

**Universidad de Costa Rica
Instituto de Investigaciones en Ingeniería
Laboratorio de Ingeniería Sísmica**

Informe Final

**Simulaciones numéricas para sismos fuertes de Costa Rica
Código: 731-A9-196**

Investigador:

Aarón Moya

31 de julio del 2012

Título: Simulaciones numéricas para sismos fuertes de Costa Rica

Código: 731-A9-196

Vigencia: 1 julio 2009 al 31 julio 2012

Investigador: Aarón Moya ($\frac{1}{4}$ TC), Principal
Víctor Schmidt ($\frac{1}{8}$ TC), Asociado

Antecedentes:

Las simulaciones numéricas permiten estimar diferentes escenarios de la ocurrencia de terremotos así como llegar a entender como es el fenómeno de la ruptura de falla y propagación de las ondas sísmicas. Es decir, no podemos crear los sismos, pero si introducir los parámetros de la fuente sísmica en un modelo de capas y estudiar la forma en que se propagan por medio de las computadoras.

Existen métodos de modelaje de ondas en 1, 2 y 3 dimensiones. En este trabajo se optó por llevar a cabo las simulaciones usando métodos llamados estocásticos que se pueden considerar de una dimensión. Estos generan registros sintéticos de aceleración que toman en cuenta los efectos de la magnitud del sismo, la atenuación del medio y los efectos de sitio.

Se pretende analizar el posible efecto que tuvieron los siguientes sismos fuertes:

- a- 04 de mayo de 1910 en Cartago
- b- 03 de julio de 1983 en Pérez Zeledón
- c- 25 de marzo de 1990 en Cóbano
- d- 22 de diciembre de 1990 en Piedras Negras
- e- 10 de julio de 1993 en Pejibaye
- f- 20 de agosto de 1999 en Dominical
- g- 22 de noviembre del 2004 en Damas
- h- 08 de enero del 2009 en Cinchona

Evidentemente los primeros eventos no poseen ningún tipo de registro acelerográfico debido a que en esa época no existían acelerógrafos o eran muy pocos.

Para cada sismo, se calculó el valor de aceleración máximo luego de promediar un total de 100 eventos. En base a ese valor de aceleración se hacen correlaciones con las intensidades máximas y el nivel de daño observado en cada caso.

Cuando existen registros de aceleración observados, las comparaciones se hacen en forma directa con los mismos en las tres componentes. La razón para esto es que el resultado de un acelerograma producido artificialmente por el método estocástico representa una resultante (es decir no está separado en las tres componentes ortogonales de movimiento del suelo).

Ejecución del proyecto

Objetivos Específicos:

1. Obtener registros sintéticos

La obtención de registros sintéticos se ha completado en el desarrollo de esta investigación y se muestran en cada uno de los apartados de cada sismo.

La información se muestra en forma de gráficos para eventos cercanos al epicentro y de tablas para los mismo o para otras estaciones que fueran de interés.

2. Identificar las zonas más fuertemente golpeadas por un terremoto

Esto se muestra en cada registro obtenido y se hace comentario respectivo al nivel de aceleración calculado así como también su intensidad.

Los datos de aceleración máxima son en muchas veces correlacionables con el nivel de daño producido en un terremoto. Por tanto, se trata de encontrar una relación directa entre los valores máximos y los sitios que experimentaron mayor movimiento durante el sismo.

3. Identificar zonas de impacto en cuencas sedimentarias como Turrialba

Este objetivo se refiere más que nada a la comparación que se hace de un acelerograma obtenido en un sitio sedimentario como el Valle de Turrialba y comparándolo con otro cercano como el ubicado en una colina.

También se hace referencia al caso de San Isidro de El General con el terremoto del 3 de julio de 1983 que ocurrió en una falla muy cercana a ese centro de población, así como a lo sucedido en el terremoto Cinchona del 2009.

METODOLOGIA

Los cálculos del registro sintético se llevaron a cabo usando el método estocástico popularizado por Boore (1983, 2005) en el cual se obtiene un registro sintético que representa un valor medio del comportamiento del suelo mediante la multiplicación de los efectos de la fuente sísmica, el medio de propagación y los efectos de sitio (Fig 1).

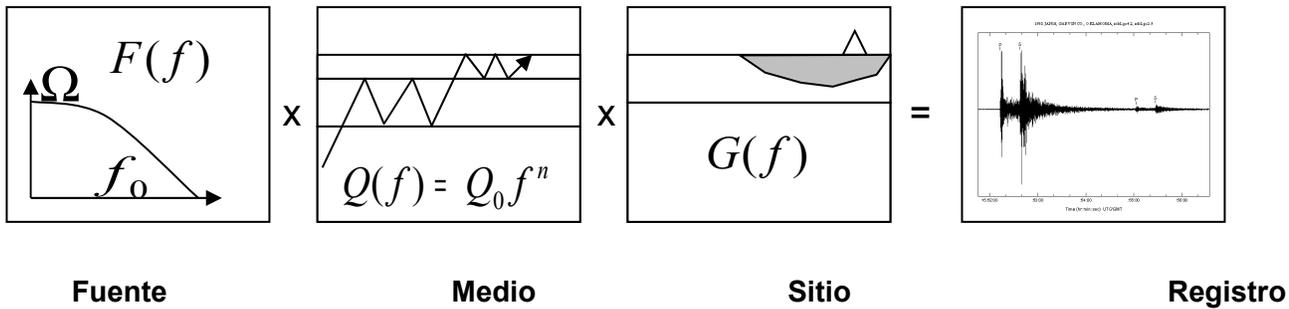


Figura 1. Esquematación de las partes más importantes de un modelado estocástico. La fuente sísmica se multiplica por el efecto de propagación y el efecto de sitio para obtener un registro sintético. La fuente está dada por un nivel plano y una frecuencia de esquina, el efecto de propagación por la distancia, R, y el valor de la atenuación, Q. El efecto de sitio se obtiene de observaciones realizadas a lo largo del tiempo con sismos registrados *in situ*.

La fuente sísmica es comúnmente modelada como una fuente puntual representada por el momento sísmico y la frecuencia de esquina.

El medio de propagación está representado por el valor de la atenuación Q y la distancia de cada estación al hipocentro. Para el medio de propagación se utilizó la corrección por dispersión geométrica dada por la distancia hipocentral y el factor de atenuación o calidad llamado Q. Este último fue calculado para Costa Rica usando datos de aceleración en Moya (2009) y posee el siguiente valor

$$Q(f) = (231,5 \pm 0,06) f^{(0,8 \pm 0,08)} \quad (1)$$

La combinación de esos tres factores da como resultado un registro acelerográfico. Es decir, si conocemos la función de la fuente, el medio de propagación (dado por el factor de calidad Q) y del efecto de sitio, podríamos reconstruir un acelerograma de cualquier evento sísmico que se desee.

En este trabajo se analizaron precisamente los sismos más importantes ocurridos en el país desde 1983 hasta el 2009 a excepción del terremoto de Limón de 1991. El método estocástico que se utilizó en este trabajo asume que la fuente generadora de sismos fuertes se puede considerar como un punto, no como un área. Un terremoto de magnitud inferior a 7 y generalmente lejano, se puede considerar como una fuente puntual bajo ciertas condiciones. El terremoto de Limón fue de Mw 7.7 por lo que haberlo analizado desde el punto de vista estocástico, asumiendo una fuente puntual, no hubiera sido correcto.

La tabla 1 muestra los eventos sísmicos que se tomaron en cuenta para cada simulación.

Tabla 1. Parámetros de los sismos utilizados en este estudio

Fecha	Epicentro	Mw	Profundidad (km)	Caída de esfuerzos
04/05/1910	Cartago	6.0	5.0	80
03/07/1983	Buena Vista	5.8	14.0	80
10/07/1993	Pejibaye	5.8	13.0	80
25/03/1990	Cóbano	7.0	20.0	80
22/12/1990	Piedras Negras	6.0	5.0	80
20/08/1999	Dominical	6.9	20	80
22/11/2004	Damas	6.4	24	80
08/01/2009	Cinchona	6.1	5.0	80

Efectos de Sitio

El efecto de sitio se a partir de cocientes espectrales de sedimento contra roca (Borchert, 1970) o la razón de la componente horizontal contra la vertical (Lermo & Chávez-García, 1993), inversiones de concientes espectrales (Moya, 2009) e incluso simulaciones numéricas.

Los efectos de sitio son todas aquellas variaciones en amplitud, contenido frecuencial y duración que experimenta una señal sísmica en el lugar de registro. Normalmente tales efectos tienden a amplificar las ondas sísmicas cuando los sedimentos son de baja impedancia como el aluvión o las cuencas sedimentarias. Los sitios ubicados sobre calizas, lavas y granito por el contrario amplifican poco la señal.

Al ser Costa Rica un país tropical con un elevado índice de precipitación y también altamente volcánico, es de esperarse que los suelos sean en su mayoría lo suficientemente suaves como para amplificar las ondas sísmicas cuando ocurre un terremoto. El Valle Central es un buen ejemplo de ello. En Ramírez et al. (1996) se concluye que lugares como San Ramón, Alajuela, el sur de San José y Cartago entre otros están constituidos por suelos muy blandos.

A pesar de que los efectos de sitio son tan importantes, la determinación objetiva de estos es sumamente difícil y se han propuesto numerosas técnicas. Una de las más básicas es la que consiste en dividir el espectro de una señal en suelo contra el mismo espectro de una señal en roca (Borchert, 1970).

Esta técnica es válida siempre que la distancia de las dos estaciones usadas en el análisis sea mucho menor que la distancia de ambas al hipocentro. Al cumplirse con ese requisito, en el conciente se estarían eliminando otros efectos tales como el medio de propagación y la fuente sísmica. El resultado del cociente es sin embargo, una estimación relativa porque no se conoce el efecto real del sitio en roca que es usado como referencia.

Otra técnica bastante común es la de dividir la componente horizontal entre la vertical, conocido como H/V. La componente vertical de los registros sísmicos se ha observado que presenta poca aplicación en relación con las componentes horizontales y por esa razón se ha asumido que a la hora de calcularse le cociente H/V este elimina los efectos de la fuente y del medio de propagación. Diversos autores han dedicado importantes trabajos para demostrar la validez de la técnica (Konno & Ohmachi, 1998; Lermo & Chavez-Garcia, 1993).

Para efectos de utilizar todas las estaciones disponibles y cercanas a cada uno de los eventos seleccionados, los efectos de sitio de cada estación se calcularon usando el cociente H/V usando todos los registros posibles.

Se ha tomando una ventana de unos 50 segundos a partir del arribo de la onda P para cada sismo importante ocurrido del 2010 y 2011 según la siguiente ecuación

$$S(f) = \sqrt{NS(f)^2 + EW(f)^2} \quad (2)$$

donde S(f) es la resultante del efecto de sitio, NS(f) es la componente norte-sur y EW(f) es la componente este-oeste del registro de aceleración en el dominio de la frecuencia.

