

INFORME SOBRE LAS PRINCIPALES ACTIVIDADES SISMOLÓGICAS En EL BRASIL DURANTE EL INTERVALO 2000 A 2007

Jesus Antonio Berrocal Gómez
Representante Nacional Del Brasil

I. INTRODUCCIÓN

En el Brasil existen varios grupos de sismología que actualmente se encuentran en actividad, en orden cronológico de formación, son los siguientes:

- Observatorio Sismológico del Instituto de Geociencias de la Universidade de Brasilia (IG/UnB), 1966;
- Grupo de Sismología del *Instituto de Astronomía, Geofísica e Ciências, Atmosféricas* de la *Universidade de Sao Paulo* (IAG/USP), 1975;
- Grupo de Sismología del Observatorio Nacional de Río de Janeiro (ON/RJ), 1978;
- Grupo de Sismología del *Instituto de Física Teórica e Experimental* de la *Universidade Federal do Rio Grande do Norte*, (IFTE/UFRN), 1985

Los integrantes de esos grupos son dados en el **Anexo 1** de este informe

Existen otras universidades del Brasil con interés en implantar la sismología como una herramienta de investigación, entre las cuales se encuentran, la *Universidade Federal do Pará* (Belem), la *Universidade Estadual Paulista* (UNESP, en Río Claro) y la *Universidade de Rio Grande do Sul* (UFRGS, en Porto Alegre).

Las cuatro instituciones principales mantienen estaciones sismográficas en operación y practican el intercambio de datos entre ellas, de ese intercambio de datos se extrae el **Boletín Sísmico Brasileiro**, que es elaborado por el grupo del IAG/USP es y publicado regularmente en la **Revista Brasileira de Geofísica**

Existen cursos de pos-grado en Geofísica, con especialización en Sismología, en el IAG/USP, UnB, UFRN y ON/RJ. Existen cursos de graduación en Geofísica en el IAG/USP, UFPA y UFBA (en estos últimos, con énfasis en Geofísica Aplicada)

El IAG/USP ofrece todo año, entre las últimas semanas de enero y primeras de febrero una Escuela de Verano en Geofísica, normalmente con alguna disciplina de sismología, abierta para todos los interesados, nacionales y extranjeros.

II. ESTACIONES SISMOGRÁFICAS EN EL BRASIL

2.1 Estaciones Analógicas de Período Corto e de Período Largo

La primera estación sismográfica instalada en el Brasil fue la de Río de Janeiro (RDJ), que opera con tres sismómetros de período largo e con registro analógico desde 1906 en la sede del ON/RJ, que ahora está localizado en la parte metropolitana de esa ciudad. Posteriormente, en la década de 1960 fue instalada por el USGS la estación NAT del tipo WWSSN, próxima de Natal, en la región NE del Brasil una estación con tres componentes de periodo corto y tres de período largo, que era operada por el Instituto de Pesquisas de la Marina del Brasil y posteriormente, desde 1975, por la UFRN. No era efectuado la lectura rutinera de los

sismogramas de esas estaciones hasta esa época; los sismogramas de NAT eran enviados al USGS para ser copiados y después devueltos al Brasil.

En 1966, fue instalada la versión experimental del *South American Array System (SAAS)*, una red de dos líneas entrecruzadas de 24 sismógrafos de período corto, enlazadas teleméricamente a una estación central donde sus datos eran registrados en una cinta multicanal en frecuencia modulada, a través de un proyecto conjunto entre CERESIS y la Universidad de Edinburgo de la Gran Bretaña, con participación de la UnB. La etapa final de SAAS fue instalada en inicio de la década de 1970, en colaboración adicional con el *Conselho Nacional de Pesquisas – CNPq* (actualmente *Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico*) y el USGS, que también instaló una estación del tipo WWSSN en el punto central de SAAS. Desde esa época se iniciaron los trabajos de análice rutinera de sismogramas y la investigación sismológica en el Brasil.

En las décadas entre 1970 y 1990 la UnB, USP, UFRN y ON/RJ instalaron varias estaciones sismográficas de periodo corto y registro analógico, algunas de las cuales funcionan hasta el presente.

2.2 Estaciones Sismográficas de Banda Ancha en el Brasil

En el mapa de la **Figura 1** son presentadas las principales estaciones de banda ancha que han operado y que todavía operan en el Brasil. Las estaciones de las redes internacionales del USGS/IRIS y GEOSCOPE son mostradas con cuadrados plomos y los triángulos azules son estaciones de banda ancha operadas en régimen semi-permanente por los grupos de sismología del Brasil.

Los triángulos pequeños son locales que fueron ocupados temporalmente por el proyecto BLSP (ver descripción posteriormente) hasta 2002 y los triángulos rojos y cuadrados amarillos, hasta 2004.

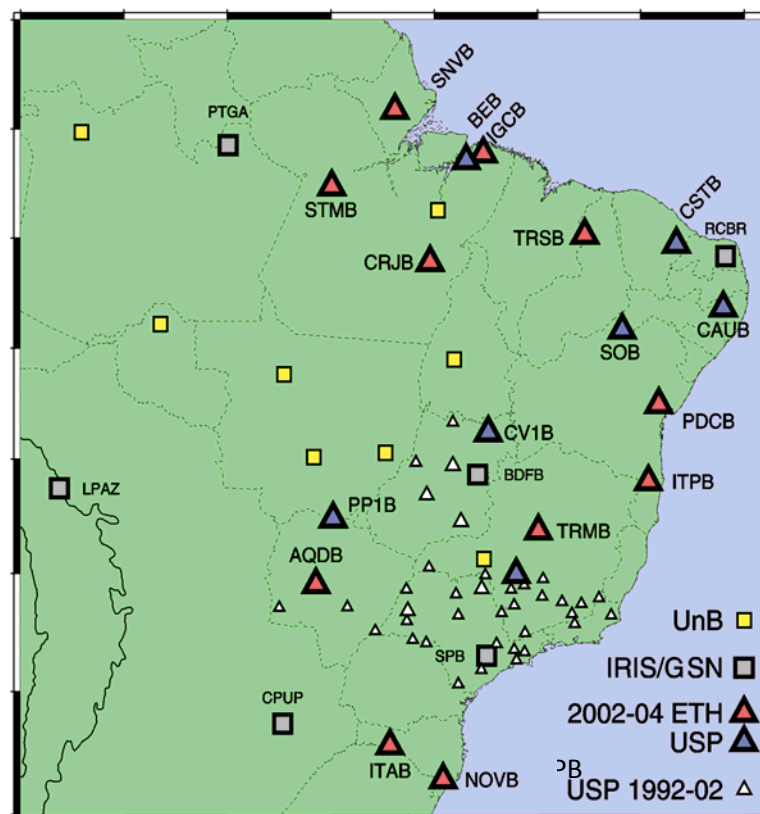


Figura 1 - Mapa localización de las principales estaciones de banda ancha que operan en el Brasil o que operaran en los últimos 16 años.

