

DATOS DE MOVIMIENTOS FUERTES REGISTRADOS EN BAJA CALIFORNIA  
DURANTE EL SISMO EL MAYOR-CUCAPAH DEL 4 DE ABRIL DE 2010 ( $M_w$  7.2):  
RESULTADOS PRELIMINARES

Luis Munguía, Miguel Navarro, Tito Valdez and Manuel Luna

Grupo de Sismología de Movimientos Fuertes

Departamento de Sismología, División de Ciencias de la Tierra, CICESE (PA: 99385).

## Introducción

El sismo El Mayor-Cucapáh del 4 de Abril de 2010 ocurrió a las 15:40 horas tiempo local en Baja California (22:40 UTC). Su epicentro fue localizado en el margen occidental del Valle de Mexicali, en la zona donde convergen las sierras El Mayor y Cucapáh. El epicentro está ubicado a alrededor de 40 kilómetros al sur de Mexicali, ciudad con alrededor de un millón de habitantes. Desde Febrero de 1892, cuando un sismo de magnitud similar ocurrió sobre el extremo noroeste de la falla Laguna Salada, ningún otro evento de ese tamaño se había registrado en el área del sismo de Abril de 2010. Históricamente, en la región del sismo El Mayor-Cucapáh ocurrieron otros eventos de magnitud similar a éste. Por ejemplo, en Mayo de 1940 la falla Imperial generó un sismo de magnitud 6.9 con epicentro ligeramente al norte de la frontera internacional. También, en 1915 y 1934 dos eventos de  $M \sim 7$  ocurrieron en asociación de la falla Cerro Prieto, al sureste del epicentro del evento El Mayor-Cucapáh. Adicionalmente a esos fuertes sismos, muchos otros eventos de magnitud menor ocurren en la región como resultado de movimiento tectónico en fallas importantes que son subsidiarias al sistema de fallas principal Imperial-Cerro Prieto. En Baja California, este sistema de fallas constituye la frontera entre las grandes placas tectónicas del Pacífico y Norte América.

Los efectos del sismo El Mayor-Cucapáh se sintieron en la región noroeste de México, así como en el sur de California, en Arizona y en Nevada, a más de 400 kilómetros del epicentro. En la vecindad del epicentro, la intensidad del movimiento sísmico originó un marcado efecto de licuefacción en los materiales del subsuelo y notables agrietamientos superficiales, mecanismos responsables del severo daño causado en casas y canales de irrigación en amplias áreas del Valle de Mexicali.

Posteriormente a la ocurrencia del sismo principal, se recuperó una considerable cantidad de registros de estaciones sismológicas operadas en la región por varias instituciones. En particular, trece estaciones de la Red de Acelerógrafos del Noroeste de México (RANM), operada por personal del CICESE, registraron el sismo a distancias que van de 12 a 140 kilómetros del epicentro. Seis de esas estaciones están ubicadas sobre

sedimentos del Valle de Mexicali, a menos de 35 km del epicentro; las otras estaciones registran sobre rocas graníticas de las sierras peninsulares de Baja California. Los datos de movimientos fuertes registrados durante el sismo principal y algunas de las réplicas de mayor magnitud constituyen una importante base de datos de aceleración para la realización de estudios detallados de esos fuertes eventos.

El presente reporte sustituye a nuestro anterior reporte preliminar sobre el sismo El Mayor-Cucapáh (en español), en el que las componentes de aceleración horizontal, registradas con instrumentos Geosig, aparecen erróneamente intercambiadas en el manuscrito y en los archivos de datos. Además de haberse corregido tal error, en esta versión del reporte se muestran gráficas adicionales de velocidad, desplazamiento y espectros de Fourier y de respuesta. Por tanto, el presente informe incluye:

- a) el epicentro del sismo principal, determinado usando solo los tiempos de arribo medidos en registros de las estaciones acelerográficas y estaciones sismológicas convencionales más cercanas al epicentro;
- b) los valores máximos de parámetros de movimientos del suelo derivados de los registros de estaciones acelerográficas que fueron activadas por el sismo principal;
- c) gráficas de las tres componentes de aceleración, velocidad y desplazamiento registradas;
- d) espectros de Fourier de desplazamiento y espectros de respuesta de aceleración absoluta (para 5 % de amortiguamiento), y
- e) gráficas tripartitas de espectros de respuesta que muestran pseudo velocidad (PSV), pseudo aceleración (PSA) y desplazamiento relativo (SD) calculados también para un 5 % de amortiguamiento.

### **Localización del epicentro del sismo principal**

La Figura 1 muestra el epicentro del sismo mayor del 4 de Abril de 2010 ( $M_w$  7.2) (estrella amarilla) y la ubicación de estaciones acelerográficas que registraron el evento en el área epicentral (cuadros blancos). Para la localización de este epicentro, se utilizaron solo los tiempos de arribo de ondas P medidos en los registros de varias estaciones locales. De ese modo, se combinaron los tiempos de arribo de los acelerogramas con lecturas de tiempos de arribo de dos estaciones de movimientos débiles de la Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM) (EMX y CPX, rombos azules) y con datos de una estación de banda ancha (círculo verde) instalada en la región del epicentro con anterioridad al 4 de Abril. Los datos de la estación de banda ancha fueron proporcionados por Javier Lermo, investigador de la Universidad Nacional Autónoma de

México (UNAM). Con este cubrimiento de estaciones, se logró determinar el epicentro del sismo principal con una precisión mayor a la lograda cuando se usan solo datos de estaciones ubicadas a distancias más regionales.

De esta manera, el epicentro del sismo principal se ubicó en las coordenadas 32.30 N and 115.32 W. Sin embargo, y debido a la inexistencia de estaciones sismológicas muy cercanas al epicentro, la profundidad focal no se pudo constreñir con los datos de primeros arribos. Para solventar dicho problema se corrió el programa de localización de hipocentros con diversos valores fijos de la profundidad focal, eligiendo como solución final a aquélla con error de localización más bajo. De esta manera, se determinó que el punto de inicio de la ruptura del sismo El Mayor-Cucapáh estuvo a solo 2 km de la superficie. Los errores estándar asociados al epicentro y a la profundidad focal son de 1.4 y 2.2 km respectivamente. Sin embargo, se observó que valores de la profundidad focal de hasta 6 km producen prácticamente las mismas coordenadas horizontales, pero con errores de localización ligeramente más altos. No obstante, esta somera profundidad focal es congruente con las señales de periodo largo que predominan en los registros de desplazamiento que se obtienen de la doble integración con respecto al tiempo de los registros locales de aceleración.

Tabla 1. Coordenadas geográficas e instrumentación de las estaciones acelerográficas que registraron el sismo El Mayor-Cucapáh del 4 de Abril 2010 ( $M_w$  7.2).

No.	Nombre de la estación (código)	Coordenadas geográficas			Cond. sitio	Acelerógrafos (todos de 2g)
		Latitud (grados)	Longitud (grados)	Altitud (msnm)		
1	Geotérmica (GEO)	32.4000	-115.2400	30	Sedimentos	Etna, Kinematics
2	Saltillo (SAL)	32.4222	-115.1303	50	Sedimentos	GeoSIG GMS-18
3	M. De Ocampo (MDO)	32.4640	-115.3160	14	Sedimentos	GeoSIG GMS-18
4	Chihuahua (CHI)	32.4884	-115.2420	15	Sedimentos	GeoSIG GMS-18
5	Tamaulipas (TAM)	32.5495	-115.2357	15	Sedimentos	GeoSIG GMS-18
6	Riito (RII)	32.1656	-114.9612	15	Sedimentos	GeoSIG GMS-18
7	Rancho San Luis (RSL)	32.1160	-115.8407	1490	Roca sólida	GeoSIG GMS-18
8	Santa Isabel Viejo (SIV)	31.8710	-115.8160	1500	Roca sólida	SSA-1, Kinematics
9	Héroes de la Indep. (HDI)	31.6153	-115.8822	1130	Roca sólida	Etna, Kinematics
10	R. Agua Caliente (RAC)	32.0203	-116.3012	714	Roca sólida	GeoSIG GMS-18
11	Valle de la Trinidad (VTR)	31.3985	-115.7142	750	Roca sólida	Etna, Kinematics
12	Tres Hermanos (TRH)	31.6900	-116.1900	800	Roca sólida	GeoSIG GMS-18
13	CICESE (CIC)	31.8683	-116.6642	60	Roca sólida	GeoSIG GMS-18

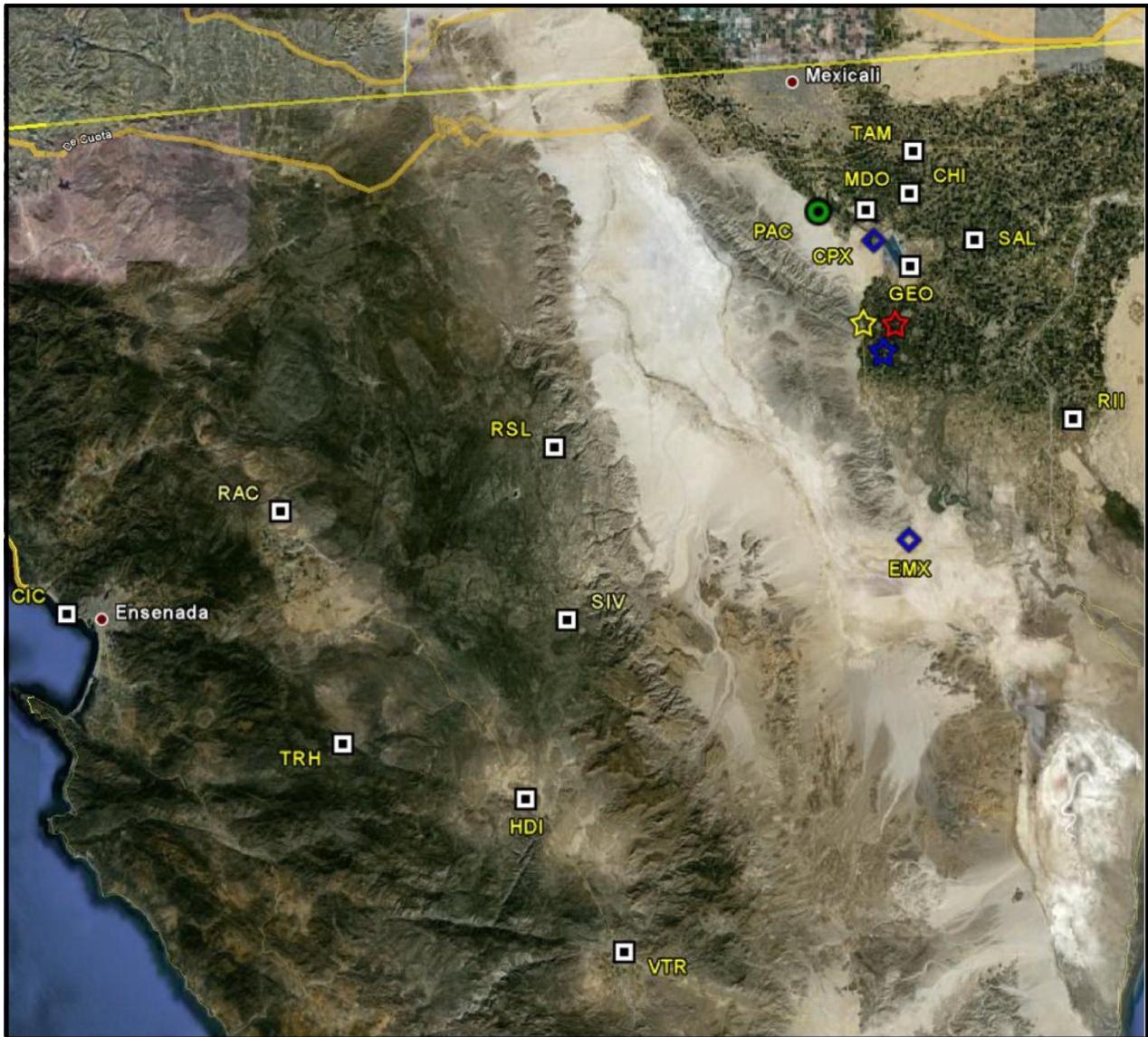


Figura 1. Cuadros blancos: estaciones de RANM; Rombos azules: estaciones de RESNOM; Círculo verde: estación de banda ancha de la UNAM; Estrella amarilla: epicentro obtenido con los datos locales de aceleración; Estrella roja: epicentro preliminar de RESNOM; Estrella azul: epicentro tomado de la página web del USGS.

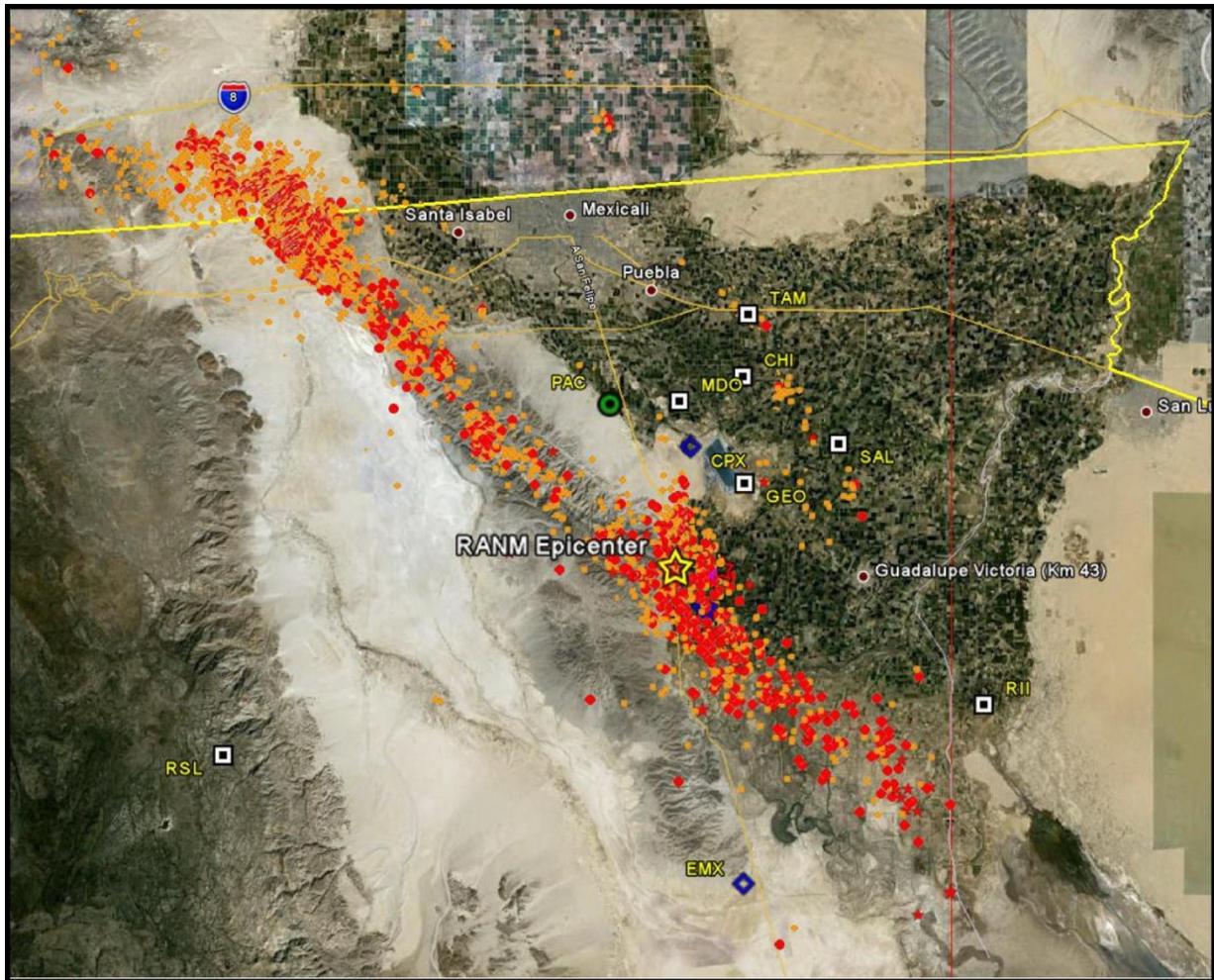


Figura 2. Estaciones de movimientos fuertes y débiles usadas en la localización del epicentro del sismo El Mayor-Cucapáh del 4 de Abril de 2010 y epicentros de réplicas localizadas por el USGS.

### **Registros de aceleración, velocidad y desplazamiento producidos por el evento principal**

La Tabla 2 contiene información concerniente a las estaciones acelerográficas que registraron el evento principal del 4 de Abril de 2010. Para cada sitio, la tabla incluye información de la instrumentación en operación, la distancia al epicentro y las aceleraciones máximas registradas en las direcciones Norte, Vertical y Este.

La Tabla 3 muestra estimaciones de los valores máximos de velocidad y desplazamiento obtenidos al integrar una y dos veces con respecto al tiempo los registros de aceleración. Es importante mencionar que los valores máximos de desplazamiento se obtuvieron de registros filtrados entre 0.04 and 50 Hertz.

Con referencia a las Tablas 2 y 3, resulta obvio que los valores máximos de las aceleraciones, velocidades y desplazamientos registrados en sitios sedimentarios (a distancias de entre 12 y 35 km) son considerablemente más altos que los registrados en sitios sobre roca (a distancias de 60 a 140 km). En sedimentos las aceleraciones pico registradas varían de 145 a 799 gales (0.148 g a 0.815 g), mientras que en los sitios sobre roca las aceleraciones máximas van de 13 a 73 gales (0.013 g a 0.074 g). Deberá notarse que las aceleraciones más altas se registraron en la componente de movimiento vertical de estaciones localizadas sobre sedimentos. Por otro lado, las estaciones en sedimentos registraron velocidades y desplazamientos pico que están entre 14 y 61 cm/seg y 9 y 52 cm, respectivamente. En el caso de estos parámetros, los valores de amplitud más altos se observaron siempre en las componentes de movimiento horizontal. De gran interés notar también que, en promedio, los valores pico de los parámetros de movimientos fuertes registrados en roca sólida son alrededor de 10 veces más bajos que los registrados sobre sedimentos. Finalmente, las últimas dos columnas a la derecha de la Tabla 3 muestran estimaciones preliminares del momento sísmico,  $M_o$ , y la magnitud momento,  $M_w$ , obtenidas de los datos locales de movimientos fuertes. Se notará que la magnitud  $M_w$  estimada es solo 0.2 unidades más baja que la correspondiente magnitud asignada por el USGS con base en datos de información sísmica regional.

Tabla 2

Estación	Distancia (km)	Aceleración pico (cm/seg <sup>2</sup> )			Acelerógrafos (todos de 2g)
		Norte	Vertical	Este	
Geotérmica (GEO)	12	282	-385	-281	Etna, Kinematics
Saltillo (SAL)	19	-145	172	-150	GeoSIG GMS-18
M. de Ocampo (MDO)	19	-404	799	-527	GeoSIG GMS-18
Chihuahua (CHI)	21	-193	274	-244	GeoSIG GMS-18
Tamaulipas (TAM)	28	222	-208	-203	GeoSIG GMS-18
Riito (RII)	33	376	668	393	GeoSIG GMS-18
Rancho San Luis (RSL)	58	49	-37	60	GeoSIG GMS-18
Santa Isabel Viejo (SIV)	70	31	19	34	SSA-1, Kinematics
Héroes de la Indep. (HDI)	96	72	38	-38	Etna, Kinematics
Rancho Agua Caliente (RAC)	102	-64	-59	-73	GeoSIG GMS-18
Valle de la Trinidad (VTR)	108	33	-22	23	Etna, Kinematics

<b>Tres Hermanos (TRH)</b>	<b>110</b>	<b>43</b>	<b>39</b>	<b>-46</b>	<b>GeoSIG GMS-18</b>
<b>CICESE (CIC)</b>	<b>140</b>	<b>-19</b>	<b>13</b>	<b>23</b>	<b>GeoSIG GMS-18</b>

Tabla 3

Estación	Velocidad máxima (cm/seg)			Desplazamiento máximo (cm)			Momento sísmico (dina-cm)	Mag $M_w$
	Norte	Vertical	Este	Norte	Vertical	Este		
Geotérmica	-48.5	18.1	42.1	-35.4	-13.0	28.2	2.48 e 26	6.9
Saltillo	-36.7	-19.2	-45.6	34.2	-13.8	-43.6	6.54 e 26	7.1
M. de Ocampo	43.4	17.2	61.0	-20.1	8.5	-32.7	2.72 e 26	6.9
Chihuahua	34.2	16.0	38.5	30.9	13.0	47.9	6.30 e 26	7.1
Tamaulipas	52.8	-14.1	34.3	-52.2	-9.9	-23.6	6.41 e 26	7.1
Riíto	37.8	-15.4	-51.9	20.3	10.6	42.8	5.97 e 26	7.1
Rancho San Luis	4.7	-2.4	-5.3	4.3	-2.1	-3.9	1.53 e 26	6.7
Santa Isabel Viejo	3.9	-2.5	2.6	-3.9	1.4	2.1	1.86 e 26	6.8
Héroes de la Indep.	2.7	2.1	-3.3	2.2	1.2	-1.6	1.42 e 26	6.7
Rancho Agua Caliente	4.1	-2.6	3.9	-3.1	1.2	-3.3	2.27 e 26	6.8
Valle de la Trinidad	3.2	-2.4	-2.3	2.1	1.4	-1.8	1.94 e 26	6.8
Tres Hermanos	-3.3	2.6	-4.3	-2.8	-0.9	-3.6	2.12 e 26	6.8
CICESE	3.7	1.6	3.0	-4.2	-1.2	-2.1	2.89 e 26	6.9
<b>Momento sísmico promedio: <math>3.4 \times 10^{26}</math> dina-cm; Magnitud momento promedio: 7.0</b>								

### Espectros de Fourier de desplazamiento y espectros de respuesta

Desde el punto de vista de la ingeniería, un análisis detallado de la composición espectral de los movimientos registrados es de importancia crítica para entender cómo es el comportamiento de las estructuras durante los intensos movimientos sísmicos. Durante la ocurrencia de sismos fuertes, se espera que la forma de los espectros de respuesta resulte influenciada por las condiciones del subsuelo en los sitios de registro. La experiencia con sismos regionales de magnitud pequeña indica amplificaciones

moderadas de los movimientos sísmicos debidas a que ante movimientos débiles los materiales del subsuelo muestran un comportamiento lineal y un bajo amortiguamiento. En cambio, para movimientos sísmicos de muy alto nivel la respuesta sísmica de depósitos sedimentarios puede ser no lineal. En tales situaciones, el módulo de rigidez de los materiales se reduce, su atenuación se incrementa y, como resultado, los movimientos a altas frecuencias en el espectro de respuesta resultan más deamplificados que los movimientos a bajas frecuencias.

Uno de los aspectos de mayor relevancia del sismo El Mayor-Cucapáh fue su gran potencial para inducir el fenómeno de licuefacción en materiales saturados del Valle de Mexicali. Como resultado de ese fenómeno, se observaron severos desplazamientos horizontales y asentamientos verticales del suelo en diversas zonas del valle. Estas observaciones constituyen una clara evidencia de comportamiento no lineal de los suelos blandos en la vecindad del epicentro, y son también los responsables del daño causado a un número significativo de construcciones tanto en la ciudad como en el Valle de Mexicali. Una gran cantidad de canales de irrigación dañados por el sismo dieron lugar a un fuerte impacto negativo en las actividades agrícolas y económicas de la región.