Tabla 2. Valores de aceleración del suelo y su correspondencia en la Intensidad de Mercalli Modificada (Wald et al., 1999)

Rango de aceleración (cm/s ²)	Intensidad de Mercalli Modificada
Menor a 1.7	I
1.7-14	II-III
14-39	IV
39-92	V
92-180	VI
180-340	VII
340-650	VIII
650-1240	IX
Mayor a 1240	Mayor a X

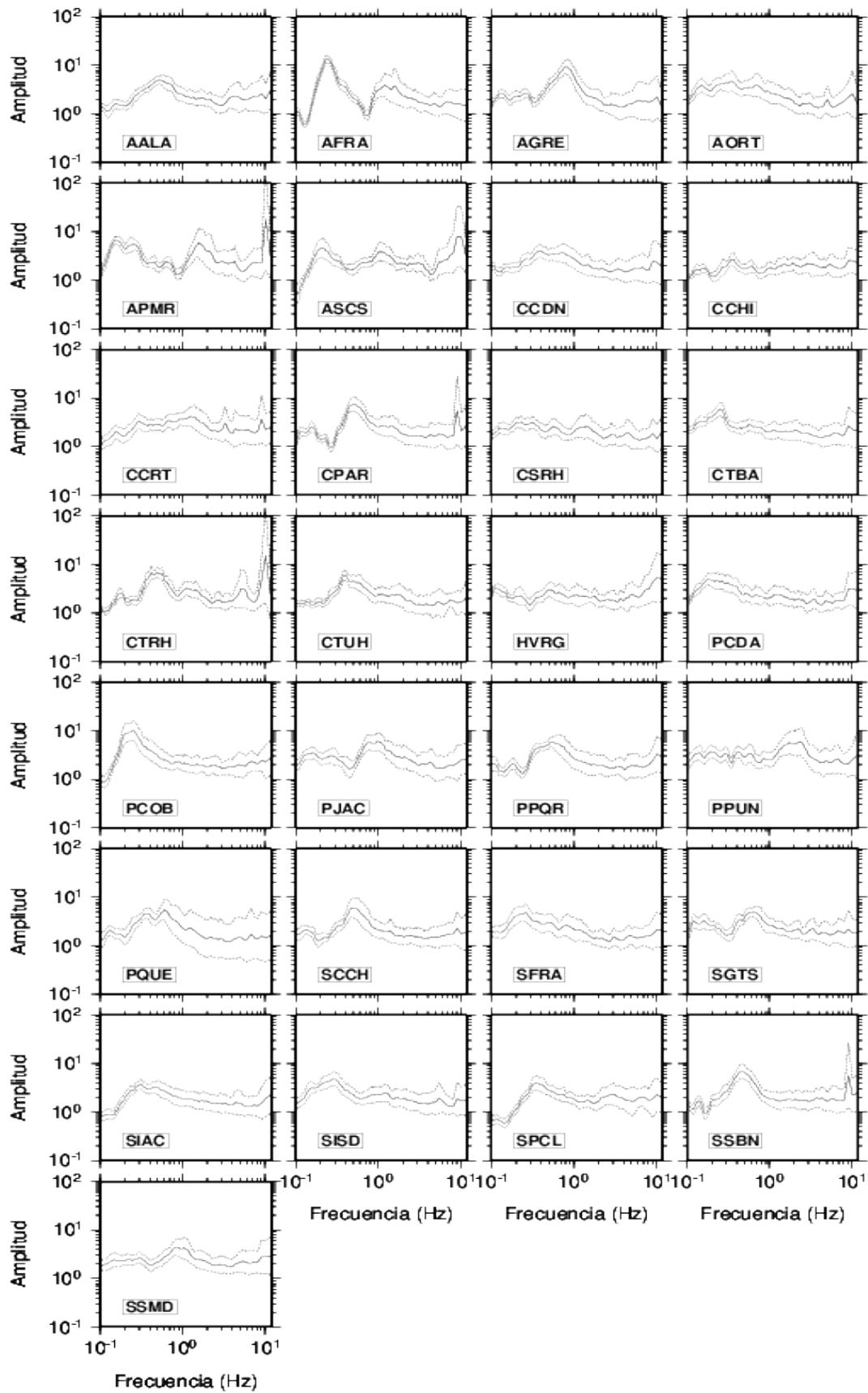


Figura 2. Efectos de sitio para estaciones usadas en las simulaciones

Los efectos de sitio así determinados son utilizados para ser usados en el programa de simulaciones estocásticas propuesto por Boore (1983, 2005).

En la figura 2 se muestran 29 sitios seleccionados para calcular los diferentes valores de aceleración sintética. La traza del centro representa el valor promedio de amplificación mientras que las líneas punteadas la desviación estándar de los mismos.

Sismo de Cartago de 1910.

El 4 de mayo de 1910 un sismo de aproximadamente Ms 6.4 con epicentro en la Falla de Agua Caliente destruyó la ciudad de Cartago y causó la muerte a más de 300 personas (Montero & Miyamura, 1981). El evento de 1910 no fue el único, algunos de los otros sismos históricos más importantes en las cercanías de Cartago y San José se describen en Fernández & Montero (2002). Entre ellos están los siguientes:

1. En 1842 sucedió el sismo de Alajuelita, el cual tuvo una magnitud que osciló entre Ms 5.0 y 5.5.
2. En 1910 ocurrieron dos sismos muy importantes a lo largo de la falla de Agua Caliente. El primero fue el 13 de abril y el segundo el 04 de mayo. Este último fue el que destruyó la ciudad de Cartago y que se llamó Terremoto de Santa Mónica.
3. La intensidad del sismo del 13 de abril fue de VII en la escala de Mercalli, el del 04 de mayo de VIII en la misma escala. (Fernández & Montero, 2002; Montero & Miyamura, 1981).
4. El sismo del 13 de abril se ubicó al este, cerca de San José, el sismo del 04 de mayo se ubicó al oeste, al sur de Cartago.
5. En el año 1951 sucede otro temblor, esta vez cerca de Paraíso.
6. En la década de 1980 se presentaron varios sismos que tuvieron magnitudes de alrededor de 3.0 grados . Los sismos ocurrieron al suroeste de Cartago y fueron atribuidos a la Falla Navarro (Salazar et al., 1992; Fernández & Pacheco, 1998).
7. En 1994 en junio se presenta un enjambre que la Red Sismológica Nacional ubica entre las fallas de Jaris, Agua Caliente y Río Azul con máximos de 3.0 grados (Fernández & Montero, 2002).
8. En octubre de 1994 se presente otro enjambre en la misma zona con máximos de 4.2 grados (RSN, informe de 1994). Fernández & Montero (2002) sugieren que la actividad fue provocada por la falla Agua Caliente.
9. En 1997 se presenta nuevamente otro enjambre sísmico con magnitud máxima de 3.7 grados en la intersección de las fallas Jericó y Agua Caliente (Fernández & Montero, 2002).
10. En el año 2004, Montero et al. (2006) indican que un nuevo enjambre sísmico ocurrió entre Aserri y Desamparados y que en esa ocasión, el máximo de magnitud fue de Mc 3.7 (Mc = magnitud de coda)

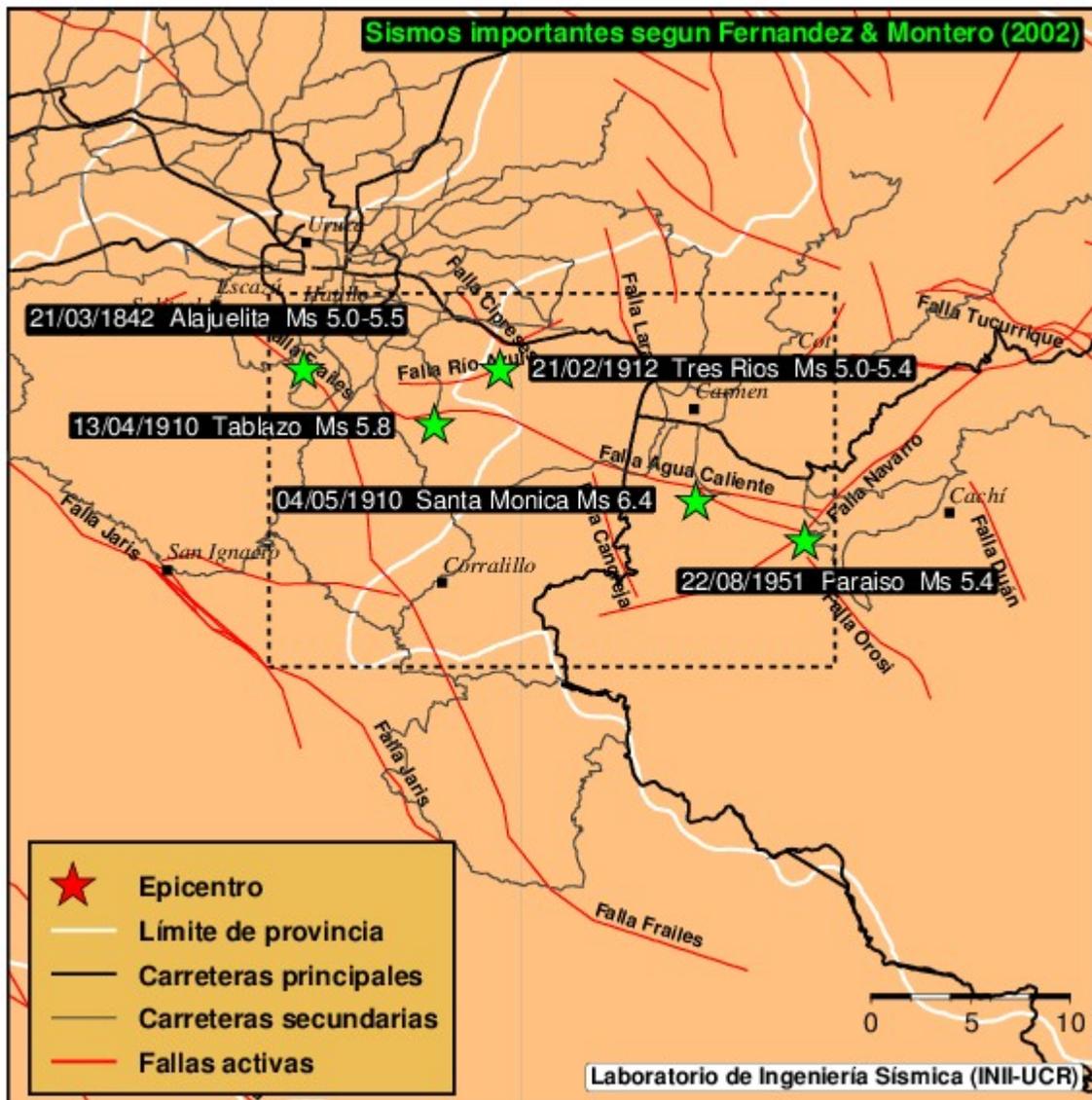


Figura 3. Principales sismos fuertes en el pasado en la zona del sureste de San José y suroeste de Cartago.

Montero (1986) en el artículo "Período de recurrencia y secuencias sísmicas de los temblores interplaca e intraplaca en la región de Costa Rica" dice que los eventos del Tablazo de 1910, Santa Mónica de 1910 y Tres Ríos de 1912, junto con otros sismos fuera de nuestra área de interés, fueron parte de una misma secuencia sísmica.

Posterior al evento de Tres Ríos, hubo un período de tranquilidad sísmica que duró 39 años. Ese período de tranquilidad se interrumpió con la ocurrencia del temblor de Paraiso de 1951 que, junto con la ocurrencia de otros sismos, finaliza en 1955. A partir de ese año, un nuevo período de tranquilidad sísmica incia hasta el año 1985.

Ese autor señala que los períodos de tranquilidad sísmicas parecen ser variables con valores mínimos de 20 años y máximos de 39 años. En las conclusiones se indica que el período medio estimado para el Valle Central es de 29.9 más-menos 9.9 años.

En otro estudio por Montero et al. (2005) se indica que el lado oeste de la falla Agua Caliente es una

región donde han ocurrido muchos eventos sísmicos, particularmente entre 1984 y 2005. Según los autores, esto puede ser debido a que en esa región existe un cambio de rumbo en la geometría de la falla que facilitaría la acumulación de esfuerzos. Ellos sugieren que este cambio de geometría puede haber influido incluso en la propagación de la ruptura del terremoto de abril de 1910.