III. ESTUDIOS DE SISMICIDAD Y DE PELIGRO SÍSMICO EN EL BRASIL

3.1 Sismicidad del Territorio Brasileño

Los datos de la actividad sísmica ocurrida en el Brasil desde 1720 hasta 2006 están listados en el **Anexo 2** y sus epicentros mostrados en la **Figura 2**. La actividad sísmica histórica, hasta 1982, fue extraída del libro *Sismicidade do Brasil* de **Berrocal et al. (1984)**. Los datos posteriores están divulgados en el Boletim Sísmico Brasileiro, que es publicado regularmente en la *Revista Brasileira de Geofísica*, que es elaborado por el grupo de sismología del IAG/USP con la participación de todas las instituciones que operan estaciones sismográficas en el Brasil.

Gran parte de los datos de sismos ocurridos en el Brasil en las décadas de 1970 a 1990, fueron registrados en las estaciones que son instaladas para monitorear la sismicidad inducida por reservorios hidroeléctricos.

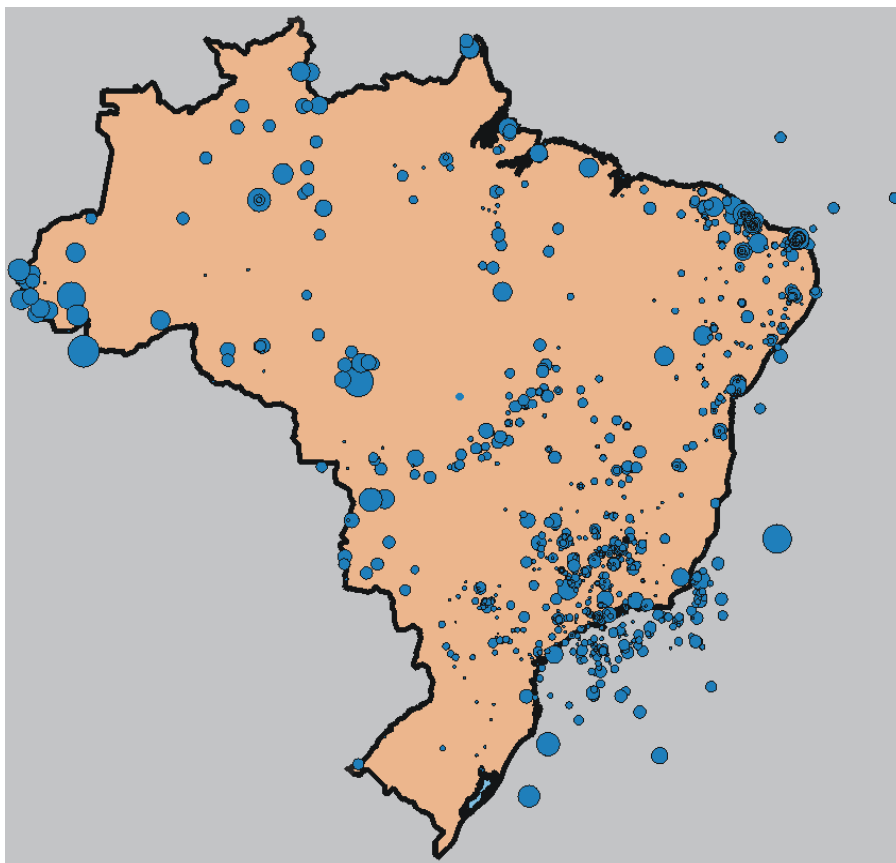


Figura 2 – Mapa de epicentros de los sismos ocurridos en el Brasil entre 1720 y 2006. El tamaño de los círculos corresponde a las magnitudes entre 3 y 6.3 m_b .

3.2 Evaluación del peligro Sísmico en la Región Sudeste del Brasil

Para este trabajo fue utilizado el método probabilístico (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis-PSHA*) conforme propuesto por **Budnits et al.(1997)**. En ese método la vibración del terreno, correspondiente a la máxima vibración horizontal provocada por un sismo, es descrita como un parámetro simple del movimiento de las partículas del terreno, que cuando sobrepasada, define o peligro sísmico en un local de interés.

Ese método puede ser descrito de acuerdo con **Kramer (1996)**, en las siguientes etapas:

- 1 – Identificación y caracterización de la fuente o fuentes sísmicas: geometría y ubicación de las fuentes sísmicas mas próximas; definir el sismo de magnitud máxima esperado; calcular las relaciones frecuencia/magnitud.
- 2 – Determinar el nivel de movimiento vibratorio del terreno en el local de interés causada por sismos de todas las magnitudes hasta la magnitud máxima esperada a través de las relaciones de predictividad.
- 3 – Introducir las imprecisiones en la localización de hipocentros y en la magnitud deben ser consideradas en esta etapa

En la **Figura 3** se muestra el mapa sismotectónico de la región Sudeste del Brasil, con datos de sismos ocurridos entre 1720 y 2003. En la **Figura 4** está la caracterización de la fuente sísmica como una fuente difusa bidimensional que fue denominada Provincia Sismotectónica de Sudeste (PSS). La PSS es dividida en células de fracciones de grado geográfico, en la Figura 4 se muestran esas células como siendo de $\frac{1}{2}$ grado de lado. En la práctica esas células son menores. En el caso de la PSS fueron utilizadas células de $\frac{1}{8}$ de grado.

