

*Caracterización del movimiento del suelo
y sus efectos en la infraestructura
durante los terremotos del 2001, El Salvador*

Primera Edición

Los autores:

María Belén Benito (Universidad Politécnica de Madrid)
Patricia de Hasbun (“Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”)
José Cepeda (“Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”)
Douglas Hernández (Servicio Nacional de Estudios Territoriales)
Carlos Pullinger (Servicio Nacional de Estudios Territoriales)
Griselda Marroquín (Servicio Nacional de Estudios Territoriales)
José Martínez Díaz (Universidad Complutense de Madrid)

*Caracterización del movimiento del suelo
y sus efectos en la infraestructura
durante los terremotos del 2001, El Salvador*

Primera Edición

Los editores darán consideración favorable a las solicitudes por escrito de autorización para reproducir o traducir parcial o totalmente este documento, con la correspondiente referencia a la fuente.

*Portada del documento
Fotografías del terremoto de 2001
Manuel López Menjivar Alcredo/Preliminary Reports and Annotated Images
from the El Salvador
Earthquakes of January 13th and February 13th, 2001/Earthquake Engineering
Research Institute*

*Derechos Reservados © 2005
primera edición por:
Universidad Politécnica de Madrid
Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”
Servicio Nacional de Estudios Territoriales institución adscrita al Ministerio de Medio
Ambiente y Recursos Naturales*

ISBN 99923-868-00

*Este documento se terminó de imprimir en octubre de 2005 en
Grafimedios
Esta edición consta de 1000 ejemplares
Diseño gráfico: Grafimedios
San Salvador, El Salvador, Centro América*

INDICE DE CAPÍTULOS

CAPÍTULO I	
Marco general del proyecto	7

CAPÍTULO II	
Caracterización de la sismicidad de 2001	13

CAPÍTULO III	
Caracterización del Movimiento Fuerte del Suelo Generado por Los Sismos de 2001	29

CAPÍTULO IV	
Estudios de los daños en las Estructuras Asociados a los Sismos de 2001	41

CAPÍTULO V	
Conclusiones, Lecciones Aprendidas y Recomendaciones	65

Referencias	71
-------------	----

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Mapa tectónico regional de Centro America	8
Figura 1.2 Principales terremotos ocurridos durante los siglos XX y XXI	9
Figura 1.3. Imagen RADAR-SRTM de El Salvador (cortesía de Propulsión Laboratory), con terremotos destructores históricos y epicentros instrumentales ($M > 2.5$, periodo 197-2001) del catálogo USGS-NEIC	10
Figura 1.4 Red sísmica y acelerográfica instalada previa a los sismos de 2001	11
Figura 1.5 Configuración actual de la red sísmica y acelerográfica.	12
Figura 2.1. Mapa de sismicidad de 2001, registrada y relocalizada por la Red Salvadoreña de periodo corto del SNET.	13
Figura 2.2 Relación entre magnitud de coda y magnitud momento obtenida para los eventos del subcatálogo de estudio.	14
Figura 2.3a Sismicidad de El Salvador después del sismo principal del 13 de enero hasta el 28 de Febrero, desplegada en ventanas de una semana de duración (Magnitud Mw 3.0).	16
Figura 2.3b Sismicidad de El Salvador para el periodo 29 de Marzo a 15 de Junio.	17
Figura 2.4a Representación del plano de falla para el evento del 13 de enero Ms 7.8, ajustado con la secuencia de réplicas de los primeros tres días, junto con la proyección en superficie de epicentros.	19

Figura 2.4b Representación del plano de falla para el evento del 13 de febrero Ms 6.5.	19
--	----

Figura 2.5a Histograma representando el número de sismos en función del tiempo para el periodo comprendido entre el 13 de enero y el 31 de marzo, diferenciando los sismos asociados a la subducción de los del eje volcánico.	20
--	----

Figura 2.5b Histograma representando el número de sismos en función del tiempo para el periodo comprendido entre el 1 de abril y el 30 de junio	21
---	----

Figura 2.6 Distribución logarítmica de las series temporales de subducción y cadena volcánica desde el 13 de enero hasta el 31 de diciembre de 2001	22
---	----

Figura 2.7. Ajustes de la ley de Omori:	
a) para la serie total de réplicas del 13 de enero (Seis meses).	
b) para el periodo comprendido entre el 13 de enero y el 13 de febrero.	
c) para la totalidad de las réplicas del 13 de febrero.	
d) para el periodo comprendido entre el 13 de febrero y el 8 de mayo.	22

Figura 2.8. Ajustes a la ley Gutenberg-Richter obtenidos para las series de réplicas de los sismos del 13 de enero y del 13 de febrero de 2001.	23
---	----

Figura 2.9 Distribución Magnitud-Profundidad para las secuencias sísmicas del 13 de enero y 13 de febrero.	23
--	----

Figura 2.10 Transferencia de esfuerzos de Coulomb generados por el terremoto de subducción del 13 de enero	25
--	----

Figura 2.11 Transferencia de esfuerzos de Coulomb generados por el terremoto del 13 de febrero.	25
---	----

Figura 2.12 Evolución temporal de los sismos importantes ocurridos en El Salvador desde 1900 hasta el 2001, mostrando las magnitudes reportadas en función del tiempo tanto para sismos de cadena volcánica como para los de subducción	26
---	----

Figura 2.13 Figura 5. A: Modelo en planta de la transferencia de esfuerzos de Coulomb (CFS) inducido por el terremoto de 1982 sobre la ZFES. B: Modelo conjunto en planta de la transferencia de CFS inducida por los eventos de 1982, y enero de 2001 sobre la ZFES para una profundidad de 10 km. C. Modelo de CFS generado únicamente por el sismo del 13 de febrero, con representación de otros eventos locales ocurridos posteriormente. D. Modelo conjunto de CFS generado por los eventos de 2001 en la cross-section aa'' de la figura 5B. E. Modelo conjunto del CFS generado por los eventos principales de 1982, 1986 y 2001.	27
---	----

Figura 2.14 Figura 2.14. A) Secuencia de réplicas del 13 de febrero de 2001 (Mw 6.6) proyectada sobre la imagen RADAR de la Zona de Falla de El Salvador (ZFES).	28
--	----

Figura 3.1. Mapa de El Salvador con epicentros de eventos que produjeron registros de movimientos fuertes durante 2001 y las correspondientes estaciones de registro	30
--	----

Figura 3.2. Distribución magnitud-distancia para (A) registros de sismos de subducción y (B) registros de sismos de corteza superficial.	32
--	----

