

## MAPA DE AMPLIFICACION SISMICA DEL VALLE CENTRAL, COSTA RICA

Ramírez, R.<sup>1</sup>; Santana, G.<sup>2</sup> & Chacón, O.<sup>2</sup>

1) Laboratorio de Ingeniería Sísmica, Instituto de Investigaciones en Ingeniería,  
Universidad de Costa Rica

2) Earthquake Engineering Research Center,  
University of California at Berkeley, USA

(Recibido 15/11/1994; Aceptado 11/2/1996)

**ABSTRACT:** Seismic amplification consist of a modification of the seismic signal when it travels from rock to soil strata. This causes variations in the amplitude and the frequency content of the signal when it reaches the surface. This effect tends to cause a variation in the intensity with a possible increase in damage to infrastructure. To evaluate the degree of seismic signal amplification hazard a combination of the following maps is used:

- Surface geology
- Earthquake generating sources
- Peaks of registered intensities
- Natural period of the soil
- Maximum possible peak acceleration, velocity and displacement

The map presented allows the calculation of high, medium and low relative hazard in conjunction with other engineering parameters. Finally, the hazard map is compared with the urban development map, where a coincidence between the areas of larger residential growth and the areas with higher level of hazard of seismic amplification is observed.

**RESUMEN:** La amplificación sísmica consiste en una modificación de la señal sísmica, cuando viaja de la roca hacia el suelo. Esto causa variaciones en la amplitud y en el contenido de frecuencias de la señal en la superficie. Ese efecto tiende a causar una variación de la intensidad con un posible aumento en los daños a la infraestructura. Para evaluar el grado de amenaza de amplificación sísmica se combinan una serie de mapas que incluyen:

- Geología superficial
- Fuentes generadoras de sismos
- Intensidades máximas registradas
- Período naturales del suelo
- Aceleración, velocidad y desplazamiento máximos posibles

El mapa presentado permite obtener una amenaza relativa alta, media y baja en conjunto con algunos parámetros ingenieriles. Finalmente se compara el mapa de amenaza con el de desarrollo urbano, donde se observa una coincidencia de las áreas de mayor crecimiento residencial con el nivel mas alto de amenaza de amplificación sísmica.

## INTRODUCCION

La estructura del suelo provoca una transformación de la señal sísmica que viaja de la roca a la superficie y se evidencia en una modificación de su amplitud y frecuencia. Dicho cambio puede variar los períodos de movimiento del suelo, de tal forma que coincidan con los de las estructuras civiles causando graves daños como consecuencia del fenómeno de resonancia.

La evidencia del efecto de las condiciones locales del suelo en la excitación sísmica, ha sido objeto de estudio por algunos autores. Seed et al. (1976) presentan espectros normalizados de ciento cuatro registros y los clasifican según cuatro condiciones de suelo, para el oeste de los Estados Unidos.

Dobry et al. (1978) comparan dos registros del Terremoto de San Fernando en 1971 (Estados Unidos), a una misma distancia, pero en condiciones de suelo diferente, estos exhiben un comportamiento similar en los primeros 14 s, sin embargo el registro en roca disminuye su intensidad, mientras que el de suelo continua otros 14 s.

Diferentes autores coinciden que los factores que más influyen sobre el movimiento del suelo son: la magnitud del sismo, los mecanismos de ruptura que dan origen al sismo (las dimensiones y orientación de la falla, caída de esfuerzos y la naturaleza del movimiento de la falla), el medio geológico de propagación, la trayectoria de las ondas, la geología superficial, propiedades físicas de los suelos, dimensiones verticales y horizontales.

En los terremotos de San Francisco (1906), Caracas (1967), Rumania (1977), México (1985), Armenia (1988) y otros se observó que la severidad de los daños en las edificaciones aumentaba en rellenos de suelo blando, en relación con los suelos firmes.

Algermissen et al. (1992), realizaron mapas de amenaza para terremotos en Chile, superponiendo: mapas sísmicos, intensidades máximas, geología superficial, isoaceleraciones y les asignaron algunos parámetros de diseño ingenieril a los diferentes tipos de suelo.

Aguirre (1992) desarrolló una metodología de zonificación, que consiste en un modelo multiparamétrico, para la determinación de zonas sísmicas homogéneas para Viña del Mar y consiste de los diferentes mapas: de nivel de daños en las viviendas (Terremoto, 13 de marzo de 1985), calidad

de suelo de fundación, el nivel de daños en el servicio del alcantarillado, las clasificaciones dinámicas del suelo basadas en mediciones de microvibraciones, el grado de amplificación geológica, topografía y la geología del área urbana.

El presente trabajo busca realizar una aproximación de las áreas con amenaza de amplificación sísmica, con el fin de identificar zonas donde se debe realizar estudios de detalle de geología, geofísica y geotecnia.

Las primeras descripciones sobre dinámica de suelos del Valle Central provienen de Lores (1978), quien se refiere a perfiles de suelo en San José y define el contacto entre arcillas y lahares. Gallegos (1980) realiza un estudio del modelo de propagación de ondas cortantes, y propone un período de vibración de 0,42 y 0,5 s para la zona localizada en la Torre de Energía del Instituto Costarricense de Electricidad en Sabana Norte. Valverde (1981) analiza la respuesta dinámica de depósitos de suelo de varias ciudades del Valle Central, en Cartago centro define un período de 0,8 s y para Alajuela de 1,15 s. Pujol & Castro (1981) retoman los trabajos anteriores y obtienen períodos predominantes, para la Facultad de Derecho de la Universidad de Costa Rica de 0,24-0,37 s, San Juan de Tibás 0,56-0,71 s y el Instituto Tecnológico de Costa Rica de 0,17 y 0,25 s. Vargas (1987) presenta el primer trabajo relacionado con la dinámica de los suelos en el Valle Central, complementado con la geología realizada por Ehandi (1981). Taylor (1994) define para Cartago períodos predominantes para suelo blando (0,80-1,0 s), firme (0,2-0,9 s) y roca (cercanos a 0,3 s).

## UBICACION DEL AREA DE ESTUDIO

El Valle Central se ubica entre las coordenadas 83°36' - 84°30' y 9°40' - 10°10' N, comprende la depresión central, localizada en la parte sur de la Cordillera Volcánica Central y al este de la Cordillera de Talamanca (Fig. 1). En esta zona se encuentra la mayor parte de la población costarricense, asentada sobre las ciudades de San José, Cartago, Heredia, Alajuela, Turrialba, San Ramón y otras.

Morfotectónicamente, la región se encuentra en el Arco Interno o Arco Volcánico, caracterizada por rocas volcano-sedimentarias de edad terciaria, sobreyacidas por rocas volcánicas cuaternarias. Corresponde esta área con los valles y montañas

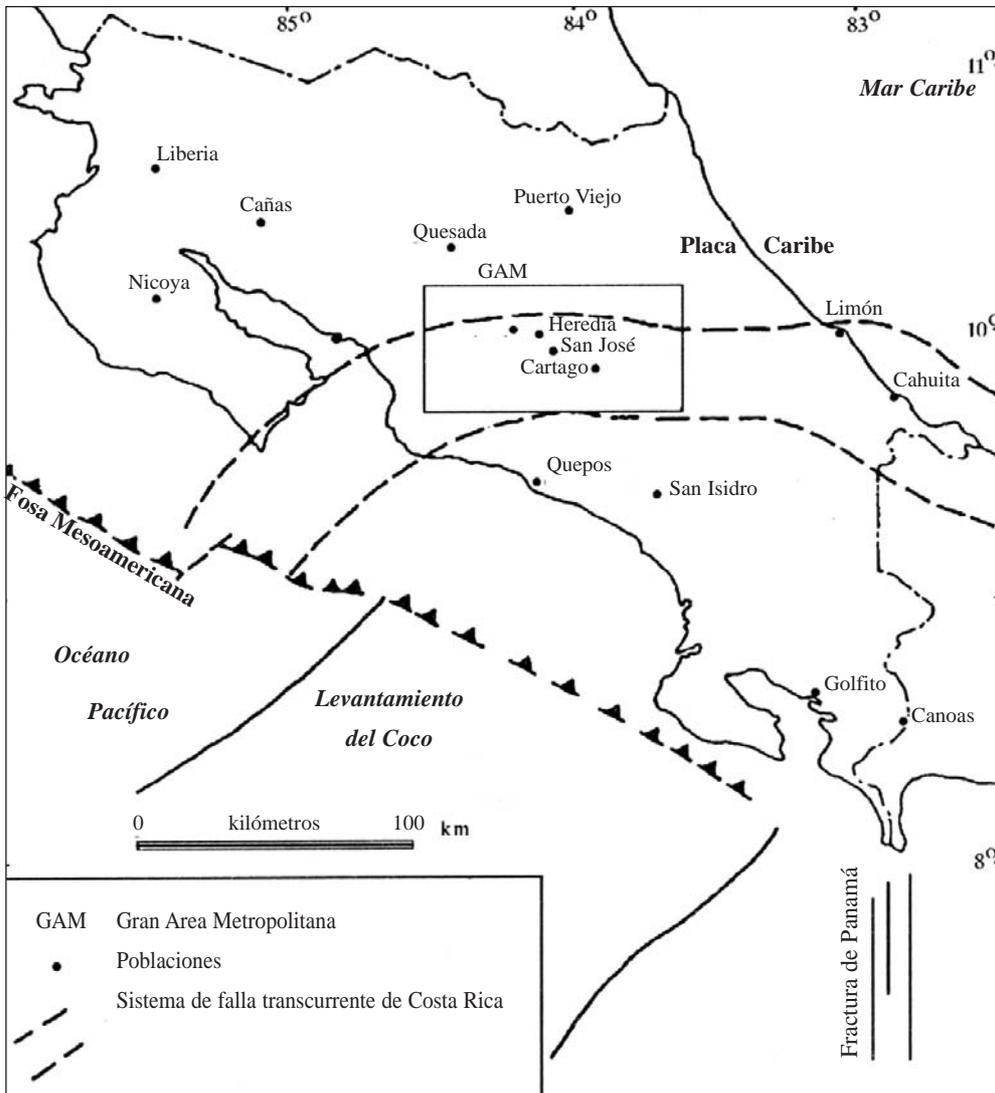


Fig.1: Localización del área de estudio (modificado de Morales & Aguilar, 1994).

del interior del país, donde se originan temblores asociados a fallamiento local, con profundidades menores a 20 km, de magnitud moderada pero de intensidades de hasta IX MM (Mercalli Modificada), siendo éstos los más destructivos (Montero, 1983).