En este reporte se incluyen gráficas de espectros de Fourier y de respuesta calculados con datos de aceleración registrados durante el sismo El Mayor-Cucapáh en sitios ubicados sobre sedimentos y sobre roca en la región norte de Baja California. Los espectros de respuesta de aceleración absoluta (SA), pseudo velocidad (PSV), pseudo aceleración (PSA) y desplazamiento relativo (SD) fueron calculados para un 5 % de amortiguamiento. Se espera que un análisis detallados de los datos de movimientos fuertes registrados por estaciones de RANM, para el evento principal y las réplicas de mayor magnitud, resulten en valiosa información adicional.

Las figuras 3 a 80 mostradas a continuación corresponden a los registros de movimientos fuertes y espectros de cada una de las estaciones de RANM que se activó con el sismo principal del 4 de Abril de 2010.

## **Agradecimientos**

Los fondos para la operación de RANM y para las investigaciones que se encuentran actualmente en desarrollo los proporcionan el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B. C. (CICESE) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT, Contrato CB-2007-01-83878). El CONACYT proporcionó también los fondos para la adquisición de 12 nuevos acelerógrafos Geosig para RANM. Se agradece a Antonio Vidal, Ignacio Méndez, Francisco Farfán y Sergio Arregui por su apoyo en el uso de los datos del sistema RESNOM. Javier Lermo (UNAM) puso a nuestra disposición los datos digitales de una estación de banda ancha que había

instalado en la región epicentral con anterioridad al sismo principal. Finalmente, nuestro proyecto se beneficia continuamente del apoyo administrativo que proporcionan la Sra. Gabriela Hernández y el personal administrativo del CICESE en general.

