



**INFORME DEL PROYECTO:
PRIMERA FASE DE LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA EN LAS
PRINCIPALES CIUDADES DE EL SALVADOR**



POR:

Erick Burgos Ganuza

Douglas Hernández

René Ayala Ayala

Carlos Pullinger

San Salvador, 27 de agosto de 2007

AGRADECIMIENTOS

Los autores quisieran agradecer de forma especial a los expertos japoneses por la capacitación, cooperación y soporte técnico brindados a lo largo de la ejecución de este proyecto. Particularmente se agradece al Dr. Hirohaki Yamanaka y Dr. Kentaro Motoki. Se agradece de forma especial al Dr. Walter Salazar porque sin su gestión este proyecto no hubiese sido posible. Al mismo tiempo se agradece a la Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA) por el soporte económico y cooperación brindada. Por último quisieramos agradecer al geólogo Walter Hernández por su colaboración y discusiones durante las visitas de campo.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-----|
| AGRADECIMIENTOS | i |
| ÍNDICE GENERAL | iii |
| LISTA DE TABLAS | v |
| LISTA DE FIGURAS | vii |
| CAPÍTULO 1 | |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. Antecedentes | 1 |
| 1.2. Estudios previos | 2 |
| 1.3. Objetivos | 5 |
| 1.3.1. Objetivo general | 5 |
| 1.3.2. Objetivos específicos | 5 |
| 1.4. Delimitación del estudio | 5 |
| 1.5. Metodologías de campo utilizadas y delimitación del área de estudio. | 8 |
| CAPÍTULO 2 | |
| SISMICIDAD | 13 |
| CAPÍTULO 3 | |
| GEOLOGÍA DEL AMSS | 17 |
| CAPÍTULO 4 | |
| EXPLORACIÓN GEOFÍSICA | 21 |
| 4.1. Introducción | 21 |
| 4.2. Métodos de exploración utilizados | 22 |
| 4.2.1. Arreglos | 22 |
| 4.2.2. Refracción sísmica | 25 |
| 4.2.3. Microtrepidaciones | 27 |
| CAPÍTULO 5 | |
| RESPUESTA DE CAPAS SUPERFICIALES DE SUELO | 31 |
| 5.1. Introducción | 31 |
| 5.2. Arreglos | 32 |
| 5.2.1. Procesamiento de registros | 32 |
| 5.2.2. Resultados obtenidos | 33 |
| 5.2.3. Interpretación de resultados | 33 |
| 5.3. Refracción sísmica | 36 |

| | |
|---|----|
| 5.3.1. Procesamiento de registros | 40 |
| 5.3.2. Resultados obtenidos | 42 |
| 5.4. Microtrepidaciones | 42 |
| 5.4.1. Procesamiento de registros | 43 |
| 5.4.2. Resultados obtenidos | 44 |
| 5.4.3. Efectos de sitio basados en la observación de movimiento fuerte | 49 |
| CAPÍTULO 6 | |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 55 |
| 6.1. Conclusiones | 55 |
| 6.2. Recomendaciones | 56 |
| REFERENCIAS | 59 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabla 1.1 | Ubicación de estaciones acelerográficas. | 7 |
| Tabla 1.2 | Sitios en donde se han realizado toma de datos desde el inicio del proyecto. | 10 |
| Tabla 2.1 | Sismos destructores en El Salvador durante el siglo XX y XXI. Fuente Benito (2005) y base de datos SNET. | 15 |
| Tabla 2.2 | Aceleraciones máximas registradas para el sismo del 10/10/86. [Atakan y Torres, 1993]. | 16 |
| Tabla 5.1 | Sitios en donde se realizó sísmica de refracción. | 38 |
| Tabla 5.2 | Períodos predominante en cada estación. | 49 |
| Tabla 5.3 | Terremotos utilizados en el método de Borchardt (1970). | 54 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|-------------|---|----|
| Figura 1.1 | Ubicación de estaciones acelerográficas. (SNET, 2004). | 6 |
| Figura 2.1 | Mapa tectónico Regional de Centroamérica. (Modificado de Benito, 2005). | 13 |
| Figura 3.1 | Geología del Área Metropolitana de San Salvador (modificado de Wiesemann, 1975). | 18 |
| Figura 4.1 | Gráfica de SPAC vrs. Frecuencia del parqueo de biblioteca de la UCA. | 23 |
| Figura 4.2 | Gráfico de Velocidad de fase vrs Frecuencia del parqueo de biblioteca de la UCA. | 24 |
| Figura 4.3 | Modelo de capas. | 24 |
| Figura 4.4 | Distribución geométrica de los sensores en un arreglo típico. | 25 |
| Figura 4.5 | Formas de onda a su arribo al sensor. | 26 |
| Figura 4.6 | Curvas de Tiempo de viaje vrs Distancia. | 26 |
| Figura 4.7 | Modelo de estructura de capa superficial. | 27 |
| Figura 4.8 | Arreglo lineal para refracción. | 28 |
| Figura 4.9 | Numeración de sensores para ondas generadas en ambos extremos. | 28 |
| Figura 4.10 | Relaciones espectrales obtenidas por el método de Nakamura (1989). | 29 |
| Figura 5.1 | Velocidades de fase y SPAC para distintas estaciones Acelerográficas. | 34 |
| Figura 5.2 | Perfiles de velocidades de ondas de corte por estación. | 35 |
| Figura 5.3 | Prueba sísmica de refracción en Externado de San José (Fotos: Douglas Hernández). | 37 |
| Figura 5.4 | Sísmica de refracción medida en parqueo UCA (frente a edificio ICAS) en julio de 2006. | 38 |
| Figura 5.5 | Sísmica de refracción medida en cancha de football CENREN en julio de 2006. | 39 |
| Figura 5.6 | Curvas de tiempo de viaje de ondas de corte obtenidas de la sísmica de refracción en CENREN en julio de 2006. | 39 |
| Figura 5.7 | Perfil de velocidad de onda de corte obtenido de la sísmica de refracción en CENREN en julio de 2006. | 40 |
| Figura 5.8 | Sísmica de refracción en parqueo de Feria Internacional. | 41 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 5.9 | Sísmica de refracción en Externado de San José. | 41 |
| Figura 5.10 | Sísmica de refracción en Hogar del Niño. | 42 |
| Figura 5.11 | Traza de una señal de microtrepidaciones y relación H/V para la estación UCA. | 44 |
| Figura 5.12 | Señales “aceptables” de microtrepidaciones con su correspondiente relación espectral H/V . | 45 |
| Figura 5.13 | Señales “no aceptables” de microtrepidaciones con su correspondiente relación espectral H/V . | 46 |
| Figura 5.14 | Función de transferencia para diferentes sitios obtenidos utilizando el método de Nakamura (1989). | 47 |
| Figura 5.15 | Espectros de amplificación de sitio obtenidos utilizando el Método de Inversión Híbrida (Modificada de Salazar, 2004). | 50 |
| Figura 5.16 | Espesores de tierra blanca en el Área Metropolitana de San Salvador (Modificado de Schmidt-Thomé, 1975). | 52 |
| Figura 5.17 | Función de transferencia para diferentes sitios obtenidos utilizando el método de Borcherdt (1970). | 54 |

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes.

Luego de los terremotos del 2001 la capacidad instrumental del SNET para el monitoreo sísmico fue ampliada y mejorada significativamente por medio de la instalación de equipos obtenidos a través de donaciones por diferentes agencias de cooperación internacional, entre ellas: JICA, USAID, IDB, WB, SIDA y AECI. Asimismo, colaboraciones con instituciones nacionales como UCA, LaGeo y CEL que tienen experiencia, recursos y capacidades en el monitoreo sísmico, han permitido el intercambio de información y eficiencia en la utilización de los recursos.

En el período 2001-2003 el SNET ha estado en un proceso de instalación de equipo nuevo y elaborando investigaciones en sismología e ingeniería sísmica en conjunto con la UCA por medio de los cuales se ha logrado compartir información, datos y recursos orientados a reducir el riesgo sísmico en El Salvador.

Adicionalmente, durante la visita del Profesor Kazuoh Seo del Instituto Tecnológico de Tokio en la primera semana de abril de 2004, así como en el seminario del 16-20 junio de 2003 organizado por la Asociación Salvadoreña de Ingenieros y Arquitectos (ASIA), la UCA y la Universidad de Karlsruhe de Alemania, se identificó como una necesidad principal en materia de reducción de riesgo llevar a cabo la microzonificación en las principales ciudades de El Salvador.

La evaluación de la microzonificación en las principales ciudades de El Salvador es en sí misma la combinación de una serie de estudios orientados al conocimiento de

otros elementos de peligrosidad sísmica asociados al movimiento fuerte del terreno durante un terremoto. Entre ellos se pueden citar: evaluación de la amplificación del terreno causado por la respuesta de los estratos superficiales, amplificación por efectos topográficos, licuefacción, estabilidad de taludes, vulcanismo, entre otros.

La relevancia de este estudio radica en el establecimiento de una técnica de medición que permita evaluar con cierto nivel de confiabilidad la amplificación del movimiento fuerte del terreno causado por los estratos superficiales, de manera que en etapas posteriores pueda ser aplicable de forma sistemática en lugares específicos, permitiendo obtener parámetros útiles para los futuros planes de desarrollo y ordenamiento territorial y/o revisión de las normas de construcción vigentes.

En vista de lo anterior, la UCA y SNET plantearon a la Agencia Internacional de Cooperación del Japón (JICA), a finales de 2004, la propuesta de proyecto denominada: “Primera Fase de la Microzonificación Sísmica en las Principales Ciudades de El Salvador”, solicitando la adquisición de equipo de fabricación japonesa así como la capacitación por parte de expertos del Japón en lo concerniente al procesamiento de la información que se colectare durante las campañas de campo. Esta etapa se llevó a cabo durante el primer semestre del 2006.

Desde julio de 2006 hasta la fecha, el personal de UCA y SNET se han encargado de la recolección de datos y del análisis de los mismos.

1.2. Estudios Previos.

En años previos se han realizado una serie de estudios de amenaza sísmica basándose en ambos, las características del movimiento fuerte así como de las condiciones geológicas superficiales propias de la zona en estudio. A continuación se presenta una breve reseña de los estudios de microzonificación sísmica

realizados en Área Metropolitana de San Salvador (AMSS). Para más detalle ver Bommer et. al. (1998).

El primer trabajo de zonificación sísmica del AMSS fue elaborado por Schimidt-Thomé (1975) el cual fue desarrollado como parte del metro plan 80 para el desarrollo y planificación de la ciudad. El estudio fundamentalmente identifica las formaciones geológicas y fallas, espesor de tierra blanca, distribución de corrientes de lava y de roca dura en la región y aspectos hidrogeológicos.

Martínez (1979) considera a parte de aspectos geológicos y sistemas de fallas, los valores de aceleración del terreno en relación al tipo de suelo, presentando mapas de curvas de isoaceleración. Esta microzonificación tiene validez únicamente para terremotos de campo lejano, no así para eventos locales, ya que se utilizaron datos de un terremoto a larga distancia.

Linares (1985) presenta una propuesta de microzonificación sísmica para el AMSS basada en la observación de microtemblores, espectros de respuesta y registros de sismoscopios auxiliándose de una red instalada en el área. Los resultados se presentan en un mapa con seis zonas con factores de amplificación del suelo que van desde 1.0 a 3.0 en intervalos de 0.5.

El estudio realiado por la empresa Consorios Italiano Fiaccioli y otros (1998) fue desarrollado dentro de un programa de asistencia técnica y social como una cooperación del gobierno italiano al gobierno de El Salvador. En este informe se determinaron las propiedades dinámicas de suelos mediante pruebas *in situ* y de laboratorio y mapas de microzonificación sísmicas basados en el análisis de la respuesta sísmica del movimiento fuerte del terremoto del 10 de octubre de 1986. El estudio presenta un mapa que identifica las zonas de tierra blanca joven y las zonas de relleno recientes, correlacionó y ordenó cerca de 600 perforaciones las cuales no excedían a 12 m de profundidad en los cuales se destaca la lava superficial que no implica un lecho rocoso ya que el suelo puede estar constituido

por sucesiones de lava y material piroclástico; también se presenta un mapa basado en 26 perforaciones profundas para extracción de agua de entre 100 y 210 m de profundidad.

El estudio de Invarsson y Johansson (1996) tuvo como objetivo determinar las frecuencias fundamentales y los factores de amplificación del subsuelo en el AMSS, utilizando para ello mediciones de microtemblores y el método de Nakamura (1989); se hicieron mediciones en 94 puntos de la ciudad los cuales se compararon con los resultados obtenidos del análisis de registros de movimiento fuerte del terremoto del 10 de octubre de 1986, encontrándose grandes discrepancias.

Aguilar (1990) realizó una microzonificación basada en mapas de las características geológicas para el AMSS, estableciendo las propiedades mecánicas con pruebas de penetración estandar (SPT) y las propiedades dinámicas correlacionando el número de golpes de las pruebas con los ensayos de refracción.

En el trabajo de Guzmán y otros (1996) se desarrolla una investigación geotécnica de estudios previos y pruebas en muestras extraídas en estratos superficiales en distintos puntos de San Salvador para los cuales se estudiaron las propiedades dinámicas a partir del ensayo del péndulo de torsión libre. Presentan sus resultados en un mapa de curvas de isoperíodos que oscilan de 0.1 a 1.2 segundos para el AMSS.

Por último se puede mencionar el trabajo realizado por Reyes y Sorto (2007) en el cual realizaron una microzonificación de la ciudad de Santa Tecla (hoy parte del AMSS) basándose en registros de microtrepidaciones y el método de Nakamura.

1.3. Objetivos.

1.3.1. Objetivo general.

Reducir el riesgo sísmico en El Salvador y sus principales ciudades por medio de la generación de conocimiento del comportamiento del terreno ante el fenómeno sísmico.

1.3.2. Objetivos específicos.

- Medición de microtrepidación en sitios específicos.
- Validación de la información recolectada a través de las campañas de microtrepidación con información de registros acelerográficos de terremotos pasados o datos de ondas de corte existentes.
- Validación de la información de estudios previos realizados para la microzonificación del AMSS.
- Transferencia de tecnología para los participantes locales, con el objeto que esta actividad sea reproducible en otros sitios del país.
- Elaboración de una propuesta de proyecto para la evaluación de la amplificación del terreno en el AMSS y principales ciudades de El Salvador.

1.4. Delimitación del Estudio.

Como punto de inicio para la evaluación de la peligrosidad sísmica, se definió estudiar el fenómeno de la amplificación por la respuesta de los estratos superficiales debido a los movimientos fuertes del terreno, tratando de validar una metodología de microtrepidación que permitiera identificar las áreas geográficas donde la metodología podrá aplicarse e identificar metodologías alternativas para las áreas donde los resultados de la investigación indiquen que la microtrepidación no es adecuada para medir la amplificación del terreno.

Inicialmente, la propuesta de proyecto planteó realizar mediciones de microtrepidación en las estaciones acelerográficas a nivel nacional que tanto UCA,

SNET, LaGeo y CEL poseen (Ver Tabla 1.1 y Figura 1.1). Cabe mencionar que las microtrepidaciones deberían realizarse durante todo el día, para poder corroborar si la amplitud y el pico máximo de los espectros son estables.

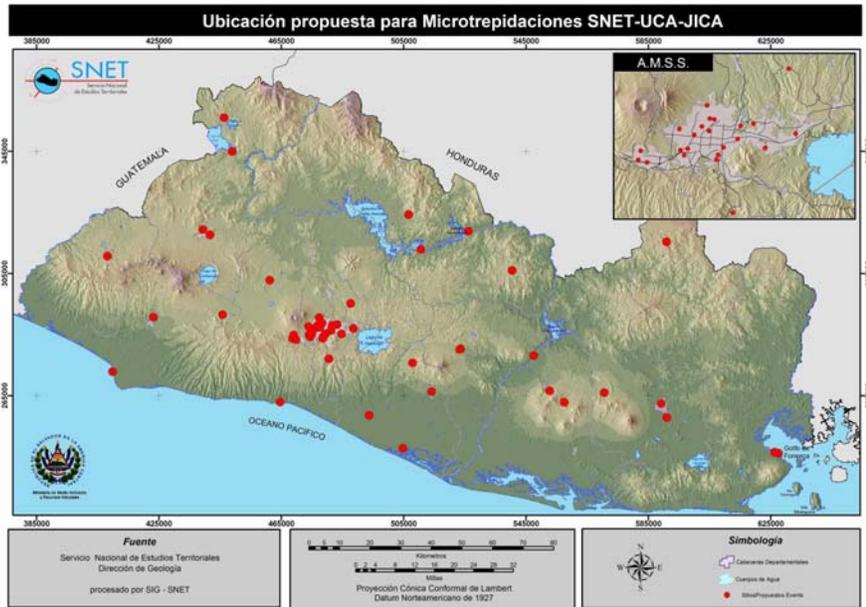


Figura 1.1. Ubicación de estaciones acelerográficas (SNET, 2004).

Asimismo, lo anterior se complementaría con las mediciones de los arreglos verticales de microtemblores y de refracción sísmica en algunos puntos clave tales como la estación de referencia (Panchimalco), porque al existir un sedimento de poca profundidad, las funciones de amplificación obtenidas por el método de inversión híbrida de Salazar (2004) podrían corregirse poniendo como restricción el efecto de sitio en esta estación.

En los casos donde no existe coincidencia entre las funciones de transferencia obtenidas utilizando registros de movimientos fuertes, perfiles de suelo y microtrepidaciones, el estudio debería considerar metodologías alternativas para completar el objetivo final de este proyecto.