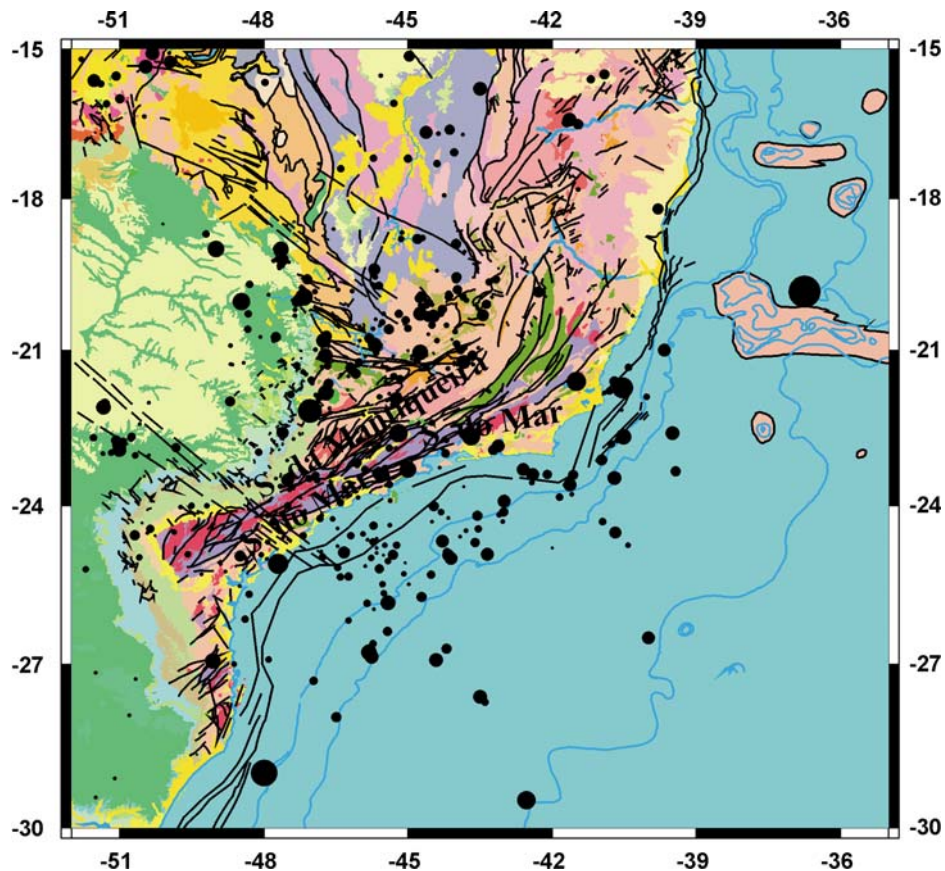


Figura 3 – Mapa sismotectónico de la región Sudeste del Brasil

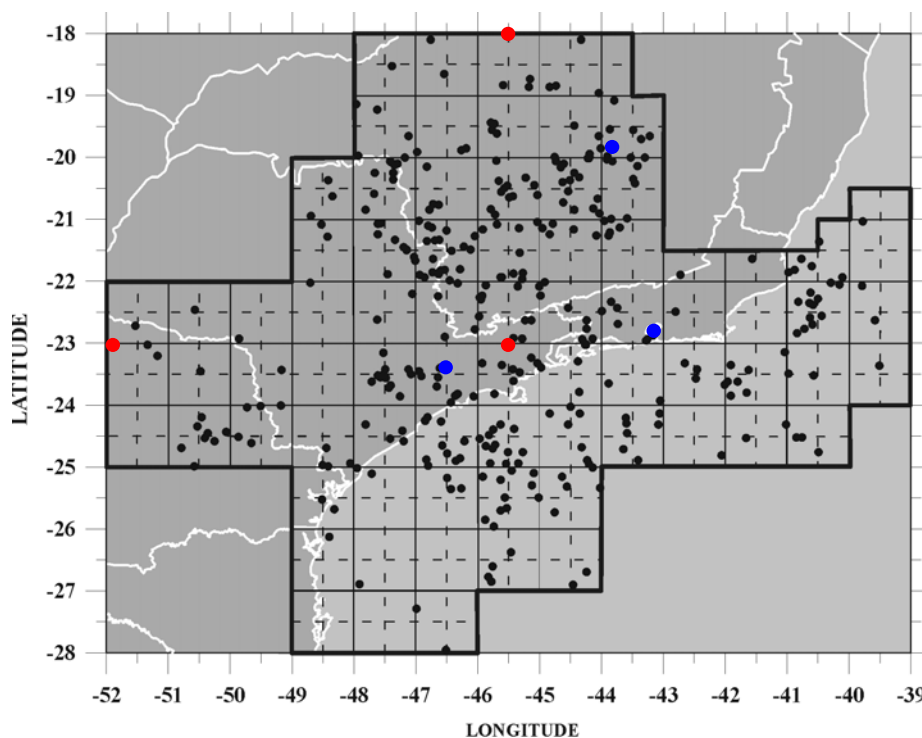


Figura 4 – Caracterización de la fuente sísmica en la región Sudeste, cubriendo las áreas con mayor nivel de actividad sísmica, para formar la Provincia Sismotectónica del Sudeste (PSS), mostrando las capitales en azul y puntos central y extremos en rojo, para los cuales fueron determinadas las curvas de peligro sísmico.

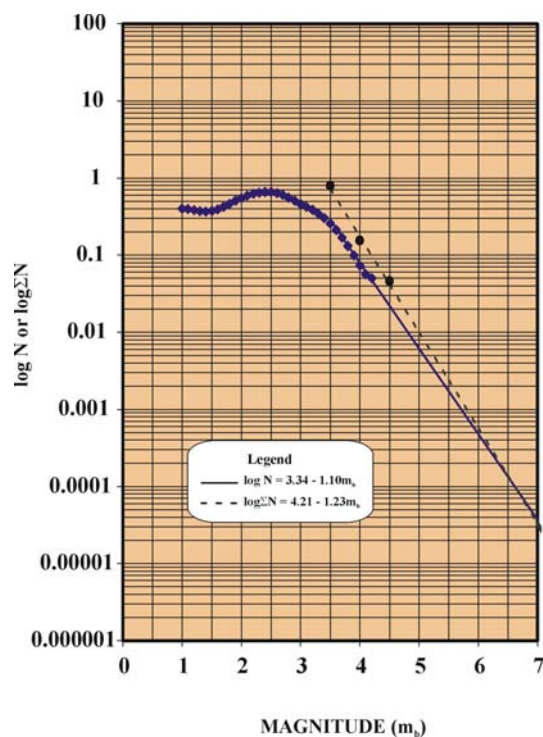


Figura 5 – Curvas frecuencia/magnitud de la PSS

Para determinar la función de recurrencia fueron calculadas las relaciones frecuencia/magnitud simple y acumulativa, como se muestra en la **Figura 5**. Para calcular la curva acumulativa fueron utilizados datos de sismos históricos y recientes, para la curva simple se utilizaron datos entre 1979 y 2003.

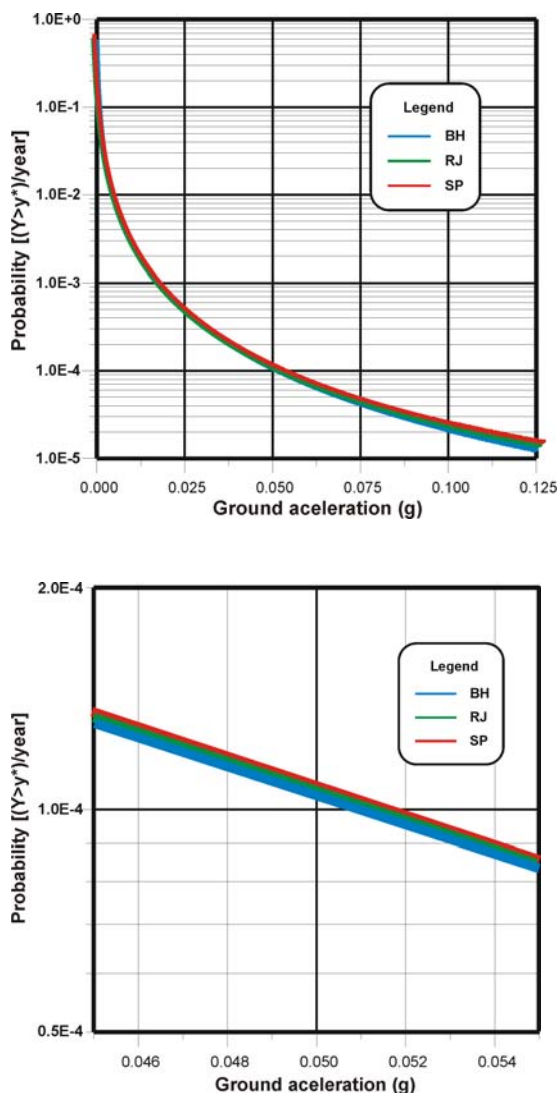


Figura 6 – Curvas de peligro sísmico para las tres capitales.

