



Geofísica internacional

ISSN: 0016-7169

Instituto de Geofísica, UNAM

Solano Bahena, René; Aguirre González, Jorge
Metodología para el cálculo de acelerogramas sintéticos utilizando funciones de transferencia
empíricas y el método estocástico de Boore, en la ciudad de Tapachula, Chiapas
Geofísica internacional, vol. 58, núm. 3, 2019, Julio-Septiembre, pp. 189-210
Instituto de Geofísica, UNAM

DOI: <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2019.58.3.2061>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56872286002>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UNAM
redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Metodología para el cálculo de acelerogramas sintéticos utilizando funciones de transferencia empíricas y el método estocástico de Boore, en la ciudad de Tapachula, Chiapas

René Solano Bahena* y Jorge Aguirre González

Received: January 08, 2018; accepted: May 08, 2019; published on line: July 01, 2019

Resumen

El principal objetivo de este artículo es estimar los acelerogramas sintéticos de un sismo de magnitud 7.3 en la Ciudad de Tapachula, Chiapas, ocurrido el 7 de noviembre de 2012 en las costas de Guatemala. En este trabajo, se combinaron los métodos de las Funciones de Transferencia Empíricas y el Método Estocástico de Boore (1983, 2003), que es útil para simular los movimientos del terreno de alta frecuencia ($f > 0.1$ Hz), lo cual es de mucho interés en el campo de la ingeniería (Boore, 2003).

Para comprobar el grado de ajuste entre los acelerogramas obtenidos con el método utilizado en este artículo, se utilizaron las métricas propuestas por Anderson (2004). Para ello, se realizaron pruebas con acelerogramas conocidos registrados en una red temporal (instalada durante el periodo del 15 de junio al 29 de julio de 2011, en la Ciudad de Tapachula), y se compararon con los resultados sintéticos obtenidos tras aplicar el método mencionado. Para la simulación de un sismo de $M=4.7$, ambas componentes horizontales muestran buenos ajustes en la mayoría de las estaciones donde fue registrando. Es decir, el método aquí propuesto logra aproximarse mucho a los datos reales grabados en cada una de las estaciones. Esto respalda la confianza que tenemos en la gran utilidad que este método tiene para generar aplicaciones de interés en la ingeniería sísmica.

Palabras clave: acelerogramas sintéticos, funciones de transferencia, métricas de ajuste y método estocástico.

Abstract

The main objective of this article is to estimate the synthetic accelerograms of an earthquake with a magnitude of 7.3 in the City of Tapachula, Chiapas, which occurred on november 7, 2012 on the coasts of Guatemala. In this paper, the methods of the Empirical Transfer Functions and the Boore's Stochastic Method (1983, 2003), which is useful to simulate the high frequency ground motions ($f > 0.1$ Hz), were combined. This is of great interest in the field of engineering (Boore, 2003).

The accelerograms were obtained through the method used in this work. In order to verify the degree of adjustment between them, the metrics proposed by Anderson (2004) were used. To accomplish this, tests were performed with known accelerograms recorder in a temporary network. These were installed from June 15 to July 29, 2011, in the City of Tapachula, and were compared later with the synthetic results obtained after applying the mentioned method. For the simulation of a magnitude 4.7 earthquake, both horizontal components showed good adjustment in most of the stations where they were registered. In other words, the method proposed manages to closely approximate the real data recorded in each of the stations. This fact supports the confidence we have in this method, in how particularly useful it is to generate applications of interest in seismic engineering.

Key words: synthetic accelerograms, transfer functions, fitting metrics and stochastic method.

R. Solano Bahena*
J. Aguirre González
Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
Coordinación de Ingeniería Sismológica
*Corresponding author: resolanoba@gmail.com

Introducción

Chiapas es uno de los estados de la República Mexicana que se encuentra en un ambiente geológico y tectónico complejo, debido en gran medida a la convergencia de tres placas tectónicas (Norteamericana, Cocos y Caribe), las cuales cubren una amplia zona de deformación en Chiapas y el oeste de Guatemala (Guzmán-Speziale y Meneses-Rocha, 2000). Además, se tienen varios sistemas de fallas continentales y locales que atraviesan el territorio chiapaneco, provocando que varias entidades del sureste del país se vean afectadas por sismos de pequeña y gran magnitud.

A pesar de la gran actividad sísmica que ocurre en el estado de Chiapas, hay ciudades que no cuentan con la suficiente instrumentación para tener una oportuna respuesta y/o prevención de los riesgos sísmicos. Un ejemplo es la Ciudad de Tapachula con el sismo que ocurrió el 7 de noviembre de 2012 cerca de las costas de Guatemala, que tuvo una magnitud de 7.3 reportada por el Servicio Sismológico Nacional (SSN), y del cual no se pudieron tener registros sísmicos de aceleración. En este artículo nos enfocaremos en la Ciudad de Tapachula, que es la segunda ciudad con mayor número de habitantes del estado de Chiapas, únicamente por debajo de Tuxtla Gutiérrez. Tapachula concentra el 70% de su población en la zona urbana, con 348 156 habitantes aproximadamente (INEGI, 2015). Por ello, en este trabajo se estimaron acelerogramas sintéticos producidos por el sismo del 7 de noviembre de 2012, en 6 sitios de la mancha urbana.

Los registros de aceleración utilizados, pertenecieron a una red temporal, instalada en el periodo del 15 de junio al 29 de julio de 2011, estos acelerogramas fueron usados para calcular las Funciones de Transferencia Empíricas Promedio (Solano, 2016), y para las pruebas de ajuste entre acelerogramas observados y sintéticos. Además, se contaron con registros de la red del Complejo Volcánico del Tacaná (CVT), donde se grabó el sismo de Guatemala. La combinación del Método Estocástico de Boore y las Funciones de Transferencia Empíricas Promedio, hicieron posible el cálculo de los acelerogramas sintéticos, que posteriormente fueron evaluados con las métricas de Anderson (2004), con el objetivo de evaluar de forma cuantitativa el ajuste de acelerogramas con el método planteado en este artículo. Finalmente, se simuló el evento del 7 de noviembre de 2012 cerca de las costas de Guatemala, se obtuvieron los acelerogramas sintéticos y se realizaron mapas de aceleraciones máximas en la Ciudad de Tapachula, Chiapas.

Tectónica y sismicidad

La actividad sísmica en la región chiapaneca, se deriva en gran medida de la interacción de la placa de Cocos que se desplaza de occidente a oriente subduciéndose bajo la Placa Norteamericana y la del Caribe (Guzmán-Speziale *et al.*, 1989), esta zona se extiende 3000 km con dirección a Centroamérica y es conocida como Trinchera Mesoamericana. Guzmán-Speziale (2010), proponen una tasa de subducción promedio de la placa de Cocos bajo la placa Norteamericana de 6.6 cm/año y un desplazamiento promedio de 1.8 cm/año de la placa del Caribe en dirección oriental con respecto a la placa Norteamericana. El resultado es que se tengan varios sistemas de fallas continentales y locales que atraviesan todo el territorio chiapaneco. Los sistemas más importantes, según el Plan Operativo de Protección Civil por Riesgo Sísmico del Estado de Chiapas (IPCMIRD, 2010), son: a) Sistema de fallas Montagua Polochic, b) Provincia de fallas Inversas, c) Provincia de fallas de transcurrancia (Figura 1).

La evolución tectónica de la región está relacionada también con el vulcanismo del Cinturón Volcánico Centroamericano, donde se encuentra el Complejo Volcánico del Tacaná (CVT), el cual es un volcán que se considera activo y que mostró actividad por última vez en 1986. Algunos autores como González-Herrera *et al.* (2012), clasifica cinco fuentes sismogénicas que han afectado al estado de Chiapas:

- Los procesos de subducción de las placas Cocos, Norteamericana y Caribe, que dan origen a sismos de gran magnitud.
- Deformación interna de la placa subducida, produce sismos de mediana o gran profundidad. Por ejemplo, el sismo de Villaflores del 21 de octubre de 1995, con magnitud 7.2, el cual tuvo una profundidad focal de 165 km y área de ruptura de 30 km x 10 km (Rebollar *et al.*, 1999).
- Deformación cortical, debida a fallas superficiales, las cuales originan temblores de pequeña profundidad (menos de 40 km).
- Volcanes activos en el estado de Chiapas: Tacaná y el Chichonal.
- La falla lateral izquierda Montagua-Polochic, entre la placa Norteamericana y del Caribe (Figura 1).

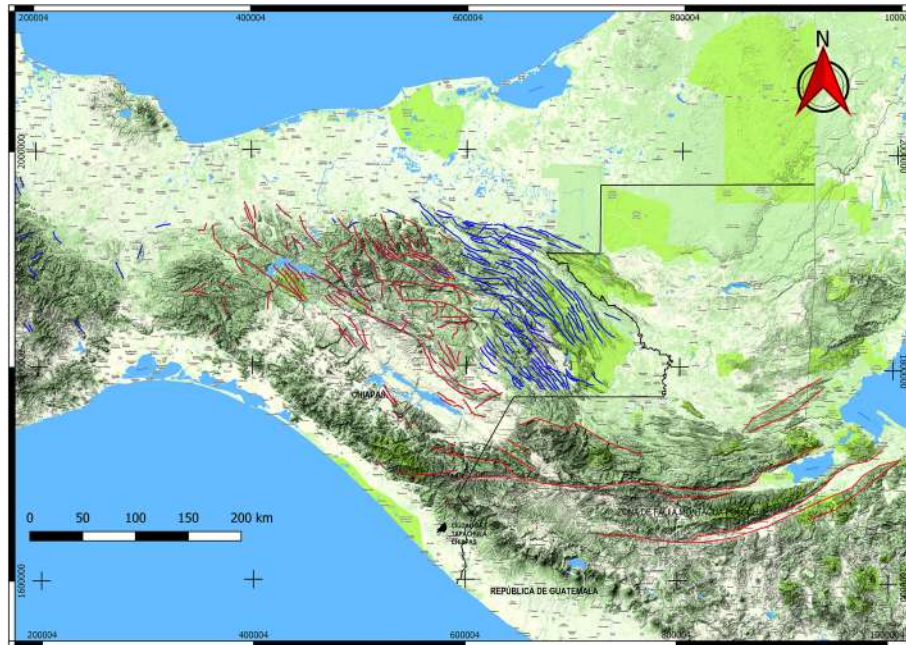


Figura 1. Mapa con los complejos estructurales del área de estudio. En color rojo se muestran las fallas de tipo transcurrente y en azul las fallas inversas, (mapa generado en QGIS 2.18.9, fallas geológicas modificadas de INEGI).

En el estado de Chiapas han ocurrido sismos históricos con magnitudes mayores a 6.0 que han provocado daños importantes en la región. El sismo más fuerte en el estado de Chiapas ($M=7.7$), ocurrió el 23 de septiembre de 1902. Causo serios daños en San Cristóbal de las Casas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapa de Corzo y en la Ciudad de México, provocó desperfectos en las cañerías del agua. Además, fue destructor de San Bartolomé de los Llanos (hoy Venustiano Carranza). En el documento de Peligros Naturales y Tecnológicos relevantes durante el periodo 1810-2010 (SEGOB, 2013), se enlistan algunos otros sismos importantes que han ocurrido en la región Chiapaneca:

- El sismo del 14 de diciembre de 1935 ($M=7.3$), ocasiono daños materiales en Tuxtla Gutiérrez, Chiapa de Corzo, San Cristóbal de las Casas, pero no hubo registro de víctimas.
- El sismo del 25 de septiembre de 1968 ($M=6.3$), afecto el Soconusco y en el municipio de Acapetahua hubo pérdidas materiales considerables, ya que provocó flexión de vías férreas, derrumbes de caminos y comunicaciones interrumpidas, se estimaron 20 muertes y más de 300 heridos.
- El sismo ocurrido el 29 de abril de 1970 ($M=7.3$), provocó daños importantes en los municipios de Mazapán de Madero,

Motozintla, Huixtla, Ciudad Madero y Tapachula.

- Finalmente, los dos recientes sismos que ocurrieron en el 2017. El primero ocurrido el 14 de junio con Magnitud de 6.9, localizado en las cercanías de Cd. Hidalgo, SSN. Dicho sismo provocó aceleraciones de 152.8 gales en la estación TAJN perteneciente al Instituto de Ingeniería de la UNAM, no se reportaron personas fallecidas, sin embargo, sí algunos daños materiales. El segundo ocurrió el 7 de septiembre ($M=8.2$), localizado en las cercanías de Pijijiapan a una profundidad de 58 km, SSN. Este sismo, tuvo aceleraciones de 110.7 gales en la estación TAJN y provocó alrededor de 32 muertos en los estados de Oaxaca, Chiapas y Tabasco, además de grandes afectaciones a inmuebles.

Dada la magnitud que tuvieron y los daños que ocasionaron los sismos históricos, en este trabajo se hizo el estudio de un sismo con magnitud similar a los anteriores, dicho sismo ocurrió el 7 de noviembre de 2012, localizado a 74 km al sur de Cd. Hidalgo, en el estado de Chiapas, cerca de las costas de Guatemala (SSN).