Tabla1.1. Ubicación de estaciones acelerográficas.

| Estación | Código | Latitud (°) | Longitud (°) |
|--|---------------|--------------------|---------------------|
| Santiago de María | SM | 13.484917 | -88.468414 |
| Presa 15 de Septiembre | QC | 13.623020 | -88.560870 |
| San Miguel (Gobernación) | MG | 13.480317 | -88.176025 |
| Sensuntepeque (Parroquia Santa Bárbara) | SE | 13.874930 | -88.625960 |
| Observatorio Sismológico | OB | 13.679555 | -89.196425 |
| Ciudadela Don Bosco | DB | 13.715171 | -89.154999 |
| Seminario San José de la Montaña (Superficie de pozo) | SS | 13.702530 | -89.224050 |
| Ministerio de Relaciones Exteriores (Superficie de Pozo) | RS | 13.685030 | -89.240170 |
| Viveros de DUA (Superficie de Pozo) | VS | 13.736134 | -89.209061 |
| Puerto de Cutuco | CU | 13.332414 | -87.822625 |
| Santa Tecla (Iglesia de Concepción) | ST | 13.673868 | -89.289241 |
| Puerto de Acajutla (Edificio Administrativo) | CA | 13.574884 | -89.833633 |
| Santa Ana (Casa Parroquial, El Calvario) | SA | 13.995719 | -89.561319 |
| Ahuachapán (Salida hacia Tacuba, después de 1996) | AH | 13.916472 | -89.850117 |
| Metapán (CESSA) | CM | 14.326810 | -89.497950 |
| Centro de Investigaciones Geotécnicas | CI | 13.698000 | -89.173330 |
| Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas” (Biblioteca) | UC | 13.679136 | -89.235815 |
| Chalatenango (Parroquia) | CHLT | 14.040850 | -88.938560 |
| Aeropuerto Internacional El Salvador (Terminal de pasajeros) | AS | 13.446853 | -89.057872 |
| Instituto Geográfico Nacional (Superficie de Pozo) | IS | 13.712763 | -89.169863 |
| San Vicente (Seminario Pío XII, después de 1996) | SV | 13.643797 | -88.781908 |
| CENREN (Superficie de Pozo) | CS | 13.687629 | -89.141584 |
| Hotel Camino Real | HCR | 13.712000 | -89.215000 |
| Hotel Sheraton | HSR | 13.709170 | -89.241300 |
| Instituto de Vivienda Urbana | IV | 13.721000 | -89.206000 |
| Hogar del Niño | HND | 13.688190 | -89.190010 |
| Asociación Cafetalera de Chinameca | CHIN | 13.513400 | -88.347690 |
| Unidad de Salud La Herradura | HERR | 13.349460 | -88.956340 |
| Universidad de El Salvador San Miguel | SMIG | 13.438990 | -88.158940 |
| AGAPE Sonsonate | SONS | 13.736202 | -89.710251 |
| Unidad de Salud de Perquín | PERQ | 13.958856 | -88.157982 |
| Servicio Nacional de Estudios Territoriales | SNET | 13.686833 | -89.231500 |
| Universidad de El Salvador San Salvador | UESS | 13.719964 | -89.200539 |
| Base Naval La Unión | LUNA | 13.335250 | -87.834419 |
| Ministerio de Agricultura y Ganadería Santa Tecla | MAGT | 13.684249 | -89.286446 |
| Universidad Católica de Occidente Santa Ana | UNCO | 13.980000 | -89.540000 |

Tabla1.1. Ubicación de estaciones acelerográficas (cont).

| Estación | Código | Latitud (°) | Longitud (°) |
|--|---------------|--------------------|---------------------|
| Parque Saburo Iraho San Jacinto | SJAC | 13.674410 | -89.198080 |
| Casa de Máquina Presa 5 de Noviembre | PNOV | 13.991000 | -88.758000 |
| Campo Experimental de la UCA | CEUC | 13.846140 | -89.358680 |
| Guajoyo | GUAJ | 14.227000 | -89.473000 |
| Cerrón Grande | CEGD | 13.938000 | -88.902000 |
| Campo Geotérmico de Berlín | CBER | 13.519000 | -88.513000 |
| Unidad de Salud de Armenia | UARM | 13.744000 | -89.501000 |
| Unidad de Salud de San Bartolo | CSBR | 13.704000 | -89.106000 |
| Externado de San José | ESJO | 13.707000 | -89.207000 |
| Unidad de Salud de La Libertad | ULLB | 13.486000 | -89.327000 |
| Unidad de Salud de San Pedro Nonualco | USPN | 13.602000 | -88.927000 |
| Unidad de Salud de Panchimalco | UPAN | 13.614000 | -89.179000 |
| Hospital San Rafael | HSRF | 13.671000 | -89.279000 |
| Unidad de Salud de Tonacatepeque | UTON | 13.778000 | -89.114000 |
| Hospital Santa Gertrudis (San Vicente) | HSGT | 13.642000 | -88.784000 |
| Hospital Santa Teresa (Zacatecoluca) | HSTR | 13.517000 | -88.869000 |

1.5. Metodologías de campo utilizadas y delimitación del Área de estudio.

Las campañas de medición iniciaron formalmente el 21 de agosto de 2006 en el parqueo de la Feria Internacional de El Salvador, aproximadamente un mes después de la capacitación impartida por los expertos japoneses. Durante las primeras jornadas de medición (en el parqueo de la feria, Externado de San José, Hogar del Niño, parque Saburo Hiraó, entre otros) se identificaron inconvenientes relacionados con la calidad de

los datos de microtrepidación, arreglos verticales y sísmica de refracción, referidos al efecto del tráfico vehicular, ruido eléctrico, etc. en los mismos. De igual forma, el equipo de trabajo conformado al inicio del proyecto no se mantuvo constante por la salida de uno de sus integrantes.

En vista de lo anterior, fue necesario replantear la metodología de trabajo, con el objeto de dar cumplimiento a los tiempos estipulados. En este contexto, y de común acuerdo entre las partes técnicas involucradas (UCA y SNET), se definió delimitar

la metodología de trabajo realizando mediciones de microtrepidaciones en los lugares en donde se tienen registros de movimiento fuerte, información geotécnica y/o información geofísica de referencia, dentro del Área Metropolitana de San Salvador.

En la tabla 2 se muestran los sitios en donde se ha realizado la toma de datos desde el inicio del proyecto hasta la fecha.

Tabla 1.2. Sitios en donde se han realizado toma de datos desde el inicio del proyecto.

| Lugar | Código | Latitud (°) | Longitud (°) | Fecha del visita | Hora de ensayo | Sísmica de refracción | Arreglos | Microtrepidación | Registro de movimiento fuerte | Consideraciones particulares del sitio |
|---------------------------------------|--------|-------------|--------------|------------------|----------------|-----------------------|----------|------------------|-------------------------------|---|
| Casa Presidencial | CPR | 13.685984 | -89.240171 | 08/01/2007 | 11:13 | | X | X | X | Tráfico de la calle a Santa Tecla a unos 50 mts. La prueba de microtrepidación se realizó al lado del pozo. |
| Centro de Investigaciones Geotécnicas | CIG | 13.698759 | -89.173303 | 09/05/2007 | 9:45 | | | X | X | Prueba realizada sobre base de concreto. |
| Hospital de San Bartolo | CSBR | 13.704451 | -89.105982 | 15/02/2007 | 9:39 | | | X | X | Se realizó al lado del acelerógrafo. Se observó ruido eléctrico en registro. |
| Hospital de San Bartolo | CSBR | 13.704451 | -89.105982 | 18/05/2007 | 13:58 | | | X | X | Se realizó al lado del acelerógrafo. Se observó ruido eléctrico en registro. |
| Viveros de DUA | VDU | 13.738326 | -89.209481 | 09/05/2007 | 11:55 | | | X | X | La prueba se llevó a cabo al lado del pozo de observación sísmológica |
| Externado de San José-Cancha football | ESJO | 13.706762 | -89.205268 | 27/08/2006 | 13:51 | X | X | X | X | El sensor 7 no registro adecuamente. Probable relleno |
| Externado de San José-Parqueo | ESJO | 13.706691 | -89.206968 | 13/01/2007 | 17:22 | | X | X | X | Frente a Edificio Administrativo |
| Parqueo Feria Internacional | FINT | 13.686215 | -89.238055 | 21/08/2006 | 15:47 | X | X | X | | Tráfico de la calle a Santa Tecla a unos 30 mts. |
| Hogar del Niño-losa de concreto | HDN | 13.687268 | -89.18648 | 25/09/2006 | 12:12 | X | X | X | | Aires acondicionados funcionando a unos 3 mts. |
| Hogar del Niño-cancha BKB | HDN | 13.687865 | -89.187546 | 18/05/2007 | 11:24 | | | X | | La prueba se realizó en cancha de BKB |
| Iglesia Concepción | ST | 13.674789 | -89.289725 | 08/06/2007 | 14:27 | | | X | X | La prueba se realizó en el área de parqueo |
| Unidad de Salud Panchimalco | UPAN | 13.613202 | -89.178478 | 26/08/2006 | 12:10 | | X | X | X | La prueba se realizó en la calle adjunta a la unidad de salud. Existe un muro del lado de la unidad de salud. |
| Unidad de Salud Panchimalco | UPAN | 13.613202 | -89.178478 | 10/02/2007 | 10:59 | | X | X | X | La prueba se realizó en la calle adjunta a la unidad de salud. Existe un muro del lado de la unidad de salud. |

Tabla 1.2. Sitios en donde se han realizado toma de datos desde el inicio del proyecto (cont).

| Lugar | Código | Latitud (°) | Longitud (°) | Fecha del visita | Hora de ensayo | Sísmica de refracción | Arreglos | Microtrepidación | Registro de movimiento fuerte | Consideraciones particulares del sitio |
|--|--------|-------------|--------------|------------------|----------------|-----------------------|----------|------------------|-------------------------------|---|
| Unidad de Salud Panchimalco | UPAN | 13.613202 | -89.178478 | 08/06/2007 | 10:49 | | | X | X | La prueba se realizó en la calle adjunta a la unidad de salud. Existe un muro del lado de la unidad de salud. |
| Parqueo Hotel Radisson | HRPS | 13.710539 | -89.240756 | 01/02/2007 | 9:42 | | | X | X | Se realizó en el parqueo |
| Parque Saburo Hirao-cancha BKB | SJAC | 13.675746 | -89.197252 | 05/09/2006 | 12:00 | | | X | | Prueba realizada en cancha de BKB |
| Parque Saburo Hirao-cancha BKB | SJAC | 13.675746 | -89.197252 | 30/01/2007 | 10:52 | | X | X | | Prueba realizada en cancha de BKB |
| Seminario San José de la Montaña-cancha football | SEM | 13.704263 | -89.224618 | 25/01/2007 | 11:43 | | X | X | X | Prueba realizada en cancha de football. |
| Seminario San José de la Montaña-pozo | SEM | 13.703354 | -89.223993 | 25/01/2007 | 12:19 | | | X | X | Prueba realizada al lado del pozo de observación sísmológica |
| SNET | SNET | 13.687737 | -89.23133 | 14/03/2007 | 11:01 | | | X | | Prueba realizada en la central sísmica de SNET |
| UCA-parqueo biblioteca | UCA | 13.680282 | -89.235519 | 23/09/2006 | 17:48 | | X | X | X | Frente a edificio de biblioteca |
| UCA-parqueo biblioteca | UCA | 13.680282 | -89.235519 | 16/04/2007 | 14:42 | | X | X | X | Frente a edificio de biblioteca |
| Universidad Don Bosco | UDBS | 13.715966 | -89.155052 | 18/05/2007 | 15:11 | | | X | X | Prueba realizada en auditorium Edif 2. Anteriormente se encontraba un SMA-1 instalado en este lugar. |
| Unidad de Salud de La Libertad | ULLB | 13.485144 | -89.327153 | 08/06/2007 | 12:19 | | | X | X | Prueba realizada al lado del acelerógrafo. |

CAPÍTULO 2

SISMICIDAD

La región centroamericana está localizada en una región con una tectónica de placas compleja y activa. En ella, interactúan principalmente las placas de Norteamérica, Cocos, Caribe y Bloque de Panamá, mostrando diferentes valores y direcciones de desplazamiento. La Figura 2.1 muestra esquemáticamente estos procesos tectónicos.

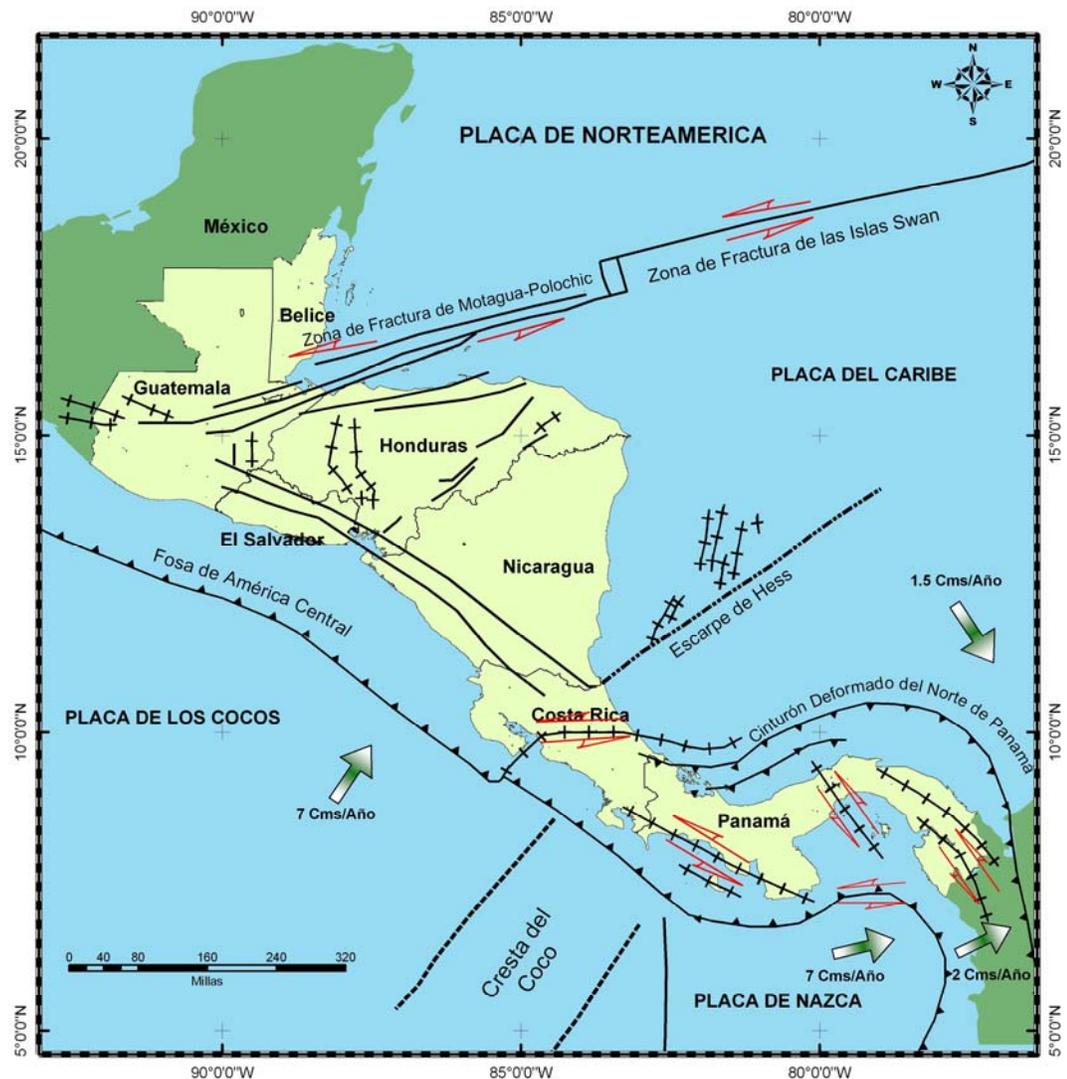


Figura 2.1. Mapa tectónico Regional de Centroamérica. (Modificado de Benito, 2005).

En lo que respecta al territorio salvadoreño, la actividad sísmica que principalmente afecta al país proviene de la interacción entre las placas de Norte América, Caribe y Cocos. Típicamente se ha observado que los sismos que más daño han causado en El Salvador han tenido su origen por el fenómeno de subducción entre la placa de Cocos y la placa del Caribe, así como por el sistema de fallas geológicas locales dentro del territorio o en sus cercanías.

La zona de subducción ha producido los eventos de mayor magnitud ($M > 7.0$) con origen en la placa del Coco (terremotos intraplaca) o en la interfase entre ésta y la placa del Caribe (terremotos interplaca). El sistema de fallamiento local se ha caracterizado por sismos de moderada magnitud (no superiores a 6.8 en magnitud) y profundidades someras (5-20 km). (Benito, 2005).

Cabe mencionar que ciertas zonas del territorio nacional, tales como Candelaria de la Frontera, Ahuachapán, Apaneca–Juayúa-Los Naranjos, Ateos-Sacacoyo, San Salvador, San Vicente, Meanguera del Golfo, entre otras, frecuentemente son afectadas por series sísmicas caracterizadas por presentar magnitudes moderadas y profundidades focales someras (sismicidad tipo enjambre), causando daño a la infraestructura existente en cada zona. Entre los enjambres sísmicos más relevantes durante los últimos tres años se pueden citar el que afectó Apaneca-Juayúa-Los Naranjos en mayo de 2005, Golfo de Fonseca entre Octubre y noviembre de 2006, San Lorenzo-Atiquizaya-Turín en diciembre de 2006, y Los Naranjos entre junio-julio y agosto de 2007. (SNET, 2007)

La Tabla 2.1 muestra un resumen de los sismos destructores en El Salvador a lo largo del siglo XX y comienzos del XXI.

El fenómeno de amplificación por la respuesta de los estratos superficiales, el mismo ha sido observado en casos particulares como el del terremoto del 10 de octubre de 1986, en donde este evento de magnitud moderada ($M_s = 5.4$) que afectó principalmente el Área Metropolitana de San Salvador, generó aceleraciones hori-

Tabla 2.1. Sismos destructores en El Salvador durante el siglo XX y XXI.

Fuente Benito (2005) y base de datos SNET.

| Año | Me s | Dí a | Hora | Latitu d (°) | Longitu d (°) | M S | Profundida d (km) | Intensida d (MM) | Fuente |
|------|---------|---------|-------|-----------------|------------------|--------|----------------------|---------------------|------------|
| 1915 | 09 | 07 | 01:20 | 13.900 | -89.600 | 7.7 | 60 | IX | Subducción |
| 1917 | 06 | 08 | 00:51 | 13.820 | -89.310 | 6.7 | 10 | VIII | Local |
| 1917 | 06 | 08 | 01:30 | 13.770 | -89.500 | 5.4 | 10 | VIII | Local |
| 1919 | 04 | 28 | 06:45 | 13.690 | -89.190 | 5.9 | 10 | X | Local |
| 1930 | 07 | 14 | 22:40 | 14.120 | -90.250 | 6.9 | 30 | VII | Local |
| 1932 | 05 | 21 | 10:12 | 12.800 | -88.000 | 7.1 | 150 | VIII | Subducción |
| 1936 | 12 | 20 | 02:45 | 13.717 | -88.933 | 6.1 | 10 | VIII | Local |
| 1937 | 12 | 27 | 00:43 | 13.933 | -89.783 | 5.9 | 10 | VII-VIII | Local |
| 1951 | 05 | 06 | 23:03 | 13.520 | -88.400 | 6.0 | 10 | - | Local |
| 1951 | 05 | 06 | 23:08 | 13.520 | -88.400 | 6.2 | 10 | - | Local |
| 1951 | 05 | 07 | 20:22 | 13.480 | 88.450 | 5.8 | 10 | - | Local |
| 1965 | 05 | 03 | 10:01 | 13.700 | -89.167 | 6.3 | 15 | VIII | Local |
| 1982 | 06 | 19 | 06:21 | 13.300 | -89.400 | 7.3 | 80 | VII | Subducción |
| 1986 | 10 | 10 | 17:49 | 13.667 | -89.183 | 5.4 | 10 | VIII-IX | Local |
| 2001 | 01 | 13 | 17:33 | 13.049 | -88.660 | 7.8 | 60 | VIII | Subducción |
| 2001 | 02 | 13 | 14:22 | 13.671 | -88.938 | 6.5 | 10 | VIII | Local |

zontales del terreno significativamente diferentes para estaciones acelerográficas ubicadas sobre depósitos no consolidados en comparación con equipos instalados sobre materiales consolidados, aún cuando las distancias epicentrales fueron comparables entre sí. Véase en Tabla 2.2 las aceleraciones máximas registradas durante el sismo del 10 de octubre de 1986. Los análisis espectrales mostraron amplificaciones significativas. (Atakan y Torres, 1993).