Figura 3.3. Historias temporales de aceleración, velocidad y desplazamiento en la dirección Norte-Sur obtenidas del procesamiento de una selección de registros para el sismo del 13 de enero de 2001. Adaptado de López Casado et al. (2001).	34
--	----

Figura 3.4. Historias temporales de aceleración, velocidad y desplazamiento en la dirección Norte-Sur obtenidas del procesamiento de una selección de registros para el sismo del 13 de febrero de 2001. Adaptado de López Casado et al. (2001).	34
--	----

Figura 3.5. Espectros de respuesta de pseudo-velocidad para registros de los sismos del 13 de enero (línea continua) y del 13 de febrero (línea discontinua) correspondientes a la componente Norte-Sur del movimiento, con amortiguamiento crítico del 5%.	35
---	----

Figura 3.6. Atenuación de sismos de subducción utilizando la ecuación 3.1 ajustada. Curvas comparativas de PGA vs. distancia a la ruptura para diferentes magnitudes y sitio clase D.	36
---	----

Figura 3.7. Atenuación de sismos de corteza superficial utilizando la ecuación 3.2 ajustada. Curvas comparativas de PGA vs. Distancia a la ruptura para diferentes magnitudes y sitio tipo suelo.	36
Figura 3.8. Comparación de ecuaciones de atenuación para sismos de subducción considerando un evento de magnitud 7.5.	37
Figura 3.9. Comparación de ecuaciones de atenuación para sismos de corteza superior considerando un evento de magnitud 6.5.	37
Figura 3.10. Distribución espacial de aceleración máxima horizontal para el terremoto del 13 de enero de 2001.	28
Figura 3.11. Distribución espacial de aceleración máxima horizontal para el terremoto del 13 de febrero de 2001.	38
Figura 4.1 Mapa por departamentos de la República de El Salvador.	39
Figura 4.2. Mapa de isosistas del sismo del 13 de enero de 2001.	40
Figura 4.3 Histograma del porcentaje de viviendas dañadas por departamento. Terremoto del 13 de Enero de 2001	42
Figura 4.4 Histograma del porcentaje de viviendas destruidas por Departamento. Terremoto del 13 de Enero de 2001	42
Figura 4.5 Histograma del porcentaje de edificios públicos dañados por Departamento. Terremoto del 13 de Enero de 2001	44
Figura 4.6 Histograma del porcentaje de iglesias dañadas por Departamento. Terremoto del 13 de Enero de 2001	45
Figura 4.7 Histograma del porcentaje de viviendas dañadas por Departamento. Terremoto del 13 de Febrero de 2001	45
Figura 4.8 Histograma del porcentaje de viviendas destruidas por departamento. Terremoto del 13 de Febrero de 2001	46
Figura 4.9 Mapa de porcentajes de viviendas urbanas (C1) que experimentan daño reparable (D1)	47
Figura 4.10 Mapa de porcentajes de viviendas urbanas (C1) que experimentan daño irreparable (D2)	52
Figura 4.11 Mapa de porcentajes de viviendas rurales (C2) que experimentan daño reparable (D1)	53
Figura 4. 12. Mapa de porcentajes de viviendas rurales (C2) que experimentan daño irreparable (D2)	53
Figura 4.13. Porcentaje de estructuras analizadas para cada sistema estructural, en función de su uso (descrito en la tabla 4.1).	56
Figura 4.14. Gráfica de porcentajes de daño para cada sistema estructural	
Figura 4.15 Relación entre el daño estructural y el no estructural experimentado por los diferentes sistemas estructurales.	57
Figura 4.16. Relación entre el daño severo y débil experimentado por los diferentes sistemas estructurales	57
Figura 4.17 Daño asignado a los sistemas estructurales clasificados con vulnerabilidad A, afectados por el terremoto del 13 de enero de 2001.	58
Figura 4.18 Daño asignado a los sistemas estructurales clasificados con vulnerabilidad D, afectados por el terremoto del 13 de enero de 2001	59
Figura 4.19 Mapa de zonificación sísmica de El Salvador. Norma de Diseño por Sismo del Reglamento para la Seguridad de las Construcciones, p.17.	60
Figura 4.20. Ejemplo de curvas de fragilidad para clases de vulnerabilidad A, B y C.	
a. Daño medio normalizado en función de aceleración pico efectiva (EPA)	
b. Probabilidad de daño $D > 2$, en función de la aceleración pico (PGA)	63

Figura 4.21. Ejemplo de aplicación de la teoría de la decisión. Representación conjunta de funciones de probabilidad de daño ligero (P1) y probabilidad de daño moderado + fuerte (P2), para la definición del valor umbral en el parámetro de movimiento	64
---	----

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Parámetros fuente de terremotos destructores en El Salvador a lo largo del siglo XX y comienzos de 2001.	9
Tabla 2.1a. Parámetros fuente y mecanismos focales para el sismo del 13 de enero de 2001, según diferentes Agencias y autores	15
Tabla 2.1b. Parámetros fuente y mecanismos focales para el sismo del 13 de Febrero de 2001, según diferentes Agencias y autores.	15
Tabla 2.2. Parámetros fuente para los sismos ocurridos durante el primer semestre de 2001 con magnitud M 4.5.	17
Tabla 3.1. Características de las estaciones acelerométricas.	30
Tabla 3.2. Geología de estaciones y número de registros por estación.	31
Tabla 3.3. Resumen de las características de la base de datos de 2001.	31
Tabla 3.4. Registros del sismo del 13 de enero de 2001. Valores pico.	33
Tabla 3.5. Registros del sismo del 13 de febrero de 2001. Valores pico.	33
Tabla 3.6. Coeficientes de regresión y desviaciones estándar en ecuaciones de atenuación para eventos de subducción intra-placa.	36
Tabla 3.7. Coeficientes de regresión y desviaciones estándar en ecuaciones de atenuación para eventos de corteza superficial.	36
Tabla 4.1 Valoración de daños, por departamentos, producidos por el sismo del 13 de enero de 2001 (Fuente: C.O.E.N. Datos al 28 de febrero de 2001)	43
Tabla 4.2 Porcentajes de Daño estimados con base al conjunto total de daños por departamento, para el sismo del 13 de enero de 2001.	43
Tabla 4.3 Valoración de daños, por departamentos, producidos por el sismo del 13 de Febrero de 2001 (Fuente: C.O.E.N. Datos al 4 de abril de 2001)	47
Tabla 4.4 Porcentajes de daño estimados en base al conjunto total de daños por departamento, para el sismo del 13 de Febrero	47
Tabla 4.5 a. Porcentajes de Daño por Municipios, originados por los dos sismos (13 de enero y 13 de febrero) en las clases rural y urbana.	
Tabla 4.5 b. (continuación)	
Tabla 4.5 c. (continuación)	
Tabla 4.5 d. (continuación)	51
Tabla 4.6. Clasificación de las estructuras en función de su uso, destacando el número de evaluaciones realizadas en cada clase.	54
Tabla 4. 7. Definición de clases y sub-clases de vulnerabilidad para la estructura de base de datos descrita, adaptando la escala EMS-98 a los sistemas estructurales existentes en el país.	54
Tabla 4.8. Sumario del número de estructuras disponibles en la base de datos de daños original, para cada clase de vulnerabilidad definida.	55
Tabla 4.9 Sumario de los datos de daño y sistemas estructurales contenidos en la base de datos depurada, a partir de la base original.	55

