



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
INSTITUTO DE GEOFÍSICA**

**USO DE REGISTROS DE ACELERACIÓN DE LA  
RED DEL SERVICIO  
SISMOLÓGICO NACIONAL PARA LA  
CARACTERIZACIÓN  
DEL PELIGRO SÍSMICO EN MÉXICO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS (SISMOLOGÍA)  
PRESENTA**

**LENIN ÁVILA BARRIENTOS**

**TUTOR: DR. CARLOS M. VALDÉS GONZÁLEZ.**



CD.UNIVERSITARIA., MÉXICO, D.F., MAYO 2011



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mi familia.

A mi madre y padre – Fili y Fausto-

A mis hermanos Fausto, Jazmín y Eduardo.

A mis sobrinos Yael y Luís.

## **AGRADECIMIENTOS.**

A mi familia, que de manera incondicional me ha brindado su apoyo. A mi madre y padre – Fili y Fausto- por brindarme su amor, su apoyo, comprensión y cariño. A ellos que me han enseñado e inculcado sus grandes valores, por enseñarme a conducirme en la vida con responsabilidad, respeto y dedicación. A mis hermanos Fausto, Jazmín y Eduardo, a ellos quienes les agradezco todo el apoyo brindado. A mis sobrinos Yael y Luís, quienes de alguna u otra manera me han ayudado a ver la vida llena de alegría y esperanza. A todos ellos GRACIAS.

Institucionalmente a CONACYT por el gran apoyo brindado durante este tiempo. Al Instituto de Geofísica, a la UNAM, por la oportunidad de seguir adelante en mi formación.

A mi tutor Dr. Carlos M. Valdés González quien me brindo su confianza y apoyo para la realización de este trabajo, por compartirme su conocimiento, consejos y experiencias.

A todo el personal del Servicio Sismológico Nacional, por el apoyo brindado durante mi estancia. A Ing. Iván Rodríguez Rasilla, Dr. Víctor Hugo Espíndola Castro, Ing. Casiano Jiménez Cruz, Ing. Aarón J. Gutiérrez Jiménez, Ing. Luis E. Rodríguez Abreu, a todos ellos por su amistad y apoyo.

A mis amigos y compañeros, por su gran apoyo tanto académico como moral. A Hortencia Flores, Pía Berger y John Díaz por su comprensión, apoyo, consejos y paciencia.

A todas aquellas personas que han contribuido a mi formación tanto como persona como profesionista, y que, sin intención, no he nombrado en esta sección, pero saben que su amistad siempre será conservada en la mente y corazón.

***MUCHAS GRACIAS.***



## ÍNDICE GENERAL

<b>Resumen .....</b>	<b>12</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>15</b>
<b>Capítulo I.- Generalidades.....</b>	<b>18</b>
I.1.- Introducción .....	18
I.2.- Escalas de Intensidad .....	20
I.2.1.- Descripción de la escala de intensidad sísmica MM .....	22
I.3.- Relaciones entre PGA, PGV e Intensidades .....	24
I.3.1.- Movimiento del suelo.....	24
I.3.2.- Efectos de la fuente sísmica.....	27
I.3.3.- Patrón de radiación, tipo de falla y directividad.....	29
I.3.4.- Efectos de trayectos de viaje de las ondas sísmicas (Travel paths) .....	30
I.3.5.- Efectos de sitio.....	30
I.3.6.- Relaciones entre PGA, PGV e Intensidad.....	33
I.4.- Interacción suelo-estructura .....	37
I.4.1.- Periodo dominante del movimiento de suelo .....	37
I.4.2.- Daños en las estructuras .....	39
I.5.- Atenuación .....	40
I.5.1.- Relaciones de atenuación .....	41
I.6.- Trabajos previos.....	45
<b>Capítulo II.- Base de datos.....</b>	<b>52</b>
II.1.- Área de estudio .....	52
II.2.- Servicio Sismológico Nacional (SSN) .....	55
II.2.1.- Red del SSN .....	56
II.2.2.- Instrumentación de la red de banda ancha del SSN .....	58
II.3.- Base de datos .....	59
II.4.- Software de análisis .....	63
<b>Capítulo III.- Metodología de análisis .....</b>	<b>65</b>
III.1.- Revisión de trazas.....	65
III.2.- Análisis de los eventos .....	69
III.3.- Elaboración de mapas.....	76
<b>Capítulo IV.- Resultados.....</b>	<b>84</b>
<b>Capítulo V.- Conclusiones.....</b>	<b>151</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>155</b>
<b>Apéndice A.- Trazas .....</b>	<b>162</b>



**Apéndice B.- Perfiles ..... 169**



## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.-***Ejemplo de historias de aceleración, velocidad y desplazamiento, para el evento de San Fernando del 9 de Febrero de 1971. Tomado de [Miranda \[1\], 1999](#).* 25
- Figura 2.-***Espectros de Fourier en terreno firme de la ciudad de México registrados durante el sismo del 14 de Septiembre de 1995, con  $M=7.6$ . Las amplitudes están en m/s. Tomado de [Ordaz, 1999](#).* 26
- Figura 3.-** *Construcción de un espectro de respuesta de desplazamientos de un grado de libertad para el evento de El Centro, California, del 18 de Mayo de 1940;  $s_d$ - Desplazamiento;  $T$ - Tiempo;  $x$ - Amortiguamiento crítico (2%), tomado de [Miranda \[1\] \(1999\)](#).* 27
- Figura 4.-***Modelos de las hipótesis de “barreras” (arriba) y de “asperezas” (abajo). Tomado de [Reiter, 1990](#).* 28
- Figura 5.-***Gráfica de las relaciones entre aceleración e intensidad, propuestas por diferentes autores.* 37
- Figura 6.-** *Distancias del sitio a la fuente para modelos de movimiento de suelo. Profundidad sismogénica (línea punteada, que es la profundidad de parte omogénica alta de la corteza) (Tomada de [Abrahamson y Shedlock, 1997](#))* 43
- Figura 7.-** *Zonas sismotectónicas de México de acuerdo a la regionalización de [Zúñiga et al., 1997](#). Sub1, Sub2, Sub3 y Sub4.- Representan las regiones de la zona de subducción del pacifico mexicano. MVB.- Región del eje volcánico mexicano (Mexican Volcanic Belt). NAM.- Región intraplaca (Norteamericana). BCI y BC2.- Regiones del pacifico (Península de Baja California). SMO.- Provincia de la Sierra Madre Occidental. BAR.- Provincias de Cuencas y Sierras-Fisura del Rio Bravo (Basin and Range-Río Grande rift). BB.- Provincia de la Cuenca de Burgos (Burgos Basin). RIV1, RIV2 y RIV3.- Placa rivera interfaces con las placas Pacifico y Norteamericana. GMX.- Región del Golfo de México. NAL.- Región intraplaca (Norteamericana). IN1, IN2 e IN3.- Representan las regiones intraplaca (Cocos).* 47
- Figura 8.-** *Mapa de curvas iso-aceleración para México, aceleración máxima en gales,  $T=500$ . (Tomado de [Zúñiga et al., 1997](#))* 48
- Figura 9.-** *Mapa que muestra las aceleraciones máximas del terreno (pga) con un 10% de posibilidad de excedencia en 50 años, para las regiones de México, el Caribe, América central y Sudamérica, la condición de sitio es roca.(Tomado de [Tanner y Shellock, 2004](#))* 49



- Figura 10.-** Mapa con los segmentos propuestos por *Zúñiga y Guzmán (1994)* (Elipses) se muestran los valores  $p$  encontrados para cada uno de ellos, así como las zonas de fractura y zonas de ruptura de algunos sismos importantes en México (tomado de *Kostoglodov y Pacheco, 1999*). 51
- Figura 11.-** Mapa con los segmentos propuestos por *Zúñiga y Guzmán (1994)* (Elipses), mostrando los valores  $b$  encontrados para cada uno de ellos, así como las zonas de fractura y zonas de ruptura de algunos sismos importantes en México (tomado de *Kostoglodov y Pacheco, 1999*). 51
- Figura 12.-** Mapa donde se observan las zonas de fractura y zonas de ruptura de algunos sismos importantes en México (tomado de *Kostoglodov y Pacheco, 1999*). 52
- Figura 13.-** Distribución de las estaciones de la Red Sismológica de Banda Ancha a lo largo del territorio nacional (Tomada de <http://www.ssn.unam.mx>) 56
- Figura 14.-** Distribución de los 99 eventos que conforman el catálogo. 63
- Figura 15.-** Traza de aceleración del evento 14-06-2004 en la estación PNIG. 66
- Figura 16.-** Traza de velocidad del evento 13-04-2007 en la estación CAIG. 66
- Figura 17.-** Traza de aceleración del evento 13-04-2007 en la estación YAIG. 67
- Figura 18.-** Traza de velocidad del evento 06-11-2007 en la estación CAIG. 67
- Figura 19.-** Traza de aceleración del evento 24-09-2008 en la estación CCIG. 68
- Figura 20.-** Traza de velocidad del evento 24-09-2008 en la estación HUIG. 68
- Figura 21.-** Traza de velocidad del evento 05-10-2007 en la estación TGIG. 69
- Figura 22.-** Registros de velocidad y aceleración para el evento de Guerrero del 13-04-2007, en la estación ANIG, arriba se muestra el registro de aceleración obtenido directamente del acelerógrafo, abajo se muestra el registro de aceleración derivado del registro de velocidad, a la derecha se muestra el espectro de Fourier para cada uno de los registros. 73
- Figura 23.-** Espectros de Fourier de los registros de velocidad (línea punteada) y aceleración (línea continua) para el evento de Guerrero del 13-04-2007, en la estación ANIG. 73
- Figura 24.-** División de espectros para el evento de Guerrero del 13-04-07 de los registros de  $PGA_v$  entre  $PGA$ , para la estación ANIG, se observa que la diferencia permanece casi constante para un rango de frecuencias. 74



- Figura 25.-** *Espectros de Fourier de los registros de velocidad (línea punteada) y aceleración (línea continua) con  $g=1/8$ , para el evento de Guerrero del 13-04-2007, en la estación ANIG.* 74
- Figura 26.-** *Promedio de cocientes encontrados de acuerdo a la calibración de los acelerógrafos.* 76
- Figura 27.-** *Contornos de iso-velocidad para el evento del 13-01-2004, en su componente Norte, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.* 78
- Figura 28.-** *Contornos de iso-aceleración para el evento del 13-01-2004, en su componente Norte, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.* 79
- Figura 29.-** *Contornos de iso-velocidad para el evento del 13-04-2007, en su componente Este, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.* 81
- Figura 30.-** *Contornos de iso-aceleración para el evento del 13-04-2007, en su componente Este, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.* 82
- Figura 31.-** *Contornos de isosistas para el evento del 13-04-2007, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.* 83
- Figura 32.-** *Contornos de iso-velocidad para el evento del 01-01-2004, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.* 85
- Figura 33.-** *Contornos de iso-aceleración para el evento del 01-01-2004, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.* 86
- Figura 34.-** *Contornos de iso-velocidad para el evento del 13-03-2004, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.* 90
- Figura 35.-** *Contornos de iso-aceleración para el evento del 13-03-2004, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.* 91



- Figura 36.-** *Contornos de isosistas para el evento del 13-03-2004, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.* 92
- Figura 37.-** *Perfil Norte hacia el centro del país para el evento del 13-04-2007, en la componente Este.* 97
- Figura 38.-** *Perfil a lo largo de la costa del Pacífico (Oeste), para el evento del 13-04-2007, en la componente Este.* 97
- Figura 39.-** *Perfil a largo de la costa del Pacífico (Este), para el evento del 13-04-2007, en la componente Este.* 98
- Figura 40.-** *Perfil a largo de la costa del Pacífico (Oeste), para sismos en el estado de Guerrero, en la componente Norte.* 105
- Figura 41.-** *Perfil a largo de la costa del Pacífico (Este), para sismos en el estado de Guerrero, en la componente Norte.* 105
- Figura 42.-** *Perfil hacia el noroeste del país, para sismos en el estado de Guerrero, en la componente Norte.* 106
- Figura 43.-** *Perfil hacia el centro del país (Norte), para sismos en el estado de Guerrero, en la componente Norte.* 106
- Figura 44.-** *Perfil hacia el noreste del país, para sismos en el estado de Guerrero, en la componente Norte.* 107
- Figura 45.-** *Perfil a lo largo del pacífico (Oeste), para sismos en el estado de Oaxaca, en la componente Norte.* 108
- Figura 46.-** *Perfil hacia el centro del país (Norte), para sismos en el estado de Oaxaca, en la componente Norte.* 109
- Figura 47.-** *Perfil hacia el Golfo de México, para sismos en el estado de Oaxaca, en la componente Norte.* 109
- Figura 48.-** *Perfil a lo largo del pacífico (Oeste), para sismos en el limite este de los estados de Oaxaca y Veracruz, en la componente Norte.* 111
- Figura 49.-** *Perfil hacia el centro del país, para sismos en el limite Este de los estados de Oaxaca y Veracruz, en la componente Norte.* 111



**Figura 50.-** *Contornos de iso-velocidad para el evento del 17-01-2004, para la componente Este, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.* 113

**Figura 51.-** *Contornos de iso-velocidad para el evento del 17-01-2004, para la componente Norte, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.* 114

**Figura 52.-** *Contornos de iso-aceleración para el evento del 17-01-2004, para la componente vertical, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.* 115

**Figura 53.-** *Contornos de iso-aceleración para el evento del 17-01-2004, para la componente Norte, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.* 116

**Figura 54.-** *Contornos de iso-velocidad para el evento del 18-08-2004, para la componente Este, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.* 118

**Figura 55.-** *Contornos de iso-velocidad para el evento del 18-08-2004, para la componente Norte, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.* 119

**Figura 56.-** *Contornos de iso-aceleración para el evento del 18-08-2004, para la componente Este, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.* 120

**Figura 57.-** *Contornos de iso-aceleración para el evento del 18-08-2004, para la componente Norte, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.* 121

**Figura 58.-** *Contornos de iso-velocidad para el evento del 30-11-2004, para la componente Este, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.* 122



**Figura 59.-** Contornos de iso-aceleración para el evento del 30-11-2004, para la componente Norte, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento. 123

**Figura 60.-** Contornos de iso-aceleración para el evento del 30-11-2004, para la componente Vertical, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento. 124

**Figura 61.-** Contornos de iso-velocidad para el evento del 28-03-2007 (1), para la componente Este, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento. 125

**Figura 62.-** Contornos de iso-velocidad para el evento del 28-03-2007 (1), para la componente Norte, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento. 126

**Figura 63.-** Contornos de iso-aceleración para el evento del 28-03-2007(1), para la componente Este, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento. 128

**Figura 64.-** Contornos de iso-aceleración para el evento del 28-03-2007(1), para la componente Vertical, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento. 129

**Figura 65.-** Contornos de iso-velocidad para el evento del 28-03-2007 (2), para la componente Este, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento. 130

**Figura 66.-** Contornos de iso-aceleración para el evento del 28-03-2007(2), para la componente Norte, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento. 131

**Figura 67.-** Contornos de iso-aceleración para el evento del 28-03-2007(2), para la componente Vertical, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento. 132



**Figura 68.-** *Contornos de iso-velocidad para el evento del 23-05-2007, para la componente Este, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.* 133

**Figura 69.-** *Contornos de iso-velocidad para el evento del 23-05-2007, para la componente Norte, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.* 134

**Figura 70.-** *Contornos de iso-velocidad para el evento del 23-05-2007, para la componente Vertical, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.* 135

**Figura 71.-** *Contornos de iso-aceleración para el evento del 23-05-2007, para la componente Este, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.* 136

**Figura 72.-** *Contornos de iso-velocidad para el evento del 12-02-2008, para la componente Este, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.* 138

**Figura 73.-** *Contornos de iso-velocidad para el evento del 12-02-2008, para la componente Norte, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.* 139

**Figura 74.-** *Contornos de iso-velocidad para el evento del 12-02-2008, para la componente Vertical, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.* 140

**Figura 75.-** *Contornos de iso-aceleración para el evento del 12-02-2008, para la componente Este, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.* 141

**Figura 76.-** *Contornos de iso-aceleración para el evento del 12-02-2008, para la componente Norte, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.* 142



- Figura 77.-** *Mapa de isosistas determinado por [Figuroa \(1974\)](#) para el evento del 7 de Junio de 1982, con una  $M= 6.5$  y una intensidad máxima de 8.* 145
- Figura 78.-** *Mapa de isosistas para el evento del 14-08-2005, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.* 146
- Figura 79.-** *Mapa de contornos de velocidad máxima absoluta para los eventos analizados en este estudio, triángulos rellenos representan las estaciones empleadas para el desarrollo de los contornos.* 148
- Figura 80.-** *Mapa de contornos de aceleración máxima absoluta para los eventos analizados en este estudio, triángulos rellenos representan las estaciones empleadas para el desarrollo de los contornos.* 149
- Figura 81.-** *Mapa de contornos de intensidad máxima absoluta para los eventos analizados en este estudio, triángulos rellenos representan las estaciones empleadas para el desarrollo de los contornos.* 150



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.-</b> <i>Escala de intensidad sísmica y la aceleración máxima (Tomada de Kanai, 1983).</i>	21
<b>Tabla 2.-</b> <i>Revisión de la escala de intensidad sísmica de la JMA y la aceleración máxima (Tomada de Kanai, 1983).</i>	22
<b>Tabla 3.-</b> <i>Características de las estaciones de la red de banda ancha del SSN (Modificada de <a href="http://www.ssn.unam.mx">http://www.ssn.unam.mx</a>).</i>	57
<b>Tabla 4.-</b> <i>Datos generales de los 99 eventos así como las estaciones en que fueron registrados.</i>	60
<b>Tabla 5.-</b> <i>Valores máximos del movimiento del suelo para el evento de Guerrero del 13-04-2007.</i>	70
<b>Tabla 6.-</b> <i>Estaciones que presentan diferencia entre aceleraciones obtenidas mediante el registro de velocidad y aquellas obtenidas de los acelerógrafos (Modificada de <a href="http://www.ssn.unam.mx">http://www.ssn.unam.mx</a>).</i>	72
<b>Tabla 7.-</b> <i>Valores de calibración de los acelerógrafos en las estaciones que presentan diferencia entre aceleraciones obtenidas mediante el registro de velocidad y aquellas obtenidas de los acelerógrafos (Modificada de <a href="http://www.ssn.unam.mx">http://www.ssn.unam.mx</a>).</i>	75
<b>Tabla 8.-</b> <i>Eventos con características similares correspondientes a este estudio (Izquierda) y a aquellos encontrados en el catálogo de Figueroa (1974) (Derecha).</i>	144



## Resumen

Se llevó a cabo un análisis de 99 eventos con el objetivo de desarrollar mapas de iso-velocidad, iso-aceleración e isosistas aplicables en cualquier parte sismogénica de la República Mexicana. El análisis permite conocer la distribución de los valores del movimiento del suelo, propagación de la energía y el comportamiento de los eventos dada su región sismogénica. Adicionalmente, se pretende hacer una caracterización aproximada del peligro sísmico del país. Los registros empleados para este análisis fueron obtenidos del catálogo sísmico de la Red de Banda Ancha del Servicio Sismológico Nacional (SSN), para el periodo comprendido entre el 2004 al 2008, tomando dos eventos del 2009, debido a que antes de estos años el SSN no contaba con estaciones en la parte Norte del país y por ende de la información de eventos que ocurrieron en esta zona. La magnitud ( $M_w$ ) de los eventos dentro del catálogo varía de 4.1 a 7.1.

El presente trabajo, compara los registros de aceleración que provienen de los acelerómetros, con los registros de aceleración obtenidos a partir de los sismómetros de banda ancha, con el fin de establecer una calibración entre ambos equipos. Las trazas de los registros de los eventos fueron revisadas con el fin de evitar la obtención de valores erróneos debido: a un mal registro del evento, saturación del registro, altos niveles de ruido, registro incompleto del evento, etc. Al inicio del análisis se contaba con 4530 trazas de velocidad y 612 trazas de aceleración, una vez realizada la discriminación de las trazas se obtuvieron 3000 trazas de velocidad y 390 de aceleración para la determinación de los valores picos del movimiento del suelo.

La comparación realizada entre los valores de aceleración obtenidos por medio de los registros de velocidad y aquellos obtenidos directamente de los acelerógrafos no presenta una diferencia significativa, corroborando que su empleo es factible para aquellos casos con los que no se cuente registros de aceleración, permitiendo así complementar los registros de los eventos.



Una vez determinados los valores máximos del movimiento del suelo, se elaboraron diferentes mapas que muestran la distribución de los mismos, así como mapas de isosistas. La distribución de los contornos de los valores máximos se ve influenciada por: la cantidad de estaciones de registro, la distribución de las estaciones, los parámetros del evento, efectos de sitio y la zona sismogénica donde ocurren los sismos.

Los eventos ocurridos en la costa del Pacífico Mexicano por lo general muestran una eficiente propagación de la energía hacia el centro del país, tomando una mayor distancia en atenuarse comparada con su atenuación a lo largo de la costa del Pacífico en donde la energía se atenúa más rápido. Para eventos ocurridos hacia el interior del país muestran una distribución de energía más concéntrica al epicentro del evento tomando la energía casi la misma distancia en atenuarse, este comportamiento también se puede observar para los eventos ocurridos en el Golfo de California. Los eventos ocurridos en la parte Sureste del país presentan una distribución semi-elíptica, con el eje mayor dirigido hacia el Noroeste. En general la energía se concentra entre los 200 a 300 km más cercanos al epicentro.

Dado que no se cuenta con un catálogo de intensidades, se emplearon ecuaciones empíricas que relacionan los valores máximos del movimiento del suelo con la Intensidad Modificada de Mercalli (IMM) para la elaboración de los mapas de isosistas. Con el fin de corroborar nuestros resultados, éstos fueron comparados con mapas de isosistas elaborados para algunos sismos en México, para lo cual fueron seleccionados de nuestro catálogo todos aquellos eventos que presentaran características similares con aquellos previamente realizados. La distribución de las isosistas es muy parecida entre los eventos, las pequeñas variaciones que se observan son debidas a los parámetros propios de cada evento (magnitud y profundidad), verificando así que la metodología empleada para la elaboración de los mapas es adecuada.

La metodología empleada en este trabajo pretende ser automatizada por el SSN para proveer la información necesaria poco tiempo después de haber ocurrido un evento sísmico en cualquier parte sismogénica del país. La información plasmada en los modelos



desarrollados es de gran importancia para las instituciones encargadas de la protección civil, reducción del riesgo y aquellas involucradas en la materia.

Con este trabajo se pretende generar información para una mejor caracterización del peligro sísmico en México. De los modelos se observa una regionalización de las áreas con un mayor peligro sísmico dada la ocurrencia de un evento (Costa del Pacífico Mexicano y Golfo de California), pero un estudio más a detalle podría definir claramente los límites de estas regiones.

Empleando los registros de velocidad y aceleración de la red de banda ancha del SSN, será posible proveer una información más completa relacionada a la ocurrencia de un sismo así como un panorama del peligro sísmico en la zona de la trinchera del Pacífico Mexicano y también de la parte Norte del país, en donde varios años atrás no se contaba con estaciones sísmicas.



## Abstract

In this thesis 99 events were analyzed, to develop shakemaps, for any seismogenetic region of Mexico. This maps permit to observe the distribution of peak ground motion, energy distribution and the behavior of the events due the specifics of seismogenetic region, and to characterize the seismic hazard in Mexico. The records employed for this analysis were obtained from the Broad-Band Seismic Network of the Servicio Sismológico Nacional (SSN), for the period from 2004 to 2008, plus two events from 2009. Before these years the SSN did not have seismic stations in the northern part of the country. The events analyzed range in magnitude from 4.1 to 7.1.

The analysis compares records from accelerometers with the acceleration records obtained from broad-band seismometers, with the objective to calibrate the equipment. The traces of the events were revised in order to avoid: bad records, saturated records, high noise levels, incomplete traces, etc. We started with a total of 4530 velocity and 612 acceleration records. After the revision the number of records reduced to 3000 for velocity and 390 for acceleration, which were employed to obtain the peak ground values.

The comparison between acceleration values obtained from seismometers and accelerometers does not show a significant difference, corroborating that the use of acceleration values obtained from velocity records is feasible in absence of acceleration record, allowing to extend the data set.

Once we determined peak ground motions, we elaborated maps showing the distribution of such values, as well as the isoseismal maps. The contour of peak ground values is influenced by station density, station distribution, event parameters, site effects and by the seismogenetic zone where the events occur.

The ground motion from events that occurred in the Mexican Pacific coast, show in general an efficient energy propagation to the center of the country, taking more distance to attenuate compare with the distance taking along of Pacific coast where the energy takes



less time to attenuate. Events occurred inland, the ground motion shows an almost concentric distribution around the epicenter and the energy takes the same distance to attenuate. This behavior can be observed in the events occurred in the Gulf of California as well. The events occurring in the southeast region show a semi elliptical distribution with the major axe towards the northwest. In general the energy is concentrated within the 200 to 300 km from to the epicenter.

Due to the absent of intensities catalogs, we employed empirical equations to relate the peak ground motion with the Mercalli Modified Intensity (MMI) and to develop the isoseismal maps. With the aim to verify our results we compared our maps with isoseismal maps developed for some of the past earthquakes occurred in Mexico. We selected from our catalog events with similar characteristics to those previously analyzed, and found the MMI distribution very similar among those events. The small variations observed are due to particular characteristics of the event parameters such as magnitude and depth, corroborating that the methodology employed for developing the isoseismal maps is adequate.

We expect the methodology employed in this research to be automated by the SSN to provide this information just a few minutes after an earthquake occurrence in any seismogenetic zone in the country. The information showed in the maps is intended to be used by the institutions in charge of civil protection, risk reduction and all involved in the topic.

With this research we intent to give guidelines to provide a better seismic hazard characterization in Mexico. From the maps we can observe a regionalization of the areas with a greatest seismic hazard due the earthquake occurrence (Mexican Pacific Coast and Gulf of California). However, to provide a better definition for the limits of these regions a detailed study is necessary.

Employing velocity and acceleration records from the SSN Broad-Band Network, not just for the Mexican Pacific Trench but also for the northern part, where some years ago



the SSN didn't have seismic stations, we can provide more complete information related to earthquake occurrence as well as a first order seismic hazard characterization.



## Capítulo I.- Generalidades

### *1.1.- Introducción*

Las zonas de subducción son los lugares donde ocurren la mayoría de los fenómenos paroxísticos sobre la superficie de la Tierra, incluyendo actividad volcánica explosiva, sismos de magnitudes grandes, deslizamientos y campos termales (Poli y Schmidt, 2002). Dado que nuestro país presenta por una parte, una zona de subducción (parte sur) y por otra, una zona de transurrencia y divergencia (parte noroeste), es importante tomar en cuenta los peligros que puede generar la ocurrencia de un evento sísmico de magnitud considerable, para lo cual un análisis del peligro sísmico es necesario.

El análisis del peligro sísmico nos da una descripción de los efectos, provocados por la ocurrencia de un sismo, ya sea de manera local o regional, lo cual tiene un gran valor para los investigadores en la materia (Reiter, 1990). El peligro sísmico comprende aspectos relacionados con la tectónica y la sismicidad, como son: la estimación de movimientos fuertes y microzonificación (Ordaz, 1999).

Dentro del rubro de la estimación de movimientos fuertes esperados para una zona, se tiene el hecho de que éstos dependen de las condiciones del sitio, ya que por ejemplo, si se tiene más de 100 m de espesor de roca y suelo por encima de éste, cualquier sitio bajo estas condiciones tendría un mayor efecto en el nivel de sacudimiento (Reiter, 1990). Debido a esto las estructuras edificadas sobre la superficie de la tierra podrían experimentar fuertes movimientos los cuales en una situación dada las conducirían al colapso (Gallipoli *et al.*, 2004; Ávila-Barrientos, 2003; Singh *et al.*, 1988).

Los efectos importantes sobre el terreno como consecuencia de un evento sísmico de gran magnitud, se presentan principalmente en áreas con depósitos de material reciente o sedimentos pobremente consolidados del cuaternario, compuestas generalmente por materiales altamente compresibles, como son las arcillas, limos y arenas, a donde se llegan a verificar velocidades para las ondas de corte de hasta 35 m/s, como es el caso para



algunos sitios de la Ciudad de México. Sitios a grandes distancias de la zona sismogénica no implican que la amplificación del movimiento del terreno tenga que ser reducido, ya que el alto contraste de las impedancias entre el basamento rocoso y el cuerpo sedimentario superficial es la causa principal del fenómeno de amplificación de las ondas (Gutiérrez, 1999).

La mayoría de las evaluaciones del peligro sísmico de importantes estructuras, tales como edificios altos, presas, plantas nucleares, escuelas, etc., son elaboradas con base en datos como son la magnitud y los registros disponibles de las intensidades de los eventos sísmicos. La dificultad asociada con la caracterización del peligro sísmico por medio de la escala de intensidad es que la naturaleza subjetiva y cualitativa de las escalas de intensidad permite solamente una correlación de primer orden con la medida de parámetros de movimientos fuertes (Trifunac y Brady, 1975).

El objetivo de este trabajo de investigación es el de desarrollar mapas de isosistas (Intensidad Modificada de Mercalli), de sismos ocurridos en el país. Con base en la elaboración de mapas, se pretende presentar una estimación del peligro sísmico en la República Mexicana. Además se verificará que la extracción de registros de aceleración derivados de los registros de velocidad sean factibles para su uso en este tipo de trabajos, para cual se realizará una comparación entre estos registros y aquellos obtenidos directamente de los acelerógrafos. Con la finalidad de alcanzar dicho objetivo se utilizaran los registros de velocidad y aceleración de las estaciones de banda ancha del Servicio Sismológico Nacional (SSN) empleando un catálogo de eventos que comprenden desde el 2004 al 2008. Esto debido a que antes de esta fecha el SSN no contaba con estaciones en la parte norte del país y por lo consecuente no se contaba con esa información.



## ***1.2.- Escalas de Intensidad***

Las escalas de intensidad sísmica fueron diseñadas para proporcionar la descripción de los posibles efectos de un evento sísmico sobre las personas, las estructuras y sus alrededores. Una mayoría de las escalas empleadas actualmente (Escala de Intensidad Modificada de Mercalli, MKS, etc.) aún representan una descripción subjetiva de la respuesta humana al sacudimiento y una descripción al daño asociado a los edificios. Además, numerosos factores relacionados a la densidad de población, el tipo de construcción, al ambiente social, económico y cultural podrían significativamente afectar la descripción cuantitativa final de la intensidad del sacudimiento en un sitio en particular ([Trifunac y Brady, 1975](#); [Kanai, 1983](#)).

Los primeros intentos en el desarrollo de escalas de intensidad fueron: la escala de Gastaldi en 1564, la de Poardi en 1627, la escala de Pignataro en 1783 la cual fue dividida en 5 grados, también se encuentra la escala de Sekiya en 1884 la cual estaba dividida en 4 grados y una escala de 10 grados por Rossi-Forel en 1883.

Mercalli en 1902 por su parte desarrollo una escala de 10 grados, la cual posteriormente fue cambiada a 12 grados, para su correspondencia con las aceleraciones propuestas por Cancani en 1904. La Tabla 1 muestra la escala de Mercalli y su correspondiente aceleración propuesta por Cancani. Por otra parte [Wood-Neumann \(1931\)](#) mejoró la escala ya antes modificada de Mercalli, denominándose como la escala de Intensidad Modificada de Mercalli (o simplemente IMM), la cual es empleada en los Estados Unidos y en muchos otros países ([Kanai, 1983](#)).



Tabla 1.- Escala de intensidad sísmica y la aceleración máxima (Tomada de [Kanai, 1983](#)).

Escala de Mercalli (1902)	Aceleración (Cancani, 1904) (gal)
I	0.25
II	0.50
III	1.00
IV	2.50
V	5.00
VI	10.00
VII	25.00
VIII	50.00
IX	100.00
X	250.00
XI	500.00
XII	1 000.00

La Agencia Meteorológica de Japón (JMA por sus siglas en inglés) desarrollo su propia escala de intensidad sísmica, que durante varios años se ha ido modificando. La Tabla 2 muestra dichos cambios y su relación con la aceleración. Durante mucho tiempo se ha intentado el desarrollo de una escala de intensidad sísmica común, un ejemplo de esto es la escala de intensidad MKS propuesta por [Medvedev, Sponheuer y Karnik \(1963\)](#), que para propósitos prácticos la escala IMM y la escala MKS son esencialmente la misma ([Kanai, 1983](#); [Trifunac y Brady, 1975](#)).

En los niveles más bajos de las escalas, la intensidad generalmente es calculada en términos de como el sacudimiento es sentido por las personas, en los más altos niveles de las escalas son basados en las observaciones hechas al daño estructural el cual es inspeccionado por especialistas en la materia ([Yih-Min et al., 2003](#)).



Tabla 2.- Revisión de la escala de intensidad sísmica de la JMA y la aceleración máxima (Tomada de [Kanai, 1983](#)).

Grados	1884	1898	1936	1949	Ace. (gal)
I	Ligero	Ligero	Ligero	Ligero	0.8-2.5
II	Débil	Muy débil	Débil	Débil	2.5-8
III		Débil	Ligeramente Fuerte Algo fuerte	Algo fuerte	8-25
IV	Fuerte	Algo fuerte	Moderadamente fuerte	Fuerte	25-80
V	Desastroso	Fuerte	Muy fuerte	Muy fuerte	80-250
VI		Desastroso	Desastroso	Desastroso	250-800
VII				Muy desastroso	> 800

Es importante considerar el hecho de nuevos conceptos arquitectónicos e ingenieriles, que incluyen edificios altos y otro tipo de estructuras, cuyo periodo natural de vibración se encuentran por arriba del rango de periodos considerados para las descripciones originales en la intensidad del sacudimiento ([Trifunac y Brady, 1975](#)).

### *1.2.1.- Descripción de la escala de intensidad sísmica MM*

Dentro de este estudio la escala de intensidad sísmica que se empleará es la escala de Intensidades Modificada de Mercalli, que se encuentra dividida en 12 grados, los cuales se describen a continuación ([Kanai, 1983](#)):

- ⇒ Grado I.- Sacudida sentida por muy pocas personas en condiciones especialmente favorables.
- ⇒ Grado II.- Sacudida sentida sólo por pocas personas en reposo, especialmente en los pisos altos de los edificios. Los objetos suspendidos pueden oscilar.
- ⇒ Grado III.- Sacudida sentida claramente en los interiores, especialmente en los pisos altos de los edificios, muchas personas no lo asocian con un temblor. Los



vehículos de motor estacionados pueden moverse ligeramente. Vibración como la originada por el paso de un carro pesado. Duración estimable.

- ⇒ Grado IV.- Sacudida sentida durante el día por muchas personas en los interiores, por pocas en el exterior. Por la noche algunas despiertan. Vibración de vajillas, vidrios de ventanas y puertas; los muros crujen. Sensación como de un carro pesado chocando contra un edificio, los vehículos de motor estacionados se balancean claramente.
- ⇒ Grado V.- Sacudida sentida casi por todo el mundo; muchos despiertan. Algunas piezas de vajilla, vidrios de ventanas, etcétera, se rompen; pocos casos de agrietamiento de aplanados; caen objetos inestables. Se observan perturbaciones en los árboles, postes y otros objetos altos. Se detienen de relojes de péndulo.
- ⇒ Grado VI.- Sacudida sentida por todo mundo; muchas personas atemorizadas huyen hacia afuera de los edificios. Algunos muebles pesados cambian de sitio; pocos ejemplos de caída de aplanados o daño en chimeneas. Daños ligeros.
- ⇒ Grado VII.- Advertido por todos. La gente huye al exterior. Daños sin importancia en edificios de buen diseño y construcción. Daños ligeros en estructuras ordinarias bien construidas; daños considerables en las débiles o mal planeadas; rotura de algunas chimeneas. Sentido por las personas conduciendo vehículos en movimiento.
- ⇒ Grado VIII.- Daños ligeros en estructuras de diseño especialmente bueno; considerable en edificios ordinarios con derrumbe parcial; grande en estructuras débilmente construidas. Los muros salen de sus armaduras. Caída de chimeneas, pilas de productos en los almacenes de las fábricas, columnas, monumentos y muros. Los muebles pesados se vuelcan. Arena y lodo proyectados en pequeñas



cantidades. Cambio en el nivel del agua de los pozos. Pérdida de control en las personas que guían vehículos motorizados.

- ⇒ Grado IX.- Daño considerable en las estructuras de diseño bueno; las armaduras de las estructuras bien planeadas se desploman; grandes daños en los edificios sólidos, con derrumbe parcial. Los edificios salen de sus cimientos. El terreno se agrieta notablemente. Las tuberías subterráneas se rompen.
- ⇒ Grado X.- Destrucción de algunas estructuras de madera bien construidas; la mayor parte de las estructuras de mampostería y armaduras se destruyen con todo y cimientos; agrietamiento considerable del terreno. Las vías del ferrocarril se tuercen. Considerables deslizamientos en las márgenes de los ríos y pendientes fuertes. Invasión del agua de los ríos sobre sus márgenes.
- ⇒ Grado XI.- Casi ninguna estructura de mampostería queda en pie. Puentes destruidos. Grietas anchas en el terreno. Las tuberías subterráneas quedan fuera de servicio. Hundimientos y derrumbes en terreno suave. Gran torsión de vías férreas.
- ⇒ Grado XII.- Destrucción total. Ondas visibles sobre el terreno. Perturbaciones de las cotas de nivel (ríos, lagos y mares). Objetos lanzados al aire.

### ***1.3.- Relaciones entre PGA, PGV e Intensidades***

#### ***1.3.1.- Movimiento del suelo***

El movimiento del suelo en un sitio dado puede ser considerado, que esta bajo la influencia de tres elementos principales: la fuente, trayectos de viaje de las ondas sísmicas y las condiciones locales del sitio. El primero describe, como el tamaño y la naturaleza de la fuente sísmica controla la generación de las ondas sísmicas. El segundo describe los efectos producidos por las diferentes condiciones geológicas sobre las ondas sísmicas, durante su viaje desde la fuente sísmica hasta un lugar en particular. Por último, el tercer



elemento describe el efecto de los varios cientos de metros más superficiales de roca y suelo y la superficie topográfica en una zona, sobre el movimiento del terreno producido por el paso de las ondas sísmicas (Reiter, 1990).

El movimiento del suelo puede ser dividido en dos niveles generales: 1.- Movimiento débil o movimiento de una pequeña amplitud debido a sismos distantes o sismos pequeños y, 2.- Movimiento fuerte (strong motion) o movimiento de grandes amplitudes de sismos cercanos o grandes sismos (Reiter, 1990). La aceleración, la cual es relacionada a la fuerza y puede ser medida, es tomada como una forma de cuantificar el movimiento del suelo, para lo que se emplean instrumentos llamados acelerógrafos, que están configurados para proveer registros útiles de la aceleración, llamados acelerógramas (Figura 1) (Reiter, 1990). Típicamente la aceleración (medida en Gales, gal) es indicada como una fracción de la aceleración de la gravedad, la cual es aproximadamente  $980 \text{ cm/seg}^2$ . Debido a que la aceleración máxima es utilizada para definir su efecto sobre las estructuras (Bazán y Meli, 1999) puede ser considerada como el mejor parámetro a medir.

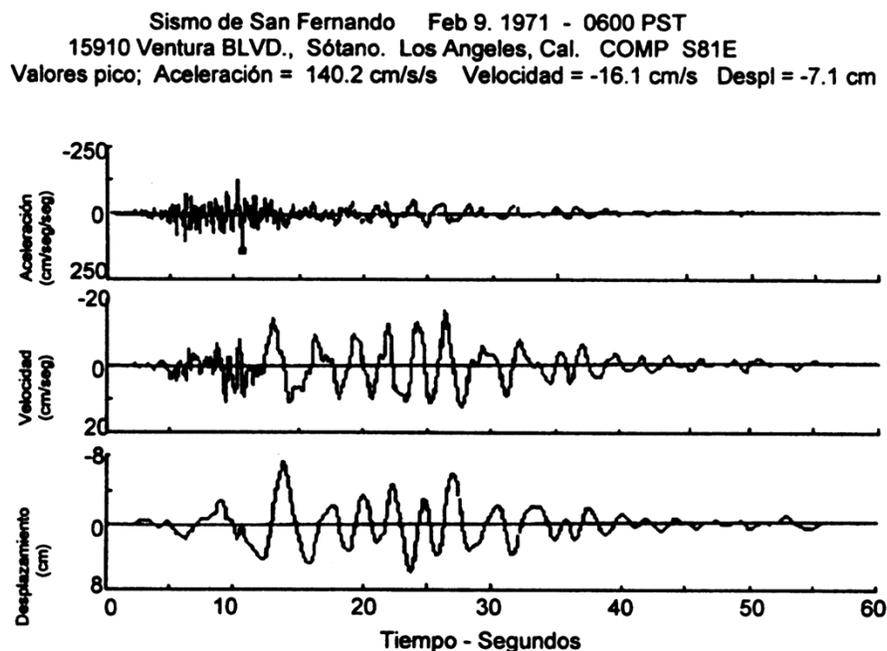


Figura 1.-Ejemplo de historias de aceleración, velocidad y desplazamiento, para el evento de San Fernando del 9 de Febrero de 1971. Tomado de Miranda [1], 1999.



Además de la aceleración el movimiento del suelo puede ser presentado en otras formas, por ejemplo los sismólogos hacen uso extensivo del análisis de Fourier para analizar la fuente y las propiedades de propagación. El análisis de Fourier permite la transformación de la señal en el dominio del tiempo, al dominio de la frecuencia lo cual directamente representa la frecuencia dependiente de las características del movimiento registrado, el espectro de amplitud de Fourier (Figura 2) es una descripción relativa de la energía del movimiento del suelo. Por otra parte los ingenieros han desarrollado otro tipo de espectro, llamado espectro de respuesta (Figura 3), el cual ha sido muy útil en el diseño y análisis de estructuras. En muchas formas la respuesta elástica de una estructura al movimiento del suelo producido por un sismo puede ser aproximado por el comportamiento de un oscilador simple cuyo periodo fundamental o periodo natural es el mismo de aquel de la estructura. El espectro de respuesta tiene su uso limitado a aquellas aplicaciones las cuales requieren un conocimiento detallado del contenido de la frecuencia del mismo movimiento del suelo (Reiter, 1990). Básicamente el espectro de respuesta se construye con diferentes periodos de vibración y todos con el mismo amortiguamiento (Figura 3) (Miranda [1], 1999; Reiter, 1990).

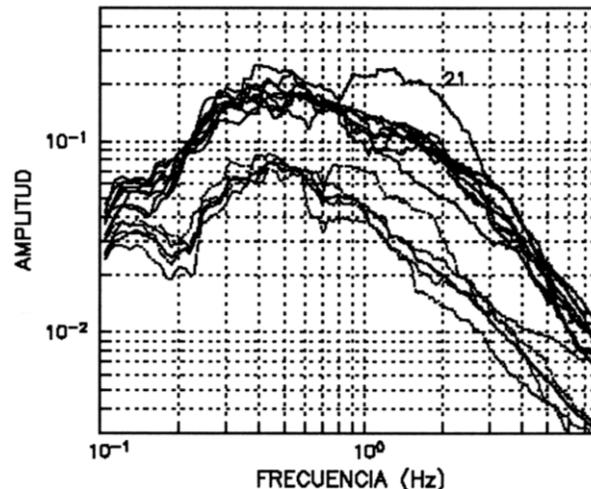


Figura 2.-Espectros de Fourier en terreno firme de la ciudad de México registrados durante el sismo del 14 de Septiembre de 1995, con  $M=7.6$ . Las amplitudes están en m/s. Tomado de Ordaz, 1999.

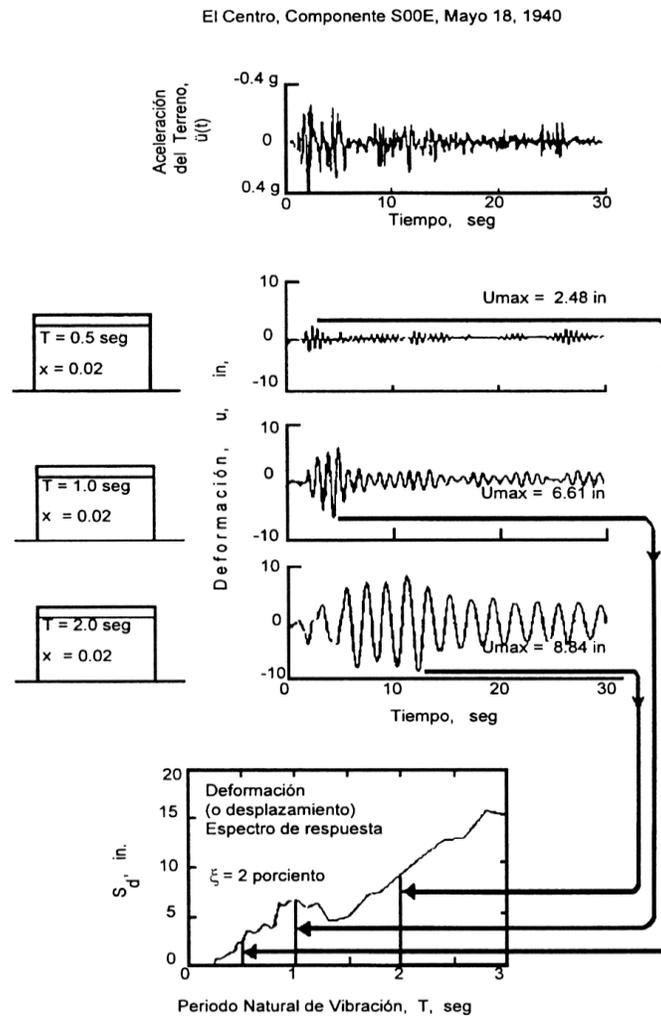


Figura 3.- Construcción de un espectro de respuesta de desplazamientos de un grado de libertad para el evento de El Centro, California, del 18 de Mayo de 1940;  $s_d$ .- Desplazamiento; T.- Tiempo;  $x$ .- Amortiguamiento crítico (2%), tomado de Miranda [1] (1999).

### 1.3.2.- Efectos de la fuente sísmica

El proceso de ruptura de un sismo no es instantáneo y puede ser muy complicado. El proceso de ruptura (deslizamiento de la falla) se detiene en lugares en donde ésta llega a la superficie o donde la roca es lo suficientemente fuerte para resistir la deformación sin fracturarse. La ruptura usualmente, no siempre, continúa en una velocidad, llamada velocidad de ruptura, un tanto menor a la velocidad de las ondas S en la roca adyacente. Un

incremento en la velocidad de ruptura puede resultar en un incremento en la amplitud del movimiento del suelo, particularmente en altas frecuencias (Reiter, 1990).

Las fallas consisten de partes débiles y fuertes cuya habilidad a la ruptura durante un evento sísmico varía. Las partes fuertes han sido llamadas “barreras” por algunos autores (Aki, 1979) y “asperezas” por otros (Kanamori y Stewart, 1978).

La hipótesis de las barreras, supone que la falla está en un estado de esfuerzos uniforme antes del evento sísmico. Durante el sismo la ruptura se propaga dejando parches sin romper (Figura 4). Estos parches o barreras son la localización de numerosas réplicas las cuales representan la liberación del esfuerzo a través de fatiga estática (Reiter, 1990).

De acuerdo a la hipótesis de las asperezas, esta menciona que justo antes del evento (sismo principal) la falla no está en un estado de esfuerzos uniforme, sino mas bien ha estado liberando esfuerzo sobre partes de la falla a través de eventos premonitores (foreshocks) dejando detrás fuertes parches o asperezas (Figura 4). Durante el sismo estas asperezas se rompen resultando en un deslizamiento suave de la falla (Reiter, 1990).

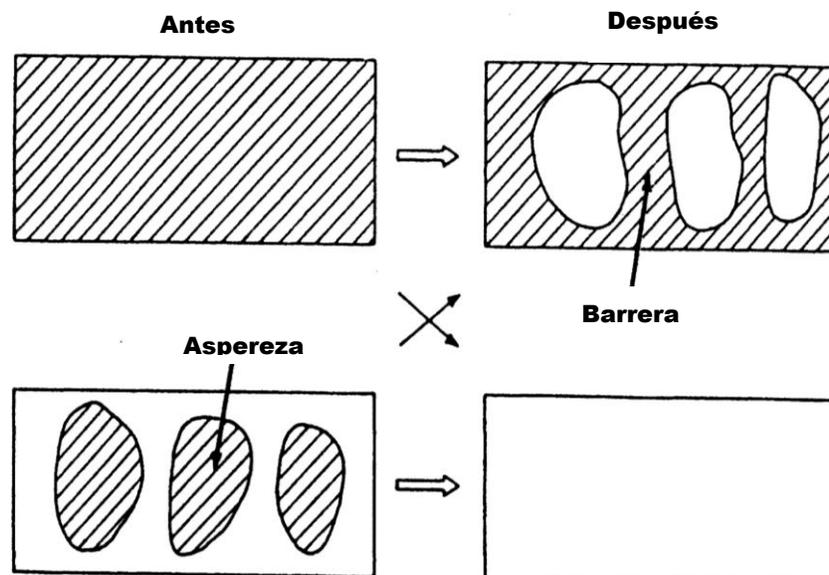


Figura 4.-Modelos de las hipótesis de “barreras” (arriba) y de “asperezas” (abajo). Tomado de Reiter, 1990.



Las barreras y asperezas son importantes para el movimiento del suelo producido por un sismo, debido a que representan lugares de la liberación de esfuerzos concentrados (caída de esfuerzo) y los lugares de origen y termino de la ruptura de la falla, también representan las fuentes de los altos niveles del fuerte movimiento del suelo, particularmente en las altas frecuencias las cuales dominan los lapsos de tiempo de la aceleración y los espectros (Reiter, 1990).

### *1.3.3.- Patrón de radiación, tipo de falla y directividad*

Los patrones de radiación son tridimensionales así que la geometría de la falla en profundidad y el lugar de interés con respecto a aquella geometría afecta el movimiento del suelo, por ejemplo, los patrones de radiación de las ondas S de una falla transcurrente son opuesto a aquellos de las ondas P (desplazado  $45^\circ$  en azimut), las ondas S más fuertes son generadas en direcciones paralelas y perpendiculares al plano de falla (Reiter, 1990).

El tipo de fallamiento también afecta el movimiento del suelo, el movimiento máximo del suelo parece estar relacionado a fallamiento inverso o normal donde los máximos esfuerzos de compresión son paralelos a la superficie de la tierra, por lo que se puede decir que la corteza está en un estado de compresión, por otro lado, el movimiento mínimo parece estar asociado con fallamiento normal y lateral, en el normal los esfuerzos de compresión mínimos son paralelos a la superficie y se puede decir que la corteza está en una estado de tensión, en el fallamiento lateral los esfuerzos de compresión máximos y mínimos son paralelos a la superficie (Reiter, 1990).

Otra característica de la fuente que puede afectar el movimiento del suelo es la directividad, también referida como enfoque. La directividad ocurre porque la fuente de las ondas sísmicas (ruptura de la falla) es un movimiento de fuente que viaja a lo largo de la falla a una velocidad finita de ruptura. La dirección de la ruptura de la falla afecta el movimiento de suelo, ya que si la ruptura se propaga hacia un sitio en particular, el movimiento del suelo en ese sitio será mayor que si la ruptura se propagará alejándose de éste (Reiter, 1990).



El efecto de directividad produce el mayor movimiento del suelo (y la menor duración) en la dirección de propagación de la ruptura y el menor (y mayor duración) en la dirección opuesta a la dirección de propagación de la ruptura. Este efecto incrementa cuando la velocidad de ruptura se aproxima a la velocidad de las ondas sísmicas y cuando el ángulo entre el punto de observación y la dirección de propagación se vuelve más pequeño (Reiter, 1990).

#### *1.3.4.- Efectos de trayectos de viaje de las ondas sísmicas (Travel paths)*

Los efectos del trayecto de viaje de las ondas sísmicas sobre el movimiento del suelo son primeramente relacionados a la atenuación de las ondas sísmicas, la atenuación es definida como la pérdida de amplitud de la onda sísmica con la distancia, junto con la magnitud del sismo (o momento) la atenuación provee el mayor efecto sistemático y profundo observado en el movimiento del suelo (Reiter, 1990).

#### *1.3.5.- Efectos de sitio*

Se conoce como efecto de sitio a la respuesta sísmica del terreno con características significativamente distintas en amplitud, duración o contenido de frecuencias de un área relativamente reducida, con respecto al entorno regional. Podría decirse que es aquella condición bajo la cual se llegan a observar intensidades sísmicas notablemente distintas y bien localizadas (Gutiérrez, 1999).

El efecto de sitio se da fundamentalmente en función de las características geométricas de los cuerpos geológicos, como son: topografía del basamento, espesor y distribución de los estratos. Así como de los parámetros mecánicos de los materiales, tales como: velocidades de las ondas P y S, densidad, amortiguamientos, etc. (Gutiérrez, 1999; Reiter, 1990)

De acuerdo a Gutiérrez (1999), el efecto de sitio puede ser dividido en dos tipos: 1.- Amplificación del movimiento en cuerpos sedimentarios superficiales y, 2.- Amplificación



relacionada con la topografía superficial. El primero tiene especial importancia para las estimaciones de peligro sísmico, debido a que un gran número de ciudades importantes del país y del mundo se han desarrollado en planicies aluviales, algunas cercanas a las fuentes sísmogénicas. Sin embargo, las grandes distancias con respecto a las zonas de alta sismicidad no significa que los niveles de amplificación del movimiento del terreno tengan que ser reducidos (Gutiérrez, 1999; Reiter, 1990), ya que una de las causas principales del fenómeno de amplificación de las ondas es el alto contraste de impedancias que se tiene entre el cuerpo sedimentario superficial y el basamento rocoso.