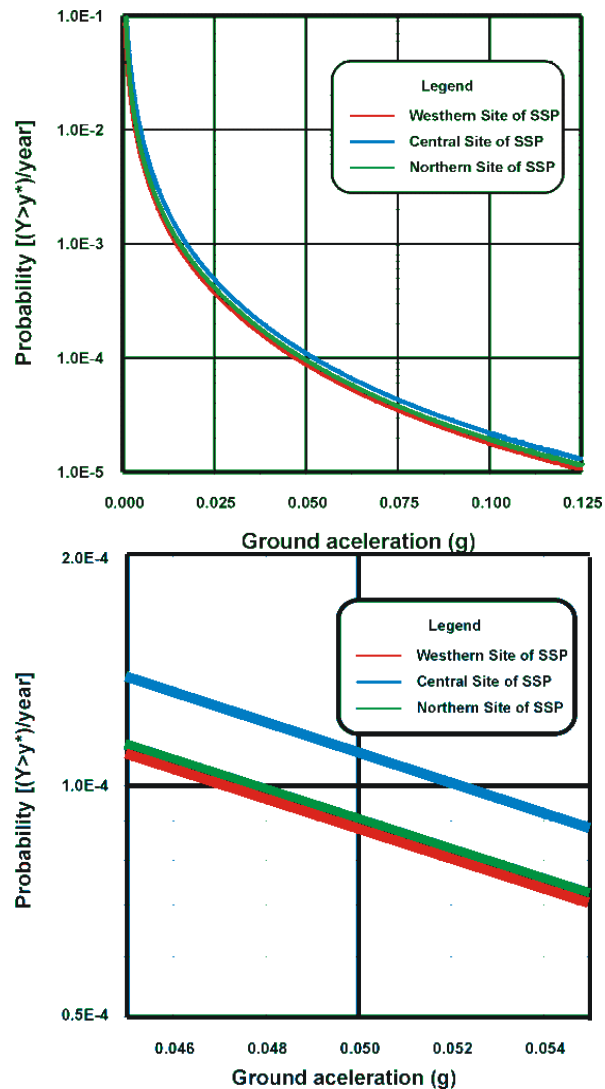


Figura 7 – Curvas de peligro sísmico para los tres puntos estudiados.

Los resultados arriba conseguidos por **Berrocal et al. (2008)** muestran que en las tres capitales la aceleración horizontal máxima esperada con una probabilidad de 10^{-4} años es en torno de 0.051g y que en los extremos de la PSS puede llegar a ser menor que 0.048g.

4. PROYECTOS SISMOLÓGICOS REGIONALES

En 1992 comenzaron a ser ejecutados los proyectos sismológicos regionales, utilizando redes de estaciones de banda ancha y en 1998 los proyectos geotectónicos en provincias tectónicas de carácter regional a través de levantamientos geofísicos (refracción sísmica profunda, métodos sismológicos con datos telesísmicos, estudios de sismicidad local, gravimetría,

magneto-telúrica y estudios geodésicos de precisión) y de levantamientos geológicos (tectónicos, geoquímicos, geocronológicos e neotectónicos).

4.1 El Proyecto Sísmico Brasileño de Estudio Litosféricos (Brazilian Lithospheric Seismic Project – BLSP)

En este proyecto participan el IAG/USP (Coordinador Marcelo Assumpção), IPT, UnB, UFRN, DTM/CIW (USA) y ETH (Suiza)

Estudios con el Método Función del Receptor (FR)

El método de Función del Receptor (ver **Figura 8**) está basado en la refracción de la onda P y su conversión en S, para definir la estructura de la corteza debajo de la estación receptora, por medio de la deconvolución de las señales.

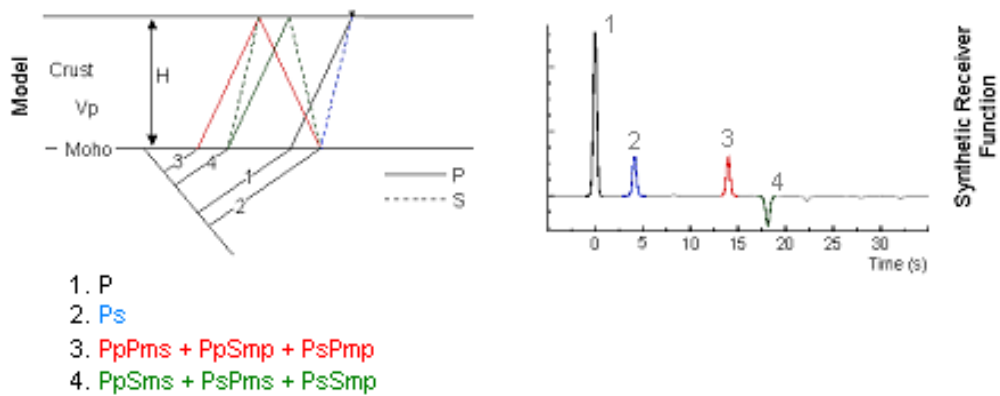


Figura 8 – Fundamentos del método de Función del Receptor

Utilizando el método de estaciones simples, para definir la corteza y el manto superior debajo de las estaciones individuales, incluyendo el “stacking” de las funciones de receptor, y la inversión conjunta de las funciones de receptor y de la dispersión de ondas superficiales. Ver ejemplos con el resultado de este método en la **Figura 9**.

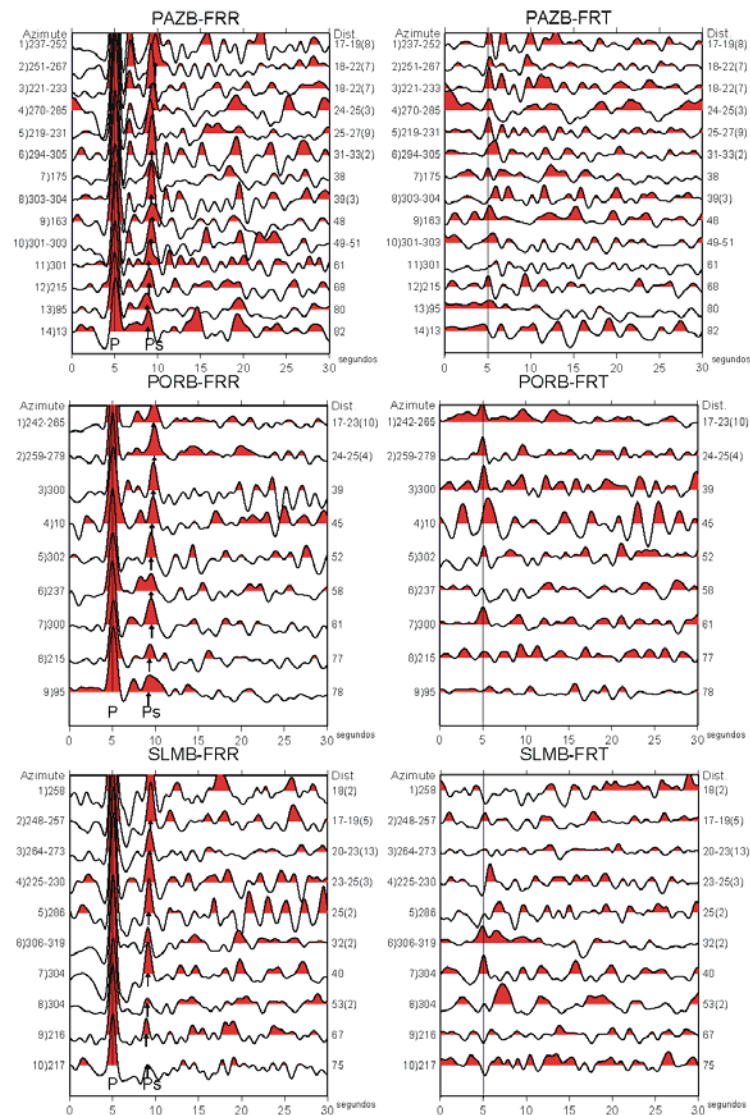


Figura 9 – Resultado de la aplicación del método FR en tres estaciones con datos de telesismos empillados por la distancia epicentral y el azimut. En la primera columna están los resultados de la función radial (FRR) y en la segunda la función transversal (FRT)

La aplicación del método FR en la región central del Brasil resultó en la determinación de la profundidad de la discontinuidad Moho en un área de carácter regional, como se observa en la **Figura 10**.

