando o enchimento de um reservatório próximo a uma falha pré-existente sob um estado de tensão crítico, Bell & Nur (1978) mostram que a variação na resistência ΔS devido à carga de água e à pressão de poro induzida é dada pela relação:

$$\Delta S = \mu(\Delta\sigma - \Delta P) \pm \Delta\tau$$

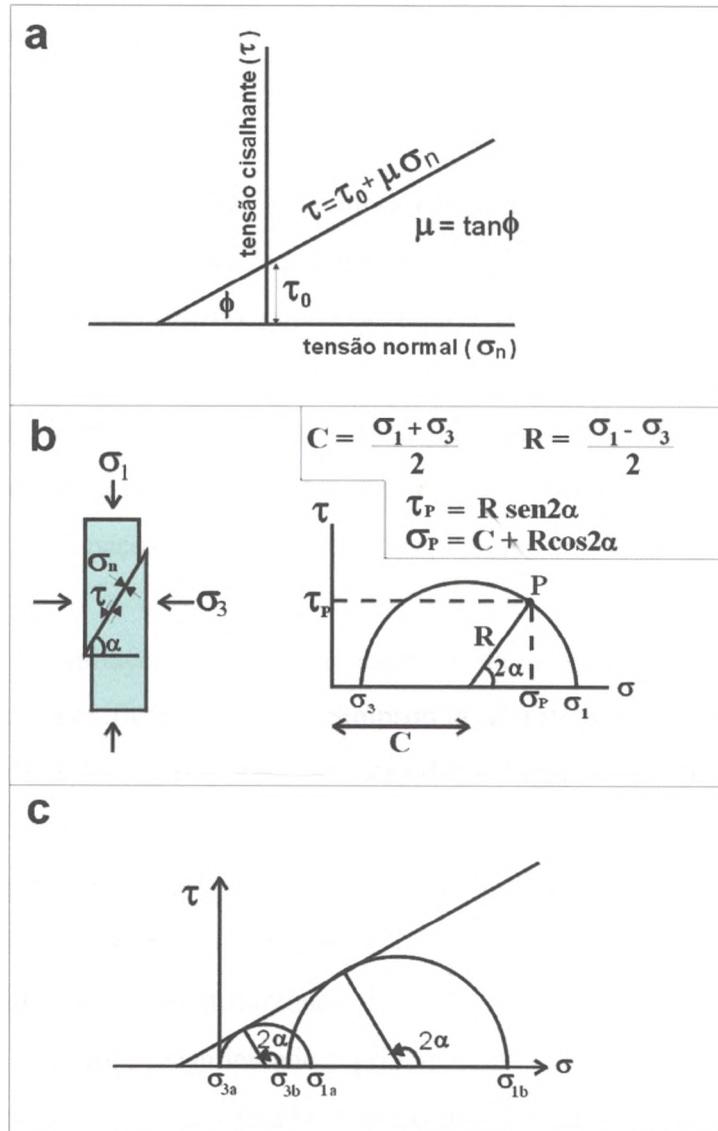


Figura 2.1 – (a) Lei de Coulomb para fraturamento de rocha seca; (b) Círculo de Mohr; (c) critério de fraturamento de Mohr-Coulomb (Simpson, 1986).

onde $\Delta\sigma$ e $\Delta\tau$ são aumentos nas tensões normal e cisalhante, respectivamente, num plano devido à carga de água do lago; μ é o coeficiente de fricção; e ΔP é o aumento na pressão de poro induzido pelo peso da água. Dependendo do sinal das tensões locais $\Delta\tau$ será subtraído ou adicionado a ΔS . Se a compressão é considerada positiva e o cisalhamento local favorece falhamento inverso, $\Delta\tau$ é subtraído da resistência.

O enchimento de um reservatório pode mudar a resistência da crosta das seguintes formas (Bell & Nur, 1978; Simpson, 1986):

- a) Pelo aumento na tensão elástica devido à carga superficial adicional e concomitante mudança instantânea na pressão de poro proporcional à deformação volumétrica. Esses efeitos seguem o enchimento inicial do lago e variações no N.A. com pequeno ou nenhum atraso;
- b) Pelo aumento na pressão de poro por difusão a partir da superfície. E em casos onde o nível freático anteriormente ao enchimento do lago é baixo, o fluxo de água a partir do reservatório até espaços porosos insaturados pode ser importante.

Com base na variação temporal e espacial da SIR, a resposta sísmica de um reservatório pode ser classificada, segundo Simpson *et al.* (1988) e Talwani (1995), em duas categorias: Sismicidade Inicial (ou Resposta Rápida) e Sismicidade de Estado Estável (ou Resposta Atrasada).

A primeira categoria, amplamente observada, está associada ao enchimento inicial do lago, a grandes variações do N.A., ou a aumentos do mesmo acima do maior nível atingido anteriormente. Resulta do efeito instantâneo da carga ou descarga e do efeito atrasado da difusão da pressão de poro. A sismicidade é principalmente de baixa magnitude, rasa ($h \leq 10$ km), do tipo enxame sísmico, e confinada às proximidades do reservatório. O maior evento geralmente ocorre após ter sido completado o enchimento e o N.A. máximo ter sido atingido. Espacialmente há uma estabilização geral e comumente uma ausência de sismicidade abaixo da porção mais profunda do lago, e sismicidade dispersa na periferia. Este período de aumento na atividade sísmica é seguido por um decréscimo gradual a níveis pré-enchimento, indicando o término da resposta poro-elástica ao enchimento.

A sismicidade de estado estável raramente é observada, ocorrendo após o efeito do enchimento inicial ter diminuído. Está geralmente associada a sismos de grande magnitude e profundos ($h \geq 10$ km), que se estendem além da área do reservatório. Persiste por muitos anos sem um decréscimo na frequência ou na magnitude. O aumento da pressão de poro responsável pela sismicidade está relacionado à frequência e amplitude das variações do nível de água do reservatório. A sismicidade continua por décadas e parece não desaparecer.

Em geral, a SIR resulta da interação complexa entre o aumento da tensão elástica, os efeitos cumulativos do aumento da pressão de poro dos mecanismos elástico e de difusão, e o regime de tensões pré-existentes (Bell & Nur, 1978; Simpson, 1986).

Estudos de diversos exemplos de SIR ao longo de vários anos mostram que algumas feições são comuns à maioria dos casos, podendo ser utilizados como uma forma de distinção entre a sismicidade induzida e a natural.

A análise da relação frequência-magnitude (ou Relação Gutenberg-Richter) para seqüências sísmicas induzidas por reservatório tem mostrado, para muitos casos, que o valor do parâmetro b de pré-abalos é maior que aquele para pós-abalos, e que ambos são maiores que o b para a sismicidade natural da região (Gupta, 1992).

Outra feição característica da SIR é observada na relação entre as magnitudes do maior pós-abalo (M_1) e do evento principal (M_0). De acordo com a Lei de Bath, $M_0 - M_1 = 1,2$ para terremotos grandes e rasos. Para SIR Papazachos (1974) encontrou a relação $M_0 - M_1 = 0,5$. Utsu (1969) observou que associados a grandes valores de b observam-se razões M_1/M_0 pequenas, e vice-versa, para seqüências sísmicas naturais. Para sismos induzidos um alto valor de b é acompanhado por alta razão M_1/M_0 .

Mogi (1963a,b *apud* Gupta, 1992) classificou as seqüências sísmicas em três tipos (Figura 2.2): Tipo I, Tipo II e Tipo III. O Tipo I consiste na ocorrência de um evento principal seguido por numerosos pós-abalos, correspondendo a materiais homogêneos sob a ação de um campo homogêneo de tensões (Figura 2.2). Quando o material apresenta uma estrutura heterogênea e/ou a tensão aplicada não é uniforme, observam-se pequenos sismos antecedendo um evento principal e este, por sua vez, seguido de diversos pós-abalos. Este tipo de seqüência sísmica foi definido como do Tipo II (Figura 2.2). A terceira categoria, Tipo III, caracteriza-se pela ocorrência de uma atividade de enxame de eventos, cujas magnitudes aumentam gradualmente e depois decrescem com o tempo. Relaciona-se a este tipo de sismicidade materiais com estruturas extremamente heterogêneas e/ou tensões aplicadas com considerável concentração (Figura 2.2).

A SIR pode ser classificada como do Tipo II (Gupta, 1992), segundo o tipo de padrão pré-abalos-pós-abalos definido por Mogi. Observa-se, também, que as seqüências induzidas apresentam decaimento dos pós-abalos mais lenta em comparação com seqüências naturais (Gupta, 1992).

Segundo Gupta (1992), todas estas características apresentadas que diferenciam a sismicidade induzida da natural são um reflexo das variações nas propriedades mecânicas do meio proporcionadas pelo reservatório.

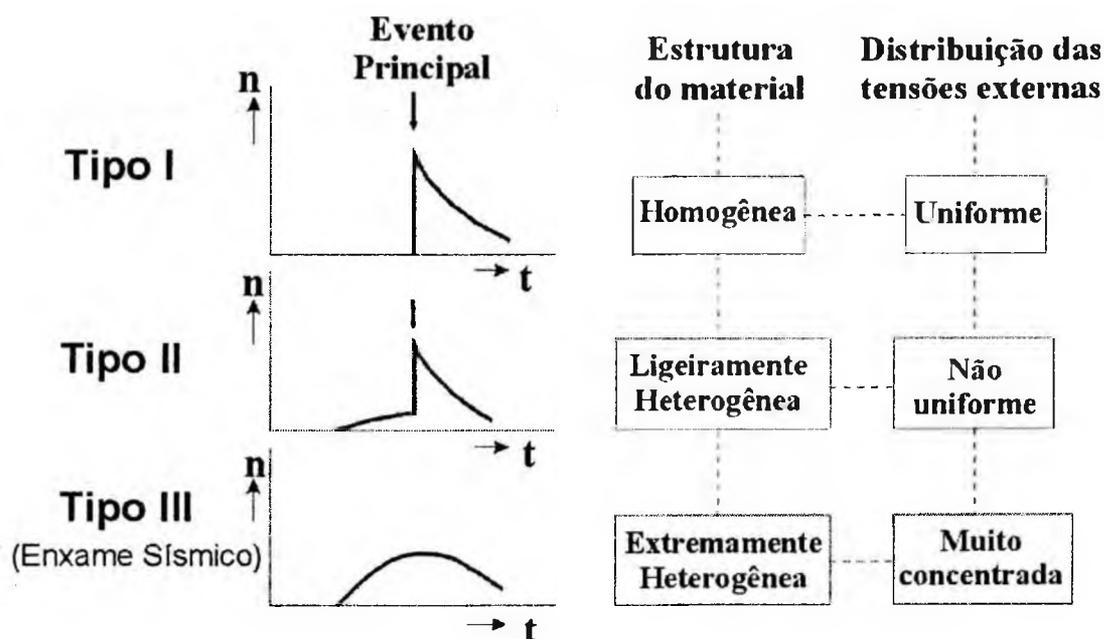


Figura 2.2 – Classificação das seqüências sísmicas segundo Mogi (1963a,b *apud* Gupta, 1992), onde n é o número de eventos e t a escala de tempo.

2.2.2 - Casos Mundiais e Brasileiros de SIR

O primeiro caso conhecido de SIR data de 1936, associado ao Lago Mead, nos Estados Unidos. Desde então, diversos casos de SIR têm sido relatados em todo o mundo. Uma compilação de mais de 70 casos de aumento ou decréscimo na sismicidade após o enchimento de um reservatório é apresentada por Gupta (1992). Tal distribuição geográfica é mostrada na Figura 2.3. Marza *et al.* (1999a) estimam que aproximadamente 200 casos de SIR já foram observados em todo o mundo até o momento.

Entretanto, o estudo sobre a SIR só ganhou atenção da sociedade científica na década de 60, com a ocorrência de eventos induzidos com magnitudes superiores a 6 em diversas

partes do mundo. O maior sismo induzido por reservatório já registrado ocorreu no Reservatório de Koyna, na Índia. Esse tremor ocorreu em 10 de dezembro de 1967, com magnitude 6,5 M_s , causando a morte de 200 pessoas e desabrigando mais de 1500. Os sismos de Koyna e de Hsinfengkiang (China) provocaram danos estruturais às próprias barragens, e os sismos de Kremasta (Grécia) e Oroville (EUA) provocaram danos em áreas vizinhas povoadas (Simpson, 1986). A Tabela 2.1 mostra os principais sismos induzidos ocorridos no mundo.

No Brasil, o interesse pela SIR teve início na década de 70, com a ocorrência de um sismo de magnitude 3,7 (intensidade VI MM), em 1972, induzido pelo Reservatório de Cajuru (MG). Este foi o marco inicial para os programas de monitoramento sismográfico dos reservatórios brasileiros, com o pioneirismo da CEMIG (Marza *et al.*, 1999a).

Uma compilação dos casos históricos e mais recentes de SIR no Brasil é apresentada por Marza *et al.* (1999a) e Assumpção *et al.* (2002). A Tabela 2.2 apresenta algumas informações sobre a SIR nesses reservatórios e a Figura 2.4 mostra a distribuição geográfica. Observa-se que a maioria dos casos brasileiros de SIR é do tipo resposta rápida (ou sismicidade inicial), o que é coincidente com dados de SIR em todo o mundo, onde este tipo de resposta é a mais observada (Talwani, 1995). Outra característica notada é a presença de alguns casos mostrando sismicidade com ciclo repetitivo (i.é., a ocorrência de mais de um evento principal), como Nova Ponte/MG, Tucuruí/PA e Carmo do Cajuru/MG (Marza *et al.*, 1999a).

2.2.3 – A Sismicidade Induzida no Reservatório de Nova Ponte

A UHE Nova Ponte possui uma barragem com 142 metros de altura e seu reservatório apresenta um volume de 12,8 km³. Este lago é formado a partir do represamento das águas dos rios Quebra-Anzol e Araguari, e tem profundidade máxima de 132 metros. O enchimento deste lago começou em outubro de 1993, e com aproximadamente 18% da capacidade total do reservatório atingida, teve início a atividade sísmica induzida.

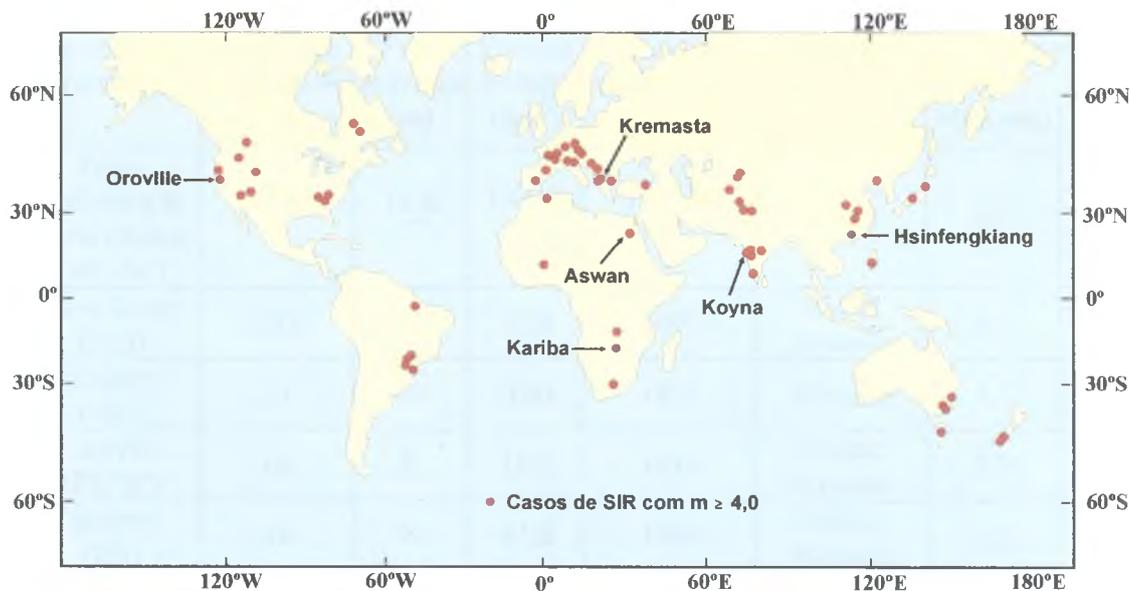


Figura 2.3 – Distribuição geográfica de casos de SIR no mundo. São mostrados apenas casos com magnitude igual ou superior a 4,0, e de aumento ou decréscimo de sismicidade (Gupta, 1992). Os casos com os maiores eventos (Tabela 2.1) são identificados.

Tabela 2.1 – Principais eventos induzidos por reservatório ocorridos no mundo (Marza *et al.*, 1999a).

Represa	País	Altura da Barragem (m)	Volume (10^6 m^3)	Início do Enchimento	Maior Evento	
					Ano	Mag.
Koyna	Índia	103	2.708	1964	1967	6,5
Kremasta	Grécia	165	4.750	1965	1966	6,3
Hsinfengkiang	China	105	10.500	1959	1962	6,1
Oroville	EUA	236	4.295	1968	1975	5,9
Kariba	Rodésia	128	160.368	1959	1963	5,8
Aswan	Egito	111	164.000	-	1981	5,6

Tabela 2.2 – Casos históricos e recentes comprovados de SIR no Brasil e algumas características (Marza *et al.*, 1999a; Assumpção *et al.*, 2002).

N.	Reservatório (estado)	Altura da barragem (m)	Prof. máxima (m)	Volume do lago (km ³)	Início do enchimento	Tipo de sismicidade	Maior evento	
							Mag. (m _b)	I ₀ (MM)
1	Porto Colômbia & Volta Grande (MG/SP)	40 & 45	35 & 37	1,46 & 2,30	1973 & 1973	Inicial	4,2	VI-VII
2	Nova Ponte (MG)	142	132	12,8	1993	Inicial; Atrasada	4,0	VI
3	Cajuru (MG)	23	20	0,20	1954	Atrasada	3,7	VI
4	Capivara (PR/SP)	60	55	10,5	1976	Inicial; Atrasada	3,7	VI
5	Tucuruí (PA)	106	90	45,8	1984	Inicial; Atrasada	3,6	IV-V
6	Balbina (AM)	42	35	17,5	1987	Inicial	3,4	-
7	Miranda (MG)	85	82	1,14	1997	Inicial; Atrasada	3,3	V-VI
8	Paraibuna-Paratinga (SP)	98 & 104	90	4,74	1974 & 1976	Inicial	3,0	IV
9	Jaguari (SP)	67	53	1,5	1969	Atrasada	3,0	V-VI
10	Capivari-Cachoeira (PR)	61	58	0,18	1970	Inicial	<3	VI
11	Açu (RN)	31	31	2,4	1985	Atrasada	3,0	IV?
12	Serra da Mesa (GO)	150	146	54,4	1996	Inicial	2,2	-
13	Marimbondo (MG/SP)	90	86 ?	6,15	1975	Inicial	2,0 M _L	N.S.
14	Sobradinho (BA)	43 ?	40	34,1	1977	Inicial	1,9 M _L	N.S.
15	Emborcação (MG/GO)	158	154	17,5	1981	Inicial	1,6 M _L	N.S.
16	Xingó (SE/AL)	140	110 ?	3,8	1994	Inicial	1,7	III-IV

Nota: N.S. – não sentido; I₀ é a intensidade epicentral máxima; mag é a magnitude.

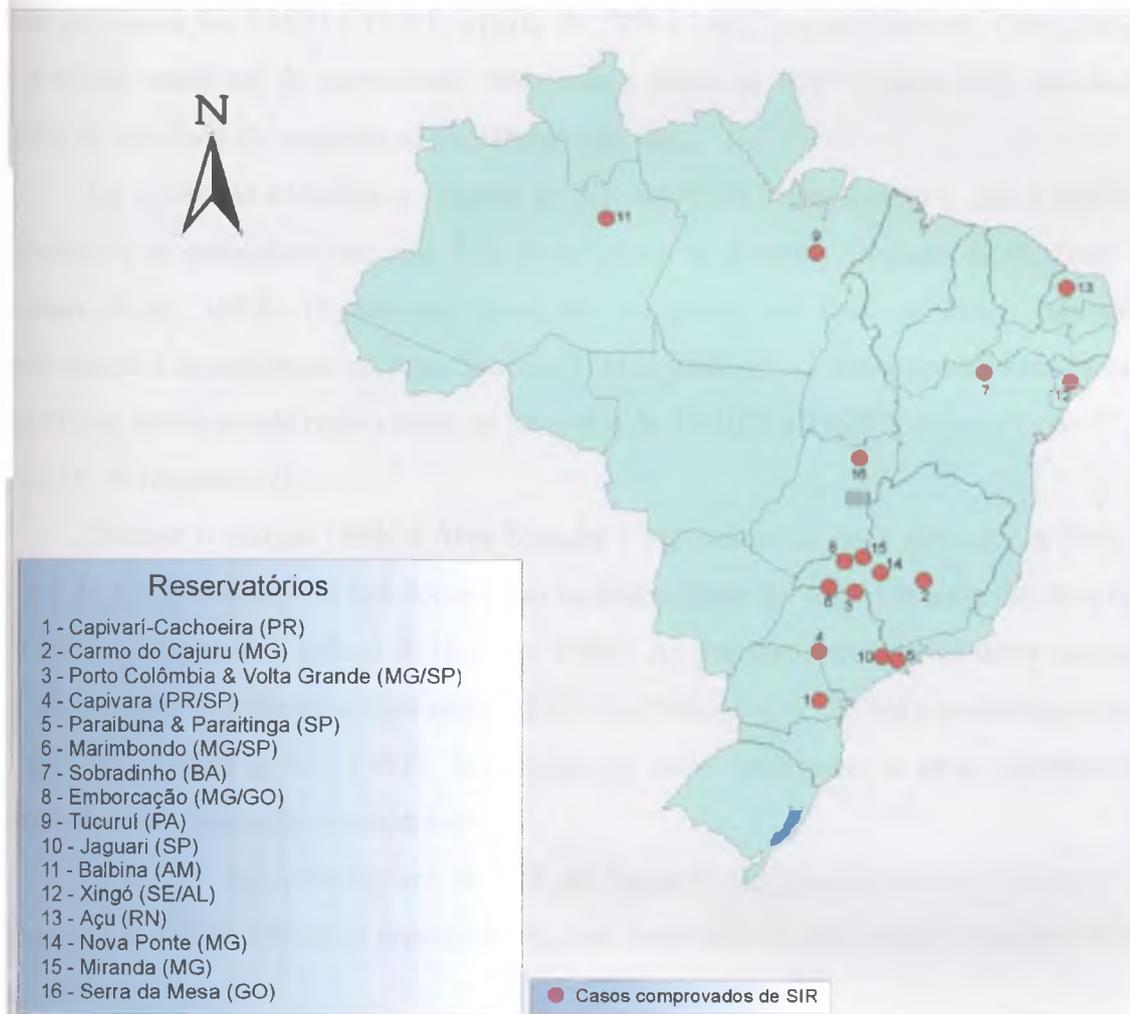


Figura 2.4 – Distribuição geográfica dos casos comprovados de SIR no Brasil (Marza *et al.*, 1999a).

A comprovação de que a sismicidade observada nas proximidades do Reservatório de Nova Ponte é de origem induzida pode ser feita por duas observações. Anteriormente ao enchimento do lago (outubro de 1993), não foram observados sismos num raio de aproximadamente 60 km da estação NP1, e apenas 4 a até 100 km, como mostra a Figura 2.5. Esta pesquisa foi feita consultando o Banco de Dados sobre a Sismicidade Brasileira (SISBRA) do Observatório Sismológico (SIS). Este banco de dados abrange eventos contidos no Boletim Sísmico Brasileiro, publicado na Revista Brasileira de Geofísica, para o qual o SIS é colaborador. Além desses eventos estão presentes informações de sismos detectados pelas estações coordenadas pelo SIS. Apesar da estação NP1 ter iniciado seu funcionamento em

1989, anteriormente a esta data o monitoramento sismográfico da região de Nova Ponte foi feito pelas estações EMB1 e FUR1, a partir de 1979 e 1982, respectivamente. Outro indicativo é a relação temporal da sismicidade observada a partir de 1994 (Figura 2.6), que mostra o início da atividade em resposta ao enchimento do lago.

Os primeiros trabalhos a respeito da SIR em Nova Ponte mostram que a sismicidade concentrou-se essencialmente em dois focos sísmicos distintos (Veloso & Huelsen, 1994; Veloso *et al.*, 1994). O primeiro deles foi localizado no final do braço esquerdo do reservatório e denominado de Área Sísmica 1. O segundo foco, denominado Área Sísmica 2, localiza-se numa ampla região entre os paralelos de 19,10°S e 19,25°S e meridianos 47,51°W e 47,76° W (Figura 2.7).

Durante o ano de 1994, a Área Sísmica 1 apresentou-se mais ativa que a Área 2, e a partir de 1995 observou-se um decréscimo na sismicidade da Área 1 e aumento na atividade da Área 2 (Figura 2.7; Veloso & Huelsen, 1995). As profundidades focais desta sismicidade foram estimadas preliminarmente entre 0,5 e 1 km (Veloso *et al.*, 1994) e posteriormente entre 1 e 7 km (Marza *et al.*, 1997). Entretanto, os erros associados a essas estimativas das profundidades focais são consideráveis.

A análise espaço-temporal da SIR de Nova Ponte permite sua classificação como sismicidade inicial e de ciclo repetitivo, ou seja, com mais de um evento principal (Marza *et al.*, 1999a).

Os eventos principais ocorreram em 21 de abril de 1995, com magnitude de 3,5 m_R e em 22 de maio de 1998, de 4,0 m_R . Suas intensidades máximas associadas foram de IV-V MM e VI MM, respectivamente, e ambos localizam-se na Área 2.

Um estudo sobre os efeitos macrossísmicos causados pelo evento de 21 de abril de 1995 foi feito por Veloso & Veloso (1995), e o mapa com as isossistas obtido é mostrado na Figura 2.8. Veloso & Marza (1996) estimaram a aceleração máxima na barragem de Nova Ponte, produzida por este sismo, entre 0,007 e 0,02 g.

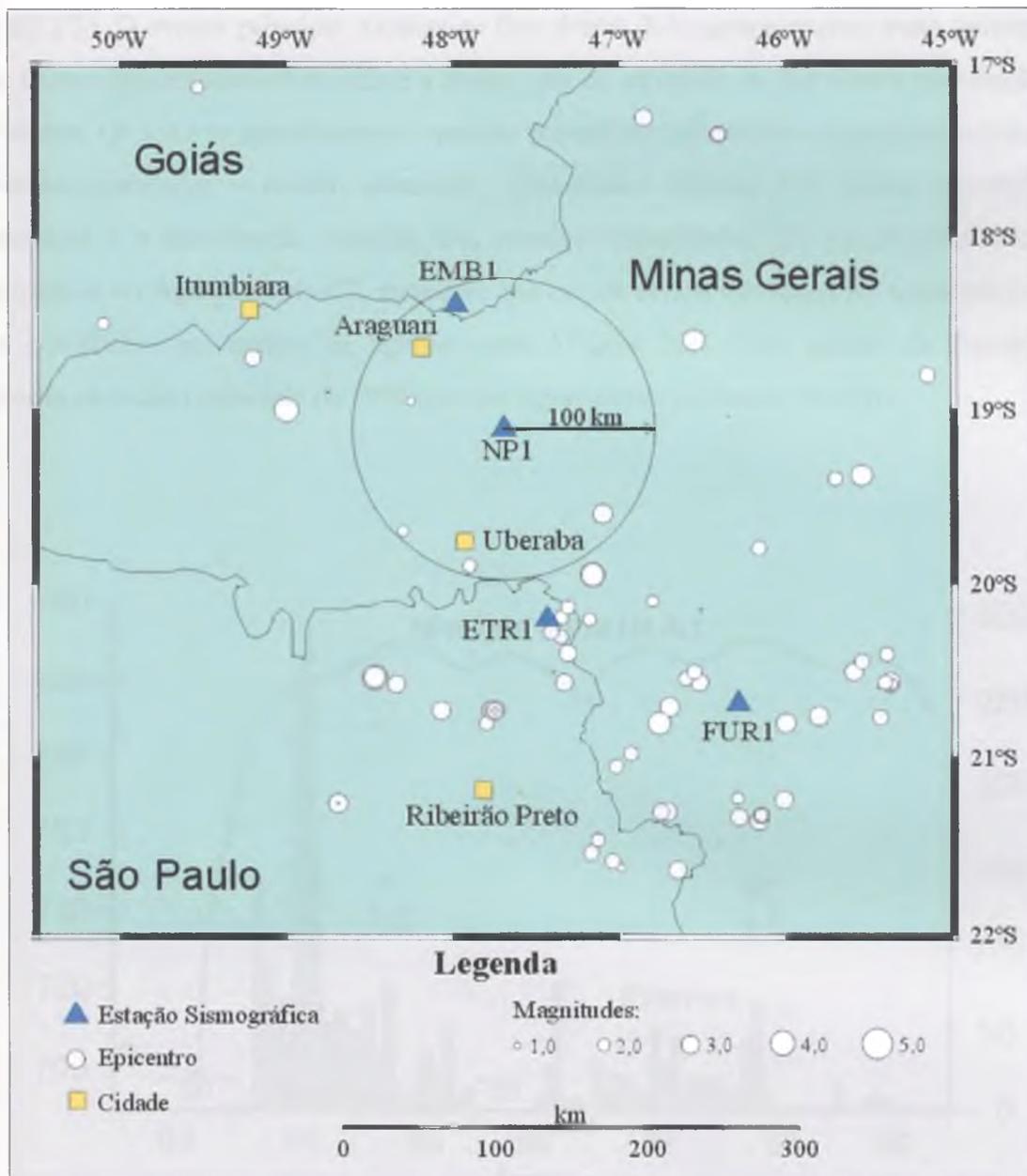


Figura 2.5 – Atividade sísmica natural na região próxima a Nova Ponte anterior a outubro de 1993. Nota-se a presença de reduzido número de eventos num raio de 100 km a partir da estação NP1, evidenciando a ausência de sismicidade natural na região de influência do Reservatório de Nova Ponte. Fonte: SISBRA-SIS.

Um estudo mais detalhado sobre o evento principal de 1998 e sismos dependentes (pré-abalos e pós-abalos) foi feito por Marza *et al.* (1999b). Nesta análise, observa-se que os eventos secundários estão distribuídos em duas áreas de concentração, denominadas C1 e C2

(Figura 2.7). O evento principal localiza-se fora destes dois agrupamentos, mais próximo do lago. Outra característica observada é a maior taxa de atividade de pré-abalos em relação aos pós-abalos. Os autores identificaram o padrão pré-abalos adiantados – quiescência sísmica – pré-abalos imediatos – evento principal – pós-abalos (Figura 2.9). Outra característica interessante é a distribuição espacial dos eventos dependentes. Os pré-abalos adiantados localizam-se no Agrupamento C2, enquanto que os pré-abalos imediatos no Agrupamento C1 e os pós-abalos em ambos os agrupamentos (Figura 2.7). Esse padrão de sismicidade associada ao evento principal de 1998 tem um significativo potencial preditivo.

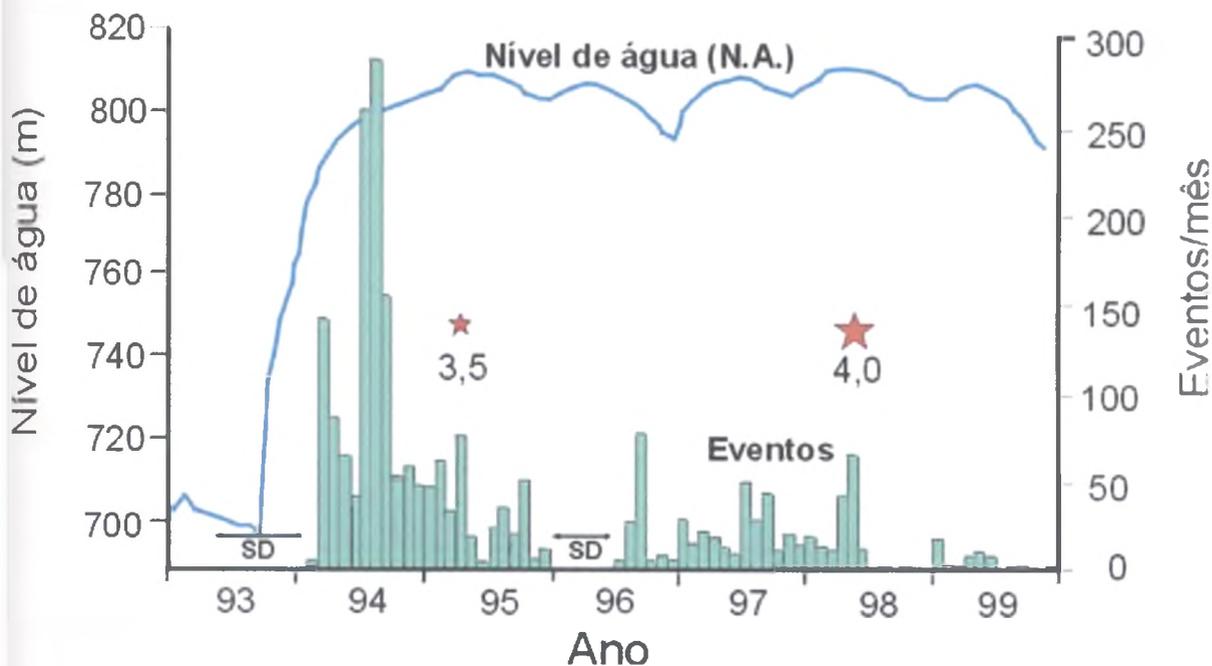


Figura 2.6 – Relação entre o número mensal de eventos induzidos em Nova Ponte, ocorridos no período de 1993 a 1999, em comparação com o nível de água do reservatório (N.A.). Os dois eventos principais de 1995 e 1998 estão mostrados com a simbologia de uma estrela. As barras verticais representam o número de eventos, enquanto que a linha contínua o valor do N.A.. A sigla SD indica períodos sem dados (Assumpção *et al.*, 2002).

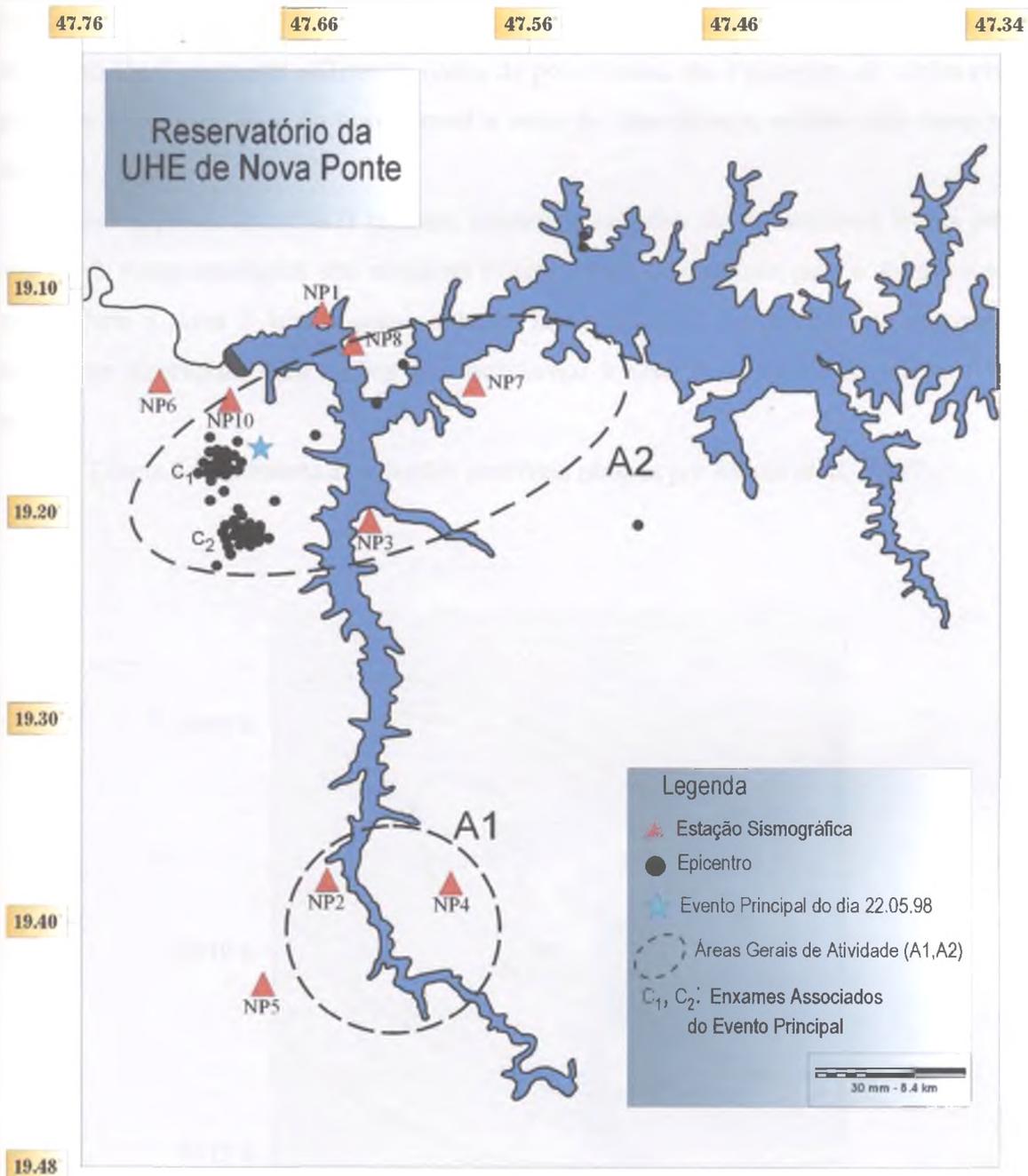


Figura 2.7 – Mapa epicentral dos agrupamentos C1 e C2 e do evento principal de 22 de maio de 1998. A1 = Área Sísmica 1; A2 = Área Sísmica 2. (Marza *et al.*, 1999b).

Alguns trabalhos propõem um mecanismo de falhamento para os sismos de Nova Ponte. Os primeiros resultados, a respeito do mecanismo focal para a Área 1, foram apresentados por Veloso *et al.* (1994). Entretanto, os mesmos são inconclusivos em virtude da pobre cobertura numérica de estações e das polaridades não serem bem separadas. Para a Área

Sísmica 2, Marza *et al.* (1997) encontraram duas soluções possíveis (Figura 2.10a) para o mecanismo focal composto utilizando dados de polaridades, em 4 estações, de vários eventos agrupados. Uma solução é do tipo normal e outra do tipo inverso, ambas com componente direcional.

Assumpção *et al.* (1997) também apresenta soluções de mecanismos focais para as áreas 1 e 2. Estes resultados são vistos na Figura 2.10b. O resultado para a Área 1 é pouco preciso. Para a Área 2 temos como solução mais provável um falhamento inverso com componente direcional. Para ambos os mecanismos o eixo P tem uma orientação SW-NE similar.

A Tabela 2.3 apresenta as soluções possíveis obtidas por Marza *et al.* (1997).

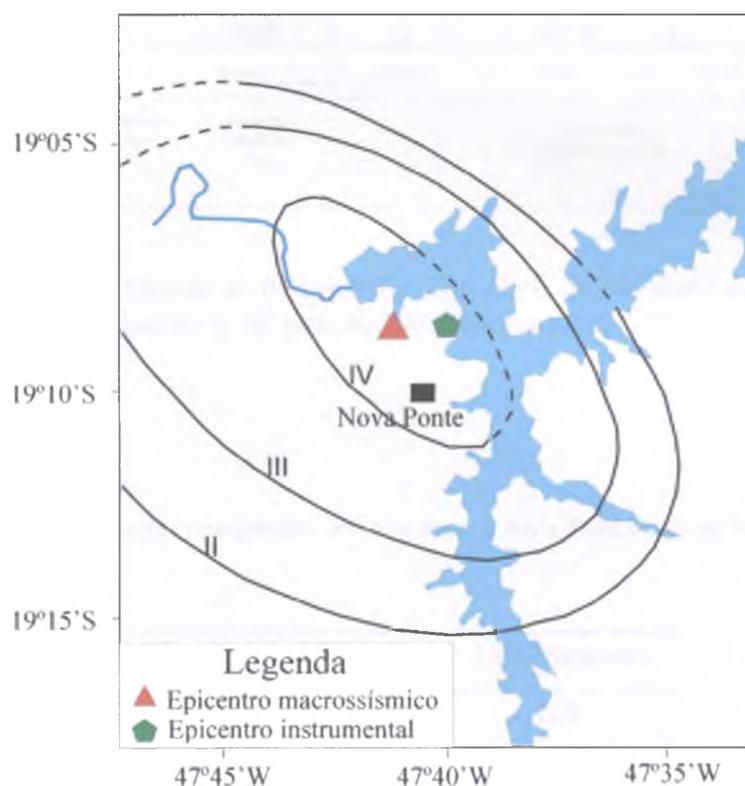


Figura 2.8 – Área afetada pelo sismo de 21 de abril de 1995 (3,5 m_R). Modificado de Veloso & Veloso (1995).

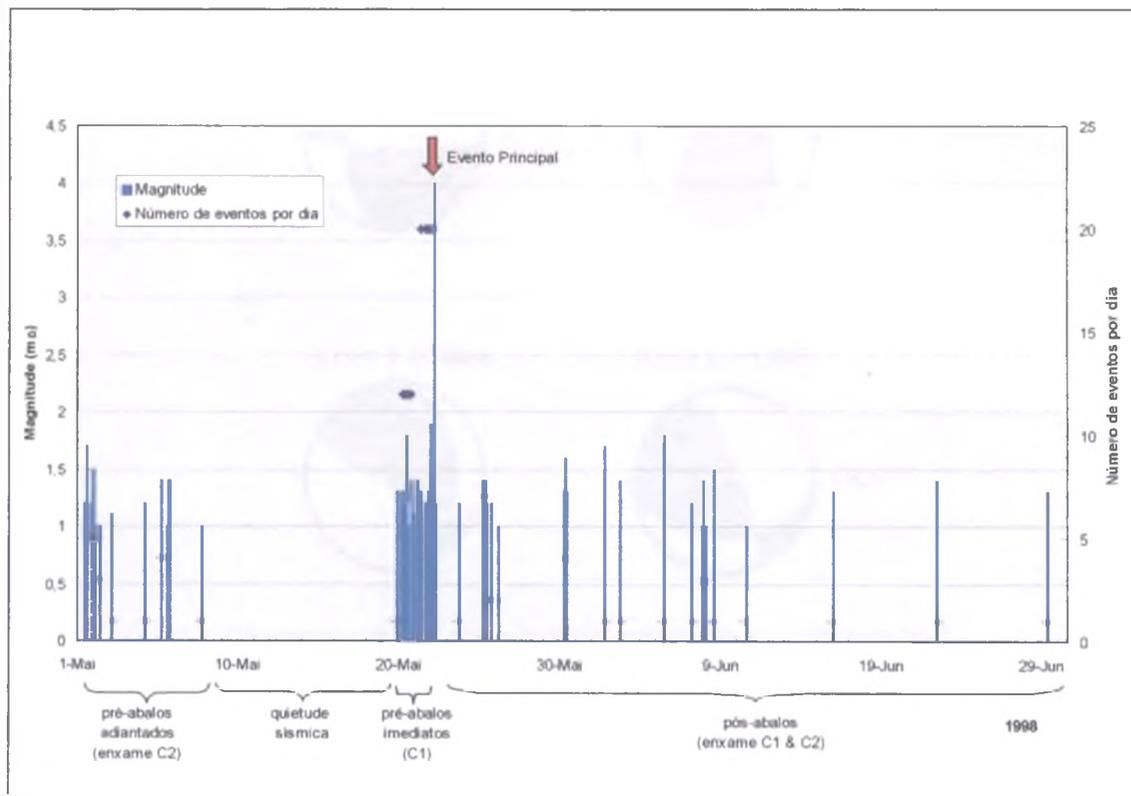


Figura 2.9 – Distribuição temporal de magnitude e taxa diária de atividade sísmica relacionada ao evento principal de 22 de maio de 1998 (Marza *et al.*, 1999b).

Tabela 2.3 – Mecanismos focais compostos obtidos para a Área Sísmica 2 de Nova Ponte (Marza *et al.*, 1997).

Direção	Mergulho	Deslizamento
190°	46°	168°
272°	99°	46°
215°	60°	130°
336°	48°	42°

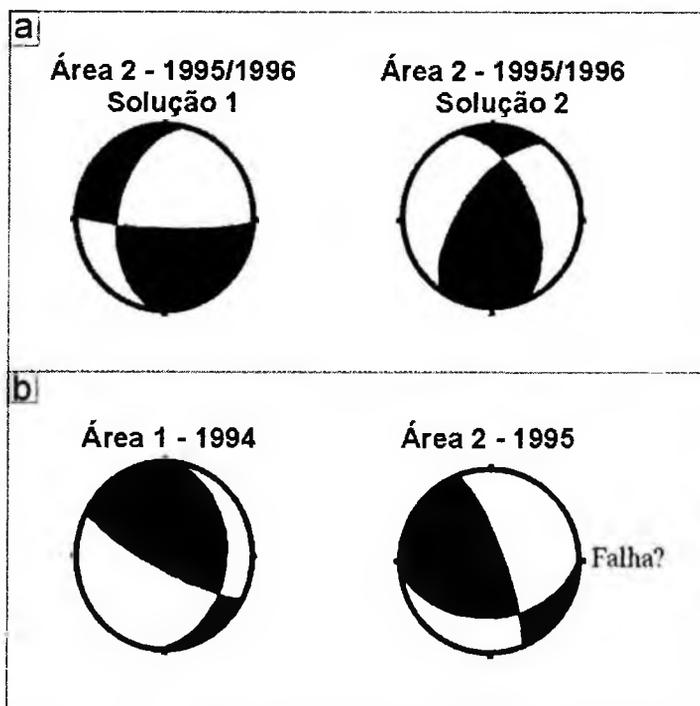


Figura 2.10 – Soluções dos mecanismos focais. (a) Soluções dos mecanismos focais obtidas por Marza *et al.* (1997) para a Área Sísmica 2, com dados de 1995 e 1996 (Tabela 2.3); (b) mecanismos focais apresentados por Assumpção *et al.* (1997) para as áreas 1 e 2, utilizando dados de 1994 e 1995, respectivamente.

CAPÍTULO 3

Aspectos Geológicos da região da UHE Nova Ponte/MG

3.1 – Introdução

O capítulo anterior forneceu informações adquiridas em diversos estudos realizados na região em questão.

Visando melhor situar o leitor no espaço e no aspecto geológico, o presente capítulo destacará as principais unidades litotectônicas observadas na região de Nova Ponte.