El segundo tipo de amplificación, con base en modelos teóricos y numéricos, se ha determinado que el movimiento sísmico puede estar sujeto a amplificación, principalmente en componentes horizontales, en los altos topográficos (áreas convexas) y a una deamplificación en zonas intermontañas (áreas cóncavas), especialmente donde los espesores del suelo son muy reducidos (Gutiérrez, 1999).

Reiter (1990) menciona, que las propiedades que afectan el nivel del movimiento del suelo son la impedancia y la absorción. La impedancia de acuerdo a Aki y Richards (1980) es la resistencia de una partícula (roca o suelo) al movimiento. Si una onda sísmica que pasa a través de una región donde la impedancia incrementa, la resistencia al movimiento incrementa y para conservar la energía, la velocidad de la partícula y por lo tanto la amplitud de la onda sísmica decrece. Las ondas sísmicas a una misma distancia de un evento deberían ser más altas en una densidad baja (suelo de baja velocidad) que en densidad alta (roca de alta velocidad) (Reiter, 1990).

La absorción se encarga de mitigar el incremento de la amplitud, la cual es también llamada amortiguamiento o atenuación inelástica, que tiende a ser substancialmente mayor en suelo suave que en rocas. En altas frecuencias el impacto de la absorción puede ser muy severo a diferencia de las bajas frecuencias. La impedancia y la absorción parecen balancear aquellas frecuencias que dominan el máximo de aceleración (cerca de 5 Hz), debido a que no hay una diferencia significativa de los máximos de aceleración registrados en sitios definidos en términos generales como roca y suelo (Aki, 1988). Si el movimiento



del suelo es dominado por altas frecuencias, como en el caso de pequeños sismos, la absorción más baja de la roca puede permitir altos picos, que en otros sitios, los máximos de velocidades, sin embargo, usualmente dominados por frecuencias alrededor de 1 Hz o menor, serán siempre mayores en sitios de suelo suave (Reiter, 1990).

Se ha notado que en muchos casos los efectos de sitio pueden controlar el movimiento del suelo, factores de 10 o más en amplificación son teóricamente posibles y han sido observados, después del evento de septiembre de 1985, los estudios de amplificación en la ciudad de México mostraron un lugar sobre el antiguo lago en el cual el movimiento del suelo en una frecuencia fue 55 veces mayor que aquellos cerca de la roca (Reiter, 1990, Singh *et al.*, 1988). Cuando las condiciones de sitio incluyendo los efectos topográficos, considerados como significantes y puedan impactar la seguridad, debe realizarse una evaluación detallada utilizando estudios históricos, experimentales y teóricos (Reiter, 1990).

Las metodologías para la evaluación de los efectos de sitio pueden dividirse en dos grupos (Gutiérrez, 1999): observación instrumental y análisis teórico y numérico con base en información geotécnica. Las observaciones instrumentales pueden a su vez dividirse en dos, ya sea empleando una estación de referencia, donde una de las estaciones de registro denominada estación de referencia, debe estar libre de los efectos de sitio (normalmente zona rocosa) y el efecto de sitio puede ser estimado calculando el cociente de espectros de amplitud de Fourier (suelo blando/suelo firme) de los registros de velocidad o aceleración. La segunda evaluación es sin una estación de referencia, una de las técnicas más conocidas consiste en el cálculo de razones espectrales de componentes horizontales entre verticales de un registro sísmico dado, otras de las técnicas es el uso de la vibración ambiental, particularmente por la rapidez con que se obtienen los resultados y su bajo costo (Gutiérrez, 1999).

Dentro de los estudios teóricos y numéricos se encuentran los métodos analíticos, métodos de rayos, las técnicas basadas en análisis de frontera y las técnicas en el análisis de dominio (Gutiérrez, 1999). Los métodos analíticos se emplean para estudios de casos con



geometría sumamente simple, los métodos de rayos emplean técnicas basadas en el análisis de altas frecuencias y presentan dificultades de uso cuando las longitudes de onda son comparables a las heterogeneidades, las técnicas basadas en análisis de frontera emplean integrales de frontera, de gran utilidad cuando se considera un número limitado de unidades geológicas homogéneas, por último las técnicas basadas en el análisis del dominio, emplean métodos de diferencias finitas o elemento finito, particularmente útiles para estructuras complejas (Gutiérrez, 1999).

### ***1.3.6.- Relaciones entre PGA, PGV e Intensidad***

La caracterización estadística de los niveles esperados del movimiento del suelo en un sitio dado en términos de la intensidad de un sismo para una respectiva área es una práctica común dentro de la sismología y la ingeniería, por lo que, el evaluar la naturaleza de las correlaciones entre intensidad sísmica y las amplitudes registradas de movimientos fuertes es de suma importancia, así como el re-examinar como éstas fueron determinadas (Trifunac y Brady, 1975).

Los mapas de intensidades son representaciones simplificadas de un campo espacialmente variable, y el valor real de la intensidad ( $I$ ) en el sitio de registro del movimiento fuerte es, usualmente, no conocido, por lo que no existe garantía de que la  $I$  en el lugar de la estación del movimiento fuerte corresponda con el valor de la  $I$  sobre el mapa (Wald *et al.*, 1999).

Las comparaciones entre los máximos del movimiento del suelo (velocidad y aceleración) e intensidades son basadas principalmente en regresiones de los niveles de intensidad contra los limitados valores registrados de los máximos del movimiento del suelo (Yih-Min *et al.*, 2003; Trifunac y Brady, 1975; Hsu, 1979). Las intensidades basadas en los máximos de aceleración, suelen ser erráticas debido que para eventos de pequeños a moderados hay, ocasionalmente, grandes valores de aceleración, los cuales están confinados a algunos pequeños vecindarios, estos singulares valores son grandes debido a



los efectos de sitio y a los efectos de la propagación de onda, especialmente cuando los movimientos del suelo son dominados por altas frecuencias (Yih-Min *et al.*, 2003).

Yih-Min *et al.* (2003) mostraron tres ejemplos para ilustrar el comportamiento de los PGA y velocidad máximos (PGV), siendo que los PGA pueden tener mayores variaciones, mientras que los valores correspondientes a los PGV dan pequeñas variaciones, observando claramente que para sismos grandes los valores de PGA varían en amplios rangos y no reflejan la magnitud del evento así como los valores de PGV.

Wald *et al.* (1999) mostraron que los bajos niveles de intensidad se correlacionan muy bien con los PGA y PGV, mientras que para las intensidades más altas, éstas se correlacionan mejor con los PGV. Boatwright *et al.* (2001) demostraron que PGV es significativamente mejor correlacionado con la intensidad ( $IMM \geq 6$ ) que el PGA, basado en la correlación de la intensidad añadida con observaciones de PGA y PGV en el sismo de Northridge de 1994.

Atkinson y Kaka (2007) mencionan que el PGV es ideal entre los parámetros de movimientos del suelo para las elaboraciones de Shakemaps, debido a que es el más simple parámetro y el que está, de una manera más rápido, disponible de las redes sismológicas, además que es un parámetro que está directamente relacionado con la energía cinética, la cual se relaciona con el daño producido a las estructuras.

Desde los comienzos de la instrumentación sismológica, varios intentos se han llevado a cabo con el fin de correlacionar las escalas de intensidad sísmica con los PGA's, uno de los primeros fue desarrollado por Ishimoto (1932), quien correlaciono las componentes horizontales de los máximos de aceleración con seis niveles de la escala de intensidades del Observatorio Meteorológico Central Japonés. En 1951, Kawasumi, propuso la relación entre el promedio de PGA,  $\bar{a}$ , en  $\text{cm}/\text{seg}^2$  y la intensidad  $I$ , en la escala de intensidad japonés:

$$\log \bar{a} = -0.35 + 0.5I \quad 1.3.6$$



En 1942, Gutenberg y Richter, correlacionaron los PGA con la escala de intensidad sísmica Modificada de Mercalli ( $I_{MM}$ ), y propusieron la siguiente ecuación:

$$\log a = -0.5 + 0.33I_{MM} \quad 1.3.7$$

Mientras que en 1956, Hershberger derivó la siguiente ecuación:

$$\log a = -0.90 + 0.43I_{MM} \quad 1.3.8$$

Neumann (1954) propuso la siguiente relación:

$$\log a = -0.041 + 0.308I_{MM} \quad 1.3.9$$

la cual es válida sólo para distancias epicentrales por arriba de las 25 millas (40.2 Km.). Por su parte Trifunac y Brady (1975) proponen tres relaciones una para las aceleraciones, la segunda para las velocidades y la tercera para los desplazamientos, todas las relaciones divididas en componentes verticales (V) y horizontales (H):

1.- Relaciones de aceleración para  $IV \leq I_{MM} \leq X$ :

$$\log a_V = -0.18 + 0.30I_{MM} \quad 1.3.10$$

$$\log a_H = 0.014 + 0.30I_{MM} \quad 1.3.11$$

2.- Relaciones de velocidad para  $IV \leq I_{MM} \leq X$ :

$$\log v_V = -1.10 + 0.28I_{MM} \quad 1.3.12$$

$$\log v_H = -0.63 + 0.25I_{MM} \quad 1.3.13$$

3.- Relaciones de desplazamiento para  $V \leq I_{MM} \leq X$ :

$$\log d_V = -1.13 + 0.24I_{MM} \quad 1.3.14$$

$$\log d_H = -0.53 + 0.19I_{MM} \quad 1.3.15$$

Wald *et al.* (1999) desarrollaron relaciones entre la  $I_{MM}$  y los máximos de aceleración y velocidad (PGA y PGV respectivamente), comparando movimientos del suelo horizontales con intensidades observadas para ocho eventos significativos en California, las relaciones encontradas caen dentro de un rango limitado de intensidad de  $I_{MM}$ :



⇒ Para el máximo de aceleración con  $V \leq I_{MM} \leq VIII$ :

$$I_{MM} = 3.66 \log (\text{PGA}) - 1.66 \quad 1.3.16$$

⇒ Para el máximo de aceleración con  $I_{MM} \leq IV$ :

$$I_{MM} = 2.20 \log (\text{PGA}) + 1.00 \quad 1.3.17$$

⇒ Para el máximo de velocidad con  $V \leq I_{MM} \leq IX$ :

$$I_{MM} = 3.47 \log (\text{PGV}) + 2.35 \quad 1.3.18$$

⇒ Para el máximo de velocidad con  $I_{MM} \leq IV$ :

$$I_{MM} = 2.10 \log (\text{PGV}) + 3.40 \quad 1.3.19$$

[Atkinson y Kaka \(2007\)](#) determinaron relaciones entre los PGV y la intensidad MM usando datos de sismos moderados sentidos en la región central de Estados Unidos, los cuales fueron registrados en red de banda ancha y registros de movimientos fuertes en dicha región, las relaciones determinadas son las siguientes:

$$MMI = 4.37 + 1.32 (\log \text{PGV}) \quad \log \text{PGV} \leq 0.48 \quad 1.3.20$$

$$MMI = 3.54 + 3.03 (\log \text{PGV}) \quad \log \text{PGV} \geq 0.48 \quad 1.3.21$$

La Figura 5 muestra las relaciones entre aceleración e intensidad de manera gráfica, donde se puede apreciar que son muy similares entre ellas, a excepción de la relación de [Hershberger \(1956\)](#) que presenta altos valores de aceleración hacia los niveles mayores de intensidad y valores bajos de aceleración en los primeros niveles. La mayoría de las relaciones presentadas fueron desarrolladas para el país de donde los datos fueron obtenidos (Estados Unidos, Japón, etc.), por lo que la aplicación de las mismas a otros lugares podría estar restringida. [Lomnitz \(1970\)](#) puntualiza que en algunas partes del mundo la intensidad es evaluada haciendo un promedio sobre una región, mientras que en otras partes (Ej. California), los máximos efectos son usados para determinar un nivel de intensidad en



particular. Debido a esto los autores no recomiendan el uso de éstas, como rutinas en las aplicaciones dentro de la ingeniería civil. En este trabajo se usaran las relaciones desarrolladas por Wald *et al.* (1999), debido a que éstas presentan una mejor correlación tanto para los niveles bajos de intensidad como para los niveles altos, como se puede apreciar en la Figura 5.

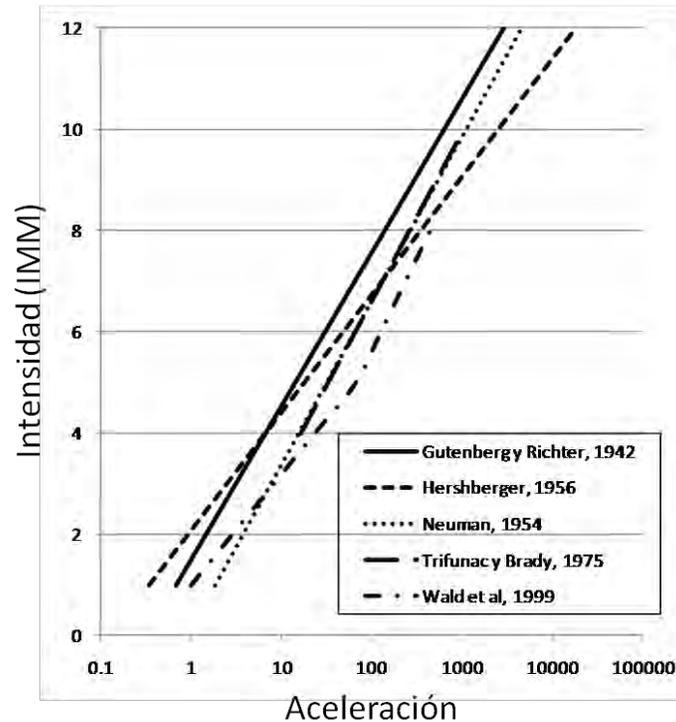


Figura 5.-Gráfica de las relaciones entre aceleración e intensidad, propuestas por diferentes autores.

#### ***1.4.- Interacción suelo-estructura***

##### ***1.4.1.- Periodo dominante del movimiento de suelo***

El hecho de que el movimiento del suelo producido por un sismo tiene un periodo único el cual depende del tipo de suelo, implica que las características de las componentes de periodo corto en el movimiento son ampliamente gobernadas por las propiedades del suelo (Kanai, 1983).



Así que para cada escenario hay cierto periodo en donde las amplitudes alcanzan su máximo, este periodo de máxima amplitud es llamado periodo predominante y demuestra una de las características del suelo (Kanai, 1983). Hay evidencia que el movimiento del suelo por altas frecuencias en México es más intenso para eventos intraplaca que para los eventos interplaca (Iglesias *et al.*, 2002; Singh *et al.*, 2000).

Investigaciones detalladas de lo anterior revelaron que este periodo predominante varía de acuerdo a la distancia epicentral y a la magnitud del evento, entre otros factores, pero debido a que la distancia epicentral incrementa, el periodo predominante tiende a ser mayor, mientras que en los casos de pequeños sismos éste muestra una tendencia a ser menor (Iglesias *et al.*, 2002; Singh *et al.*, 1987; Kanai, 1983).

Partiendo de la magnitud de los eventos, las magnitudes de 5 o más pueden producir daño a las estructuras, el periodo dominante del movimiento producido por el sismo, y que tiene un significado importante tomándolo desde un punto de vista de la ingeniería, es constante para cada tipo de suelo (o subsuelo), y su valor corresponde al periodo natural del suelo (Kanai, 1983). El mayor daño a las estructuras se puede presentar cuando su periodo natural coincide con el periodo predominante del movimiento producido por el sismo (Reiter, 1990; Kanai, 1983). La vibración de las estructuras no incrementará a menos que varias ondas con aquel periodo sean sostenidas incluso si el periodo coincide. En estructuras ordinarias, si las fuerzas externas con el mismo periodo ocurren varias veces, la amplitud de vibración se aproximará al valor para una oscilación infinitamente sostenida (Kanai, 1983).

En áreas en donde el periodo predominante es corto (suelo duro), el número máximo de oscilaciones así como la aceleración máxima del movimiento sísmico son mayores, pero el rango del periodo es limitado. Mientras que donde el periodo dominante es largo (suelo suave) el número total de oscilaciones no es tan grande y el rango del periodo es extenso (Kanai, 1983).



El periodo de vibración del movimiento producido por un sismo en suelo suave, tiene una amplitud de desplazamiento mayor, pero su amplitud de aceleración es pequeña debido a su largo periodo predominante, mientras que, en suelo duro el periodo de vibración tiene una amplitud de desplazamiento relativamente pequeña, y su amplitud de aceleración es mayor debido a su corto periodo predominante (Kanai, 1983).

#### *1.4.2.- Daños en las estructuras*

El daño producido por el movimiento del suelo depende del tipo de estructuras, de la amplitud, frecuencia, duración y energía. El pico de aceleración por si mismo sólo provee información acerca de la máxima aceleración y de la asíntota de la alta frecuencia en el espectro de respuesta, por lo que el máximo de aceleración por si solo puede considerarse como un indicador del daño potencial (Reiter, 1990). Lo que sería el caso para estructuras frágiles o sistemas frágiles tales como las estructuras de mampostería sin refuerzo, que son más susceptibles a altas frecuencias, estas pueden ser dañadas principalmente debido a que no absorben la energía cuando la aceleración causa cargas inerciales que exceden la resistencia a la falla (Reiter, 1990; Jennings, 1985).

La información sobre la frecuencia dominante es particularmente importante debido a que diferentes tipos de estructuras tienen periodos naturales diferentes, las estructuras cortas y rígidas son sensibles a periodos cortos (altas frecuencias) que las altas y flexibles (Reiter, 1990). La duración del movimiento se convierte en un elemento crítico en la evaluación del potencial de daño, si un pulso de aceleración es fuerte pero la duración de éste es más corto que el periodo natural de la estructura, la deformación estructural será pequeña, por otra parte, si la duración del pulso es largo y mantiene su fuerza, la tasa de deformación estructural puede incrementar muy rápidamente (Reiter, 1990).

Otro buen indicador del daño es el máximo de velocidad. El máximo de velocidad es asociado con periodos largos de movimiento y puede ser fácilmente relacionado con la energía, debido a que la energía cinética es proporcional al cuadrado de la velocidad (Reiter, 1990). El daño es una función compleja de amplitud, frecuencia y duración, el cual



varía con el tipo de estructura o componente a ser considerado (Del Valle, 1999; Reiter, 1990).

En general, en terrenos firmes la frecuencia es más alta que en terrenos blandos, lo que indica que el número de ciclos de oscilación del terreno por unidad de tiempo es mayor, sintiéndose el movimiento más violento y rápido que en los terrenos blandos, donde es más lento, por lo que los desplazamientos y la duración total suelen ser mucho mayores en el terreno blando (Del Valle, 1999).

### ***1.5.- Atenuación***

Los efectos del trayecto de viaje de las ondas sísmicas sobre el movimiento del suelo son primeramente relacionados a la atenuación de la propagación de las ondas sísmicas, la atenuación es definida como la pérdida de amplitud de la onda sísmica con la distancia, junto con la magnitud del sismo (o momento) la atenuación provee el mayor efecto sistemático observado en el movimiento del suelo (Reiter, 1990).

La atenuación de las ondas sísmicas puede ser considerada como compuesta de dos elementos principales: la expansión geométrica y la absorción (algunas veces llamado amortiguamiento). La expansión geométrica resulta de la conservación de la energía como ondas y frentes de ondas ocupando una mayor área, extendiéndose conforme se van alejando de la fuente. Si la tierra fuese homogénea e isotrópica, es decir, las mismas propiedades en todas direcciones, las ondas de cuerpo tendrían frentes de onda esféricos y sus amplitudes decrecerían  $1/R$ , donde  $R$  es la distancia a la fuente sísmica (Lay y Wallace, 1995; Reiter, 1990).

La absorción, por otra parte, simboliza una red de pérdida de energía como ondas sísmicas propagadas, ésta es parcialmente controlada por mecanismos intrínsecos físicos de pérdida tal como la fricción a través del deslizamiento en las fracturas, fricción interna y los efectos de los límites de granos, los cuales ocurren cuando una onda sísmica pasa a través de la roca. La temperatura podría ser considerada como un mecanismo de pérdida donde la



roca más caliente cause mayor absorción. La otra parte de la absorción es causada por las heterogeneidades a lo largo del trayecto de viaje que puede causar un esparcimiento lo cual resulta en una interferencia destructiva ([Reiter, 1990](#)).

### ***1.5.1.- Relaciones de atenuación***

La determinación del riesgo sísmico puede ser elaborado de manera determinística (escenarios específicos de sismos) y de manera probabilística (todos los sismos con sus probabilidades específicas de ocurrencia). Ambas aproximaciones requieren de modelos de atenuación del movimiento del suelo, la mayoría de los modelos de atenuación están basados en análisis estadísticos de los registros del movimiento del suelo, los cuales son actualizados cuando nuevos datos de movimientos fuertes están disponibles ([Abrahamson y Shedlock, 1997](#)).

La estimación de un esperado movimiento del suelo debido a un evento sísmico a una distancia dada y de una magnitud dada son datos de entrada fundamentales para el cálculo del riesgo sísmico. La determinación del criterio para el diseño sísmico de estructuras ingenieriles depende de que tan cercano sea la estimación del movimiento del suelo a la realidad para los sismos que se esperan durante la vida útil de la estructura o estructuras. Estas estimaciones son usualmente (y mayormente usadas) ecuaciones, llamadas *relaciones de atenuación*, que expresan el movimiento del suelo en función de la magnitud y la distancia, y ocasionalmente incluyen otro tipo de variables, tales como: el tipo de fallamiento, tipo de suelo, etc. ([Abrahamson y Shedlock, 1997](#))

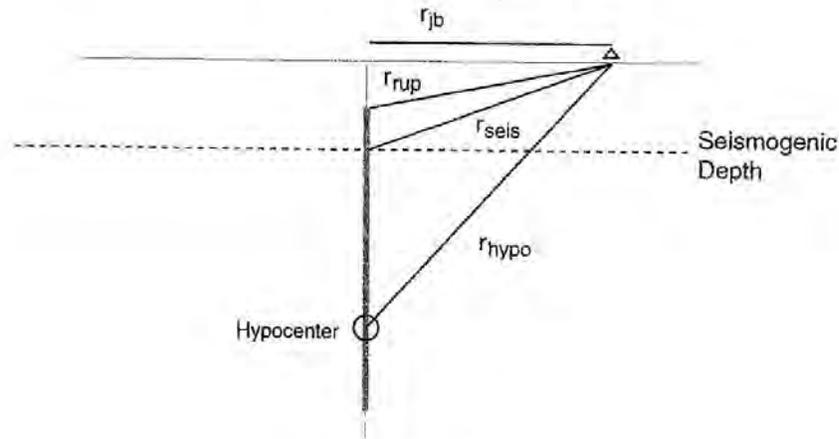
Las relaciones de atenuación del movimiento del suelo pueden ser determinadas de dos formas: empíricamente, usando registros del movimiento del suelo o teóricamente, usando modelos sísmicos para generar movimientos del suelo sintéticos los cuales toman en cuenta la fuente, el sitio y los efectos del trayecto de las ondas sísmicas ([Abrahamson y Shedlock, 1997](#)).



Los parámetros comúnmente usados en la determinación de las ecuaciones de atenuación son los máximos de aceleración horizontal y vertical (PGA), el máximo de velocidad (PGV) y 5% de amortiguamiento en la aceleración espectral (SA) para una clasificación de suelo. Los parámetros que deben ser claramente definidos en función de la estimación del movimiento del suelo son: la magnitud del evento sísmico, tipo de fallamiento, distancia y las condiciones locales del sitio ([Abrahamson y Shedlock, 1997](#)).

Puede no haber tanto problema en definir el tipo de magnitud a emplear, dado que la mayoría de las redes reportan la magnitud de momento sísmico ( $M_w$ ), a veces el problema se presenta en qué tipo de distancia se debe utilizar, dado que hay diversas distancias que se pueden determinar a la fuente, tales como:  $r_{jb}$ , que es la distancia horizontal más cercana a la proyección vertical de la ruptura (es la “distancia de Joyner-Boore”);  $r_{rup}$ , es la distancia más cercana a la superficie de ruptura;  $r_{seis}$ , es la distancia más cercana a la superficie sismogénica de ruptura (asumiendo que los sedimentos cercanos a la superficie de ruptura son no sismogénicos) ([Marone y Scholz, 1998](#)); y por último la distancia hipocentral,  $r_{hypo}$ , la Figura 6 muestra estas diferentes medidas para fallas verticales y para fallas inclinadas ([Abrahamson y Shedlock, 1997](#)).

### Vertical Faults



### Dipping Faults

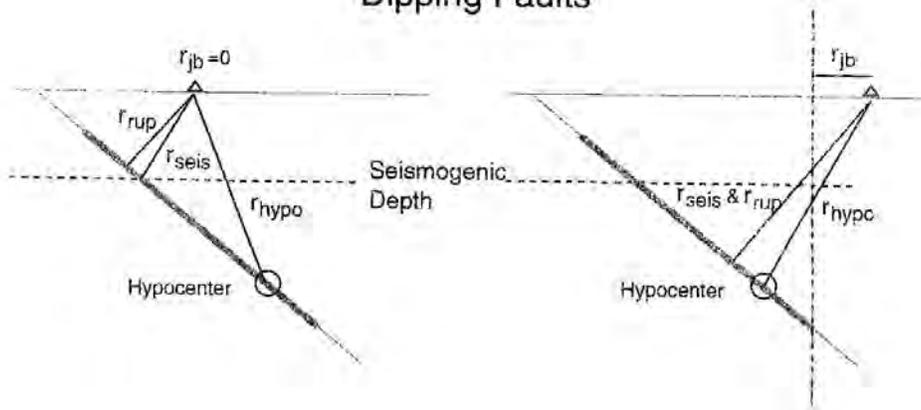


Figura 6.- Distancias del sitio a la fuente para modelos de movimiento de suelo. Profundidad sismogénica (línea punteada, que es la profundidad de parte omogénica alta de la corteza) (Tomada de Abrahamson y Shedlock, 1997)

Con respecto a la clasificación del sitio también se emplean diversos esquemas, los cuales varían de descripciones cualitativas del material cercano a la superficie a definiciones cuantitativas basadas en la velocidad de la onda de corte. Además diferentes ambientes tectónicos proveen condiciones para la determinación de diferentes relaciones de atenuación del movimiento del suelo (Abrahamson y Shedlock, 1997). Dentro de estos ambientes se encuentra el de subducción, que es donde nuestro país tiene cabida, la mayoría de las relaciones de atenuación en este tipo de ambientes son basadas primordialmente sobre registros de Japón y Sur América (Abrahamson y Shedlock, 1997).



[Youngs et al. \(1997\)](#) desarrollaron relaciones de atenuación para la interfase en la zona de subducción y para eventos intraplaca usando datos de Alaska, Chile, Cascadia, Japón, México, Perú y de las islas Soloman, demostrando que los máximos de los movimientos del suelo de estos ambientes tectónicos se atenúan más lentamente que aquellos de sismos corticales superficiales en regiones tectónicamente activas y que los eventos intraplaca producen mayores máximos de movimiento del suelo que los eventos de interfase para una misma magnitud y distancia.

Por su parte [Anderson \(1997\)](#) presenta un modelo no-paramétrico para los máximos de aceleración como función de la magnitud, distancia y sitio, para eventos en zonas de subducción, el cual fue desarrollado usando solamente datos del estado de Guerrero, con eventos que varían en magnitud desde 3 a 8.1.

A parte del trabajo desarrollado por [Anderson \(1997\)](#), otros de los primeros intentos por desarrollar ecuaciones para estimar los movimientos del terreno fueron llevados a cabo por [Esteva y Villaverde \(1974\)](#), usando principalmente registros de California con 30% de datos de México y Centroamérica, más tarde surgieron otros modelos los cuales emplearon información de registros únicamente de México: [Bufaliza \(1984\)](#), [Ordaz et al. \(1989\)](#) y [García et al. \(2005\)](#).

Dado que México presenta variaciones en la zona de subducción, debido a la subducción de las placas de Rivera y Cocos ([Pardo y Suárez, 1995](#)), las relaciones de atenuación determinadas para el estado de Guerrero no pueden ser aplicadas hacia otra parte de la zona de subducción tal como los resultados de [Tejeda y Chávez \(2007\)](#) lo muestran, ellos determinaron ecuaciones de atenuación para el estado de Colima (zona norte de la zona de subducción) para las aceleraciones máximas y para espectros de respuesta de pseudoaceleración en 10 valores de periodos (con 5% de amortiguamiento), demostrando que la atenuación en el estado de Colima es diferente a la del estado de Guerrero, sugiriendo que la diferencia en la tectónica y en la geología regional puede alterar significativamente la atenuación del movimiento del suelo con la distancia, invalidando la extrapolación de estas relaciones de atenuación a otros sitios.



### ***1.6.- Trabajos previos***

El análisis del peligro sísmico describe la peligrosidad potencial de los sismos relacionados a fenómenos naturales tales como el sacudimiento del terreno, la ruptura de la falla o la licuefacción del suelo, lo cual podría resultar en consecuencias adversas para la sociedad, tal como la destrucción de edificios y la pérdida de vidas. El análisis del peligro sísmico, requiere el conocimiento de varias disciplinas, tal como la geología, la cual ayuda a definir la localización, configuración y las potenciales fuentes sísmicas, particularmente las fallas activas. Las técnicas geofísicas ayudan a definir las fuentes sísmicas que no son observables en la superficie. Las matemáticas proporcionan las evaluaciones probabilísticas. La ingeniería geotécnica es usada para estimar el efecto de las condiciones del suelo local en el movimiento del terreno. La ingeniería estructural y mecánica define la manera de cómo establecer los parámetros de los resultados de la mayoría de los análisis de peligro. Finalmente las relaciones políticas y públicas son necesarias para la aplicación de los más sofisticados estudios de peligro (Reiter, 1990).

La actividad sísmica de México ha sido objeto de estudio desde tiempos inmemorables, el país se ha distinguido entre de los países de mayor avance en el campo de la construcción sismo-resistente y en las técnicas de evaluación del peligro sísmico. Un análisis de peligro sísmico fue desarrollado para Latinoamérica y el Caribe por Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH), la zona de cobertura global de este proyecto abarca los 70° S a los 33° N de latitud y de los 30° W a los 120° W, la cual para su operatividad fue dividida en regiones: México, Centroamérica, Sudamérica y el Caribe.

La parte correspondiente a México del proyecto anterior fue desarrollada por Zúñiga *et al.* (1997), empleándose una base de datos de lo que se contaba hasta el momento, considerando datos históricos relacionados a la época colonial y precortesiana, desarrollando así una regionalización sismotectónica general de México (Figura 7), considerando:



- ⇒ La localización hipocentral de eventos de características similares.
- ⇒ Las características tectónicas comunes de la zona.
- ⇒ Los mecanismos focales y patrones de fallamiento.
- ⇒ Las características principales de la liberación de energía de los sismos dentro de cada región.
- ⇒ La historia sísmica de cada región.
- ⇒ Y la reducción de regiones primarias, de las cuales se pudiese partir para posibles subdivisiones futuras más refinadas.

En la determinación del peligro sísmico se emplearon datos y modelos teóricos para describir la sismicidad de las fuentes potencialmente dañinas, con especial énfasis en la modelación probabilística del proceso de ocurrencia de los grandes eventos de subducción. Además de presentar modelos de atenuación de las ondas sísmicas, los cuales fueron empleados para los diferentes tipos de eventos considerados (costeros, superficiales y profundos). Son modelos semi-empíricos, cuya forma funcional se deriva de consideraciones teóricas y cuyos parámetros fueron ajustados para reproducir las características de los movimientos fuertes registrados. El peligro sísmico queda expresado en términos de la tasa de excedencia de la aceleración máxima del terreno, en el caso de ocurrencias poissonianas, y la tasa de excedencia equivalente para el proceso de renovación. En la Figura 8 se muestra un mapa con las curvas iso-aceleración (gales) del país, para un periodo de recurrencia de 500 años ( $T=500$ ).

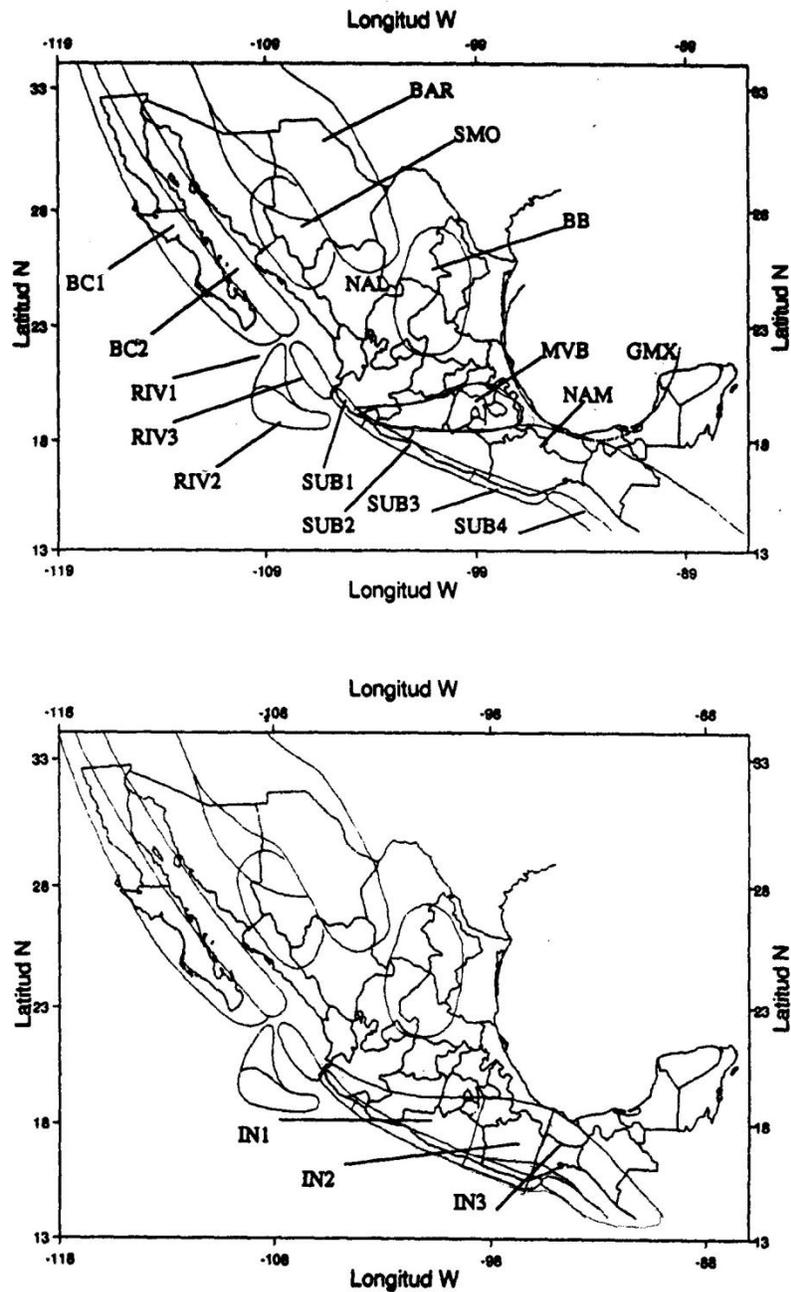


Figura 7.- Zonas sismotectónicas de México de acuerdo a la regionalización de Zúñiga et al., 1997. Sub1, Sub2, Sub3 y Sub4.- Representan las regiones de la zona de subducción del pacífico mexicano. MVB.- Región del eje volcánico mexicano (Mexican Volcanic Belt). NAM.- Región intraplaca (Norteamericana). BC1 y BC2.- Regiones del pacífico (Península de Baja California). SMO.- Provincia de la Sierra Madre Occidental. BAR.- Provincias de Cuencas y Sierras-Fisura del Río Bravo (Basin and Range-Río Grande rift). BB.- Provincia de la Cuenca de Burgos (Burgos Basin). RIV1, RIV2 y RIV3.- Placa rivera interfaces con las placas Pacífico y Norteamericana. GMX.- Región del Golfo de México. NAL.- Región intraplaca (Norteamericana). IN1, IN2 e IN3.- Representan las regiones intraplaca (Cocos).

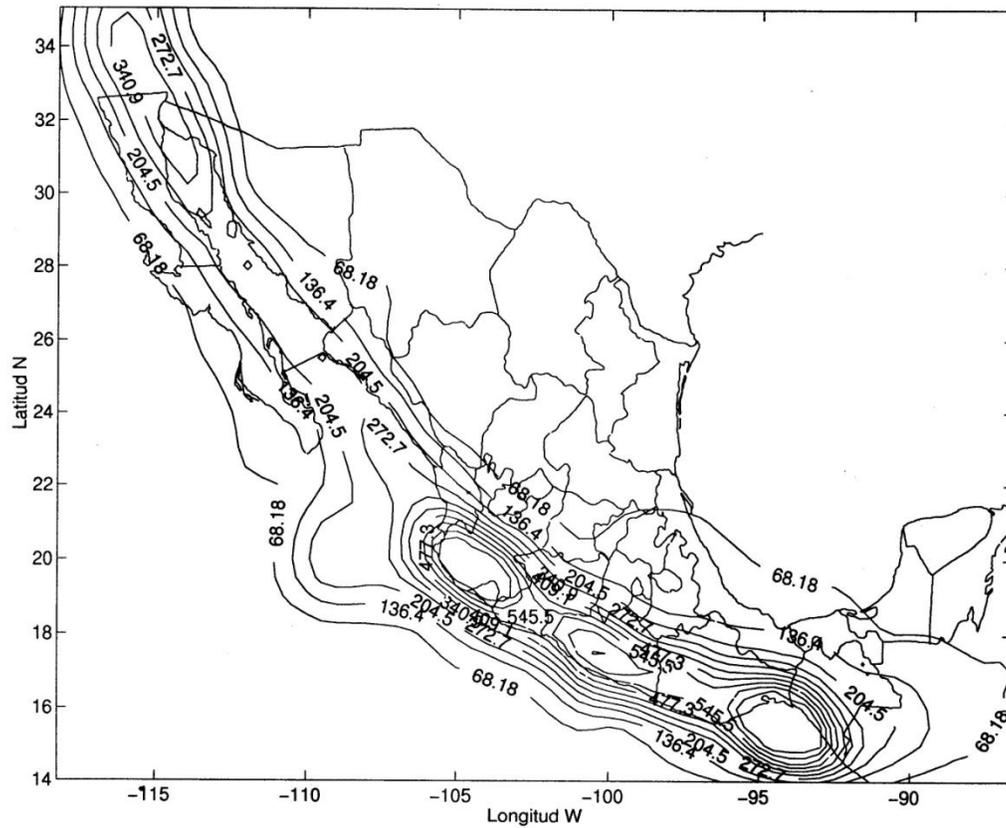


Figura 8.- Mapa de curvas iso-aceleración para México, aceleración máxima en gales,  $T=500$ . (Tomado de Zúñiga et al., 1997)

Otro de los trabajos desarrollado en este sentido (peligro sísmico), fue el realizado por [Tanner y Shedlock \(2004\)](#), quienes elaboraron nueve mapas designados a asistir la mitigación del riesgo global, proveyendo un marco general del peligro sísmico, estos mapas cubren las regiones de México, el Caribe, América central y Sudamérica. Para la región de México los altos valores de peligro sísmico ocurren en áreas que han sido, o son, los límites de placas donde han ocurrido los grandes sismos.

Los valores que calcularon, fueron empleando métodos probabilísticos basados sobre un método de ocurrencia histórica de sismos, para lo cual el primer paso fue el desarrollo de un catalogo sísmico uniforme para cada una de las regiones, y después de esto la identificación de las relaciones de atenuación apropiadas o la elaboración de las mismas, estimaciones del movimiento del terreno (Ground motion) de cada evento en el catalogo basado en las funciones de atenuación escogidas, cálculo de periodos de recurrencia para la



excedencia de un rango de valores del movimiento del terreno, y por último la generación de graficas que se ajustan a sus datos. Las curvas son extrapoladas para estimar el valor del movimiento del terreno para un periodo de recurrencia de interés en cada sitio. En la Figura 9 se muestra un mapa, para un máximo de aceleración (PGA) del terreno, el cual está dado en porcentaje de gales (%g), con un 10% de posibilidad de excedencia en un periodo de 50 años.

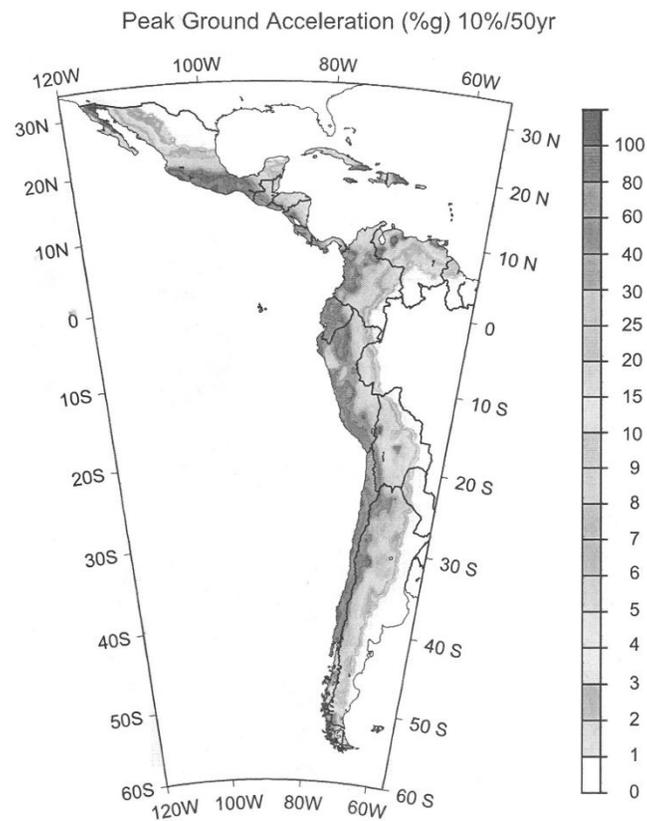


Figura 9.- Mapa que muestra las aceleraciones máximas del terreno (PGA) con un 10% de posibilidad de excedencia en 50 años, para las regiones de México, el Caribe, América central y Sudamérica, la condición de sitio es roca. (Tomado de [Tanner y Shellock, 2004](#))

Por su parte [Currie et al. \(2002\)](#), compararon la estructura termal de las zonas de subducción de México y Cascadia, usando modelos termal de elemento finito, en el caso de México este modelo fue desarrollado ya que no existía, esto con el propósito de saber las implicaciones para el peligro sísmico, para ambas regiones encontraron que los sismos dentro de la placa en subducción se limitan a profundidades menores a los 100 km, debido a las altas temperaturas de la placa.



Otra de las investigaciones enfocadas al tema del peligro sísmico es la realizada por [Ávila-Barrientos \(2007\)](#). En esta investigación se analizaron dos de los principales parámetros de las secuencias de réplicas ocurridas en la costa del Pacífico Mexicano, el valor “ $p$ ” de la relación Omori-Utsu (Fórmula modificada de Omori) y el valor “ $b$ ” que es el valor de la pendiente en la relación Gutenberg-Richter. El objetivo principal fue estudiar si existe una correlación entre el régimen tectónico y la generación de réplicas que pudiera ser observada a nivel regional, adicionalmente, encontrar bases estadísticas para determinar el peligro sísmico ocasionado por las réplicas sobre la costa del Pacífico Mexicano en forma relativa.

[Ávila-Barrientos \(2007\)](#) considera que la costa del Pacífico Mexicano presenta un mayor peligro sísmico por la ocurrencia de réplicas en su parte Este, ya que las réplicas tardan más tiempo en atenuarse (menores valores  $p$ ) (Figura 10), además de que los valores  $b$  indican mayor ocurrencia de eventos medianos contra eventos pequeños (mayor valor  $b$ ) (Figura 11), lo que podría causar daños a la estructuras. Por otra parte, sus resultados indican que la región Oeste del Pacífico Mexicano presenta un menor peligro sísmico por la ocurrencia de réplicas, ya que estas toman un menor tiempo en atenuarse y la relación de ocurrencia de eventos medianos a chicos es menor. Las regiones de menor (Oeste) y mayor (Este) peligro sísmico están divididas por el Gap de Guerrero.

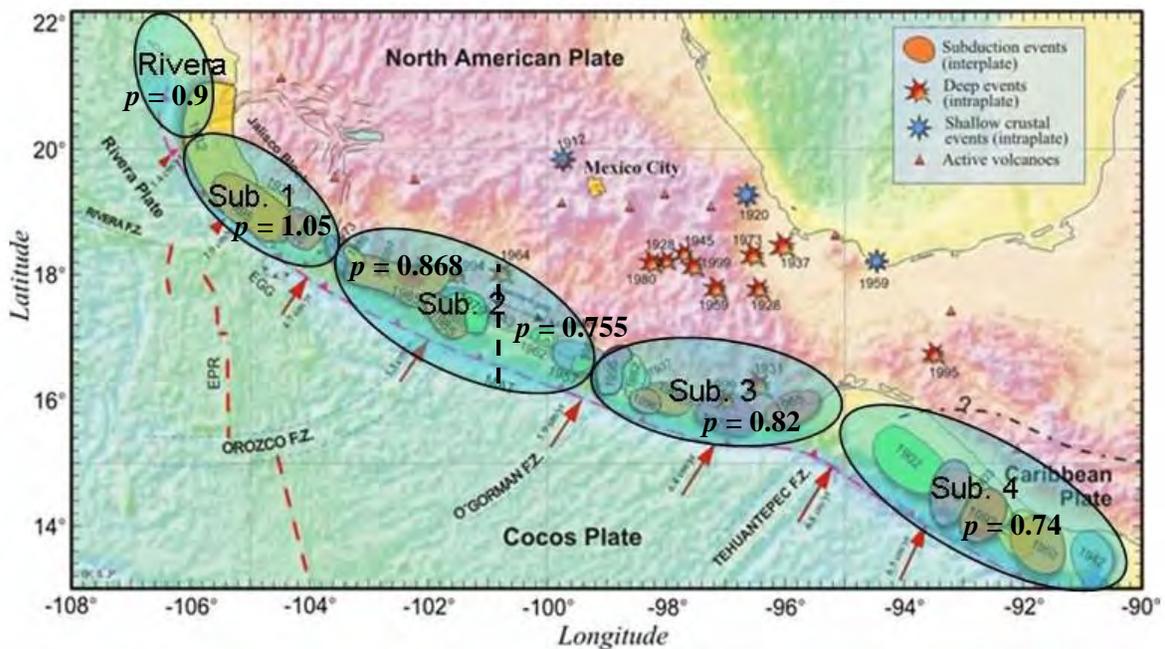


Figura 10.- Mapa con los segmentos propuestos por Zúñiga y Guzmán (1994) (Elipses) se muestran los valores  $p$  encontrados para cada uno de ellos, así como las zonas de fractura y zonas de ruptura de algunos sismos importantes en México (tomado de Kostoglodov y Pacheco, 1999).

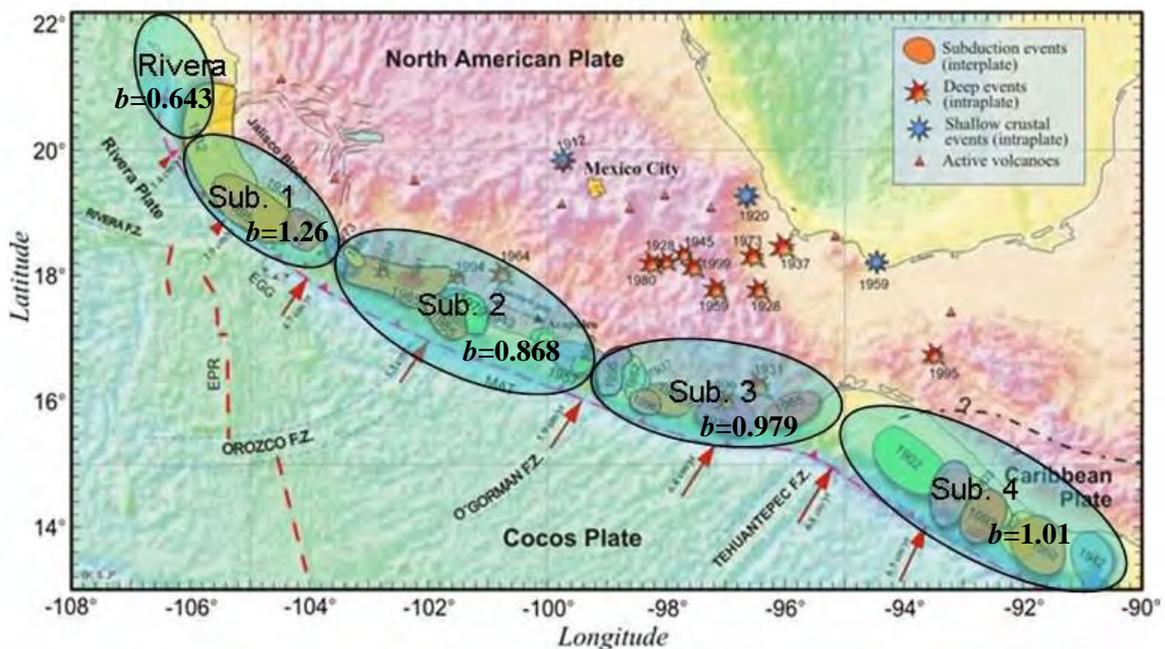


Figura 11.- Mapa con los segmentos propuestos por Zúñiga y Guzmán (1994) (Elipses), mostrando los valores  $b$  encontrados para cada uno de ellos, así como las zonas de fractura y zonas de ruptura de algunos sismos importantes en México (tomado de Kostoglodov y Pacheco, 1999).



## Capítulo II.- Base de datos

### II.1.- Área de estudio

La sismicidad y tectónica del sur de México son caracterizadas por la subducción de las placas oceánicas Cocos y Rivera por debajo de la placa Norteamericana a lo largo de la trinchera Meso-americana (Figura 12). Diferentes estudios han mostrado que esta zona de subducción muestra variaciones en el ángulo de subducción (Pardo y Suárez, 1995).

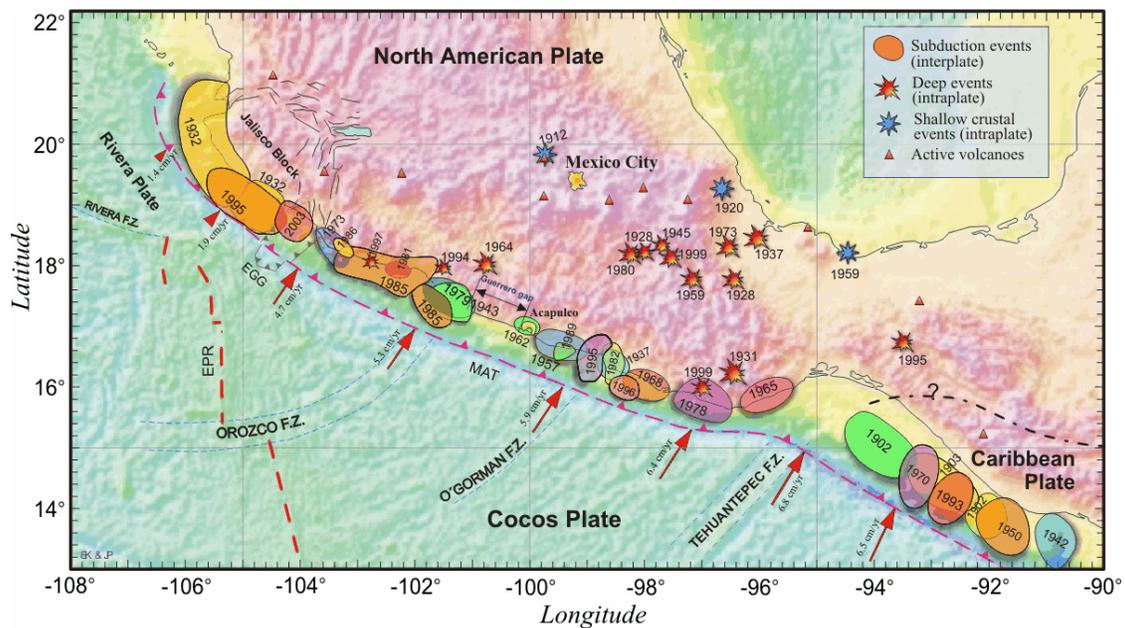


Figura 12.- Mapa donde se observan las zonas de fractura y zonas de ruptura de algunos sismos importantes en México (tomado de Kostoglodov y Pacheco, 1999).

Empleando datos provenientes de una red permanente local Suárez *et al.*, (1990) definieron la geometría de la placa de Cocos en mayor detalle y mostraron que en México central no subduce en un ángulo superficial constante, en su lugar, después de un ángulo inicial de alrededor de 15° la placa se vuelve casi horizontal formando la base de la placa Norteamericana.