El Método de Tomografía Sísmica

Utilizando métodos basados en redes sismográficas para iluminar el manto superior debajo de la red de estaciones, esto incluye la tomografía por tiempos de tránsito diferenciados, a tomografía con ondas superficiales y la migración de funciones de receptor. En la **Figura 11** se presenta

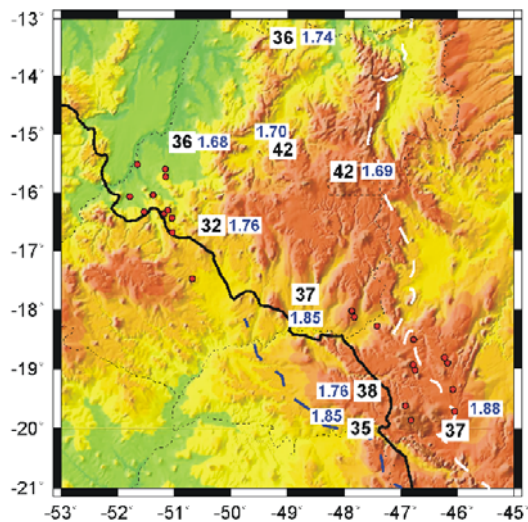


Figura 10 - Espesura de la corteza (en negro) y el valor de la razón V_p/V_s en la región central del Brasil, obtenidos con el método FR

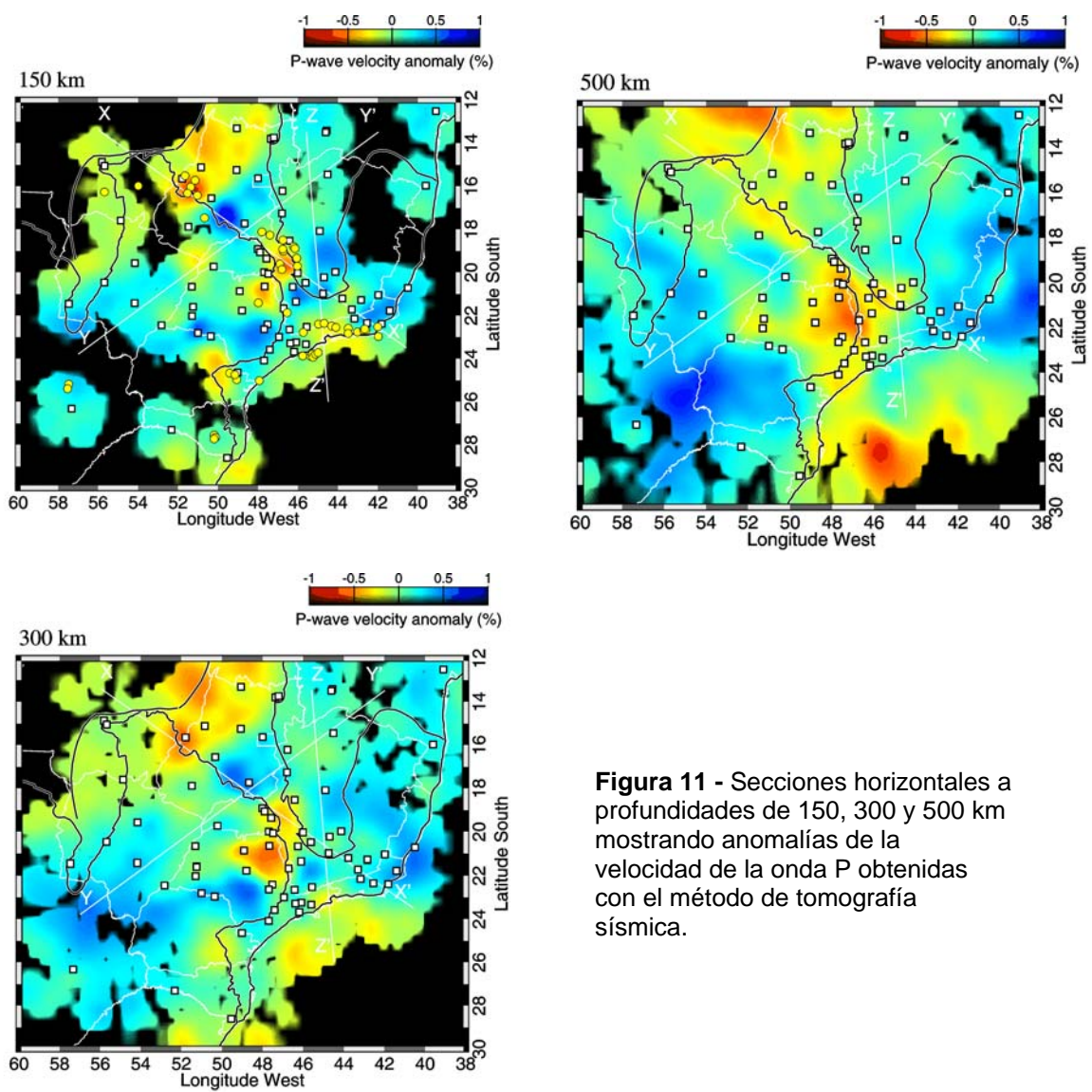


Figura 11 - Secciones horizontales a profundidades de 150, 300 y 500 km mostrando anomalías de la velocidad de la onda P obtenidas con el método de tomografía sísmica.

4.2 Estudios de Anisotropía Sísmica

Utilizando el método de separación de la polarización de la onda SKS, que también utiliza datos de estaciones individuales, para investigar las estructuras anisotrópicas debajo de las estaciones.

4.3 Proyectos Geotectónicos de Carácter Regional

Provincia Tectónica Tocantins

El primer proyecto geotectónico fue en la **Provincia Tectónica Tocantins**, localizada en la región Central del Brasil (ver **Figura 12**) que fue financiado por la FAPESP (*Fundação de Apoio a Pesquisa do Estado de Sao Paulo*) y contó con la colaboración de la *Stanford University* de los Estados Unidos y del USGS (*Menlo Park*) que prestaron los equipamientos necesarios para los experimentos de refracción sísmica (110 sismógrafos y sistemas de disparo automático).

