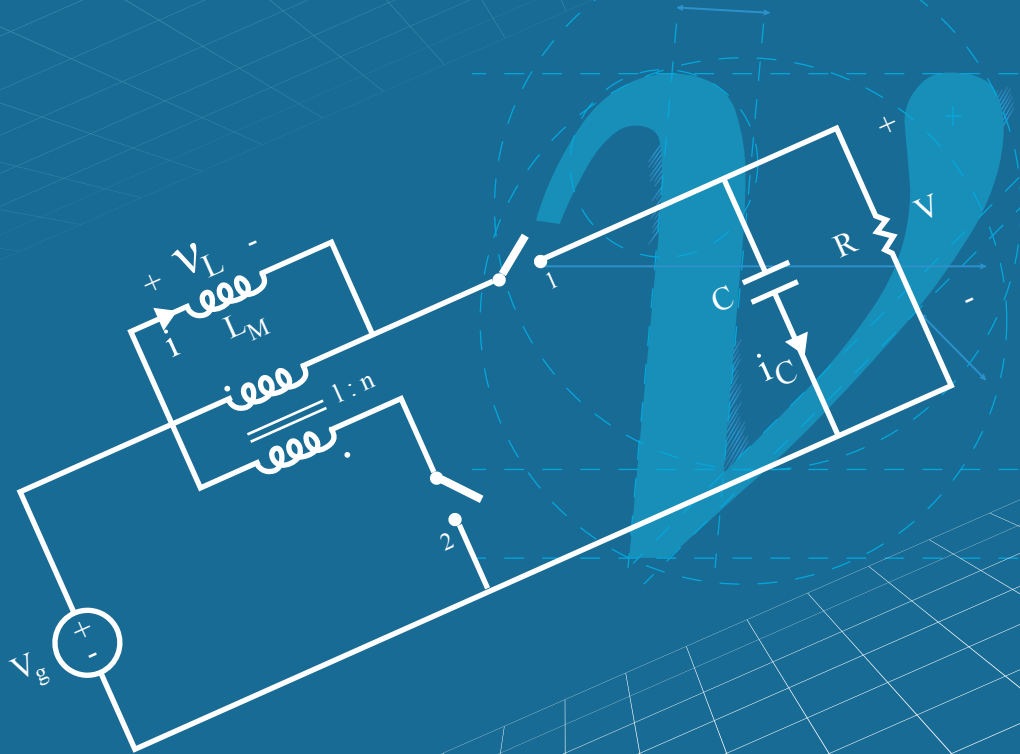


Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
AGOSTO/DICIEMBRE 2012 - VOLUMEN 22 Número (2)



Ingeniería

Revista Semestral de la Universidad de Costa Rica
Volumen 22 – Agosto/Diciembre 2012 –Número 2

DIRECTOR

Ing. Juan Carlos Chaves De Oña, Ph. D.
Escuela de Ingeniería Mecánica
Universidad de Costa Rica

EDITOR

Ing. Manuel Montoya Maroto.
Escuela de Ingeniería Industrial
Universidad de Costa Rica

CONSEJO EDITORIAL

Ing. Edwin Solórzano Campos, M. Sc. Decano de la Facultad de Ingeniería, Universidad de Costa Rica
Ing. Georges Govaere Vicarioli, Ph. D. Director del Instituto de Investigaciones en Ingeniería, Universidad de Costa Rica
Ing. Ronald Argüello Venegas, Ph. D. Profesor pensionado de la Universidad de Costa Rica
Ing. Juan Gabriel Monge Gapper, M. Sc., Profesor de la Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Costa Rica
Ing. Guillermo Santana Barboza, Ph. D. Profesor de la Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica
Ing. Juan Araque Skinner, M.Sc. Director de la Escuela de Ingeniería Topográfica, Universidad de Costa Rica
Ing. Manuel Molina Córdoba. Profesor de la Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Costa Rica
Ing. José Miguel Mena Marín, MBA, GIP LTDA
Ing. Luis Diego Marín Naranjo, M. Sc., Profesor de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica
Ing. Rodolfo Herrera Jiménez, Ph. D. Profesor emérito de la Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica

CORRESPONDENCIA Y SUSCRIPCIONES

Editorial de la Universidad de Costa Rica
Apartado Postal 11501-2060
Revista Semestral de la Universidad de Costa Rica

CANJES

Universidad de Costa Rica
Sistema de Bibliotecas, Documentación e Información
Unidad de Selección y Adquisiciones-CANJE
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio Brenes
Costa Rica

SUSCRIPCIÓN ANUAL:

Costa Rica: ₡ 4000,00
Otros países: US\$ 20,00

NÚMERO SUELTO:

Costa Rica: ₡ 2000,00
Otros países: \$ 20,00

Esta revista se encuentra indizada en Latindex,
Engineering Index y Compendex



Ingeniería

Revista Semestral de la Universidad de Costa Rica
Volumen 22 – Agosto/Diciembre 2012 –Número 2

Edición aprobada por la comisión de la Universidad de Costa Rica
© 2010 EDITORIAL UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
Todos los derechos reservados conforme a la ley
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio Brenes
San José, Costa Rica

Supervisión:

Ing. Juan Carlos Chaves De Oña, Ph.D.

Ing. Manuel Montoya Maroto, E.I.

D.I. Marcela Quirós Garita, M.Sc.

Colaboración:

Srta. Ingrid Vargas Romero, asistente de filología, estudiante de la Escuela de Filología de la Universidad de Costa Rica.

Srta. Ana Elizabeth González López, estudiante de la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Costa Rica.

Diagramación:

Luis Arias Mesén.

Katherine Canales Montoya, estudiante de Artes Plásticas con énfasis en Diseño Gráfico de la Univesidad de Costa Rica.

