

Investigadores Principales

Por Costa Rica

Aarón Moya
Alvaro Climent
Ileana Boschini
Victor Schmidt
Wilfredo Rojas

Por Noruega

Conrad Lindholm
Farrokh Nadim
Hilmar Bungum
Kuvvet Atakan

Con el financiamiento de:

NORAD-CEPREDENAC

INSTITUCIONES NACIONALES PARTICIPANTES

Y la cooperación de la:

COMISION NACIONAL DE EMERGENCIA (CNE)

Colaboración especial:

Amir Kayna (NGI)
Carlos Segura (LIS)
Federico Güendel (OVSICORI)
Germán Leandro (ICE)
Ivonne Arroyo (ICE)
Lidier Esquivel (CNE)
Marino Protti (OVSICORI)
Miguel Bolaños (ICE)
Ricardo Bolaños (UPA)
Roy Bogantes (UCR)
Walter Montero (UCR)
Municipalidad de San José



Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS)

Instituto de Investigaciones en Ingeniería

Universidad de Costa Rica

2060 San Pedro de Montes de Oca,

San José, Costa Rica

Tel: (506)-253-7331

Fax: (506)-224-2619

Investigadores:

Ing. Víctor Schmidt D., vschmidt@terraba.fing.ucr.ac.cr

M.Sc. Aarón Moya F., cmoya@terraba.fing.ucr.ac.cr

Tec. Carlos Segura V., csegura@terraba.fing.ucr.ac.cr

Asistentes de Investigación:

Ing. José Guzmán M.

Ing. Regina Salas M.



Instituto Costarricense de Electricidad (ICE)

Area de Amenazas y Auscultación Sismo-Volcánica

Apdo. 10032-1000

San José, Costa Rica

Investigadores:

Ing. Alvaro Climent M., acliment@ns.ice.go.cr

M.Sc. Ileana Boschini L., ilbosc@msmail.ice.go.cr

Asistentes de Investigación:

Guillermo Esquivel

Elena Badilla

Lepolt Linkimer



Escuela Centroamericana de Geología

Universidad de Costa Rica

2060 San Pedro de Montes de Oca

San José, Costa Rica

Tel: (506)-253-2586

Fax: (506)-253-8407

Investigadores:

Lic. Wilfredo Rojas, wrojas@cariari.ucr.ac.cr



NORSAR (The Research Council of Norway)

P.O. Box 51

N-2007 Kjeller, Norway

Tel: (47) 63805900

Fax: (47) 63818719

Investigadores:

Dr. Conrad Lindholm, conrad@norsar.no

Dr. Hilmar Bungum, hilmar@norsar.no



Norwegian Geotechnical Institute (NGI)

P.O. box 3930 Ullevaal Hageby

N-0806 Oslo, Norway

Tel: (47) 22230388

Fax: (47) 4722230448

Investigadores:

Dr. Farrokh Nadim, fna@ngi.no

Dr. Amir Kayna, amk@ngi.no



University of Bergen, Norway

Institute of Solid Physics,

Allégt.41,N-2007 Bergen, Norway

Tel: (47)-55-583420

Fax: (47)-55-589669

Investigador

Dr. Kuvvet Atakan, kuvvet.atakan@ifjf.uib.no

El conocimiento en el mundo de los adultos es similar al aprendizaje en el mundo de los niños: el mismo requiere tiempo, energía y trabajo.

CONTENIDO

PREAMBULO	1
RESUMEN	2
INTRODUCCION	4
<u>CAPITULO 1</u>	<u>FALLAMIENTO ACTIVO Y SISMICIDAD</u>
RESUMEN	11
1.1 INTRODUCCION	11
1.2 AMBIENTE TECTONICO REGIONAL	11
1.3 TECTONICA LOCAL	13
1.4 SISMICIDAD HISTORICA	15
1.5 SISMICIDAD REGISTRADA INSTRUMENTALMENTE	17
1.6 CONCLUSIONES	20
1.7 REFERENCIAS	20
<u>CAPITULO 2</u>	<u>ESTIMACION DE LA AMENAZA SISMICA</u>
RESUMEN	23
2.1 INTRODUCCION	23
2.2 METODOLOGIA	24
2.3 INTEGRACION DE LA AMENAZA PARA EL SITIO DE INTERES	26
2.4 RESULTADOS	29
2.5 CONCLUSIONES	33
2.6 REFERENCIAS	35
<u>CAPITULO 3</u>	<u>GEOLOGIA Y CARACTERISTICAS GEOTECNICAS-GEOFISICAS</u>
RESUMEN	37
3.1 INTRODUCCION	37
3.2 GEOLOGIA	37
3.3 CARACTERISTICAS GEOTECNICAS	41
3.4 CARACTERISTICAS GEOFISICAS	48
3.5 CONCLUSIONES	56
3.6 REFERENCIAS	57
<u>CAPITULO 4</u>	<u>RESPUESTA DINAMICA DE LOS SUELOS: ESTIMACIONES EMPIRICAS</u>
RESUMEN	59
4.1 INTRODUCCION	60
4.2 RED ACELEROGRAFICA SAN Y REGISTROS SISMICOS	61
4.3 EFECTOS DE SITIO	66
4.4 CONCLUSIONES	77
4.5 REFERENCIAS	80
<u>CAPITULO 5</u>	<u>RESPUESTA DINAMICA DE LOS SUELOS: ESTIMACIONES ANALITICAS</u>
RESUMEN	83
5.1 MODELO GEOFISICO DE LOS SUELOS SUPERFICIALES	83
5.2 CONSIDERACIONES DEL MODELO ANALITICO UTILIZADO	86
5.3 REGISTROS SISMICOS UTILIZADOS	88
5.4 ANALISIS DE RESPUESTA DINAMICA	90
5.5 CONCLUSIONES	97
5.6 REFERENCIAS	97