Según se desprende de esos trabajos de investigación se puede decir que:

1. En la zona del sureste de San José y suroeste de Cartago es común que sucedan enjambres sísmicos.
2. Las magnitudes más grandes de dichos enjambres pueden ser de hasta 4.0 grados si no se presenta un evento mayor.
3. En caso de que ocurriera un evento fuerte, muy probablemente su magnitud podría rondar los 5.0 a 6.0 grados. Históricamente, los sismos importantes que han ocurrido en el Valle Central han rondado esos valores.
4. Es muy importante tener presente que si el foco o hipocentro de un sismo es somero (menos de 5 km), aunque sea de magnitud moderada, podría generar daños importantes a estructuras que no cuenten con los lineamientos de construcción recomendados por el Código Sísmico.

El evento del 4 de mayo de 1910 es importante no solo desde el punto de vista económico y social, sino también por las siguientes observaciones:

1. El sismo no ocurrió como un evento aislado, sino que se habían presentado varios eventos con anterioridad. La actividad sísmica inició el 13 de abril (Montero & Miyamura, 1981) y luego de ese día se sucedieron otros temblores sentidos por la población. Muy probablemente algunos de esos sismos eran precursores.
2. Las personas escucharon retumbar la tierra lo cual es indicativo de que la fuente sísmica se debía encontrar relativamente cerca de la superficie.
3. En el trabajo por Montero & Miyamura (1981) se observa que las intensidades sísmicas fueron grandes en el área epicentral y que estas disminuyeron significativamente con la distancia lo que es indicativo de eventos someros.
4. San José no sufrió daños tan cuantiosos como Cartago aún cuando ambas ciudades están a escasos 20 km de distancia. Esto indica que el epicentro estuvo mucho más cerca de Cartago que de San José, pero además que la liberación de la energía tuvo que ser muy localizada, quizás como en el caso del terremoto de Cinchona del 2009.

Estas observaciones nos permiten delimitar bastante bien la ubicación del posible epicentro del terremoto del 4 de mayo de 1910 en la zona sur de Cartago. Los estudios que se han realizado en la zona de la Falla de Agua Caliente por Fernández & Montero (2002) y Montero et al. (2006) indican que esta es de una falla de tipo rumbo con desplazamiento cercano al E-W. Los mismos autores sugieren que la concentración de la sismicidad observada durante los años 1984 y 2005 en la zona de cambio de rumbo de dicha falla hacia el oeste muy probablemente esté asociada a una zona de acumulación de esfuerzos de una barrera que en el pasado fue un sitio donde terminó la ruptura de un evento importante.

El Laboratorio de Ingeniería Sísmica cuenta con varias estaciones acelerográficas en la ciudad de Cartago y alrededores que se pueden utilizar para calcular un registro sintético en cada una que muestre un valor aproximado de aceleración que pudiera reflejar lo que sucedió en el 1910. Anteriormente en el proyecto de investigación 731-A8-160 se determinó también un escenario de aceleraciones para un posible terremoto en el sur de Cartago. Existen las siguientes diferencias entre ambos estudios:

1. En el estudio del proyecto 731-A8-160 se utilizaron parámetros sísmicos que eran similares a los del sismo de Piedras Negras de 1990 y de Cinchona del 2009 a lo largo de un plano de falla. En este proyecto, se está utilizando una fuente de tipo puntual, por lo que toda la energía

- irradia de un punto central en todas direcciones y esto es diferente a si se tratara de una falla.
2. En el estudio presente se está utilizando muchos más eventos para calcular los efectos de sitio de todas las estaciones.
 3. En el estudio actual se emplean los cálculos en estaciones nuevas que antes no existían.
 4. El método de simulación empleaba un tipo de programa diferente al utilizado en el actual.

Tabla 3. Valores máximos de aceleración y desviación estándar calculados para estaciones de interés.

Estación	Aceleración promedio (cm/s ²)	Desviación estándar
CCDN	901.0	100.7
CCHI	196.5	22.0
CCRT	592.4	71.2
CPAR	517.3	65.3
CTRH	302.7	40.1
SGTS	317.7	35.9

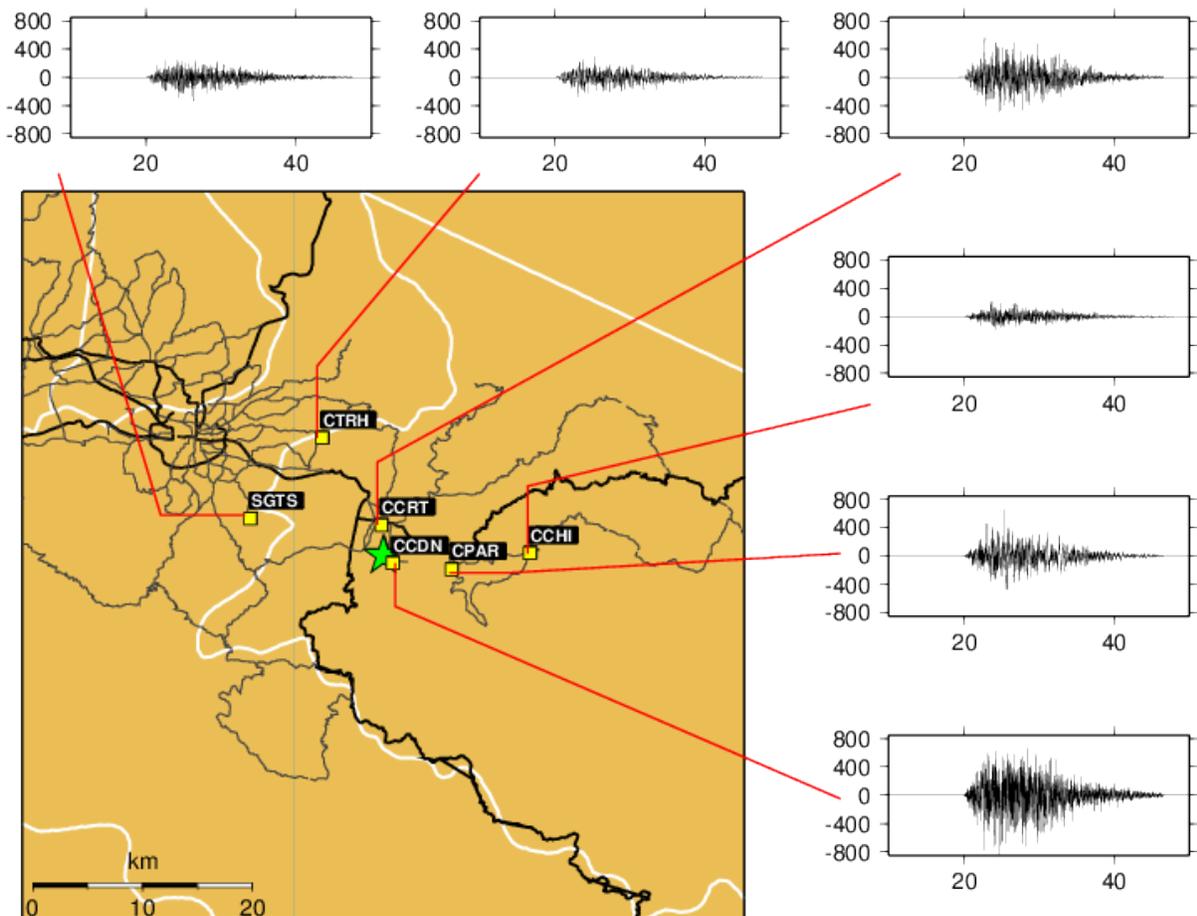


Figura 4. Registros de aceleración sintéticos para estaciones selectas. Las amplitudes máximas se encuentran normalizadas al sitio con mayor amplificación.

En vista de que este sismo de 1910 presentó la particularidad de haber afectado grandemente a Cartago, pero no a San José, también se muestra en la siguiente figura el valor medio de todas las estaciones de los alrededores del epicentro de ese evento. Según esto, el valor medio de aceleración en San José centro pudo haber alcanzado los 200 cm/s². Este valor es muy similar al registrado en Alajuela centro cuando sucedió el sismo de Cinchona en el 2009. El sismo de Cinchona fue de Mw 6.1 y muy superficial. Este causó enormes daños en el área epicentral, pero no tanto así en Alajuela que estaba ubicado a unos 20 km al sur.

Esto puede indicar que el valor medio calculado en San José con estas simulaciones, pudo haber sido muy similar a lo que quizás se experimentó en la capital en 1910.

Sismo de Pérez Zeledón de 1983

Según Leandro et al. (1983) un sismo con mb 5.1 ocurrió a las 11:13:43 del 3 de julio de 1983 en las cercanías de San Isidro de Pérez Zeledón justo instantes antes que otro evento mayor de MI 6.1 ocurriera en la misma zona. Esta corta diferencia de tiempo entre ambos eventos dificultó un poco la localización exacta del sismo principal, por lo que su ubicación se estimó en este informe en base a la localización del precursor de mb 5.1 que reportaron esos autores.

En esa época, no existía ninguna estación acelerográfica en San Isidro de El General, por lo cual no se cuenta con ningún registro de la época para saber el valor de la intensidad que el sismo produjo. Morales (1987) calculó la intensidad de Mercalli entre VII y VIII en San Isidro centro con valores superiores lógicamente cerca de la zona epicentral. Más recientemente en un estudio por Mora y Peraldo (2011) las intensidades medias de la zona de la ciudad de San Isidro se estimaron ligeramente más bajas entre VI y VII según se desprende de la Figura 3 de esos autores.

Alrededor del año 1985, el Laboratorio de Ingeniería Sísmica instaló un acelerógrafo de manera permanente en las instalaciones del Instituto Nacional de Seguros de esa ciudad. Numerosos sismos se han registrado desde entonces lo que ha permitido calcular un efecto de sitio usando la técnica H/V explicada en la parte de la metodología.

Tabla 4. Valores máximos de aceleración y desviación estándar calculados para estaciones de interés.

