

MODELADO NUMÉRICO 2D DE LA RESPUESTA SÍSMICA PARA LAS CIUDADES DE BARQUISIMETO Y CABUDARE CON FINES DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

Leonardo Alvarado¹; Leonardo Álvarez²; Michael Schmitz¹; Herbert Rendón¹

Forma de citar: Alvarado, L., Álvarez, L., Schmitz, M., y Rendón, H. 2015. Modelado numérico 2D de la respuesta sísmica para las ciudades de Barquisimeto y Cabudare con fines de microzonificación sísmica. Boletín de Geología, 37 (1): 45-55.

RESUMEN

Se presentan los resultados preliminares del modelado numérico de las ondas sísmicas superficiales a lo largo de cuatro perfiles en las ciudades de Barquisimeto y Cabudare. Este modelado 2D se llevó a cabo usando una técnica que combina un método analítico (suma modal) con un método numérico (diferencias finitas) para obtener la respuesta sísmica en términos de la generación de sismogramas sintéticos. Se emplearon dos eventos sísmicos escenarios de magnitudes 6,0 y 7,0 Mw. Las razones de los espectros de respuesta 2D/1D muestran que la componente vertical sufre amplificaciones de hasta un factor 6, para frecuencias alrededor de 2Hz, mientras que las componentes horizontales amplifican hasta un factor de 2 para frecuencias alrededor de 1Hz. Adicionalmente, se observaron aumentos en la amplitud y duración de la señal sísmica en los bordes de la cuenca sedimentaria.

Palabras clave: Modelado numérico onda sísmica, método híbrido, microzonificación sísmica.

2D MODELLING OF THE SEISMIC RESPONSE FOR BARQUISIMETO AND CABUDARE CITIES FOR MICROZONATION STUDIES

ABSTRACT

The preliminary results of the 2D superficial seismic wave modeling along four cross sections through the Barquisimeto and Cabudare cities are presented. The 2D modeling was done using a technique that combines an analytical method (modal summation) with a numerical method (finite difference) in order to obtain the seismic response in terms of synthetic seismograms generation. We used two seismic scenarios with magnitude 6.0 and 7.0 Mw. The 2D/1D spectra ratio shows the vertical component of the acceleration with an amplification factor 6, around 2 Hz; whereas the horizontal components have amplification of factor 2, around 1 Hz. We also observed an increase in amplitude and duration of the seismic signal at the edge of the sedimentary basin.

Keywords: Numerical modelling of seismic wave, hybrid method, seismic microzoning

¹ Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), Venezuela

² Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS), Cuba

INTRODUCCIÓN

La evaluación de la respuesta sísmica del suelo puede ser realizada a través de diferentes métodos experimentales, p.e. la medición de *microtremores* para el cálculo de las razones espectrales de las componentes horizontal y vertical, mejor conocida como razón H/V (Nakamura, 1989), que supone que la razón de la componente horizontal y vertical del movimiento está relacionada con la función de transferencia de la onda S.

Métodos alternativos para la determinación de la repuesta sísmica del suelo, lo constituyen los métodos determinísticos que emplean programas computacionales para modelar la onda sísmica. En este sentido se han propuestos muchas técnicas para el cálculo de los sismogramas sintéticos basados en el modelado 2D y 3D de la onda sísmica, una de estas técnicas fue desarrollada por Fäh, quién combinó un método analítico conocido como suma modal (Panza, 1985; Panza and Suhaldoc, 1987; Panza *et al.*, 2000), con diferencias finitas (Fäh, 1992; Fäh, *et al.*, 1993). La propagación de la onda de la fuente hasta el inicio de la cuenca sedimentaria se calcula con el método de suma modal para un modelo de estructura formado por capas planas (1D). El esquema de diferencias finitas (2D), es usado para simular la propagación de la onda en la cuenca. Esta técnica se denomina método híbrido y es particularmente adecuada para estimar el movimiento del suelo en cuencas sedimentarias complejas, ya que permite tomar en cuenta la fuente y la trayectoria de las ondas sísmicas.

El método híbrido ha sido aplicado a diversas ciudades, Roma (Fäh, *et al.* 1993), Thessaloniki, Grecia (Triantafyllidis *et al.*, 2004), Santiago de Cuba (Álvarez *et al.*, 2004), Beijing (Ding, *et al.*, 2004) con fines de microzonificación sísmica, ya que permite la comparación de los sismogramas sintéticos en el basamento rocoso y la cuenca sedimentaria, y de esa manera obtener las razones 2D/1D de diferentes parámetros del movimiento del suelo como aceleraciones, velocidades y desplazamientos máximos y las razones de espectro de frecuencia, entre otros.

En este estudio se presentan los resultados del modelado numérico de la onda sísmica superficial utilizando el método híbrido que se realizó en las ciudades de Barquisimeto y Cabudare a lo largo de cuatro perfiles con el objetivo de determinar la respuesta del suelo a una frecuencia máxima de 5 Hz con fines de microzonificación sísmica.

REGIÓN DE ESTUDIO

Las ciudades de Barquisimeto y Cabudare en el estado Lara están ubicadas en la región centro occidental de Venezuela: Barquisimeto, capital del estado, se encuentra ubicada en una terraza aluvial del valle del río Turbio, al norte de la Falla de Boconón, mientras que Cabudare, se ubica al sureste de la ciudad de Barquisimeto. La FIGURA 1 muestra la localización de los cuatro perfiles.

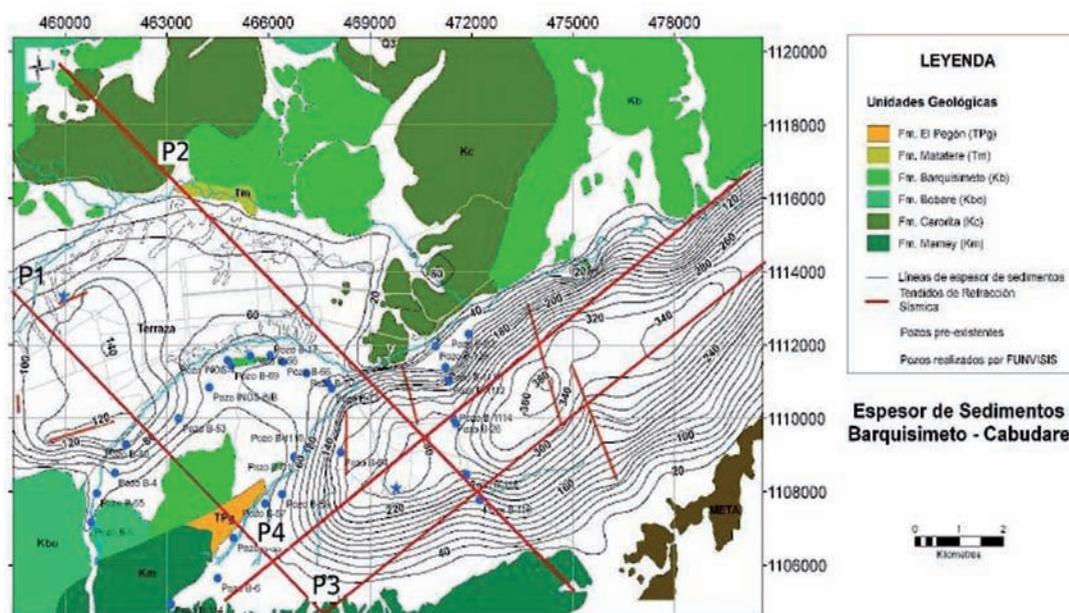


FIGURA 1. Ubicación de los perfiles sobre mapa de espesor de sedimentos (Reinoza, *et al.*, 2008). El modelado se hizo de manera preliminar a lo largo de los perfiles 1 a 4.