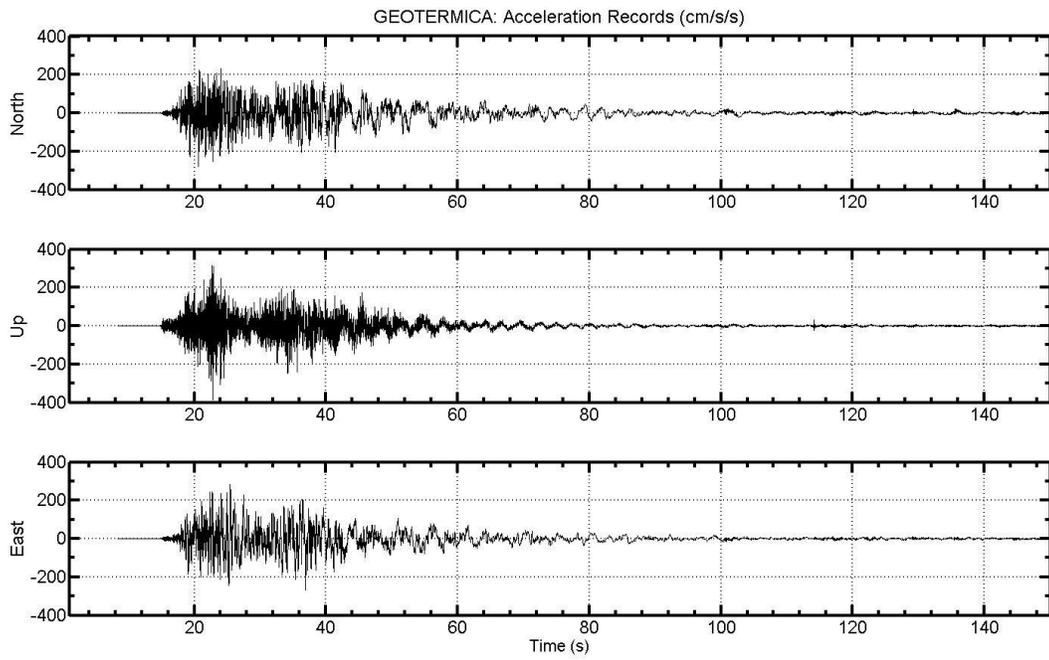


Figura 3

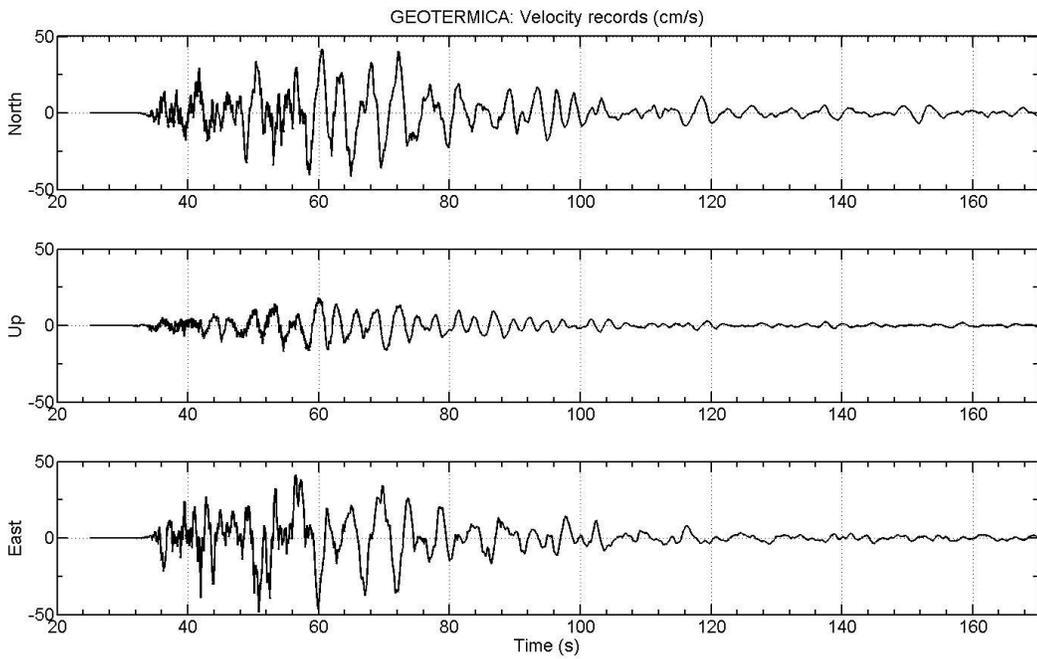


Figure 4

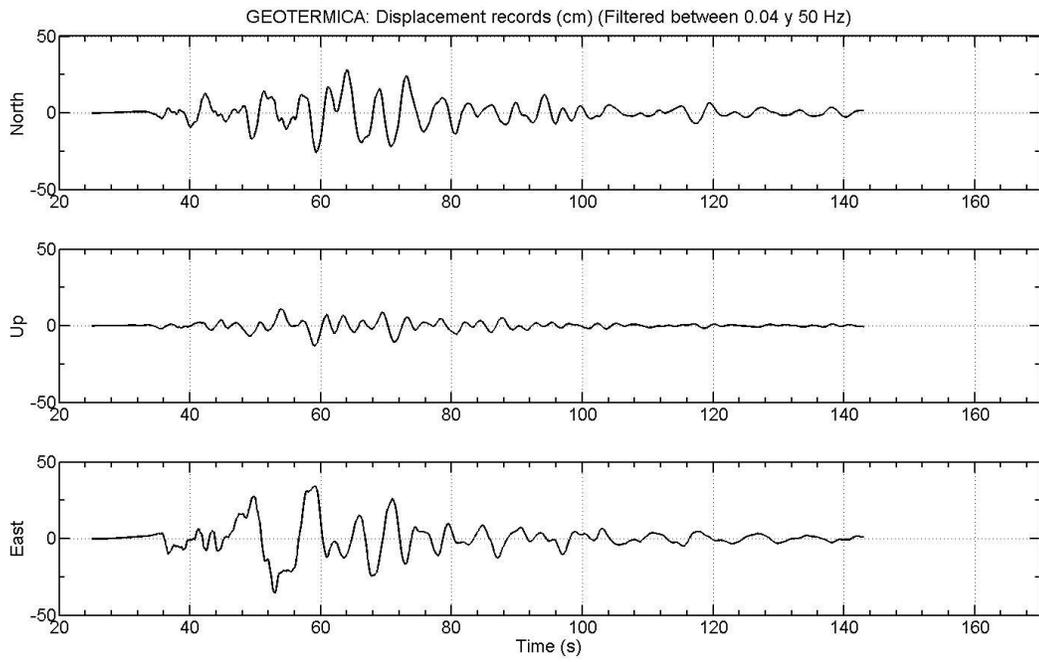


Figure 5

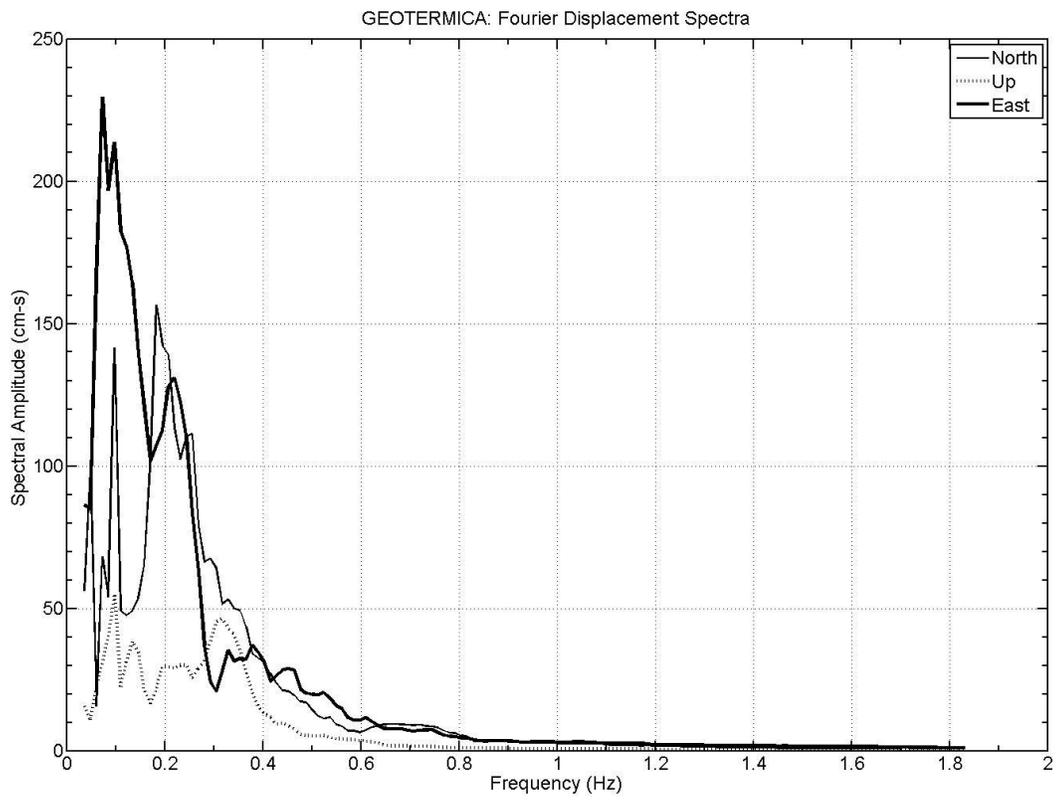


Figure 6

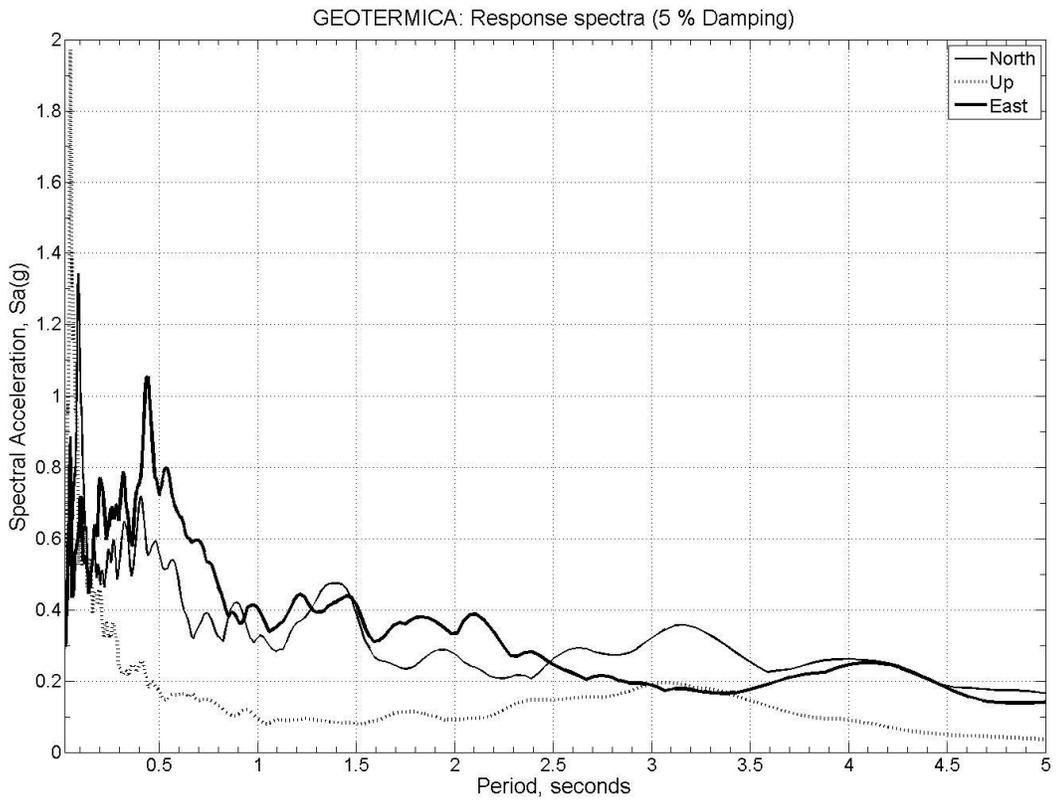


Figure 7

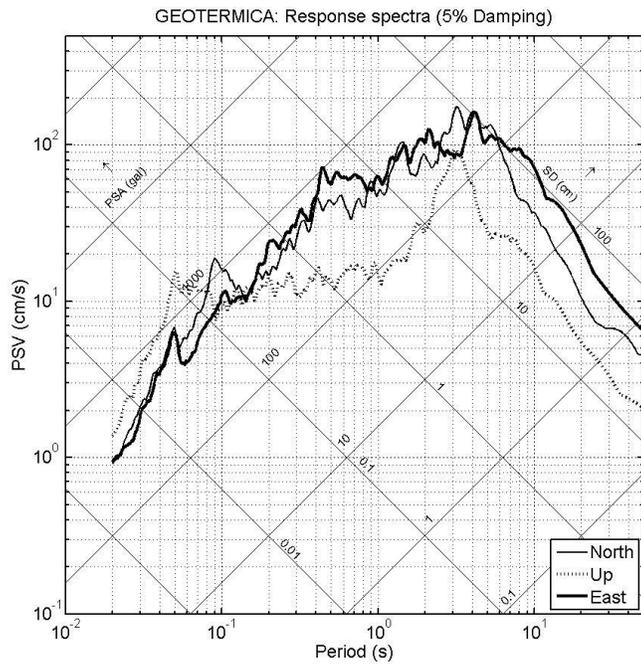


Figure 8

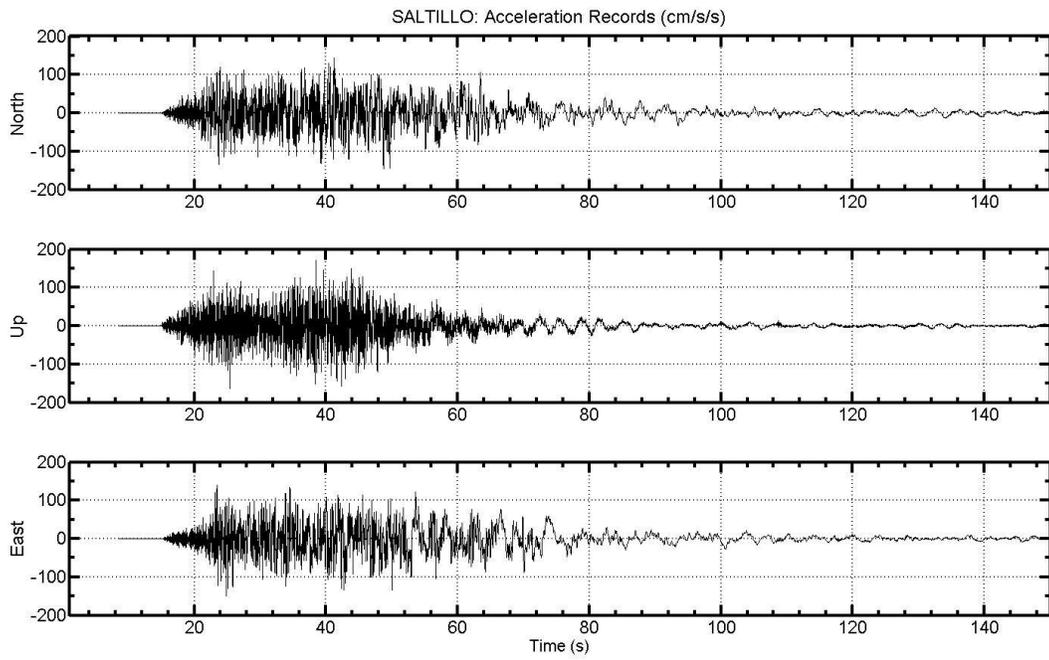


Figure 9

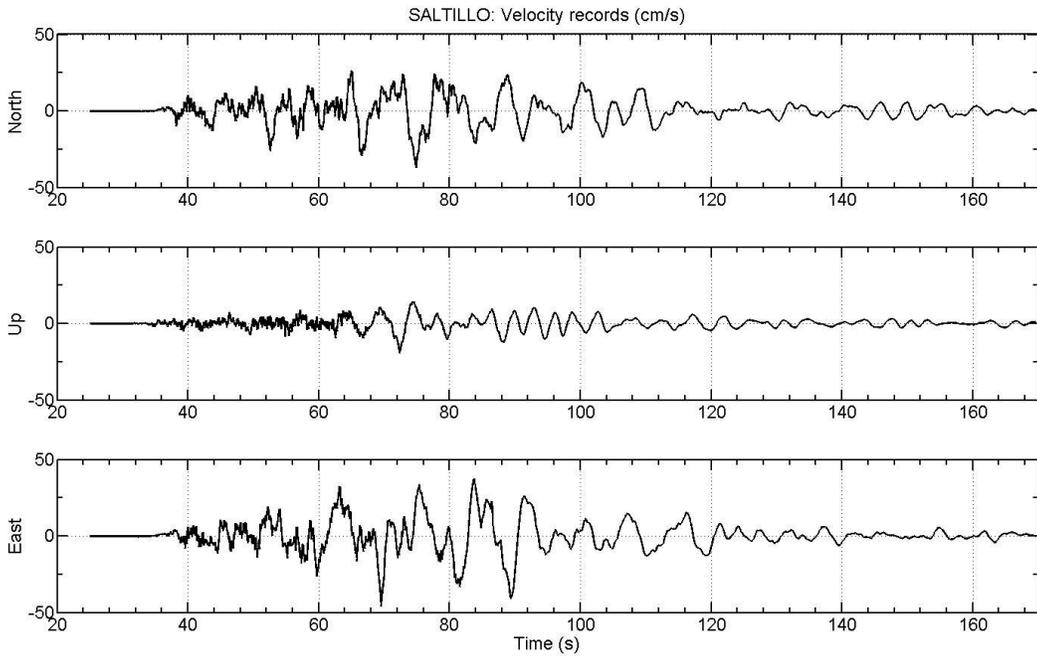


Figure 10

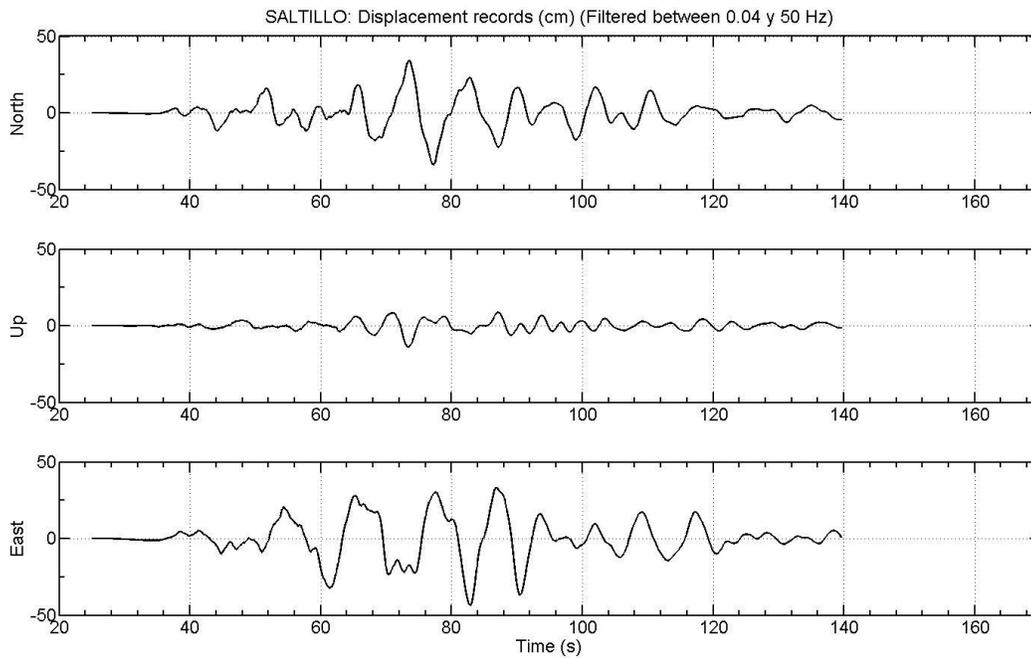


Figure 11

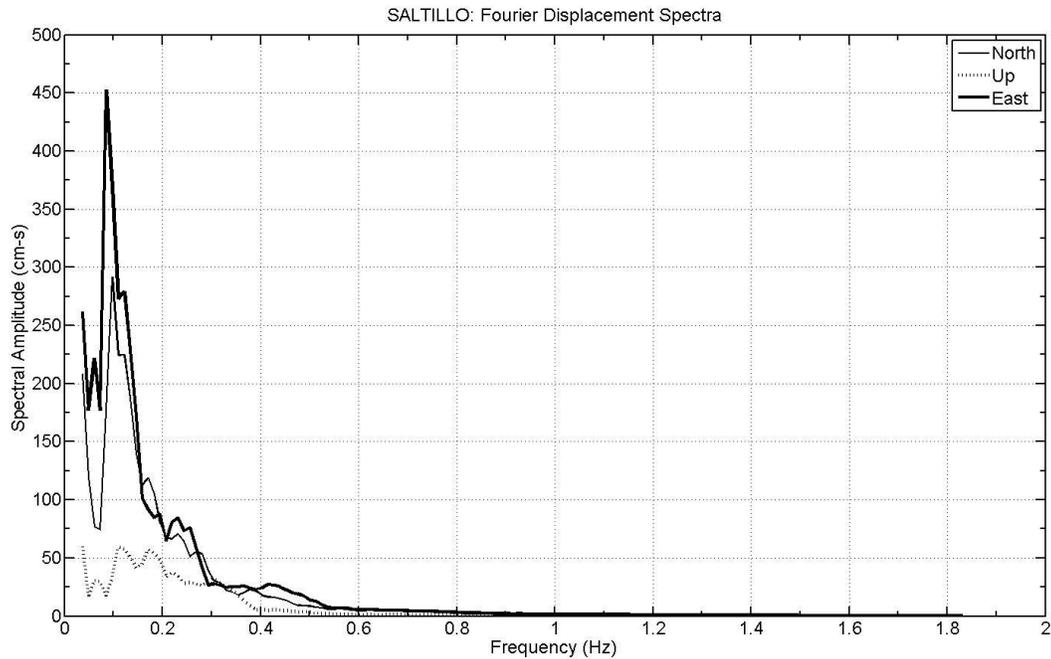


Figure 12

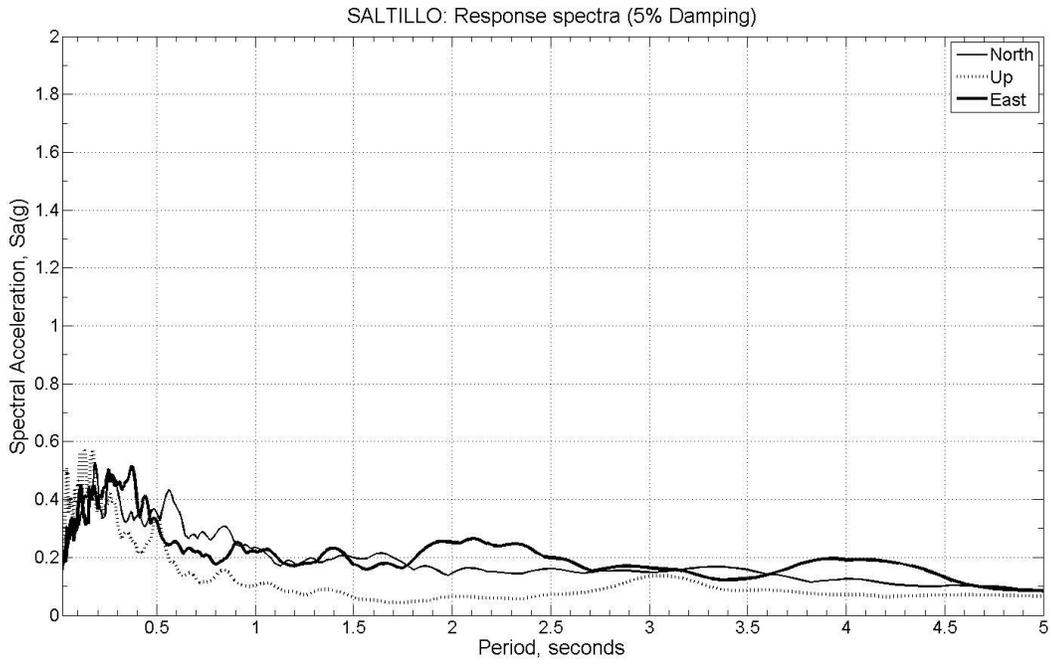


Figure 13

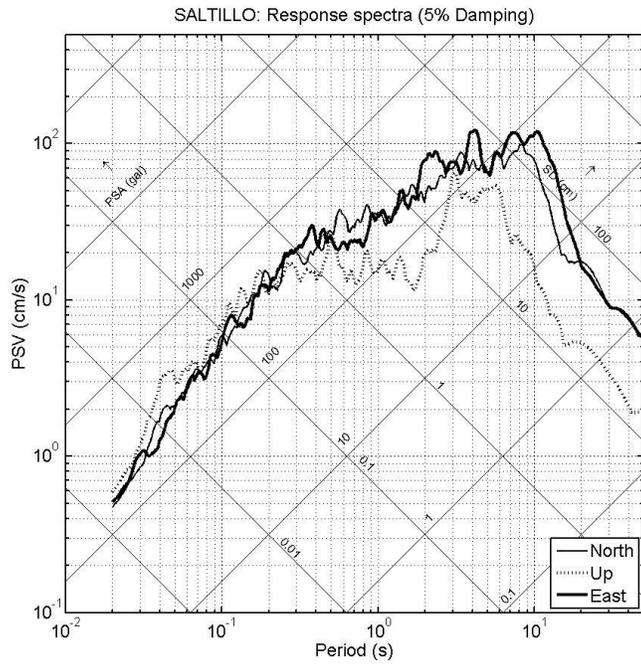


Figure 14

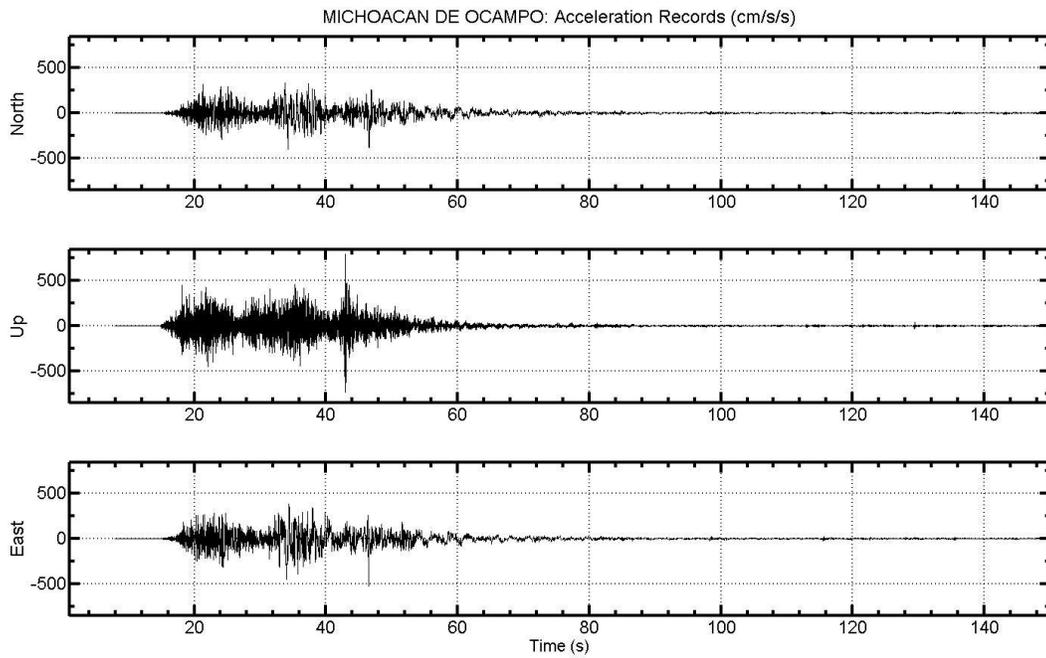


Figure 15