Prólogo

Los dos terremotos que tuvieron lugar en El Salvador, el 13 de enero y el 13 de febrero de 2001, dejaron un saldo de más de un mil víctimas mortales, un millón de damnificados equivalente al 20 por ciento de la población y un volumen de pérdidas y daños que ascendió a un 12% del Producto Interno Bruto (PIB), según datos de CEPAL.

La tragedia que vivió el país tuvo eco mundial, y provocó numerosos movimientos de ayuda y solidaridad, procedentes de distintas cooperaciones, entre ellas la española. En ese contexto se generó el proyecto, cuyo contenido y resultados se reflejan en la presente publicación.

Más allá de los aspectos técnicos y logísticos abordados, que serán contemplados en los capítulos sucesivos, deseo comenzar con algunas reflexiones, sobre si la catástrofe puede o no ser evitada; reflexiones que han marcado la orientación del proyecto. Las lecciones aprendidas, extraídas del mismo, deberán servir para la mitigación del riesgo futuro, ese ha sido y será el primer objetivo.

El terremoto es un fenómeno natural, pero el desastre no es natural. Este último se puede reducir su impacto con adecuadas medidas de planificación territorial y diseño sismorresistente de las construcciones.

Las políticas de prevención de daños deben surgir de la acción combinada de la comunidad científica y de las autoridades políticas y administrativas, y es de trascendental importancia la concienciación en esta línea de actuación, si se quiere lograr que los terremotos dejen de producir catástrofes como la que se vivió en El Salvador en el año 2001. La actuación pre-evento es posible, recomendable y aún más, es rentable. Evidentemente el mayor valor de esa actuación es la salvaguarda de vidas humanas, algo que no tiene precio, pero además, en términos económicos, la inversión que supone para un país adoptar medidas de diseño sismorresistente es considerablemente menor que el costo de

la reconstrucción, una vez ocurrido el sismo. La idea bien podría quedar resumida en: “Más vale prevenir que lamentar...”.

El impacto del terremoto es mayor, precisamente en los países menos desarrollados, donde aunque en términos absolutos el impacto económico pueda ser inferior al de otros países más industrializados, el porcentaje de pérdidas frente al PIB puede llegar a ser tremendamente elevado. Basta recordar los casos de los terremotos de Managua en 1972, Guatemala, 1976 y San Salvador en 1986. Esos fueron precisamente los 3 sismos con mayor porcentaje relativo de pérdidas entre 1970 y 1990, de todos los ocurridos en el mundo.

A pesar de este hecho, bien conocido por la comunidad sismológica, la concienciación política y social sobre las políticas preventivas es generalmente difícil, debido tal vez a que la memoria humana es más corta que el período de recurrencia del sismo. La sociedad en general es más propensa a volcar sus esfuerzos una vez ocurrido el terremoto, desatándose entonces, grandes movimientos de solidaridad y acciones desde todos los sectores que pueden aportar alguna ayuda.

Indudablemente eso es positivo, pero no hay que olvidar que las actuaciones a posteriori son ya de reconstrucción y reparación de pérdidas; y muchas de ellas podrían haberse evitado y otras, como las pérdidas humanas, son ya irrecuperables.

Los países más desarrollados tienen buena conciencia de todo ello y adoptan eficaces políticas preventivas. Es habitual ver cómo en Estados Unidos y Japón, terremotos de gran magnitud causan daños económicos que son relativamente superados con facilidad y con menores pérdidas humanas. Un ejemplo idóneo lo constituye el terremoto de Seattle (EEUU) el 17 de Febrero de 2001, 4 días después del segundo sismo destructor de ese año en El Salvador

y de similar magnitud (M 6.6). Aquel terremoto no causó ninguna víctima mortal, mientras que el de El Salvador dejó más de 300 muertos. Puede pensarse que sólo las economías fuertes tienen posibilidad de adoptar medidas de diseño que lleven a esa mitigación del daño, pero eso no es rigurosamente cierto. Hay muchas soluciones razonablemente económicas para el diseño sismorresistente que pueden practicarse, sin llegar al encarecimiento que suponen medidas más sofisticadas como las aplicadas en países más desarrollados. La cuestión es más bien de concienciación y de redistribución de fondos, invirtiendo más en una línea de prevención, lo cual supondrá un ahorro notablemente compensado en costo de reparación de pérdidas. Y evidentemente, más allá del ahorro estrictamente económico, el mayor beneficio será, sin duda, la protección de vidas humanas.

El presente proyecto, si bien surgió en una fase post-terremoto, ha pretendido ahondar en aspectos que permitan mejorar la caracterización del riesgo y adoptar políticas preventivas de daños en El Salvador, precisamente en el aprovechamiento e interpretación de la información generada durante los eventos de 2001. Se ha realizado un esfuerzo técnico que ha sido apoyado por las autoridades del país, con la financiación de Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI). Puede considerarse un buen ejemplo de esa acción combinada entre la comunidad científica, las autoridades políticas y la Cooperación Internacional, siendo deseable que como tal, se extendiera asegurando la línea de prevención y mitigación del riesgo sísmico y contribuyendo a esa concienciación, tan necesaria, para que el terremoto deje de ser una catástrofe, que en ningún caso es natural.

Dra. María Belén Benito – Universidad Politécnica de Madrid

Resumen

El presente documento contiene las actividades desarrolladas y los principales resultados obtenidos durante la ejecución del proyecto: **“Contribución a la renovación de la red acelerométrica de El Salvador. Estudio de los sismos de 2001 y sus efectos”**. Este proyecto fue financiado por la Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI) y ejecutado mediante convenio de colaboración con el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) y la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA). Por parte de España, el organismo participante ha sido la Universidad Politécnica de Madrid, la cual coordinó la parte técnica del proyecto.