Diseño de portada:

Luis Arias Mesén.

SIMULACIÓN ESTOCÁSTICA DE ACELERACIONES MÁXIMAS PARA UN TERREMOTO ENTRE CARTAGO Y SAN JOSÉ

Aarón Moya

RESUMEN

Se llevó a cabo una simulación de aceleraciones estocástica. El estudio primero simula el posible valor máximo de aceleración experimentado en la zona de estudio a raíz del terremoto de 1910 al sur de Cartago. Posteriormente, se calcula el impacto de este evento, pero ubicando su epicentro en la región de Tobosí, entre Cartago y San José. Los resultados indican que si un sismo de magnitud 6.0 ocurriera en la región, podría generar valores máximos de aceleración de alrededor de 1 g. Debido a su cercanía a la superficie, el sismo se atenuaría rápidamente llegando a San José con menor intensidad, pero podría afectar de forma severa, principalmente a Cartago y edificaciones que se encuentren en sitios cercanos a la falla causativa.

Palabras clave: Terremoto, simulación estocástica, Cartago, 1910, Tobosí

ABSTRACT

We conducted a stochastic simulation to estimate the peak ground acceleration. In this study, we are interested in finding out what the peak ground acceleration might have been in close to the city of Cartago due to the 1910 event. Then, we simulated another scenario but locating the epicenter close to the region of Tobosí. The results indicate that if a magnitude 6.0 earthquake were to occur today in that region, it could cause peak ground accelerations of the order close to 1g. Due to its shallow depth, the event could quickly attenuate and reach San Jose with lesser intensity, but could be very severe for Cartago and structures built near the causative fault.

Key words: Earthquake, stochastic simulation, Cartago, 1910, Tobosí

Recibido: 9 de noviembre del 2012 • **Aprobado:** 22 de febrero del 2013

1. INTRODUCCIÓN

El 22 de febrero del 2011 en Christchurch, Nueva Zelanda ocurrió un sismo de Mw 6,2 (6,3 MI) a escasos 5 km de profundidad y muy cerca de la ciudad. Cobró la vida de más de 100 personas (MacRae & Dhakal, 2011) y produjo grandes daños a edificios de construcción reciente, muchos de los cuales tuvieron que ser demolidos (EERI, 2011). El sismo de 6,3 MI produjo además licuefacción del terreno y múltiples derrumbes, todos asociados a sus altas aceleraciones en la cercanía a la zona epicentral.

Llamó la atención que estructuras modernas también se vieran muy afectadas por este sismo de magnitud moderada. Champion & Liel (2012)

sugieren que el comportamiento de estructuras cerca de una falla sísmica es muy poco entendido. Los registros de velocidad cerca de una falla sísmica suelen presentar picos elevados cuando la ruptura se propaga en dirección al sitio y a la velocidad de la ruptura. A esto se le conoce como direccionalidad. Según los autores, este pico puede generar desplazamientos y demandas a estructuras que incrementarían su probabilidad de que colapsaran.

En Costa Rica, un evento con características similares pudo haber sido el responsable de la destrucción de Cartago en 1910. El registro fotográfico de la destrucción de la ciudad en esa época, evidencia que el sismo ocurrido el 4 de mayo tuvo que haber sucedido muy cerca de la

vieja metrópoli para haber causado los daños tan focalizados que muestran las imágenes. En aquella época no se contaba con ningún tipo de regulación en las construcciones como el Código Sísmico que actualmente posee el país.

Sin embargo, el evento del 4 de mayo de 1910 en Cartago no fue el único en importancia en las cercanías del ahora densamente poblado Valle Central. Algunos de los otros sismos históricos más importantes en las cercanías de esa ciudad y San José se describen en Fernández & Montero (2002). Entre ellos están los siguientes:

- En 1842 sucedió el sismo de Alajuelita, el cual tuvo una magnitud que osciló entre Ms 5,0 y 5,5.
- 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. 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). 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.
- En el año 1951 sucede otro temblor, esta vez cerca de Paraíso.
- 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).
- En junio de 1994 se presenta un enjambre que la Red Sismológica Nacional (RSN) ubica entre las fallas de Jaris, Agua Caliente y Río Azul con máximos de 3,0 grados (Fernández & Montero, 2002).
- En octubre de 1994 se presentó 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.
- 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).

- En el año 2004, Montero, Barahona, Rojas & Taylor (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)

Montero (1986) dice que los eventos del Tablazo de 1910, Santa Mónica de 1910 y Tres Ríos de 1912, junto con otros sismos, 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 Paraíso de 1951 que, junto con la ocurrencia de otros sismos, finaliza en 1955. A partir de ese año, un nuevo período de tranquilidad sísmica inicia hasta el año 1985.

Ese autor señala que los períodos de tranquilidad sísmica parecen ser variables con valores mínimos de 20 años y máximos de 39 años e indica que el período medio estimado para el Valle Central es de $29,9 \pm 9,9$ años.

Adicionalmente Montero, Barahona, Rojas, & Taylor (2005) indican 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 1910.

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

- En la zona del sureste de San José y suroeste de Cartago es común que sucedan enjambres sísmicos.
- Las magnitudes más grandes de dichos enjambres pueden ser de hasta 4,0 grados si no se presenta un evento mayor.
- 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.