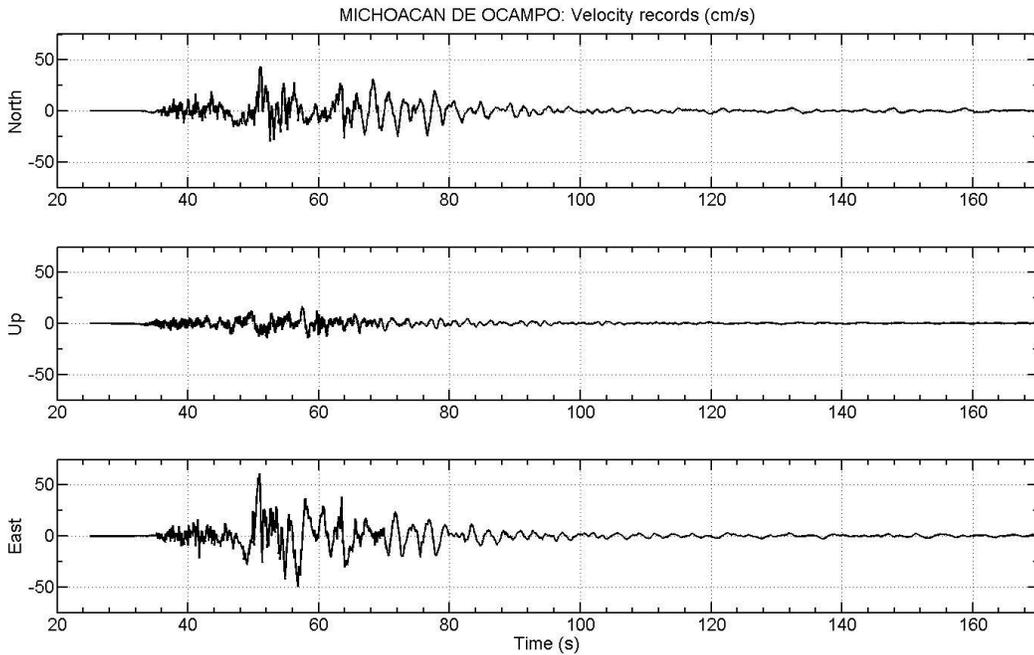


Figure 16

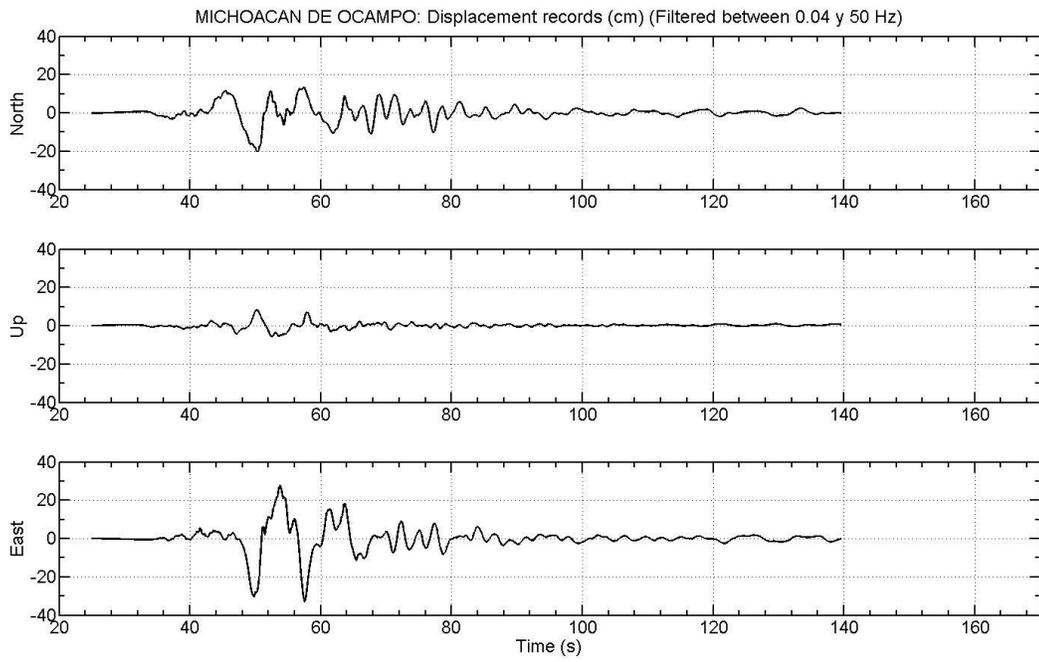


Figure 17

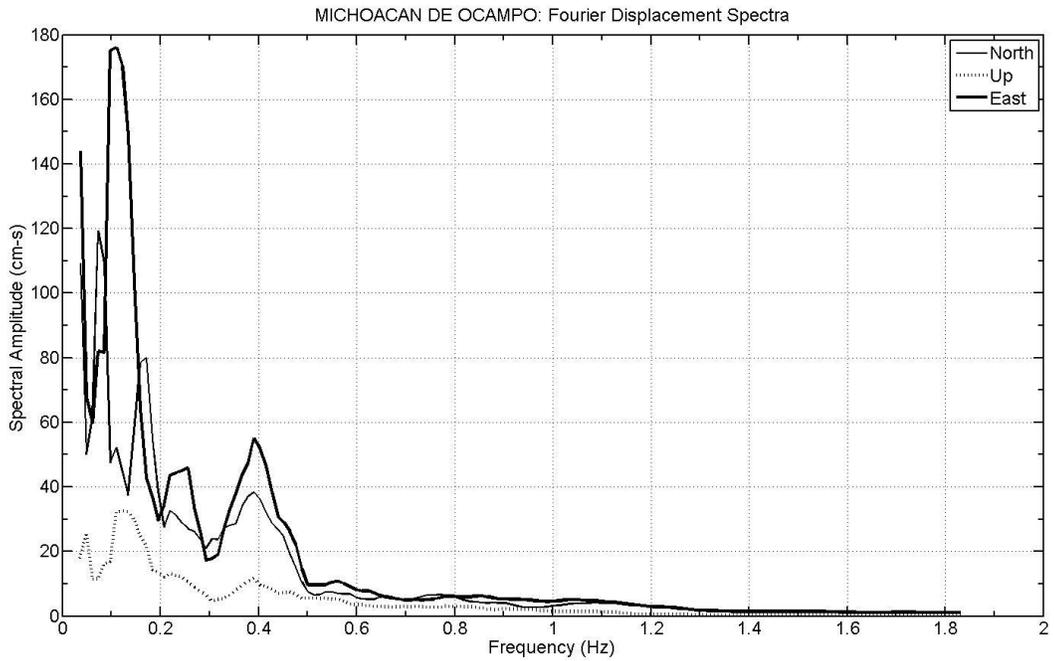


Figure 18

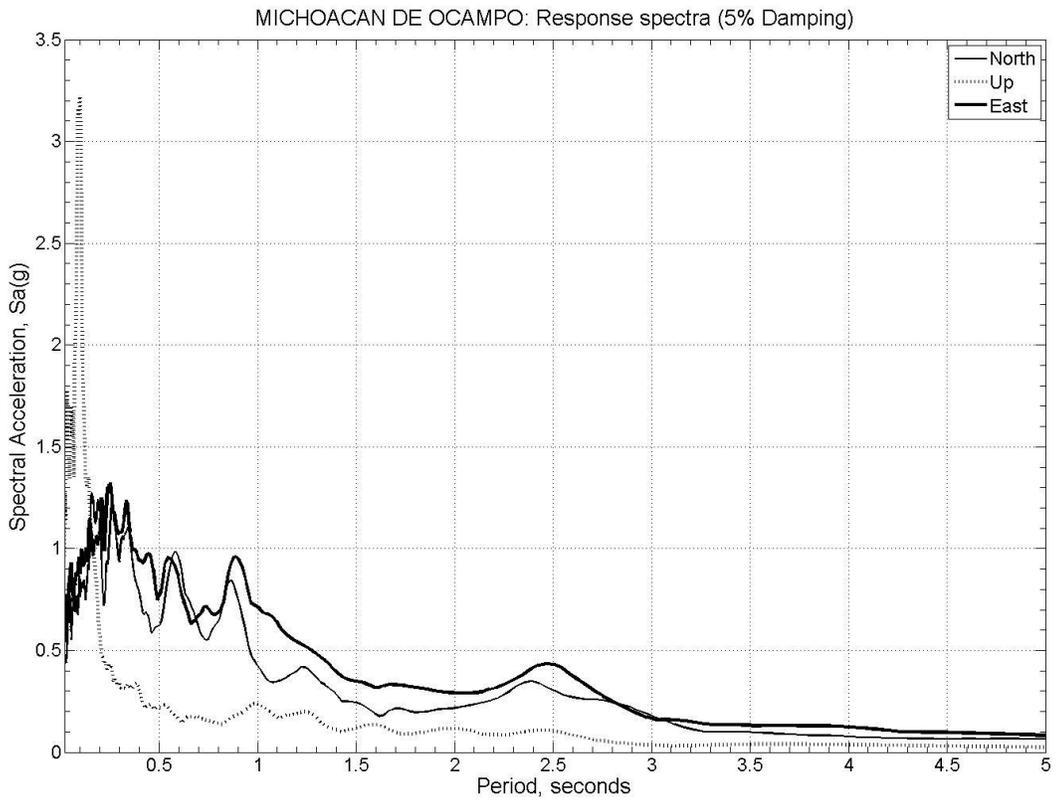


Figure 19

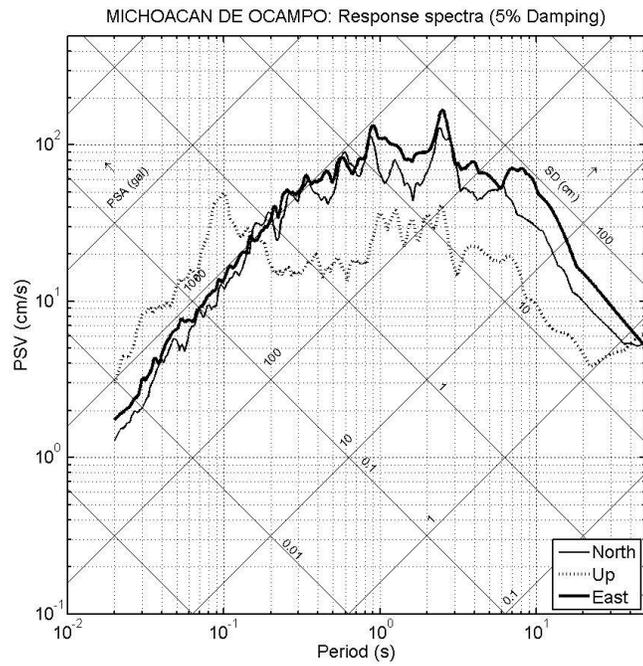


Figure 20

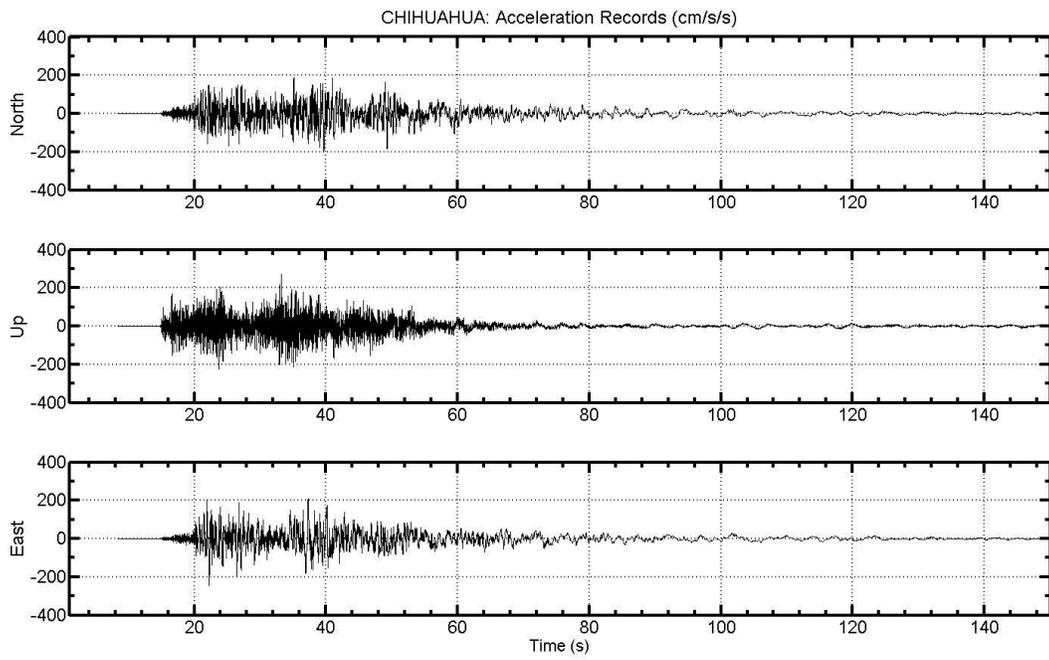


Figure 21

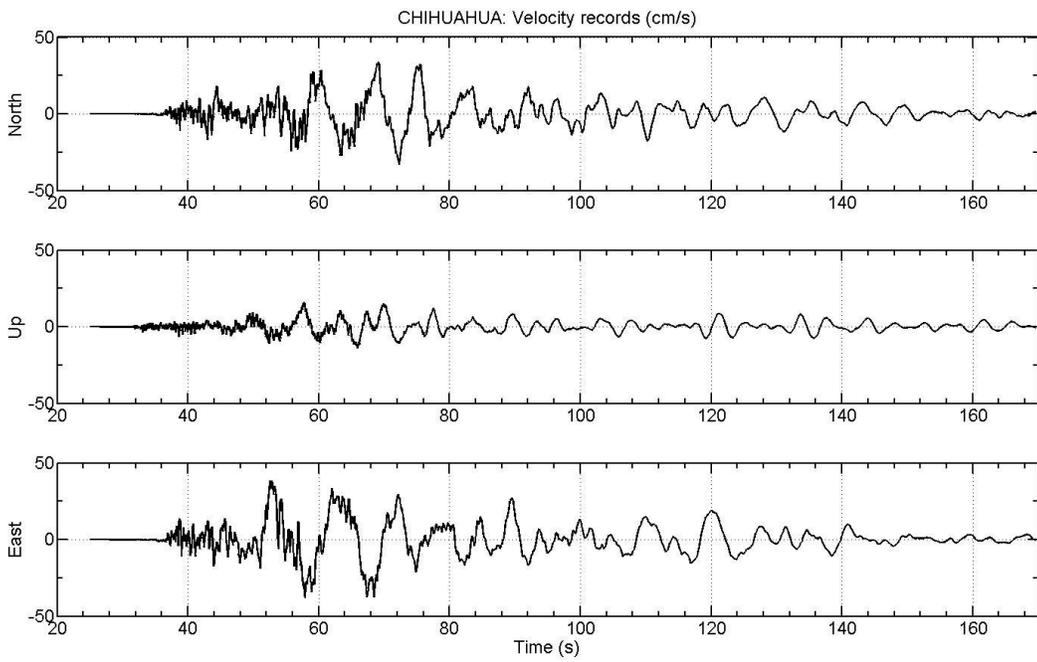


Figure 22

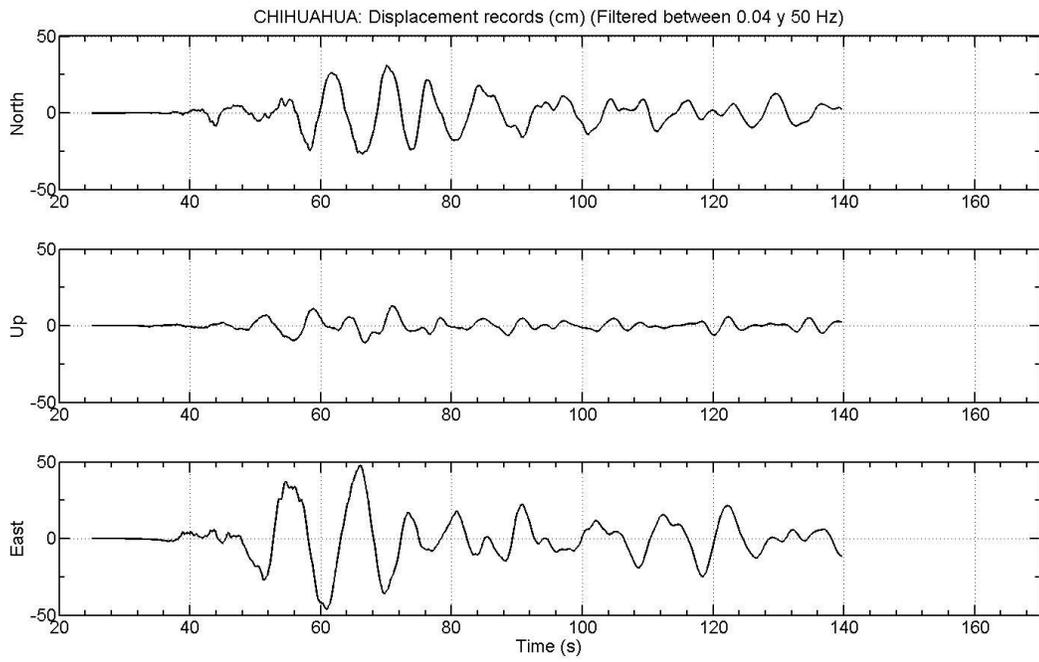


Figure 23

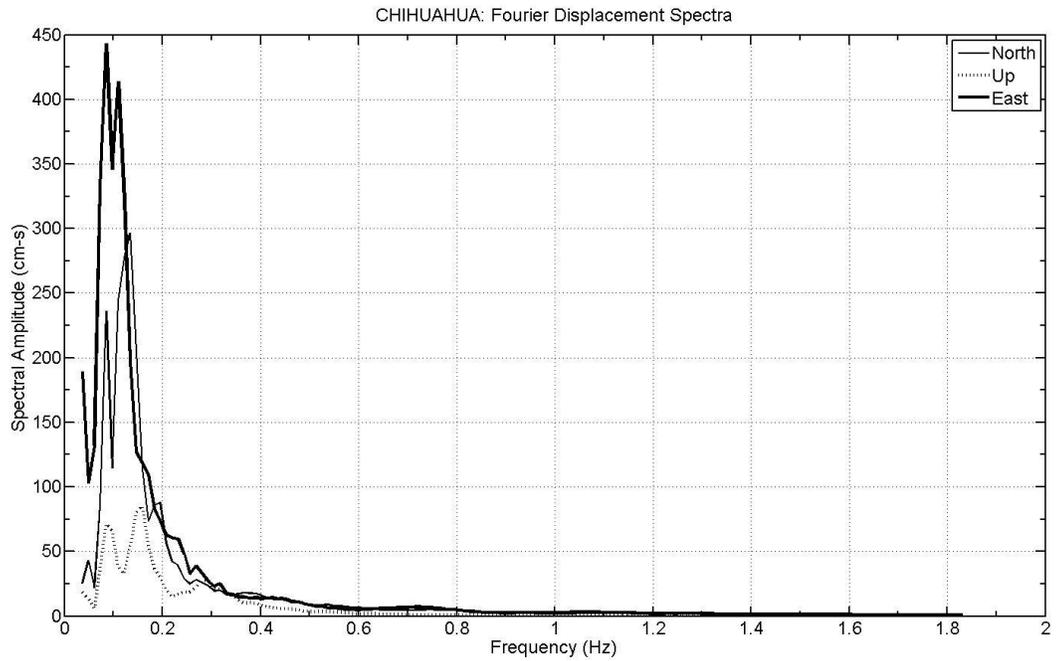


Figure 24

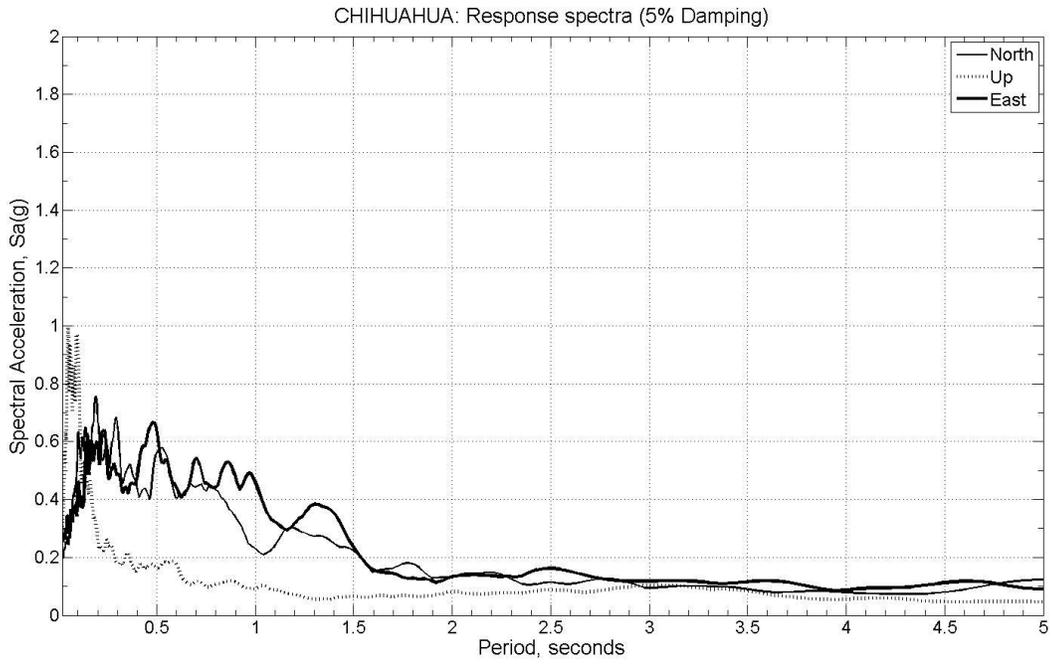


Figure 25

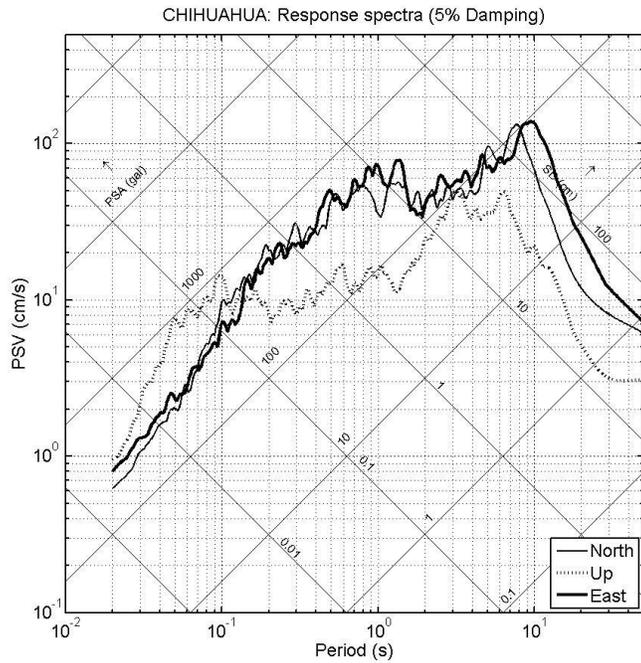


Figure 26

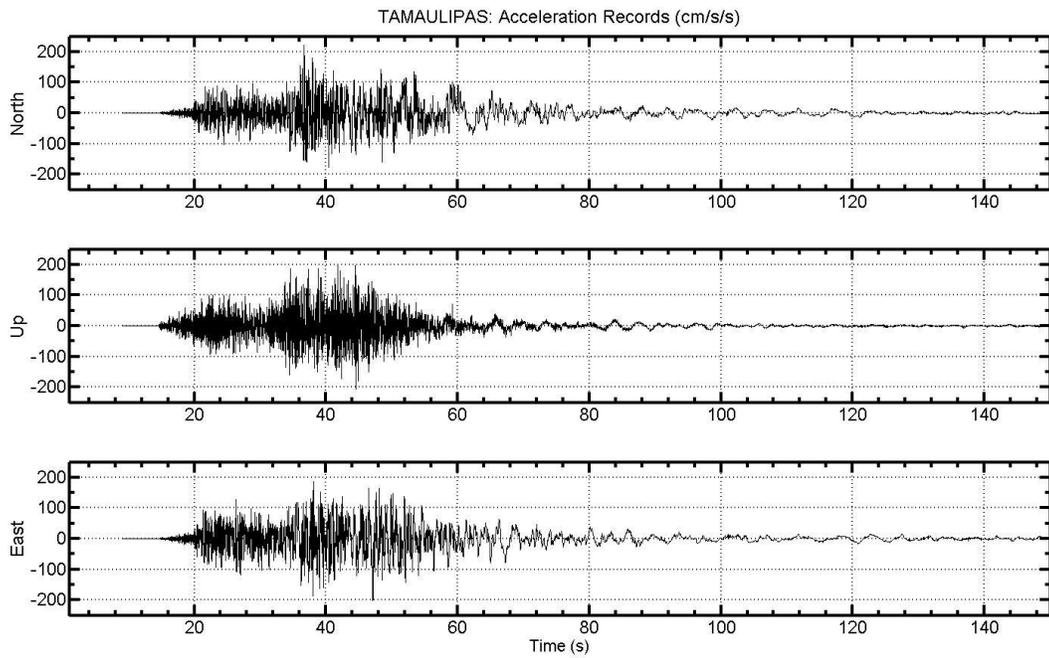


Figure 27

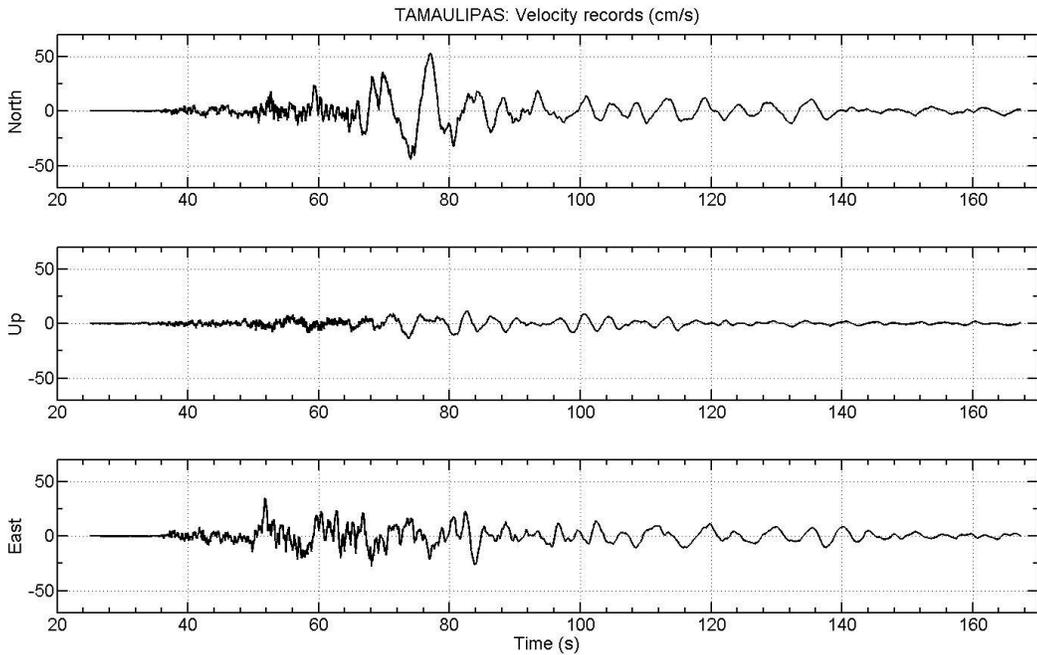


Figure 28