Los objetivos específicos del proyecto se resumen en:

- Fortalecimiento de la Red acelerográfica de El Salvador a través de la adquisición de tres estaciones acelerométricas digitales, modelo Etna de Kinematics, Inc., que han contribuido a la renovación de la red existente en el SNET. Asimismo, en el marco de este proyecto, se han unificado las actividades de las diferentes redes existentes en el país, con el objeto de disponer de una red de cobertura nacional.
- Estudio de la intensa actividad sísmica registrada durante el año 2001, analizando todo lo referente a distribución espacial y temporal de los sismos ocurridos con diferente origen (subducción y cadena volcánica) y de sus posibles interacciones.
- Estudio del movimiento fuerte producido por los sismos de 2001.
- Análisis de los efectos producidos por los sismos en las construcciones.

Los objetivos descritos anteriormente fueron alcanzados a través de las actividades que se reflejan en los sucesivos Capítulos de la presente publicación. El objetivo global perseguido fue de profundizar en el conocimiento de la sismicidad que afecta a El Salvador, para mejorar las estimaciones de amenaza; así como optimizar las evaluaciones de daños para un mejor conocimiento de la vulnerabilidad de estructuras, a fin de extraer lecciones aprendidas que contribuyan a la mitigación del riesgo sísmico en la región Centroamericana.

Marco general del proyecto

INTRODUCCIÓN

El 13 de enero de 2001 un terremoto de magnitud de Ondas superficiales (Ms) 7.8 (NEIC-United States Geological Survey) afectó a todo el territorio salvadoreño. El terremoto se localizó con coordenadas 13.049° Norte, 88.660° Oeste y con una profundidad focal de 60 Km., situando su epicentro a unos 20 Km. de la costa central de El Salvador.

El proceso que generó el terremoto fue la interacción entre la placa de subducción Cocos y la placa del Caribe. Al terremoto principal le sucedieron una serie de más de 8 mil réplicas, de magnitudes hasta de M 5.7 durante el 2001.

Un mes después, el 13 de febrero, un segundo terremoto de magnitud Ms 6.5 en la escala de Richter ocurrió cerca de San Pedro Nonualco, a unos 30 Km. al Este de San Salvador. El terremoto se localizó con las coordenadas 13.671° Norte, 88.938° Oeste y una profundidad focal de 10 Km. Su epicentro se asoció a una serie de fallas de dirección Este-Oeste que atraviesan El Salvador con alineación paralela a la cadena volcánica.

El 17 de febrero de ese mismo año, un tercer terremoto de moderada magnitud (Mw) = 5.1 (CIG) ocurrió al sur del Área Metropolitana de San Salvador, localizándose con las coordenadas 13.682° Norte y 89.251° Oeste, también asociado a sistemas de fallas locales. En total, durante el año 2001 se registraron más de 12 mil sismos en El Salvador, entre eventos principales y réplicas, de los cuales, cerca de 750 fueron sentidos por la población.

Esta intensa actividad sísmica, además de causar la muerte de más de un mil 200 personas, destruyó cerca de 250 mil casas de habitación y dañó buena parte de la infraestructura; además de generar gran consternación tanto en El Salvador como en el ámbito centroamericano.

El Gobierno de España a través de la Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI) ofreció inmediatamente al Gobierno de El Salvador ayuda destinada a contribuir con el fortalecimiento de las capacidades de monitoreo e investigación científica de El

Salvador, específicamente para el área sísmológica.

A través de esta ayuda se genera el presente proyecto, en el cual participó personal de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas” (UCA) y el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET), apoyados por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) y por la propia AECI.

En esta publicación se presentan los resultados de los análisis realizados en relación con la crisis sísmica que afectó a El Salvador durante el año 2001; tanto en lo referente a la caracterización de la actividad sísmica como el movimiento fuerte; así también los efectos reportados en las construcciones.

Los contenidos del estudio han sido desarrollados por los distintos representantes del grupo de trabajo configurado para el proyecto, y se reflejan en la presente publicación ordenada en cinco capítulos. En ellos se desglosa la información recabada, los análisis realizados y los resultados obtenidos.

Tras el presente capítulo **introdutorio**, en el **capítulo II** se describe y analiza la actividad sísmica registrada en 2001, para lo cual se evaluó la distribución espacial y temporal de los sismos principales y sus réplicas, complementando este análisis con el modelo de transferencia de esfuerzos, para examinar posibles procesos de interacción entre las diferentes series sísmicas.

El **capítulo III** resume las características del terremoto principal registrado por las diferentes estaciones acelerométricas existentes en el país y, estudia la atenuación sísmica separando los escenarios de subducción y cadena volcánica, así como los posibles efectos locales debidos a las condiciones geológicas del territorio.

En el **capítulo IV** se estudian los efectos macrosísmicos asociados a los sismos del 13 de enero y 13 de febrero, para lo cual se evalúan los reportes de daños elaborados inmediatamente después de los principales sismos. También se trata de obtener una serie de conclusiones sobre la distribución

de los daños y el comportamiento de diferentes tipologías constructivas. Asimismo, se desprenden de este análisis recomendaciones para mejorar futuras evaluaciones de daño.

El capítulo V cierra la presente publicación, incluyendo una discusión general de los resultados obtenidos, conclusiones y lecciones aprendidas de este esfuerzo.

Finalmente se presenta un apartado de Referencias sobre la información manejada en el estudio.

ANTECEDENTES DE COOPERACION

A raíz del terremoto del 13 de enero de 2001 y respondiendo a una invitación del Departamento de Mecánica Estructural de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA), se configuró en España un grupo de trabajo, el cual se desplazó a El Salvador para asistir en la evaluación de los efectos del terremoto.

Este grupo estaba compuesto por especialistas en sismología, geotecnia e instrumentación sísmica de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Universidad Complutense de Madrid (UCM), Universidad de Granada, el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) y el Real Observatorio de la Armada en San Fernando (ROA).

Durante su estancia en El Salvador, los miembros del grupo antes mencionado contactaron con el MARN, el Comité de Emergencia Nacional (COEN) y el Centro de Investigaciones Geotécnicas (CIG) del Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano, para colaborar con las actividades de evaluación de daños y determinación de áreas de peligro por nuevos deslizamientos.

Al cabo de su estancia en El Salvador se discutió la posibilidad de formular y gestionar proyectos de cooperación científica y técnica, dirigidos hacia futuras investigaciones en los temas de sismología y deslizamientos.