## METODOLOGIA

De las lecciones aprendidas de sismos recientes, se considera que la amplificación sísmica

ocurre cuando en determinado tipo de suelo, topografía y con un cierto período natural, adquiere un grado de susceptibilidad, bajo estas condiciones la sismicidad actúa como elemento generador del fenómeno (Algermissen et al., 1992; Acevedo & Ortigosa, 1992; Aguirre, 1992; y Yegian et al., 1994 a,b).

Este trabajo describe el estudio preliminar sobre amplificación sísmica del Valle Central. Para la realización se han elaborado en primer lugar una serie de mapas temáticos básicos a escala

1:200 000, sobre los siguientes aspectos: geología superficial, fuentes generadoras de sismos, intensidades máximas, períodos naturales del suelo, aceleraciones, velocidades y desplazamientos máximos posibles.

Posteriormente se ha realizado una superposición de esos mapas para obtener una combinación de los distintos factores y de esta forma se obtiene el mapa de amenaza relativa. En la siguiente sección se describen los resultados de los diferentes factores.

### MAPA DE GEOLOGIA SUPERFICIAL

Las formaciones geológicas superficiales son unidades diferenciadas de materiales con naturaleza física diferente, se exponen en superficie y llegan a alcanzar espesores importantes, constituyendo la base de apoyo de las obras civiles, por lo cual el conocimiento de su naturaleza, características y fenómenos a los que están sometidos, son básicos en la planeación del medio físico (Hermelin, 1992). La geología se basó en el trabajo de Denyer et al. (1994), "Mapa Geológico de la Gran Área Metropolitana".

Las formaciones geológicas superficiales (rocas y suelos), se clasifican en cuatro grupos (Fig. 2), usando criterios de la ATC (Applied Technology Council, 1985), utilizados en códigos sísmicos mundiales, los que se derivan de la experiencia del terremoto de México de 1985; también se incorporan en esta clasificación propiedades geofísicas y geotécnicas. Estas son:

**TIPO S<sub>1</sub> (Roca):** Rocas volcánicas efusivas (basaltos y andesitas), intrusivas (granodioritas, monzonitas, gabros y sienitas), metamórficas (cornubianitas), poco fisuradas, con una velocidad de la onda cortante de (2500-4000 m/s).

**TIPO S<sub>2</sub> (Firme):** Rocas sedimentarias (areniscas, lutitas, calizas, brechas y conglomerados), rocas volcánicas (flujos piroclásticos, lavas y lahares), con espesores de arcilla inferiores a 20 m y velocidades de la onda cortante (1500-1700 m/s).

**TIPO S<sub>3</sub> (Blando):** Rocas volcánicas (lavas y depósitos piroclastos), fuertemente alteradas, donde los niveles freáticos son altos, los espesores de arcilla de hasta 10 m sobre suelo tipo

S<sub>2</sub> y velocidad de la onda cortante (800-1200 m/s).

**TIPO S<sub>4</sub> (muy blando):** Rocas volcánicas (lahares, cenizas y tobas), rocas sedimentarias (diatomitas, lacustres y lutitas), depósitos recientes (aluviones y coluvios), de baja calidad mecánica, con niveles freáticos someros, son rocas fuertemente alteradas, espesores de arcilla mayores a 50 m sobre suelos tipo S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> y S<sub>3</sub>, velocidad de onda cortante (235-300 m/s).

El espectro de respuesta de aceleraciones presenta períodos superiores a 0,7 s.

### MAPA DE FUENTES GENERADORAS DE SISMOS, INTENSIDADES MAXIMAS Y AREAS DE INFLUENCIA

Para la preparación de un modelo de amenaza sísmica, es necesario establecer las fuentes potenciales generadoras de sismos, incluyendo la delimitación espacial, sus dimensiones y orientación. La fuente puede ser representada por un área o una línea fuente. Las fuentes generadoras de sismos han sido obtenidas de la compilación del mapa "Sismicidad y Neotectónica" de Montero (1994). En el cuadro 1 se describen las fuentes que ofrecen evidencias geológicas y sismicidad reciente e histórica, basado en los trabajos de Morales (1985), Arias & Denyer (1991), Montero (1986) y Red Sismológica Nacional (1990-94).

En el mapa de fuentes generadoras de sismos (Fig. 3) se representan los sismos históricos y recientes, las intensidades máximas en las poblaciones más importantes, a estos se le asocian algunos rasgos geológicos como: lineamientos, fallas y desplazamientos relativos; también se escoge un sismo representativo de la fuente considerando sismicidad instrumental e histórica, observaciones de campo y daños a la infraestructura y a ese sismo se le asigna un área de influencia (intensidad de VII en la Escala de Mercalli Modificada).

### PERIODOS NATURALES DEL SUELO

Este parámetro ayudará a pronosticar los tipos de suelo y la susceptibilidad de amplificación sísmica.

Para efectuar el análisis de la respuesta sísmica del suelo se realizan los siguientes pasos:

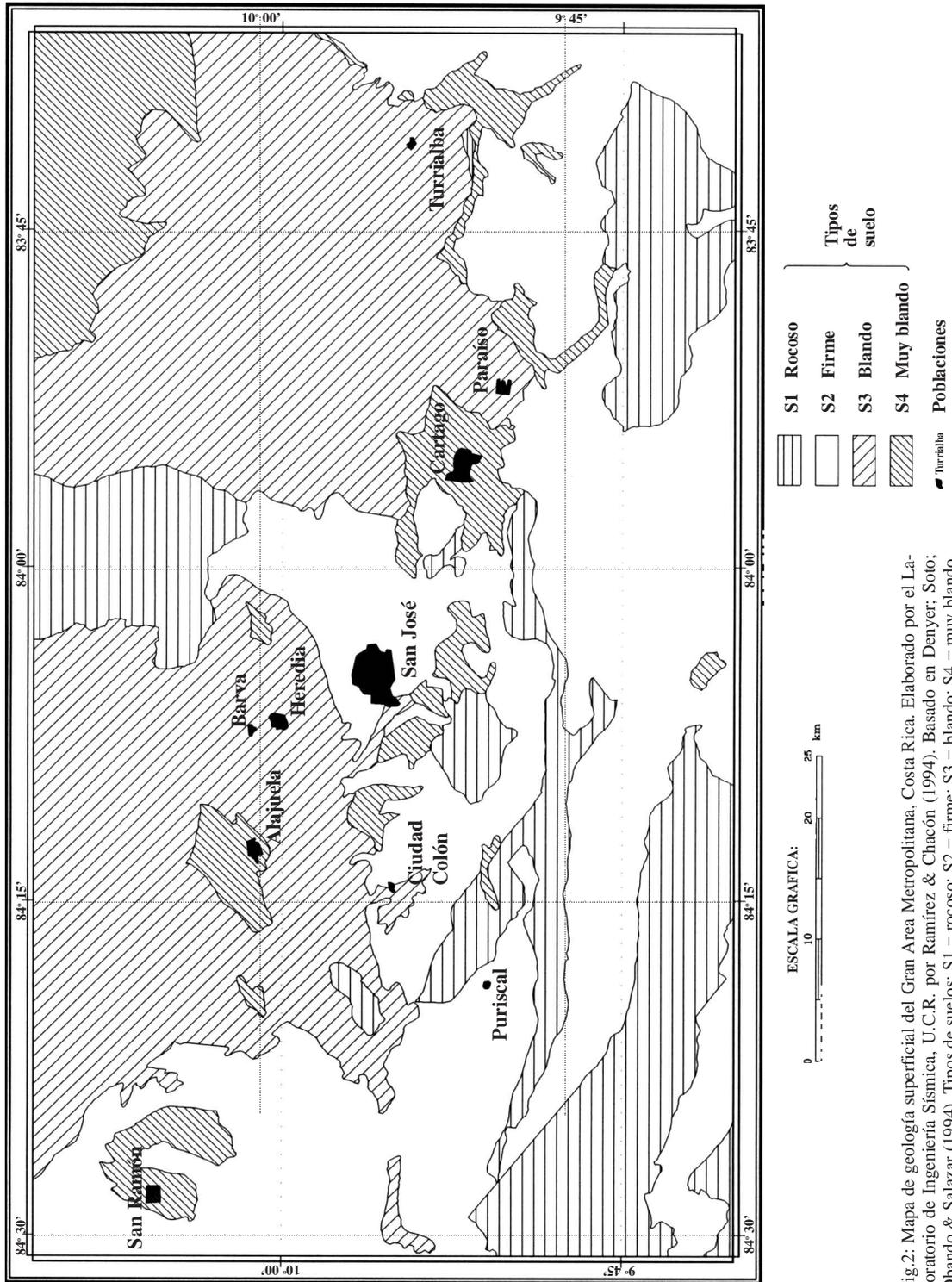


Fig.2: Mapa de geología superficial del Gran Area Metropolitana, Costa Rica. Elaborado por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica, U.C.R. por Ramírez & Chacón (1994). Basado en Denyer, Soto; Obando & Salazar (1994). Tipos de suelos: S1 = rocoso; S2 = firme; S3 = blando; S4 = muy blando.