Estación	Aceleración promedio (cm/s ²)	Desviación estándar
CCHI	45.7	5.3
CPAR	62.8	7.7
CSRH	58.1	5.8
CTBA	79.7	7.5
SSMD	78.8	8.1
SISD	200.8	24.1

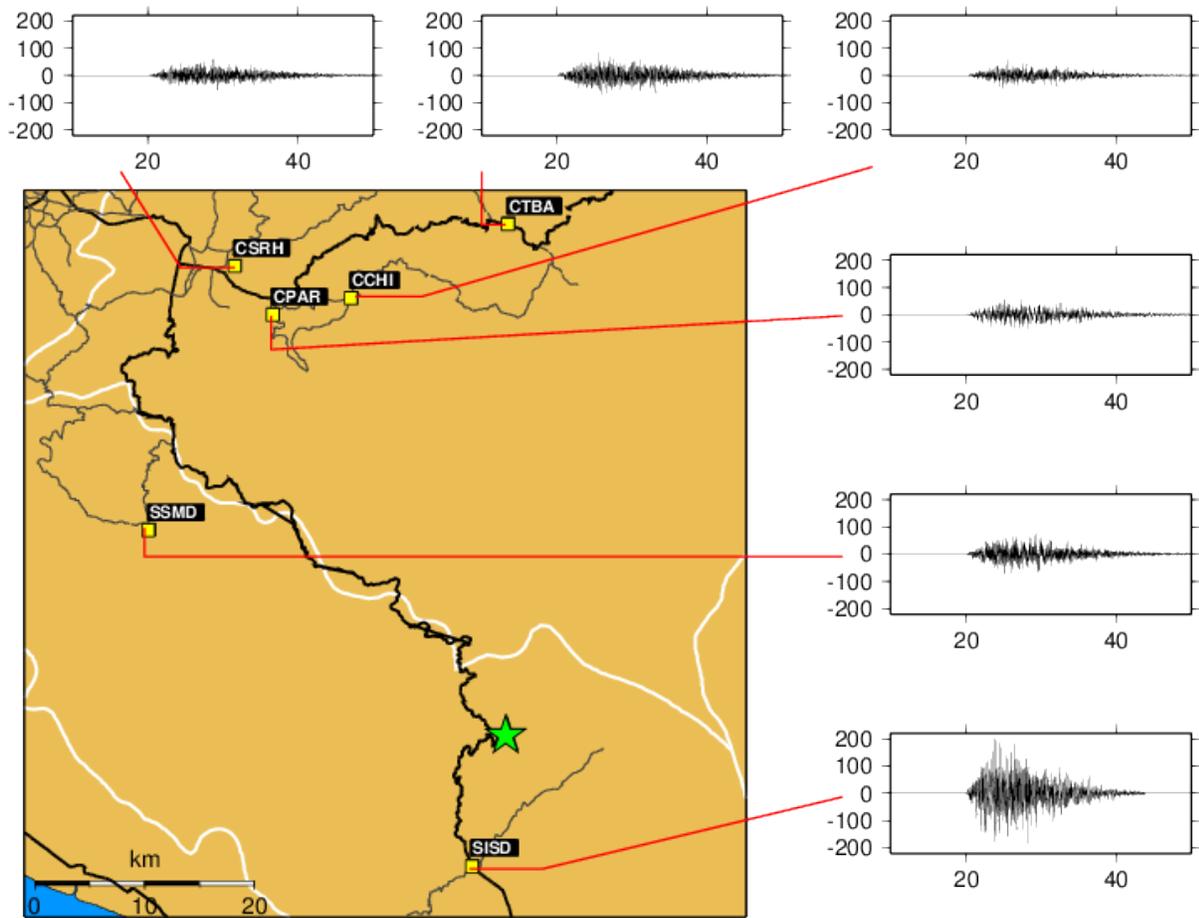


Figura 6. Resultados de simulación para el terremoto de Pérez Zeledón del 3 de julio de 1983. La aceleración se da en cm/s^2 y está normalizada al valor máximo de la estación que registró los mayores valores.

Según los resultados, el valor promedio de aceleraciones encontrado para la estación más cercana al epicentro (SISD), sería de 200.8 cm/s^2 . Este valor, según la tabla de correspondencia de aceleraciones con intensidades de la tabla 2 correlacionaría con una intensidad de VII en la escala de Mercalli. Sin embargo, debido a que la desviación estándar es de 24.1, también el valor de intensidad VI podría ser aceptable.

Otros sitios donde se realizó el mismo tipo de cálculo se detallan en la tabla 4.

Aunque este sismo fue sentido relativamente fuerte en San Isidro, debido a su poca profundidad pudo haber sido un evento muy localizado que no generó mucho movimiento fuerte en otras estaciones. En el caso de Cachí, por tratarse de un sitio en roca, la aceleración siempre va a esperarse que sea menor a la de Paraíso que está relativamente cerca en cuanto a distancia se refiere.

Sismo de Cóbano de 1990

El 25 de marzo de 1990, un terremoto de Mw 7.0 ocurrió a la entrada del Golfo de Nicoya. Según Protti et al. (1995), el evento fue de Mw 7.0 a unos 20 km de profundidad. El sismo fue precedido por otro de Mw 6.0 unos minutos antes.

Las intensidades en las cercanías del epicentro fueron calculadas por esos autores en VII tanto en Puntarenas como en la Península de Nicoya. De acuerdo con Santana et al. (1990), el sismo del 25 de marzo de 1990 fue particularmente dañino en Cóbano, Tambor y Paquera. Hubo daños importantes en la sede de la Universidad de Costa Rica en Puntarenas, Mata de Limón, Tivives y Jacó. Muchos de los daños observados en estas tres últimas localidades se debieron a que las construcciones eran de tipo deficientes para resistir sismos. En las zonas costeras también se evidenció el efecto de la licuefacción principalmente en suelos granulares y poco consolidados como es típico de estos ambientes.

En el Valle Central, los autores indican que los daños fueron de carácter no estructural y principalmente para edificios altos. No obstante, se observaron daños a nivel estructural en la Facultad de Microbiología de la Universidad de Costa Rica en el campus principal en San Pedro de Montes de Oca. Este último, probablemente causado por efectos locales de amplificación sísmica.

Aunque se trata de un evento grande, se decidió tratar de hacer la simulación con las estaciones de Cóbano (PCOB), Paquera (PPQR) en la Península de Nicoya, Puntarenas (PPUN), Caldera (PCDA) y Jacó (PJAC) hacia el este del epicentro para ver su impacto en cuanto a aceleración.

Tal como se mencionó anteriormente, asumir que se trata de una fuente puntual para un sismo de esta magnitud deja por fuera muchos aspectos importantes como los posibles efectos de directividad y del patrón de radiación de las ondas sísmicas. Por otro lado, se trata de un sismo bastante profundo, lo que podría ayudar a evaluar su efecto puntual, principalmente en Puntarenas que es donde se encontraba un acelerógrafo en esa fecha.

Tabla 5. Valores máximos de aceleración y desviación estándar calculados para estaciones de interés.

Estación	Aceleración promedio (cm/s ²)	Desviación estándar
PPUN	208.7	17.7
PCDA	216.0	20.5
PJAC	244.1	22.1
PCOB	400.0	45.3
PPQR	317.3	28.3

Según los cálculos numéricos, este sismo, a pesar de su enorme tamaño, produjo aceleraciones no muy grandes. En el caso particular del Hospital Monseñor Sanabria que es donde se encontraba un acelerógrafo en 1990, el valor registrado fue de 233 cm/s². Nuevamente, el efecto de la profundidad del hipocentro pudo haber influido para que esto se diera.

La estación con el valor mayor de aceleración sería Cóbano (con 400 cm/s²) que fue precisamente una de las comunicadas más afectadas por el movimiento del suelo y que dió su nombre a este sismo. Por otra parte, existe bastante similitud en los registros de Puntarenas (PPUN) y Caldera (PCDA) considerando que el sitio de Puntarenas se encuentra sobre la barra arenosa en que se ubica la ciudad portuaria y por tanto debería poseer mayor amplificación.

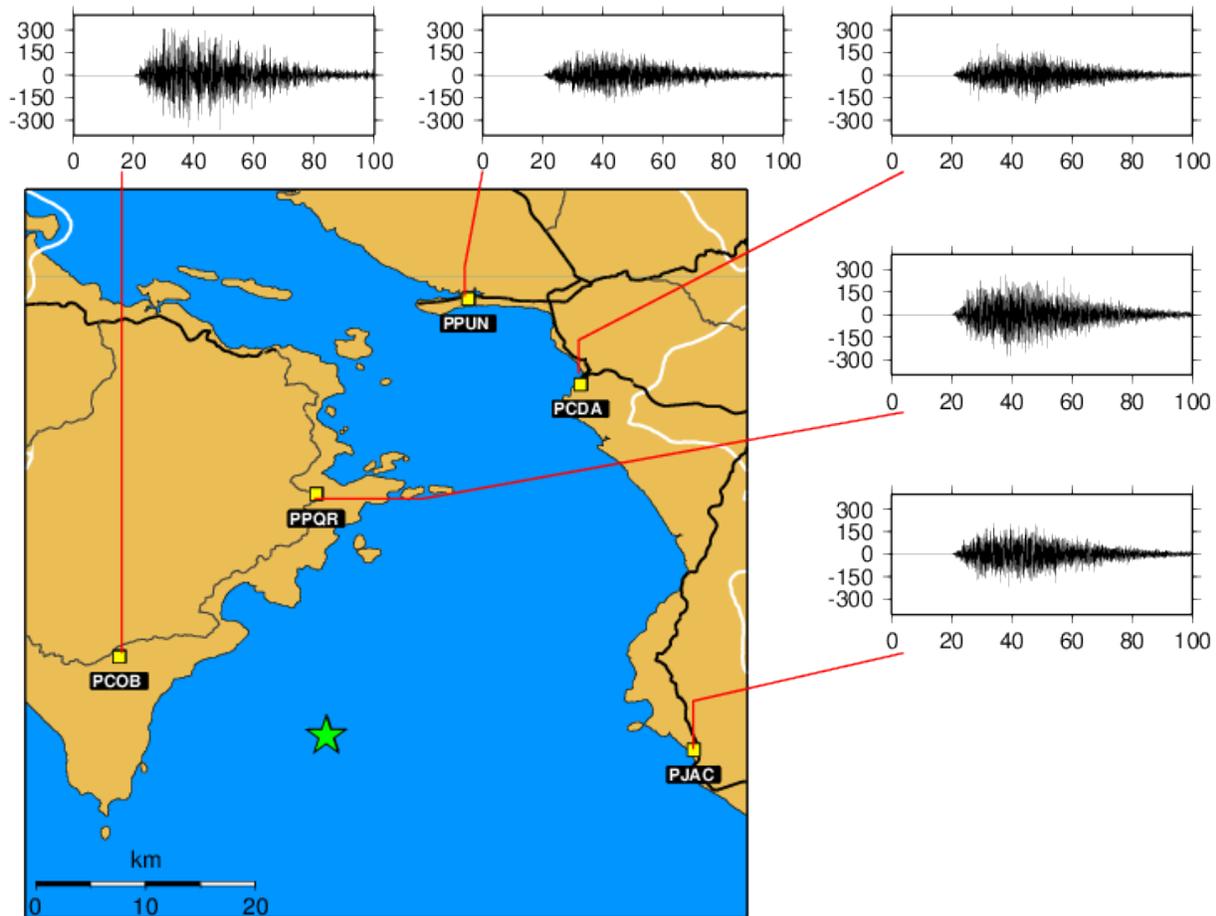


Figura 7. Resultados de simulación para el terremoto de Cóbano de 1990. La aceleración se da en cm/s^2 y está normalizada al valor máximo de la estación que registró los mayores valores.

Sismo de Piedras Negras de 1990

El terremoto de Piedras Negras de Mora del 22 de diciembre de 1990 también es conocido como el terremoto de Alajuela por la gran destrucción ocasionada a esa ciudad. El sismo tuvo su origen a 5.0 km de profundidad según datos de la Red Sismológica Nacional (RSN) y se ubicó a unos 4 km al noreste de Santiago de Puriscal. Los heridos fueron contados en aproximadamente 100 personas y los daños de entre 268 y 300 casas afectas de manera parcial o total en Alajuela, San José y Heredia. En la zona sur de Puriscal ocurrieron una serie de pequeños deslizamientos. La intensidad de Mercalli asociada por la RSN fue de VII en Alajuela.

Según los datos de aceleración recopilados por este laboratorio, la aceleración máxima en Alajuela se registró en 415 cm/s^2 que corresponde a una intensidad de VIII en la escala de Mercalli. El valor del registro sintético indica que el valor promedio fue de casi la mitad, unos 227 cm/s^2 .

Tabla 6. Valores máximos de aceleración y desviación estándar calculados para estaciones de interés.