3.2 – Localização e Aspectos Geológicos

O Reservatório da UHE Nova Ponte (CEMIG) localiza-se no estado de Minas Gerais, na região do Triângulo Mineiro, entre os paralelos 19°00'S e 19°30' S e meridianos 46°45' W e 47°45' W (Figura 3.1). A cidade de Nova Ponte, às margens do reservatório, situa-se próxima à barragem da usina a, aproximadamente 80 km a ESE de Uberlândia e a NNE de Uberaba.

A ambiência geológica onde se encontra este reservatório caracteriza-se por estar no limite entre duas entidades litotectônicas: a Província Tocantins e a Bacia do Paraná (Figura 3.2).

A Província Tocantins é um orógeno neoproterozóico desenvolvido em resposta à convergência e colisão entre três blocos continentais: o Craton São Francisco-Congo, o Craton Amazônico e o Craton Paraná ou Craton Rio de la Plata (Araújo Filho, 1999; Cordani *et al.*, 2000). Compõem esta província as faixas de dobramentos Paraguai, Araguaia e Brasília. A área em estudo está localizada no segmento sul da Faixa Brasília, onde são observadas rochas do Complexo Granito-gnáissico (Arqueano-Paleoproterozóico), dos grupos Canastra e Paranoá (Meso/Neoproterozóico) e dos grupos Araxá, Ibiá e Bambuí (Neoproterozóico).



Figura 3.1 – Mapa de localização do lago da UHE Nova Ponte (azul), no Triângulo Mineiro, e cidades próximas no estado de Minas Gerais.

A Bacia do Paraná é uma extensa depressão intracratônica, preenchida por um pacote de rochas sedimentares de idade Siluriana a Triássica e outro pacote de rochas vulcano-sedimentares (Jurássico Superior ao Cretáceo), sendo este último relacionado à abertura do Oceano Atlântico (COMIG, 2000). A Bacia do Paraná, na região de Nova Ponte, é representada pelas litologias dos grupos São Bento (Jurássico a Cretáceo) e Bauru (Cretáceo). Do primeiro grupo são observadas exposições de rochas das formações Botucatu e Serra Geral, enquanto que apenas a Formação Uberaba constitui o Grupo Bauru na região.

Sobre as unidades do segmento meridional da Faixa Brasília e da Bacia do Paraná foram depositadas as litologias da Unidade Nova Ponte (Terciário), além da cobertura detrítica-arenosa (Terciário a Quaternário) e de aluviões recentes (Quaternário).

3.2.1 – A Faixa Brasília

A Faixa Brasília é um cinturão orogênico Brasileiro localizado na parte leste da Província Tocantins. Esta faixa móvel se estende por mais de 1000 quilômetros na direção N-S, ao longo da margem oeste do Craton São Francisco (Figura 3.2). As unidades sedimentares e metassedimentares da Faixa Brasília mostram deformação tectônica e metamorfismo progressivamente maiores em direção a oeste. São observados sedimentos não metamorfisados na região cratônica, a leste, e um aumento no grau metamórfico em direção ao interior da faixa, onde encontram-se rochas que sofreram metamorfismo em fácies anfíbolito ou mesmo granulito.

Esta zonação tectônica permitiu a individualização da Faixa Brasília, de leste para oeste, em: Zona Cratônica, Zona Externa e Zona Interna (Cordani *et al.*, 2000). Os contatos entre estas zonas são feitos por meio de grandes falhas regionais orientadas N-S.

Um lineamento de direção WNW-ESE, conhecido como Sintaxe dos Pirineus, subdivide a Faixa Brasília em segmentos norte e sul. Estes segmentos apresentam características bem distintas tanto tectonicamente quanto em termos metamórficos e deformacionais (Araújo Filho, 1999; Cordani *et al.*, 2000).

A região de Nova Ponte localiza-se no segmento sul da Faixa Brasília, onde se observam deformação e metamorfismo intensos, com complexos sistemas de empurrões

envolvendo os grupos Araxá, Canastra, Ibiá e Paranoá (Cordani *et al.*, 2000). As estruturas maiores mostram direções preferencialmente NW-SE, em resposta à compressão principal orientada SW para NE, que resultou na colisão entre os cratons São Francisco e Rio de la Plata.

As diversas unidades que compõem a Faixa Brasília na região de Nova Ponte são: Complexo Granito-gnáissico e grupos Canastra, Paranoá, Araxá, Ibiá e Bambuí. A seguir serão apresentadas algumas informações sobre cada unidade litotectonoestratigráfica.

Complexo Granito-gnáissico

Na área em estudo, o Arqueano/Paleoproterozóico é representado pelo Complexo Granito-gnáissico (Figura 3.3). Este complexo é composto por gnaisses bandados, micáceos e quartzo-feldspáticos, granito maciço e gnaissificado, milonito gnaiss, milonito xisto, filonito de rochas graníticas e básicas, anfíbolitos e ultrabásicas xistificadas (CEMIG, 1990).

Os gnaisses da série milonítica ocorrem em zonas de cisalhamento, que constituem grandes traços estruturais direcionados para NW (Figura 3.3), importantes nas implantações das entidades geotectônicas do Proterozóico e do Fanerozóico (CEMIG, 1990).

A esta unidade, que constitui o embasamento das litologias da Faixa Brasília, pode-se correlacionar um maciço siálico chamado de Bloco Paraná (COMIG, 2000), que representaria o embasamento da Bacia do Paraná e que atualmente estaria recoberto pelo seu pacote vulcano-sedimentar. Brito Neves & Cordani (1991) mencionam a presença de fragmentos “cratônicos” menores, representados por um embasamento siálico antigo (Paleoproterozóico ou Arqueano) de certa forma reativado pela orogenia Brasileiro, e que constituiriam fragmentos produzidos por rifteamento e dispersão de supercontinentes antigos. Segundo Araújo Filho (1999), dados geofísicos sugerem a presença de um pequeno bloco cratônico sob as coberturas fanerozóicas da Bacia do Paraná, chamado Craton Rio de la Plata.

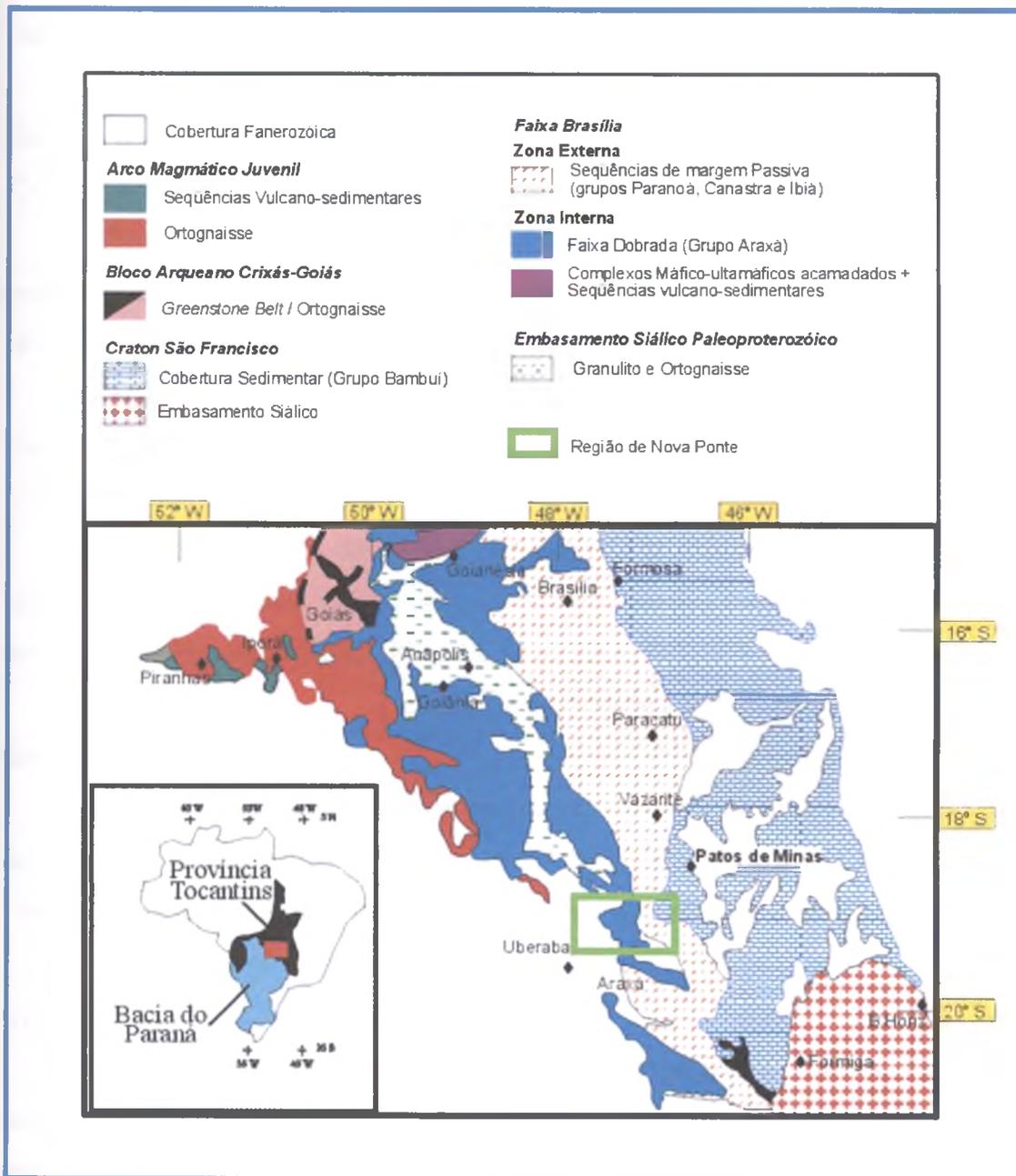


Figura 3.2 – Mapa de localização da região de Nova Ponte com relação à Província Tocantins, a leste, e a Bacia do Paraná, a oeste (Cordani *et al.*, 2000).

Grupo Canastra

Sobre as rochas do Complexo Granito-gnáissico encontram-se metassedimentos detríticos psamíticos (quartzitos) e pelíticos (filitos), metamorfisados na fácies xisto-verde (Cordani *et al.*, 2000), que constituem o Grupo Canastra (Meso/Neoproterozóico).

Na área em estudo, as litologias deste grupo ocupam uma pequena parcela da porção oeste (Figura 3.3), representada por quartzitos puros e micáceos, filitos quartzosos e carbonáticos, com predominância dos quartzitos (CEMIG, 1990).

O metamorfismo que afetou estas rochas atingiu fácies xisto verde baixo. Estruturalmente, exibem dobramento e três padrões de juntas inclinadas direcionadas para NNW e NNE.

O Grupo Canastra é considerado um equivalente metamorfisado do Grupo Paranoá, ambos representando seqüências típicas de margem passiva formadas na margem oeste do continente São Francisco-Congo (Pimentel *et al.*, 1999).

Grupo Paranoá

Na região em estudo, este grupo está representado por metarenitos e metassiltitos, que ocorrem apenas numa restrita porção no extremo NE da área (Figura 3.3). A idade deste grupo é tida como meso a neoproterozóica e o ambiente de sedimentação é de margem passiva.

Grupo Araxá

O Grupo Araxá (Figura 3.3), de idade neoproterozóica, consiste basicamente de quartzito micáceo e micaxisto (calcoxisto, muscovita-quartzo xisto, muscovita-clorita xisto, biotita-granada xisto, estaurolita xisto e xisto feldspático). A relação entre os grupos Canastra e Araxá ainda não é clara, sendo considerados atualmente como equivalentes laterais (Cordani *et al.*, 2000).

A presença de rochas vulcânicas como anfibolitos (metabasaltos), meta-andesitos e metariolitos, são evidências do caráter vulcano-sedimentar da seqüência Araxá (Cordani *et al.*, 2000).

Algumas intrusões de corpos gabróides anfibolitizados podem ser observadas (Figura 3.3).

O provável ambiente deposicional para os micaxistos e quartzitos do Grupo Araxá é marinho turbidítico de águas profundas, no caimento da plataforma continental, onde os anfibolitos finos e os metassedimentos pelíticos carbonáticos seriam evidências de expansão de fundo oceânico durante a sedimentação deste grupo (Cordani *et al.*, 2000).

Mapa Geológico da Região da UHE Nova Ponte - MG

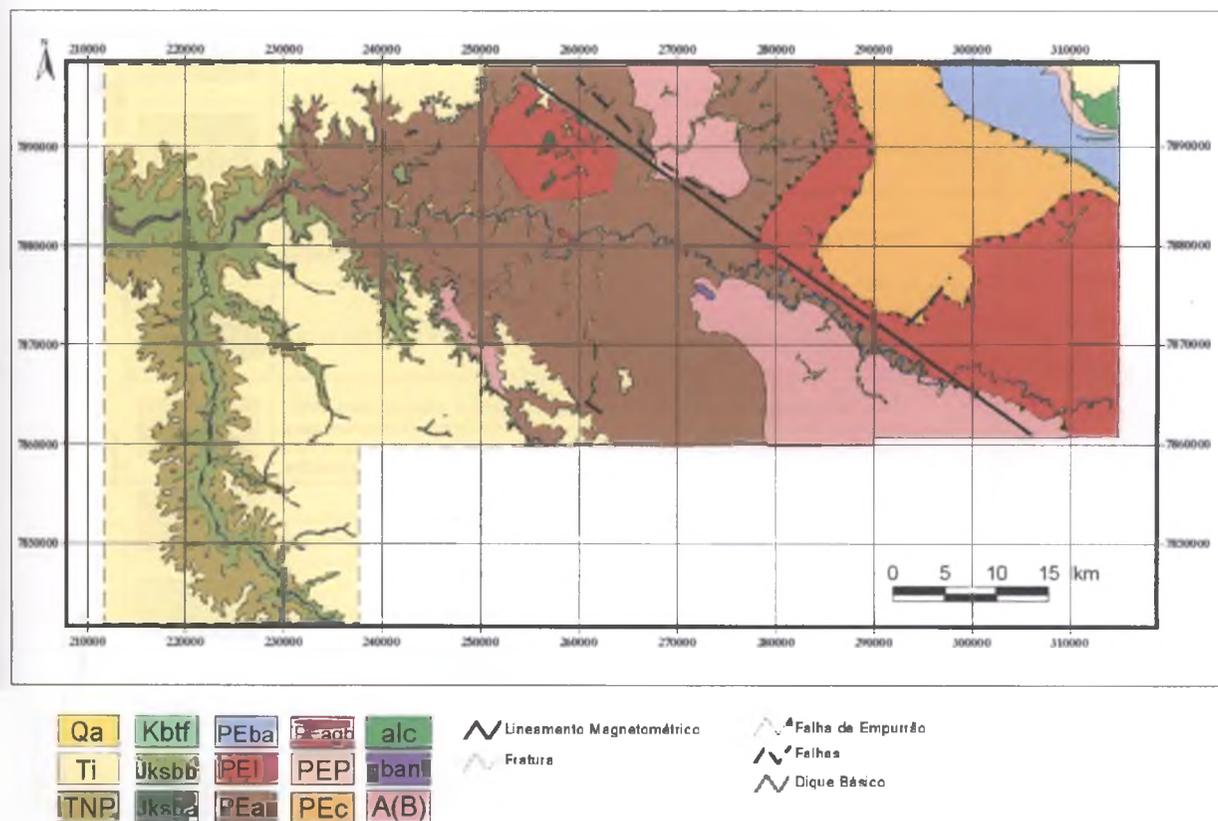


Figura 3.3 – Mapa geológico da região da UHE Nova Ponte (modificado de CEMIG, 1990).

Fanerozóico	Cenozóica	Quaternária	Qa	Aluviões recentes: areia, cascalho e argila	
			Ti	Unidade não diferenciada: cobertura detrítica arenosa	
		Terciária	TNP	Unidade Nova Ponte: terraços fluviais com níveis de cascalho e areia, subordinadamente coluviões	
	Mesozóica	Cretáceo		alc	Intrusivas Alcalinas: alcalinas em geral
				Kbtf	GRUPO BAURU Tufitos e aglomerados vulcânicos
		Jurássico		Jksbb	GRUPO SÃO BENTO Formação Serra Geral: basalto vítrófilo maciço ou amigdaloidal contendo localmente na base níveis delgados de tufitos
				Jksba	Formação Botucatu: arenito puro quartzo com níveis de conglomerados, breccias sedimentares e localmente com contribuição tufácea no topo
	Proterozóico	Superior		PEagb	GRUPO ARAXÁ Corpos gabróides anfibolitizados ou xistificados e localmente xistos gnaissóides
				PEax	Clonita-tremolita xisto, tremolito, quartzo-clonita-tremolita-muscovita xisto, quartzo-clonita-muscovita xisto com ou sem silimanita, quartzo-biotita-clonita-granada xisto localmente gnaissóide, quartzo-clonita-senocita xisto localmente granatífero e anfibolitos
				PEI	GRUPO IBIÁ Quartzo-senocita-clonita xisto associado ou não a rochas finamente laminadas da unidade PEaxI
Médio			PEba	GRUPO BAMBUÍ Ardosia, marga e metapelito	
			PEP	GRUPO PARANOÁ Metarenito e metassiltito	
			PEc	GRUPO CANASTRA Quartzitos puros e micáceos e filitos quartzo-senocítico-clorítico e quartzo-senocítico-clorítico carbonático	
			gbanf	Corpos gabróides anfibolitizados	
Arqueano		A(B)	COMPLEXO GRANÍTICO-GNÁISSICO Gnaisses a duas micas, quartzo-biotita-clonita-plagioclásio gnaisses, quartzo-plagioclásio-biotita-muscovita-epidoto gnaisses, milonito gnaisses, anfibolitos laminados, granito leucocrático maciço e gnaissificado		

Figura 3.3 - (Continuação) Legenda para o mapa geológico da região da UHE Nova Ponte (modificado de CEMIG, 1990).

A principal estrutura planar é a foliação direcionada preferencialmente para NW, de baixo ângulo, associada a empurrões com direção de transporte para o Craton São Francisco (CEMIG, 1990; Pimentel *et al.*, 1999).

Dados de gravimetria mostram falhas em leque que convergem para as regiões de Nova Ponte e Perdizes (Figura 3.4). As rochas do Grupo Araxá exibem três padrões de juntas tectônicas sub-verticais e verticais direcionadas para NW, NE e NS, que sofreram reativações durante o Fanerozóico (CEMIG, 1990).

O retrometamorfismo imposto às rochas do Grupo Araxá foi intenso. As paragêneses minerais anteriores à fase retrometamórfica indicam metamorfismo da fácies de transição do xisto verde alto ao epidoto-anfibolito baixo, progressivo de leste para oeste.

Grupo Ibiá

Os sedimentos do Grupo Ibiá foram depositados em um ambiente marinho profundo, ainda no Neoproterozóico, podendo ser um equivalente estratigráfico do Grupo Araxá (Cordani *et al.*, 2000).

O Grupo Ibiá pode ser subdividido em Formação Cubatão (na base) composta por diamictitos, e Formação Rio Verde (no topo) representada essencialmente por filito calcífero ou calco xisto com laminações quartzosas e algumas intercalações de quartzito fino e filito cinza localmente carbonático (Cordani *et al.*, 2000). Apenas a Formação Rio Verde é observada na região de Nova Ponte (Figura 3.3), sendo identificados apenas quartzo-sericitá-clorita xistos (CEMIG, 1990).

Grupo Bambuí

O Grupo Bambuí é composto por sedimentos pelíticos e carbonáticos que ocupam todo o lado leste da Faixa Brasília e cobrem grandes áreas do Craton São Francisco.

A idade de suas rochas ainda é tema de debate, estando entre uma larga faixa entre 950 e 600 Ma. (Cordani *et al.*, 2000).

Na região de Nova Ponte o Grupo Bambuí é representado por ardósias, margas e metapelitos, fazendo contato tectônico (falha de empurrão) com os sedimentos do Grupo Canastra (Figura 3.3).

O provável ambiente deposicional das litologias deste grupo é de plataforma estável.

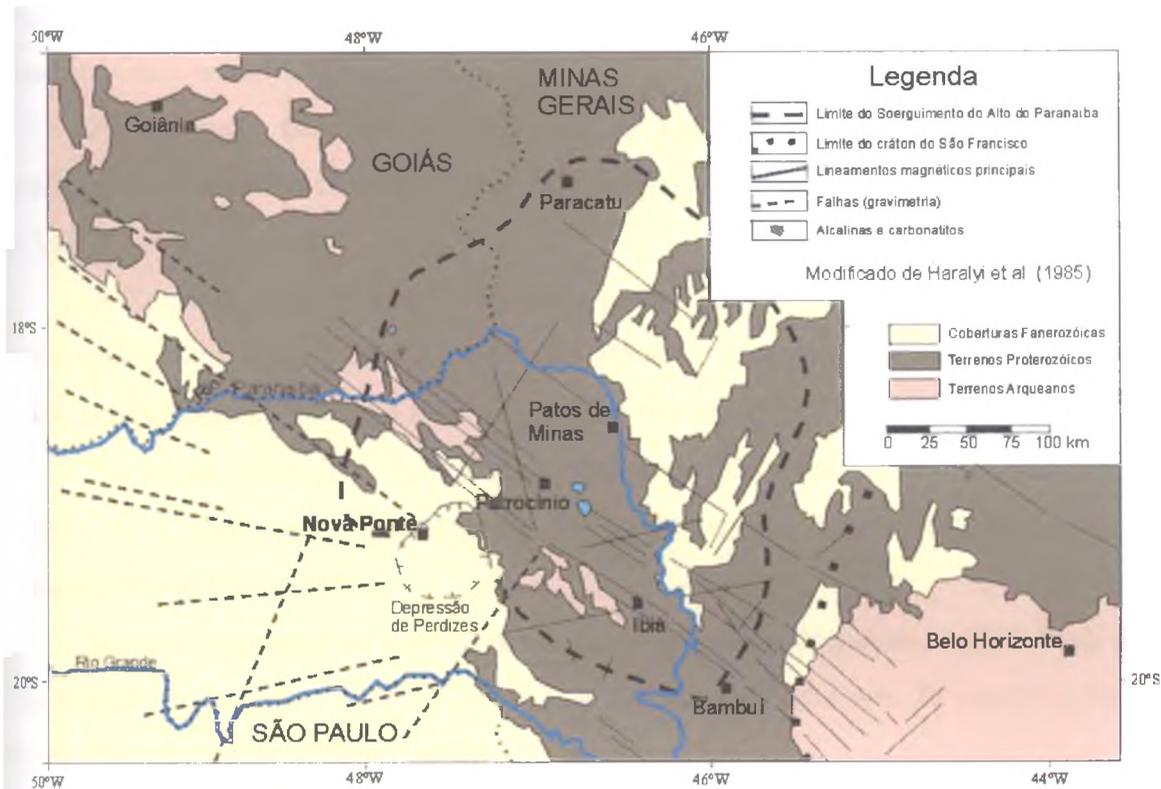


Figura 3.4 – Mapa geológico da região do triângulo mineiro, mostrando os elementos estruturais individualizados com informações geofísicas. Modificado de Haralyi *et al.* (1985).

3.2.2 - Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná é representada, na região de Nova Ponte, pelo Grupo São Bento e pelo Grupo Bauru.

Grupo São Bento

Este grupo é constituído pelas formações Botucatu e Serra Geral. A Formação Botucatu, de idade Jurássica Superior, é constituída de arenitos, em geral finos, com pouca

matriz e elevado grau de arredondamento, mostrando estratificações cruzadas de grande porte. Estas características sugerem deposição eólica em ambiente desértico (Cordani *et al.*, 2000). Mais restritamente podem ocorrer depósitos de areias conglomeráticas e conglomerados sub-aquosos (CEMIG, 2000). Em direção ao topo seus sedimentos intercalam-se aos derrames basálticos da Formação Serra Geral.

A Formação Botucatu depositou-se, na área, tanto sobre o Complexo Granito-gnáissico e o Grupo Araxá quanto sobre e interdigitada aos basaltos da Formação Serra Geral (CEMIG, 1990).

A Formação Serra Geral é predominantemente constituída por derrames basálticos que estão sobrepostos aos arenitos da Formação Botucatu. A maior parte deste vulcanismo de bacia intracontinental apresenta idade entre 140 e 100 Ma.

As rochas vulcânicas da Formação Serra Geral são representadas, na área em estudo (Figura 3.3), unicamente por basaltos de granulometria fina e estrutura maciça ou amigdaloidal (CEMIG, 1990).

A maior espessura da camada basáltica na área é de 175 metros, registrada no sítio de implantação da barragem de Nova Ponte. Essa espessura diminui para 20 metros ao longo do limite oriental da área (CEMIG, 1990)

Estruturalmente, o Grupo São Bento exhibe juntas e pequenas falhas geradas na fase distensiva, devidas à tectônica epirogênica. Nas rochas basálticas exibem-se, além destas, juntas singenéticas, isto é, geradas quando da solidificação da lava.

Grupo Bauru

Este grupo é dividido em Formação Uberaba, constituída por leques aluviais conglomeráticos, e Formação Marília, composta por calcários lacustres e por arenitos e conglomerados calcíferos. Ocorrem, na área em estudo, somente reduzidas exposições de rochas tufáceas da Formação Uberaba, discordantemente sobre os grupos São Bento e Araxá (CEMIG, 1990).

O ambiente de sedimentação do Grupo Bauru compreende sistemas fluviais e lacustres, em clima semi-árido.

Ao longo de extensas zonas de cisalhamento direcionadas para NW (Figura 3.4) que se mostram ativas até, pelo menos, o Terciário Inferior, injetaram-se magmas alcalinos. Estas

zonas de fraqueza estão relacionadas ao soerguimento do Alto Paranaíba, feição estrutural que é um alto estrutural e morfológico delimitador das bacias do São Francisco e Paraná. Este arcabouço impôs a configuração NW dada à Bacia do Paraná nesta região (CEMIG, 1990).

A região de Nova Ponte está no limite do soerguimento e é balizada pela depressão gravimétrica de Perdizes, sendo esta sub-superficialmente preenchida por rochas alcalinas similares às de Catalão e Araxá (Figura 3.4). Estas suítes alcalinas desenvolveram-se contemporaneamente à sedimentação continental, com expressiva contribuição vulcanoclástica da Formação Uberaba (CEMIG, 1990).

3.2.3 - Coberturas Detríticas Recentes

Sobre as litologias tanto da Faixa Brasília (Grupo Araxá) quanto da Bacia do Paraná (grupos São Bento e Bauru) depositaram-se os sedimentos terciários inconsolidados da Unidade Nova Ponte (Figura 3.3). Estes sedimentos são representados por níveis de cascalheiras entremeados de sedimentos silto-arenosos a níveis argilosos avermelhados e esverdeados, com até 60 metros de espessura (CEMIG, 1990). A área de ocupação dos sedimentos da Unidade Nova Ponte acompanha a direção NW do bordo oriental da Bacia do Paraná na região do Triângulo Mineiro (Figura 3.3).

Sobre a Unidade Nova Ponte repousa uma cobertura detrítica arenosa Cenozóica, constituindo extensas chapadas.

Em quase todos os cursos d'água são encontradas áreas aluvionares quaternárias, que são camadas de argila sotopostas a uma cobertura de areias inconsolidadas e sobrepostas a um nível de cascalho com seixos arredondados de grande porte (CEMIG, 1990).

CAPÍTULO 4

A Rede Sismográfica de Nova Ponte

4.1 – Introdução

Para o estudo da sismicidade natural ou induzida de determinada região, como determinação de epicentros, profundidade dos sismos, mecanismo focal, análises estatísticas, é imprescindível a presença de uma rede de estações sismográficas com instrumentação e geometria adequados para a obtenção de resultados confiáveis. Além disso, é de vital importância conhecer as características dos instrumentos utilizados (tipo de sensores e registradores, polaridades das estações, ganho dos amplificadores, filtros etc.) e evitar mudanças freqüentes nos instrumentos ou em suas configurações.

Em Nova Ponte, tanto a geometria quanto os equipamentos da rede sismográfica e suas características sofreram várias mudanças ao longo dos sete anos a que se refere este trabalho. Dessa forma, os resultados obtidos e apresentados nos capítulos subseqüentes são relativos a determinados períodos em que os equipamentos e/ou suas configurações permaneceram inalterados e os dados puderam ser agrupados em uma mesma população estatística.

Tendo já adquirido as características geológicas e informações de sismologia nos capítulos anteriores, resta agora destacar a instrumentação utilizada na aquisição dos dados antes de analisá-los e processá-los (capítulos 5 e 6).

Portanto, no presente capítulo são apresentadas as características da Rede Sismográfica de Nova Ponte, como instrumentação e geometria, além de informações a respeito do período de monitoramento pré-enchimento.

4.2 – Monitoramento pré-enchimento

Numa reunião realizada em Paris/França na década de 70, um grupo de pesquisadores da UNESCO recomendou que a área de influência do lago de uma grande usina hidrelétrica (100 metros de altura da barragem e/ou 1,0 km³ de volume) fosse monitorada sismograficamente pelo menos 3 anos antes de seu enchimento (Gupta, 1992, p.319).

Seguindo esta recomendação, iniciou-se o programa de auscultação sísmica na área da UHE Nova Ponte no final da década de 80. A primeira estação a operar na área (NP1) foi instalada em fevereiro de 1989, por meio de um convênio entre a CEMIG e o Observatório Sismológico (SIS). Anteriormente a esta data, entretanto, um monitoramento sismográfico da região em estudo já vinha sendo feito com a presença de estações localizadas a distâncias regionais (Figura 4.1). A estação EMB1 (UHE – Emborcação, pertencente à CEMIG), foi instalada em novembro de 1979. Esta estação está localizada a aproximadamente 85 km de NP1. Outra estação cujo início de operação antecedeu a instalação de NP1 é FUR1 (UHE-Furnas, de FURNAS), que funciona na região desde 1982 e dista, aproximadamente, 220 km de Nova Ponte. Qualquer sismo com magnitude igual ou superior a 1,0 que ocorresse na região de Nova Ponte seria detectado por EMB1 e, acima de 1,8 também por FUR1.

4.3 – Distribuição Espacial das Estações Sismográficas

O início da SIR em Nova Ponte (janeiro de 1994) não foi registrado pela estação NP1 devido a problemas em seu funcionamento. Com a continuidade e intensificação desta sismicidade, duas outras estações foram instaladas para monitorarem, juntamente com NP1, esta atividade.

Em 23 de março de 1994, entrou em operação a segunda estação, NP2, nas proximidades da Área Sísmica 1, região com maior ocorrência de eventos naquele momento (Figura 4.2). A terceira estação, NP3, foi instalada próxima a NP1 para auxiliar na detecção dos eventos que ocorriam em outra região, denominada Área Sísmica 2 (Figura 4.2). Como a Área 1 era mais ativa, mais duas estações, NP4 e NP5, foram instaladas nesta área (Figura 4.2).

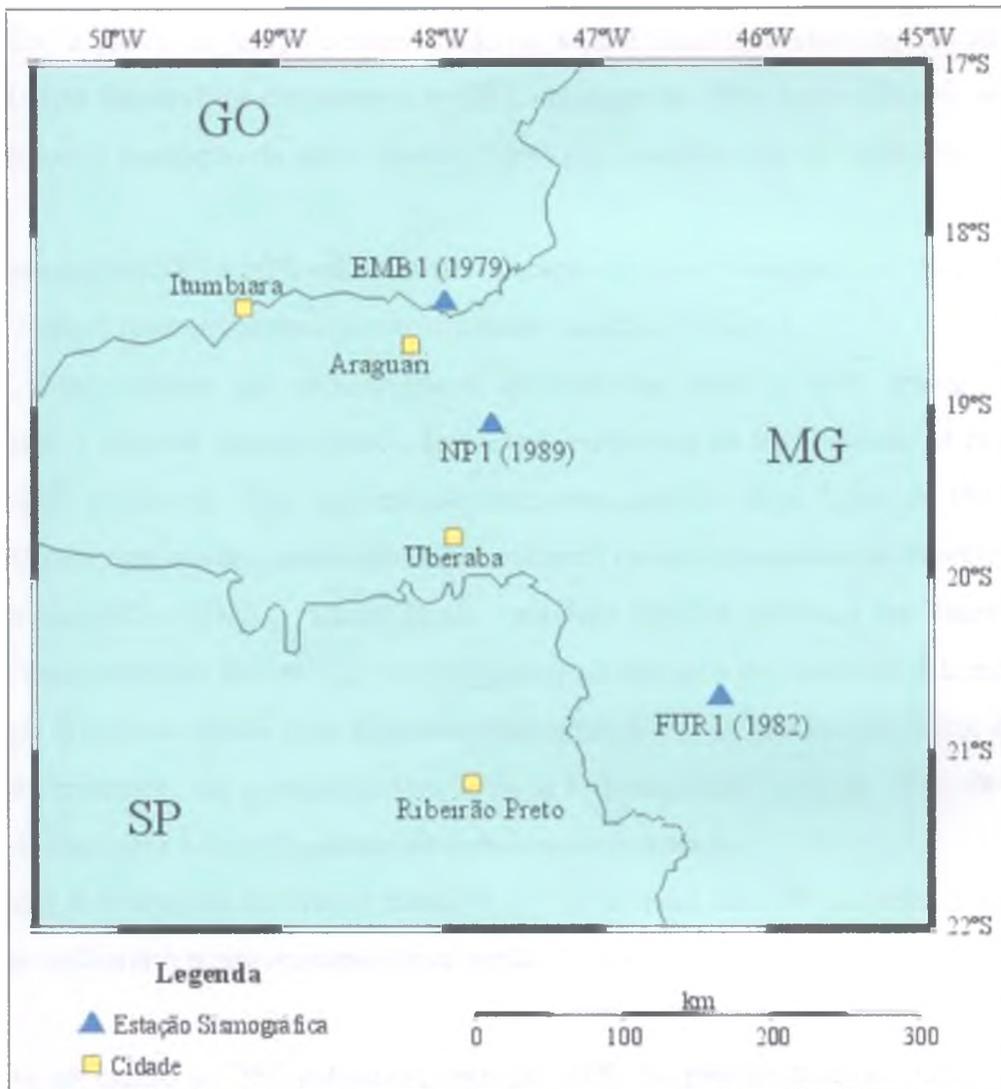


Figura 4.1 – Mapa com a localização da estação NP1 e demais estações na região de Nova Ponte, que contribuíram para o monitoramento pré-enchimento. O valor em parênteses indica o ano de início de operação da estação.

O fato de a atividade sísmica ocorrer simultaneamente em duas áreas distintas, juntamente com o reduzido número de equipamentos disponíveis e as dificuldades em se encontrar bons afloramentos na região, definiram a geometria da rede sismográfica local. Esta geometria não é ideal com relação ao número de estações nem tão pouco com relação à disposição das mesmas. Um número maior de sensores foi concentrado nas proximidades da

Área Sísmica 1 pelo fato desta ser a região mais ativa na época, enquanto apenas 2 estações foram localizadas ao redor da Área 2 (NP1 e NP3).

Com o passar do tempo a sismicidade na Área 2 aumentou enquanto que na Área 1 diminuiu. Este fato levou à desativação de NP2, em julho de 1994, e de NP5 em outubro do mesmo ano, e a instalação da sexta estação (NP6) nas proximidades da região mais ativa na época.

As estações NP7 e NP8 entraram em operação nos dias 16 de maio e 12 de dezembro de 1995, respectivamente, ambas nas proximidades da Área Sísmica 2.

A única estação que monitorava a atividade da Área 1, NP4, apesar de gerar sismogramas e registrar alguns eventos, apresentou problemas de sensibilidade no período de julho de 1995 a julho de 1996. Esta estação funcionou até o dia 26 de junho de 1997, sendo desativada para que sua instrumentação fosse utilizada no monitoramento do Reservatório da UHE Miranda/MG (CEMIG). Dessa forma, esta área sísmica passou a ser monitorada a distância pelas estações da Área 2, o que implicou no aumento do limiar de detectabilidade (magnitude do menor evento a ser detectado pelas estações) e na diminuição da eficiência na localização epicentral dos eventos da Área Sísmica 1. Somente em junho de 1998 NP4 voltou a operar, melhorando o monitoramento da sismicidade da Área 1.

Com a ocorrência do evento principal de 22 de maio de 1998 na Área 2, tornou-se necessário melhorar o monitoramento desta região. Para isso foram instaladas as estações NP9 e NP10.

Em novembro de 1998 entrou em operação NP9, nas proximidades da Área Sísmica 2 (Figura 4.2), mas esta estação permaneceu muito pouco tempo em atividade, sendo desativada em 16 de março de 1999. A estação NP10 foi localizada no interior da estação de microondas de Nova Ponte.

Observa-se que a geometria da rede sismográfica de Nova Ponte foi alterada ao longo de todo o período de 1994 a 2000. Estas modificações se fizeram principalmente em função da variação espacial da localização dos eventos, primeiramente mais numerosos na Área 1 e posteriormente quase que totalmente concentrados na Área 2.

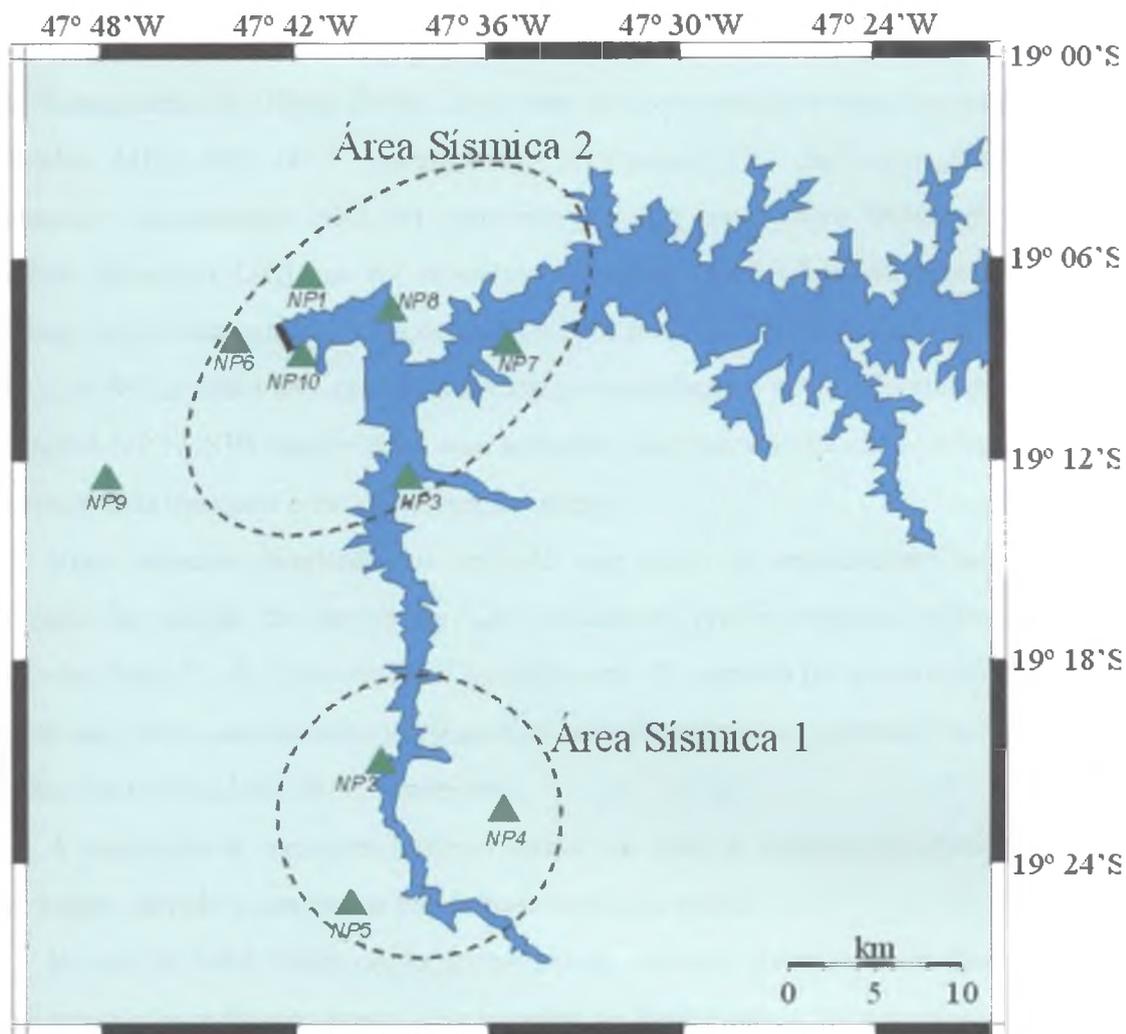


Figura 4.2 – Mapa com a localização de todas as estações que fizeram parte da Rede Sismográfica de Nova Ponte entre 1994 e 2000, assim como as áreas sísmicas 1 e 2.

4.4 – Instrumentação das Estações

Entre 1994 e 2000 dez estações fizeram parte da Rede Sismográfica de Nova Ponte, sendo que diversas tiveram sua instrumentação alterada neste período.

Desde a sua instalação até janeiro de 1994, a estação NP1 funcionou com um sensor vertical de período curto L4C (*Mark Products Ltd.*). Após a detecção de problemas de mau funcionamento o sensor foi trocado por um sismômetro de período curto MK3A (*Sensonics*).

Com o surgimento da SIR, outras estações foram instaladas na área, dando origem à Rede Sismográfica de Nova Ponte. Esta rede era composta por estações analógicas com registrador MEQ 800 (*W.F. Sprengnether Instrument Co. Inc.*) e registro em papel enfumaçado. Inicialmente NP2 era composta por um sismômetro Willmore MK2 (*Rank Precision Industries Ltd.*) que foi substituído por um S7000 (*Teledyne Geotech*) devido a problemas no instrumento. As estações NP3 e NP4 funcionavam com sensores MK3A e NP5 e NP6 com MK2, todos eles uniaxiais dispostos verticalmente sobre afloramentos de basalto. As estações NP7 e NP8 funcionaram com sensores uniaxiais verticais MK3A instalados sobre afloramentos de quartzito e basalto respectivamente.

Num primeiro momento foi definido que todos os registradores operassem com velocidade de rotação do tambor de 120 mm/minuto proporcionando maior precisão nas leituras das fases P e S. Entretanto, tal procedimento foi seguido por pouco tempo, devido ao aumento nos custos relacionados a trocas diárias de sismogramas, passando os registradores a operarem com velocidade de 60 mm/minuto.

A realização de correções horárias diárias em todas as estações foi efetuada por muito pouco tempo, devido a constantes problemas no relógio padrão.

No ano de 1994, assim como no restante do período, diversos e numerosos problemas prejudicaram o bom funcionamento das estações da Rede Sismográfica de Nova Ponte, desde a falta de pessoal para troca de sismogramas ao mau funcionamento nos equipamentos. Um gráfico mostrando o desempenho operacional destas estações pode ser visto na Figura 4.3. Períodos de funcionamento normal são indicados por uma linha grossa colorida para cada estação.

Devido a freqüentes problemas relativos a trocas de sismogramas ocorridos em 1994 e à necessidade de redução de gastos, iniciou-se no ano de 1995 o processo de transmissão telemétrica dos dados a uma central de registro, localizada em uma área próxima à Subestação da UHE-Nova Ponte. A gravação destes dados continuou sendo da forma analógica, em papel enfumaçado, mas com registro de duas estações em um mesmo sismograma. Os vários pares de estações com registros conjuntos foram NP1 com NP3, NP1 com NP7, e NP1 com NP6.

Com a continuidade da atividade sísmica induzida pelo reservatório houve uma necessidade em se melhorar a qualidade do registro das estações locais. Dessa forma, a partir do final do mês de maio de 1995, todas as estações próximas à Área 2 passaram a ter seus

registros digitalizados no interior da Estação Sismográfica Móvel, pertencente ao Observatório Sismológico. Esses dados eram gravados utilizando-se softwares de aquisição e análise de dados do sistema IASPEI (*International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior*). Foi utilizado um relógio TS-250 para obtenção do sinal de tempo e sincronização dos canais de sinal sísmico.

Somente a estação NP4 continuou como estação remota simples e registro analógico em papel enfumaçado.

Ao mesmo tempo em que os sinais das estações telemétricas eram digitalizados, também seus registros eram feitos da forma analógica durante um determinado período. No 1º semestre a digitalização dos dados foi feita a uma taxa de 50 *aps* (amostras por segundo), e no 2º semestre o sistema de detecção automática de eventos foi ativado e a taxa de amostragem passou a 100 *aps*.

O registro analógico dos dados perdurou até o mês de julho para as estações NP6 e NP7, até agosto para NP3 e para NP1 até o início de dezembro.

Durante todo o período em que estas estações estiveram funcionando em 1996, o sistema de detecção esteve ativado e a taxa de digitalização permaneceu em 100 *aps*.

Nos primeiros 7 meses de 1997 os registros digitais das estações de Nova Ponte foram digitalizados em 100 *aps* e no restante do ano em 200 *aps*. O sistema de detecção de eventos permaneceu ativado em todo o ano. A estação NP3 não funcionou de 1 de fevereiro a 24 de junho (Figura 4.3), devido a problemas no sismômetro MK3A, que foi substituído por outro de mesmo modelo.

Em junho de 1998 a Rede Sismográfica de Nova Ponte passou por uma série de modificações. A central de registro de dados foi transferida para o interior do prédio da Subestação da UHE Nova Ponte. Os sinais das estações remotas, antes de serem enviados à central de registro, passaram a ser repetidos na estação de microondas de Nova Ponte. Nesta central foi instalado um GPS, para a aquisição de código de tempo via satélite e uma unidade de fitas DAT (*Digital Audio Tape*) para gravação dos dados.

A estação NP4 foi reativada, com um registrador digital Quanterra ligado a um sismômetro de banda larga Guralp CMT 40T (*Guralp Systems Seismological Instrumentation*). Os dados desta estação eram gravados de forma contínua a uma taxa de 20 *aps* e a gravação do sistema de detecção automática em 100 *aps*. A este conjunto sismográfico

está conectado um receptor GPS para a obtenção diária de sinais de satélite para a correção horária.