La placa de Rivera es cinemáticamente diferente de la placa Norteamericana y Cocos, la placa está limitada al Oeste por la cordillera del Pacífico Este (East Pacific Rise)



y al sur por la zona de fractura de Rivera la cual está localizada a 165 km al Oeste de la Trinchera meso-americana (Bourgois y Michaud, 1991), el límite entre las placas de Rivera-Cocos (Este) no está totalmente definido, varios autores han tratado de definirlo (Mammerickx y Kligord, 1982; Nixon 1982; Bandy *et al.*, 1988; Mammerickx y Carmichael, 1989; Burgouis y Muchaud, 1991; Lonsdale, 1995; DeMets y Wilson, 1997; Bandy y Hide, 2000; Michaud *et al.*, 2001), el límite de la placa es difuso, y más que un límite definido se considera como una zona de deformación (M. C. Juan R. Peláez, comunicación personal).

La sismicidad relacionada a la subducción de la placa Rivera por debajo del bloque de Jalisco es baja, al menos 6 eventos mayores ( $M_s > 7.0$ ) han sido documentados desde 1837 incluyendo el gran evento de Jalisco ( $M_s = 8.2$ ) (Eissler y McNally, 1984; Singh *et al.*, 1985), lo cual contradice la sugerencia de que la placa subduce asísmicamente (Nixon, 1982). Con base en registro de microsismos locales e hipocentros relocalizados de eventos telesísmicos, Pardo y Suárez (1993) concluyeron que la subducción de la placa Rivera toma lugar con un ángulo de inclinación (alrededor de  $50^\circ$ ) debajo de profundidades de los 40 km.

La placa de Cocos subduce a una tasa que incrementa hacia el sureste de 4.8 cm/año en  $104.5^\circ$  W hasta 7.5 cm/año en  $94^\circ$  W (DeMets *et al.*, 1990). La edad también varía a lo largo de la trinchera meso-americana, con brincos asociados a zonas de fractura. Hacia el Este el Tehuantepec ridge intercepta la Trinchera meso-americana cerca de los  $95^\circ$  W. Aparentemente, éste es la expresión morfológica de una zona de fractura que presumiblemente separa corteza de diferentes edades, una corteza más joven y más superficial hacia el Noroeste difiere en edad con respecto de aquella al Sureste del Tehuantepec ridge por aproximadamente 10 a 25 m.a. (Couch y Woodcock, 1981).

Las placas subducidas de Rivera y Cocos muestran rápidas variaciones laterales en el ángulo de subducción en profundidades mayores a los 30 km, en el Istmo de Tehuantepec la sismicidad define una zona de Wadati-Benioff inclinada en un ángulo de  $30^\circ$ . Inmediatamente hacia el Oeste el ángulo de la placa subducida es más superficial y



decrece alrededor de los  $25^\circ$ , en México central, la geometría del slab se vuelve casi subhorizontal a distancias de entre 110 y 275 km desde la Trinchera y a profundidades de 50 km (Pardo y Suárez, 1995). Una geometría similar fue inferida para la región de Guerrero por Suárez *et al.* (1990) y Singh y Pardo (1993) usando datos locales.

En la región hacia el Oeste de la placa de Cocos el ángulo de subducción cambia nuevamente, de una inclinación casi horizontal en la región de Guerrero y Oaxaca a un ángulo más inclinado de alrededor de  $30^\circ$ , este ángulo es similar al observado cerca del Istmo de Tehuantepec. Hacia el Noroeste, el slab continua inclinándose progresivamente y por debajo del volcán de Colima la zona de Wadati-Benioff es claramente vista inclinándose en un ángulo de alrededor de  $50^\circ$  a una profundidad máxima de aproximadamente 130 km (Pardo y Suárez, 1995).

La mayor diferencia entre las zonas de subducción de Rivera y Cocos es la lenta tasa de convergencia entre la placa de Rivera y la placa Norteamericana, de alrededor de 2 cm/año (DeMets y Stein, 1990), relativa a una mayor tasa de convergencia de Cocos-Norteamericana de alrededor de 6 cm/año (DeMets *et al.*, 1990). Quizás esta baja tasa de movimiento relativo se convierte en un parámetro importante que afecta la geometría de la placa de Rivera (Pardo y Suárez, 1995).

La pendiente superficial observada en la zona de subducción del Sur de México puede ser explicada por la edad, relativamente joven, de la placa subducida, su moderada tasa de convergencia y el rápido movimiento absoluto de la placa Norteamericana, relativo a la trinchera. Hacia el Este del ridge de Tehuantepec, donde la placa de Cocos subduce por debajo de la placa del Caribe, con un ángulo más inclinado, el slab es de 10 a 25 m.a. más vieja que hacia el Oeste del ridge de Tehuantepec (Couch y Woodcock, 1981), y el movimiento relativo de la placa del Caribe hacia la trinchera es más bajo que para el Noroeste (Gripp y Gordon, 1990).



Las variaciones laterales en la pendiente del ángulo de la placa subducida en profundidades mayores a 30 km, sugiere que el sur de México puede ser dividido dentro de 4 regiones, limitadas por características batimétricas mayores:

1.- La región de Jalisco, donde la placa de Rivera que subduce por debajo de la placa Norteamericana es limitada al Este por la subducción del graben de El Gordo, de hecho, las significantes diferencias en la pendiente del slab sobre ambos lados del graben podría indicar que esta característica tectónica desacopla las placas de Rivera y Cocos (Pardo y Suárez, 1995).

2.- La región de Michoacán, es una zona de transición entre la pendiente de la placa Rivera y la subducción casi horizontal del Este, como se mencionó esta región está limitada al Oeste por el graben de El Gordo y hacia el Este por la proyección hacia la costa de la Zona de Fractura de Orozco (Pardo y Suárez, 1995).

3.- La región de Guerrero-Oaxaca muestra una geometría casi horizontal de la placa de Cocos, geográficamente esta región puede ser delimitada por las zonas de fractura de Orozco y O'Gorman (Pardo y Suárez, 1995).

4.- La región Sur de Oaxaca en el Sureste de México, es una zona de transición entre la geometría horizontal o casi horizontal de la subducción por debajo de Guerrero y subducción más inclinada de la placa de Cocos por debajo de la placa del Caribe hacia el Este (Pardo y Suárez, 1995).

## ***II.2.- Servicio Sismológico Nacional (SSN)***

El Servicio Sismológico Nacional (SSN) tiene como objetivo principal proporcionar información oportuna sobre la ocurrencia de sismos en el territorio nacional y determinar sus parámetros hipocentrales, así como la magnitud. De igual manera, el SSN proporciona la información necesaria para mejorar nuestra capacidad de evaluar el peligro sísmico y



volcánico a nivel nacional. El SSN está adscrito al Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (<http://www.ssn.unam.mx/SSN/objetivos.htm>).

### II.2.1.- Red del SSN

En sus inicios, el SSN contó con los instrumentos más modernos de la época, sin embargo, es hasta los años sesenta que se comienza la instalación de sismógrafos electromagnéticos. Llegando a tener aproximadamente 20 instrumentos autónomos, con grabación de las señales sísmicas en papel ahumado y fotográfico. En los años 90's el Departamento de Instrumentación del Instituto de Geofísica, comenzó a desarrollar un sistema de adquisición y procesamiento automático de datos y a instrumentar estaciones telemétricas digitales. A partir de 1992, con apoyo presupuestal de la Secretaría de Gobernación y de la UNAM, se inició la modernización de la Red Sismológica Nacional con la instalación de equipos de nueva tecnología. Así, nació la red de Observatorio Sismológicos de Banda Ancha. Hoy el SSN cuenta con 36 estaciones de banda ancha, distribuidas en toda la República Mexicana (Figura 13) (<http://www.ssn.unam.mx>).

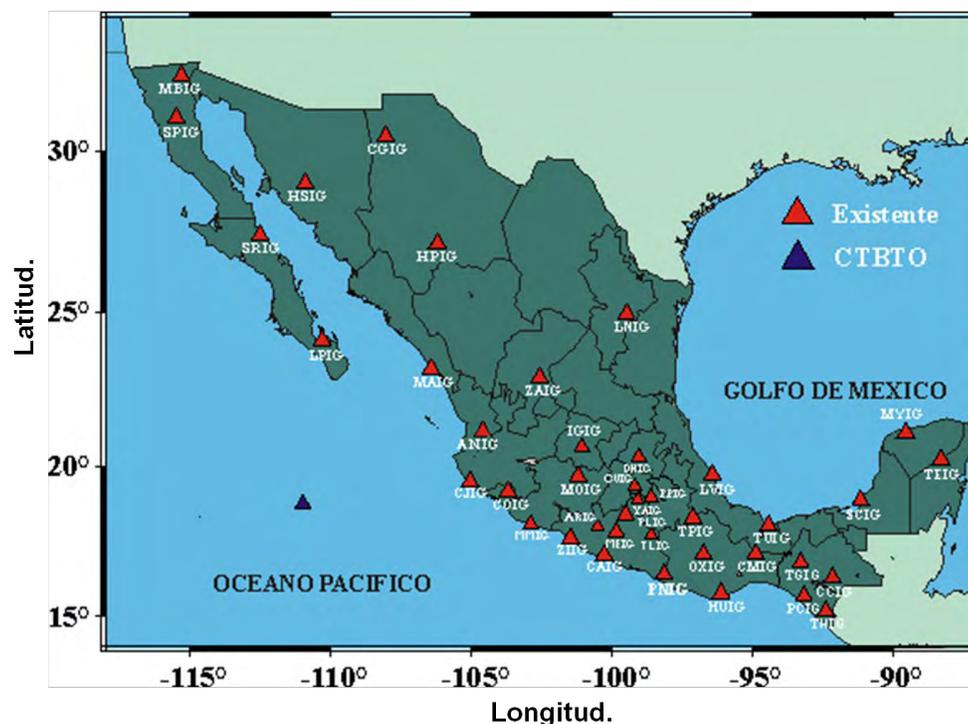


Figura 13.- Distribución de las estaciones de la Red Sismológica de Banda Ancha a lo largo del territorio nacional (Tomada de <http://www.ssn.unam.mx>)



La Tabla 3 muestra las características generales de las estaciones de la red de banda ancha del SSN.

Tabla 3.- Características de las estaciones de la red de banda ancha del SSN (Modificada de <http://www.ssn.unam.mx>).

Estaciones de Banda Ancha						
Cve.	Cal.	Est.	Lat. (°N)	Long. (°W)	Alt. (msnm)	Tipo de suelo
ANIG	1g	Ahuacatlan, Nay.	21.0558	-104.4828	1009	
ARIG	0.5g	Arcelia, Gro.	18.2805	-110.347		Roca Volcánica
CAIG	2g	Cayaco, Gro.	17.0492	-100.2677	80	Diorita
CCIG	2g	Comitán, Chis.	16.2825	-92.1368	1600	Biomicroita
CGIG	1g	Casas Grandes, Chih.	30.3652	-107.9773	1524	
CJIG	2g	Chamela, Jal.	19.499	-105.043	129	Andesita
CMIG	1g	Matías Romero, Oax.	17.091	-94.8838	200	Caliza
COIG	1g	Colima, Col. (08-Nov-07)	19.1815	-103.6918	860	Caliza recristalizada
CUIG	2g	CU, DF.	19.329	-99.178	2257	Colada de lava
DHIG	1/2g	Demacu, Hid.	20.3012	-99.0353	1994	Caliza
HPIG	1g	Hidalgo del Parral, Chih.	26.9352	-105.6655	1798	
HSIG	1g	Hermosillo, Son.	29.1167	-111.6167	600	
HUIG	2g	Huatulco, Oax.	15.7698	96.1083	150	Cuarzomonzita
LNIG	1/4g	Linares, NL.	24.8982	-99.4657	295	
LPIG	1g	La Paz, BCS.	24.102	-110.308	46	Toba Dacítica
LVIG	1g	Laguna Verde, Ver.	19.7232	-96.4177	41	Caliza
MAIG	2g	Mazatlán, Sin.	23.1883	-106.4244	10	Toba riolítica
MBIG	Vel.	Mexicali, BC.	32.4072	-115.198	20	
MEIG	1/2g	Mezcala, Gro.	17.9258	-99.6197	808	
MMIG	2g	Maruata, Mich.	18.2885	-103.3455	64	
MOIG	1g	Morelia, Mich.	19.6779	-101.1889	1275	
OXIG	1g	Oaxaca, Oax.	17.0733	-96.7332	1600	
PCIG	2g	Pijijiapan, Chis.	15.705	-93.219		Caliza
PLIG	1/4g	Iguala, Gro.	18.3927	-99.5023	875	Caliza
PNIG	2g	Pinotepa Nacional, Oax.	16.3935	-98.1273	350	Diorita
PPIG	1/2g	Popocatepetl, DF.	19.0667	-98.6267	3980	Colada de lava
PZIG	1g	Pozo, CU, DF.	19.3290	-99.1780	2257	Basalto
SCIG	1g	Sabancuy, Camp.	18.9677	-91.1865	40	
SPIG	1g	San Pedro, BC.	31.0458	-115.4658		
SRIG	1g	Santa Rosalia, BCS.	27.3198	-112.241		
TEIG	1/2g	Tepich, QR.	20.2263	-88.2764	69	Caliza
TGIG	2g	Tluxta Gtz. Chis.	16.7782	-93.1222	612	
THIG	2g	Tapachula, Chis.	14.882	-92.296		



TPIG	1g	Tehuacan, Pue.	18.4195	-97.3617	1488	
TUIG	1g	Tuzandepetl, Ver.	18.0339	-94.4227	100	Domo salino
YAIG	1g	Yautepec, Mor.	18.8633	-99.0668	1340	Caliza
ZAIG	1/2g	Zacatecas, Zac.	22.769	-102.567	2537	Cuarzo diorita
ZIIG	2g	Zihuatanejo, Gro.	17.6077	-101.4647	50	Cuarzo monzonita

### ***II.2.2- Instrumentación de la red de banda ancha del SSN***

Las estaciones sismológicas de la red de banda ancha del Servicio Sismológico Nacional cuentan con los siguientes instrumentos (<http://www.ssn.unam.mx>):

- Un sismómetro STS-2.- Estos sensores triaxiales permiten registrar ondas sísmicas en una amplia banda de frecuencias, con respuesta plana a la velocidad del suelo entre 0.01 a 30 Hz, y capacidad de registrar sismos en una amplia gama de magnitudes, desde sismos locales pequeños hasta sismos lejanos, sin problemas de saturación.
- Un acelerómetro FBA-23.- Estos sensores triaxiales permiten registrar las aceleraciones del suelo dentro de un amplio espectro de frecuencias sin saturación de la señal para sismos grandes locales y regionales. Estas características de los sensores, permiten estimar con gran precisión la magnitud de sismos grandes que puedan ocurrir en el territorio nacional.
- Un registrador QUANTERRA con digitizador de 24 bits.

Las señales del sensor de velocidad son muestreadas en forma continua a 20, 1 y 0.1 muestras por segundo (mps), son convertidas a un formato digital y almacenadas en el disco duro del registrador Quatterra. En el caso de temblores moderados a grandes de magnitud  $> 4.5$ , las señales de velocidad y aceleración se muestrean a 80 mps. Los datos almacenados se transmiten a la Estación Central mediante un programa de interrogación y extracción automática a través de Satélite, Internet o por Teléfono.



Todas las estaciones cuentan con un reloj GPS que permite obtener una referencia de tiempo de alta precisión, el cual es almacenado junto con la información sísmica. Los equipos se encuentran alojados en casetas especialmente construidas para minimizar el ruido. Las instalaciones cuentan con doble pared y aislamiento de aire para minimizar los cambios de temperatura en el interior. Además los sensores se cubren con material aislante de temperatura y está forrado con papel aluminio para evitar inducciones eléctricas. Para registrar con una buena relación señal a ruido y minimizar los efectos de sitio, se construyó un pilar sobre la roca, independiente de la estructura de la caseta.

### ***II.3.- Base de datos***

Para la determinación del peligro sísmico es necesario el empleo de los registros del movimiento del suelo (velocidad y aceleración), con base en estos registros se desarrollan las relaciones empíricas de PGA ó PGV contra la IMM, esto con la finalidad de elaborar los mapas de isosistas o shakemaps, así como determinar leyes de atenuación, para presentar un panorama mucho más completo del peligro sísmico.

En este trabajo se pretende desarrollar mapas de iso-velocidad, iso-aceleración y de isosistas empleando los parámetros PGA y PGV contra la IMM. La base de datos empleada para el desarrollo de este trabajo de investigación se tomó de la red sismológica de banda ancha del SSN, con eventos que comprenden desde el 2004 al 2008. Esto debido a que anteriormente el SSN no contaba con estaciones en la parte norte del país y por lo consecuente no se contaba con esa información.

El catálogo está conformado por 99 eventos de los cuales se tienen registros de velocidad y registros de aceleración, cabe aclarar que no todas las estaciones en las que fueron registrados cada unos de los eventos contienen esta información, la Tabla 4 muestra los 99 eventos y las estaciones en las que fueron registrados y la Figura 14 la distribución de los mismos.



USO DE REGISTROS DE ACELERACIÓN DE LA RED DEL SERVICIO  
SISMOLÓGICO NACIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN  
DEL PELIGRO SÍSMICO EN MÉXICO



Tabla 4.- Datos generales de los 99 eventos así como las estaciones en que fueron registrados.

Evento	Fecha	Hr. (GMT)	Latitud	Long.	Prof.	Mag.	Estaciones de registro																																			
							ANIG	ARIG	CAIG	CCIG	CGIG	CJIG	CMIG	COIG	CUIG	DHIG	HPIG	HSIG	HUIG	LNIG	LPIG	LVIG	MAG	MBIG	MEIG	MMIG	MOIG	OXIG	PCIG	PLIG	PNIG	PPIG	PZIG	SCIG	SPIG	SRIG	TEIG	TGIG	THIG	TPIG	TUIG	UPIG
1	01/01/2004	23:58:02	17.30	101.36	14	5.0			*	*		*	*	*	*	*		*				*	*		*	*	*											*	*	*	*	*
2	13/01/2004	14:00:07	25.09	109.54	5	4.7												*	*																					*	*	
3	13/01/2004	21:28:58	15.99	97.15	16	5.5			*	*		*	*	*	*	*		*				*	*		*	*	*											*	*	*	*	
4	17/01/2004	21:13:08	17.68	95.65	116	4.7			*	*		*	*	*	*	*		*				*	*		*	*	*										*	*	*	*		
5	05/02/2004	12:36:55	15.22	94.30	35	4.8			*	*		*	*	*	*	*		*				*	*		*	*	*										*	*	*	*		
6	09/02/2004	00:01:46	23.75	108.78	10	5.2						*	*					*																					*	*		
7	09/02/2004	01:24:36	24.69	113.07	10	4.7					*	*	*					*				*	*		*	*	*								*	*	*	*	*			
8	09/02/2004	09:03:49	25.33	112.47	20	4.5			*			*	*	*	*	*		*				*	*		*	*	*								*	*	*	*	*			
9	18/02/2004	10:59:20	24.02	108.83	16	5.7					*	*	*					*				*	*		*	*	*									*	*	*	*			
10	25/02/2004	18:22:19	13.47	92.66	10	5.5			*	*		*	*	*	*	*		*				*	*		*	*	*								*	*	*	*	*			
11	13/03/2004	14:02:26	17.79	103.77	22	4.9			*	*		*	*	*	*	*		*				*	*		*	*	*								*	*	*	*	*			
12	29/03/2004	07:47:44	18.60	106.25	30	4.7			*	*		*	*	*	*	*		*				*	*		*	*	*								*	*	*	*	*			
13	20/04/2004	17:44:20	17.33	94.74	144	5.2			*	*		*	*	*	*	*		*				*	*		*	*	*								*	*	*	*	*			
14	02/05/2004	04:19:30	18.09	105.93	9	4.8			*	*		*	*	*	*	*		*				*	*		*	*	*							*	*	*	*	*				
15	02/05/2004	05:17:31	18.09	106.15	15	4.8			*	*		*	*	*	*	*		*				*	*		*	*	*								*	*	*	*	*			
16	14/06/2004	22:54:21	16.22	98.16	10	5.6			*	*		*	*	*	*	*		*				*	*		*	*	*						*	*	*	*	*	*				
17	15/06/2004	22:28:48	32.33	117.92	10	5.0					*	*	*					*				*	*		*	*	*									*	*	*	*			
18	22/06/2004	06:10:41	25.17	109.95	30	4.7					*	*	*					*				*	*		*	*	*								*	*	*	*	*			
19	18/08/2004	09:03:10	16.24	95.15	51	5.6			*	*		*	*	*	*	*		*				*	*		*	*	*							*	*	*	*	*				
20	30/08/2004	05:35:16	29.52	116.55	10	5.1			*			*	*	*	*	*		*				*	*		*	*	*							*	*	*	*	*				
21	17/09/2004	23:43:20	16.03	91.22	46	5.0			*	*		*	*	*	*	*		*				*	*		*	*	*						*	*	*	*	*	*				
22	24/09/2004	14:43:18	28.44	112.81	35	5.5					*	*	*					*				*	*		*	*	*						*	*	*	*	*	*				
23	28/10/2004	20:30:02	18.40	99.81	60	4.7			*	*		*	*	*	*	*		*				*	*		*	*	*						*	*	*	*	*	*				
24	30/11/2004	13:36:28	17.22	94.10	182	4.7			*	*		*	*	*	*	*		*				*	*		*	*	*						*	*	*	*	*	*				
25	06/01/2005	00:02:19	19.43	109.15	10	5.3			*	*		*	*	*	*	*		*				*	*		*	*	*						*	*	*	*	*	*				
26	22/02/2005	19:15:49	25.67	109.97	10	5.1					*	*	*					*				*	*		*	*	*						*	*	*	*	*	*				
27	28/02/2005	01:05:59	18.76	104.60	7	5.6			*	*		*	*	*	*	*		*				*	*		*	*	*					*	*	*	*	*	*	*				
28	08/05/2005	17:07:35	20.71	109.36	20	5.9			*	*		*	*	*	*	*		*				*	*		*	*	*				*	*	*	*	*	*	*	*	*			
29	05/06/2005	08:28:50	23.67	108.66	7	5.5			*	*		*	*	*	*	*		*				*	*		*	*	*					*	*	*	*	*	*	*				
30	22/06/2005	09:15:27	17.11	93.84	184	4.6			*	*		*	*	*	*	*		*				*	*		*	*	*					*	*	*	*	*	*	*				
31	26/06/2005	11:27:43	23.90	109.09	16	4.7			*	*		*	*	*	*	*		*				*	*		*	*	*						*	*	*	*	*	*				
32	27/06/2005	11:35:46	18.86	107.26	20	5.7			*	*		*	*	*	*	*		*				*	*		*	*	*				*	*	*	*	*	*	*	*	*			
33	10/08/2005	01:18:35	22.12	98.73	25	4.1					*	*	*					*				*	*		*	*	*						*	*	*	*	*	*				





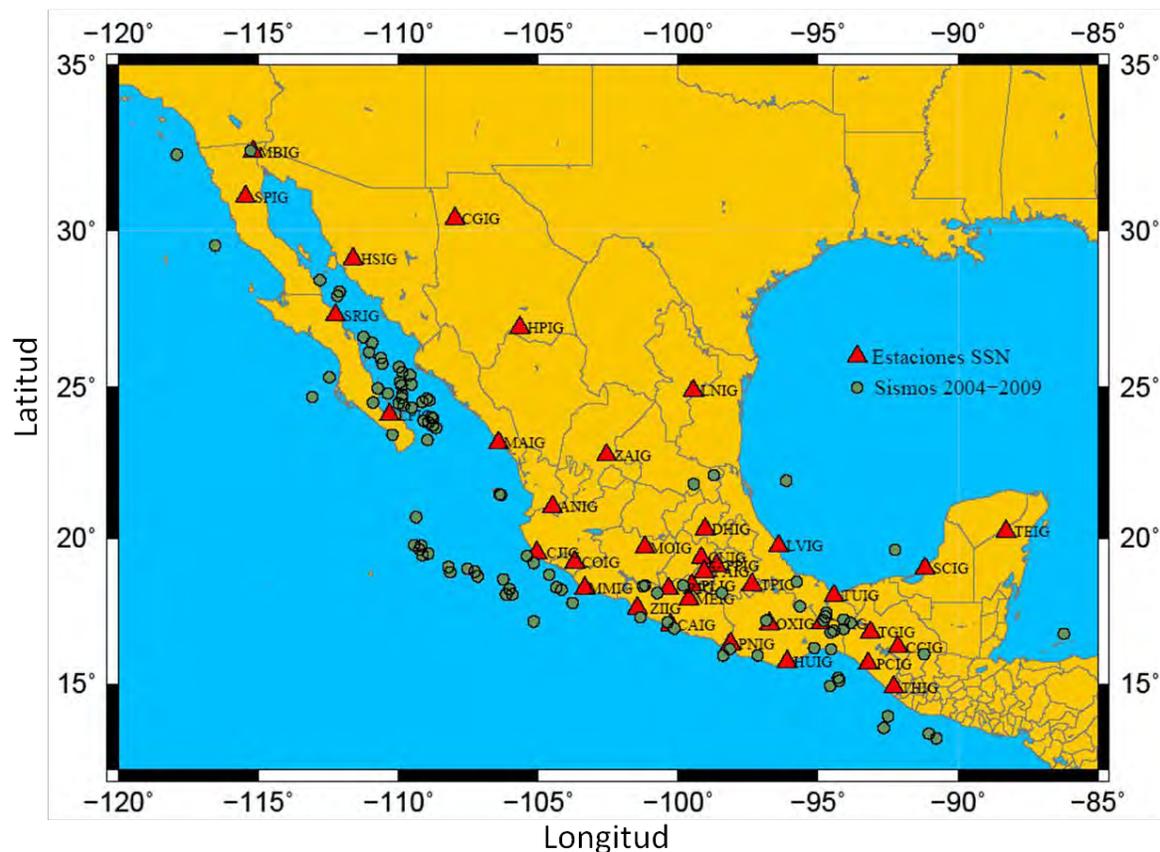


Figura 14.- Distribución de los 99 eventos que conforman el catálogo.

#### II.4.- Software de análisis

Para realizar el análisis de los datos se emplean dos programas diseñados para el procesamiento de registros sísmicos (series de tiempo): Seismic Code Analysis (SAC) y el programa DEGTRA A4 diseñado en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

El programa SAC, es un programa interactivo diseñado para el estudio de señales, especialmente datos de series de tiempo. Se ha puesto énfasis en las herramientas de análisis empleadas por los investigadores en sismología, quienes se encuentran en el estudio detallado de eventos sísmicos. Las capacidades de análisis incluyen operaciones aritméticas generales, tales como la transformada de Fourier, técnicas de estimaciones espectrales, filtros IIR y FIR, acumulación de señales, interpolación, correlación y



determinación de fases sísmicas. SAC también contiene extensas capacidades gráficas (<http://www.iris.edu/manuals/sac/manual.html>).

DEGTRA A4 (Dr. Mario Ordaz, 1990-2002, dentro del programa DEGTRA A4) es la versión más reciente de la serie de programas DEGTRA que lleva más de una década de desarrollo, por parte de investigadores y estudiantes del Instituto de Ingeniería (UNAM). DEGTRA es un programa sui generis puesto que ha sido desarrollado por sus propios usuarios.

El programa permite visualizar señales y manipularlas, DEGTRA A4 resulta útil; también para usar filtros básicos y avanzados, evaluar la coherencia, correlación cruzada, integrar, derivar, calcular espectros de amplitudes de Fourier, mostrar en forma de odograma los registros sísmicos de componentes diferentes, rotar, sumar, restar, corregir línea base de diversas formas y para muchos otros aspectos que interesan a sismólogos e ingenieros sísmicos.

DEGTRA A4 presenta la capacidad de calcular espectros de respuesta tanto lineales como no lineales, así como respuesta de osciladores de un grado de libertad o Intensidad de Arias. También conocer un espectro de resistencia o de desplazamiento de un oscilador de comportamiento bi-lineal asociado a una demanda de ductilidad prescrita.

Además, DEGTRA A4 expande las posibilidades de versiones anteriores de evaluación de funciones de transferencias (FT) a partir de espectros de Fourier y permite realizar cálculos de funciones de transferencia teóricas (lineales por lo pronto) con el método de Thomson Haskell para depósitos de suelo, aspecto útil para ingenieros de suelos.



## Capítulo III.- Metodología de análisis

### III.1.- Revisión de trazas

Una vez determinado el catálogo a emplear se realizó un análisis de las trazas para cada uno de los eventos y de sus tres componentes, con la finalidad de obtener los valores reales de los sismogramas y acelerogramas, discriminando todos aquellos valores que pudieran estar influenciados por algún error al momento del registro, o que la traza del evento no estuviera visible por el contenido de ruido en ésta, o porque la traza del evento no estuviera completa.

Al realizar el análisis de las trazas se pudieron encontrar errores en algunos de los eventos, a continuación se mencionan algunos de éstos:

- Sismo del 14-06-2004, la componente Este en la traza de aceleración en la estación PNIG presenta un “pico”, lo cual provoca que el valor se eleve casi el doble referido con las otras dos componentes (Figura 15).
- Sismo del 13-04-2007, la estación CAIG presenta un registro saturado en velocidad (Figura 16) por lo que los valores no representan un movimiento real del suelo, la estación YAIG muestra un mal registro de la componente Norte en las trazas de aceleración (Figura 17) lo que arroja un valor extremadamente alto comparado con las dos componentes restantes.
- Sismo de 06-11-2007, nuevamente la estación CAIG presenta un registro saturado en velocidad (Figura 18) restringiendo el uso de estos valores.
- Sismo de 24-09-2008, la estación CCIG presenta un mal registro del evento (Figura 19). La estación HUIG presenta un glitche en el registro lo que, al momento de la obtención de los valores, nos arroja valores que no corresponden al evento (Figura 20).



- Sismo del 05-10-2007, la estación TGIG presenta un error en el registro de la componente Este, produciendo valores de velocidad y aceleración mayores (Figura 21)

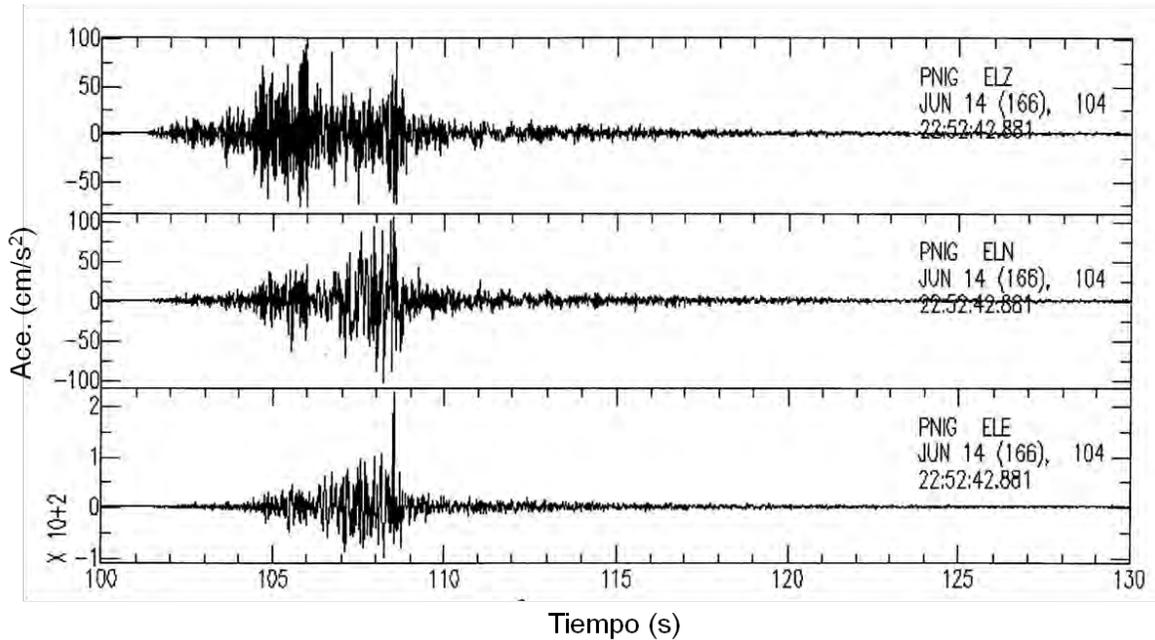


Figura 15.- Traza de aceleración del evento 14-06-2004 en la estación PNIG.

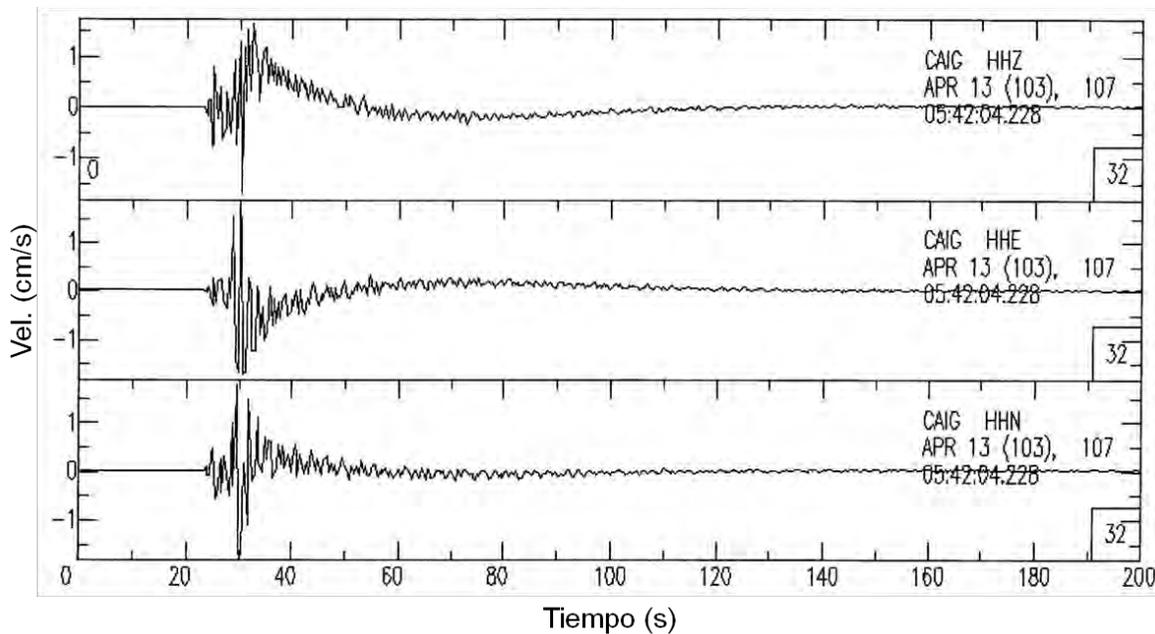


Figura 16.- Traza de velocidad del evento 13-04-2007 en la estación CAIG.

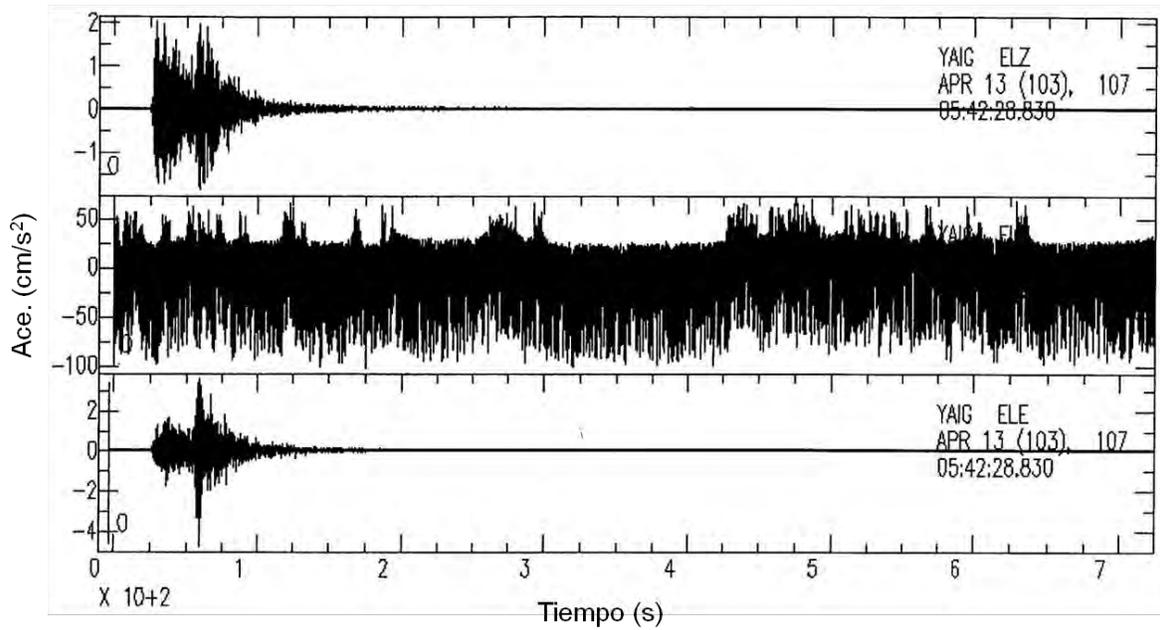


Figura 17.- Traza de aceleración del evento 13-04-2007 en la estación YAIG.

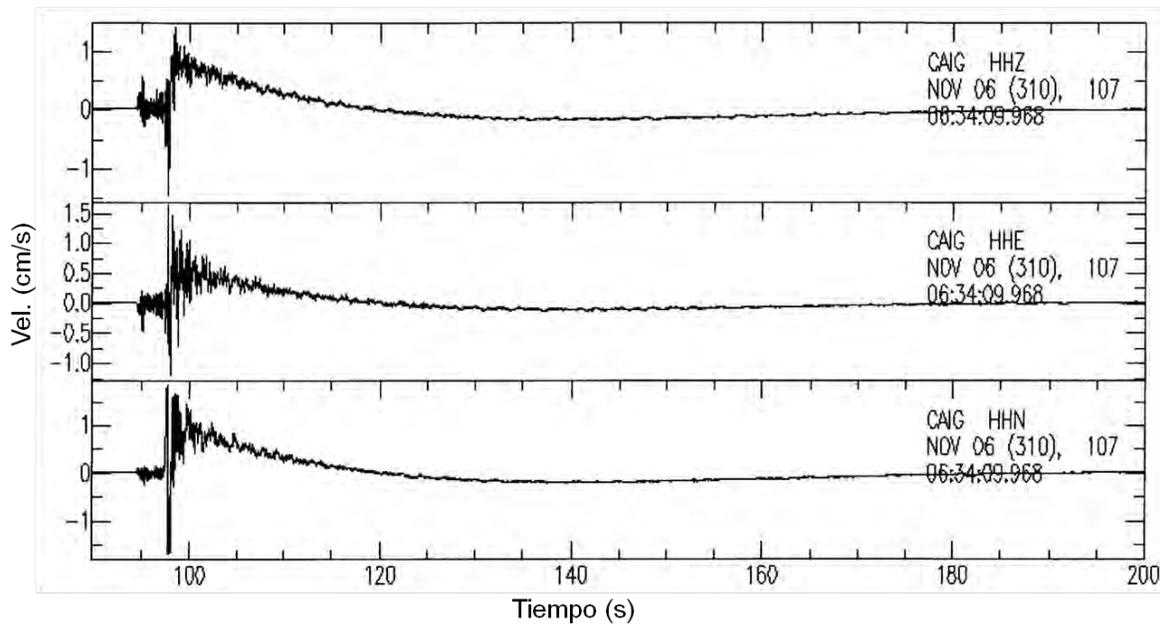


Figura 18.- Traza de velocidad del evento 06-11-2007 en la estación CAIG.

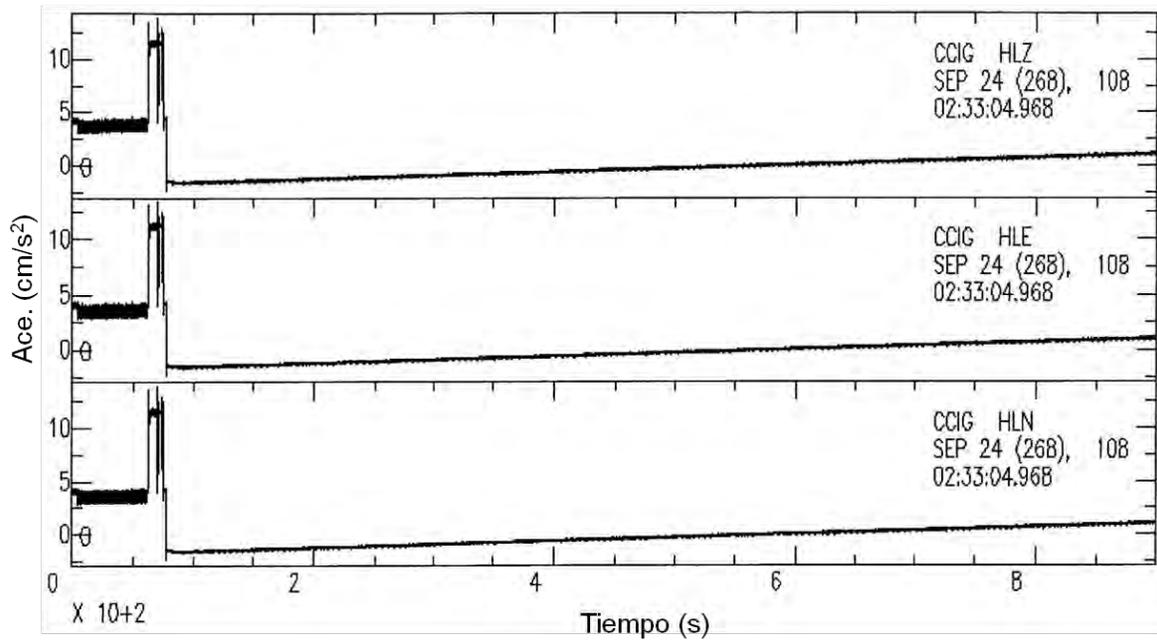


Figura 19.- Traza de aceleración del evento 24-09-2008 en la estación CCIG.

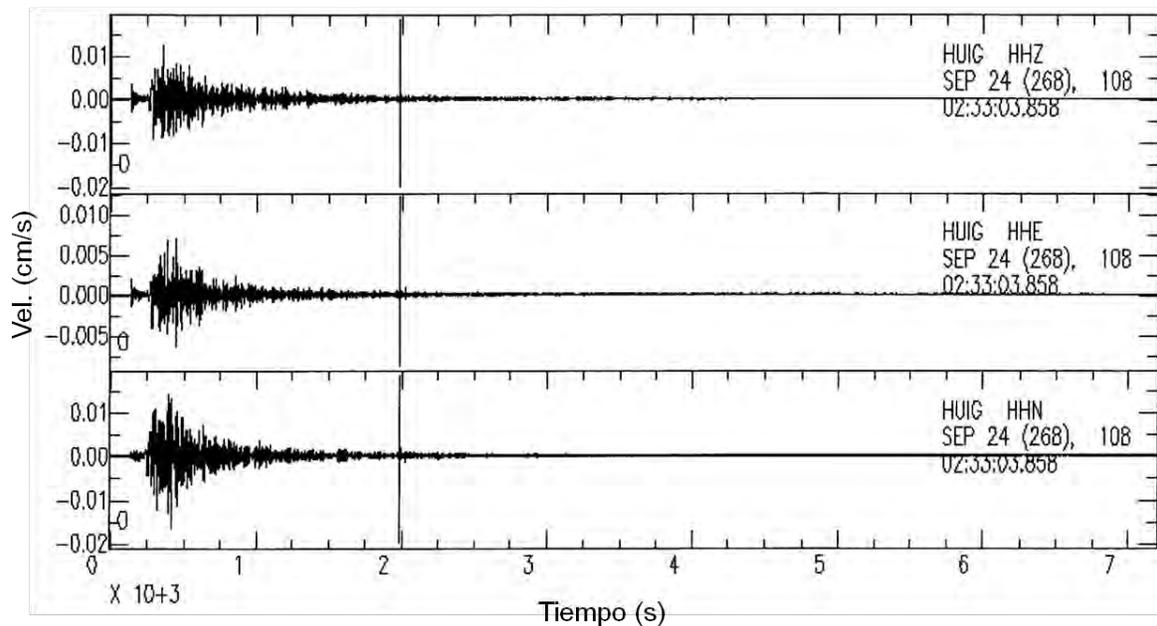


Figura 20.- Traza de velocidad del evento 24-09-2008 en la estación HUIG.

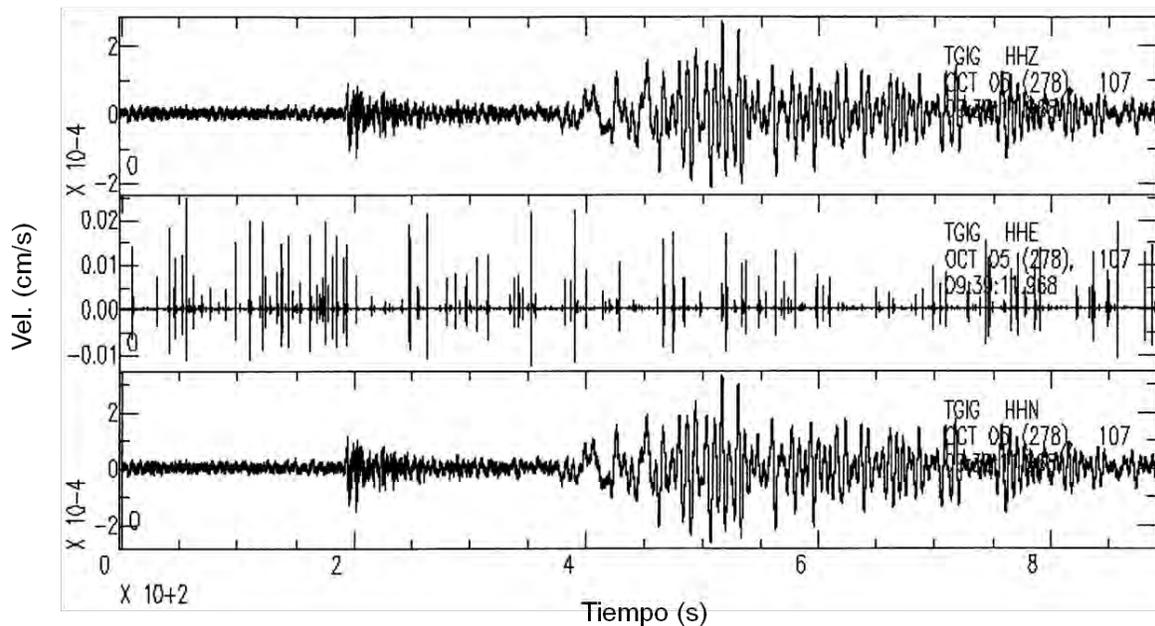


Figura 21.- Traza de velocidad del evento 05-10-2007 en la estación TGIG.

Las figuras anteriores son algunos de los ejemplos de la revisión de las trazas, después de este análisis el número de las trazas a emplear para la determinación de los valores se redujo, al inicio del análisis se contaba con 4530 trazas de velocidad y 612 trazas de aceleración, una vez realizada la discriminación de las trazas se obtuvieron 3000 trazas de velocidad y 390 de aceleración para la determinación de los valores del movimiento del suelo.

La revisión de las trazas para determinar los valores máximos del movimiento del suelo, es un paso importante dentro del proceso, ya que si éstas hubiesen sido consideradas tal como se obtuvieron de la base de datos, los valores encontrados del movimiento del suelo no hubiesen sido representativos del mismo.

### **III.2.- Análisis de los eventos**

Una vez revisadas las trazas de los eventos, el siguiente paso fue obtener los valores pico del movimiento del suelo, es decir se determinan los valores máximos de velocidad



(PGV), los máximos de aceleración mediante la derivada del registro de velocidad ( $PGA_v$ ) y los máximos de aceleración obtenida directamente de los registros acelerográficos (PGA).

Para lo anterior se empleó el programa SAC donde mediante la realización de macros y el uso de las funciones del programa, se obtuvieron los valores máximos. Los resultados obtenidos para  $PGA_v$  y PGA fueron comparados, con la finalidad de corroborar que dichos valores fueran similares, dado que los equipos, tanto sismógrafos como acelerógrafos se ubican en la misma área al interior de la caseta, por lo que éstos no deberían presentar una gran diferencia.

La primera comparación de los valores fue empleando los valores máximos, estos valores fueron divididos para encontrar el cociente entre ellos, y saber la diferencia que existe entre los mismos, la Tabla 5 muestra un ejemplo de esto, para el evento del 13 de Abril del 2007.

Tabla 5.- Valores máximos del movimiento del suelo para el evento de Guerrero del 13-04-2007.

Estaciones	Aceleración * (Del reg. de vel.)			Aceleración (Original)			Cociente		
	Z	E	N	Z	E	N	Z	E	N
ANIG	0.07712	0.16172	0.15010	0.57612	1.21549	1.14496	0.13	0.13	0.13
CAIG	82.05921	97.50212	86.19770	45.72148	65.13448	64.28939	1.79	1.50	1.34
CMIG	0.23568	0.10744	0.31271	0.22381	0.10219	0.29169	1.05	1.05	1.07
CUIG	2.33828	3.45474	3.54621	2.10445	3.02467	3.36177	1.11	1.14	1.05
DHIG	0.34560	0.67027	0.47385	0.31477	0.62389	0.44446	1.10	1.07	1.07
HUIG	0.27819	0.13084	0.23263	0.25426	0.12237	0.21400	1.09	1.07	1.09
LVIG	0.20709	0.19516	0.22121	0.18033	0.15843	0.20213	1.15	1.23	1.09
MEIG	16.72715	17.47899	19.95750	20.35598	16.62500	18.54554	0.82	1.05	1.08
MMIG	0.45112	0.93311	0.85063	3.36383	7.04461	6.34778	0.13	0.13	0.13
MOIG	2.03110	5.17376	3.96949	1.85245	4.76506	3.63986	1.10	1.09	1.09
OXIG	0.65277	1.09980	0.85163	0.58136	1.00454	0.76150	1.12	1.09	1.12
PLIG	4.51979	4.11897	4.73885	4.03815	3.66199	4.27032	1.12	1.12	1.11
PNIG	0.97381	0.58526	1.09899	0.90393	0.57217	1.00005	1.08	1.02	1.10
PPIG	2.31721	6.28028	4.70595	2.10694	5.85926	4.27815	1.10	1.07	1.10
TPIG	1.08915	1.41149	1.95822	1.01365	1.28987	1.83220	1.07	1.09	1.07
TUIG	0.09912	0.02487	0.22562	0.09010	0.22781	0.20657	1.10	0.11	1.09
YAIG	2.13282	4.59453	6.04183	2.01967	4.78536	0.00000	1.06	0.96	
ZIIG				5.42679	11.23531	7.98089	0.00	0.00	0.00

De la tabla anterior podemos apreciar que la mayoría de las estaciones presentan valores de aceleración similares, indicándonos que los valores de aceleración obtenidos por medio de la derivada del registro de velocidad pueden ser empleados con confianza en aquellas estaciones donde no se cuenten con los valores de aceleración aportados por los acelerógrafos.



También podemos identificar que las estaciones que muestran diferencia entre los valores máximos de aceleración, ANIG, CAIG y MMIG, para el caso de CAIG, los valores que se obtienen de aceleración corresponden al registro saturado de velocidad (Figura 16), lo que provoca que tengamos altos valores y el cociente nos de una gran diferencia, por lo que estos valores obtenidos mediante la derivación del registro de velocidad no serán empleados.

En el caso de las estaciones ANIG y MMIG, se puede atribuir a un error en los aparatos, probablemente de calibración o su rango dinámico, ya que, como se menciono anteriormente, los sismógrafos y acelerógrafos se encuentran en la misma caseta, la posibilidad de que la diferencia encontrada entre los valores pudiera deberse a efectos de sitio, directividad o cercanía del evento quedan descartadas.

El procedimiento anterior fue realizado para cada uno de los eventos, encontrándose que la diferencia entre las aceleraciones parece conservarse para diferentes eventos en las mismas estaciones: ANIG, CGIG, HPIG, HSIK, LNIG, LPIG, MMIG, PCIG, SRIG (Tabla 6). El cociente encontrado en estas estaciones, podría utilizarse como un factor de corrección para homogenizar los valores de aceleración, por lo que se tendría que aceptar uno de los dos valores como ( $PGA_v$  o  $PGA$ ) el valor real del movimiento del suelo. Debido a que desconoce la causa directa de esta diferencia entre los valores y a que los sismógrafos son los mismos para cada una de las estaciones se emplearan los valores de aceleración obtenidos mediante la derivada del registro de velocidad para nuestro análisis, descartando los valores de aceleración encontrados en las estaciones anteriores.



Tabla 6.- Estaciones que presentan diferencia entre aceleraciones obtenidas mediante el registro de velocidad y aquellas obtenidas de los acelerógrafos (Modificada de <http://www.ssn.unam.mx>).