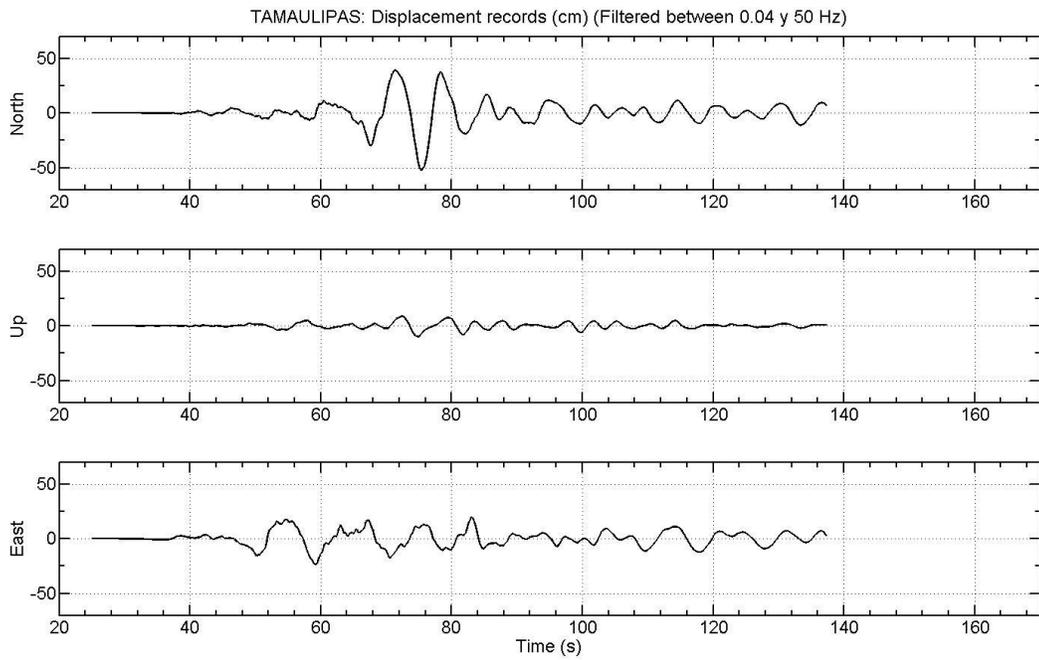


Figure 29

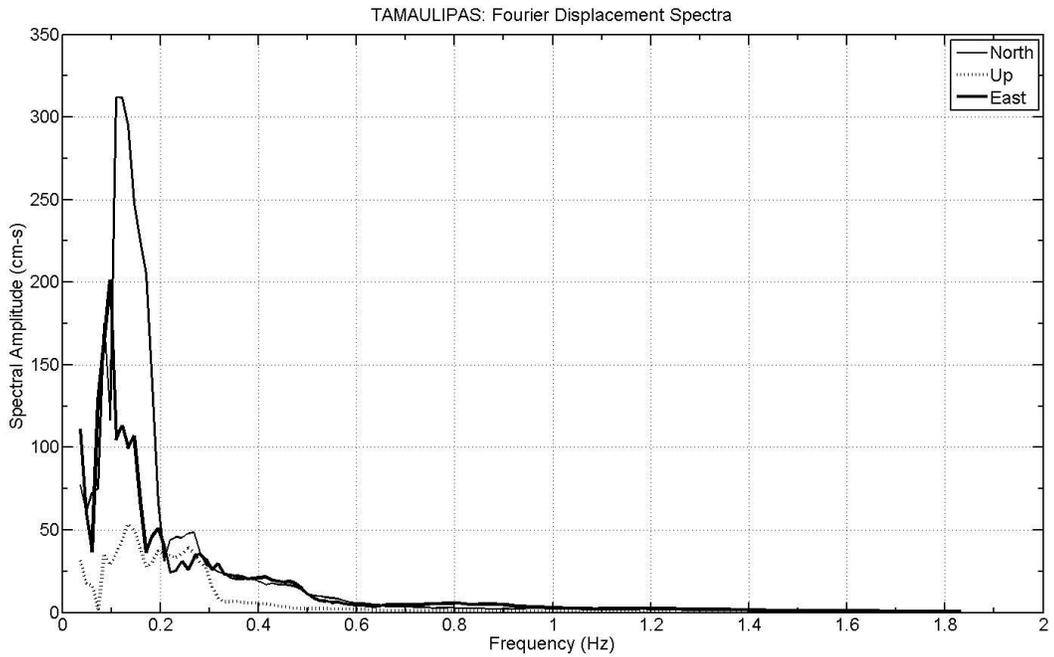


Figure 30

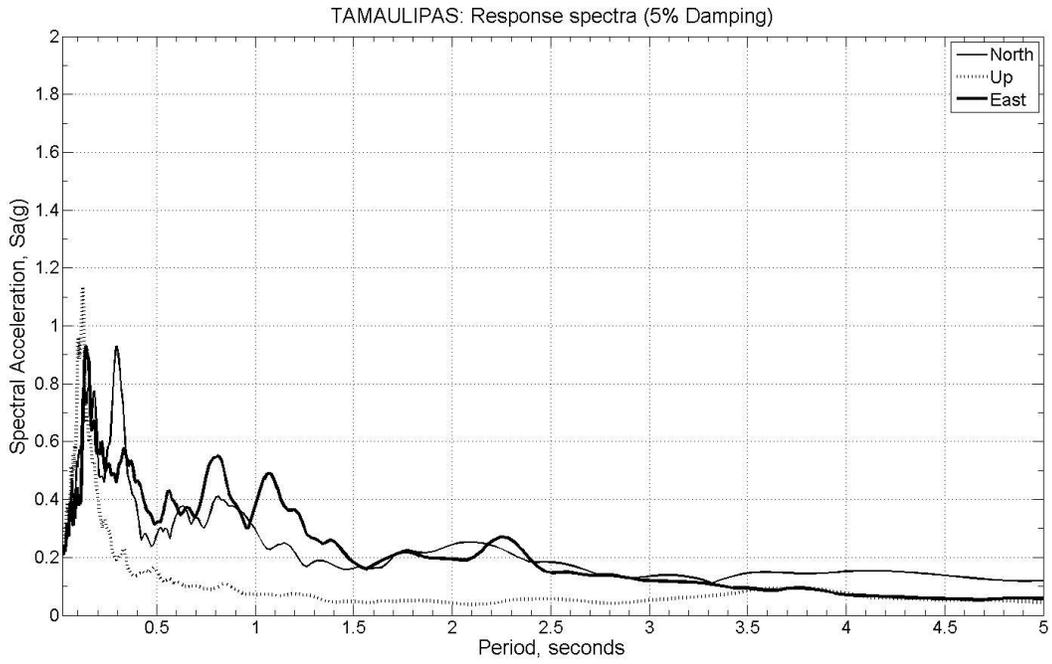


Figure 31

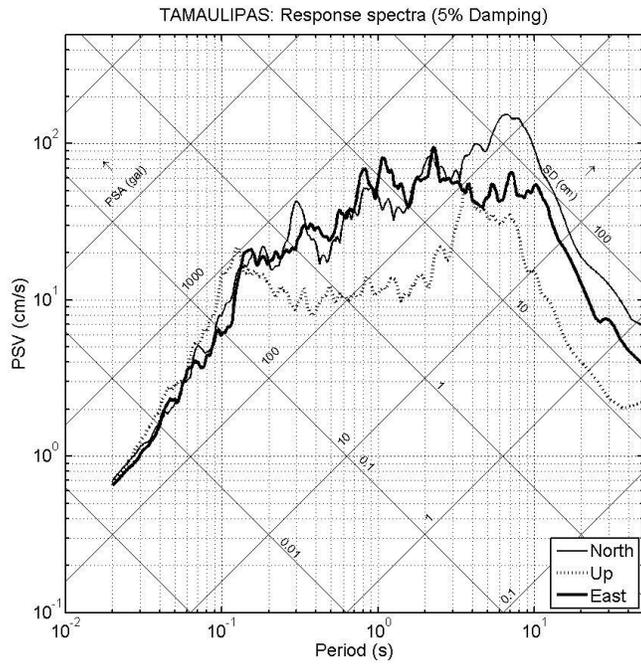


Figure 32

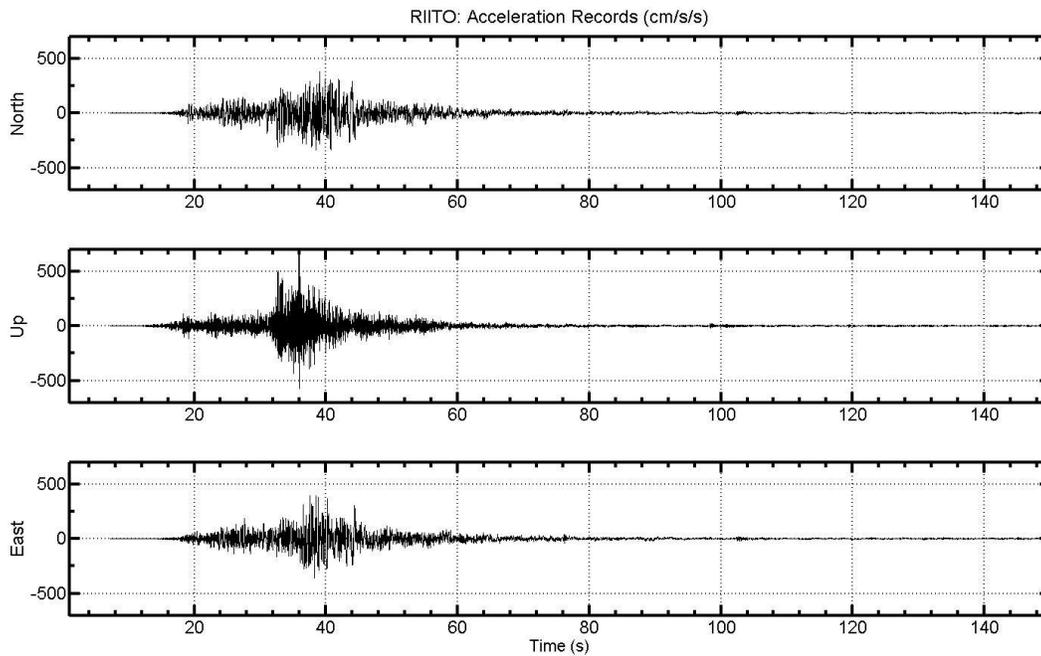


Figure 33

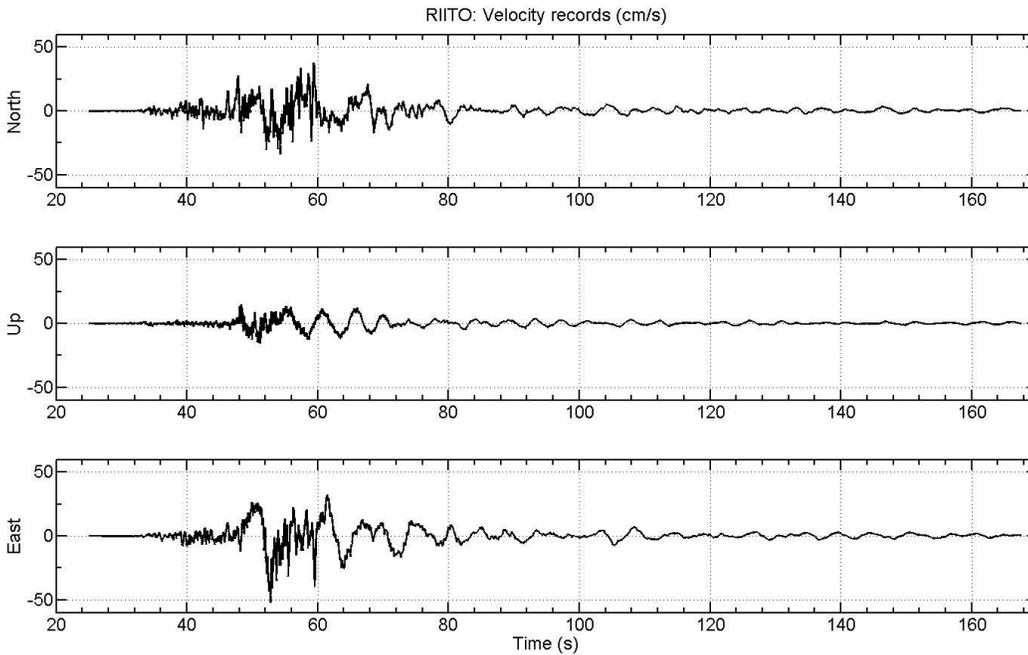


Figure 34

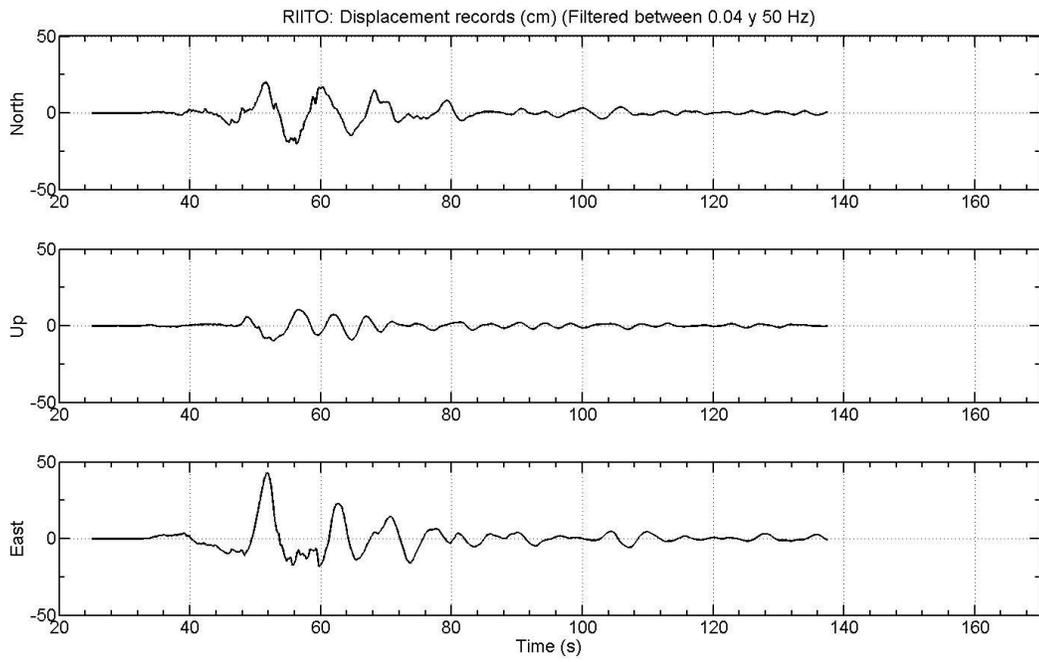


Figure 35

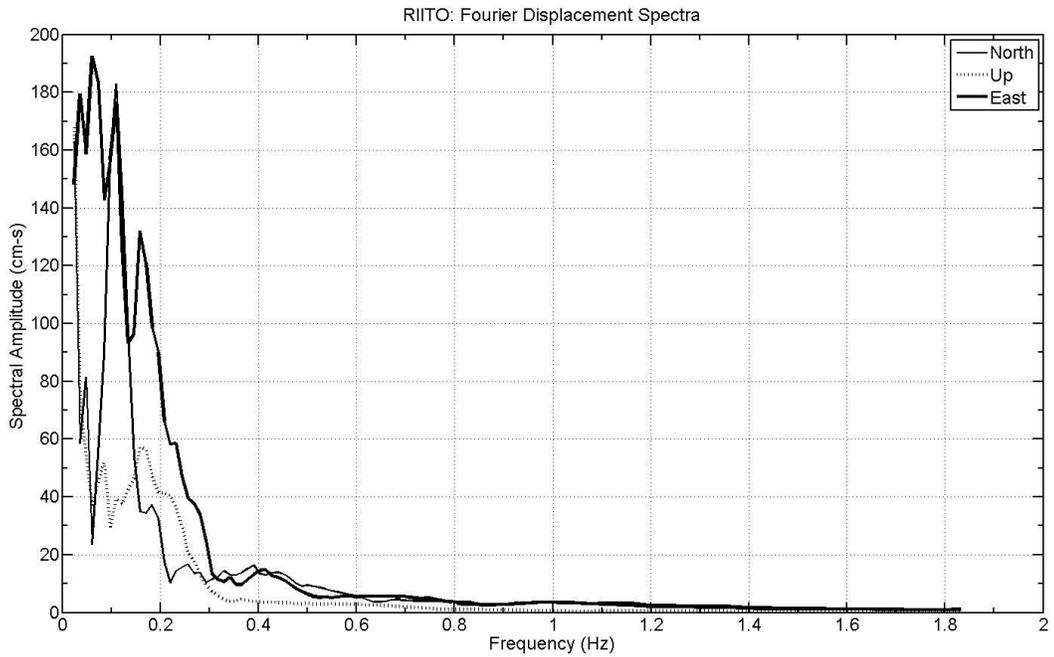


Figure 36

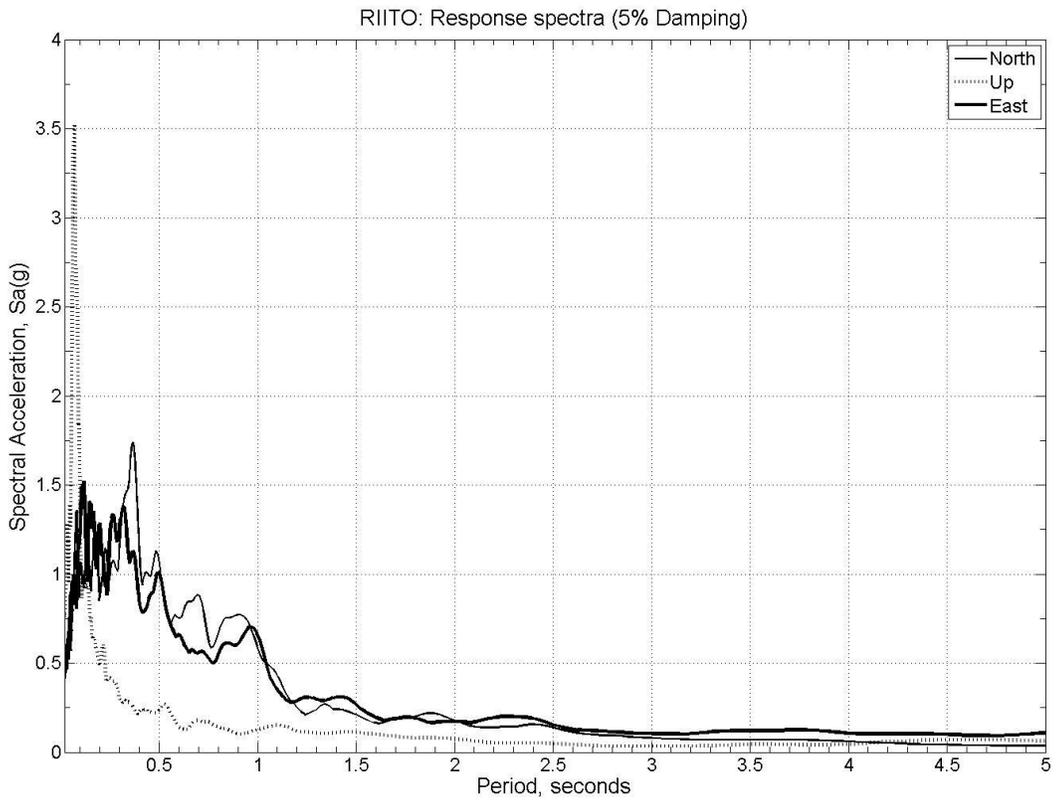


Figure 37

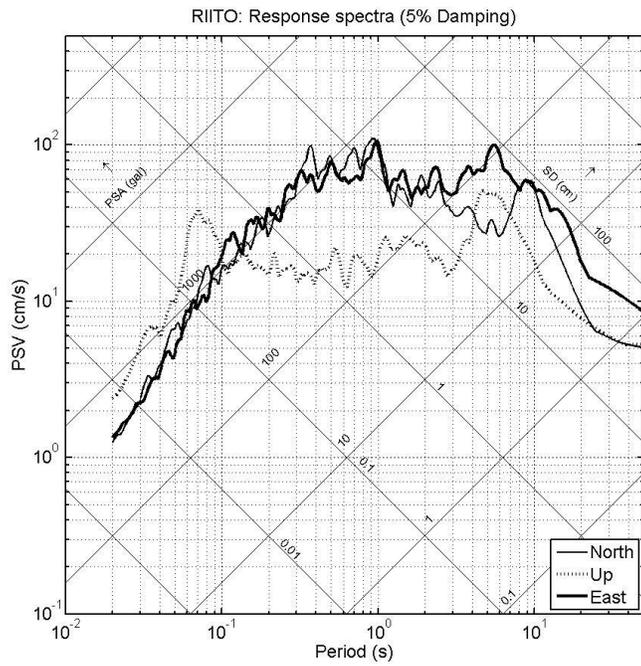


Figure 38

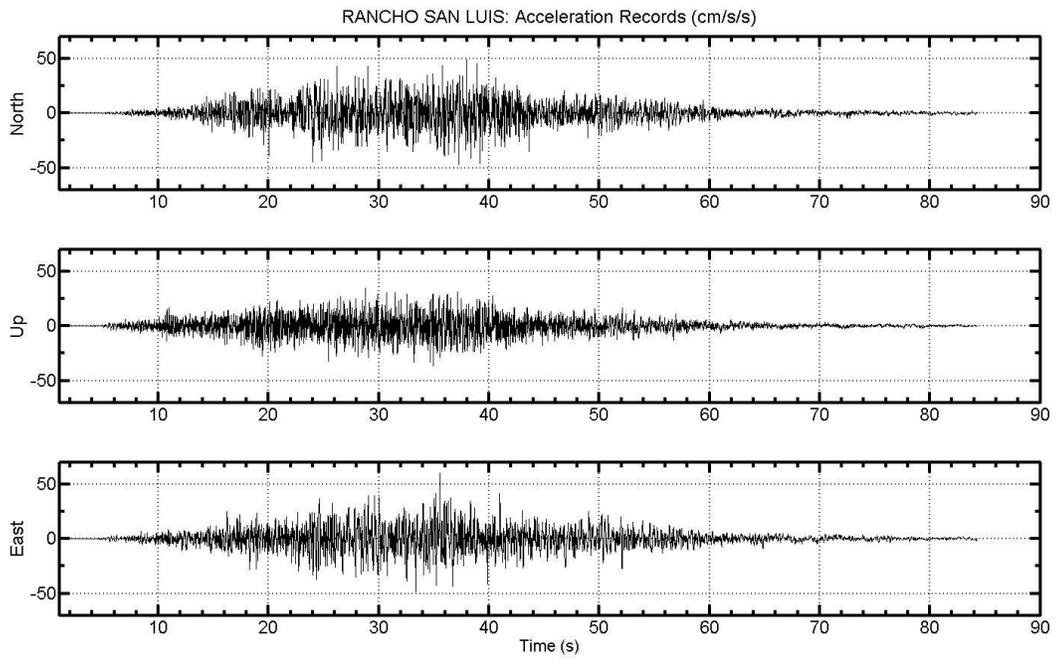


Figure 39

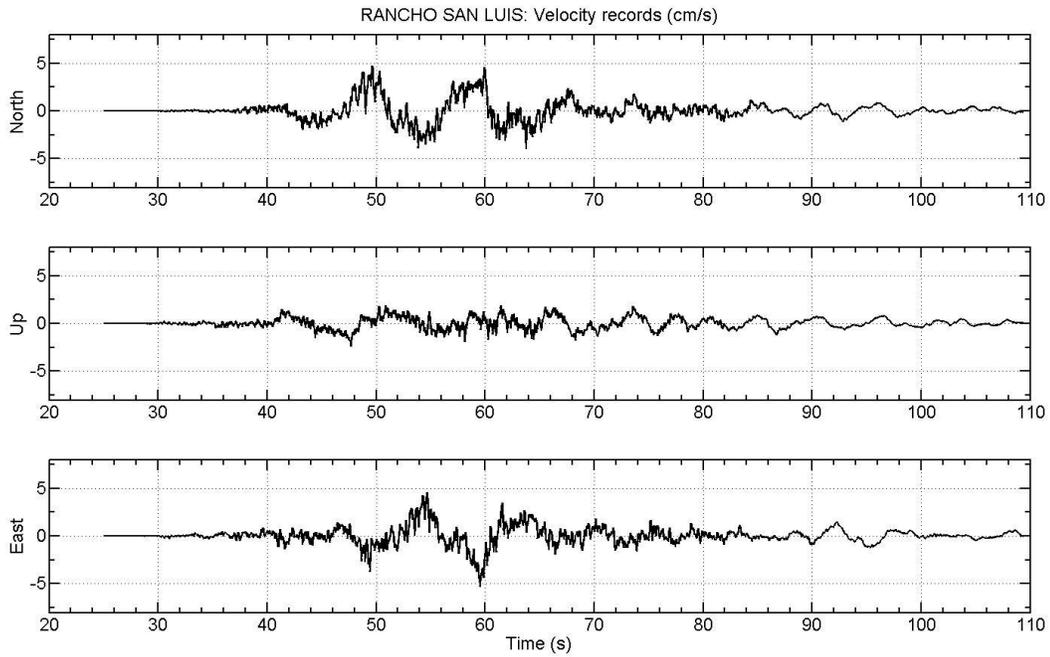


Figure 40

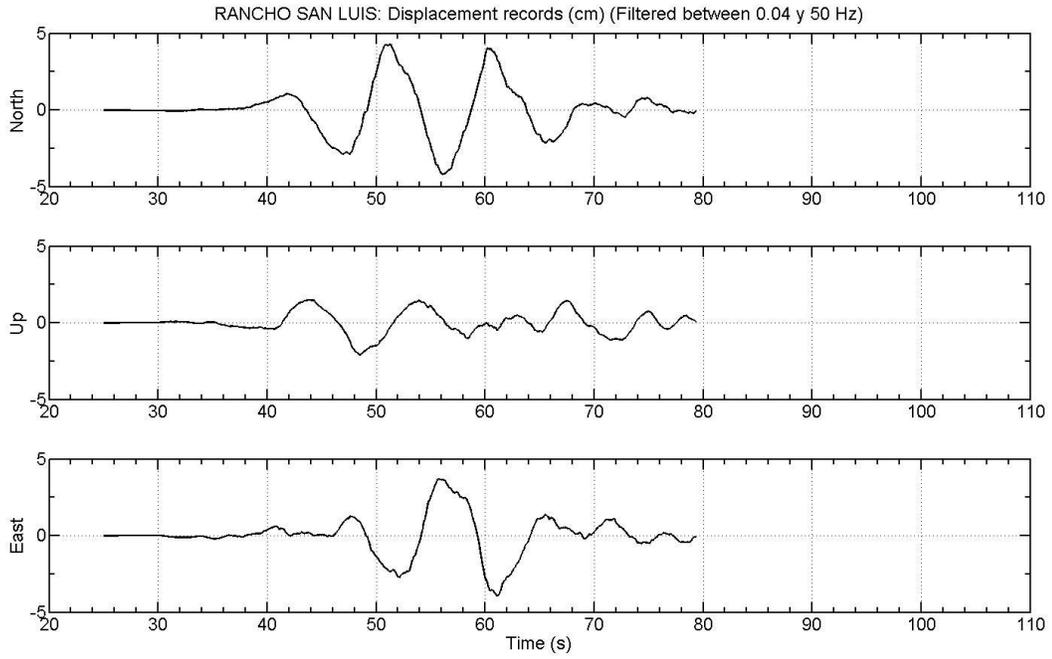


Figure 41