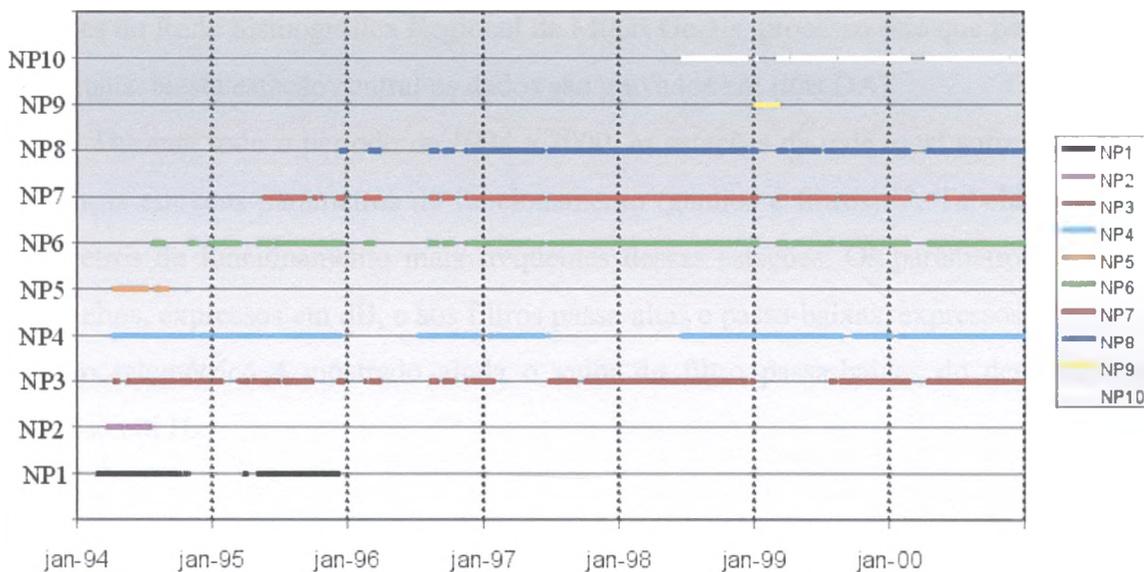


Figura 4.3 – Funcionamento das estações da Rede Sismográfica de Nova Ponte durante o período de 1994 a 2000.

Dentre as estações telemétricas, NP10 apresenta uma peculiaridade, seu sensor (MK3A) foi disposto em um poço de 1,5 metros de profundidade. Isto se deve ao fato de não haver afloramento no local e também pela presença de ruídos provenientes de uma rodovia próxima e da própria torre de microondas.

Durante todo o ano de 1998 o sistema de detecção esteve ativado e a digitalização dos sinais permaneceu em 200 *aps*.

A estação NP9, instalada em novembro de 1998, era composta por um registrador digital RefTek, (Refraction Technology Inc.) com três sismômetros MK2, nas direções N-S, E-W e Z (vertical), sobre afloramento de basalto. Funcionava com parâmetros de gravação contínua dos sinais do sensor vertical a uma taxa de 40 amostras por segundo, e gravação em 200 *aps* dos três canais para o sistema de detecção de eventos, e receptor GPS para correção

horária. Entretanto, esta estação permaneceu em funcionamento por muito pouco tempo (Figura 4.3).

Em fevereiro de 1999, os dados digitais provenientes da Rede Sismográfica Local de Nova Ponte passaram a ser canalizados em um *link* de microondas para o Edifício Sede da CEMIG, em Belo Horizonte/MG, para serem registrados juntamente com os dados de outras estações da Rede Sismográfica Regional de Minas Gerais, processo este que permanece até os dias atuais. Nesta estação central os dados são gravados em fitas DAT.

Durante todo o período de 1994 a 2000, as estações da rede local sofreram constantes mudanças em seus parâmetros de funcionamento (ganhos e filtros). A Tabela 4.1 mostra os parâmetros de funcionamento mais frequentes dessas estações. Os parâmetros são relativos aos ganhos, expressos em dB, e aos filtros passa-altas e passa-baixas, expressos em Hz. Para o registro telemétrico é mostrado ainda o valor do filtro passa-baixas do demodulador (D) expresso em Hz.

4.5 – Coordenadas das Estações

Para a minimização dos erros associados à localização hipocentral de eventos, além de leituras precisas das fases P e S e um modelo de velocidades mais próximo possível da realidade, também é muito importante que as estações sismográficas tenham coordenadas precisas.

As coordenadas das estações sismográficas de Nova Ponte foram obtidas de diversas maneiras, utilizando-se inicialmente cartas topográficas e posteriormente diferentes modelos e marcas de GPS (*Global Positioning System*). Dessa forma, o banco de dados da posição das estações é heterogêneo, com diferentes precisões.

Um problema semelhante foi observado na Rede Sismográfica do Sul da Califórnia, que apresentava um banco de dados de coordenadas bastante heterogêneo, inclusive com erros grosseiros. Para minimizar esses erros, Haase *et al.* (1995) fizeram aquisição de coordenadas de todas as estações da rede utilizando GPS. Para essas novas coordenadas eles obtiveram

precisões de até 3 metros nas localizações. Diversas estações estavam deslocadas em mais de 500 metros com relação ao banco de dados inicial.

Para a melhor localização hipocentral dos eventos induzidos em Nova Ponte, torna-se necessário a utilização de coordenadas mais precisas e que tenham sido adquiridas por meio de um mesmo método ou equipamento.

Assim, foi feita uma pesquisa de campo a todas as estações sismográficas que funcionaram de 1994 a 2000, para a obtenção de suas coordenadas de uma forma homogênea, utilizando um GPS da marca Garmin modelo 100 SRVY II.

A aquisição de dados foi feita durante dez minutos com a antena do GPS posicionada sobre a tampa do sismômetro em cada estação. Essas medidas são mostradas na Tabela 4.2. O SIGMA (m) mostra a qualidade da medida, ou seja, o erro em metros da coordenada. A coluna DOP (*Dilution of Precision*) é a medida da qualidade da geometria dos satélites e, portanto, a precisão da posição (Manual do usuário). Valor igual a 1 significa a melhor geometria e 10 a pior.

Nas estações em funcionamento e nas que não operam mais, mas que apresentavam alguns resquícios das instalações (fotos 4.1 e 4.2) esta pesquisa não teve problemas em se realizar, uma vez que foi possível encontrar o local onde estava disposto o sismômetro. Entretanto, as estações NP2 e NP5 não apresentavam marcações do ponto exato onde funcionavam na época, sendo necessário o auxílio de técnicos da CEMIG e do SIS, responsáveis na época pela operação e manutenção das estações, e a ajuda dos moradores locais para suas localizações (fotos 4.3 e 4.4).

Para Nova Ponte, os erros nos valores das coordenadas podem ser estimados em até 30 metros, que são muito inferiores à precisão obtida na localização epicentral, onde os melhores resultados obtidos encontram-se na casa das unidades de centenas de metros (Capítulo 5).

Tabela 4.1 – Parâmetros de funcionamento das estações sismográficas de Nova Ponte, expressos em ganhos (dB) e filtros passa-altas e passa-baixas (Hz). D é o valor do filtro passa-baixas do demodulador.

Estação	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
NP1	84dB-5Hz-30Hz	84dB-out-25Hz	-	-	-	-	-
NP2	84dB-out-30Hz	-	-	-	-	-	-
NP3	78dB-5Hz-30Hz	78dB-out-10Hz	78dB-out-10Hz	78dB-out-10Hz	84dB-out-30Hz D: 50Hz	84dB-out-30Hz D: 50Hz	84dB-out-30Hz D: 50Hz
NP4	84dB-5Hz-30Hz	84dB-out-10Hz 72dB-out-30Hz	72dB-out-30Hz 84dB-out-10Hz	84dB-out-10Hz	-	-	-
NP5	78dB-out-10Hz	-	-	-	-	-	-
NP6	84dB-out-30Hz	78dB-out-10Hz	78dB-out-10Hz	78dB-out-10Hz	84dB-out-30Hz D: 20Hz	84dB-out-30Hz D: 20Hz	84dB-out-30Hz D: 20Hz
NP7	-	78dB-out-30Hz	78dB-out-30Hz	78dB-out-30Hz	78dB-out-30Hz	78dB-out-30Hz	78dB-out-30Hz
NP8	-	78dB-out-30Hz	78dB-out-30Hz	78dB-out-30Hz	78dB-out-30Hz D: 20Hz	78dB-out-30Hz D: 20Hz	78dB-out-30Hz D: 20Hz
NP10	-	-	-	-	72dB-out-10Hz 66dB-out-30Hz D: 20Hz	66dB-out-30Hz D: 20Hz	66dB-out-30Hz D: 20Hz

Tabela 4.2 – Coordenadas das estações da Rede Sismográfica de Nova Ponte e precisões associadas, Sigma – erro em metros; DOP – *Dilution of Precision* é a medida da qualidade da geometria dos satélites (1/melhor e 10/pior).

Estação	Latitude (S)	Longitude (W)	Altitude (m)	Sigma (m)	DOP	Nº Medidas
NP1	19° 06,95785'	47° 39,83724'	872,3	16,0	1,7	540
NP2	19° 22,01020'	47° 39,03451'	841,0	12,0	1,0	539
NP3	19° 12,57923'	47° 38,54560'	814,2	22,3	2,1	526
NP4	19° 22,53226'	47° 35,57865'	932,0	11,5	0,9	543
NP5	19° 25,58805'	47° 40,31071'	931,9	11,9	0,9	541
NP6	19° 08,52727'	47° 43,83642'	801,2	12,4	1,0	544
NP7	19° 08,62962'	47° 35,37297'	946,2	11,7	1,0	541
NP8	19° 07,57808'	47° 39,03097'	889,2	15,9	1,7	542
NP9	19° 12,66259'	47° 47,85490'	888,1	13,2	1,5	542
NP10	19° 08,93926'	47° 41,77519'	912,2	15,7	1,2	546



Foto 4.1 – Vista dos abrigos do registrador MEQ-800 (centro) e do sismômetro (esquerda) da antiga estação NP1.



Foto 4.2 – Aquisição das coordenadas da estação digital NP9, com uso de GPS disposto nos resquícios do abrigo dos sismômetros instalados em afloramento de basalto.



Foto 4.3 – Obtenção de coordenadas, com uso de GPS, para a estação NP2 localizada com auxílio de técnicos da CEMIG e do SIS e de moradores locais.



Foto 4.4 – Provável local de funcionamento da estação NP5, sem qualquer evidência dos abrigos, somente determinado com a ajuda de técnicos da CEMIG e do SIS e de moradores da região.

CAPÍTULO 5

Distribuição Espacial da SIR em Nova Ponte/MG

5.1 – Introdução

Os primeiros estudos sobre a SIR em Nova Ponte mostram que os sismos concentram-se principalmente em duas áreas sísmicas (Veloso & Von Huelsen, 1994; Veloso *et al.*, 1994; Veloso & Von Huelsen, 1995). Essas regiões foram denominadas Área Sísmica 1 e Área Sísmica 2 de acordo com a cronologia do surgimento da atividade (Figura 5.1). Trabalhos posteriores (Veloso & Marza, 1996; Assumpção *et al.*, 1997; Marza *et al.*, 1997), utilizando um número maior de dados adquiridos ao longo do tempo por uma rede sismográfica mais densa, confirmam a existência dessas áreas sismogênicas.

No entanto, para as análises efetuadas nestes trabalhos, foram utilizados dados de hipocentros de eventos registrados em 3 ou mais estações, obtidos com coordenadas das estações sismográficas heterogêneas (Capítulo 4) e modelo de velocidades que sofreu alterações ao longo do tempo. Todos estes fatores implicam em incertezas e inconsistências na localização hipocentral.

Dessa forma, para proceder numa análise espaço-temporal da sismicidade, deve-se utilizar um banco de dados padronizado e homogêneo tanto para as leituras das fases quanto para as coordenadas das estações. Além disso, a localização desses eventos deve ser feita utilizando-se um mesmo modelo de velocidades.

Considerando o que foi exposto acima, no presente capítulo serão apresentados os procedimentos adotados para a relocalização hipocentral dos sismos induzidos ocorridos, entre 1994 e 2000 na área do Reservatório de Nova Ponte. O objetivo é diminuir as possíveis fontes de erros acima identificadas para que se possa analisar a distribuição da SIR no tempo e no espaço com mais confiança, e suas possíveis relações com feições geotectônicas presentes na área.

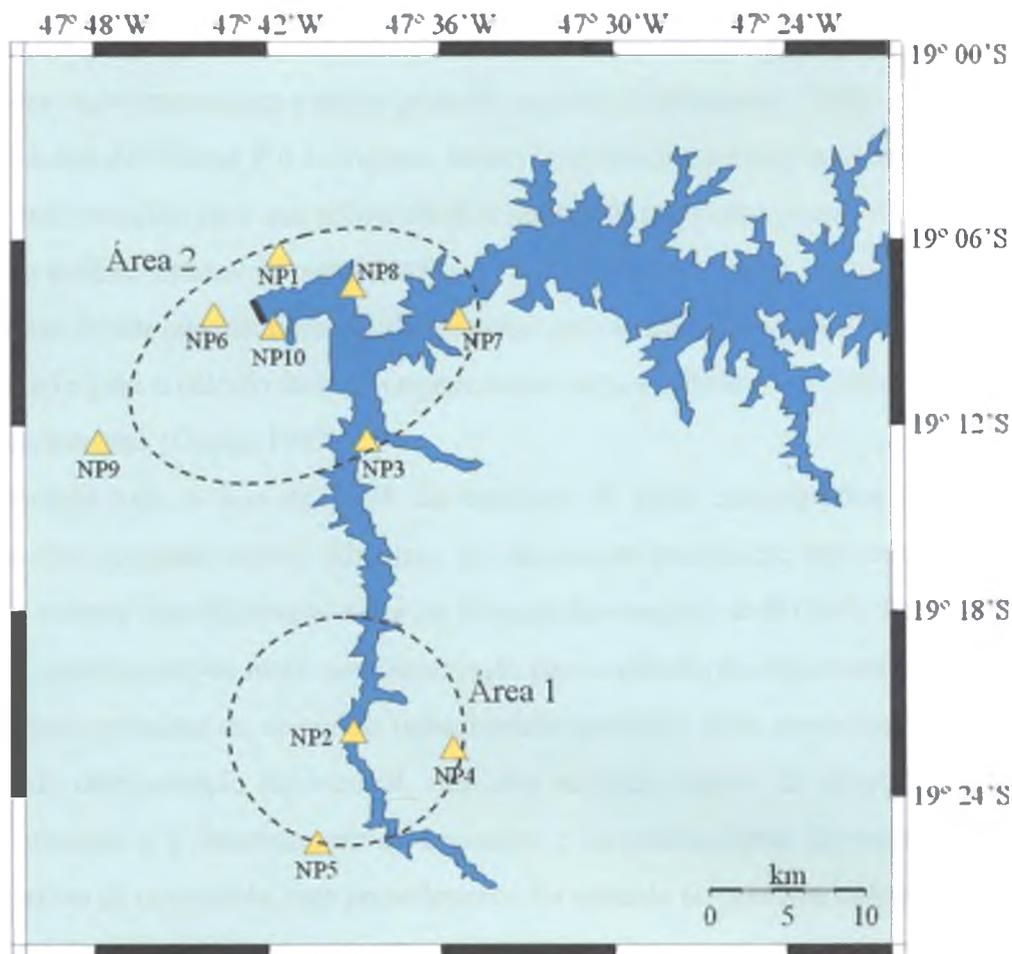


Figura 5.1 – Mapa de localização das áreas sísmicas de Nova Ponte e das estações da rede sismográfica local.

5.2 – Banco de Dados de leituras das ondas P e S

A análise dos sismogramas produzidos pelas estações da Rede Sismográfica de Nova Ponte durante o período de 1994 a 2000, forneceu um banco de dados dessa sismicidade. Este banco de dados contém leituras das ondas P e S dos diversos sismos detectados por uma ou mais estações.

Três estações sismográficas dispostas em uma geometria não linear são suficientes para se determinar o epicentro de um sismo, mas para se obter uma estimativa confiável da profundidade focal e das coordenadas do epicentro, necessita-se de pelo menos 5 estações

sismográficas (Gupta, 1992). Para realizar correlações com feições geológicas, é preciso obter localizações hipocentrais com a maior precisão possível (Uhrhammer, 1980). Dessa forma, do banco de dados de leituras P e S original, foram selecionados apenas os eventos com registro em 4 ou mais estações para que sejam obtidos resultados mais confiáveis de hipocentros, e se processar a análise espacial da sismicidade.

Além de um número razoável de estações, para a obtenção de boas localizações (erros de até 1 km) e para o cálculo da hora origem, outro requisito básico é a realização de correção horária nas estações (Gupta, 1992).

Durante todo o ano de 1994, as estações da Rede Sismográfica de Nova Ponte operaram sem correção horária (Capítulo 4). Assim, na localização hipocentral são usados apenas os valores das diferenças entre as leituras das ondas S e P (S-P). Para melhorar os resultados, adicionando-se mais uma informação para o cálculo do hipocentro, assumiu-se que a estação mais próxima do epicentro tinha horário corrigido. Este procedimento não incorre em erros na determinação hipocentral, mas sim na hora origem do evento. Mas, como o objetivo principal é a determinação do epicentro e da profundidade dos eventos, e não seu horário preciso de ocorrência, este procedimento foi adotado no presente trabalho.

A partir de 1995, com a gravação digital dos dados, as estações passaram a ter horário sincronizado. Apenas a estação NP4 continuou com gravação distinta das demais, seja pelo registro analógico sem correção horária, seja pelo registro digital mas com base de tempo distinta das demais estações (Capítulo 4). Este fato impediu a utilização dos tempos de chegada das ondas P e S registradas nesta estação, permitido apenas o uso dos valores de S-P para as localizações hipocentrais.

Este banco de dados formado será usado na relocalização dos eventos, utilizando um novo modelo de velocidades e coordenadas homogêneas das estações sismográficas (Capítulo 4).

5.3 – Modelo de Velocidades

5.3.1 – Razão V_P/V_S

Nas determinações hipocentrais dos eventos de Nova Ponte realizadas até o momento, sempre foram usados valores teóricos para a razão entre a velocidade da onda P e a velocidade da onda S (V_P/V_S). Entretanto, para aumentarmos a precisão das localizações, é necessário utilizar um valor de V_P/V_S mais próximo da realidade. Para tanto, procedeu-se a determinação do valor desta razão para a região de Nova Ponte.

Assumimos, aqui, que o V_P/V_S é invariável com a profundidade. Sua determinação independe do modelo de velocidades adotado e é feita segundo a relação abaixo (Assumpção *et al.*, 1989a):

$$t_{si} - t_{pi} = (K - 1) (t_{pi} - t_{oi})$$

Onde:

t_{pi} e t_{si} são, respectivamente, os tempos de chegada das ondas P e S para o i -ésimo evento;

t_{oi} é a hora origem do i -ésimo evento;

K é a razão V_P/V_S

A razão V_P/V_S foi calculada para as áreas 1 e 2. Foram usados eventos registrados em 4 ou mais estações, com leituras confiáveis das ondas P e S, e que tenham ocorrido entre 1995 e 2000, período durante o qual as estações tiveram horário corrigido. A determinação desta razão foi feita pelo método dos mínimos quadrados utilizando um conjunto de 27 sismos para a Área 1 e 211 para a Área 2.

As figuras 5.2 e 5.3 mostram o diagrama Wadati composto obtido para as áreas 1 e 2 respectivamente. Os resultados são apresentados na Tabela 5.1.

Os valores calculados para o V_P/V_S das duas áreas são muito próximos, considerando-se os erros nas determinações. No presente trabalho será adotado o valor de 1,70, que se assemelha muito ao valor encontrado para uma região de Minas Gerais, de $1,704 \pm 0,003$, para

toda a crosta (Assumpção *et al.*, 2001). Dessa forma, é uma boa aproximação considerar que o valor de V_p/V_s aqui definido é invariável com a profundidade.

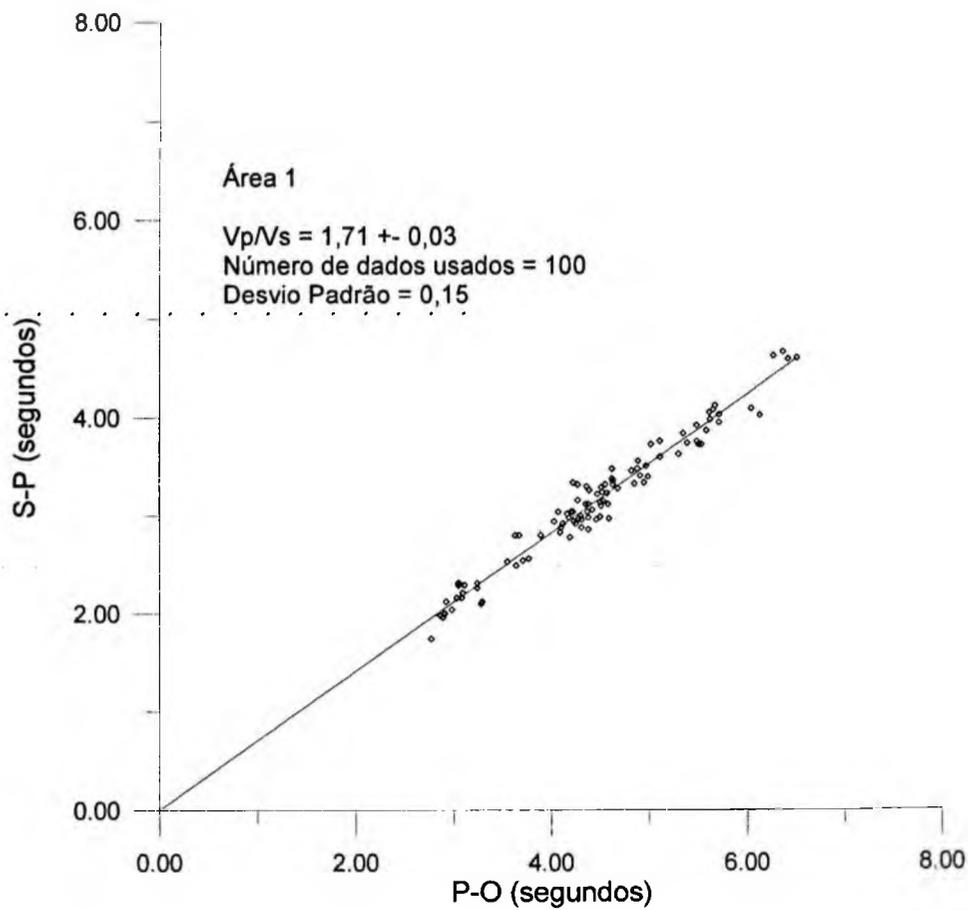


Figura 5.2 – Diagrama Wadati composto para a Área 1. Cada ponto refere-se a uma estação e a linha contínua corresponde ao melhor ajuste obtido pelo método dos mínimos quadrados. Total de dados utilizados: 100.

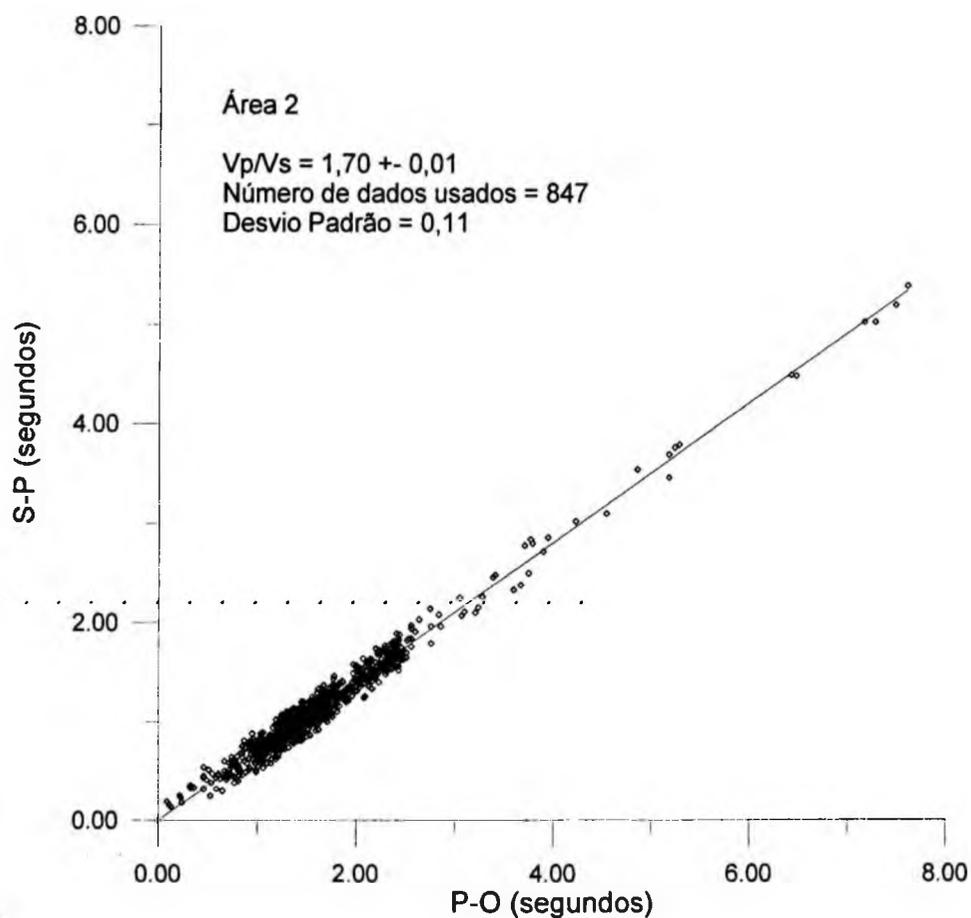


Figura 5.3 – Diagrama Wadati composto para a Área 2. Cada ponto refere-se aos valores de uma única estação e a linha contínua corresponde ao melhor ajuste pelo método dos mínimos quadrados. Total de dados utilizados: 847.

Tabela 5.1 – Valores da razão V_p/V_s obtidos para as áreas sísmicas 1 e 2, onde σ é o desvio padrão e N o número de observações.

	V_p/V_s	σ	N
Área Sísmica 1	$1,71 \pm 0,03$	0,15	100
Área Sísmica 2	$1,70 \pm 0,01$	0,11	847

5.3.2 – Determinação do modelo de velocidades

A precisão obtida na localização hipocentral depende do modelo de velocidades adotado para determinada região. Um modelo inadequado introduz erros sistemáticos nas coordenadas e profundidades dos eventos. Assim, deve-se utilizar um modelo de velocidades mais próximo possível da realidade. Conhecimentos sobre a geologia da região e, se for possível, informações indiretas a respeito das espessuras e velocidades das camadas em sub-superfície são importantes para a criação de um modelo de velocidades mais apropriado.

No caso de Nova Ponte, vários modelos foram utilizados ao longo dos anos para a localização dos eventos. Um recente levantamento de refração sísmica profunda realizado nas proximidades de Nova Ponte forneceu informações a cerca das camadas crustais e suas velocidades na região (Perosi, 2000). A estes dados de sísmica, foram conjugadas informações sobre a geologia da área (Capítulo 2) e de estudos da estrutura crustal na região sudeste do Brasil (Assumpção *et al.*, 2001).

No estudo de eventos locais, os modelos de velocidade geralmente são compostos por camadas horizontais sobre um semi-espaço (Lee & Dodge, 1992). Assim, foi elaborado um modelo preliminar composto por 2 camadas planas horizontais e um semi-espaço infinito, com espessuras e velocidades definidas combinando-se informações geológicas (Cemig 1990) e de refração sísmica (Perosi, 2000). Diversos outros modelos foram obtidos a partir deste variando-se as espessuras e velocidades da onda P das camadas e do semi-espaço.

Para definir qual desses modelos é o mais apropriado, o seguinte procedimento foi adotado. Foram escolhidos 30 eventos com registros claros para evitar erros nas leituras das ondas P e S. Para cada modelo foi feita a localização desses 30 sismos e determinou-se o resíduo RMS (*Root Mean Square*) médio o conjunto de eventos. Após a comparação entre os resíduos dos diversos modelos, aquele com menor RMS médio foi definido como o modelo mais apropriado para a região de Nova Ponte.

A Figura 5.4 mostra o modelo final adotado para a realocação dos sismos induzidos em Nova Ponte. A camada mais superficial apresenta espessura de 0,3 km e velocidade da onda P (V_P) de 5,0 km/s, representando os basaltos da Formação Serra Geral (Capítulo 2). A segunda camada tem espessura de 5,7 km e V_P de 5,7 km/s, sendo relacionada aos xistos do Grupo Araxá. Sob estas duas camadas encontra-se o embasamento, com V_P de 6,1 km/s.

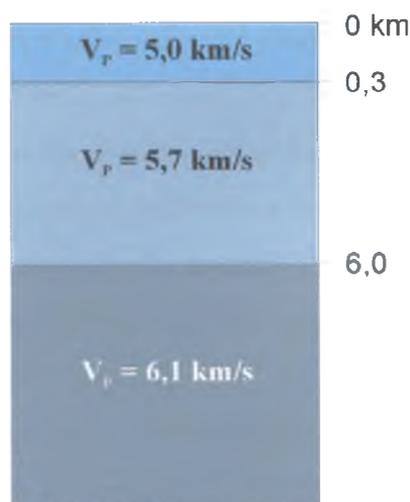


Figura 5.4 – Modelo de velocidades elaborado para ser utilizado na relocalização dos sismos induzidos de Nova Ponte ocorridos no período de 1994 a 2000.

5.4 – Relocalização Hipocentral

Dispondo de um modelo de velocidades mais próximo da realidade e de coordenadas mais precisas das estações sismográficas, procedeu-se a relocalização hipocentral dos eventos do banco de dados criado na seção 5.2.

Para realizar esta relocalização utilizou-se o programa HYPO71 (Lee & Lahr, 1975). O arquivo com o modelo de velocidades definido na seção anterior (Figura 5.3) e outros parâmetros utilizados por este programa encontram-se no Apêndice A.

A localização dos sismos foi feita separadamente, de acordo com a área sísmica, para cada ano do período em estudo. Neste processo foi calculado um resíduo médio para cada estação, que foi então utilizado como uma correção de estação e, então, realizou-se uma nova determinação hipocentral. O objetivo desta correção é minimizar prováveis erros sistemáticos decorrentes da análise incorreta das fases.

Com base nos resultados obtidos por esta relocalização, um procedimento de seleção dos eventos com melhores determinações hipocentrais foi seguido. Esta escolha se processou tomando como base os valores de quatro parâmetros calculados pelo programa HYPO71, presentes nos arquivos de resultados da localização. Estes parâmetros são a raiz quadrada

média dos resíduos das estações (RMS), os erros do epicentro (ERH) e da profundidade (ERZ), e o ângulo de maior separação azimutal entre as estações em relação ao epicentro (GAP).

Foram escolhidos apenas os eventos cujas localizações hipocentrais possuem estes quatro parâmetros com valores iguais ou inferiores a um limite pré-determinado. Estes valores de corte são mostrados na Tabela 5.2. Os eventos selecionados neste procedimento acima descrito e suas determinações hipocentrais são apresentados no Apêndice B, onde se encontram separados por ano e área sísmica.

Podemos observar, pelos dados desta tabela, que o valor máximo para o erro na determinação da profundidade é bem superior ao associado ao cálculo do epicentro. Isto se deve ao fato do cálculo da profundidade focal ser extremamente sensível ao número e geometria das estações sismográficas, e ao modelo de velocidades. Como a Rede Sismográfica de Nova Ponte não apresenta uma geometria ideal (Capítulo 4), também foi estipulado um elevado valor para o parâmetro GAP.

Tabela 5.2 – Valores máximos aceitos para os diversos parâmetros calculados pelo HYPO71 (Lee & Lahr, 1975) utilizados na seleção dos eventos.

RMS (seg)	ERH (km)	ERZ (km)	GAP (°)
0,20	2,0	5,0	330

Portanto, como resultado final dos procedimentos acima descritos, obteve-se um banco de dados homogêneo e uniforme contendo as localizações hipocentrais com menores erros associados. Estes valores de epicentros e profundidades serão utilizados na análise das feições espaciais, e de maneira subsidiária, temporais da SIR de Nova Ponte durante o período de 1994 a 2000.

O Apêndice B contém os resultados finais da realocização realizada nesta seção, em listagens para cada área sísmica. No Apêndice C são apresentados registros, feitos pelas estações da rede sismográfica, de eventos das áreas sísmicas 1 e 2.

5.5 – Distribuição Espacial e Temporal da SIR em Nova Ponte

Os hipocentros determinados nas seções anteriores, presentes no Apêndice B, serão analisados do ponto de vista espacial e temporal nesta seção. Para cada ano do período entre 1994 e 2000, a distribuição dos epicentros é mostrada em um mapa da região de Nova Ponte, compreendendo parte do reservatório, juntamente com as estações sismográficas operantes no ano em questão. Para se avaliar a distribuição dos eventos em profundidade, quatro seções verticais foram realizadas. Para cada área sísmica há um par de planos perpendiculares verticais com direções de 45° e 135° de azimute, correspondendo aos perfis AA' e BB' para a Área 1, e CC' e DD' para a Área 2.

Apesar de a atividade sísmica induzida em Nova Ponte ter sido mais intensa na Área 1, também ocorreram eventos na Área 2 durante o ano de 1994. Entretanto, na análise que será feita a seguir, apenas eventos da Área 1 possuem localizações mais precisas, provavelmente devido à geometria da rede na época.

A Figura 5.5 mostra a distribuição epicentral dos 30 eventos ocorridos em 1994 (Apêndice B), todos na Área Sísmica 1. Não é possível visualizar uma distribuição preferencial dos epicentros. Alguns eventos sugerem um fraco alinhamento nas mesmas direções das seções verticais.

As figuras 5.6 e 5.7 mostram as seções AA' e BB', respectivamente. Como pode ser observada, a grande maioria dos eventos encontra-se a profundidades focais inferiores a 4 km. Da mesma forma que em planta, nesses perfis não é observada nenhuma feição que indique a presença de um plano preferencial para a ocorrência dos eventos.

Em 1995, o número de eventos da Área 1 diminuiu, enquanto que na Área 2 aumentou. Dos eventos ocorridos neste ano, 15 localizam-se na Área 1 e 51 na Área 2, como pode ser visto na Figura 5.8. Além desses eventos, também é mostrado o sismo principal de 21 de abril, com magnitude 3,5 m_R , simbolizado por uma estrela (Figura 5.8).

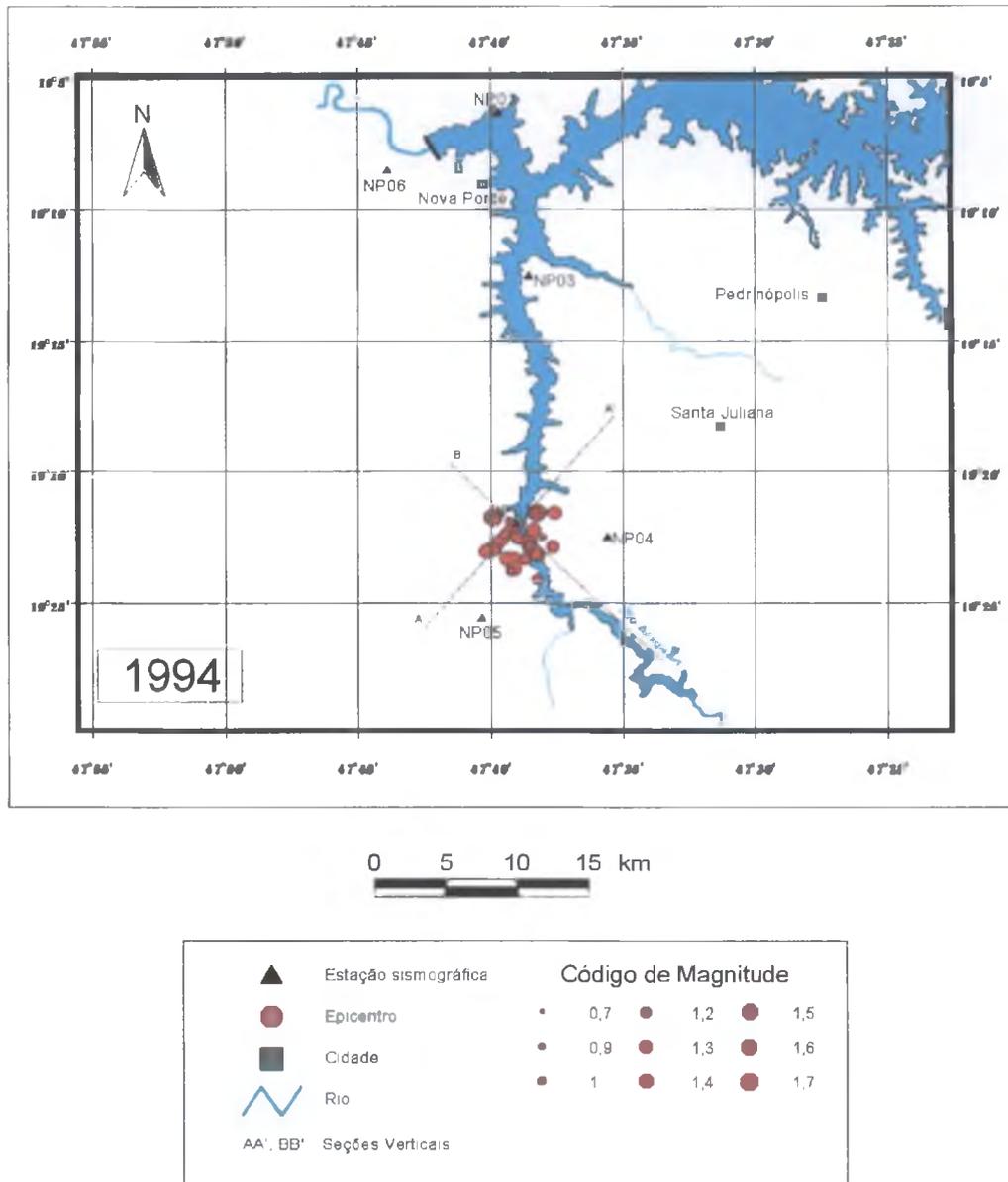


Figura 5.5 – Mapa com a distribuição epicentral dos eventos de 1994 (Apêndice B) e estações operantes na época. Número de eventos: 30.

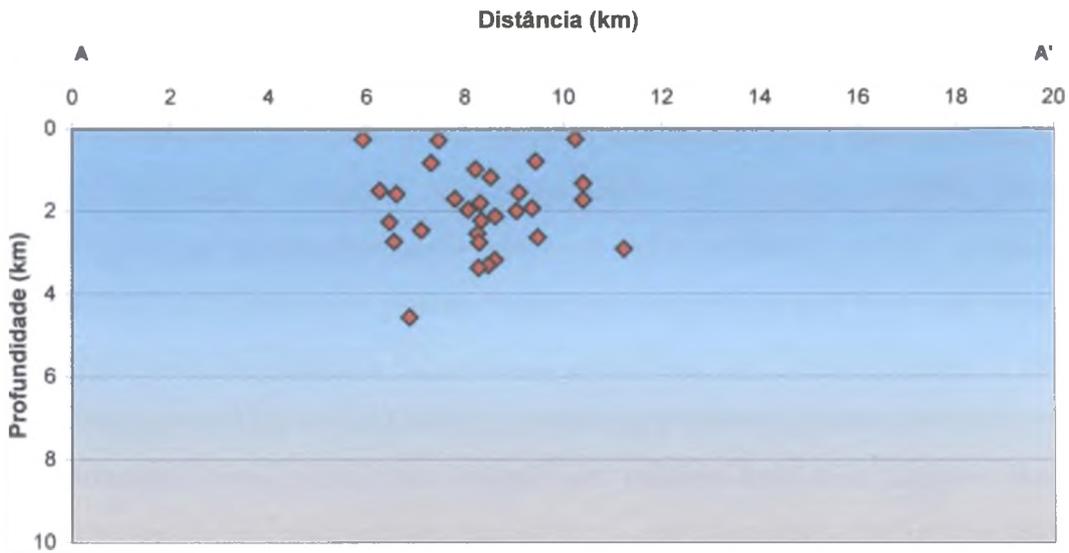


Figura 5.6 – Seção AA' (Figura 5.5) mostrando a distribuição de profundidades dos eventos da Área 1 em 1994.

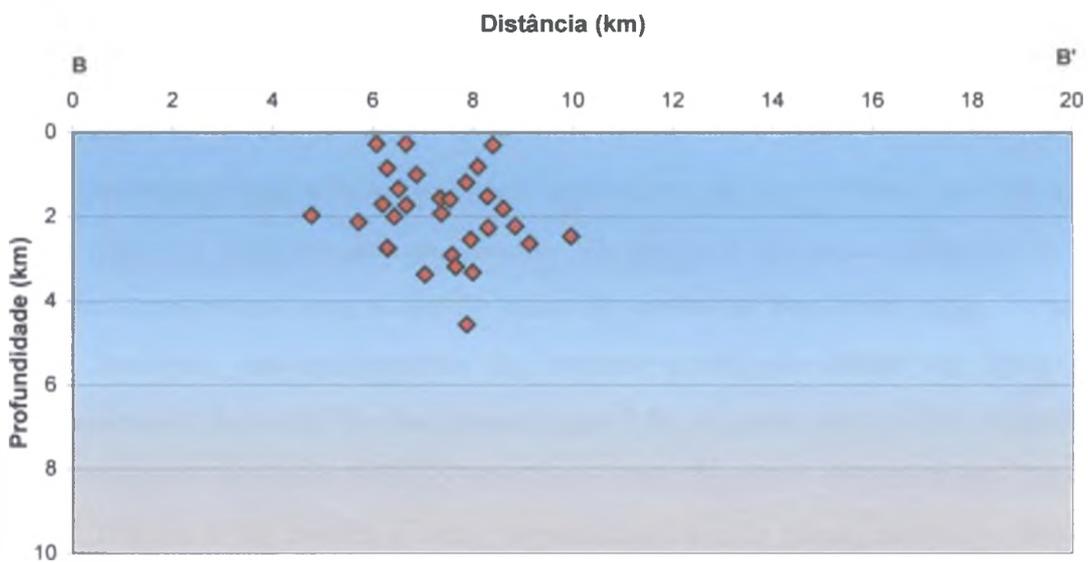


Figura 5.7 – Seção BB' (Figura 5.5) mostrando a distribuição de profundidades dos eventos da Área 1 em 1994.

Uma avaliação preliminar a respeito dos eventos das áreas 1 e 2, para o ano de 1995, poderia induzir a uma conclusão errônea de que os sismos da Área 1 apresentam maiores magnitudes comparados aos da Área 2. Deve-se considerar que a rede sismográfica está praticamente concentrada na Área 2, com apenas uma estação na Área 1 (NP4). Isto implica no aumento do limiar de detectabilidade para os eventos da Área 1, ou seja, apenas eventos com magnitudes suficientemente grandes foram bem registrados por 4 ou mais estações da rede e apresentaram localizações hipocentrais confiáveis. De forma inversa, o limiar de detectabilidade para a Área 2 sendo menor permite que eventos pequenos tenham hipocentros bem determinados. Já os eventos com magnitudes maiores terão seus registros facilmente saturados, em virtude da proximidade das estações, prejudicando a análise das fases S e, conseqüentemente, suas determinações hipocentrais.

Os eventos da Área 1 apresentam uma dispersão ligeiramente maior em comparação aos eventos do ano anterior. Ao contrário do observado em 1994, é possível inferir um alinhamento de epicentros aproximadamente na direção NNW para os dados de 1995. Este fraco alinhamento também é visto nos perfis AA' e BB' (figuras 5.9 e 5.10 respectivamente). Os sismos dessa área apresentam profundidades geralmente entre 5 e 8 km que, além de mais profundos que os eventos ocorridos em 1994, também encontram-se mais dispersos (figuras 5.8, 5.9 e 5.10).

A distribuição espacial dos epicentros dos eventos da Área 2, neste ano (Figura 5.8), sugere um aparente alinhamento com direção NE, paralela à direção do perfil CC'. Este alinhamento é coincidente com a direção geral da porção do lago nesta região. É possível identificar, também, um agrupamento de eventos a SW da cidade de Nova Ponte, aproximadamente 5 km a sul da barragem (Figura 5.8). A seção vertical CC' (Figura 5.11) sugere a presença de um plano definido pelos hipocentros dispostos em toda a sua extensão. O perfil DD' (Figura 5.12) mostra o corte perpendicular a este plano provável e indica um possível mergulho do mesmo para NW. Nestes dois perfis observa-se que a maioria dos eventos possui foco entre 2 e 8 km de profundidade. A profundidade do evento principal de 21 de abril também é mostrada.

Para o ano de 1996 apenas eventos da Área 2 possuem hipocentros bem determinados. Estes sismos encontram-se, em sua maioria, agrupados na mesma região identificada para os

eventos de 1995 (Figura 5.13). Apenas alguns poucos sismos localizam-se fora deste agrupamento.

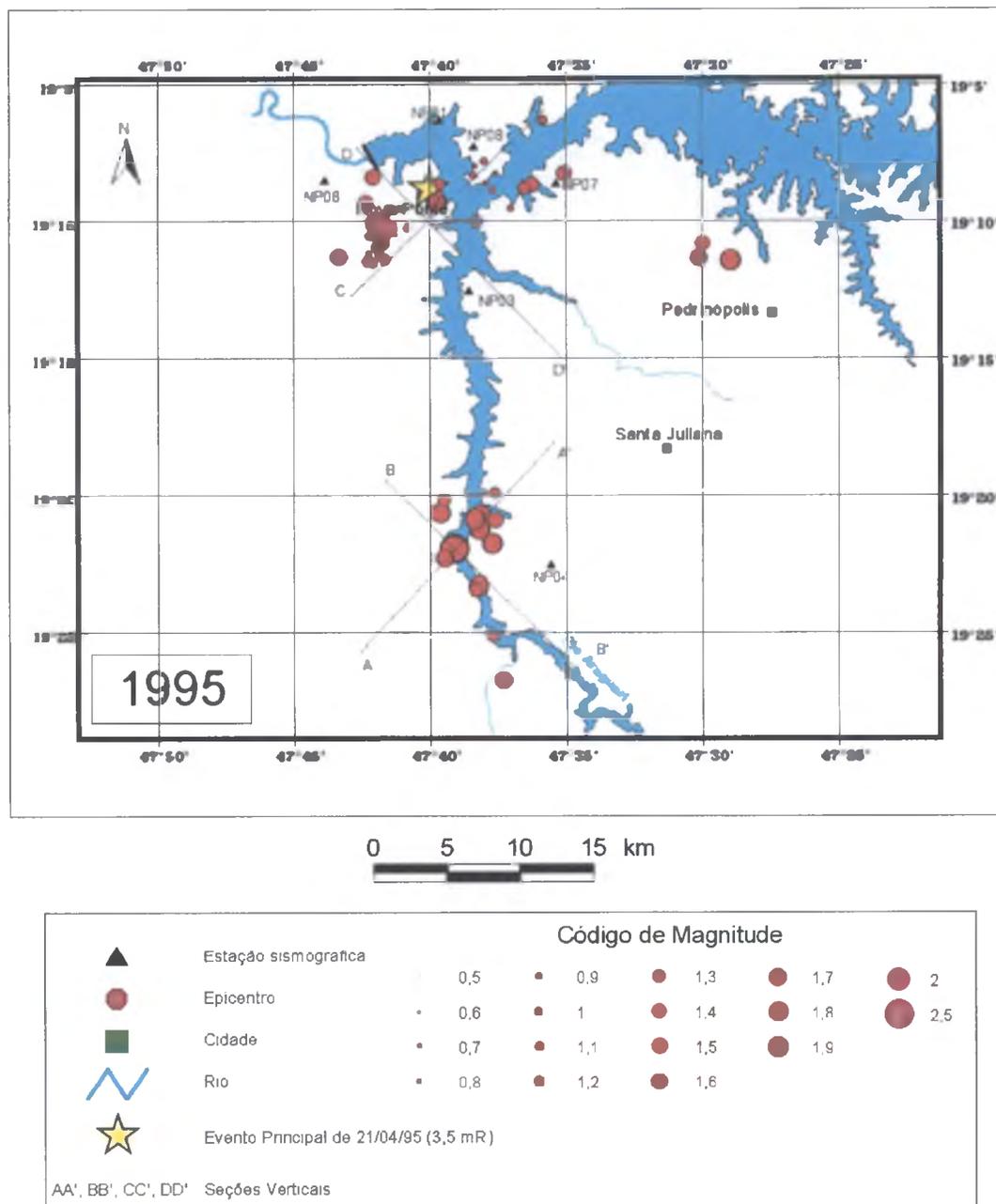


Figura 5.8 – Mapa com a distribuição epicentral dos eventos de 1995 (Apêndice B) e estações operantes na época. Número de eventos: 67.