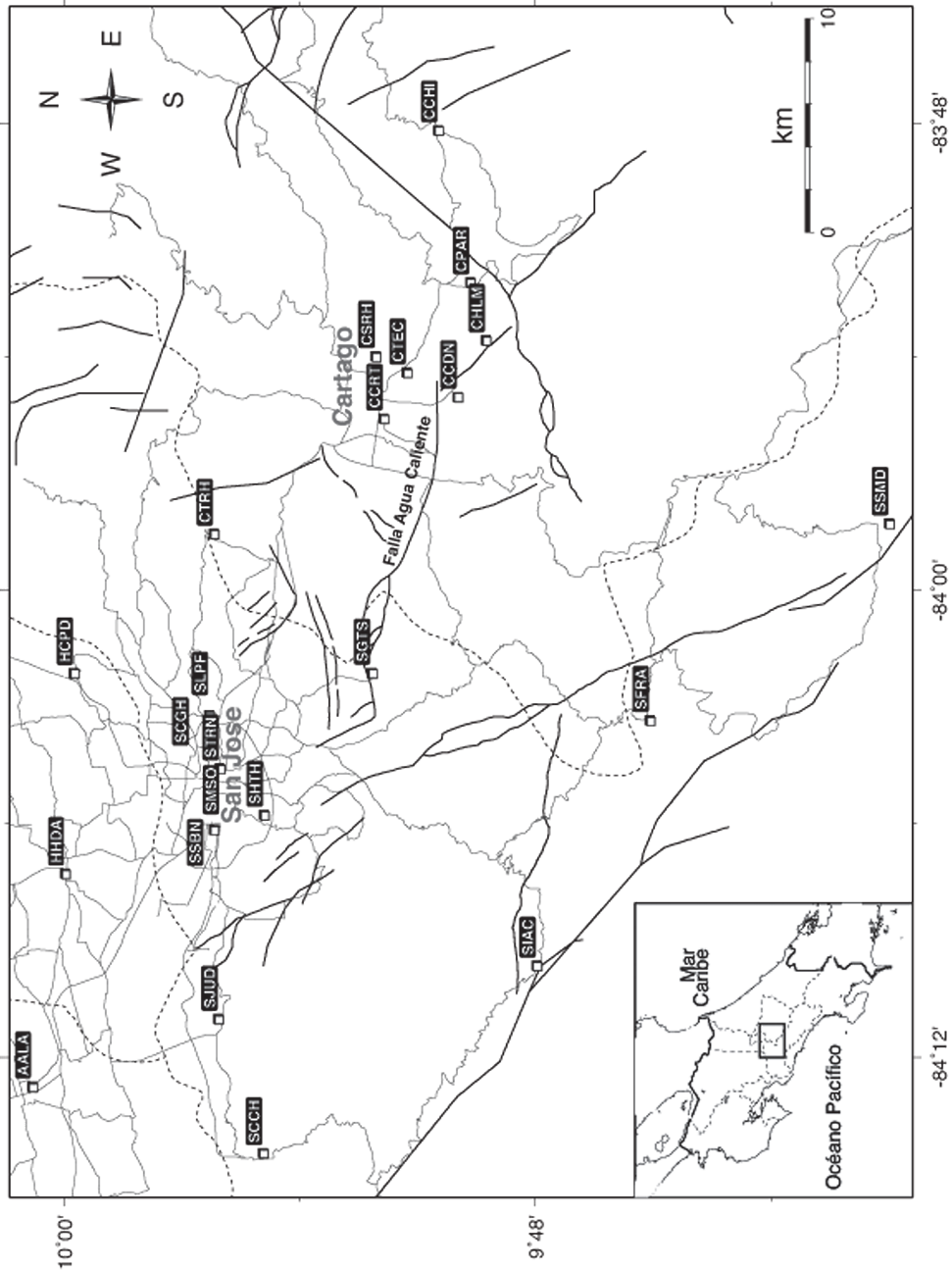


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio. Las trazas gruesas son las fallas activas más importantes según Fernández & Montero (2002). Las trazas grises corresponden a las principales carreteras de la zona y la línea punteada a los límites de provincia. Se muestra la ubicación de la falla Agua Caliente así como la localización de las estaciones de medición del Laboratorio de Ingeniería Sísmica.

Fuente: Elaboración propia, 2012.

- 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.

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.

En esta investigación, se pretende estudiar el impacto en términos de aceleración que tendría la ocurrencia de un hipotético sismo cerca del Valle Central, específicamente entre Cartago y San José. La zona de estudio se muestra en la Figura 1.

La razón para escoger el área al sur de San José y Cartago para llevar a cabo este estudio se debe a que en el 2010 se cumplieron los 100 años del terremoto de Cartago de 1910. Este fue un sismo del cual no existe ningún tipo de registro y que tuvo epicentro en la Falla de Agua Caliente. El terremoto destruyó la ciudad de Cartago y causó la muerte a más de 300 personas (Montero & Miyamura, 1981).

El acelerado crecimiento de la población en el Valle Central, particularmente en San José y Cartago, y la falta de un plan regulador o el incumplimiento de este han hecho que la ciudad se extienda hacia el sur, precisamente más cerca de la zona de la falla. Esta cercanía es altamente

peligrosa ya que la fuerza de la sacudida en su vecindad no ha sido estudiada en detalle. La edificación de estructuras cercanas a una fuente sísmica importante, aún cuando estén basadas en el Código Sísmico, no es garantía de que estas vayan a comportarse de forma adecuada durante una emergencia, por lo poco que se conoce sobre los efectos del movimiento fuerte en el campo cercano.