Datos

En la Ciudad de Tapachula existen dos estaciones permanentes de registro sísmico. Una de ellas TAJN corresponde a una estación

acelerográfica y es operada por el Instituto de Ingeniería, UNAM. Otra es la estación THIG que corresponde a una estación sismológica con sensor de velocidad de banda ancha operada por el SSN. Desgraciadamente, las dos estaciones no estaban operando cuando ocurrió el sismo de Guatemala. Sin embargo, dicho evento fue registrado por la red del CVT del SSN. Por otro lado, se usaron registros del Catálogo de Registros Sísmicos de la Red Temporal, Tapachula, Chiapas (Aguirre *et al.*, 2011). Esta red estuvo instalada en el periodo del 15 de junio al 29 de julio de 2011 por el Instituto de Ingeniería y el Instituto de Geofísica de la UNAM, las estaciones sísmicas utilizadas para este trabajo se enlistan en la tabla 1, cuya distribución sobre la mancha

urbana se ilustran en la Figura 2. Los registros se utilizaron tanto para obtener las Funciones de Transferencia Empíricas Promedio (Solano, 2016), como para las pruebas de ajuste entre acelerogramas sintéticos y observados.

Las *Funciones de Transferencia Empíricas Promedio* ($FTEP(\omega)$), fueron calculadas entre las seis estaciones de la red temporal con respecto a la estación de referencia CHIQ (Figura 3). La estación CHIQ pertenece a la red CVT del SSN, (Figura 4). El promedio de las funciones de transferencia se realizó con 17 eventos (tabla 2), los cuales fueron registrados en las 6 estaciones de aceleración de la red temporal.

Tabla 1. Clave, nombre, institución y coordenadas UTM (región 15P) de las estaciones de la red temporal y del SSN.

ESTACIÓN	NOMBRE	INSTITUCIÓN	LATITUD (UTM)	LONGITUD (UTM)
TACA	Colegio de Arquitectos	IINGEN	580897.33	1649617.99
TACC	Colegio de Ingenieros Civiles	IINGEN	580430.57	1644884.23
TALV	Lavanderia	IINGEN	579693.3	1647906.92
TAPP	Planta Potabilizadora	IINGEN	580222.33	1653859.67
TAPT	Planta de Tratamiento	IINGEN	579417.61	1640196.32
TATC	Tecnologico de Tapachula	IINGEN	578013.31	1646205.33
CHIQ	Población Chiquihuites	SSN	595822.34	1668880.15

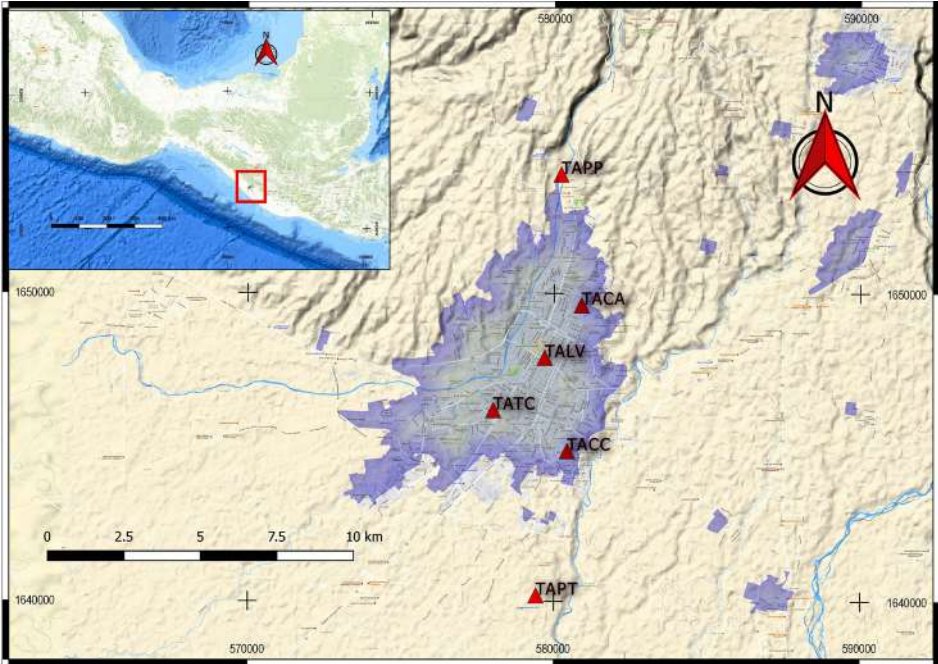


Figura 2. Localización de las estaciones sísmicas de la Red Temporal en la Ciudad de Tapachula, Chiapas.

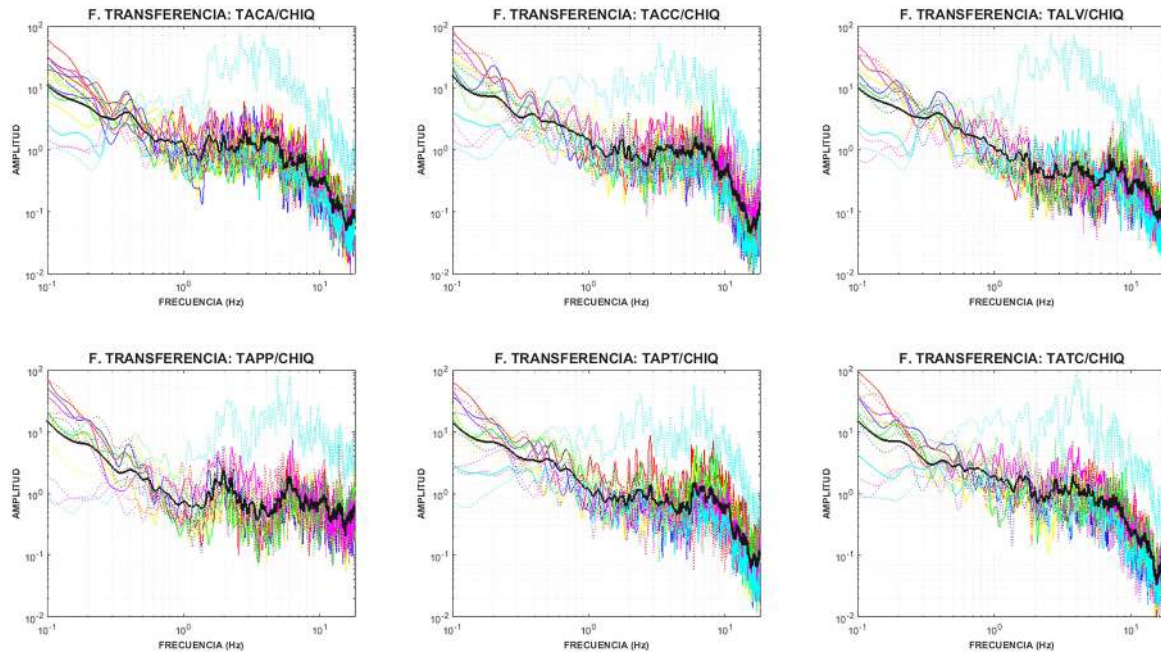


Figura 3. Funciones de Transferencia Empíricas de 17 sismos grabados en las 6 estaciones de la red temporal de Tapachula, con respecto a la estación de referencia CHIQ del SSN. La línea en color negro representa el promedio.

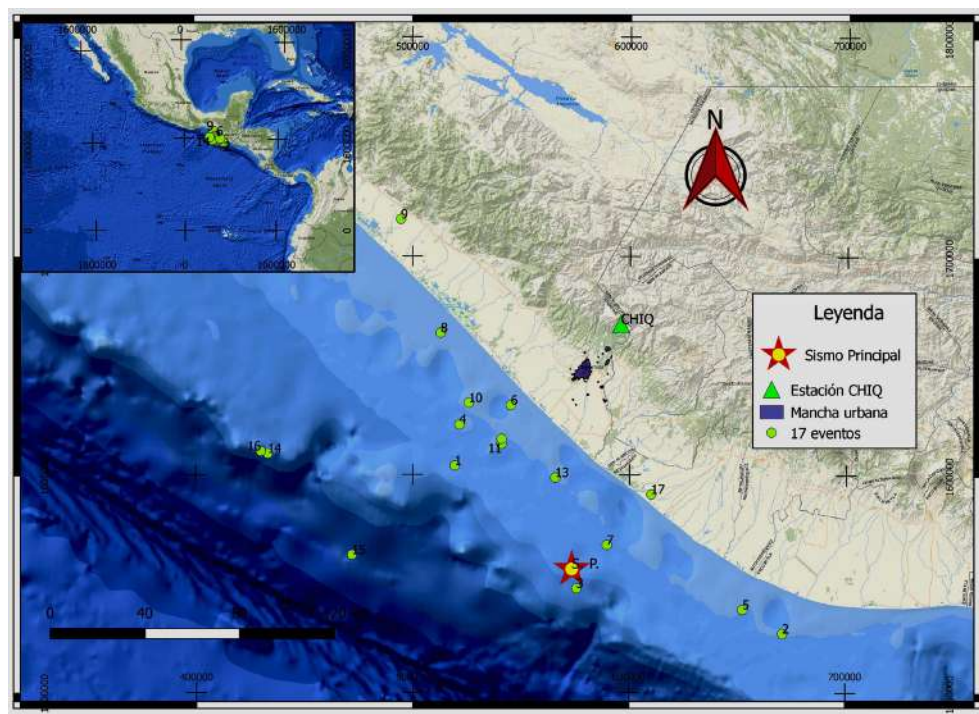


Figura 4. Localización de los 17 eventos con los que se realizaron las funciones de transferencia. Sismo principal (lat: 14.02° y long:-92.31°), estación de referencia CHIQ del SSN y mancha urbana de la Ciudad de Tapachula, Chiapas.

Tabla 2. Eventos sísmicos de baja magnitud, registrados en las 6 estaciones de la red temporal. Tomados del Catálogo de Registros Sísmicos de la Red Temporal en Tapachula, Chiapas (2011).

No. de Sismo	FECHA	HORA GMT	LATITUD	LONGITUD	MAGNITUD	PROF. [Km]	ZONA
1	19/06/11	07:33:38	14.51	-92.82	3.6	16	75 km al suroeste de CD Hidalgo, Chiapas.
2	28/06/11	15:13:37	13.81	-91.42	4	80	124 km al sureste de CD Hidalgo, Chiapas.
3	01/07/11	07:14:24	14	-92.3	4.1	20	76 km al sur de CD Hidalgo, Chiapas.
4	01/07/11	08:38:07	14.68	-92.8	3.8	4	62 km al suroeste de Huixtla, Chiapas.
5	01/07/11	10:07:12	13.91	-91.59	3.9	82	104 km al sureste de CD Hidalgo, Chiapas.
6	01/07/11	17:35:30	14.76	-92.58	3.3	78	62 km al suroeste de CD Hidalgo, Chiapas.
7	05/07/11	09:25:35	14.18	-92.17	4.1	24	55 km al sur de CD Hidalgo, Chiapas.
8	07/07/11	14:24:10	15.06	-92.88	3.7	89	42 km al sur Mapastepec, Chiapas.
9	11/07/11	16:02:43	15.53	-93.05	4.4	72	20 km al noroeste de Mapastepec, Chiapas.
10	12/07/11	10:06:29	14.77	-92.76	4	77	51 km al suroeste de Huixtla, Chiapas.
11	14/07/11	09:32:58	14.6	-92.62	3.8	76	51 km al oeste de CD Hidalgo, Chiapas.
12	14/07/11	09:37:13	14.64	-92.62	4.1	60	49 km al suroeste de Tapachula, Chiapas.
13	18/07/11	22:57:58	14.46	-92.39	3.7	28	35 km al suroeste de CD Hidalgo, Chiapas.
14	22/07/11	06:38:53	14.56	-93.62	4.6	23	125 km al suroeste de Mapastepec, Chiapas.
15	22/07/11	10:07:39	14.14	-93.26	4.7	22	133 km al suroeste de CD Hidalgo, Chiapas.
16	23/07/11	06:27:12	14.57	-93.65	4	24	126 km al suroeste de Mapastepec, Chiapas.
17	27/07/11	05:59:00	14.39	-91.98	4.5	93	37 km al sureste de CD Hidalgo, Chiapas.

Método estocástico de Boore y las $FTEP(\omega)$

A lo largo de los años se han realizado estudios en los cuales se proponen métodos para el cálculo de sismogramas o acelerogramas sintéticos, con la finalidad de hacer una evaluación del sitio y la respuesta estructural en alguna zona de interés. En este artículo, se combinan dos métodos para simular los movimientos de la tierra, el objetivo principal es obtener acelerogramas de un sismo de gran magnitud (evento principal), en un área que por falta de instrumentación no se tuvieron registros.

Uno de los métodos usados en este trabajo es el de las Funciones de Transferencia Empíricas, las cuales tienen la finalidad de determinar la respuesta del suelo en una determinada zona, nosotros las usaremos para transferir el efecto del sismo principal de una estación de referencia a la zona de interés, la Ciudad de Tapachula. A continuación, explicaremos de manera breve como obtenerlas. El cálculo de las $FTEP(\omega)$, requiere de registros grabados en dos estaciones sísmicas (zona de referencia y zona de interés), y deben corresponder a un promedio de las distintas funciones de transferencia calculadas para distintos sismos que se tengan registrados en ambas estaciones (Valdés, 2008).

Para calcular las $FTEP(\omega)$, se realiza el cociente espectral de las componentes horizontales de varios acelerogramas registrados en las estaciones del sitio de interés $\langle EF_{HSI}(\omega) \rangle$ con respecto al sitio de referencia $\langle EF_{HSR}(\omega) \rangle$ y después obtenemos

un promedio (ecuación 1). En nuestro caso, se realizó con el promedio de 17 acelerogramas de eventos sísmicos (tabla 2), grabados en la estación de referencia CHIQ (suelo duro), y en las seis estaciones de la red temporal de Tapachula, que es nuestra zona de interés y que consideramos como las de suelo blando.

$$FTEP(\omega) = \frac{\langle EF_{HSI}(\omega) \rangle}{\langle EF_{HSR}(\omega) \rangle} \quad (1)$$

Lo siguiente es obtener el espectro de aceleraciones del evento principal en las estaciones de Tapachula. Esto se logra multiplicando en el dominio de las frecuencias el evento principal grabado en la estación CHIQ, con las $FTEP(\omega)$, obtenidas en la ecuación 1, para las 6 estaciones de Tapachula. Lo anterior da como resultado los espectros de amplitudes de la aceleración en cada estación. Sin embargo, estamos interesados en realizar una estimación de los registros de aceleración en el dominio del tiempo en cada sitio y con el espectro de amplitud no es posible definirlos de manera única.