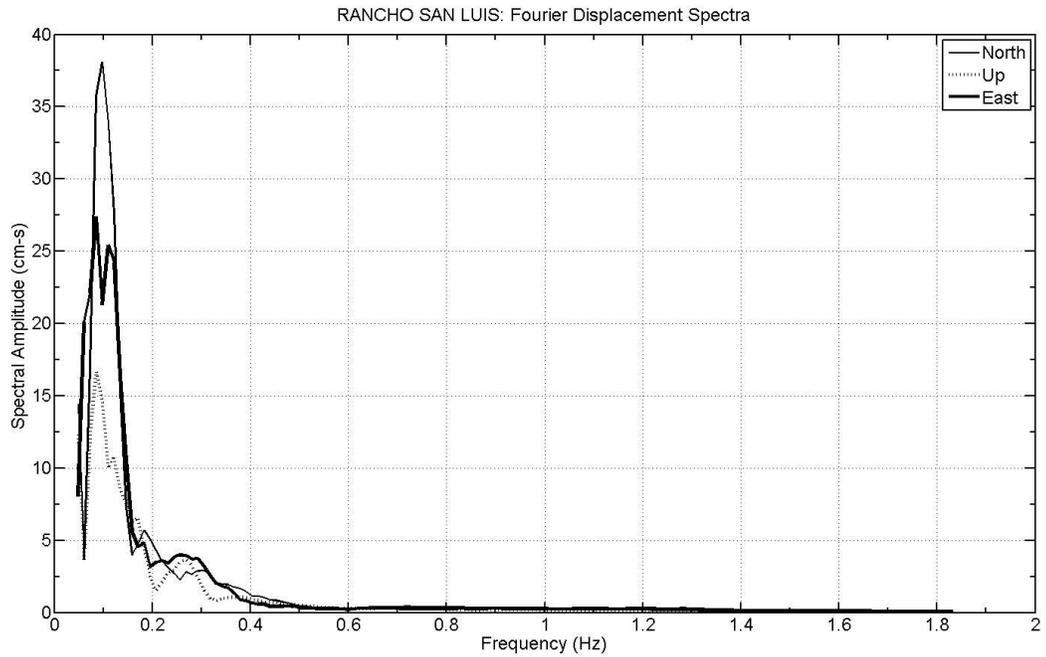


Figure 42

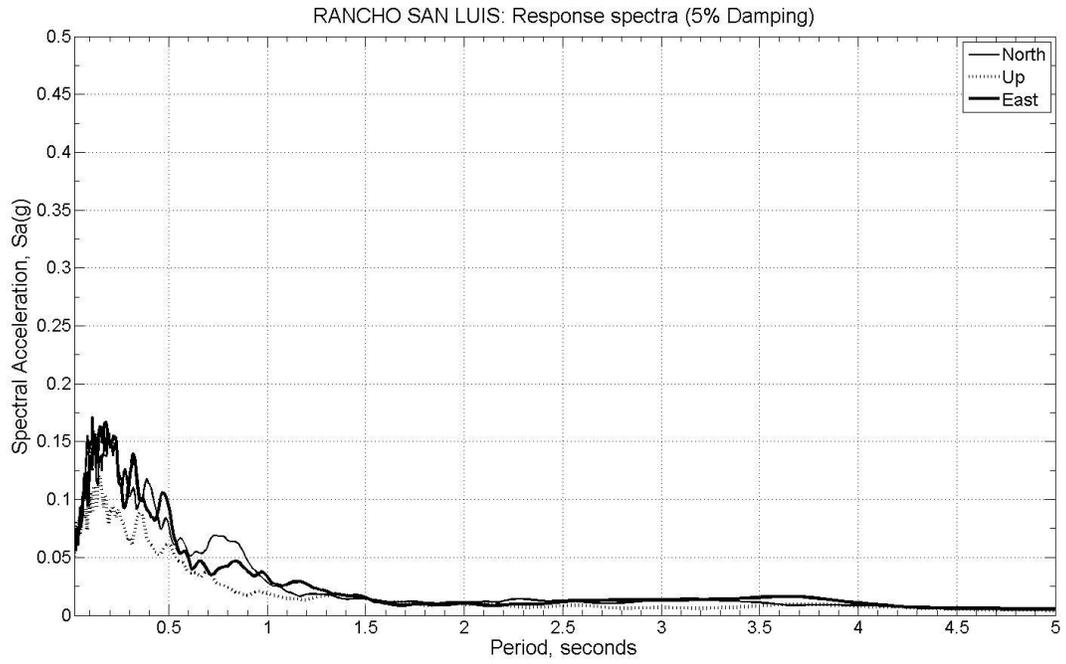


Figure 43

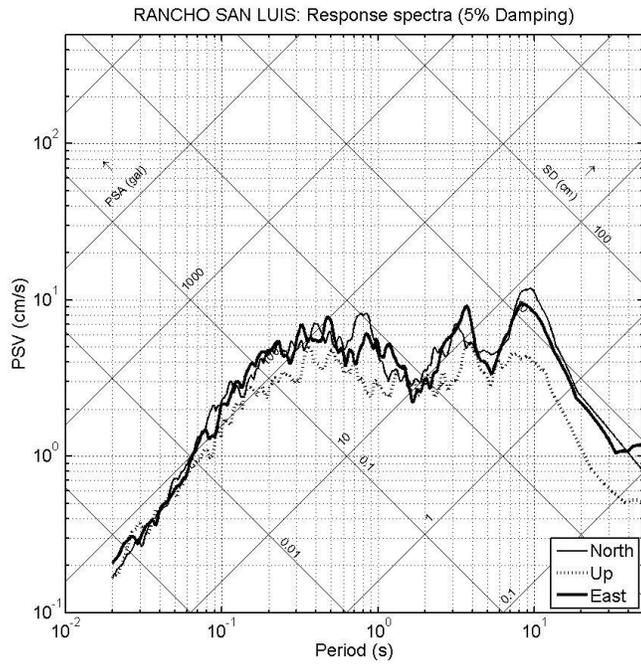


Figure 44

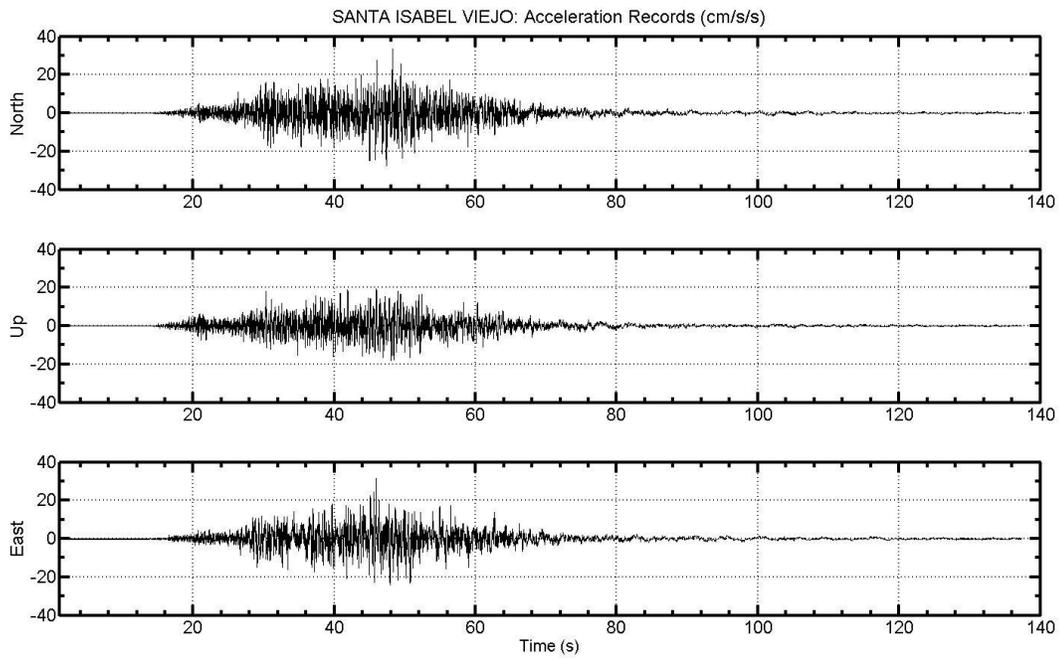


Figure 45

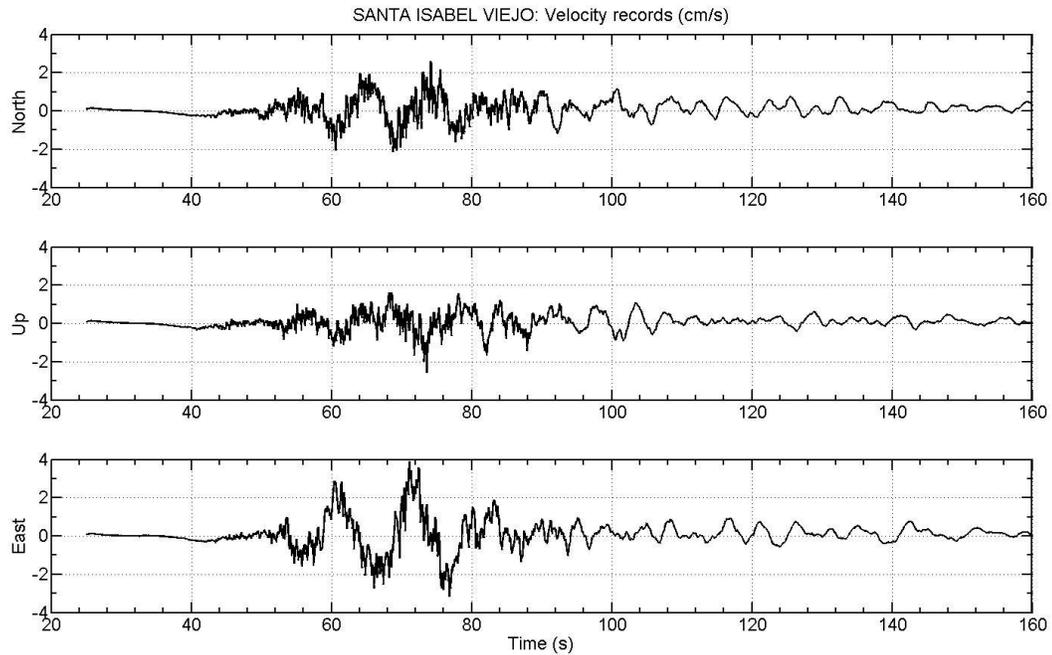


Figure 46

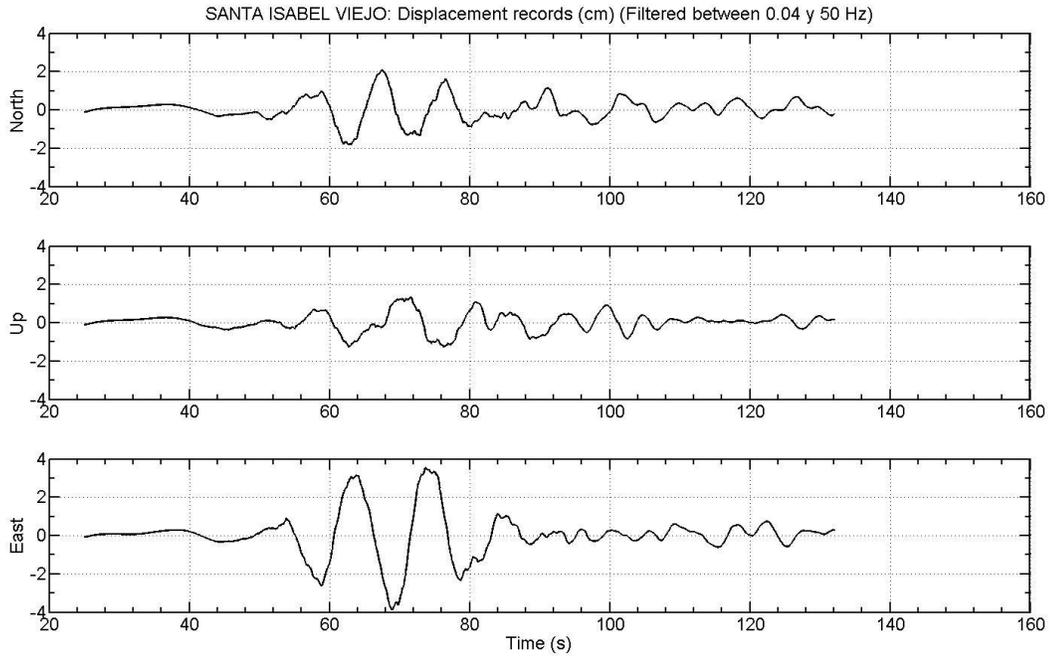


Figure 47

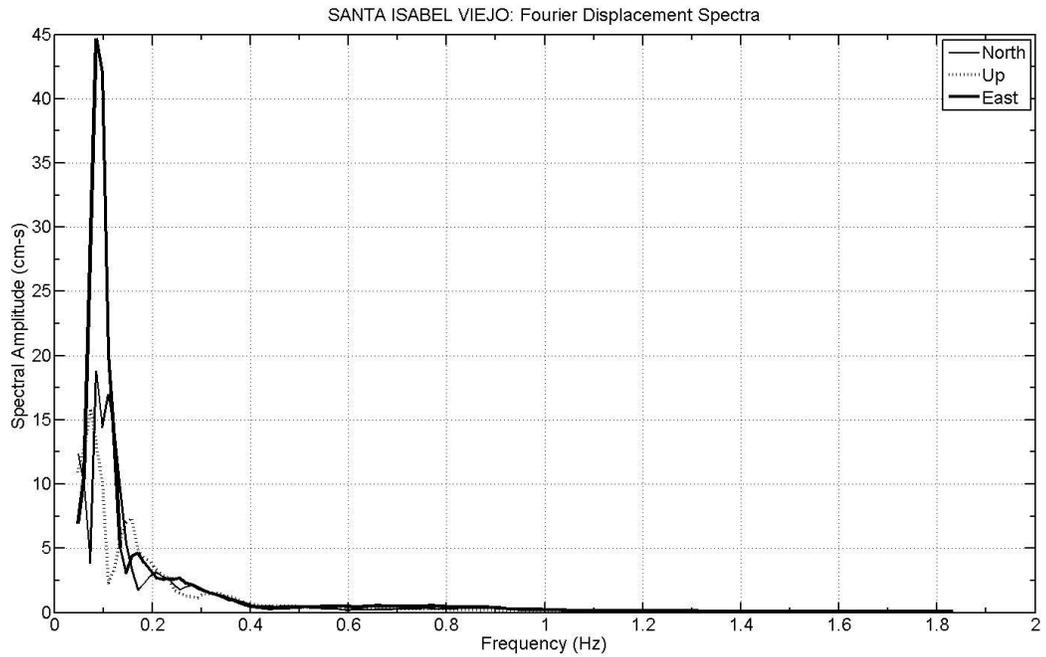


Figure 48

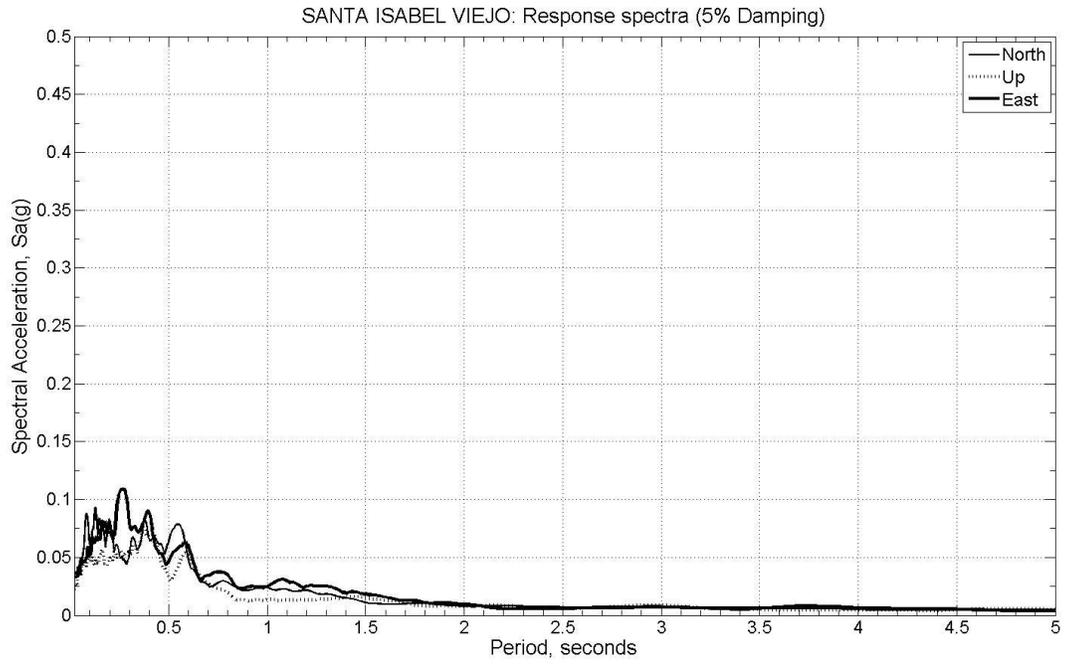


Figure 49

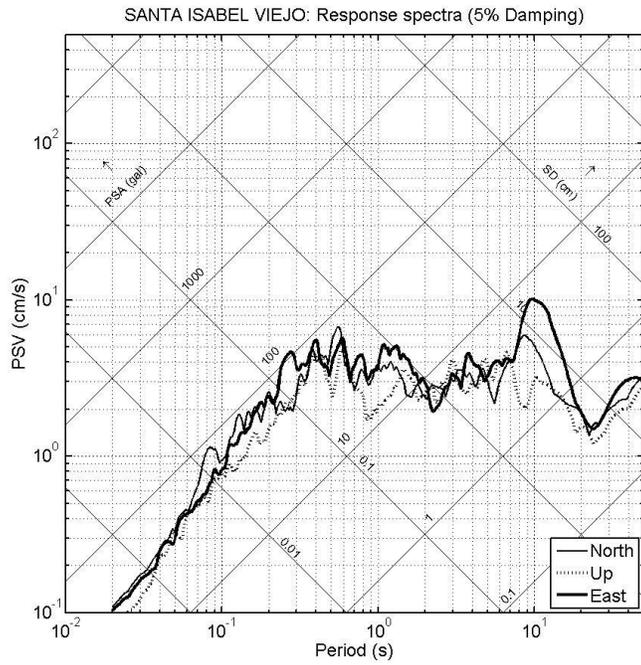


Figure 50

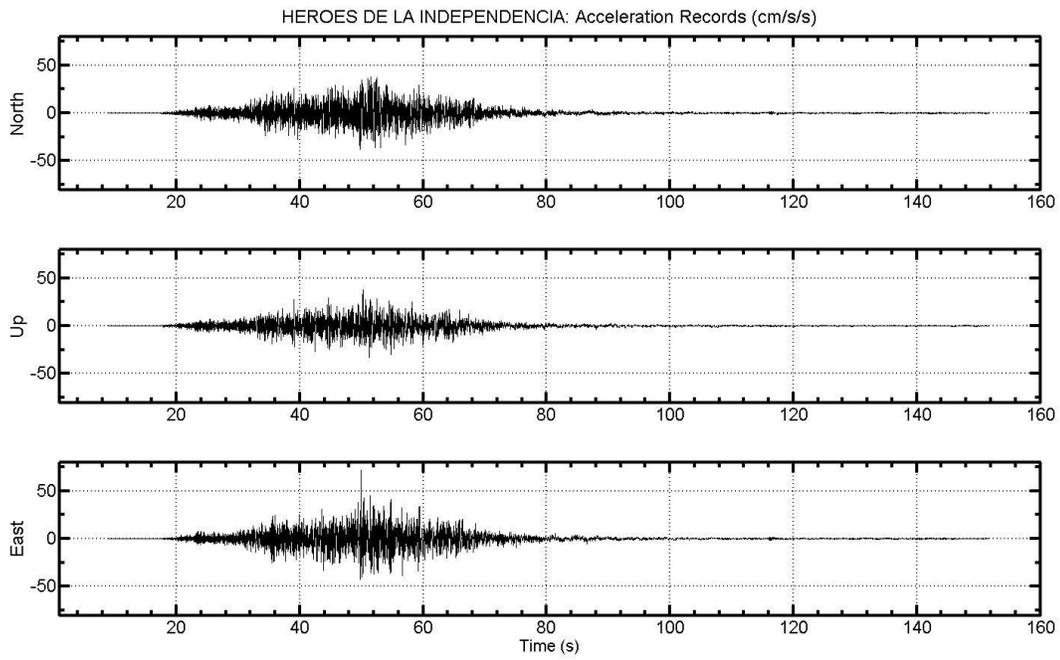


Figure 51

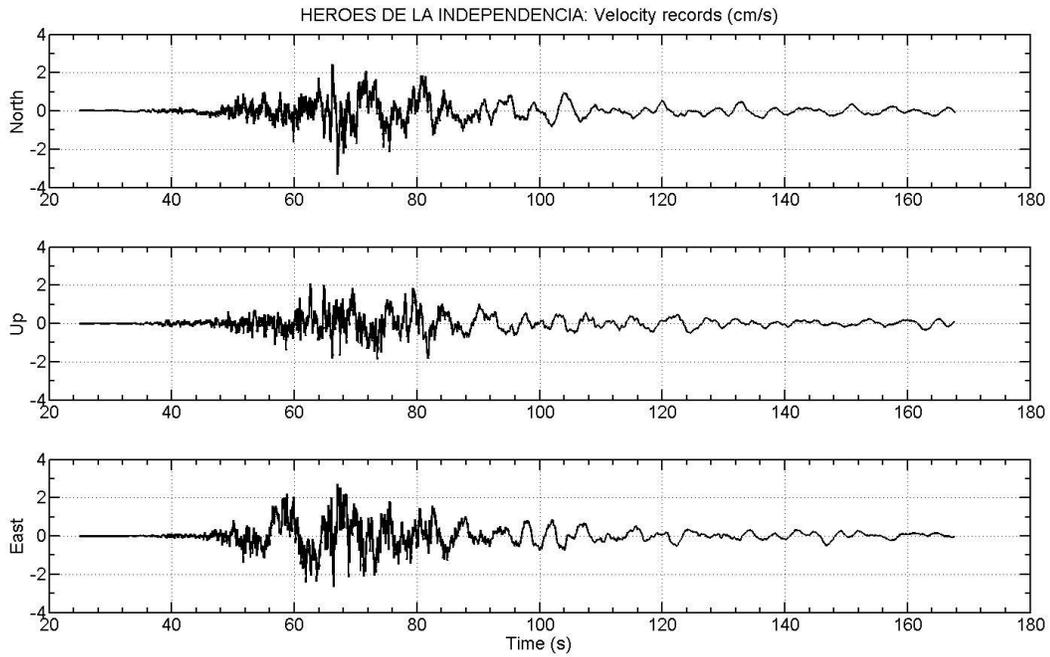


Figure 52

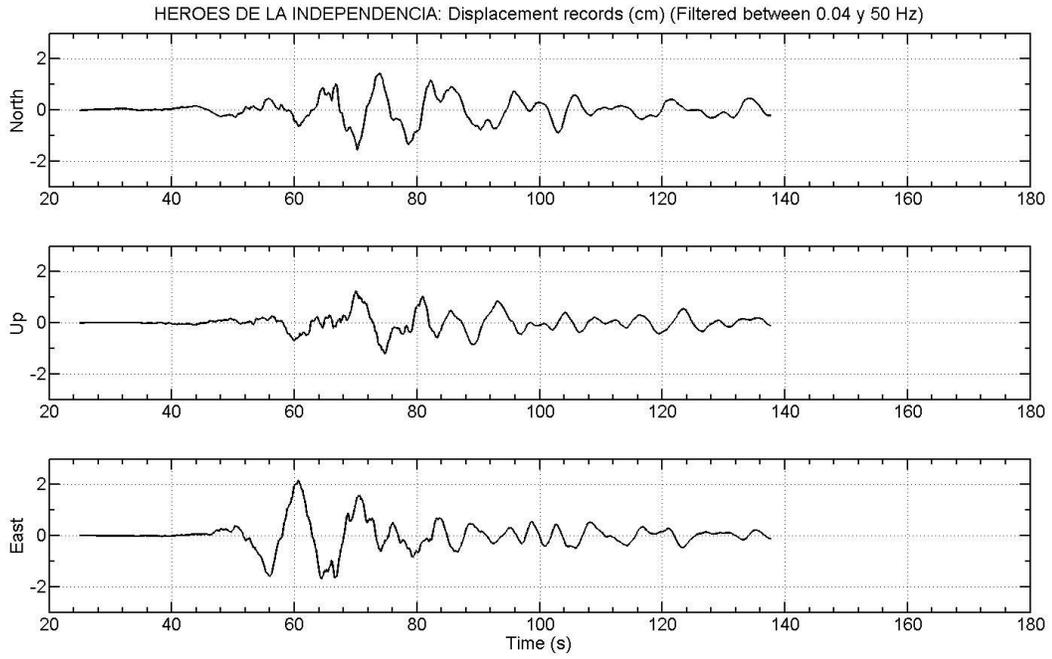


Figure 53

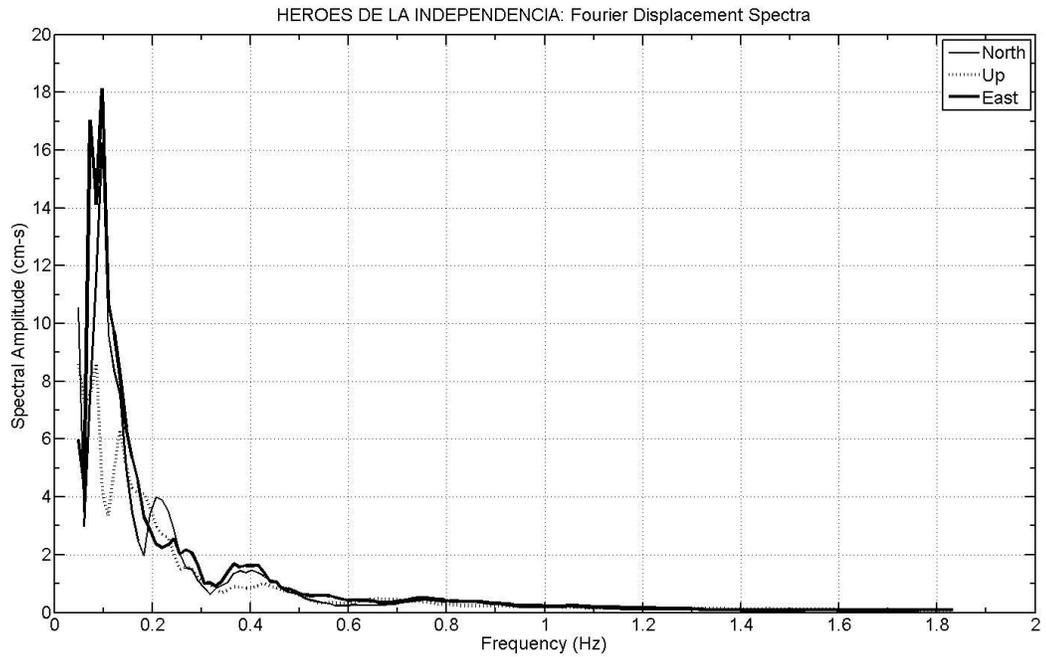


Figure 54