CUADRO 1

Estimaciones Preliminares de Fuentes Generadoras de Sismos. Valle Central

Zona sísmica	Fallas o lineamientos	Orientación/ longitud (km)	Magnitud ML	Mecanismo de ruptura	Prof. km	Eventos relacionados
Puriscal**	F. Virilla F. Vibora	N45-60°E /64 N70°W /13	5,0-6,5	Transcurrente	5	30/06/1990x 22/12/1990
Pejibaye**	F. Atirro F. Omega	N40°W /8 N32°W /16	4,5-5,5	Transcurrente Normal	10	08/07/1993x 10/07/1993
Norte de Alajuela <sup>^</sup>	F. Alajuela F.Río Segundo F. Sabanilla-San Isidro	N80°W /32 Lineamiento N60°W /27	5,0-6,5*	Inverso Transcurrente	<15	28/03/1851 30/12/1888 29/08/1911
Cartago ~ Orosi	F. Coris-Guarco F. Agua Caliente-	N55-60°W /12+ N45-70°W /39+	5,0-6,5	Transcurrente	<10	02/09/1841 04/05/1910x
Sur de San José**	F. Corralillo	N26°W /10	4,5-5,5	Transcurrente	<10	13/04/1910 09/08/1991x
Irazú ~	Lineamientos	NNW-SSE	5,5	Transcurrente (?)	<15	30/12/1952x

\* Morales (1985)

\*\* Red Sismológica Nacional (1990-1994)

~ Alvarado et al. (1988)

<sup>^</sup> Montero (1984-1988-1994)

x Sismo seleccionado en el modelo

caracterizar el movimiento de la base rocosa, determinar la configuración y extensión de los estratos, evaluar las características dinámicas (módulo de elasticidad cortante y amortiguamiento) de los estratos y sus variaciones según la deformación y analizar la respuesta del suelo debido al movimiento de la roca subyacente.

Para la determinación de los períodos del suelo se usó el modelo unidimensional de ondas cortantes (Programa SHAKE, Schnabel et al., 1972), que asume que las ondas sísmicas se propagan verticalmente.

En este estudio se escogieron perfiles de suelos generales, basados en los trabajos de Gallegos (1980), Valverde (1981), Pujol & Castro (1981), Vargas (1987), Taylor (1994), Ramírez (en preparación) y Peraldo (en preparación).

En el cuadro 2 aparecen los resultados derivados del Programa de Computadora SHAKE, donde por ejemplo para la ciudad de Alajuela con un espesor de arcilla de 30 m, el período natural de vibración del suelo es de 1.12 s y la relación entre suelo/roca (amplificación sísmica es de 7.1).

En la figura 4 se presentan los espectros de respuesta de aceleración y velocidad para Alajuela y Heredia, puede observarse que el parámetro de aceleración generado en la superficie del terreno no siempre es el que mejor describe el nivel de daño sufrido por la estructura. El factor que más influye (aceleración o velocidad) depende de las características de rigidez del suelo. Así, en la figura 4a, el período en Alajuela es cercano a 1 s, por lo que toma importancia la velocidad (sistemas flexibles), y su punto máximo es cercano al período natural del suelo. Al contrario, en el perfil de Heredia se nota que las aceleraciones alcanzan valores altos en períodos cortos (Fig. 4b).

### MAPA DE ACELERACIONES MAXIMAS POSIBLES

Una vez definidas las características físicas: geología superficial y fuentes generadoras de sismos, se incorporan sobre las áreas de influencia (curva de intensidad VII Escala Mercalli Modificada) una serie de puntos aleatorios.

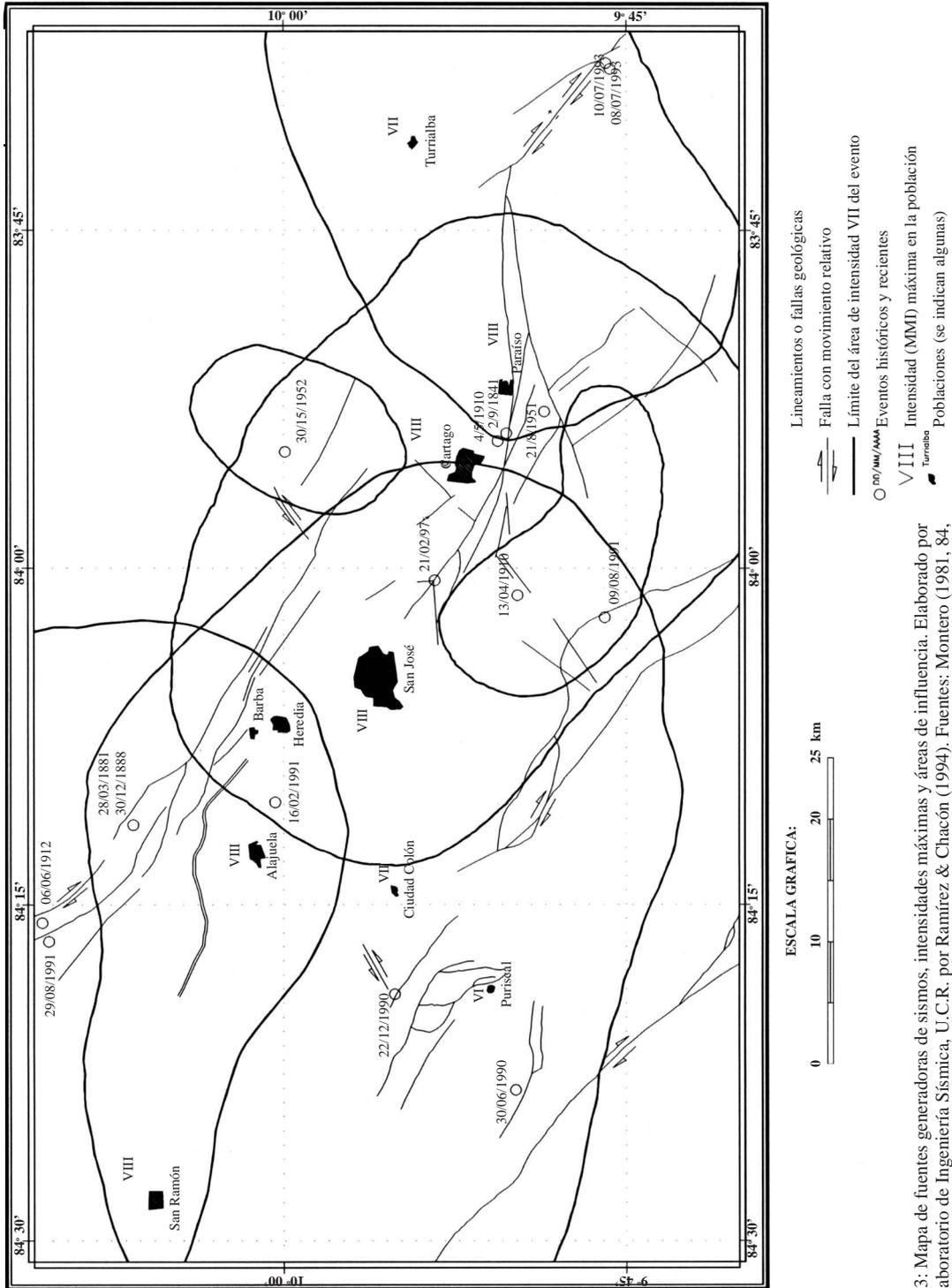


Fig.3: Mapa de fuentes generadoras de sismos, intensidades máximas y áreas de influencia. Elaborado por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica, U.C.R. por Ramírez & Chacón (1994). Fuentes: Montero (1981, 84, 86, 94), Alvarado et al. (1988), Morales (1985) y RSN (1990-94).