En este artículo usaremos un segundo método, el cual servirá para simular los movimientos del terreno en el dominio del tiempo, a menudo se le conoce como "método estocástico" y consiste en combinar el espectro de amplitudes del movimiento del terreno con un espectro de fase aleatorio modificado, de modo que haya una relación con la magnitud del terremoto y la distancia fuente-estación (Boore, 2003). El método de simulación estocástico presentado por Boore, hace uso de los dominios del tiempo y frecuencia; se

basa en conceptos de ingeniería y modelos sismológicos del movimiento del suelo en el dominio espectral, donde los movimientos de alta frecuencia son básicamente aleatorios (Hanks, 1979; Hanks y McGuire, 1981).

Una de las características esenciales del método estocástico es que toma en cuenta diversos factores que afectan los movimientos del suelo (fuente, trayectoria y sitio) en formas funcionales simples. La forma de aplicar el método estocástico, comienza con un ventaneo de una secuencia temporal de ruido gaussiano aleatorio, con media esperada cero y varianza elegida para dar la unidad de la amplitud espectral en el promedio. El espectro de las series de tiempo con ventanas generado con el ruido gaussiano aleatorio, se multiplica con el espectro de amplitudes de la aceleración, el cual fue estimado a partir de diversos parámetros de la fuente. Por último, se transforma de nuevo al dominio del tiempo para producir la serie temporal final. La parte fundamental para el método estocástico de Boore, es el cálculo del *espectro de aceleración del suelo de las ondas de cizalla* a una determinada distancia de la falla la cual tiene una magnitud de momento dada (Boore, 1983; Boore, 2003).

La variante que se propone en este artículo al método estocástico original propuesto por Boore es que, para generar el *espectro de aceleraciones del suelo*, lo hacemos calculando en primer lugar las $FTEP(\omega)$ (ecuación 1), las cuales ya contendrán información sobre el medio por donde se propagan las ondas sísmicas. Posteriormente, para transferir el efecto del sismo principal a la zona de interés (Tapachula, Chiapas), es necesario que este sismo haya sido grabado en la estación que se tomó como referencia cuando se calcularon las $FTEP(\omega)$, en este trabajo fue la estación CHIQ perteneciente a la red del CVT, SSN.

Finalmente, se hace la multiplicación espectral entre el acelerograma del evento principal grabado en la estación de referencia CHIQ ($EFSP_{SR}(\omega)$ con la $FTEP(\omega)$), (ecuación 2). Donde, $EFSP_{SR}(\omega)$ representa el espectro de amplitudes de la aceleración para el sismo principal en la zona de interés, (para este trabajo, son las 6 estaciones localizadas en la Ciudad de Tapachula).

$$EFSP_{SI}(\omega) = FTEP(\omega) \cdot EFSP_{SR}(\omega) = \frac{\langle EF_{HSI}(\omega) \rangle}{\langle EF_{HSR}(\omega) \rangle} \cdot EFSP_{SR}(\omega) \quad (2)$$

Sin embargo, para generar una serie temporal es necesario regresar al dominio del tiempo. Para ello, se debe contar con el espectro de amplitudes (ecuación 2) y la parte compleja, correspondiente al espectro de fase,

el cual se calculó de manera similar a como lo realizó Boore. Se elige un valor de semilla para generar una matriz con ruido aleatorio en el dominio del tiempo, después se usa una ventana que represente la envolvente promedio de la serie temporal. Saragoni y Hart (1974) propusieron una ventana de conformación que representa lo que es un acelerograma (ecuación 3).

$$w(t) = \alpha t^b e^{-ct} H(t) \quad (3)$$

$H(t)$ es la función de escalón unitario. Los parámetros b y c son definidos por las ecuaciones:

$$b = -\frac{\varepsilon \ln \eta}{1 + \varepsilon (\ln \varepsilon - 1)} \quad (4)$$

$$c = \frac{b}{\varepsilon T_\omega} \quad (5)$$

$$T_\omega = 2T_D \quad (6)$$

$$T_D = \frac{1}{f_c} \quad (7)$$

La longitud de la ventana de conformación estará controlada por la duración de la fuente T_D , la cual está relacionada con la frecuencia de esquina. El espectro para diferentes terremotos es controlado por dos parámetros: 1) Momento sísmico, para el evento principal fue de $M_0 = 1.45 \times 10^{27}$ dina-cm (Ekström *et al.*, 2012, CMT de Harvard) y 2) Frecuencia de esquina. Éstos pueden ser relacionados con la caída de esfuerzos, mediante la relación de Brune:

$$f_c = 4.9 \times 10^6 \beta \left(\frac{\Delta \sigma}{M_0} \right)^{1/3} \quad (8)$$

Donde f_c está en Hertz, β en km/s, $\Delta \sigma$ en bars y M_0 en dina-cm, (Brune, 1970). Debe considerarse que, el pico de la envolvente se produce en alguna fracción ε de una duración especificada como T_ω (la cual, no es necesariamente el final de la serie temporal); además, la amplitud en el tiempo T_ω se reduce a una fracción η de la máxima amplitud. El factor de normalización α da como resultado una envolvente con unidad de área cuadrada (ecuación 9). Γ es la función gamma. Para generar la ventana, usamos los valores de $\eta = 0.05$ y $X = 0.05$ y (Boore, 1983).

$$\alpha = \frac{(2c)^{2b+1}}{\Gamma(2b+1)}^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Posteriormente, se corta la matriz de ruido gaussiano a manera que el resultado obtenido represente la parte compleja del acelerograma principal (Figura 5), después aplicamos la Transformada de Fourier para pasar al dominio de las frecuencias y se multiplica con el espectro de amplitudes del sismo principal (ecuación 2), lo que da como resultado el espectro de aceleración completo. Finalmente, transformamos al dominio del tiempo y obtenemos la serie temporal final de la aceleración para el sismo principal en el sitio de interés. En el diagrama de la Figura 6, se resume como se aplicaron los métodos usados en este trabajo para generar acelerogramas sintéticos en la Ciudad de Tapachula, Chiapas.

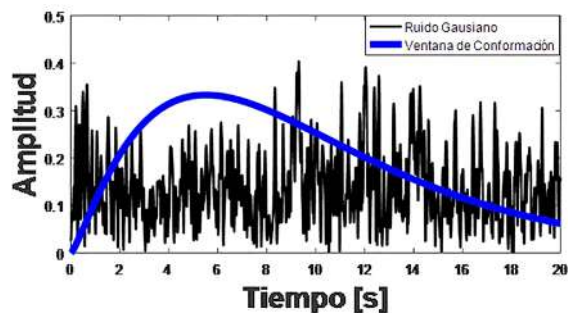


Figura 5. Color negro: ruido Gaussiano generado con una semilla de 6. Color azul: ventana de conformación que representa la envolvente promedio de la serie temporal, (Saragoni y Hart, 1974).

Resultados de la simulación de acelerogramas

Para verificar la confiabilidad de los acelerogramas sintéticos en aplicaciones de ingeniería, existe la necesidad de cuantificar o caracterizar el grado de adecuación que tienen con los registros observados. En este trabajo, se realizaron algunas pruebas comparando acelerogramas sintéticos con acelerogramas observados (sismos prueba), los cuales fueron grabados por la red temporal en el sitio de interés, durante el periodo del 15 de junio al 29 de julio de 2011 (tabla 3). Para escoger los sismos prueba, se tomó en cuenta la magnitud de cada evento, debido a que el sismo que pretendíamos estimar fue de 7.3, se quería observar que tanto variaba el ajuste conforme la magnitud aumentaba.

Debido a que los movimientos fuertes en el subsuelo, son series temporales muy complejas, cualquier medida que se base en un único parámetro para la comparación de sintéticos y observados, es seriamente incompleta (Anderson, 2004). Por ello, Anderson propuso diez métricas, basadas en: la aceleración máxima, la velocidad pico, el desplazamiento máximo, intensidad y duración de Arias, la integral y duración de energía, el espectro de Fourier, el espectro de respuesta y finalmente la correlación cruzada. Cada característica se compara en una escala de 0 a 10, siendo 10 el ajuste perfecto. Las puntuaciones para cada parámetro se promedian para obtener una calidad de ajuste total o general. Una puntuación por debajo de 4 es un mal ajuste, una puntuación de 4 a <6 es un ajuste regular, una puntuación de 6 a 8 es un buen ajuste y una puntuación de más de 8 es un excelente ajuste, (Tabla 4).

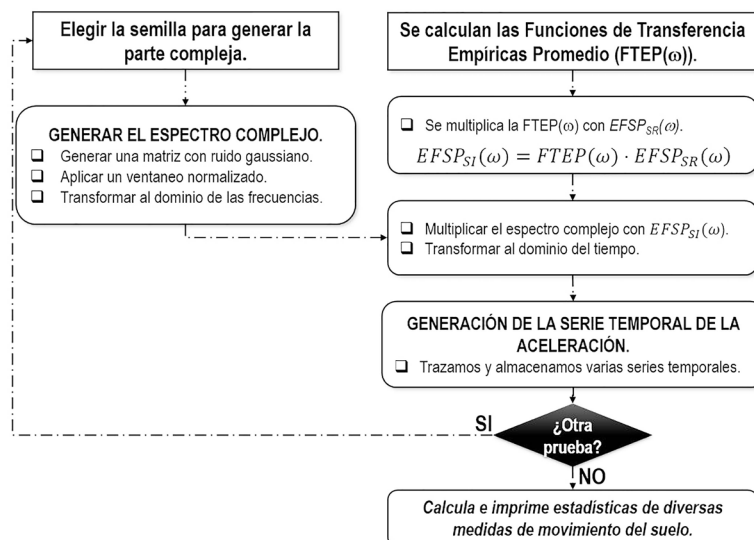


Figura 6. Metodología propuesta para este trabajo usando las Funciones de Transferencia Empíricas y el método estocástico de Boore.

Tabla 3. Datos de los acelerogramas observados, tomados para las pruebas con la metodología propuesta. Catálogo de Registros Sísmicos de la Red Temporal en Tapachula, Chiapas (2011).

NO. PRUEBA	FECHA	HORA (GMT)	LATITUD	LONGITUD	MAGNITUD	PROF. [km]
1	01/07/2011	17:35:30	14.76	-92.58	3.3	78
2	28/06/2011	15:13:37	13.81	-91.42	4	80
3	22/07/2011	10:07:39	14.14	-93.26	4.7	22

Tabla 4. Puntaje y calidad de ajuste entre acelerogramas observados y sintéticos, (Anderson, 2004).

PUNTAJE	CALIDAD DE AJUSTE
10	Perfecto ajuste
8 - <10	Excelente ajuste
6 - <8	Buen ajuste
4 - <6	Ajuste regular
Menor a 4	Ajuste pobre

Los acelerogramas sintéticos generados con la metodología propuesta en este artículo, se compararon con los acelerogramas observados de los sismos prueba (tabla 3). Posteriormente, se evaluaron con 9 de las 10 métricas propuestas por Anderson (2004), dejando fuera la correlación cruzada, debido a que es muy sensible a los tiempos de inicio relativos y en algunos casos los registros de movimientos fuertes no tienen tiempos de

inicio conocidos, por lo que puede haber cierta incertidumbre sobre el tiempo de inicio del terremoto. De esta forma, para cada prueba se realizaron estimaciones con 20 semillas diferentes, obteniendo un promedio de las métricas en cada estación de la red temporal.

En la tabla 5, se tienen los resultados obtenidos en la prueba 1, para el sismo ocurrido el 01/07/2011 con $M=3.3$. Mostramos los valores de las 20 semillas utilizadas de manera aleatoria, además de los resultados promedio de las métricas de Anderson para las 6 estaciones (componentes horizontales). Para determinar que estaciones tienen mejor ajuste general, en la parte inferior de la tabla, tenemos un promedio (μ) que incluye los resultados de las 20 semillas, así como la varianza (σ^2), desviación estándar (σ) y coeficiente de variación (Cv).