CAPITULO 6 **INTEGRACION Y ANALISIS DE RESULTADOS**

6.1	INTRODUCCION	99
6.2	COMPARACION DE RESULTADOS	99
6.3	MAPA DE ESPERORES DE SUELOS E ISOPERIODOS	101
6.4	ZONIFICACION DINAMICA DEL AREA METROPOLITANA	101
6.5	ESPECTROS DE RESPUESTA PARA EL AREA METROPOLITANA	106
6.6	REFERENCIAS	112

CAPITULO 7 **DISCUSION FINAL Y RECOMENDACIONES**

7.1	DISCUSION	115
7.2	CONSIDERACIONES DE ORDEN INGENIERIL	117
7.3	REFERENCIAS	120

PREAMBULO

El tema de la amenaza sísmica y la reducción del riesgo ha sido tratado en América Central desde 1991 por medio de un proyecto de cooperación técnica entre instituciones locales como: la Universidad de Costa Rica, el Instituto Costarricense de Electricidad, la Universidad Nacional y la Comisión Nacional de Emergencias y noruegas como: NORSAR, NGI y la Universidad de Bergen.

El proyecto ha sido financiado por la Agencia Noruega para el Desarrollo y la Cooperación (NORAD) por medio de la organización regional Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central (CEPREDENAC). La contraparte del proyecto fue obtenida por medio de recursos locales.

El interés de esta investigación es el de mejorar el conocimiento sobre las causas de los efectos destructivos de los eventos sísmicos, en áreas urbanas propensas a la ocurrencia periódica de dichos eventos. Y por medio de este conocimiento se pretende contribuir a mitigar el efecto destructivo de futuros sismos de magnitud importante.

Todos los que de una u otra forma han trabajado en este proyecto, se sienten complacidos con los resultados obtenidos, y consideran que lejos de ser el resultado perfecto o último, el mismo deberá ser complementado y mejorado, cada vez que nuevas investigaciones sean desarrolladas en cada uno de los países de la región.

Es nuestra esperanza que el presente documento sea utilizado por profesionales y políticos para la toma de decisiones sobre el desarrollo y la planificación urbana, así como para el mejoramiento y actualización de códigos de diseño y construcción de obras sismoresistentes.

De una semilla puede crecer un árbol, si ésta se coloca en tierra fértil, de la misma manera, el conocimiento puede traer beneficios a la sociedad siempre y cuando esté dispuesta a utilizarlo

RESUMEN

Esta investigación está orientada especialmente a obtener resultados sobre la amenaza sísmica y el comportamiento dinámico de los suelos en el Area Metropolitana de San José, en la cual se concentra la mayor parte de la población del país y en donde se desarrollan las principales actividades socioeconómicas del mismo.

Para ello se utilizó información disponible en diferentes fuentes y otra gran cantidad de datos fueron generados, de tal forma que los resultados presentados en este informe están basados en el conocimiento actual de las diferentes ramas de la ciencia y de la tecnología que actuaron en forma multidisciplinaria para el desarrollo de este proyecto.

En la parte central de Costa Rica, el fallamiento tiene dos orientaciones predominantes: noroeste y noreste. La sismicidad histórica y reciente indica que el fallamiento localizado en los bordes del Valle Central es activo y puede generar eventos sísmicos de hasta 6,5 grados en magnitud. Estas fuentes sísmicas representan una importante amenaza para las ciudades localizadas en esta región del país.

La información sismo-tectónica, tanto regional como local ha sido analizada, cuantificada e integrada por medio de un análisis de amenaza sísmica probabilístico, el cual ha permitido obtener curvas de isoaceleración pico en la zona de estudio para periodos de retorno de 50, 100 y 500 años, así como espectros de respuesta elásticos de amenaza uniforme para un sistema de un grado de libertad con 5 % de amortiguamiento. El promedio de los mismos ha sido recomendado como espectro de respuesta de referencia (roca) para el área de interés.