Cve.	Cal.	Est.	Lat. (°N)	Long. (°W)	Alt. (msnm)	Tipo de suelo
ANIG	1g	Ahuacatlan, Nay.	21.0558	-104.4828	1009	
CGIG	1g	Casas Grandes, Chih.	30.3652	-107.9773	1524	
HPIG	1g	Hidalgo del Parral, Chih.	26.9352	-105.6655	1798	
HSIG	1g	Hermosillo, Son.	29.1167	-111.6167	600	
LNIG	1/4g	Linares, NL.	24.8982	-99.4657	295	
LPIG	1g	La Paz, BCS.	24.102	-110.308	46	Toba Dacítica
MMIG	2g	Maruata, Mich.	18.2885	-103.3455	64	
PCIG	2g	Pijijiapan, Chis.	15.705	-93.219		Caliza
SRIG	1g	Santa Rosalia, BCS.	27.3198	-112.241		

Se realizó una segunda comparación de los valores, en esta comparación no se emplearon los valores máximos encontrados, sino que se utilizó todo el registro de los eventos para corroborar que la diferencia encontrada se mantenía utilizando toda la serie de tiempo. Después de haber realizado la división de espectros (Figuras 22, 23 y 24) de cada uno de los eventos se encontró que el cociente encontrado por medio del primer procedimiento se seguía conservando. La división de espectros nos confirma que la variación de aceleraciones existe y es la misma ya sea utilizando valores máximos o la serie de datos del registro, también se observa que dicha variación es conservada para un cierto rango de frecuencias, el cual varía de una estación a otra.

Retomando que la diferencia encontrada entre las aceleraciones pueda deberse a la calibración de los aparatos, se realizó la determinación de los valores máximos de las aceleraciones, para las estaciones mostradas en la Tabla 6, empleando un valor diferente de calibración, encontrándose que los valores nuevos de aceleración son muy similares entre si, esto se puede apreciar claramente en la Figura 25, en donde se muestran los espectros de Fourier para el evento del 13-04-2007 en la estación ANIG, el valor de calibración empleado fue  $g=1/8$  mientras el utilizado por el SSN es 1 (Figura 23).

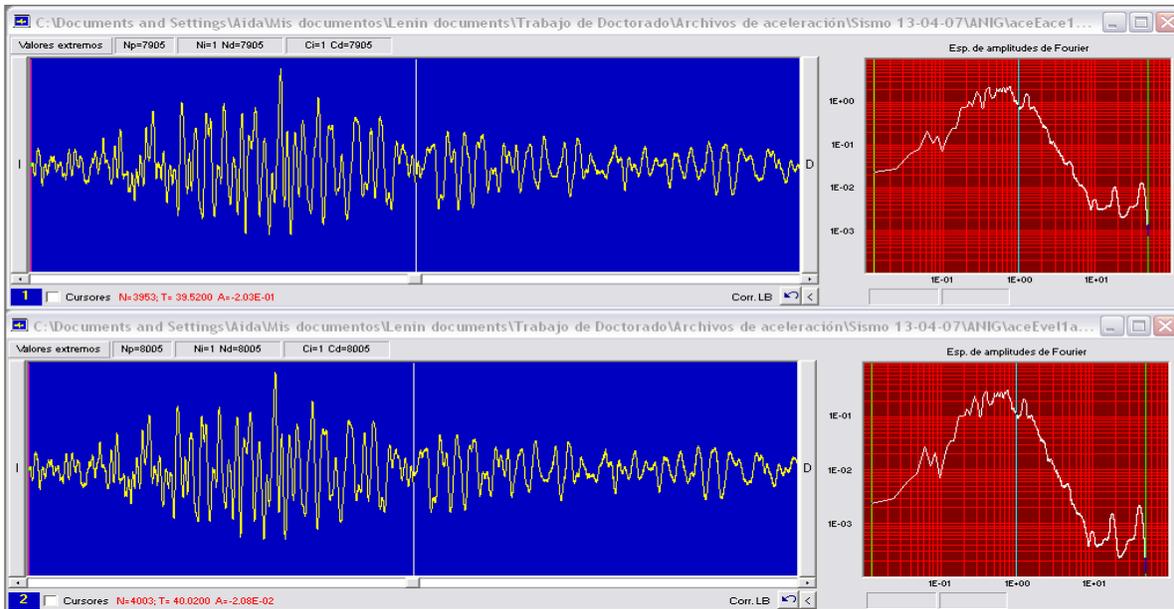


Figura 22.- Registros de velocidad y aceleración para el evento de Guerrero del 13-04-2007, en la estación ANIG, arriba se muestra el registro de aceleración obtenido directamente del acelerógrafo, abajo se muestra el registro de aceleración derivado del registro de velocidad, a la derecha se muestra el espectro de Fourier para cada uno de los registros.

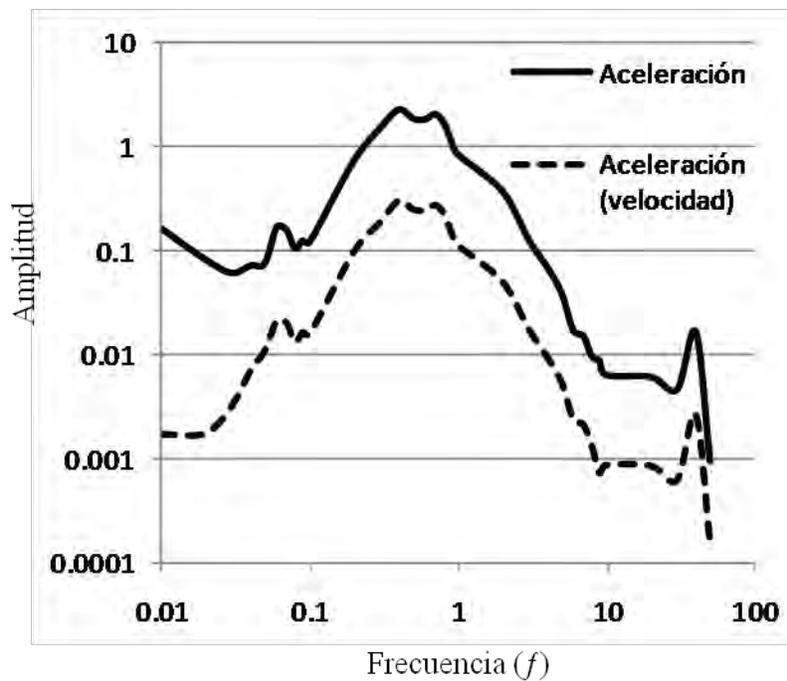


Figura 23.- Espectros de Fourier de los registros de velocidad (línea punteada) y aceleración (línea continua) para el evento de Guerrero del 13-04-2007, en la estación ANIG.

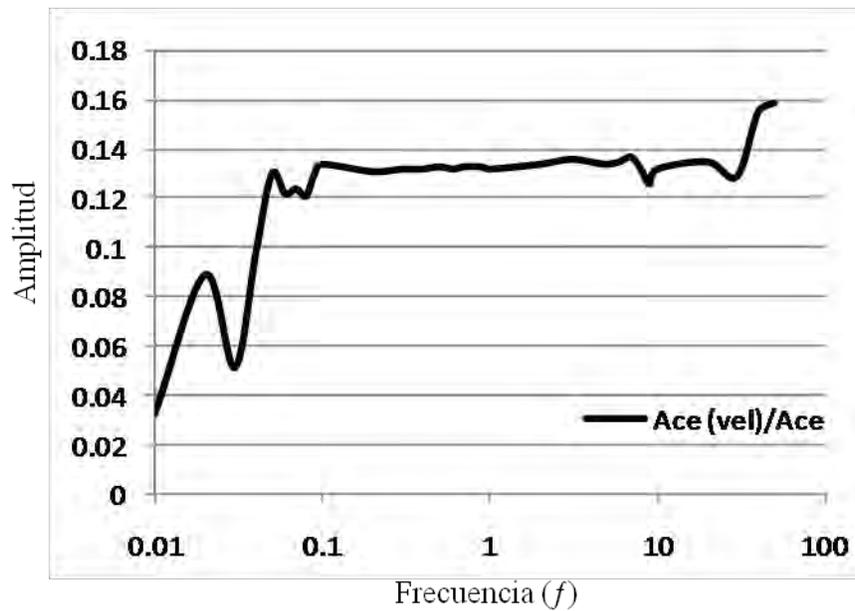


Figura 24.- División de espectros para el evento de Guerrero del 13-04-07 de los registros de PGAv entre PGA, para la estación ANIG, se observa que la diferencia permanece casi constante para un rango de frecuencias.

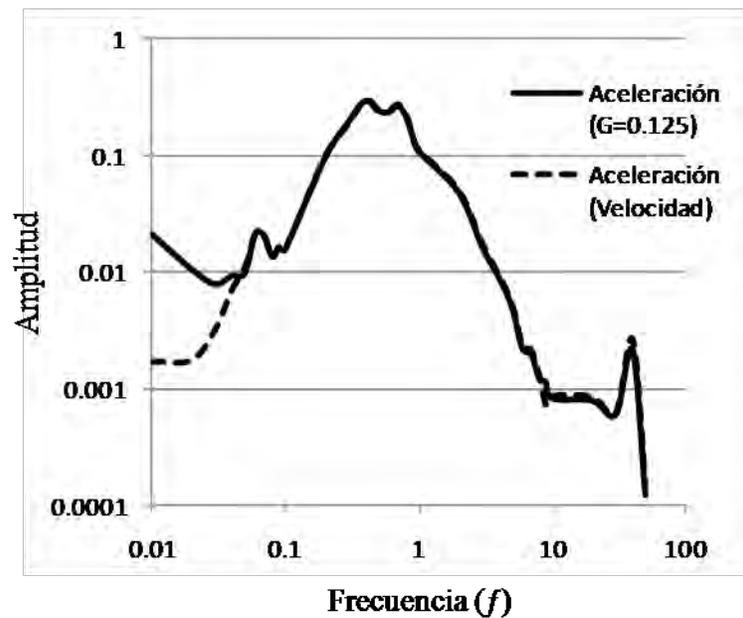


Figura 25.- Espectros de Fourier de los registros de velocidad (línea punteada) y aceleración (línea continua) con  $g=1/8$ , para el evento de Guerrero del 13-04-2007, en la estación ANIG.

De las Figuras 23 y 25 anteriores se puede apreciar que el nuevo valor de calibración, arroja valores de aceleración muy similares a aquellos determinados mediante los registros de velocidad, reduciendo en gran medida la diferencia encontrada



anteriormente entre las aceleraciones. Este procedimiento se realizó para las estaciones que mostraban esta diferencia entre aceleraciones, los valores de calibración encontrados para cada una de ellas se muestra en la Tabla 7. Dado lo anterior una revisión a estas estaciones es necesaria por parte del SSN, para evitar en un futuro posibles errores.

Tabla 7.- Valores de calibración de los acelerógrafos en las estaciones que presentan diferencia entre aceleraciones obtenidas mediante el registro de velocidad y aquellas obtenidas de los acelerógrafos (Modificada de <http://www.ssn.unam.mx>).

Cve.	Cal. (SSN)	Cal. (Encontrada)	Est.	Lat. (°N)	Long. (°W)	Alt. (msnm)
ANIG	1g	1/8g	Ahuacatlan, Nay.	21.0558	-104.4828	1009
CGIG	1g	1/8g	Casas Grandes, Chih.	30.3652	-107.9773	1524
HPIG	1g	1/8g	Hidalgo del Parral, Chih.	26.9352	-105.6655	1798
HSIG	1g	1/8g	Hermosillo, Son.	29.1167	-111.6167	600
LNIG	1/4g	1/24g	Linares, NL.	24.8982	-99.4657	295
LPIG	1g	2g	La Paz, BCS.	24.102	-110.308	46
MMIG	2g	1/4g	Maruata, Mich.	18.2885	-103.3455	64
PCIG	2g	1/4g	Pijjiapan, Chis.	15.705	-93.219	
SRIG	1g	1/8g	Santa Rosalía, BCS.	27.3198	-112.241	

Se determinaron los valores máximos para cada uno de los eventos, la diferencia encontrada entre los valores de aceleración  $PGA_v$  y  $PGA$  no muestra una diferencia significativa para la mayoría de las estaciones, exceptuando los valores encontrados para las estaciones mencionadas en la Tabla 6. Las variaciones encontradas en promedio para las tres componentes es del 8.8%. El promedio de las variaciones en cada una de las componentes es: del 14.2% para E, del 6.9% para N y del 5.2% para Z (vertical). En la componente E se llega a presentar una variación del 20% a 1/2g y una mayor desviación estándar a 1g, en la componente N las variaciones y las desviaciones estándar son muy similares entre si, encontrándose un máximo del 8% a 1/2g y, por último, en la componente vertical las variaciones también son muy similares, encontrándose la máxima de 7.3% en 2g, ubicándose en esta calibración la mayor desviación estándar. La Figura 26 muestra los promedios de la variación en las aceleraciones, de acuerdo a la calibración de los acelerógrafos, en la componente Norte. Dado lo anterior el uso de las aceleraciones



obtenidas por medio del registro de velocidad, son confiables de emplear para aquellos casos donde no se cuente con el registro de aceleración.

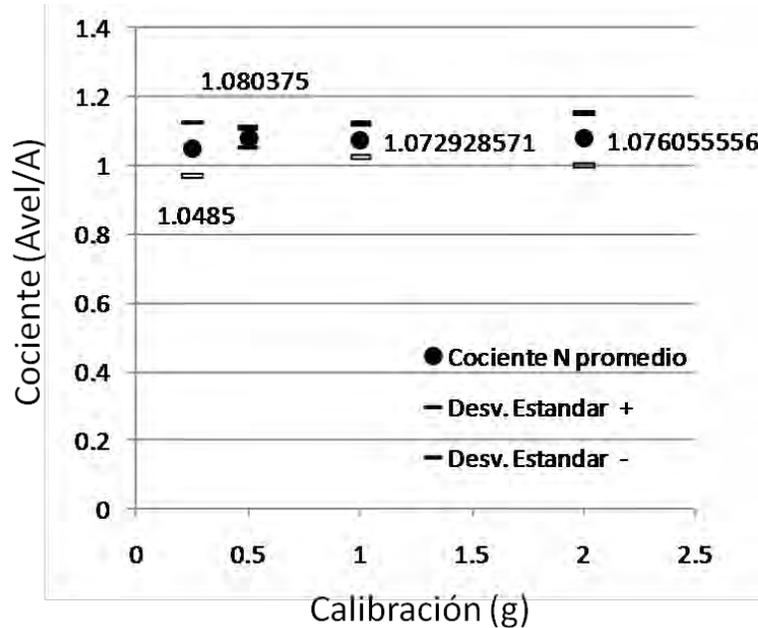


Figura 26.- Promedio de cocientes encontrados de acuerdo a la calibración de los acelerógrafos.

### III.3.- Elaboración de mapas

Una vez efectuado la revisión de trazas y la determinación de los valores máximos, corroborando la confiabilidad de éstos para ser empleados, se procedió a elaborar los mapas de iso-velocidad, iso-aceleración e isosistas. Para realizar los mapas se utilizó el programa *Generic Mapping Tools* (Wessel y Smith, 2003) y las relaciones entre PGA y MMI desarrolladas por Wald *et al.* (1999). Con la finalidad de observar la variación en espacio de dichos registros, los mapas fueron elaborados para cada sismo y en sus tres componentes.

El primer paso en la elaboración de los mapas fue la selección de los eventos, los eventos fueron seleccionados con base en la cantidad de registros con los que contaba cada uno, debido a que muchos eventos contaban con pocos registros después de la revisión de



las trazas. Los sismos seleccionados fueron aquellos que presentaran 5 registros o más ya que estos muestran una mejor distribución de los contornos de los valores máximos.

Como se puede apreciar en las Figuras 27 y 28, para los eventos que contaban con menos de 5 registros, los contornos de iso-velocidad y de iso-aceleración no representan claramente el área de influencia, ya que, debido a la falta de datos el programa realiza una interpolación proyectando valores hacia donde no se cuenta con registros, de ahí la importancia de tener la mayor cantidad de registros posible, las figuras anteriores corresponden al evento del 13 de Enero del 2004, en su componente Norte, este evento cuenta con dos registros en las estaciones MAIG y ZAIG.

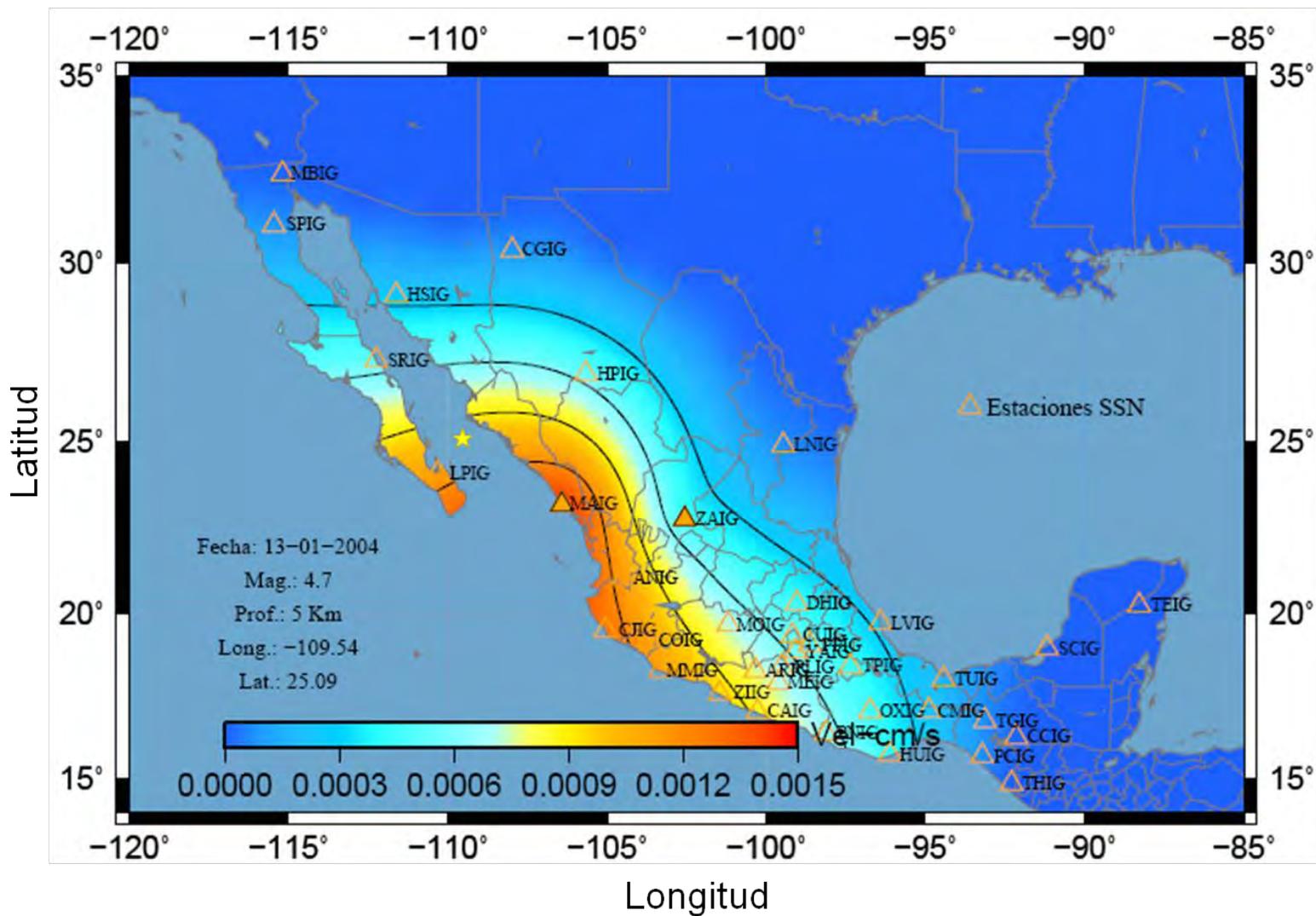


Figura 27.- Contornos de iso-velocidad para el evento del 13-01-2004, en su componente Norte, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.

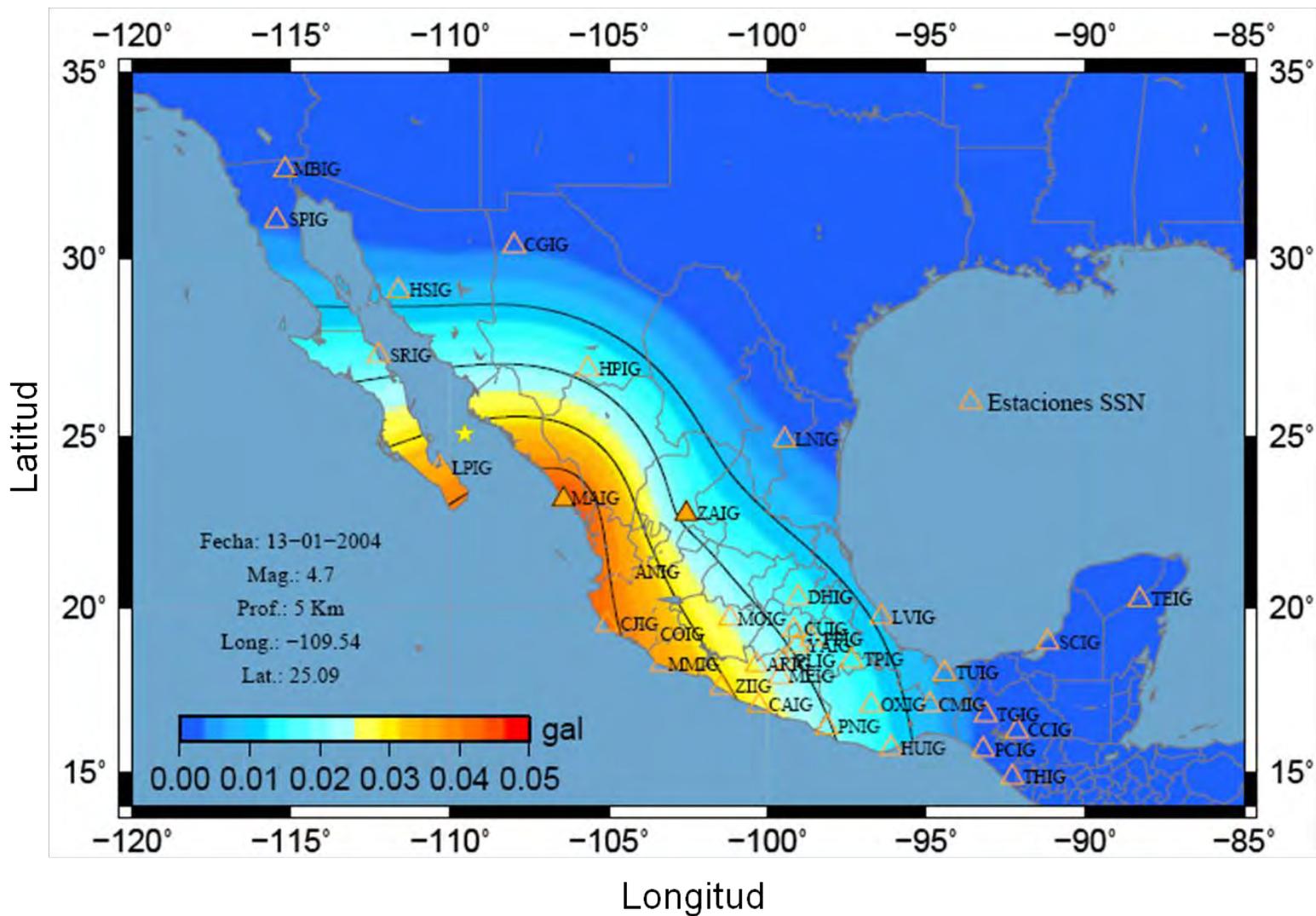


Figura 28.- Contornos de iso-aceleración para el evento del 13-01-2004, en su componente Norte, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.



En las figuras anteriores se puede observar que la ausencia de datos en la estación LPIG, provoca que los mayores valores sean registrados en la estación MAIG, indicando una idea errónea de que el evento ocurrió frente a esta estación y no en el Golfo de California tal como está marcado en los mapas.

Después de haber seleccionado los eventos, se procedió a completar el conjunto de datos de cada uno de los ellos con la mayor cantidad de datos de velocidad y aceleración, con la finalidad de obtener una mayor densidad de estaciones y por lo tanto una mejor distribución de los valores, realizándose para cada una de las tres componentes. Ejemplo de lo anterior se muestra en las Figuras 29, 30 y 31, donde se observa la distribución de los valores picos para el evento del 13 de Abril del 2007,  $M_w = 6.3$ , para la componente Este y la intensidad máxima, ocurrido en las costas de Guerrero.

El evento muestra que fue registrado en 25 estaciones del SSN, como se puede apreciar en las figuras, la distribución de los datos es muy buena, concentrándose los valores máximos en la región epicentral. Realizando una comparación con el evento del 14-01-2004 (Figuras 27 y 28) se puede observar la importancia de que los eventos cuenten con la mayor cantidad de registros posible, ya que de esta manera se podrá presentar una mejor distribución de los valores.

En las figuras anteriores podemos observar que los valores máximos son concentrados en área epicentral, con el máximo en la estación más cercana al epicentro (CAIG), los valores tienden a tomar una mayor distancia en atenuarse hacia el centro del país que a lo largo de la costa del Pacífico, también se puede observar un efecto de directividad hacia el NW, tomando una mayor distancia en atenuarse la energía hacia esta dirección que hacia el SE, donde se observan que los contornos están cercanos uno a otro. También se puede observar un efecto producido por el Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM), provocando que los contornos tiendan a distribuirse a lo largo de éste, atenuando la energía hacia la parte Norte del país.

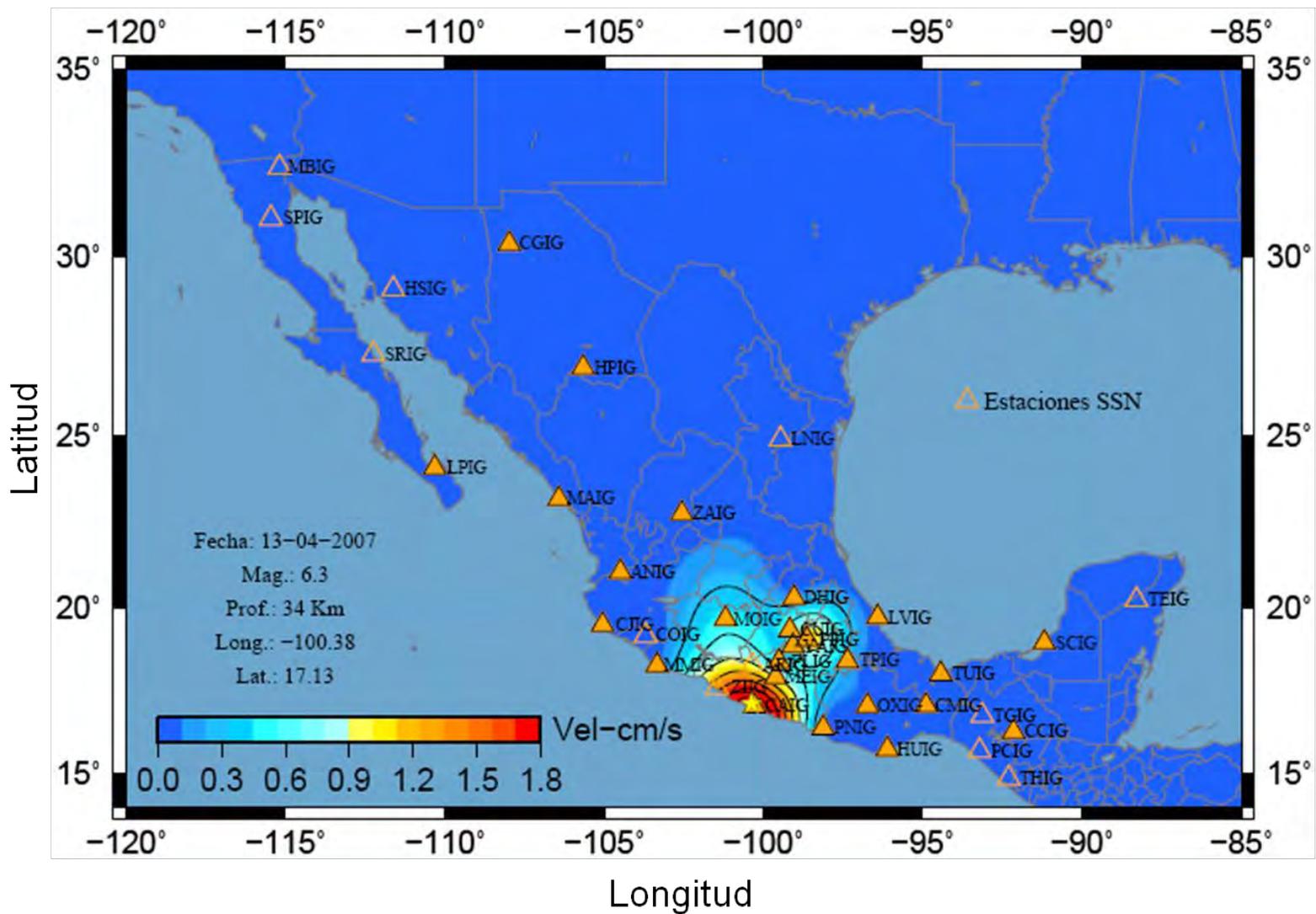


Figura 29.- Contornos de iso-velocidad para el evento del 13-04-2007, en su componente Este, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.

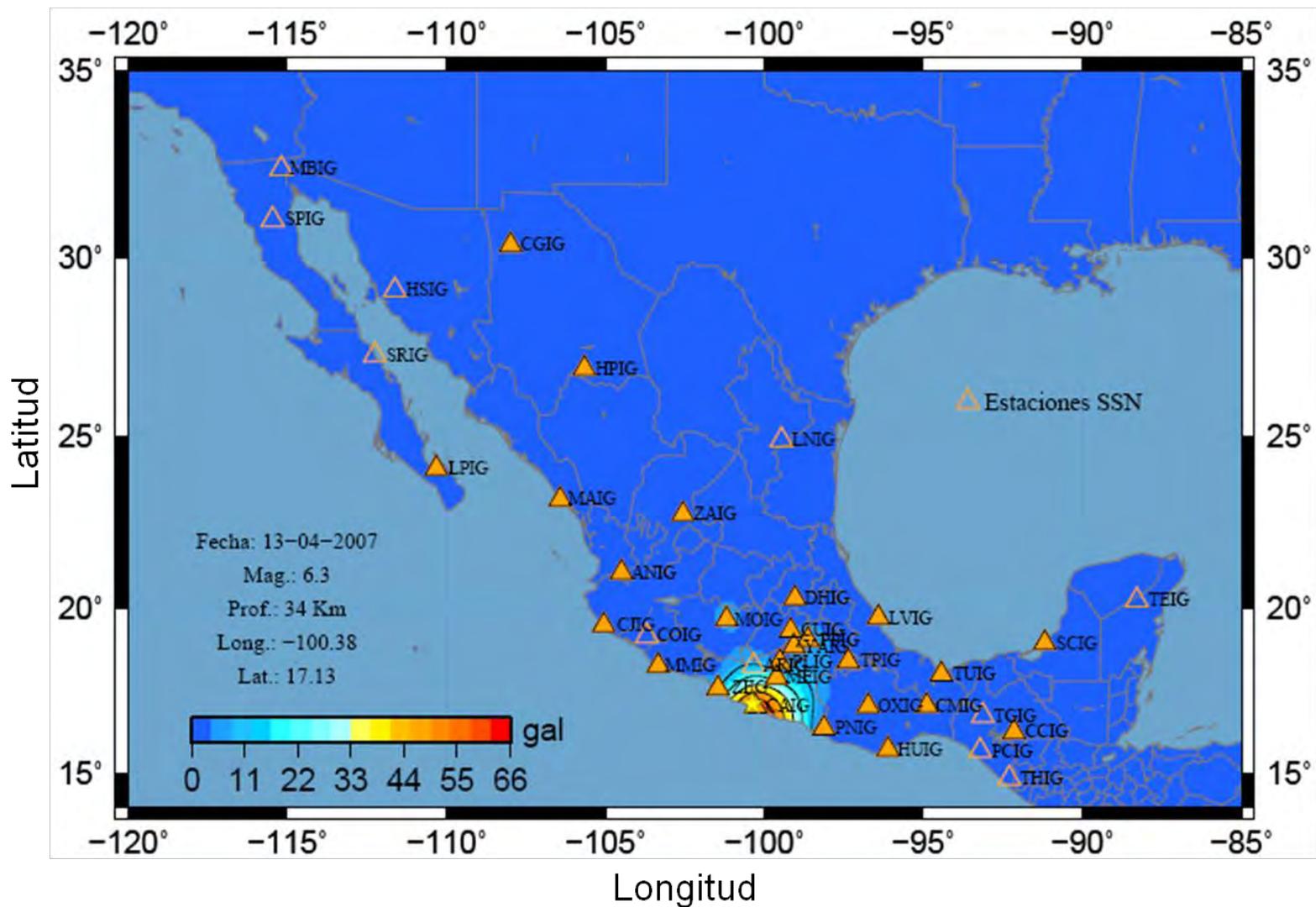


Figura 30.- Contornos de iso-aceleración para el evento del 13-04-2007, en su componente Este, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.

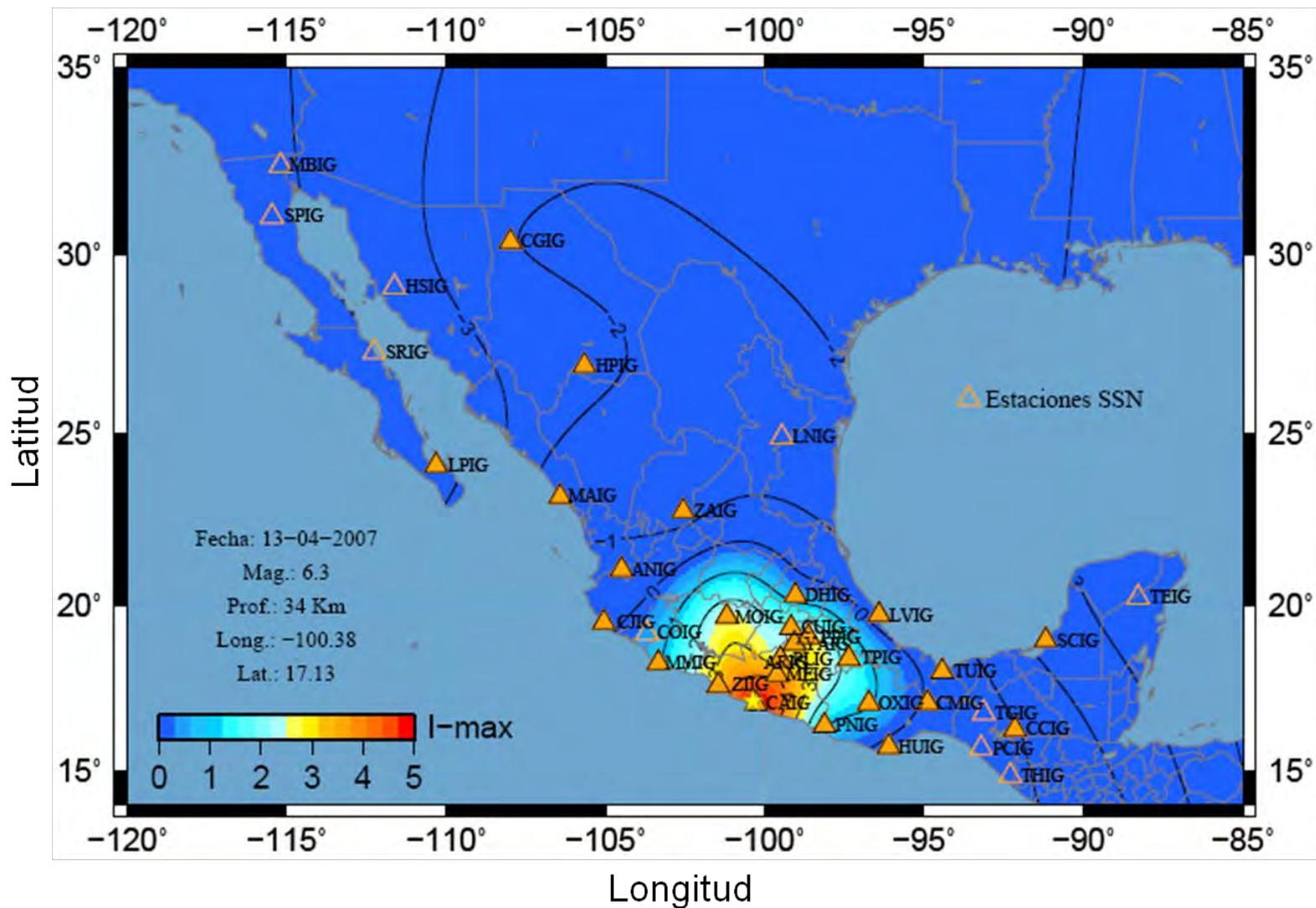


Figura 31.- Contornos de isosistas para el evento del 13-04-2007, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.



## Capítulo IV.- Resultados

Un catálogo de 99 eventos fue empleado para la realización de mapas donde se muestran la distribución de los valores máximos del movimiento del suelo, así como de intensidades con base en los mismos. Debido a la cantidad de registros y a la calidad de los mismos, 45 eventos del catálogo fueron seleccionados para la elaboración de dichos modelos. Dada la cantidad de mapas que se generaron, tan sólo se mostraron los más relevantes, el resto de los mapas pueden ser consultados en el disco anexo a este trabajo.

Como se menciono anteriormente, la cantidad de registros es un punto importante para tener una buen distribución los valores máximos, pero, además de la cantidad de estaciones que registran el evento, las estaciones cercanas al epicentro deben presentar un correcto funcionamiento, dado que, sin los valores correspondientes a estas estaciones, las estaciones alejadas del epicentro presentaran los valores máximos, dando una distribución errónea de los valores y por lo tanto una mala ubicación de los posibles daños debido al evento.

Ejemplo de lo anterior se observa en las Figuras 32 y 33 para el evento de 01 de Enero del 2004, con  $M_w=5.0$  suscitado en las costas de Guerrero, en las figuras se muestra la distribución de los contornos de iso-velocidad e iso-aceleración para la componente Norte, se muestra una sola componente debido a que la distribución de las otras restantes es muy similar (Sismo 1, disco anexo).

De las figuras se puede observar que la concentración de los valores máximos está en la parte centro del país, aunque el evento haya ocurrido en las costas de Guerrero, la razón de esta distribución es, que las estaciones cercanas al epicentro, ZIIG y CAIG, no cuentan con un registro del evento, dando la impresión que el evento ocurrió en el Estado de México. Aunque el evento contiene 13 registros, la ausencia de valores en las estaciones dentro del área epicentral, pueden dar una representación equivocada.

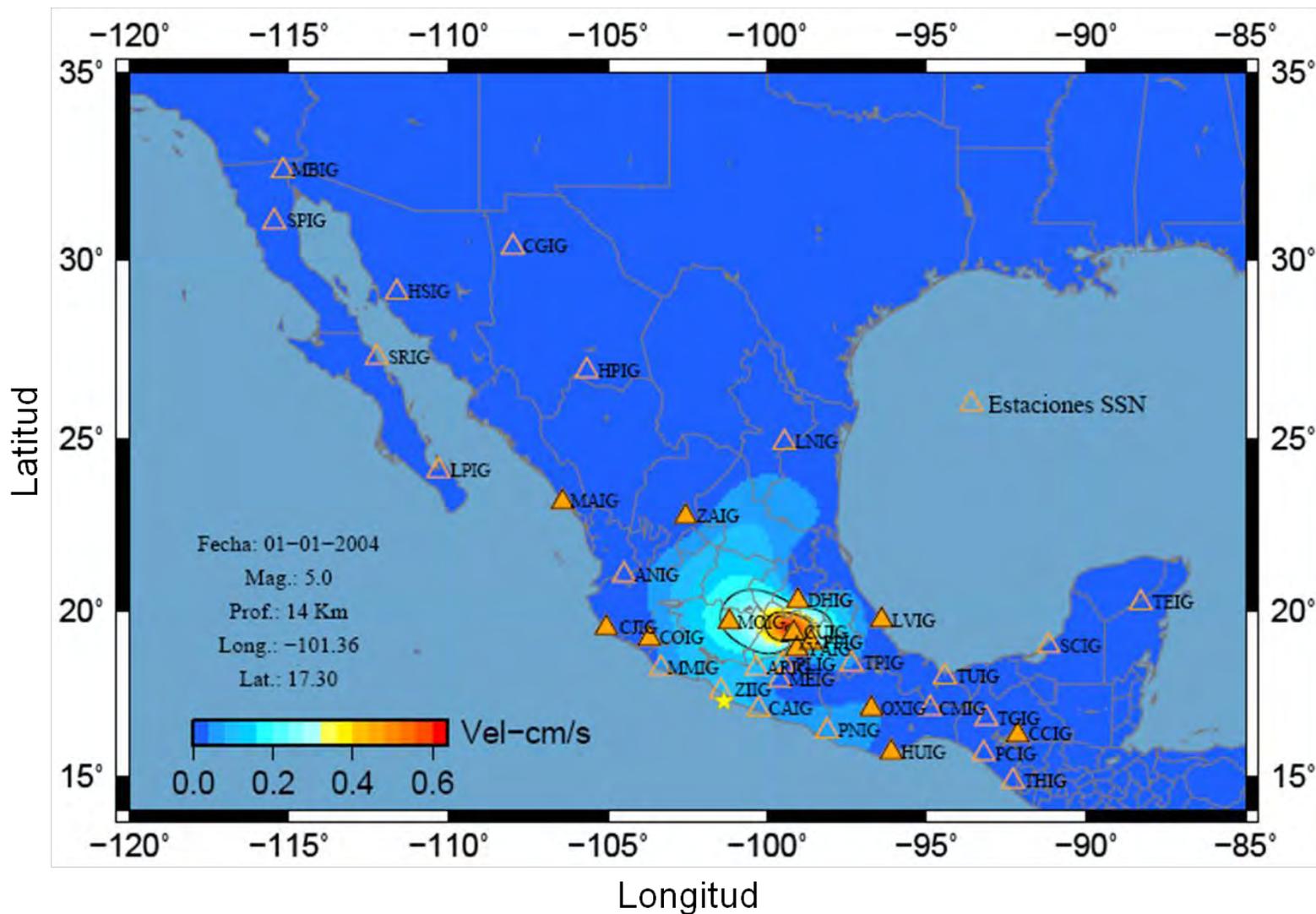


Figura 32.- Contornos de iso-velocidad para el evento del 01-01-2004, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.

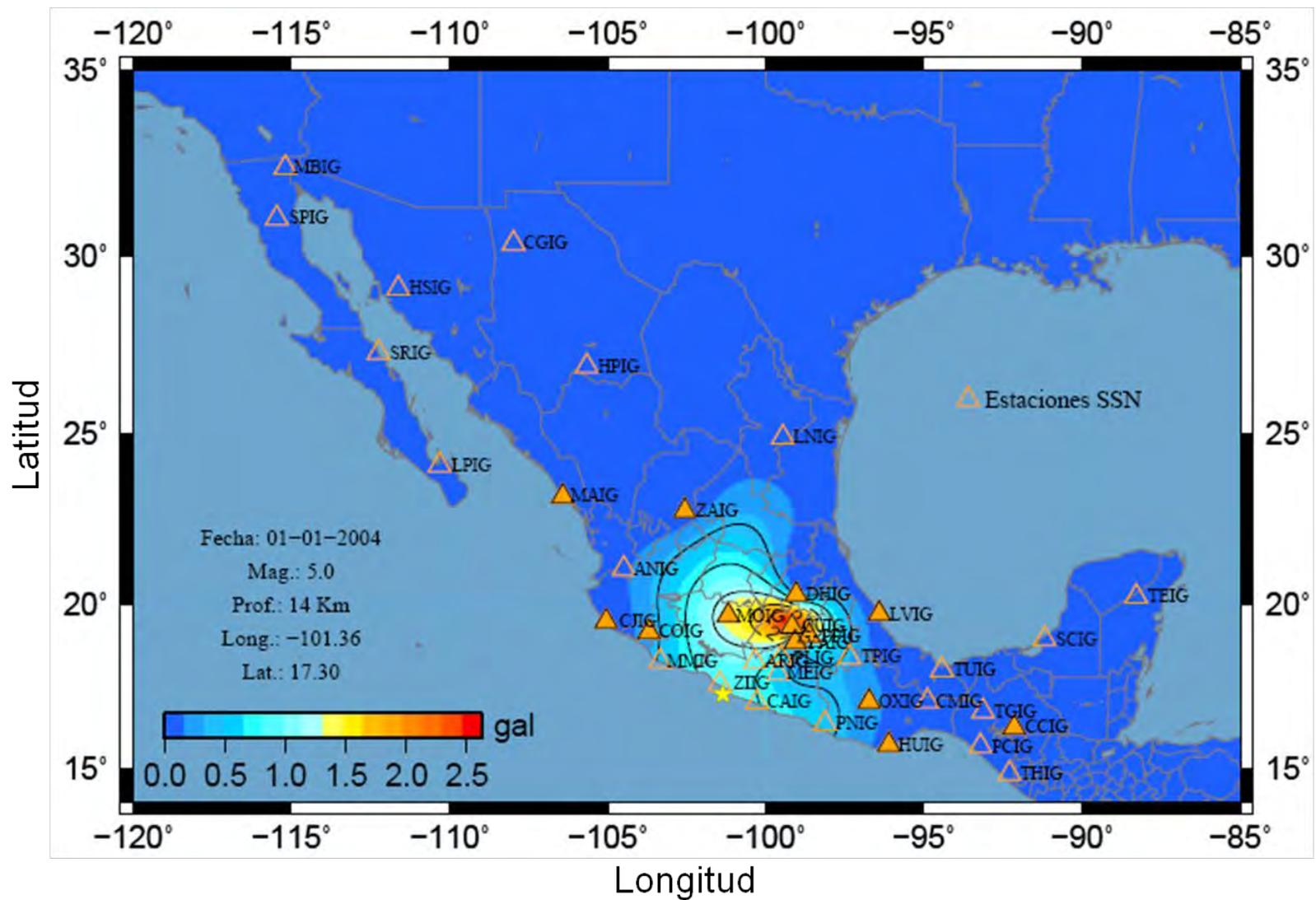


Figura 33.- Contornos de iso-aceleración para el evento del 01-01-2004, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.



A pesar de la ausencia de valores en las estaciones cercanas al epicentro, se puede observar de las figuras anteriores, que los valores tienden a distribuirse en el la zona sur-Oeste y Sureste del país.

Otros eventos que no cuentan con valores en las estaciones cercanas al epicentro, son los siguientes:

- Sismo del 13-01-2004,  $M_w=5.5$  (Sismo 3, disco anexo), ubicado en el estado de Oaxaca, este evento cuenta con 12 registros, las estaciones más cercanas al epicentro, HUIG, no cuenta con valores, y la estación PNIG contiene valores muy bajos, los valores máximos se presentan en estaciones retiradas del epicentro CAIG, CUIG y TUIG, ésta última es debido a que los valores están muy cerca del nivel de ruido (Apéndice A, Figuras A1 y A2), provocando dos polos en los mapas, también se observa que los valores tienden a concentrarse hacia la parte sur del país.
- Sismo del 05-02-2004,  $M_w=4.8$  (Sismo 5, disco anexo), ubicado en la zona del Istmo de Tehuantepec, entre los estados de Oaxaca y Chiapas, este evento cuenta con 12 registros, la estación PCIG no cuenta con valores, siendo la estación más cercana al epicentro, la estación CMIG es la que cuenta con los valores máximos, cabe destacar que los valores que se tienen son muy bajos, provocando que los contornos sean más pronunciados.
- Sismo 08-05-2005,  $M_w=5.9$  (Sismo 28, disco anexo), ubicado al SSE de Baja California, el evento cuenta con 14 registros todos ubicados en la parte SE del epicentro, como no se cuenta con valores en las estaciones del Norte del país, la interpolación proyecta valores hacia esta parte, de la misma forma que el evento anterior se cuenta con valores pequeños.



- Sismo 28-07-2007,  $M_w=5.1$  (Sismo 77, disco anexo), ubicado al SSE de Baja California, el evento cuenta con 16 registros, la mayoría de ellos ubicados hacia el Este del epicentro, a pesar de que se tienen estaciones hacia la parte Norte, la distribución de las mismas no es adecuada, haciendo que los valores máximos se presenten hacia la zona Este del país, y por consiguiente se creería que el evento se suscito en el estado de Oaxaca.
- Sismo 15-08-2007,  $M_w=5.0$  (Sismo 78, disco anexo), ubicado al Oeste del estado de Jalisco, cuenta con 14 registros, con una muy mala distribución, además son valores muy pequeños, lo que hace que los contornos se marquen mucho más. Se puede observar que se generan dos polos en el mapa separados por CVTM.
- Sismo 10-09-2007,  $M_w=4.8$  (Sismo 85, disco anexo), evento ubicado al Sur del Golfo de California, el evento cuenta con 13 registros, al igual que los anteriores con una mala distribución, alejados del epicentro, y con pequeños valores, que pareciera indicar que cuando se tienen valores pequeños la distribución de los contornos no es muy buena, se observa que los máximos valores para la aceleración se concentran en las estaciones ANIG y MOIG.
- Sismo del 05-10-2007,  $M_w=5.1$  (Sismo 90, disco anexo), ubicado al Oeste del estado de Jalisco, cuenta con 23 registros, aunque la estación mas cercana no presenta valores (CJIG), los valores máximos tienden a concentrarse en la parte Centro y Norte del país. Los valores que se observan en la componente Este es debido al mal registro en la estación TGIG (Figura 20).

Dentro de los resultados obtenidos durante la realización de los mapas, nos encontramos con eventos que aunque la estación más cercana al epicentro no contará con valores, presentaba una distribución no muy mala de los contornos, lo que nos podría dar una idea de lo que se puede esperar al ocurrir un evento con características similares. Las



Figuras 34 y 35 muestran los contornos para componente Norte (las dos restantes presentan distribución similar, Sismo 11, disco anexo), para el evento 13-03-2004, Mw=4.9, y la Figura 36 los contornos de las intensidades.

Este evento se encuentra localizado frente a las costas del estado de Michoacán, cuenta con 13 registros, la estación más cercana al epicentro es MMIG, la cual no cuenta con valores, ajustándose la interpolación a la estación con el valor máximo que corresponde a la estación COIG, a pesar de que la estación MMIG no contiene valores, se observa una buena distribución, esto puede deberse a que las estaciones con registro se encuentran cerca al epicentro, prácticamente rodeando al evento.

Las velocidades parecen ubicarse en la parte Norte y Centro del país, no se observa que se transmitan hacia la parte sur, lo que puede deberse a la presencia del CVTM, por su parte las aceleraciones permanecen dentro del área epicentral, a excepción de la estación TPIG que presenta valores de aceleración altos, esto es debido a que se cuenta con valores muy bajos cercanos al nivel de ruido (Figura A3), y al momento de obtener la aceleración resultan en valores altos (Figura A4).

Se observa que los valores máximos del movimiento del suelo son valores bajos, mostrando que los contornos sean más pronunciados, la ausencia de valores hacia la parte del Golfo de California provoca la distribución de los valores hacia esa zona, debido a la interpolación de datos.

Las mayores intensidades se presentan en la estación COIG, donde se registraron los máximos valores, alcanzando una IMM de 2, dado que la estación COIG se encuentra más retirada del epicentro, se podría estimar que la estación MMIG contara con una intensidad mayor o igual a 2.

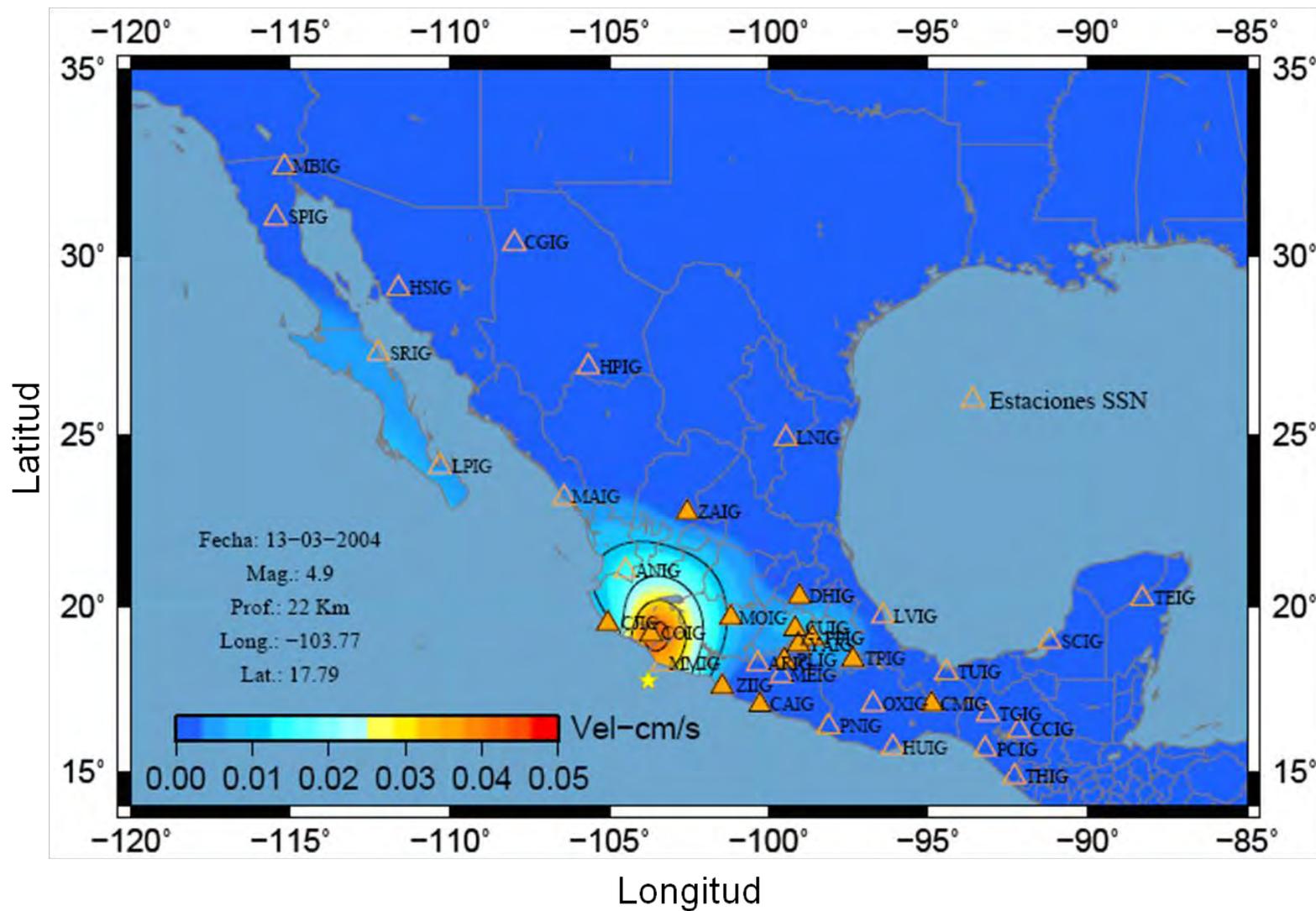


Figura 34.- Contornos de iso-velocidad para el evento del 13-03-2004, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.