2. METODOLOGÍA

Los cálculos se llevaron a cabo usando el método estocástico (Boore, 1983) con ayuda del programa de cómputo llamado SMSIM (Boore, 2005). En el método se obtiene un registro sintético de aceleración que representa un valor medio del comportamiento del suelo, mediante la multiplicación de los efectos de la fuente sísmica, $F(f)$, el medio de propagación, $Q(f)$, y los efectos de sitio $G(f)$ según se detalla en la Figura 2. El método ha sido muy exitoso en la predicción de movimiento fuerte. El método puede ser aplicado asumiendo una fuente puntual o una falla finita y diferentes versiones del método se han desarrollado para abarcar ambos escenarios (Atkinson & Boore, 1997; Atkinson et al., 2009; Boore, 2009)

La fuente sísmica es comúnmente modelada como una fuente puntual representada por el momento sísmico (Ω) y la frecuencia de esquina (f_0). El medio de propagación está representado por el valor de la atenuación $Q(f) = Q_0 f^n$ y la distancia de cada estación al hipocentro. Para el

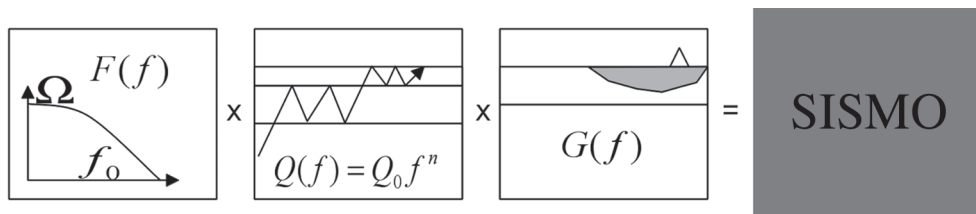


Figura 2. Esquema de lo que consiste el método estocástico. Se multiplica el factor de la fuente sísmica dado por $F(f)$, por el medio de propagación dado por $Q(f)$ y el efecto de sitio bajo la estación $G(f)$ para obtener un registro artificial de un Sismo.

Fuente: Elaboración propia, 2012.

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 se conoce la función de la fuente, el medio de propagación (dado por el factor de calidad Q) y el efecto de sitio, se puede reconstruir un acelerograma de cualquier evento sísmico que se desee.

El método estocástico que se utilizó en este trabajo asume que la fuente generadora de sismos es puntual, no un área. Un terremoto de magnitud inferior a 6 se puede considerar como una fuente puntual porque no genera rupturas de la falla muy grandes que pudieran afectar el arribo de las ondas sísmicas a diferentes tiempos. En la fuente puntual, toda la energía de un sismo sale de un único punto en todas direcciones. Los efectos del medio de propagación y de geología local bajo las estaciones serán las que contribuyan a la modificación de la señal sísmica en uno u otro sitio.

3. EFECTOS DE SITIO

Los efectos de sitio son todas aquellas variaciones en la amplitud, el contenido de frecuencias y la 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. En Ramírez, Santana & Chacón (1996) se concluye que lugares como San Ramón, Alajuela, el sur de San José y Cartago entre otros están constituidos por suelos muy blandos que tienden a amplificar las ondas sísmicas.

A pesar de que los efectos de sitio son tan importantes, la determinación objetiva de estos es difícil y se han propuesto numerosas técnicas. Una de las más básicas es la que divide el espectro de una señal en suelo contra el espectro de una

señal en roca (Borcherdt, 1970), ambas obtenidas para el mismo sismo.

Esta técnica es válida siempre que la distancia entre las dos estaciones usadas en el análisis sea mucho menor que la distancia de ambas al hipocentro. Al cumplirse con ese requisito, en el cociente planteado anteriormente 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 de una misma estación de registro, conocido como H/V. En la componente vertical de los registros sísmicos se observó que presenta poca amplificación en relación con las componentes horizontales, y por esa razón se ha asumido que a la hora de calcularse el cociente H/V se elimina los efectos de la fuente y del medio de propagación. Diversos autores han dedicado importantes trabajos para demostrar la validez de la técnica, como Konno & Ohmachi (1998); Lermo & Chavez-Garcia (1993) entre muchos otros).

Para estimar los efectos de sitio de cada estación utilizada en el análisis, se utilizó el cociente H/V de todos los registros disponibles en cada una de ellas. Se tomó una ventana de 50 s a partir del arribo de la onda P para cada sismo importante ocurrido entre el 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.

En la Figura 3 se muestran las gráficas resultantes del análisis de efectos de sitio. La traza del centro representa el valor promedio de amplificación mientras que las líneas punteadas la desviación estándar de los mismos. Aunque lo más importante es evaluar el impacto de un sismo en Cartago, se calculan los registros sintéticos de otras estaciones para observar la distribución de las aceleraciones en un área mayor, como por ejemplo observar el impacto en San José.