Para efectos de evaluar la respuesta de sitio en los suelos de la ciudad capital, se realizaron mediciones geofísicas en 13 diferentes lugares para obtener la velocidad de la onda cortante. Los valores promedio de velocidad de los primeros 30 metros de los depósitos de suelo han permitido clasificar a los mismos como suelos de comportamiento rígido. También se realizaron mediciones de ruido ambiente en 185 sitios, por medio de los cuales se obtuvo un mapa de isoperiodos relativos de la zona. Se instaló además una red de ocho acelerógrafos digitales, durante nueve meses en el año 1998, registrándose un total de 68 eventos. A la vez se desarrolló un mapa de espesores de materiales no consolidados en todo el área incluida en el estudio. Esta información fue analizada e integrada por medio de las técnicas empíricas y analíticas de evaluación de respuesta de sitio, utilizando principalmente razones espectrales y el programa SHAKE.

La síntesis de los resultados ha permitido caracterizar el comportamiento dinámico de los suelos en el Area Metropolitana de San José de la siguiente manera:

- El mapa de microzonificación sísmica, obtenido con base en mediciones de ruido ambiente, muestra periodos predominantes relativamente más altos en las zonas del centro, este y noreste de la ciudad.
- Con base en implicaciones prácticas de la ingeniería y a la respuesta dinámica presentada por los suelos, se propone dividir San José en dos zonas: una localizada al sur, oeste y noroeste de la ciudad, la cual presenta periodos predominantes menores a 0,25 segundos y en las cuales no se espera tener un efecto de sitio importante (amplificación de las señales sísmicas debidas a la presencia de estratos de suelos blandos); la otra en la parte central, este y noreste de San José en la cual si se espera la aparición de este tipo de efectos, y caracterizada por tener periodos predominantes entre los 0,25 y 0,6 segundos alcanzando factores de amplificación promedio máximos de hasta 2,5.
- Para efectos de índole ingenieril, se recomienda que se utilice como espectro de referencia (roca) para el Area Metropolitana el espectro de respuesta normalizado de igual amenaza obtenido por medio del estudio de amenaza sísmica. Este es un espectro elástico basado en la respuesta máxima esperada de un sistema de un grado de libertad evaluado para un 5 % de amortiguamiento.

En la Figura 1 se presentan los espectros de respuesta normalizados según el estudio de amenaza y que caracterizan la respuesta dinámica en la ciudad de San José.

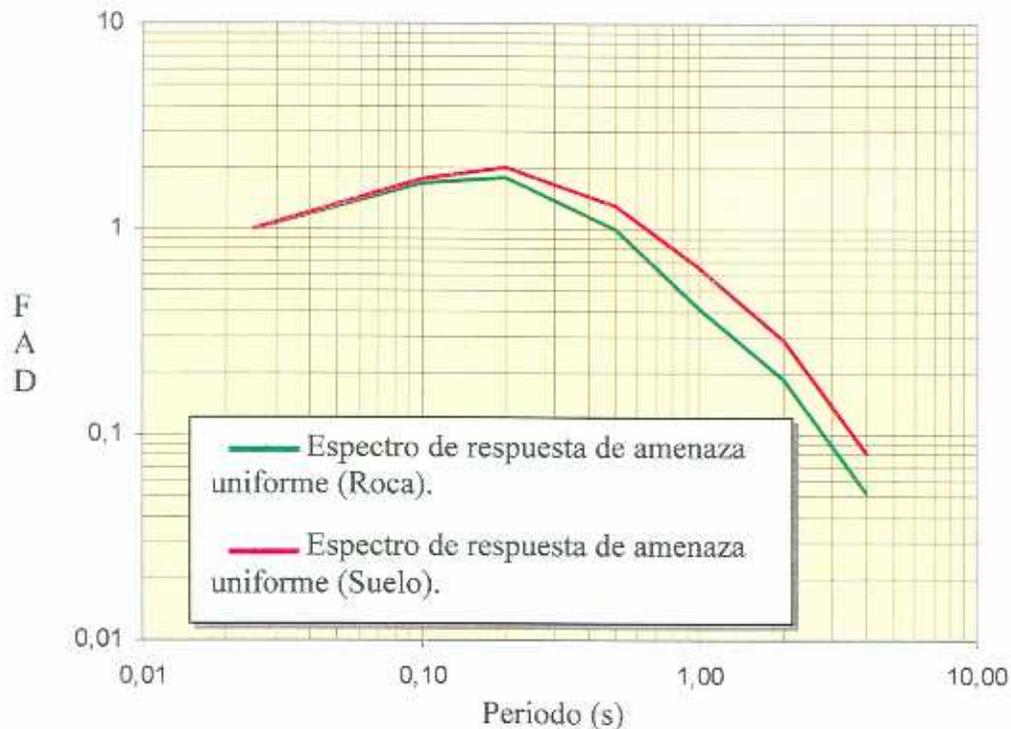


Fig. 1. Espectro de respuesta de amenaza uniforme para roca en el Area Metropolitana de San José y el espectro correspondiente para condición de suelo. FAD: Factor de Amplificación Dinámica.