En la prueba 1, la estación TALV es la que tiene los peores ajustes generales con un valor de 2.01 y 1.66 para la componente EW y NS,

Tabla 5. Resultados de las métricas de Anderson en las estaciones de la red temporal de Tapachula, para 20 semillas diferentes. Sismo del 01/07/2011, $M=3.3$. a) Componente EW. b) Componente (NS).

a)METRICAS DE ANDERSON (2004)							b)METRICAS DE ANDERSON (2004)						
SEMILLAS (EW)	ESTACION TACA	ESTACION TACC	ESTACION TALV	ESTACION TAPP	ESTACION TAPT	ESTACION TATC	SEMILLAS (NS)	ESTACION TACA	ESTACION TACC	ESTACION TALV	ESTACION TAPP	ESTACION TAPT	ESTACION TATC
0	7.75	6.80	1.91	3.63	6.49	7.12	0	5.44	4.72	1.70	1.84	6.02	5.10
2	8.18	6.78	1.94	3.65	6.77	7.54	2	4.89	4.25	1.66	1.85	5.86	4.47
4	7.14	7.21	2.05	3.60	6.04	6.49	4	5.36	5.65	1.78	1.85	6.66	4.92
6	8.21	7.38	2.26	4.58	5.92	7.55	6	5.70	4.63	1.70	1.96	5.67	5.18
16	8.22	7.32	2.14	3.65	6.23	7.56	16	5.05	5.00	1.79	1.79	6.25	4.90
18	7.73	7.23	1.76	4.22	6.02	6.80	18	4.59	4.36	1.59	1.87	5.34	3.78
24	7.20	7.31	1.91	3.52	6.10	6.32	24	3.91	3.84	1.60	1.82	5.61	3.36
48	7.18	6.69	2.16	4.15	6.71	6.29	48	4.43	3.82	1.64	1.74	4.92	3.69
60	7.72	7.49	2.22	4.67	5.17	7.19	60	4.98	4.32	1.65	1.78	6.08	4.26
80	6.95	6.64	2.20	3.71	6.34	6.39	80	5.06	4.90	1.68	1.96	6.50	4.67
102	7.79	7.21	1.89	3.81	6.04	6.61	102	4.81	4.02	1.60	2.35	5.80	3.97
112	7.68	7.26	2.03	4.03	5.79	7.06	112	6.24	5.19	1.81	1.85	6.58	5.67
130	6.02	6.16	1.94	3.44	6.43	5.54	130	4.25	3.98	1.61	1.88	6.16	3.83
148	8.18	6.99	1.85	3.80	6.65	7.37	148	5.75	4.41	1.60	1.73	5.16	4.58
155	8.03	7.30	2.16	4.41	5.78	6.98	155	4.85	4.57	1.62	1.83	5.74	4.24
174	7.06	7.08	1.95	4.19	6.14	5.90	174	4.36	4.43	1.62	1.89	5.92	3.62
193	7.28	6.49	1.87	3.57	6.76	6.14	193	4.27	3.66	1.62	1.78	5.07	3.81
216	7.12	7.27	1.95	3.59	6.14	6.57	216	4.70	4.79	1.68	1.74	5.80	4.19
252	7.48	6.98	1.85	3.77	6.36	6.53	252	4.80	4.50	1.60	1.94	5.62	4.43
268	6.89	7.08	2.13	3.96	6.20	6.45	268	4.01	4.16	1.64	2.03	5.53	3.95
$\mu =$	7.49	7.03	2.01	3.90	6.20	6.72	$\mu =$	4.87	4.46	1.66	1.87	5.81	4.33
$\sigma^2 =$	0.30	0.11	0.02	0.12	0.14	0.31	$\sigma^2 =$	0.35	0.23	0.00	0.02	0.22	0.35
$\sigma =$	0.55	0.33	0.14	0.35	0.38	0.55	$\sigma =$	0.59	0.48	0.07	0.13	0.47	0.59
Cv=	7.36	4.73	7.10	9.07	6.11	8.23	Cv=	12.13	10.83	3.97	7.20	8.08	13.64

respectivamente. Comparando los puntajes anteriores, con lo que propone Anderson (tabla 4), la calidad de ajuste es pobre. Por otro lado, los mejores ajustes generales los mostraron la estación TACA (para la componente EW) y TAPT (para la componente NS), con puntajes de 7.49 (buen ajuste) y 5.81 (ajuste regular), respectivamente.

Tomando como base lo anterior, en la Figura 7 se tiene la comparación del peor ajuste simulado para el evento 01/07/2011 en la estación TALV. El resultado en la componente EW, corresponde a una semilla de 18 con un puntaje de 1.76, mientras que para la

componente NS fue de 1.59, en ambos casos la calidad de ajuste es pobre. De manera similar, en la Figura 8 se tienen los mejores ajustes para la componente EW y NS, correspondiente a la estación TACA y TAPT, respectivamente. Los puntajes fueron de 8.22 (EW) con una semilla de 16 y de 6.66 (NS) con una semilla de 4.

En la tabla 6, tenemos los resultados para la prueba 2, sismo ocurrido el 28/06/2011 con $M=4$. Se muestran los mismos parámetros que para la prueba 1 y 3, en las dos componentes horizontales de las 6 estaciones de Tapachula. En la prueba 2, la estación TALV sigue teniendo

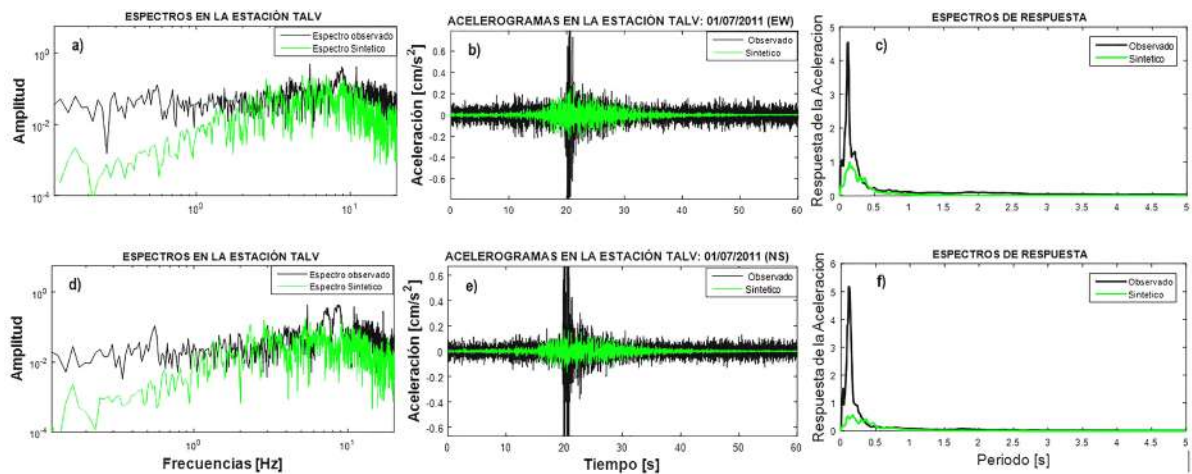


Figura 7. Los peores ajustes para el sismo del 01/07/2011 en la estación TALV. Observado (negro) y sintético (verde). Espectros de Fourier (Izquierda). Acelerogramas (centro). Espectros de Respuesta (derecha). Componente EW (a, b y c): semilla=18 y promedio de Anderson= 1.76. Componente NS (d, e y f): semilla=18 y promedio de Anderson=1.59.

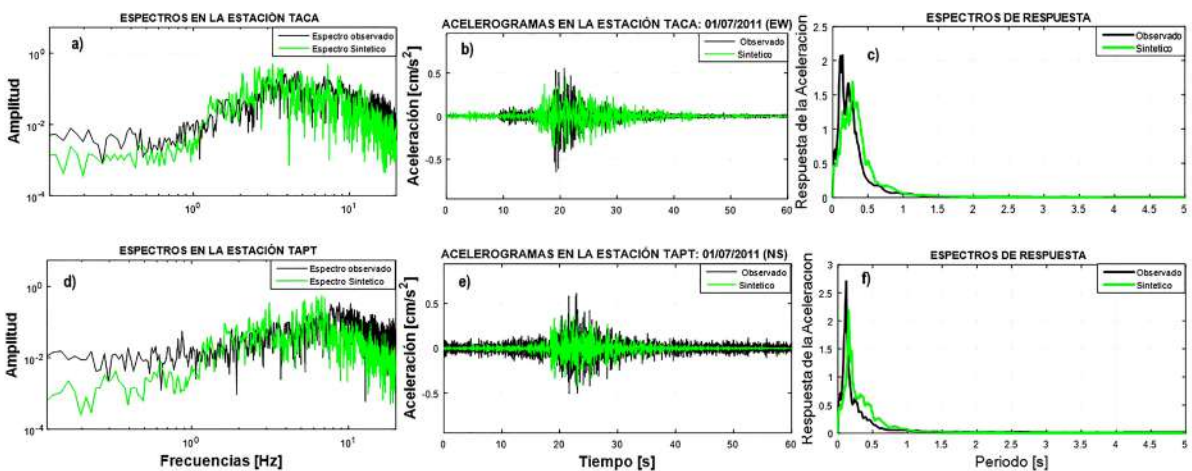


Figura 8. Los mejores ajustes para el sismo del 01/07/2011 estación TACA (EW) y TAPT (NS). Observado (negro) y sintético (verde). Espectros de Fourier (Izquierda). Acelerogramas (centro). Espectros de Respuesta (derecha). Componente EW (a, b y c): semilla=16 y promedio de Anderson= 8.22. Componente NS (d, e y f): semilla=4 y promedio de Anderson=6.66.

Tabla 6. Resultados de las métricas de Anderson en las estaciones de la red temporal de Tapachula, para 20 semillas diferentes. Sismo del 28/06/2011, M=4.0. a) Componente EW. b) Componente (NS).

a)METRICAS DE ANDERSON (2004)							b)METRICAS DE ANDERSON (2004)						
SEMILLAS (EW)	ESTACION TACA	ESTACION TACC	ESTACION TALV	ESTACION TAPP	ESTACION TAPT	ESTACION TATC	SEMILLAS (NS)	ESTACION TACA	ESTACION TACC	ESTACION TALV	ESTACION TAPP	ESTACION TAPT	ESTACION TATC
0	7.52	6.08	2.81	7.12	8.40	8.21	0	6.37	5.27	4.16	6.83	5.38	6.90
2	7.81	5.74	2.78	5.76	6.61	7.13	2	7.34	5.41	4.26	4.72	5.81	7.47
4	6.99	7.29	3.37	8.14	8.20	8.94	4	6.90	6.34	4.73	7.01	6.01	7.13
6	7.21	7.60	3.22	6.77	6.84	8.70	6	7.49	7.71	4.78	6.25	6.29	7.52
16	5.86	7.42	3.00	6.30	6.73	8.43	16	7.04	7.59	4.44	5.80	5.92	7.47
18	6.30	7.89	2.72	7.72	6.65	8.39	18	6.95	5.86	4.14	7.34	5.99	7.24
24	6.66	6.91	3.15	7.97	8.03	8.69	24	5.83	6.30	4.30	6.67	5.83	6.65
48	6.79	5.75	2.82	6.27	8.58	7.61	48	6.81	5.65	4.96	5.59	5.94	7.29
60	5.78	8.18	3.00	7.32	7.26	8.91	60	6.98	6.44	4.78	7.34	5.63	7.15
80	6.28	6.54	2.80	7.72	8.71	8.88	80	6.30	5.92	4.27	6.67	5.63	6.70
102	5.55	7.99	2.86	7.31	7.73	8.93	102	6.80	6.80	4.61	7.46	5.97	6.99
112	6.23	7.04	3.08	6.36	5.58	7.55	112	6.77	8.08	4.36	5.26	5.86	7.18
130	5.92	6.53	2.82	7.63	8.75	9.05	130	5.04	5.69	3.73	5.99	5.31	6.30
148	6.19	7.62	2.56	6.65	7.06	8.91	148	7.58	6.69	4.05	6.38	5.50	7.51
155	6.17	7.66	2.69	8.09	8.34	9.25	155	5.94	6.04	3.73	7.10	5.24	6.30
174	6.89	7.48	2.96	7.97	7.96	8.96	174	6.93	5.68	4.51	7.28	5.90	7.23
193	6.14	8.03	2.83	7.50	7.64	8.71	193	6.59	6.35	4.16	6.59	5.64	7.01
216	6.73	7.46	3.28	8.12	7.93	8.91	216	6.80	6.54	4.88	7.07	6.38	7.20
252	6.04	6.61	2.89	8.24	8.18	9.00	252	6.73	6.12	4.31	7.21	5.58	7.52
268	5.13	6.96	2.94	6.25	6.55	8.11	268	5.81	7.54	4.22	5.58	5.29	6.70
$\mu =$	6.41	7.14	2.93	7.26	7.59	8.56	$\mu =$	6.65	6.40	4.37	6.51	5.76	7.07
$\sigma^2 =$	0.42	0.51	0.04	0.57	0.73	0.31	$\sigma^2 =$	0.37	0.61	0.11	0.59	0.09	0.14
$\sigma =$	0.65	0.72	0.20	0.76	0.86	0.56	$\sigma =$	0.60	0.78	0.34	0.77	0.31	0.37
Cv=	10.11	10.05	6.87	10.40	11.27	6.50	Cv=	9.09	12.16	7.71	11.79	5.35	5.23

los peores ajustes generales en ambas componentes horizontales, con valores de 2.93 para la componente EW y 4.37 para la componente NS. Los resultados anteriores mejoraron en comparación con los puntajes obtenidos en la prueba 1, aunque no de forma significativa. Por otro lado, los mejores ajustes generales los mostraron la estación TATC para la componente EW, con un puntaje de 7.73 y 7.07 para la NS, en ambos casos se considera un buen ajuste.

En la Figura 9, se tiene la comparación de los peores ajustes simulados para la prueba 2 en ambas componentes horizontales (estación TALV). El resultado en la componente EW, corresponde a una semilla de 148, con un puntaje de 2.56. Mientras que para la componente NS fue 3.73 con una semilla de 130, en ambos casos la calidad de ajuste es pobre. De manera similar, en la Figura 10 se tienen los mejores ajustes simulados para la componente EW y NS, correspondiente a la estación TATC. Los puntajes fueron de 9.25 (EW) con una semilla de 155, lo que representa un excelente ajuste y de 7.52 (NS) con una semilla de 6, buen ajuste.

Finalmente, en la tabla 7 tenemos los resultados para la prueba 3, del sismo ocurrido el 22/07/2011 con M=4.7. En esta prueba los peores ajustes se encuentran en la estación TAPT, caso contrario a las dos primeras pruebas, donde el peor ajuste en las dos componentes horizontales lo presentaba la estación TALV.