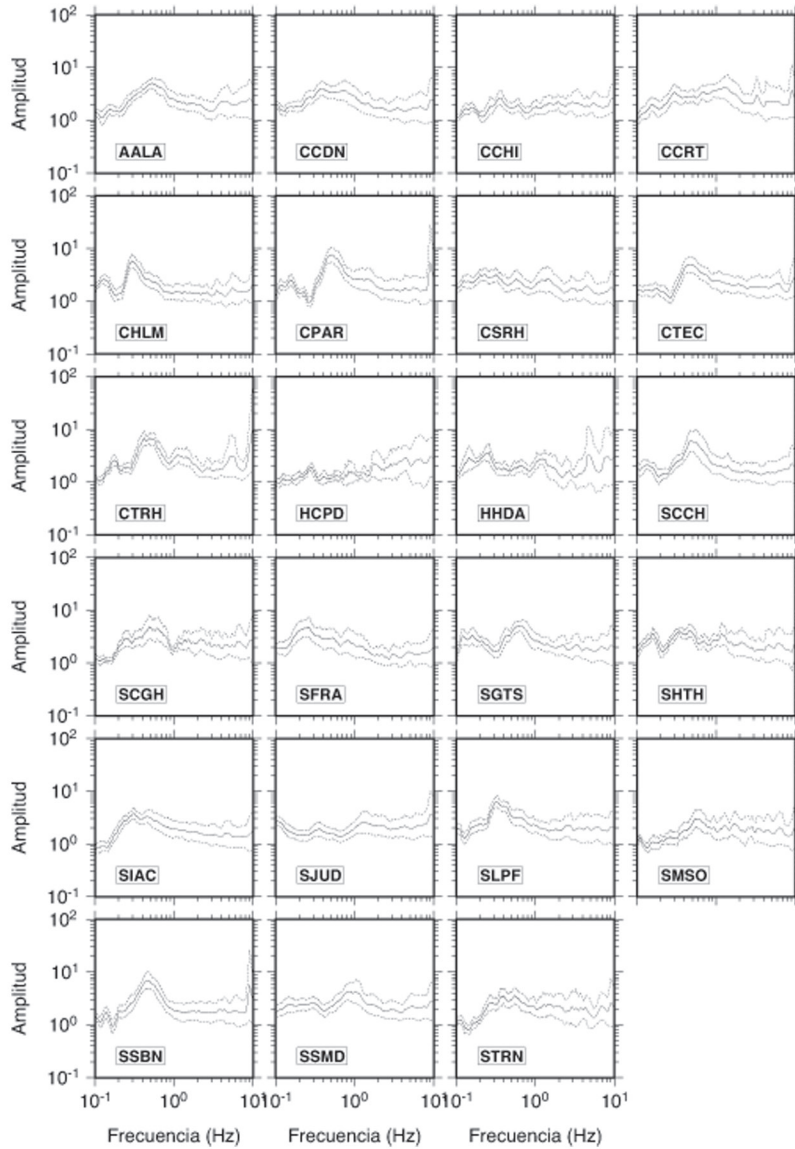


Figura 3. Efectos de sitio para 23 sitios selectos en la simulación. La ubicación de los mismos está indicada en la Figura 1. Las líneas punteadas son la desviación estándar y la del centro el valor promedio.

Fuente: Elaboración propia, 2012.

4. RESULTADOS

4.1 Escenario de aceleraciones del Terremoto de Cartago de 1910

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

- 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 sucedieron otros temblores sentidos por la población. Muy probablemente algunos de esos sismos eran precursores.
- Las personas escucharon retumbar la tierra lo cual es indicativo de que la fuente sísmica se debía encontrar relativamente cerca de la superficie.
- En el trabajo por Montero & Miyamura (1981) se observa que las intensidades sísmicas fueron altas en el área epicentral y que estas disminuyeron significativamente con la distancia lo que es indicativo de eventos someros.
- 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, posiblemente similar al del terremoto de Cinchona del 2009.

Los estudios que se han realizado en la zona de la Falla de Agua Caliente por Fernández & Montero (2002) y Montero, Barahona, Rojas, & Taylor (2006) indican que esta es de una falla de desplazamiento de rumbo con dirección cercana a la este-oeste. 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.

Utilizando los efectos de sitio estimados para las estaciones de Cartago, se calculó un total de 100 registros por cada estación. El valor promedio de cada sitio se tomó como el máximo. Con base en ese valor de aceleración se hicieron correlaciones con las intensidades máximas que pudo haber alcanzado el movimiento en la escala propuesta por Wald, Quintoriano, Heaton, Kanamori, Scrivner, & Worden (1999). El resultado de las simulaciones numéricas para el sismo de Cartago de 1910 en estaciones cercanas a esa ciudad se presenta en la Figura 4. Los valores de aceleración se listan en el Cuadro 1.

El valor más alto se presentó en la estación ubicada en Ciudad de los Niños (CCDN) que estaría a escasos metros del epicentro y es de 900 cm/s^2 que corresponden a una intensidad de IX. El valor de 709 cm/s^2 se registra para el sitio del Instituto Tecnológico de Costa Rica (CTEC) y 670 cm/s^2 para el sitio de San Rafael de Oreamuno (CSRH) ambos con intensidad IX. También con intensidad IX estaría el sitio de la mina de Holcim (CHLM), unos kilómetros más al este de la estación CCDN con 716 cm/s^2 .

La aceleración de 592 cm/s^2 sería para el sitio de Biblioteca Pública de Cartago (CCRT) con intensidad VIII y 303 cm/s^2 para Tres Ríos (CTRH) con intensidad VII. Estos valores de intensidad en el centro de la ciudad de Cartago correlaciona con los descritos en Montero & Miyamura (1981) para la época de 1910.

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 Figura 5 el valor medio de aceleración máxima en estaciones de los alrededores del epicentro. Según esto, el valor medio de aceleración en San José centro pudo haber alcanzado los 200 cm/s^2 .

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 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.