Los resultados de las evaluaciones producto de la visita a El Salvador y los estudios

posteriores realizados fueron expuestos en el informe: “Estudio de la crisis sísmica de enero-febrero de 2001 en El Salvador. Asistencia Técnica Española” (Benito et al., 2001).

Inmediatamente después del terremoto del 13 de Febrero, el Gobierno de El Salvador gestionó ante el Gobierno de España, asistencia en los temas de vigilancia volcánica y sísmica. Ante esta petición AECEI contactó con miembros de la UPM para que propusieran proyectos de investigación en El Salvador, para ser implementados durante el año 2001. Tras la solicitud de AECEI, la UPM comenzó a gestionar la propuesta de un proyecto esencialmente sísmico, para lo que contactó con el CIG y el MARN (que entonces organizaba la creación de SNET), con objeto de tener conocimiento sobre las principales necesidades y preferencias de actuación en temas de riesgo sísmico en el país, así como de integrar a estas instituciones en el proyecto.

Considerando las necesidades de mejorar la red acelerográfica del CIG, que en el momento del terremoto constaba de 26 estaciones analógicas tipo SMA-1 de Kinometrics Inc. (de las cuales sólo funcionaron 19), por medio de la sustitución de equipos digitales, se consideró conveniente incluir la adquisición de, al menos tres equipos, dentro de las prestaciones del proyecto. Asimismo, se discutió la necesidad de estudiar a fondo los mecanismos y efectos de los terremotos del 2001, a fin de comprender lo ocurrido y recomendar acciones encaminadas a mitigar el riesgo de futuros terremotos. Así se configuraron los contenidos del proyecto, quedando por perfilar el grupo de trabajo y los organismos participantes.

Previo al inicio de las actividades contempladas, para su ejecución se consideró necesario involucrar al grupo del Departamento de Mecánica Estructural de la UCA, garantizando su participación formal por medio de un Adendum a la propuesta de proyecto. Quedó entonces definida la participación oficial del SNET y la UCA como contrapartes de El Salvador y la UPM como institución española encargada de la coordinación técnica del proyecto. El grupo de trabajo se configuró con los siguientes miembros: Carlos Pullinger y Douglas Hernández (SNET), Patricia Hasbún y José Cepeda (UCA) y Belén Benito (UPM).

La oportunidad de integrar la experiencia en el tema de ingeniería sísmica, surgida a partir de la cooperación que realizaron instituciones españolas después del terremoto de 1986 y la capacidad instrumental adquirida con la red instalada



Figura 1.1. Mapa tectónico regional de Centro América

por parte de la UCA, en adición a la experiencia y capacidad del CIG, se valoró como importante aporte al desarrollo de las investigaciones científicas programadas, encaminadas a comprender las amenazas naturales que afectan a El Salvador.

CONTEXTO REGIONAL E HISTÓRICO DE LA ZONA DE ESTUDIO

La actividad sísmica en El Salvador es producto de la interacción entre las placas de Cocos, Caribe y Norte América. En la figura 1.1 se presenta un mapa tectónico regional de la zona que ilustra los diferentes procesos existentes en el área.

En El Salvador estas interacciones producen varios subprocesos que son los causantes de la sismicidad que afecta al territorio. La interacción entre la placa de Cocos y la del Caribe produce dos zonas generadoras de sísmos. La primera zona sismogeneradora es donde se producen los terremotos de mayor magnitud ($M > 7$), tales como el sucedido el 13 de enero de 2001, ocurren en la placa de subducción (Placa de Coco)

y/o en la interfase entre ésta y la placa superior (Placa del Caribe).

Estos sísmos están asociados a rupturas de fallas normales o inversas que generan sísmos a lo largo de la costa salvadoreña y por debajo del territorio, hasta unos 200 Km. de profundidad. El movimiento relativo de placas, a razón de 8 cm es la causa de estos frecuentes terremotos que se generan a profundidades intermedias en la costa del Pacífico. Otros sísmos importantes ocurridos en la zona de subducción son similares a los del 7 de septiembre de 1915 ($M_S = 7.7$), 28 de Marzo de 1921 ($M_S = 7.4$), 21 de Mayo de 1932 ($M_S = 7.1$), y 19 de Junio de 1982 ($M = 7.3$).

La segunda zona sismogeneradora en El Salvador y responsable de la mayoría de sísmos destructores, como los ocurridos en 1986 y febrero del 2001, es un sistema de fallas que se extiende de Este a Oeste a lo largo de todo el territorio salvadoreño y paralelo a la cadena volcánica. Los sísmos que ocurren en esta franja son de magnitudes intermedias, no mayores de

M 6.8, pero de profundidades someras (5-20 Km.). Los terremotos de Chinameca, 1951, San Salvador, 1965, San Salvador, 1986 y San Vicente en febrero de 2001, asociados a esta zona, fueron generados por fallas transversales. Sin embargo, la evidencia de fallas superficiales también indica importantes movimientos verticales.

Estos terremotos de corteza superficial tienen origen tectónico, pero a menudo son llamados “eventos de cadena volcánica” debido a su proximidad al eje volcánico. Son sismos que contribuyen significativamente a la peligrosidad y riesgo sísmico en la región e históricamente han causado mayores daños que los grandes sismos de la zona de subducción, ya que sus epicentros suelen coincidir con núcleos de población (White and Harlow, 1993). Durante el siglo XX los terremotos produjeron destrucción en El Salvador en, al menos, 7 ocasiones y otras veces ocurrieron en enjambres de dos o tres eventos similares con una diferencia temporal de minutos u horas (Bommer et al., 2002).

La tabla 1.1 incluye un sumario de los parámetros focales de los principales terremotos destructores ocurridos durante el siglo XX y comienzos de 2001, y los epicentros de los mismos aparecen representados en la figura 1.2.

Situando en este contexto de los sismos de 2001, los eventos principales del 13 de enero y 13 de febrero son dos ejemplos recientes del potencial sísmico de la zona de subducción y de la cadena volcánica respectivamente. El sismo del 13 de enero es similar al ocurrido el 19 de junio de

Tabla 1.1
Parámetros fuente de terremotos destructores en El Salvador a lo largo del siglo XX y comienzos de 2001.

Año	Mes/día	Hora	Latitud (°)	Longitud (°)	M _s	Profundidad (km)	Intensidad (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	13,517	-88,400	5.9	10	VIII	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

1982, en términos de mecanismo, profundidad focal y patrón de daños al Suroeste del país. Este terremoto fue seguido por el sismo cortical del 10 de octubre de 1986. Por otra parte, la localización del evento del 13 de febrero es similar al ocurrido en 1936, que fue precedido por el evento de subducción de 1932.