INTRODUCCION

Debido al costo y a requerimientos de equipo y personal especializado, este tipo de investigaciones se desarrollan básicamente en zonas densamente pobladas, donde los sismos representan una amenaza severa a la comunidad.

El fundamento lamentable de esta investigación se basa en que los sismos severos, de características destructivas, han ocurrido en el pasado y volverán inevitablemente a ocurrir en el futuro, causando serios daños en las actividades económicas y sociales del país, si no se toman las medidas del caso. Aquí es donde debe contestarse la pregunta de si las pérdidas económicas y en vidas humanas pueden reducirse. La respuesta se encuentra al analizar y aprender de los eventos y desastres pasados y aplicar estos conocimientos en el planeamiento adecuado del desarrollo urbano y las prácticas de diseño y construcción.

Los efectos de cualquier terremoto dependen de una amplia gama de factores, se pueden citar entre algunos de ellos:

- ❑ Los parámetros intrínsecos al sismo, como por ejemplo: magnitud, tipo de fuente, propagación de la señal, localización, profundidad, etc.
- ❑ Condiciones geológicas, en particular las superficiales como: el tipo de suelo, espesor, topografía y saturación del terreno.
- ❑ Condiciones de la sociedad, por ejemplo: la calidad de las edificaciones, preparación de la población ante desastres, normas de diseño y construcción entre otros.

La historia de desastres causados por terremotos muestra claramente una estrecha relación entre la magnitud del desastre y las condiciones geológicas y sociales. El análisis de eventos con características destructivas permite identificar las causas de tal efecto. La Figura 2 relacionada al terremoto de Kobe, Japón (1995) y proporciona tres elementos claros que son:

- *Amplificación local del terreno* causada por las condiciones particulares del mismo. El denominado “Cinturón del Desastre” fue una franja bastante localizada a lo largo del centro de la ciudad de Kobe en donde se estima que la amplificación de la señal se incrementó significativamente debido a la interacción entre el suelo y la topografía de la roca de basamento.
- *Licuefacción* causada por el incremento de la presión de poro del suelo debido a la vibración del terreno que hace que se pierda rigidez. Cuando esto sucede, el suelo no puede proporcionar el soporte necesario a los edificios, puentes y estructuras en general, dando como resultado que los mismos colapsen. En Kobe, la destrucción de los muelles, tan importantes para el comercio de Japón, se debió a este fenómeno en particular.
- *Otros efectos secundarios* tales como el fuego, deslizamientos, movimientos laterales de masas de tierra, también son consecuencia de los sismos fuertes.