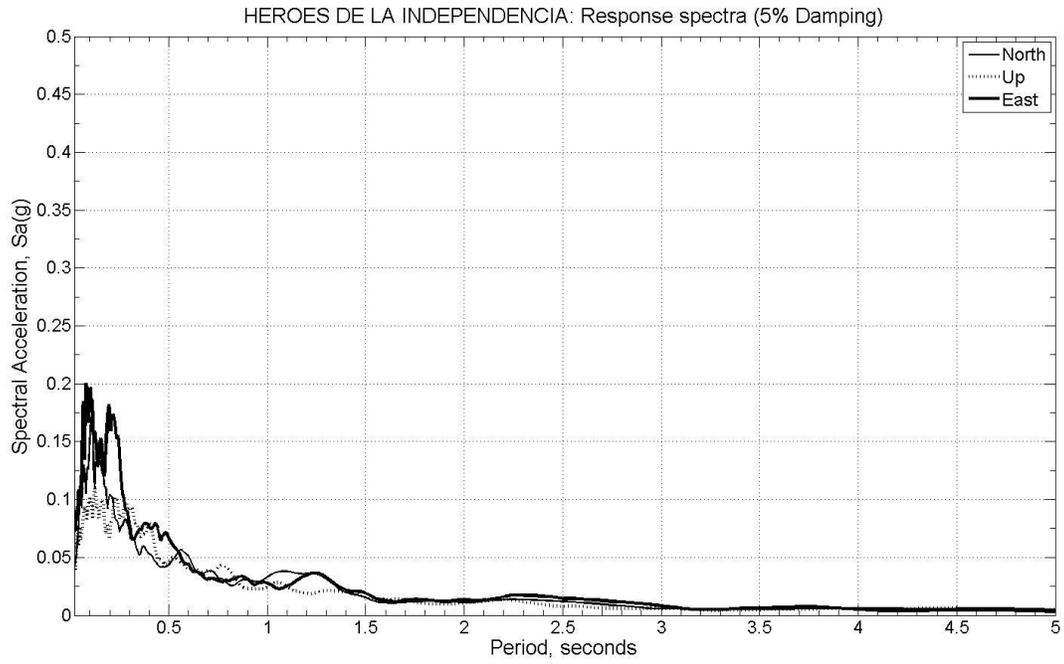


Figure 55

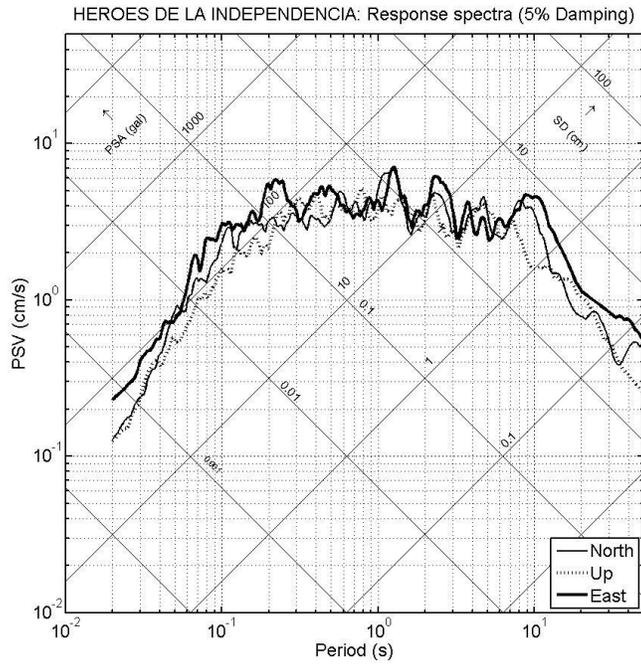


Figure 56

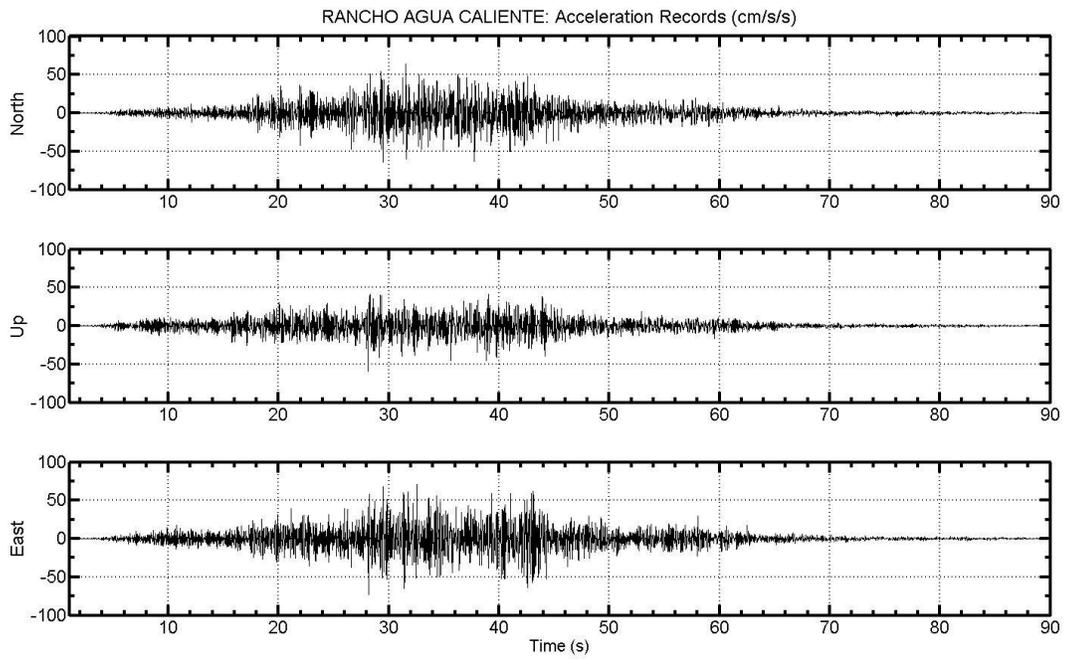


Figure 57

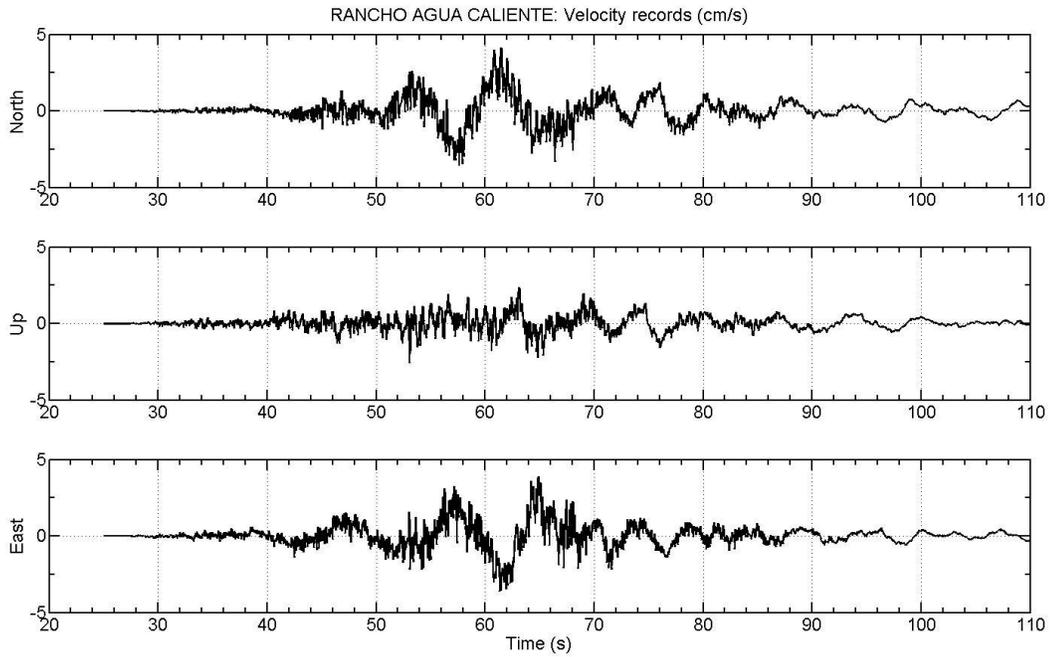


Figure 58

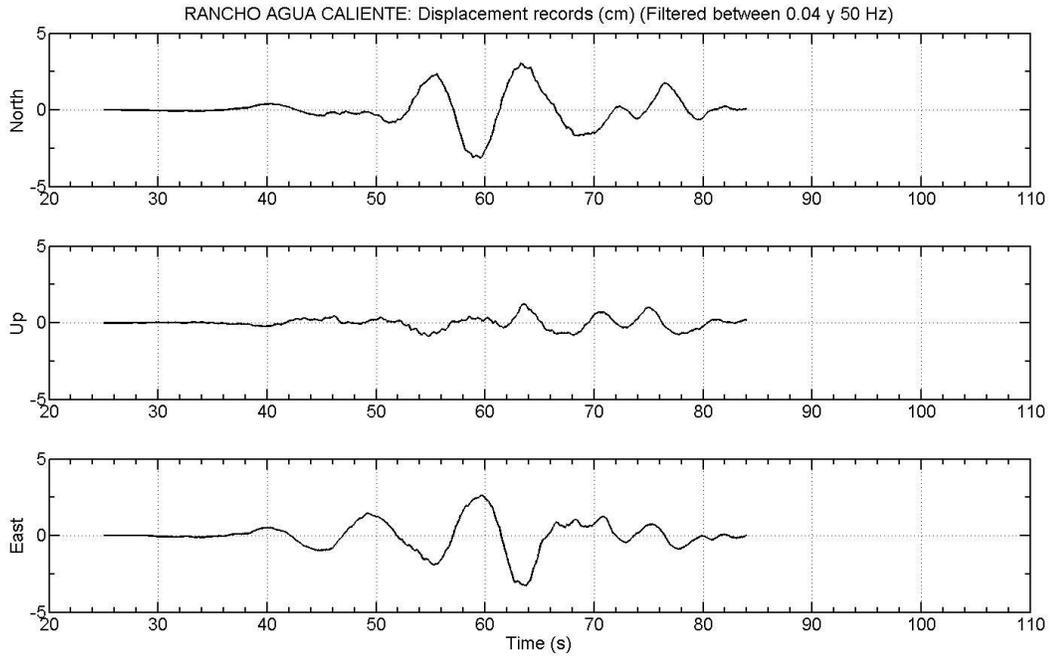


Figure 59

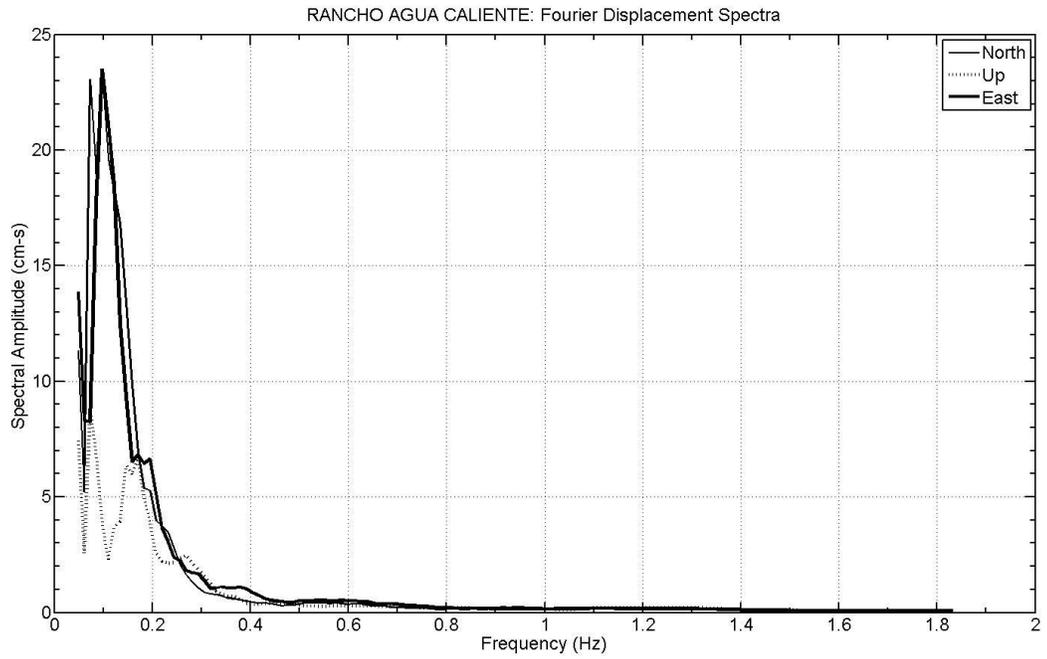


Figure 60

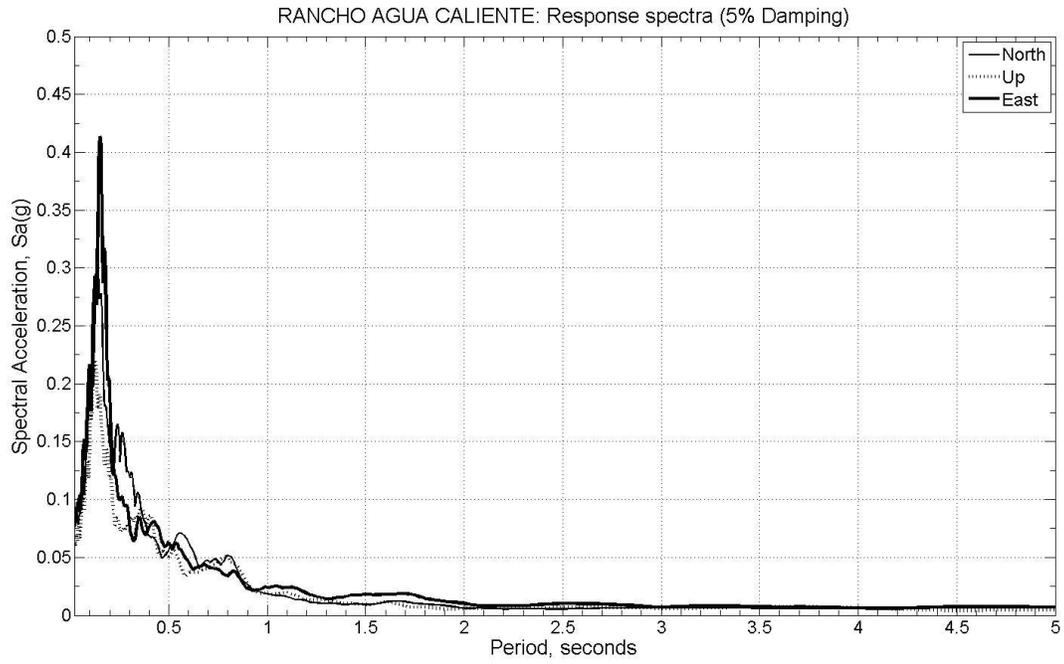


Figure 61

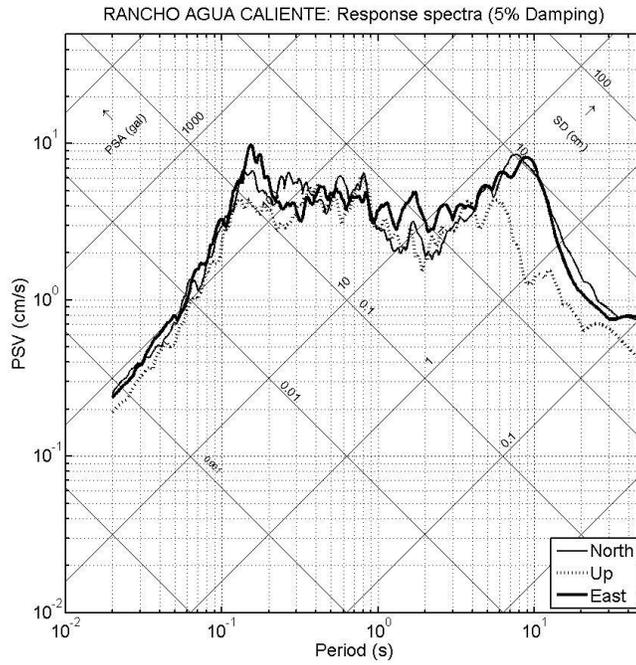


Figure 62

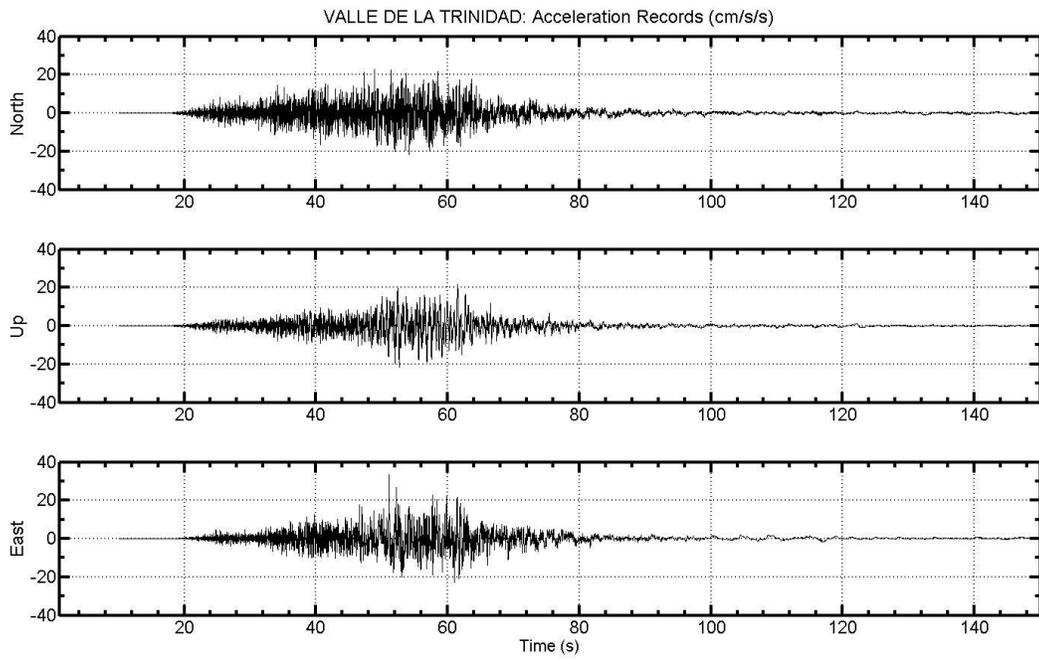


Figure 63

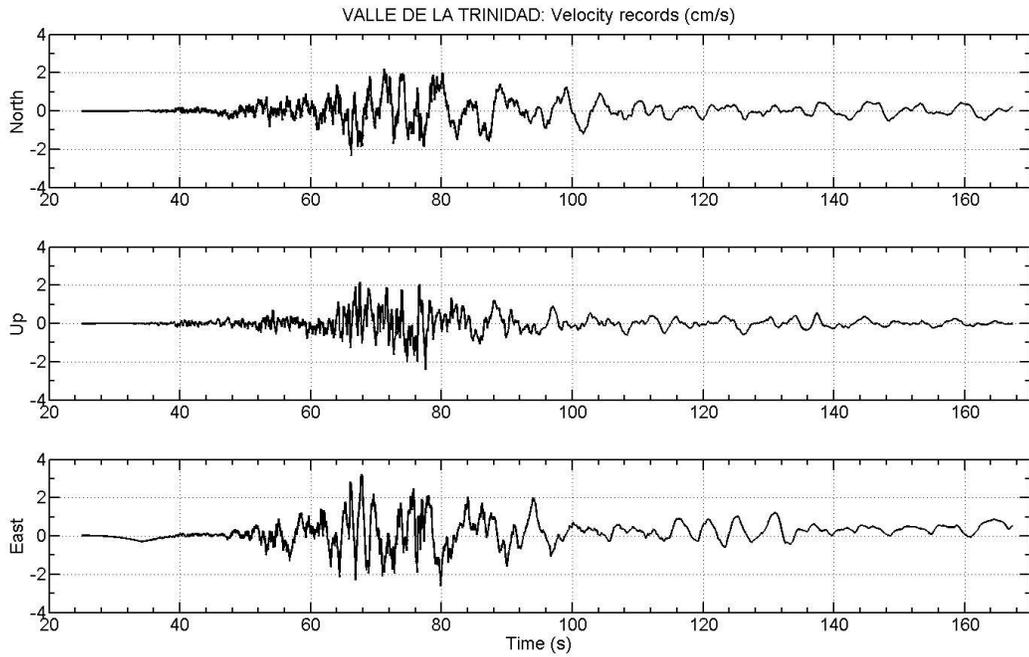


Figure 64

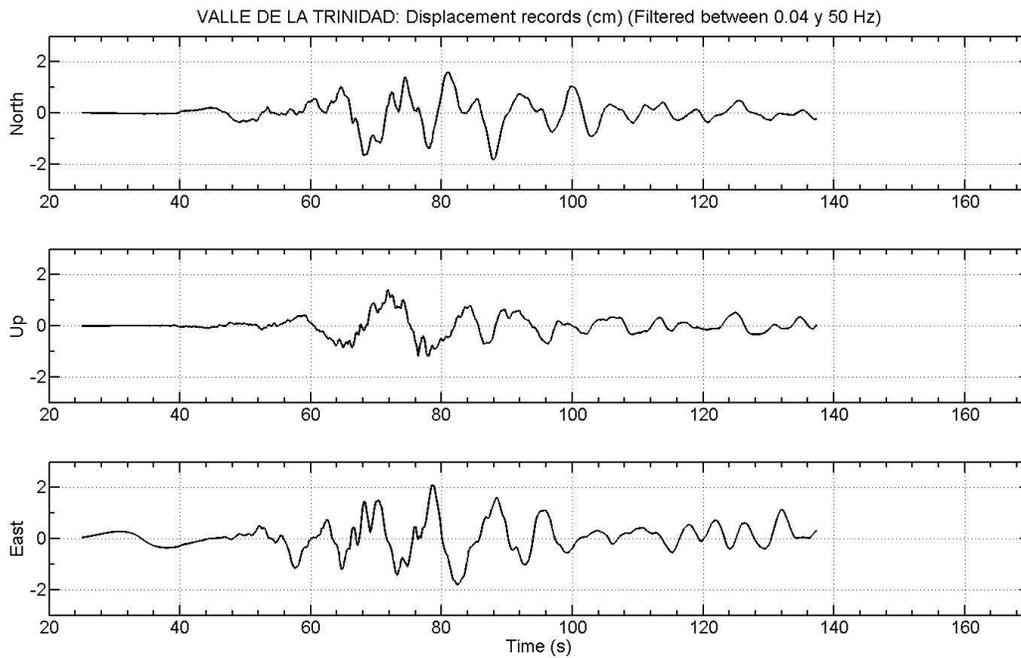


Figure 65

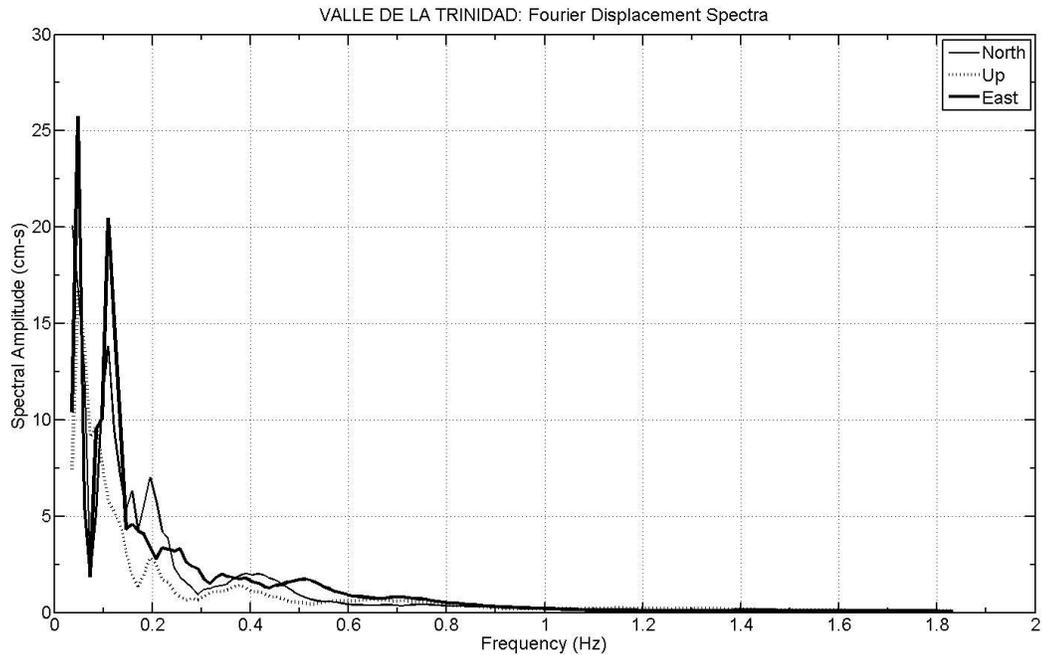


Figure 66

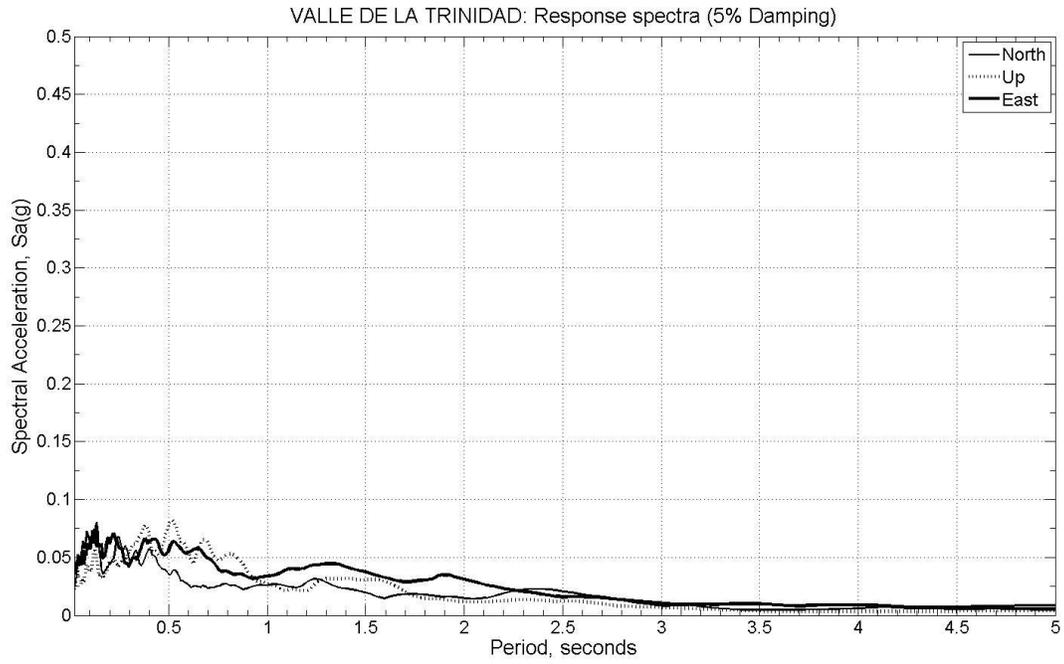


Figure 67