Cuadro 2

Períodos naturales del suelo en el Valle Central						
Déposito	Espesor de arcilla (m)	Acelr. Máxima Registro Base (g)	Período Fund. de Oscilación (s)	Amplificación Máxima	Período Predomin. Terremoto	Terremoto usado
Torre Energía ICE	14,51	0,07	0,42	11,85	0,35	Kern County Taft 21/07/52
Derecho	5	0,07-0,25	0,24-0,45	11,45-5,07	0,35	Kern County Taft 21/07/52
Tibás	15,5	0,07-0,25	0,56-0,91	9,31-4,96	0,35	Kern County Taft 21/07/52
Parque Morazán	15,6	0,07-0,25	0,50-0,83	9,66-5,10	0,35	Kern County Taft 21/07/52
Inst. Tec, Costa Rica	3,5	0,10-0,25	0,17-0,25	11,39-6,59	0,25	Imperial Valley 18/05/40
Fábrica Nal. Cemento	30,5	0,25	1,1	5,59	0,25	Imperial Valley 18/05/40
Cartago Centro	20	0,25	0,81	4,53	0,25	Imperial Valley 18/05/40
Alajuela Centro	29,5	0,09	1,12	7,1	0,35	Kern County Taft 21/07/52
Alajuela Juan Santamaría	18,50 53,50	0,09	0,39-1,51	8,70-3,95	0,25	Lower California 30/12/34
Heredia Centro	8,5	0,09	0,11	9,21	0,485	Kern County Taft 21/07/52
Puriscal Centro*	60	-	0,78	11	-	-
San Ramón Centro*	80	-	0,7-1,3	>10	-	-

Basado en Vargas (1987)

\* Método aproximado para determinar el período; relación de Joyner et al. (1981)

Posteriormente se usan relaciones de atenuación, calculadas a partir de los datos de aceleración pico registrado por el Programa de Medición de Sismos Fuertes del Laboratorio de Ingeniería Sísmica. El método empleado es el sugerido por Dahle et al. (1991 en: Climent et al. 1994). La ecuación simple de regresión puede ser expresada como:

$$\ln A - c_3 \ln R = c_1 + c_2 M + c_4 R + \ln \epsilon$$

donde A es la amplitud observada, M es la magnitud, R la distancia hipocentral y los coeficientes  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  y  $c_4$  son las constantes a determinar en la regresión. El valor de varepsilon es considerado como un valor de término normalmente distribuido en el dominio logarítmico.

Para este estudio se utilizaron las curvas calculadas por Taylor (1994) para tres diferentes tipos de suelo: blando, firme y rocoso. La ecuación de atenuación para suelo blando (Fig. 5) de

magnitudes locales mayores a 5.5 esta representado por:

$$\ln(PGA) = -3,23423 - 0,99789M - 0,5359 \ln R - 0,00207R - R/90 \text{ (m/s}^2\text{)}$$

Para cada punto en el área de influencia se obtuvieron los valores de aceleración máxima, luego se construyeron las curvas de isovalores de aceleración (Fig. 6).

Para la determinación de la recurrencia de aceleraciones se establece por medio de un método empírico que relaciona la intensidad con la aceleración (Trifunac & Brady, 1975). Se graficaron las intensidades máximas reportadas en el período de 1638 a 1994 (Peraldo & Montero, 1994, Montero & Peraldo en preparación), se observa que el promedio aproximado de la intensidad de VIII+ para el Valle Central es de 50 años, si se usa la relación propuesta anteriormente se tiene valores superiores a 50%

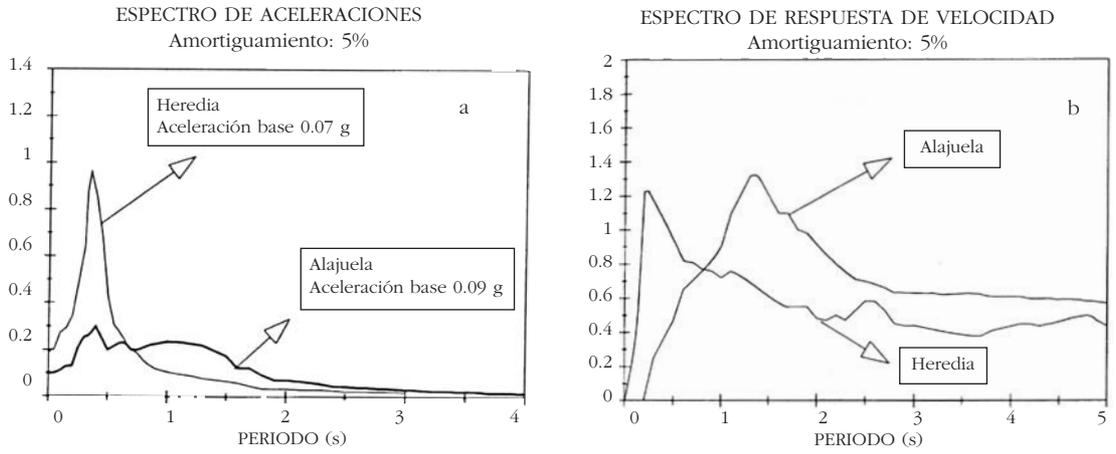


Fig. 4: Espectros de aceleración y velocidad.

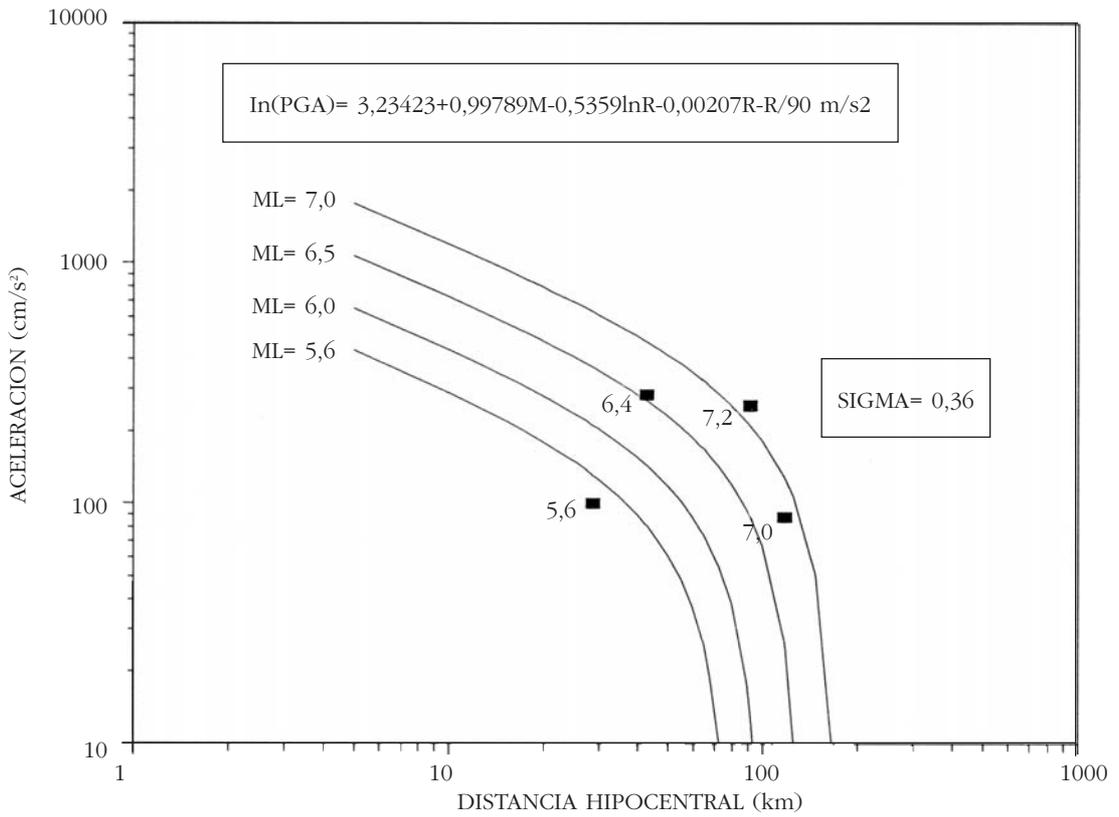


Fig. 5: Curva de atenuación para Cartago (suelo blando), (Taylor, 1994).