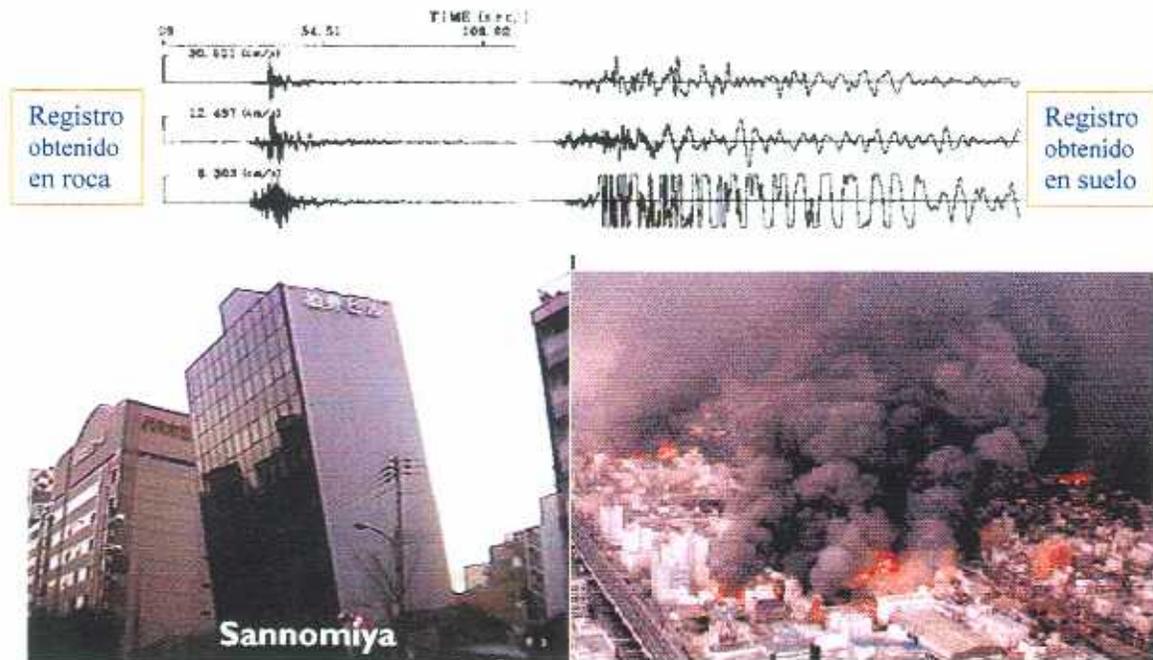


Fig. 2. Registros sísmicos registrados en dos sitios con características locales diferentes cerca de Kobe y dos fotos de daños asociados a efectos secundarios del evento.

Con las experiencias anteriores en mente y las lecciones aprendidas de sismos pasados, tanto nacionales como de otras regiones, es posible mitigar el efecto destructivo de futuros terremotos. Sin embargo, se requiere de la conscientización y el trabajo conjunto de técnicos y políticos, para llegar a normalizar adecuadamente el desarrollo urbano en el país, y a la vez mejorar y supervisar, de una manera enérgica, las prácticas de diseño y construcción. Para ponerlo en términos claros, un mapa sobre el comportamiento dinámico de los suelos proporcionado en el momento adecuado a un planificador urbano, puede reducir el efecto del sismo si el mismo fue utilizado en el desarrollo y la planificación de diferentes obras en la zona.

El presente estudio es un primer intento de analizar las condiciones locales de los suelos en el Area Metropolitana de San José y de combinar esta información con conocimientos sobre amenaza sísmica y fallas locales activas. En el mismo se han integrado varias disciplinas de la ciencia y la ingeniería y es una investigación multidisciplinaria como puede notarse en el esquema de la Figura 3. El objetivo final de este estudio es el de suministrar información técnica sobre la amenaza sísmica y el comportamiento dinámico de los suelos en la ciudad de San José, de tal forma que pueda ser utilizada por las autoridades locales y profesionales en un mejor planeamiento del crecimiento de la ciudad, y reducir de esta forma el efecto destructivo de los eventos sísmicos.

Esta primera investigación de microzonificación de San José involucra recopilaciones e investigaciones en el campo de la geología, la geofísica, la geotecnia, la sismología y la ingeniería sísmica. La tres primeras de ellas aportando la información base

para los estudios desarrollados en las dos últimas áreas. De acuerdo con la calidad de la información suministrada, así será la calidad del producto final obtenido.

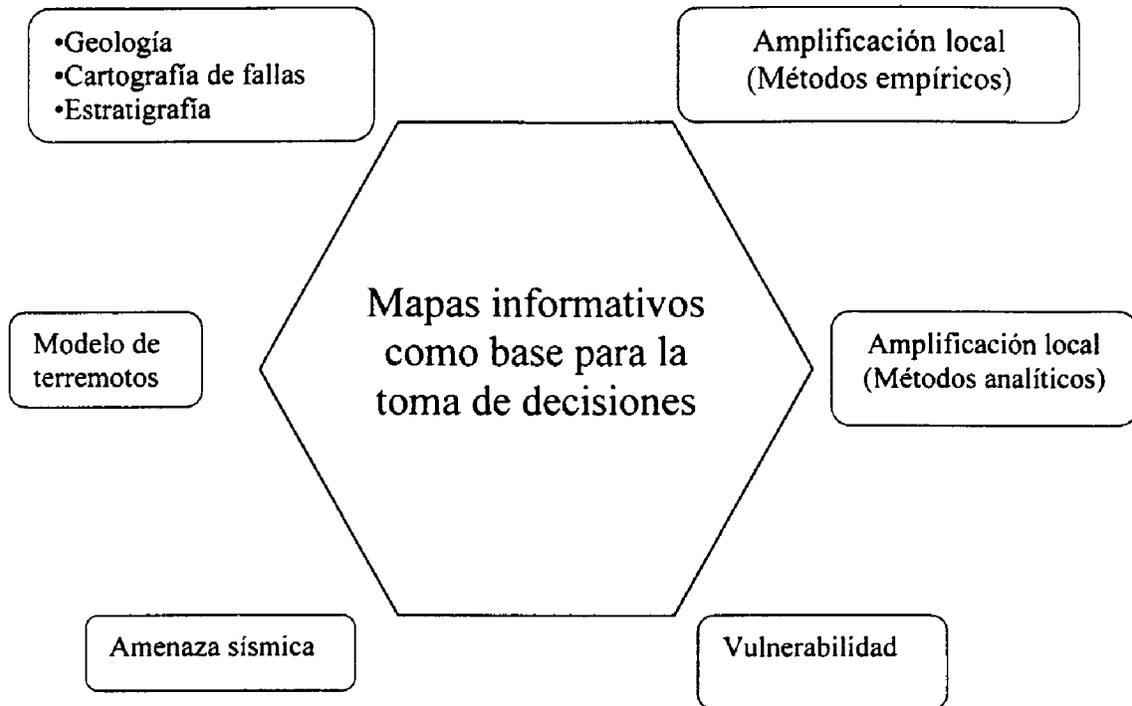


Fig. 3. Diagrama simplificado de los principales campos de investigación relacionados con el presente proyecto.