Además, hay una mejora significativa para el caso de las componentes NS, ya que todos los resultados de puntajes generales por estación, se encuentran en el rango de buen a excelente ajuste. La estación TAPT presenta los peores ajustes, con un puntaje general de 4.24 para la componente EW (ajuste regular). Sin embargo, para la componente NS el peor ajuste es de 7.21, que a pesar de ser el peor para esta componente, sigue teniendo un puntaje alto, que equivale a un buen ajuste.

En la Figura 11, se tiene la comparación de los peores ajustes simulados para la prueba 3 en ambas componentes horizontales (estación TAPT). Para la componente EW, el resultado corresponde a un ajuste de 3.47 (ajuste pobre) con una semilla de 2. Mientras que para la componente NS, el peor ajuste es de 6.23 con una semilla de 18, lo cual es un buen ajuste. Cabe señalar que, a diferencia de las dos primeras pruebas, en esta última, las amplitudes de los acelerogramas sintéticos (Figuras 11b y 11e) sobrepasan de manera significativa a los acelerogramas observados, esto también se muestra claramente en los espectros de respuesta obtenidos (Figuras 11c y 11f).

En la Figura 12, se muestran las mejores simulaciones para la prueba 3. El mejor resultado de la simulación en la estación TALV (componente EW), tiene un puntaje de 8.84 y semilla 174. Mientras que para la componente NS, el mejor ajuste se observa en la estación

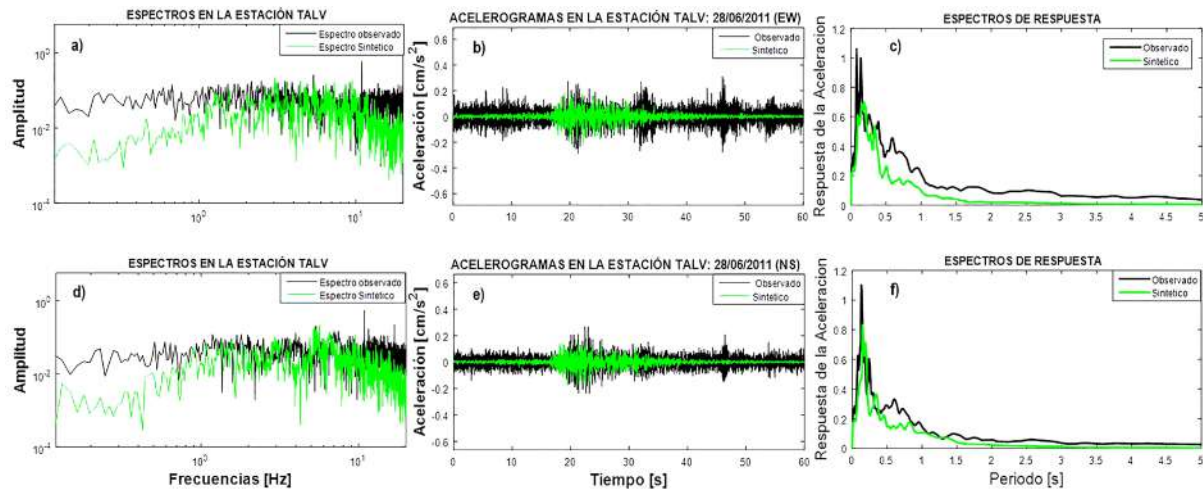


Figura 9. Los peores ajustes para el sismo del 28/06/2011 estación TALV. Observado (negro) y sintético (verde). Espectros de Fourier (Izquierda). Acelerogramas (centro). Espectros de Respuesta (derecha). Componente EW (a, b y c): semilla=148 y promedio de Anderson= 2.56. Componente NS (d, e y f): semilla=130 y promedio de Anderson=3.73.

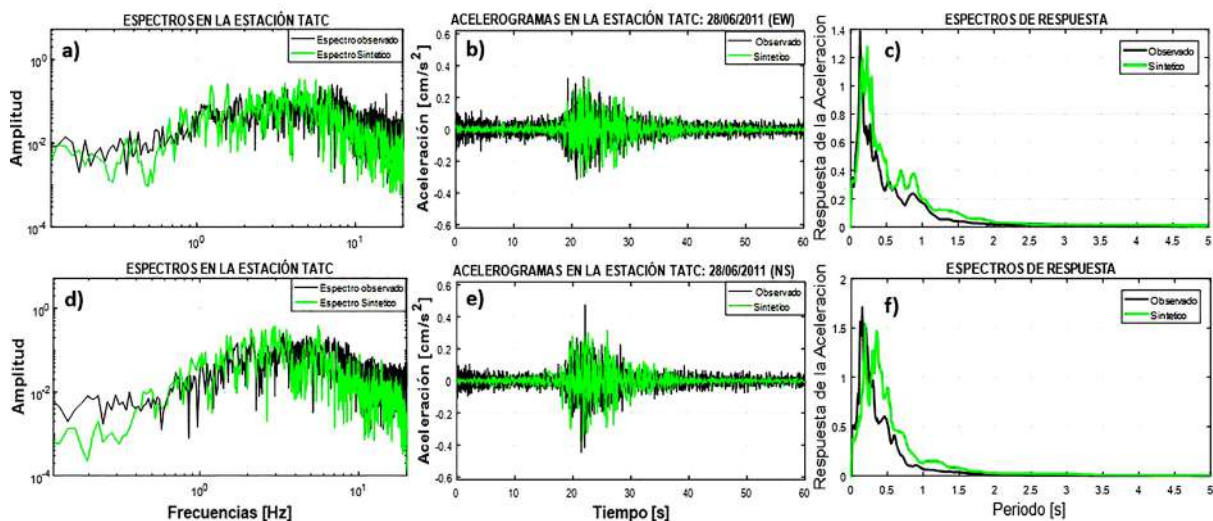


Figura 10. Los mejores ajustes para el sismo del 28/06/2011 estación TATC. Observado (negro) y sintético (verde). Espectros de Fourier (Izquierda). Acelerogramas (centro). Espectros de Respuesta (derecha). Componente EW (a, b y c): semilla=155 y promedio de Anderson= 9.35. Componente NS (d, e y f): semilla=6 y promedio de Anderson=7.52.

TACA, cuyo puntaje fue de 9.30 con una semilla de 80. En ambos casos, los resultados están en el rango de excelente ajuste. Notamos que, los espectros de respuesta sintéticos (Figuras 12c y 12f), tienen una amplitud y forma muy parecida a la de los datos observados, lo que nos da una idea del porque son los mejores ajustes simulados.

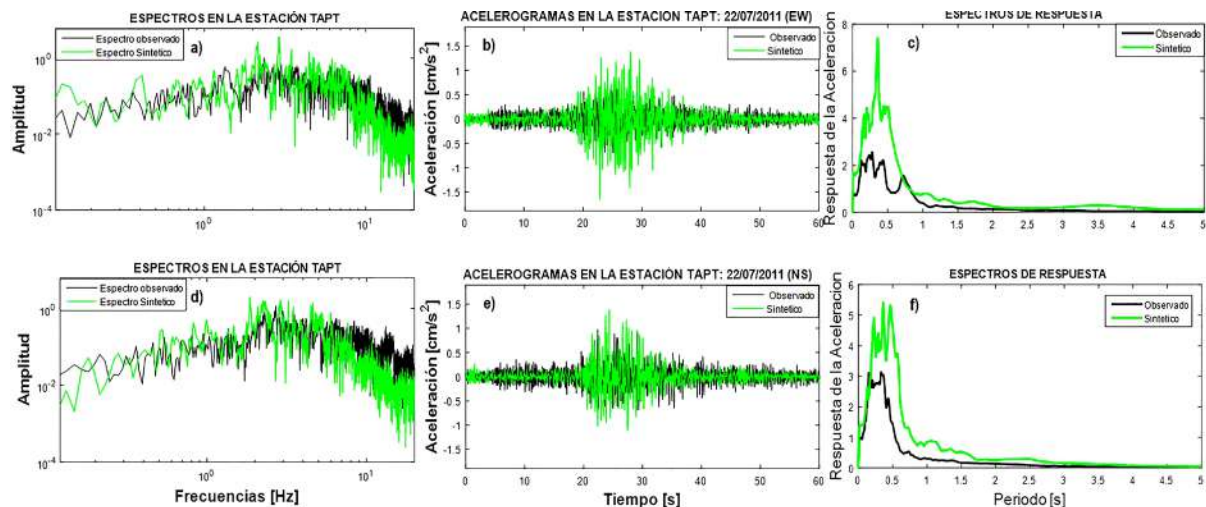
Después de haber realizado las 3 pruebas anteriores, podemos decir que las mayores discrepancias en los ajustes promedio por estación, las tenemos en la prueba 1 ($M=3.3$, tabla 6). Posteriormente, al aumentar la magnitud del sismo ($M=4$, prueba 2), los

ajustes por estación mejoraron, dejando solo el puntaje general promedio de la estación TALV (EW) con un pobre ajuste y para las estaciones TALV (NS) y TAPT (NS), con un ajuste regular. Por último, la prueba 3 ($M=4.7$, tabla 7) tuvo mejoras significativas, debido a que todas las estaciones presentaron un buen ajuste, excepto las estaciones TAPT (EW) y TACA (NS), con un ajuste regular y excelente, respectivamente.

Con base en lo anterior y bajo la hipótesis que las simulaciones mejoran conforme la magnitud del evento en cuestión aumenta,

Tabla 7. Resultados de las métricas de Anderson en las estaciones de la red temporal de Tapachula, para 20 semillas diferentes. Sismo del 22/07/2011, M=4.7. a) Componente EW. b) Componente (NS).

a)METRICAS DE ANDERSON (2004)							b)METRICAS DE ANDERSON (2004)						
SEMILLAS (EW)	ESTACION TACA	ESTACION TACC	ESTACION TALV	ESTACION TAPP	ESTACION TAPT	ESTACION TATC	SEMILLAS (NS)	ESTACION TACA	ESTACION TACC	ESTACION TALV	ESTACION TAPP	ESTACION TAPT	ESTACION TATC
0	7.10	5.71	7.35	6.91	4.52	5.79	0	8.88	6.85	6.94	7.75	7.21	8.33
2	5.04	4.88	5.42	7.07	3.47	6.78	2	7.07	6.52	7.27	6.65	6.35	8.92
4	6.59	5.96	7.71	7.39	3.55	6.83	4	8.98	8.17	7.94	7.96	7.25	8.02
6	6.66	6.14	7.54	8.45	3.88	8.49	6	8.07	7.53	7.40	7.89	6.25	7.99
16	7.43	7.04	7.87	9.04	4.57	7.83	16	8.71	7.86	8.11	6.96	7.68	8.03
18	6.06	5.09	7.67	7.54	3.52	8.04	18	7.66	6.99	7.03	8.08	6.23	8.27
24	6.73	5.77	8.25	7.49	4.06	6.13	24	8.95	7.86	8.10	7.93	7.95	8.15
48	7.54	6.26	7.23	7.22	5.43	4.41	48	9.18	7.61	7.76	7.38	7.84	7.84
60	5.95	5.66	8.15	7.50	3.67	7.96	60	7.93	7.74	8.06	7.17	7.52	7.66
80	7.53	6.42	8.17	7.50	4.51	5.44	80	9.30	7.86	8.15	7.78	7.78	7.75
102	7.65	6.61	8.80	7.99	4.80	6.80	102	7.75	7.33	7.52	6.89	6.81	7.75
112	6.52	6.47	6.84	8.89	3.68	8.33	112	7.47	7.01	6.71	7.75	6.27	8.84
130	8.48	6.96	8.76	7.55	4.85	4.96	130	8.78	8.59	8.38	7.13	7.87	6.30
148	6.74	6.52	7.80	8.43	4.06	8.55	148	7.97	7.58	7.83	7.72	6.67	9.15
155	6.56	6.18	8.37	7.57	4.40	6.42	155	9.27	8.51	8.54	7.70	8.55	7.72
174	7.53	6.33	8.84	7.36	4.86	5.18	174	8.66	8.10	8.22	7.41	7.36	6.57
193	5.67	5.60	7.61	7.72	3.59	7.50	193	7.97	7.13	6.94	7.60	6.36	8.96
216	7.10	6.38	8.67	7.57	4.47	6.26	216	8.61	8.08	8.30	7.92	7.37	8.55
252	7.14	6.17	8.01	7.55	4.11	6.98	252	8.83	7.39	7.24	7.73	6.70	8.48
268	8.56	7.84	8.11	9.20	4.78	6.69	268	8.54	8.21	8.26	7.48	8.21	6.38
$\mu =$	6.93	6.20	7.86	7.80	4.24	6.77	$\mu =$	8.43	7.65	7.74	7.54	7.21	7.98
$\sigma^2 =$	0.72	0.43	0.59	0.41	0.30	1.41	$\sigma^2 =$	0.39	0.30	0.30	0.15	0.49	0.62
$\sigma =$	0.85	0.65	0.77	0.64	0.55	1.19	$\sigma =$	0.63	0.55	0.54	0.39	0.70	0.79
Cv=	12.27	10.54	9.80	8.18	12.90	17.55	Cv=	7.45	7.13	7.04	5.17	9.71	9.87

**Figura 11.** Los peores ajustes para el sismo del 22/07/2011 estación TAPT. Observado (negro) y sintético (verde). Espectros de Fourier (Izquierda). Acelerogramas (centro). Espectros de Respuesta (derecha). Componente EW (a, b y c): semilla=2 y promedio de Anderson= 3.47. Componente NS (d, e y f): semilla=18 y promedio de Anderson=6.23.

para el sismo principal (M=7.3) se estimaron 20 acelerogramas sintéticos con distintas semillas (como se ha hecho con anterioridad), y se obtuvieron los promedios (μ) de los valores pico de la aceleración (PGA), velocidad (PGV) y la máxima amplitud del espectro de respuesta (RMAX). Además, con la finalidad de comparar la dispersión entre los resultados obtenidos, se calculó la desviación estándar (σ) y el porcentaje del coeficiente de variación (Cv). Lo anterior, se realizó para las 6 estaciones de la red temporal en Tapachula, en las dos componentes horizontales (tabla 8).