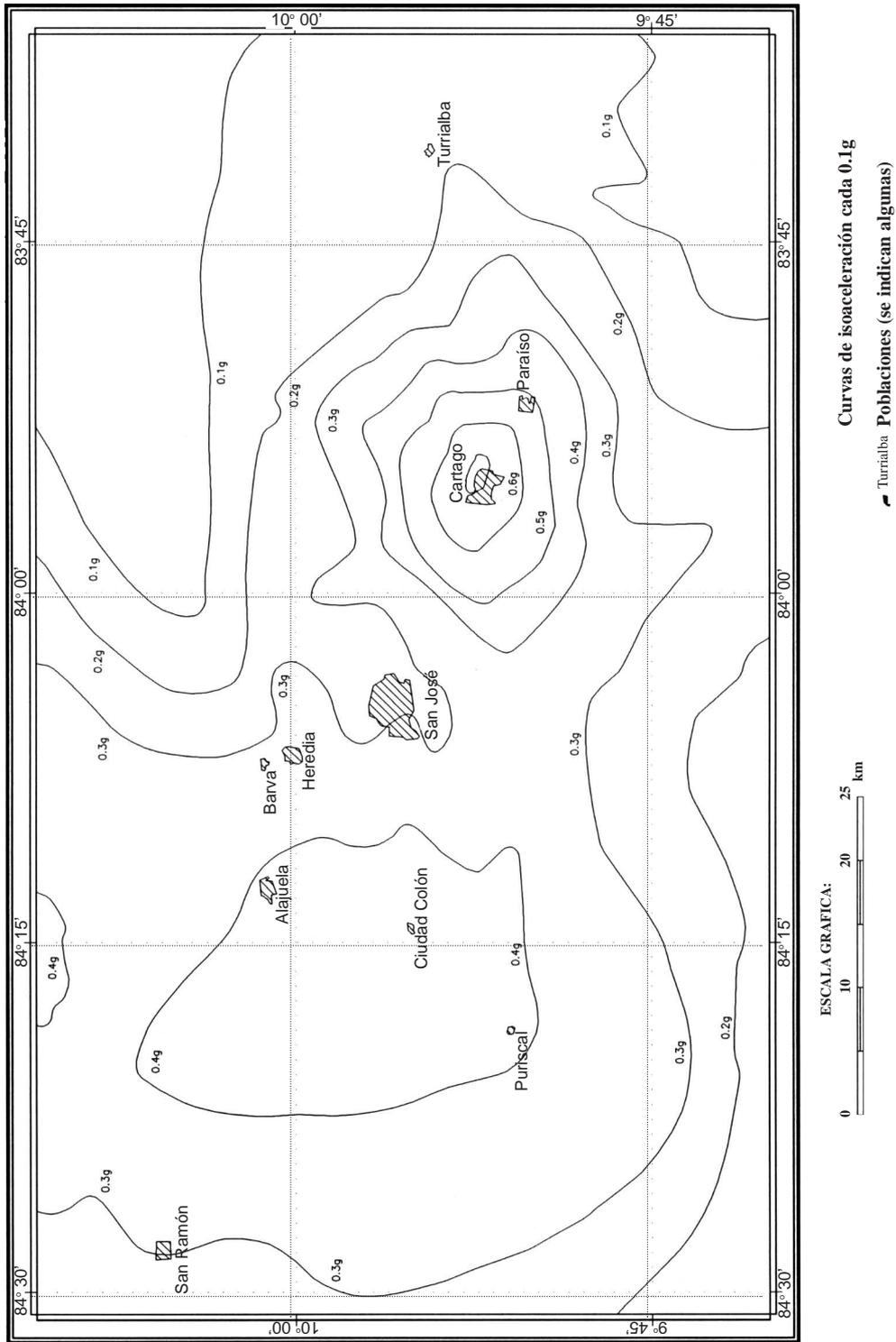


Fig.6: Mapa de aceleraciones máximas posibles Gran Area Metropolitana (50 años). Elaborado a partir de mapas a escala 1:200000 por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica, U.C.R., basado en Ramírez, Chacón & Taylor (1994). Curvas de isoaceleración cada 0,1 g.

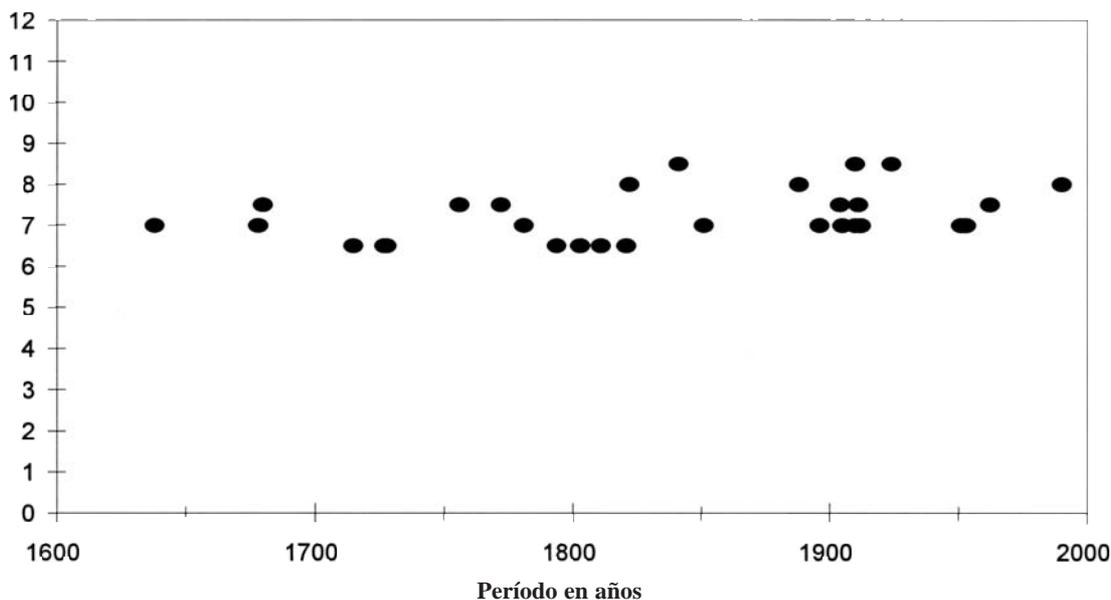


Fig.7: Intensidades máximas, Valle Central, período 1638-1994. Basado en Peraldo & Montero (1994) y Peraldo (1995).

de la gravedad, estos se notan cerca de la ciudad de Cartago (Fig.7).

acelerográficas, estudios de microzonificación y sismicidad histórica.

### MAPA DE AMPLIFICACION SISMICA

En esta etapa se superponen los mapas de geología superficial y isoaceleraciones, los demás fueron considerados en este último.

Se consideró que la curva de aceleración máxima de 40% de la gravedad y los materiales considerados como blandos y muy blandos son los más susceptibles a presentar el fenómeno de amplificación (Fig. 8).

Este mapa demuestra varias limitaciones del estudio de Riesgo Sísmico para Costa Rica (Mortgat et al. 1977), adoptado por el Código Sísmico de Costa Rica (versión 1986), la omisión de las fuentes de fallas locales, la relación de atenuación de aceleraciones propuesta por Esteva y Villaverde en 1970, que usa constantes de otros ambientes tectónicos y la base de datos sísmicos son entre las más importantes.

Debe revisarse críticamente el Código Sísmico de Costa Rica, e incorporarse la nueva visión tectónica del país, bases de datos sismológicas y

### MAPA DE DESARROLLO URBANO

El objetivo de este mapa es comparar el crecimiento urbano con las áreas de mayor amenaza de amplificación.

Se elaboró con base al trabajo de investigación "Mapa de posibles tendencias de crecimiento residencial en el GAM (Década de los 90) realizado por Alpizar (1994). El mapa se dividió en tres zonas generales alto, medio y bajo desarrollo urbano. Se observa un crecimiento acelerado en las ciudades de Cartago, Heredia, Alajuela, San Ramón y sur de San José que coinciden con las áreas de mayor de amenaza de amplificación sísmica (Fig. 9).

### ESPECTROS DE RESPUESTA

Los espectros se incorporan al mapa de amplificación, como una ayuda fundamental para visualizar mejor las fuerzas laterales desarrolladas por un sismo a una estructura.

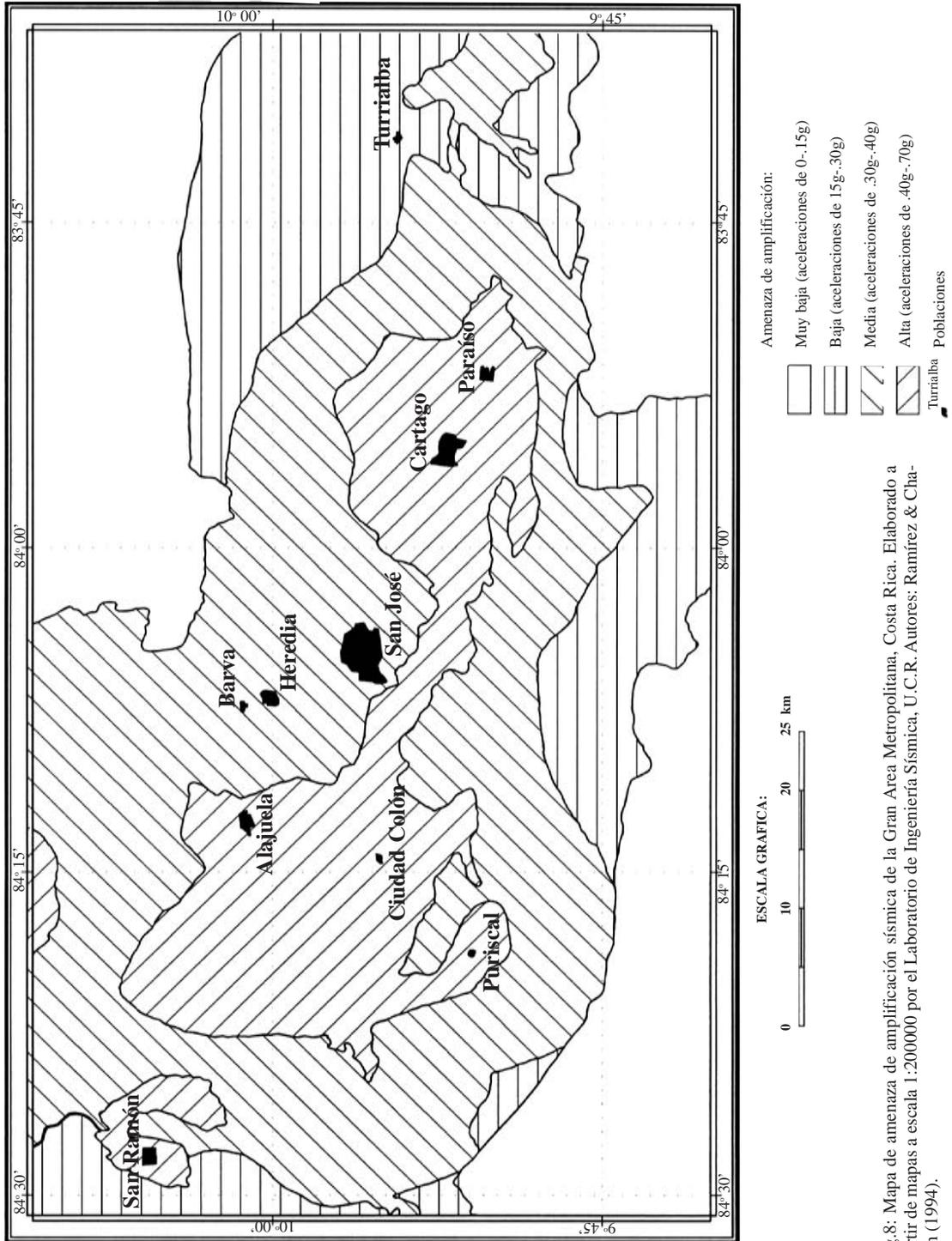


Fig.8: Mapa de amenaza de amplificación sísmica de la Gran Area Metropolitana, Costa Rica. Elaborado a partir de mapas a escala 1:200000 por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica, U.C.R. Autores: Ramírez & Chacón (1994).