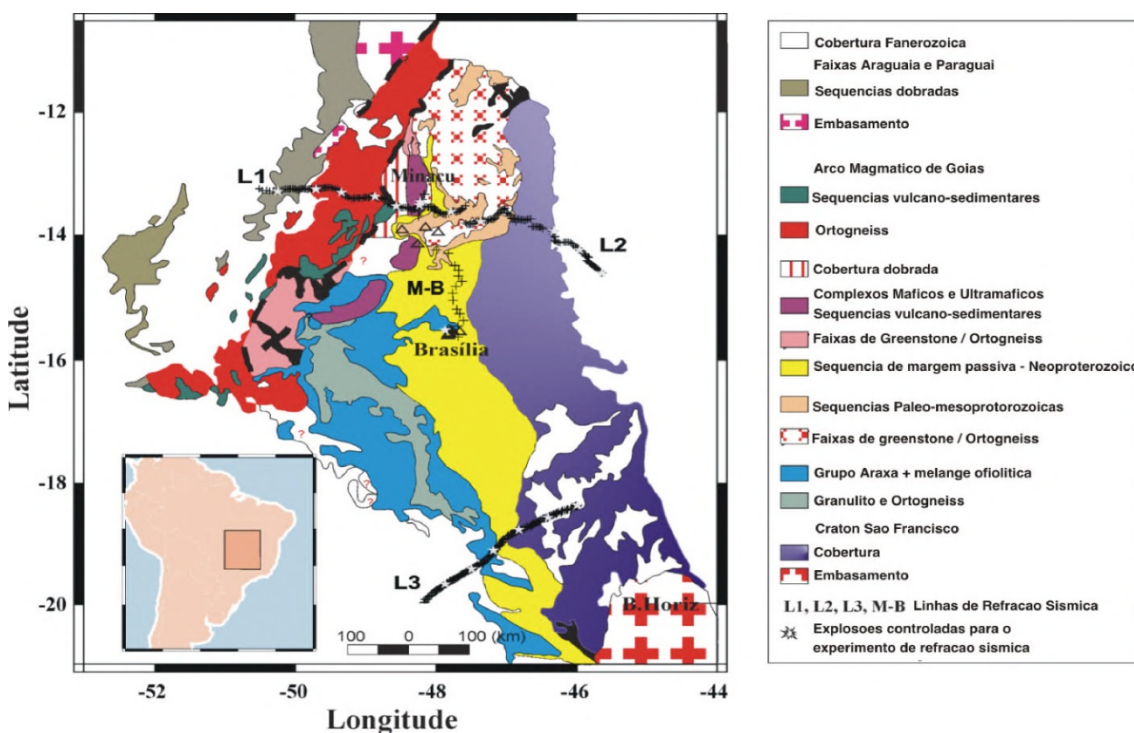


Figura 12 – Mapa de los sectores Central y Sudeste de la Provincia Sismotectónica de Tocantins, mostrando la localización de las líneas de refracción sísmica profunda (L1, L2 y L3)

Participación del IAG/USP (Coordinador J. Berrocal), UnB, Stanford University y USGS – Menlo Park (USA).

Fueron empleados el métodos de refracción sísmica profunda, con líneas de 300 km de extensión e 120 sismógrafos de periodo corto y explosiones cada 50 km (siete en cada línea) con cargas entre 500 y 1.000 kg, los métodos de función del receptor y tomografía sísmica utilizando nueve sismógrafos de banda ancha con datos de telesismos, levantamientos de la sísmicidad regional, estudios gravimétricos y geodésicos utilizando GPS de precisión.

Algunos de los resultados de los métodos sísmológicos utilizando sismógrafos de banda ancha están presentados en las **Figuras 9, 10 y 11**. Parte de los resultados del método de refracción sísmica profunda son presentados en las **Figuras 13, 14 y 15**.

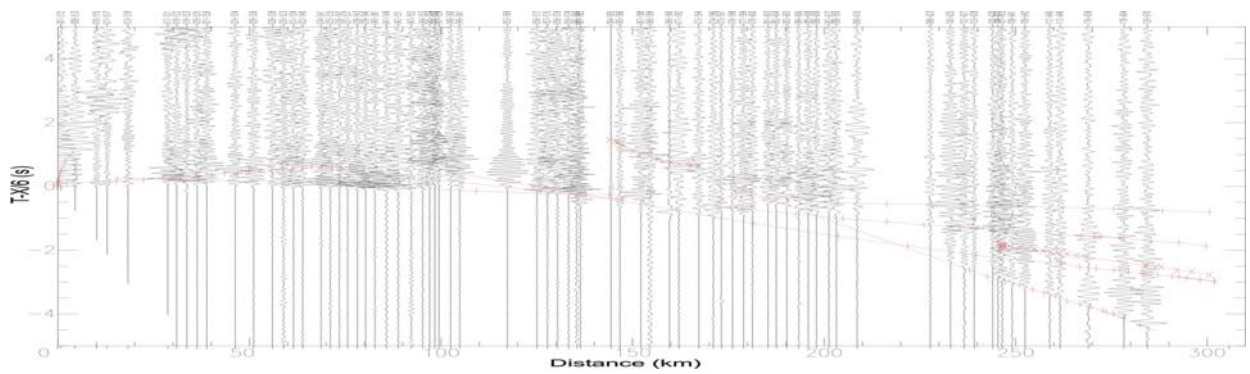


Figura 13 – Sección sísmica de tiempo reducido (velocidad de reducción 6.0 km/s) de la Línea L1 (Porangatu-GO), correspondiente al tiro Ex L1.1, mostrando la buena calidad de las señales de la onda P.

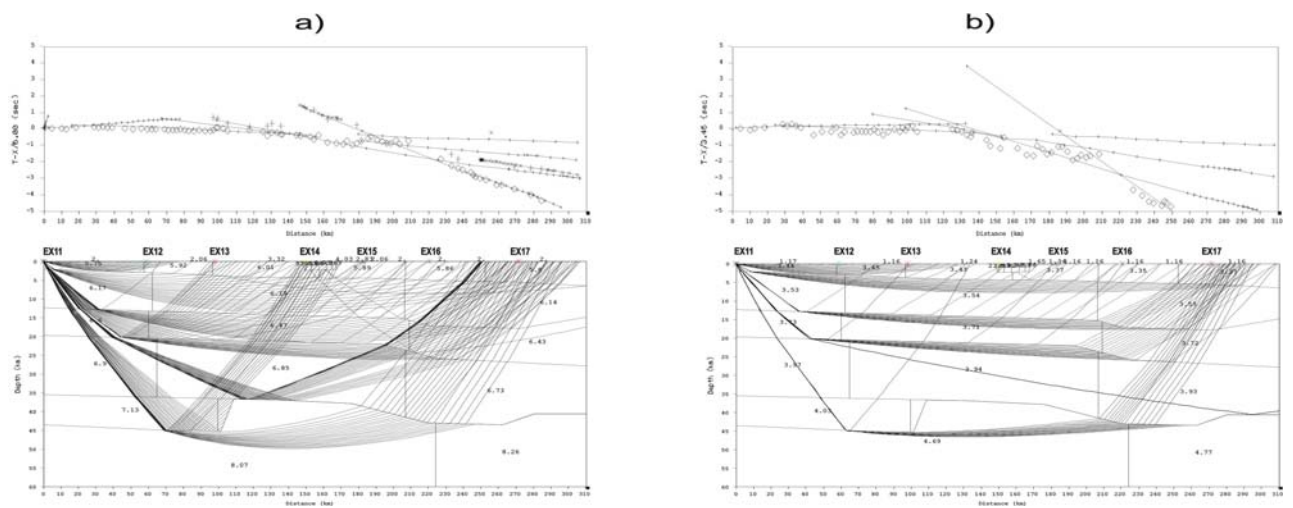


Figura 14 – Modelamiento de los rayos sísmicos utilizando el programa MacRay en (a) para la onda P y en (b) para la onda S, con datos del tiro de la Figura 13. En la parte superior se presenta la correlación entre el modelo y los tiempos observados.