En lo referente al mecanismo focal para ambos tipos de terremotos, diferentes estudios han aportado soluciones correspondientes a una falla normal con extensión horizontal NE-SO, para los sismos de subducción de 1982 y enero de 2001. Los eventos de corteza superficial de 1965, 1986 y febrero de 2001 presentan, en cambio, mecanismos de desgarre con planos de falla verticales orientados en dirección NS y EO. La figura 1.3 muestra los mecanismos focales de los principales sismos ocurridos en los dos escenarios.

Una interpretación tectónica sobre el origen de los movimientos transversales que se manifiestan a lo largo de la cadena volcánica fue propuesta por Harlow y White (1985), quienes sugieren que el movimiento relativo entre la placa de Cocos y del Caribe es ligeramente oblicuo, lo cual genera dos componentes principales: la primera y más importante de las dos es un componente de movimiento normal, a lo largo de la trinchera Centroamericana y la segunda se manifiesta como un movimiento lateral derecho a lo largo de la cadena volcánica

Este componente oblicuo de la colisión Cocos-Caribe causaría el movimiento lateral derecho de la zona volcánica, compatible con los mecanismos focales y las características geológicas observadas en ella (White, 1991). La existencia de fallas con este movimiento dentro del arco volcánico de El Salvador así como de las regiones limítrofes de Guatemala y Nicaragua (Weinberg, 1992), unida a la agrupación de epicentros a lo largo de estas fallas, es consistente con el componente de movimiento paralelo a la trinchera concentrada a lo largo del eje volcánico (DeMets, 2001). La razón de movimiento a lo largo de este eje para El Salvador y Guatemala ha sido estimado en 8 mm/año (Guzmán-Speciale, 2001) y resulta menor que la predicha para Nicaragua.

La interacción entre la placa del Caribe y la placa de Norteamérica produce un efecto secundario en El Salvador, el cual es causante de la actividad sísmica de baja magnitud (M<5) en varias partes del territorio de El Salvador, particularmente en los extremos del oriente y occidente del país.

Esta actividad telúrica generalmente se registra a profundidades someras (5-15 Km.) en forma de enjambres asociados a movimientos de fallas normales en dirección predominantemente norte. La evidencia de

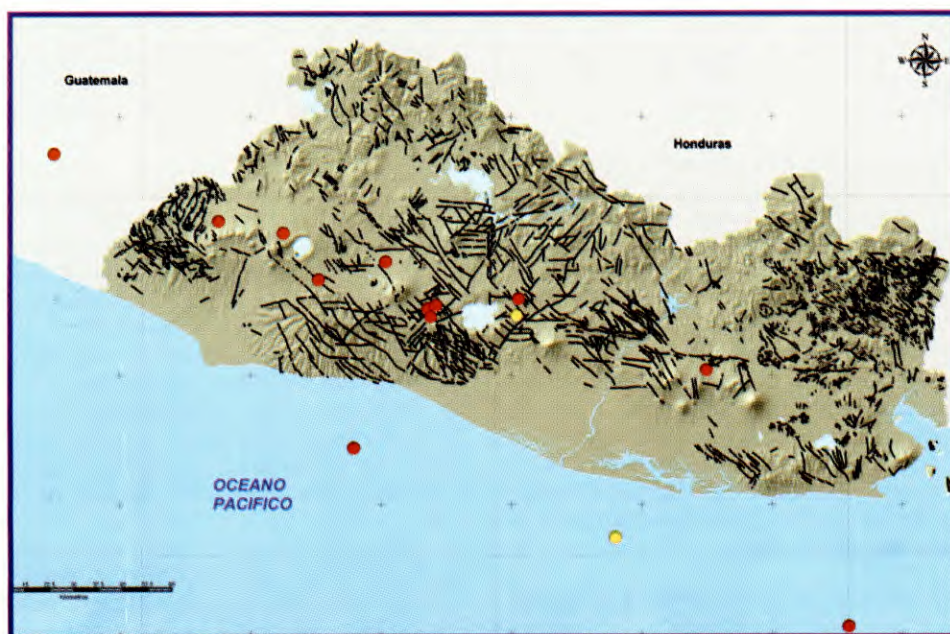


Figura 1.2 Estado del monitoreo sísmico previo a los terremotos de 2001

fallas superficiales también indica importantes desplazamientos en el pasado.

La actividad sísmica del volcán Conchagua ocurrida en febrero de 1991, sismicidad de abril de 1999 ocurrida en la Isla Meanguera y los enjambres periódicos que ocurren en la frontera con Guatemala, en los alrededores del volcán El Chingo son ejemplos de esta actividad.

Finalmente, es de destacar que en el entorno tectónico-subducción con fallamiento normal- es relativamente frecuente que los terremotos sean seguidos por otros eventos superficiales intra-placa, en el plazo de 4 ó 5 años. Este comportamiento ha sido observado en otras regiones donde el régimen tectónico implica un límite de subducción fuera de la costa y eje volcánico dentro del continente, como por ejemplo en México (Lomnitz y Rodríguez, 2001). Esta inferencia puede ser explicada por la transferencia de esfuerzos debido a que la relajación en una zona conduce a acumulación de esfuerzos en zonas adyacentes. El estudio realizado en el marco de este proyecto muestra que un patrón similar puede existir en El Salvador (ver capítulo 2).

ESTADO DEL MONITOREO SÍSMICO PREVIO A LOS TERREMOTOS DEL 2001

La vigilancia sísmica en El Salvador antes de los terremotos del 2001 se llevaba a cabo a través de una red sísmica telemétrica de estaciones de período corto y una red de estaciones de movimiento fuerte. Cuatro instituciones realizaban diferentes actividades y participaban en el monitoreo sísmico del territorio: CIG, LAGEO S.A. de C.V. (LAGEO), Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL) y UCA.

El CIG, como responsable de la vigilancia sísmica en el país, contaba con una red de 12 estaciones sísmicas de período corto que transmitían vía radio a las instalaciones de la institución en San Salvador. De la totalidad de estaciones, 11 de ellas se ubicaban a lo largo del eje volcánico y solamente una se localizaba al norte del país. Asimismo, en el oriente del país sólo existía una estación, cuya función era principalmente la vigilancia del volcán Chaparrastique en San Miguel, considerado de El Salvador, en ese momento.