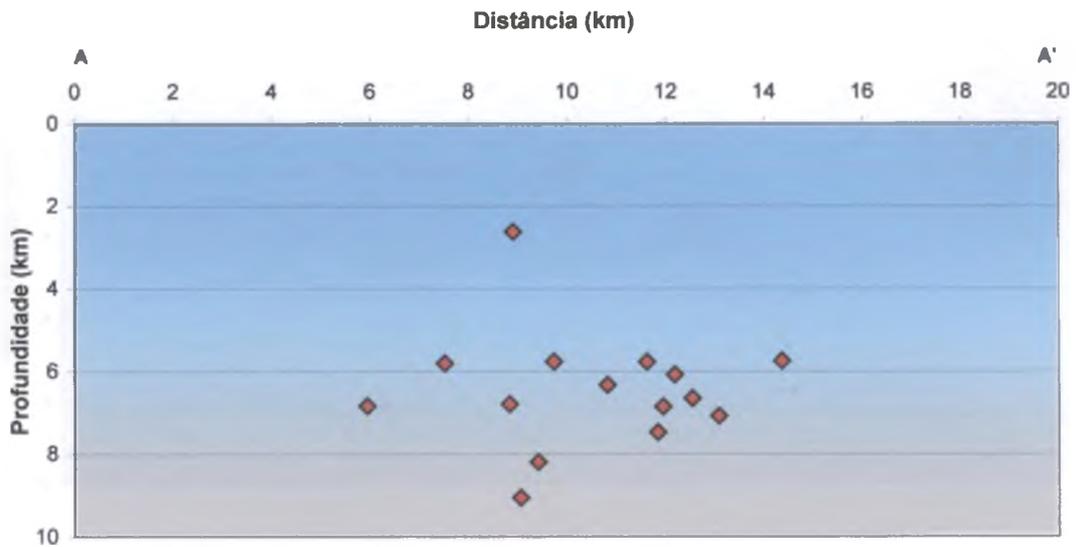


Figura 5.9 – Seção AA’ (Figura 5.8) mostrando a distribuição de profundidades dos eventos da Área 1 em 1995.

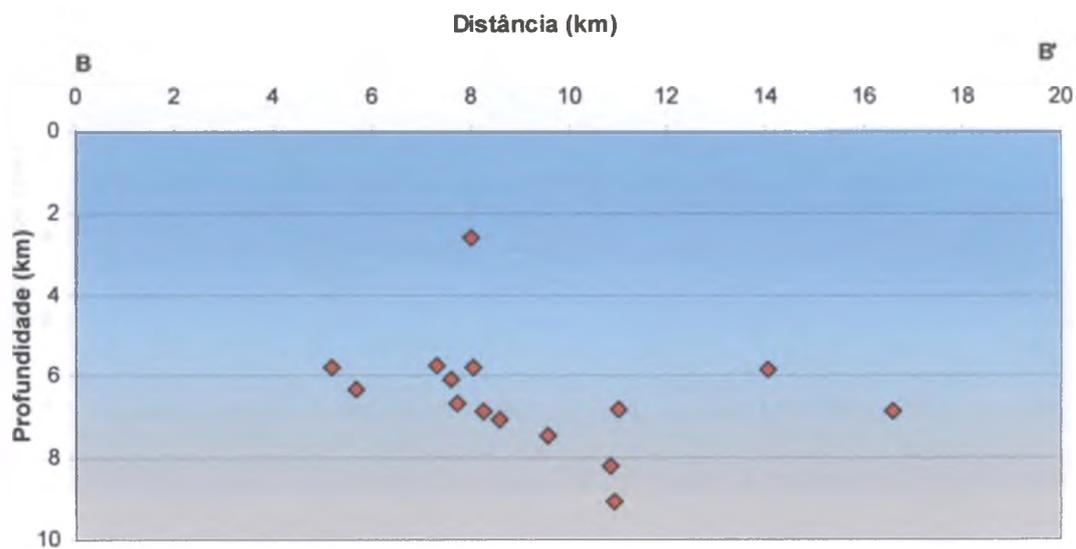


Figura 5.10 – Seção BB’ (Figura 5.8) mostrando a distribuição de profundidades dos eventos da Área 1 em 1995.

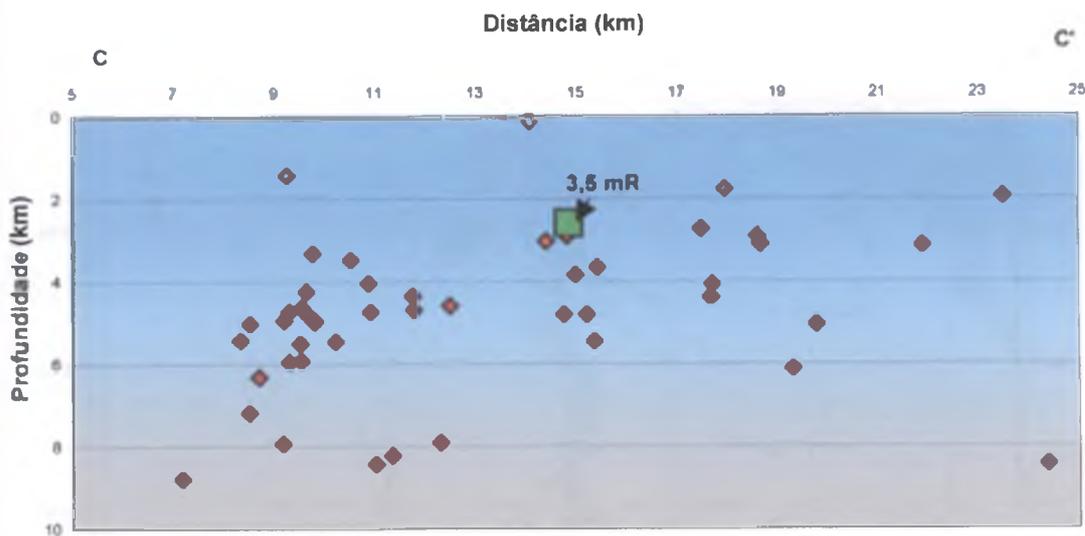


Figura 5.11 – Seção CC' (Figura 5.8) mostrando a distribuição de profundidades dos eventos da Área 2 em 1995. O quadrado verde corresponde ao evento principal de 21 de abril.

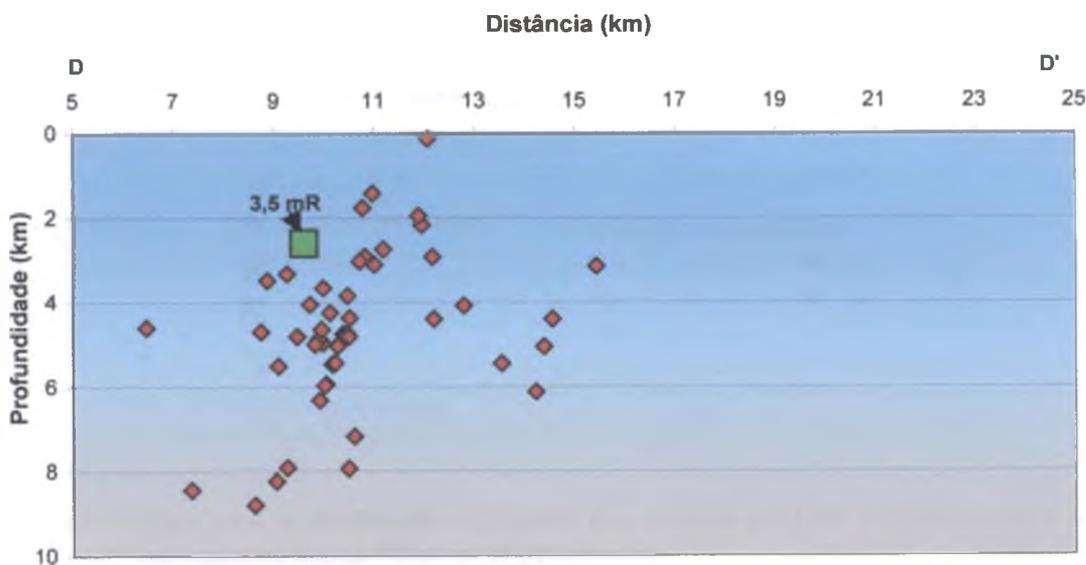


Figura 5.12 – Seção DD' (Figura 5.8) mostrando a distribuição de profundidades dos eventos da Área 2 em 1995. O quadrado verde corresponde ao evento principal de 21 de abril.

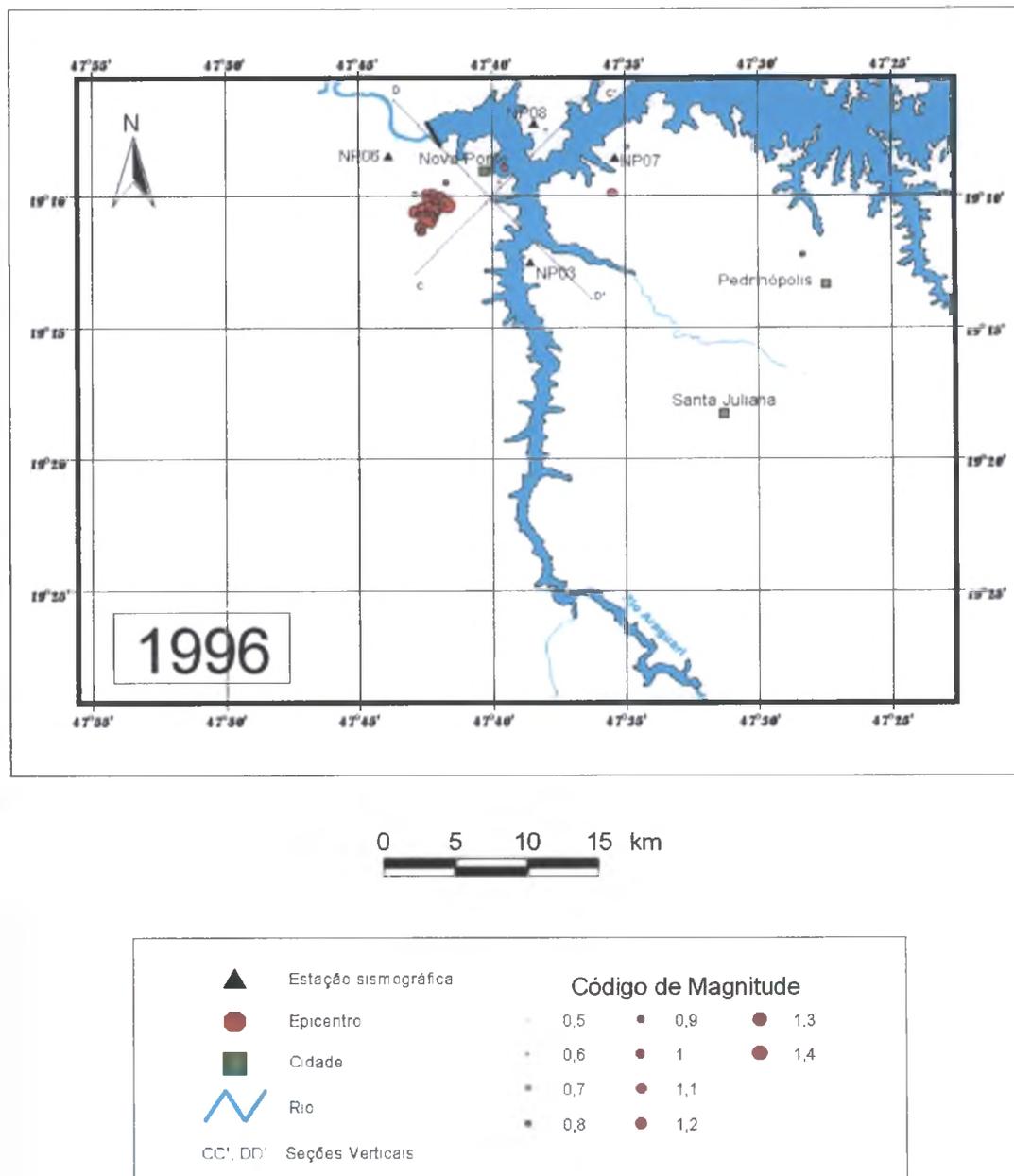


Figura 5.13 – Mapa com a distribuição epicentral dos eventos de 1996 (Apêndice B) e estações operantes na época. Número de eventos: 64.

As seções CC' e DD' mostram que as profundidades dos eventos variam de 2 a 6 km geralmente (figuras 5.14 e 5.15). A Figura 5.14 sugere um pequeno plano, com inclinação para NW e aproximadamente 2 km de extensão, definido pelos hipocentros dos sismos do

agrupamento (figuras 5.14 e 5.15). Os eventos não agrupados parecem ser mais profundos ao se distanciarem da área mais profunda do lago (Figura 5.14).

Em 1997, os eventos da Área 1 localizam-se mais a norte em relação aos epicentros dos eventos ocorridos em anos anteriores, como mostra a Figura 5.16. A profundidade desses eventos também aumentou, com valores entre 8 e 13 km (figuras 5.17 e 5.18). Na Seção BB' (Figura 5.18) podemos observar um aumento das profundidades focais na direção NW, sugerindo que os eventos mais afastados do lago sejam mais profundos (Figura 5.16).

Assim como em 1995 e 1996, os eventos da Área 2 durante o ano de 1997 encontram-se agrupados em uma região a SW de Nova Ponte e também alguns eventos dispersos. Para este ano observa-se uma dispersão bem maior em comparação com anos anteriores, com alguns eventos localizados próximos à barragem (Figura 5.16). Não é possível definir direções preferenciais para os eventos.

As figuras 5.19 e 5.20 mostram as seções CC' e DD', onde observam-se, claramente, os hipocentros do agrupamento a SW de Nova Ponte separados dos demais eventos. As profundidades dos eventos variam de menos de 1 km, na região logo abaixo do lago e em suas margens, a até quase 8km em regiões mais afastadas do reservatório (figuras 5.19 e 5.20). Os focos dos eventos do agrupamento parecem ser mais profundos em direção a W, enquanto que os dos eventos dispersos apresentam aumento para leste.

Em 1998 os eventos da Área 1 apresentam alguns eventos de forma concentrada e outros mais dispersos (Figura 5.21). As profundidades focais variam de 2 a 10 km. Os epicentros para este ano estão mais dispersos em comparação com os anos anteriores.

A Área 2 apresenta eventos agrupados em duas regiões, já mencionadas em trabalhos anteriores (Capítulo 2). Também é mostrado o epicentro do evento principal de 22 de maio (4,0 m_R). Os hipocentros encontram-se, em sua maioria, até 6km de profundidade (figuras 5.22 e 5.23). Os hipocentros dos eventos dos dois agrupamentos apresentam aumento da profundidade para W. Novamente os focos dos sismos dispersos mostram-se mais profundos a medida em que se afastam da área mais profunda do lago.

Em virtude do pequeno número de eventos nos anos de 1999 e 2000, a análise de seus hipocentros será feita conjuntamente. A sismicidade da Área 2 neste biênio apresenta-se mais dispersa (Figura 5.26), com profundidade variando de 1 a 8 km (figuras 5.27 e 5.28).

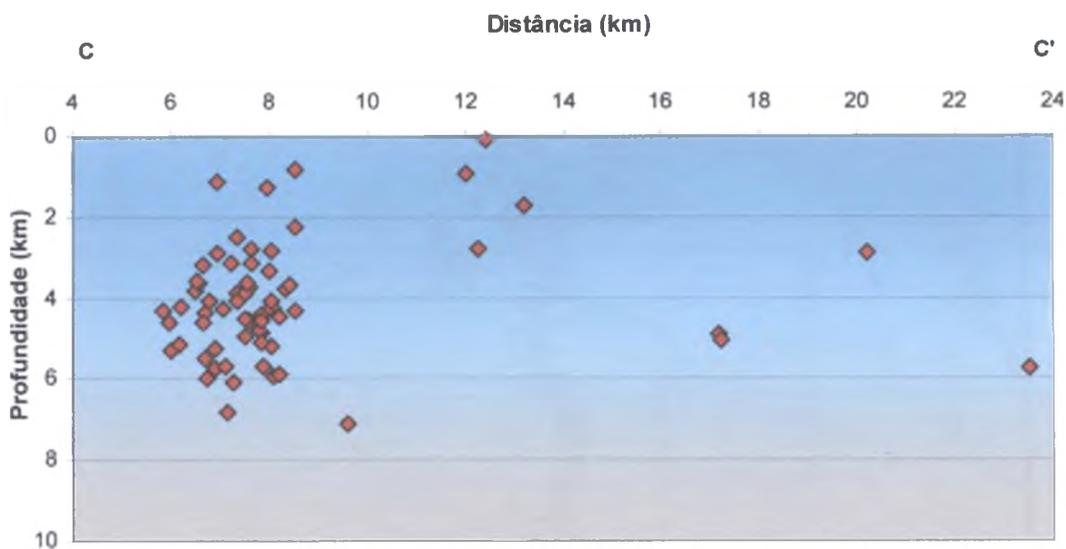


Figura 5.14 – Seção CC' (Figura 5.13) mostrando a distribuição de profundidades dos eventos da Área 2 em 1996.

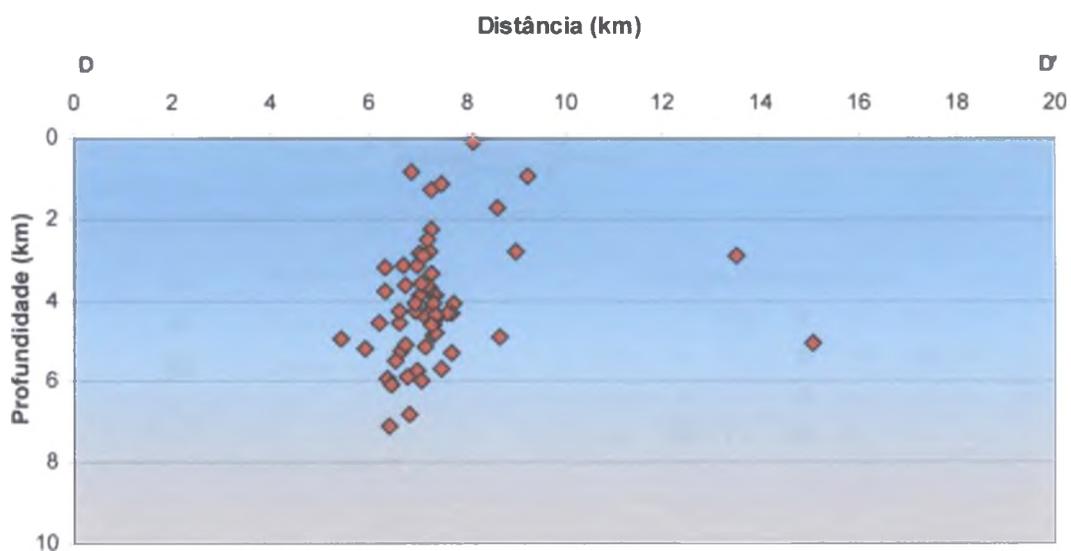


Figura 5.15 – Seção DD' (Figura 5.13) mostrando a distribuição de profundidades dos eventos da Área 2 em 1996.

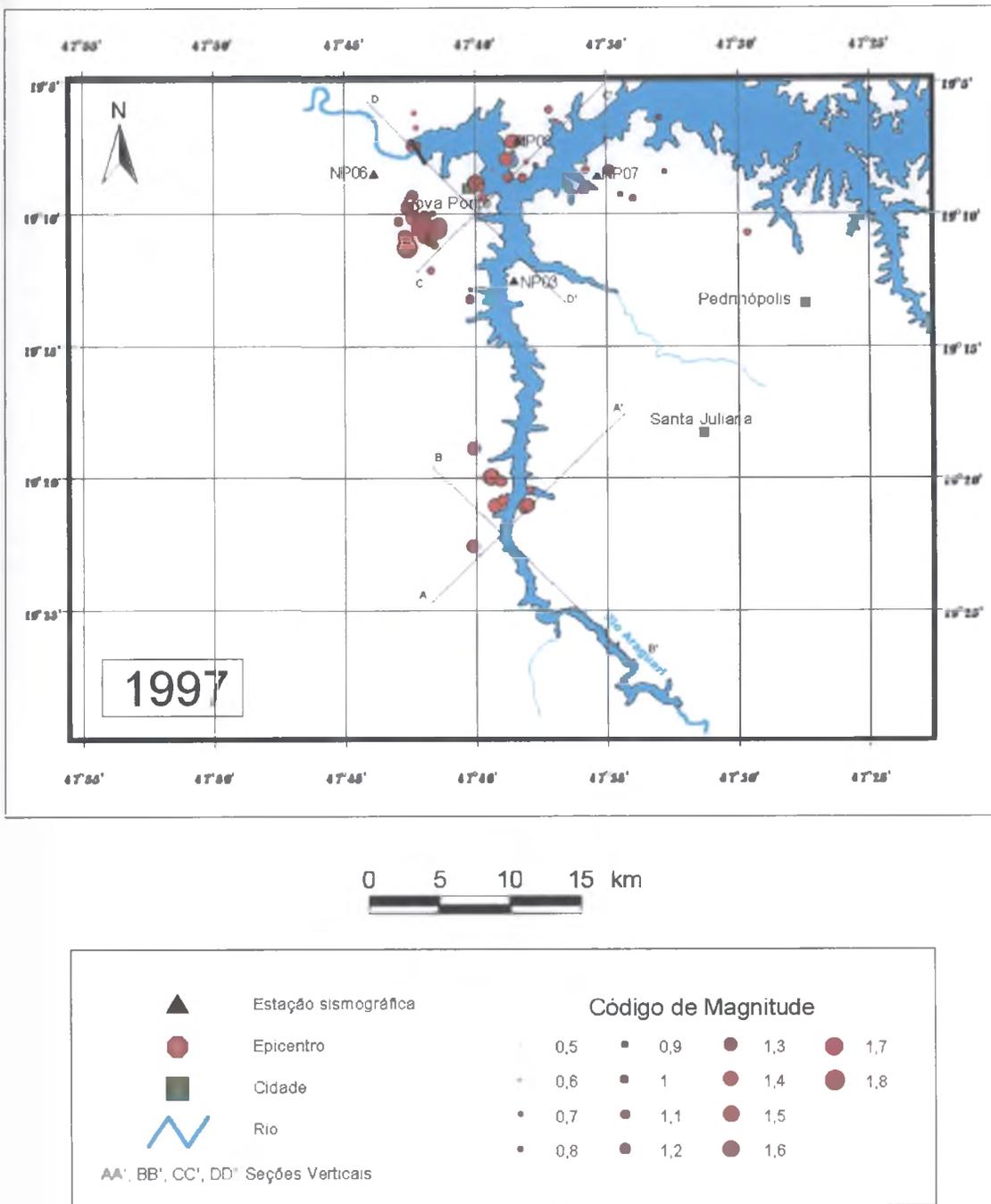


Figura 5.16 – Mapa com a distribuição epicentral dos eventos de 1997 (Apêndice B) e estações operantes na época. Número de eventos: 99.

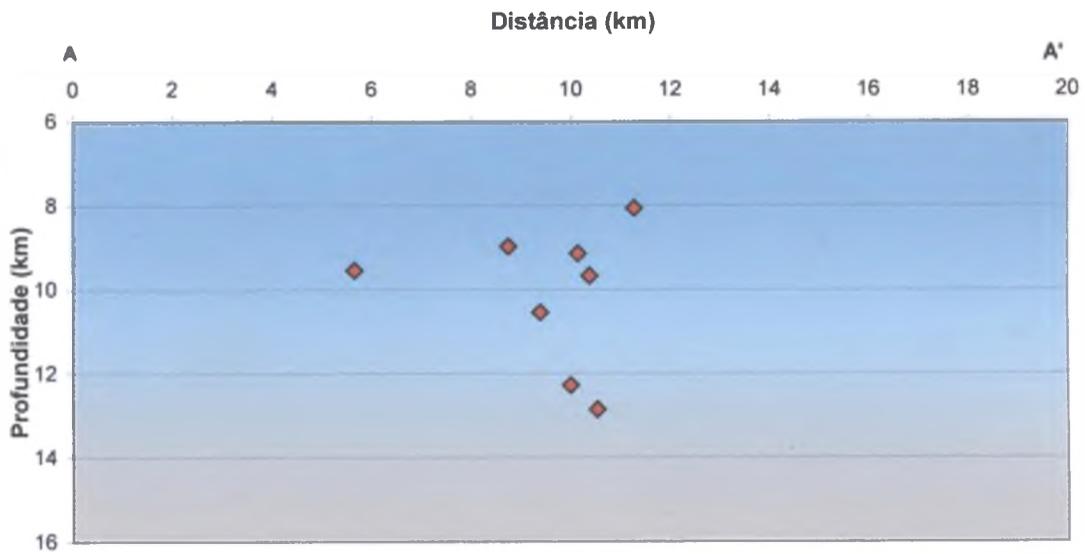


Figura 5.17 – Seção AA' (Figura 5.16) mostrando a distribuição de profundidades dos eventos da Área 1 em 1997.

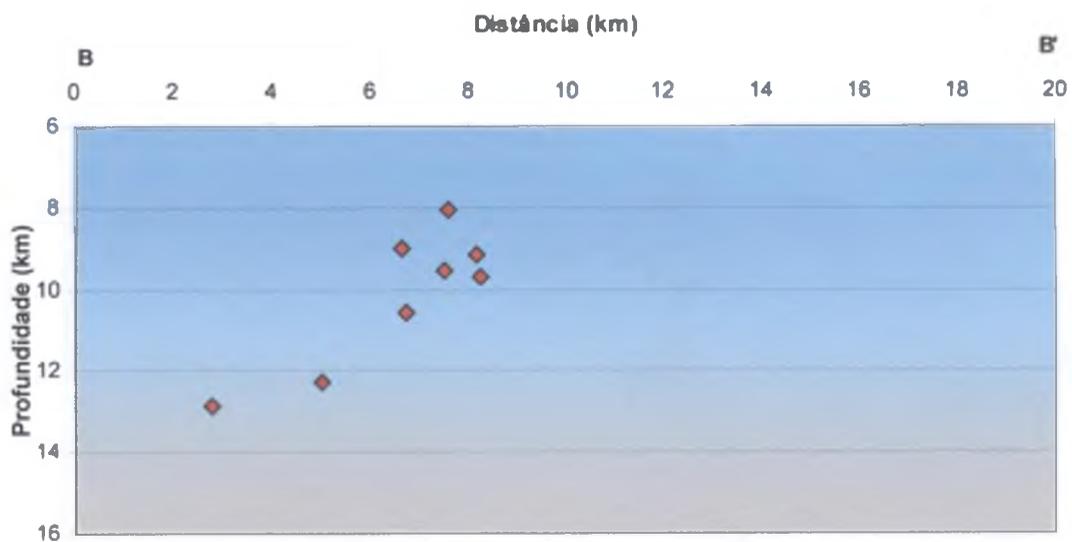


Figura 5.18 – Seção BB' (Figura 5.16) mostrando a distribuição de profundidades dos eventos da Área 1 em 1997.

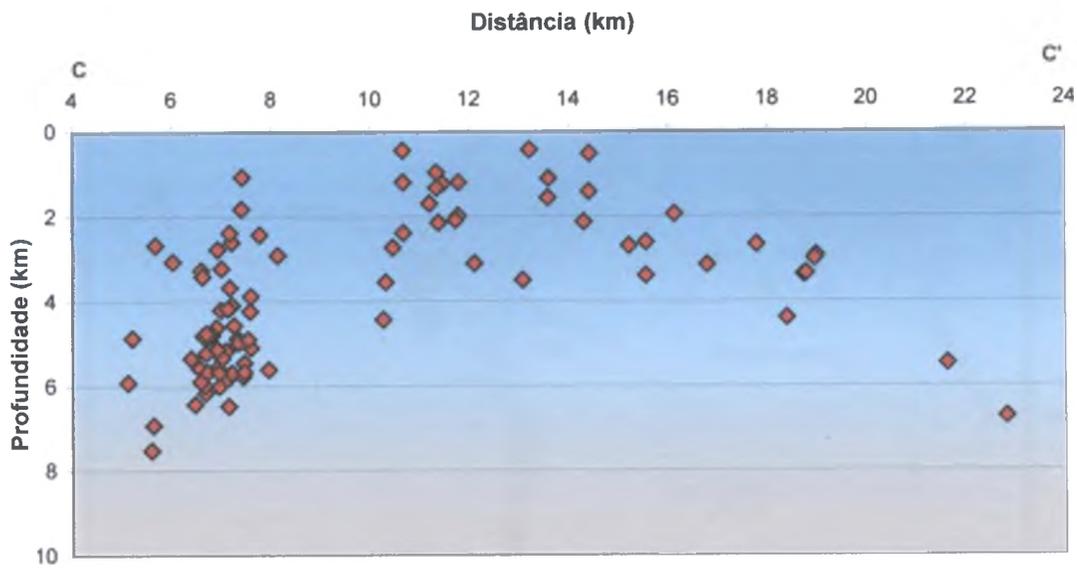


Figura 5.19 – Seção CC' (Figura 5.16) mostrando a distribuição de profundidades dos eventos da Área 2 em 1997.

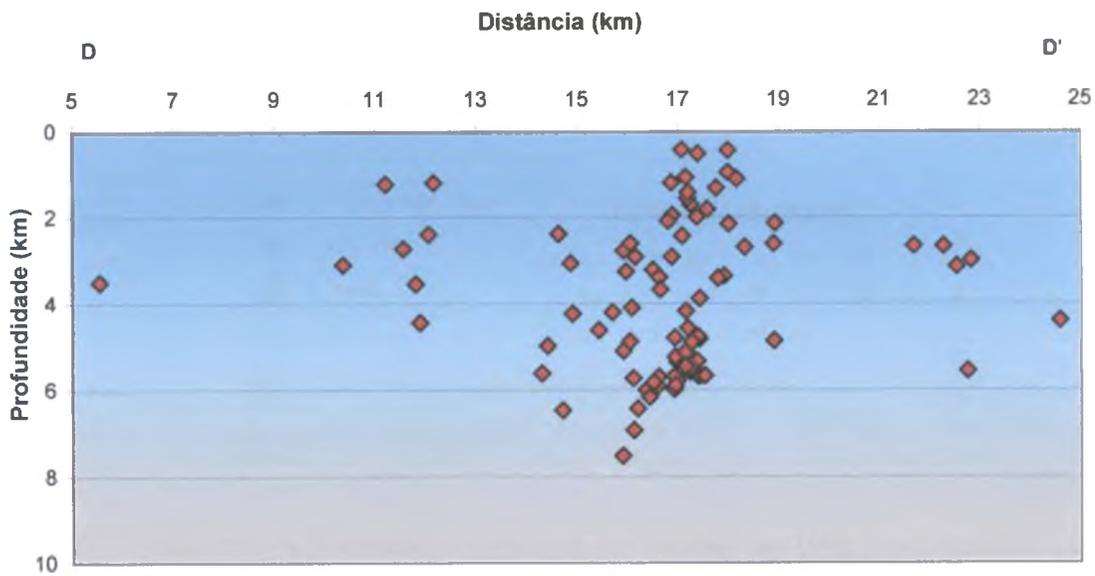


Figura 5.20 – Seção DD' (Figura 5.16) mostrando a distribuição de profundidades dos eventos da Área 2 em 1997.

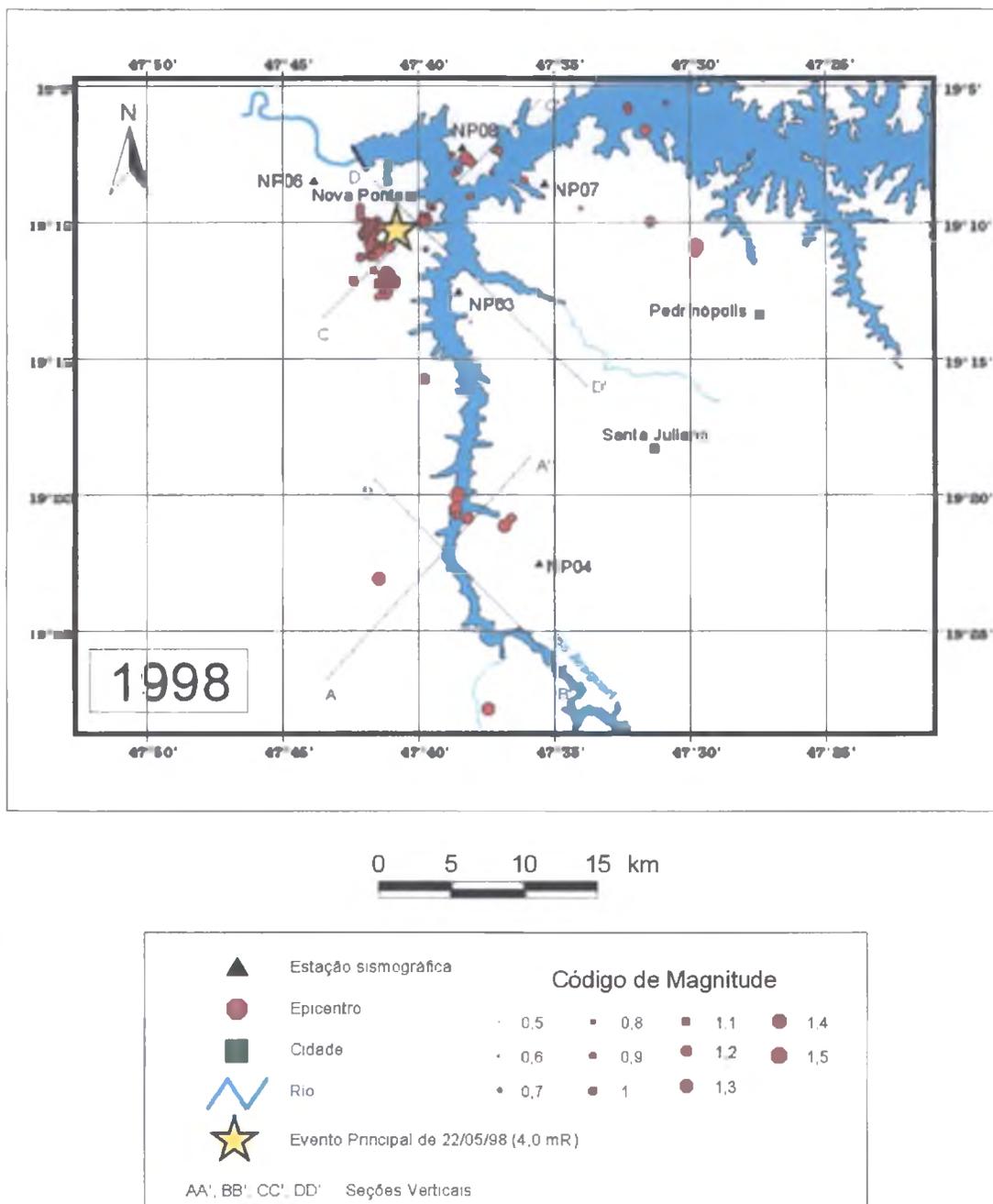


Figura 5.21 – Mapa com a distribuição epicentral dos eventos de 1998 (Apêndice B) e estações operantes na época. Número de eventos: 99.

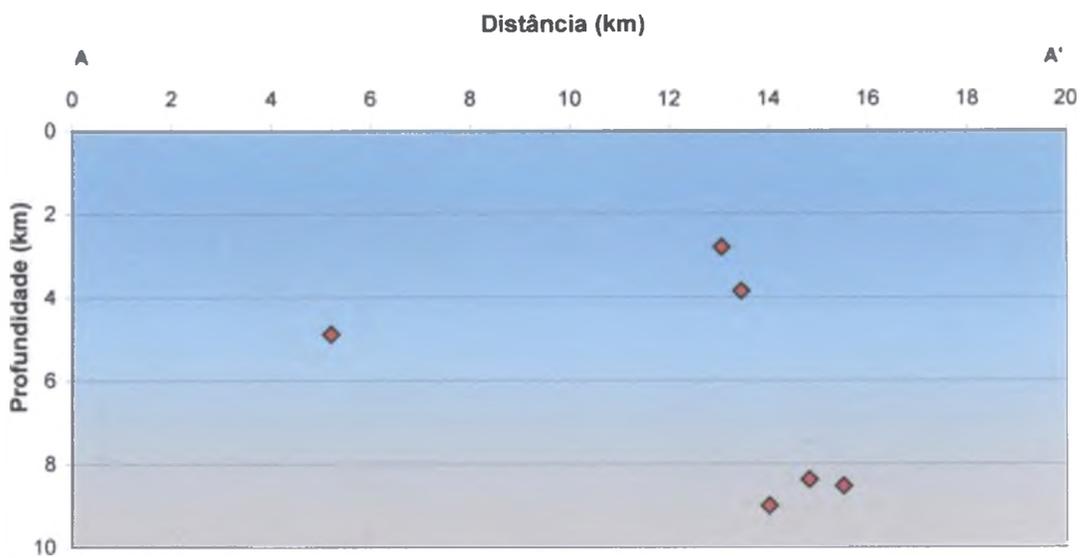


Figura 5.22 – Seção AA' (Figura 5.21) mostrando a distribuição de profundidades dos eventos da Área 1 em 1998.

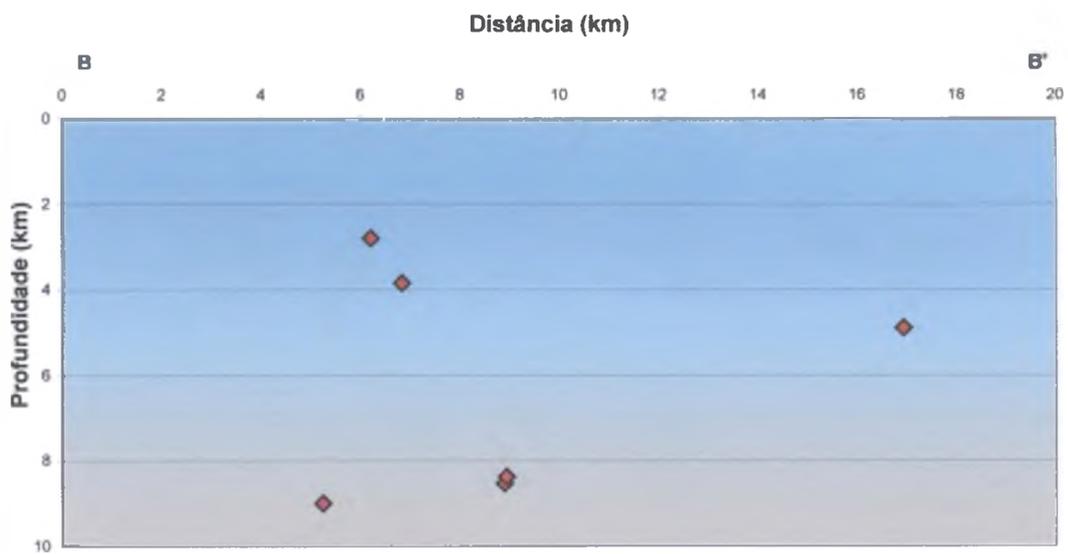


Figura 5.23 – Seção BB' (Figura 5.21) mostrando a distribuição de profundidades dos eventos da Área 1 em 1998.

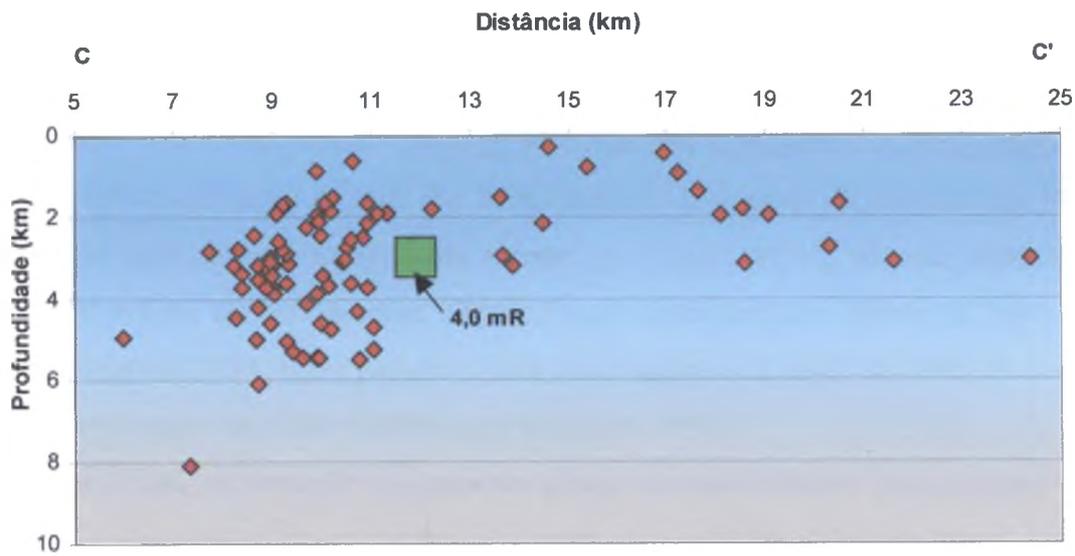


Figura 5.24 – Seção CC' (Figura 5.21) mostrando a distribuição de profundidades dos eventos da Área 2 em 1998. O quadrado verde corresponde ao evento principal de 22 de maio.

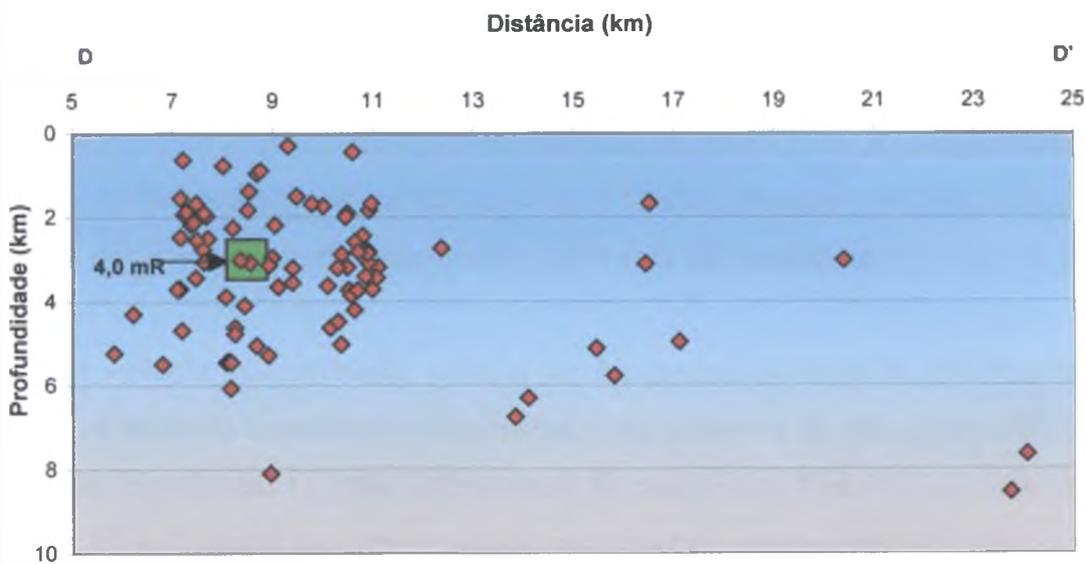


Figura 5.25 – Seção DD' (Figura 5.21) mostrando a distribuição de profundidades dos eventos da Área 2 em 1998. O quadrado verde corresponde ao evento principal de 21 de maio.

A Figura 5.29 apresenta todos os epicentros dos eventos registrados entre 1994 e 2000, sem diferenciação de magnitude, classificados segundo a cor em função do ano de ocorrência.

Para os sismos da Área 1 é possível identificar uma migração dos epicentros, de uma área mais restrita, próxima ao lago em 1994, para as vizinhanças da margem em 1998. As variações da profundidade focal desses eventos nos perfis AA' e BB' são mostradas nas figuras 5.30 e 5.31, respectivamente. Nessas figuras claramente se observa um agrupamento de hipocentros em 1994. Estes passam a ficar mais dispersos a partir de 1995. A disposição dos epicentros sugere um fraco alinhamento na direção NNW.

Uma feição interessante é o aumento gradual da profundidade com o tempo (figuras 5.30 e 5.31). Em 1994 todos os eventos encontram-se a até 5 km de profundidade, sendo que em 1995 os valores encontram-se em sua maioria entre 5 e 10 km. Em 1997 esta profundidade aumentou um pouco mais, ficando, em geral, entre 7 e 14 km. Já para os eventos de 1998, há uma grande dispersão nas profundidades focais. Estes aumentos na dispersão de epicentros e profundidades focais com o tempo sugerem um processo de difusão da água a partir do reservatório, tanto lateralmente quanto verticalmente. Esta difusão teria proporcionando alterações nas condições tectônicas locais e/ou nas propriedades hidromecânicas da rocha, favorecendo a ocorrência dos sismos induzidos. Estes efeitos são observados para os eventos de 1994 a 1997. Para os sismos de 1998 suas localizações hipocentrais são interpretadas como resultantes de um processo de estabilização da influência da água em profundidade, e a ocorrência dos eventos estaria relacionada à liberação de tensões em diversas regiões da crosta.