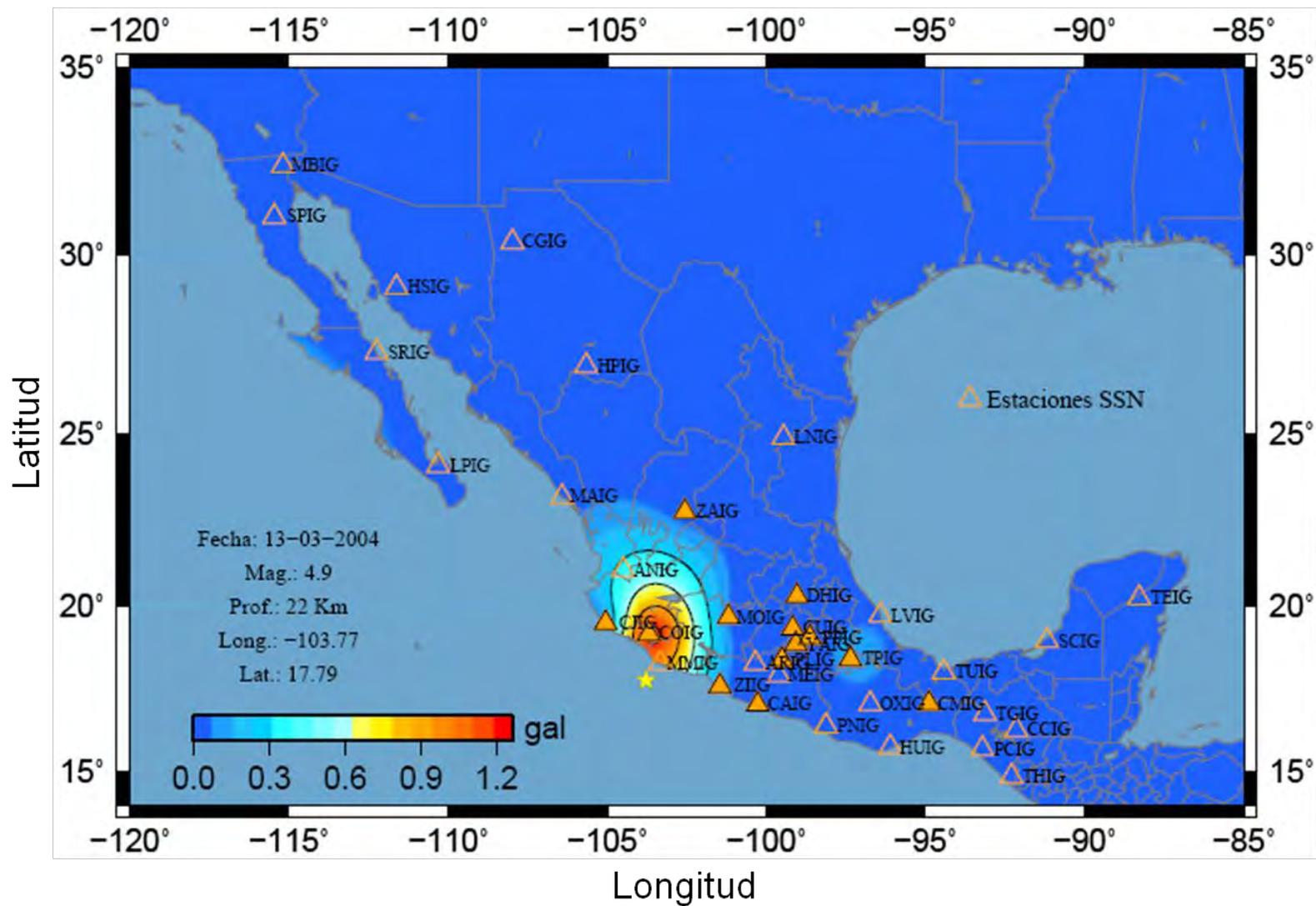


Figura 35.- Contornos de iso-aceleración para el evento del 13-03-2004, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.

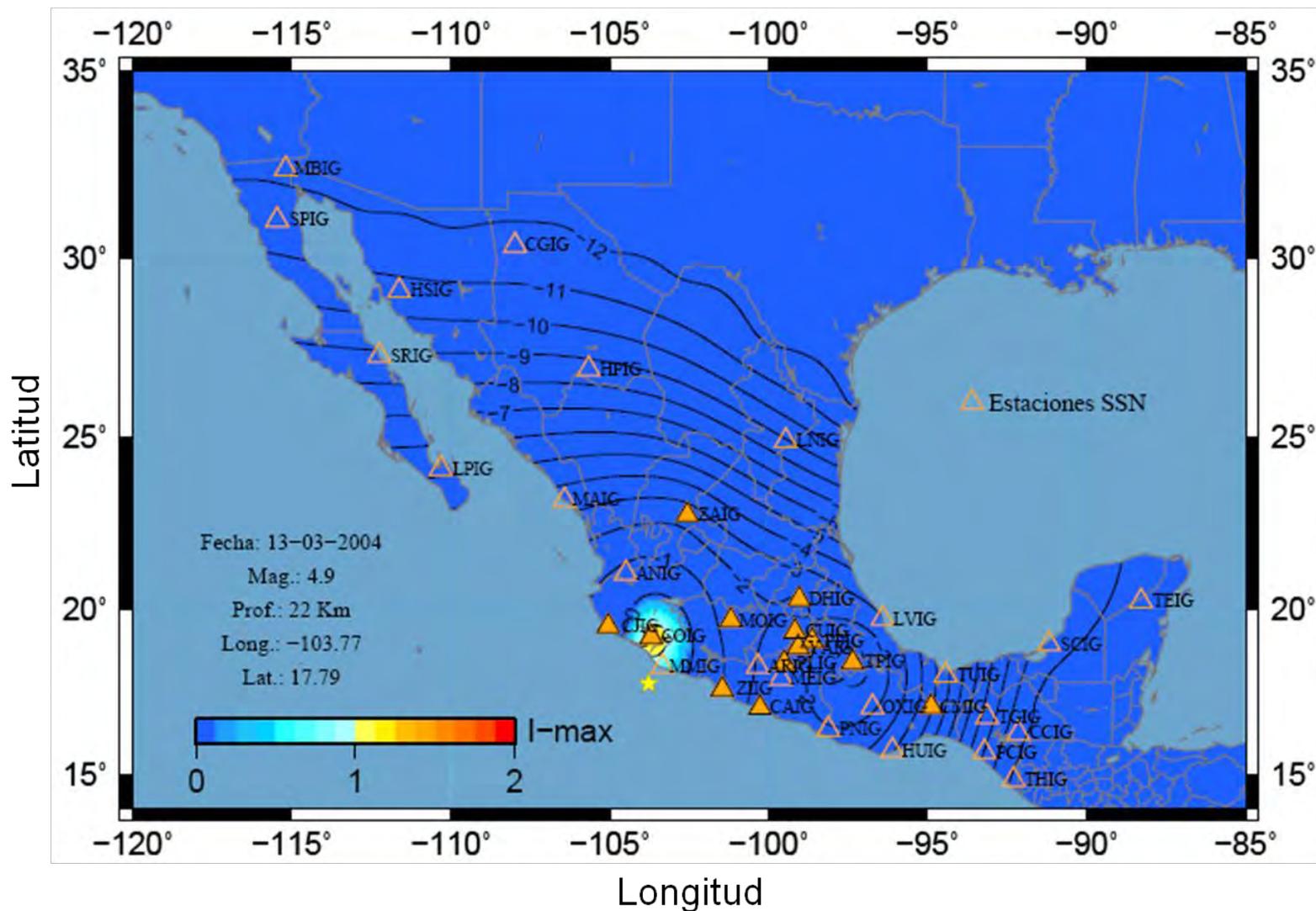


Figura 36.- Contornos de isosistas para el evento del 13-03-2004, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.



Otros eventos que presentan distribuciones similares, sin contar con valores en la estación más cercana al epicentro, son los siguientes:

- Sismo del 22-06-2005,  $M_w=4.6$  (Sismo 30, disco anexo), ubicado al Norte de la frontera entre los estados de Oaxaca y Chiapas, el evento cuenta con 15 registros, la mayoría de estos ubicados al Oeste del epicentro, presentándose los valores máximos en la estación HUIG, revisando la traza de la estación, no se observa alguna anomalía (Figura A5).
- Sismo del 14-11-2005,  $M_w=4.6$  (Sismo 37, disco anexo), el evento está localizado al SE del estado de Veracruz y cuenta con 16 registros, de las estaciones más cercanas al epicentro tan sólo la estación TUIG presenta valores, pero los máximos se localizan en la estación OXIG, revisando las trazas de la estación no se observa anomalía alguna (Figura A6).
- Sismo del 14-12-2005,  $M_w=4.6$  (Sismo 39, disco anexo), evento localizado al Oeste del estado de Guerrero, cuenta con 14 registros, se observa que los valores máximos permanecen dentro de la zona epicentral, dado que la mayoría de las estaciones de registro se encuentran hacia la parte Este del epicentro, la interpolación tiende a proyectar valores hacia la parte NE donde se tiene una estación de registro, demostrando que es de importancia contar con una mayor cantidad de registros y la correcta funcionalidad de cada una de las estaciones.
- Sismo del 18-01-2006,  $M_w= 4.9$  (Sismo 42, disco anexo), evento ubicado al Este del estado de Oaxaca, cuenta con 5 registros, pero dada la distribución de las estaciones de registros, que casi rodean al epicentro, los contornos obtenidos muestran una buena distribución, aunque las estaciones mas cercanas no contengan registro.



- Sismo del 20-02-2006,  $M_w=5.0$  (Sismo 45, disco anexo), evento localizado al W del estado de Guerrero, cuenta con 14 registros, la mayoría localizados hacia la parte Este del epicentro, lo que provoca distorsión hacia la parte NW donde se tienen tres estaciones con registros y retiradas del epicentro, se puede considerar una buena distribución de los contornos, aunque las estaciones más cercanas no cuentan con registro, debido a que como el caso anterior, las estaciones se encuentran rodeando al epicentro.
- Sismo del 27-06-2006,  $M_w=5.6$  (Sismo 49, disco anexo), evento localizado en el Istmo de Tehuantepec, cuenta con 13 registros, se observa que los valores de velocidad son un poco mayores en la estación TUIG (Figura A7), y por otro lado las aceleraciones son máximas en la estación HUIG, siendo una de las más cercanas al epicentro, el cambio es debido a que al momento de obtener la aceleración en la estación TUIG esta alcanza los niveles de ruido (Figura A8). Esta situación parece ser la misma en eventos anteriores (eventos 3, 24 y 28), probablemente sea debido a un efecto de sitio, dado que la estación se ubica en un domo salino.
- Sismo del 31-07-2006,  $M_w=5.3$  (Sismo 51, disco anexo), se encuentra ubicado al Oeste del estado de Colima, este evento cuenta con 16 registros la mayoría ubicados hacia el E del epicentro, dada la poca cantidad de registros hacia la parte N provoca la distorsión de los contornos, aun con esto se puede observar la proyección de los contornos hacia la parte SE del país siguiendo prácticamente el CVTM.
- Sismo del 13-11-2006,  $M_w=5.6$  (Sismo 54, disco anexo), ubicado al Oeste del estado de Colima, el evento cuenta con 17 registros, con los valores máximos en la estación CJIG, dada la posición de las estaciones de registro, casi rodeando al epicentro muestran una buena distribución de los contornos, las estaciones MAIG y ZAIG, que se encuentran más retiradas del epicentro



tienden a causar distorsión hacia la parte Norte. Aunque se puede observar una proyección de los valores hacia la parte E del país siguiendo el CVTM.

- Sismo del 21-01-2007,  $M_w=5.3$  (Sismo 57, disco anexo), ubicado frente a las costas del estado de Nayarit, se muestra una buena distribución de los contornos, pero las estaciones de los 14 registros están retiradas del epicentro, lo que provoca la distorsión de los valores. La cercanía de las estaciones de registro también es importante para la buena distribución de los contornos.
- Sismo del 25-02-2007,  $M_w=4.9$  (Sismo 63, disco anexo), este evento localizado en el Golfo de California presenta 9 registros la mayoría ubicados hacia el SE del epicentro, sin embargo se observa que los contornos tienden hacia la estación CGIG, la cual no es la más cercana, revisando las trazas de la estación no se encontró anomalía alguna tanto en la traza de velocidad como en la de aceleración derivada de la velocidad (Figuras A9 y A10).
- Sismo del 28-03-2007,  $M_w=4.9$  (Sismo 68, disco anexo), evento ubicado al Oeste del estado de Jalisco, cuenta con 10 registros, el evento presenta una buena distribución de contornos, pero debido a lo alejado de las estaciones tienden a distorsionarse, además de que los valores son muy bajos, lo que, como ya se ha observado, tienden a distorsionar la distribución de los contornos.
- Sismo del 06-07-2007,  $M_w=6.2$  (Sismo 74, disco anexo), el evento se encuentra ubicado entre los estados de Oaxaca y Chiapas, cuenta con 23 registros la mayoría de ellos ubicados hacia la parte W y N del epicentro, hacia la parte E tan sólo se cuenta con tres de las estaciones de registro de las 6 que se ubican en esta zona, provocando la distorsión de los contornos. Nótese la distribución de las estaciones, que prácticamente rodean al epicentro.



- Sismo del 24-09-2008,  $M_w=6.4$  (Sismo 96, disco anexo), ubicado al Suroeste del estado de Michoacán, el evento cuenta con 24 registros, en general presenta una buena distribución, los valores tienden a distorsionarse hacia el Norte debido a la poca densidad de estaciones de registro y su cercanía respecto al epicentro, también se observa que los valores tienden a seguir el trazo del CVTM. En la aceleración vertical se observa que la estación HPIG presenta los valores máximos causando la distribución de los valores hacia esa zona, revisando las trazas se encontró, que al momento de obtener la aceleración derivada de la velocidad la traza presenta un glitche (Figura A11), lo cual afecta los valores reales del movimiento del suelo.

Finalmente dentro la elaboración de los mapas, tenemos aquellos que presentan una muy buena distribución, de acuerdo con la cantidad de registros y la distribución de las estaciones de dichos registros. Como el evento de 13-04-2007,  $M_w=6.3$  (Figuras 29, 30 y 31), este evento es uno de los representativos dada la ubicación de su epicentro y la estación más cercana ubicada casi sobre el evento. Como habría de esperarse los valores máximos se presentan en la región del epicentro.

Se puede apreciar como las velocidades toman una mayor distancia en atenuarse que las aceleraciones, sin embargo ambas (PGV y PGA) toman mayor distancia hacia el Norte (Figura 37), que hacia lo largo de la costa del Pacífico tanto hacia al W como al E (Figuras 38 y 39).

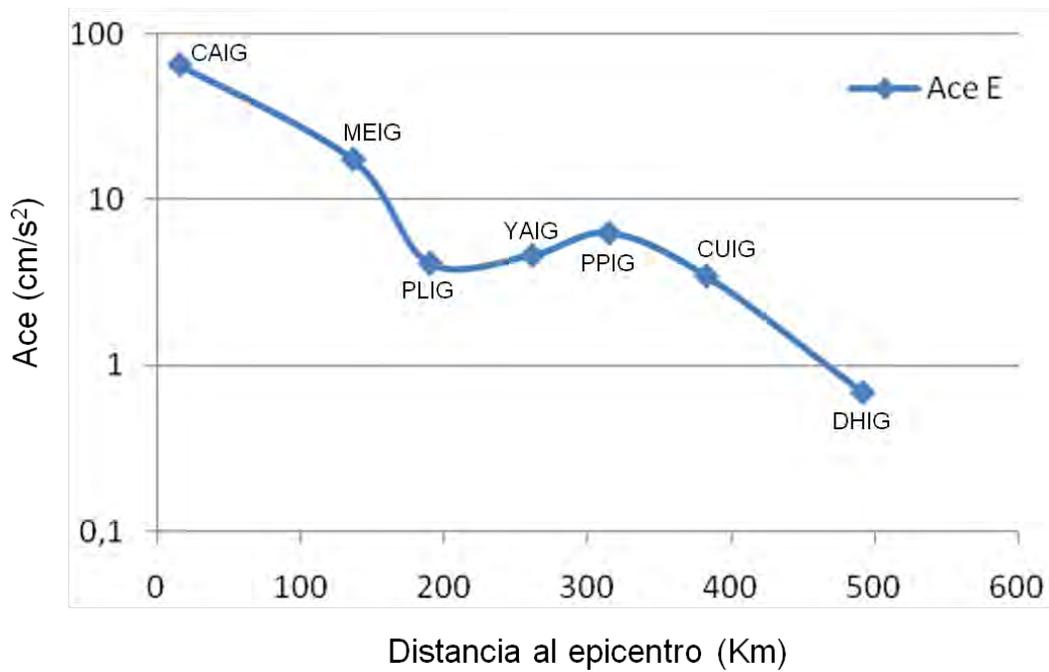


Figura 37.- Perfil Norte hacia el centro del país para el evento del 13-04-2007, en la componente Este.

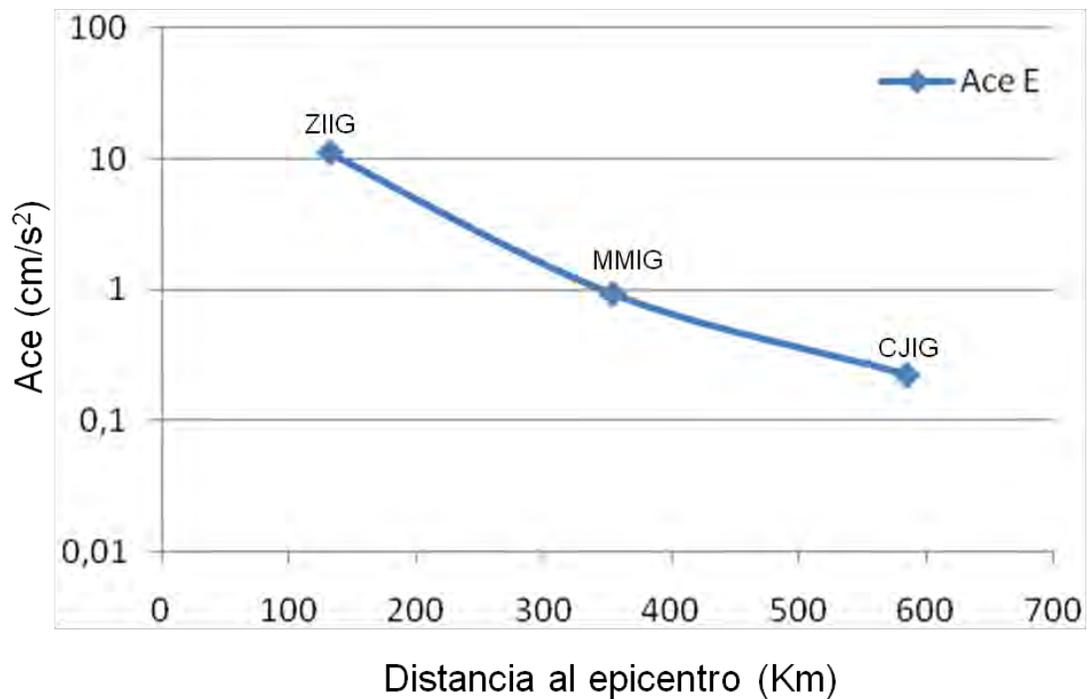


Figura 38.- Perfil a lo largo de la costa del Pacífico (Oeste), para el evento del 13-04-2007, en la componente Este.

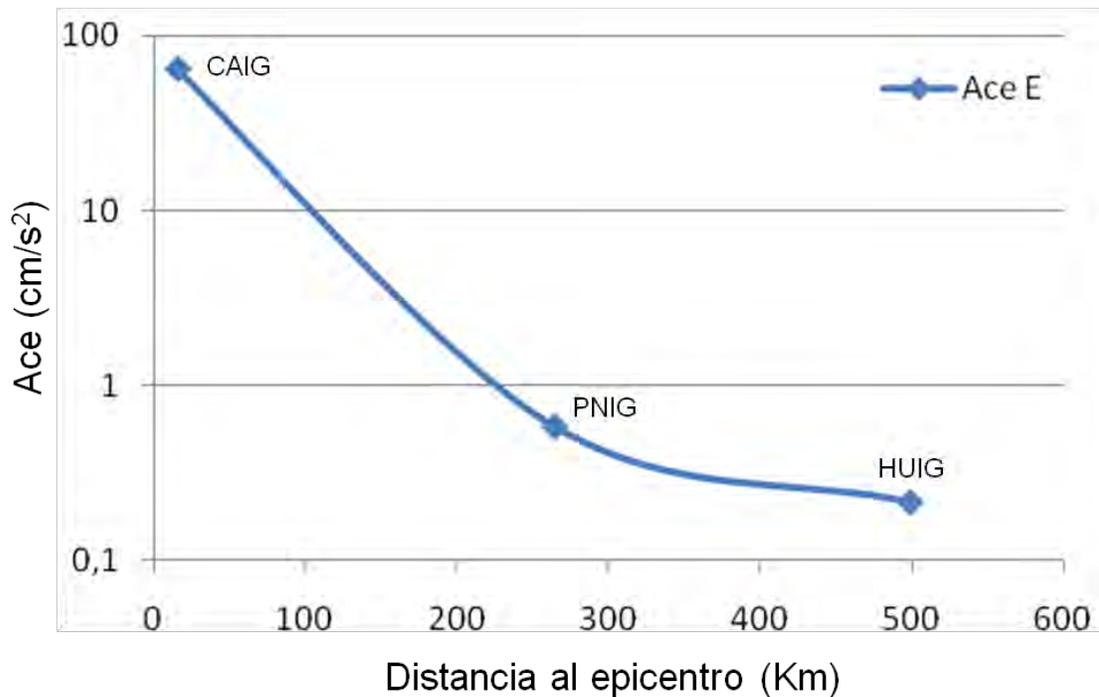


Figura 39.- Perfil a largo de la costa del Pacífico (Este), para el evento del 13-04-2007, en la componente Este.

Las aceleraciones dirigidas a lo largo de la costa del pacífico tanto hacia la parte W como para la parte E toman casi la misma distancia en atenuarse. En la Figura 37 se observa un incremento en los valores de la aceleración en las estaciones YAIG, PPIG y CUIG, este incremento se presenta con mayor énfasis en las componentes horizontales (N y E).

Otros eventos que presentan una buena distribución, con las características mencionadas anteriormente, son los siguientes:

- Sismo del 20-04-2004,  $M_w=5.2$  (Sismo 13, disco anexo), este evento está localizado en el estado de Oaxaca cerca de la frontera con el estado de Veracruz, cuenta con 17 registros la mayoría de ellos ubicados hacia la parte W del epicentro, es un evento profundo que presenta una buena distribución, los valores presentan una tendencia hacia la parte W, debido a los valores registrados en la estación OXIG, la cual no presenta alguna anomalía en su



traza, la presencia de estos valores podría deberse a un posible efecto de sitio. Debido a esto las aceleraciones toman una mayor distancia en atenuarse hacia la parte NW del epicentro.

- Sismo del 14-06-2004,  $M_w=5.6$  (Sismo 16, disco anexo), el evento se encuentra localizado cerca de la frontera de los estados de Guerrero y Oaxaca, cuenta con 18 registros distribuidos prácticamente alrededor del epicentro, los valores de velocidad y aceleración muestran una buena correlación, el valor alto que se presenta en la componente Este es debido al glitche que se observó en la Figura 14. La atenuación de la energía toma mayor distancia hacia el centro del país (Apéndice B, Figura B1) casi el doble comparado con la atenuación sobre la costa del pacífico (Figura B2). En la figura B1 se observa que la estación PPIG muestra valores altos, revisando las trazas de dicha estación no se encontraron anomalías, lo que sugiere un posible efecto de sitio. Las intensidades muestran una buena distribución, y se puede observar que estas están regidas en la parte Norte por el CVTM.
- Sismo del 28-10-2004,  $M_w=4.7$  (Sismo 23, disco anexo), evento localizado al Norte del estado de Guerrero, cuenta con 15 registros y la distribución de las estaciones es buena, debido a su cercanía y prácticamente rodeando al epicentro, la distribución de los contornos es casi concéntrica, se observa una distorsión de los contornos hacia el W del epicentro y hacia el E, hacia el W es debido al registro que se presenta en la estación CJIG, y a su lejanía del epicentro, por su parte la distorsión en el Este es debido a los valores registrados en la estación OXIG, por lo que también se observa que la atenuación de la energía toma una mayor distancia hacia estos lados del epicentro, las aceleraciones mayores N-E (centro del país) se ubican alrededor de los 150 km cercanos al epicentro (Figura B3).



- Sismo del 14-08-2005,  $M_w=5.8$  (Sismo 34, disco anexo), evento localizado al SW del estado de Oaxaca casi con la frontera del estado de Guerrero, el evento cuenta con 12 registros con los valores máximos localizados en la estación PNIG la cual es la estación más cercana al epicentro, la distribución de las estaciones es prácticamente rodeando el epicentro, de los mapas se puede observar que la distribución de los valores hacia el Norte está regida por la presencia del CVTM. La atenuación de la energía toma una mayor distancia hacia el interior del país (Figura B4), comparado con la distribución que se observa sobre la costa del pacífico (Figura B5). El evento muestra una distribución muy eficiente hacia el interior del país.
- Sismo del 11-08-2006,  $M_w=5.2$  (Sismo 52 disco anexo), el evento cuenta con 20 registros y está ubicado al SW del estado del Guerrero, la distribución que presenta es buena, se puede observar que la estación PPIG genera valores altos que tienden a distorsionar los contornos, observando las trazas de la estación no se observa anomalía alguna que indique que los registros de la estación pudieran estar arrojando valores erróneos (Figura A12 y A13), lo que podría deberse a un efecto de sitio en la estación. La distribución de la energía hacia el interior del país abarca una mayor distancia que para la costa del Pacífico (Figura B6 y B7).
- Sismo del 11-02-2007,  $M_w=5.2$  (Sismo59, disco anexo), el evento se encuentra ubicado al Oeste del estado de Nayarit, con 17 registros el evento muestra una buena distribución, la ausencia de estaciones hacia la parte Norte del epicentro, provocan la distorsión de los contornos hacia esa zona. Los máximos valores se concentran en las estaciones más cercanas al epicentro ANIG y MAIG.
- Sismo del 04-05-2007,  $M_w=4.9$  (Sismo 70, disco anexo), el evento está localizado en el estado de Oaxaca, cuenta con 21 registros la estación más cercana OXIG registra los valores máximos, la distribución de las estaciones



es muy favorable, dado que se encuentran rodeando al evento y además de la cercanía hacia el evento. Los valores se distribuyen casi concéntricamente desde el epicentro, la atenuación de la energía es ligeramente más rápida a lo largo de la costa del pacífico (Figura B8), que hacia la zona centro (Figura B9) o hacia la zona del Golfo de México (Figura B10).

- Sismo del 01-09-2007,  $M_w=6.3$  (Sismo 80, disco anexo), ubicado al Sur del Golfo de California, el evento cuenta con 15 registros, la mayoría de las estaciones de registro se ubican hacia el SE del país, las estaciones del Norte cuentan con registro, pero la ausencia de las estaciones sobre Baja California provocan la distorsión de los contornos hacia el NW, los valores máximos son registrados en la estación más cercana LPIG, aunque las estaciones muestran una buena distribución la lejanía de éstas provoca cierta distorsión de los contornos. (Evento similar a este es el evento del 05-09-2007,  $M_w=4.8$ , Sismo 83, disco anexo)
- Sismo del 15-09-2007,  $M_w=5.0$  (Sismo 86, disco anexo), el evento se encuentra localizado en el estado de Oaxaca, cuenta con 22 registros, presenta una buena distribución de estaciones, los contornos tienden a alongarse hacia la parte E y W del epicentro, especialmente hacia el W, tomando la energía una mayor distancia en atenuarse, que hacia la parte del Golfo de México o de la costa del Pacífico, los valores máximos están distribuidos en las estaciones OXIG, TGIG y CMIG que es la estación más cercana al epicentro.
- Sismo del 06-11-2007,  $M_w=5.6$  (Sismo 93, disco anexo), evento localizado en las costas de Guerrero cuenta con 25 registros, en general la distribución de las estaciones es buena, la estación más cercana al epicentro es CAIG la cual registra los valores máximos, como se puede observar de los mapas la energía tiende a ser más eficiente hacia el centro del país, los valores máximos de aceleración están concentrados entre los 200 km más cercanos



al epicentro (Figuras B11, B12 y B13). También puede observarse que la energía toma una mayor distancia en atenuarse hacia el centro del país que sobre la costa del Pacífico.

- Sismo del 15-04-2008,  $M_w=6.5$  (Sismo 95, disco anexo), este evento se encuentra localizado al sur del estado de Chiapas, frente a las costas de Guatemala cuenta con 20 registros la estación más cercana al epicentro es THIG que cuenta con los valores máximos, aunque el evento es de una magnitud considerable, la lejanía del mismo no produce movimientos fuertes del suelo más allá de la parte sur del estado de Chiapas, registrándose una intensidad máxima en Tapachula de 4 con una aceleración por arriba de los 20 gal. La atenuación de la energía toma casi la misma distancia para la zona del Golfo de México (Figura B14), hacia el interior del país (Figura B15) y sobre la costa del Pacífico (Figura B16), también se puede observar los posibles efectos de sitio en las estaciones de OXIG y PPIG, que al momento de revisar las trazas no se encontró anomalía alguna que pudiera indicar un error en el registro del sismo. (Evento similar a éste es el evento del 16-10-2008,  $M_w=6.6$ , Sismo97, disco anexo)
- Sismo del 22-05-2009,  $M_w=5.7$  (Sismo 98, disco anexo), evento localizado en el estado de Puebla con 24 registros con una buena distribución de las estaciones, que rodean el epicentro. Se observa que la distribución de los valores tiende hacia dos direcciones hacia el Norte y hacia el Sur, en el Norte siguen la traza del CVTM, que actúa como una barrera, hacia el sur la presencia de valores en la estación OXIG tiende a distorsionar los contornos hacia esa dirección, debido al posible efecto de sitio en la estación. Las aceleraciones mayores a 1 gal se concentran entre los 200 a 250 km alrededor del epicentro, con un valor máximo de 42 gal, generando una intensidad máxima de 5. Se puede observar que la energía se atenúa más rápido en la dirección Norte que en cualquier otra dirección (Figuras B17, B18 y B19), tal vez debido a la presencia del CVTM.



Para tener una mejor idea sobre la atenuación de la energía, se graficaron las aceleraciones contra la distancia al epicentro para algunos grupos de eventos, con una localización similar entre ellos. El primer grupo consta de tres eventos en la zona del estado de Guerrero, evento del 11-08-2006,  $M_w = 5.2$ , evento del 13-04-2007,  $M_w = 5.6$  y el evento del 06-11-2007,  $M_w = 5.6$  (Sismos 52, 69 y 93). El segundo grupo es conformado por el evento del 14-06-2004,  $M_w = 5.6$ , evento del 14-08-2005,  $M_w = 5.8$  y el evento del 04-05-2007,  $M_w = 4.9$  (Sismos 16, 34, y 70) localizados en el estado de Oaxaca. Y el último grupo esta conformado por el evento del 20-04-2004,  $M_w = 5.2$  y por el evento del 15-09-2007,  $M_w = 5.0$  (Sismos 13 y 86) ubicados en el limite Este de los estados de Oaxaca y Veracruz.

Las Figuras 40, 41, 42, 43, 44 muestran las gráficas de aceleración contra la distancia al epicentro del primer grupo de eventos, en su componente Norte (las componentes Z y E pueden ser consultadas en el apéndice B, Figuras B20- B29), en ellas se puede observar que las tendencias son parecidas en cada uno de los perfiles para los diferentes eventos, en el perfil del Pacífico Oeste (Figura 40) se puede apreciar que las aceleraciones mayores se concentran en los primeros 400 km, la tendencia de la atenuación se comporta de manera casi lineal para los tres eventos, dada la ausencia de valores a partir de los 600 km, se desconoce si este comportamiento se conserva.

Por otra parte en el perfil a lo largo del Pacífico Este (41), se puede observar que las aceleraciones mayores se concentran en 300 km más cercanos al epicentro, los tres eventos muestran tendencia similares, presentando una pendiente mayor dentro de los primeros 300-400 km y después de esta distancia la pendiente es reducida, abarcando una mayor distancia para atenuar la energía. El comportamiento observado de la atenuación dentro de los kilómetros más cercanos (300-400) es parecido al de la parte Oeste del Pacífico.

En el perfil hacia la parte Noroeste del país (Figura 42) se observa un comportamiento similar al los dos perfiles anteriores, presentando un mayor pendiente dentro de los 600 km al epicentro, que después se reduce a un comportamiento casi



horizontal, tomando una mayor distancia en atenuar la energía, las aceleraciones mayores se concentran en los primeros 400 km con respecto al epicentro. Se observa un comportamiento paralelo de las tendencias de los eventos.

Los perfiles a lo largo del Pacífico Oeste (Figura 40), Pacífico Este (Figura 41) y el perfil hacia el noroeste (península de Baja California, Figura 42) presentan una tendencia similar de atenuación dentro de los 300-600 km, identificándose un comportamiento exponencial al menos en los perfiles del Pacífico Este y Noroeste, para el perfil Pacífico Oeste, dada la ausencia de datos a una distancia mayor a 600 km, el comportamiento de una tendencia más horizontal no es identificable.

En el perfil hacia el centro del país (Norte, Figura 43) se observa un comportamiento “quebrado” en la tendencia de la atenuación, dentro de los primeros 200 km se observa una pendiente alrededor de los 45 grados, la cual se ve interrumpida cuando se alcanza el CVTM (CUIG y PPIG), mostrando una amplificación en esta zona, abarcando alrededor de 200 km. Posteriormente retoma la pendiente con una inclinación mayor, sugiriendo que la energía a su paso por el CVTM se atenúa de manera considerable, a partir de los 500 km al epicentro la atenuación cambia nuevamente reduciendo su pendiente, tomando una mayor distancia en atenuar la energía. Las mayores aceleraciones se concentran dentro de los primeros 400 km al epicentro, considerando la zona de amplificación entre los 200-400 km, ya que sin esta zona lo más probable es que la distancia que tomaría la energía en atenuarse sería menor.

El perfil Noreste (Figura 44) muestra una tendencia de atenuación casi lineal, concentrándose las mayores aceleraciones dentro de los 400 km más cercanos al epicentro, después de esta distancia la pendiente en la atenuación se ve un poco reducida, abarcando una zona de alrededor de 350 km, lo cual influye en que se tome una mayor distancia para atenuar la energía.

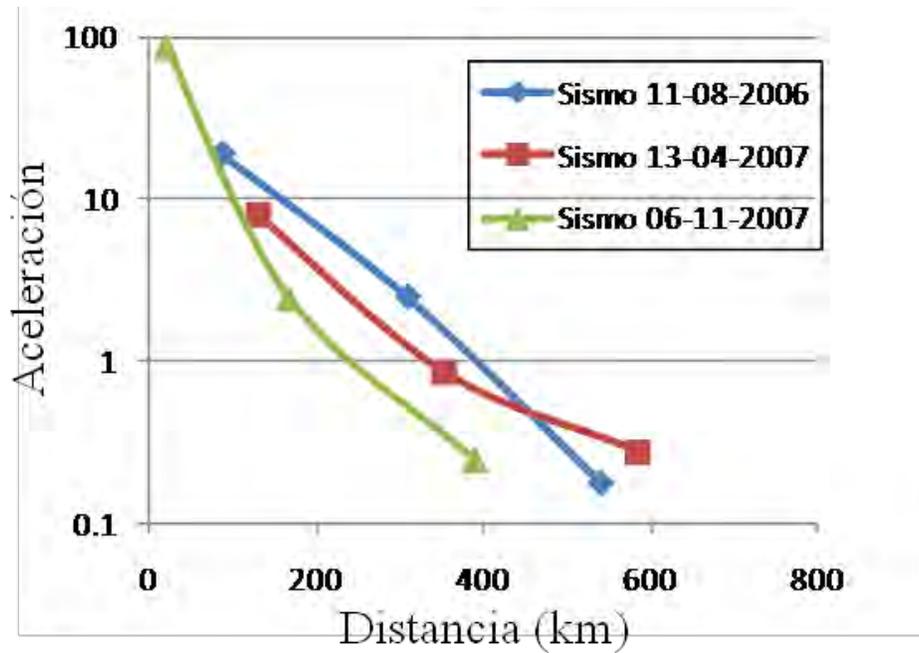


Figura 40.- Perfil a largo de la costa del Pacífico (Oeste), para sismos en el estado de Guerrero, en la componente Norte.

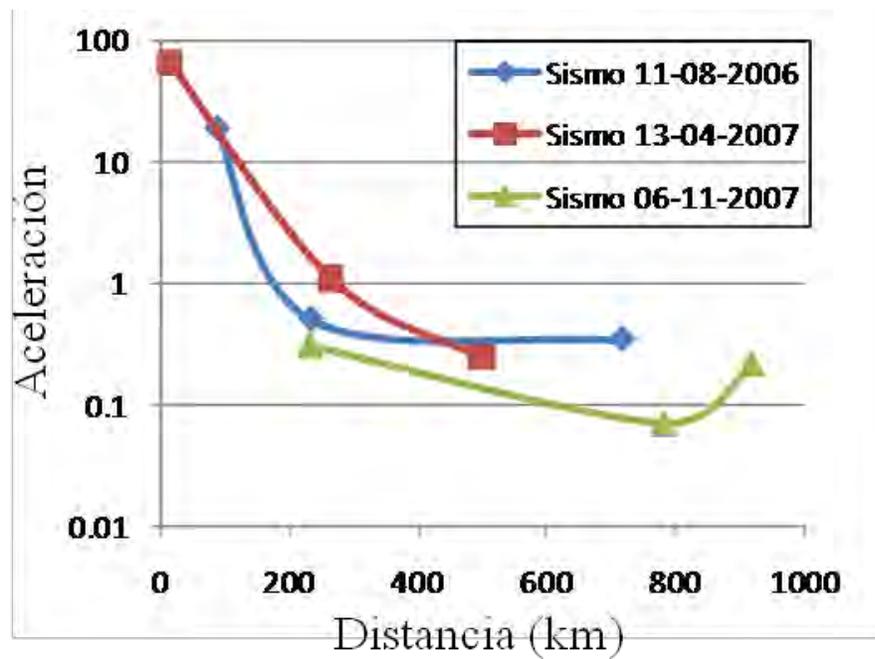


Figura 41.- Perfil a largo de la costa del Pacífico (Este), para sismos en el estado de Guerrero, en la componente Norte.

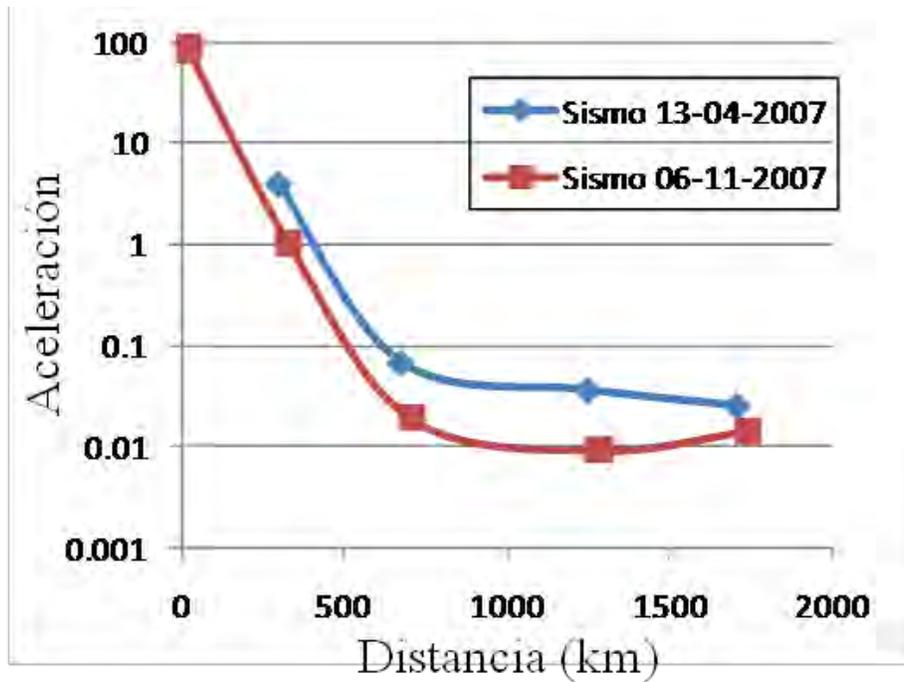


Figura 42.- Perfil hacia el noroeste del país, para sismos en el estado de Guerrero, en la componente Norte.

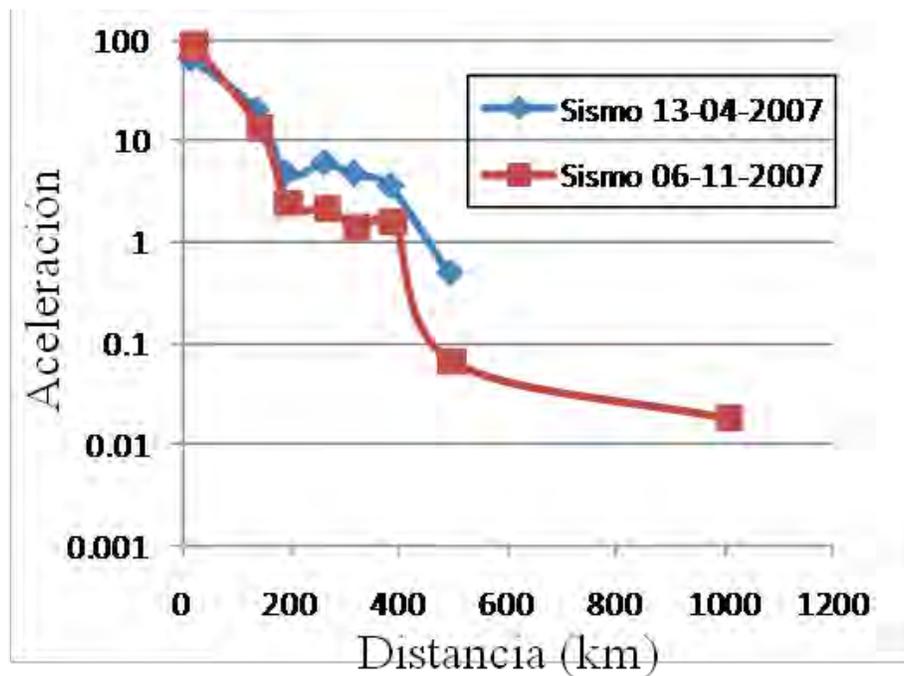


Figura 43.- Perfil hacia el centro del país (Norte), para sismos en el estado de Guerrero, en la componente Norte.

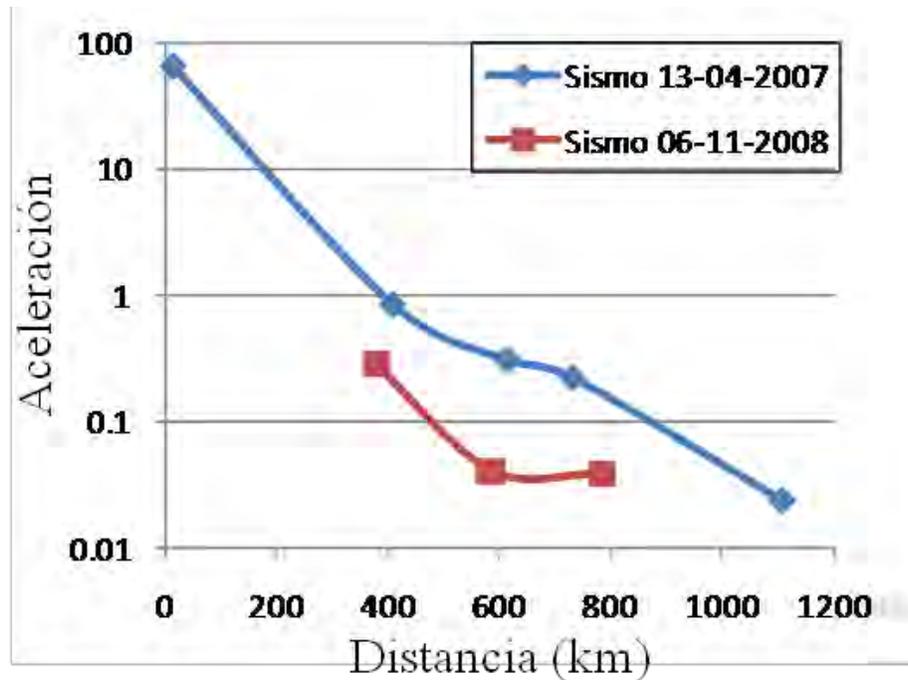


Figura 44.- Perfil hacia el noreste del país, para sismos en el estado de Guerrero, en la componente Norte.

En el segundo grupo, eventos localizados en el estado de Oaxaca, se observa que los eventos conservan una misma tendencia hacia cada una de las trayectorias. En el perfil de atenuación para el Pacífico Oeste en la componente norte (Figura 45) (Las componentes Z y E pueden ser consultadas en el apéndice B, Figuras B30-B35), se puede identificar un comportamiento exponencial de la atenuación, exceptuando los últimos 200 km donde la pendiente de la tendencia cambia, provocando el que la energía tome una menor distancia en atenuarse, observándose en esta zona (Colima) una amplificación en las aceleraciones. Las aceleraciones mayores se concentran alrededor de los primeros 250 km al epicentro. El comportamiento (exponencial) de la atenuación en esta trayectoria es parecido a aquellos presentados por los eventos del primer grupo.

En la dirección Norte, es decir, hacia el centro del país (Figura 46), se observa que los eventos conservan una atenuación similar, paralela entre sí. La tendencia presenta cambios en su pendiente, el primero se observa alrededor de los 300 km en donde la pendiente disminuye por unos 100 km, para posteriormente entrar a la zona del CVTM



donde las aceleraciones presentan una amplificación, después de esta zona la pendiente cambia a un ángulo mayor, reduciendo la distancia para atenuar la energía. Este tipo de comportamiento también fue observado en los eventos del primer grupo para esta trayectoria.

En la dirección Noreste (Golfo de México, Figura 47) la atenuación muestra un comportamiento casi lineal, observándose un cambio de pendiente hacia los 400 km del epicentro, en esta zona (TUIG) se presenta una amplificación, la cual genera este cambio de pendiente, posteriormente la pendiente en la tendencia toma un ángulo mayor. Las mayores aceleraciones tienden a concentrarse alrededor de los 300 km más cercanos al epicentro. El comportamiento mostrado es similar para los eventos ocurridos en Guerrero.

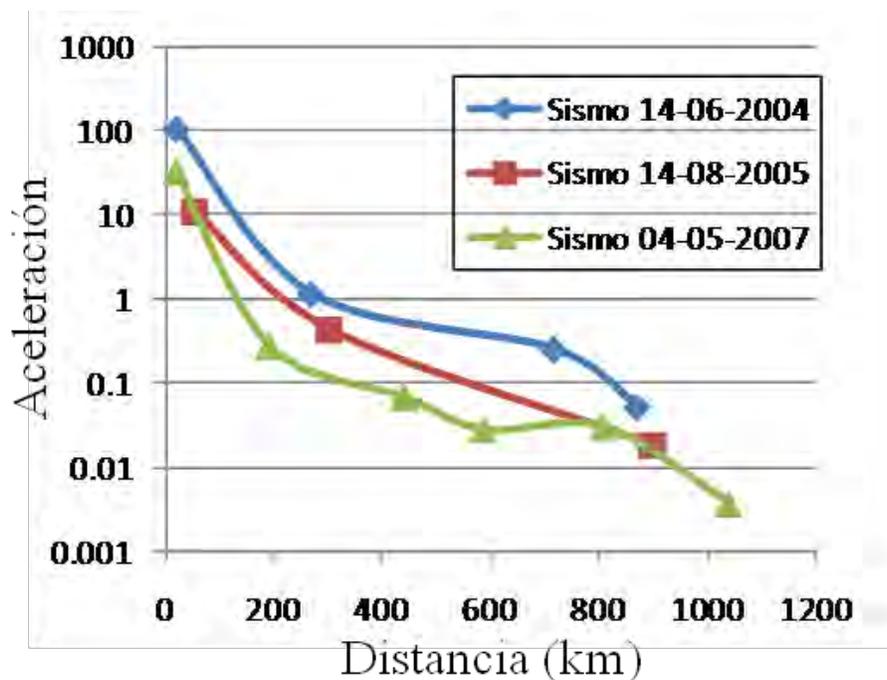


Figura 45.- Perfil a lo largo del pacífico (Oeste), para sismos en el estado de Oaxaca, en la componente Norte.

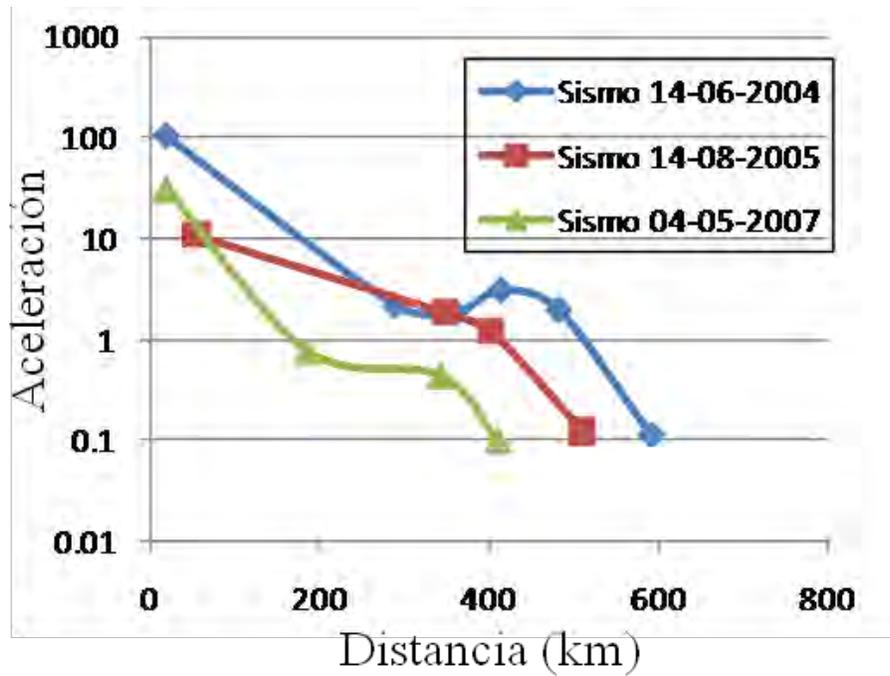


Figura 46.- Perfil hacia el centro del país (Norte), para sismos en el estado de Oaxaca, en la componente Norte.