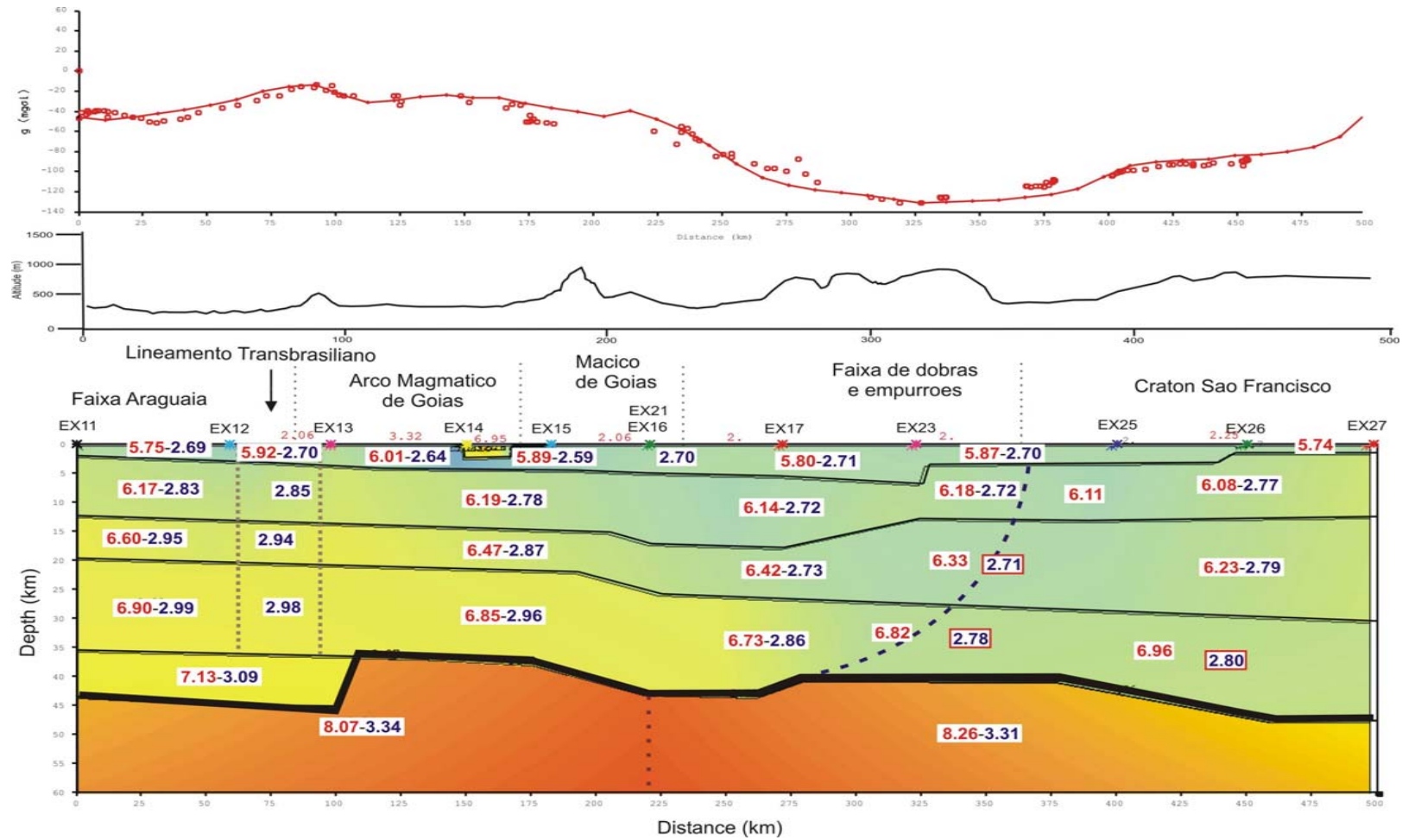


Figura 15 – En la porción inferior de esta figura se presenta el modelo de velocidades sísmicas final (V_p en rojo) debajo de las líneas L1 y L2 , juntamente con los valores de densidad, que permitieron elaborar un modelo gravimétrico, que es mostrado en la línea roja de la porción superior de la figura con las lecturas gravimétricas en la superficie. El trazo del centro es la topografía de la sección.

Provincia Tectónica Borborema

En mayo de 2005 fue presentada una propuesta al Programa Institutos del Milenio promovido por el Ministerio de Ciencia y Tecnología del Brasil y por CNPq, para ejecutar estudios geotectónicos en la Provincia Borborema. En octubre de ese año salió el resultado que aprobaron nuestro pedido con una verba inicial de R\$3.500.000 (US\$1.500.000). Fueron comprados 6 sismógrafos de banda larga, que están siendo instalados en Borborema, y un vehículo de campo.

Participan en este proyecto la el IG/UnB (Coordenado por Reinhardt Fuck), IAG/USP, UFRN, UFC, *Universidade de Campinas* (UNICAMP), *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais* (INPE), UNESP, ON/RJ y Petrobrás. Instituciones extranjeras son Cornell University, USGS (Menlo Park), Northwestern University, South Carolina University.

Como los pedidos efectuados al National Science Foundation efectuados en 2005 y 2006 no fueron aprobados por diferentes razones, el empréstito de los equipamientos para este proyecto por parte de PASSCAL se vió muy perjudicado. Por ese motivo y gracias a que en 2006 fue creada la Red de Estudios Geotectónicos en la Petrobrás, fue posible comprar 40 sismógrafos de banda larga (sismómetros STS-2 y digitalizadores Q330) y 405 sismógrafos de período corto (sensores L4-C y registradores Texan. Probablemente se consiga aumentar el número de sismógrafos de período corto con mas 800 unidades a través de un nuevo pedido que será hecho este año a NSF.

Los equipos de la Red de Estudios Geotectónicos ya fueron comprados, faltando unicamente que lleguen los sismómetros STS-2, que deben llegar hasta fines de este año de 2008.

En las Figuras 16 y 17 se presenta la localización de las estaciones sismográficas de banda ancha que forman la Rede Sismográfica de Borborema que funcionará entre 2009 y 2010, de la cual algunas ya se encuentran en operación, y las líneas de refracción sísmica profunda que se pretende levantar en el Proyecto Borborema, probablemente en inicios de 2009. Actualmente están siendo procesados los datos de esas estaciones de banda ancha que están en operación y también están siendo localizados los 400 puntos de cada una de las líneas refracción sísmica profunda de este proyecto.

Considerando el estado actual del conocimiento geológico sobre la Provincia Borborema, y considerando la complejidad y longevidad de su historia tectónica, ella ofrece oportunidad ideal para investigar su estructura crustal y de la litosfera, en tres dimensiones. Principalmente para estudiar las fuentes sismogénicas que existen en la región Nordeste, que es una de las de mas alto índice de actividad sísmica en el Brasil (ver **Figura 2**).