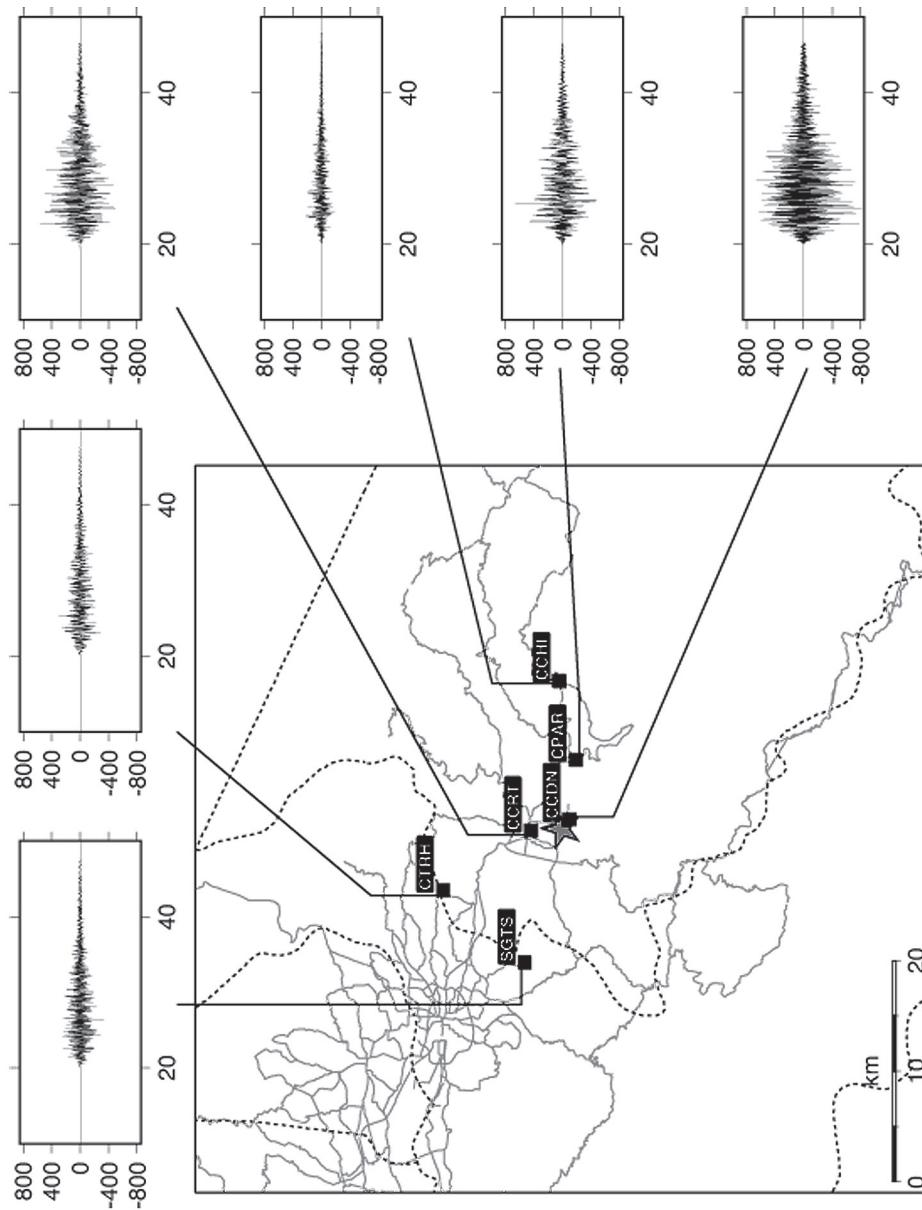


Figura 4. Ejemplo de cálculo de un registro sintético en estaciones de Cartago. Las amplitudes de los registros están dadas en cm/s^2 y el tiempo en segundos.

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Cuadro 4. 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

Fuente: Elaboración propia, 2012.

4.2 Escenario de aceleraciones para un sismo con epicentro en Tobosi

En nuestro país, el único sismo muy cercano a una ciudad densamente poblada ha sido el del Terremoto de Cartago de 1910. Tanto el reciente Terremoto de Chinchona ocurrido en el 2009, así como el Terremoto de Cartago, poseen una magnitud y profundidad que los hacen particularmente peligrosos si hubieran ocurrido más cerca de la capital. Debido a esto, 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. Esto es, en el sitio donde ocurrió el sismo del 09 de diciembre del 2011 que fue de Mw 3,1 que se muestra representado como una estrella en la Figura 6.

La profundidad del sismo, en la simulación, es de 5,0 km. Se utilizó la información de la amplificación del suelo de cada una de las estaciones acelerográficas en el área, tal como en el caso anterior y también las propiedades de propagación sísmicas. Se obtuvieron 20 señales sintéticas por cada sitio y en cada una se calculó el valor máximo que luego se promedió. Este resultado que se muestra en la Figura 6 indica lo siguiente:

- El valor de mayor aceleración se da en la estación de Guatuso de Patarrá. El máximo es de unos 650 cm/s² a una distancia de unos 5 km. Este valor es similar al registrado en la Casa de Máquinas de Cariblanco con el Terremoto de Chinchona del 8 de enero del 2009 que produjo un valor de 658 cm/s² a 15 km de distancia (Climent & Moya, 2009). Ese es el registro más cercano al epicentro. Sin embargo, como el sismo tuvo una Mw 6,1, ligeramente mayor del que hablamos hipotéticamente en este estudio, 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.
- 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 y que podrían presentarse daños sin importancia en edificios de buen diseño y construcción. Se podrían presentar daños ligeros en estructuras ordinarias aun-