Esta variação da distribuição espacial dos hipocentros ao longo do período analisado não pode ser atribuída a artefatos, como mudanças na geometria da rede sismográfica ou na determinação hipocentral. O maior adensamento de estações na Área 1 (3 estações) ocorreu apenas em 1994 (Capítulo 4), e, para os anos subsequentes, apenas 1 estação estava presente nas proximidades (NP4), sendo que alguns eventos foram localizados sem dados desta estação. Caso a variação na distribuição espacial dos hipocentros da Área 1 entre 1994 e 2000 fosse resultado apenas da geometria da rede sismográfica, observaríamos uma mudança somente entre 1994 e o restante do período. Isto porque, a partir de 1994, a geometria não apresentou alterações significativas a ponto de influenciar na distribuição espacial da forma observada nas figuras 5.29, 5.30 e 5.31.

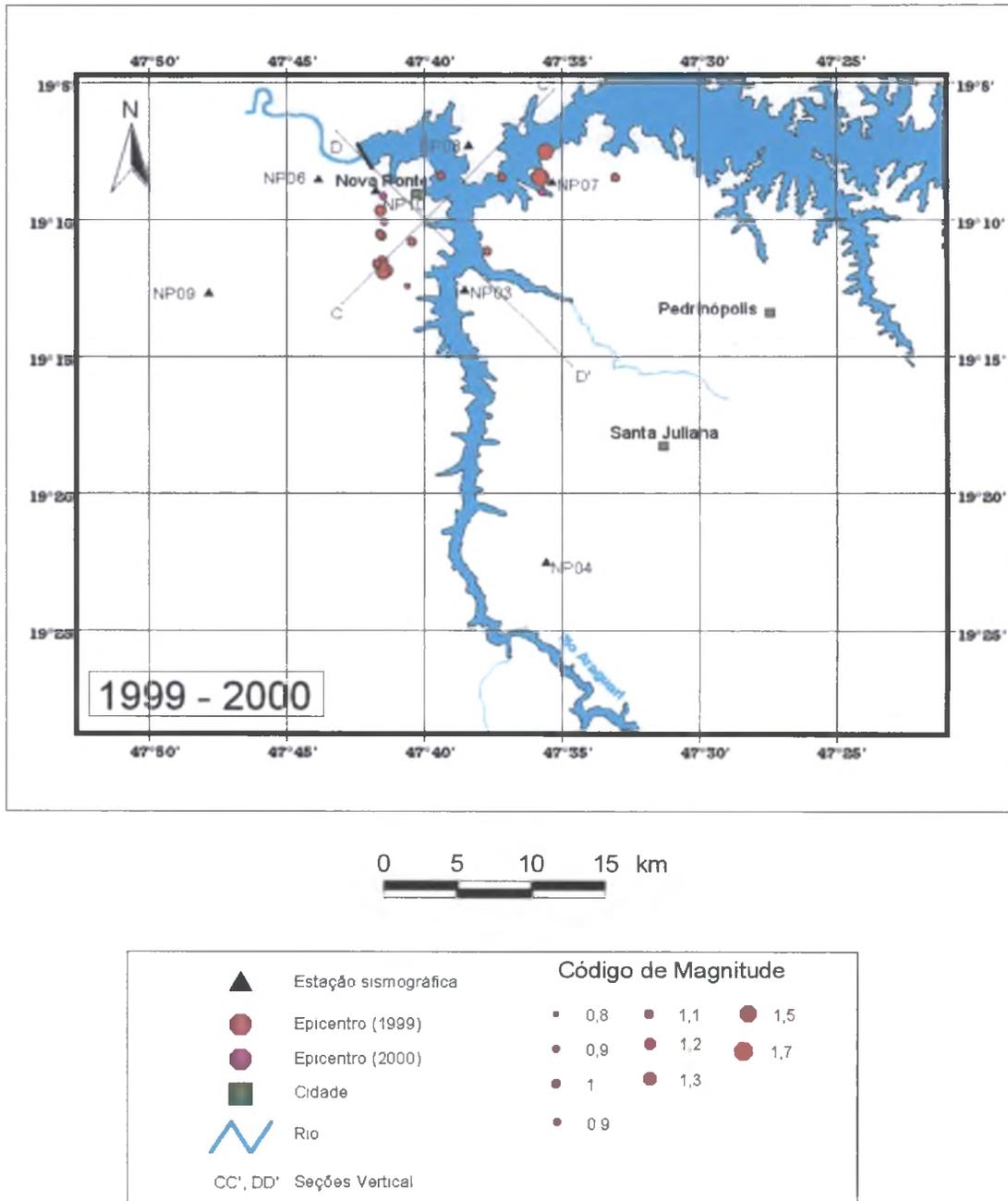


Figura 5.26 – Mapa com a distribuição epicentral dos eventos de 1999 e 2000 (Apêndice B) e estações operantes na época. Número de eventos: 16 de 1999 e 2 de 2000.

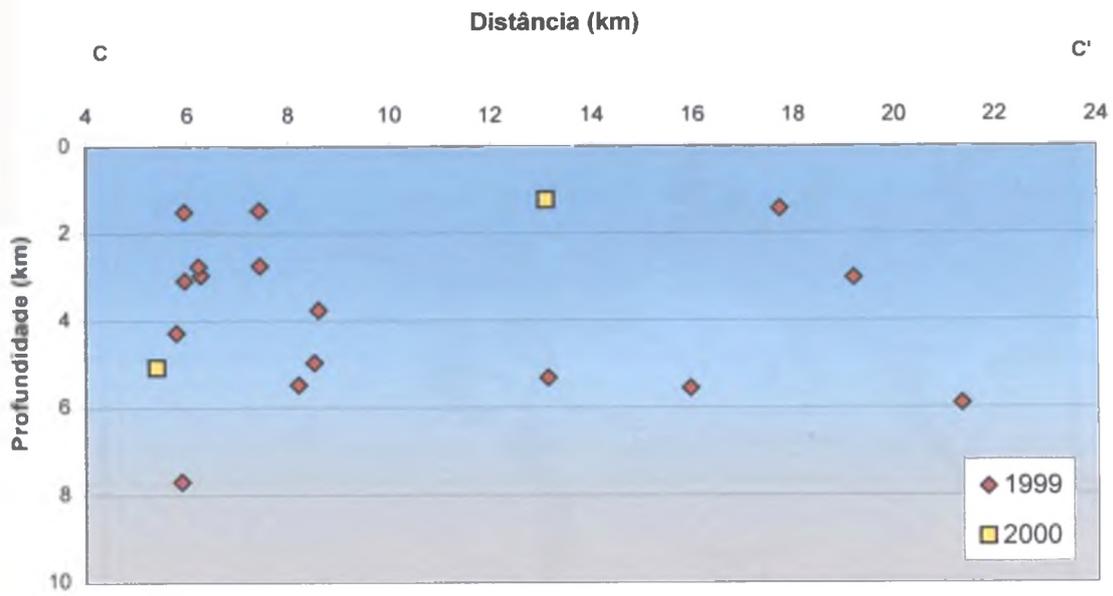


Figura 5.27 – Seção CC' (Figura 5.26) mostrando a distribuição de profundidades dos eventos da Área 2 em 1999 e 2000.

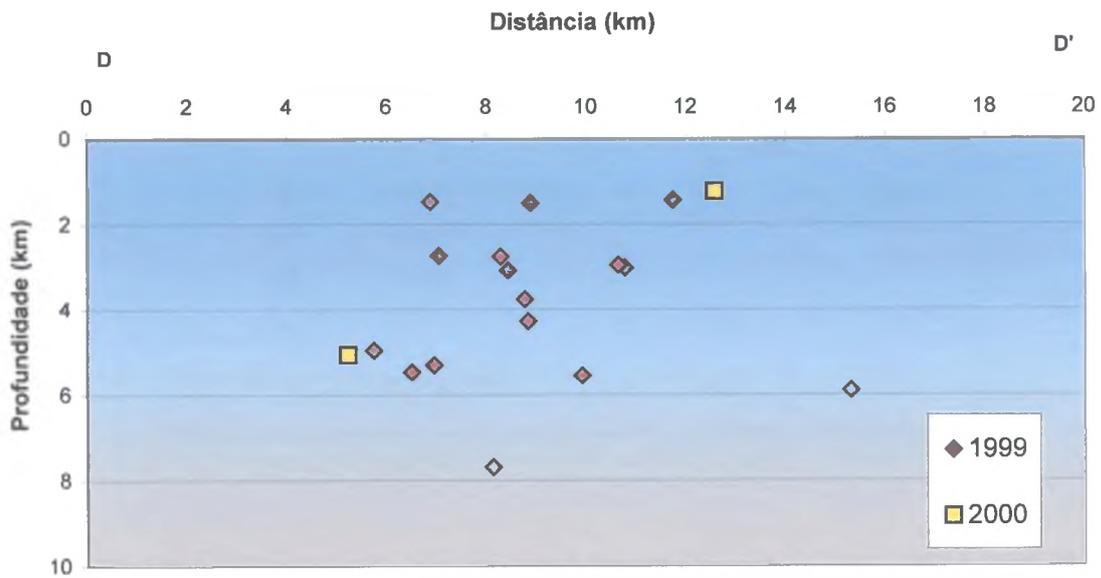


Figura 5.28 – Seção DD' (Figura 5.26) mostrando a distribuição de profundidades dos eventos da Área 2 em 1999 e 2000.

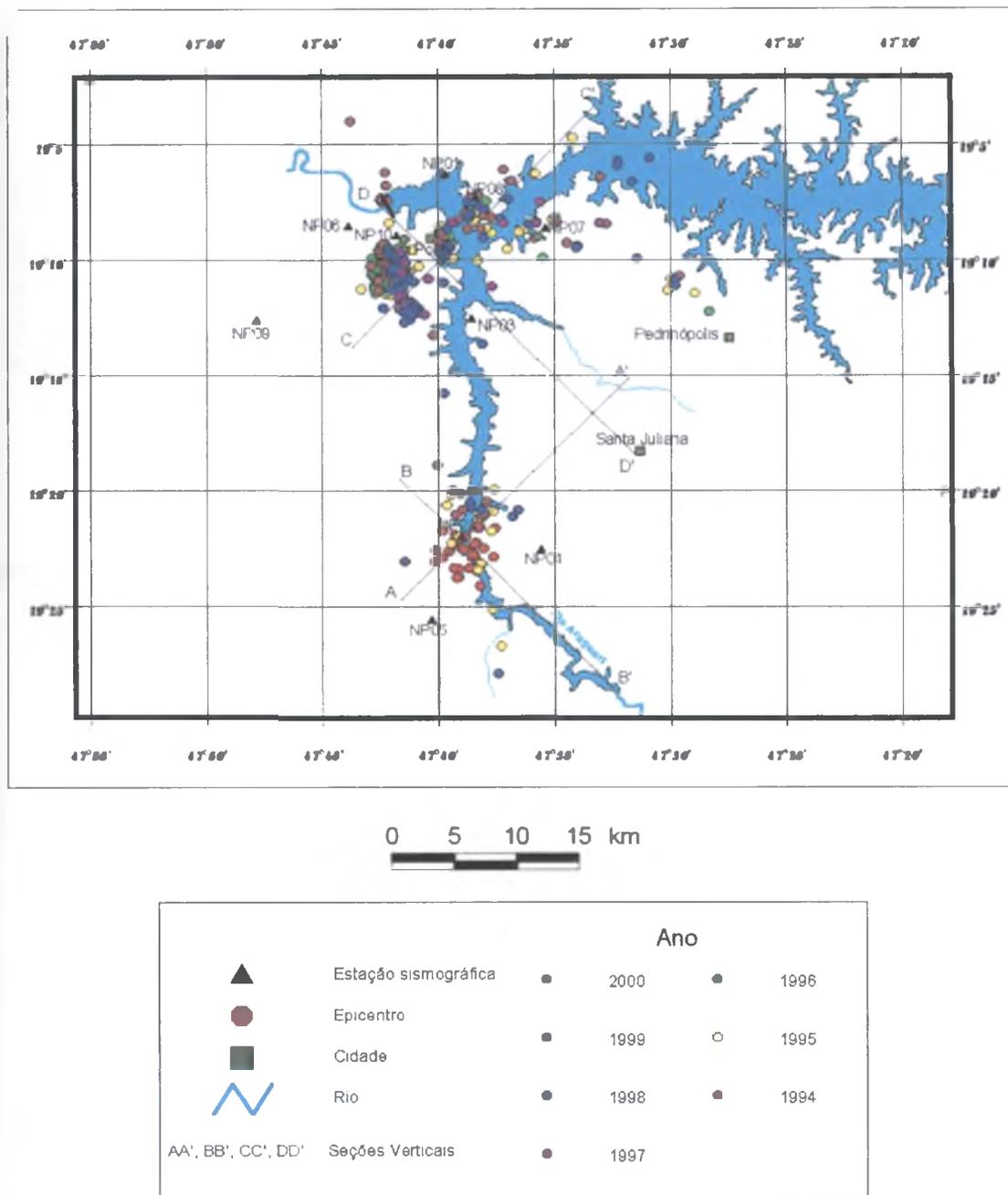


Figura 5.29 – Mapa com a distribuição epicentral de todos os eventos entre 1994 e 2000 (Apêndice B) e estações que operaram neste intervalo de tempo. Os eventos estão classificados de acordo com o ano de ocorrência e não foram individualizados segundo a magnitude. Número de eventos: 377.

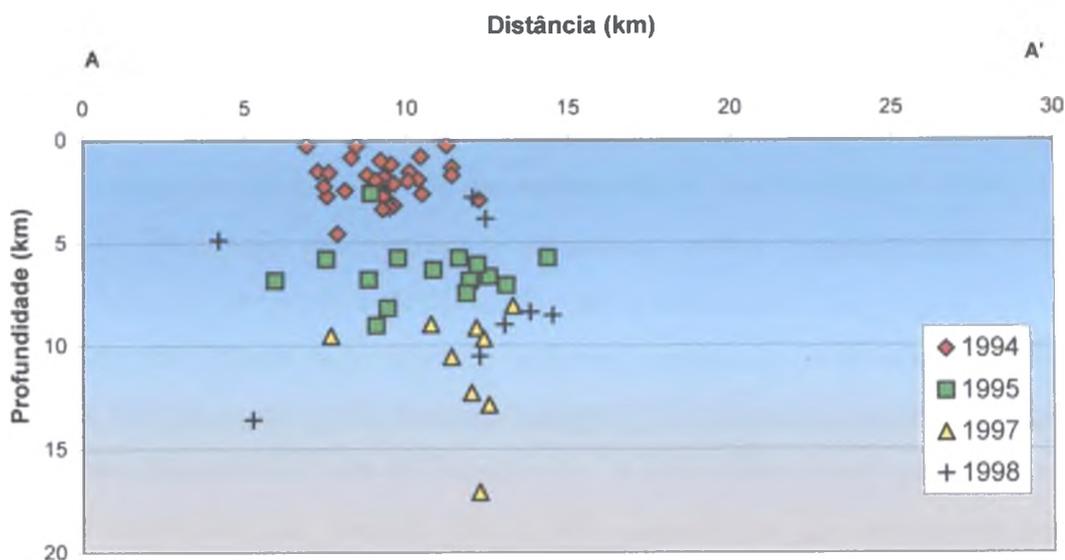


Figura 5.30 – Seção AA' (Figura 5.29) mostrando a distribuição de profundidades dos eventos da Área 1 entre 1994 e 2000.

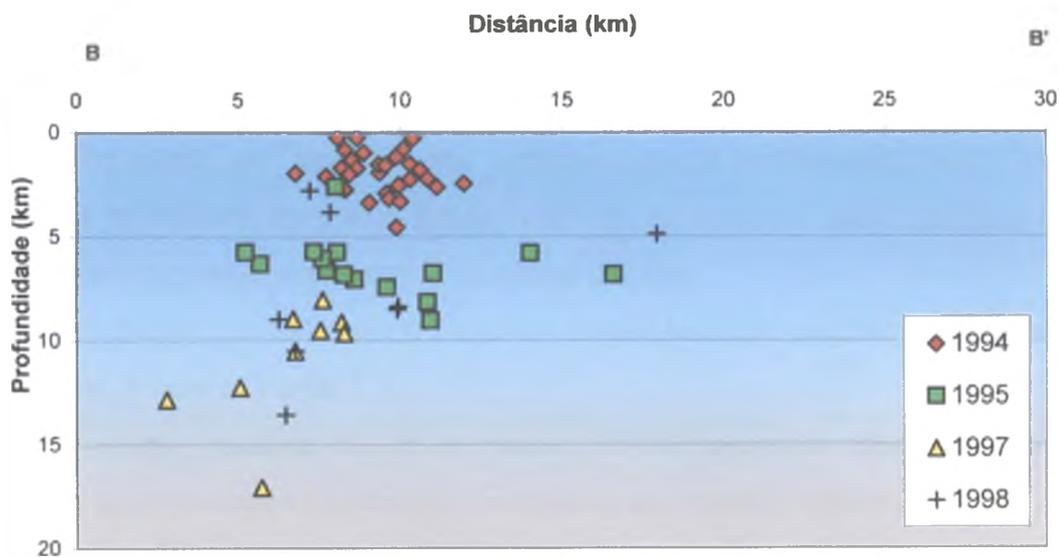


Figura 5.31 – Seção BB' (Figura 5.29) mostrando a distribuição de profundidades dos eventos da Área 1 entre 1994 e 2000.

A distribuição dos epicentros da Área 2 entre 1994 e 2000 é mostrada na Figura 5.29. Observam-se eventos agrupados numa área restrita de aproximadamente 4 km de largura e 7 km de comprimento. Este agrupamento possui direção aproximada NNW, que coincide com a direção de alongamento das isossistas do evento de 21 de abril de 1995 (Capítulo 2, Figura 2.6), e aproxima-se das direções dos mecanismos focais definidos para esta área (Capítulo 2, Figura 2.10 Tabela 2.3). Neste agrupamento também estão o evento principal de 22 de maio de 1998 (4,0 m_R) e os sismos a ele associados (pré e pós-abalos).

Uma sismicidade mais dispersa, contendo o evento de 21 de abril de 1995 (3,5 m_R) também é vista na região a leste deste agrupamento, estendendo-se por até 25 km da cidade de Nova Ponte, nas proximidades de Pedrinópolis. A distribuição desses epicentros sugere dois fracos alinhamentos nas direções NE e NW, semelhantes às direções de soluções de mecanismos focais definidos para a área 2 (Capítulo 2, Figura 2.10 e Tabela 2.3). As seções CC' e DD' (figuras 5.32 e 5.33, respectivamente) mostram que os focos encontram-se, em sua maioria, a até 10 km de profundidade. Na seção CC' é visível a individualização dos eventos do agrupamento. Outra feição observada é o aumento das profundidades dos eventos em direção a NE (eventos dispersos) e SW (eventos agrupados), praticamente a partir do centro do perfil. Os hipocentros do agrupamento mostram maiores profundidades em direção a W, como é visto nas figuras 5.32 e 5.33.

Diferentemente do observado para a Área 1, os hipocentros dos eventos da Área 2, no período em estudo, não mostram uma variação clara da profundidade com o tempo, com ocorrência de eventos em profundidades variáveis em todos os anos. Este fato deve estar relacionado a alguma característica geotectônica da área.

Um mapa com todos os 377 eventos analisados neste trabalho, diferenciados pelas magnitudes, é visto na Figura 5.34.

O evento principal de 22 de maio de 1998 apresentou uma seqüência sísmica completa, com pré-abalos adiantados e imediatos e pós-abalos (Capítulo 2). O mapa da Figura 5.35 mostra a distribuição epicentral desta seqüência, enquanto que os perfis CC' e DD' (figuras 5.36 e 5.37 respectivamente) mostram a disposição das profundidades.

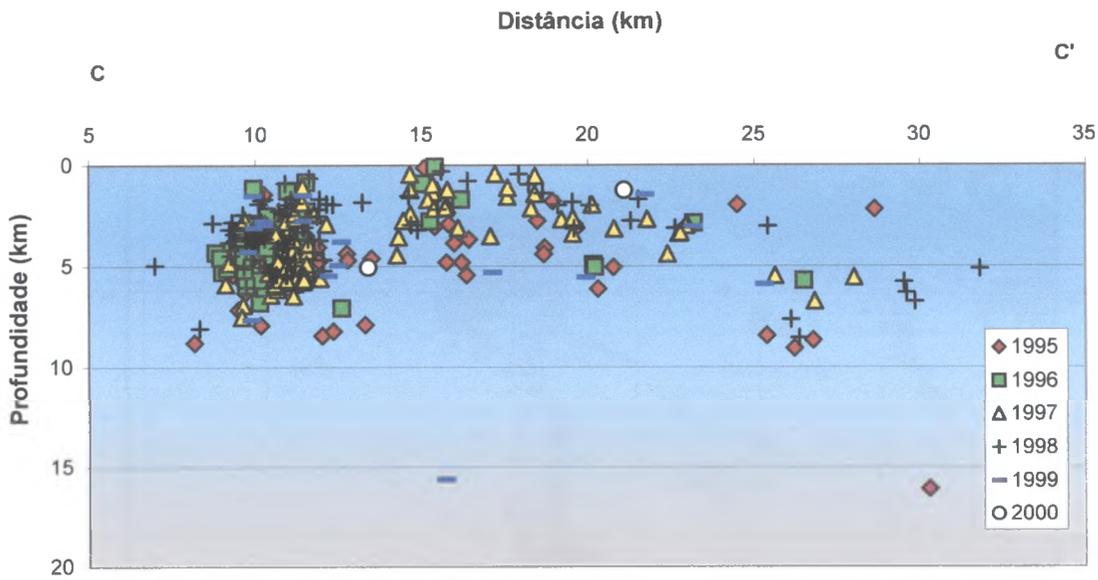


Figura 5.32 – Seção CC’ (Figura 5.29) mostrando a distribuição de profundidades dos eventos da Área 2 entre 1994 e 2000.

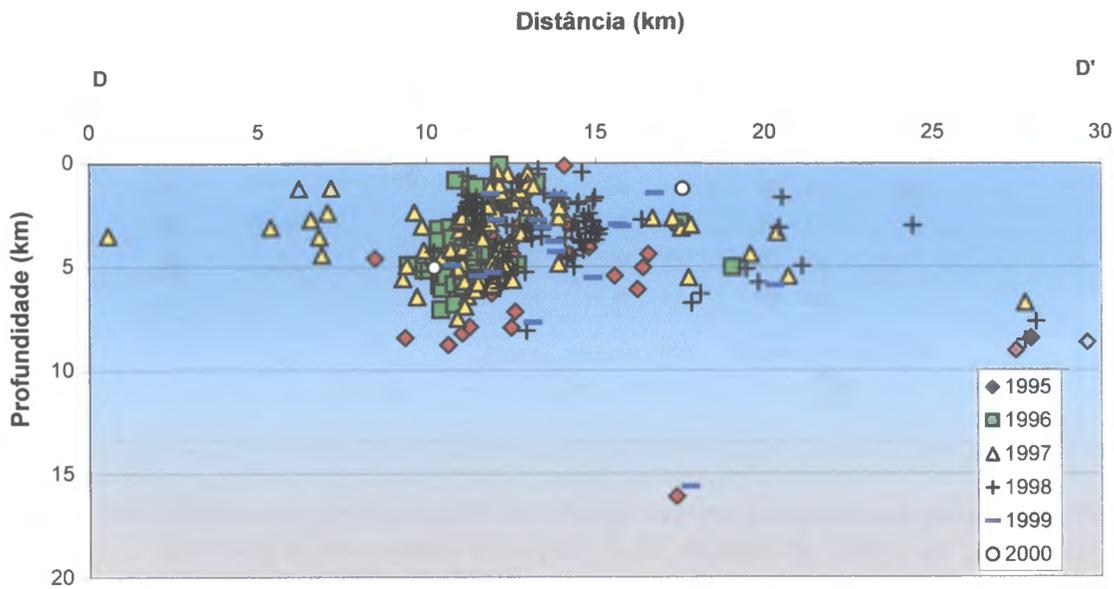


Figura 5.33 – Seção DD’ (Figura 5.29) mostrando a distribuição de profundidades dos eventos da Área 2 entre 1994 e 2000.

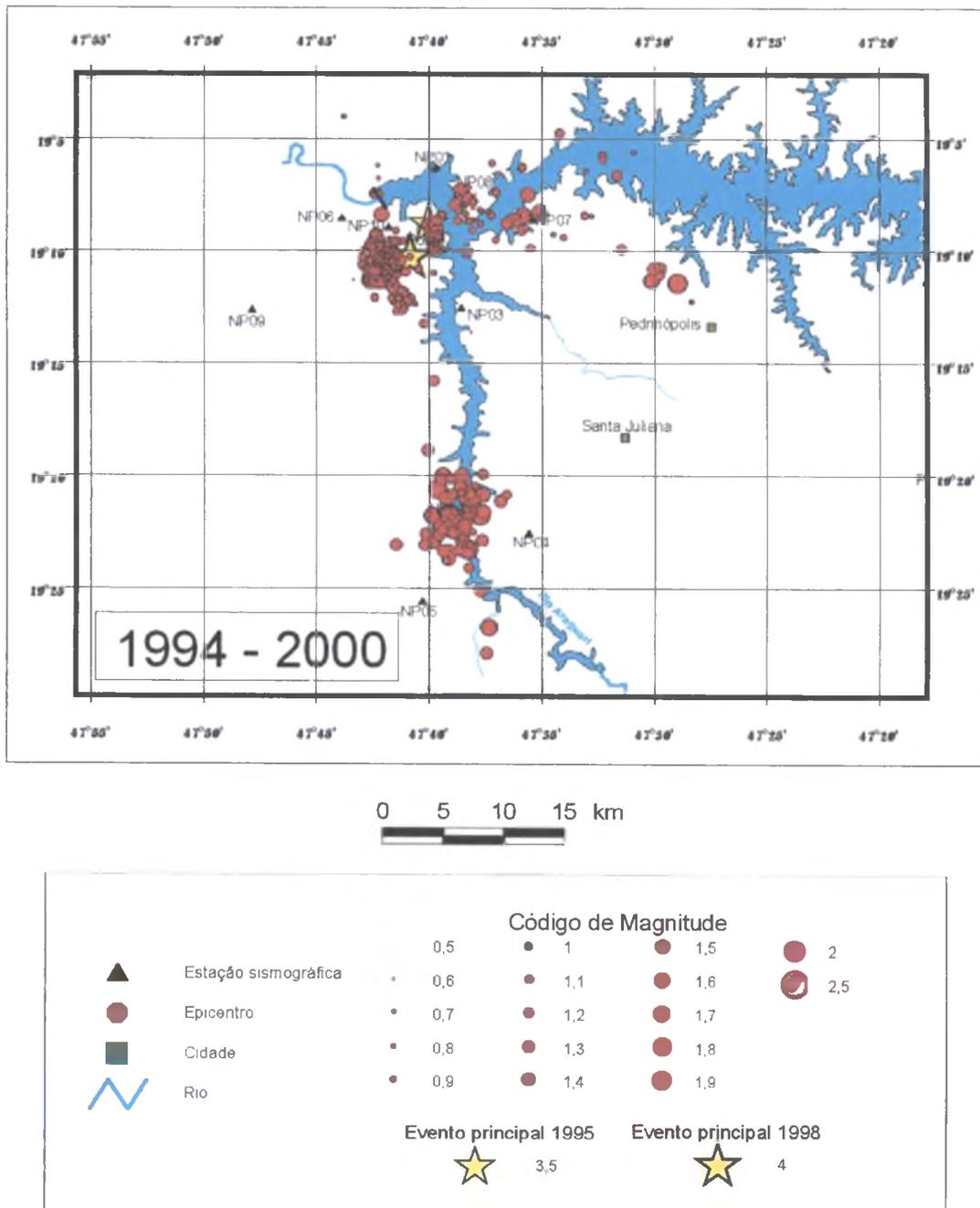


Figura 5.34 – Distribuição dos epicentros de todos os eventos localizados no período de 1994 a 2000 (círculos) e dos eventos principais de 21 de abril de 1995 e de 22 de maio de 1998 (estrelas) (Apêndice B). Número de eventos: 377.

A variação espacial dos hipocentros dessa seqüência sísmica, mostrada nas seções CC' e DD', sugere que as tensões locais concentraram-se, inicialmente, na região definida pelos

focos dos pré-abalos adiantados. Em seguida, a concentração se deu na área dos pré-abalos imediatos e do evento principal. Com a ocorrência deste evento maior, houve distribuição das tensões em toda a área e a ocorrência dos pós-abalos de forma dispersa. A distribuição dos focos na seção CC' sugere um provável plano de falha com mergulho para NW.

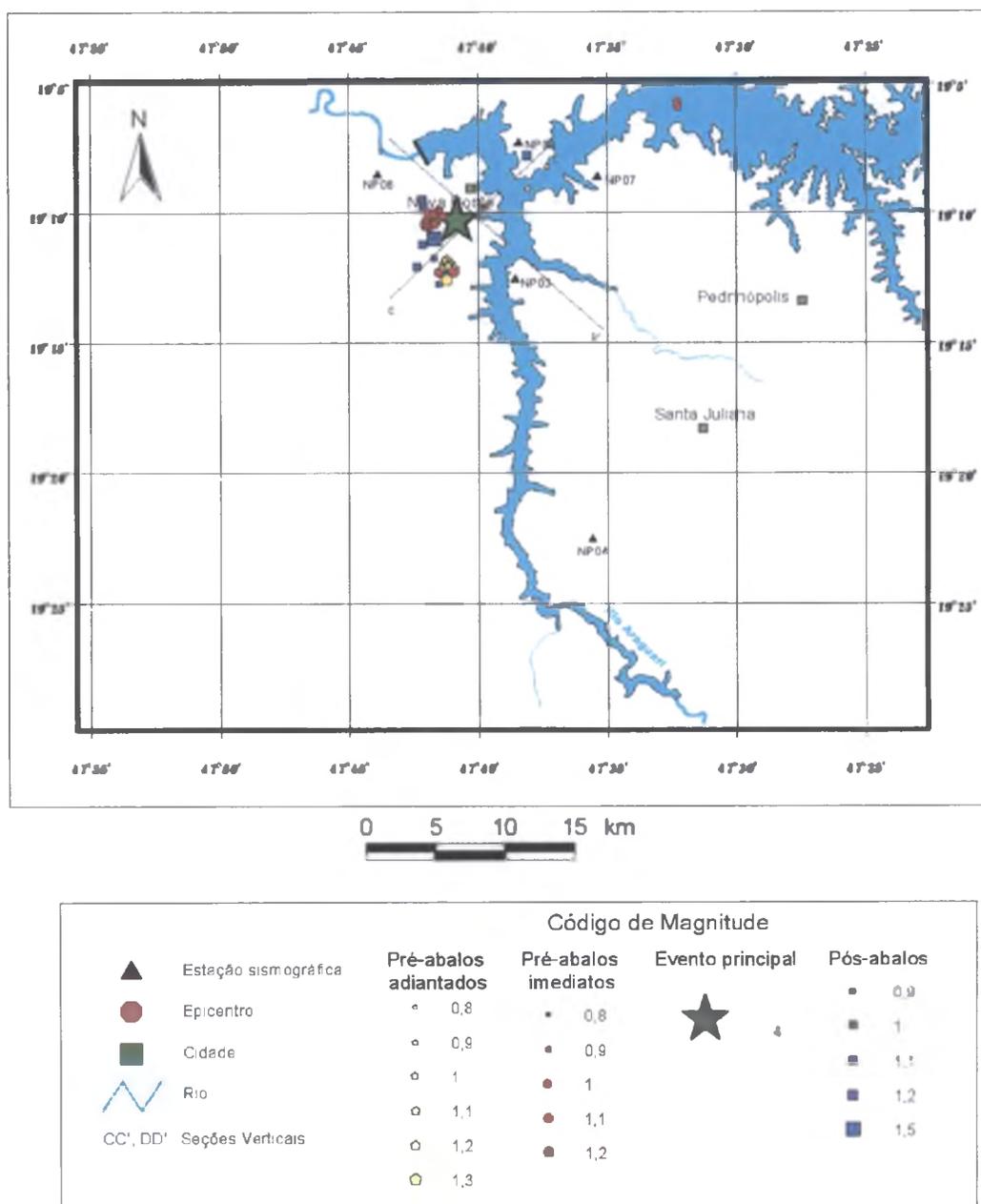


Figura 5.35 – Mapa com a distribuição epicentral do evento principal de 22 de maio de 1998 (4,0 m_R), sismos associados e estações que operaram neste intervalo de tempo. Número de eventos: 56.

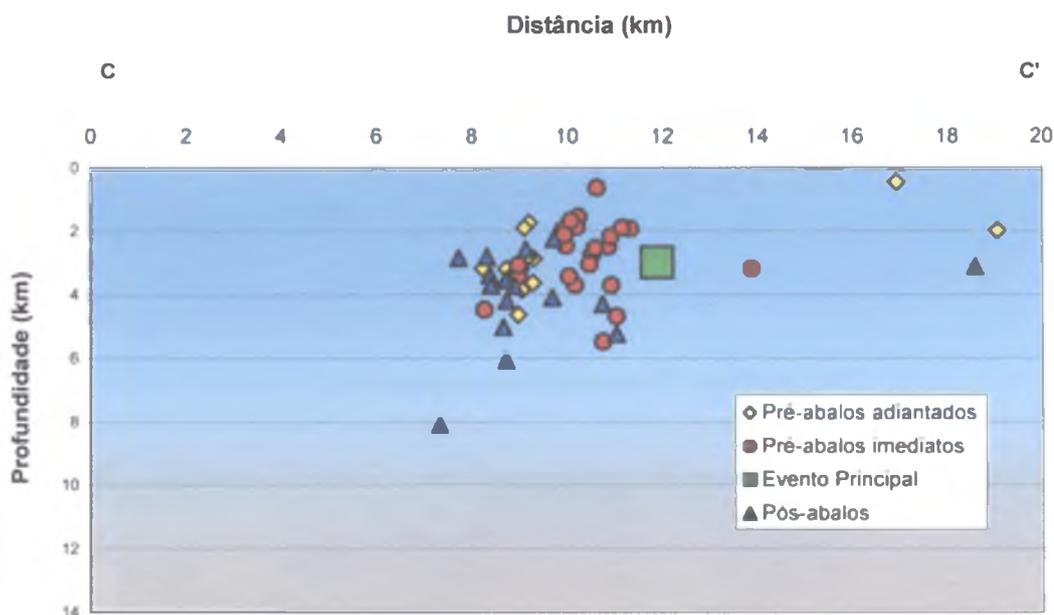


Figura 5.36 – Seção CC' (Figura 5.35) mostrando a distribuição de profundidades dos eventos da seqüência sísmica relacionada ao evento principal de 22 de maio de 1998 (4,0 m_R) (Marza *et al.*, 1999b).

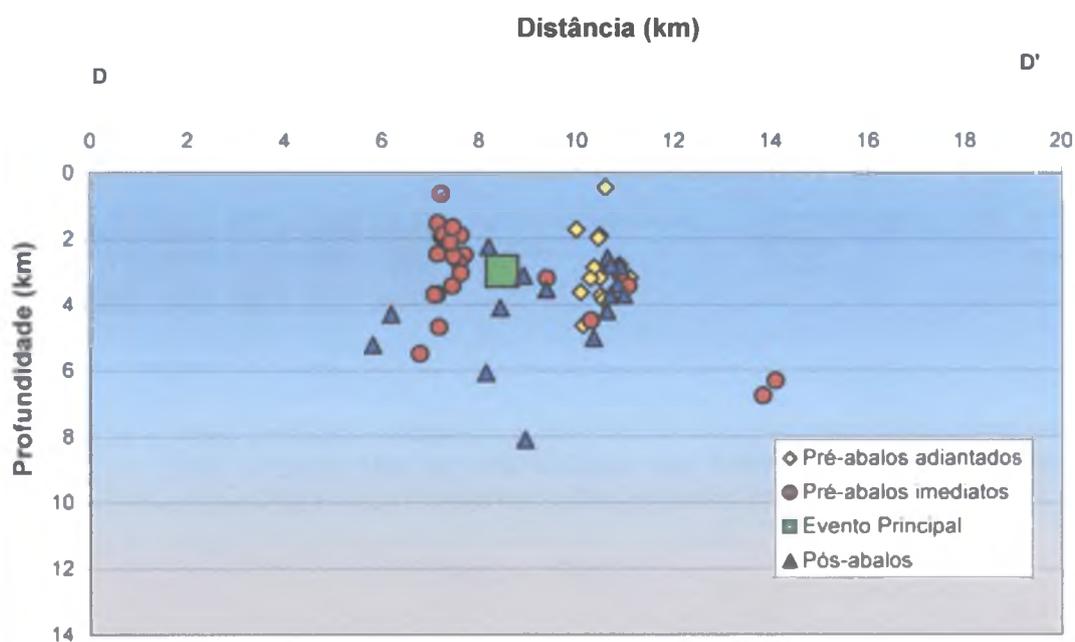


Figura 5.37 – Seção DD' (Figura 5.35) mostrando a distribuição de profundidades dos eventos da seqüência sísmica relacionada ao evento principal de 22 de maio de 1998 (4,0 m_R) (Marza *et al.*, 1999b).

Na tentativa de correlacionar a distribuição espacial da sismicidade com feições tectônicas presentes na área, dispomos os epicentros de todos os 377 eventos analisados no mapa geológico de Nova Ponte (Figura 5.38). Nesta análise, os eventos não foram individualizados segundo sua magnitude para facilitar a visualização de possíveis tendências na disposição dos epicentros.

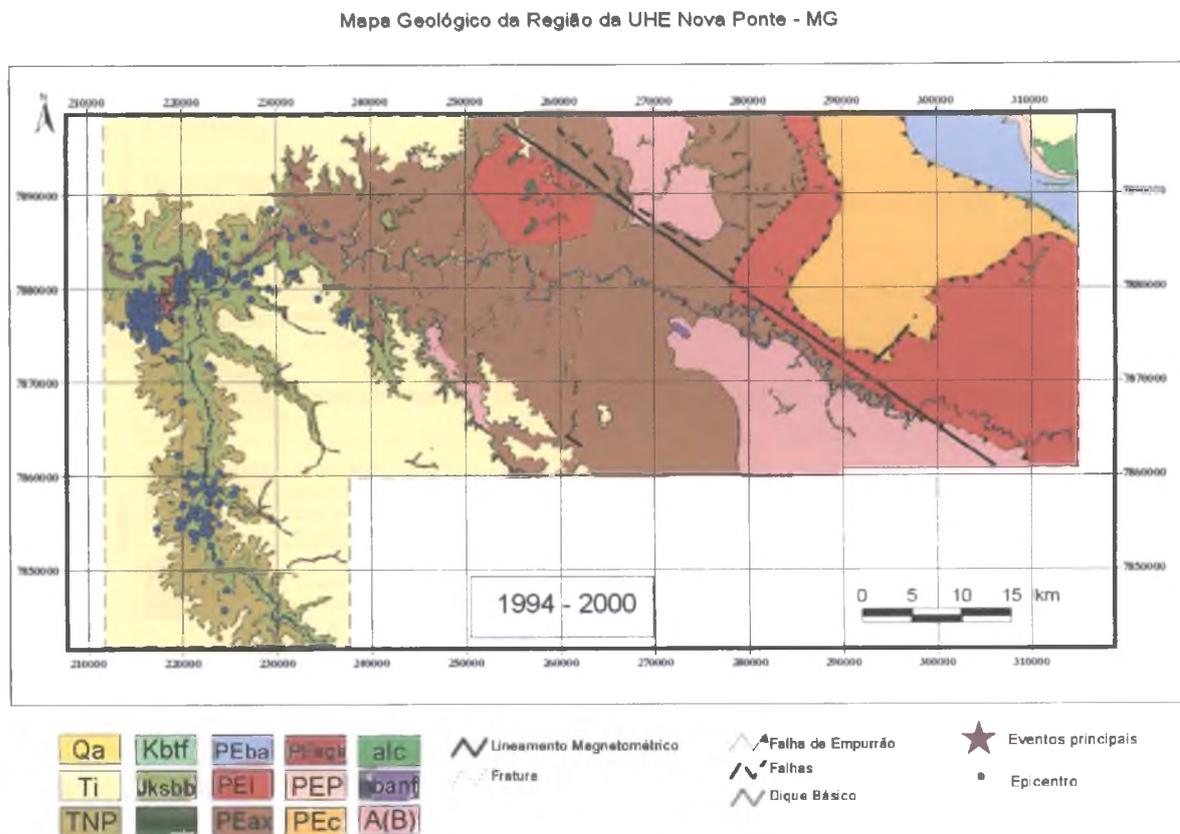


Figura 5.38 – Mapa geológico mostrando a distribuição dos epicentros dos eventos ocorridos entre 1994 e 2000. Não há diferenciação dos eventos por magnitude por motivo de comparação com as feições tectônicas presentes. Número de eventos: 377.

Etimológico	Cenozóico	Quaternário	Qa	Aluviões recentes: areia, cascalho e argila	
			Ti	Unidade não diferenciada: cobertura detrítica arenosa	
		Terciário	TNP	Unidade Nova Ponte: terraços fluviais com níveis de cascalho e areia, subordinadamente coluviões	
	Mesozóico	Cretáceo		alc	Intrusivas Alcalinas: alcalinas em geral
				Kbtf	Tuítos e aglomerados vulcânicos
		Jurássico		Jksbb	Formação Serra Geral: basalto vítrófilo maciço ou amigdaloidal contendo localmente na base níveis delgados de tuítos
				Jksba	Formação Botucatu: arenito puro quartzo com níveis de conglomerados, breccias sedimentares e localmente com contribuição tufácea no topo
	Proterozoico	Superior		PEagb	Corpos gabróides anfibolitizados ou xistificados e localmente xistos gnaissóides
				PEax	Clonita-tremolita xisto, tremolito, quartzo-clonita-tremolita-muscovita xisto, quartzo-clonita-muscovita xisto com ou sem silimanita, quartzo-biotita-clonita-granada xisto localmente gnaissóide, quartzo-clonita-sencita xisto localmente granatífero e anfibolitos
				PEI	Quartzo-sencita-clonita xisto associado ou não a rochas finamente laminadas da unidade PEaxI
Médio			PEba	Ardosia, margá e metapelito	
			PEP	Metarenito e metassiltito	
			PEc	Quartzitos puros e micáceos e filitos quartzo-sencítico-clorítico e quartzo-sencítico-clorítico carbonático	
			qbanf	Corpos gabróides anfibolitizados	
Arqueano		A(B)	Complexo Granítico-Gnaissico: Gnaisses a duas micas, quartzo-biotita-clonita-plagioclásio gnaisses, quartzo-plagioclásio-biotita-muscovita-epidoto gnaisses, milonito gnaisses, anfibolitos laminados, granito leucocrático maciço e gnaissificado		

Figura 5.38 – (Continuação) Legenda para o mapa geológico.

Podemos observar um ligeiro alinhamento de epicentros, na Área 1, segundo a direção NNW, coincidente com a direção de parte do rio Araguari nesta área. Para a Área Sísmica 2 é possível inferir um alinhamento aproximadamente NNW para o agrupamento a oeste dos eventos principais de 1995 e 1998 (estrelas vermelhas). A distribuição dos epicentros dispersos a leste do agrupamento sugere direções preferenciais para NE e NW. Estas duas direções são coincidentes com as direções gerais das fraturas, falhas e lineamentos geofísicos, individualizados no mapa geológico.

Assim, os eventos induzidos em Nova Ponte estariam ocorrendo em direções preferenciais, coincidentes com as de planos de fraqueza (falhas, fraturas, alinhamentos geofísicos ou geomorfológicos) identificados no estudo geológico da região (CEMIG, 1990). Este fato está de acordo com modelos teóricos, onde o peso do lago seria insuficiente para a produção de falhamentos. A orientação dos planos de fraqueza pré-existentes favoráveis à movimentação, juntamente com as tensões tectônicas presentes na região próximas ao valor crítico, são pré-requisitos para que a influência do lago (tensão elástica e pressão de poro) induza sismicidade.

CAPÍTULO 6

Quantificação da SIR em Nova Ponte

6.1 – Introdução

No estudo da sismicidade, é essencial conhecer não apenas a localização hipocentral e a hora origem do sismo (Capítulo 5), mas também seu tamanho. A energia sísmica pode ser usada para expressar o tamanho de um sismo, mas seu cálculo não é simples. Outro parâmetro que pode ser utilizado na determinação do tamanho do terremoto é o momento sísmico, mas sua determinação também é complexa e depende do modelo adotado para a fonte (Takeya, 1985). A magnitude é uma medida desprovida de dimensão física e sua relação com o fenômeno do terremoto em seu foco é pouco clara (Báth, 1981), mas que fornece uma idéia do “tamanho” do terremoto. As vantagens de sua utilização são a facilidade no cálculo e as diversas aplicações. Conhecendo-se o valor da magnitude dos eventos de determinada área podemos classificá-los, compará-los com sismos de outras regiões e estimarmos a quantidade de energia por ele liberada.

Desde a introdução da escala de magnitude local M_L por Richter em 1935, para os terremotos do sul da Califórnia, diversos outros cálculos têm sido elaborados utilizando amplitudes de ondas de corpo ou superficiais. Para a sismicidade brasileira, Assumpção (1983) definiu uma fórmula de magnitude calibrada com base na escala m_b telessísmica, válida para sismos com distâncias epicentrais entre 200 e 1500 km.

Nos estudos de sismicidade de determinada área usando estações locais, sismos com magnitudes acima de 2 facilmente saturam o registro, impossibilitando o uso de fórmulas baseadas na amplitude do sinal para sua quantificação. Entretanto, suas magnitudes podem ser determinadas por estações regionais ou telessísmicas. Por outro lado, sismos pequenos não podem ser registrados a distâncias muito grandes, sendo necessário o uso de uma magnitude local. Para resolver este problema, comumente utilizam-se medidas da duração do registro sísmico para a estimativa da magnitude do evento. A magnitude baseada na duração não é influenciada pela saturação do registro para sismos grandes registrados por estações locais.

Tendo como base o exposto acima, neste capítulo serão apresentadas as relações obtidas para o cálculo da magnitude dos eventos de Nova Ponte, utilizando a duração do sinal sísmico nas estações NP3 e NP4. Além disso, foi determinado o parâmetro b da relação Gutenberg–Richter (ou relação de recorrência) para todo o período de estudo (1994 a 2000), conjuntamente e anualmente, e para as seqüências de pré-abalos e pós-abalos do sismo principal de 22 de maio de 1998.

6.2 – Magnitude de Duração

6.2.1 - Ondas de Cauda

Uma feição característica nos registros sísmicos é a presença de uma cauda que se segue após cada fase (Figura 6.1), cuja amplitude decai com o tempo, denominada onda de cauda (*coda waves*). A onda de cauda de um sismo foi considerada por Aki (1969) como resultante de ondas de espalhamento para trás (*backscattering waves*), provenientes de heterogeneidades na crosta, aleatoriamente distribuídas por uma grande área ao redor do epicentro e da estação (Figura 6.2). Estas heterogeneidades podem ser irregularidades topográficas, falhas, fraturas e variações na geologia superficial ou nas propriedades elásticas das rochas. As ondas espalhadas nestas irregularidades chegarão na estação algum tempo após a chegada das ondas diretas.