**Tabla 2.2. Aceleraciones máximas registradas para el sismo del 10/10/86.
[Atakan y Torres, 1993].**

| Estación | Latitud (°) | Longitud (°) | Aceleraciones máximas (g) | | | Distancia al epicentro (km) |
|---------------------------------------|----------------|-----------------|------------------------------|-------|-------|-----------------------------------|
| | | | N-S | E-W | Z | |
| Centro de Investigaciones Geotécnicas | 13.700 | -89.175 | 0.42 | -0.71 | 0.40 | 4.3 |
| Instituto Geográfico Nacional | 13.714 | -89.171 | 0.40 | -0.54 | 0.46 | 5.7 |
| Instituto de Vivienda Urbana | 13.721 | -89.206 | 0.72 | 0.37 | - | 5.3 |
| Universidad Centroamericana | 13.683 | -89.237 | -0.39 | 0.43 | 0.24 | 3.8 |
| Hotel Camino Real | 13.712 | -89.215 | 0.47 | 0.34 | 0.26 | 4.5 |
| Hotel Sheraton | 13.713 | -89.243 | 0.22 | 0.32 | -0.15 | 6.2 |

En el caso particular de los sismos del 2001, se observaron otros tipos de fenómenos tales como licuefacción de suelos, inestabilidad de taludes, movimiento de fallas geológicas menores, mecanismo de disparo de sismos, etc., que afectaron de manera significativa diferentes partes del país.

Lo anterior pone de manifiesto la importancia de los estudios orientados al conocimiento de otros tipos de peligro asociados directamente al movimiento fuerte del terreno, dada la frecuente actividad sísmica a la que se encuentra expuesto El Salvador.

CAPÍTULO 3

GEOLOGIA DEL AMSS

La geología del Área Metropolitana de San Salvador esta controlada por materiales provenientes de dos grandes complejos volcánicos activos: la caldera de Ilopango y el volcán de San Salvador. Sin embargo, varios centros eruptivos pequeños, entre ellos el cerro de San Jacinto, los centros eruptivos de Mejicanos y Mariona, así como también el Plan de la Laguna han producido pequeños volúmenes de materiales que localmente controlan la morfología del terreno. Adicionalmente, depósitos que provienen de la erosión y deposición de los materiales primarios contribuyen a generar un ambiente geológico complejo apto para que existan efectos de amplificación sísmica en diferentes sitios del área metropolitana.

La Figura 3.1 muestra la distribución de los depósitos antes mencionados, las unidades descritas en el mapa hacen referencia al Mapa Geológico de El Salvador (escala 1:100,000). Sin embargo, y en términos generales la geología del Área Metropolitana de San Salvador puede dividirse en cinco distintas áreas geográficas: 1) área de los municipios al norte de la caldera de Ilopango, incluyendo Soyapango e Ilopango, 2) zona central del AMSS, incluyendo, el centro de San Salvador y gran parte de los municipios de Mejicanos y Ciudad Delgado, 3) Santa Tecla y el poniente de San Salvador, 4) zona sur de San Salvador, Antiguo Cuscatlán, Nuevo Cuscatlán y el Municipio de San Marcos y 5) Zona norte de San Salvador, incluyendo el Municipio de Apopa y parte de Mejicanos. En dicha figura, la simbología de colores está relacionada a unidades litológicas según el Mapa Geológico de El Salvador (escala 1:100,000). Las líneas continuas y discontinuas identifican posibles fallas; los triángulos verdes identifican sitios de medición de microtrepidación en conjunto con expertos japoneses; los triángulos rojos identifican sitios medidos de forma independiente.

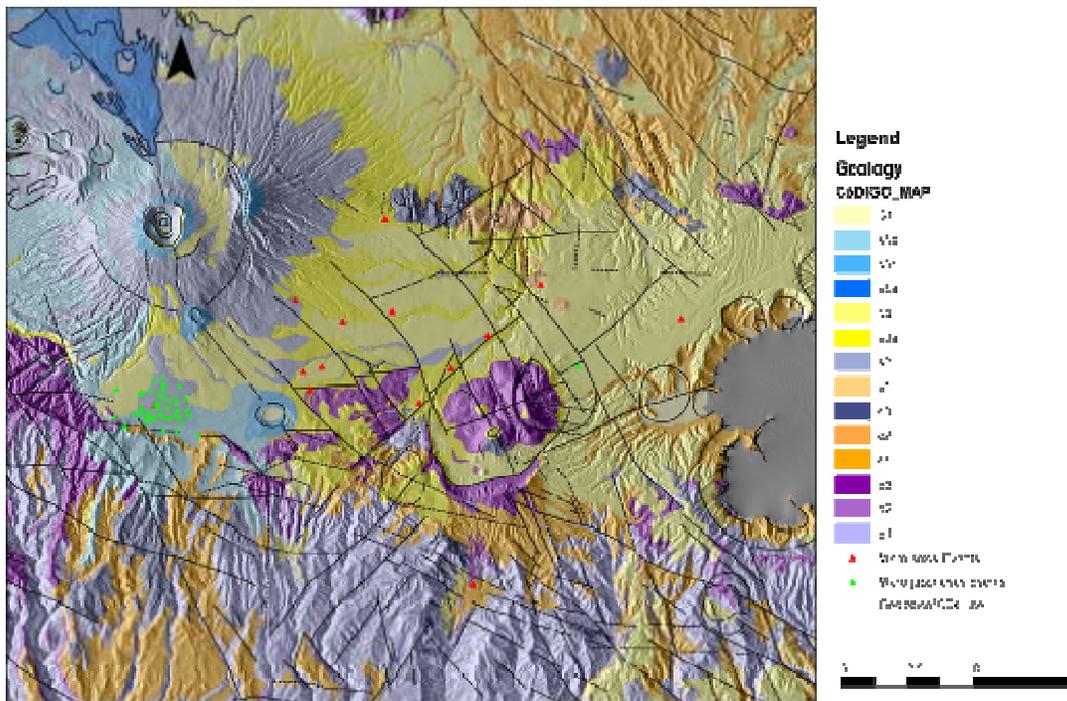


Figura 3.1. Geología del Área Metropolitana de San Salvador (modificado de Wiesemann, 1975).

El área geográfica al norte de la caldera de Ilopango, incluyendo los municipios de Soyapango e Ilopango esta caracterizada por tener grandes espesores de depósitos piroclásticos productos de erupciones de la caldera de Ilopango, por lo que estos depósitos tienen mayores espesores cerca del borde de la caldera, disminuyendo a medida que se aleja de ella. Espesores medidos de estos depósitos superan los 60 m en algunos lugares. Los materiales se caracterizan por tener baja densidad y poca consolidación ya que están compuestos por materiales pumíticos de composición silícica (Hernández, 2004).

Hacia el occidente y específicamente en la zona del centro de San Salvador, estos depósitos disminuyen en espesor pero siempre alcanzan espesor en el orden de los 17 m. En esta zona, los depósitos piroclásticos localmente cubren lavas del complejo volcánico de San Salvador, del cerro de San Jacinto, los cerros de Mariona y Mejicanos.

La zona poniente de San Salvador y la ciudad de Santa Tecla están caracterizadas por tener espesores menores a 10 m de productos piroclásticos sobre lavas recientes del volcán de San Salvador. A su vez, en las lavas recientes sobreyacen una secuencia de productos piroclásticos pumíticos y escoriáceos que a su vez descansan sobre lavas más antiguas del mismo volcán, cuyos espesores se pueden conocer por medio información de pozos ya perforados o nuevos por perforar.

Hacia el sur de la ciudad de San Salvador y el municipio de San Marcos los depósitos piroclásticos recientes sobreyacen en depósitos piroclásticos más antiguos y materiales (lavas y tobas) de la sierra El Bálsamo. En esta área los depósitos piroclásticos varían considerablemente en espesor dependiendo de la cercanía a la caldera de Ilopango y del cráter del Plan de la Laguna.

Hacia el norte de la ciudad de San Salvador, los espesores de los piroclásticos recientes disminuyen alcanzando valores menores a los 5 m. Sin embargo, inmediatamente subyaciendo se encuentra una serie de depósitos piroclásticos más antiguos mezclados con materiales producto de la erosión del volcán de San Salvador, los cuales descansan sobre lavas del mismo volcán. El espesor aproximado de todos los materiales piroclásticos ronda los 10 m, aumentando a medida que se alejan de las laderas del volcán de San Salvador.

CAPÍTULO 4

EXPLORACIÓN GEOFÍSICA

4.1 Introducción.

La microzonificación sísmica es un estudio de peligrosidad sísmica que toma en cuenta la influencia de la geología local en la respuesta de las capas superiores a fin de predecir el movimiento del terreno. Para medir esa respuesta se pueden usar distintos parámetros como períodos predominantes, velocidades de onda de corte, funciones de transferencia, espesores de capas a distintas profundidades y sus velocidades de ondas de corte.

Para poder validar los resultados obtenidos en este estudio se eligieron lugares de medición que contaran con registros de movimiento fuerte para poder comparar los períodos predominantes obtenidos del movimiento fuerte con los obtenidos con microtemblores. Una vez establecida la metodología, se evaluará si puede ser utilizada en los centros poblacionales más importantes del país. Se buscaron parámetros como velocidades de onda de corte en la capa superficial empleando el método de refracción sísmica, además se obtuvieron períodos predominantes utilizando microtrépidaciones y la técnica de Nakamura y estimaciones de espesores de capas y sus velocidades de onda de corte a mayores profundidades, a través de arreglos y el uso de un algoritmo genético.

En el procesamiento se han utilizado programas elaborados por los profesores japoneses Hirohaki Yamanaka y Kentaro Motoki en Visual Fortran. Entre ellos: Micplot cuyo propósito es visualizar la forma de ondas registradas y calcular relaciones espectrales de microtrépidaciones. ES8toamp.dsw que sirve para la conversión a un formato ASCII, y los ejecutables spac.exe y spac2vel.exe calculan de velocidades de fase, mientras que garay_all2.dws es utilizado para la implementación del algoritmo genético y otros auxiliares.

4.2 Métodos de exploración utilizados.

Los métodos de exploración geofísica empleados en este estudio fueron : refracción sísmica para la obtención de la velocidad de las ondas de corte de la capa superficial, la medición de ruido ambiental (microtemblores) se utilizó para obtener períodos predominantes y los arreglos de microtrepidación se usaron para determinar los perfiles de velocidades de ondas de corte (V_s) con la profundidad.

4.2.1 Arreglos.

a) Metodología para Arreglos.

El algoritmo genético desarrollado por Holland (1975), es una simulación matemática de la evolución biológica basada en la regla de la selección natural, una línea de pensamiento orientada a incursionar en la inteligencia artificial. Consiste básicamente en generar aleatoriamente la población inicial, que está constituida por un conjunto de cromosomas que representan las posibles soluciones del problema. En caso de que dicha población inicial no sea aleatoria, es importante garantizar que sea lo más diversa posible a fin de garantizar que la mayor parte de la población esté representada, con lo cual se busca evitar una convergencia prematura. A cada uno de los cromosomas de esta población se le aplica una función de características para saber qué tan "buena" es la solución que se está codificando. Después de conocer la característica de cada cromosoma, se procede a elegir los cromosomas que serán cruzados en la siguiente generación, los cromosomas con mejor función de características tienen mayor probabilidad de ser seleccionados.

El cruzamiento es el principal operador genético, opera sobre dos cromosomas a la vez para generar dos descendientes donde se combinan las características de ambos cromosomas padres. El proceso iterativo se detiene cuando ya no se producen cambios en la población o regulando el número máximo de iteraciones (generaciones).

Resumiendo el algoritmo: Iniciar aleatoriamente o a partir de una población dada, una población de soluciones a un problema representada por una estructura de datos adecuada. Posteriormente se evalúa cada una de las soluciones y se le asigna una puntuación o *fitness* según lo bien que lo hayan hecho. Se escoge de la población la parte que tenga una puntuación mayor, se mutan (cambia) y entrecruzan (combina) las diferentes soluciones de esa parte escogida para reconstruir la población. Finalmente, el proceso se repite un número determinado de veces, o hasta que se haya encontrado la solución deseada.

El método del algoritmo genético presenta una enorme dependencia del modelo inicial introducido, donde se le asignan los parámetros del número de capas, sus espesores H , densidades ρ y la velocidad V_s . La velocidad de la capa superior puede ser obtenida de una prueba de refracción, las velocidades del resto de capas se pueden tomar de pozos o perforaciones que se encuentran disponibles o se asumen, por ejemplo cuando no se tienen pozos o no se pueden hacer pruebas de refracción.

Las velocidades de fase de las ondas Rayleigh se obtienen ocupando el método SPAC (Spatial Autocorrelation Coefficient), ver figuras 4.1 y 4.2

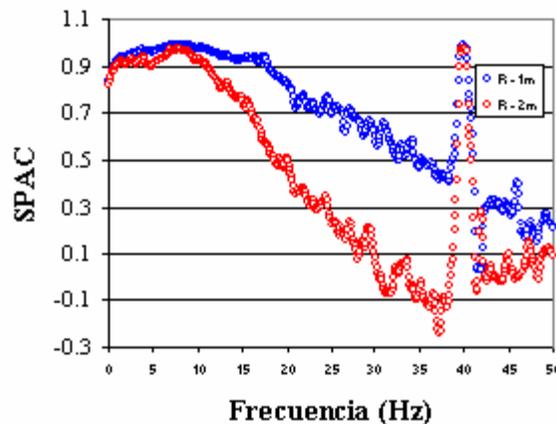


Figura 4.1. Gráfica de SPAC vs. Frecuencia del parqueo de biblioteca de la UCA.

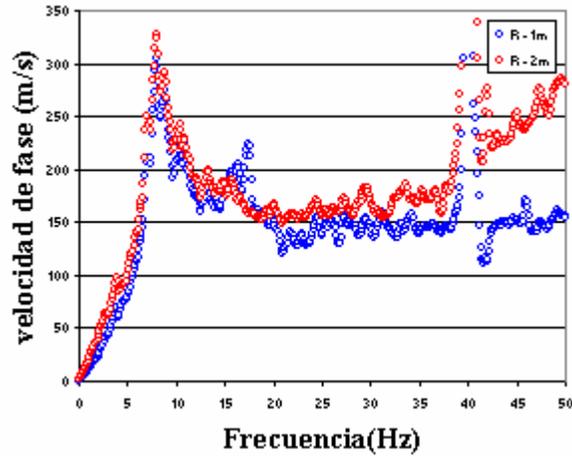


Figura 4.2. Gráfico de Velocidad de fase vrs Frecuencia del parqueo de biblioteca de la UCA.

Los pares ordenados frecuencia vrs velocidad de fase de la mejor aproximación y la propuesta inicial del modelo de capas nos permite ejecutar el algoritmo genético con lo cual se obtiene la solución “óptima”.

Una propuesta de capas y velocidades de ondas de corte obtenida se ilustra en la Figura 4.3, en ella se muestra una comparación entre el modelo de inversión obtenido con el observado y el modelo de la inversión con la profundidad.

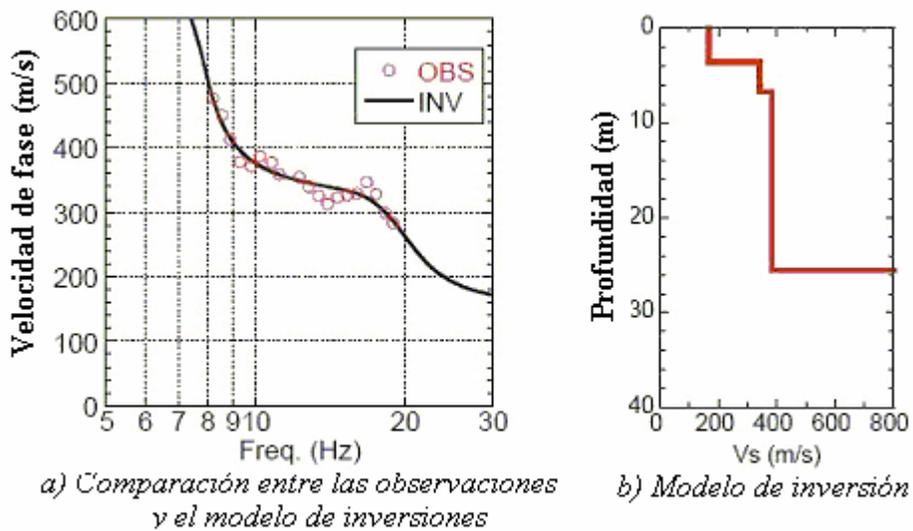


Figura 4.3. Modelo de capas.

b) Adquisición de datos

El diseño del arreglo vertical consiste en un triángulo mayor de lado L inscrito en un círculo de radio r que guardan la relación de la Ecuación 4-1. De las partes medias de los lados del triángulo mayor, o sea a $L/2$, se construye un triángulo menor y un círculo de radio menor que guardan igual relación.

$$r = \frac{L}{\sqrt{3}} \quad (\text{Ec. 4-1})$$

En el centro se coloca un acelerómetro triaxial, y sensores uniaxiales en los vértices de los dos triángulos que definen los dos círculos (ver Figura 4.4). Los sensores colocados en los vértices del triángulo mayor se conectan a los canales 2, 3 y 4 y los sensores colocados en los vértices del triángulo menor se conectan a los canales 5, 6 y 7, como se muestra en la Figura 4.4.