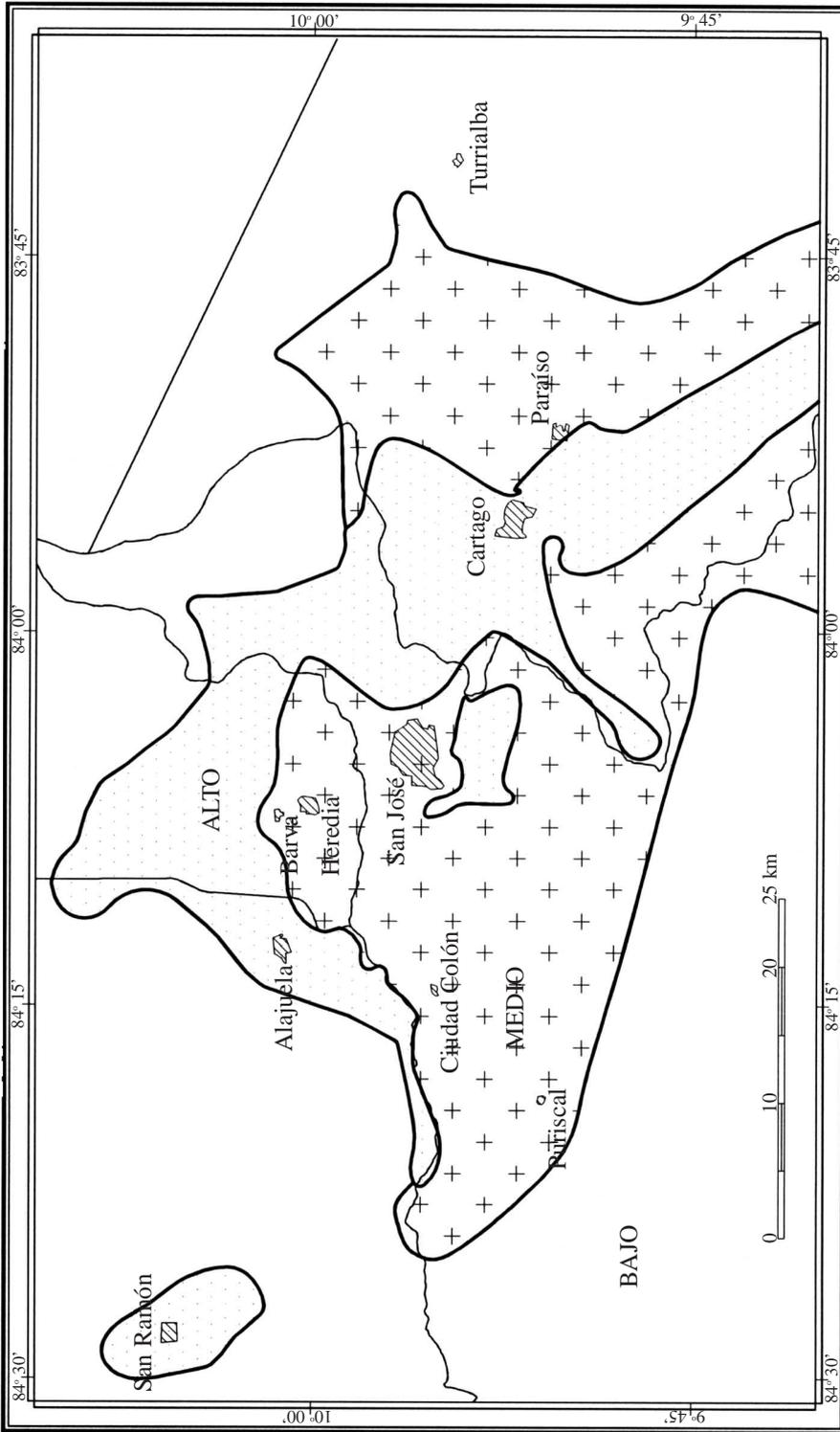


Fig.9: Mapa de desarrollo urbano de la Gran Area Metropolitana. Elaborado por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica, U.C.R. Digitalizado por Chacón, González & Ramírez (1994). Fuente Alpizar (PRODUS, 1994).

El espectro se basa en la respuesta máxima de un sistema amortiguado de un grado de libertad con diferentes períodos ante determinada sollicitación dinámica.

Newmark (1970) coloca los tres espectros de respuesta en un solo gráfico, todas las escalas son logarítmicas y la escala de desplazamientos y aceleraciones están colocados en sentidos opuestos a 45 de la vertical, la escala de pseudovelocidades, por ser el parámetro del cual se derivan todos los demás se coloca en la vertical.

Los espectros fueron calculados empleando el Programa SCANVIEW de KINEMETRIC, que permite pasar registros analógicos a digitales.

Se determinaron los espectros de respuesta para un amortiguamiento del 5% de las componentes principales del Terremoto de Piedras Negras, también conocido como Terremoto de Alajuela, obtenidos por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica, para las estaciones de San Ramón (SRM), Alajuela (ALJ), Instituto Nacional de Seguros (INS), Hatillo (HTO), Cartago (CTG) y Cachí (CCH) (Fig. 10).

En el cuadro 3 se presentan los valores máximos de aceleración, velocidad y desplazamiento de las componentes longitudinal, vertical y transversal.

### LIMITACIONES

La metodología permite tener una aproximación de las áreas con amenaza de amplificación sísmica y los principales factores involucrados. El

método identifica áreas donde se debe tomar en consideración las características de las formaciones geológicas superficiales (suelos) y ayuda a definir factores de amplificación dinámica para perfiles de suelo muy blando, blando, firme y rocoso, también permite orientar recursos a estudios geológicos, geotécnicos y geofísicos para el desarrollo de infraestructura humana. Este trabajo sin embargo, no sustituye bajo ninguna circunstancia estudios locales de suelo para diseño y concepción de obras humanas.

### CONCLUSIONES

- Las zonas de San Ramón, Alajuela, sur de San José y Cartago presentan la mayor amenaza de amplificación sísmica del Valle Central.

- Las condiciones de suelo deben ser consideradas como instrumentos valiosos en la toma de decisiones en los proyectos de ordenación física del territorio, planificación urbana, uso del terreno, urbanismo y explotación de recursos naturales.

- Utilizando los parámetros: geología superficial, fuentes generadoras de sismos, intensidades máximas, períodos naturales del suelo, aceleraciones, velocidades y desplazamientos, proponemos un mapa de amenaza de amplificación sísmica general, en donde los valores de aceleración y períodos del suelo son mayores a los propuestos por el Código Sísmico de Costa Rica.

- Se recomienda incluir en las normas de diseño sismo-resistente un cuarto tipo de suelo "muy blando" con períodos superiores a los 0,7 segundos.