A pesar de que se generaron 20 acelerogramas sintéticos para ambas componentes horizontales en las 6 estaciones de la Ciudad de Tapachula, en este artículo solo mostraremos un resultado por cada componente horizontal. Se utilizó la PGA como indicador para elegir el acelerograma que mejor representara al evento principal, debido a que en la mayoría de los casos los coeficientes de variación (Cv, que son los que dan una idea de la dispersión de los datos), tienen el menor valor en comparación con los obtenidos para PGV y RMAX. Posteriormente, elegimos los acelerogramas sintéticos cuya PGA fuera la más cercana al

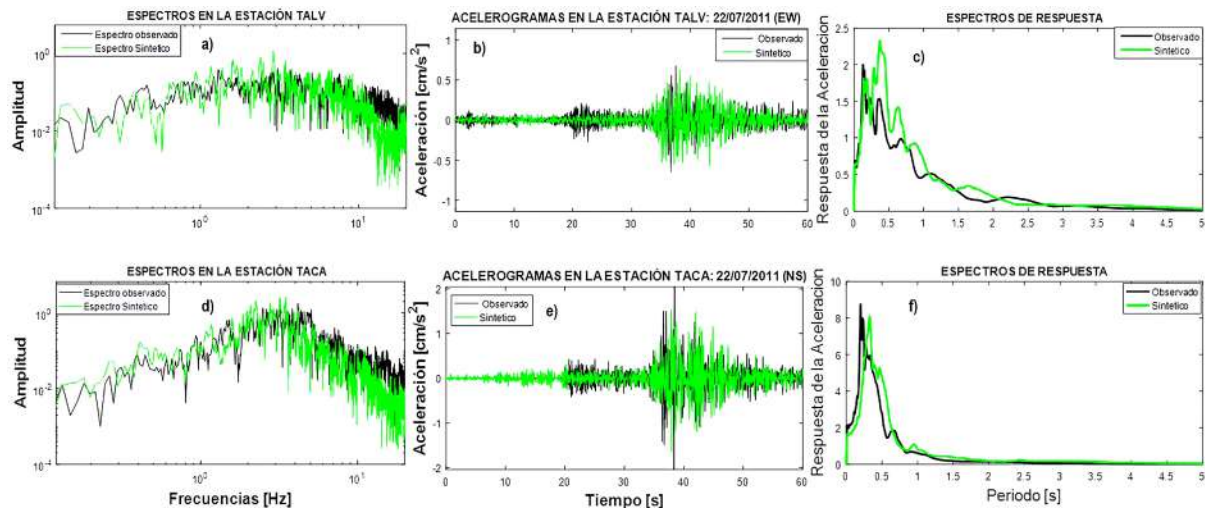


Figura 12. Los mejores ajustes para el sismo del 22/07/2011 estación TALV (EW) y TACA (NS). Observado (negro) y sintético (verde). Espectros de Fourier (Izquierda). Acelerogramas (centro). Espectros de Respuesta (derecha). Componente EW (a, b y c): semilla=174 y promedio de Anderson= 8.84. Componente NS (d, e y f): semilla=80 y promedio de Anderson=9.30.

Tabla 8. Resultados para el sismo de Guatemala (7/11/2012, M=7.3). Promedio y desviación estándar de las 20 simulaciones para PGA, PGV y amplitud máxima del espectro de respuesta (RMAX), en las dos componentes horizontales. Dónde: μ , σ y C_v , son: el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación, respectivamente.

RESULTADOS PARA EL ACELEROGRAMA DEL EVENTO PRINCIPAL																		
ESTACION TACA				ESTACION TACC			ESTACION TALV			ESTACION TAPP			ESTACION TAPT			ESTACION TATC		
	PGA	PGV	RMAX	PGA	PGV	RMAX	PGA	PGV	RMAX	PGA	PGV	RMAX	PGA	PGV	RMAX	PGA	PGV	RMAX
EW	$\mu=$ 21.17	1.45	90.22	18.05	1.10	81.83	9.97	0.69	41.87	17.96	1.13	78.32	18.44	1.14	87.27	18.84	1.37	74.51
	$\sigma=$ 3.15	0.23	17.77	1.95	0.17	15.20	1.18	0.09	6.56	2.10	0.20	12.20	2.17	0.19	14.39	2.39	0.23	11.97
%	$Cv=$ 14.88	16.17	19.70	10.80	15.16	18.58	11.80	13.80	15.67	11.67	17.65	15.58	11.76	16.78	16.49	12.71	16.70	16.06
NS	$\mu=$ 21.60	1.59	88.58	18.81	1.32	81.87	9.85	0.83	40.54	20.21	1.42	87.05	18.90	1.29	81.98	19.90	1.54	78.47
	$\sigma=$ 2.94	0.24	12.49	2.18	0.15	14.36	1.10	0.11	5.72	3.08	0.25	15.49	2.11	0.18	12.11	2.27	0.19	11.41
%	$Cv=$ 13.62	15.35	14.10	11.57	11.43	17.53	11.15	13.64	14.10	15.26	17.39	17.80	11.17	14.25	14.77	11.39	12.53	14.54

promedio (μ). A continuación, en las figuras 13 a 18 se muestran los resultados sintéticos que representan el sismo ocurrido el 07 noviembre de 2012 cerca de las costas de Guatemala (evento principal), obtenidos para las 6 estaciones de la Ciudad de Tapachula, Chiapas.

Finalmente, tomando los resultados de los sintéticos que se ilustraron en las figuras anteriores (figuras 13 a 18), se hicieron mapas de aceleraciones máximas (PGA) para el evento principal, en la Ciudad de Tapachula (Figura 20a y Figura 20b). El valor máximo de aceleración se tuvo en la estación TACA en sus dos componentes horizontales, mientras que la estación que presentó menor amplificación fue la estación TALV, con las aceleraciones menores en sus dos componentes horizontales. Los valores de las PGA, en las componentes EW y NS, se resumen en la tabla 9.

Los resultados de las aceleraciones máximas (PGA) obtenidas para el sismo principal, (Figura 20a y Figura 20b), se correlacionaron con la escala de Intensidades de Mercalli Modificada (IMM), la cual se basa en medir el daño ocasionado al hombre y a los materiales en general debido al sismo, (sus valores van de I a XII, tabla 10). Los valores de las PGA en cinco de las estaciones, se encuentran en un rango de 18 [cm/s^2] a 22 [cm/s^2], lo que corresponde a una intensidad IV y ningún daño potencial. Por otro lado, la estación que mostró la menor amplificación en el terreno, fue la estación que se encuentra en el centro de la mancha urbana (TALV), con valores de PGA de 9.92 [cm/s^2] y 9.85 [cm/s^2], para las componentes EW y NS, respectivamente, lo que corresponde a una intensidad de II-III.

Tabla 9. Valores de las aceleraciones máximas (PGA) para las estaciones de la Ciudad de Tapachula, Chiapas.

ESTACION	VALORES DE PGA [cm/s ²]	
	COMPONENTE (EW)	COMPONENTE (NS)
TACA	21.21	21.60
TACC	18.04	18.49
TALV	9.92	9.85
TAPP	18.23	20.11
TAPT	18.42	18.88
TATC	19.00	20.10

Discusión

En aplicaciones de ingeniería se tienen dificultades para evaluar que tan satisfactorios son los resultados que se obtienen cuando se intentan simular movimientos fuertes, ya que son variables en su duración, arribos de energía, forma y amplitud espectral, por lo que pueden tener apariencias diferentes. Los puntajes de las métricas que propone Anderson se basan en promedios que miden la calidad de ajuste de estas características, van desde las medidas integrales (potencialmente las más fáciles de ajustar), hasta los valores pico, luego a las amplitudes espectrales y finalmente a la correlación cruzada (la cual no se tomó como métrica, para este trabajo).

Las métricas donde se obtuvieron los mayores problemas de ajuste, por ende, los menores puntajes, fue en la integral de energía y en el desplazamiento pico. Las siete métricas restantes no penalizaban demasiado las pequeñas diferencias que pudo haber entre los dos acelerogramas comparados. Los resultados de las simulaciones obtenidas en las 3 pruebas realizadas, muestran que los ajustes mejoraron conforme la magnitud del evento aumenta, con lo cual tuvimos mejoras significativas en ambas componentes horizontales. Analizando los peores ajustes para la prueba 1 y 2 (estación TALV), podemos decir que el pobre ajuste obtenido en la prueba 1, fue debido a que la forma del acelerograma observado,

elegido en ambas componentes horizontales (Figura 7b y 7e), presentaba un pulso de gran amplitud a los 20 segundos, lo que provocó que nuestra metodología no pudiera reproducir adecuadamente esa liberación abrupta de energía.

Por otro lado, la prueba 2 nos volvió a dar ajustes pobres en la estación TALV para ambas componentes horizontales. La estación TALV, se encuentra en la zona centro de la mancha urbana, por lo que el registro observado presentaba mucho ruido (Figura 9b y 9e). Un sismo de pequeña magnitud no tiene mucha diferencia en amplitud con respecto al ruido ambiental que se genera en esta estación. Por lo que nuestro método, el cual utiliza una ventana para representar la envolvente de un acelerograma (Figura 5), tiene dificultades al tratar de reproducir cambios variables a lo largo de la serie temporal.

El método planteado en este artículo también tiene dificultades al tratar de reproducir la fase de la onda P, esto se observa en la prueba 3, las mejores simulaciones obtenidas (Figura 12b y 12e), no muestran con claridad este arribo. Sin embargo, para fines de ingeniería lo que nos interesa es la fase intensa asociada a las ondas S, en cuyo caso nuestro método logra aproximarse mucho a los datos reales grabados por las estaciones en la ciudad de Tapachula, lo que nos puede dar una buena idea de cómo fueron los registros de aceleración debidos al evento principal mostrados en las Figuras 13-18.

Finalmente, con los acelerogramas sintéticos estimados para el evento principal se generaron mapas de aceleraciones máximas para las 6 estaciones en la Ciudad de Tapachula, Chiapas. El Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) estimó mapas de intensidades para el sismo principal (7 de noviembre de 2012, Figura 19), los valores que obtuvieron se encontraban en un rango de intensidades de V a VI según la escala de MMI, lo que corresponde a un daño potencial de muy ligero a ligero, esto difiere de los resultados que nosotros obtuvimos con unas intensidades equivalentes máximas de IV.

Tabla 10. Rangos y relaciones de movimiento de terreno, IMM. Modificada de Wald, 1999.

Movimiento percibido	No sentido	Leve	Ligero	Moderado	Fuerte	Muy fuerte	Severo	Violento	Extremo
Daño potencial	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Muy ligero	Ligero	Moderado	Moderado/Fuerte	Fuerte	Muy fuerte
PGA (%g)	< 0.17	0.17 - 1.4	1.4 - 3.9	3.9 - 9.2	9.2 - 18	18 - 34	34 - 65	65 - 124	> 124
PGV (cm/s)	<0.1	0.1 - 1.1	1.1 - 3.4	3.4 - 8.1	8.1 - 16	16 - 31	31 - 60	60 - 116	> 116
Intensidad	I	II - III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X +

Sin embargo, debemos tomar en cuenta que los datos proporcionados por el USGS pueden tener un sesgo, debido a que dependen de los informes y/o reportes colectados por internet

de la comunidad que se van adquiriendo para dicho evento. Por tal motivo, si tenemos pocos reportes, la muestra estadística no sería lo suficientemente representativa.

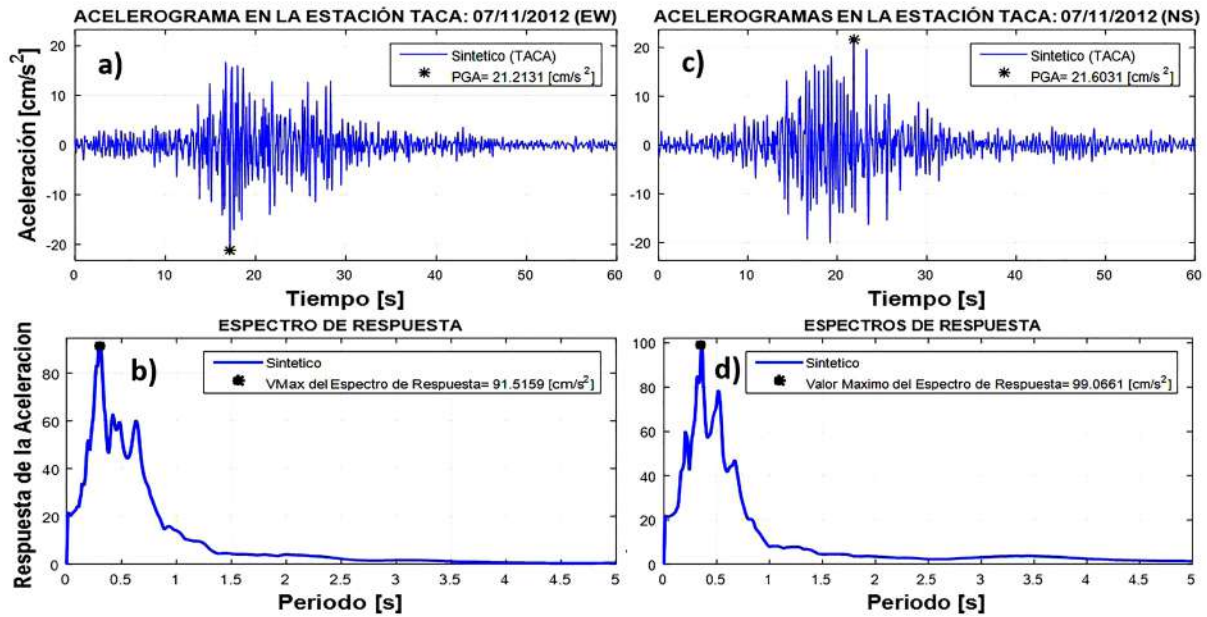


Figura 13. Estación TACA. a) Acelerograma sintético (EW), con semilla=252 y $\text{PGA}=21.21 \text{ [cm/s}^2\text{]}$. b) Espectro de respuesta (EW), valor máximo=91.51 $\text{[cm/s}^2\text{]}$. c) Acelerograma sintético (NS), con semilla=2 y $\text{PGA}=21.6 \text{ [cm/s}^2\text{]}$. d) Espectro de respuesta (NS), valor máximo=99.06 $\text{[cm/s}^2\text{]}$.