Las investigaciones realizadas en estos campos se enfocaron en dos aspectos principales: la cartografía de las fuentes locales de sismicidad y sus efecto en los niveles de amenaza sísmica, y una mejor comprensión del comportamiento dinámico de los suelos de San José sometidos a excitaciones sísmicas.

- **Fallas locales:** Es de especial interés, para conocer el grado de amenaza sísmica en que se encuentra una región o localidad determinada, el conocimiento del régimen sismotectónico y en especial aquel relacionado con las fallas locales.

Los grandes terremotos ocurren en grandes fallas y la cartografía de las mismas es una investigación de suma importancia. Esto no excluye la posibilidad de que grandes terremotos pueden ocurrir en fallas que no han podido ser determinadas, como sucedió con el terremoto de Taiwán en setiembre de 1999. Para el estudio y cartografía de las fallas se utiliza información suministrada por: la geología, la topografía, la actividad sísmica (histórica y reciente) y la excavación de trincheras. La razón por la cual se realiza esta última actividad es la de revelar movimientos ocurridos en la falla, los cuales quedan registrados en la columna estratigráfica (Fig. 4). Estas investigaciones permiten evaluar el potencial sísmico de cada una de las fallas estudiadas.

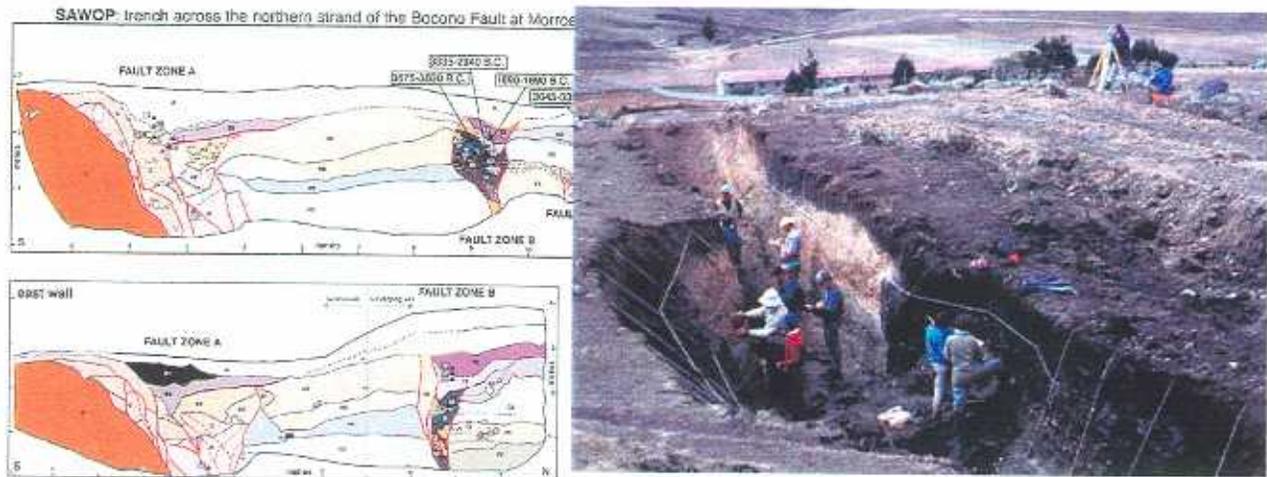


Fig. 4. Ejemplo (Venezuela) de una trinchera que permite establecer el perfil del suelo, en el cual los movimientos sísmicos históricos pueden ser datados y cuantificados.

- **Estimación de la amenaza sísmica:** La evaluación de la amenaza o peligro sísmico se realiza empleando un enfoque determinístico o probabilístico. El segundo de ellos fue utilizado en esta investigación e incluye el uso, tanto de la sismicidad histórica como de la reciente y el conocimiento de la actividad de las fallas. El procedimiento de evaluación se muestra en la Figura 5 y los resultados se proporcionan en forma de una curva de amenaza que muestra el movimiento esperado del terreno en términos de aceleración pico (PGA) para un cierto nivel de probabilidad anual de excedencia.