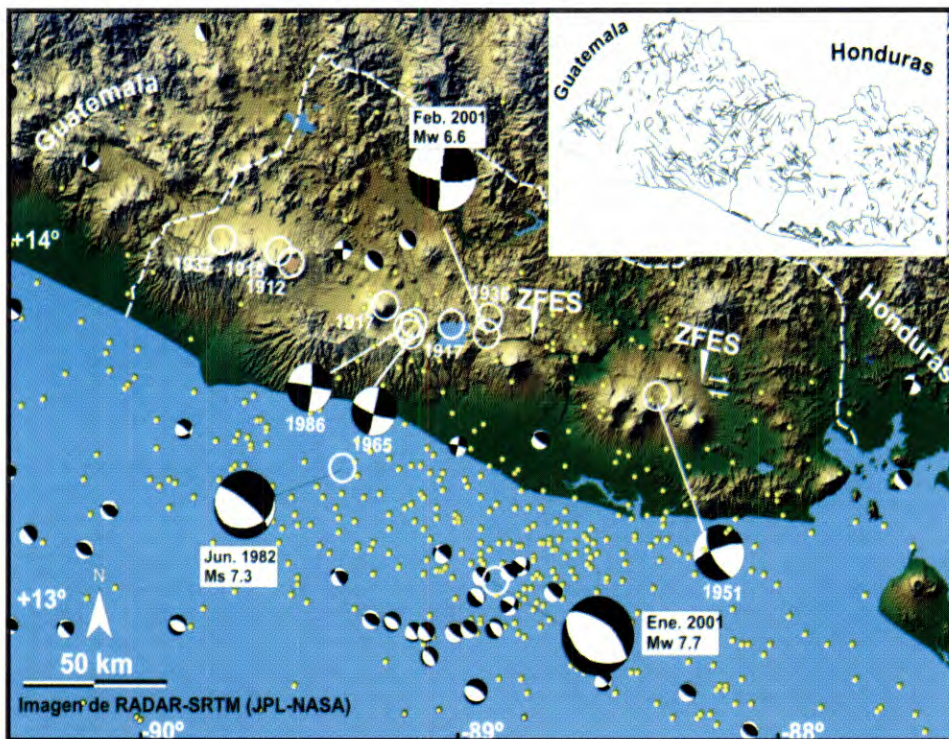


Figura 1.3. Imagen RADAR-SRTM de El Salvador (cortesía de Propulsión Laboratory), con terremotos destructores históricos (círculos blancos) y epicentros instrumentales ($M > 2.5$, periodo 197-2001) del catálogo USGS-NEIC (puntos). Los símbolos pequeños de mecanismos focales corresponden a eventos de $M > 5.5$ (Harvard CMT). Los símbolos grandes son mecanismos dados por Buforn et al. 2001

La distribución de la red a lo largo del eje volcánico y la existencia de tan solo una estación en el oriente del país, fue una limitante para la evaluación de la profundidad de los sismos de subducción y, posiblemente, causa de incertidumbres en la ubicación de sismos en el oriente del país. Adicionalmente, meses antes de los terremotos, una descarga eléctrica generada por una tormenta dañó las capacidades de transmisión de datos de 5 estaciones sísmicas, limitando el número de estaciones operativas durante el sismo del 13 de enero únicamente a 7 estaciones.

Una segunda red de estaciones sísmicas de período corto se ubicaba en las propiedades de LAGEO, en el campo geotérmico de Berlín, al oriente del país. Esta red, que constaba de 7 estaciones y cuyo propósito era realizar el monitoreo de la microsismicidad generada por las actividades de desarrollo del campo geotérmico tenía una distribución sumamente limitada. Sin embargo, debido a la firma de un convenio entre LAGEO y el CIG, este último tuvo acceso a las señales derivadas de 2 estaciones sísmicas ubicadas en Berlín, mejorando así la cobertura en la zona oriental del país.

Por otra parte, en lo que respecta al registro del movimiento fuerte, las cuatro instituciones arriba mencionadas disponían

de redes acelerométricas propias utilizadas para distintas aplicaciones.

El CIG poseía 26 estaciones acelerométricas analógicas del tipo SMA-1 de Kinometrics, Inc., las cuales eran utilizadas para el registro de movimientos fuertes, así como también en estudios de efectos de sitio, para lo cual se habían construido pozos a cielo abierto para medir las amplificaciones generadas por las cenizas jóvenes que forman la base de San Salvador. Al momento del terremoto del 13 de enero de 2001, solamente 19 estaciones registraron el sismo.

Tanto la UCA como LAGEO, poseían estaciones digitales del tipo SSA-2 de Kinometrics, Inc. La UCA había distribuido 10 estaciones en la zona paracentral del país, mientras que LAGEO tenía ubicados dos equipos en el campo geotérmico de Berlín. CEL poseía dos acelerógrafos instalados en la Central Hidroeléctrica 15 de Septiembre. Las 10 estaciones de la UCA registraron los sismos de enero de 2001, así como los 2 acelerógrafos de LAGEO y sólo uno de los equipos de la CEL.

La figura 1.4 muestra la configuración de las redes sísmicas y acelerométricas previa a los terremotos de 2001 y la figura 1.5 se presenta la configuración actual de las redes.