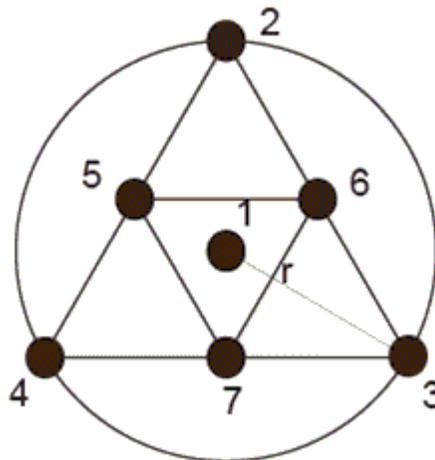


Figura 4.4. Distribución geométrica de los sensores en un arreglo típico.

4.2.2 Refracción sísmica.

a) Metodología de refracción sísmica.

Consiste en la medición de las velocidades de corte V_s de la capa superficial a través del cálculo del tiempo de arribo al sensor (geófono) de las ondas directas y refractadas.

La Figura 4.5 ilustra las ondas registradas por un geófono, a partir de las cuales se determinan los pares ordenados tiempo vrs distancia, y las mismas son graficadas en curvas de tiempo de viaje (ver Figura 4.6). El modelo de estructura de la capa superficial (espesor y velocidad de corte) se determina a partir de las curvas de teimpo de viaje tal como se muestra en Figura 4.7.

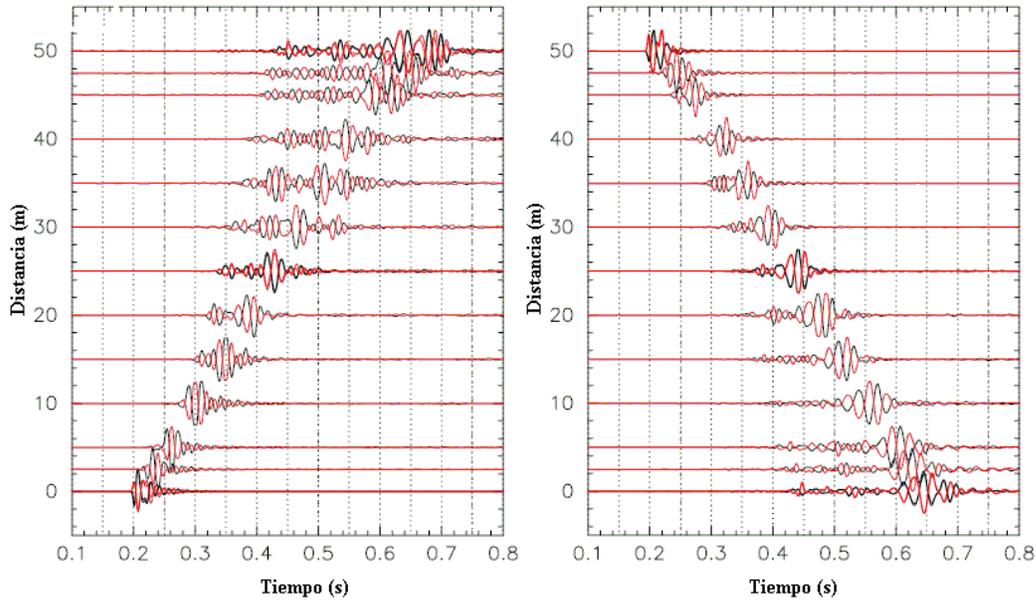


Figura 4.5. Formas de onda a su arribo al sensor.

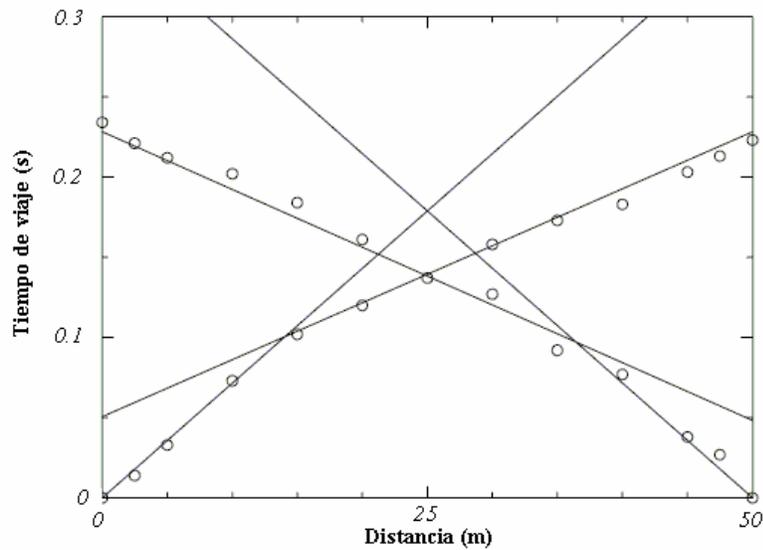


Figura 4.6. Curvas de Tiempo de viaje vrs Distancia.

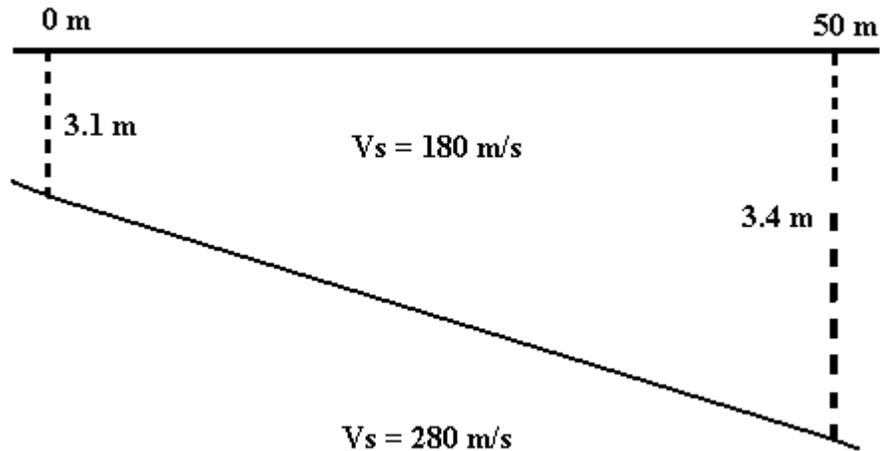


Figura. 4.7. Modelo de estructura de capa superficial.

b) Adquisición de datos.

Para la obtención de los datos se instalan los geófonos en dirección E-O a cinco centímetros de la superficie del terreno siguiendo la distribución lineal mostrada en la Figura 4.8. Los dos primeros geófonos se separan 2.5 m, los subsiguientes a 5 m, como se detalla en la figuras 4.8 y 4.9. Las ondas de corte se generan golpeando una pieza de madera colocada bajo las llantas de un vehículo, en la dirección N - S en ambos extremos del arreglo. Esta operación se repete 8 veces en ambos sentidos y en ambos extremos del arreglo. La longitud del arreglo se eligió por la disposición del lugar y la sensibilidad del sensor más alejado; el número de sensores a utilizar se estimó con la expresión:

$$N=L/5+3 \qquad \text{(Ec. 4-2)}$$

4.2.3 Microtrepidaciones.

a) Metodología de Microtrepidaciones.

Se parte del supuesto de que los microtemblores están compuestos principalmente de ondas Rayleigh, las cuales pueden tener muchas fuentes, entre ellas el tráfico ve-

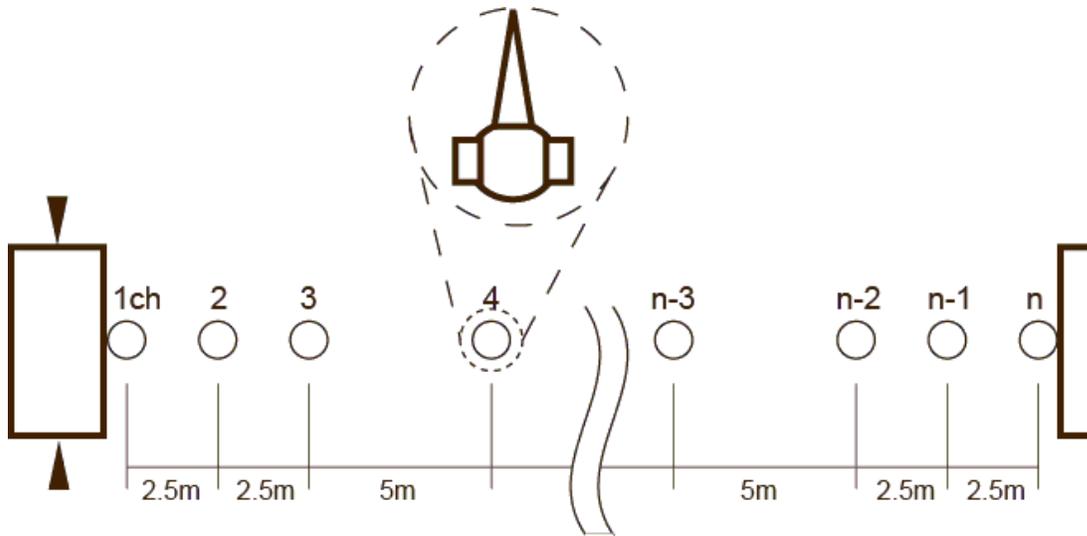


Figura 4.8. Arreglo lineal para refracción sísmica.

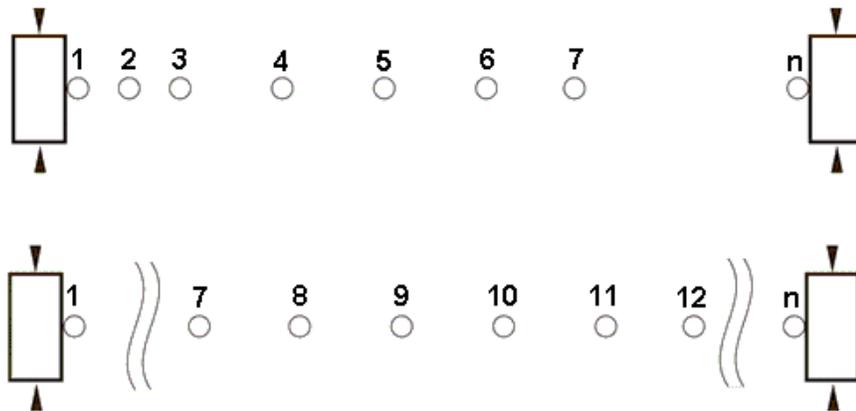


Figura 4.9. Numeración de sensores para ondas generadas en ambos extremos.

hícular, actividad en la industria, las olas del mar, el viento, la variación en las presiones atmosféricas, etc. Dicha fuente no localizada, genera una transmisión de ondas al terreno que viajan por suelos de múltiples composiciones, de acuerdo a la geología local.

A través de acelerómetros triaxiales se registran las ondas superficiales en sus componentes horizontales y verticales, y utilizando la técnica de H/V (Nakamura, 1989) obtener los períodos predominantes del sitio. Nakamura (1989) supone que los microtemblores están compuestos por ondas superficiales Rayleigh y Love y ondas de cuerpo P y S; además, parte de la asunción que la componente vertical del

movimiento llega a la superficie sin experimentar amplificaciones considerables en el rango de frecuencias ingenieriles y que el efecto de las ondas Rayleigh es igual para la componente vertical y horizontal, el cociente espectral queda definido por la siguiente ecuación:

$$\frac{H}{V} = \frac{\sqrt{NS^2 + EW^2}}{UD} \quad (\text{Ec. 4-3})$$

La Figura 4.10 ilustra la relación H/V para dos estaciones CENREN y CPR respectivamente.

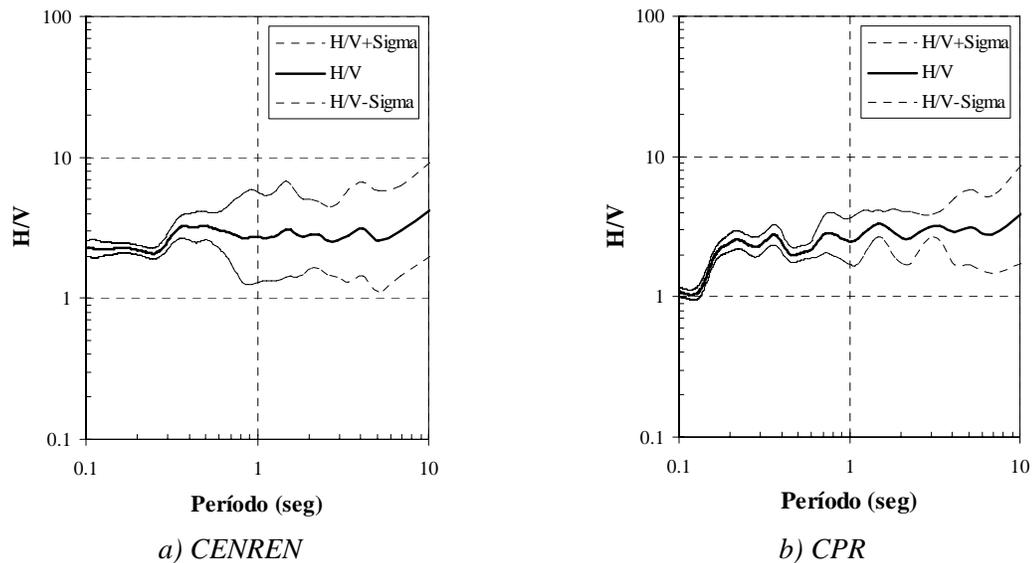


Figura 4.10. Relaciones espectrales obtenidas por el método de Nakamura (1989).

b) Adquisición de datos

Se utiliza un sensor triaxial conectando las componentes E-O, N-S y Z a los canales 1, 2 y 3, el cual es colocado lo más cerca posible al equipo instalado en las estaciones de movimiento fuerte de los sitios visitados con la finalidad de reducir factores de discrepancias entre los resultados de los análisis de los microtemblores con los de movimiento fuerte.

CAPÍTULO 5

RESPUESTA DE CAPAS SUPERFICIALES DE SUELO

5.1. Introducción.

Investigaciones a lo largo de las últimas décadas han establecido una relación directa entre los daños causados por un terremoto y la geología local, observándose amplificaciones de las ondas sísmicas por efecto de las capas superficiales de suelo. El caso más típico ocurrió durante el terremoto de Michoacán, México en 1985, en donde la diferencia de impedancia entre las capas de suelo modificó el contenido frecuencial y la duración de la sacudida del terreno (Kobayashi et. al., 1986). Dicho comportamiento también fue observado en Leninakan durante el terremoto de Armenia en 1988, en San Francisco durante Loma Prieta en 1989 y en la ciudad de Kobe durante el terremoto de Japón en 1995 (Bard, 1999, Navarro et. al., 1998).

En el capítulo 4 se mencionaron los distintos métodos de exploración geofísica empleados para conocer los efectos de sitio. De todos ellos, la medición de microtemblores resulta ser una de las alternativas más atractivas por ser la más sencilla y económica; además, los resultados han demostrado ser consistentes con observaciones de movimiento fuerte (Bard, 1999). Esta ventaja ha impulsado su uso en países de latinoamerica como México (Flores Estrella y Aguirre González, 2003), El Salvador (Ingvarsson y Johansson, 1996; Atakan, 1996), Colombia (Gueguén et. al., 1997), España (Seo, 1999a), Portugal (Teves-Costa et. al., 1996), Taiwán (Sokolov et. al., 2007), Israel (Zaslavsky et. al., 2000), Grecia (Panou et. al., 2005) y muchos otros (Bard, 1999). Sin embargo, dicha información debe de ser usada con cautela y se deben establecer las condiciones en las que pueda ser usada, estudiando caso por caso (Seo, 1999b).

Este capítulo presenta los resultados obtenidos durante la campaña de mediciones de microtemblores en las estaciones acelerográficas del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), realizada entre agosto de 2006 a junio de 2007. La Tabla 1.2 muestra un resumen de los sitios en los cuales se realizaron mediciones y el tipo de medición que se efectuó en cada estación. El código asignado fue el mismo que poseen las estaciones acelerográficas, exceptuando Feria Internacional (FINT) y Hogar del Niño (HDN) a los que se les asignó un código debido a que no existen estaciones en dichos lugares. En la estación HDN se realizaron mediciones debido a que se cuenta con información estratigráfica del pozo excavado en 1994 el cual estaba enmarcado dentro del proyecto de actualización del Reglamento de Diseño Sísmico.

5.2. Arreglos.

Únicamente se efectuaron mediciones de arreglos en las estaciones CENREN, FINT, CPR, ESJO, SJAC, UCA, HDN y UPAN de las que fueron descartadas FINT por estar muy contaminadas con ruido causado por el tráfico, ESJO, SJAC y HDN debido a que las señales no eran consistentes y UPAN por contener ruido eléctrico. En la Tabla 1.1 se muestra un resumen de las condiciones en que se llevaron a cabo las mediciones en cada estación.

5.2.1. Procesamiento de registros.

Los perfiles de velocidades de ondas de corte en cada sitio fueron obtenidos por medio de la técnica de inversión de la velocidad de fase de las ondas Rayleigh empleando el método SPAC y algoritmos genéticos (GA). Los programas utilizados fueron elaborados por el personal del Instituto Tecnológico de Tokio. Los parámetros utilizados para el procesamiento fueron: población, 30; número máximo de generaciones, 100; tasa de cruce, 0.7; tasa de mutación, 0.1; y número de ejecuciones, 10.

5.2.2. Resultados obtenidos.

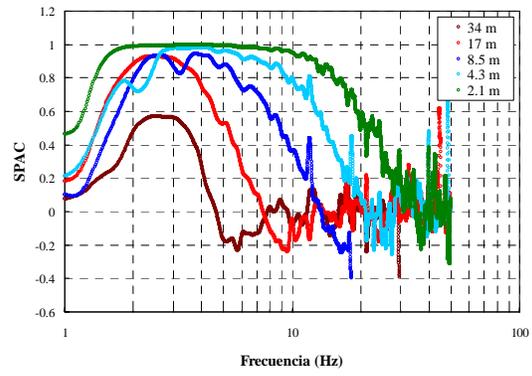
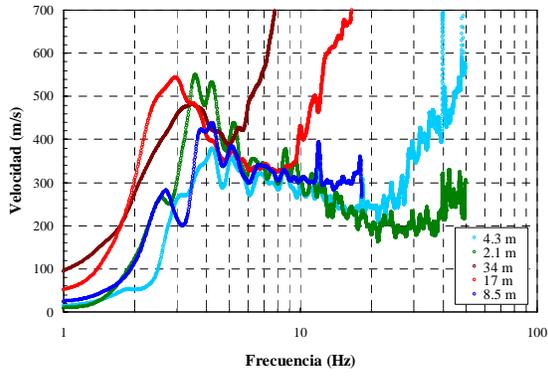
En la Figura 5.1 se muestra la velocidad de fase junto con la relación SPAC mientras que en la Figura 5.2 se ilustra la velocidad de fase y los perfiles de las velocidades de ondas de corte para las estaciones CENREN, CPR y UCA. En la porción izquierda de la figura se muestra el modelo de inversión con las observaciones de campo, mientras que en la porción derecha se observa el modelo de inversión obtenido. Una de las desventajas que presenta el método utilizado para calcular el perfil de velocidades de ondas de corte, es que se tiene que asumir un modelo de capas, el cual es utilizado como dato de partida para iniciar el proceso de optimización.