La otra forma de presentar los resultados, es en forma de espectros de respuesta de igual probabilidad para un sistema de un grado de libertad. Este resultado es posible suministrarlo siempre y cuando en el análisis se haya utilizado una ecuación de atenuación espectral de las señales sísmicas. Actualmente Costa Rica y el área centroamericana cuentan con este tipo de ecuaciones obtenidas a partir de datos de la región, de aquí que los resultados presentados en el capítulo correspondiente a este tema son de suma importancia en el desarrollo de espectros de diseño sísmoresistente.

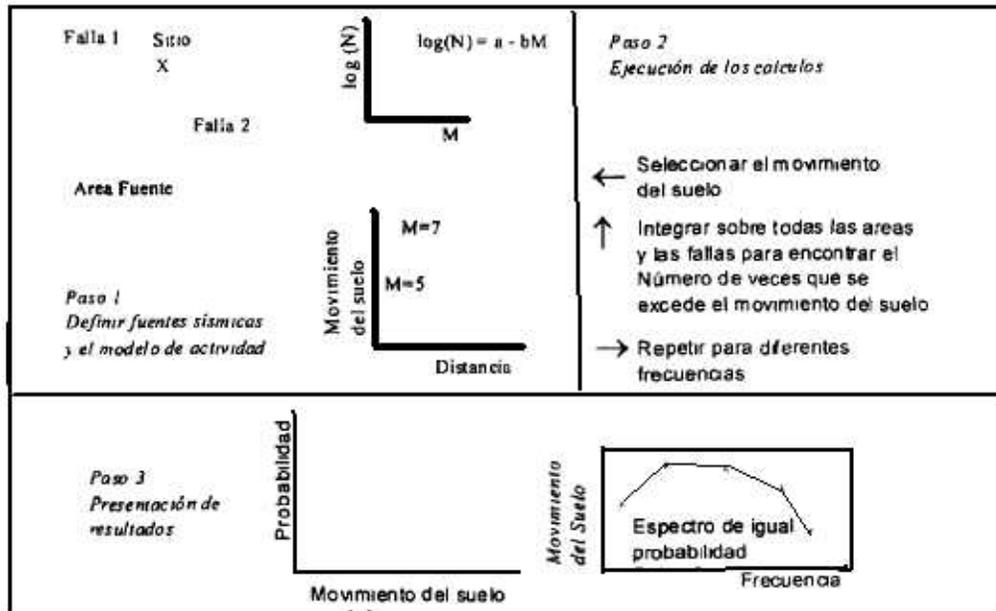


Fig. 5. Esquema simplificado del procedimiento de cálculo utilizado para la estimación de la amenaza sísmica.

• **Amplificación del terreno:** El grado de amenaza sísmica a que está expuesta una localidad se ve altamente influenciado por el efecto de sitio, en especial por la amplificación de las señales sísmicas en los suelos no consolidados. Dicho efecto se muestra en forma esquemática en la Figura 6. La cuantificación de la amplificación del suelo es hecha por medio de métodos empíricos y analíticos.

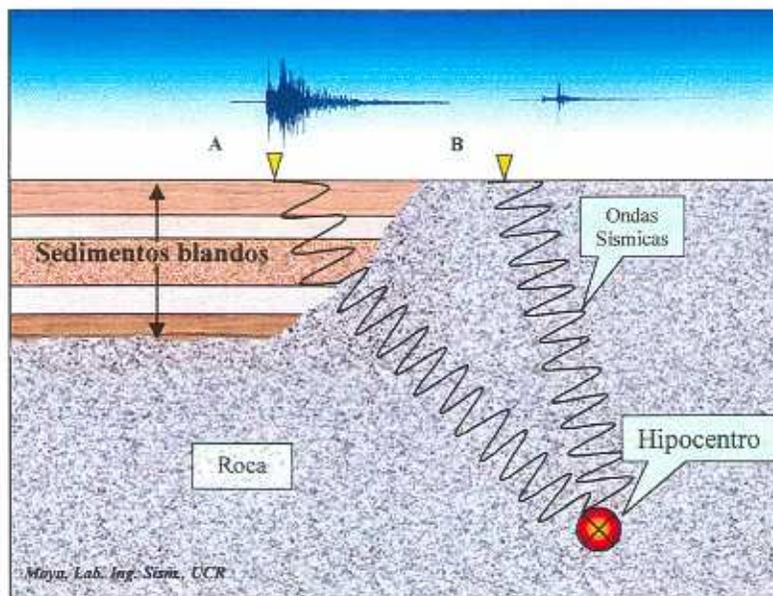


Fig. 6. Presentación esquemática de la amplificación de las señales sísmicas, debido al efecto local de los sedimentos blandos.

En este proyecto el efecto o respuesta dinámica de sitio en el Area Metropolitana de San José fue analizado en términos de un modelo en una dimensión, o sea no se analizan variaciones laterales de los depósitos de suelo. Dada la condición anterior, el análisis se simplificó y se concentró básicamente en la determinación de dos parámetros: el periodo o frecuencia fundamental y las máximas amplificaciones. Se considera que el periodo predominante es aquel en el cual la función de transferencia presenta el valor máximo.