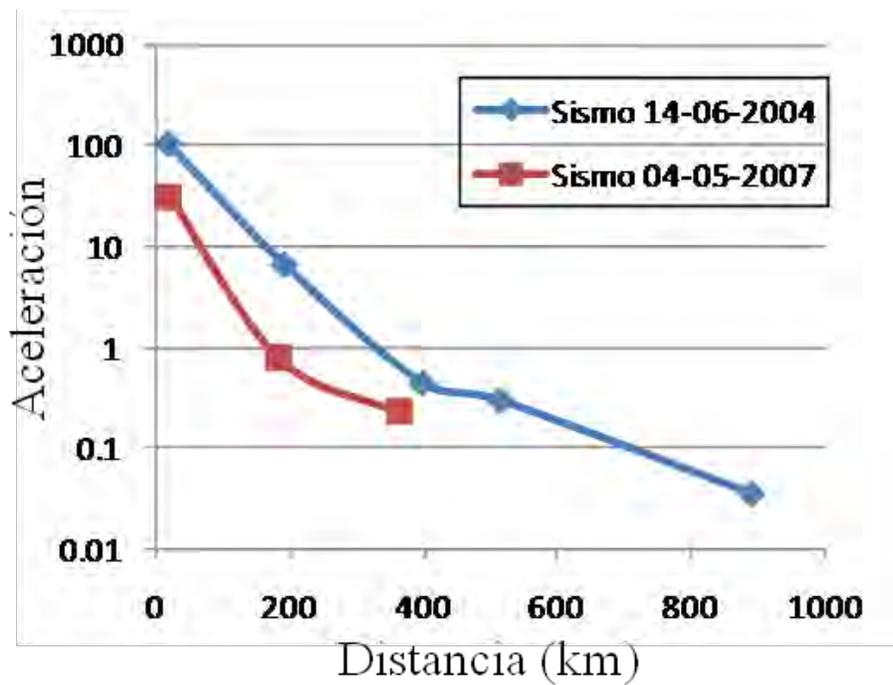


Figura 47.- Perfil hacia el Golfo de México, para sismos en el estado de Oaxaca, en la componente Norte.



Los eventos del tercer grupo (Oaxaca-Veracruz) a lo largo del Pacífico Oeste (Figura 48) en su componente norte (Las componentes Z y E, pueden ser consultadas en el apéndice B, Figuras B36-B39) muestran una tendencia similar a la presentada por los eventos de los grupos anteriores. Las aceleraciones mayores se observan en los 400 km más cercanos al epicentro, hacia al final de la curva, se identifica una amplificación en las aceleraciones, correspondiente a la zona de Colima, esta situación también es vista en los perfiles de los grupos anteriores, manifestando un posible efecto de sitio en esta estación (COIG).

Hacia el centro del país (Figura 49) la atenuación muestra un comportamiento casi lineal, hacia el final de la curva, alrededor de los 500 km, se puede ver un cambio en la pendiente, provocando que la energía tome una menor distancia en atenuarse. Las aceleraciones mayores se concentran alrededor de los 300 km más cercanos al epicentro, se puede observar una amplificación al alcanzar el CVTM (TPIG y PPIG), después de esta zona se observa el aumento en la pendiente. Este aumento en la atenuación después de cruzar el CVTM es también observado en los grupos anteriores.

Los perfiles de los tres grupos muestran tendencias de atenuación similares, el comportamiento exponencial observado a lo largo del Pacífico (Oeste y Este) es parecido al mostrado para la parte Noroeste del país (Baja California). La tendencia de la atenuación hacia la parte del Golfo de México muestra un comportamiento casi lineal, con pequeños cambios en la pendiente. Los perfiles hacia el centro del país, muestran un comportamiento “quebrado” atribuible a su paso por el CVTM. Se pudieron identificar zonas donde la energía se amplifica, en el Pacífico en la estación COIG, hacia el centro de país en las estaciones de CUIG, PPIG y TPIG, y para la zona del Golfo de México en la estación TUIG. De manera general la atenuación mostrada de los sismos en cada una de las trayectorias son similares, observándose algunas variaciones en los eventos de cada grupo, que pueden atribuirse a los parámetros de magnitud, profundidad y localización.

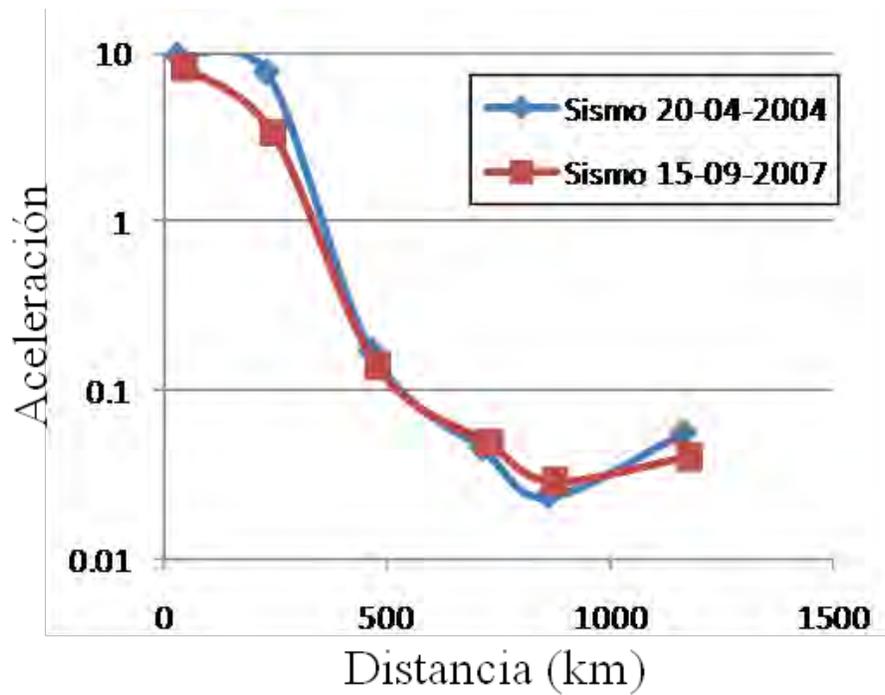


Figura 48.- Perfil a lo largo del pacífico (Oeste), para sismos en el limite este de los estados de Oaxaca y Veracruz, en la componente Norte.

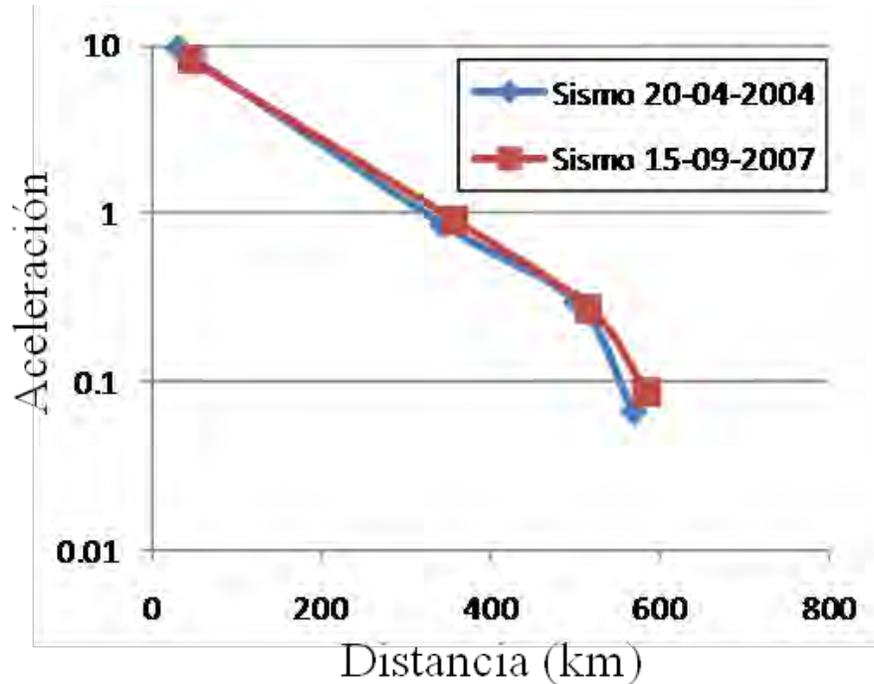


Figura 49.- Perfil hacia el centro del país, para sismos en el limite Este de los estados de Oaxaca y Veracruz, en la componente Norte.



Dentro del análisis de los mapas, hay eventos que contienen registros en las estaciones más cercanas, pero muestran un comportamiento anómalo, quizás debido a los posibles efectos de sitio de algunas de las estaciones, caso de esto es evento del 17-01-2004,  $M_w=4.7$  (Sismo 4, disco anexo), localizado en la frontera entre los estados de Oaxaca y Veracruz, cuenta con 15 registros y la distribución de las estaciones es buena ya que rodean al epicentro, es un evento profundo que genera los máximos valores en las estaciones OXIG y TUIG, como se puede observar en la Figura 50, donde se muestran los contornos de velocidad para la componente Este, el epicentro prácticamente se ubica justo en medio de estas estaciones. Las componentes Norte y Vertical (Z), muestran la misma distribución en velocidad, con el valor máximo en la estación TUIG (Figura 51). Con respecto a las aceleraciones los valores máximos se presentan en la estación OXIG para las componentes Este y Z (Figura 52), mientras que para componente Norte los valores máximos se presentan distribuidos entre las estaciones cercanas al epicentro, OXIG, HUIG, CMIG y TUIG (Figura 53).

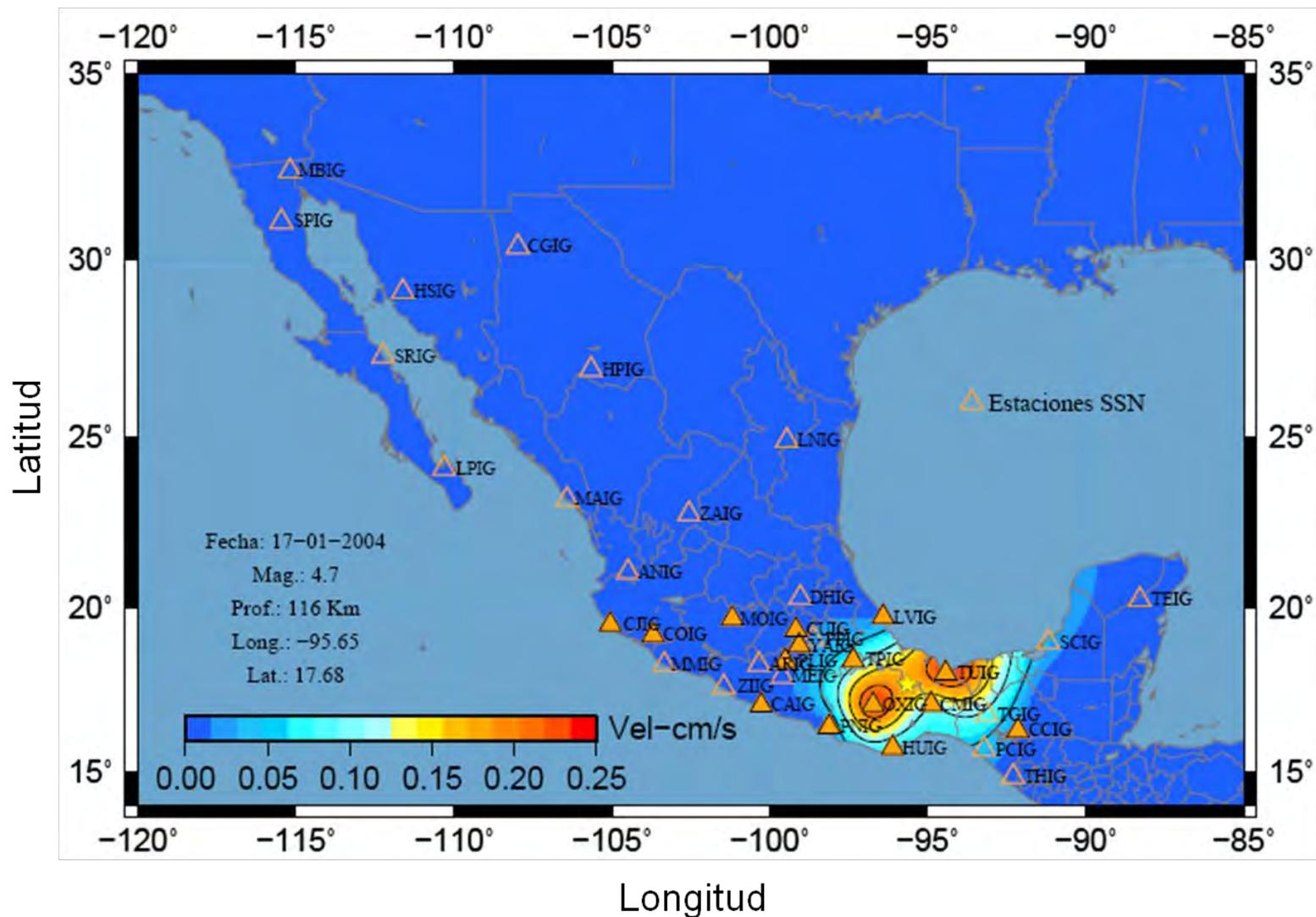


Figura 50.- Contornos de iso-velocidad para el evento del 17-01-2004, para la componente Este, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.

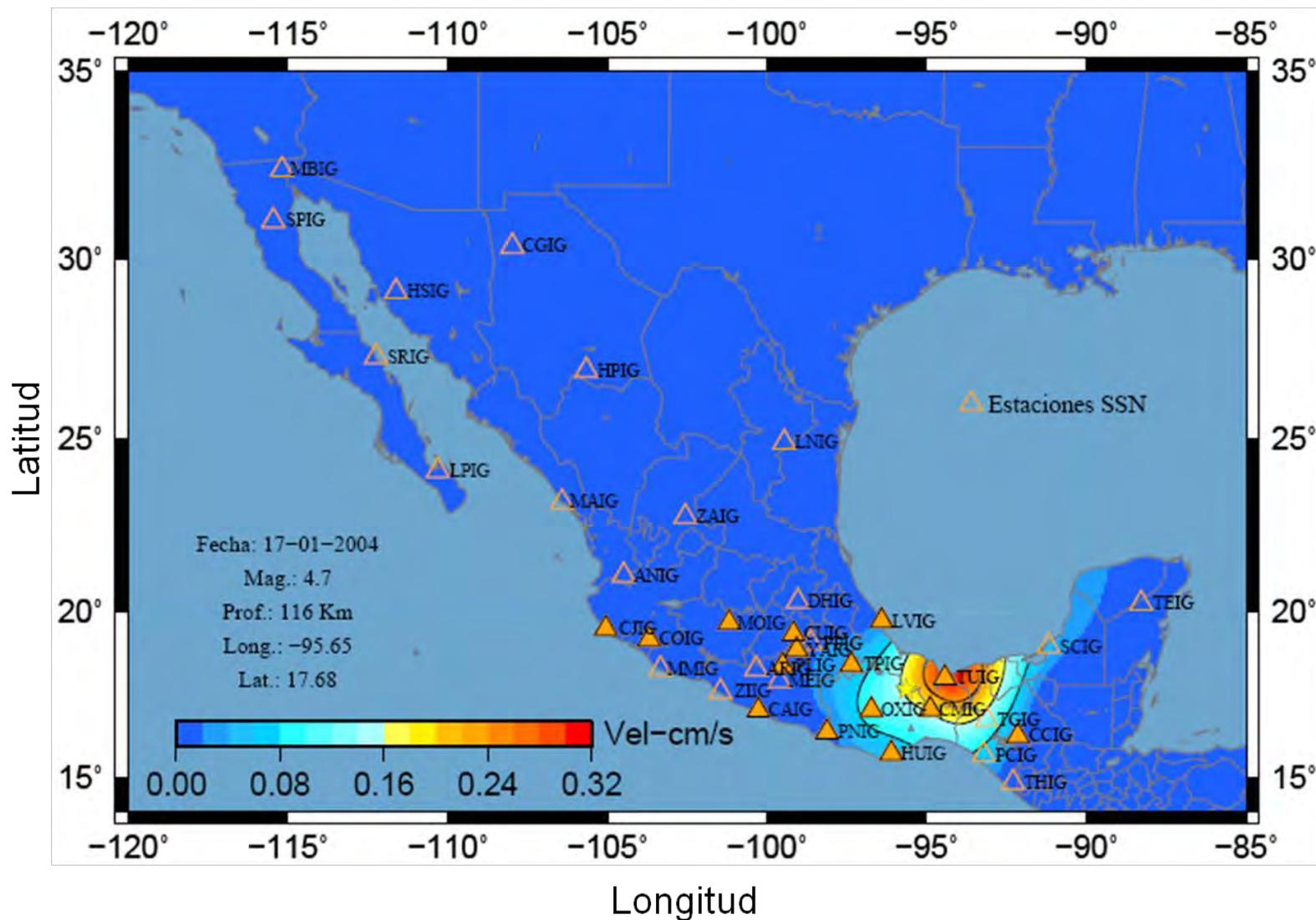


Figura 51.- Contornos de iso-velocidad para el evento del 17-01-2004, para la componente Norte, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.

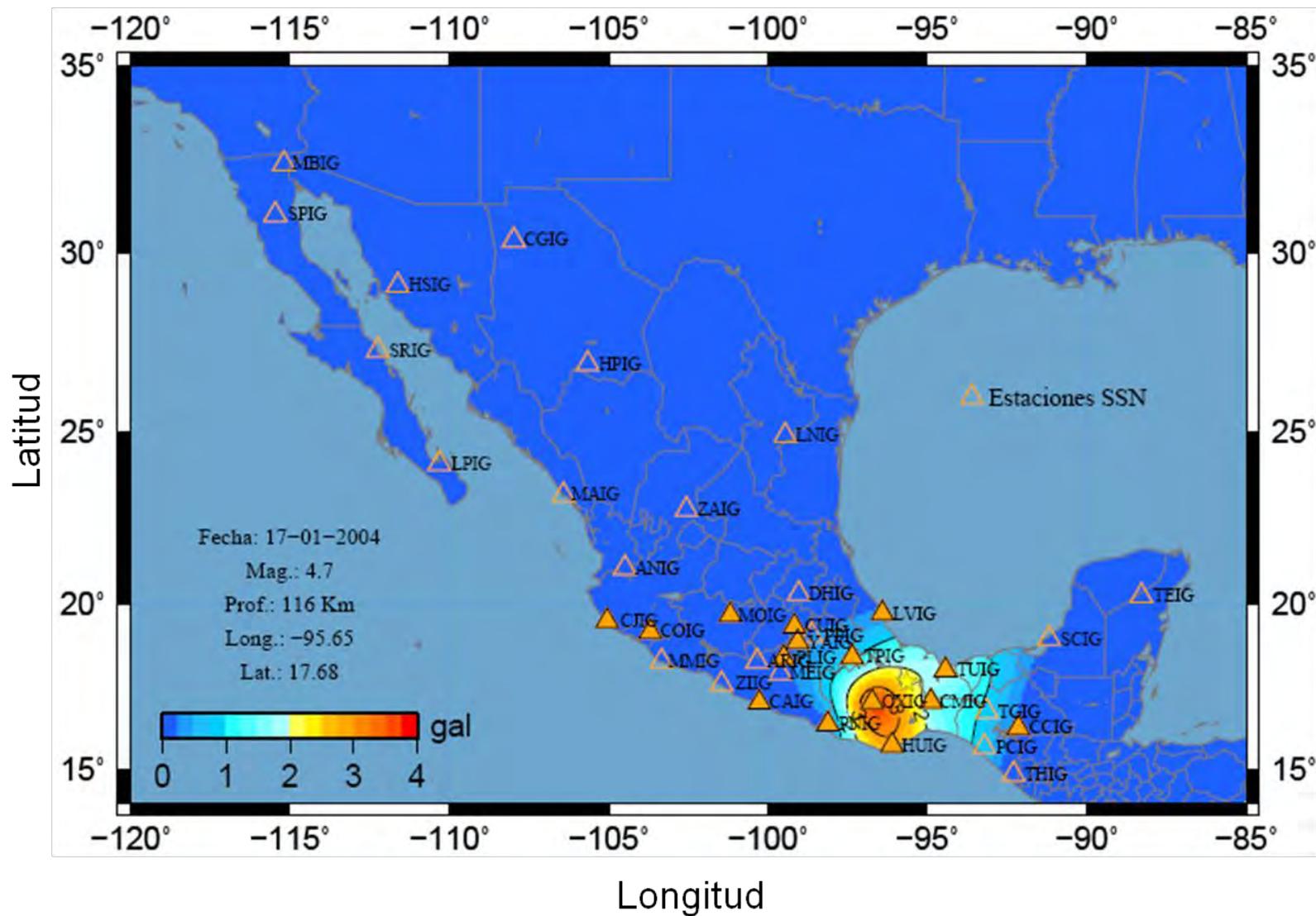


Figura 52.- Contornos de iso-aceleración para el evento del 17-01-2004, para la componente vertical, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.

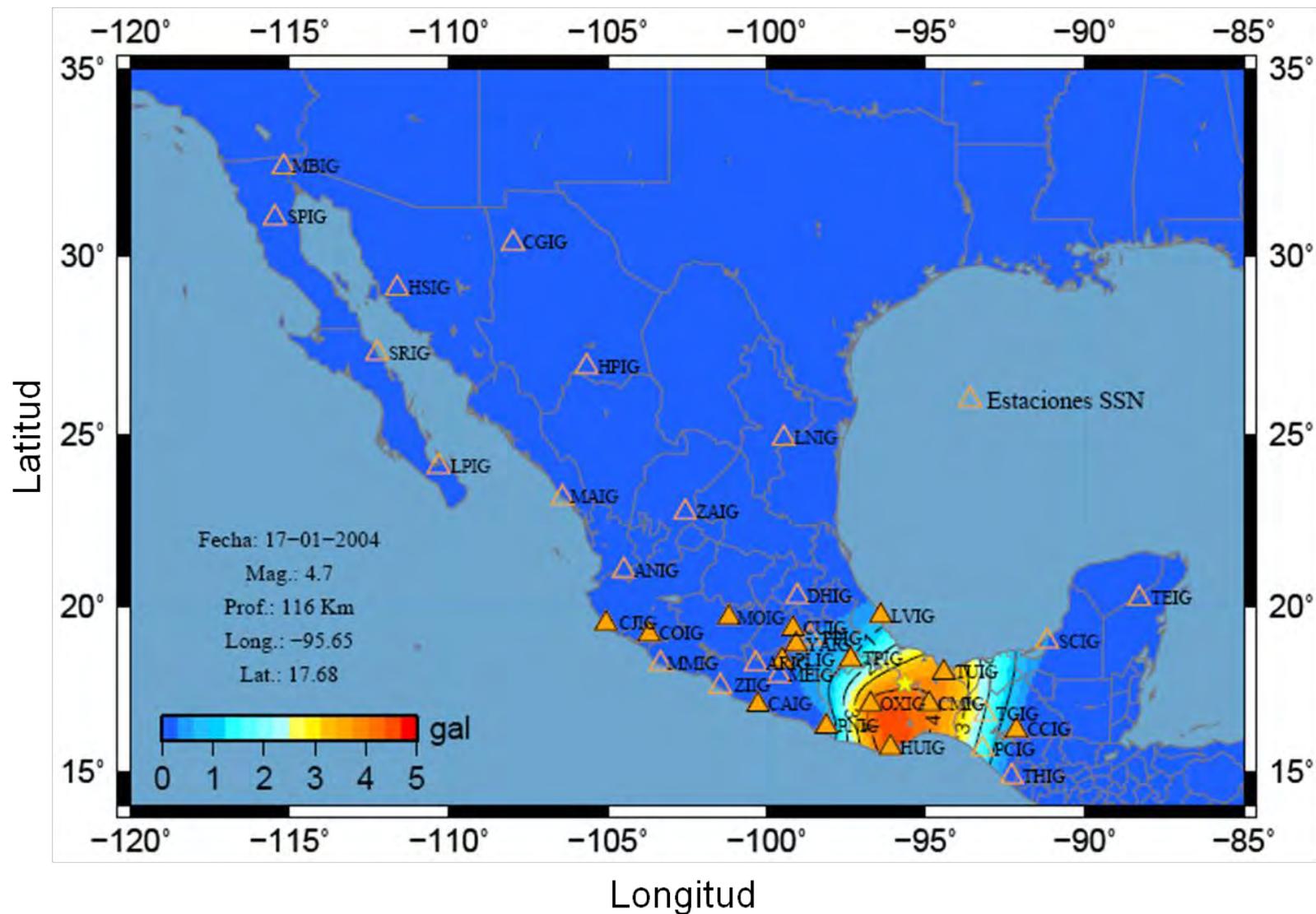


Figura 53.- Contornos de iso-aceleración para el evento del 17-01-2004, para la componente Norte, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.



Otro de los eventos que presentan estas características es el del 18-08-2004,  $M_w=5.6$  (Sismo 19, disco anexo), el evento se encuentra localizado al SE del estado de Oaxaca, en la zona del Istmo de Tehuantepec, el sismo cuenta con 18 registros la mayoría de las estaciones ubicadas hacia la parte W del epicentro, siendo las estaciones más cercanas al epicentro HUIG y CMIG. Los valores de velocidad y de aceleración muestran diferente distribución, para las velocidades los valores máximos se localizan en la estación OXIG para las componentes Este y Z (Figura 54), mientras que para la componente Norte se encuentran en las estaciones OXIG y TUIG (Figura 55). Con lo que respecta a las aceleraciones, los valores máximos se localizan en la estación OXIG para la componente Este (Figura 56), y para las componentes Norte y Z se localizan en la estación HUIG (Figura 57).

El evento del 30-11-2004,  $M_w=4.7$  (Sismo 24, disco anexo), es otro de los sismos que presentan un comportamiento extraño, el epicentro del evento esta localizado al Este del estado de Oaxaca, cerca de la frontera con los estados de Veracruz y Chiapas, cuenta con 14 registros la mayoría ubicados al W del epicentro, aunque la estación más cercana al epicentro CMIG tiene registro, ésta no presenta los valores máximos. Los valores máximos se registran en la estación TUIG, tanto para las velocidades como para las aceleraciones, la estación TPIG contiene valores un poco menores a los de la estación TUIG, tal vez debido a un efecto de sitio, lo que provoca la distorsión de los contornos hacia la dirección W, observándose la misma distribución en las tres componentes de velocidad (Figura 58). El efecto de la estación TPIG en las aceleraciones es menos notorio en las componentes horizontales (Figura 59), pero en la componente Z éste vuelve a resaltar (Figura 60).

El evento del 28-03-2007 (1),  $M_w=5.4$  (Sismo 66, disco anexo), cuenta con 10 registros y está localizado en el Golfo de California. La estación más cercana LPIG cuenta con valores pero no son los máximos, para la componente Este, el valor máximo de velocidad se ubica en la estación CGIG (Figura 61), mientras que para las componentes restantes se ubican en CGIG y HPIG (Figura 62).

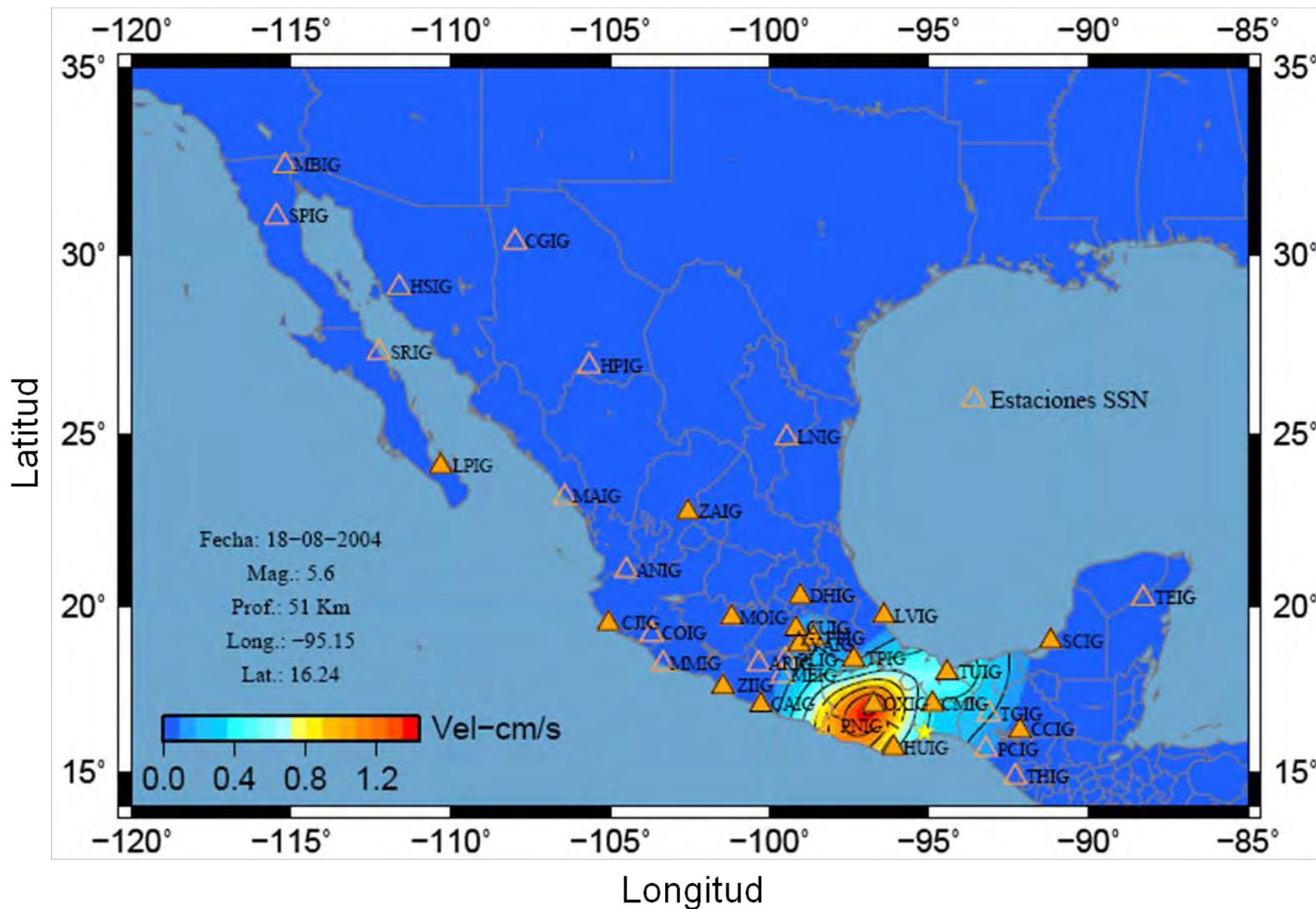


Figura 54- Contornos de iso-velocidad para el evento del 18-08-2004, para la componente Este, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.

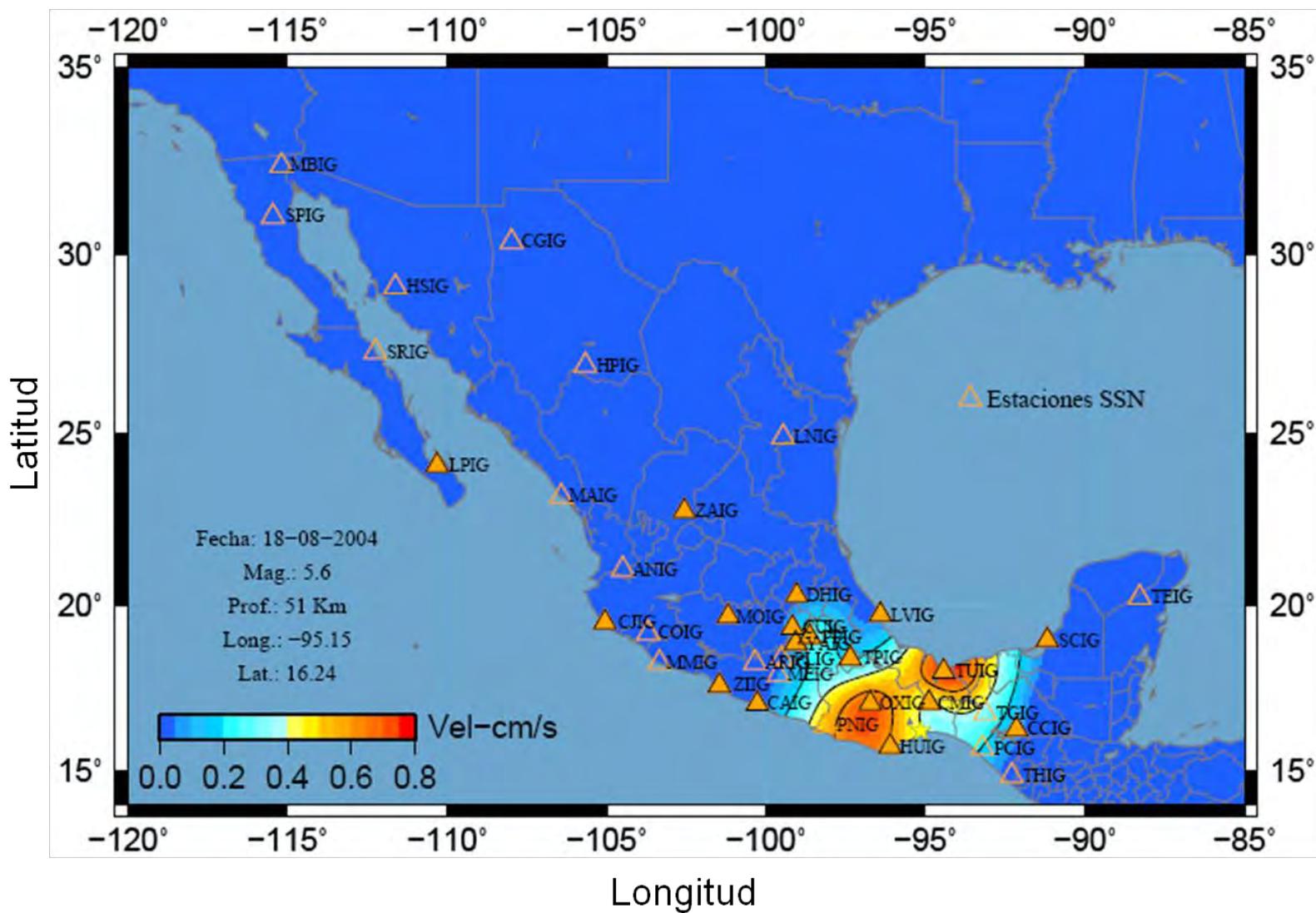


Figura 55.- Contornos de iso-velocidad para el evento del 18-08-2004, para la componente Norte, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.

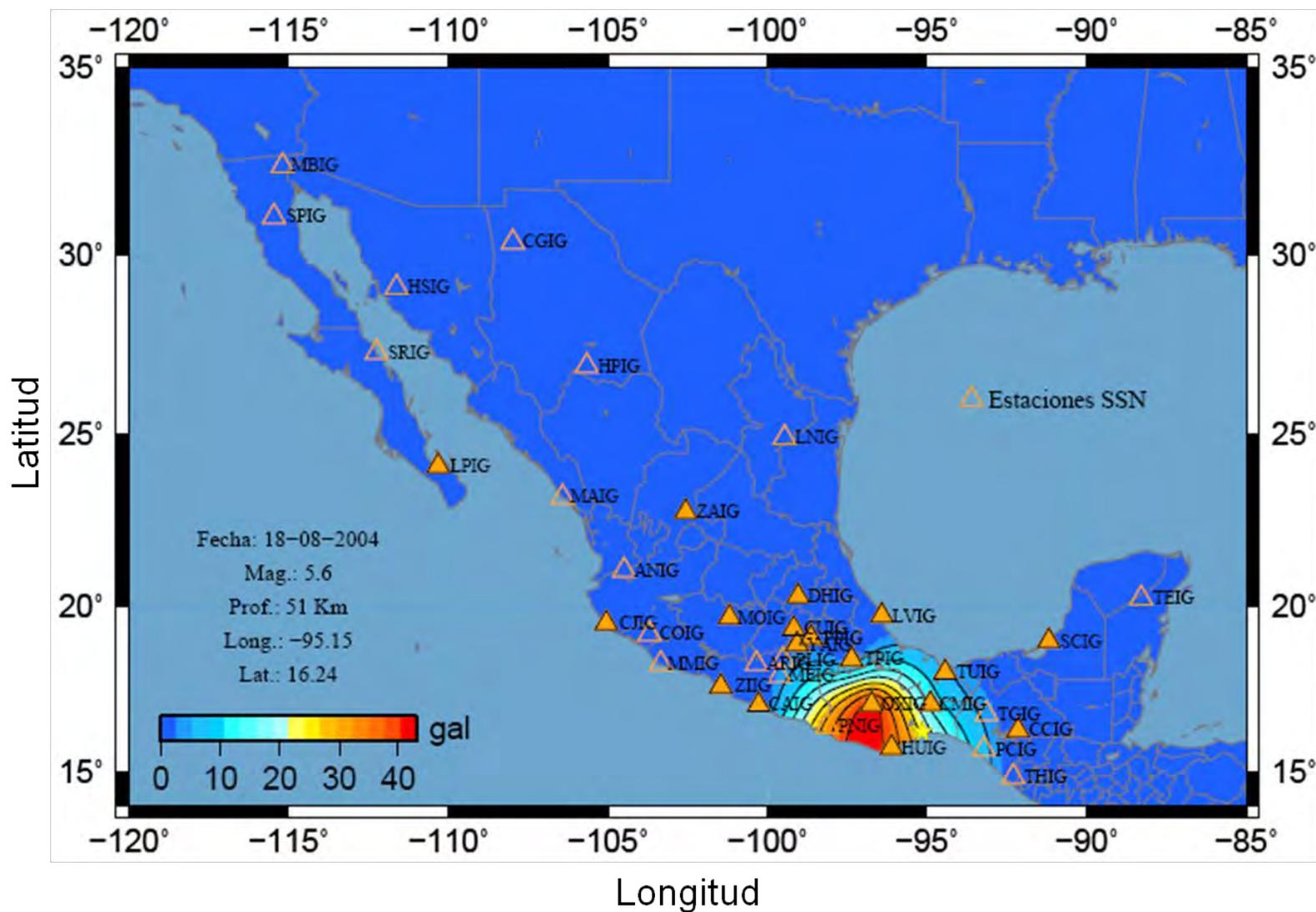


Figura 56.- Contornos de iso-aceleración para el evento del 18-08-2004, para la componente Este, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.

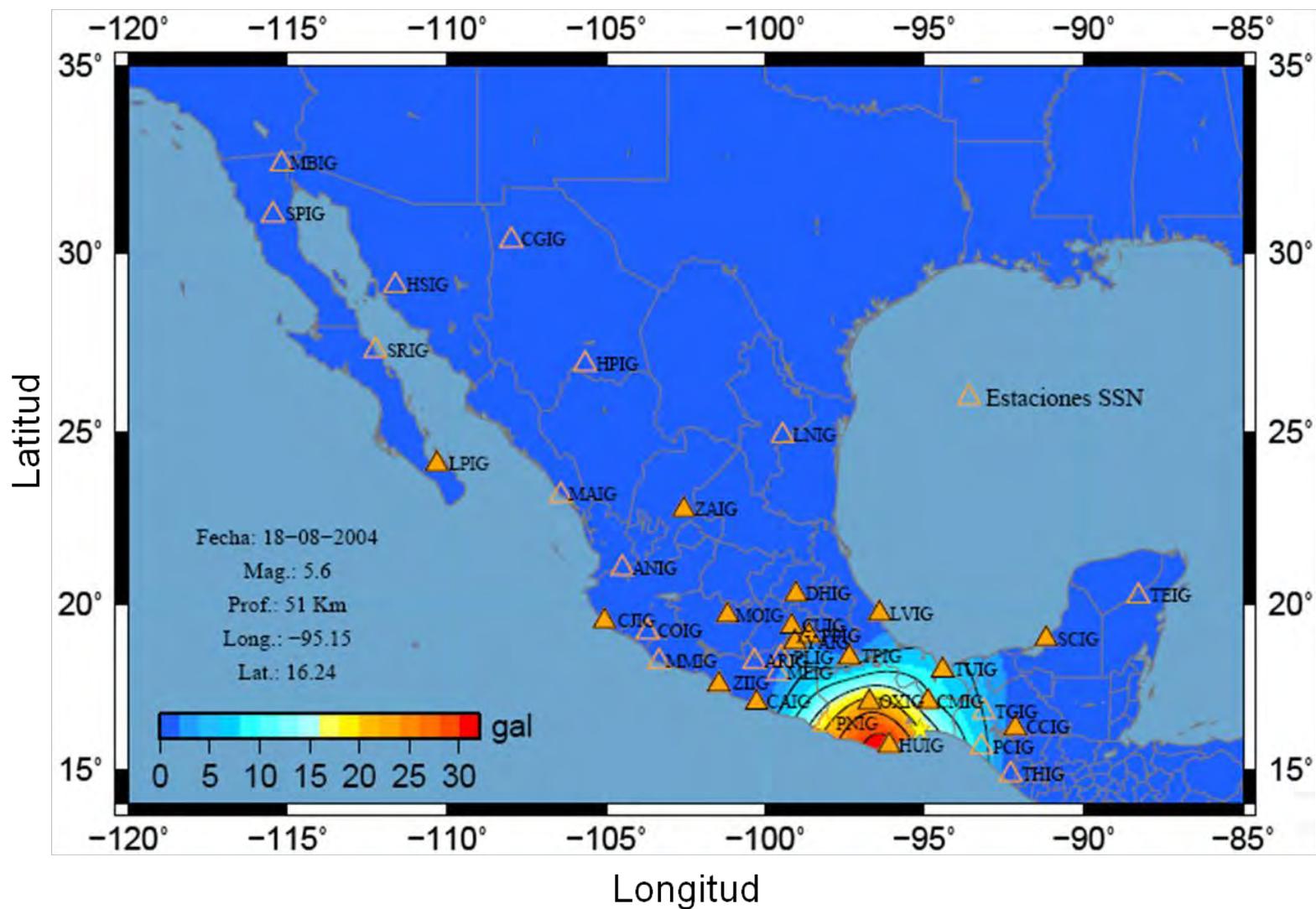


Figura 57.- Contornos de iso-aceleración para el evento del 18-08-2004, para la componente Norte, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.

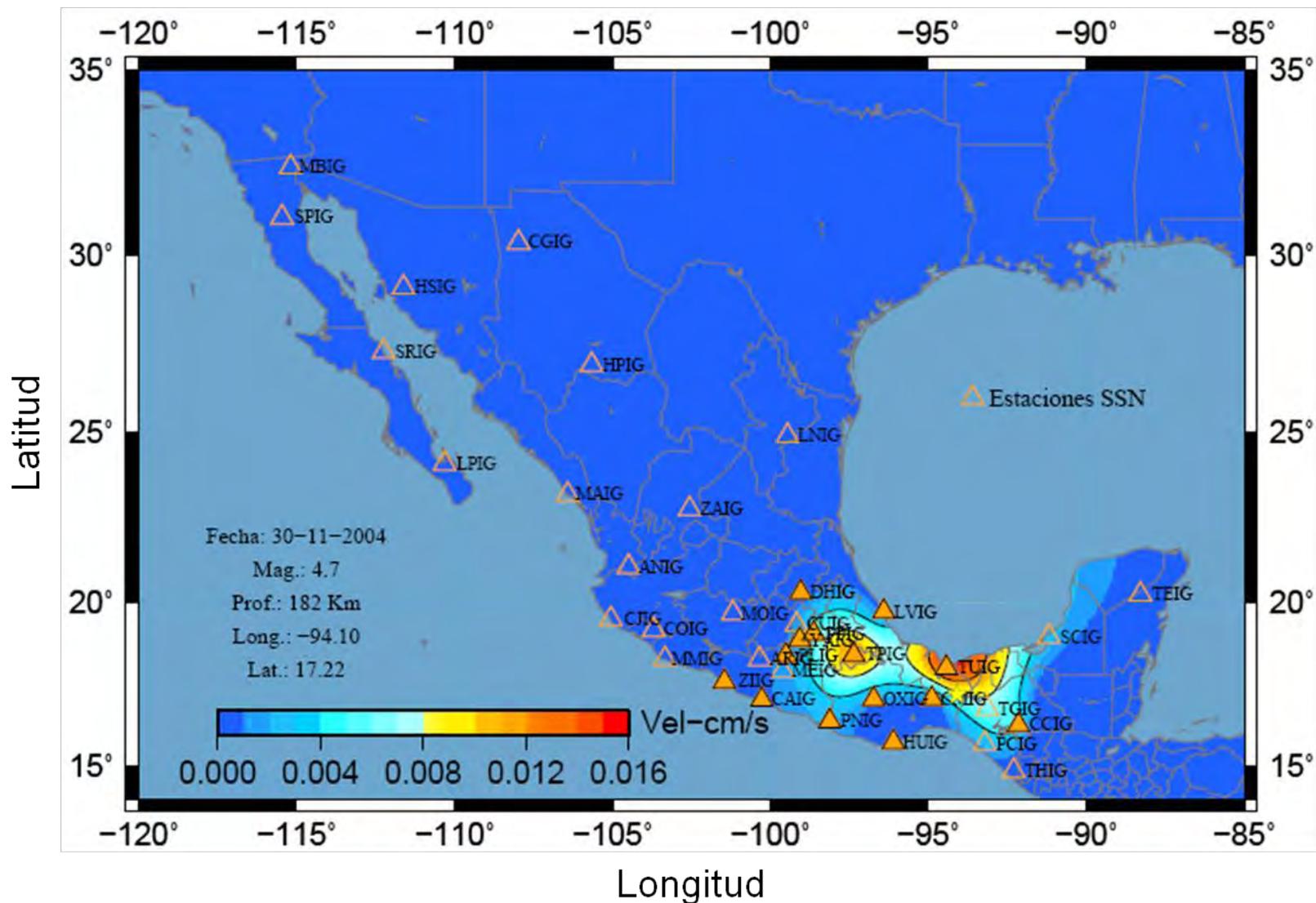


Figura 58.- Contornos de iso-velocidad para el evento del 30-11-2004, para la componente Este, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.

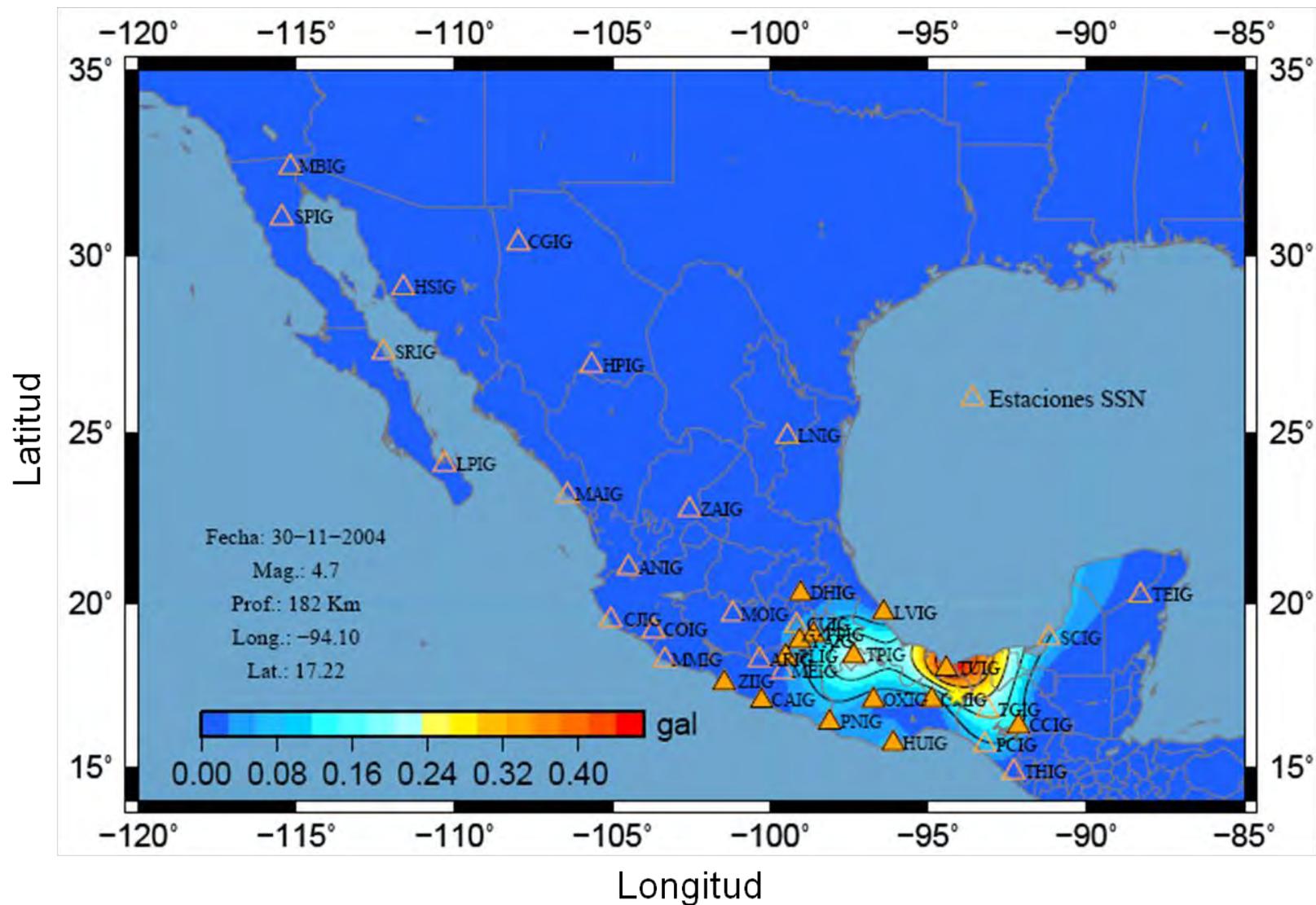


Figura 59.- Contornos de iso-aceleración para el evento del 30-11-2004, para la componente Norte, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.

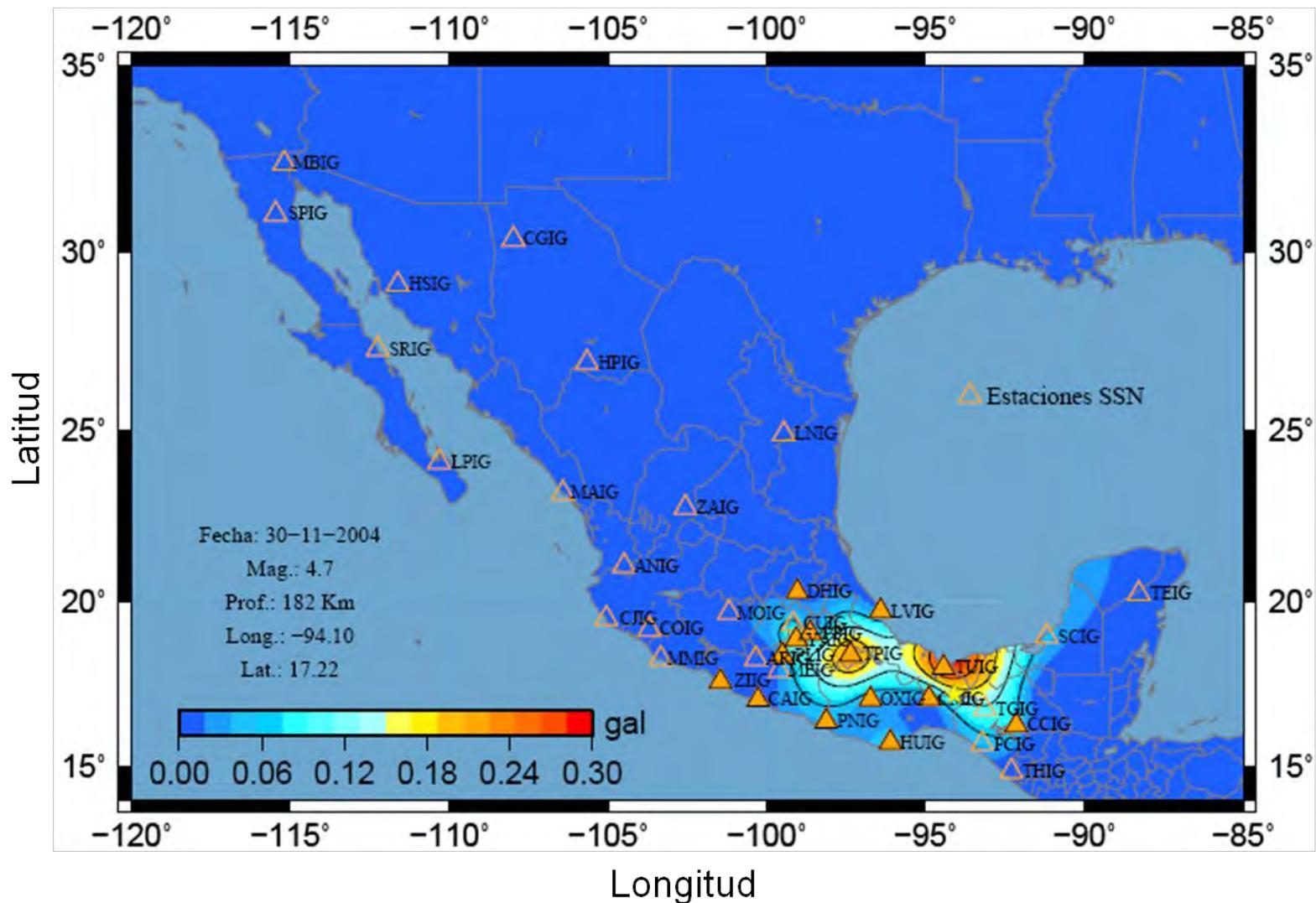


Figura 60.- Contornos de iso-aceleración para el evento del 30-11-2004, para la componente Vertical, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.