Estación 1990	PGA-NS (cm/s ²)	PGA-UD (cm/s ²)	PGA-EW (cm/s ²)	Estación 2012	Sintético (cm/s ²)	Desv. Est. (cm/s ²)
ALJ	262	223.0	415.0	AALA	226.9	27.7
SRM	165.0	95.0	177.0	ASRM	160.2	17.8
CTG	234.0	110.0	292.0	CCRT	65.6	6.5
CCH	42.8	21.7	28.5	CCHI	40.4	4.0
GTS	165.0	66.5	73.7	SGTS	125.8	12.9
HTO	174.0	74.5	220.0	SHTO	170.9	17.6

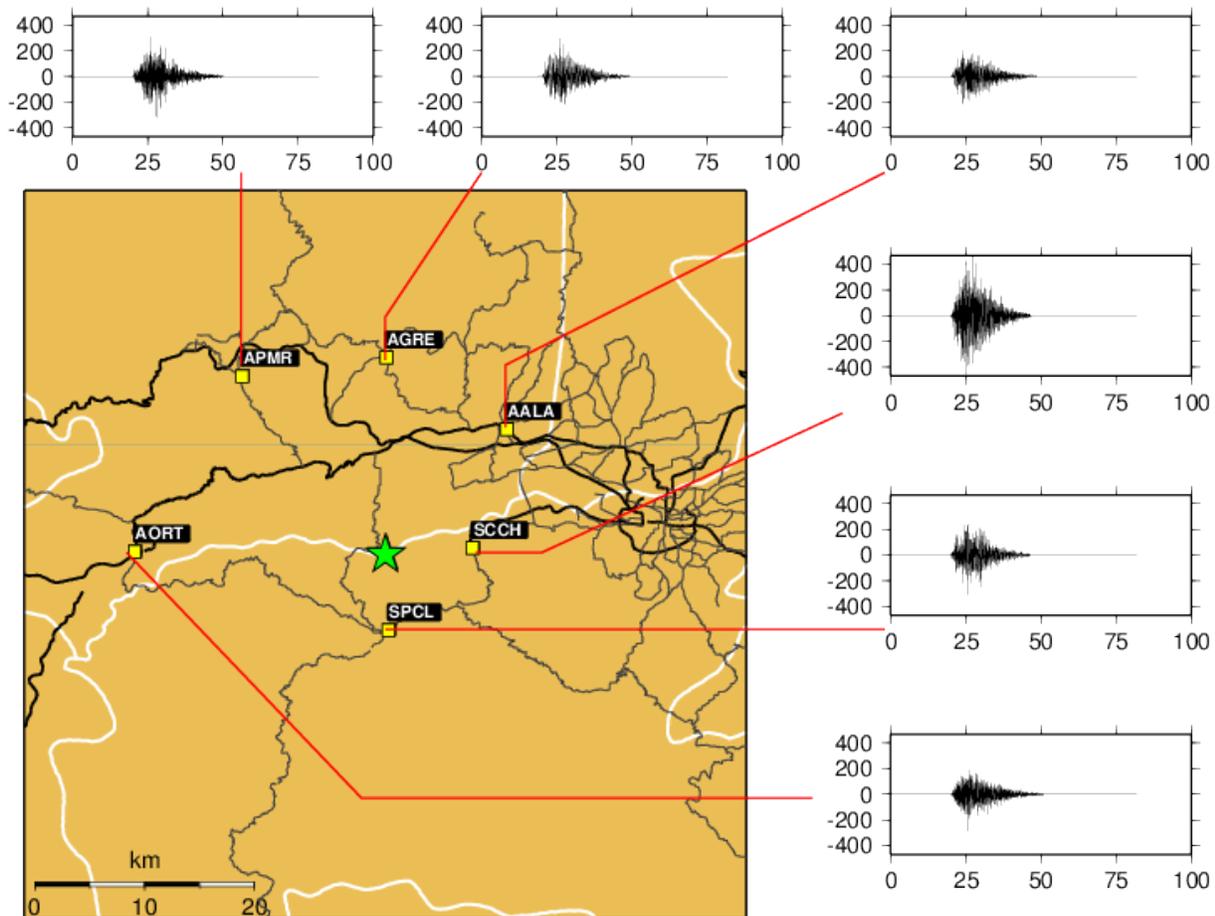


Figura 8. Resultados de simulación para el terremoto de Piedras Negras del 22 de diciembre de 1990. La aceleración se da en cm/s² y está normalizada al valor máximo de la estación que registró los mayores valores.

El hecho de que el sitio de AALA fuera uno de los más bajos en este análisis para el sismo de 1990 muy probablemente se deba a condiciones del efecto de sitio de la estación aunque también pueda deberse a algún efecto de directividad por parte de la fuente sísmica. Esto se puede entender mejor

cuando vemos que una de las estaciones ubicadas en la Estación Experimental Fabio Baudrit de la Universidad de Costa Rica, unos 5 km al este de AALA, el valor calculado es de 361.7 cm/s².

En el caso de los registros de acelerógrafos en San Ramón, Hatillo, Cachí y Guatuso, las similitudes son más evidentes. Contrario a ALJ y AALA, los sitios en 1990 y en el 2012 son exactamente los mismos. Las estaciones de Alajuela y Cartago de 1990 estaban en un lugar diferente al actual. Sin embargo, para con el sismo de Pejibaye de 1993, las estaciones de Alajuela y Cartago también eran diferentes a las actuales y no presentan diferencias tan grandes. Probablemente en esos casos el factor distancia tenga algo que ver.

Durante el enjambre sísmico que se presentó en Santiago de Puriscal a mediados de 1990, el LIS tuvo instalado un acelerógrafo en la estación de bomberos de esa ciudad. El mismo fue quitado algunos meses más tarde y por tanto el registro acelerográfico del sismo principal de diciembre no se grabó. En este estudio se obtuvo un valor de 300 cm/s² para ese lugar. Interesantemente, el valor mayor corresponde al sitio de Ciudad Colón con 458.3 cm/s², para Grecia de 243.4 cm/s² y para Palmares de 247.6 cm/s².

Sismo de Pejibaye de 1993

El 10 de julio de 1993 ocurrió un sismo de Mw 5.8 a las 14:41 hora local en Pejibaye de Turrialba. El evento se ubicó a unos 13.2 km de profundidad según reportes de la Red Sismológica Nacional. Fernández (1996) indica que el evento estuvo acompañado de otros tres con magnitudes de 4.8, 4.9 y 5.3.

Para ese entonces, el LIS contaba con varios acelerógrafos en diferentes partes del país, por lo cual los resultados de los registros sintéticos que se obtienen en este estudio se pueden comparar con los observados con las siguientes salvedades:

1. El sitio ALJ en 1993 estaba ubicado en el ahora Museo de Alajuela, la estación AALA está en el edificio del Instituto Nacional de Seguros (INS).
2. El sitio CTG estaba en el parque central de Cartago, el sitio CCRT está en la biblioteca pública.
3. El sitio SBN1 estaba en la base del edificio del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), el sitio SSBN se encuentra en el centro del Parque Metropolitano La Sabana.
4. El sitio CMA estaba en la biblioteca Carlos Monge de la Universidad de Costa Rica en San José, el sitio SLPF se encuentra en el piso inferior de la Facultad de Ingeniería en el mismo campus.
5. El resto de los sitios están igual que en 1993.

Los valores de aceleración para esos sitios se muestra la tabla 7.

En términos generales, los valores de aceleración que muestran esa tabla parecen ser bastante aceptables si son comparados con el valor máximo de cada sitio. Por ejemplo, en el sitio de Cachí que en 1993 se llamaba CCH y luego se denominó CCHI, el valor observado en aquel año fue de 152.0 cm/s² mientras que el calculado en este estudio de 120.5 cm/s², ambos valores corresponden a una intensidad de Mercalli de VI.

Tabla 7. Valores máximos de aceleración y desviación estándar calculados para estaciones de interés.

Estación 1993	PGA-NS (cm/s ²)	PGA-UD (cm/s ²)	PGA-EW (cm/s ²)	Estación 2012	Sintético (cm/s ²)	Desv. Est. (cm/s ²)
ALJ	31.4	20.8	32.1	AALA	38.8	4.2
CCH	152.0	70.0	59.0	CCHI	120.5	13.4
CTG	201.0	134.0	105.0	CCRT	82.6	9.8
SBN1	29.0	21.0	42.0	SSBN	54.6	6.5
CMA	60.0	27.6	75.5	SLPF	75.9	8.3
FRA	66.8	29.0	58.9	SFRA	81.8	9.0
ISD	52.6	31.4	81.5	SISD	64.9	7.1

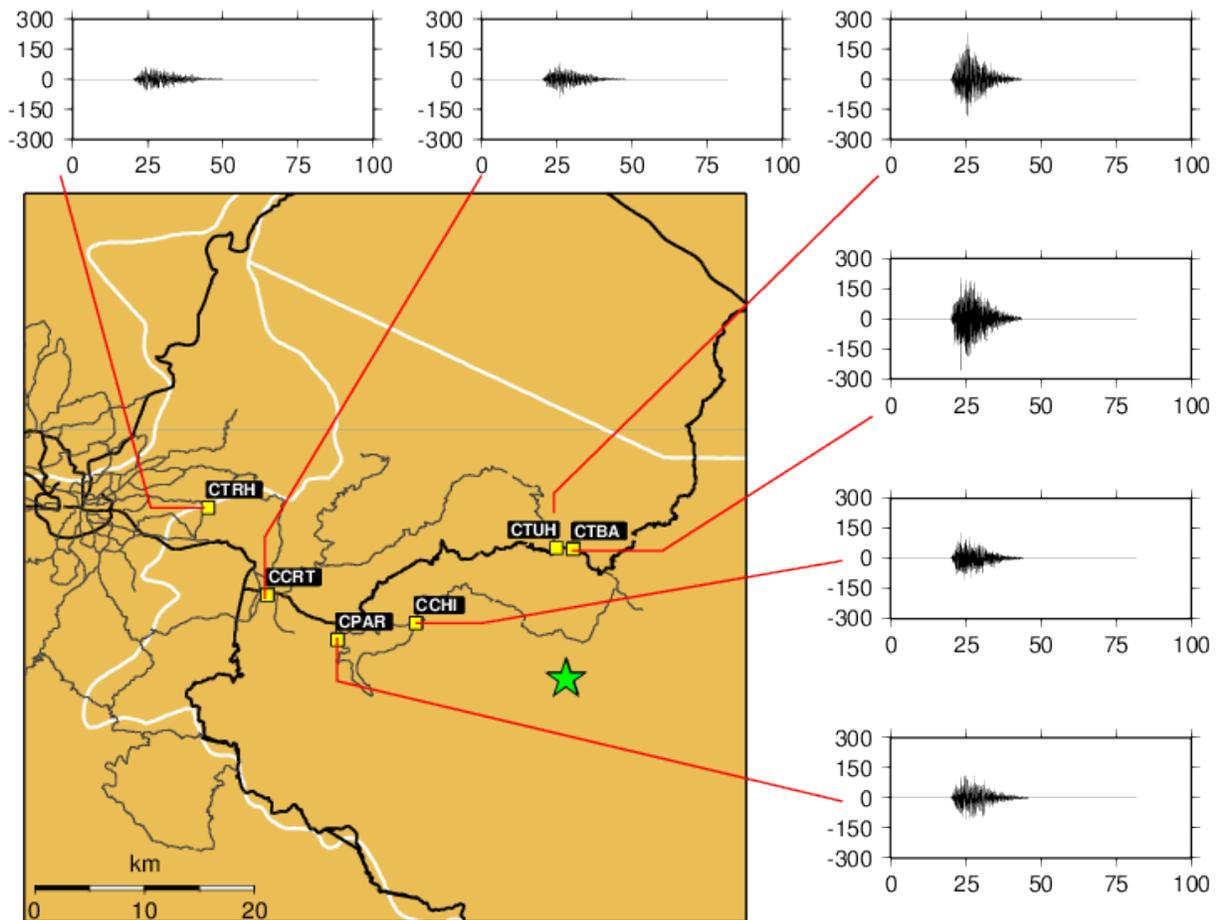


Figura 9. Resultados de simulación para el terremoto de Pejibaye del 10 de julio de 1993. La aceleración se da en cm/s² y está normalizada al valor máximo de la estación que registró los mayores valores.