Para CENREN se utilizó el informe de la visita realizada por personal japonés al país durante junio de 2006; sin embargo, en la Figura 5.2a se muestra el perfil obtenido de velocidades obtenido el pozo excavado en 1994 (SNET, 1994). Para CPR se utilizó la información del pozo perforado en 1994 (SNET, 1994).

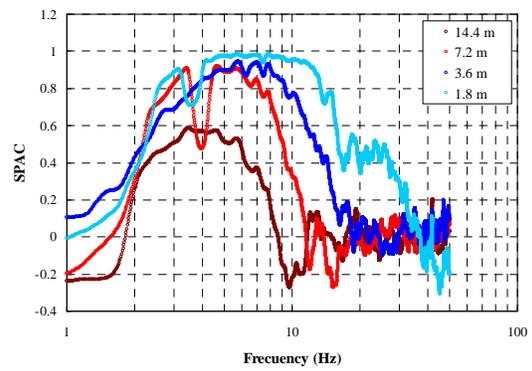
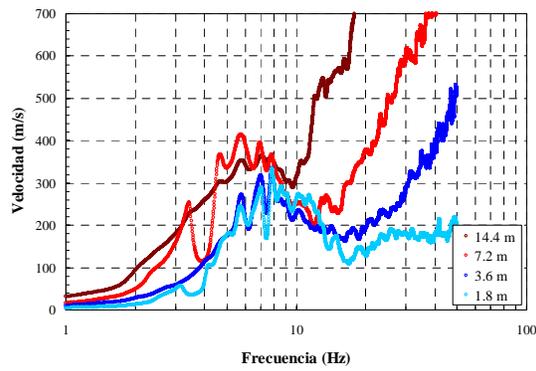
Finalmente, para la estación UCA se utilizó el perfil propuesto por el Consorzio ITALTEKNA enmarcado dentro del programa para la reconstrucción de San Salvador después del terremoto del 10 de octubre de 1986 (Consorzio Salvador E. ITALTEKNA ITALCONSULT, 1988).

5.2.3. Interpretación de resultados.

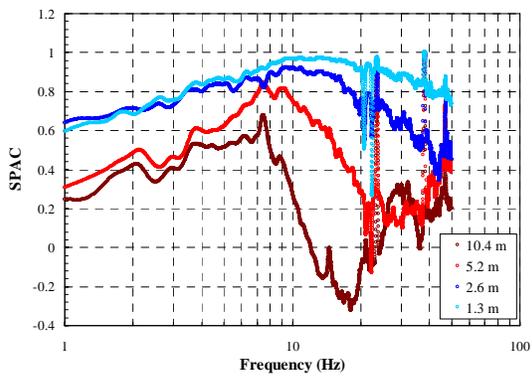
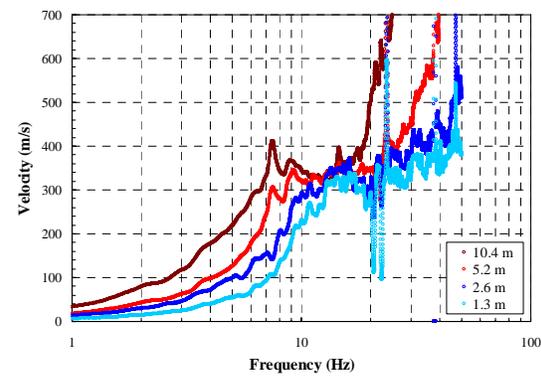
Los resultados mostrados en el literal a) de la figura anterior muestran que hasta una profundidad de 20 m el método de inversión da resultados aceptables. En el caso del literal b) los resultados obtenidos no son congruentes con los perfiles de velocidad de los pozos; sin embargo, es de tener presente que dichas velocidades fueron obtenidas por medio de una correlación con el número de golpes de pruebas de penetración estándar (SPT) realizadas en los sitios. En la estación UCA existen tramos en donde los resultados no son congruentes con los obtenidos por la consul-



a) CENREN

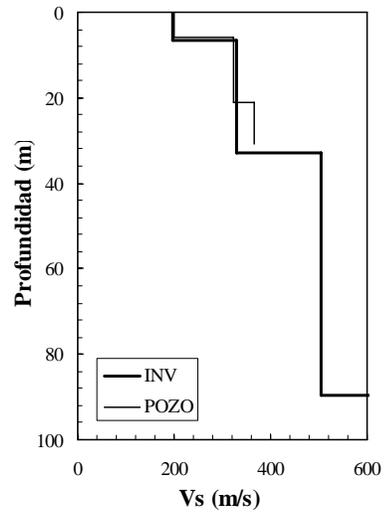
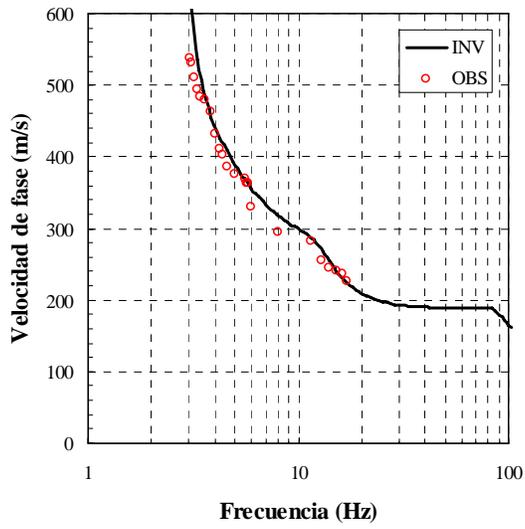


b) CPR

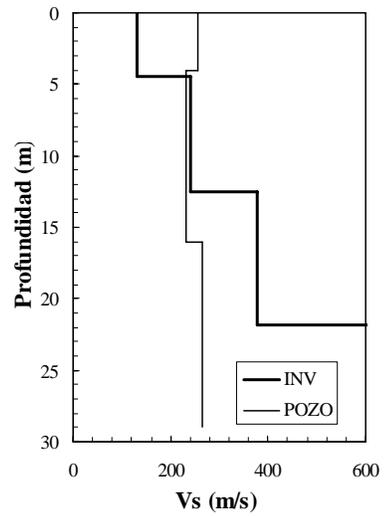
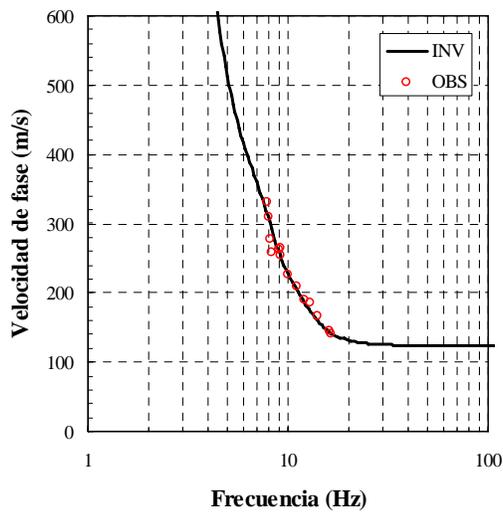


c) ESJO

Figura 5.1. Velocidades de fase y SPAC para distintas estaciones acelerográficas.

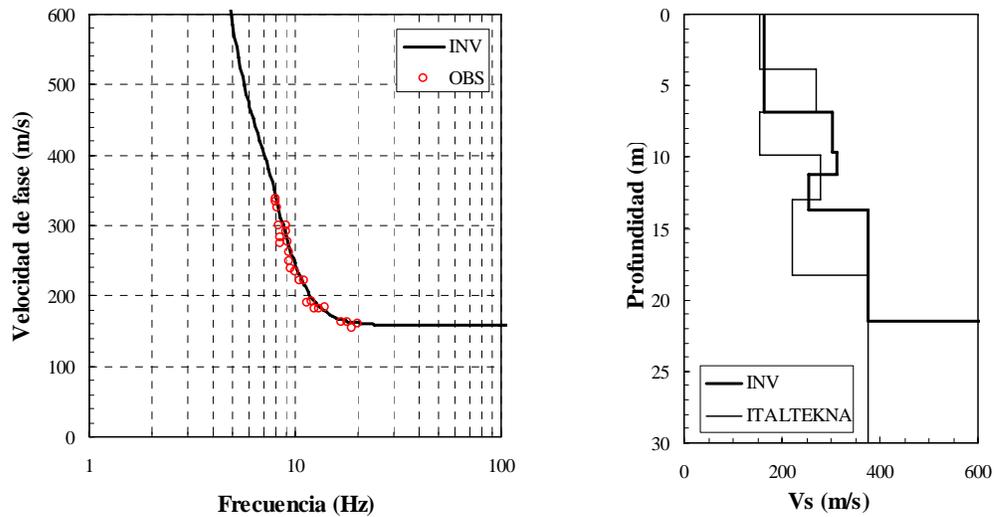


a) CENREN



b) CPR

Figura 5.2. Perfiles de velocidades de ondas de corte por estación.



c) UCA

Figura 5.2. Perfiles de velocidades de ondas de corte por estación (cont).

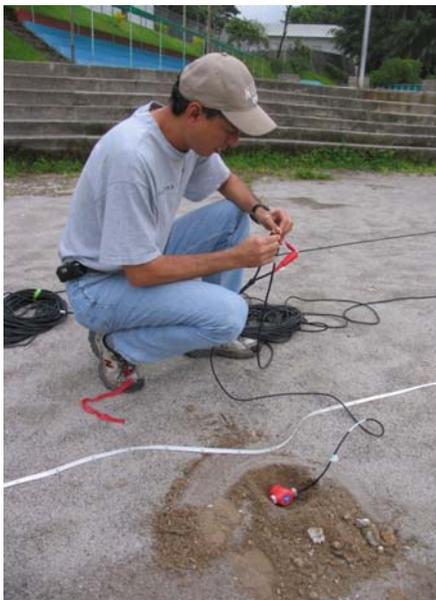
tora ITALTEKNA. En los tres casos estudiados (CENREN, CPR y UCA) la correlación de las velocidades de fase observadas y calculadas por el método de inversión es excelente, sin embargo, el modelo de las velocidades de corte con la profundidad varía de caso en caso, lo cual dependerá del método que se utilice para su determinación. Debido a que la perforación de sondeos y la apertura de pozos a cielo abierto requiere de una fuerte inversión económica, o que los existentes han sido inaccesibles, se carece de datos suficientes para realizar estudios similares en otros sitios y así poder determinar con más certeza si el método es apropiado para determinar los perfiles de velocidades de ondas de corte.

5.3. Refracción sísmica.

La sísmica de refracción se realizó con el propósito de obtener la velocidad de onda de corte en los primeros metros del suelo, tratando de complementar la información requerida para el análisis de los arreglos de microtrepidación. Únicamente se llevó a cabo en las estaciones FINT, ESJO y HDN.

Cabe mencionar que después de haber analizado los datos de estos tres sitios, se observó que el ruido producido por el tráfico afectaba significativamente la lectura de los tiempos de arribo de las fases sísmicas en cada sitio. Asimismo, en lugares como SJAC y SEM no fue posible desarrollar las mediciones debido a la presencia de ruido eléctrico en las trazas.

La metodología empleada está de acuerdo con lo expuesto en 4.2.2, configurando un arreglo lineal de geófonos, y produciendo ondas de corte a través de golpes dados con una almádana a un trozo de madera en cada extremo del arreglo, en ambas direcciones perpendiculares al mismo (al menos proporcionaron 10 golpes en cada dirección). Véanse Figuras 5.3.



a) Instalación de geófonos



b) Generación de ondas de corte

Figura 5.3. Prueba sísmica de refracción en Externado de San José (Fotos: Douglas Hernández).

La Tabla 5.1 presenta aspectos relacionados con la toma de datos durante las jornadas de sísmica de refracción en cada sitio. Es importante indicar que tanto el procedimiento de campo como el procesamiento de la información son acordes con la capacitación recibida en julio de 2006 por parte de expertos japoneses del Institu-

Tabla 5.1. Sitios en donde se realizó sísmica de refracción.

| Sitio | Código | Fecha | No. de Geófonos | Longitud del arreglo (m) |
|-----------------------------|--------|------------|-----------------|--------------------------|
| Parqueo Feria Internacional | FINT | 21/08/2006 | 13 | 50 |
| Externado de San José | ESJO | 27/08/2006 | 13 | 50 |
| Hogar del Niño | HDN | 25/09/2006 | 8 | 25 |

to Tecnológico de Tokyo quienes durante su estadía en el país desarrollaron sísmica de refracción en UCA y CENREN, y los resultados obtenidos se muestran en las figuras 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7. Las trazas no se consideraron apropiadas para el análisis pues es difícil leer los primeros arribos de ondas debido al ruido, principalmente en los geófonos más alejados.

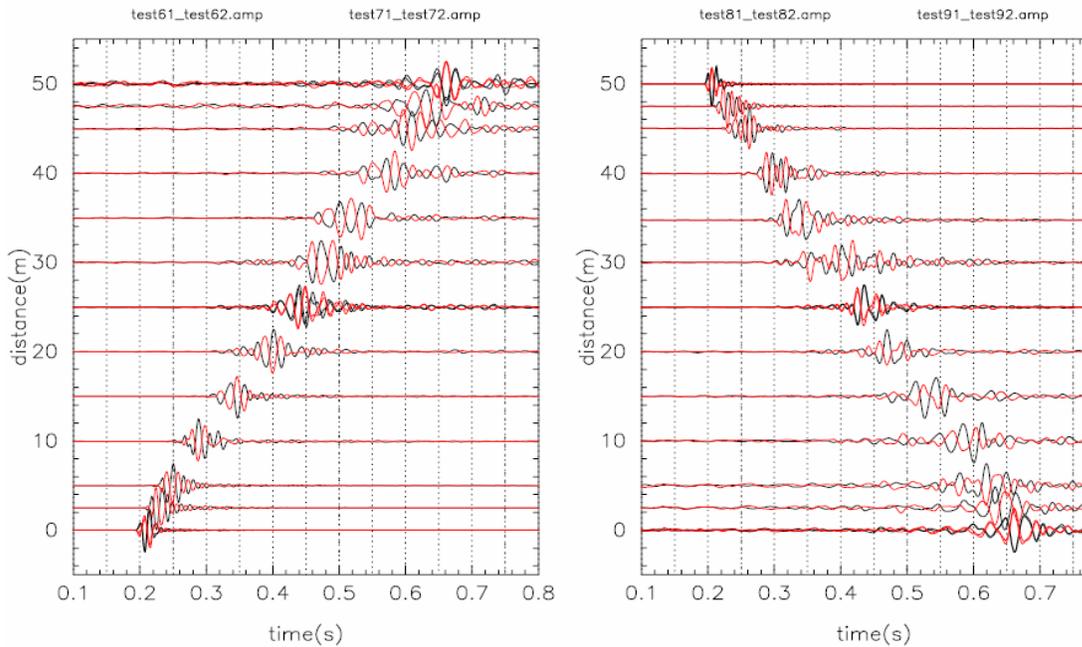


Figura 5.4. Sísmica de refracción medida en parqueo UCA (frente a edificio ICAS) en julio de 2006.

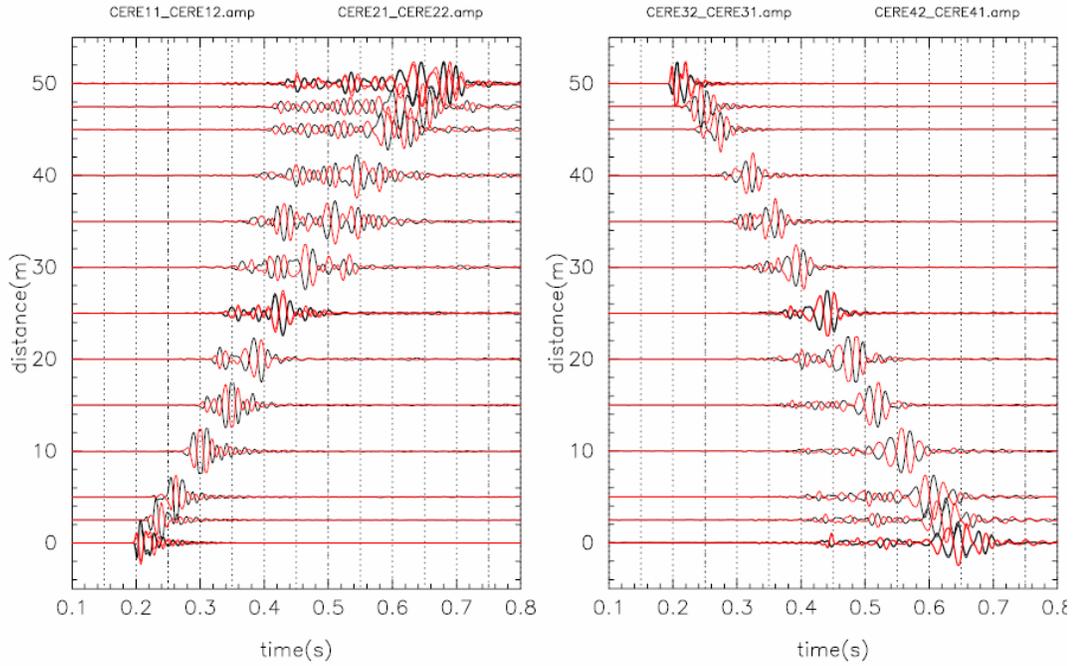


Figura 5.5. Sísmica de refracción medida en cancha de football CENREN en julio de 2006.

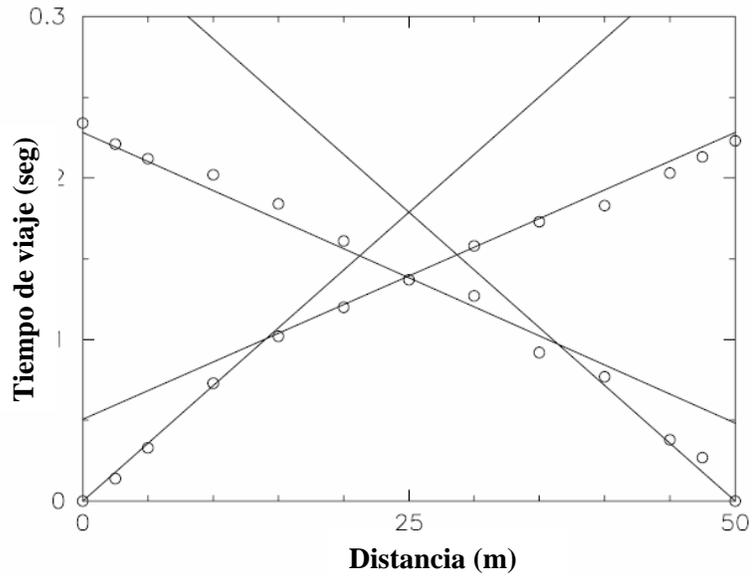


Figura 5.6. Curvas de viaje de ondas de corte obtenidas de la sísmica de refracción en CENREN en julio de 2006.