SISMOS ESCENARIOS

La región de estudio se encuentra ubicada en una zona de gran actividad sísmica evidenciada tanto por datos instrumentales como por datos históricos. A partir de la sismicidad registrada en la región y de los mecanismos focales conocidos se realizó la escogencia de los eventos sísmicos escenarios, basado en la cercanía de los eventos a la región de estudio y de su alineación con los perfiles seleccionados. De esta manera se seleccionaron dos eventos cuyos mecanismos focales corresponden a los sismos del Tocuyo 1950/08/03 y San Pablo 1975/04/05, estos mecanismos se obtuvieron de las soluciones CMT de Harvard (TABLA 1 y FIGURA 2).

TABLA 1. Parámetros focales de los sismos escenarios (CMT, Harvard).

Sismo	Mag (Mw)	Lat (N)	Lon (O)	Ac (°)	Buz (°)	Des (°)	Prof (km)
El Tocuyo 1950/08/03	7.0	9.74	69.83	230	62	190	16
San Pablo 1975/04/05	6.0	10.27	69.60	112	39	168	30

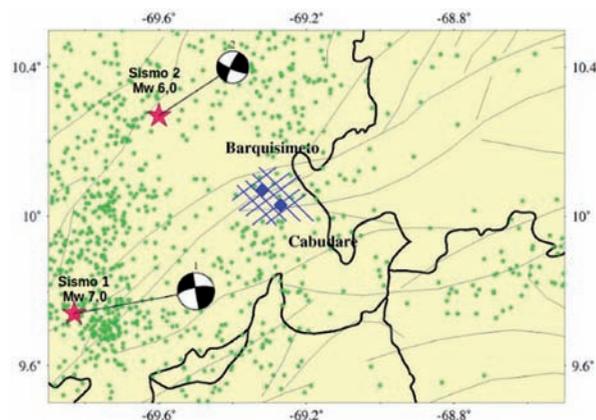


FIGURA 2. Sismos escenarios seleccionados (estrellas) y mecanismos focales correspondientes (CMT, Harvard), adicionalmente la sismicidad instrumental de la región (puntos).

MODELOS DE ESTRUCTURA REGIONAL

El modelo de corteza empleado es un modelo simplificado del obtenido por Bezada (2005). En el trabajo de Bezada se analizaron secciones sísmicas a lo largo de un perfil que se extiende desde unos 150 km costa afuera del estado Falcón hasta el norte de Barquisimeto. Para la estimación de las densidades se

consideró el estudio gravimétrico de Orihuela y Cuevas (1993). Las velocidades de onda S fueron estimadas a partir de relaciones empíricas (Brocher, 2005) y las atenuaciones utilizadas fueron las definidas por Álvarez *et al.*, (2004). El modelo de corteza se muestra en la FIGURA 3.

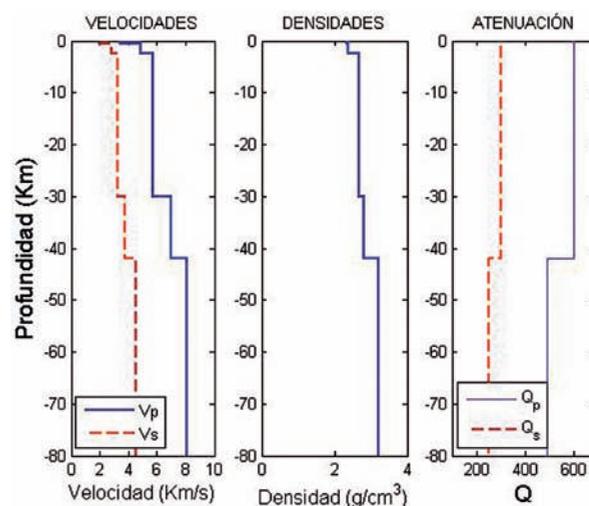


FIGURA 3. Parámetros del modelo de estructura regional.

MODELOS DE ESTRUCTURA LOCAL

Los modelos de estructura local empleados para el cálculo de los sismogramas 2D por diferencias finitas se obtuvieron a partir del modelado gravimétrico realizado por Reinoza *et al.*, (2008). En el modelo de estructura local fueron considerados dos tipos de sedimentos: - la terraza aluvial de Barquisimeto (noroeste de la región) con densidad $\rho=1,7 \text{ g/cm}^3$, velocidad de onda P de 1,5 km/s, y - la cuenca de Cabudare (al sureste) con densidad $\rho=1,8 \text{ g/cm}^3$, velocidad de onda P de 1,7 km/s. En la TABLA 2 se muestran todos los parámetros del modelo de estructura local, necesarios para el modelado de la onda sísmica. Las evaluaciones sísmicas realizadas posterior a la realización de los modelados (Reinoza *et al.*, 2011; Morales *et al.*, 2012) indican valores promedio de la velocidad de onda P de 1,6 – 1,8 km/s y 1,5 – 1,9 km/s para la terraza y la cuenca, respectivamente, y valores promedio de la velocidad de onda S de 0,7 – 1,0 km/s y 0,55 – 0,9 km/s para la terraza y la cuenca, respectivamente. Aunque estos resultados sugieren que las velocidades sísmicas en la terraza de Barquisimeto son ligeramente superiores a las de la cuenca de Cabudare, no representa un cambio considerable para la propagación de las ondas sísmicas. En la FIGURA 4 se muestra la estructura local de los perfiles.

TABLA 2. Parámetros del modelo de estructura local donde se indican: Densidad (ρ), Velocidades de ondas P y S (V_p , V_s) y atenuaciones de las ondas P y S (Q_p , Q_s).