Aki (1969) observou que a duração do sinal sísmico é independente da distância epicentral para eventos a até 100 quilômetros da estação. Segundo Aki & Chouet (1975) as ondas de cauda de baixa frequência (em torno de 1 Hz) devem ser ondas superficiais de espalhamento para trás (*backscattering surface waves*) provenientes de heterogeneidades na parte superior da crosta, enquanto que as ondas de cauda de alta frequência (em torno de 20 Hz) são provenientes de ondas de corpo de espalhamento para trás (*backscattering body waves*) a partir de heterogeneidades na parte profunda da litosfera.

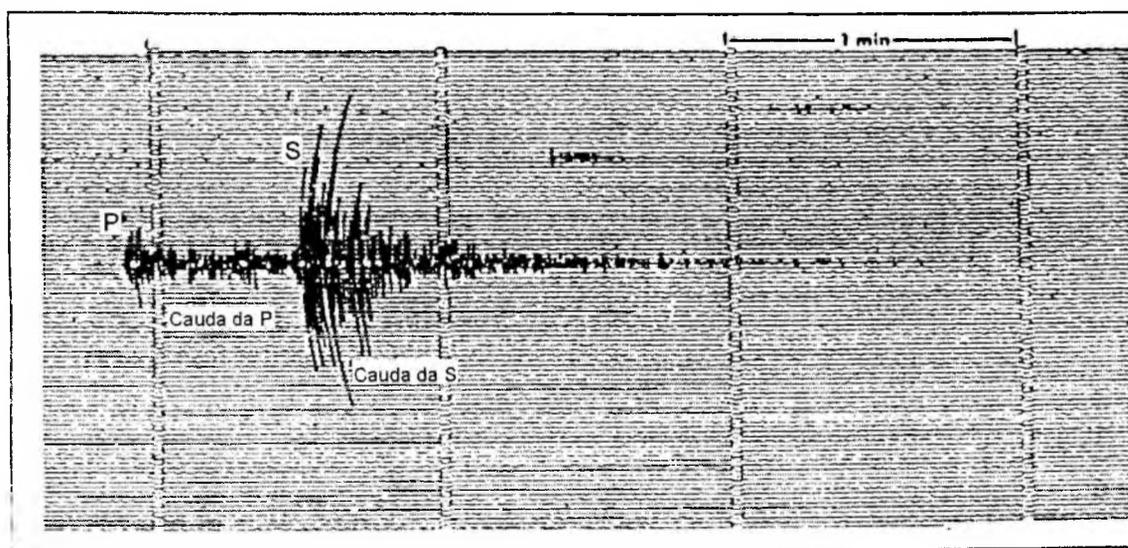


Figura 6.1 – Sismograma do sismo ocorrido na Espanha, de magnitude 3,7 M_L , mostrando as fases P e S e suas respectivas caudas (Lee & Dodge, 1992).

Analisando a semelhança entre as ondas de cauda de tremores de diversas localidades, Aki (1969) e Aki & Chouet (1975) concluíram que o conteúdo espectral das ondas de cauda decai em função do tempo, independentemente da natureza ou distância do caminho percorrido pelas ondas entre o epicentro e a estação.

Segundo Hermann (1975), o envelope da onda de cauda obedece a uma relação do tipo t^{-q} , onde t é o tempo medido a partir da chegada da onda P e q é uma constante. A Figura 6.3 mostra um sismograma com o registro do evento de Illinois (EUA), ocorrido em 1965 (3,2 m_b), com a curva que representa o envelope da onda de cauda para este registro.

Su *et al.* (1992) estudaram a relação entre a amplificação local da onda de cauda e a geologia superficial. Eles observaram que a amplificação da onda de cauda decresce com o aumento da idade geológica da rocha na qual se localiza o sensor e que diferentes ambientes geológicos mostram diferentes dependências com a frequência. Sedimentos quaternários mostram maiores amplificações a baixas frequências e o fator de amplificação diminui gradualmente com o aumento da frequência, enquanto que rochas graníticas mostram baixa amplificação a baixas frequências e o fator de amplificação aumenta gradualmente com o aumento da frequência.

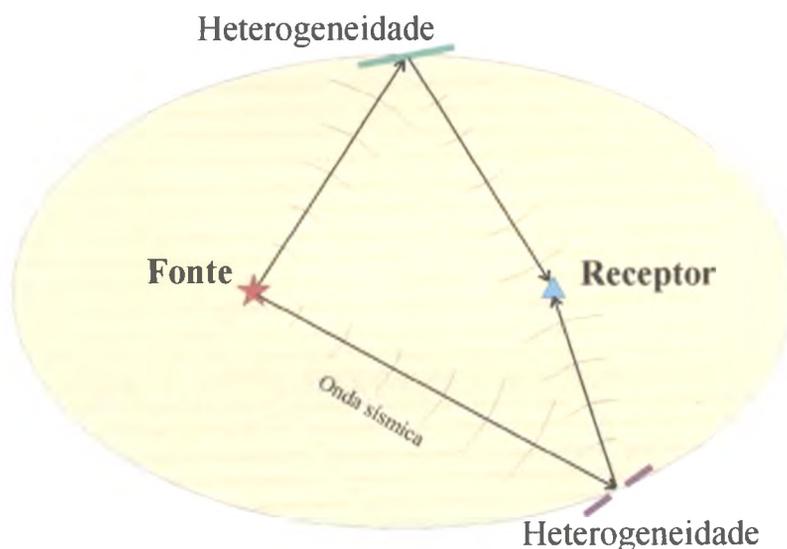


Figura 6.2 – Esquema ilustrando a origem das ondas de cauda como resultantes do espalhamento para trás. Ondas sísmicas propagam-se radialmente a partir de uma fonte e chegam no receptor. Se alguma descontinuidade está presente nas vizinhanças da fonte e do receptor, as ondas sísmicas serão espalhadas nesta descontinuidade e chegarão no receptor algum tempo após as ondas diretas (modificado de Lee & Dodge, 1992).

6.2.2 - Magnitude baseada na Duração

Com base nas observações de que a onda de cauda não apresenta dependência em relação à distância ou à natureza do caminho percorrido entre o epicentro e a estação, e no fato dos dados empíricos mostrarem que:

$$\log (A/T) \propto \log D \quad (6.1)$$

onde: **D** = duração do registro;
A = amplitude da onda (P, S ou superficial);
T = período.

Várias fórmulas têm sido desenvolvidas para a utilização da duração do registro de um sismo como medida para se estimar sua magnitude.

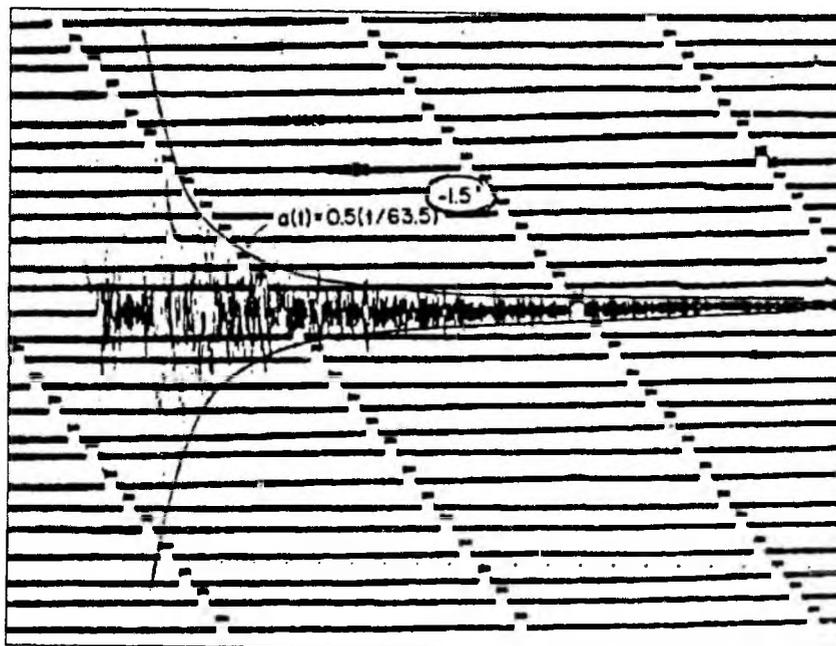


Figura 6.3 – Envelope da onda de cauda para o sismo de Illinois, ocorrido em 1965, com magnitude 3,2 m_b . Para este registro a amplitude da onda de cauda obedece à relação $a(t) = 0,5(t/63,5)^{-1,5}$ (Herrman, 1975).

A duração do registro é geralmente definida como a medida desde a primeira chegada (P) até o traço desaparecer no ruído de fundo ou cair definitivamente abaixo de algum valor fixo, tanto absoluto quanto relativo ao nível de ruído.

Várias são as vantagens do cálculo da magnitude de duração, como o fato de não requerer qualquer calibração do sismógrafo, não ser afetado pela saturação ou por traços muito fracos da maior amplitude e a praticamente desprezível dependência com a distância, fazendo do método aplicável também quando as distâncias epicentrais são incertas. Além disso, a magnitude de duração possui a vantagem de ser um método bastante simples e rápido.

A fórmula geral para a magnitude de duração pode ser escrita da seguinte maneira (Båth, 1981):

$$m_D = a \log D + b (\log D)^2 + c\Delta + dh + e \quad (6.2)$$

onde: **a, b, c, d e e** são constantes para um dado instrumento e estação;
D é a duração do sinal sísmico;
 Δ é a distancia epicentral em quilômetros;
h é a profundidade focal.

Segundo Bâth (1981), o termo $c\Delta$ que é a dependência com a distância epicentral, por ser geralmente pequeno, pode ser ignorado para sismos a até 200 km da estação (Suteau & Whitcomb, 1979).

O termo profundidade focal **dh** pode ser incluído na constante **e** no caso de eventos rasos (Bâth, 1981). Como os sismos de Nova Ponte são rasos ($h \leq 10$ km; Cap. 5) e as durações serão medidas em estações locais, os termos $c\Delta$ e **dh** serão aqui desprezíveis.

O coeficiente **b** da relação (6.2) pode ser considerado nulo, já que a relação m_D versus **D** é aproximadamente linear, desconsiderando o termo quadrático **b (log D)²**.

Dessa forma, a equação (6.2) fica simplificada para:

$$m_D = a \log D + e \quad (6.3)$$

6.3 - Quantificação dos Sismos Induzidos em Nova Ponte

Para a quantificação dos sismos induzidos pelo Reservatório de Nova Ponte, será utilizada a duração do registro sísmico, no intuito de definir relações semelhantes a (6.3), como forma de determinação das magnitudes.

Foi feita a correlação entre a duração medida em duas estações da rede sismográfica de Nova Ponte e a magnitude m_R (Assumpção, 1983) obtida por meio de estações regionais. Os eventos utilizados nesta relação estão listados na Tabela 6.1 e as estações utilizadas para o cálculo do m_R são mostradas na Figura 6.4.

Tabela 6.1 – Eventos utilizados na determinação das relações $\log D - m_R$ para NP3 e NP4.

Nº	Data	Horário (UTC)	m_R	Magnitude obtida de
1	13/04/1994	07:46	1,75	FUR1
2	13/04/1994	12:36	2,08	FUR1
3	15/04/1994	15:36	1,93	FUR1
4	21/04/1994	10:01	2,24	CP
5	28/05/1994	00:56	2,36	CP
6	08/06/1994	05:32	2,45	CP e FUR1
7	08/06/1994	08:01	1,91	FUR1
8	27/07/1994	15:17	2,25	CP e FUR1
9	28/07/1994	04:07	2,12	CP e FUR1
10	02/08/1994	13:34	1,81	FUR1
11	12/08/1994	10:37	2,04	FUR1
12	18/09/1994	11:44	2,06	CP e FUR1
13	13/11/1994	00:49	1,89	FUR1
14	13/11/1994	02:18	1,55	FUR1
15	13/11/1994	04:02	1,84	FUR1
16	17/11/1994	04:34	1,77	FUR1
17	09/01/1995	23:35	1,65	FUR1
18	25/01/1995	21:38	1,91	FUR1
19	24/02/1995	18:19	2,07	FUR1
20	01/03/1995	22:10	1,84	FUR1
21	22/03/1995	09:38	2,02	FUR1
22	19/04/1995	21:01	2,06	FUR1
23	19/04/1995	21:11	2,34	CP e FUR1
24	21/04/1995	08:50	3,50	BSB*
25	25/04/1995	16:58	2,23	CP e FUR1
26	27/04/1995	03:22	1,99	FUR1
27	29/05/1995	11:57	2,50	CP e FUR1
28	29/05/1995	16:20	2,14	CP e FUR1
29	03/06/1995	19:49	2,31	CP e FUR1
30	26/06/1995	17:03	1,82	FUR1
31	28/06/1995	17:46	1,83	FUR1
32	29/06/1995	22:09	1,92	FUR1
33	24/08/1995	03:19	2,58	CP e FUR1
34	11/11/1996	20:51	2,01	FUR1
35	18/03/1997	17:13	2,05	CP e FUR1
36	08/08/1998	18:19	2,54	FUR1
37	31/08/1998	21:45	2,16	CP e FUR1
38	11/01/1999	04:39	2,28	CP

BSB* - Boletim Sísmico Brasileiro.

6.3.1 – Magnitude Regional e sua aplicação na área em estudo

As estações usadas para a medida da duração foram NP3 e NP4. São dois os principais motivos que levaram à escolha destas duas estações. Primeiramente, o fato de serem as únicas estações de toda a rede a operarem desde o início da atividade sísmica (em 1994) até atualmente, quase que ininterruptamente (Cap. 4). O outro fator determinante nesta escolha tem como fundamento as localizações de NP3 e NP4 em áreas sísmicas distintas (respectivamente Área Sísmica 2 e Área Sísmica 1, Cap. 5). Estes dois fatores proporcionaram a formação de um banco de dados mais completo, contendo o maior número possível de sismos ocorridos na região em estudo.

Foram usados somente os eventos cujas durações puderam ser obtidas com confiança. Alguns eventos ocorridos nos períodos em que funcionou o sistema de detecção automática, ou nos quais os sinais contínuos eram editados na própria usina de Nova Ponte, não foram utilizados pelo fato de seus registros não conterem a onda de cauda completa. Dentre estes eventos infelizmente está o evento principal de 22 de maio de 1998, com magnitude 4,0 m_R .

As estações utilizadas para o cálculo do m_R foram FUR1 e CP (Figura 6.4). A estação FUR1 consiste em um sensor S 7000 (*Teledyne Geotech*) e um registrador analógico MEQ 800, que monitora o Reservatório de Furnas por meio de um convênio entre FURNAS Centrais Elétricas e o Observatório Sismológico (SIS). A distância entre esta estação e as áreas sísmicas de Nova Ponte está no limite inferior de validade da relação m_R definida por Assumpção (1983). Entretanto, Takeya (1985) mostrou que a distâncias epicentrais inferiores a 200 quilômetros, a fórmula de magnitude regional ainda é válida, podendo ser aplicada para os sismos de Nova Ponte, que se encontram a aproximadamente 190 km de FUR1.

A outra estação utilizada, CP, faz parte do Arranjo Sismográfico de Brasília, composta por sensor MK2 (*Rank Precision Industries Ltd.*) e registrador Helicorder/RV-301B (*Teledyne Geotech*) com registro analógico em papel termo-sensível. Os dados dessa estação também são gravados no formato digital pelos sistemas de aquisição do IASPEI com taxa de amostragem em 100 aps (amostras por segundo) e do NORSAR (*Norway Seismic Array*), com 40 aps.

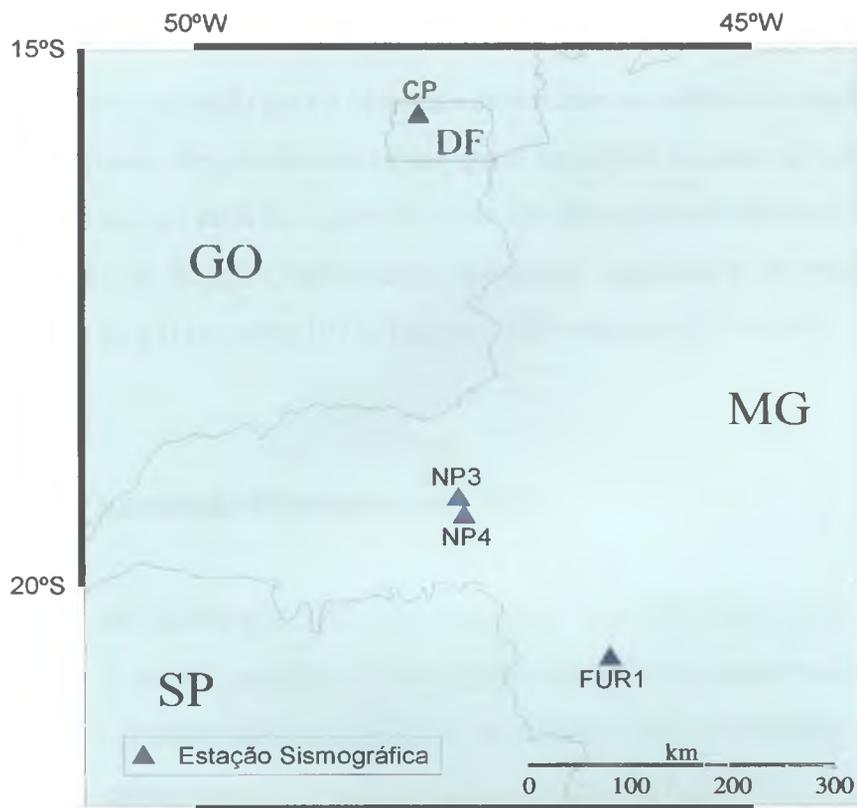


Figura 6.4 – Disposição espacial das estações regionais FUR1 e CP, utilizadas no cálculo de m_R , em relação às estações locais NP3 e NP4, onde foram medidas as durações dos registros.

Para eventos registrados por estas duas estações foi calculada a magnitude média. Apenas para o sismo de 21 de abril de 1995 foi utilizado o valor de magnitude do Boletim Sísmico Brasileiro (Tabela 6.1), editado pelo grupo de sismologia do IAG-USP, e publicado na Revista Brasileira de Geofísica (RBGf). Contribuem para a elaboração deste boletim, além do IAG-USP, as instituições SIS-UnB, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e Observatório Nacional do Rio de Janeiro (ON).

Os trinta e oito eventos não puderam ser utilizados conjuntamente na análise dos dados devido às variações sofridas nos parâmetros de funcionamento e nos equipamentos das estações NP3 e NP4 durante todo o período em estudo (Capítulo 4). Dessa forma, esses eventos foram agrupados de acordo com um mesmo parâmetro ou equipamento. Foram utilizados vinte e sete sismos registrados por NP3 e vinte e quatro por NP4.

O procedimento adotado para a obtenção da duração em ambas as estações consiste na medida desde a primeira chegada da onda P até que a amplitude da onda de cauda decaísse ao nível do ruído de fundo da estação. Vários estudos têm demonstrado que as diferentes formas de medir a duração do registro influenciam apenas na constante e da relação (6.3), não afetando os valores de a (Hermann, 1975; Takeya, 1985; Assumpção, 1989b).

6.3.2 - Cálculo da magnitude de duração para NP3

Os sismos detectados por NP3 com magnitude m_R calculada foram agrupados em quatro populações, de acordo com os diversos parâmetros de funcionamento (78-out-10, 78-5-30, e 78-out-30), e à gravação digital (IASPEI). As relações entre o logaritmo da duração e a magnitude m_R para estes grupos de eventos podem ser vistas na Figura 6.5.

A aparente dispersão dos dados da Figura 6.5b reflete o pequeno intervalo de magnitude analisado (aproximadamente 0,8 unidade) e também ao maior número de observações neste grupo. Mesmo assim, o maior desvio entre os dados observados e a reta de ajuste (aproximadamente 0,2) é inferior ao erro máximo aceitável no cálculo de magnitude (0,3 unidade), o que mostra um ajuste relativamente bom.

Dispondo todas as retas de NP3 conjuntamente (Figura 6.6) observa-se que suas inclinações são bastante semelhantes, mas que estão ligeiramente deslocadas entre si.

Devido ao pequeno número de observações de cada grupo, inviabilizando estatísticas individuais, e principalmente devido à semelhança das inclinações das relações $\log D$ - m_R para os vários parâmetros/equipamentos de NP3, utilizou-se um artifício estatístico objetivando unicamente a melhoria nos resultados, onde todos os dados foram reunidos em um único grupo para aumentar a população. O procedimento seguido para este agrupamento será descrito a seguir.

Uma reta foi escolhida para servir como referencial para que todos os dados se desloquem em sua direção. A reta relacionada aos parâmetros 78-out-10 foi adotada pelo fato de seu ajuste ser o mais confiável em virtude da melhor distribuição dos dados (Figura 6.5a), ou seja, maiores intervalos de magnitude disponíveis (1,99 a 3,50 m_R). Foram calculadas as diferenças médias dos valores de magnitude entre todas as outras retas e esta reta referencial.

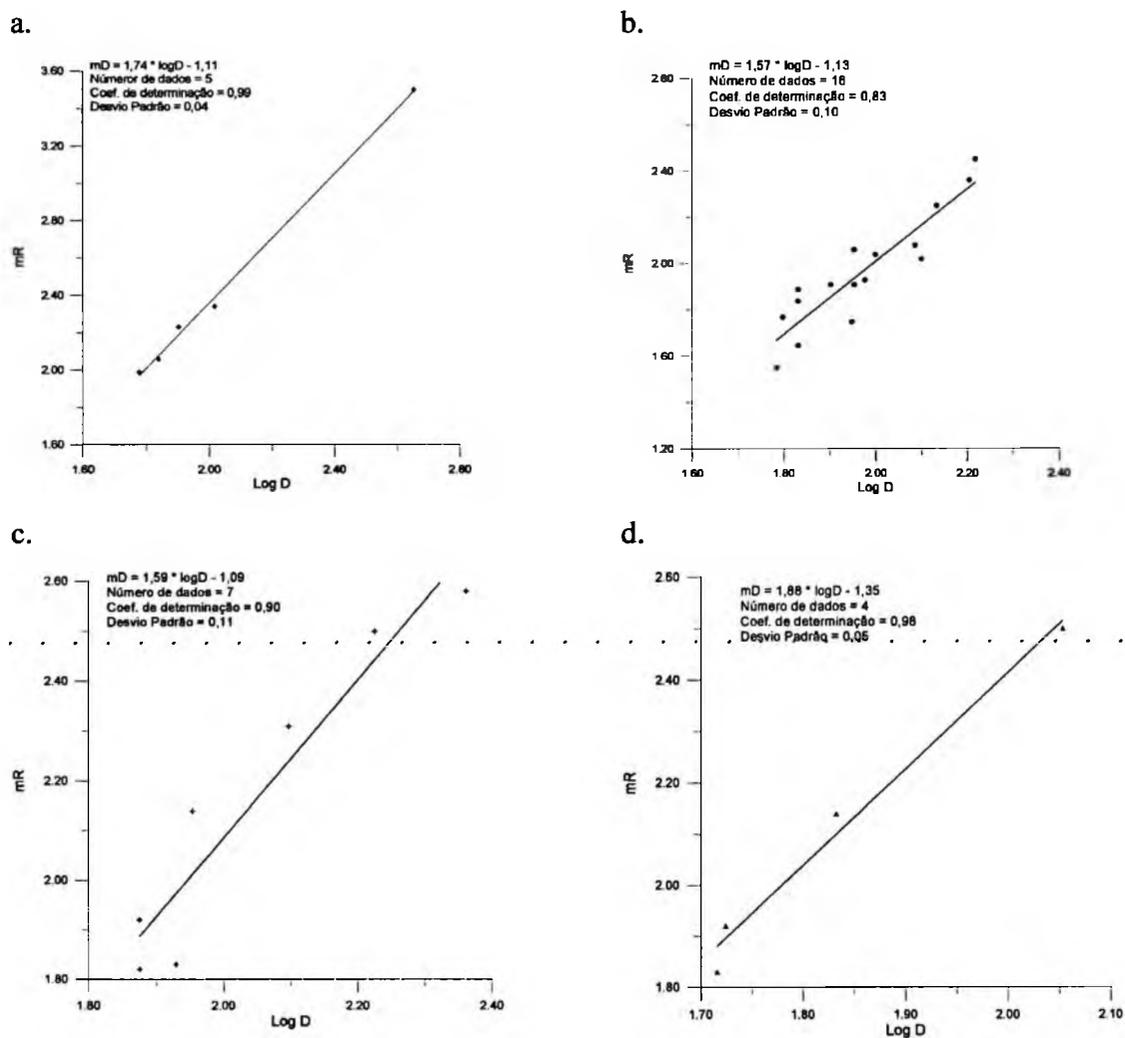


Figura 6.5 – Relação $\log D(\text{seg.})$ vs. m_R para os sismos de Nova Ponte registrados pela estação NP3, nos diversos conjuntos equipamento/parâmetros de funcionamento. a) conjunto MK3A+MEQ800 com parâmetros 78dB-Out(0,2Hz)-10(Hz); b) conjunto MK3A+MEQ800 com parâmetros 78dB-5Hz-30Hz; c) conjunto MK3A+MEQ800 com parâmetros 78dB-Out(0,2Hz)-30Hz; d) conjunto MK3A+IASPEI com parâmetros 78dB-Out(0,2Hz)-30Hz.

Aos valores iniciais de magnitude calculados para os outros parâmetros/equipamentos adicionou-se esta diferença média para cada reta, fazendo com que todos os pontos se deslocassem em direção à reta referencial. Com todas as trinta e duas observações agrupadas obteve-se uma nova reta (Figura 6.7), com um maior número de pontos e, por conseguinte, um ajuste estatisticamente melhor. A equação desta nova reta é a seguinte:

$$m_D = 1,67 \log D - 0,97 \quad (6.4)$$

O coeficiente de determinação (Figura 6.7) foi de $R^2 = 0,937$ e desvio padrão (σ) de 0,008. Esta equação será usada como base para a dedução das relações para as demais configurações da estação NP3.

Para obtermos a relação $\log D \times m_R$ para as outras configurações, é necessário fazer uma "correção" na equação (6.4). Esta correção consiste em subtrair os mesmos valores de magnitude anteriormente adicionados para cada parâmetro da estação. Ou seja, estaremos alterando apenas o termo independente de (6.4) de um valor constante para cada conjunto parâmetro/equipamento da estação. Como a reta referente aos parâmetros de funcionamento da estação em 78-out-10 foi utilizada como base para a dedução da equação (6.4), não será necessária a correção para este parâmetro. Para o sistema de gravação digital do IASPEI observa-se que a reta de ajuste das observações é quase coincidente com a utilizada como referencial. Por este motivo não foi feito nenhum ajuste nos dados e, dessa forma, não é necessária nenhuma correção.

Após as devidas correções, temos as seguintes fórmulas para NP3:

$$m_D = 1,67 (\pm 0,05) \log D - 0,97 (\pm 0,08) \quad 78\text{-out-10} \quad (6.5)$$

$$m_D = 1,67 (\pm 0,05) \log D - 1,32 (\pm 0,08) \quad 78\text{-5-30} \quad (6.6)$$

$$m_D = 1,67 (\pm 0,05) \log D - 1,47 (\pm 0,08) \quad 78\text{-out-30} \quad (6.7)$$

$$m_D = 1,67 (\pm 0,05) \log D - 0,97 (\pm 0,08) \quad \text{IASPEI} \quad (6.8)$$

A relação entre a magnitude e o logaritmo da duração, no entanto, não é perfeitamente linear para grandes intervalos de magnitude, mostrando diminuições nas inclinações com o decréscimo da magnitude (Aki & Chouet, 1975; Hermann, 1975; Suteau & Whitcomb, 1979).

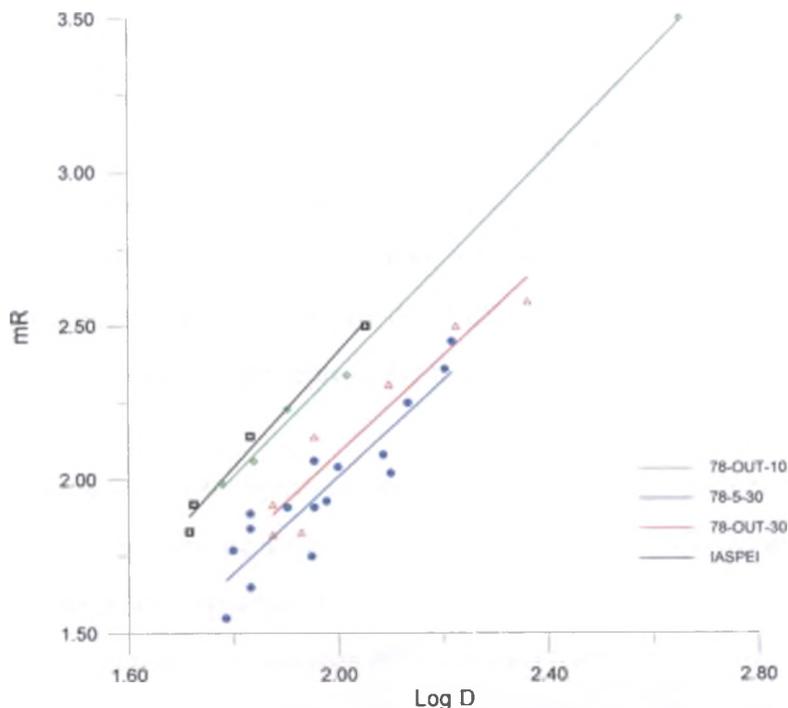


Figura 6.6 – Relação $\log D \times m_R$ para todos os conjuntos equipamento/parâmetros de funcionamento para NP3. As retas apresentam inclinações semelhantes entre si.

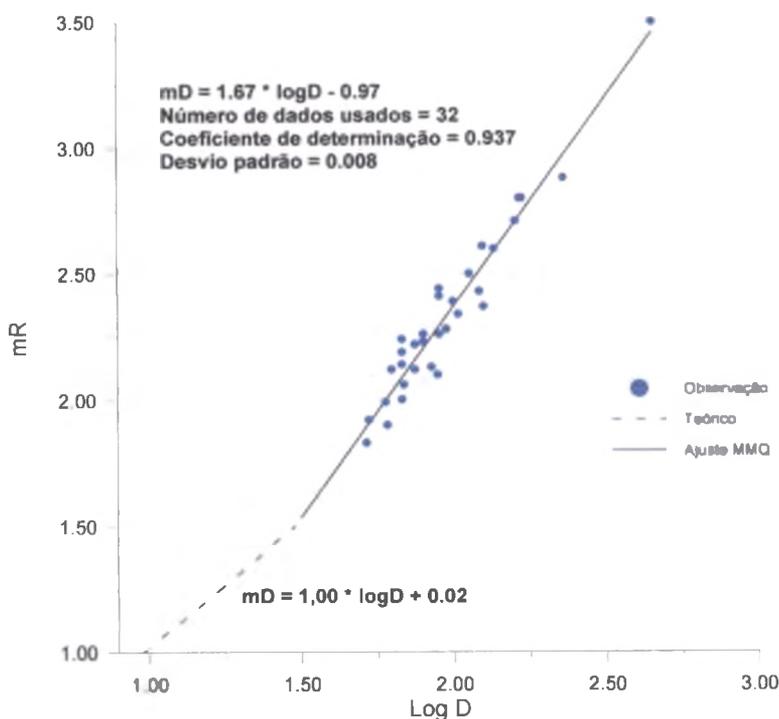


Figura 6.7 – Relação $\log D \times m_R$ para todos os dados de NP3 agrupados com relação ao parâmetro 78dB-Out-10Hz. O melhor ajuste para os dados observados é mostrado pela linha contínua, obtida pelo método dos mínimos quadrados. A linha tracejada representa a relação $\log D \times m_R$ teórica para sismos com magnitudes inferiores a 1,5.

No estudo dos sismos de João Câmara/RN entre 1986 e 1987, Assumpção *et al.* (1989) definiram a relação $\log D - m_R$ onde o melhor ajuste indica inclinação de 2,05 para magnitudes iguais ou superiores a 1,5. Para magnitudes inferiores a este valor foi adotada uma inclinação de 1,00 com base em dados de literatura. Por sua vez, Berrocal *et al.* (1993) calcularam inclinações de 1,60 e 1,71 (para as estações MON e MON2, respectivamente) para os sismos ocorridos em Monsuaba/RJ entre dezembro de 1988 e fevereiro de 1989, com $m_R > 1,0$, e utilizaram o valor de 0,7 para melhor representar a inclinação da relação $\log D$ vs. m_R para os sismos com $m_R < 1,0$.

Para a SIR de Nova Ponte, optou-se por extrapolar as relações (6.5) a (6.8) a partir da magnitude de 1,5. Para valores de magnitude inferiores a 1,5 a relação geral foi reescrita, adotando-se o coeficiente a como sendo 1,0 o que é compatível com informações de literatura. A Figura 6.7 mostra as relações obtidas para NP3 nos parâmetros 78-out-10.

Finalmente temos, para a estação NP3, as seguintes relações entre a magnitude e a duração, de acordo com o equipamento da estação e o parâmetro de funcionamento:

Parâmetros de operação do sismógrafo: 78dB – out (0,2Hz) – 10Hz:

$$m_D = 1,67 \log D - 0,97 \quad (D \geq 30 \text{ seg.}; m_D \geq 1,5) \quad (6.9)$$

$$m_D = 1,00 \log D + 0,02 \quad (D < 30 \text{ seg.}; m_D < 1,5) \quad (6.10)$$

Parâmetros de operação do sismógrafo: 78dB – 5Hz – 30Hz:

$$m_D = 1,67 \log D - 1,32 \quad (D \geq 50 \text{ seg.}; m_D \geq 1,5) \quad (6.11)$$

$$m_D = 1,00 \log D - 0,20 \quad (D < 50 \text{ seg.}; m_D < 1,5) \quad (6.12)$$

Parâmetros de operação do sismógrafo: 78dB – out (0,2Hz) – 30Hz:

$$m_D = 1,67 \log D - 1,27 \quad (D \geq 45 \text{ seg.}; m_D \geq 1,5) \quad (6.13)$$

$$m_D = 1,00 \log D - 0,15 \quad (D < 45 \text{ seg.}; m_D < 1,5) \quad (6.14)$$

Parâmetros de operação do sismógrafo: 78dB – out (0,2Hz) – 30Hz (IASPEI):

$$m_D = 1,67 \log D - 0,97 \quad (D \geq 30 \text{ seg.}; m_D \geq 1,5) \quad (6.15)$$

$$m_D = 1,00 \log D + 0,02 \quad (D < 30 \text{ seg.}; m_D < 1,5) \quad (6.16)$$

6.3.3 - Cálculo da magnitude de duração para NP4

Os vinte e quatro eventos registrados por NP4 foram subdivididos em três grupos segundo os parâmetros de funcionamento da estação e/ou seu equipamento. A Figura 6.8 mostra as relações obtidas para estas populações de eventos. É possível notar a discrepância relativamente pequena entre os dados e as retas calculadas, mostrando um bom ajuste, apesar das relações mostradas nas Figuras 6.8b e 6.8c estarem restritas a pequenos intervalos de magnitude (0,6 e 0,4 unidades de magnitude, respectivamente).

Entretanto, o número de observações em cada grupo de dados é muito pequeno para que sejam obtidos resultados estatisticamente confiáveis, da mesma forma do observado para os dados de NP3 na seção anterior.

A Figura 6.9 mostra as três retas dispostas conjuntamente, com inclinações muito semelhantes entre si. Dessa forma, o mesmo procedimento descrito no item 6.3.1, adotado para os dados da estação NP3, foi utilizado nesta seção. A reta de regressão estipulada como referencial foi a relativa aos parâmetros 84-out-10 devido ao maior intervalo de magnitudes a ela relacionado (Figura 6.8a).

Após o ajuste das magnitudes dos eventos referentes ao funcionamento em 84-5-30 e ao conjunto sismográfico Quatterra-Guralp em relação à reta referencial, obteve-se o banco de dados conjunto e a reta com o melhor ajuste aos pontos é a mostrada na Figura 6.10, e sua equação é:

$$m_D = 1,75 \log D - 1,27 \quad (6.17)$$

com coeficiente de determinação $R^2 = 0,990$ e desvio padrão $\sigma = 0,001$.

Procedendo a mesma análise feita para NP3, definiu-se o valor de 1,00 para a inclinação da reta para a relação magnitude-logD de eventos com magnitudes inferiores a 1,5 (Figura 6.10).

Assim, para eventos registrados em NP4, obteve-se os seguintes resultados, de acordo com os parâmetros de funcionamento da estação:

Parâmetros de operação do sismógrafo: 84dB – out(0,2Hz) – 10Hz:

$$m_D = 1,75 \log D - 1,27 \quad (D \geq 40 \text{ seg.}; m_D \geq 1,5) \quad (6.18)$$

$$m_D = 1,00 \log D - 0,10 \quad (D < 40 \text{ seg.}; m_D < 1,5) \quad (6.19)$$

Parâmetros de operação do sismógrafo: 84dB – 5Hz – 30Hz:

$$m_D = 1,75 \log D - 1,51 \quad (D \geq 50 \text{ seg.}; m_D \geq 1,5) \quad (6.20)$$

$$m_D = 1,00 \log D - 0,20 \quad (D < 50 \text{ seg.}; m_D < 1,5) \quad (6.21)$$

Registrador Quanterra e sensor Guralp:

$$m_D = 1,75 \log D - 1,07 \quad (D \geq 30 \text{ seg.}; m_D \geq 1,5) \quad (6.22)$$

$$m_D = 1,00 \log D - 0,02 \quad (D < 30 \text{ seg.}; m_D < 1,5) \quad (6.23)$$

Pode ser observado que, para uma mesma estação e uma mesma magnitude, as durações são maiores quando os parâmetros de funcionamento da estação estão ajustados para registrar frequências mais altas. Tanto no caso da estação NP3 quanto em NP4, a duração medida para uma mesma magnitude é maior quando os filtros estão em 5Hz a 30Hz em relação aos outros parâmetros. Isto provavelmente está relacionado ao fato dos eventos locais apresentarem maior conteúdo de frequência e, da mesma forma, suas ondas de cauda.

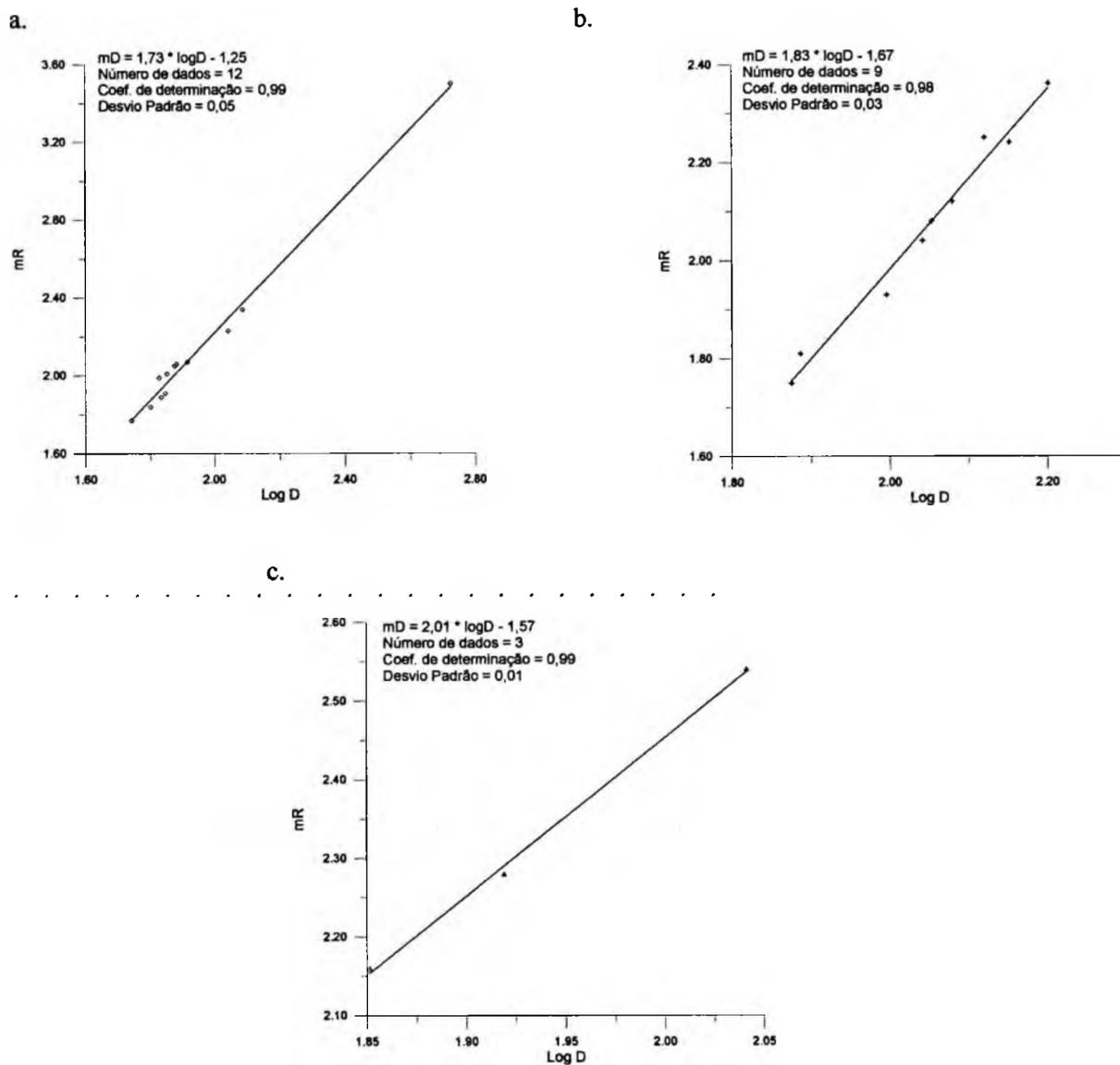


Figura 6.8 – Relação $\log D(\text{seg.}) \times m_R$ para os sismos de Nova Ponte registrados pela estação NP4, nos diversos conjuntos equipamento/parâmetros de funcionamento. a) conjunto MK3A+MEQ800 com parâmetros 84dB-Out(0,2Hz)-10(Hz); b) conjunto MK3A+MEQ800 com parâmetros 84dB-5Hz-30Hz; c) conjunto Guralp+Quanterra.

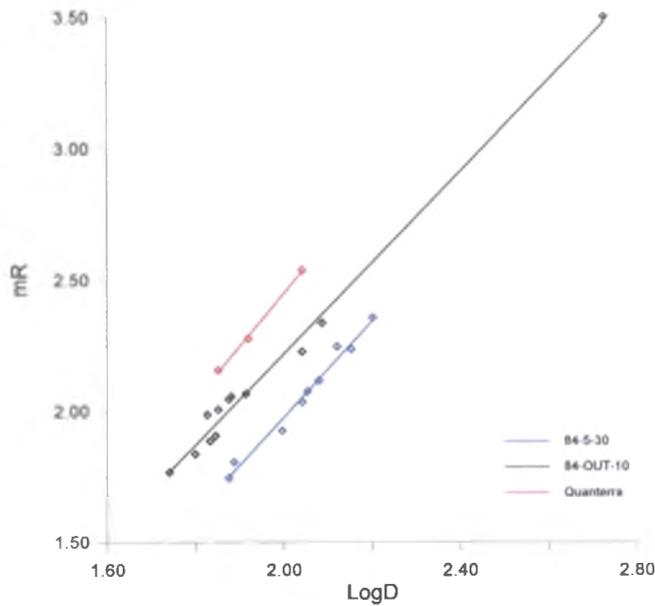


Figura 6.9 – Relação $\log D$ x m_R para todos os conjuntos equipamento/parâmetros de funcionamento para NP4. As retas apresentam inclinações semelhantes entre si.

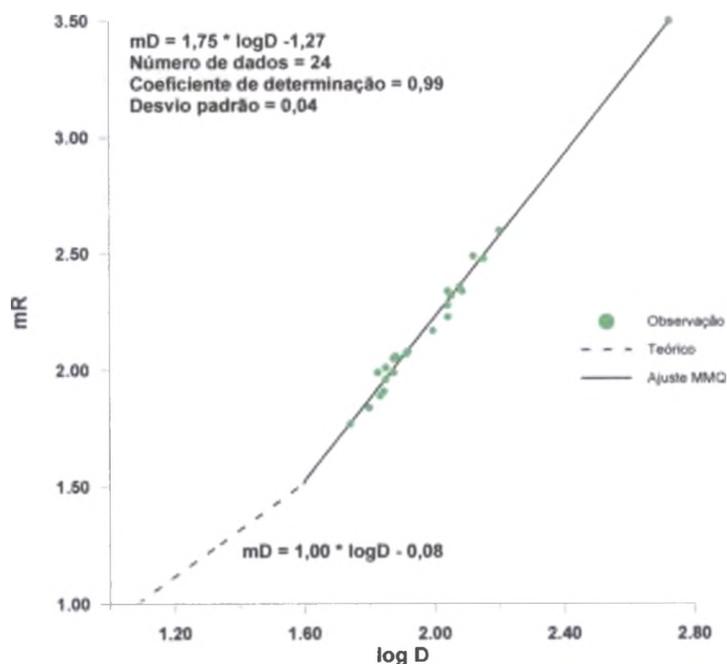


Figura 6.10 – Relação $\log D$ x m_R para todos os dados de NP4 agrupados com relação ao parâmetro 84dB-Out-10Hz. O melhor ajuste para os dados observados é mostrado pela linha contínua, obtida pelo método dos mínimos quadrados. A linha tracejada representa a relação $\log D$ x m_R teórica para sismos com magnitudes inferiores a 1,5.

6.4 - Parâmetro b

A distribuição do número de sismos de acordo com sua magnitude tem sido observada para diversas regiões sísmicas em todo o mundo. Esta distribuição pode ser expressa pela seguinte equação, conhecida como relação de recorrência, ou relação Gutenberg-Richter (1944):

$$\log N = a - bM \quad (6.24)$$

onde N é o número de tremores com magnitude igual ou superior a M , e a e b são constantes. Esta relação, que é a mais estudada na sismologia (cf. Båth, 1981), mostra que o número de eventos diminui de forma logarítmica com o aumento da magnitude.

O valor de a da equação (6.24), que depende do tempo de observação, do tamanho da região considerada e do nível de atividade sísmica, fornece a medida da atividade sísmica (Båth, 1981 e Gupta, 1992). A constante b , ou parâmetro b , fornece a razão entre o número de sismos de pequenas e grandes magnitudes. Apesar do valor de b variar significativamente com a região sísmica e com a profundidade, geralmente está entre 0,5 e 1,5 (Båth, 1979).