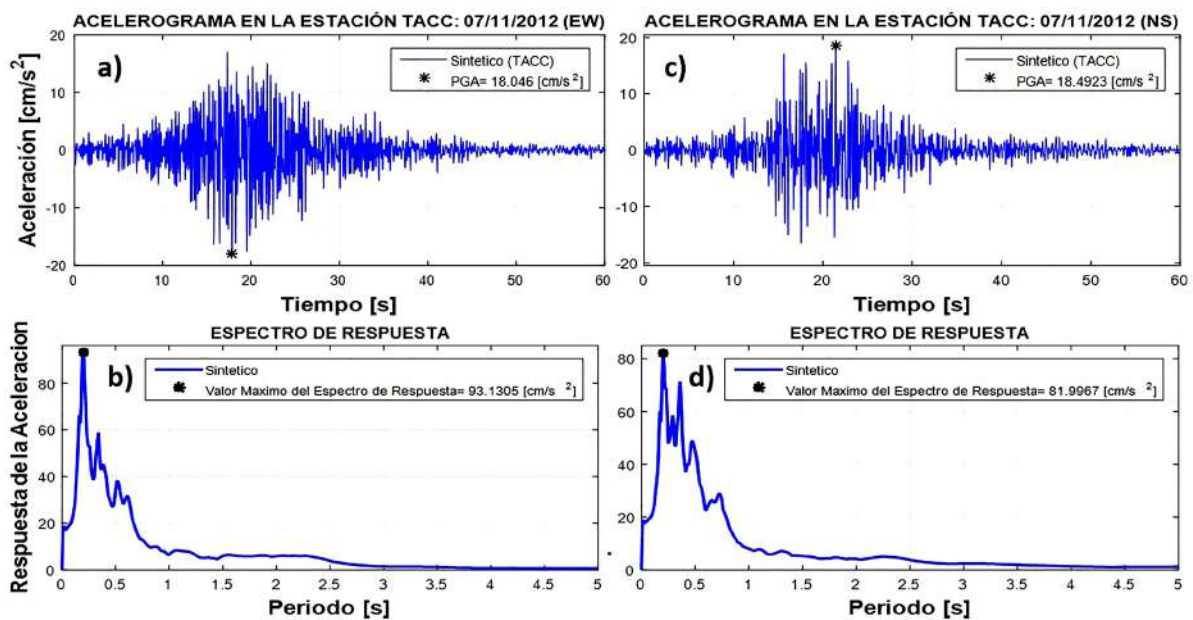


Figura 14. Estación TACC. a) Acelerograma sintético (EW), con semilla=112 y $\text{PGA}=18.04 \text{ [cm/s}^2\text{]}$. b) Espectro de respuesta (EW), valor máximo=93.13 $\text{[cm/s}^2\text{]}$. c) Acelerograma sintético (NS), con semilla=18 y $\text{PGA}=18.49 \text{ [cm/s}^2\text{]}$. d) Espectro de respuesta (NS), valor máximo=81.99 $\text{[cm/s}^2\text{]}$.

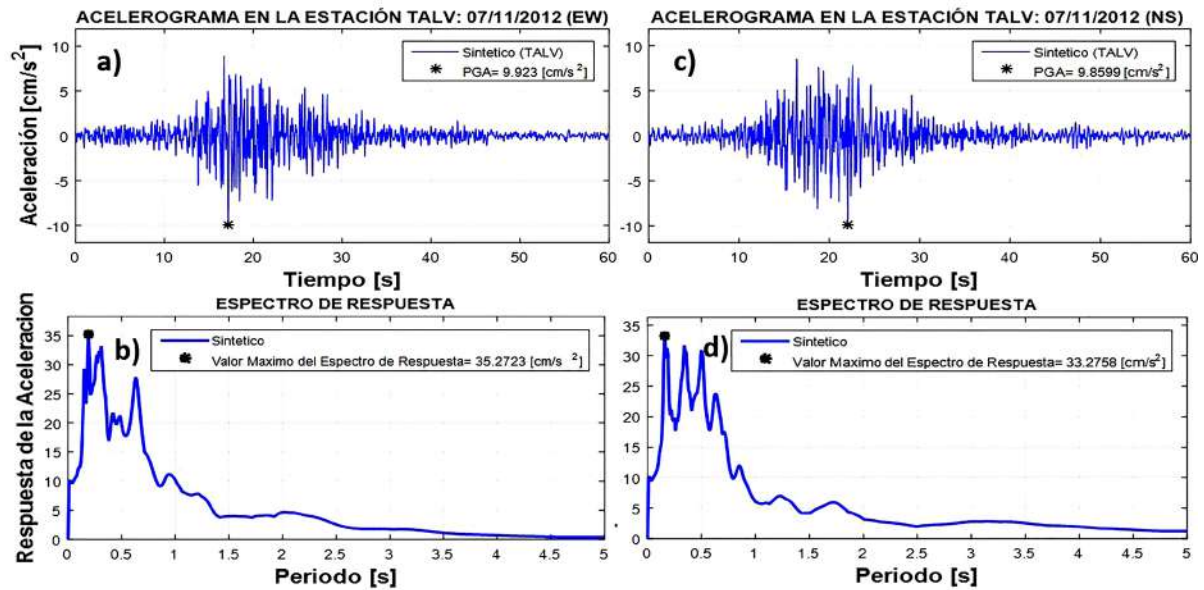


Figura 15. Estación TALV. a) Acelerograma sintético (EW), con semilla=252 y PGA=9.92 [cm/s²]. b) Espectro de respuesta (EW), valor maximo=35.27 [cm/s²]. c) Acelerograma sintético (NS), con semilla=193 y PGA=9.85 [cm/s²]. d) Espectro de respuesta (NS), valor maximo=33.27 [cm/s²].

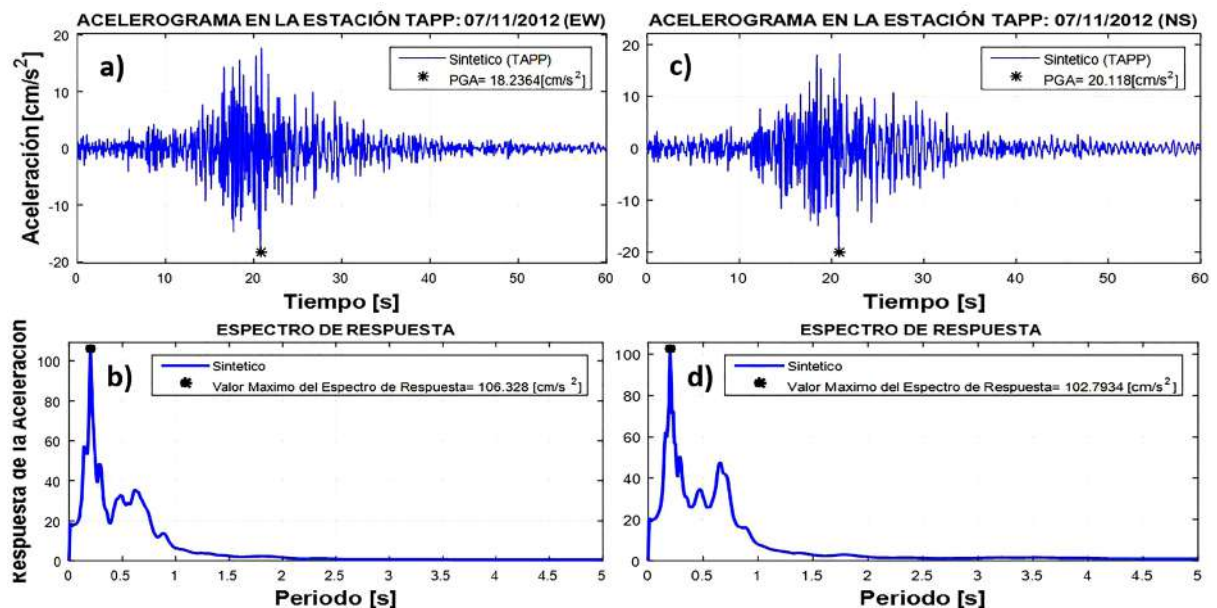


Figura 16. Estación TAPP. a) Acelerograma sintético (EW), con semilla=155 y PGA=18.23 [cm/s²]. b) Espectro de respuesta (EW), valor maximo=106.32 [cm/s²]. c) Acelerograma sintético (NS), con semilla=155 y PGA=20.11 [cm/s²]. d) Espectro de respuesta (NS), valor maximo=102.79 [cm/s²].

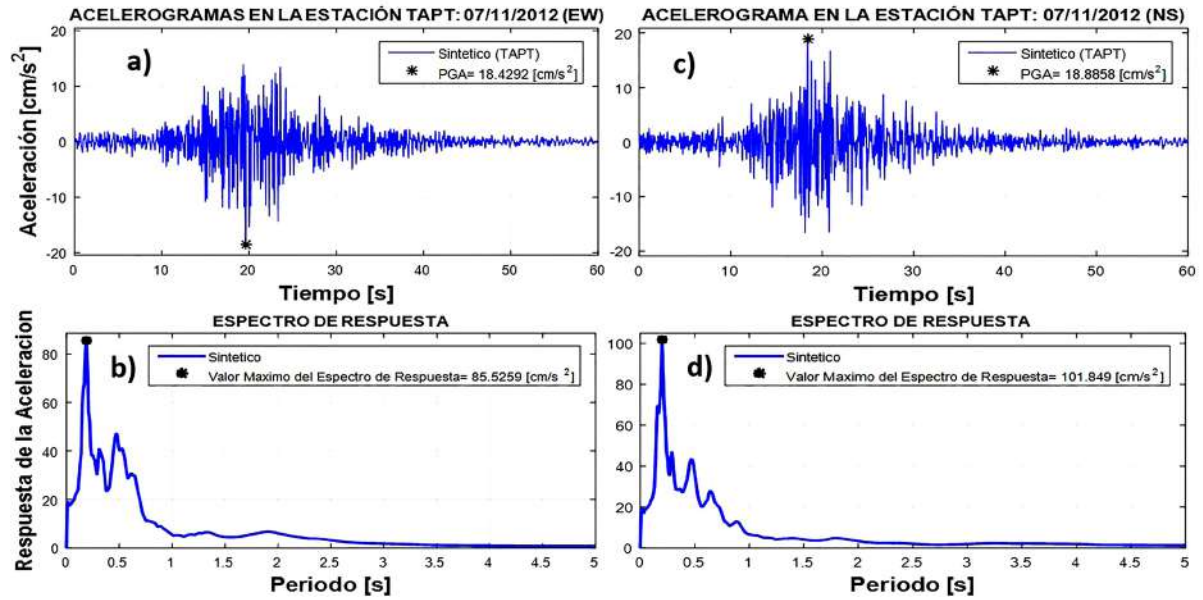


Figura 17. Estación TAPT. a) Acelerograma sintético (EW), con semilla=102 y PGA=18.42 [cm/s²]. b) Espectro de respuesta (EW), valor maximo=85.52 [cm/s²]. c) Acelerograma sintético (NS), con semilla=155 y PGA=18.88 [cm/s²]. d) Espectro de respuesta (NS), valor maximo=101.84 [cm/s²].