Material	Densidad ρ (g/cm^3)	Velocidad Ondas P V_p (km/s)	Velocidad Ondas S V_s (km/s)	Atenuación Ondas P Q_p	Atenuación Ondas S Q_s
Terraza aluvial Barquisimeto	1,7	1,5	0,75	100	50
Cuenca de Cabudare	1,8	1,7	0,85	100	50
Roca	2,35	3,40	1,70	600	300

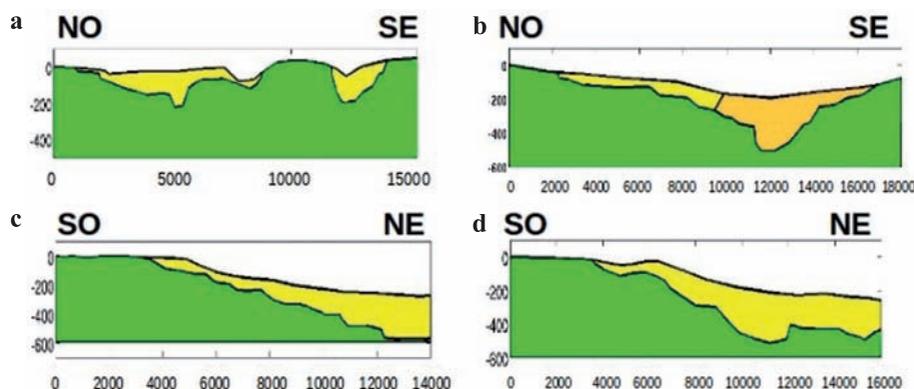


FIGURA 4. Modelos de estructura local para los perfiles: 1 (a), 3 (b), 5 (c) y 6 (d).

RESULTADOS

Perfil 1

En la FIGURA 5 se muestran los sismogramas sintéticos a lo largo del perfil 1 con dirección NO-SE para las tres componentes de la aceleración transversal (arriba), radial (centro) y vertical (abajo), utilizando como sismo escenario un evento de magnitud 6,0 Mw ubicado al noroeste (FIGURA 2), con los parámetros focales indicados en la TABLA 1. Los números sobre las trazas indican los valores máximos de aceleración; se observa que la máxima aceleración se alcanza para la componente radial ($29,4 \text{ cm/s}^2$ a 8 km del borde NO) en la terraza de Barquisimeto. La máxima aceleración en la componente vertical en el centro de la terraza es de $12,4 \text{ cm/s}^2$ a 6 km del inicio del perfil, la máxima aceleración de la componente transversal se mide en la cuenca de Cabudare al SE del perfil con un valor de $23,8 \text{ cm/s}^2$ a 14 km del inicio del perfil.

Los sismogramas sintéticos son utilizados para calcular otros parámetros del movimiento del suelo comúnmente utilizados en la ingeniería sísmica y que se correlacionan con los daños estructurales. En la FIGURA 6, se presentan los gráficos de máximo valor del espectro de aceleración y los períodos asociados en función de la distancia a la fuente, para

las componentes transversal (FIGURAS 6a, 6b), radial (6c, 6d) y vertical (6e, 6f). Se observa que en la componente transversal (ondas SH) las máximas aceleraciones se alcanzan en la cuenca de Cabudare a unos 43 a 44 km del epicentro (13-14 km del inicio del perfil) (FIGURA 6b) y períodos entre 0,4 y 0,5 s (2,5 – 2,0 Hz) (FIGURA 6a); las otras componentes también alcanzan valores máximos a la misma distancia. Valores de la aceleración altos se alcanzan también en la parte más profunda del perfil de la terraza de Barquisimeto (5-6 km del inicio del perfil).

Las características de las señales sísmicas que interesa conocer y que están relacionadas con daños en las edificaciones son: la amplitud, la duración y el contenido de frecuencias. El contenido de frecuencias se aprecia mejor observando la transformada de Fourier que muestra el contenido de frecuencia de la señal. Para estudiar los efectos 2D debido a la presencia de la cuenca sedimentaria es mejor utilizar los espectros de respuesta relativos. En la FIGURA 7 se muestran los espectros de respuesta relativos; estos espectros son funciones definidas por:

$$RSR(f) = \frac{RS_{2D}(f)}{RS_{1D}(f)} \quad (1)$$

donde, RS_{2D} es el espectro de respuesta para las señales calculadas en el medio donde se incluye la estructura local y RS_{1D} corresponde al espectro de respuesta para el basamento; ambos, calculados para un medio con amortiguamiento de 5%.

Este procedimiento permite remover los efectos de la fuente y de la estructura regional. Por otro lado, permite identificar en un área determinada, las bandas de frecuencia y los lugares donde ocurren los efectos de amplificación o deamplificación (Fäh *et al.*, 1993) y son la base para la microzonificación sísmica (Álvarez *et al.*, 2004).

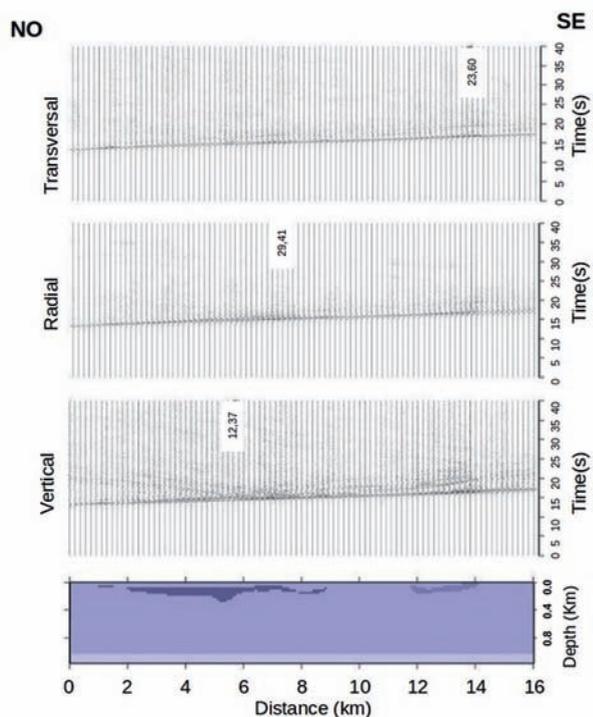


FIGURA 5. Sismogramas sintéticos a lo largo del perfil 1 para las componentes de la aceleración transversal (arriba), radial (centro) y vertical (abajo) con el modelo de estructura local. El color azul claro en el modelo local representa la corteza y el azul oscuro los sedimentos.

En la FIGURA 7 se muestra el espectro de respuesta relativo para las componentes: vertical (FIGURA 7a), radial (7b) y transversal (7c) en función de la distancia a la fuente, además se muestra el modelo local (7d). Se observa que para la componente vertical, frecuencias entre 2,0 y 2,5 Hz son amplificadas hasta por un factor de 6 en el centro de la terraza de Barquisimeto (entre los 5 y 6 km) y hasta un factor de 5 en el centro y bordes de la cuenca de Cabudare ubicada más hacia el SE del perfil (entre los 12 a 14 km).

Las componentes horizontales muestran amplificaciones de factor 2 para frecuencias entre 0,5 y 1,2 Hz para las componentes transversal y radial (FIGURAS 7b y 7c).