O parâmetro b tem sido utilizado em diversos estudos, podendo ser correlacionado a heterogeneidades na crosta ou ao regime de tensões na região. Mogi (1962, 1967a) observou a dependência de b com a heterogeneidades mecânicas de amostras de rochas em laboratório, obtendo aumento deste parâmetro com o aumento da heterogeneidade. Posteriormente (Mogi, 1967b), concluiu que o b não deve ser muito sensível a variações estruturais da crosta por apresentar valores entre 0,6 e 1,0 para a maioria das regiões, enquanto que a estrutura da crosta apresenta pode variar consideravelmente de região para região.

Estudos em laboratório mostram que a relação frequência-magnitude para microfraturamento de amostras de rocha, em geral se aproxima da relação obtida para terremotos (Scholz, 1968), e que o parâmetro b possui forte dependência com o estado de

tensão e pequena relação com as propriedades físicas do material. Um valor alto de b reflete um estado de tensão baixo, enquanto que um baixo valor indica tensões locais elevadas.

Decréscimos no valor do parâmetro b antes de grandes terremotos ou sismos principais têm sido utilizados na predição sísmica. Alguns estudos mostram que b decresce antes desses eventos, aumentando após sua ocorrência. Outros trabalhos mostram que há um decréscimo deste parâmetro com a profundidade, mas também se observam casos em que ele permanece invariável ou aumenta em determinados valores de profundidade. Entretanto, segundo Båth (1981), muitos desses estudos são inconclusivos ou contraditórios.

No gráfico frequência-magnitude, os valores superiores de magnitude fornecem informações das magnitudes máximas esperadas, importante em estudos de perigo sísmico.

O declínio dos valores de $\log N$ para magnitudes baixas geralmente tem sido correlacionado à incompletude dos dados, ou seja, ao decréscimo na detectabilidade da rede sismográfica. No gráfico de $\log N$ cumulativo, este limiar de detectabilidade é relacionado a uma porção quase horizontal da curva, em valores de magnitude onde o número cumulativo de eventos passa a diminuir. Entretanto, alguns autores acreditam que este decréscimo no valor de $\log N$ para baixas magnitudes é um fenômeno físico real não relacionado à diminuição da detectabilidade (Båth, 1981).

Nas seqüências sísmicas induzidas por reservatórios, valores de b acima dos encontrados para a sismicidade natural, para uma mesma região, têm sido observados. Além disso, o b para pré-abalos é maior ou comparável ao obtido para pós-abalos, e o b para ambos é maior que o observado para a sismicidade regional (Gupta, 1992). Dessa forma, a determinação deste parâmetro para determinada região tem sido um mecanismo adicional na comprovação de sismicidade induzida.

6.4.1 - Cálculo do Parâmetro b para a SIR de Nova Ponte

Com base nas relações entre a duração e a magnitude m_R definidas no item 6.3, foram determinadas as magnitudes para todos os sismos cuja duração pode ser medida por NP3 e/ou NP4, ocorridos no período de 1994 a 2000. Para o caso de sismos com magnitudes calculadas pelas duas estações, foi utilizado o valor médio. Este banco de dados formado será utilizado na determinação do parâmetro b para Nova Ponte. A Tabela 6.2 lista a frequência normal e cumulativa de sismos para cada intervalo de magnitude variando de 0,1 unidade, e os respectivos valores anuais para todo o período em estudo.

Para a estimativa da frequência sísmica anual, foi considerado um período de 5,5 anos, com aquisição permanente de dados pelas estações NP3 e/ou NP4, com base no funcionamento dessas estações durante o período (Cap. 4). Para este intervalo de tempo considerado, pelo menos 2 eventos de magnitude 2,0 ocorreram a cada ano.

As relações Gutenberg-Richter para as frequências normal e cumulativa podem ser vistas na Figura 6.11. Observa-se que os dados perdem a linearidade para magnitudes inferiores a 1,3, que foi considerada a magnitude mínima. Entretanto, este valor de magnitude não corresponde ao limiar de detectabilidade da rede sismográfica de Nova Ponte, pois sismos de magnitudes bem inferiores são facilmente registrados. As retas mostradas na Figura 6.11 são resultantes do ajuste por mínimos quadrados para o intervalo de magnitude de 1,3 a 4,0 (magnitude máxima do catálogo).

Assim, para a SIR de Nova Ponte entre os anos de 1994 a 2000, obteve-se o valor do parâmetro b de 1,01 utilizando a regressão linear do número cumulativo de eventos, ou seja, pelo método dos mínimos quadrados (Figura 6.11). Para esta determinação foi encontrado um coeficiente de determinação $R^2 = 0,963$ e desvio padrão $\sigma = 0,05$.

Uma outra forma de se determinar o valor do parâmetro b é utilizando a fórmula de máxima verossimilhança (Aki, 1965 e Utsu, 1966):

$$b = \frac{\log_{10} e}{\bar{m} - m_{\min}} \quad (6.25)$$

onde \bar{m} é o valor médio das magnitudes acima da magnitude mínima m_{\min} .

A relação (6.25) pressupõe magnitudes contínuas, mas como estas são geralmente expressas em valores discretos separados por Δm unidades, os valores obtidos para o parâmetro b a partir da equação (6.19) apresentam uma forte tendência e sua incerteza é subestimada (Bender, 1983; Marzocchi & Sandri, 2001).

Uma correção para o efeito de agrupamento de intervalos Δm , ou seja, para a discretização das magnitudes, foi proposta por Utsu (1971), onde a relação (6.25) passa a ser escrita da seguinte maneira:

$$b = \frac{\log e}{\bar{m} - (m_{\min} - \frac{\Delta m}{2})} \quad (6.26)$$

Utilizando a relação acima, foi definido o valor do parâmetro b para a SIR de Nova Ponte, durante todo o intervalo de 1994 a 2000. Para este banco de dados, obteve-se uma magnitude média (\bar{m}) de 1,57 e utilizou-se a magnitude mínima (m_{\min}) de 1,3 definida pela regressão linear Log(N-M) (Figura 6.11). Assim, pelo método da máxima verossimilhança com a correção de Utsu (1971), obteve-se $b=1,37$ com desvio padrão ($\sigma = \frac{b}{\sqrt{N}}$) de $\pm 0,07$.

O parâmetro b calculado pelo método da máxima verossimilhança ($1,37 \pm 0,07$) difere um pouco daquele obtido pelo método dos mínimos quadrados ($1,01 \pm 0,05$). Para determinado grupo de sismos, seu valor depende do método utilizado no seu cálculo, da magnitude máxima assumida, das técnicas de tratamento do tamanho do intervalo de magnitude (Δm) e da ausência de eventos de um determinado intervalo de magnitudes (Bender, 1983). De acordo com Bender (1983), o b obtido pelo método da máxima verossimilhança usando dados agrupados é idêntico ao obtido com dados contínuos de magnitude se Δm for pequeno ($\Delta m=0,1$).

Tabela 6.2 – Número de sismos para cada intervalo de magnitude m_R com $\Delta m=0,1$ ocorridos na região de Nova Ponte, durante o período de 1994 a 2000. Os valores para o número de eventos anuais foram obtidos considerando um período de pleno funcionamento das estações NP3 e NP4 de 5,5 anos durante todo o período.

m_R	N	Nc	N/ano
0,6	36	935	6,545
0,7	32	899	5,818
0,8	88	867	16,000
0,9	124	779	22,545
1,0	74	655	13,455
1,1	50	581	9,091
1,2	97	531	17,636
1,3	106	434	19,273
1,4	100	328	18,182
1,5	76	228	13,818
1,6	33	152	6,000
1,7	27	119	4,909
1,8	24	92	4,364
1,9	19	68	3,455
2,0	11	49	2,000
2,1	14	38	2,545
2,2	9	24	1,636
2,3	4	15	0,727
2,4	4	11	0,727
2,5	2	7	0,364
2,6	1	5	0,182
2,7	1	4	0,182
2,8	1	3	0,182
2,9	0	2	0,000
3,0	0	2	0,000
3,1	0	2	0,000
3,2	0	2	0,000
3,3	0	2	0,000
3,4	0	2	0,000
3,5	1	2	0,182
3,6	0	1	0,000
3,7	0	1	0,000
3,8	0	1	0,000
3,9	0	1	0,000
4,0	1	1	0,182

Nota: N – número de eventos por intervalo de magnitude
Nc – número cumulativo de eventos

Para os dados de Nova Ponte, o intervalo de magnitude Δm é 0,1, o que proporciona uma boa estimativa para o parâmetro b . Outro fator que influencia no cálculo de b , independentemente do método utilizado, é o número de observações N . Um valor confiável de b será obtido a partir de um banco de dados com N grande, da ordem de centenas de observações (Bender, 1983). O banco de dados analisado para a SIR de Nova Ponte contém um pouco mais de 400 eventos (Tabela 6.2), o que permite uma determinação de b com desvio padrão relativamente baixo ($\pm 0,07$). Portanto, os diferentes valores deste parâmetro obtidos para a SIR de Nova Ponte no período em estudo provavelmente estão relacionados ao método utilizado na sua determinação.

O fato de nosso catálogo apresentar poucas observações (apenas duas) no intervalo de magnitudes entre 2,9 e 4,0 muito provavelmente contribui para esta diferença nos resultados de b encontrados pelos dois métodos. Como o método da máxima verossimilhança considera fatores como este (Bender, 1983), e por ser mais eficiente que o método dos mínimos quadrados (Guttorp, 1987), adotaremos para a SIR de Nova Ponte, no período de 1994 a 2000, o valor de b obtido pelo método da máxima verossimilhança, ou seja, $1,37 (\pm 0,07)$.

Apenas para um efeito comparativo, é mostrada uma reta com inclinação de 1,37 (valor de b encontrado pelo método da máxima verossimilhança), juntamente com os dados observados para o número cumulativo de sismos (Figura 6.12). Como pode ser observado, há uma boa concordância entre esta reta e as observações no intervalo de magnitude de 1,3 a 2,9.

Berrocal *et al.* (1996) calcularam o parâmetro b para a região sudeste do Brasil usando um banco de dados de sismos ocorridos no período de 1979 a 1992, com magnitude igual ou superior a $3,1m_b$ (limiar de detectabilidade da rede sismográfica regional). O valor obtido pelo método dos mínimos quadrados foi de $1,06 (\pm 0,10)$ e pela fórmula de máxima verossimilhança encontraram $b=1,10 (\pm 0,33)$. Mais recentemente, o valor de b para a região sudeste do Brasil foi calculado em $1,06 (\pm 0,04)$ pela regressão linear dos sismos ocorridos entre 1975 e 1998, com magnitudes iguais ou superiores a $3,5m_b$ (Berrocal *et al.*, 2001).

Dessa forma, o valor de b para a sismicidade induzida em Nova Ponte ($1,37 \pm 0,07$) para o período de 1994 a 2000, é maior que o valor determinado para a sismicidade natural na região sudeste do Brasil. Este é mais um fato que corrobora para a comprovação do caráter induzido da sismicidade em Nova Ponte.

Para os pré-abalos e pós-abalos do evento principal de 22 de maio de 1998 ($4,0m_R$) foram calculados os valores de b utilizando-se o método da máxima verossimilhança (Equação 6.26).

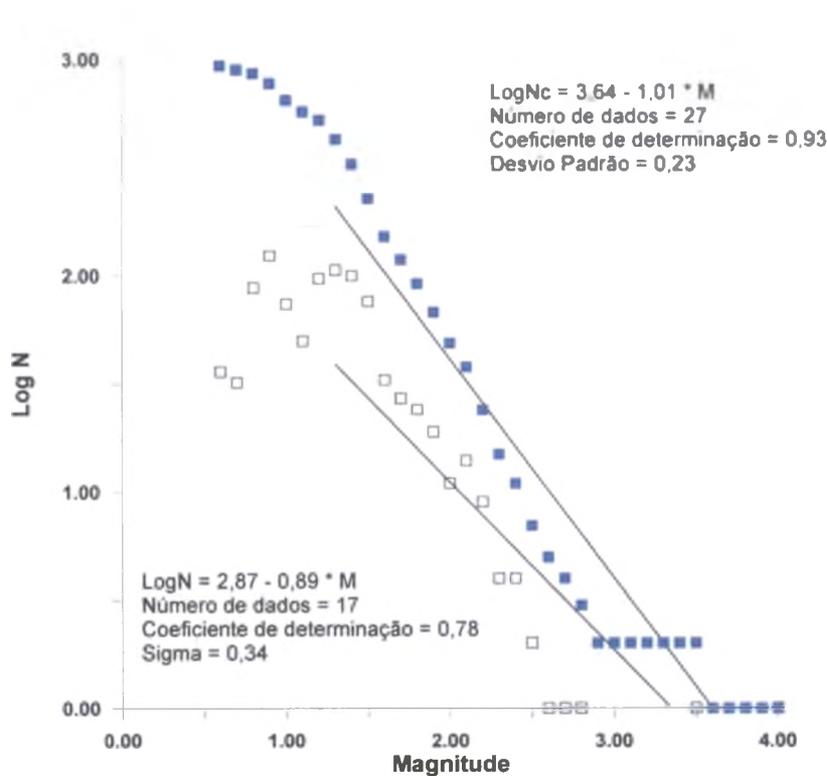


Figura 6.11 – Relação frequência-magnitude normal (quadrado aberto) e cumulativa (quadrado fechado) para Nova Ponte no período de 1994 a 2000. As linhas contínuas representam os ajustes por mínimos quadrados das observações no intervalo de magnitude de 1,3 a $4,0m_R$.

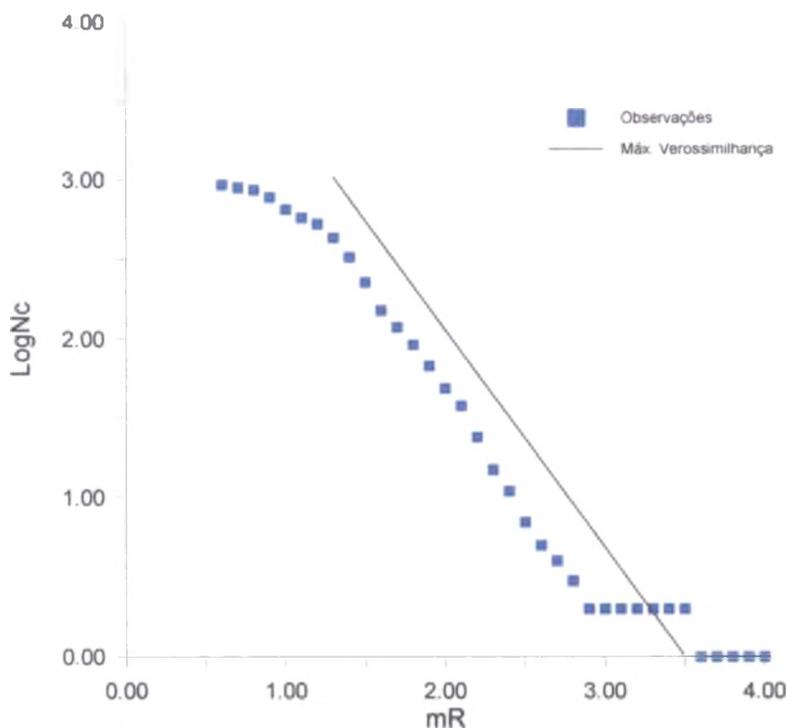


Figura 6.12 – Relação frequência-magnitude para número cumulativo de sismos da SIR de Nova Ponte no período de 1994 a 2000. A linha contínua representa uma reta com inclinação b obtida pelo método da máxima verossimilhança, com correção de Utsu (1971), não correspondendo à regressão linear dos pontos do gráfico.

Os valores obtidos foram de $2,63 (\pm 0,46)$ para a seqüência de pré-abalos, e de $2,03 (\pm 0,43)$ para os pós-abalos. Nestas determinações foram utilizados, como magnitude mínima, os menores valores observados em virtude da pequena quantidade de dados disponível. Mesmo assim, observa-se que os resultados estão muito acima do esperado para o parâmetro b (geralmente entre 0,5 e 1,5), devido ao reduzido número de eventos (33 pré-abalos e 22 pós-abalos), o que confere uma imprecisão nas determinações, observada pelo elevado desvio padrão em ambos os resultados. De qualquer forma, o parâmetro b para os pré-abalos do evento principal de 22 de maio de 1998 é maior que o calculado para a seqüência de pós-abalos, uma característica relatada em diversos casos de sismicidade induzida (Gupta, 1992).

Alguns estudos têm mostrado que o parâmetro b apresenta decréscimos em seu valor antes de grandes terremotos ou sismos principais, aumentando após sua ocorrência. Para analisar a variação temporal deste parâmetro para a SIR de Nova Ponte, foram determinados os valores anuais de b para todo o período em estudo. Estes valores foram calculados utilizando-se os métodos da máxima verossimilhança (Equação 6.26) e dos mínimos quadrados e são apresentados na Tabela 6.3.

O gráfico da Figura 6.13 mostra a variação temporal de b , obtido pelos dois métodos, durante todo o período. Para a determinação do valor de b para os anos de 1999 e 2000 foi necessário o agrupamento dos dados em virtude do reduzido número de observações. Dessa forma, foi considerado um mesmo valor para os dois anos.

Tabela 6.3 – Valores anuais do parâmetro b obtidos pelos métodos dos Mínimos Quadrados (MMQ) e da Máxima Verossimilhança (MV). σ é o valor do desvio padrão de cada estimativa e N é o número de observações. Para estas determinações foram excluídos os sismos principais de 1995 e 1998.

Ano	b (MMQ)	σ	b (MV)	σ	N
1994	1,91	$\pm 0,02$	1,61	$\pm 0,09$	313
1995	1,02	$\pm 0,01$	0,77	$\pm 0,08$	83
1996	1,15	$\pm 0,04$	1,72	$\pm 0,20$	74
1997	1,27	$\pm 0,01$	1,27	$\pm 0,12$	107
1998	0,80	$\pm 0,01$	0,96	$\pm 0,12$	69
1999 e 2000	0,89	$\pm 0,02$	1,14	$\pm 0,28$	17

Como podemos observar na Figura 6.13, com exceção do b calculado para o ano de 1996, os valores obtidos pelos dois métodos apresentam um comportamento semelhante durante todo o período em estudo. Antes dos eventos principais de 21 de abril de 1995 ($3,5 m_R$) e de 22 de maio de 1998 ($4,0 m_R$) nota-se um decréscimo no valor de b , e após a ocorrência dos mesmos, há um ligeiro aumento. Esta variação é semelhante à descrita em estudos sobre o comportamento do parâmetro b antes e depois de grandes terremotos.

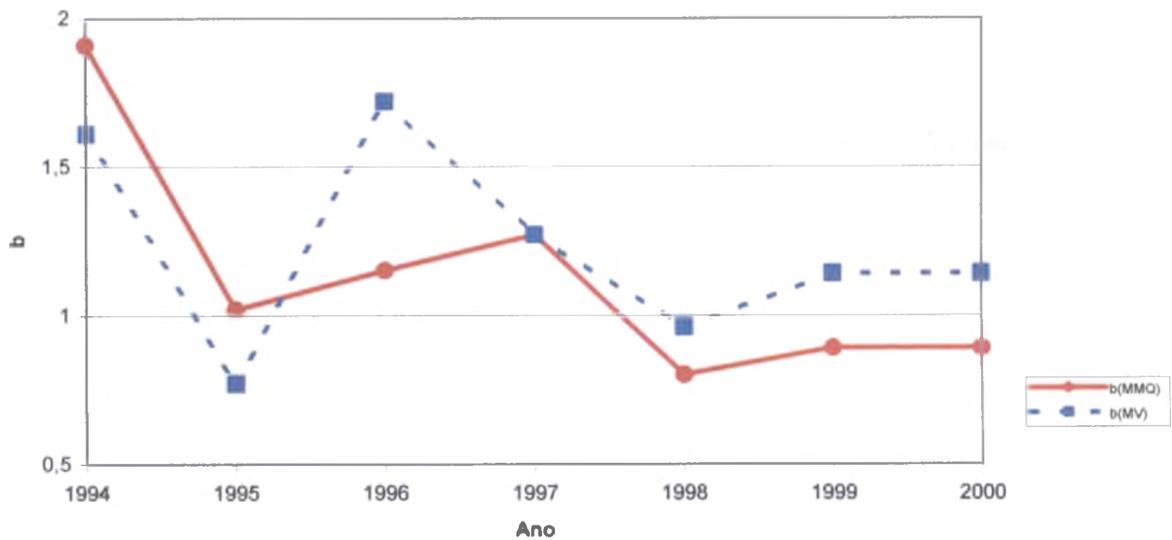


Figura 6.13 – Variação anual do parâmetro b para a SIR de Nova Ponte/MG, no período de 1994 a 2000. Comparativo entre os valores de b determinados pelo método dos mínimos quadrados (círculos verdes) e pelo método da máxima verossimilhança (quadrados azuis). Nas determinações de b não foram utilizados os eventos principais de 1995 ($3,5 m_R$) e de 1998 ($4,0 m_R$).

CAPÍTULO 7

Discussão e Conclusões

O presente estudo teve como objetivo caracterizar a sismicidade induzida no Reservatório de Nova Ponte no período entre 1994 e 2000. Esta caracterização foi feita em termos da variação espaço-temporal dessa sismicidade e de suas feições de recorrência.

Para proceder a análise da distribuição da SIR em Nova Ponte, primeiramente foi feita a relocalização hipocentral de maior precisão de todos os eventos registrados em 4 ou mais estações. Um modelo de velocidades para a região foi criado com base em informações de refração sísmica (Perosi, 2000) e de geologia (Capítulo 3). Este modelo compreende uma camada superficial com 300 metros de espessura e $V_p = 5,0$ km/s (basaltos da Fm. Serra Geral); uma segunda camada com espessura de 5,7 km e $V_p = 5,7$ km/s (xistos do G. Araxá); e um semi-espaço com $V_p = 6,1$ km/s. Foi inferida, também, a razão V_p/V_s para a região, obtendo-se o valor de 1,70.

Dentre esses eventos relocalizados, utilizando-se o programa HYPO71 (Lee & Lahr, 1975), foram selecionados aqueles com os melhores resultados para se proceder a análise espaço-temporal da SIR. Os parâmetros da seleção foram: $RMS \leq 0,20$ seg.; $ERH \leq 2,0$ km; $ERZ \leq 5,0$; e $GAP \leq 330^\circ$ (veja Apêndice B para explicação das siglas).

A análise da distribuição dos hipocentros, ao longo desses 7 anos que compreendem o período em estudo, mostrou algumas características interessantes e importantes para compreender a SIR de Nova Ponte.

Os sismos da Área Sísmica 1 (Capítulo 5; Figura 5.4) apresentam-se agrupados em uma região de, aproximadamente, 5 km de raio. Seus epicentros mostram fraco alinhamento na direção NNW e observa-se uma migração a partir de uma área restrita próxima do lago, em 1994, para as vizinhanças da margem em 1998. Uma feição marcante é também o aumento na profundidade e na dispersão dos hipocentros com o tempo, evidenciando a difusão lateral e vertical da água a partir do reservatório. Os focos desses eventos distribuem-se, em sua maioria, entre 0 e 15 km de profundidade. Pode ser notada uma direção preferencial de aumento na profundidade focal para NW.

Os eventos da Área 2 ocorrem de duas formas (Capítulo 5; Figura 5.34): agrupados ou de forma dispersa. Os epicentros dos sismos agrupados encontram-se numa área restrita, com comprimento aproximado de 10 km e largura de 5 km, ligeiramente alongada na direção NNW. Esta direção de alinhamento dos epicentros coincide com planos de solução de mecanismos focais definidos para esta área (Capítulo 2; Figura 2.10), e com a direção de maior extensão das isossistas do evento principal de 21 de abril de 1995 (Capítulo 2; Figura 2.8). Os epicentros que ocorrem de forma dispersa sugerem fracos alinhamentos nas direções NE e NW. Estas direções também são próximas das obtidas nos mecanismos focais (Capítulo 2; Figura 2.10). Os sismos dessa área sísmica ocorrem em diversas profundidades, com focos entre 0 e 10 km em sua grande maioria. As profundidades desses eventos aumentam à medida em que se distanciam da área do lago. As direções de alinhamentos de epicentros para as duas formas de distribuição dos sismos na Área Sísmica 2 são coincidentes com as direções gerais de feições geológicas, geofísicas e geomorfológicas (falhas, fraturas, lineamento magnetométrico, alinhamentos de drenagens).

A diferença entre a distribuição temporal das profundidades focais das duas áreas sismogênicas sugere um comportamento hidromecânico diferenciado para as rochas nestas localidades. Gomide (1999) também encontrou valores de difusividade hidráulica diferentes para as duas áreas sísmicas.

O evento principal de 22 de maio de 1998 (4,0 m_R) e os sismos associados (pré e pós-abalos) apresentam um padrão espacial-temporal de sismicidade. Os pré-abalos adiantados e imediatos (Marza *et al.*, 1999b) concentram-se em dois agrupamentos distintos, enquanto que os pós-abalos ocorrem nas duas aglomerações, e o evento principal nas proximidades da área dos pré-abalos imediatos (Capítulo 2; figuras 2.7 e 2.9). Esta distribuição sugere uma direção de acúmulo de tensões, primeiramente na região de localização dos pré-abalos adiantados e, posteriormente, na dos pré-abalos imediatos, até a ocorrência do evento principal. Após este, há uma redistribuição das tensões em toda a região e a ocorrência dos pós-abalos nos dois agrupamentos.

Além do estudo da distribuição espacial, a quantificação dos sismos induzidos em Nova Ponte fez-se necessária para a caracterização da sismicidade. Dessa forma, foram definidas novas relações entre a magnitude e a duração do sinal nas estações sismográficas NP3 e NP4. Foi necessário definir relações específicas para cada conjunto

equipamento/parâmetro (Capítulo 6), em virtude destas duas estações apresentarem variações nos seus equipamentos e em seus parâmetros de funcionamento (Capítulo 4).

Utilizando-se as relações entre a magnitude e a duração aqui definidas, determinou-se o parâmetro b para a SIR de Nova Ponte pelo método da máxima verossimilhança, e obteve-se $b = 1,37 (\pm 0,07)$. Este valor é superior ao encontrado para a sismicidade natural na região Sudeste ($b = 1,06 \pm 0,04$; Berrocal *et al.*, 2001), que é uma característica geral da SIR observada também em vários casos em todo o mundo (Gupta, 1992).

Foram determinados também os valores de b para os pré e pós-abalos do evento principal de 22 de maio de 1998. Os resultados mostram que este parâmetro para os pré-abalos é superior ao de pós-abalos, semelhante ao descrito para outras seqüências sísmicas induzidas por reservatório.

Pode-se concluir que as características observadas neste trabalho, como variação espacial dos eventos entre 1994 e 2000, alinhamento dos epicentros e valor do parâmetro b , enfatizam a natureza induzida da sismicidade presente na região do Reservatório de Nova Ponte. Além disso, o comportamento espaço-temporal dos sismos associados ao evento principal de 22 de maio de 1998 ($4,0 m_R$) possui um caráter preditivo, importante para estudos de perigo sísmico.

Finalmente, vale salientar que o caso de SIR de Nova Ponte se destaca por uma série de feições e conjecturas como: neste local ocorreu, em 1998, o segundo maior sismo induzido por reservatório no Brasil ($m_R=4,0$); o monitoramento sismográfico é bastante completo tanto em cobertura temporal (incluindo período pré e pós-enchimento), espacial e em número de estações; a validação da SIR de Nova Ponte pode ser considerada confiável por ser confirmada por vários atributos [padrão espacial, temporal, correlação com a variação do nível de água (Assumpção *et al.*, 2002), feições estatísticas (coeficiente b) e com feições geológicas etc.]. Face a essas conjecturas, consideramos imprescindível que o monitoramento instrumental em Nova Ponte continue e, mais que isso, seja adensado e melhorado (com oportunidades oferecidas pela tecnologia moderna). Isto porque, considerando o caráter de ciclo repetitivo observado neste reservatório, é razoável esperar uma futura ocorrência de outros eventos principais.

Referências Bibliográficas

- AKI, M. 1965. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits. *Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ.*, **43**, 237-293 (*apud Bender, 1983*).
- AKI, K. 1969. Analysis of the seismic coda of local earthquake as scattered waves. *J. Geophys. Res.*, **74**, 615-631.
- AKI, K. & CHOUET, B. 1975. Origin of coda waves: source, attenuation, and scattering effects. *J. Geophys. Res.*, **80**, 3322-3342.
- ARAÚJO FILHO, J.O. 1999. Structural characteristics and tectonic evolution of the Pirineus Syntaxes, Central Brazil. *PhD Thesis, Univ. of Illinois, USA*, 417 p.
- ASSUMPÇÃO, M. 1983. A regional magnitude scale for Brazil. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **73**: 237-246.
- ASSUMPÇÃO, M.; FERREIRA, J. M.; CARVALHO, J. M.; BLUM, M. L.; MENEZES, E. A.; FONTENELE, D. & AIRES, A. 1989a. Seismic activity in Palhano, CE, October, 1988 – Preliminary Results. *Rev. Bras. Geof.* **7**: 11-17.
- ASSUMPÇÃO, M.; TAKEYA, M.; FERREIRA, J.M.; COSTA, J.M. & SOPHIA, C.M. 1989b. Cálculo de magnitudes e relação frequência-magnitude dos sismos de João Câmara, RN. *Rev. Bras. Geofísica*, **7**: 107-116.
- ASSUMPÇÃO, M.; BARBOSA, J. R.; BERROCAL, J.; BASSINI, A. M.; MARZA, V. I.; HUELSEN, M. G. V. & RIBOTA, L. C. 1997. Seismicity patterns and focal mechanisms in SE Brazil. *Rev. Bras. Geof.*, **15**: 119-132.
- ASSUMPÇÃO, M.; JAMES, D. & SNOKE, A. 2001. Crustal thicknesses in SE Brazilian shield by receiver function analysis: implications for isostatic compensation. *J. Geophys. Res.*, *submetido*.
- ASSUMPÇÃO, M.; MARZA, V. I.; BARROS, L. V.; CHIMPLIGANOND, C. N.; SOARES, J. E. P.; CARVALHO, J. M.; CAIXETA, D. F.; AMORIM, A. & CABRAL, E. 2002. Reservoir induced seismicity in Brazil. *Pure Appl. Geophys.* **159**, 598-617.
- BAECHER, B. G. & KEENEY, R. L. 1982. Statistical examination of reservoir induced seismicity. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **72**: 553-569.
- BÅTH, M. 1979. Introduction to Seismology. Basel, Boston, Stuttgart: Birkhäuser Verlag, 427 pp.
- BÅTH, M. 1981. Earthquake magnitude – recent research and current trends. *Earth Sci. Rev.*, **17**: 315-398.
- BELL, M. L. & NUR, A. 1978. Strength changes due to reservoir induced pore pressure and stresses and application to Lake Oroville. *J. Geophys.*, **83**: 4469-4483.
- BENDER, B. 1983. Maximum likelihood estimation of b values for magnitude grouped data. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **73**: 831-851.

- BERROCAL, J.; FERNANDES, C.; BUENO, A.; SEIXAS, N. & BASSINI, A. 1993. Seismic activity in Monsuaba (state of Rio de Janeiro), Brazil, between 1988 December and 1989 February. *Geophys. J. Int.*, **113**: 73-82.
- BERROCAL, J.; FERNANDES, C.; BASSINI, A. & BARBOSA, J.R. 1996. Earthquake hazard assessment in Southeastern Brazil. *Geof. Int.*, **35**: 257-272.
- BERROCAL, J.; FERNANDES, C.; DINIZ DE ALMEIDA, A.A. & ROEHL, J.L.P. 2001. Avaliação da ameaça sísmica na Região SE do Brasil através do método probabilístico. Anais do 7º Congresso Internacional de Geofísica, Salvador, BA, Brasil, 1264-1267.
- BRITO NEVES, B.B. & CORDANI, U.G. 1991. Tectonic evolution of South America during the Late Proterozoic. *Precambrian Research*, **53**, 23-40.
- CEMIG 1990. Projeto Executivo Geologia. *Relatório Final, Vols. 1 e 2, – Estudos Ambientais – Usina Hidrelétrica de Nova Ponte. Leme Engenharia S.A.*, Belo Horizonte, MG.
- COMIG 2000. Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais e texto explicativo, *Cd-Rom, Companhia Mineradora de Minas Gerais – COMIG*.
- CORDANI, U.G.; MILANI, E.J.; THOMAZ FILHO, A. & CAMPOS, D.A. 2000. Tectonic Evolution of South America, Rio de Janeiro.
- GUPTA, H.K. 1992. Reservoir-induced Earthquakes. *Developments in Geotechnical Engineering* 64, Elsevier, 364 pp.
- GUTENBERG, B & RICHTER, C.F. 1944. Frequency of earthquakes in California. *Bull. Seism. Soc. Am.* **34**, 185-188 (*apud Smith, 1986*).
- GUTTORP, P. 1987. On least-squares estimation of *b* values. *Bull. of Seism. Soc. of Am.* **77**, 2115-2124.
- HAASE, J. S.; Acusón, E.; Kanamori, H.; Mori, J. 1995. Global Positioning System Resurvey of Southern California Seismic Network Stations. *Bull. of Seism. Soc. of Am.* **85**, 361-374.
- HARALYI, N.L.E.; HASUI, Y.; MIOTO, J.A.; HANZA, V.M. & RODRIGUES, C.R.V. 1985. Ensaio sobre a estruturação crustal do Estado de Minas Gerais com base na informação geofísica e geológica. *Cont. à Geol. e Petrol. Bol. Esp. da SBG, Núcleo de Minas Gerais, Belo Horizonte*.
- HERMANN, R.B. 1975. The use of duration as a measure of seismic moment and magnitude. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **65**, 899-913.
- KISSLINGER, K. 1976. A review of Theories of mechanisms of induced seismicity. *Eng. Geol.*, **8**: 85-90.
- LEE, W. H. K. & DODGE, D. A. 1992. A course on: PC-based seismic networks. *U.S. Geol. Survey, Open-File Report*, 92-441.

- 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. Survey, Open-File Report*, 75-331.
- MARZA, V. I.; VELOSO, J. A. V.; CARVALHO, J. M.; BARROS, L. V.; & GOMIDE, L. C. 1997. Reservoir induced seismicity at Nova Ponte (MG): Revisited, *Anais do 5º Congresso Internacional da SBGf*, p. 968-971.
- MARZA, V. I.; BARROS, L. V.; SOARES, J. E. P.; CARVALHO, J. M.; FONTENELLE, D. P.; CHIMPLIGANOND, C. N.; CAIXETA, D. F.; GOMES, I. P.; FURTADO, G. O.; CARIM, A. L.; SOUZA, I. F., CALIMAN, E. H. & BARROS, J. B. 1999a. Some aspects of reservoir – induced seismicity in Brazil. *Proc 23rd Brazilian Cong. An Large Dams*, Belo Horizonte, Brazil, **1**, 199-211.
- MARZA, V. I.; BARROS, L. V.; SOARES, J. E. P.; CARVALHO, J. M.; CHIMPLIGANOND, C. N. & CAIXETA, D. F. 1999b. A precussory seismicity pattern associated to the Nova Ponte (MG) reservóir induced mainshock of 1998 'May' 22 ($m_R = 4,0$): *Proc. 6th Int. Congr. Brazilian Geophys. Soc.*, Rio de Janeiro, Brazil. 4pp (CD-ROM).
- MARZOCCHI, W. & SANDRI, L. 2001. IAGA-IASPEI Joint Scientific Assembly, Hanoi, Vietnam.
- MOGI, K. 1962. Study of elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relation to earthquake phenomena. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **40**, 125-173 (*apud Gupta, 1992*).
- MOGI, K. 1963a. The fracture of a semi-infinite body caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena (second paper). The case of the materials having some heterogeneous structures. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **41**: 595-614.
- MOGI, K. 1963b. Some discussions on aftershocks, foreshocks and earthquake swarms – the fracture of a semi-infinite body caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena (third paper). *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **41**: 615-658.
- MOGI, K. 1967a. Earthquakes and fractures. *Tectonophysics*, **5**, 35-55 (*apud Gupta, 1992*).
- MOGI, K. 1962. Regional variations in magnitude-frequency relation of earthquakes. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **45**, 313-325 (*apud Gupta, 1992*).
- PAPAZACHOS, B. C. 1974. On the relation between certain artificial lakes and the associated seismic sequences. *Eng. Geol.*, **8**: 39-48.
- PEROSI, F. A. 2000. Refração sísmica profunda no setor sudeste da Província Tocantins. Dissertação de mestrado. IAG-USP.
- PIMENTEL, M.M.; FUCK, R.A. & BOTELHO, N.F. 1999. Granites and the geodynamic history of the neoproterozoic Brasília belt, Central Brazil: a review. *Lithos*, **46**, 463-483.
- SCHOLZ, C.H. 1968. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **58**: 399-415.

- SIMPSON, D. W. 1976. Seismicity changes associated with reservoir loading. *Eng. Geol.*, **10**: 123-150.
- SIMPSON, D. W. 1986. Triggered earthquakes. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **14**: 21-42.
- SIMPSON, D. W.; LEITH, W. S. & SCHOLZ, C. H. 1988. Two types of reservoir induced seismicity. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **78**: 2025-2040.
- SMITH, D. 1986. Evidence for precursory changes in the frequency magnitude b-value. *Geophys. J. R. Astr. Soc.* **86**, 815-838.
- SU, F.; AKI, K.; TENG, T.; KOYANAGI, S. & MAYEDA, K. 1992. The relation between site amplification factor and surficial geology in Central California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**: 580-602.
- SUTEAU, A. M. & WHITCOMB, J. H. 1979. A local earthquake coda magnitude and its relation to duration, moment M_0 , and local Richter magnitude M_L . *Bull. Seism. Soc. Am.*, **69**: 353-368.
- TAKEYA, M. 1985. Escalas de magnitude local na região da Usina Hidrelétrica de Foz do Areia. Dissertação de Mestrado, IAG/USP, 150 p.
- TALWANI, P. 1995. Two categories of reservoir induced seismicity. *Proc ISORIS'95*. p.44-64.
- UHRHAMMER, R. A. 1980. Analysis of small seismographic station networks. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **70**: 1369-1379.
- UTSU, T. 1966. A statistical significance test of the difference in *b*-value between two earthquake groups. *J. Phys. Earth*, **14**, 37-40 (*apud Bender, 1983*).
- UTSU, T. 1969. Aftershocks and earthquake statistics, I. Some parameters which characterize an aftershocks sequence and their interrelations. *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. 7 (geophys.)*, **3**: 129-195.
- UTSU, T. 1971. Aftershocks and earthquake statistics III. *J. Faculty of Sci., Hokkaido Univ., Series VII. Geophysics*, **3**: 379-441.
- VELOSO, J. A. V. & HUELSEN, M. G. V. 1994. Relatório sobre a atividade sísmica na área do Reservatório de Nova Ponte. Preliminar, Convênio FUB-CEMIG, 23 pp.
- VELOSO, J. A. V.; CARVALHO, J. M. ; HUELSEN, M. G. V. ; GOMIDE, L. C. & CHIMPLIGANOND, C. N. 1994. Recent Seismic Activity in the Nova Ponte Reservoir área, Brazil, abstract SSR. 12, *Reg. Seismological Assembly in S. America*, Brasília, Brazil, p. 22.
- VELOSO, J. A. V. & HUELSEN, M. G. V. 1995. Relatório sobre a atividade sísmica na área do Reservatório de Nova Ponte. Convênio FUB-CEMIG, 14 pp.
- VELOSO, J. A. V. & VELOSO, 1995. Mapa de Intensidade de Nova Ponte. *Manuscrito não publicado*.

VELOSO, J. A. V. & MARZA V. I. 1996. Estimativa da aceleração máxima ocorrida na barragem de Nova Ponte devida ao sismo de 21/04/95. Relatório especial, Observatório Sismológico, Fundação Universidade de Brasília, 15pp.