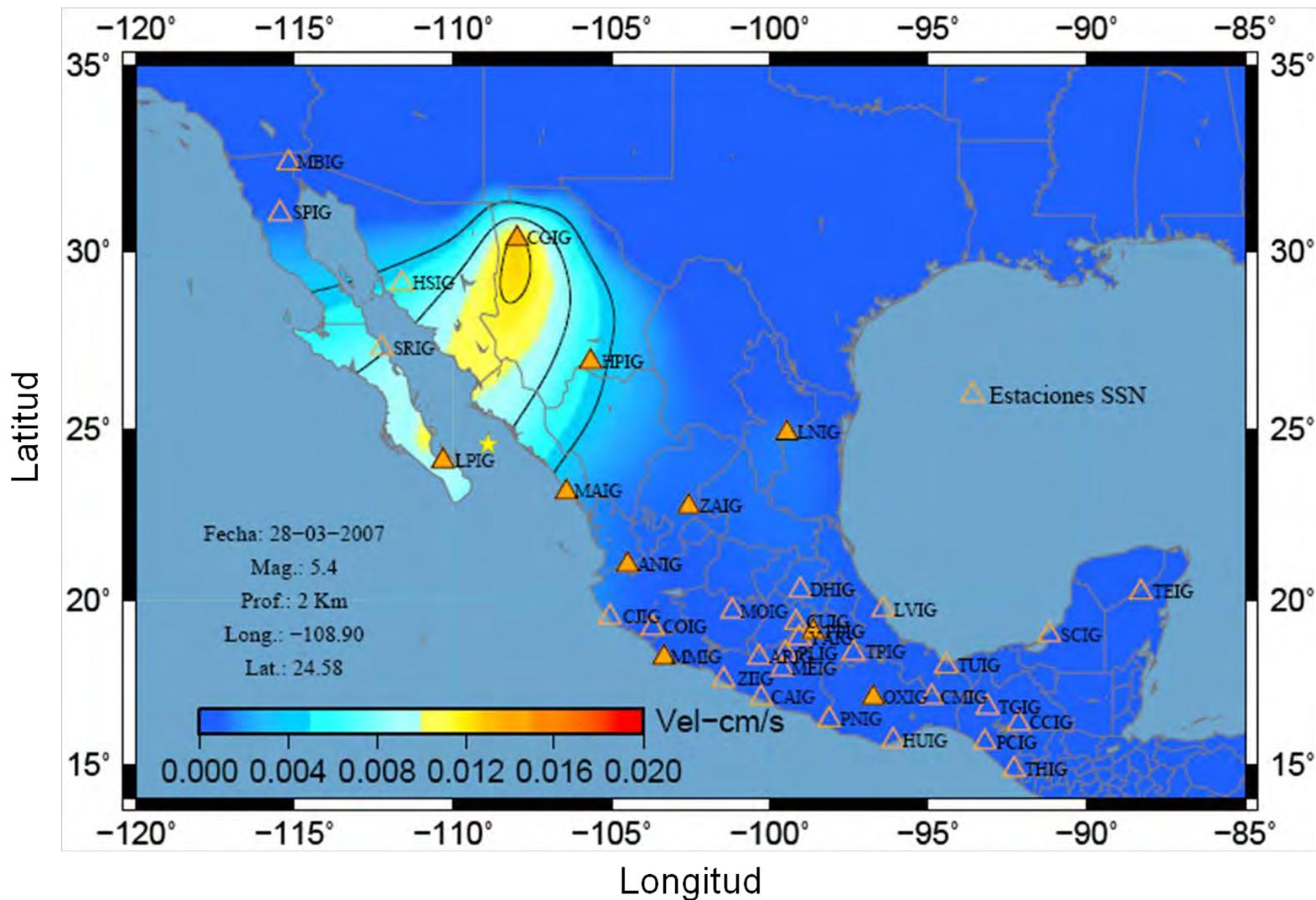


Figura 61.- Contornos de iso-velocidad para el evento del 28-03-2007 (1), para la componente Este, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.

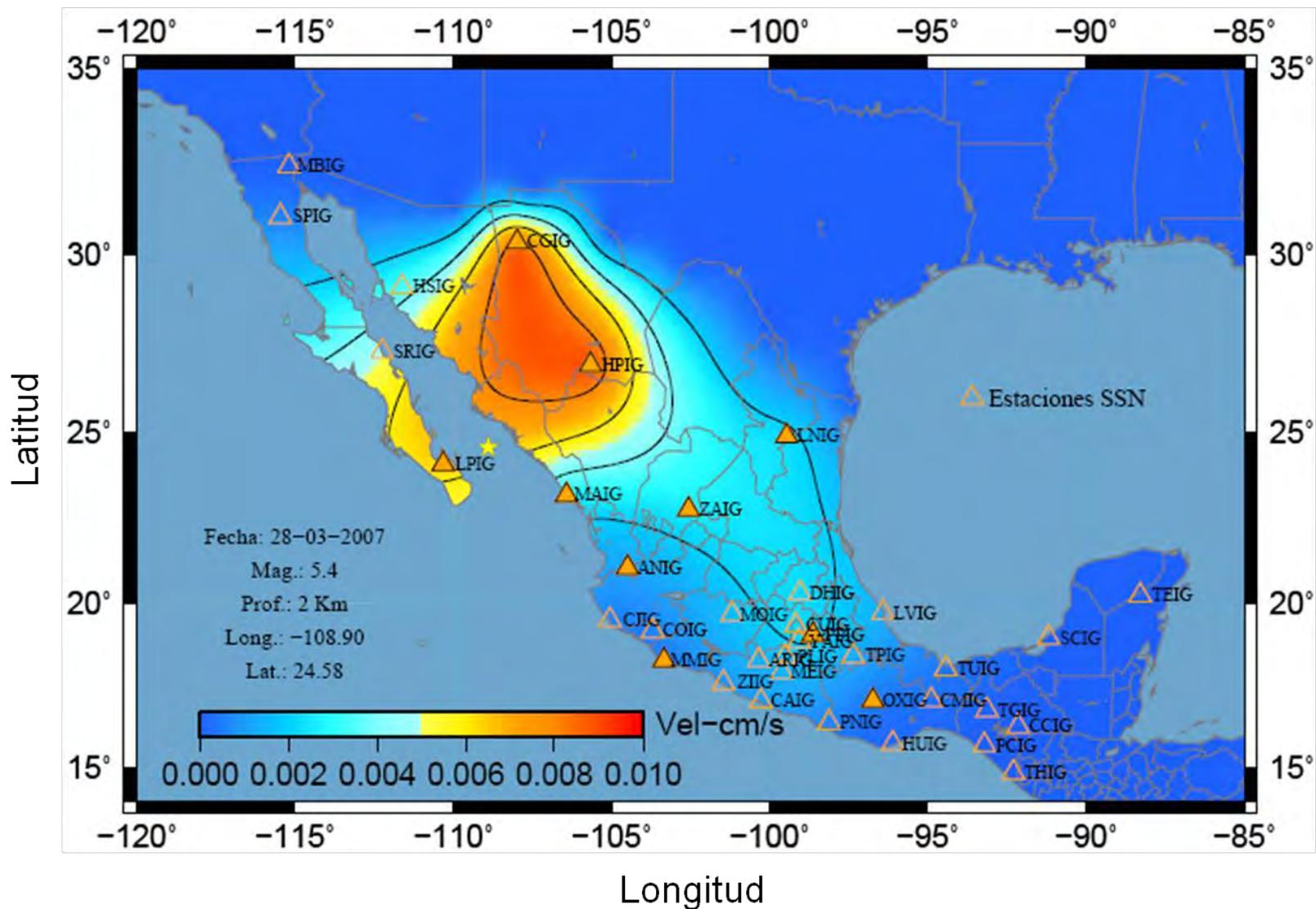


Figura 62.- Contornos de iso-velocidad para el evento del 28-03-2007 (1), para la componente Norte, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.



Por otra parte las aceleraciones muestran una distribución de los contornos muy diferente, en las componentes horizontales, los valores máximos aparecen en la estación ANIG, continuando con CGIG y LNIG (Figura 63), y en la componente Z el máximo aparece solamente en la estación CGIG (Figura 64).

Otro evento similar a éste es el del 28-03-2007 (2),  $M_w=5.2$  (Sismo 67 disco anexo), también localizado en el Golfo de California, cuenta con 12 registros, la mayoría de las estaciones de registro se encuentran hacia el Este del epicentro, con excepción de LPIG, que es la estación más cercana al epicentro, la distribución de los valores parece ser consistente en las tres componentes para las velocidades (Figura 65), donde los valores máximos se distribuyen entre las estaciones de LPIG, CGIG y HPIG, mientras que para las aceleraciones la distribución cambia, registrándose en las componentes horizontales los máximos valores en la estación ANIG (Figura 66), y para la componente vertical los valores máximos se ubican en las estaciones ANIG y CGIG (Figura 67).

El evento del 23-05-2007,  $M_w=5.4$  (Sismo 71, disco anexo), evento localizado en el Golfo de México, cuenta con 25 registros y con una buena distribución de las estaciones, la estación más cercana LVIG cuenta con registro, pero a pesar de eso los valores máximos para las velocidades varía de una estación a otra en las tres componentes, para la componente Este el valor máximo se ubica en la estación PPIG (Figura 68), para la componente Norte se ubica en la estación LVIG (Figura 69), y para la componente Z se ubica en la estación DHIG (Figura 70). Cabe mencionar que también destacan los valores de las estaciones OXIG y SCIG, en las tres componentes, observándose una distorsión de los contornos. En el caso de las aceleraciones los valores se ubican, como es de esperarse, en la estación LVIG para las tres componentes, también logran destacar los valores en las estaciones de ANIG, SCIG y OXIG, con más énfasis en la componente Este (Figura 71).

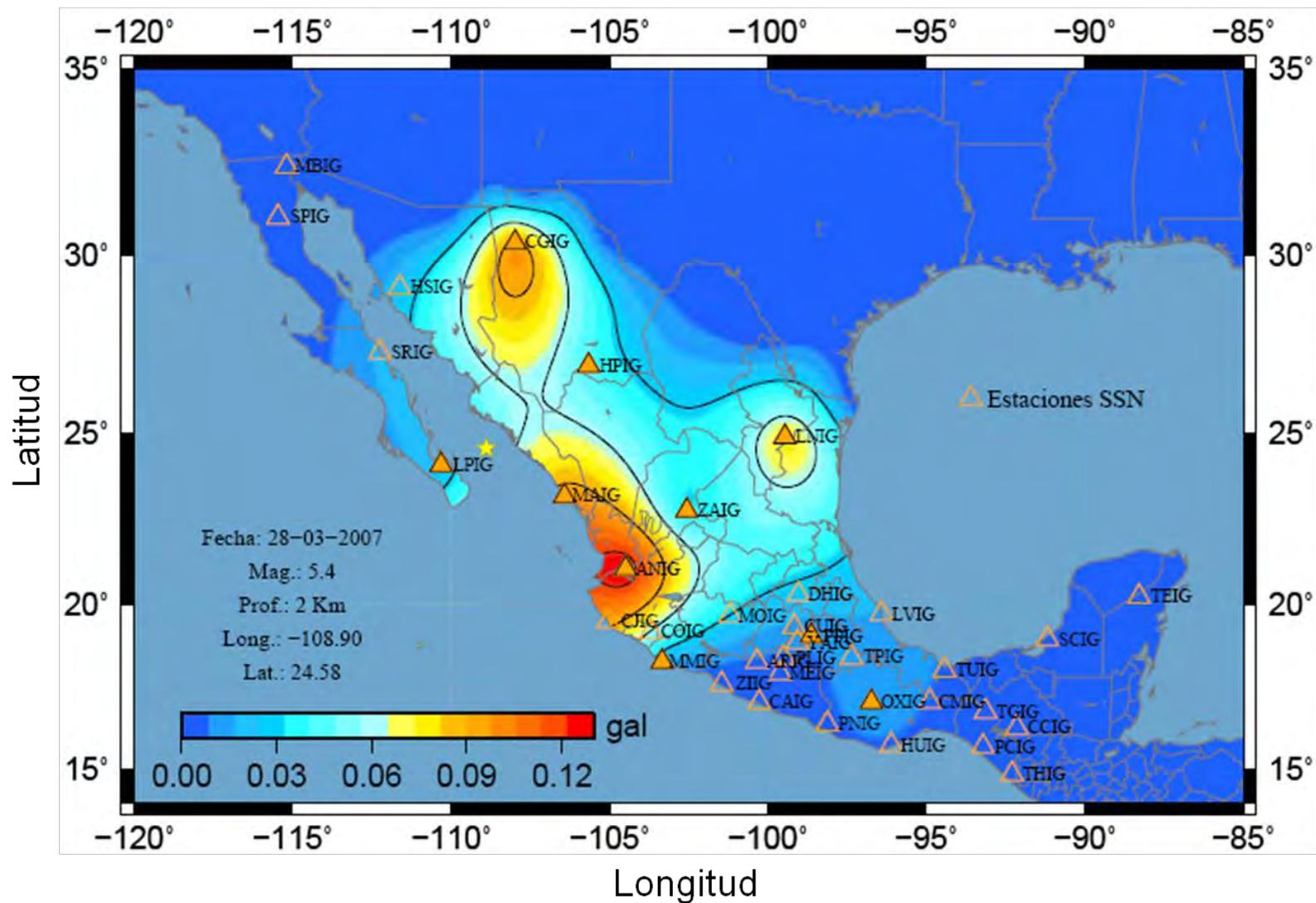


Figura 63.- Contornos de iso-aceleración para el evento del 28-03-2007(1), para la componente Este, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.

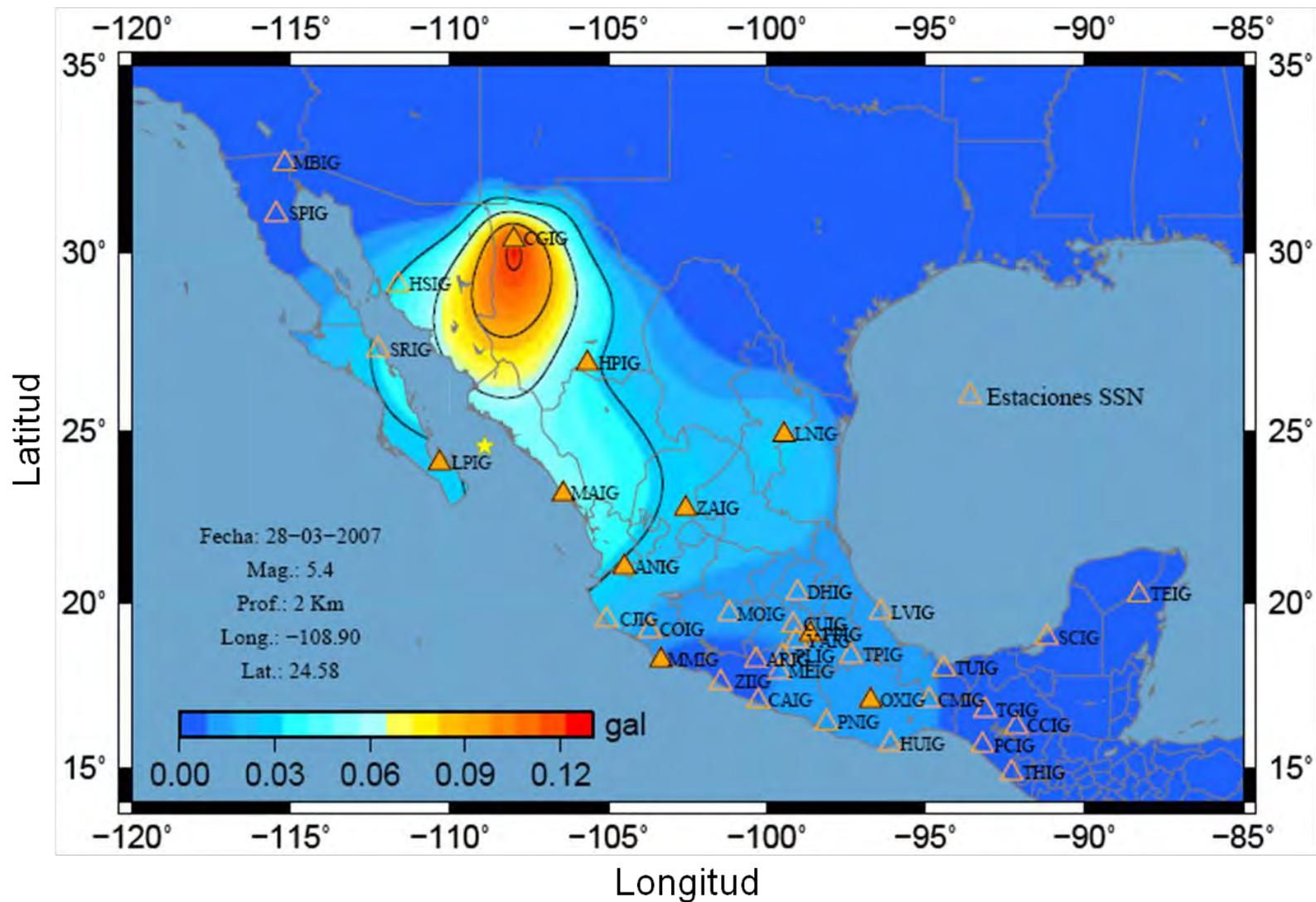


Figura 64.- Contornos de iso-aceleración para el evento del 28-03-2007(1), para la componente Vertical, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.

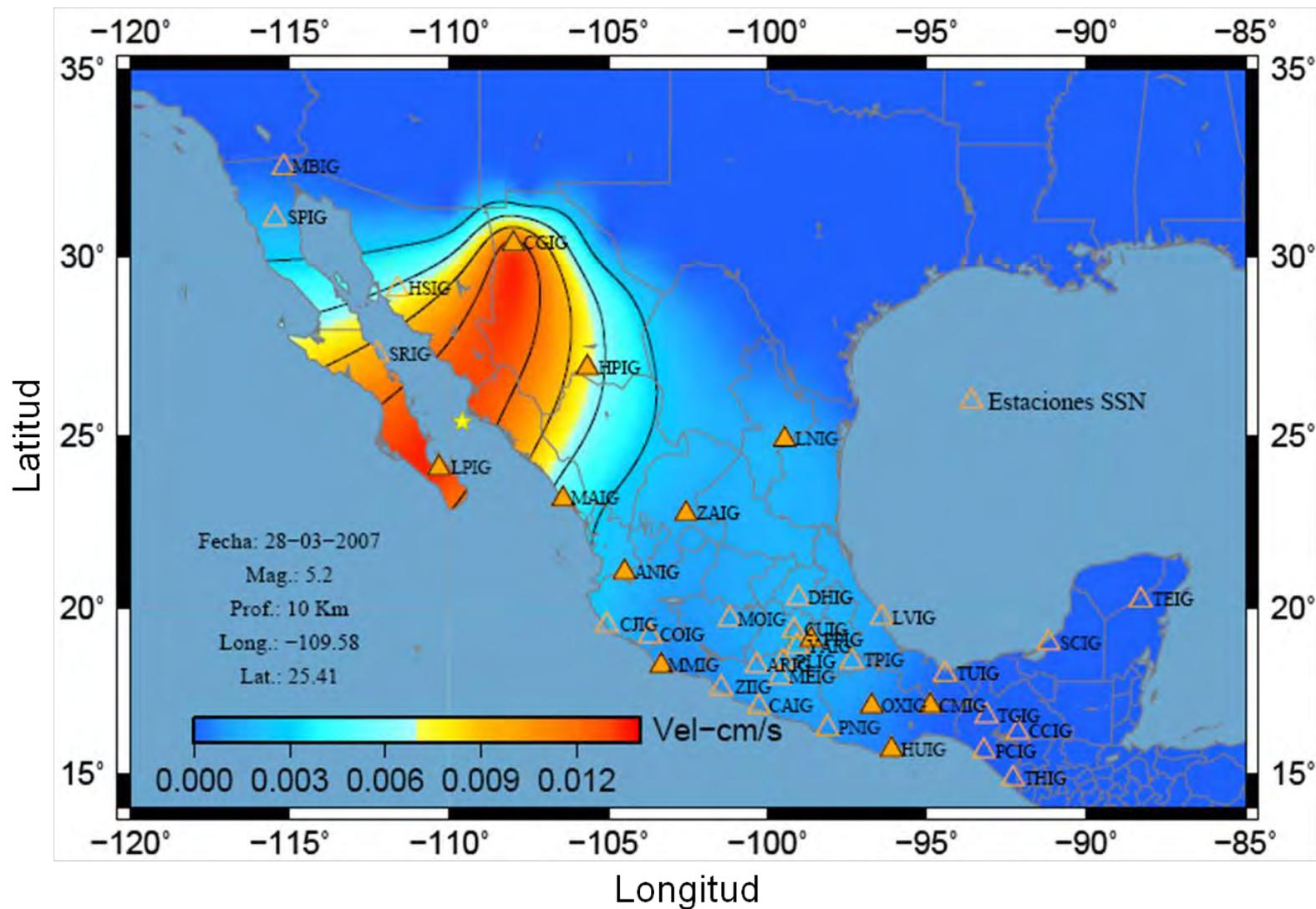


Figura 65.- Contornos de iso-velocidad para el evento del 28-03-2007 (2), para la componente Este, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.

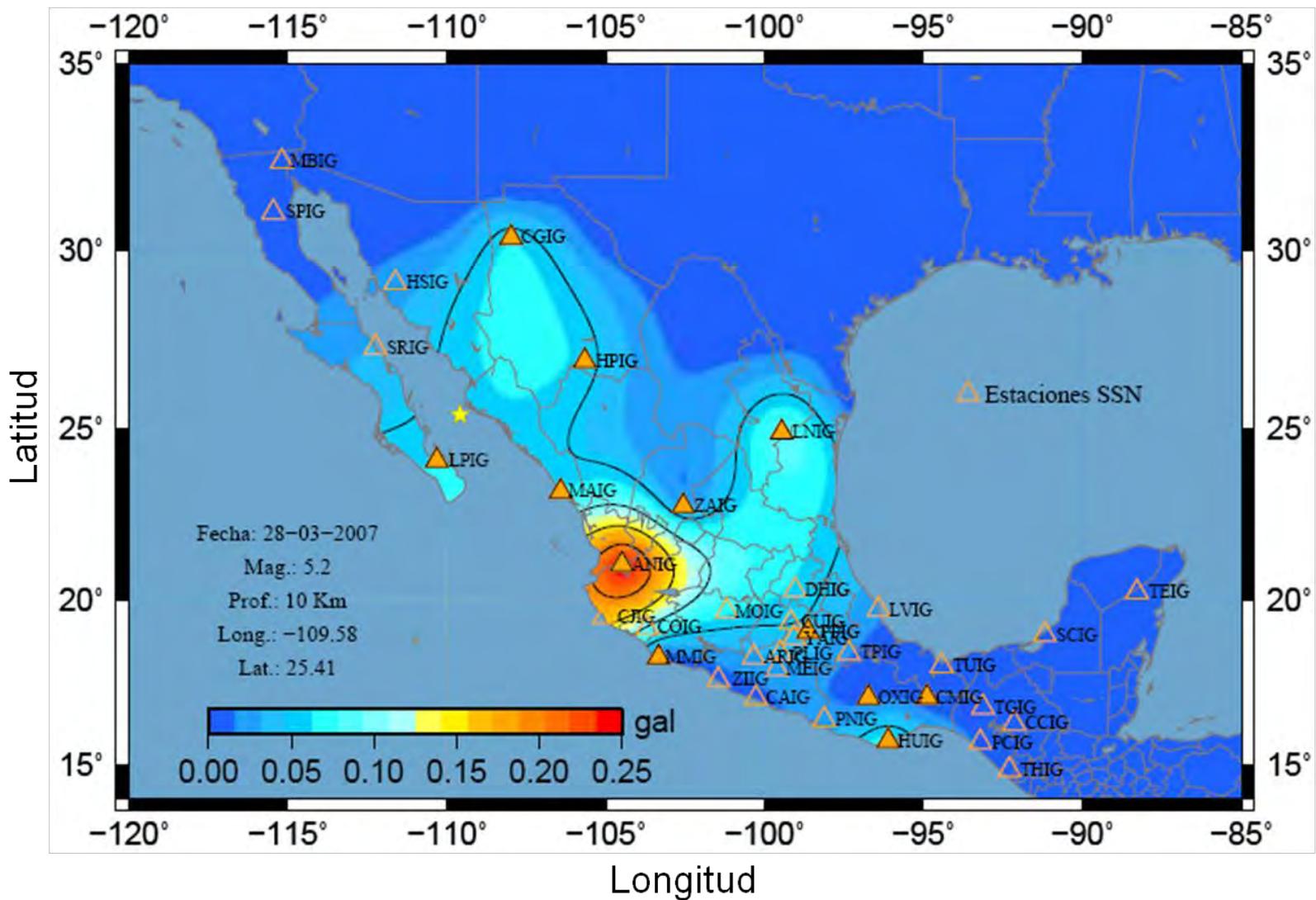


Figura 66.- Contornos de iso-aceleración para el evento del 28-03-2007(2), para la componente Norte, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.

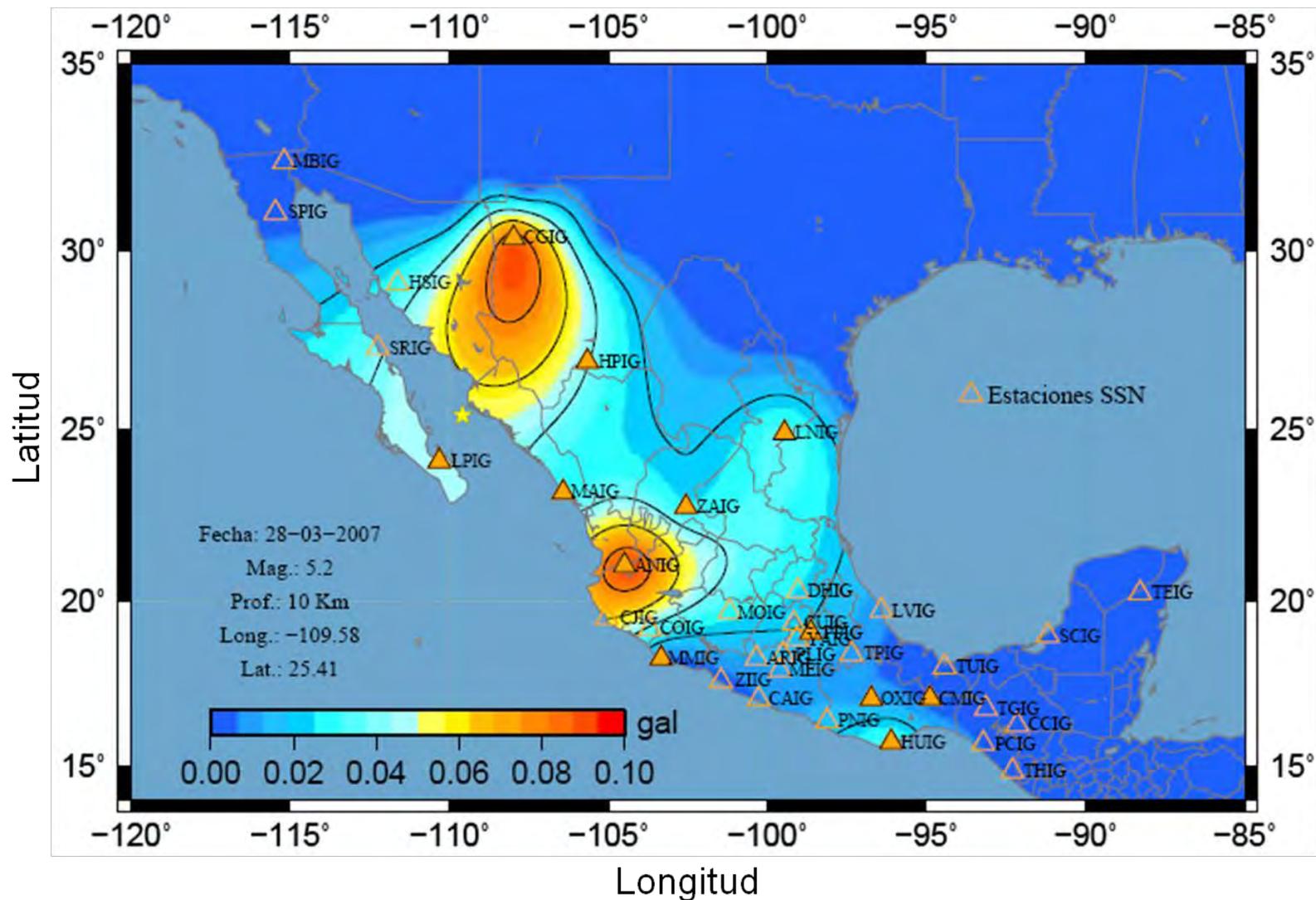


Figura 67.- Contornos de iso-aceleración para el evento del 28-03-2007(2), para la componente Vertical, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.

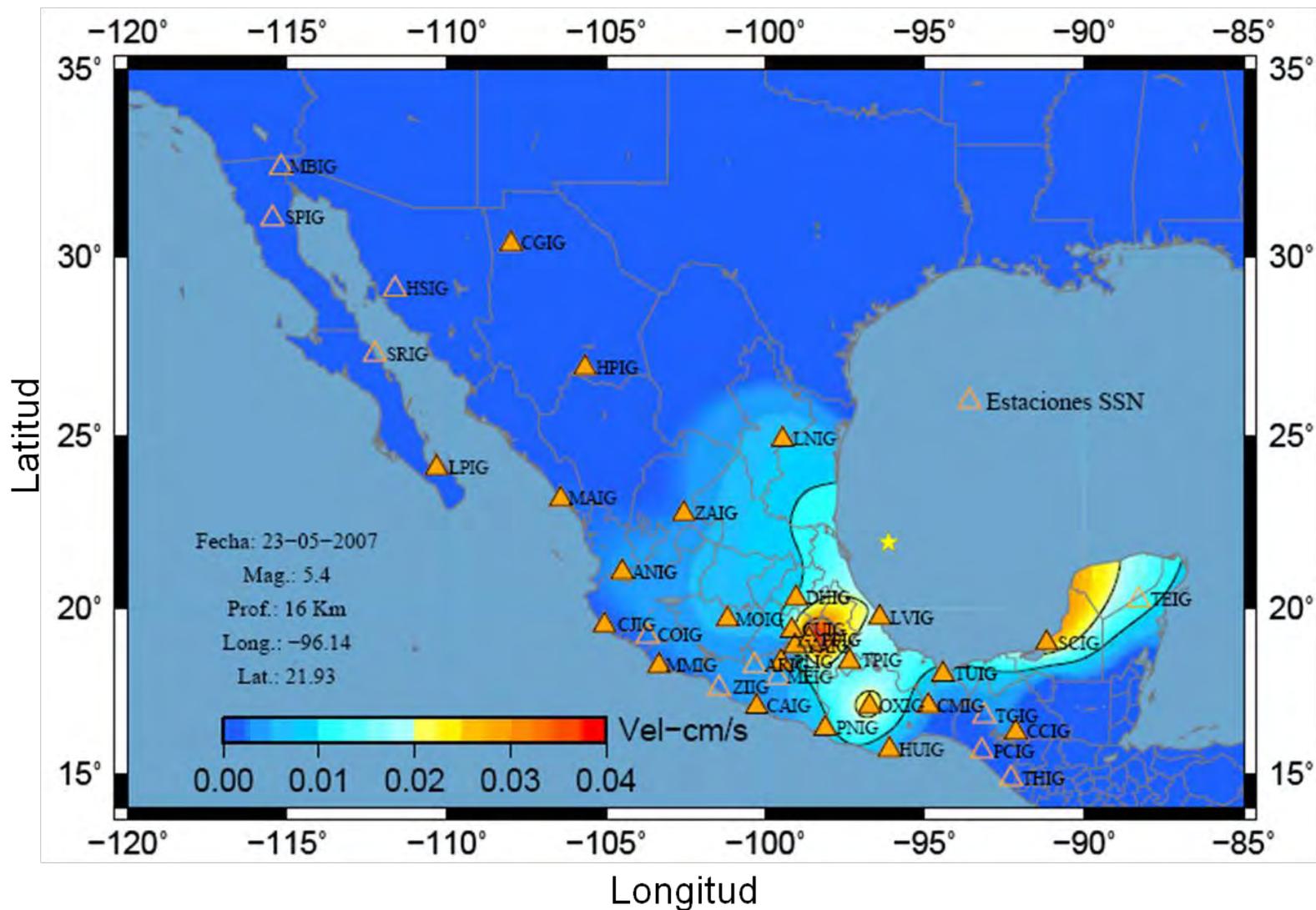


Figura 68.- Contornos de iso-velocidad para el evento del 23-05-2007, para la componente Este, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.

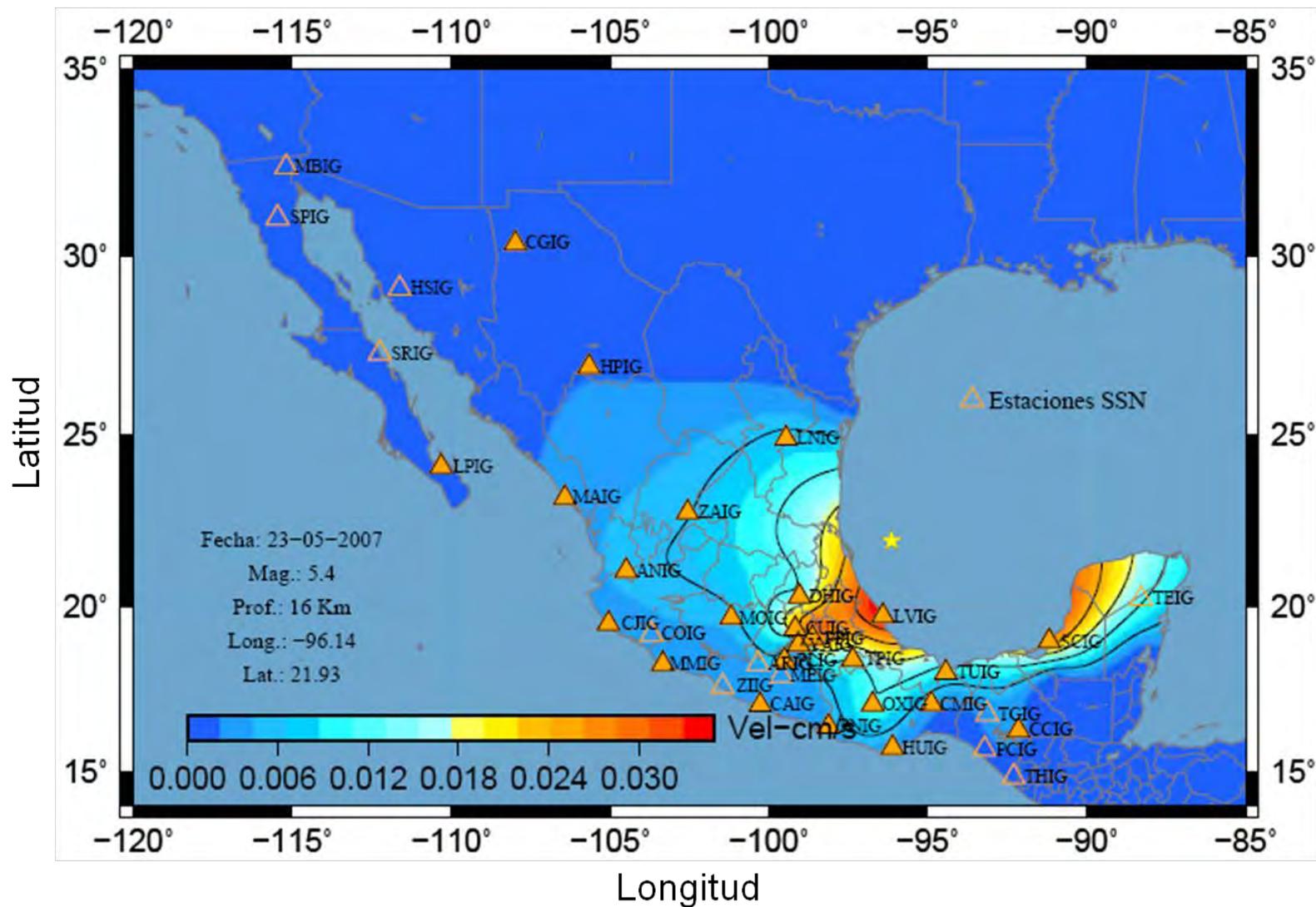


Figura 69.- Contornos de iso-velocidad para el evento del 23-05-2007, para la componente Norte, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.

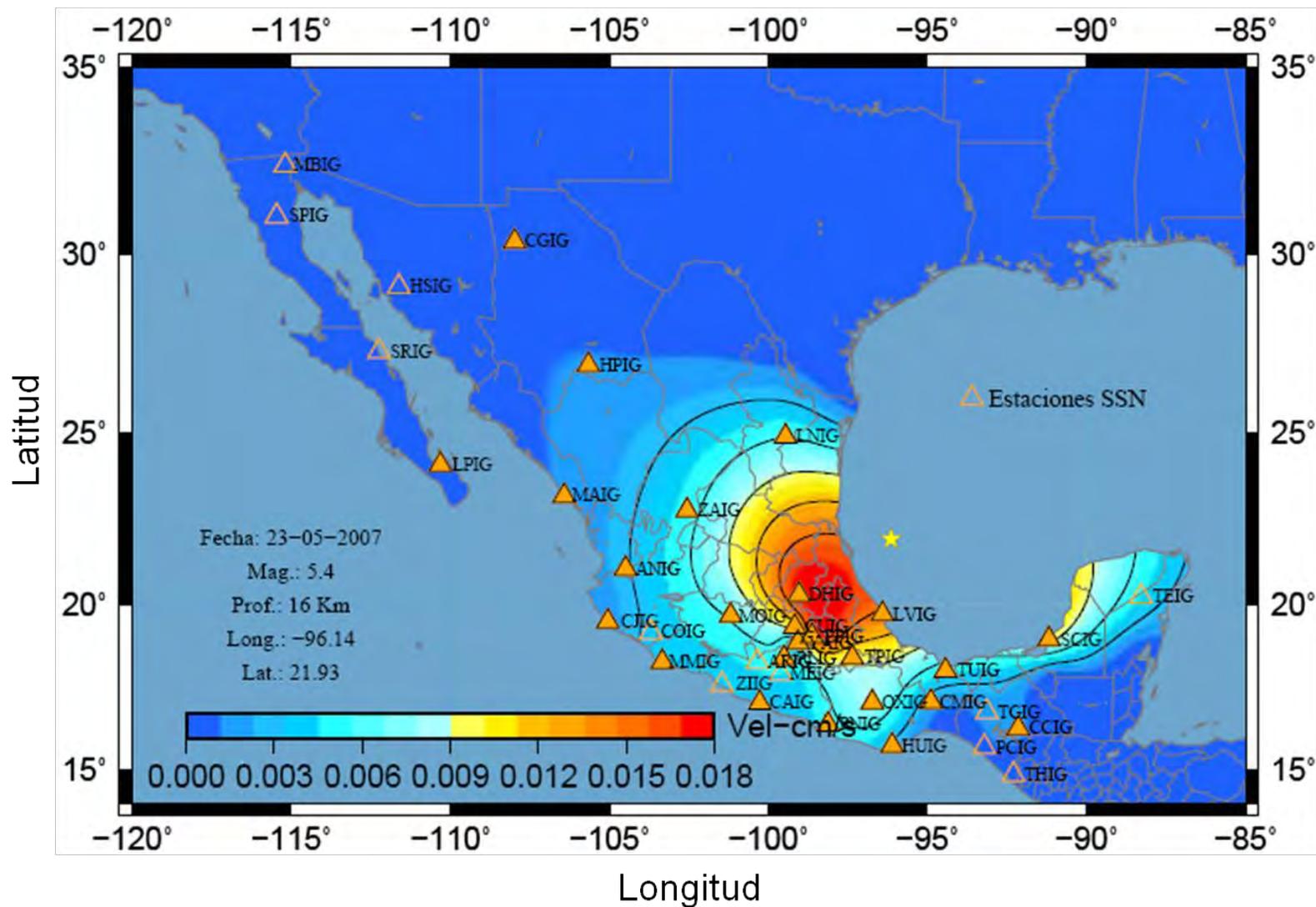


Figura 70.- Contornos de iso-velocidad para el evento del 23-05-2007, para la componente Vertical, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.

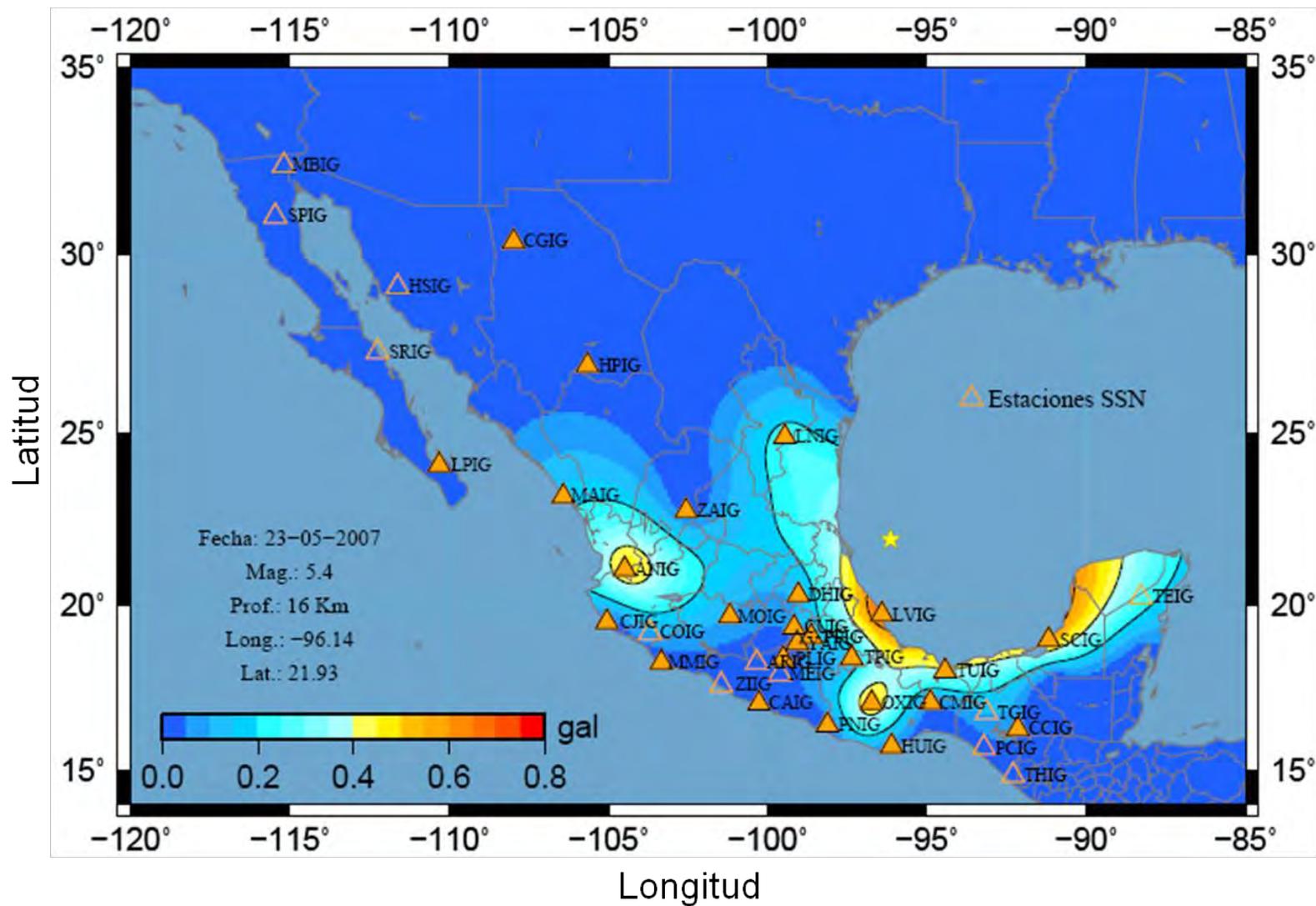


Figura 71.- Contornos de iso-aceleración para el evento del 23-05-2007, para la componente Este, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.



Por último se encuentra el evento del 12-02-2008,  $M_w=6.6$  (Sismo 94, disco anexo), ubicado en el W del estado de Oaxaca es uno de los eventos que cuenta con la mayor cantidad de registros, teniendo 28, registrando el evento casi todas las estaciones cerca del epicentro, incluyendo PNIG que es la más cerca al evento, que curiosamente no registra los valores máximos, para las velocidades éstos varían en las tres componentes, para la componente Este se tiene el valor máximo en OXIG (Figura 72), para la componente Norte se encuentra en la estación CMIG (Figura 73) y en la componente Z el valor máximo se encuentra en PCIG (Figura 74). Las aceleraciones tienen una distribución similar entre ellas, para las componentes Este y Z los valores máximos se distribuyen entre las estaciones HUIG y CMIG (Figura 75), mientras que para la componente Norte el valor se ubica en la estación HUIG (Figura 76). El evento parece tener un efecto contrario al menos en las velocidades al evento 19, ubicado al W de la estación HUIG.

Dentro de la elaboración de los mapas, se observaron diferentes comportamientos de los valores del movimiento del suelo, desde aquellos que presentan una buena distribución de los valores de velocidad y aceleración hasta aquellos donde los contornos de los valores máximos aparecen retirados del área epicentral. De la elaboración de los mapas anteriores se puede observar que la distribución de los contornos mejora cuando las estaciones de registro se encuentran rodeando al epicentro, y por supuesto la densidad de las mismas, la estación más cercana al epicentro debe contar con valores, ya que sin ésta los contornos comienzan a mostrar una mala distribución.

De los mapas anteriores se pudo observar que algunas estaciones presentan un comportamiento extraño, mostrando valores mayores, provocando una distorsión en los contornos, lo cual se puede deber a un posible efecto de sitio, dichas estaciones son las siguientes: OXIG, PPIG, TUIG y TPIG, siendo OXIG la que cuenta con mayor presencia en los eventos analizados, en 11 sismos, siguiéndole TUIG con 5 eventos, PPIG con 4 eventos y por último TPIG con 2 sismos.

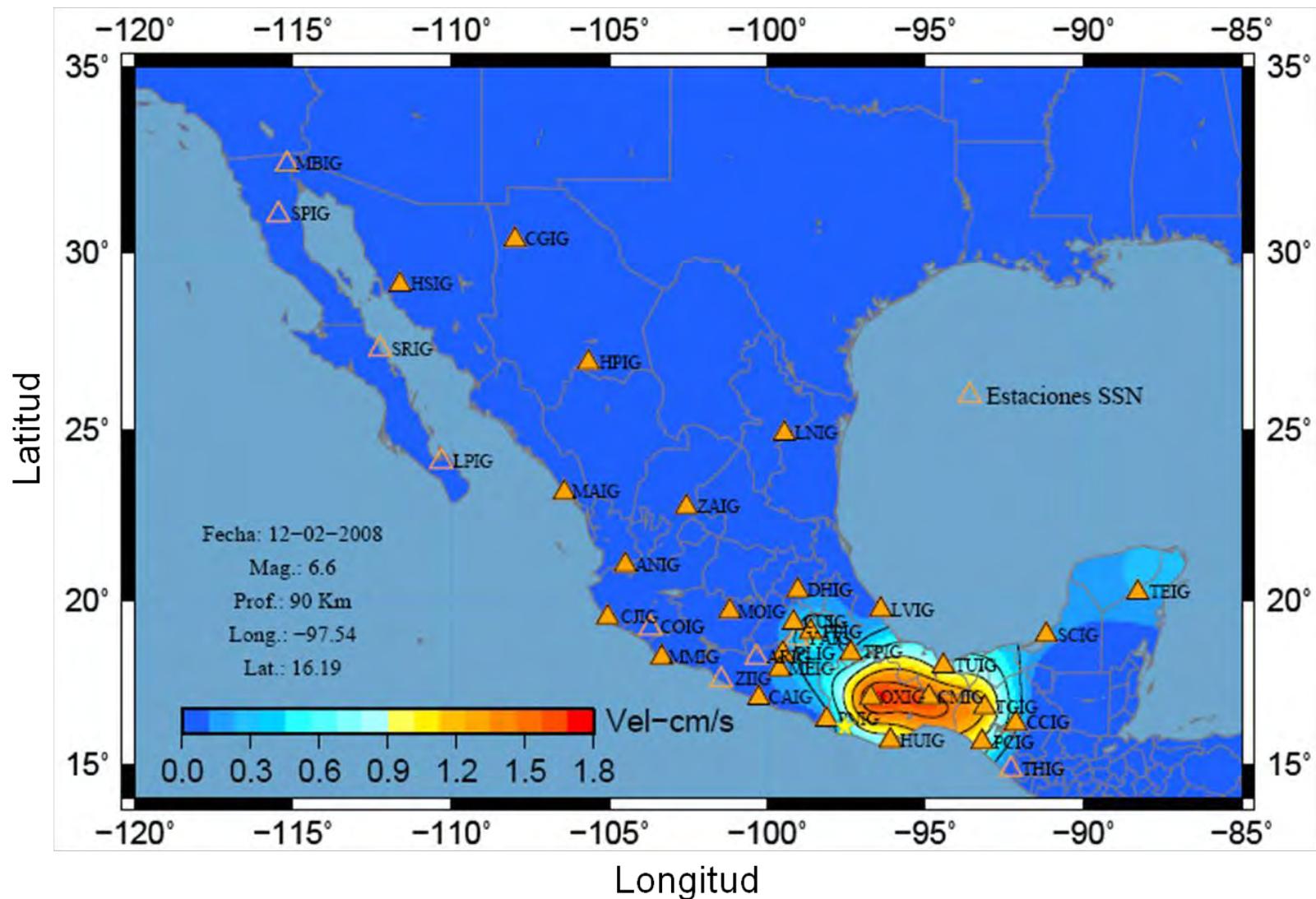


Figura 72.- Contornos de iso-velocidad para el evento del 12-02-2008, para la componente Este, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.

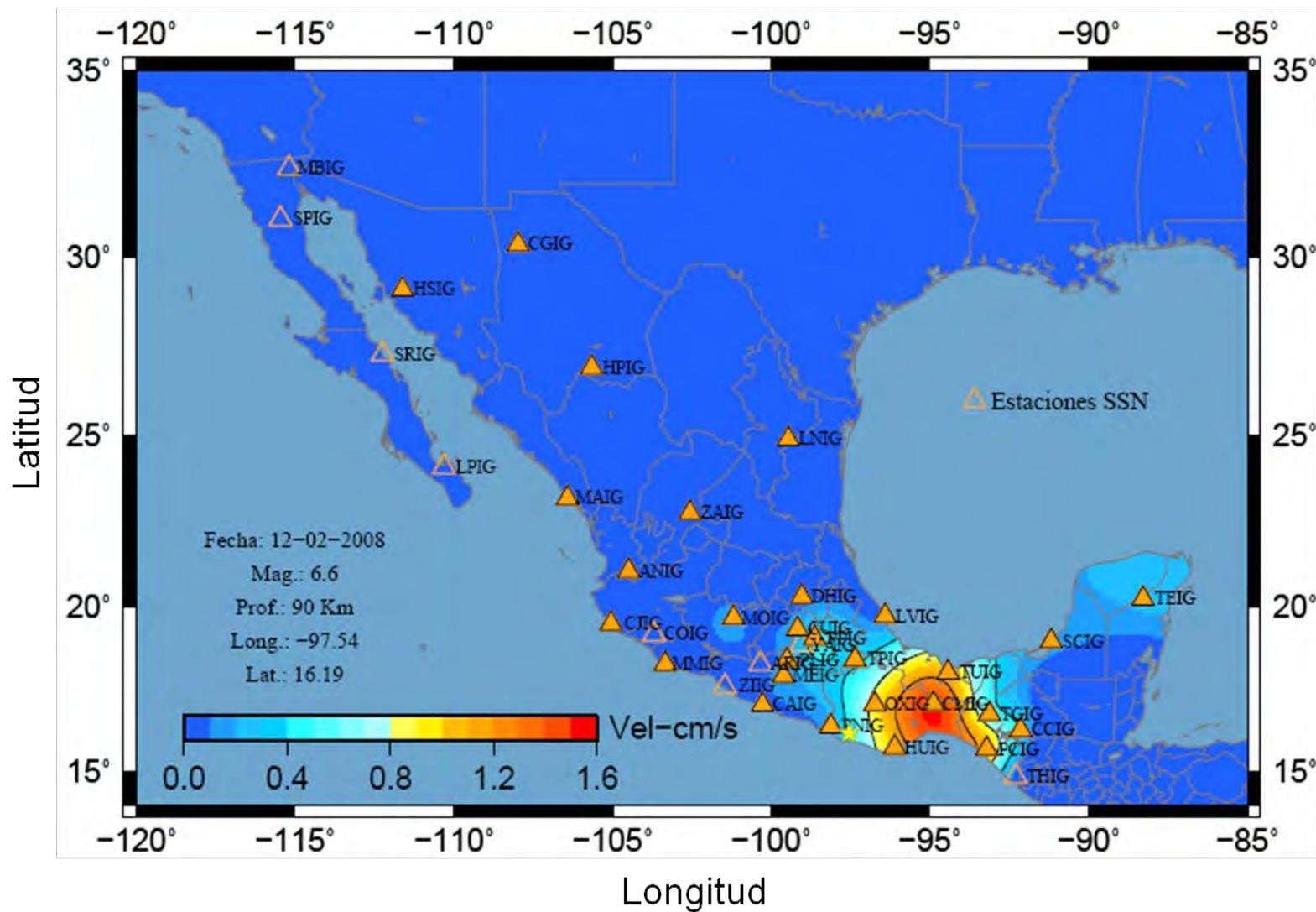


Figura 73.- Contornos de iso-velocidad para el evento del 12-02-2008, para la componente Norte, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.