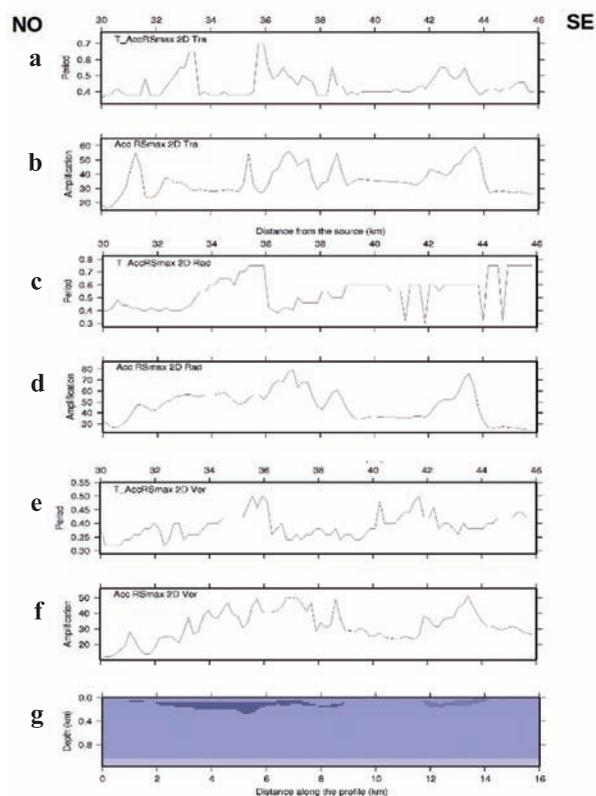


FIGURA 6. Gráficos de máximo valor del espectro de aceleración transversal y períodos asociados a lo largo del perfil 1. **a)** y **b)** muestran, respectivamente, los períodos y valores máximos de la componente transversal del espectro de aceleración; en **c)** y **d)** los valores de período y máximo del espectro de aceleración para la componente radial; **e)** y **f)** para la componente vertical, con el modelo estructura local **(g)**.

Perfil 2

En la FIGURA 8 se muestran los sismogramas sintéticos a lo largo del perfil 2 con dirección NO-SE (FIGURA 1) para las tres componentes de la aceleración transversal (arriba), radial (centro) y vertical (abajo); utilizando como sismo escenario el mismo del perfil 1. Se observa que la máxima aceleración se alcanza entre 3-4 km del borde NO de la terraza para las tres componentes del movimiento siendo la máxima aceleración alcanzada en la componente radial (29,8 cm/s² radial, 20,0 cm/s² transversal y 10,3 cm/s² vertical).

En la FIGURA 9, se presentan los gráficos de máximo valor del espectro de aceleración y períodos asociados en función de la distancia a la fuente, para las componentes: transversal (FIGURAS 9a, 9b), radial (9c, 9d) y vertical

(9e, 9f). Se observa que para las tres componentes del movimiento las aceleraciones máximas se alcanzan en borde NO de la cuenca, entre 3-4 km del borde y para períodos entre 0,3 y 0,5 s (2 y 3,3 Hz).

En la FIGURA 10 se muestra el espectro de respuesta relativo para las componentes vertical (FIGURA 10a), radial (FIGURA 10b) y transversal (FIGURA 10c) de la aceleración en función de la distancia a la fuente para el perfil 2. Se observa que para la componente vertical, frecuencias entre 2,0 y 2,5 Hz son amplificadas hasta por un factor de 5 en el extremo SE (entre los 15 y 16 km del inicio del perfil) y hasta un factor de 4 en la parte más profunda (entre 12 y 14 km del inicio del perfil) al igual que en el borde NO, a 4 km del inicio del perfil. Las componentes horizontales muestran amplificaciones de factor 2 para frecuencias entre 0,4 y 0,5 Hz.

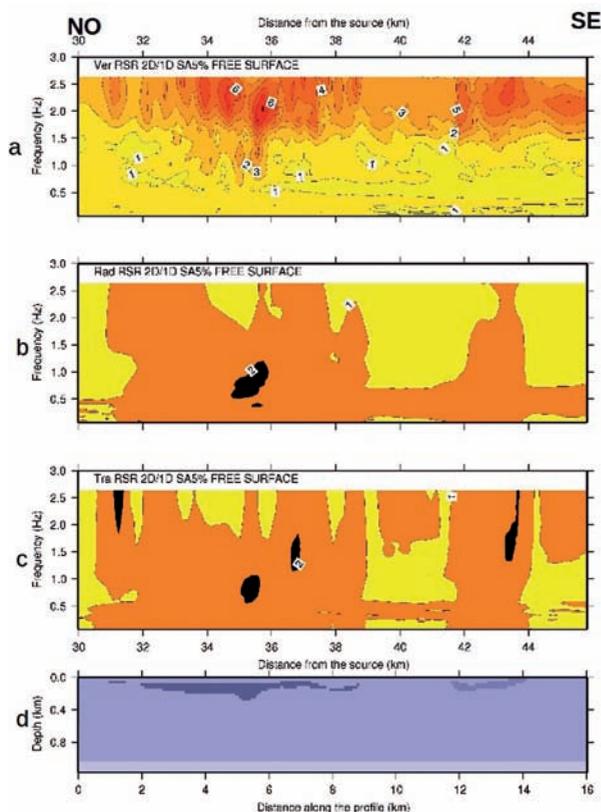


FIGURA 7. Espectro de respuesta relativo (RSR) de la aceleración para las componentes vertical (a), radial (b) y transversal (c) a lo largo del perfil 1, adicionalmente el modelo de estructura local (d).

Perfil 3

En la FIGURA 11 se muestran los sismogramas sintéticos a lo largo del perfil 3 con dirección SO-NE (FIGURA 1) para las tres componentes de la aceleración transversal

(arriba), radial (centro) y vertical (abajo), utilizando como sismo escenario un evento de magnitud 7,0 Mw ubicado al suroeste (FIGURA 2), con los parámetros focales indicados en la TABLA 1. Los sismogramas sintéticos muestran las mayores aceleraciones a unos 4 a 5 km del borde SO siendo mayor el valor de la componente radial (201,8 cm/s² radial; 101,2 cm/s² transversal y 59 cm/s² vertical). También se aprecia cómo se incrementa la duración de la señal hacia la zona más profunda de la cuenca.

La FIGURA 12 muestra los gráficos de máximo valor del espectro de aceleración y período asociado para las tres componentes del movimiento: transversal (FIGURAS 12a, 12b), radial (12c, 12d), y vertical (12e, 12f) en función de la distancia a la fuente. Se observan tres picos de para un período de 0,5 s entre los 9 y 12 km del inicio del perfil en la componente transversal.