Cuadro 3

Aceleraciones, velocidades y desplazamientos máximos del Terremoto 22 de diciembre de 1990

Comp.	Long.			Vert.			Trans.			
	Estación	Acel. cm/s <sup>2</sup>	Vel. cm/s	Desp. cm	Acel. cm/s <sup>2</sup>	Vel. cm/s	Desp. cm	Acel. cm/s <sup>2</sup>	Vel. cm/s	Desp. cm
SRM		163,04	11,31	1,73	95,73	6,96	0,78	171,22	16,61	2,99
ALJ		269,71	24,46	6,54	206,84	14,99	2,25	425,86	39,38	6,18
INS		122,36	8,62	2,01	52,28	3,71	0,96	161,56	9,08	1,47
HTO		173,67	9,87	1,71	79,73	3,94	1,04	218,23	7,27	1,40
CTG		235,81	12,36	0,85	105,74	2,94	0,38	284,43	10,97	1,51
CCH		39,47	1,93	0,31	20,50	0,85	0,46	29,08	1,80	2,54

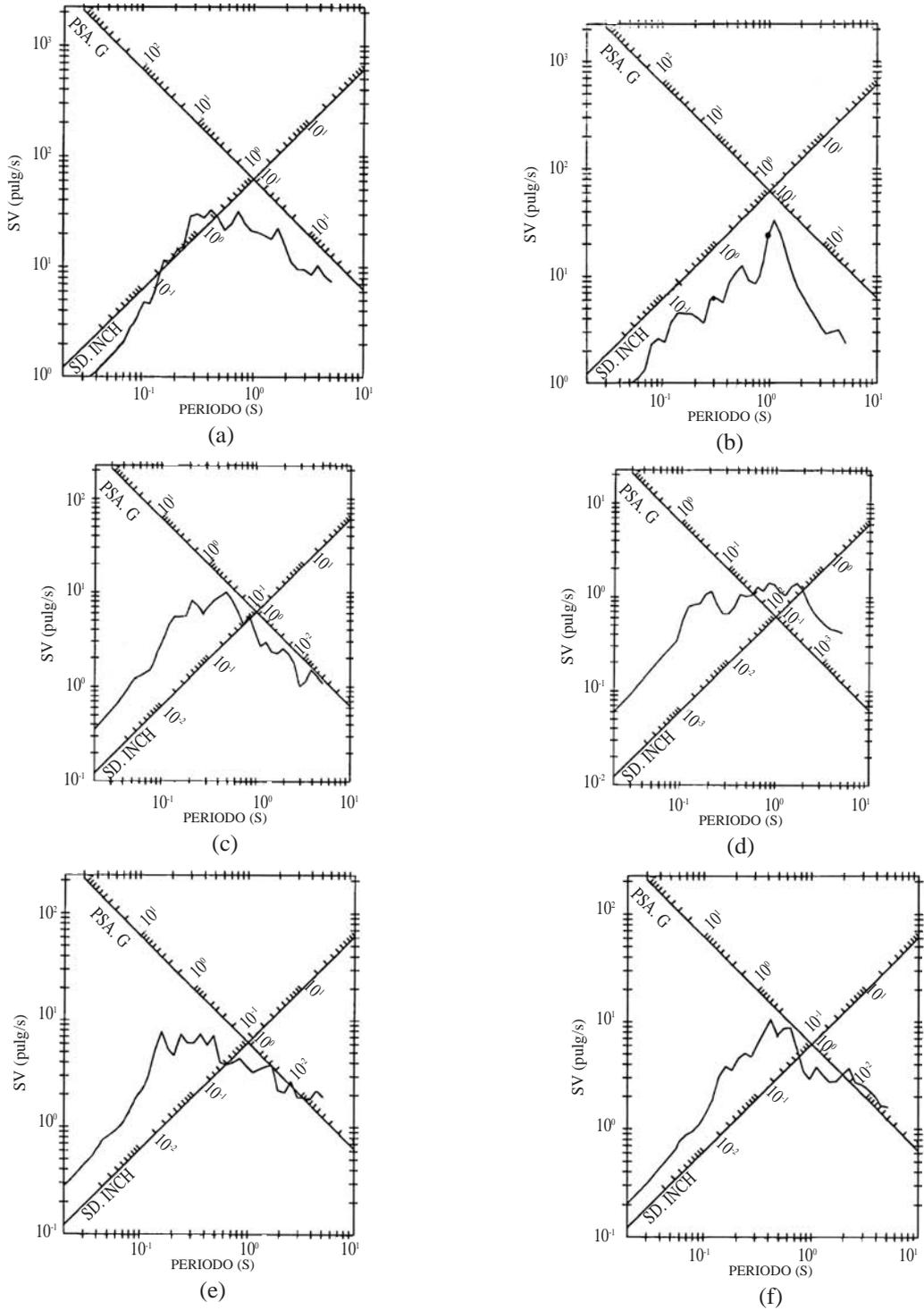


Fig. 10: Espectros de repuesta en las estaciones: a) Alajuela, b) San Ramón, c) Cartago, d) Cachí, e) Hatillo f) Instituto Nacional de Seguros.

### AGRADECIMIENTOS

Se agradece muy especialmente a Ingrid Vargas Azofeifa, Adalberto Ramírez y al personal del Laboratorio de Ingeniería Sísmica: Alfredo González, José Pablo Chacón, Franz Lara, Carlos Segura y William Brenes. También al Instituto de Investigaciones en Ingeniería, además a Giovanni Peraldo y Waldo Taylor quienes siempre estuvieron anuentes a colaborar con los autores.

### REFERENCIAS

- ACEVEDO, P. & ORTIGOSA, P., 1992: Local Soil Modelling. - *Rev. Geof.* 37: 63-80.
- AGUIRRE, A., 1992: Estudios de Microzonificación Sísmica. La experiencia en la Ciudad Viña del Mar. - *Rev. Geof.* 37: 31-46.
- ALGERMISSEN, S.T., KAUSEL, E., HANSON, S. & THENHAUS, P., 1992: Earthquake Hazard in Chile. - *Rev. Geof.* 37: 195-218.
- ALPIZAR, O.M., 1994: Evaluación del crecimiento residencial en el Gran Area Metropolitana. Período 1984-1992. - Escuela de Ing. Civil-UCR. Tesis de Lic. 72 págs + apéndice.
- ALVARADO, G., MORALES, L.D., MONTERO, W., CLIMENT, A. & ROJAS, W., 1988: Aspectos sismológicos y morfotectónicos en el extremo occidental de la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica. - *Rev. Geol. Amér. Central*, 9: 75-98.
- ARIAS, O. & DENYER, P., 1991 a: Aspectos neotectónicos y geológicos de Puriscal y alrededores, Costa Rica. - *Rev. Geol. Amér. Central*, 12: 83-95.
- ARIAS, O. & DENYER, P., 1991 b: Estructura geológica de la región comprendida en las hojas topográficas Abra, Carraigres. - *Rev. Geol. Amér. Central*, 12: 61-74.
- ASTROZA, M. & MONGE, J., 1992: Studies of seismic micro and mesozonig in Chile: Limitation to the use of weak types of construction. - *Rev. Geof.* 37: 15-30.
- AVILÉS, E., 1984: Respuesta sísmica de una estructura de suelo mediante el método de elemento finito con amortiguamiento variable. - Escuela de Ing. Civil - UCR, Tesis de Lic. 318 págs.
- BARQUERO, R., ROJAS, W. & FERNÁNDEZ, M., 1991: El enjambre de Puriscal y Mora de 1990. - En: Barquero, R. & Boschini, I. (eds): La crisis sísmica del Golfo de Nicoya y eventos sísmicos relacionados, Costa Rica, 1990. RSN, 74-94.
- CLIMENT, A., TAYLOR, W., CIUDAD REAL, M., STRAUCH, W., SANTANA, G., VILLAGRAM, C., DAHLE, A. & BUNGUM, H., 1994: Spectral strong motion attenuation in Central America. NORSAR. - The Res. Council of Norway, Kjeller, Norway.
- COLEGIO FEDERADO DE INGENIEROS Y ARQUITECTOS (Costa Rica), 1987: Código Sísmico de Costa Rica. - Editorial Tecnológica de Costa Rica (Cartago), 104 págs.
- DENYER, P. & MONTERO W., 1988: Mapa Geoestructural del Valle Central de Costa Rica. - Instituto Geográfico Nacional (1:150000), San José. 24 págs.+ 1 mapa.
- DENYER, P., ARIAS, O., SOTO, G., OBANDO, L. & SALAZAR, G.; 1994: Mapa Geológico de la Gran Area Metropolitana. Escala 1: 200 000. - En: Denyer, P. & Kussmaul, S. (eds): Atlas Geológico Gran Area Metropolitana. - Editorial Tecnológica de Costa Rica (Cartago).
- DOBRY, R., IDRIS, I.M. & TOCHER, D., 1978: Avances recientes en la caracterización de movimientos sísmicos en roca y suelo durante terremotos de magnitud moderada. - Proceedings Central American Conference on Earthquake Engineering, San Salvador, 9-12 enero: 373-384.
- ECHANDI, E., 1981: Unidades volcánicas de la vertiente norte de la cuenca del Río Virilla. - Escuela de Geología - UCR, Tesis de Lic., 123 págs.