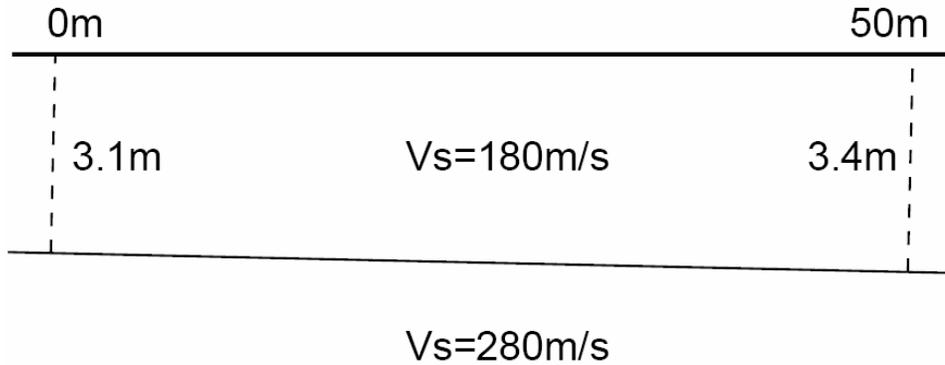


Figura 5.7. Perfil de velocidad de onda de corte obtenido de la sísmica de refracción en CENREN en julio de 2006.

5.3.1 Procesamiento de registros.

Los registros de los tres sitios fueron procesados utilizando los programas desarrollados por personal del Instituto Tecnológico de Tokio, de acuerdo con lo siguiente:

- a) Programa Stack_itata5: Permite sumar las trazas registradas en cada geófono de los golpes dados en la misma dirección, con el objeto de obtener una señal amplificada y con ello poder leer claramente los arribos de las fases sísmicas.
- b) Programa Connect_amp: Si la configuración de geófonos es mayor de ocho instrumentos (es decir, la longitud es mayor de 25 m), es necesario conectar las trazas para obtener un sólo archivo que contenga toda la información a lo largo del arreglo.
- c) Programa Draw._wave2: Se utilizó para visualizar las trazas registradas y leer los tiempos de arribo de las fases sísmicas.

La figuras 5.8, 5.9 y 5.10 muestran las señales sísmicas registradas en cada sitio.

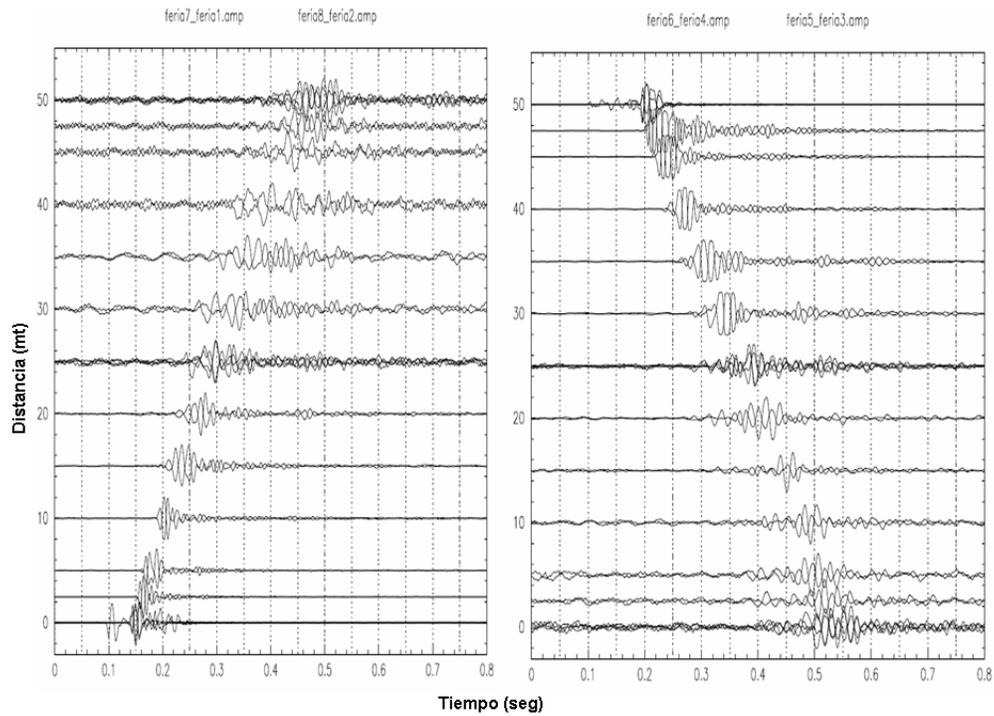


Figura 5.8. Sísmica de refracción en parqueo de Feria Internacional.

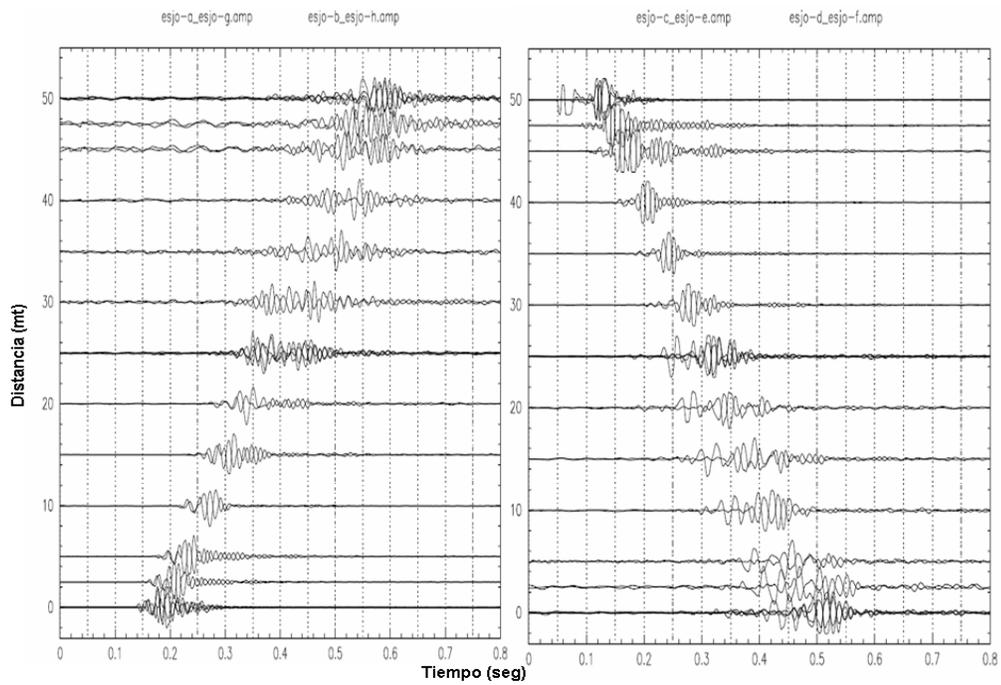


Figura 5.9. Sísmica de refracción en Externado de San José.

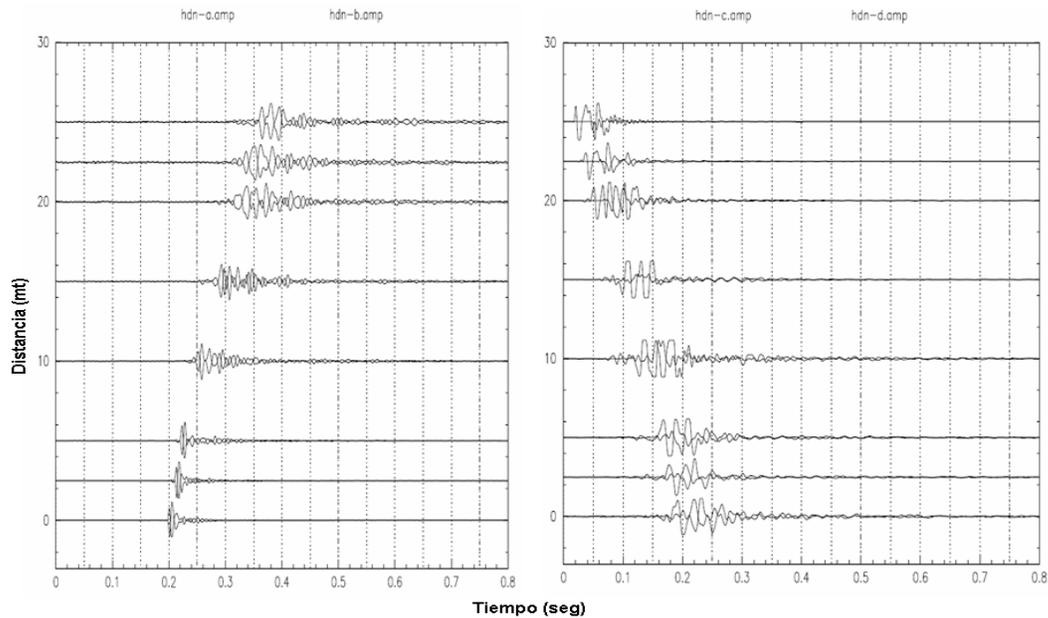


Figura 5.10. Sísmica de refracción en Hogar del Niño.

5.3.2 Resultados obtenidos.

Con base en las señales registradas, no fue posible realizar una lectura confiable de los tiempos de arribos de las primeras fases, ya que algunas de las trazas presentaron un componente de ruido de largo período probablemente debido al tráfico existente en las cercanías de cada sitio.

5.4. Microtrepidaciones.

Tal como se mencionó anteriormente, se realizó un levantamiento de ruido ambiental o microtemblores entre agosto de 2006 a junio de 2007 en las estaciones acelerograficas del SNET y UCA. Los registros obtenidos fueron seleccionados previo a su procesamiento en base a la forma de las trazas obtenidas. Si estas mostraban contaminación producida por ruido eléctrico o demasiado ruido producido por tráfico, las señales se clasificaron como “no aceptables”, en caso contrario se clasificaban como “aceptables” y se usaron para la determinación del

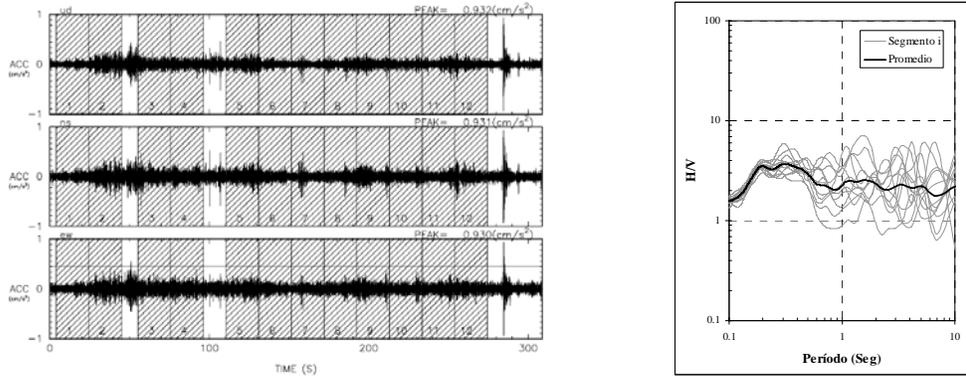
período predominante del sitio. En la Tabla 5.1 se indican las mediciones que fueron descartadas por presentar ruido eléctrico o exceso de ruido por tráfico.

5.4.1. Procesamiento de registros.

Los registros obtenidos fueron agrupados como se explicó en la sección anterior y se utilizó la técnica de Nakamura (1989) para calcular la relación espectral H/V , relación que fue utilizada por su bajo costo, por su no dependencia de una referencia y por la ausencia de constricciones de tiempo y lugar para efectuar las mediciones (Bard, 1999; Rodríguez y Mirodikawa, 2003). Tal como se explicó en el capítulo 4, en dicha relación (repetida aquí por conveniencia) H es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las dos componentes horizontales, la norte-sur (NS) y la este-oeste (EW) y UD es la componente vertical del registro, así:

$$\frac{H}{V} = \frac{\sqrt{NS^2 + EW^2}}{UD} \quad (\text{Ec. 5-1})$$

Para dicho cálculo, se utilizó el programa MICPLOT elaborado por el profesor Kentaro Motoki del Instituto Tecnológico de Tokyo (Motoki, 2006). Se consideraron únicamente las porciones de cada registro que no contenían “ruido”, entendiéndose como “ruido” a la porción del registro cuya amplitud es mayor a 5 veces el promedio de las amplitudes de todo el registro. Se subdividió el registro resultante en segmentos de 20.48 seg (zonas sombreadas y numeradas de la Figura 5.11a), con las cuales se obtuvieron los espectros de Fourier. Estudios recientes realizados por Parolai y Galiana-Merino (2006) indican que el ruido no afecta significativamente el cálculo de la relación espectral, por lo que se consideró que el “ruido” remanente después de la selección de los segmentos no influiría considerablemente en los resultados. Para corroborar lo anterior se calcularon las relaciones espectrales H/V variando el nivel que se consideró para determinar el “ruido”. Los resultados (no mostrados aquí) indican una variación mínima en la frecuencia predominante obtenida. Los espectros de Fourier se suavizaron utilizan-



a) Segmentos seleccionados

b) Relaciones H/V

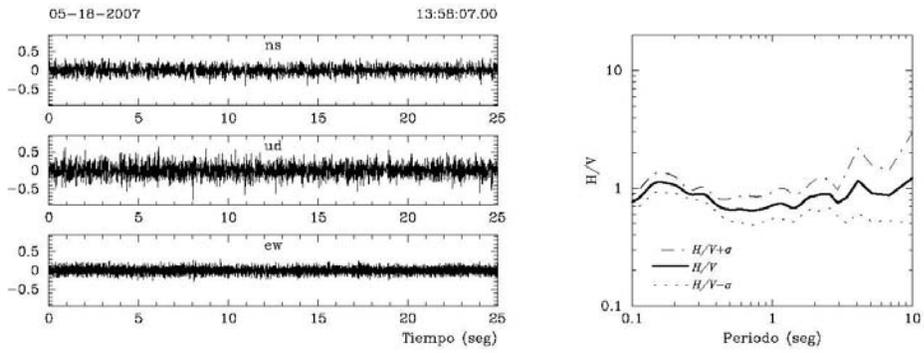
Figura 5.11. Trazas de una señal de microtrepidaciones y relación H/V para la estación UCA.

do un filtro logarítmico tipo Parzen (Konno y Ohmashi, 1998) para apreciar de forma más clara la relación espectral, facilitar la lectura de las frecuencias pico y evitar inestabilidades numéricas (Bindi et. al., 2000) razones por las cuales es recomendado por varios autores (Bard, 1999; SESAME, 2004). Las relaciones H/V se determinaron calculando el promedio de todas las ventanas (ver Figura 5.11b).

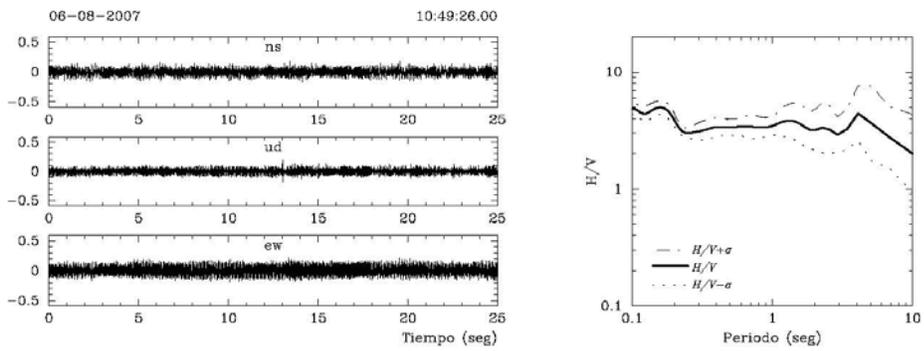
5.4.2. Resultados obtenidos.

En la Figura 5.12 se muestran los resultados obtenidos para CSBR, UPAN y ULLB considerados como “no aceptables”. En el panel izquierdo de dicha figura se muestran las trazas de las tres componentes de las aceleraciones medidas (NS, EW y UD) y en el panel derecho se colocaron las relaciones espectrales para cada caso incluyendo la media, la media más la desviación estandar y la media menos la desviación estandar.