La FIGURA 13 muestra la razón del espectro de respuesta a lo largo del perfil 3, se observa que hacia la parte más profunda de la cuenca se alcanzan amplificaciones de hasta un factor de 4 en la componente vertical (FIGURA 13a) y de hasta un factor de 2 en las componentes radial (FIGURA 13b) y transversal (FIGURA 13c).

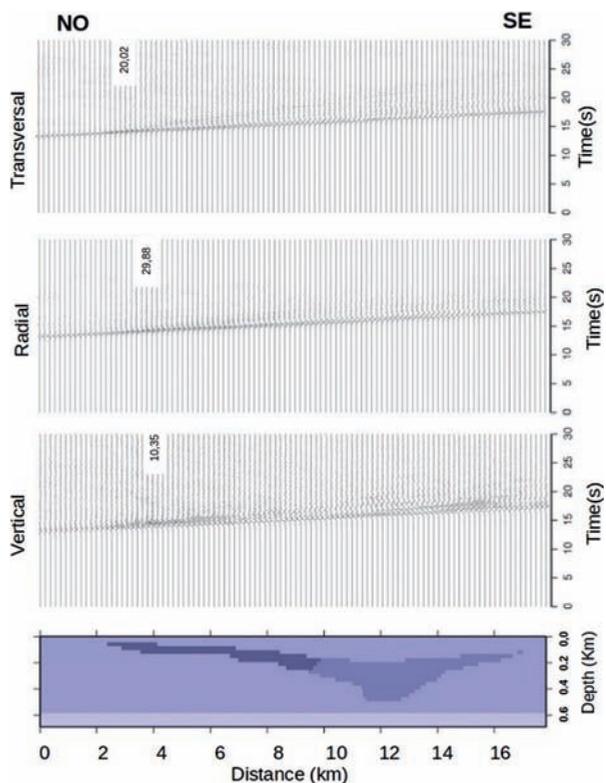


FIGURA 8. Sismogramas sintéticos a lo largo del perfil 2 para las componentes de la aceleración transversal (arriba), radial (centro) y vertical (abajo) con el modelo de estructura local.

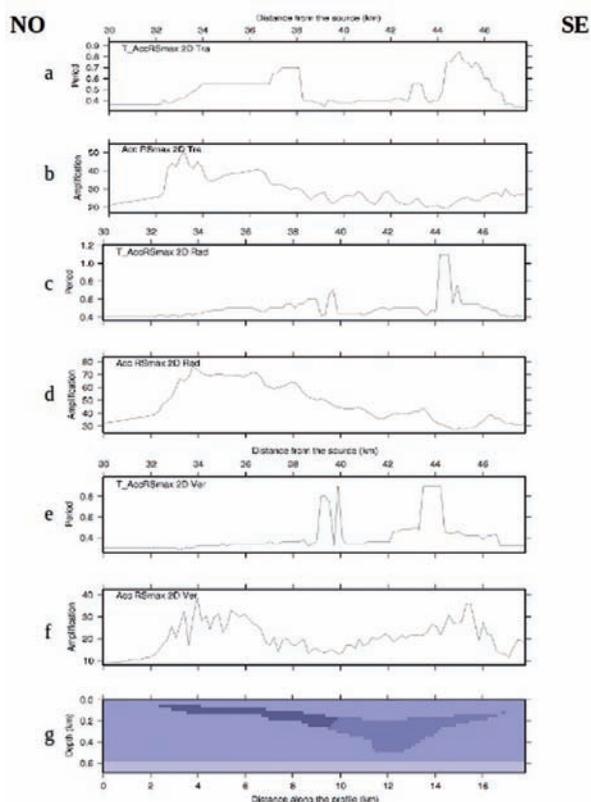


FIGURA 9. Gráficos de máximo valor del espectro de aceleración y períodos asociados para las tres componentes de la aceleración a lo largo del perfil 2 (igual a los gráficos de la FIGURA 6).

Perfil 4

En la FIGURA 14 se muestran los sismogramas sintéticos para las tres componentes de la aceleración transversal (arriba), radial (centro) y vertical (abajo) a lo largo del perfil 4, utilizando como sismo escenario el mismo evento del perfil 3. Se observa que los valores más grandes de la aceleración se alcanzan en distintos lugares para las diferentes componentes de la aceleración. Así, para las componentes vertical y radial los valores máximos se alcanzan entre los 4 y 5 km del inicio del perfil, estos valores son: $101,6 \text{ cm/s}^2$ para la componente transversal, $152,5 \text{ cm/s}^2$ para la radial y $86,2 \text{ cm/s}^2$ para la vertical. Por otra parte, el valor más grande se encuentra en la componente radial de aceleración a 500 m, aproximadamente del inicio del perfil.

La FIGURA 15 muestra los gráficos de valor máximo del espectro de aceleración y períodos asociados para las tres componentes del movimiento: transversal (FIGURAS 15a, 15b), radial (15c, 15d), y vertical (15e, 15f), en función de la distancia a la fuente. Se observa

que las mayores amplificaciones en la componente vertical ocurren entre los 6 y 8 km del inicio del perfil para períodos entre 0,6 y 0,8 s.

La razón del espectro de respuesta 2D/1D a lo largo del perfil 4 se aprecia en la FIGURA 16, donde se observan amplificaciones de hasta un factor 6 entre los 7 y 9 km del borde SO del perfil 4 en la componente vertical (FIGURA 16a) y de hasta un factor de 2 en las componentes horizontales entre los 4 y 6 km (16b y 16c).

ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo a Fäh (1992), los tres principales efectos causados por la presencia de sedimentos son: 1) La excitación de ondas superficiales en los bordes de la cuenca sedimentaria, 2) efectos de resonancia debido a la topografía del basamento y 3) la generación de ondas superficiales locales muy dispersivas con un pico de energía alrededor de los 2 Hz.

El primer conjunto de efectos se refiere la generación de ondas superficiales locales por múltiples reflexiones de las ondas SH y P-SV, al inicio de la cuenca sedimentaria que progresivamente se va haciendo más profunda. En el caso de las ondas P-SV adicionalmente ocurren conversiones de fase de S a P en la interfase sedimentos-roca y en la superficie libre. Estas múltiples reflexiones de las señales sísmicas, después de una corta propagación, generan ondas superficiales locales; este efecto parece dominar el campo de ondas en el interior de la cuenca sedimentaria en los perfiles 1 y 2 (FIGURAS 5 y 8). En los gráficos de máximo valor del espectro de aceleración, se observan las mayores amplificaciones en los bordes de la cuencas más cercanos a la fuente sísmica, en el perfil 2 (FIGURA 9) donde la profundidad de los sedimentos se va haciendo mayor, progresivamente, de NO al SE. De la misma manera se puede explicar el incremento de las amplitudes y duración de la señal que se observa en las tres componentes de la aceleración en los perfiles 3 y 4. (FIGURAS 11 y 14).