- GALLEGOS, R., 1980: Estudio de un modelo para la evaluación sísmica local de depósitos de suelo. - Escuela de Ing. Civil - UCR. Tesis de Lic., 284 págs.
- HERMELIN, M., 1992: Medio Ambiente y Plan de Desarrollo Municipal. - Camara de Comercio de Medellin. 38 págs.
- JOYNER, W.B., WARRICK, R.E. & FUMAL, T.E., 1981: The effect Quaternary alluvium on strong ground motion in the Coyote Lake California. Earthquake of 1979. - Bull. Seism. Soc. Am. 71: 1333-1349.
- LORES, R., 1978: Condiciones del suelo en San José y su influencia en el espectro de diseño. - Escuela de Ing. Civil - UCR, Tesis de Lic., 118 págs.
- MONTERO, W., 1983: Aspectos sismológicos y tectónica del Valle Central de Costa Rica. - El sistema fluvial de Tárcoles, Costa Rica. - Inst. Geogr. Nac./CONICIT: 75-90.
- MONTERO, W., 1986: Período de recurrencia y tipo de secuencias sísmicas de los temblores interplaca e intraplaca en la región de Costa Rica. - Rev. Geol. Amér. Central, 5: 35-72.
- MONTERO, W., 1988: Sismicidad histórica de Costa Rica 1638-1910. - Geof. Int. 28:531-559.
- MONTERO, W. 1994: Sismicidad y Neotectónica. - En: Denyer, P. & Kussmaul, S. (eds): Atlas Geológico Gran Area Metropolitana. - Editorial Tecnológica de Costa Rica (Cartago): 147-160.
- MONTERO, W. & ALVARADO, GE., 1988b: Los terremotos de Bagaces de 1935 y 1941: Neotectonismo transversal a la Cordillera de Guanacaste. - Ciencia y Tecnología, 12(1-2): 69-87.
- MONTERO, W. & MIYAMURA, S., 1981: Distribución de intensidades y estimación de los parámetros focales de los terremotos de Cartago 1910. Costa Rica, América Central. - Inf. Sem. Julio-Diciembre, Inst. Geogr. Nac.: 9-34.
- MONTERO, W. & MORALES, L. D.; 1984: Sismotectónica y niveles de actividad de microtemblores en el suroeste del Valle Central, Costa Rica. -Rev. Geof. IPGH, (21): 21-41.
- MONTERO, W. & MORALES, L. D., 1988a: Zonificación sísmica del Valle Central. - Memorias 4 Seminario de Ingeniería Estructural, San José, Costa Rica: 335-351.
- MONTERO, W. & MORALES, L.D., 1990: Deformación y Esfuerzos Neotectónicos en Costa Rica. - Rev. Geol. Amer. Central, 3: 69-87.
- MONTERO, W. & PERALDO, G., (en preparación): Sismicidad Histórica de Costa Rica. Período de 1821 al presente.
- MORALES, L.D.; 1983: Riesgos Geológicos asociados con terremotos en los alrededores del Golfo de Nicoya. - Brenesia , 21: 93-117.
- MORALES, L.D., 1985: Las zonas sísmicas de Costa Rica y sus alrededores. - Rev. Geol. Amér. Central, 3: 69-101.
- MORALES, L.D. & Montero W., 1990: Sismotectónica, brechas sísmicas y la amenaza sísmica potencial de América Central. - Taller de sismicidad de América Central, CEPREDENAC. Guatemala: 73-78.
- MOHRAZ, B., 1976: A study of earthquake response spectra for different geological conditions. - Bull. Seism. Soc. Am. 66-3: 915-935.
- NEWMARK, N.M., 1969: Seismic design criteria for nuclear reactor facilities. - Proceeding of the 4th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, 2: 37-50.
- NEWMARK, N.M., 1970: Current trend in the seismic analysis and design of high-rise structures. Earthquake engineering, R.L. Wiegel Coordinating Editor Prentice-Hall Inc., Englewoods Cliffs, N.J.
- NEWMARK, N. & RIDELL, R., 1980: Inelastic spectral for seismic design. - 7th World

- Conference on Earthquake Engineering, Istanbul, Turkey.
- NEWMARK, N.M. & HALL, W. J., 1982: Earthquake spectral and desing. - Department of Civil Engineering University of Illinois Urbana Champaign, 103 págs.
- OVSICORI, 1990-1993: Informes preliminares de la actividad sísmica. - Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica. Universidad Nacional. OVSICORI-UNA.
- PERALDO, G., (en preparación): Deslizamiento de Puriscal.
- PERALDO, G. & MONTERO, W., 1994a: Temblores del período colonial de Costa Rica. - Editorial Tecnológica de Costa Rica (Cartago), 162 págs.
- PERALDO, G. & MONTERO, W., 1994b: Sismicidad de América Central. Tomo 1: Información macrosísmica para los terremotos destructivos de América Central. 1469-1899. - Instituto Panamericano de Geografía e Historia. San José, Costa Rica, Informe Técnico, 320 págs.
- PERALDO, G., QUIROS, C. & MONTERO, W., 1994c: Sismicidad Histórica de América Central. Tomo 2: Documento sobre la historia sísmica y volcánica de América Central. Período 1469-1899. - Instituto Panamericano de Geografía e Historia, 440 págs.
- PUJOL, R. & CASTRO, L., 1981: Propiedades dinámicas de los suelos de San José y Cartago. - Memorias Seminario de Ingeniería Estructural, 29-31 de Octubre: 95-109.
- QUIROS, G.A., 1985: Zonificación preliminar de los suelos del Area Metropolitana. - Escuela de Ing.Civil - UCR. Tesis de Lic., 78 págs.
- RAMÍREZ, R.; (en preparación): Microzonificación Sísmica de San Ramón, Alajuela, Costa Rica.
- RAMÍREZ, R., 1993a: Determinación de la Magnitud Local a partir de acelerogramas, Costa Rica. - VI Seminario de Ingeniería Estructural, San José, Costa Rica. 21 págs.
- RAMÍREZ, R., ALVARADO, J., RAMÍREZ, A.J., GONZÁLEZ D.J., LAURENT, R. & SEGURA, C., 1993: Registro de Aceleraciones del Sismo de Pejibaye Turrialba, Costa Rica, 10 de julio de 1993. - Instituto de Investigaciones en Ingeniería. Laboratorio de Ingeniería Sísmica. Reporte IINI-LIS. 86-93.58 págs.
- RAMÍREZ, R., ALVARADO, J., BRENES, W., RAMÍREZ, A. & SEGURA, C., 1994: Calibración de los acelerógrafos SMA-1. - Instituto de Investigaciones en Ingeniería. Laboratorio de Ingeniería Sísmica-UCR. Reporte IINI-LIS-91-94. 11 págs.+apéndice.
- RAMÍREZ, R. & BRENES, W, 1994: Registro de aceleraciones terremoto del 22 de Diciembre de 1990. Valle Central, Costa Rica. - Instituto de Investigaciones en Ingeniería. Laboratorio de Ingeniería Sísmica-UCR. Reporte IINI-LIS. 92-94, 42 págs.
- RAMÍREZ, R., SANTANA, G. & CHACÓN, O., 1994: Mapa de Amplificación Sísmica del Valle Central, Costa Rica. - 9th Seminar on Eartquake Prognostics, San José, Costa Rica. 15 págs.
- RSN, 1990-1994: Informes preliminares de la actividad sísmica. - Red Sismológica Nacional. RSN-ICE.
- SANTANA, G., VARGAS, W., MATAMOROS, A., SEGURA, V. & RAMÍREZ, A., 1990: Sismo de Cóbano, 25 de marzo de 1990: Efectos sobre suelos y edificaciones. - Instituto de Investigaciones en Ingeniería. Laboratorio de Ingeniería Sísmica-UCR, Reporte IINI 49-90, 194 págs.
- SANTANA, G., MATAMOROS, A., VARGAS, W., SIBAJA, J., TAYLOR, W., SANCHO, V., SEGURA, C., RAMÍREZ, A. & LAURENT, R., 1991: Registro de aceleraciones del sismo de Frailes, 9 de agosto de 1991. - Instituto de Investigaciones en Ingeniería. Laboratorio de Ingeniería Sísmica-UCR, Reporte IINI 62-91, 40 págs.

- SCHNABEL, B., LYSMER, J. & BOLTON, S., 1972: SHAKE, A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites. - College of Engineering University of California (Berkeley, California), 88 págs.
- SEED, H.B. & IDRIS, I.M., 1969: Influence of soil conditions on ground motion during earthquake. - J. Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, (95-SM-1).
- SEED, H.B., UGAS, C. & LYSMER, J., 1976: Site Dependent Spectra for Earthquake resistant design. - Bull. Seism. of Amer. 66-1: 221-243.
- SEED, H.B., SINGH, S., CHAN C.K. & VILELA, T.F., 1982: Consideration in undisturbed sampling of sands. - Geotechnical Eng. Div. ASCE 108: GT2: 265-283.
- SELNES, B., 1987: SHAKE(N). Computer Program for analysis of Earthquake response in horizontally layered sites. - Norwegian Geotechnical Institute, 43 págs + apéndice.
- TAYLOR, W., 1994: Características sísmo-dinámicas del suelo blando en la región central de la ciudad de Cartago, Costa Rica. - Escuela de Geología - UCR, Tesis de Lic., 100 págs.+ apéndice.
- TRIFUNAC, M.D. & BRADY, A.G., 1995: On the correlation of seismic intensity scale with peak of recorded strong ground motion. - Bull. Seism. Soc. Am. 6: 139-162.
- VALVERDE, M.A., 1981: Análisis de la respuesta dinámica de depósitos de suelo ubicados en varias ciudades del Valle Central. - Escuela de Ing. Civil - UCR, Tesis de Lic., 221 págs.
- VARGAS, W.J., 1987: Análisis dinámico de depósitos de suelo. - Instituto de Investigaciones en Ingeniería. Laboratorio de Ingeniería Sísmica-UCR. Reporte INI: 41-87.
- YEGIAN, M.K., GHAHRAMAN, V.G. & GAZETAS, G., 1994a: Ground motion and soil-response analyses for Leninakan, 1988 Armenia Earthquake. - J. Geotechnical Engineering (American Society of Civil Engineers), 120-2.
- YEGIAN, M.K., GHAHRAMAN, V.G. & GAZETAS, G., 1994b: Seismological, Soil and Valley Effects in Kirovakan, 1988, Armenia Earthquake. - J. Geotechnical Engineering (American Society of Civil Engineers), 120-2.