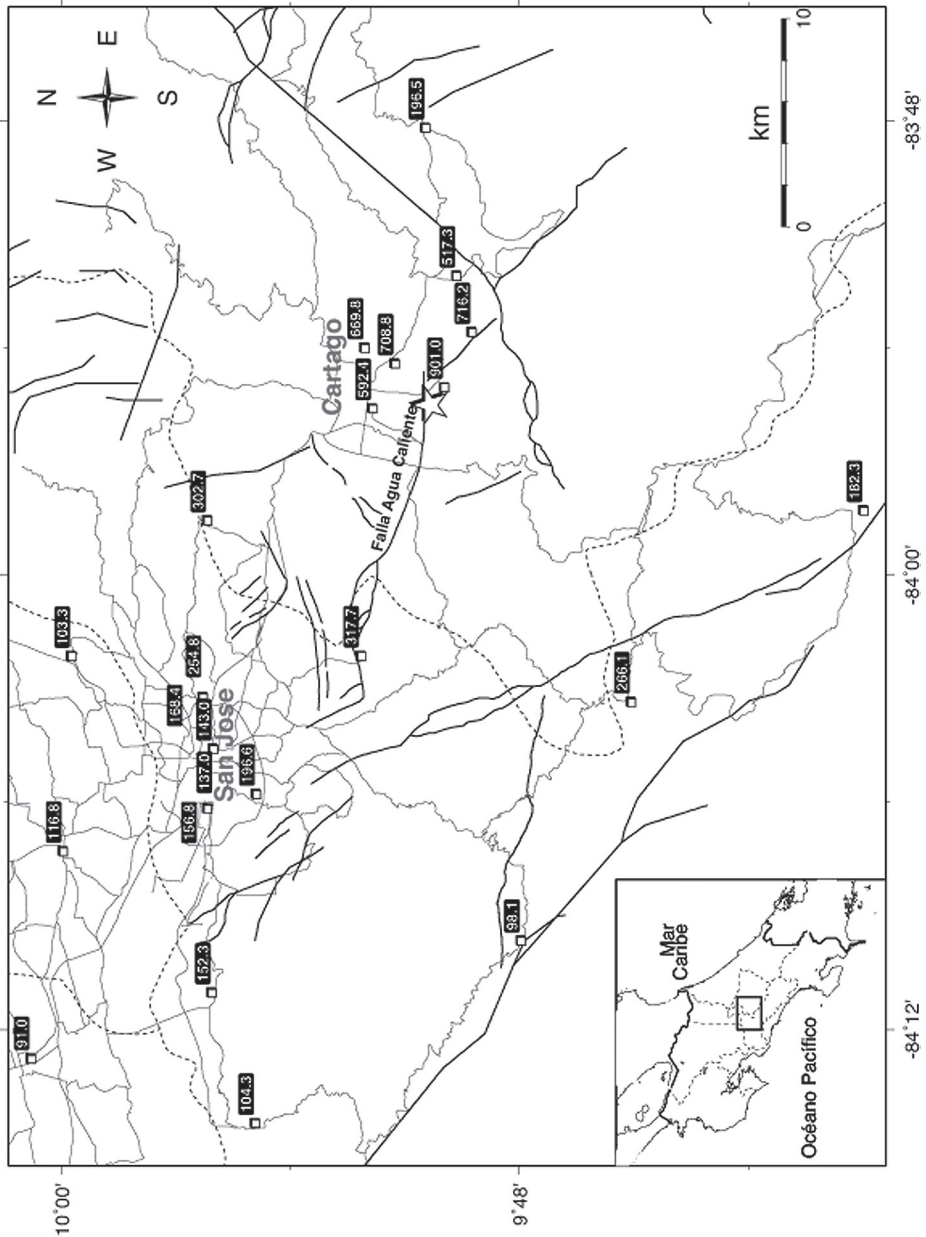


Figura 5. Valores promedio de aceleración máxima para estaciones del área central (recuadro en mapa inserto) para un hipotético sismo que ocurriera al sur de Cartago, sobre la falla Agua Caliente (estrella).

Fuente: Elaboración propia, 2012.