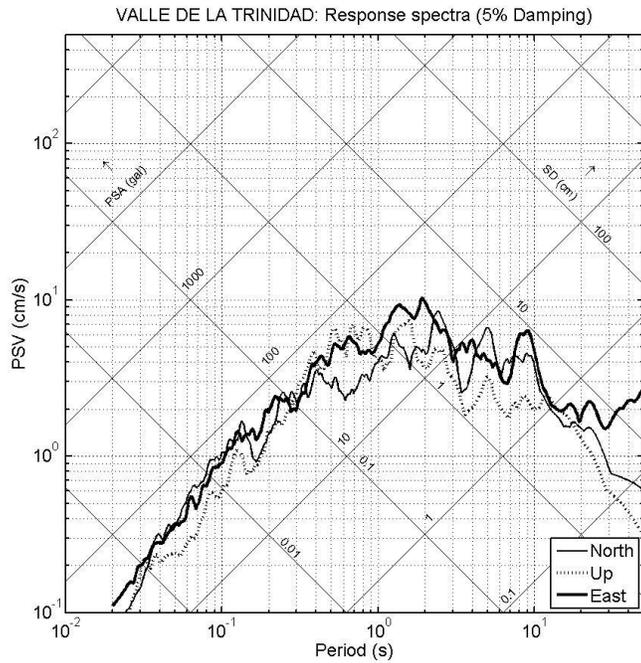


Figure 68

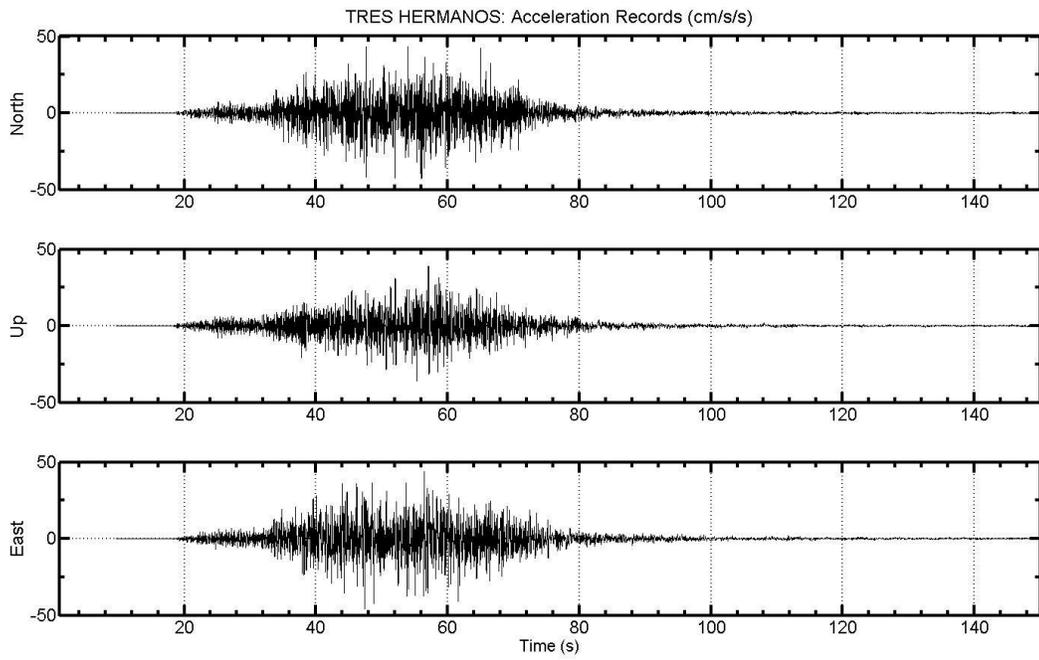


Figure 69

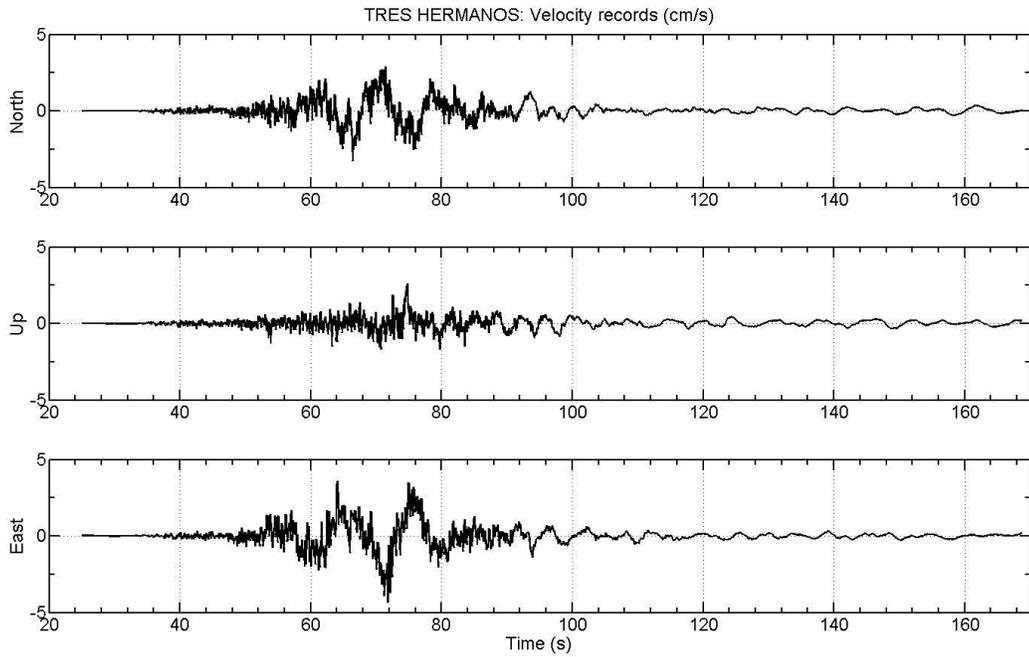


Figure 70

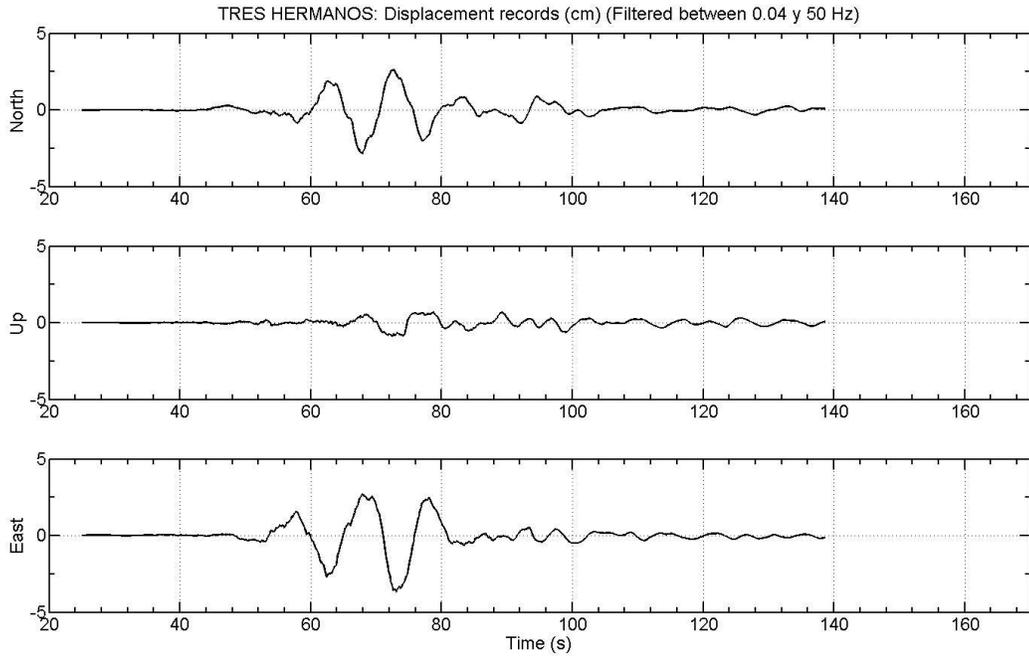


Figure 71

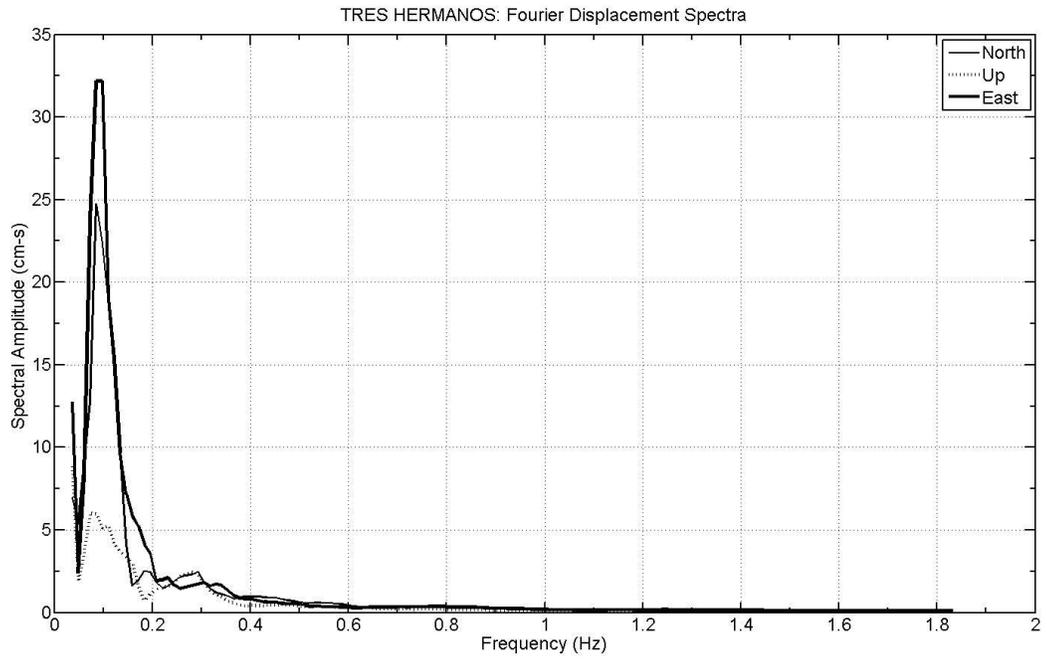


Figure 72

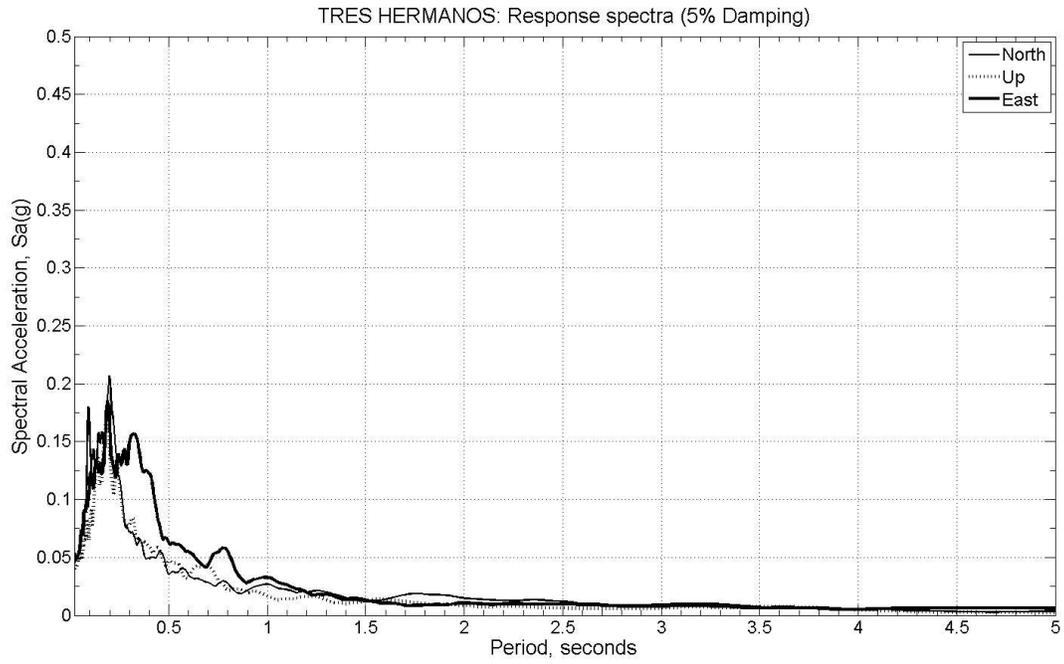


Figure 73

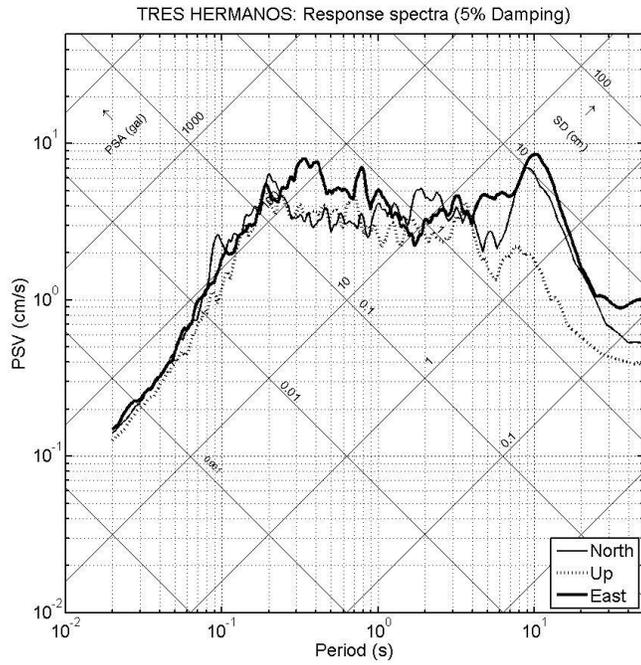


Figure 74

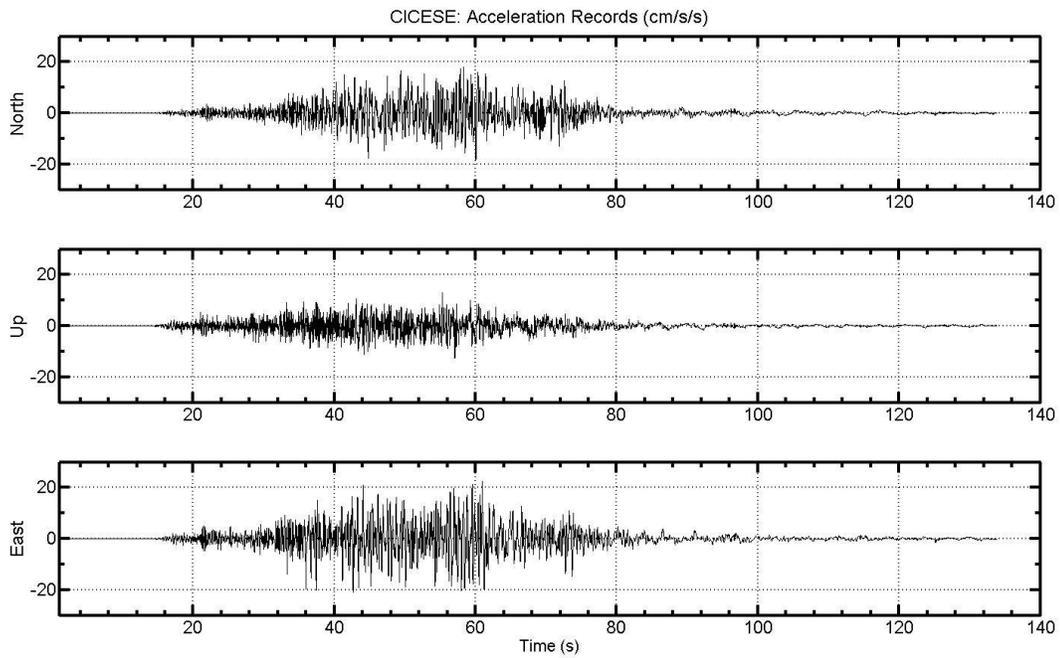


Figure 75

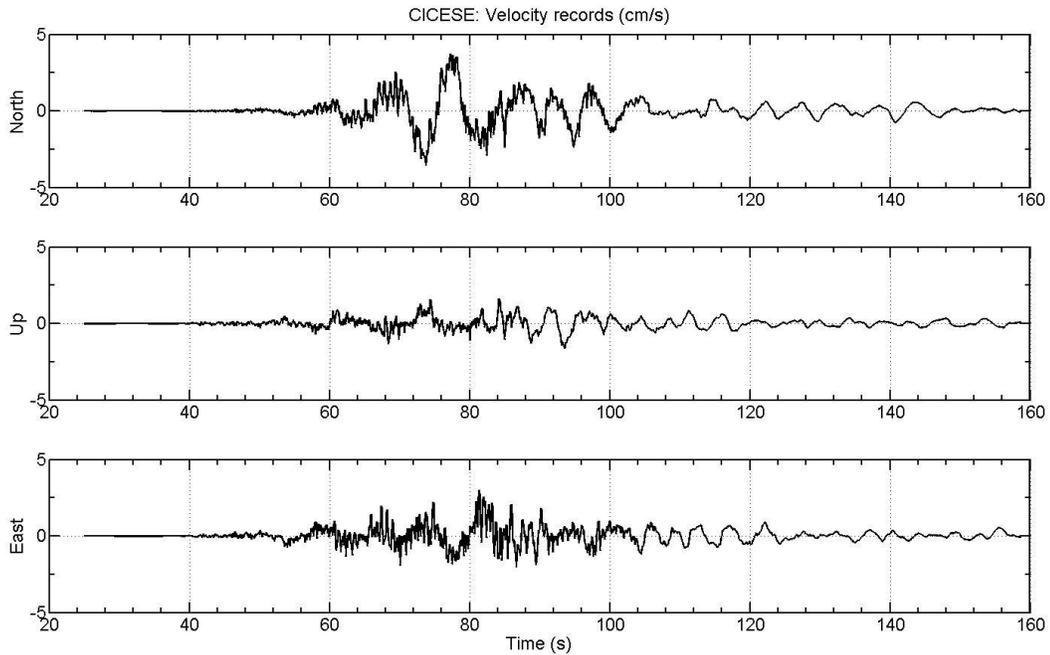


Figure 76

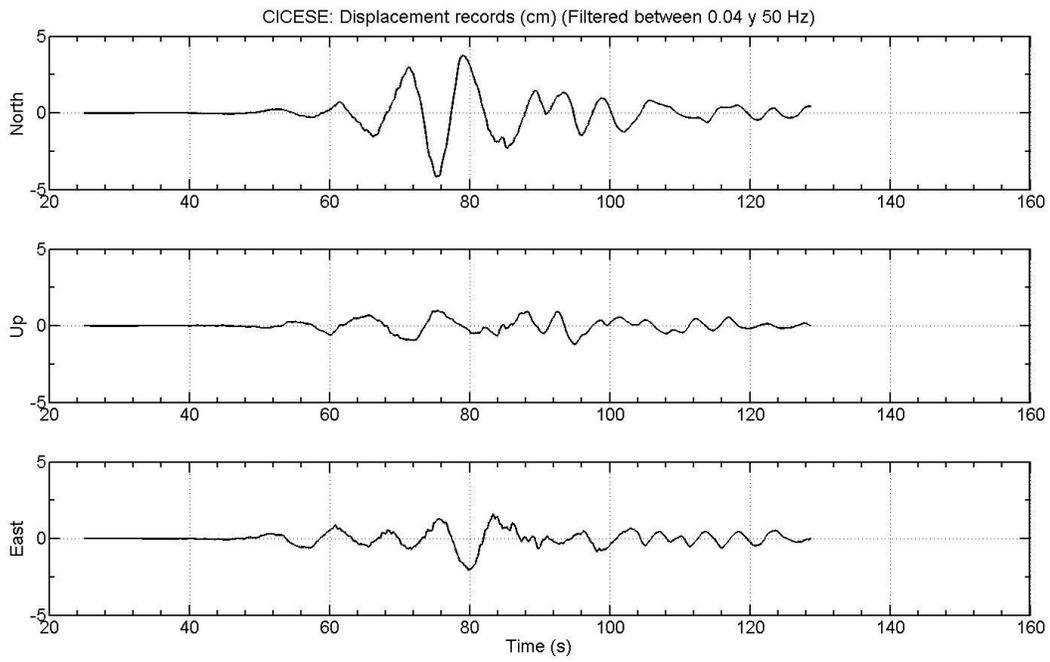


Figure 77

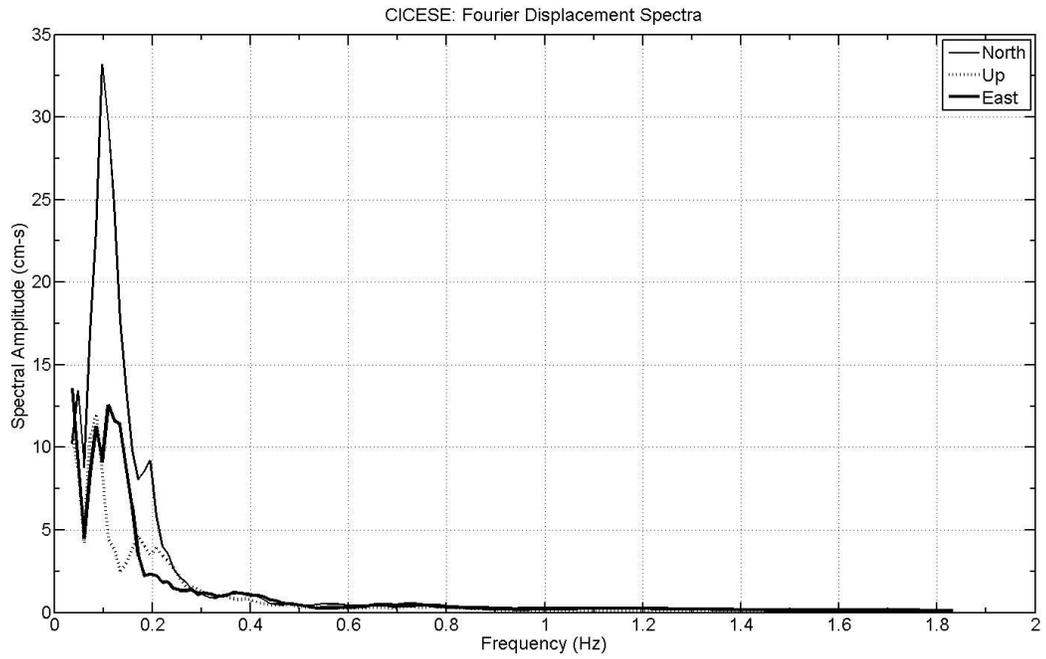


Figure 78

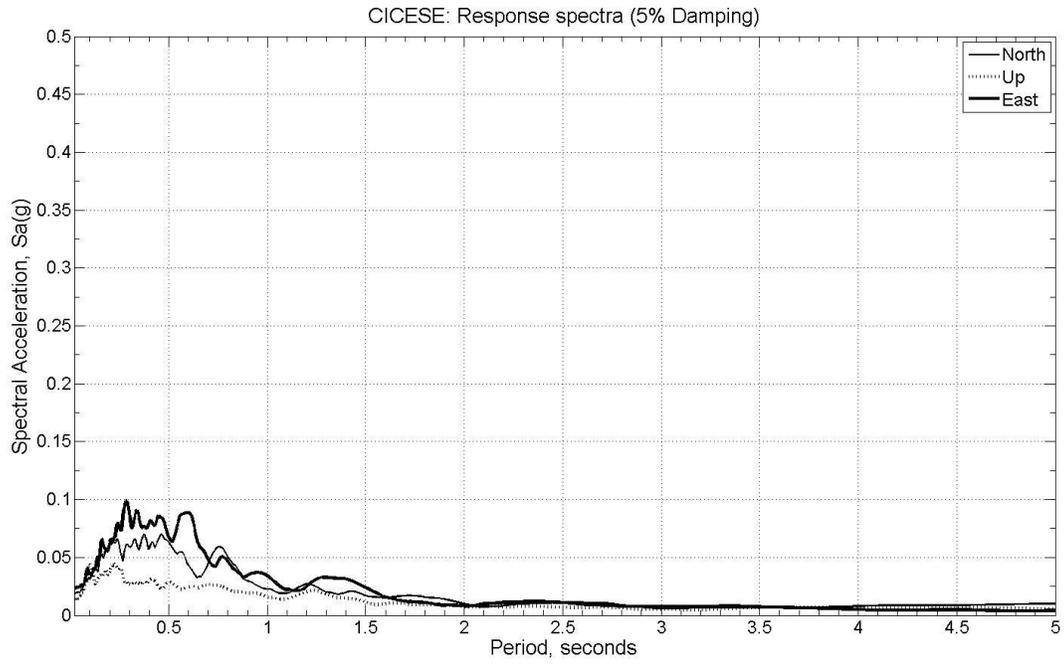


Figure 79

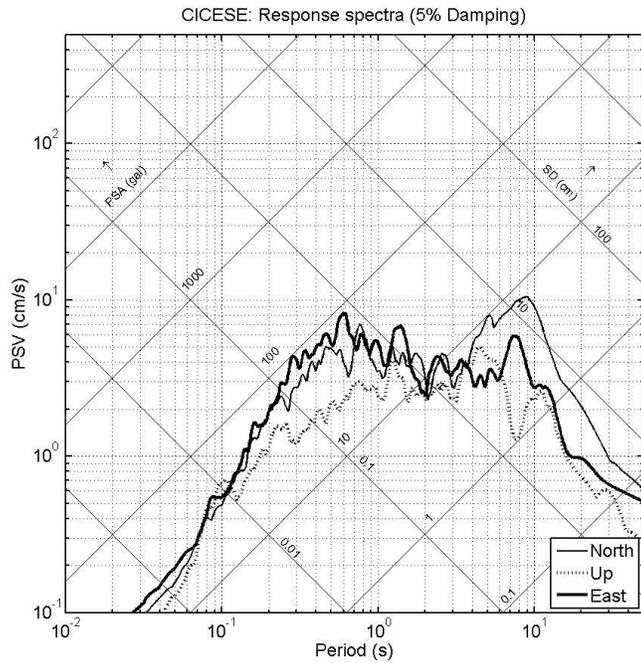


Figure 80