En el afloramiento de la roca del perfil 1 (10-12 km del inicio del perfil) se aprecian señales que muestran menores amplitudes, duración y contenido frecuencial que en las subcuencas (FIGURAS 5, 6, 7); esto ocurre para las tres componentes del movimiento. Ondas superficiales locales son excitadas en la cuenca de Cabudare con grandes amplitudes en la componente transversal. De acuerdo a Fäh (1992), estas ondas superficiales están formadas principalmente por ondas S atrapadas en la cuenca que interfieren constructivamente para frecuencias alrededor de 2 Hz.

Dentro de la cuenca sedimentaria se observan efectos de resonancia, los cuales ocurren en los sectores de la cuenca con suaves variaciones en la geometría del basamento rocoso. La resonancia es debida a la superposición de las ondas superficiales con las reflexiones dentro de la cuenca. Estos efectos 2D son mejor visualizados en las razones espectrales 2D/1D (FIGURAS. 7, 10, 13 y 16). Así, en el perfil 1 se presentan efectos resonantes en el centro de las subcuencas; se observan amplificaciones de hasta un factor 6 para frecuencias de 2 Hz en la componente vertical y de factor 2 para frecuencias de 1 Hz en las componentes horizontales (FIGURA 7). Asimismo, en los perfiles 3 y 4, se alcanzan amplificaciones de hasta un factor 5 en la zona más profunda de la cuenca para frecuencias entre 1 y 1,5 Hz en las componentes verticales del movimiento (FIGURAS 13 y 16). Los estudios de Ambrassey and Simpson (1996) y Ambrassey and Douglas (2000) apoyan estas observaciones. Estos autores concluyen que, a altas frecuencias y distancias cortas, la componente vertical del espectro puede tener una dependencia más fuerte de las condiciones del suelo que para las componentes horizontales. Estas altas amplificaciones alcanzadas por la componente vertical podrían indicar la importancia de considerar las componentes verticales tanto como las horizontales.

El uso de dos sismos escenarios diferentes para los perfiles 1, 2 y 3, 4 hace que los resultados del modelado 2D deban ser analizados de forma independiente. Sin embargo, las razones 2D/1D de parámetros simples como las aceleraciones, intensidad de Arias (IA) o funciones como los espectros de respuesta son perfectamente compatibles y constituyen en elemento clave para microzonificación sísmica.

CONCLUSIONES

Con la finalidad de estimar la respuesta sísmica de la ciudad de Barquisimeto se realizó el modelado numérico de las ondas sísmicas para cuatro perfiles ubicados en las ciudades de Barquisimeto y Cabudare aplicando el método híbrido. Los resultados obtenidos se analizaron en términos de los efectos sobre la amplitud, duración y contenido de frecuencias de las ondas sísmicas, asociados a la presencia de la cuenca sedimentaria.

Los sismogramas sintéticos muestran que la terraza de Barquisimeto tuvo una respuesta de sitio alrededor de las frecuencias 2,0 a 2,5 Hz con amplificaciones relativas que alcanzan un factor de 6 para la

componente vertical; en la cuenca de Cabudare se alcanzan amplificaciones de hasta un factor de 5 para las mismas frecuencias. En las componentes horizontales se alcanzan amplificaciones de hasta un factor de 2 para frecuencias entre 0,5 – 1,2 Hz. Estos resultados muestran que la componente vertical puede tener una dependencia más fuerte de las condiciones del suelo que las componentes horizontales y destaca la importancia de considerar las componentes verticales tanto como las horizontales.

Se observaron efectos de amplificación y duración de las señales sísmicas en los bordes de las cuencas sedimentarias, cercanos a la fuente sísmica. Estos efectos de amplificación pueden ser explicados debido a las múltiples reflexiones de las ondas sísmicas, las cuales generan ondas superficiales locales en los bordes de la cuenca sedimentaria. Se alcanzaron las mayores aceleraciones en la cuenca de Cabudare debido, quizás, a que la magnitud del sismo escenario fue mayor para estos perfiles.

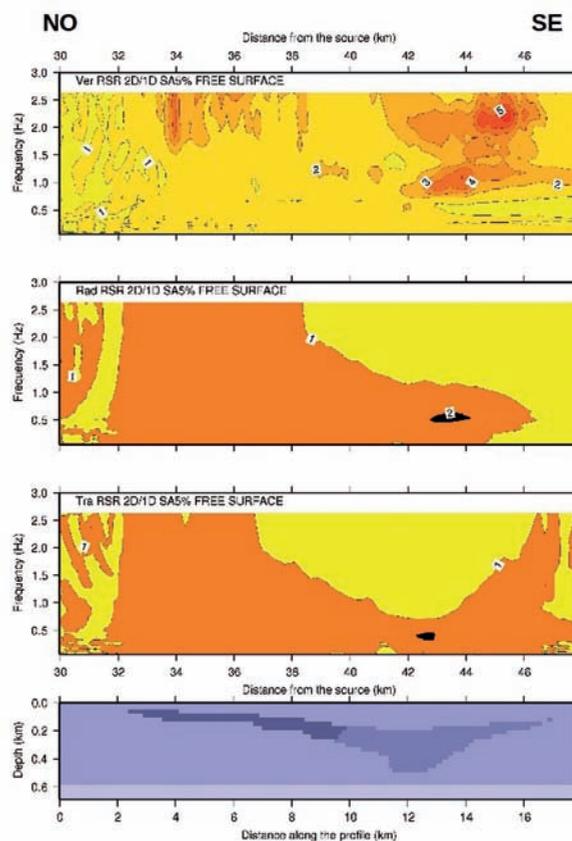


FIGURA 10. Espectro de respuesta relativo (RSR) de la aceleración para las componentes vertical, radial y transversal del perfil 2 junto al modelo de estructura local (igual a la FIGURA 7).

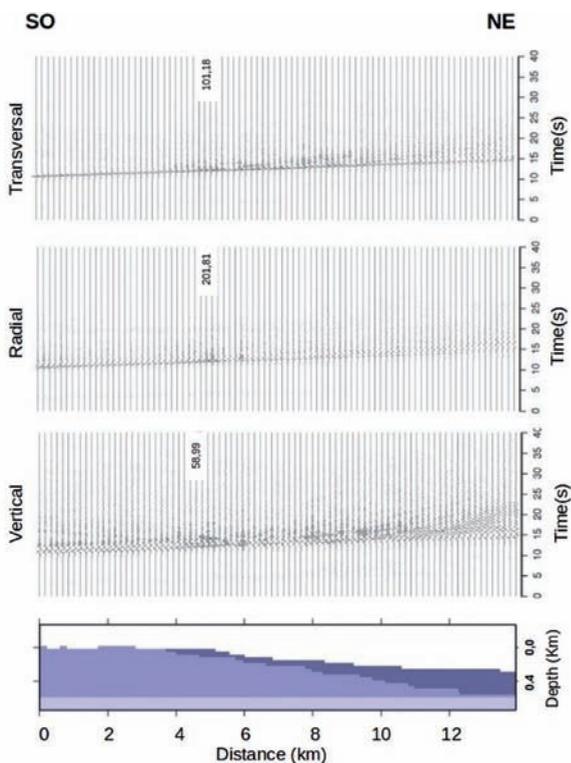


FIGURA 11. Sismogramas sintéticos a lo largo del perfil 3 para las componentes de la aceleración transversal (arriba), radial (centro) y vertical (abajo) con el modelo de estructura local.