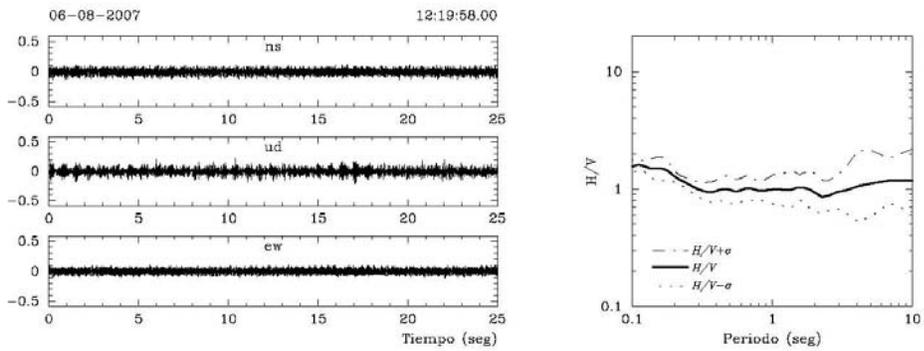
Los resultados para las estaciones UCA, VDU y ST se muestran en la Figura 5.13 y son considerados “aceptables” para ser utilizados debido a que las trazas de las aceleraciones registradas no fueron contaminadas con ruido eléctrico. Fueron obtenidos a campo abierto fuera del alcance de cualquier tipo de interferencia. Las trazas de H/V muestran un patrón distinto al caso anterior (no hay deamplificación). La Figura 5.14 muestra los resultados obtenidos en distintas estaciones.



a) Hospital San Rafael, CSBR

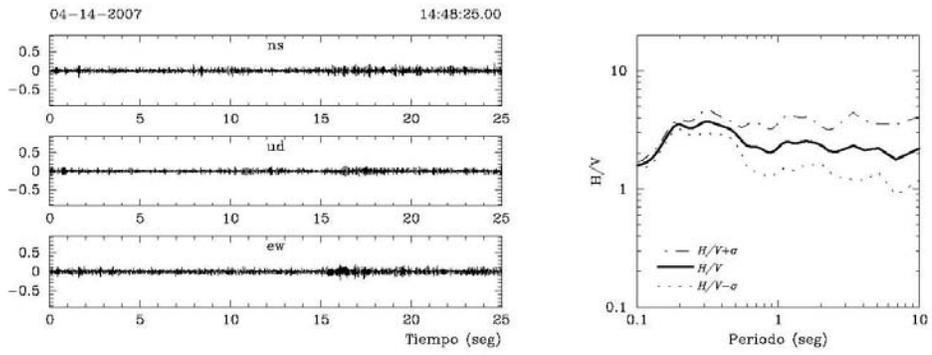


b) Unidad de Salud de Panchimalco, UPAN

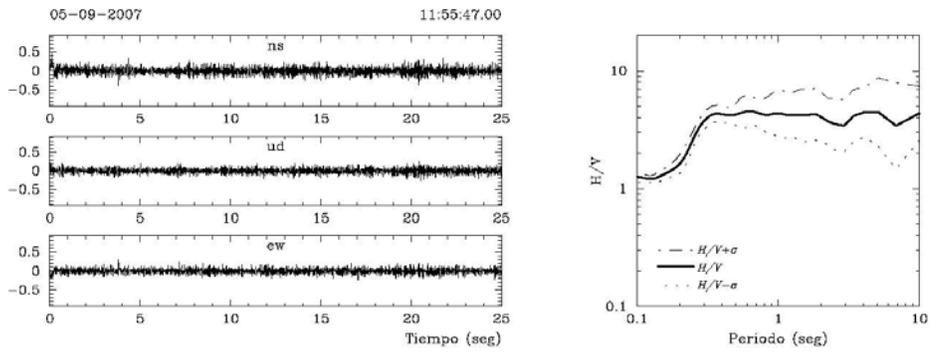


c) Unidad de Salud de La Libertad, ULLB

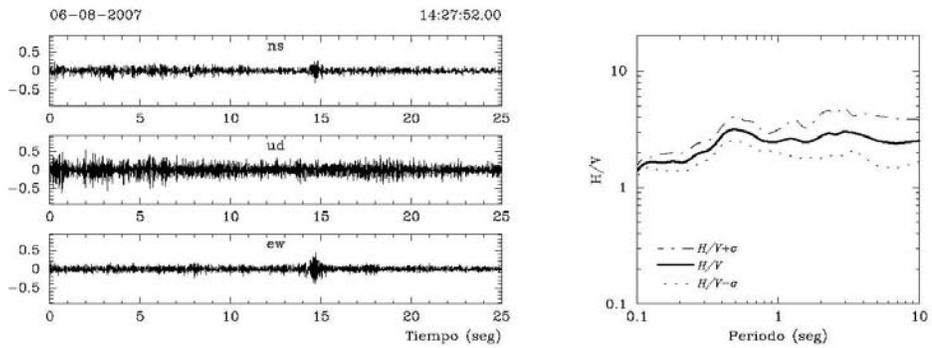
Figura 5.12. Señales “no aceptables” de microtrepidaciones con su correspondiente relación espectral H/V .



a) Universidad Centroamericana, UCA



b) Viveros DUA, VDU



c) Iglesia Concepción, ST

Figura 5.13. Señales “aceptables” de microtrepidaciones con su correspondiente relación espectral H/V.

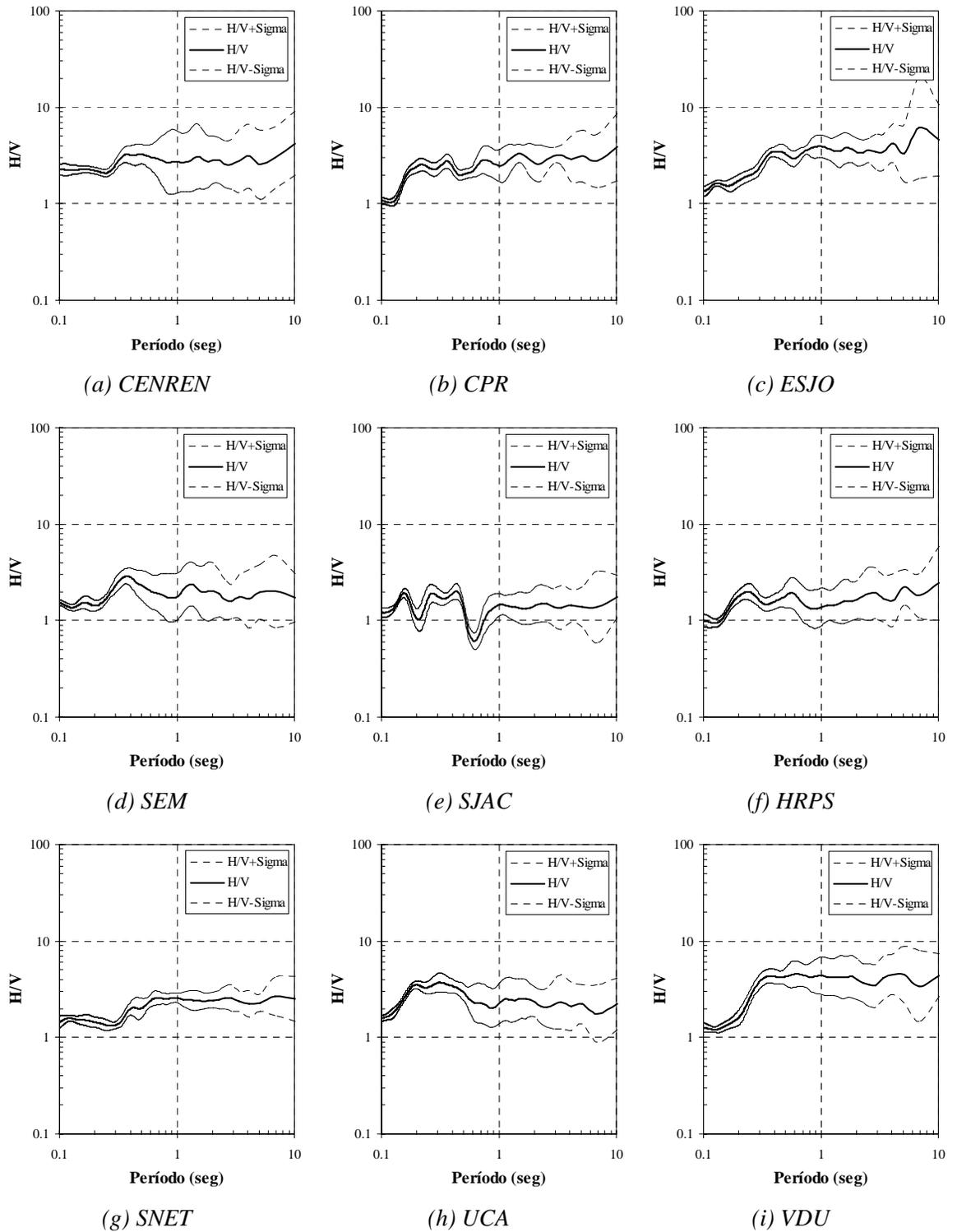


Figura 5.14. Función de tranferencia para diferentes sitios obtenidos utilizando el método de Nakamura (1989).

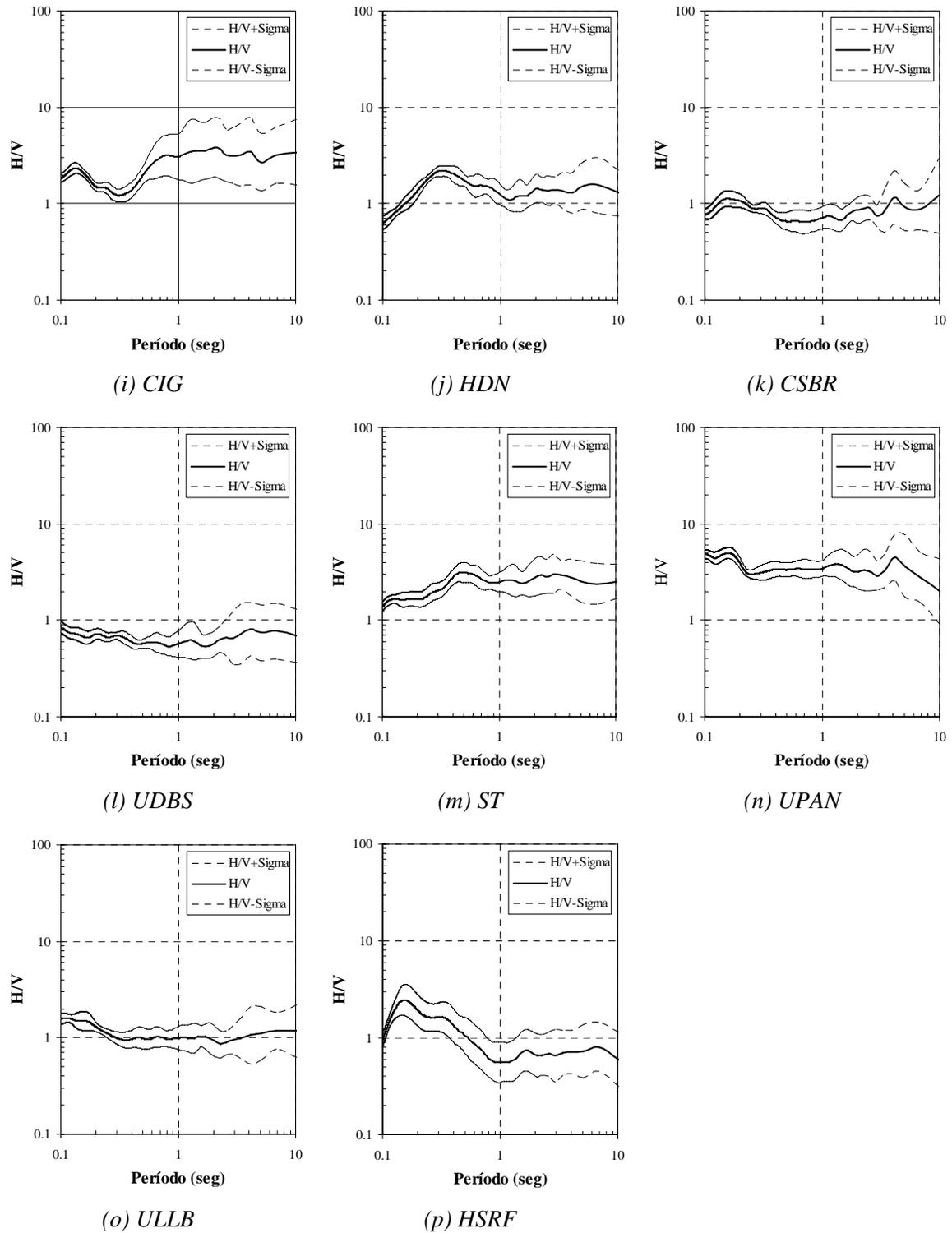


Figura 5.14. Función de tranferencia para diferentes sitios obtenidos utilizando el método de Nakamura (1989) (cont).

Del análisis anterior, se determinaron las frecuencias predominantes en cada sitio donde se tenían registros aceptables (ver Tabla 5.2). En las estaciones CPR, ESJO, SJAC, UCA, CIG y ST puede apreciarse más de un período en las gráficas de las funciones de transferencia.

Tabla 5.2. Períodos predominante en cada estación.

| Sitio | Código | Período (seg) | Espesor de Tierra Blanca (m) |
|---|--------|------------------|------------------------------|
| Hospital San Rafael | HSRF | | N/A |
| CENREN | CENREN | 0.35 | 6-9 |
| Casa Presidencial | CPR | 0.20, 0.35 | 3-6 |
| Externado de San José | ESJO | 0.12, 0.40 | 3-6 |
| Seminario San José de la Montaña | SEM | 0.35 | 3-6 |
| Parque Saburo Hirao | SJAC | 0.15, 0.28, 0.40 | 3-6 |
| Parqueo Hotel Radisson | HRPS | 0.20 | 3-6 |
| Secretaría Nacional de Estudios Territoriales | SNET | 0.40 | 6-9 |
| Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas” | UCA | 0.20, 0.30 | 3-6 |
| Centro de Investigaciones Geotécnicas | CIG | 0.13, 0.80 | 3-6 |
| Viveros de DUA | VDU | 0.38 | 3-6 |
| Hogar del Niño | HDN | 0.30 | 6-9 |
| Santa Tecla (Iglesia Concepción) | ST | 0.1, 0.40 | N/A |

5.4.3. Efectos de sitio basados en la observación de movimiento fuerte.

a) Método Híbrido (Salazar, 2004)

Al analizar las componentes NS, EW y UD de las trazas de las estaciones UPAN y ULLB de la Figura 5.13, se observa que las señales fueron contaminadas con ruido causado por la presencia de aparatos eléctricos en el interior de las instalaciones donde se realizaron las mediciones, esto provocó que los factores de amplificación obtenidos con este tipo de registros no se ajustaran a los resultados esperados en dichas estaciones. Por ejemplo, en la estación CSBR por su cercanía al Lago de Ilopango, los espesores de sedimentos determinados por Schmidt-Thomé (1975)

son mayores de 25 m. Con dichos espesores se esperarían amplificaciones a lo largo de un amplio rango de períodos (altos períodos), sin embargo, los resultados mostrados en la figura indican una deamplificación a lo largo de todo el rango de frecuencias estudiado.

De los resultados presentados en la figuras 5.12 y 5.13 se puede apreciar que el ruido causado por la presencia de aparatos eléctricos afecta considerablemente los resultados obtenidos. Por su estabilidad, los microtemblores han sido utilizados para obtener información sobre el medio que atraviesan las ondas que los componen (Moreno y Alfaro, 2000), principalmente ondas Rayleigh y S (Aki, 1957). El contenido frecuencial de un microtemblor en un sitio esta relacionado con el espesor y el tipo de suelo. Así, en sitios donde las estructuras geológicas sean profundas (por ejemplo en CSBR), se espera que un amplio rango de períodos se amplifique (en especial los largos períodos), como se observa en la estación CSBR de la Figura 5.15 (en esta figura DB es la estacion UDDBS y RS es CPR). Dicha figura muestra la función de tranferencia esperada en varios sitios obtenida por Salazar (2004) determinada utilizando la técnica de inversión híbrida y datos de movimiento fuerte.

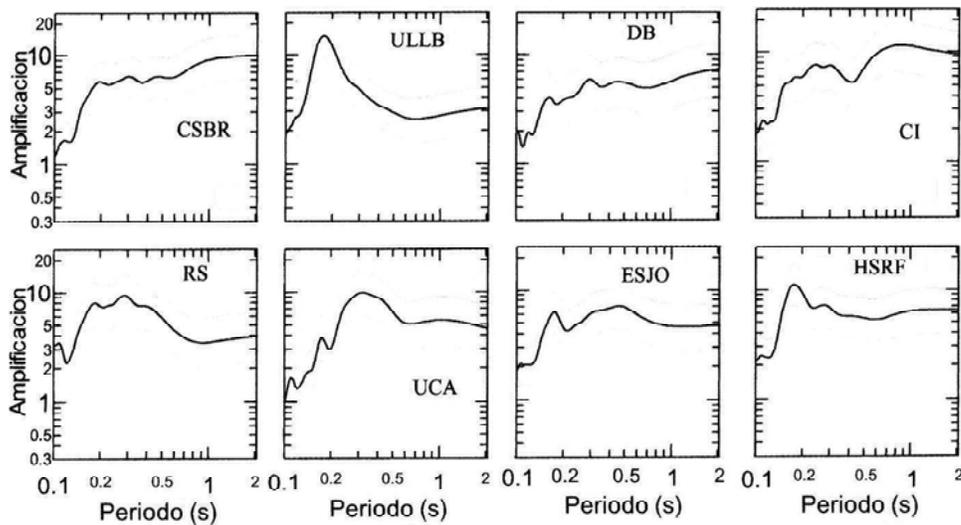


Figura 5.15. Espectros de amplificación de sitio obtenidos utilizando el Método de Inversión Híbrida (Modificada de Salazar, 2004).

Por otra parte, se ha observado una correlación entre el espesor de Tierra Blanca con los períodos picos y factores de amplificación. Así, en sitios con espesores entre 3 y 6 m períodos de 0.28 seg y en sitios con espesores mayores a 25 m se observan períodos mayores (Salazar et. al., 2007). La Figura 5.16 muestra los espesores de tierra blanca en el AMSS con la ubicación de las estaciones donde se realizaron mediciones (Schmidt-Thomé, 1975). Tal como lo indica Salazar et. al., para el análisis de lo anterior es necesario tener en cuenta que el período determinando no excluye la presencia de otras estructuras geológicas.

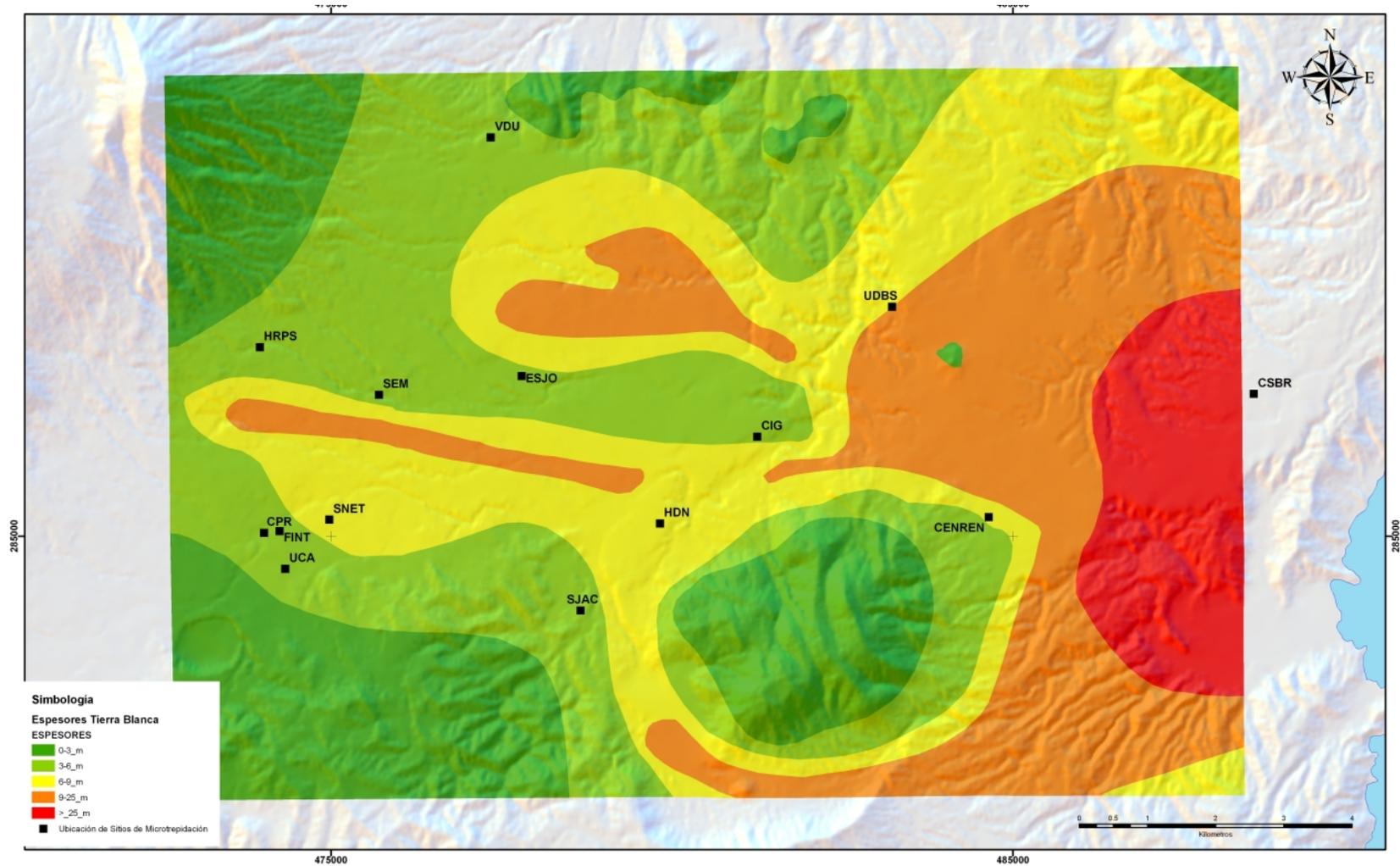


Figura 5.16. Espesores de tierra blanca en el Área Metropolitana de San Salvador (Modificado de Schmidt-Thomé, 1975).