- APÊNDICE A -**Modelo de Velocidades**

Modelo de velocidades usado na relocalização hipocentral dos eventos de Nova Ponte entre 1994 e 2000, e valores adotados para os parâmetros utilizados pelo programa HYPO71 (Lee & Lahr, 1975).

```
HEAD                                NOVA PONTE
RESET TEST(01)=0.05
RESET TEST(02)=20.
RESET TEST(03)=-1.0
RESET TEST(04)=0.05
RESET TEST(05)=3.0
RESET TEST(06)=1.0
RESET TEST(07)=-5.28
RESET TEST(08)=1.0
RESET TEST(09)=2.3
RESET TEST(10)=100.
RESET TEST(11)=15.
RESET TEST(12)=0.5
RESET TEST(13)=1.0

5.000 00.000
5.700 00.300
6.100 06.000

2.5 0050.0300. 1.70 4 0 0 1 1 0 0 0000
```

1994 – Área 1

DATE	ORIGIN	LAT S	LONG W	DEPTH	MAG	NO	GAP	DMIN	RMS	ERH	ERZ	QM		
940409	2030	38,60	19-21,65	47-38,30	0,27	1,4	6	112	1,4	0,10	0,8	0,7	B1	
940409	2221	25,28	19-22,26	47-38,37	1,93	1,4	6	113	1,2	0,03	0,6	0,5	B1	
940409	2314	14,02	19-22,51	47-38,06	0,81	0,9	5	124	1,9	0,03	0,5	1,6	C1	
940410	925	56,52	19-21,62	47-37,57	2,92	1,4	6	122	2,7	0,04	0,7	0,6	B1	
940410	10	5	12,80	19-23,22	47-38,20	2,23	1,3	6	146	2,7	0,04	0,6	0,7	B1
940410	1235	46,85	19-23,14	47-38,30	1,81	1,3	6	141	2,4	0,03	0,4	0,6	B1	
940412	2353	21,59	19-22,91	47-38,57	2,55	1,3	6	129	1,8	0,07	1,2	0,9	B1	
940413	854	18,33	19-22,77	47-38,50	1,19	1,0	5	126	1,7	0,05	1,1	1,8	C1	
940413	1158	59,91	19-22,26	47-39,19	2,76	1,5	6	160	0,5	0,04	0,6	0,6	B1	
940413	1424	8,99	19-22,66	47-38,55	3,19	1,5	6	122	1,5	0,04	0,6	0,6	B1	
940413	17	1	20,43	19-22,84	47-38,47	3,32	1,2	6	129	1,8	0,07	1,3	1,0	B1
940413	1710	56,46	19-22,35	47-38,48	1,56	0,7	5	115	1,2	0,06	1,4	1,6	C1	
940413	20	6	30,15	19-22,51	47-39,00	1,00	1,3	5	155	0,9	0,05	1,2	1,7	C1
940414	16	8	56,46	19-22,41	47-39,42	1,71	1,2	5	170	1,0	0,03	0,8	0,9	C1
940415	23	9	41,83	19-21,53	47-38,30	1,34	1,0	5	123	1,6	0,06	1,4	2,1	C1
940426	1413	57,71	19-22,63	47-39,57	0,85	1,3	6	166	1,5	0,07	1,2	3,4	C1	
940427	2234	30,97	19-21,59	47-38,24	1,73	1,7	5	130	1,6	0,05	1,1	1,4	C1	
940507	1433	39,72	19-22,92	47-39,86	2,75	1,6	5	171	2,2	0,07	1,9	1,7	C1	
940520	2335	10,66	19-23,73	47-39,12	2,27	1,4	6	147	3,2	0,08	1,6	1,4	C1	
940520	2341	34,38	19-21,76	47-39,86	1,97	1,7	6	174	1,5	0,10	1,9	2,7	C1	
940521	451	5,74	19-23,80	47-39,20	1,52	1,0	6	148	3,3	0,05	0,9	1,5	B1	
940522	1229	46,61	19-23,38	47-39,36	1,59	1,4	6	156	2,6	0,06	1,0	1,5	B1	
940524	1144	37,13	19-23,41	47-39,13	4,57	1,5	6	150	2,6	0,08	1,7	1,0	C1	
940526	1832	40,33	19-24,12	47-38,24	2,47	1,2	6	175	4,1	0,04	0,8	0,8	B1	
940529	336	20,41	19-21,91	47-39,29	2,13	0,9	5	170	0,5	0,02	0,5	0,4	C1	
940529	350	46,32	19-23,38	47-38,70	0,30	1,2	5	141	2,6	0,05	1,0	0,8	C1	
940529	359	20,34	19-22,55	47-38,91	3,38	1,2	5	144	1,0	0,03	0,9	0,5	C1	
940531	23	8	13,25	19-22,02	47-38,85	2,00	0,9	5	102	0,3	0,06	1,4	1,2	C1
940616	252	37,66	19-23,08	47-40,18	0,28	1,3	6	178	2,8	0,15	1,4	1,5	C1	
940712	1136	33,32	19-22,89	47-37,65	2,64	1,3	5	143	2,9	0,05	1,2	1,2	C1	

1995 – Área 1

DATE	ORIGIN	LAT S	LONG W	DEPTH	MAG	NO	GAP	DMIN	RMS	ERH	ERZ	QM
950521	0 1	17,16	19-22,29	47-39,45	2,62	1,7	7 249	6,8	0,05	0,8	2,0	C1
950528	2313	19,74	19-23,35	47-38,27	9,05	1,8	8 330	19,9	0,04	0,7	1,5	C1
950529	1157	56,66	19-21,99	47-39,12	5,76	2,5	8 327	17,4	0,05	0,6	0,3	C1
950529	1338	11,57	19-23,47	47-38,33	6,79	1,3	9 271	5,1	0,08	1,1	1,2	C1
950529	1621	13,45	19-20,79	47-38,16	6,65	2,0	9 211	5,5	0,08	1,1	1,2	C1
950626	1528	42,65	19-20,91	47-37,63	7,08	1,5	7 205	4,7	0,04	0,6	0,6	C1
950626	1559	0,29	19-21,22	47-38,19	6,85	1,9	7 219	5,2	0,05	0,8	0,9	C1
950626	1611	44,95	19-21,77	47-37,72	7,47	1,9	7 226	4,0	0,07	1,1	0,9	C1
950626	17 4	10,40	19-20,88	47-38,35	6,08	1,9	7 215	5,7	0,02	0,4	0,5	C1
950702	732	30,46	19-20,66	47-39,61	6,33	1,8	9 226	7,8	0,06	0,7	1,1	C1
950706	434	31,97	19-19,94	47-37,62	5,75	1,2	7 189	6,0	0,05	1,1	0,8	C1
950715	7 8	12,12	19-20,18	47-39,48	5,77	1,3	8 322	14,1	0,06	0,7	0,4	C1
950729	2223	28,29	19-23,18	47-38,17	8,19	1,4	7 265	4,7	0,07	1,8	1,5	C1
950819	1441	22,79	19-25,13	47-37,68	5,81	1,4	7 303	6,0	0,05	0,7	0,6	C1
951215	2115	55,48	19-26,72	47-37,30	6,84	1,7	9 320	8,3	0,09	1,5	2,2	C1

1995 – Área 2

DATE	ORIGIN	LAT S	LONG W	DEPTH	MAG	NO	GAP	DMIN	RMS	ERH	ERZ	QM
950421	851	00,00	19- 8,73	47-40,00	2,60	3,5						
950510	332	26,77	19- 8,80	47-36,53	6,12	1,3	7 236	6,7	0,06	0,8	0,9	C1
950519	1043	34,71	19-10,93	47-41,80	4,25	1,2	8 203	5,7	0,04	0,3	0,6	C1
950522	2018	8,05	19-10,05	47-38,30	5,45	1,3	8 122	4,7	0,14	0,8	1,6	B1
950525	2022	57,14	19- 9,34	47-42,33	8,44	1,4	9 145	3,0	0,18	1,3	1,8	C1
950526	243	48,29	19-10,11	47-41,94	3,48	1,9	9 157	4,4	0,04	0,2	0,5	B1
950526	820	59,51	19-10,58	47-42,24	5,51	0,9	8 204	4,7	0,03	0,2	0,3	C1
950528	1926	27,20	19- 8,28	47-37,59	2,92	0,8	7 158	3,9	0,05	0,4	1,1	B1
950529	547	19,06	19- 9,97	47-39,35	0,13	0,8	8 125	5,0	0,06	0,2	1,0	B1
950529	1016	47,82	19-10,55	47-42,08	3,32	0,9	8 199	4,8	0,05	0,3	0,8	C1
950529	1017	3,04	19-10,72	47-41,56	5,46	0,8	7 192	5,7	0,10	0,8	1,5	C1
950605	925	6,59	19- 9,86	47-41,56	8,23	0,8	8 168	4,7	0,20	1,5	2,6	C1
950605	926	50,89	19- 9,58	47-41,11	7,91	0,9	8 151	5,2	0,19	1,3	2,2	C1
950620	2252	56,88	19- 8,66	47-39,64	3,66	1,2	7 107	3,2	0,04	0,3	0,6	B1
950622	030	8,55	19- 8,43	47-42,11	4,60	1,5	7 149	3,0	0,07	0,5	1,0	B1
950704	14	1 10,30	19- 4,73	47-34,21	2,17	1,1	8 308	7,5	0,08	0,9	2,6	C1
950716	0 8	28,44	19- 9,21	47-39,55	2,91	0,9	8 115	4,2	0,05	0,2	0,8	B1
950716	23	1 43,40	19-10,27	47-40,84	4,37	0,9	8 165	5,9	0,04	0,2	0,5	B1
950718	1120	36,70	19-11,55	47-42,05	7,18	1,0	8 223	6,4	0,13	1,1	1,4	C1
950718	1152	23,64	19-11,40	47-41,62	1,43	1,2	8 212	5,8	0,07	0,5	2,7	C1
950718	1246	19,76	19-10,81	47-41,79	4,96	1,5	8 200	5,5	0,10	0,6	1,3	C1
950718	2129	58,86	19-10,94	47-41,87	5,93	1,3	8 205	5,6	0,05	0,4	0,6	C1
950721	8 3	2,31	19- 7,99	47-38,37	1,77	0,8	8 156	3,2	0,06	0,4	1,1	B1
950721	2226	52,01	19- 8,68	47-36,29	5,05	1,5	8 150	1,6	0,11	0,9	1,1	B1
950722	6 4	4,77	19- 8,86	47-37,69	4,08	0,9	8 131	4,1	0,03	0,2	0,4	B1
950722	652	8,44	19-11,47	47-42,26	5,43	1,2	8 225	6,1	0,12	0,9	1,6	C1
950722	1913	31,55	19- 9,01	47-39,62	3,85	0,9	8 113	3,8	0,10	0,5	1,5	B1
950723	513	45,04	19-10,82	47-41,86	4,86	1,2	8 201	5,5	0,08	0,5	1,0	C1
950801	737	17,32	19-10,75	47-41,85	4,99	0,8	8 199	5,4	0,07	0,5	0,9	C1
950808	12	1 52,57	19-11,44	47-28,94	8,66	1,9	8 328	12,4	0,08	1,3	1,4	C1
950809	2243	49,95	19-10,84	47-29,97	9,06	1,4	8 325	10,3	0,05	0,8	0,7	C1
950810	712	11,47	19- 8,27	47-35,08	3,14	1,5	8 291	0,8	0,16	1,6	1,2	C1
950819	033	8,98	19- 7,81	47-38,01	3,10	0,9	8 172	3,6	0,14	0,9	2,0	B1
950819	1533	15,33	19- 9,55	47-37,03	4,40	0,9	8 146	3,4	0,05	0,3	0,7	B1
950819	1536	21,77	19-11,33	47-30,12	8,45	1,6	8 323	10,5	0,07	1,0	1,0	C1
950820	1756	30,41	19- 8,64	47-37,93	4,40	0,8	8 137	4,5	0,07	0,4	1,1	B1
950821	543	4,26	19- 9,33	47-39,75	3,03	1,9	8 121	4,4	0,05	0,2	0,8	B1
951011	1211	58,35	19- 8,54	47-39,92	4,81	0,7	8 108	2,9	0,11	0,6	1,2	B1
951018	1237	11,98	19-11,30	47-43,32	8,79	1,6	8 244	5,2	0,09	0,9	0,9	C1
951020	1519	40,13	19-10,30	47-41,48	4,05	1,5	8 179	5,3	0,10	0,6	1,4	B1
951020	1610	32,60	19-10,54	47-41,21	4,75	0,6	8 180	5,9	0,04	0,2	0,6	B1
951020	1711	43,87	19-11,02	47-41,97	5,96	0,8	8 209	5,7	0,06	0,4	0,8	C1
951020	1732	47,40	19-10,90	47-41,90	4,64	0,5	8 204	5,5	0,07	0,5	1,0	C1
951020	1754	21,04	19-11,21	47-42,24	6,32	0,8	8 219	5,7	0,15	1,2	1,9	C1
951020	1838	5,01	19-11,18	47-41,89	4,95	0,9	8 211	6,0	0,09	0,6	1,2	C1
951022	1923	16,18	19-11,19	47-41,80	4,74	0,8	7 210	6,1	0,02	0,1	0,3	C1
951024	1718	2,58	19-11,42	47-42,17	5,03	0,7	8 223	6,1	0,12	0,9	1,6	C1
951204	1921	28,60	19-11,25	47-41,84	7,94	0,9	8 212	6,1	0,08	0,7	0,8	C1
951212	1828	11,64	19- 9,11	47-39,70	4,81	1,1	8 116	3,1	0,12	0,6	1,4	B1
951216	636	25,50	19- 6,29	47-35,82	1,96	1,0	8 276	4,4	0,12	1,2	2,1	C1
951217	733	11,28	19- 8,33	47-38,39	2,74	0,9	8 135	1,8	0,07	0,4	0,7	B1
951218	1444	46,03	19- 9,58	47-41,51	4,70	1,1	8 158	4,5	0,06	0,4	0,8	B1

1996 - Área 2

DATE	ORIGIN	LAT S	LONG W	DEPTH	MAG	NO	GAP	DMIN	RMS	ERH	ERZ	QM
960820	317	50,59	19-11,39	47-42,58	5,30	0,9	8 230	5,7	0,06	0,5	0,8	C1
960822	118	52,06	19-11,13	47-42,73	5,13	0,9	8 228	5,2	0,05	0,4	0,6	C1
960822	145	10,63	19-10,65	47-42,64	5,23	1,0	8 215	4,4	0,06	0,4	0,7	C1
960822	616	4,24	19-10,75	47-42,19	3,87	1,1	8 207	5,0	0,06	0,4	0,8	C1
960822	828	27,17	19-11,15	47-42,66	4,23	0,8	8 227	5,3	0,07	0,5	1,0	C1
960822	2349	34,27	19- 9,95	47-42,87	4,94	0,8	8 204	3,1	0,06	0,5	0,8	C1
960822	2350	9,43	19-10,37	47-42,38	4,56	1,2	8 202	4,2	0,06	0,4	0,7	C1
960823	038	34,48	19-10,19	47-42,20	4,25	1,0	8 192	4,2	0,06	0,4	0,9	C1
960824	10 1	19,89	19-10,60	47-42,17	3,73	0,8	8 202	4,8	0,06	0,4	1,0	C1
960826	430	40,55	19-10,10	47-41,94	0,84	1,3	8 184	4,4	0,05	0,3	3,9	C1
960826	9 3	39,05	19-10,59	47-42,13	2,80	1,1	8 201	4,8	0,06	0,4	1,0	C1
960826	911	53,92	19-10,25	47-41,78	2,27	1,2	8 184	4,8	0,04	0,2	0,9	C1
960826	1145	44,58	19-10,63	47-42,86	3,21	1,3	8 221	4,2	0,09	0,7	1,5	C1
960826	1639	34,82	19- 9,92	47-42,48	5,20	0,9	8 192	3,5	0,07	0,5	0,9	C1
960826	2113	1,76	19-10,47	47-41,99	3,34	0,9	8 195	4,8	0,07	0,4	1,2	C1
960826	2137	27,09	19-10,38	47-42,35	3,13	0,9	8 201	4,3	0,09	0,6	1,6	C1
960827	1112	22,33	19-10,66	47-42,39	3,12	1,2	8 209	4,7	0,08	0,5	1,3	C1
960827	1926	34,18	19- 9,97	47-42,22	3,76	1,2	8 186	3,9	0,03	0,2	0,5	C1
960828	838	49,50	19-10,36	47-42,06	2,86	0,9	8 194	4,6	0,05	0,3	0,8	C1
960831	436	9,86	19-10,48	47-41,99	1,26	0,9	8 195	4,8	0,05	0,3	2,0	C1
960915	1817	7,83	19-10,59	47-41,95	5,67	0,8	8 197	5,0	0,08	0,6	1,0	C1
960925	2258	40,29	19- 9,52	47-41,71	7,10	0,8	8 160	4,1	0,08	0,6	0,9	B1
960926	1932	14,05	19-10,44	47-42,03	4,29	0,8	8 195	4,7	0,03	0,2	0,4	C1
960926	1939	29,93	19-10,54	47-42,03	4,84	0,9	8 198	4,9	0,05	0,3	0,6	C1
960926	2035	58,40	19-10,47	47-42,09	4,42	0,6	8 197	4,7	0,03	0,2	0,5	C1
960926	2036	7,39	19-10,62	47-42,49	6,83	1,2	8 211	4,5	0,03	0,2	0,3	C1
960926	2055	4,24	19-11,11	47-42,27	4,06	0,9	8 217	5,5	0,08	0,5	1,2	C1
960926	21 8	9,64	19-10,71	47-42,47	4,28	1,3	8 213	4,7	0,07	0,5	0,9	C1
960926	2110	17,25	19-10,09	47-42,30	5,92	1,2	8 192	3,9	0,02	0,2	0,2	C1
960926	2119	17,48	19-10,41	47-41,63	4,30	1,4	8 185	5,2	0,05	0,3	0,7	C1
960926	2120	10,31	19-10,68	47-42,26	2,50	1,1	8 207	4,8	0,07	0,5	1,5	C1
960926	2129	12,92	19-11,43	47-42,69	4,33	0,8	8 233	5,7	0,05	0,4	0,7	C1
960926	2137	12,75	19-11,06	47-42,56	3,80	1,2	8 223	5,2	0,07	0,5	1,0	C1
960926	2137	42,20	19-10,42	47-42,58	6,09	1,0	8 208	4,1	0,04	0,3	0,5	C1
960926	2142	15,47	19-10,55	47-42,27	3,86	0,9	8 204	4,6	0,07	0,5	1,1	C1
960926	2248	57,71	19-10,94	47-42,31	1,14	0,7	8 214	5,2	0,08	0,5	3,8	C1
960926	2344	21,92	19-10,78	47-42,52	5,73	1,1	8 215	4,7	0,05	0,4	0,6	C1
960926	2351	44,56	19-10,88	47-42,25	5,70	1,3	8 211	5,1	0,05	0,4	0,6	C1
960927	042	22,11	19-10,66	47-42,16	4,52	0,8	8 204	4,9	0,03	0,2	0,4	C1
960927	047	46,63	19-10,41	47-41,87	4,48	0,9	8 191	4,9	0,07	0,4	1,0	C1
960927	048	45,39	19-10,30	47-41,84	3,70	0,8	8 187	4,8	0,02	0,1	0,3	C1
960927	123	5,90	19-10,60	47-42,19	3,63	0,8	8 203	4,8	0,08	0,5	1,1	C1
960927	344	6,44	19-11,27	47-42,75	4,59	0,8	8 231	5,4	0,09	0,7	1,3	C1
960927	427	4,17	19-10,58	47-42,03	4,80	0,8	8 199	4,9	0,05	0,3	0,6	C1
960927	551	11,37	19-10,81	47-42,45	2,88	0,8	8 214	4,9	0,06	0,4	1,1	C1
960927	555	41,25	19- 9,68	47-39,69	0,92	0,5	8 127	4,0	0,04	0,2	2,1	B1
960927	1012	3,04	19-10,31	47-42,25	5,09	1,0	8 197	4,3	0,05	0,4	0,7	C1
960928	2243	44,78	19-10,74	47-42,22	4,09	0,8	8 207	5,0	0,05	0,3	0,8	C1
960928	2325	32,84	19- 9,49	47-39,70	2,78	0,6	8 123	3,7	0,05	0,2	0,7	B1
960929	045	53,90	19-10,11	47-42,45	4,55	0,9	8 197	3,8	0,07	0,5	0,8	C1
960929	2 7	58,28	19-10,69	47-42,77	5,51	0,8	8 220	4,4	0,04	0,3	0,5	C1
960929	312	26,25	19-10,31	47-42,09	4,05	1,0	8 193	4,5	0,02	0,2	0,4	C1
960929	6 2	46,00	19-11,00	47-42,44	4,36	0,9	8 219	5,2	0,07	0,5	0,9	C1
960929	612	37,77	19-10,80	47-42,73	3,63	0,8	8 221	4,6	0,06	0,4	0,9	C1
960930	620	48,88	19-10,21	47-42,09	5,88	0,8	8 190	4,4	0,10	0,7	1,2	C1
960930	7 0	50,95	19-10,87	47-42,55	5,98	1,0	8 218	4,9	0,04	0,3	0,5	C1

1996 - Área 2 (Continuação)

DATE	ORIGIN	LAT S	LONG W	DEPTH	MAG	NO	GAP	DMIN	RMS	ERH	ERZ	QM
960930	7 5	48,99	19-10,94	47-42,62	3,58	0,7	8 221	4,9	0,06	0,5	1,0	C1
960930	18 3	14,98	19-10,98	47-42,51	4,59	0,7	8 220	5,1	0,04	0,3	0,6	C1
961001	125	11,90	19- 7,49	47-37,94	4,92	0,6	8 210	1,9	0,05	0,4	0,4	C1
961003	1725	48,26	19- 8,18	47-34,94	2,88	0,8	8 299	1,1	0,04	0,5	0,3	C1
961120	17 1	26,22	19- 9,91	47-35,49	5,04	1,1	8 223	2,4	0,07	0,6	0,7	C1
961122	2 6	14,50	19- 8,99	47-39,49	1,70	0,9	8 110	2,7	0,05	0,2	0,8	B1
961129	1735	16,36	19-12,27	47-28,32	5,73	0,8	8 330	14,1	0,03	0,4	0,2	C1
961222	2222	22,23	19- 9,11	47-39,96	0,08	0,5	8 120	3,3	0,08	0,2	0,9	B1

1997 - Área 1

DATE	ORIGIN	LAT S	LONG W	DEPTH	MAG	NO	GAP	DMIN	RMS	ERH	ERZ	QM
970131	16 5	52,74	19-19,97	47-39,40	12,28	1,6	8 321	13,7	0,05	0,8	0,9	C1
970131	18 8	11,87	19-21,12	47-38,14	9,15	1,4	8 325	15,8	0,02	0,3	0,5	C1
970131	18 9	30,61	19-18,90	47-40,06	12,86	1,3	7 317	12,0	0,05	0,9	0,9	C1
970131	1813	9,12	19-21,06	47-38,02	9,67	1,3	8 325	15,7	0,03	0,4	0,7	C1
970725	2337	48,71	19-20,13	47-39,05	17,09	1,2	7 322	14,0	0,08	1,8	1,4	C1
970801	1113	50,25	19-21,08	47-39,25	8,98	1,4	8 324	15,7	0,07	1,0	1,7	C1
970802	622	1,48	19-22,59	47-40,11	9,54	1,3	8 328	18,7	0,02	0,4	0,8	C1
970802	1330	23,57	19-20,86	47-38,98	10,55	1,2	8 324	15,3	0,06	0,9	1,3	C1
970908	2 3	44,11	19-20,46	47-37,93	8,07	0,9	8 323	14,6	0,07	1,0	1,6	C1

1997 - Área 2

DATE	ORIGIN	LAT S	LONG W	DEPTH	MAG	NO	GAP	DMIN	RMS	ERH	ERZ	QM
970105	559 24,83	19- 6,10	47-37,17	2,91	0,9	8	257	4,3	0,07	0,6	0,8	C1
970106	111 38,07	19- 9,11	47-35,85	3,14	1,2	7	173	1,2	0,06	0,6	0,8	B1
970114	742 38,35	19- 8,10	47-38,06	2,69	0,7	8	163	2,0	0,04	0,2	0,4	B1
970118	613 56,40	19- 7,53	47-42,42	4,44	0,9	8	217	3,1	0,03	0,3	0,4	C1
970118	1440 2,16	19- 7,48	47-42,43	3,55	1,1	8	220	3,1	0,02	0,2	0,3	C1
970118	1441 48,47	19- 6,24	47-42,30	3,10	0,7	8	257	5,0	0,04	0,4	0,6	C1
970118	1442 14,86	19- 7,44	47-42,20	2,39	0,9	8	217	3,5	0,05	0,4	0,9	C1
970118	1442 53,10	19- 6,81	47-42,22	1,23	0,7	8	242	4,3	0,06	0,5	1,9	C1
970118	1446 45,62	19- 7,33	47-42,47	2,73	0,8	8	227	3,3	0,03	0,2	0,4	C1
970118	1447 26,67	19- 7,48	47-42,16	1,20	0,9	8	215	3,5	0,05	0,4	1,6	C1
970121	21 3 42,03	19- 8,39	47-34,91	2,99	1,2	8	298	0,9	0,10	1,0	0,7	C1
970127	349 34,91	19- 4,02	47-43,77	3,50	0,8	8	299	8,3	0,06	0,7	1,5	C1
970625	1046 8,69	19-10,64	47-42,22	6,43	1,0	8	205	4,8	0,02	0,2	0,3	C1
970625	2059 11,32	19-10,93	47-42,57	6,93	1,1	8	220	5,0	0,06	0,5	0,8	C1
970630	21 5 21,96	19-11,00	47-41,79	5,58	1,0	8	205	5,8	0,04	0,2	0,4	C1
970703	218 51,46	19-10,78	47-41,60	5,16	0,9	8	195	5,7	0,03	0,2	0,4	C1
970703	838 50,81	19-10,86	47-42,67	7,52	1,3	8	221	4,8	0,06	0,6	0,7	C1
970703	840 57,21	19-10,18	47-42,35	4,61	1,4	8	196	4,0	0,07	0,5	0,8	C1
970703	841 45,71	19-10,38	47-42,03	5,72	1,2	8	193	4,7	0,03	0,2	0,3	C1
970703	842 48,75	19-10,25	47-42,21	4,20	1,0	8	194	4,3	0,05	0,4	0,7	C1
970704	838 48,72	19-10,55	47-41,90	3,22	0,9	8	195	5,0	0,10	0,6	1,8	C1
970705	036 45,43	19-10,50	47-42,26	3,26	0,9	8	202	4,6	0,05	0,3	0,8	C1
970705	850 48,32	19-10,52	47-41,97	6,00	0,9	8	196	4,9	0,05	0,3	0,5	C1
970706	536 19,04	19-10,30	47-42,90	3,06	1,0	8	214	3,7	0,04	0,3	0,7	C1
970706	2118 52,63	19-10,71	47-29,63	6,74	0,9	7	327	10,8	0,03	0,5	0,6	C1
970709	010 14,00	19-10,31	47-41,98	4,10	0,9	8	190	4,6	0,06	0,4	0,9	C1
970709	18 4 29,52	19-11,31	47-42,59	5,91	1,8	8	229	5,6	0,07	0,5	0,8	C1
970709	1933 36,19	19- 9,34	47-42,38	5,61	1,2	8	169	3,0	0,04	0,3	0,4	B1
970709	20 0 39,89	19-10,65	47-42,05	6,16	0,9	8	201	5,0	0,03	0,2	0,4	C1
970709	2257 16,85	19-10,25	47-41,95	4,87	0,9	8	188	4,6	0,07	0,5	1,0	C1
970710	5 6 32,03	19-10,59	47-41,85	5,69	1,4	8	195	5,2	0,07	0,5	0,8	C1
970710	735 18,77	19-10,10	47-41,90	5,09	1,2	8	182	4,5	0,02	0,1	0,3	C1
970710	1842 14,04	19- 9,62	47-42,57	4,97	1,1	8	184	3,0	0,04	0,3	0,4	C1
970710	21 0 18,72	19-10,84	47-41,87	5,98	0,9	8	202	5,5	0,04	0,3	0,5	C1
970710	2338 28,75	19-10,97	47-41,95	5,34	0,9	8	207	5,6	0,03	0,2	0,3	C1
970711	036 44,99	19-10,51	47-41,85	5,82	1,7	8	193	5,0	0,12	0,9	1,3	C1
970711	039 27,27	19-10,79	47-41,81	4,79	1,0	8	199	5,5	0,05	0,3	0,6	C1
970711	047 36,56	19-11,04	47-41,69	4,81	1,0	8	204	6,0	0,04	0,2	0,5	C1
970711	145 36,18	19-10,84	47-41,85	5,22	1,0	8	202	5,5	0,05	0,3	0,7	C1
970711	145 44,97	19-10,88	47-41,56	5,33	0,9	8	197	5,9	0,04	0,2	0,5	C1
970711	159 20,50	19-10,57	47-41,55	5,77	1,0	8	188	5,5	0,03	0,2	0,3	C1
970711	212 0,24	19-10,75	47-41,60	4,17	0,7	8	194	5,7	0,05	0,3	0,9	C1
970711	3 1 16,26	19-10,96	47-41,69	4,82	1,0	8	201	5,8	0,06	0,4	0,8	C1
970711	8 9 26,50	19-10,63	47-41,66	5,68	1,0	8	192	5,4	0,03	0,2	0,4	C1
970711	816 53,55	19-10,88	47-41,89	5,89	1,4	8	204	5,5	0,05	0,4	0,6	C1
970711	834 34,05	19- 6,59	47-36,87	3,36	0,7	8	251	4,2	0,05	0,5	0,6	C1
970711	1548 57,68	19-10,72	47-41,54	4,57	0,9	8	192	5,7	0,03	0,2	0,4	C1
970713	1836 1,96	19-13,27	47-40,20	2,67	1,0	8	258	3,2	0,04	0,4	0,5	C1
970717	2114 6,28	19- 9,98	47-41,60	2,91	0,8	8	172	4,8	0,04	0,2	0,9	B1
970722	633 10,11	19-10,90	47-41,62	5,57	1,0	8	198	5,9	0,07	0,5	0,9	C1
970722	659 9,06	19-11,01	47-41,68	4,76	0,8	8	202	5,9	0,06	0,4	0,8	C1
970725	955 32,97	19- 9,81	47-42,53	6,47	1,4	8	190	3,3	0,09	0,7	1,0	C1
970806	1845 58,89	19- 9,43	47-34,00	3,34	0,9	8	292	2,8	0,03	0,4	0,3	C1
970808	2322 56,51	19- 9,06	47-39,74	1,99	0,9	8	116	3,0	0,08	0,4	1,3	B1
970809	233 46,27	19- 9,37	47-39,76	1,33	0,7	8	122	3,6	0,03	0,1	0,8	B1
970809	641 28,43	19- 9,23	47-40,01	1,70	0,6	8	123	3,5	0,04	0,2	1,0	B1
970809	940 5,43	19-10,36	47-42,15	2,77	0,9	8	196	4,5	0,09	0,6	1,8	C1
970810	1038 27,04	19-10,81	47-41,33	1,82	0,9	8	190	5,9	0,04	0,2	1,0	C1

1997 - Área 2 (Continuação)

DATE	ORIGIN	LAT S	LONG W	DEPTH	MAG	NO	GAP	DMIN	RMS	ERH	ERZ	QM
970901	746	56,46	19- 9,72	47-42,29	4,23	1,0	8 180	3,5	0,02	0,2	0,3	C1
970907	2311	29,86	19-10,30	47-41,99	2,60	0,9	8 190	4,6	0,04	0,2	0,9	C1
971003	1631	21,15	19- 9,77	47-42,55	2,38	1,3	8 189	3,2	0,05	0,4	1,1	C1
971003	2018	10,91	19- 9,28	47-34,45	4,40	0,8	8 283	2,0	0,06	0,6	0,6	C1
971019	1315	56,06	19- 6,42	47-33,00	5,55	0,8	8 322	5,8	0,06	0,7	0,7	C1
971020	739	40,33	19-12,16	47-41,67	4,86	0,9	8 232	5,5	0,05	0,4	0,6	C1
971026	1934	20,03	19- 8,29	47-39,12	1,56	0,5	8 100	1,3	0,07	0,4	0,8	B1
971116	2129	5,41	19-10,64	47-41,40	4,89	1,5	8 187	5,8	0,13	0,8	1,6	C1
971117	224	7,99	19-11,00	47-41,67	5,67	1,0	8 202	5,9	0,05	0,3	0,6	C1
971117	13 3	10,41	19- 7,98	47-38,80	1,42	1,4	8 130	0,8	0,03	0,2	0,3	B1
971117	1312	21,65	19- 7,20	47-38,26	1,95	0,9	8 222	1,5	0,05	0,4	0,4	C1
971118	5 3	31,74	19- 7,32	47-38,58	3,39	1,4	8 217	0,9	0,06	0,5	0,5	C1
971119	629	19,26	19-10,83	47-41,69	5,12	1,1	8 198	5,7	0,06	0,4	0,7	C1
971120	610	26,75	19-10,48	47-41,38	2,43	1,5	8 182	5,6	0,03	0,2	0,6	C1
971120	611	48,34	19-10,54	47-41,78	3,67	1,1	8 192	5,2	0,05	0,3	0,8	C1
971120	612	52,50	19-10,62	47-41,48	5,45	0,9	8 188	5,7	0,03	0,2	0,4	C1
971120	1614	51,88	19-10,64	47-41,49	1,07	1,0	8 189	5,7	0,05	0,3	3,2	C1
971121	5 1	13,01	19-10,93	47-41,56	5,67	0,9	8 198	6,0	0,02	0,1	0,3	C1
971122	1459	54,94	19-10,77	47-41,33	5,66	0,9	8 189	5,9	0,06	0,4	0,8	C1
971122	1624	59,25	19-10,68	47-41,32	3,88	0,9	7 186	5,9	0,03	0,2	0,6	C1
971124	010	11,26	19-11,19	47-41,55	3,41	0,9	8 205	5,9	0,04	0,3	0,7	C1
971126	1246	24,48	19- 8,47	47-32,78	5,47	0,8	8 315	4,6	0,04	0,5	0,4	C1
971129	635	47,87	19- 8,19	47-37,71	2,61	0,8	8 165	2,6	0,07	0,4	0,8	B1
971202	232	28,73	19- 9,46	47-39,67	0,96	0,9	8 122	3,6	0,05	0,2	2,1	B1
971207	333	41,55	19- 8,05	47-38,72	0,52	0,6	8 132	1,0	0,03	0,2	0,8	B1
971212	936	33,01	19- 8,40	47-35,79	2,66	0,9	8 195	0,9	0,09	0,8	1,0	C1
971218	7 8	49,25	19- 9,45	47-39,65	2,15	0,7	8 121	3,6	0,02	0,1	0,4	B1
971219	1347	3,39	19- 8,66	47-38,74	1,11	1,1	8 104	2,1	0,03	0,1	0,6	B1
971221	1224	11,86	19- 8,39	47-39,30	0,43	0,6	8 110	1,6	0,04	0,1	1,1	B1
971227	545	18,52	19- 8,68	47-38,18	2,13	1,0	8 125	2,5	0,06	0,3	0,7	B1
971229	833	51,31	19- 8,86	47-39,98	2,09	1,6	8 120	2,9	0,04	0,2	0,7	B1
971230	1256	10,37	19- 8,86	47-39,93	1,20	0,9	8 119	2,8	0,03	0,1	0,7	B1

1998 - Área 1

DATE	ORIGIN	LAT S	LONG W	DEPTH	MAG	NO	GAP	DMIN	RMS	ERH	ERZ	QM
980108	1550	57,39	19-20,87	47-38,16	3,85	1,2	8 324	15,3	0,09	1,4	4,9	C1
980218	1921	23,39	19-20,04	47-38,55	9,00	1,5	8 322	13,8	0,04	0,7	0,9	C1
980309	1521	53,16	19-20,53	47-38,64	10,52	1,3	8 323	14,7	0,03	0,4	0,5	C1
980309	1523	5,41	19-20,87	47-36,58	8,53	1,1	8 325	15,7	0,11	1,8	2,7	C1
980309	1545	59,82	19-21,15	47-36,83	8,38	1,3	8 326	16,1	0,09	1,3	2,3	C1
980416	510	10,24	19-23,10	47-41,44	13,59	1,3	8 329	20,1	0,08	1,5	2,1	C1
980731	1412	40,29	19-20,78	47-38,55	2,80	1,0	11 216	6,1	0,07	0,7	1,7	C1
980808	1820	48,96	19-27,90	47-37,45	4,89	1,3	9 324	10,4	0,03	0,5	0,3	C1

1998 - Área 2

DATE	ORIGIN	LAT S	LONG W	DEPTH	MAG	NO	GAP	DMIN	RMS	ERH	ERZ	QM
980106	358	59,64	19-11,01	47-39,74	1,83	0,8	8 158	3,6	0,05	0,3	1,2	B1
980108	630	53,99	19-10,94	47-41,06	3,65	1,1	8 188	5,3	0,06	0,4	0,9	C1
980114	2236	17,87	19- 8,01	47-38,58	1,38	0,8	8 146	1,1	0,06	0,4	0,6	B1
980125	1345	20,19	19- 9,52	47-34,03	3,11	0,7	8 290	2,9	0,05	0,4	0,5	C1
980127	8 3	13,83	19- 8,47	47-36,10	2,74	0,9	8 175	1,3	0,05	0,4	0,6	B1
980202	4 3	21,37	19- 8,68	47-39,64	0,77	0,5	8 115	2,3	0,05	0,2	1,7	B1
980206	1846	3,03	19-11,94	47-41,02	3,16	0,9	8 216	4,5	0,10	0,7	1,5	C1
980207	443	36,38	19- 5,62	47-30,89	5,12	0,8	8 330	9,6	0,07	1,0	1,4	C1
980207	633	18,78	19- 6,64	47-31,63	5,78	1,2	8 326	7,5	0,08	1,1	1,1	C1
980216	2210	34,13	19-11,11	47-29,78	7,65	1,1	8 325	10,8	0,04	0,6	0,7	C1
980217	2230	18,32	19-10,89	47-29,81	8,55	1,5	8 325	10,6	0,06	0,8	0,8	C1
980310	18 1	24,26	19- 9,42	47-39,59	2,18	0,9	8 120	3,5	0,02	0,1	0,4	B1
980329	19 7	42,58	19- 9,97	47-31,45	3,02	1,2	8 319	7,3	0,11	1,4	2,4	C1
980413	349	9,63	19-12,16	47-40,85	1,67	1,2	8 221	4,1	0,08	0,6	1,9	C1
980416	1540	39,07	19- 7,51	47-38,73	1,97	0,8	8 211	0,5	0,05	0,4	0,4	C1
980417	723	32,80	19-13,65	47-38,09	1,67	0,6	8 286	2,1	0,03	0,3	0,3	C1
980418	2126	9,49	19- 8,23	47-38,68	0,95	0,9	8 124	1,3	0,02	0,1	0,4	B1
980419	1949	57,44	19-10,80	47-41,71	5,45	1,0	8 198	5,6	0,08	0,5	1,0	C1
980419	1951	9,71	19-10,84	47-41,62	4,62	0,9	8 197	5,8	0,12	0,7	1,5	C1
980419	1954	29,73	19-10,79	47-41,34	3,07	0,8	8 190	5,9	0,05	0,3	0,9	C1
980419	20 8	21,90	19-10,76	47-41,54	4,77	0,8	8 193	5,8	0,09	0,6	1,1	C1
980420	126	59,42	19-10,93	47-41,80	5,42	0,9	8 203	5,7	0,06	0,4	0,7	C1
980420	2248	55,34	19-10,80	47-41,72	3,89	1,4	8 198	5,6	0,05	0,3	0,8	C1
980420	2259	44,12	19-10,82	47-41,66	5,45	1,0	8 197	5,7	0,05	0,4	0,6	C1
980421	324	18,86	19-11,27	47-41,72	5,05	1,0	8 210	6,1	0,09	0,6	1,0	C1
980421	1653	12,35	19- 9,71	47-39,92	2,95	0,8	8 132	4,2	0,06	0,3	0,9	B1
980422	343	10,40	19-11,27	47-41,96	3,01	0,8	8 215	6,0	0,03	0,2	0,5	C1
980423	1159	37,53	19-11,31	47-41,58	5,28	0,9	8 209	5,8	0,11	0,8	1,4	C1
980427	1612	58,32	19-12,34	47-41,16	2,43	0,8	8 231	4,6	0,08	0,6	1,6	C1
980430	1120	37,46	19- 9,48	47-39,45	0,30	0,8	8 118	3,6	0,12	0,5	1,9	B1
980501	1027	30,78	19- 9,08	47-38,06	0,44	0,9	8 111	3,2	0,05	0,1	3,9	B1
980501	15 0	33,89	19-12,09	47-41,13	3,73	1,3	8 223	4,6	0,05	0,4	0,7	C1
980501	2258	51,59	19-12,07	47-41,13	3,18	1,0	8 222	4,6	0,05	0,3	0,7	C1
980501	23 1	20,70	19-11,96	47-41,28	4,63	1,2	8 221	4,9	0,02	0,1	0,2	C1
980501	23 4	1,74	19-11,92	47-41,07	2,87	1,2	8 217	4,6	0,05	0,3	0,8	C1
980502	010	30,38	19-12,11	47-41,32	3,20	0,9	8 226	4,9	0,06	0,5	0,9	C1
980502	1 2	0,70	19-11,82	47-41,25	1,73	0,9	8 217	4,9	0,04	0,2	1,0	C1
980503	320	18,44	19-11,82	47-41,18	3,63	1,2	8 215	4,8	0,04	0,3	0,6	C1
980505	446	4,78	19-12,09	47-41,09	3,85	1,2	8 222	4,5	0,05	0,4	0,6	C1
980506	456	26,06	19-12,16	47-40,91	2,79	1,1	8 222	4,2	0,07	0,5	1,1	C1
980506	1357	34,65	19-12,30	47-40,98	3,27	0,9	8 227	4,3	0,05	0,3	0,6	C1
980506	1359	50,68	19-12,04	47-41,10	1,90	1,2	8 221	4,6	0,06	0,4	1,4	C1
980506	1515	11,70	19-12,61	47-41,20	3,18	1,3	8 239	4,6	0,06	0,5	0,9	C1
980508	1648	16,13	19- 8,21	47-37,30	1,98	0,8	8 172	3,3	0,06	0,4	0,9	B1
980520	1958	7,02	19- 5,75	47-32,26	6,76	1,0	8 325	7,6	0,06	0,7	0,6	C1
980521	2 5	13,91	19-10,30	47-41,49	2,50	0,8	8 179	5,3	0,05	0,3	1,1	B1
980521	221	8,22	19- 5,95	47-32,26	6,31	0,9	8 325	7,4	0,08	1,0	0,8	C1
980521	310	5,34	19-12,31	47-40,92	3,43	1,1	8 227	4,2	0,06	0,5	0,8	C1
980521	643	38,67	19-10,20	47-41,77	0,63	1,0	8 182	4,8	0,03	0,1	2,8	C1
980521	9 8	22,88	19-12,29	47-41,49	4,48	1,0	8 233	5,2	0,02	0,2	0,3	C1
980521	910	10,88	19-12,25	47-40,99	3,08	0,9	8 226	4,3	0,05	0,4	0,8	C1
980521	1339	59,51	19-10,15	47-41,60	2,17	1,2	8 177	4,9	0,04	0,2	1,0	B1
980521	1341	18,25	19-10,39	47-41,66	2,75	1,1	8 185	5,1	0,04	0,2	0,6	C1
980521	1459	26,69	19- 9,79	47-39,69	3,20	0,8	8 129	4,2	0,04	0,2	0,6	B1
980521	2326	50,10	19-10,50	47-42,01	1,96	1,0	8 196	4,8	0,06	0,3	1,6	C1
980522	121	44,22	19- 9,99	47-41,88	5,49	1,0	8 179	4,4	0,02	0,1	0,2	B1
980522	131	49,11	19- 9,94	47-41,49	1,93	1,0	8 169	4,9	0,03	0,2	0,8	B1
980522	143	51,69	19-10,33	47-41,94	1,54	1,0	8 190	4,7	0,08	0,4	2,8	C1

1998 - Área 2 (Continuação)

DATE	ORIGIN	LAT S	LONG W	DEPTH	MAG	NO	GAP	DMIN	RMS	ERH	ERZ	QM
980522	156	20,18	19-10,35	47-41,97	3,70	1,2	8 191	4,7	0,05	0,3	0,8	C1
980522	916	5,51	19-10,42	47-41,67	3,06	1,1	8 186	5,2	0,03	0,2	0,6	C1
980522	959	42,05	19-10,03	47-41,62	4,69	1,0	8 174	4,8	0,07	0,4	1,1	B1
980522	1032	56,66	19-10,32	47-41,68	2,54	1,1	8 184	5,0	0,06	0,4	1,3	C1
980522	1312	2,63	19-10,43	47-42,04	2,47	1,0	8 195	4,7	0,04	0,3	0,9	C1
980522	14 2	24,84	19-10,16	47-41,41	1,90	1,1	8 174	5,2	0,05	0,2	1,3	B1
980522	15 3	7,80	19-10,39	47-41,91	1,87	1,0	8 191	4,8	0,04	0,3	1,1	C1
980522	1556	45,92	19-10,54	47-41,95	2,12	0,9	8 196	5,0	0,04	0,2	1,0	C1
980522	1559	31,47	19-10,04	47-41,70	3,71	0,9	8 176	4,7	0,08	0,5	1,2	B1
980522	16 2	15,48	19-10,51	47-41,88	1,67	1,2	8 194	5,0	0,05	0,3	1,5	C1
980522	16 5	40,61	19-10,52	47-41,90	3,44	0,8	8 194	5,0	0,05	0,3	0,8	C1
980522	1735	43,40	19-10,20	47-40,80	3,00	4,0						
980522	1746	51,95	19-12,13	47-42,37	8,10	1,0	8 242	6,7	0,07	0,7	0,8	C1
980522	1911	45,92	19-11,29	47-42,14	6,07	1,0	8 219	5,9	0,04	0,3	0,5	C1
980524	623	36,40	19-10,93	47-41,74	2,25	1,0	8 202	5,8	0,05	0,3	1,3	C1
980525	18 0	56,64	19-12,73	47-41,47	2,85	0,9	8 245	5,1	0,07	0,6	1,2	C1
980525	2046	13,73	19-12,16	47-41,32	5,02	0,9	8 227	4,9	0,06	0,4	0,7	C1
980525	21 0	21,81	19-12,20	47-41,10	3,73	1,2	8 226	4,5	0,08	0,6	1,1	C1
980525	21 3	22,71	19-12,09	47-41,03	2,58	1,0	8 222	4,4	0,05	0,4	0,9	C1
980525	21 7	58,17	19-12,24	47-41,19	4,20	1,0	8 228	4,7	0,06	0,4	0,7	C1
980525	2228	49,04	19-12,46	47-41,24	3,40	1,1	8 235	4,7	0,06	0,5	0,9	C1
980525	23 3	16,81	19-12,50	47-41,18	3,71	1,1	8 236	4,6	0,08	0,6	1,1	C1
980526	628	22,81	19-11,77	47-41,67	3,55	0,9	8 222	5,7	0,07	0,5	1,0	C1
980526	1745	56,40	19-12,43	47-41,32	2,81	1,0	8 235	4,9	0,08	0,6	1,4	C1
980605	2237	29,55	19-11,03	47-41,66	4,10	1,5	8 203	6,0	0,07	0,4	0,9	C1
980607	1653	54,74	19- 9,51	47-42,14	5,23	1,0	8 169	3,5	0,03	0,2	0,4	B1
980608	1140	13,68	19- 9,77	47-42,11	4,30	1,0	8 177	3,8	0,06	0,4	0,8	B1
980629	1742	14,38	19- 7,80	47-38,07	3,13	1,1	9 206	5,0	0,10	0,6	1,6	C1
980729	557	24,20	19- 7,39	47-37,00	1,68	1,0	10 224	3,6	0,07	0,5	1,0	C1
980831	2145	59,10	19- 7,66	47-38,25	1,82	1,3	11 194	1,4	0,09	0,5	0,6	C1
981014	353	35,27	19-11,07	47-41,46	0,89	1,1	10 200	4,0	0,11	0,5	4,4	C1
981025	1418	13,99	19- 9,92	47-39,76	1,50	1,4	11 127	4,0	0,14	0,5	2,7	B1
981106	1817	1,98	19-15,78	47-39,76	4,97	1,2	9 182	6,3	0,14	1,6	2,0	C1

1999 - Área 2

DATE	ORIGIN	LAT S	LONG W	DEPTH	MAG	NO	GAP	DMIN	RMS	ERH	ERZ	QM
990111	438	8,28	19- 7,52	47-35,60	3,03	1,5	10 260	2,1	0,12	1,1	1,3	C1
990323	6 1	2,86	19- 8,37	47-39,38	5,31	1,0	8 162	1,6	0,09	1,2	0,9	C1
990412	2247	19,48	19- 9,68	47-41,61	4,96	1,2	9 142	1,4	0,15	1,4	1,3	C1
990416	19 4	18,92	19-10,59	47-41,52	2,74	1,0	9 158	3,1	0,14	1,3	1,9	C1
990423	529	8,34	19-10,53	47-41,59	1,48	1,0	9 159	3,0	0,06	0,5	1,2	B1
990522	512	20,57	19-10,81	47-40,42	3,77	1,0	8 240	4,2	0,03	0,4	0,5	C1
990522	514	42,85	19-12,42	47-40,59	2,96	0,8	8 269	6,7	0,01	0,3	0,7	C1
990522	546	11,60	19-10,09	47-41,44	5,47	0,9	8 229	2,2	0,04	0,6	0,4	C1
990525	2211	28,25	19-11,87	47-41,39	1,51	1,3	9 172	5,4	0,02	0,2	1,0	B1
990530	6 1	24,89	19-11,91	47-41,47	4,28	1,3	9 174	5,5	0,05	0,5	0,8	B1
990531	223	42,46	19-11,53	47-41,51	2,76	1,2	9 171	4,8	0,05	0,5	1,0	B1
990531	346	58,68	19-11,60	47-41,70	7,69	1,0	8 263	4,9	0,04	0,9	0,8	C1
990531	528	14,12	19-11,69	47-41,56	3,09	1,2	9 173	5,1	0,06	0,6	1,2	B1
990608	1421	50,83	19- 8,44	47-33,05	5,90	1,0	8 271	4,1	0,08	1,2	0,6	C1
990831	2334	38,83	19- 8,43	47-37,17	5,55	1,0	8 262	3,6	0,18	1,6	1,8	C1
990921	2346	24,83	19- 8,45	47-35,79	1,44	1,7	10 188	0,8	0,17	1,3	1,9	C1

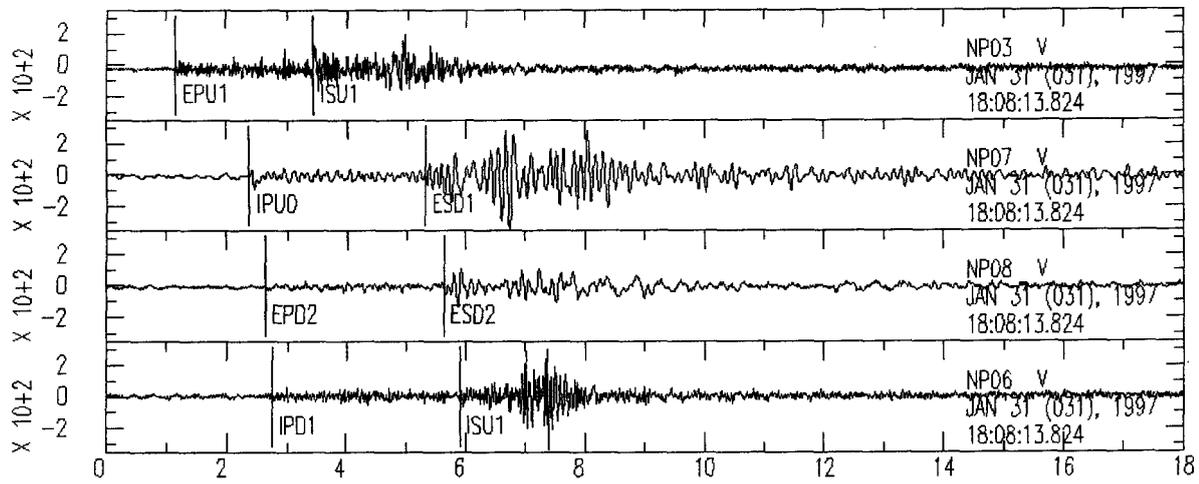
2000 - Área 2

DATE	ORIGIN	LAT S	LONG W	DEPTH	MAG	NO	GAP	DMIN	RMS	ERH	ERZ	QM
000621	2017	47,80	19- 9,01	47-35,71	1,24		9 139	0,9	0,07	0,6	1,2	B1
000712	9 1	9,66	19- 9,14	47-41,47	5,07		9 216	4,3	0,02	0,6	0,4	C1

- APÊNDICE C -

Exemplos de registros de eventos das áreas sísmicas 1 e 2.

Registros nas estações NP03, NP07, NP08 e NP06 de evento induzido da Área 1, ocorrido no dia 31 de janeiro de 1997, às 18:08:11,87 (UTC), com magnitude 1,4 m_D.



Registros do evento induzido da Área 2 nas estações NP06, NP03, NP08 e NP07, ocorrido no dia 11 de julho de 1997, às 00:39:27,16 (UTC), com magnitude 1,0 m_D.