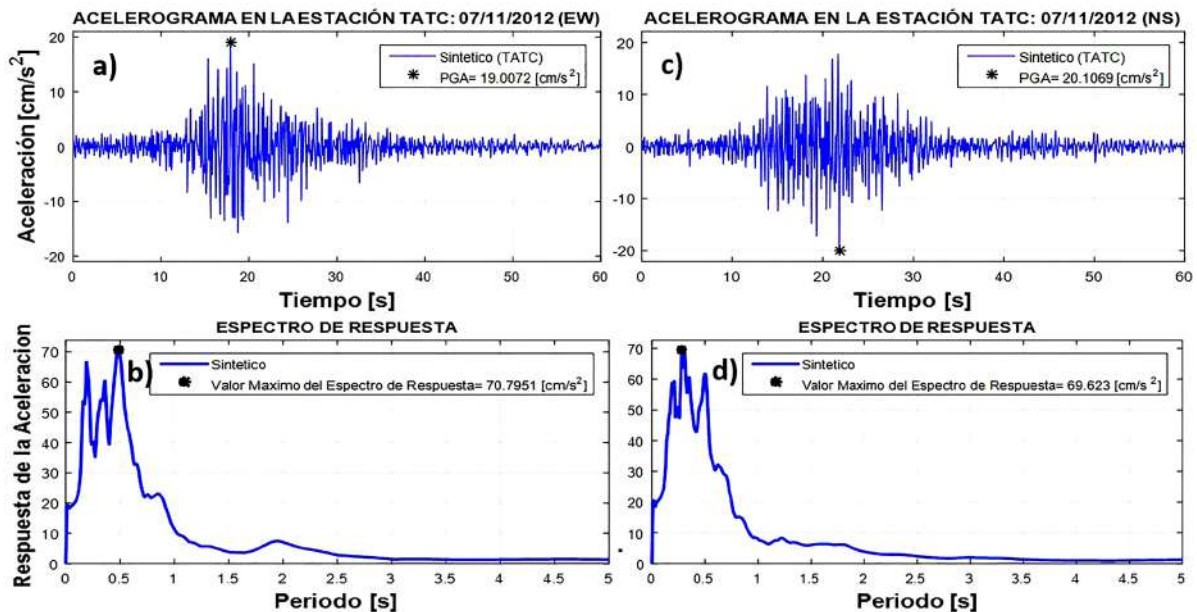


Figura 18. Estación TATC. a) Acelerograma sintético (EW), con semilla=4 y PGA=19.00 [cm/s²]. b) Espectro de respuesta (EW), valor maximo=70.79 [cm/s²]. c) Acelerograma sintético (NS), con semilla=60 y PGA=20.1 [cm/s²]. d) Espectro de respuesta (NS), valor maximo=69.62 [cm/s²].



Figura 19. Mapa de intensidades para el sismo del 7 de noviembre de 2012. Fuente: USGS, actualizado 11/10/2017, 20:17:50 (UTC).

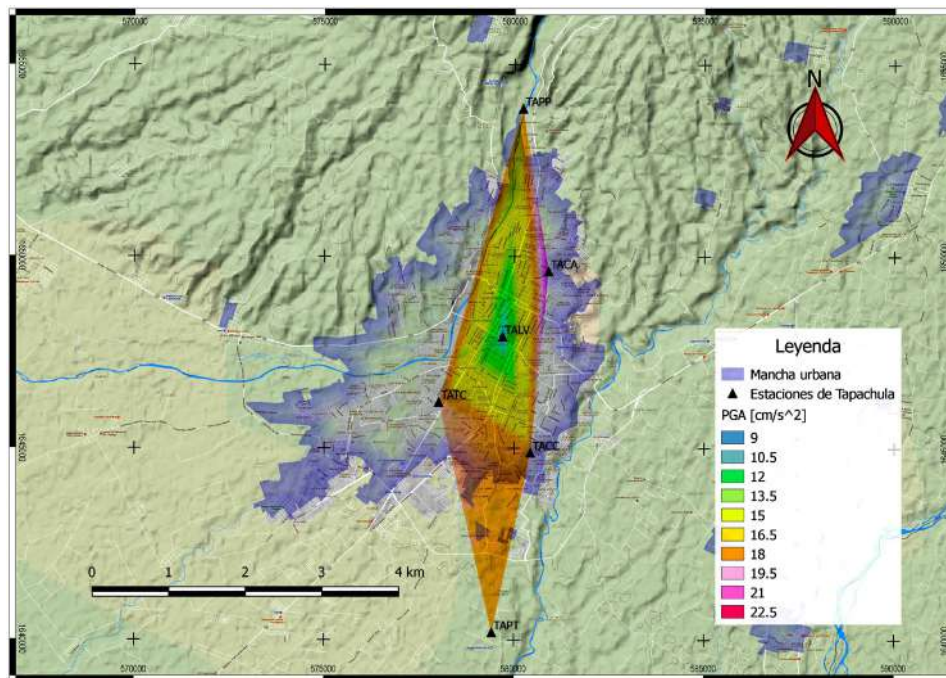


Figura 20a. Mapas de aceleraciones máximas (PGA) en la Ciudad Tapachula, Chiapas, para el sismo principal del 7 de noviembre de 2012. a) Componente EW.

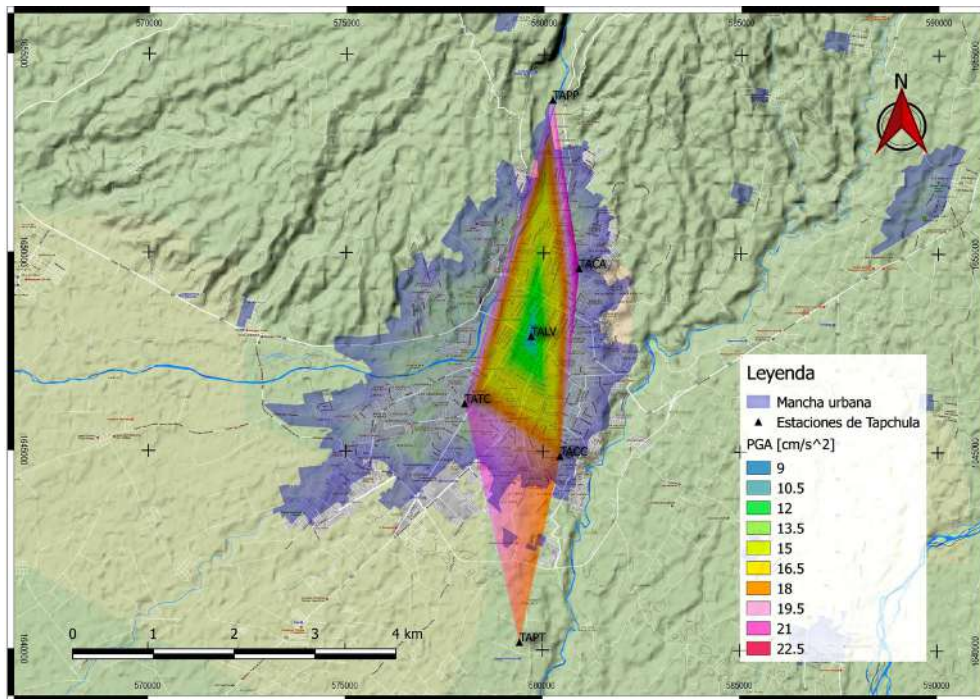


Figura 20b. Mapas de aceleraciones máximas (PGA) en la Ciudad Tapachula, Chiapas, para el sismo principal del 7 de noviembre de 2012. b) Componente NS.

Conclusiones

Se generaron acelerogramas sintéticos haciendo uso de la combinación de dos métodos: Funciones de Transferencia Empíricas y el Método Estocástico de Boore. Para ello, se siguió el proceso que se muestra en la Figura 6. Para validar si la metodología que se usó en este trabajo y si los acelerogramas que se obtenían eran confiables, se usaron las métricas propuestas por Anderson en 2004. Se realizaron tres pruebas con acelerogramas conocidos (observados) y se compararon con los sintéticos obtenidos en este trabajo, los acelerogramas observados de los eventos prueba, constaron de tres magnitudes distintas, (prueba 1, $M=3.3$; prueba 2, $M=4$; prueba 3, $M=4.7$).

En cada una de las pruebas se obtuvieron 20 acelerogramas sintéticos, debido a que se usaron 20 valores de semillas aleatorios, y se evaluó el ajuste entre cada sismograma con las métricas de Anderson. Los resultados muestran que el sismo de menor magnitud presenta los peores ajustes generales por estación y a medida que aumentaba la magnitud, la calidad del ajuste mejoraba. Tal fue el caso de los resultados para la prueba 3 ($M=4.7$), donde

se tiene que en la mayoría de las estaciones tenemos buenos ajustes para el caso de ambas componentes horizontales.

Posteriormente, se generaron los acelerogramas sintéticos en la Ciudad de Tapachula que representan al evento principal del sismo del 7 de noviembre de 2012. De los veinte sintéticos generados se tomó el que tenía la PGA más cercana al promedio para generar los mapas de aceleraciones máximas (Figura 20a y Figura 20b), debido a que los coeficientes de variación tienen el menor porcentaje de error en comparación con los valores de PGV y la respuesta máxima de aceleración (R_{max}). Cabe señalar que a pesar de que el método planteado en este artículo tiene dificultades al tratar de reproducir la fase de la onda P, para fines de ingeniería lo que nos interesa es la fase intensa asociada a las ondas S, en cuyo caso nuestro método logra aproximarse mucho a los datos reales grabados en cada una de las estaciones, lo que se puede considerar con gran utilidad para generar aplicaciones muy útiles en la ingeniería sísmica de nuestro país, con la combinación de los métodos que utilizan en este artículo.

Referencias

- Aguirre J., Mora Chaparro J. C., González R., Reyes M., Robles A., Piña J., Mijares H. y Gutiérrez C. (2011). "Catálogo de Registros Sísmicos de la Red Temporal, Tapachula, Chiapas". Instituto de Ingeniería UNAM e Instituto de Geofísica UNAM.
- Anderson J. (2004). "Quantitative measure of the goodness-of-fit of synthetic seismograms". In *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, B.C., Canada. August 1-6, 2004. Earthquake Engineering Research Institute.
- 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*, Vol 73, No 6, pp. 1865-1894, December 1983.
- Boore D. M. (2003). "Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method". *Pure appl. geophysics*. 160 (2003) 635-676.
- Brune, J. N. (1970), Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes, *J. Geophysics. Res.* 75, 4997-5009.
- Ekström G., M. Nettles, and A. M. Dziewonski, (2012). "The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes". *Phys. Earth. Planet. Inter.*, 200-201, 1-9. Enlace de consulta, CMT de Harvard: <https://www.globalcmt.org/cgi-bin/globalcmt-cgi-bin/CMT5/form?itype=y&ymd&yr=2012&mo=11&day=7&otype=y&ymd&oyr=2012&omo=11&oday=7&jyr=1976&jday=1&ojyr=1976&ojday=1&nday=1&lmw=7&umw=10&lms=0&ums=10&lmb=0&umb=10&llat=-90&ulat=90&llon=-180&ulon=180&lhd=0&uhd=1000<s=-9999&uts=9999&lpe1=0&upe1=90&lpe2=0&upe2=90&list=0>
- González Herrera R, Aguilar-Carboney J.A., Mora-Chaparro J.C., Palacios-Silva R.J., Figueroa Gallegos J.A (2012). "Análisis estadístico del peligro e inferencia del riesgo sísmico en el norte del estado de Chiapas".
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2015). Encuesta Intercensal 2015. <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/chis/poblacion/> [fecha de consulta febrero, 2019]
- Ingeniería-Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán. Vol. 16, No. 1, 2012, ISSN 1665-529X.
- Guzmán-Speziale M., Pennington W.D., Matumoto T. (1989), The triple junction of the North America, Cocos and Caribbean plates: Sismicity and Tectonics, *Tectonics*, 8, 981-997.
- Guzmán-Speziale, M. y Meneses-Rocha, (2000). "The North America-Caribbean plate boundary west of the Motagua-Polochic fault system: a fault jog in southeastern Mexico". *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. 13, 459-468.
- Guzmán-Speziale, (2010). "Beyond the Montagua and Polochic faults: Active strike-slip faulting along the Western North America-Caribbean plate boundary zone". *Tectonophysics*. Vol. 496. 17-27.
- Hanks, T. C. (1979). "b Values and w⁹ Seismic Source Models: Implications for Tectonic Stress Variations along Active Crustal Fault Zones and the Estimation of High-frequency Strong Ground Motion, *J. Geophys. Res.* 84, 2235-2242.
- Hanks, T. C. y Mcguire, R. K. (1981). "The Character of High-frequency Strong Ground Motion". *Bull. Seismol. Soc. Am.* 71, 2071-2095.
- IPCMIRD (Instituto de Protección Civil para el Manejo Integral de Riesgos de Desastres), 2010. "Plan Operativo de Protección Civil por Riesgo Sísmico". Protección Civil, Gobierno del estado de Chiapas, México.
- Rebollar C., Quintanar L., Yamamoto J., Uribe A. (1999). "Source process of the Chiapas, Mexico, Intermediate Depth Earthquake of 21 October 1995". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89 (2) 348-358.
- Saragoni, G. R. and G. C. Hart (1974). Simulation of artificial earthquakes, *Earthquake Eng. Structural Dyn* 2,249-267.
- SEGOB (Secretaría de Gobernación), (2013). "Peligros Naturales y Tecnológicos relevantes durante el periodo 1810-2010". México 200 años. Información documental sobre los eventos significativos de 1810-2010.
- Servicio Sismológico Nacional (SSN), Instituto de Geofísica. Universidad Nacional Autónoma

de México (UNAM). Ciudad Universitaria,
Ciudad de México.

Solano B. R. (2016). "Generación de Mapas de Aceleraciones Máximas en la Ciudad de Tapachula, Chiapas. Aplicando Funciones de Transferencia". Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.

United States Geological Survey (USGS). Department of the Interior. United States. Geological Survey 12201 Sunrise Valley Dr. Reston, VA 20192. Enlace de consulta: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000jv5f#map?ShakeMap%20Stations=true&shakemapSource=atlas&shakemapCode=atlas20121107163546>

Valdés González., (2008). "Metodología para la estimación del peligro sísmico con base en la teoría de vibraciones aleatorias". Ciencia Ergo, vol. 15, num1, marzo-junio, 2008, pp73-82. Universidad Autónoma del Estado de México.

Wald, D. J., Quiriano, V., Heaton, T. H. y Kanamori, H, (1999). "Relationships between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California". Earthquake Spectra. Vol. 15, 557-564.