La respuesta de capas observada en la estación CSBR y UDBS (ver Figura 5.14) muestra amplificación nula a lo largo de todo el rango de períodos estudiado contrario a lo obtenido con datos de movimiento fuerte por lo que se concluye que dichas mediciones fueron afectadas por ruido eléctrico.

En el caso de la Unidad de Salud de La Libertad (ULLB) los resultados obtenidos muestran nuevamente la influencia del ruido eléctrico en la señal lo cual provoca que no exista amplificación en todo el rango de frecuencias de interés. Dicho comportamiento es diferente al pico que se ilustra en el espectro de amplificación obtenido con datos de movimiento fuerte en la misma estación (ver Figura 5.15).

Para las estaciones CIG, CPR, UCA, ESJO y HSRF los resultados obtenidos por medio de las microtrepidaciones muestran una buena correlación con los datos obtenidos con el método de Inversión Híbrida. El porcentaje de variación en el período fundamental en los resultados varía entre 0% para las estaciones ESJO y CI a 20% para la estación HSRF.

Los valores de amplificación obtenidos con datos de ruido ambiental y con datos de movimiento fuerte no concuerdan entre sí en ninguna de las estaciones.

b) Método de relación espectral H_s/H_r (Borcherdt, 1970)

Como método alternativo se empleó el Borcherdt (1970) para corroborar el período predominante en las estaciones en donde no se realizó el análisis con el método híbrido. Por tanto, se consideraron únicamente dos estaciones, a saber, SNET y SJAC. Debido a que se contaba con información suficiente para hacer el análisis se trabajó también la estación CPR (además, esta última se comprobó con Galdámez y Kattan, 2007). Para este análisis se consideraron sólo los terremotos de subducción que hubieran sido registrados en las estaciones mencionadas anteriormente y en UPAN que se consideró como la referencia para el método.

La Tabla 5.3 muestra una lista de los sismos considerados en este análisis así como las estaciones que los registraron y en la Figura 5.17 se muestran los resultados obtenidos en donde se puede observar que para la estación SNET el período obtenido fue de 0.22 seg el cual no coincide con el obtenido por el método de microtrepidaciones, para SJAC fue de 0.16 seg el cual es 6% menor que el obtenido y para CPR fue de 0.22 seg que tiene una diferencia del 10% (ver Tabla 5.2). La diferencia en las estaciones en SJAC y CPR son pequeñas, sin embargo, en SNET se obtuvo una diferencia considerable entre uno y otro método la cual puede deberse a que no hay suficientes registros que hayan sido registrados en la estación de referencia; además, las distancias entre las dos estaciones (sitio y referencia) no sean lo suficientemente pequeñas para poder despreciar el efecto del trayecto.

Tabla 5.3. Terremotos utilizados en el método de Borchardt (1970).

| No | Fecha | Hora GMT | Latitud (°) | Longitud (°) | Prof. | Magnitud | | Estación |
|----|----------|----------|-------------|--------------|-------|----------|-----|----------------------|
| | | | | | | MI | Ms | |
| 1 | 1/13/01 | 17:35:52 | 13.049 | -88.660 | 60.0 | - | 7.8 | ST |
| 2 | 12/13/04 | 15:23:42 | 13.243 | -89.778 | 54.8 | 5.9 | - | SNET, SJAC, CPR, SEM |
| 3 | 10/7/05 | 17:42:59 | 13.091 | -89.681 | 32.1 | 5.9 | - | SNET, SJAC, CPR |
| 4 | 11/18/05 | 3:15:49 | 13.281 | -89.310 | 77.1 | 5.7 | - | SNET, SJAC, CPR, SEM |

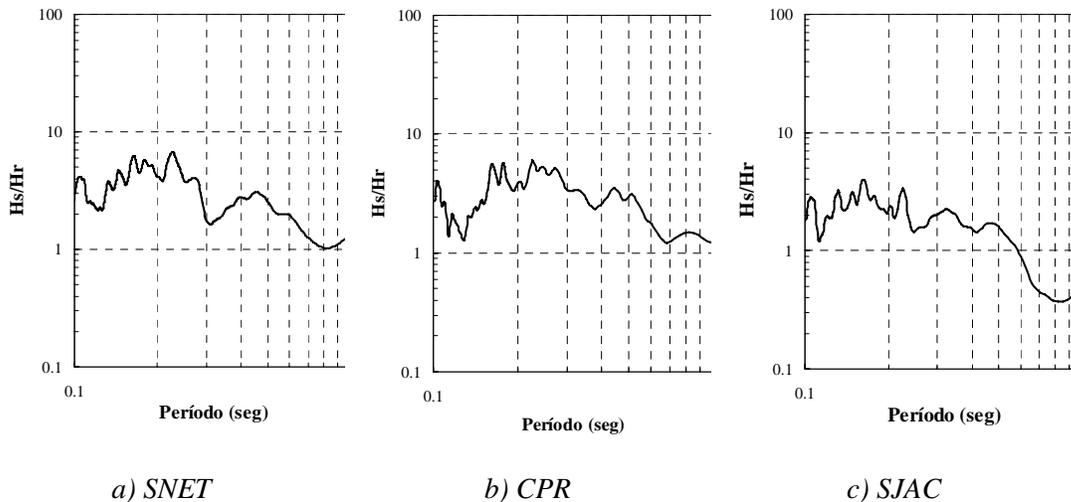


Figura 5.17. Función de tranferencia para diferentes sitios obtenidos utilizando el método de Borchardt (1970).

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones.

- La técnica de medición a través de la sísmica de refracción se ve fuertemente afectada por las condiciones de ruido producido por el tráfico vehicular, impidiendo realizar las lecturas de los tiempos de arribo de las fases sísmicas de forma clara y precisa debido a que la señal sísmica generada por los golpes de la almádana no es suficientemente fuerte para sobrepasar el ruido de fondo y registrarse en los geófonos.
- Los resultados obtenidos de los arreglos sísmicos de microtrepidación no concuerdan con los perfiles de velocidades de las perforaciones realizadas por el Consorzio ITALTEKNA ni con la información obtenida de los pozos a cielo abierto. Sin embargo, los mismos no deben considerarse concluyentes para no aplicar la técnica en otros sitios, ya que la información para realizar la comparación ha sido limitada.
- La técnica de medición a través de los arreglos sísmicos de microtrepidación puede ser utilizada para determinar perfiles de velocidad de ondas de corte siempre y cuando se cumpla lo siguiente: bajo tráfico vehicular en los alrededores del arreglo, disponibilidad de espacio para configurar un arreglo que permita obtener información de los estratos a mayor profundidad.
- La técnica de medición a través de microtrepidación permite la obtención de datos de forma ágil y en espacios reducidos. Sin embargo, es necesario que el ruido cultural producido por tráfico vehicular, equipo industrial, paso de personas, sea mínimo.

- Las tres técnicas deben realizarse con la polarización adecuada, evitando la interacción cercana de equipos o dispositivos que funcionen con corriente alterna, con el propósito de evitar el ruido eléctrico en los registros.
- El método de microtrepidaciones puede ser utilizado en aquellos sitios en donde el periodo predominante esté bien definido (pico predominante), siendo congruente con sitios que presentan un alto contraste de impedancia (diferencia significativa entre los valores de velocidad de onda de corte entre dos estratos sucesivos).

De acuerdo con el Prof. Kentaro Motoki del Instituto Tecnológico de Tokio, la relación señal/ruido del amplificador utilizado no es muy alto en el rango de periodos en el que la amplitud es baja, asimismo la amplitud observada de los microtemblores en el AMSSS es baja en el rango de periodos largos, por lo que se deberá prestar atención especial a los sitios en los que se esperaría un periodo predominante en dicho rango. Alternativamente, las técnicas de sismica de refracción y arreglos sísmicos de microtrepidaciones podrían complementar la información recolectada por medio de microtrepidación.

- Los valores de amplificación obtenidos con base en los registros de los sitios estudiados discrepan de los obtenidos a través de los registros de movimiento fuerte. No obstante, para los periodos predominantes si existe concordancia.

6.2. Recomendaciones.

- En vista que no se tuvo acceso a los manuales del usuario de los instrumentos empleados en esta etapa del proyecto, se recomienda solicitarlos al fabricante de los equipos, traducidos al inglés.

- Realizar las mediciones durante periodos del día de bajo ruido cultural, siempre y cuando se garantice la seguridad del personal y de los equipos de medición.
- Polarizar adecuadamente el digitalizador y no emplear adaptadores de voltaje para evitar la contaminación de la señal con ruido eléctrico.
- En aquellos sitios en los cuales se esperarían periodos predominantes en el rango de periodos largos, se recomienda complementar la microtrepidación con los métodos de sísmica de refracción y arreglos sísmicos de microtrepidación.
- En los sitios en donde se han realizado mediciones puntuales debería considerarse la alternativa de densificar las mediciones en las cercanías de dichos sitios con el propósito de obtener una muestra representativa que permita analizar el comportamiento de la amplificación. Este parámetro en combinación con los periodos predominantes son fundamentales para una microzonificación sísmica.
- Una siguiente etapa de este proyecto, podría considerar la continuación de las mediciones de microtrepidación en el contexto de una microzonificación sísmica sistemática en las principales ciudades de El Salvador, requiriendo para ello la adquisición de al menos dos equipos triaxiales con sus respectivos amplificadores con el propósito de poder realizar mediciones en periodos de tiempo cortos que permitan una suficiente densidad de puntos de medición útiles para una microzonificación sísmica.

REFERENCIAS

Aki, K. (1957). "Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves with Special Reference to Microtremors". *Bull. Earthq. Res. Int.* Tokyo Univ., **35**, pp 415-457

Atakan, K. (1997) "Empirical Site Response Studies in Central America: Present Status". *Proceedings of the Seminar on Assessment and Mitigation of Seismic Risk in the Central American Area*. San Salvador, El Salvador, pp 77-88.

Atakan, K., R. Torres (1993). "Local Site Response in San Salvador, El Salvador. Based on the October 10, 1986 Earthquake". *Reduction of Natural Disaster in Central America*, Report No. 6, Norway.

Base de Datos Sísmicos del Servicio Nacional de Estudios Territoriales (2007), El Salvador.

Bard, P.Y. (1999). "Microtremor Measurements: A Tool for Site Estimation?" *The effect of Surface Geology on Seismic Motion on Proceedings of The Seconds International Sumposium on The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*. Yokohama, Japon, 1998.

Benito, B., P. Hasbún, J. Cepeda, D. Hernández, C. Pullinger, G. Marroquín, J. Martínez-Díaz (2005). "Caracterización del Movimiento del Suelo y sus efectos en la Infraestructura durante los Terremotos del 2001, El Salvador", ISBN 99923-868-00.

Bindi, D., S. Parolai, D. Spallarossa y M. Cattaneo (2000). "Site Effects by H/V Ratio: Comparisson of Two Different Procedures". *J. Earthquake Eng.*, **4**, pp 97-113.

Consorzio Salvador E. ITALTEKNA ITALCONSULT (1988) “San Salvador Programa di Ricostruzione”. Ministero Degli Affari Esteri, Direzione Generale per la Cooperazione Allo Sviluppo, Italia.

Flores Estrella, H., J. Aguirre González (2003). “SPAC: An Alternative Method to Estimate Earthquake Site Effects in Mexico City”. *Geofísica Internacional*, **42**, pp 227-236.

Galdámez, C. y C. Kattan (2007) “Estudio de respuesta de capas superficiales de suelo en el Área Metropolitana de San Salvador”. Tesis para optar al grado en ingeniero civil de la Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”, San Salvador, El Salvador.

Guegón, P., J.L. Ghatelain y B. Guillier (1997). “Microzonage de Quito (Equateur)”. *Rapport ORSTOM*, Escuela Politécnica de Quito.

Hernández, W. (2004), “Características geomecánicas y vulcanológicas de las tefras Tierra Blanca Joven de la caldera de Ilopango, El Salvador”, Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Madrid.

Ingvarsson, M., y J. Johansson (1996) “Amplification of Earthquake Induced Ground Motion, San Salvador, El Salvador”. Tesis para optar al grado de Master en Ciencias del Instituto Real de Tecnología, Estocolmo.

Kobayashi, H., K. Seo y S. Midorikawa (1986) “Estimated Strong Ground Motions in the Mexico City Due to the Michoacan, Mexico Earthquake of September 19, 1985 Based on Characteristics of Microtremor”.

Konno, K. y T. Ohmachi (1998). “Ground-Motion Characteristics Estimated form Spectral Ratio Between Horizontal and Vertical Components of Microtremor”. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **88**, pp 228-241.

Moreno Jaramillo, L. y A. J. Alfaro Castilo (2000). “De los Microsismos a los Microtemblores”. *VII Congreso Colombiano de Geotécnica 2000 – Sociedad Colombiana de Geotécnica*, Colombia

Motoki, K. (2006) “Processing Microtremor Data”, Presentaciones preparadas para capacitación técnica en la Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”. Tokyo Institute of Technology, Japón.

Nakamura, Y. (1989). “A Method for Dynamics Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremor on the Ground Surface”. Quaterly Rept. R.T.R.I., Japón, **30**, pp 25-33

Navarro, M., F. J. Sánchez, A. M. Posadas, F. Luzón, T. Enomoto, I. Matsuda, F. Vidal y K. Seo (1998). “Microtremor Measurements and its Application to Seismic Microzoning of Almeria City, Southern Spain”. *11th European Conference on Earhquake Engineering*, Balkema, Rotterdam.

Panou, A.A., N. Theodulidis, P. Hatzidimitriou, K. Stylianidis y C. B. Papazachos (2005). “Ambient Noise Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio in Site Effects Estimation and Correlation with Seismic Damage Distribution in Urban Environment: The Case of the City of Thessaloniki (Northern Greece)”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **25**, pp 261-274.

Parolai, S. y J. J. Galiana-Merino (2006). “Effect of Transient Seismic Noise on Estimates of H/V Spectral Ratios”. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **96**, pp 228-236.

Reyes, J. y M. Sorto (2007). “Mediciones y análisis de microsismos en la ciudad de Santa Tecla”. Tesis para optar al grado en ingeniero civil de la Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”, San Salvador, El Salvador.

Rodríguez, V., S. Mirodikawa (2003). “Comparisson of Spectral Ratio Techniques for Estimation of Site Effects Using Microtremor Data and Earthquake Motions Recorded at the Surface and in Borehole”. *Earthquake Engng. Struc. Dyn.*, **32**, pp 1691-1714.

Salazar, W. (2004). “Evaluation of Source, Path, and Site Effects on Earthquake Ground Motion using an Inversion Technique for Subduction and Upper-Crustal Earthquakes in El Salvador, Central America”. Tesis de posgrado para optar al grado de Doctor en Filosofía del Instituto Tecnológico de Tokio, Japón.

Salazar, W., V. Sardina y J. Cortina (2007). “A Hybrid Inversion Technique for the Evaluation of Source, Path, and Site Effects Employing S-Wave Spectra for Subduction and Upper-Crustal Earthquakes in El Salvador”. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **97**, pp 208-221.

Schmit-Thomé, M. (1975). “The Geology in the San Salvador Area (El Salvador, Central America): A Basis for City Development and Planning”. *Geol. Jarbuch*, **13**, pp 207-228.

Seo K. (1999a). Joint Study on Seismic Microzonation in Granada, Spain. Granada, España.

Seo K., (1999b). “Application of Microtremors to Earthquake Engineering – Lesson Learned From Recent Joint Researches-” on *Joint Study in Seismic Microzonation in Granada Basin, Spain 1999*. International Scientific Research Project No. 07044136.

SESAME (2004). “Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibration: Measurements Processing and Interpretation” WP02, http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/Delivrables/Del-D23-HV_User_Guidelines.pdf

Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET). (1994) Información de los estudios de campo realizados para la actualización de la Reglamento de Diseño Sísmico de El Salvador, San Salvador.

Sokolov V. Y., C.H. Loh, W.Y. Jean (2007). “Application of Horizontal-to-Vertical (H/V) Fourier Spectral Ratio for Analysis of Site Effect on Rock (NEHRP-Class B) Sites in Taiwan”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **27**, pp 314-323.

Teves-Costa, P. y L. Senos (1996). “Natural Frequency of the Alluvian Deposits in the Lower Tagus Valley”. *Xth World Conf. Earthq. Engng.*, Acapulco, **739**, Elsevier Science Ltd.

Wiesemann, G. (1975), “Remarks on the geologic Structure of the Republic of El Salvador, Central America”, *Mitt Geol.-Paläont. Inst. Univ. Hamburg*, **44**, pp 557-574. Hamburg.

Zaslavsky, Y., A. Shapira, A.A. Arzi (2000). “Amplification Effects from Earthquake and Ambient Noise in the Dead Sea Rift (Israel)”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **20**, No. 1-4, pp 187-207.