Los resultados de aceleración más altos corresponden al sitio de Turrialba UCR (CTBA) y Turrialba hospital (CTUH) con 260.2 cm/s^2 y 191.6 cm/s^2 respectivamente. Este tipo de resultado concuerda con lo observado en otros sismos en que el sitio de CTBA amplifica mucho más la señal sísmica que el sitio de CTUH. Si los valores de 1993 anduvieron algo parecidos a lo obtenido en esta investigación, entonces el valor de la intensidad de Mercalli correspondiente fue de VII.

Sismo de Dominical de 1999

Este sismo ocurrió el 20 de agosto de 1999 en el océano Pacífico. Bilek et al. (2003) and DeShon et al. (2003) hablan de que este sismo fue producto de irregularidades de la corteza oceánica. Es decir, que la aspereza que lo generó era más bien una montaña submarina que se encontraba en la zona de acople cuyo origen se ubicó a 20 km de profundidad y con Mw 6.9.

Rojas & Redondo (2002) le asignan una intensidad de VI en la zona de Quepos, aunque en otros sitios el valor fue de hasta VII.

Al haber ocurrido lejos de las estaciones acelerográficas, a pesar de ser este un sismo grande, se puede asumir que se trata de una fuente puntual debido a la distancia y profundidad del hipocentro.

Las estaciones del LIS que registraron ese evento en 1999 se listan en la tabla 8 junto con las estaciones del 2012 que se usaron para el cálculo numérico. La figura 10 muestra las formas de onda para cada estación.

Tabla 8. Valores máximos de aceleración y desviación estándar calculados para estaciones de interés.

Estación 1999	PGA-NS (cm/s ²)	PGA-UD (cm/s ²)	PGA-EW (cm/s ²)	Estación 2012	Sintético (cm/s ²)	Dev. Est. (cm/s ²)
–	–	–	–	PQUE	121.6	13.3
FRA	55.7	19.9	35.0	SFRA	111.8	10.8
ISD	85.5	28.4	62.8	SISD	105.3	9.6
CDN	15.6	10.4	16.6	CCDN	101.6	9.1
TBA	59.0	23.2	45.0	CTBA	123.0	12.0
HMGL	49.9	23.2	43.7	HCPD	52.9	5.0

El resultado sintético para el sismo de Dominical es muy diferente al observado en 1999 y por mucho. Algo similar sucede cuando tratamos de simular el movimiento del sismo de Damas, que también es de subducción y a 20 km de profundidad.

Esto parece indicar que los parámetros de distancia o de atenuación necesitan ajustarse más al trabajar con sismos de magnitud grande y muy lejanos. Según los datos observados, la intensidad en Frailes, San Isidro de El General y Turrialba habría sido de V.

En 1999 la estación de Quepos no funcionó y el registro del sismo grande se perdió. Viendo el comportamiento de los datos numéricos que siempre están por encima de los observados, se podría decir que el valor de aceleración máxima en Quepos no superó los 100 cm/s^2 . En este sentido, las simulaciones sintéticas estarían más bien indicando un valor máximo cuando se trata de sismos lejanos y profundos como este caso. Si así hubiera sido, el valor de intensidad máxima en Quepos habría sido de VI.

La estación de HMGL es muy similar a HCPD, sin embargo, aunque se trata de la misma región en San Miguel de Santo Domingo de Heredia, ambos sitios están separados unos 5 km de distancia, por lo tanto, la aparente correlación nos es válida.

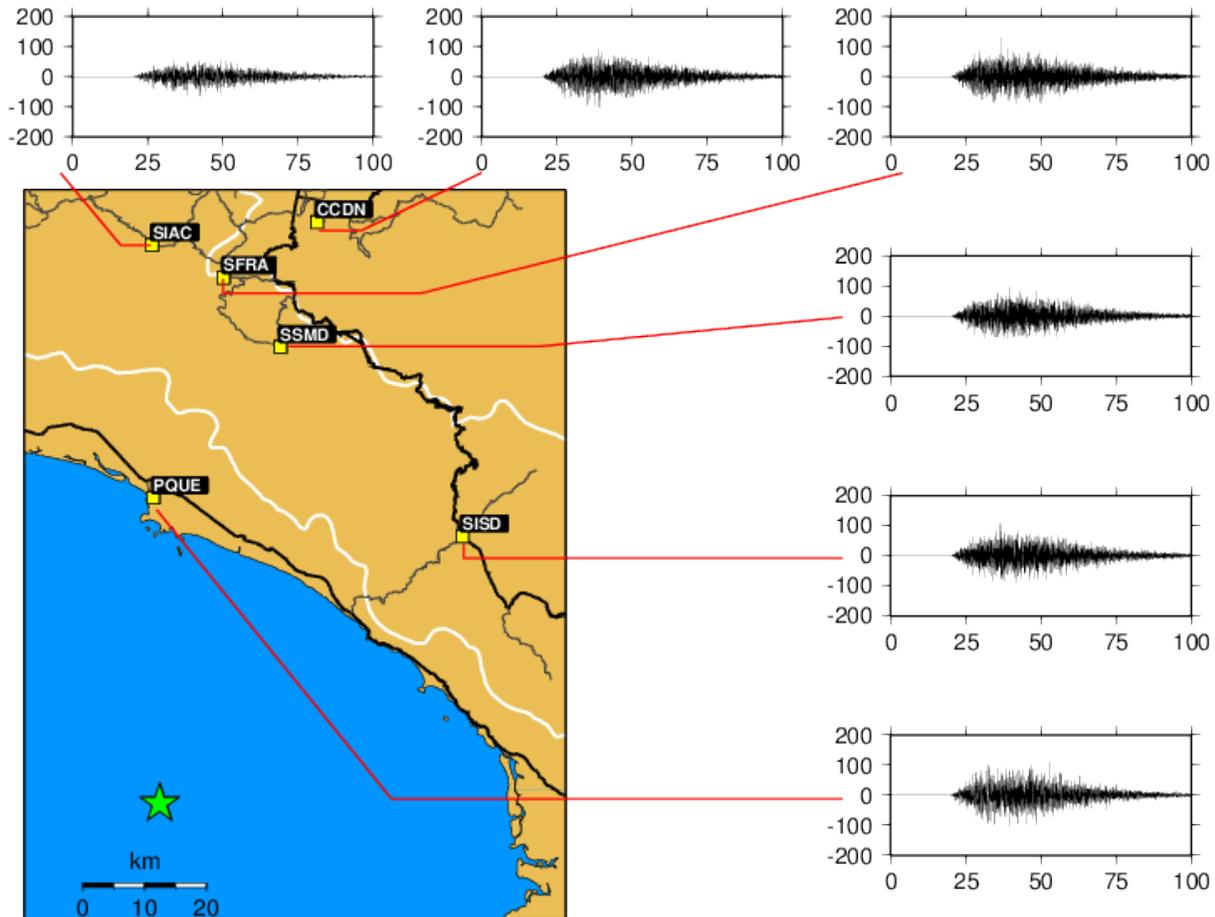


Figura 10. Resultados de simulación para el terremoto de Dominical del 20 de agosto de 1999. La aceleración se da en cm/s² y está normalizada al valor máximo de la estación que registró los mayores valores.

Sismo de Damas del 2004

Este evento ocurrió el 20 de noviembre del 2004 a las 10:02 UTC. Tuvo una magnitud de Mw 6.4 a 24 km de profundidad con intensidades máximas de VII en la escala de Mercalli según Pacheco et al. (2006). Los mismos autores indican que en las cercanías del epicentro, se había presentado también actividad en 1989 y 1994.

Los resultados de las simulaciones para seis sitios seleccionados se muestran en la siguiente figura.

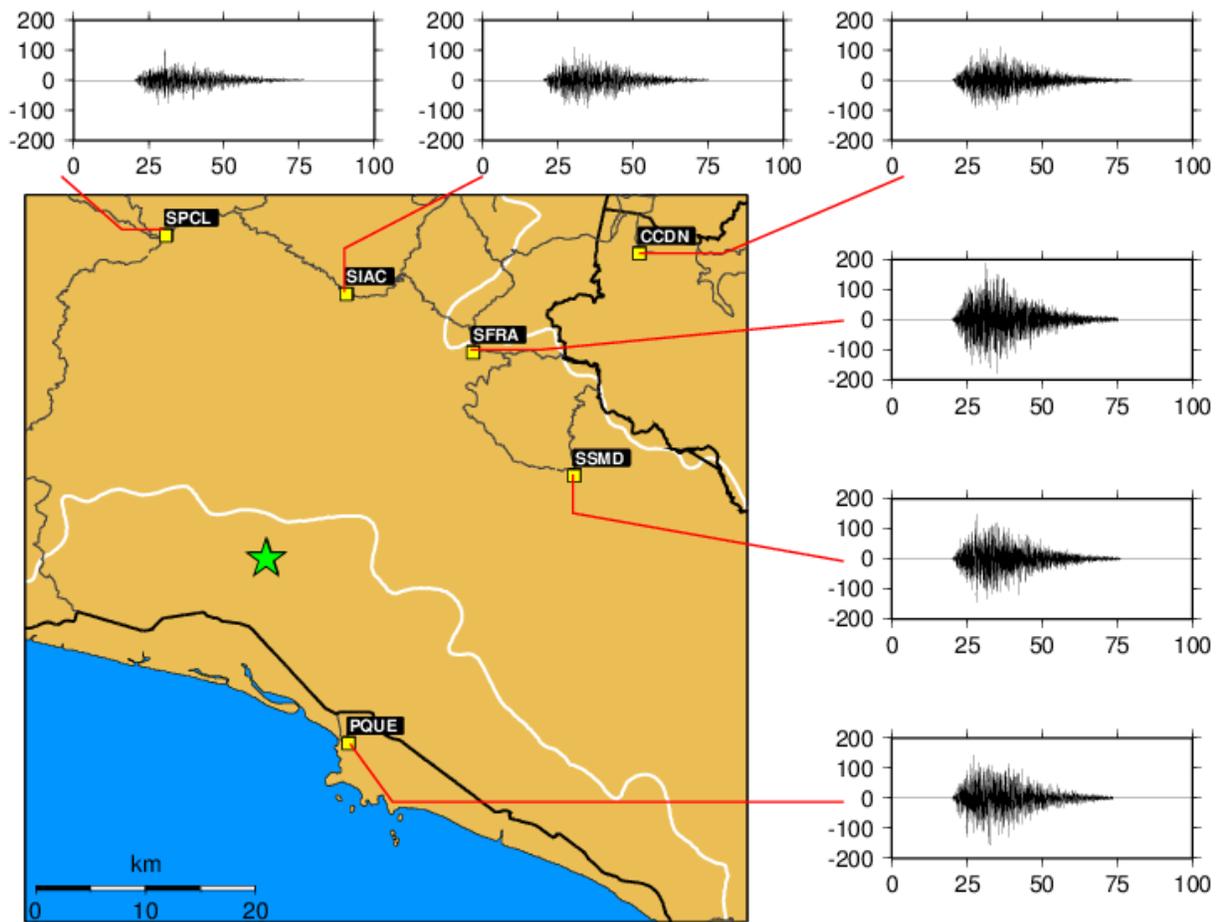


Figura 11. Resultados de simulación para el terremoto de Damas del 20 de noviembre del 2004. La aceleración se da en cm/s^2 y está normalizada al valor máximo de la estación que registró los mayores valores.