Para los análisis utilizando técnicas empíricas, se utilizan comúnmente señales de eventos sísmicos y mediciones de ruido. En el caso del método analítico se utilizan eventos sísmicos fuertes y débiles. Los métodos empíricos utilizan dos técnicas: la tradicional técnica de razón espectral de la señal obtenida sobre sedimentos con respecto a otra obtenida sobre roca y la técnica de la razón espectral de la componente horizontal con respecto a la vertical de un registro obtenido en una única estación.

Los métodos analíticos o numéricos están basados en el uso de un modelo matemático obtenido a partir de pruebas geotécnicas y geofísicas llevadas a cabo en el campo o en el laboratorio. Mediante el uso de programas tales como el SHAKE, una señal sísmica es propagada a través del modelo en cuestión para así determinar el valor de la amplificación de la columna de suelo.

- **Análisis de vulnerabilidad:** La estimación de la vulnerabilidad y las subsecuentes implicaciones socioeconómicas no ha sido evaluada en este proyecto. Sin embargo, su realización se considera de suma importancia, ya que sus resultados junto con los aportados en este informe permitirán tomar decisiones óptimas para la mitigación de las pérdidas debidas a terremotos. La Figura 7 presenta un diagrama de cómo la vulnerabilidad ha sido visualizada y cómo ella es parte de un análisis más global que puede, eventualmente, ayudar a personas encargadas de la toma de decisiones a reducir el riesgo.

Esperamos que este proyecto, ayude a impulsar y sirva de plataforma para la realización de otras investigaciones que permitan mejorar el conocimiento de los fenómenos naturales a los cuales está expuesta la ciudad de San José, en especial los fenómenos sísmicos.

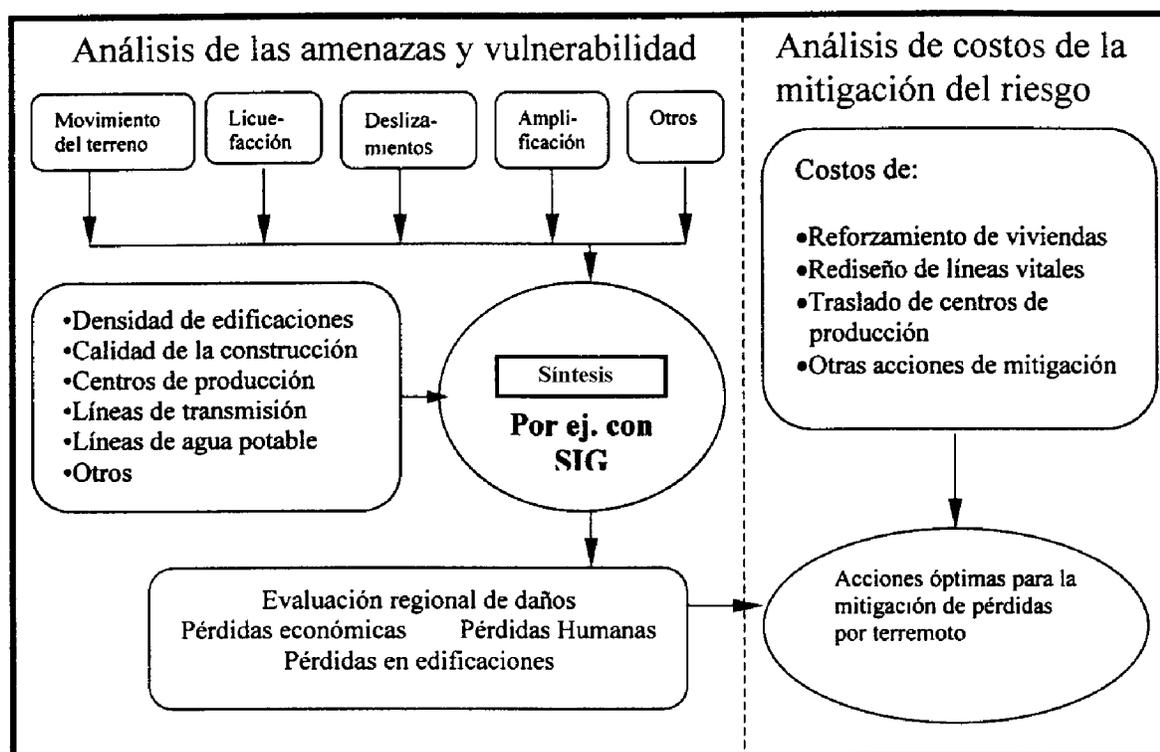


Fig. 7. Diagrama simplificado para la toma de decisiones óptimas para la mitigación de las pérdidas por terremoto.