Red Sismográfica y Acelerográfica previa a los sismos del 2001

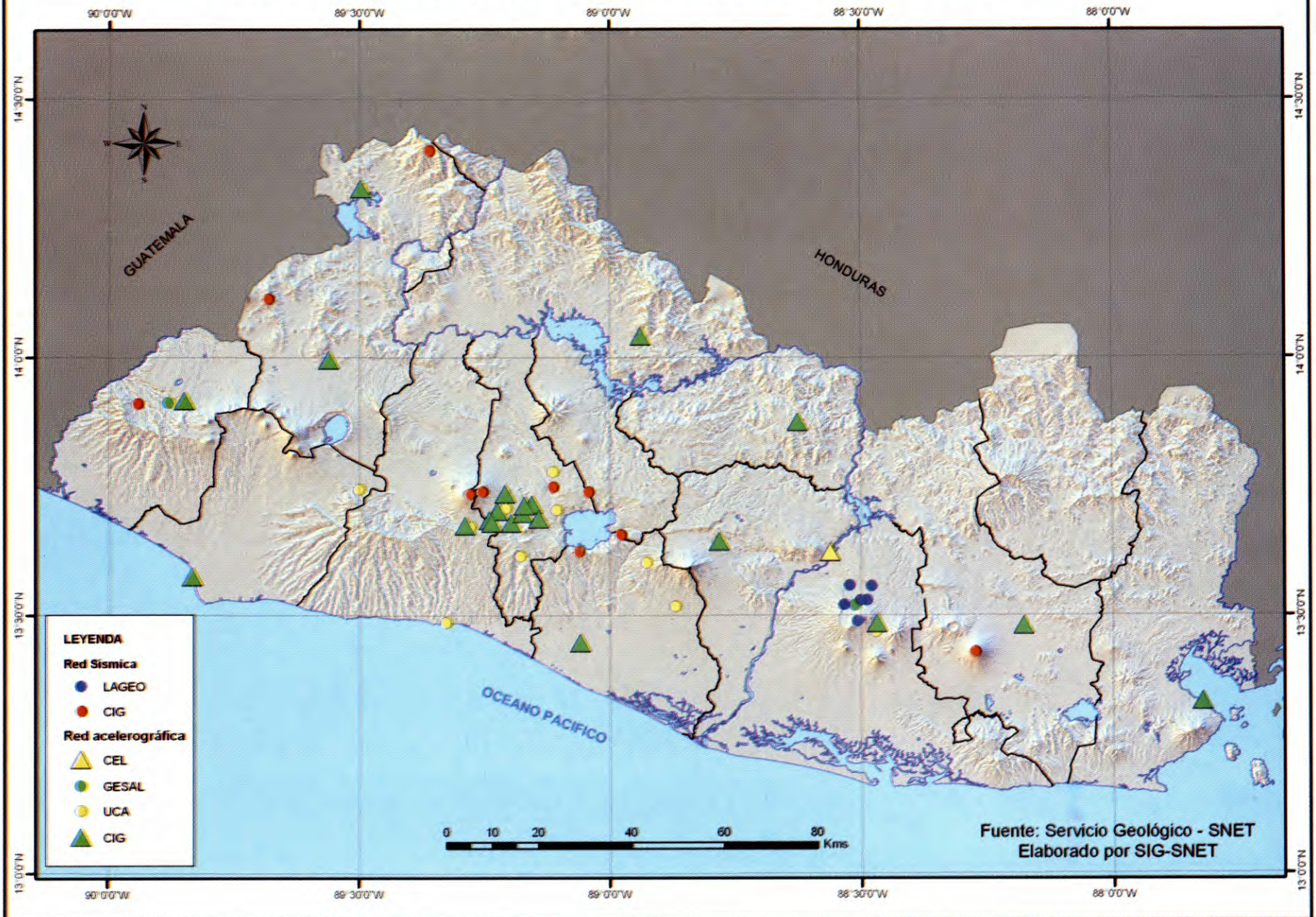


Figura 1.4 Red sísmica y acelerográfica instalada previa a los sismos de 2001

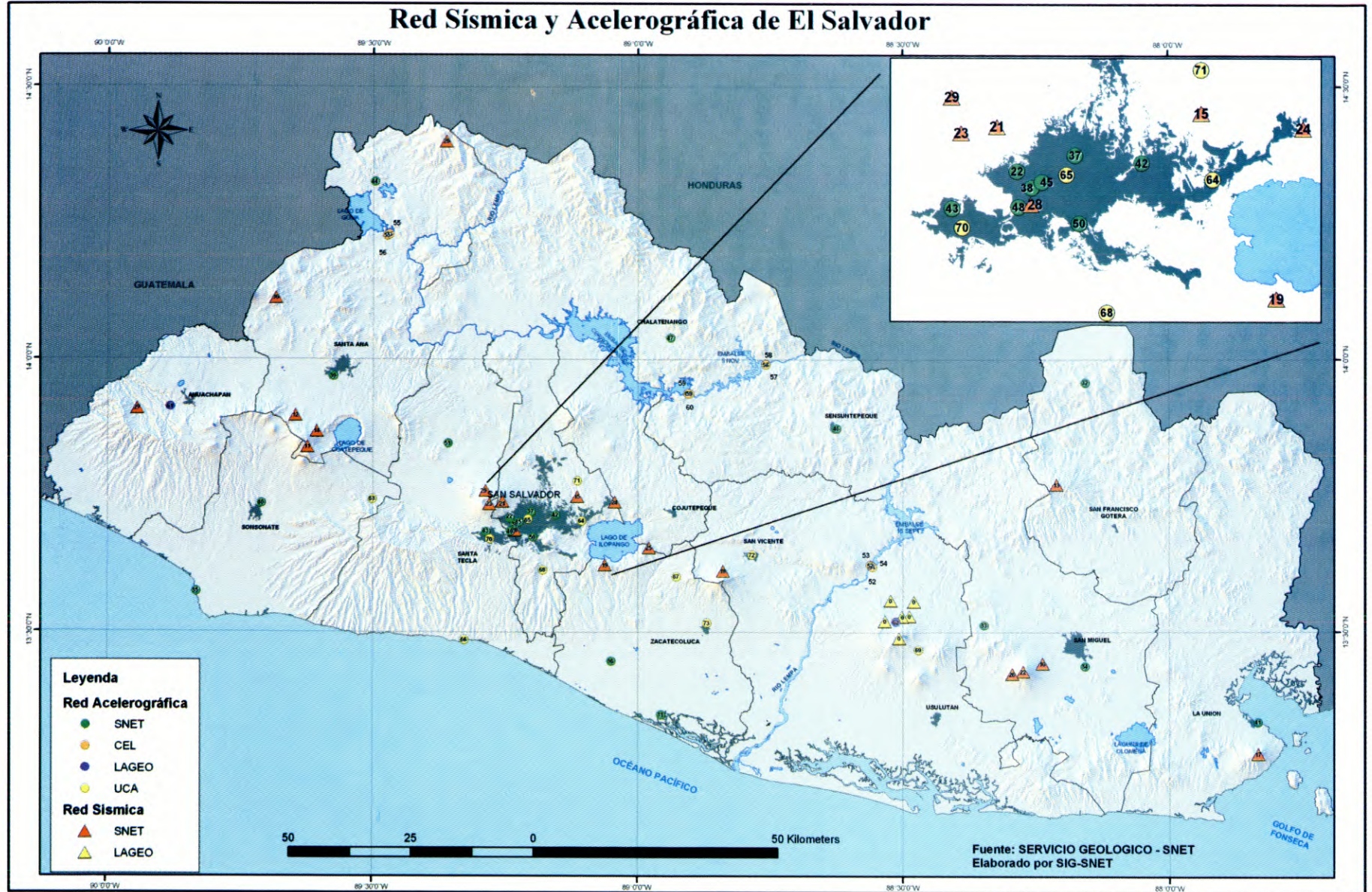


Figura 1.5 Configuración actual de la red sísmica y acelerográfica. Se presenta en detalle el equipo instalado en el Area Metropolitana de El Salvador.