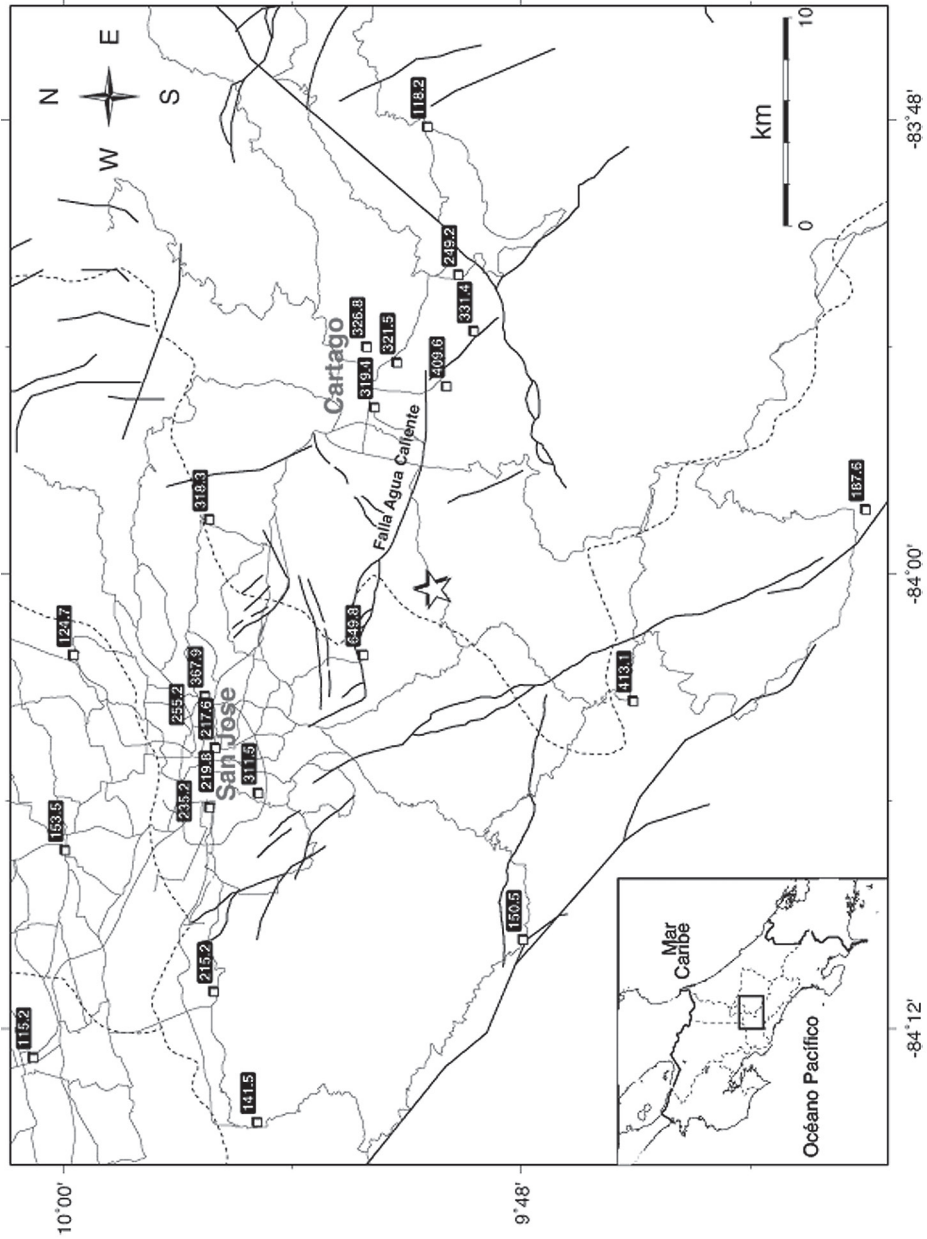


Figura 6. Valores promedio de aceleración máxima estaciones del área central de Costa Rica (recuadro en mapa inserto) para un hipotético sismo que ocurriera en la región cercana a Tobosi (estrella) donde se presentó el enjambre sísmico del 2011-2012.
Fuente: Elaboración propia, 2012.

que bien construidas y daños considerables en las débiles o mal planeadas que perjudicarían principalmente a las zonas marginales.

- 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.
- 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.

5. CONCLUSIONES

El sismo hipotético que se ha simulado aquí alcanzaría un valor de 0,9 g, sin embargo, considerando la experiencia de Christchurch, bien podríamos tener aceleraciones mucho más altas y consecuentemente más daños que los calculados en este informe.

Un sismo con epicentro en la zona de la falla de Agua Caliente, al sur de Cartago, produciría sacudidas fuertes al sur de la ciudad y centro de esta. En San José, el movimiento sería de alrededor de 0,2 g que es similar al experimentado por la ciudad de Alajuela con el terremoto de Cinchona en el 2009. Por otro lado, si el epicentro estuviera ubicado más al oeste, en la región de Tobosí, el sismo afectaría principalmente a las regiones de Guatuso, Frailes y sur de Cartago y San José.

Al tratarse de una simulación en que se asume que toda la energía del sismo irradia de forma esférica de un punto central, no se están considerando los posibles efectos de direccionalidad que pueden ocurrir ni el efecto de la topografía de basamento que pueda existir bajo la ciudad de Cartago. Este podría amplificar las ondas sísmicas, así como también la duración de la sacudida perjudicando así las estructuras altas que cada vez son más comunes en la capital.

Es por tanto recomendable que se lleven a cabo estudios más detallados con otros métodos numéricos para evaluar el impacto que la direccionalidad de las ondas sísmicas pudiera tener en las estaciones acelerográficas cercanas a la zona de estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- Atkinson, G.M. and Boore, D.M. (1997). Stochastic point-source modeling of ground motions in the Cascadia region. *Seismological Research Letters* 68, 74-85.
- Atkinson, G. M., Boore, D. M., Assatourians, K., Campbell, K. and Motazedian, D. (2009). A guide to differences between stochastic point-source and stochastic finite-fault simulations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99, 3192-3201.
- Boore, D. M. (1983). Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 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.
- Boore, D.M. (2009). Comparing stochastic point-source and finite-source ground-motion simulations: SMSIM and EXSIM. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99, 3202-3216
- Borcherdt, R.D. (1970). Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 60, 29-61.
- Climont, A. & Moya, A. (agosto, 2009). *Registros acelerográficos obtenidos durante el Terremoto de Cinchona del 8 de enero del 2009*, Costa Rica. Presentado en el X Congreso Nacional de Geotecnia, San José.
- Champion, C. & Liel, A. (2012). The effect of near-fault directivity on building seismic collapse risk. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 41 (10) 1391-1409. Doi:10.1002/eqe.1188
- EERI (2011). *Learning from earthquakes: The M 6.3 Christchurch, New Zealand, Earthquake of February 22, 2011*. Special Earthquake Report. Earthquake Engineering Research Institute.
- 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. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(1), 228-241.
- Lermo, J., and Chavez-García, F. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station: *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83, 1574-1594.
- MacRae, G.A. & Dhakal, R.P. (2011) *Lessons from the February 2011 M6.3 Christchurch earthquake*. Presentado en la 6th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Teherán, Irán.
- 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 Instituto 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. *Revista Geológica de América 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. *Revista Geológica de América 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.
- Moya, A. (2009). Inversión de efectos de sitio y factor Q utilizando cocientes espectrales. *Estudios Geológicos* 65(1), 67-77.
- Ramírez, R., Santana, G. & Chacón, O. (1996). Mapa de amplificación sísmica del Valle Central, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 19, 37-55.
- Red Sismológica Nacional (2009). El terremoto de Cinchona del jueves 8 de enero de 2009. *Revista Geológica de América Central*, 40, 91-95.
- 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.

SOBRE EL AUTOR

Aarón Moya Fernández

Investigador del Laboratorio de Ingeniería Sísmica del Instituto de Investigaciones en Ingeniería de la Universidad de Costa Rica. Geólogo de la Universidad de Wisconsin - Eau Claire. Ph. D. en Sismología de la Universidad de Kioto, Japón. Instituto de Investigaciones en Ingeniería (INII), Universidad de Costa Rica. Teléfono: (506) 2253-7331. Apartado postal: 36-2060 Correo electrónico: aaronmoya@gmail.com