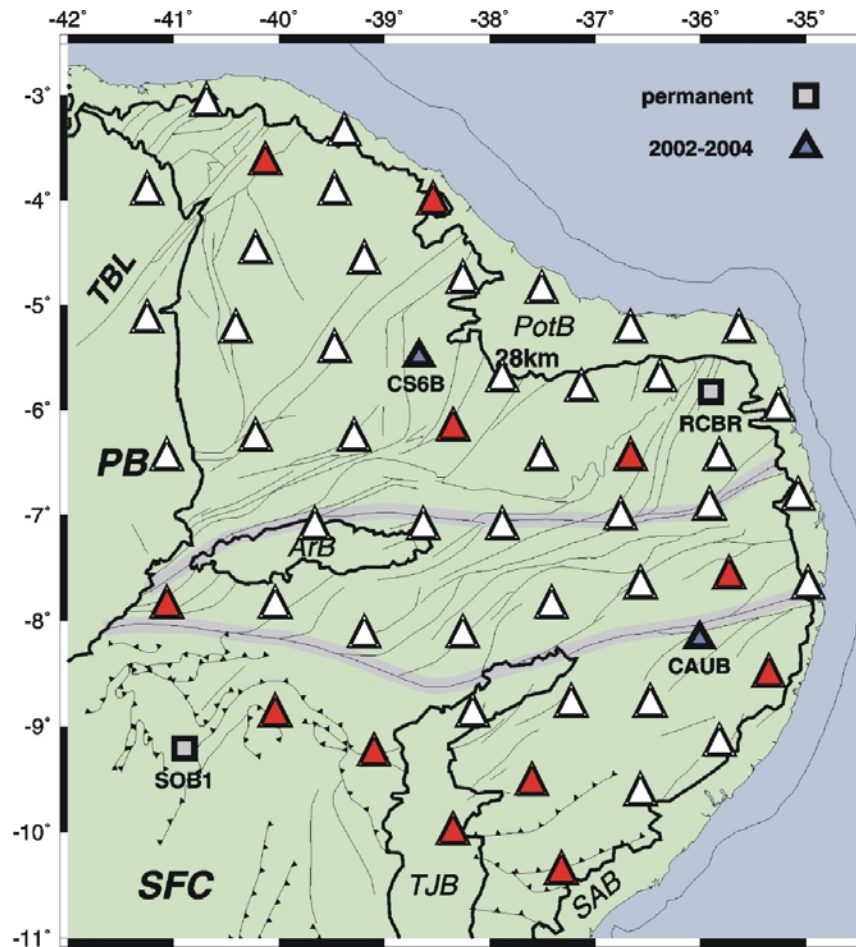


Figura 16 – Localización aproximada de la Red Sismográfica de Borborema. Los triángulos rojos son las estaciones en operación o que están siendo instaladas y los triángulos blancos son las 40 estaciones de la Red de Estudios Geotectónicos cuyos sensores llegarán en fines de este año. Observe la complejidad tectónica que existe en la Provincia Borborema. TBL es el Lineamiento Transbrasiliiano.

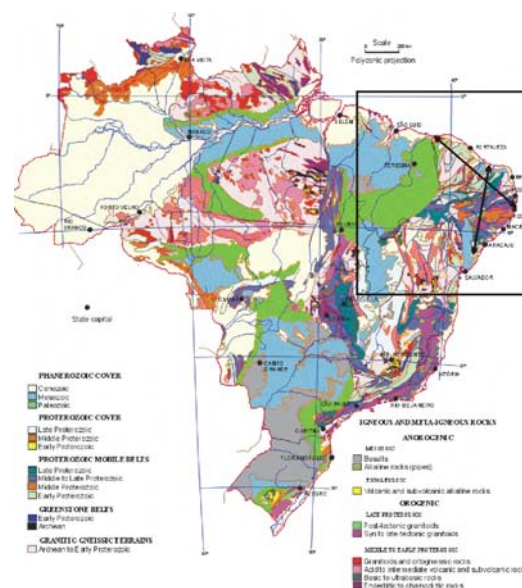


Figura 17(a) – Mapa geológico del Brasil y la localización de la Provincia Borborema

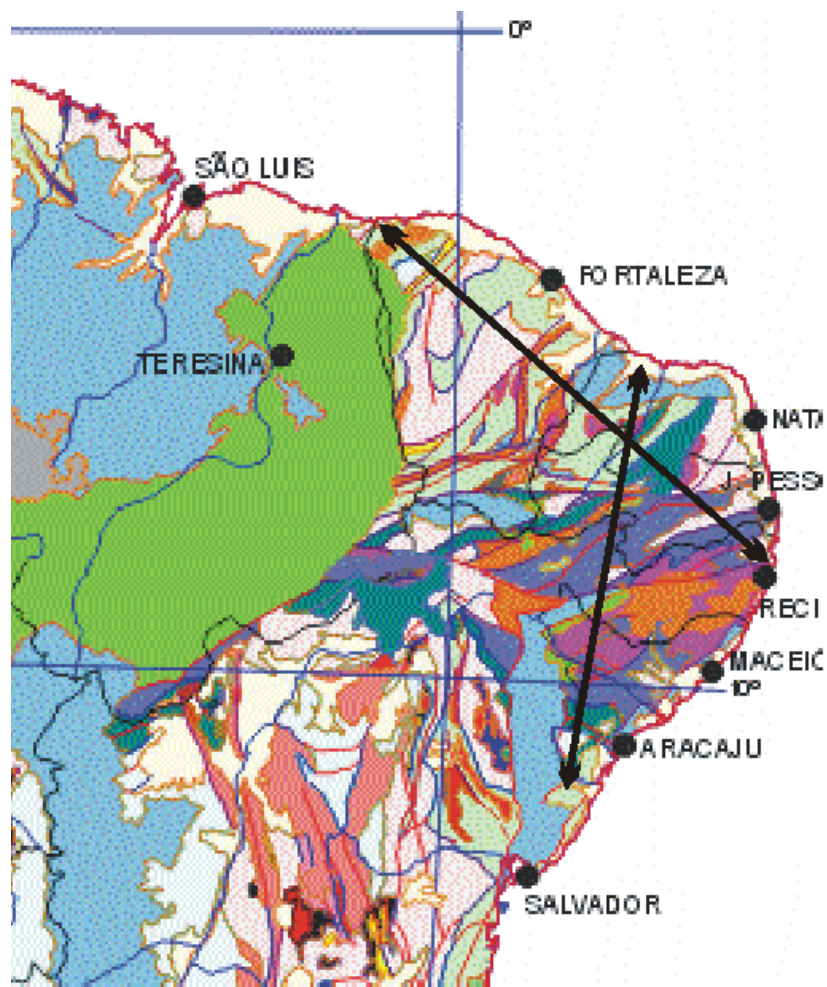


Figura 17(b) – Mapa geológico de la región Nordeste del Brasil, mostrando la posición de las líneas de refracción sísmica profunda que serán efectuadas en el Proyecto Borborema.

PROYECTOS FUTUROS

Continuación del Proyecto Borborema hasta 2010

Sismicidad y sismotectónica de la región sur del Perú (Protocolo de Intenciones entre IAG/USP y IG/UNSA) dentro del programa de CERESIS.

Red Sismográfica de las Cuencas de Campos, Santo y Espírito Santo (con Petrobras).

Implantación de la Red Sismográfica Nacional con 60 estaciones de banda ancha.

São Paulo, 27 de abril de 2008