De los 6 sitios, 3 de ellos se encontraban en las instalaciones en las que actualmente se encuentran los nuevos acelerógrafos y que son QSP (actual PQUE), FRA (actual SFRA) y PCL (actual SPCL).

El valor máximo calculado de manera sintética en PQUE fue de 169.1 cm/s^2 el cual es muy bajo comparado con el valor máximo observado en el 2004 y que fue de 231.0 cm/s^2 . Por el contrario, la estación SFRA dió un valor de 178.8 cm/s^2 cuando el máximo observado fue de 108.0 cm/s^2 . El único sitio en que se obtuvo valores más similares fue el de SPCL.

El valor máximo de intensidad en la escala de Mercalli para el sitio de Quepos sería de VI de acuerdo con el valor calculado. En el Valle Central, los valores máximo rondan los 100 cm/s^2 para una intensidad de VI también.

Tabla 9. Valores máximos de aceleración y desviación estándar calculados para estaciones de interés.

Estación 2004	Observado en el 2004			Estación 2012	Sintético (cm/s ²)	Desv. Est. (cm/s ²)
	PGA-NS (cm/s ²)	PGA-UD (cm/s ²)	PGA-EW (cm/s ²)			
QSP	226.0	218.0	231.0	PQSP	169.1	17.2
FRA	103.0	67.8	108.0	SFRA	178.8	17.9
PCL	81.1	59.6	63.0	SPCL	84.5	9.2
CDN	65.9	50.3	51.4	CCDN	112.7	10.2

Este sismo del 20 de noviembre del 2004 es bastante más profundo que los analizados hasta ahora. Pacheco et al. (2006) plantean la hipótesis de que se trata de un pequeño montículo submarino al no poder asociar a un solo plano de falla la distribución de las réplicas.

Sismo de Cinchona del 2009

Este evento sucedió el 8 de enero del 2009 a las 01:21 pm. Tuvo una magnitud de Mw 6.1 a unos 4.6 km de profundidad según reportes de la Red Sismológica Nacional. El epicentro estuvo ubicado cerca del poblado de Cinchona. El sismo causó la muerte de al menos 23 personas, desaparición de otras 7 y 100 heridos. La población damnificada se calculó en unas 125,000 personas según datos de la Comisión Nacional de Emergencias (RSN, 2009).

El sismo fue bastante superficial por lo que el área afectada mayormente fue en las cercanías del epicentro. La RSN estimó la intensidad en Cinchona, población más cercana, en IX en la escala de Mercalli. En las poblaciones de Poasito, Cartagos y Cariblanco, el valor estimado fue de VII y VIII. En Alajuela el valor fue de VI y en San José de V.

Para ese entonces, el LIS contaba con muchos equipos de tipo analógico que habían sido convertidos a instrumentos digitales pero de baja resolución (QDR de Kinometrics). Aquí se muestran los resultados comparativos de 3 de las estaciones que registraron el sismo, pero hay que tomar en cuenta que el número de muestras por segundo de los QDR era de 100, mientras que la de los equipos modernos de 200.

La estación más cercana era la de Alajuela que en el 2009 estaba ubicada en una casa de habitación en la estación llamada AALX. en la que se registró un valor de 180 cm/s²

Las estaciones seleccionadas para la simulación de acelerogramas sintéticos se presenta en la tabla 10.

Una de las estaciones del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) registró un valor de 658 cm/s² a una distancia aproximada de 15 km del epicentro. La estación estaba ubicada en la Casa de Máquinas del Proyecto Cariblanco. El valor numérico calculado para Fraijanes (AFRA) es de 731 cm/s² que, a la luz del valor obtenido en Cariblanco, parece ser congruente. Los valores obtenidos para Alajuela y Sabana también parecen concordar con los observados en el 2009.

Tabla 10. Valores máximos de aceleración y desviación estándar calculados para estaciones de interés.

Estación 2009	PGA-NS (cm/s ²)	PGA-UD (cm/s ²)	PGA-EW (cm/s ²)	Estación 2012	Sintético (cm/s ²)	Desv. Est. (cm/s ²)
AALX	169.0	97.3	199.0	AALA	181.9	21.3
SSAB	140.0	49.0	175.0	SSBN	140.5	14.9
--	--	--	--	AFRA	730.9	100.6
--	--	--	--	HVRG	247.5	23.9
ASCS	25.8	20.8	27.6	ASCS	91.6	10.9
--	--	--	--	CTRH		

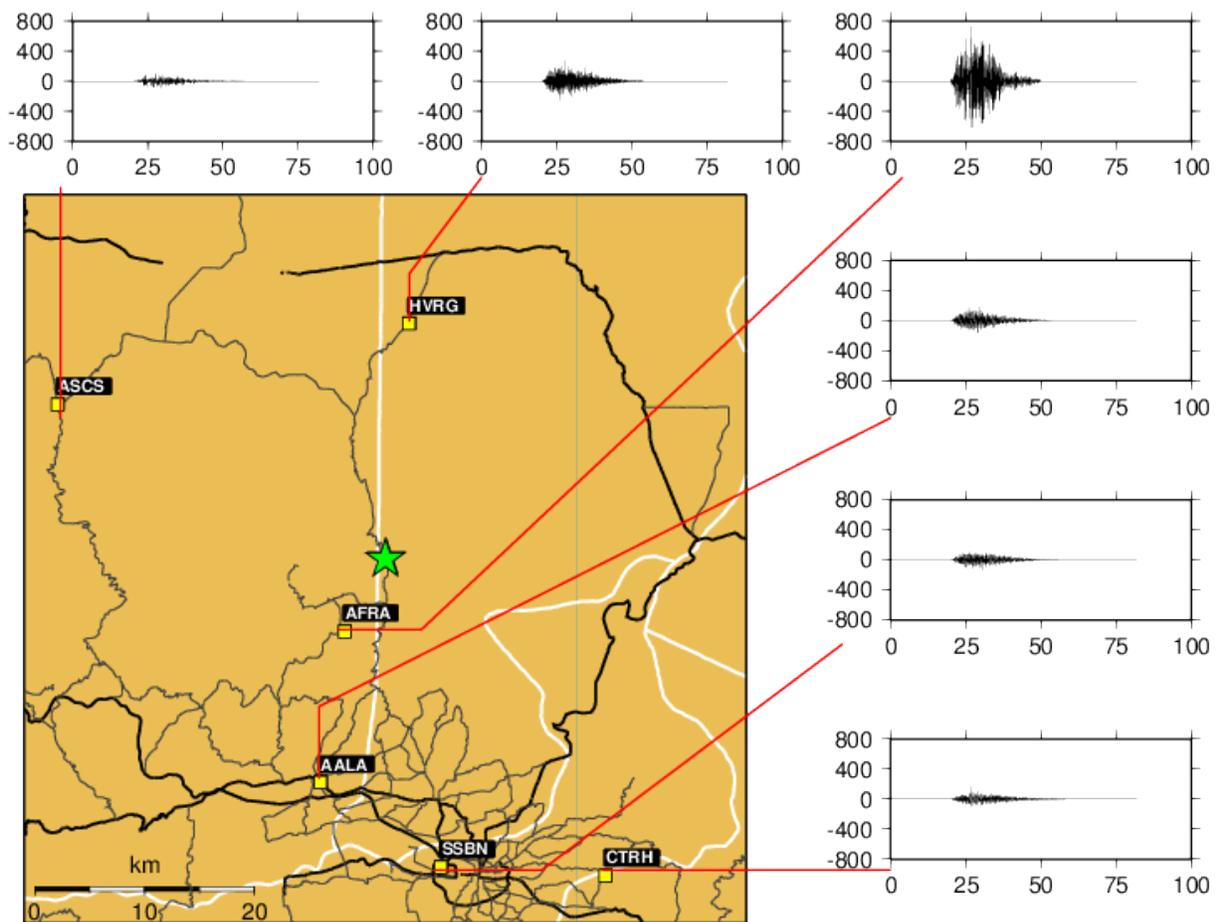


Figura 12. Resultados de simulación para el terremoto de Cinchona del 8 de enero del 2009. La aceleración se da en cm/s² y está normalizada al valor máximo de la estación que registró los mayores valores.

Este evento fue muy superficial y la mayoría de los daños se concentraron cerca del epicentro, principalmente debido a los múltiples deslizamientos que se produjeron por el movimiento fuerte.

Conclusiones

Una de las principales conclusiones que se derivan de este breve análisis numérico es que el método estocástico parece dar buenos resultados cuando se tratan de hacer cálculos de movimiento fuerte para sismos moderados (menor a 6.5) y someros (fallamiento local) usando los parámetros predefinidos de atenuación y distancia que se utilizaron aquí. Para sismos grandes y profundos, el método, parece dar resultados menos exactos lo cual tiene se podría deber a las siguientes razones:

1. Un sismo grande es un sismo que ha roto múltiples segmentos de una falla y por tanto la radiación de la energía es muy compleja como para asumir que toda proviene de un único punto (como es la suposición del método empleado en este trabajo).
2. El factor de corrección por distancia que se ha utilizado es genérico y se ha empleado para sismos locales como para sismos por subducción. Sería recomendable que llevaran a cabo estudios específicos de las zonas de subducción para encontrar relaciones de atenuación propias de esas zonas.

En el año 2011 ocurrieron dos sismos muy importantes desde el punto de vista de magnitud y proximidad a centros poblados: Christchurch, Nueva Zelanda, 22 de febrero, Mw 6.3 y Lorca, España, 11 de mayo, Mw 5.1.

Estos sismos, relativamente moderados, provocaron importantes daños y víctimas en los respectivos países. La razón principal fue su cercanía a la ciudad y su poca profundidad (menos de 5 km), lo cual originó valores de aceleración grandes.

Los registros de un acelerógrafo nos indican de manera cuantitativa, que tan fuerte fue el movimiento del suelo en cada punto donde se encuentra uno de esos equipos instalado. En el caso de Lorca, el valor máximo fue de unos 360 cm/s^2 en una estación ubicada en el centro de la ciudad. En el caso de Christchurch, el valor fue de aproximadamente 2200 cm/s^2 cerca del epicentro y unos 1800 cm/s^2 en el centro de la ciudad. Estos valores son sumamente elevados considerando el tamaño de los sismos que los produjeron, pero son valores reales que necesitan de nuestra atención.

En nuestro país, el único sismo muy cercano a un centro de población grande ha sido el de Cartago de 1910. El más reciente evento de Cinchona, como el de Cartago, posee una magnitud y profundidad que lo hacen particularmente peligroso si su epicentro hubiera estado más cerca de la capital. Para concluir este informe, se lleva a cabo un escenario de aceleraciones que podrían darse de ocurrir un sismo al sur de San José y Cartago.

Se hace la suposición que el evento es de magnitud 6.0 en la zona donde se produjo el primer evento de un enjambre sísmico que afectó la localidad de Tobosi entre el 2011 y 2012. Particularmente, el epicentro se ubica en el sitio donde ocurrió el sismo del 09 de diciembre que fue de Mw 3.1. La profundidad del sismo en la simulación es de 5 km.