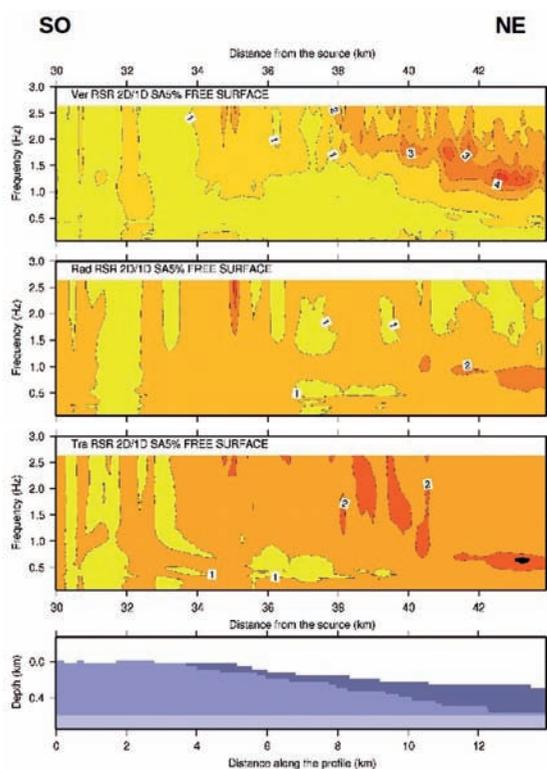


FIGURA 13. Espectro de respuesta relativo (RSR) de la aceleración para las componentes vertical, radial y transversal del perfil 3, junto al modelo de estructura local (igual a la FIGURA 7).

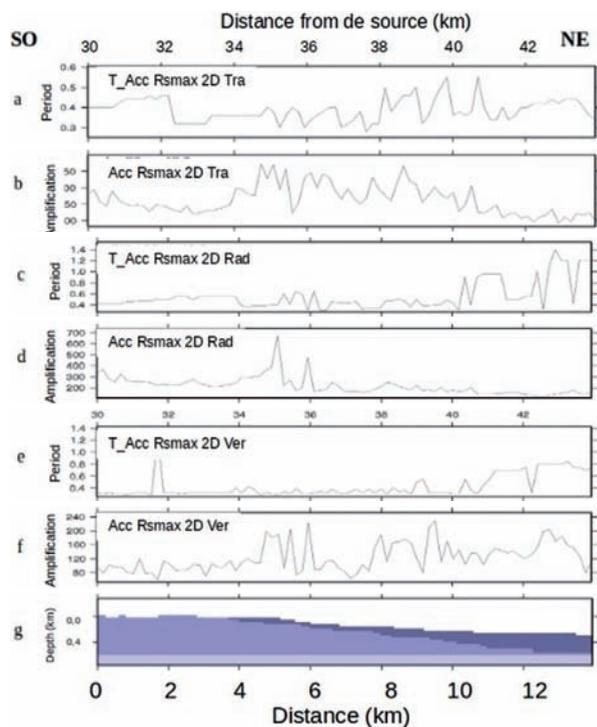


FIGURA 12. Gráficos de máximo valor de aceleración del espectro de aceleración máxima y períodos asociados para las tres componentes del espectro de aceleración, a lo largo del perfil 3 (igual al gráfico de las FIGURA 6).

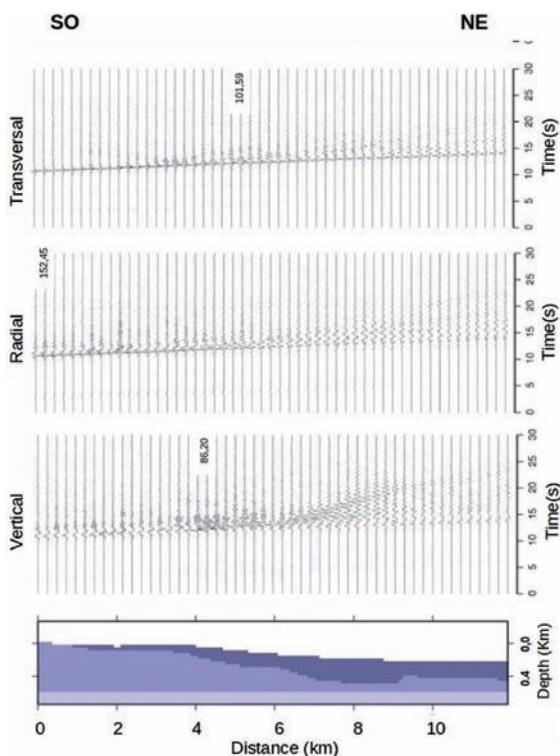


FIGURA 14. Sismogramas sintéticos a lo largo del perfil 4 para las componentes de la aceleración transversal (arriba), radial (centro) y vertical (abajo) con el modelo de estructura local.

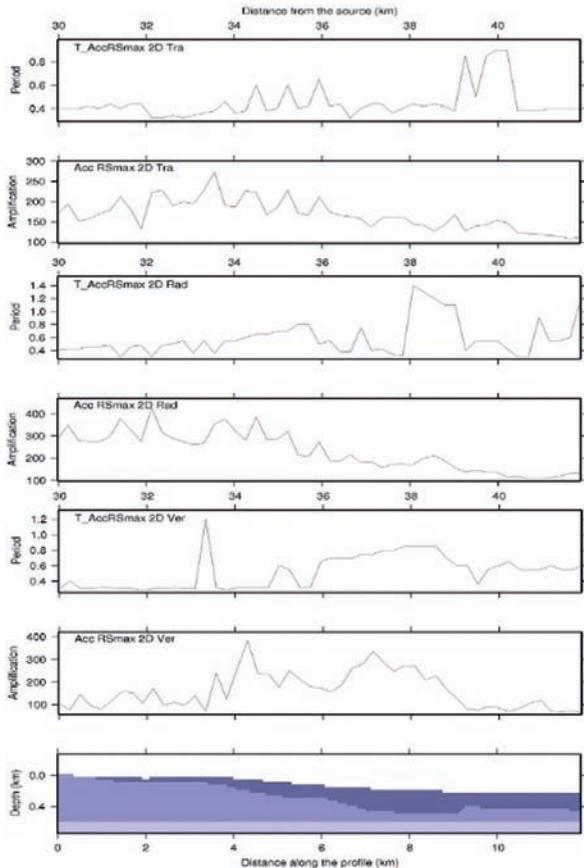


FIGURA 15. Gráficos de espectros de valor máximo de aceleración del espectro de respuesta y períodos asociados para las tres componentes del espectro de aceleración, a lo largo del perfil 4 (igual al gráfico de la FIGURA 6).