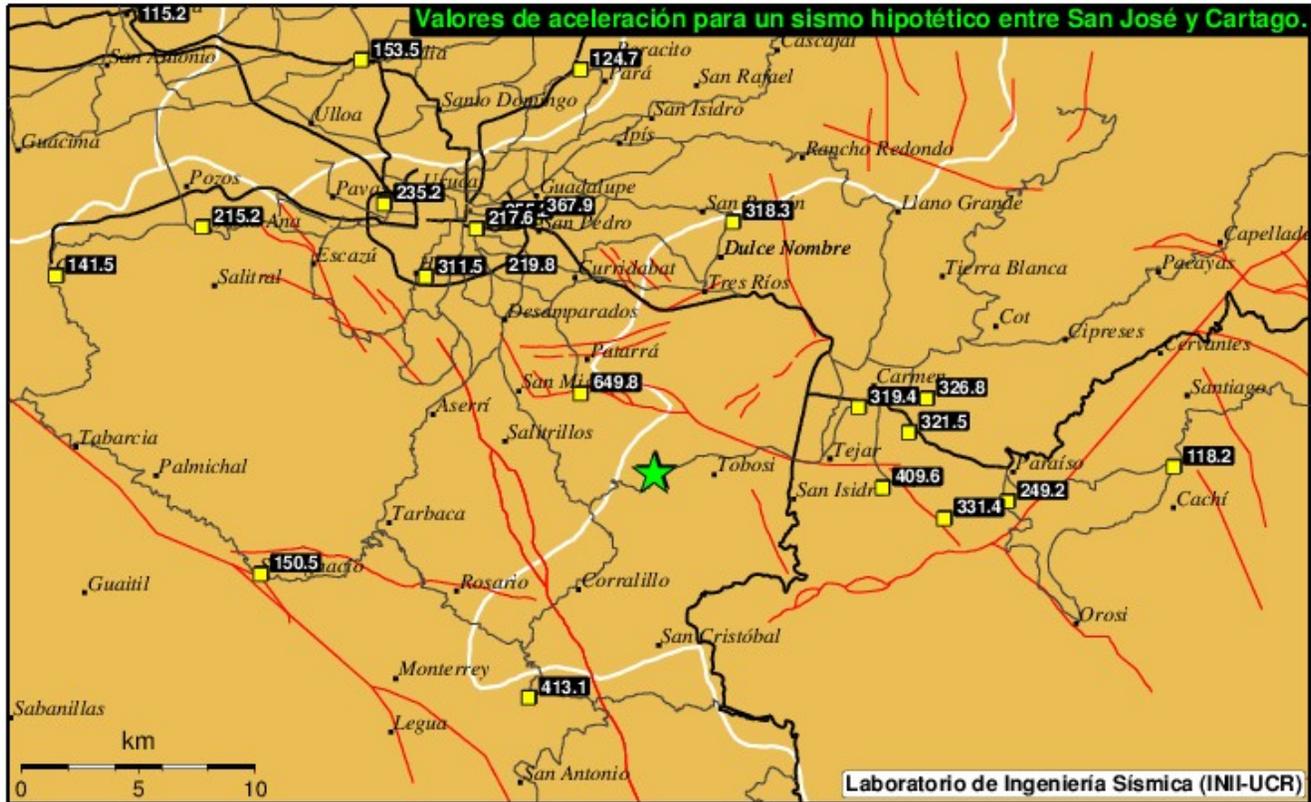


Figura 13. Valores de aceleración máximos estimados para un sismo hipotético que ocurriera en la región de Tobosí.

Se utiliza la información de la amplificación del suelo de cada una de las estaciones acelerográficas en el área y también las propiedades de propagación sísmicas en forma análoga a como se hizo con todos los sismos evaluados anteriormente. Se obtuvieron 20 señales por cada sitio y en cada una se calculó el valor máximo que luego se promedió. Este resultado nos indica lo siguiente:

1. El valor de mayor aceleración se da en la estación de Guatuso de Patarrá. El máximo es de unos 650 cm/s^2 a una distancia de unos 5 km. Este valor es similar al de la Casa de Máquinas de Cariblanco con el sismo de Cinchona del 8 de enero del 2009 que produjo un valor de 658 cm/s^2 a 15 km de distancia. El sismo de Cinchona fue de magnitud 6.2, ligeramente mayor del que hablamos hipotéticamente para este mapa, por lo cual, a distancias mucho más cercanas al epicentro, probablemente los valores de aceleración fueron todavía mucho mayores.

Las intensidades probables serían de VIII en la escala de Mercalli, lo cual corresponde a movimiento muy fuerte con posible daños ligeros en estructuras de diseño bueno; considerable en edificios ordinarios de baja calidad con derrumbe parcial; grande en estructuras débilmente construidas. Los muros sueltos salen de sus armaduras. Puede haber caída de chimeneas o muros sin varilla, pilas de productos en los almacenes de las fábricas, columnas, monumentos y muros. Los muebles pesados se pueden volcar. Podría haber arena y lodo proyectados en pequeñas cantidades en los suelos donde abundan esos materiales. Cambio en el nivel del agua de los pozos. El movimiento podría ser percibido incluso por personas que guían vehículos motorizados.

2. Debido a la lejanía del epicentro, las estaciones ubicadas en Cartago y San José experimentarían valores de aceleración de unos 250 cm/s² a 400 cm/s². El movimiento podría ser muy perjudicial para estructuras que no estén diseñadas de manera adecuada para soportar un sismo fuerte.

Esto quiere decir que el movimiento en el Valle Central podría ser de una intensidad aproximada de VII en la escala de Mercalli que corresponde a un movimiento que es advertido por todos. Podrían presentarse daños sin importancia en edificios de buen diseño y construcción. Daños ligeros en estructuras ordinarias aunque bien construidas; daños considerables en las débiles o mal planeadas; rotura de algunas paredes sin varilla. El movimiento podría ser ligeramente sentido por las personas conduciendo vehículos en movimiento.

3. En San José centro la aceleración es ligeramente menor que en Cartago. Sería más intenso en la zona sur, cerca de Hatillo y alrededor de La Sabana.
4. Finalmente, llama la atención que el valor esperado para Frailes de Desamparados sea tan grande como el de Cartago, considerando que el primero está mucho más lejos que el segundo. Evidentemente los efectos de sitio tenderán a tener un papel muy importante en la sacudida.

Informe financiero

No se solicitó financiamiento extra para esta investigación

Publicación

Los resultados de este informe serán sometidos para publicación en la Revista de Ingeniería.

Bibliografía

- Bilek, S. L., S. Y. Schwartz, and H. R. DeShon, Control of seafloor roughness on earthquake rupture behavior, *Geology*, 31, 455–458, 2003.
- Boore, D. M. (1983). Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 173, 1865-1894.
- Boore, D. M. (2005). SMSIM---Fortran Programs for Simulating Ground Motions from Earthquakes: Version 2.3---A Revision of OFR 96-80-A , U.S. Geological Survey Open-File Report.
- Borcherdt, R.D., 1970, Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 60, p. 29-61.
- DeShon, H.R., Schwartz, S.Y., Bilek, S.L., Dorman, L.M., Gonzalez, V., Protti, J.M., Flueh, E.R. & Dixon, T.H., 2003. Seismogenic zone structure of the southern Middle America Trench, Costa Rica, *J. geophys. Res.*, 108, 2491, doi:10.1029/2002JB002294.
- Fernández, M. (1996). Evaluación del hipotético sistema de falla transcurrente Este-Oeste de Costa Rica. *Rev. Geol. Amér. Central*, 19/20, 57-74.
- Fernández, M. & Pacheco, J., (1998) Sismotectónica: Región Central de Costa Rica. *Rev. Geol. Amér. Central.*, 21: 8 -20.
- Fernández, M. & Montero, W. (2002). Fallamiento y sismicidad del área entre Cartago y San José, Valle Central de Costa Rica, *Revista Geológica de América Central*, 26: 25-37.
- Konno, K. and Ohmachi, T. (1998), —Ground-Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio

- between Horizontal and Vertical Components of Microtremor", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 88, N. 1, 228-241.
- Leandro, G., León, C., Avila, M., Fernández, A., Elizondo, J., Montalto, F., Chávez, R & Obando, J., (1983). Informe geológico sismológico, San Isidoro de Pérez Zeledón y sus alrededores. Evaluación sismo 3 de julio de 1983, *Informe Interno del ICE*, pp 56.
- Lermo, J., and Chavez-Garcia, F., 1993, Site effect evaluation using spectral ratios with only one station: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 83, p. 1574–1594.
- Montero, W. & Miyamura, S., (1981). Distribución de intensidades y estimación de los parámetros focales de los terremotos de Cartago de 1910, Costa Rica, América Central. *Revista Inst. Geográfico Nacional*, Julio-Diciembre: 9-34.
- Montero, W. (1986). Período de recurrencia y secuencias sísmicas de los temblores interplaca e intraplaca en la región de Costa Rica. *Rev. Geol. Amér. Central*, 5: 35-72.
- Montero, W., Barahona, M., Rojas, W. & Taylor, M. (2005) Los sistemas de falla Agua Caliente y Río Azul y relevos compresivos asociados Valle Central de Costa Rica. *Rev. Geol. Amér. Central* 33:7-27
- Montero, W., Barahona, M, Rojas, W. & Taylor, M. (2006). Los sistemas de falla Agua Caliente y Río Azul y relevos compresivos asociados, Valle Central de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 33: 7-27.
- Mora, M & Peraldo, G. (2011) Análisis macrosísmico del terremoto de Buena Vista de Pérez Zeledón, 3 de julio de 1983 (Ms=6.1), Costa Rica. *Rev. Geol. Am. Central*, 44, 41-70.
- Morales, L.D. (1987). Regionalización de la sismicidad de Costa Rica y la crisis sísmica del año 1983, *Geostmo*, 1, 1,33-50
- Moya, A. (2009). Inversión de efectos de sitio y factor Q utilizando cocientes espectrales. *Estudios Geológicos* 65(1), 67-77.
- Pacheco, J.F.; Quintero, R.; Vega, F.; Segura J.; Jiménez, W. & González, V. (2006). The Mw 6.4 Damas, Costa Rica, Earthquake of 20 November 2004: Aftershocks and Slip Distribution. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96: 1332-1343. [doi:10.1785/0120050261](https://doi.org/10.1785/0120050261)
- Protti, M; K. McNally; J. Pacheco; V. González; C. Montero; J. Segura; J. Brenes; V. Barboza; E. Malavassi; F. Gündel; G. Simila; D. Rojas; A. Velasco; A. Mata; W. Schillinger (1995). The March 25, 1990 (Ms-2dWus0 = 7.0, Ms-2dLus0 = 6.8), earthquake at the entrance of the Nicoya Gulf, Costa Rica: Its prior activity, foreshocks, aftershocks, and triggered seismicity, *J. Geophys. Res.*, New York, Scientific American, vol. 100, no. 6, pp. 20345-20358, pp. B10302, (ISSN: 1340-4202)
- Ramírez, R.; Santana, G. & Chacón, O. (1996). Mapa de amplificación sísmica del Valle Central, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 19, 37-55.
- Rojas, W. & Redondo, C. (2002). El temblor de Quepos del 20 de agosto de 1999 (6,9 Mw): Fuente sísmica y evolución de la sismicidad. *Rev. Geol. Am. Central*, 26, 65-70.
- RSN: Red Sismológica Nacional (2009), *Rev. Geol. Am. Central*, 40, 91-95, 2009
- Salazar, G., Obando, G. & Mora, R. (1992) Acueducto Metropolitano, tramo embalse el Llano-Río Navarro (Costa Rica): Un sitio bajo amenaza,. *Rev. Geol. Amér. Central.*, 14: 85 - 96.
- Santana, G., Vargas, W., Matamoros, A., Segura, C., Ramírez, A., (1990). Sismo de Cóbano 25 de marzo de 1990 efectos sobre suelos y edificaciones. Lab. de Ing. Sísmica, Inst. Inv. en Ingeniería, Fac. de Ing., Univ. de Costa Rica. Rep INII-49-90, San José.
- Wald, D.J., V. Quintoriano, T.H. Heaton, H. Kanamori, C.W. Scrivner, & C.B Worden (1999). Relationship between peak ground acceleration, peak ground velocity, and Modified Mercalli intensity in California. *Earthquake Spectra*, 15: 557-564.