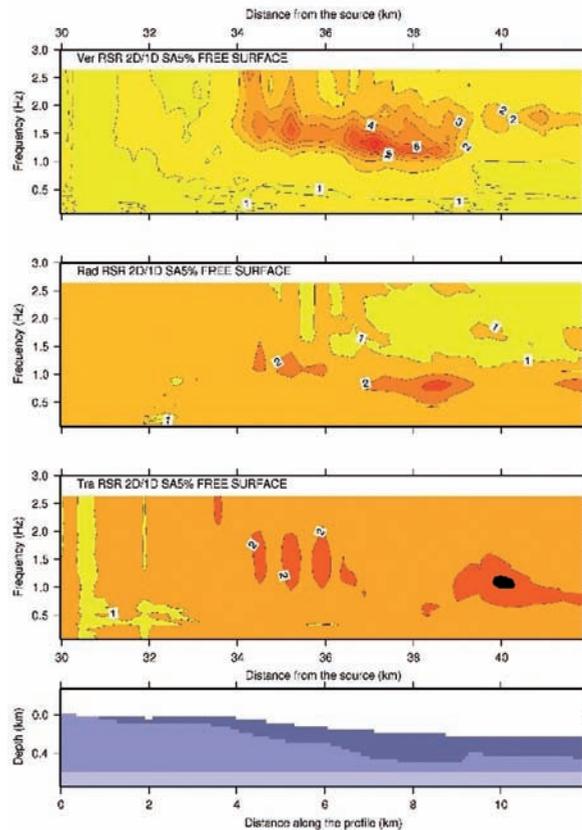


FIGURA 16. Espectro de respuesta relativo (RSR) de la aceleración para las componentes vertical, radial y transversal del perfil 4, junto al modelo de estructura local (igual a la FIGURA 7).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó gracias al financiamiento obtenido del Proyecto UNESCO/IGCP 487 e ICTP Network NET-58, “Seismic Microzonation of Latin American Cities” (SMLAC).

REFERENCIAS

Álvarez, L., García, J., Vaccari, F., Panza, G.F., González, B., Reyes, C., Fernández, B., Pico, R., Zapata, J.A., and Arango, E. 2004. Ground motion zoning of Santiago de Cuba: An approach by SH waves modelling. *Pure and Applied Geophysics*, 161: 1041-1059.

Ambrasseys, N.N., and Simpson, K.A. 1996. Prediction of Vertical Response Spectra in Europe, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 25: 401-412.

Ambrasseys, N.N., and Douglas, J. 2000. Reappraisal of the Effect of Vertical Ground Motion on response,

ESEE Report No. 00-4, Imperial College of Science, Technology and Medicine, Civil Engineering Department, London, 66p.

Bezada, M. 2005. Modelado bidimensional de la corteza en la zona de colisión Caribe-Suramérica, Región Occidental de Venezuela (Estados Lara y Falcón). Trabajo Especial de Grado, Inédito. Universidad Simón Bolívar, 175p.

Brocher, T. 2005. Empirical Relations between Elastic Wavespeeds and Density in the Earth’s Crust. *Bulletin of Seismological Society of America*, 95 (6): 2081-2092.

Ding, Z., Chen, T., and Panza, G.F. 2004. Estimation of Site Effects in Beijing City. *Pure and Applied Geophysics*, 161 (5-6): 1107-1123.

Fäh, D. 1992. A hybrid technique for the estimation of strong ground motion in sedimentary basins, Ph. D. Thesis, Nr 9767, Swiss Fed. Technology, Zurich, 161p.

Fäh, D., Iodice, C., Suhaldoc, P., and Panza, G.F. 1993. A new method for the realistic estimation of seismic ground motion in megacities, the case of Rome. *Earthquake Spectra*, 9: 643-668.

Harvard Centroid Moment Tensor Catalog, Harvard Seismology. Department of Earth and Planetary Sciences. www.seismology.harvard.edu/CMTsearch.htm. Consultado enero 2012.

Morales, C., Schmitz, M., Rocabado, V., y Pullammanappallil, S. 2012. Evaluación del modelo geológico - geofísico del subsuelo de Barquisimeto y Cabudare mediante la respuesta espectral en superficie y su aplicación en el proyecto de microzonificación sísmica. *Memorias del I Congreso Venezolano de Geociencias*, Caracas 2011.

Nakamura, K. 1989. Inferences of seismic responses of superficial layer based on microtremors measurement. *Quarterly Report on Railroad Research*, 4: 18-27.

Orihuela, N., y Cuevas, J. 1993. Modelaje Sismogravimétrico de Perfiles Regionales del Caribe Central, *Revista de Ingeniería U.C.V.*, 8 (1): 55-73.

Panza, G.F. 1985. Synthetic Seismograms: The Rayleigh Waves Modal Summation, *Journal of Geophysical Research*, 58: 125-145.

Panza, G.F., and Suhadolc, P. 1987. Complete strong motion synthetics. En (B.A. Bolt, ed.) *Seismic Strong Motion Synthetics, Computational Techniques 4* (Academic Press, Orlando, 1987), pp. 153-204.

Panza, G.F., Romanelli, F., and Vaccari, F. 2000. Seismic Wave Propagation in Laterally Heterogeneous Anelastic Media: Theory and Applications to the Seismic Zonation. *Advances in Geophysics*, 43: 1-95.

Triantafyllidis, P., Suhaldoh, P., Hatzidimitriou, P.M., Anastasiadis, A., and Theodulidis, N. 2004. Part I. Theoretical Site Response Estimation for Microzoning Purposes. *Pure and Applied Geophysics*, 161 (5-6): 1185-1203.

Reinoza, C., Morales, C., Rocabado, V., Sánchez, J., García, K., y Schmitz, M. 2008. Estimación de espesor de sedimentos a partir del modelado gravimétrico 3D con fines de microzonificación sísmica: ciudades de Barquisimeto y Cabudare, Venezuela. *XIV Congreso Venezolano de Geofísica*. Caracas. Venezuela, 8p.

Reinoza, C., Morales, C., Rocabado, V., García, K., Sánchez, C., Abreu, R., y Schmitz, M. 2011. Espesores de sedimentos a partir de interpretación integrada de datos geofísicos: ciudades de Barquisimeto y Cabudare, Venezuela. *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, 26 (2): 77-86.

Trabajo recibido: mayo 11 de 2012
Trabajo aceptado: octubre 31 de 2014