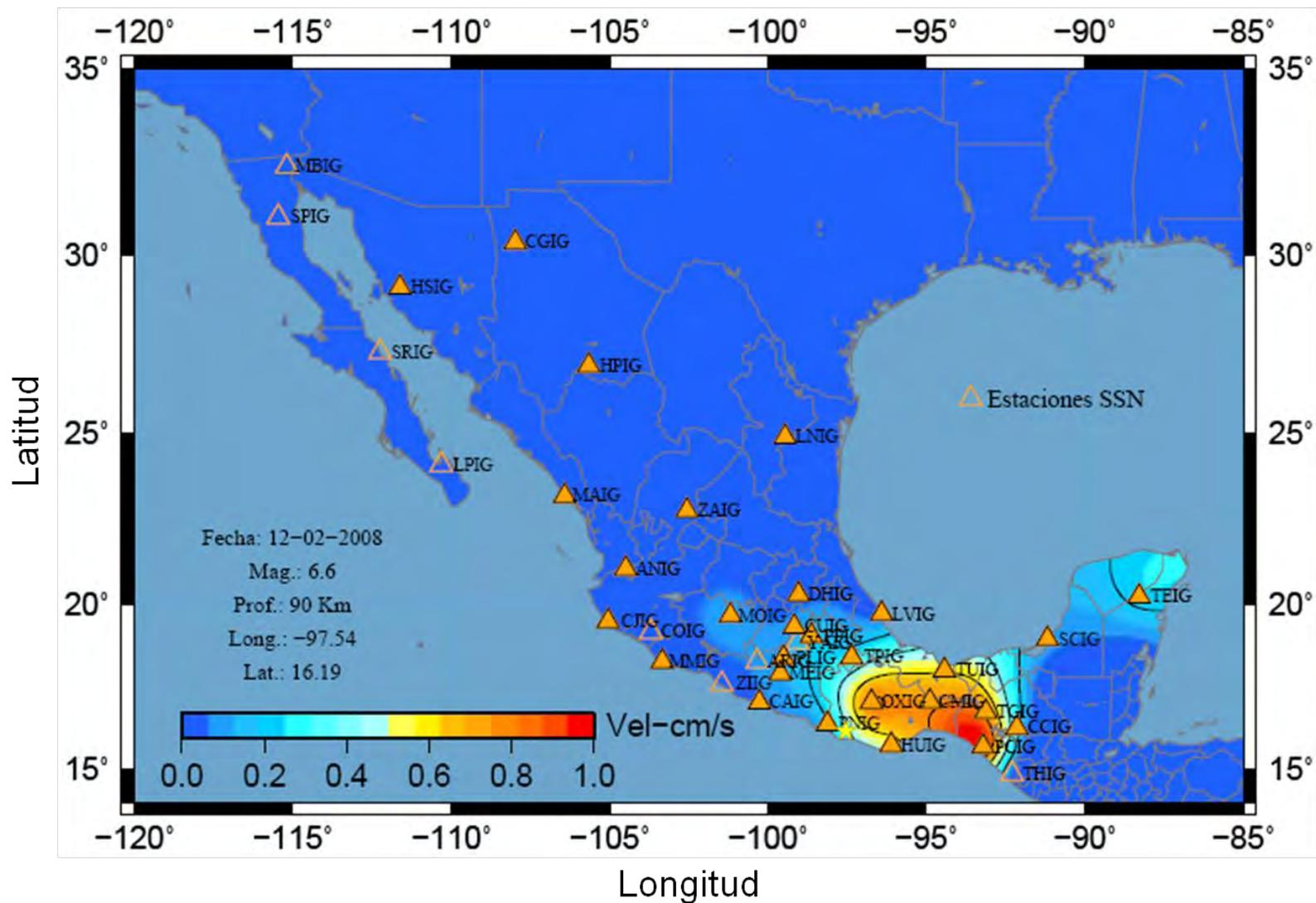


Figura 74.- Contornos de iso-velocidad para el evento del 12-02-2008, para la componente Vertical, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.

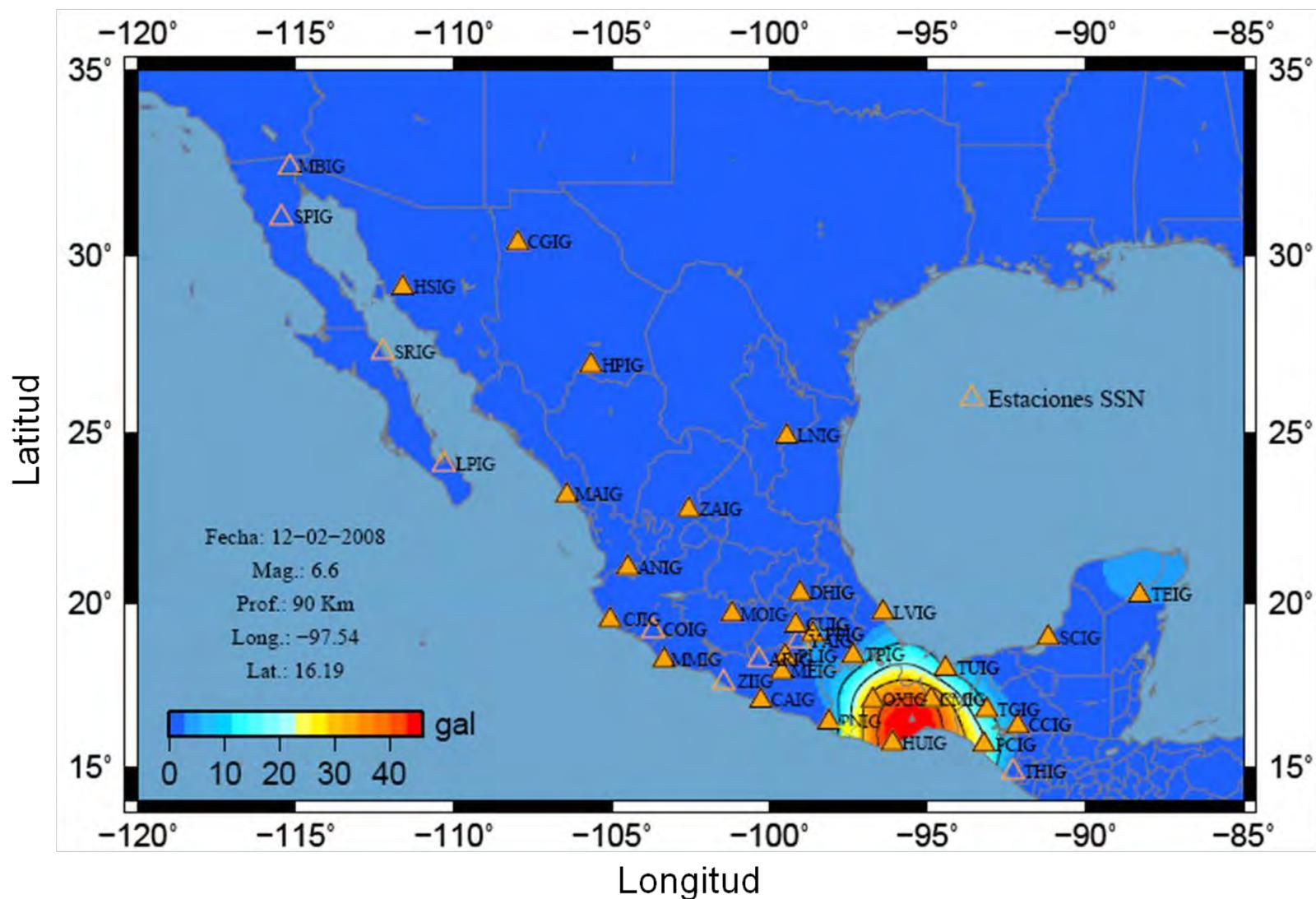


Figura 75.- Contornos de iso-aceleración para el evento del 12-02-2008, para la componente Este, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.

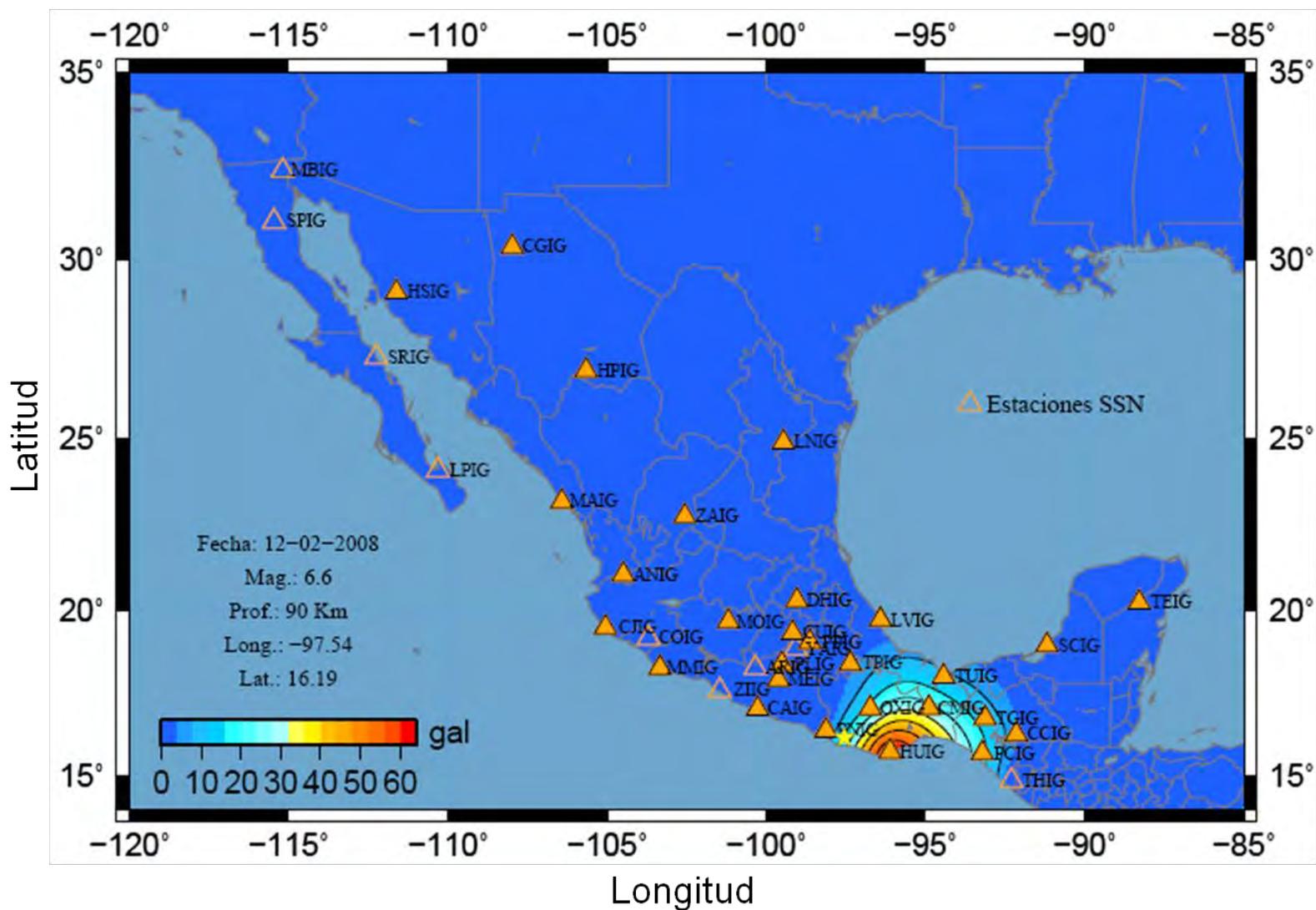


Figura 76.- Contornos de iso-aceleración para el evento del 12-02-2008, para la componente Norte, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.



Dada la ausencia de un catálogo de intensidades para los sismos ocurridos en México, los resultados obtenidos fueron comparados con los mapas de isosistas determinados por [Figueroa \(1974\)](#) para algunos sismos en México.

[Figueroa \(1974\)](#) desarrolló sus mapas basado en cuestionarios aplicando la metodología propuesta por [Richtter \(1958\)](#), las intensidades registradas (IMM) estuvieron basadas en el tipo de estructuras, características del suelo y características locales, para el dibujo de las curvas de igual intensidad los valores fueron obtenidos interpolando los valores entre los pueblos más cercanos. Ejemplo de los mapas obtenidos por [Figueroa \(1974\)](#) es el mostrado en la Figura 77, que corresponde a un evento ocurrido el 7 de Junio de 1982 al SW del estado de Oaxaca cerca de la frontera con el estado de Guerrero (Long. 98.070° W, Lat. 15.980° N), el evento tuvo una magnitud (M) de 6.5 y una profundidad de 33 Km, alcanzando una intensidad máxima de 8 (IMM) en el área cercana al epicentro.

De los 45 eventos analizados tan sólo unos pocos eventos presentaban características similares a los del catálogo de [Figueroa \(1974\)](#), los cuales se muestran en la Tabla 8, en la parte de la izquierda se encuentran los eventos en este estudio que son comparados con los de la derecha, correspondientes al catálogo de [Figueroa \(1974\)](#), también se muestra la separación en distancia entre ambos eventos. La Figura 78 muestra la distribución de las isosistas para el evento ocurrido el 14 de Agosto de 2005 (Sismo 34, disco anexo), con  $M_w = 5.8$ , y una profundidad de 15 Km, su ubicación está en las costas del Pacífico, al SW del estado de Oaxaca cerca de la frontera con el estado de Guerrero (Long. 98.40° W y 15.99° N), alcanzando una intensidad máxima de 4 (IMM) en la estación más cercana al epicentro PNIG.



Tabla 8.- Eventos con características similares correspondientes a este estudio (Izquierda) y a aquellos encontrados en el catálogo de Figueroa (1974) (Derecha).

Eventos en este estudio					Eventos en el catálogo de Figueroa (1974)					Dist. entre eventos (Km)
Fecha	Mag (Mw)	Long.	Lat.	Prof. (Km)	Fecha	Mag	Long.	Lat.	Prof. (Km)	
18-08-2004 (Sismo 19)	5.6	-95.15	16.24	51	05-06-1897	7	-95.43	16.45	50	38.92
14-08-2005 (Sismo 34)	5.8	98.40	15.99	15	07-06-1982	6.5	-98.07	15.98	33	36.696
18-01-2005 (Sismo 42)	4.9	-94.43	16.83	116	09-11-1956	6.3	-94.4833	16.96	-----	15.568
20-02-2006 (Sismo 45)	5.0	-100.75	18.14	51	06-07-1964	6.5	-100.766	18.33	-----	21.128
06-11-2007 (Sismo 93)	5.6	-100.14	16.91	7	09-12-1965	6.8	-100.15	16.55	35	40.032
12-02-2008 (Sismo 94)	6.6	-97.54	16.19	90	02-08-1968	6.5	-97.80	16.36	-----	34.472
22-05-2009 (Sismo 98)	5.7	-98.44	18.13	45	24-10-1980	6.5-7	-98.23	18.00	> Normal	26.688

De las figuras podemos observar que el comportamiento de los contornos es muy similar, la atenuación de la energía toma una mayor distancia hacia el centro del país que hacia lo largo de la costa del Pacífico, también se puede apreciar que la distribución de los contornos hacia el Norte parece estar influenciado por la presencia del CVTM, ya que dichos contornos tienden a dirigirse a lo largo del mismo.

Dada la diferencia entre los parámetros de los dos eventos en magnitud y profundidad (Tabla 8), los resultados encontrados para el evento del 14-08-2005 son los que habrían de esperarse debido a que nuestro evento presenta una magnitud menor a la del 07-06-1982, pese a esto la distribución de los contornos de las intensidades es muy parecida para dichos eventos.

Con lo anterior podemos corroborar que los resultados obtenidos, utilizando esta metodología son validos, la generación de mapas de velocidad y aceleración, así como de isosistas puede ser automatizado por el SSN y presentarlos al momento de la ocurrencia de un evento sísmico, para cualquier parte sismogénica del país.



Figura 77.- Mapa de isosistas determinado por Figuerao (1974) para el evento del 7 de Junio de 1982, con una  $M=6.5$  y una intensidad máxima de 8.

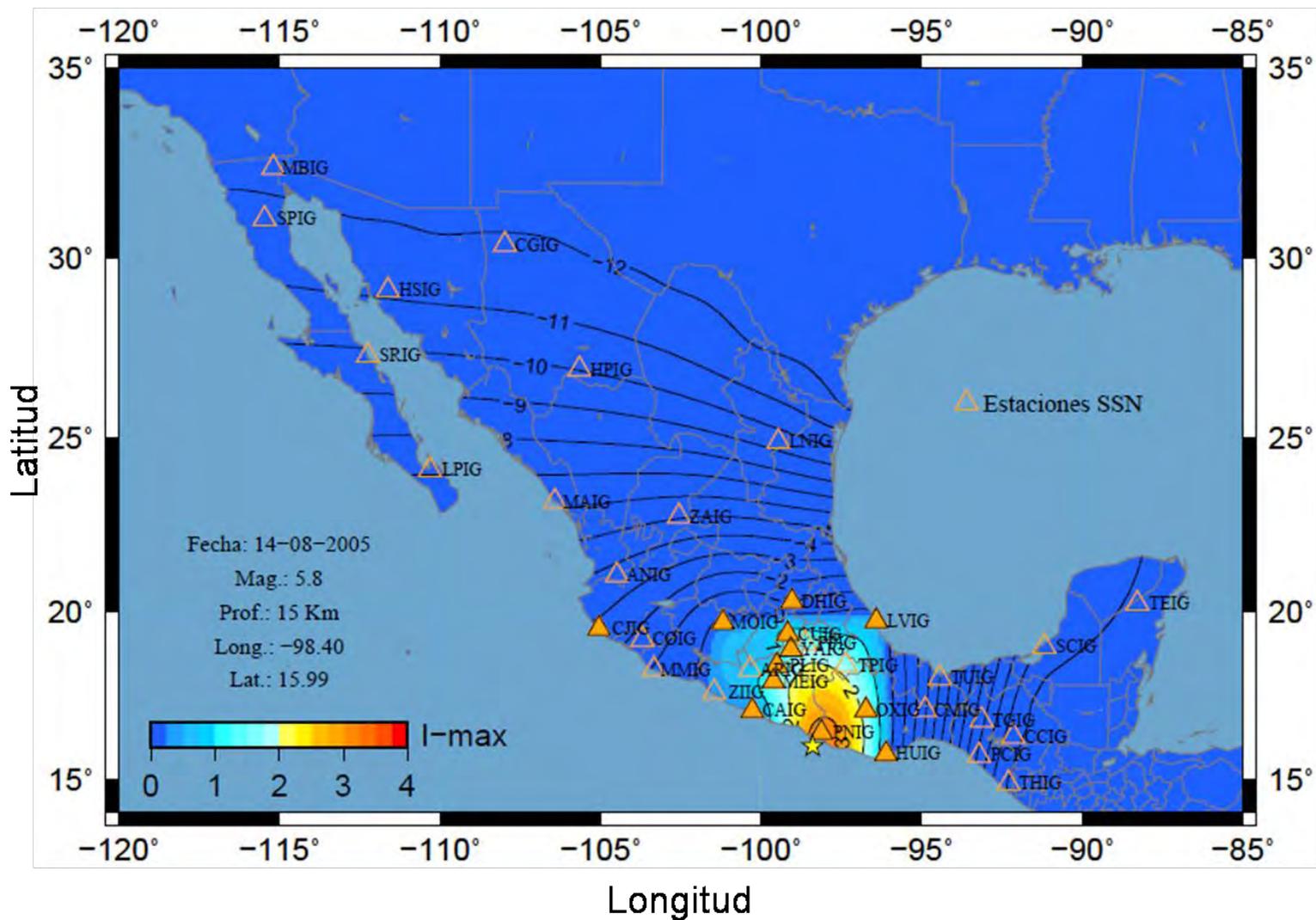


Figura 78.- Mapa de isosistas para el evento del 14-08-2005, la estrella representa el epicentro del evento, triángulos representan las estaciones del SSN, triángulos rellenos representan las estaciones con registro del evento.



Con la finalidad de observar la distribución general de los parámetros del movimiento del suelo basados en los eventos analizados, se generaron mapas con los valores máximos absolutos de las velocidades, aceleraciones e intensidades encontradas, los mapas se muestran en las Figuras 79, 80 y 81.

La Figura 79 muestra los contornos para las velocidades máximas absolutas. Se observan que estas que se concentran en el Sur y SE del país, presentándose las máximas frente a las costas del estado de Guerrero y parte del estado de Oaxaca, con un valor máximo de 6 cm/s. La Figura 80 muestra los contornos para las aceleraciones máximas absolutas, la distribución de los contornos es similar a las de las velocidades, alcanzando valores de hasta 105 gal en frente de las costas del estado de Guerrero y Oaxaca, de ambas figuras se puede observar que la distribución de los valores corresponde con la distribución de los sismos más grandes dentro de los eventos analizados.

La Figura 81 correspondiente a la distribución de las intensidades máximas, muestra que éstas se concentran en la parte Sur del país, en las costas del Pacífico Mexicano, de la figura podemos observar que los estados de Chiapas, Oaxaca y Guerrero prácticamente son cubiertos por intensidades de 4 a 6, lo cual corresponde a los eventos mayores que tenemos en este estudio, la parte SW se observan intensidades relativamente bajas, lo cual se debe a la falta de datos de grandes sismos que pudieran darnos resultados muy parecidos a los observados en la parte SE, si se contemplaran eventos ocurridos en el pasado para el SW del país, podríamos observar el mismo comportamiento, cubriendo los estados sobre la costa del pacífico con intensidades entre 4 a 6. También se puede observar que para los estados localizados en la parte Sur del mar de Cortes, dada la ocurrencia de un evento estos pueden alcanzar intensidades entre 3 a 5, lo que también podría esperarse para los estados localizados al Norte y Centro del mismo, dada la ausencia de valores en estas zonas no es posible mostrarlos en este estudio.

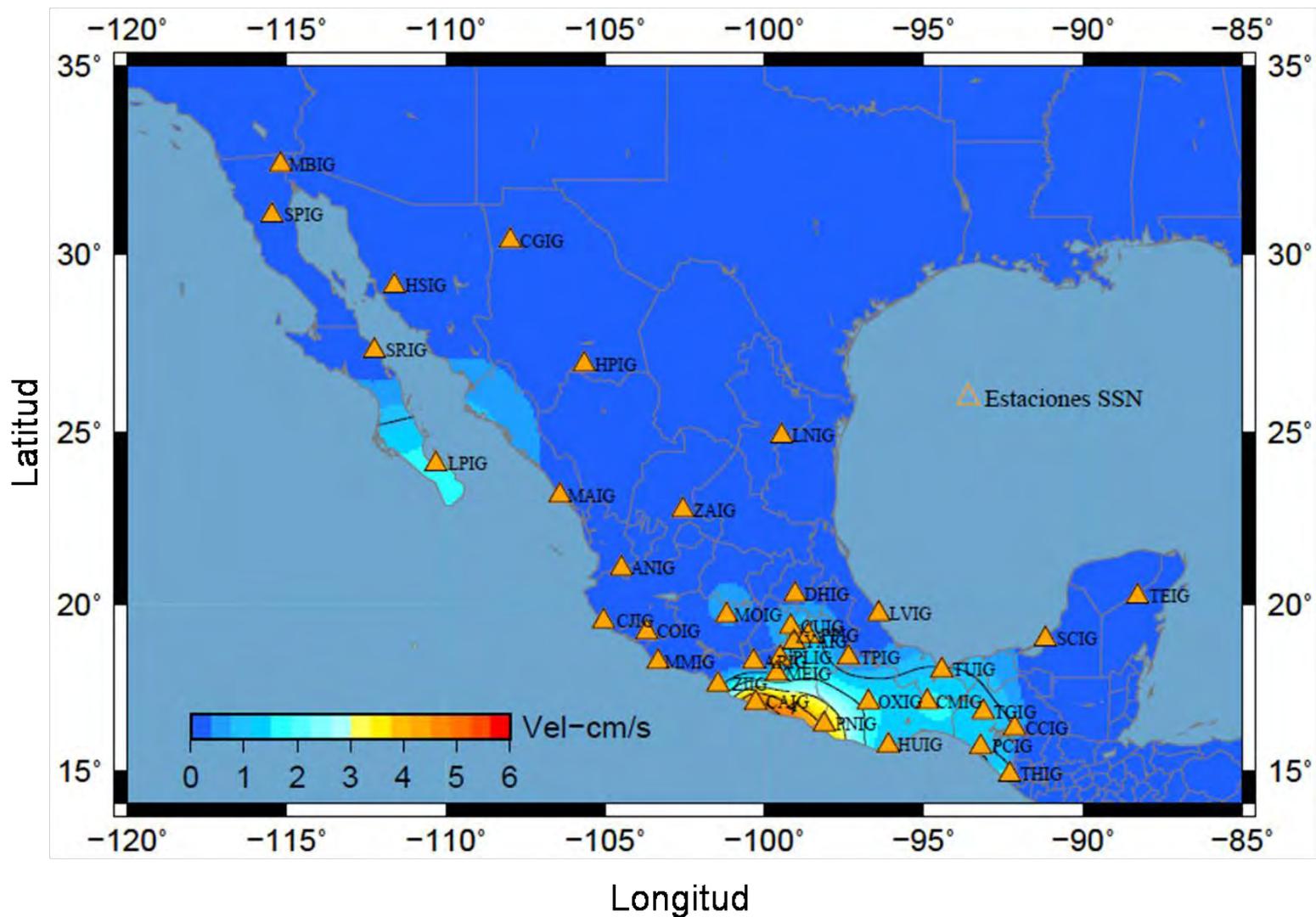


Figura 79.- Mapa de contornos de velocidad máxima absoluta para los eventos analizados en este estudio, triángulos rellenos representan las estaciones empleadas para el desarrollo de los contornos.

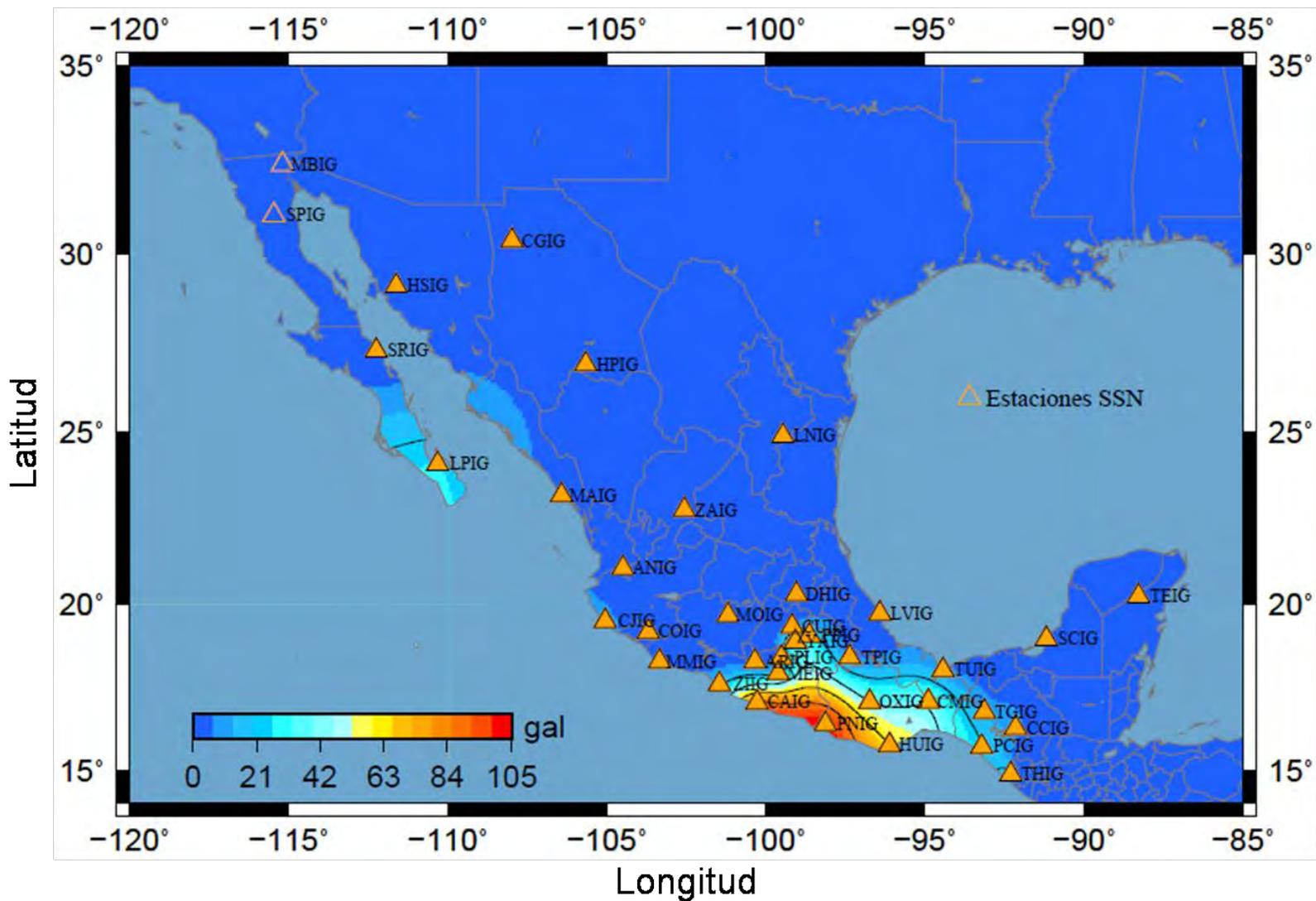


Figura 80.- Mapa de contornos de aceleración máxima absoluta para los eventos analizados en este estudio, triángulos rellenos representan las estaciones empleadas para el desarrollo de los contornos.

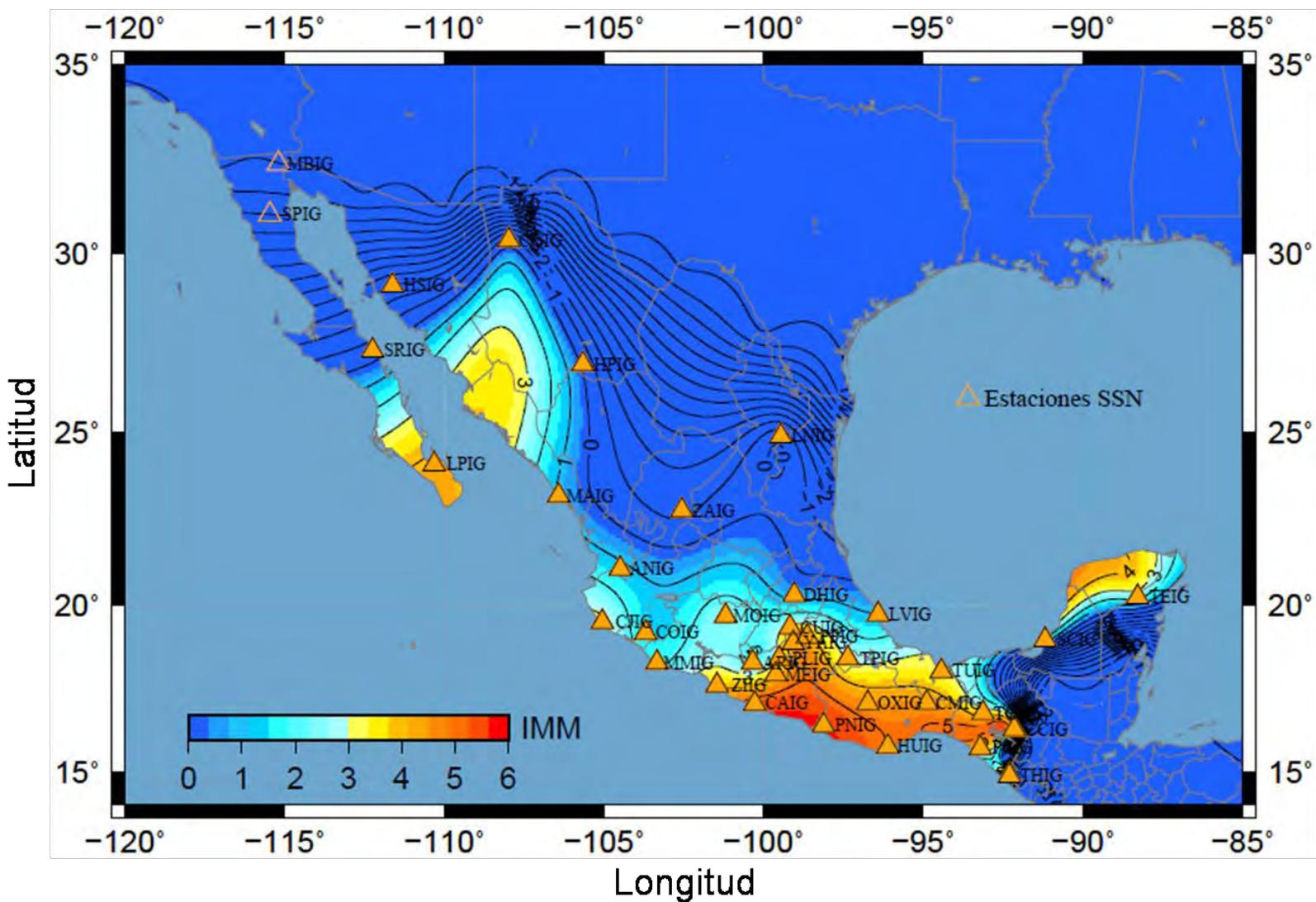


Figura 81.- Mapa de contornos de intensidad máxima absoluta para los eventos analizados en este estudio, triángulos rellenos representan las estaciones empleadas para el desarrollo de los contornos.



## Capítulo V.- Conclusiones

Se analizaron 45 eventos sísmicos de un catálogo de 99, con el objetivo de desarrollar modelos de shakemaps para la República Mexicana, así como el de proporcionar una caracterización del peligro sísmico en el país, empleando datos de velocidad y aceleración de la Red de Banda Ancha del Servicio Sismológico Nacional, para el periodo comprendido entre 2004 y 2008, contemplando dos eventos del 2009, esto debido a que antes del 2004 el SSN no contaba con estaciones en la parte Norte del país, restringiendo los datos a la parte Sur del mismo, con la presencia de estaciones en la parte Norte podemos ampliar el estudio y la generación de mapas en cualquier parte sismogénica de la República Mexicana.

Los registros sísmicos del catálogo empleado fueron revisados con la finalidad de proporcionar los mejores resultados, y evitar valores erróneos debido a fallas al momento del registro del sismo o por un mayor contenido de ruido en las trazas o en su defecto que éstas estuvieran incompletas. Una vez examinadas las trazas, se obtuvieron los valores máximos del movimiento del suelo (PGV y PGA). Para los eventos que no contaban con registros de aceleración, éstos fueron obtenidos mediante la derivada de la velocidad, validándolos comparándolos con los obtenidos directamente de los acelerógrafos. Observamos que no existe una diferencia significativa entre los valores obtenidos por medio de la velocidad y aquellos obtenidos directamente de los acelerógrafos (8.8% en promedio), corroborando que su uso es factible, excluyendo aquellas estaciones donde la diferencia de estos valores es muy notable y significativa (Tabla 6). Esto puede atribuirse a errores en los equipos, sugiriendo una revisión y calibración de los mismos (Tabla 7), para evitar que se proporcionen datos que no corresponden a los valores reales experimentados por el suelo al momento de un sismo.

Dentro de la elaboración de los mapas de iso-velocidad, iso-aceleración e isosistas, se encontraron diferentes casos, lo que es atribuible a la densidad de estaciones cerca del área epicentral, al buen funcionamiento de las mismas, al tamaño del evento y a lo que



podrían ser posibles efectos de sitio. Se pudo observar que para aquellos mapas que presentaban una buena distribución de los contornos, éstos contaban con una densidad de estaciones que prácticamente rodean al epicentro del evento y no se encontraban muy retiradas del mismo, registrando los valores máximos en la estación más cercana al epicentro, además se observó que los valores no eran tan pequeños lo que también favoreció a la buena distribución de los contornos.

Caso contrario a lo observado en los mapas donde la distribución de los contornos no es muy buena, las estaciones de registro se encontraban retiradas del epicentro y en algunos de los casos la estación más cercana al mismo no contaba con registro, lo que provocó que los valores máximos se presentaran retirados del epicentro, dando la impresión de que el evento había ocurrido en esa zona y no donde se marca en los mapas, lo que provoca una idea errónea de los mayores efectos del sismo. El registro de valores pequeños del movimiento del suelo parece provocar una distribución mucho más amplia y distorsionada de los contornos, debido a que la diferencia entre éstos no es tan significativa, los contornos son distribuidos por la mayoría de las estaciones, provocando una distribución casi homogénea sin observarse la zona de mayor afectación.

Dado que para la República Mexicana no se cuenta con un catálogo de intensidades, se emplearon ecuaciones empíricas que relacionan los valores del movimiento del suelo (PGA) contra la intensidad (IMM). Para la elaboración de los mapas de isosistas, los resultados obtenidos fueron corroborados con mapas de isosistas elaborados para grandes sismos en México, para lo cual se determinaron aquellos eventos que contaran con características similares en magnitud, ubicación y profundidad. La comparación de dichos eventos presentan distribuciones muy parecidas, las variaciones observadas son debidas a los parámetros propios de los eventos (ubicación, magnitud y profundidad principalmente), mostrando en general una muy buena correlación y distribución de los contornos de las intensidades, validando así la metodología empleada para su elaboración. Cabe mencionar que se observaron intensidades negativas correspondientes a aceleraciones por debajo de



los 0.36 gal, movimientos que ya no son percibidos por las personas. Estos valores se concentraron más en la parte Noreste y Sureste del país.

De los mapas obtenidos se pudieron observar ciertas características, tales como: la dirección de propagación de la energía, el alcance y la distribución de la misma. En general se pudo observar que la energía generada por un evento sísmico se concentra entre los 200 o 300 km más cercanos al epicentro. Los eventos ocurridos sobre la costa del Pacífico Mexicano muestran que la energía toma una mayor distancia en atenuarse hacia el centro del país que a lo largo de la costa del pacífico, para eventos ocurridos en el centro del país la distribución de la energía se presenta casi concéntrica al epicentro, tomando casi la misma distancia en atenuarse.

El CVTM juega un papel importante con respecto a la propagación de la energía y atenuación de la misma, ya que de los mapas obtenidos se puede observar que los contornos tienden a desplazarse a lo largo del CVTM reduciendo la propagación de la energía hacia el Norte del país. El mismo caso es observado en eventos que ocurren en la parte Norte del CVTM, la distribución de la energía hacia el Sur es disminuida al llegar a los límites del CVTM, para los eventos ocurridos cerca al CVTM la energía prácticamente tiende a distribuirse a lo largo del mismo disminuyendo su propagación hacia el Norte y Sur del CVTM.

Las implicaciones que presentan los mapas elaborados dentro del tema del peligro sísmico, es que estos muestran, que dada la ocurrencia de un evento sísmico, de moderado a fuerte, la parte Centro, Sur y Noroeste del país presentan un mayor peligro sísmico, mientras que la parte Noreste presenta una disminución del mismo, aunque es necesario recopilar más información en esta zona para poder caracterizar mejor el peligro sísmico, y poder mostrar las velocidades, aceleraciones e intensidades que se podrían alcanzar. La ocurrencia de eventos en la parte centro del país puede generar intensidades de 4 a 5, casi la misma situación podría presentarse para los estados ubicados en el Mar de Cortes, mientras que para los estados del Sur la intensidades tienden a ser mayores.



De los resultados obtenidos se puede observar que existen algunas zonas con posibles efectos de sitio que tienden a amplificar la energía. En los mapas elaborados se puede observar este comportamiento, claramente marcados ya que producen una distorsión en la distribución de los contornos, las zonas identificadas comprenden parte de los estados de Puebla, Oaxaca y D.F., principalmente, lo que naturalmente presenta implicaciones dentro de la evaluación del peligro sísmico.

De los mapas de velocidades, aceleraciones e intensidades máximas, se puede observar una regionalización de dichos parámetros, concentrándose los máximos valores sobre la parte de la costa del Pacífico Mexicano y que van decreciendo hacia el centro del país, de la misma manera la parte Noroeste (Mar de Cortes) presenta altos valores y tienden a decrecer hacia la dirección Este. Un estudio más detallado es necesario para definir claramente los límites de estas dos regiones que presentan un mayor peligro sísmico.

La metodología empleada para la elaboración de shakemaps en este trabajo puede ser automatizada por el SSN para proveer la información necesaria poco tiempo después de haber ocurrido un evento sísmico en cualquier parte sismogénica. Esto tiene grandes implicaciones en el tema de reducción del riesgo por sismos, así como en la respuesta oportuna hacia las áreas más afectadas ante un evento sísmico. La información plasmada en los mapas desarrollados es de gran importancia para las instituciones encargadas de la protección civil, reducción del riesgo y aquellas involucradas en la materia.

Con este trabajo se da la pauta para una mejor caracterización del peligro sísmico en México y la distribución de una información más completa relacionada a la ocurrencia de un sismo, empleando los registros de velocidad y aceleración de la red de banda ancha del SSN, no tan sólo de la trinchera del Pacífico Mexicano sino también de la parte Norte del país, en donde varios años atrás no se contaba con estaciones sísmicas, y ahora se puede dar un panorama del peligro sísmico en esta zona.



## Referencias

*Abrahamson, Norman A. and Sheldock, Kaye M; 1997; "Overview", Seismological Research Letters, Vol. 68, No. 1, pp. 9-23*

*Aki, K; 1979; "Characterization of barriers on an earthquake fault"; Journal Geophysical Research, 84, 6140-6148.*

*Aki, K; 1988; "Local site effects on strong motion" in J. L. Von Thune d. Earthquake Engineering and Soil Dynamics II-Recent advances in Ground Motion Evaluation. American Society of Civil Engineers. Geotechnical Special Publication No. 20, pp. 103-155.*

*Aki, K; Richards, P. G; 1980; "Quantitative seismology; Theory and methods, vols. 1 and 2"; San Francisco, California: W. H. Freeman.*

*Anderson, John G; 1997; "Nonparametric description of peak acceleration above a subduction thrust"; Seismological Research Letters, Vol. 68, No. 1, pp. 86-93.*

*Atkinson, Gail M. and SanLinn I. Kaka, 2007, "Relationships between felt intensity and instrumental ground motion in the Central United States and California", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 97, No. 2, pp. 497-510.*

*Ávila-Barrientos, L; 2003, "Revisión de la Seguridad Estructural del Edificio G del Instituto Tecnológico de Chilpancingo": Chilpancingo, Gro., Instituto Tecnológico de Chilpancingo, Tesis profesional, 148 p., 1 lam. Pleg.*

*Ávila-Barrientos, L; 2007, "Hacia una regionalización del peligro sísmico ocasionado por réplicas, para sismos en la costa del Pacífico Mexicano": Juriquilla, Querétaro, Centro de Geociencias, UNAM, Tesis profesional, 143 p.*

*Bandy, W. L., and T. W. C. Hilde; 2000; "Morphology and recent history of the ridge propagator system located at 18°N, 106°W, in Cenozoic Tectonics and Volcanism of Mexico"; edited by H. Delgado-Granados, G. Aguirre Diaz, and J. M. Stock, Geol. Soc. Am., Spec. Pap., 334, 29-40.*

*Bandy, W. L., V. Kostoglodov, and C. A. Mortera-Gutiérrez (1998), Southwest Migration of the Instantaneous Rivera-Pacific Euler Pole Since 0.78 Ma, Geofísica Internacional, 37, 153-169.*

*Bazán, Enrique; Meli, Roberto; 1999; "Diseño sísmico de edificios"; Limusa; p. 317*



*Boatwright, J; K. Thywissen, and L. Seekins, 2001, "Correlation of ground motion and intensity for the 17 January 1994 Northridge, California earthquake", Bulletin of the Seismological Society of America, 91, pp. 739-752.*

*Bourgois, J; Michaud, F; 1991; "Active fragmentation of the North American plate at the Mexican triple-junction area off Manzanillo"; Geo. Mar. Lett. 11, 59-65.*

*Bourgois, J; Michaud, F; 1991; "Active fragmentation of the North American plate at the Mexican triple-junction area off Manzanillo"; Geo. Mar. Lett. 11, 59-65.*

*Bufaliza, M; 1984; "Atenuación de intensidades sísmicas con la distancia en sismos Mexicanos"; Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.*

*Couch, R; Woodcock, S; 1981; "Gravity and structure of the continental margins of southwestern of Mexico and northwestern Guatemala"; Journal Geophysical Research, 86, 1829-1840.*

*Currie, C. A.; Hyndman, R. D.; Wang, K.; 2002; "The thermal structure of warm subduction zones and implications for seismic hazard: Mexico versus Cascadia"; abstracts of the 97th annual meeting, Seismological Research Letters, 73, no. 2 (200204): 225.*

*DeMets, C., and D. S. Wilson; 1997; "Relative motions of the Pacific, Rivera, North American, and Cocos plates since 0.78 Ma"; J. Geophys. Res., 102(B2), 2789-2806.*

*DeMets, C; Gordon, R. G; Argus, D. F; Stein, S; 1990; "Current plate motions"; Geophysical Research Journal International, 101, 425-478.*

*DeMets, C; Gordon, R. G; Argus, D. F; Stein, S; 1990; "Current plate motions"; Geophysical Research Journal International, 101, 425-478.*

*Del Valle, Enrique C; 1999; "Efecto de los sismos en las construcciones"; páginas 115-124, en Curso sobre diseño y construcción sismorresistente de estructuras; 1999; Secretaría de Gobernación/ Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), 423 paginas.*

*Eissler, H; McNally, K. C; 1984; Seismicity and tectonics of the Rivera plate and implications for the 1932 Jalisco, México, Earthquake"; Journal Geophysical Research, 89, 4520-4530.*

*Esteva L. and Villaverde, R; 1974; "Seismic risk, desing spectra and structural reliability"; Proc. 4P<sup>th</sup> World Conf. on Earthq. Engrg., Rome, pp. 2586-2597.*

*Figuroa, Jesús A; 1974; "Isosistas de Grandes Temblores Ocurridos en la República Mexicana"; Instituto de Ingeniería, UNAM.*



Garcia, D; Singh, S. K; Herraiz, M; Ordaz, M; Pacheco, J. F; 2005; “Inslab earthquakes of central México: peak ground-motion parameters and response spectra”; *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 95, pp. 2272-2282.

Gallipoli, M. R; Mucciarelli, M; Castro, R. R; Monachesi, G; Contri, G; 2004; “Structure, soil-structure response and effects of damage based on observations of horizontal-to-vertical spectral ratios of microtremors”; *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 24, pp. 487-495.

Guéguen, P; Bard, P-Y; Chávez-García, F. J; 2002; “Site-city seismic interaction in Mexico City-like environments: an analytical study”; *Bulletin of the Seismological society of America*, 92, 794-811.

Gutenberg, B. and F. Richter, 1942, “Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 32, No. 3, pp. 163-191.

Gutiérrez, Carlos; 1999; “Efecto de sitio”; paginas 15-17, en *Curso sobre diseño y construcción sismorresistente de estructuras*; 1999; *Secretaria de Gobernación/ Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED)*, 423 paginas.

Gripp, A; Gordon, R; 1990; “Current velocities relative to the hotspots incorporating the NUVEL-1 global plate motion model”; *Geophysical Research Letters*, 17, 1109-1112.

Hershberger, J; 1956, “A comparison of earthquake accelerations with intensity ratings”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 46, pp. 317-320.

Hsu, M. T; 1979, “Seismology”, *Lee-Ming Culture Publication Company, Taipei, Taiwan*, 16-26.

Iglesias, A; Singh, S. K; Pacheco, J. F; Ordaz, M; 2002; “A source and wave propagation study of the Copalillo, Mexico, earthquake of 21 July 2000 (Mw 5.9): Implications for seismic hazard in Mexico city from inslab earthquakes”; *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 92, No. 3, pp 1060-1071.

Ishimoto, M; 1932, “Echelle d'intensité sismique et accélération maxima”, *Bulletin Earthquake Res. Inst.* 10:614-626.

Jennings, P. C; 1985; “Ground motions parameters that influence structural damage” in R. E. Scholl and J. L. King eds. *Strong Motion Simulation and Earthquake Engineering Applications-A Technological Assessment*. *Earthquake Engineering Research Institute Publication*, No. 85-02.

Johnson, C. A; Harrison, C. G. A; 1989; “Tectonics and volcanism in central Mexico: A Landsat thematic mapper perspective”; *Remote Sens. Environ.* 28, 273-286.



- Kanai, Kiyoshi; 1983; "Engineering seismology"; University of Tokio Press; 249 p.*
- Kanamori, H; Stewart, G. S; 1978; "Seismological aspects of the Guatemala earthquake of February 4, 1976"; Journal Geophysical Research, 83, 3427-3434.*
- Kawasumi, H; 1951, "Measures of earthquake danger and expectancy of maximum intensity throughout Japan as inferred from the seismicity activity in historical times", Bulletin Earthquake Res. Inst. 29, 469-82.*
- Kostoglodov y Pacheco, 1999, "Cien años de sismicidad en México", Instituto de Geofísica, UNAM., Poster.*
- Lay, Thorne and Terry C. Wallace, 1995, "Modern Global Seismology", International Geophysics Series, Ed. Renata Dmowska and James R. Holton, Academic Press, pp. 521*
- Lomnitz, C; 1970, "Major earthquakes and tsunamis in Chile during the period 1535 to 1955", Geologische Rundschau, 59, 938-960.*
- Lonsdale, P; 1995; "Segmentation and Disruption of the East Pacific Rise in the mouth of the Gulf of California"; Marine Geophysical Researches, 17, 323-359.*
- Mammerickx, J., and K. D. Klitgord; 1982; "Northern East Pacific Rise: Evolution From 25 m.y. B.P. to the Present"; J. Geophys. Res., 87(B8), 6751-6759.*
- Mammerickx, J. and I. S. E. Carmichael; 1989; "A spreading incursion in the continent near the Rivera plate and Jalisco Block?" (abstract), Eos Trans. Am. Geophys. Union, 70, pp. 1318-1319.*
- Marone, C; and Scholz, C. H; 1988; "The depth of seismic faulting and the upper transition from stable to unstable slip regimes"; Geophysical Research Letters, 15, 621-624.*
- Medvedev, S. V; W. Sponheuer, and V. Karnik; 1963; "Seismische Scala"; Inst für Bodendynamik und Erdbebenforschung, Jena, 6 pp.*
- Michaud. F., J. Dañobeitia, R. Bartolomé, R. Carbonell, L. Delgado Argote, D. Cordoba and T. Monfret; 2001; "Did the East Pacific rise subduct beneath the North America plate (western Mexico)?"; Geo-Marine Letters, 20, 168-173.*
- Miranda, Eduardo [1]; 1999; "Respuestas de edificios al movimiento sísmico"; páginas 41-61, en Curso sobre diseño y construcción sismorresistente de estructuras; 1999; Secretaría de Gobernación/ Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), 423 paginas.*



Miranda, Eduardo [2]; 1999; “Conceptos básicos sobre interacción dinámica suelo-estructura”; paginas 103-107, en *Curso sobre diseño y construcción sismorresistente de estructuras*; 1999; Secretaría de Gobernación/ Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), 423 paginas.

Moehle, J. P; Mahin, S. A; 1991; “Observations on the behavior of reinforced concrete buildings during earthquakes”; American Concrete Institute, SP-127, *Earthquake-Resistant Concrete Structures – Inelastic Response and Design*.

Neumann, F; 1954, “Earthquake intensity and related ground motion”, Univ. Press, Seattle, Washington, 77 pp.

Nixon, G.T; 1982; “The relationship between Quaternary volcanism in central Mexico and the seismicity and structure of subducted ocean lithosphere”; *GSA Bulletin*, 93 , pp. 514-523.

Ordáz, Mario; 1999; “Sismicidad y riesgo sísmico”; paginas 19-38, en *Curso sobre diseño y construcción sismorresistente de estructuras*; 1999; Secretaría de Gobernación/ Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), 423 páginas.

Ordaz, M; Jara, J. M; Singh, S. K; 1989; “Riesgo sísmico y espectros de diseño en el estado de Guerrero”; *Memoria del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Acapulco, Pág. D40-D56.

Pardo, Mario; Suárez, Gerardo; 1995; “Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern México: Seismic and tectonic implications”; *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100, No. B7, pages 12357-12373.

Pardo, Mario; Suárez, Gerardo; 1993; “Steep subduction geometry of the Rivera plate beneath the Jalisco block in Western México”; *Geophysical Research Letters*, 20, pages 2391-2394.

Poli, Stefano; Schmidt, Max W; 2002; “Petrology of subducted slabs”; *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 30, 207-235.

Reiter, Leon; 1990; *Earthquake Hazard Analysis, Issues and Insight*; New York, Columbia University Press, New York, 254 p.

Richter, C. F; 1958; “Elementary seismology”; *Freeman*.

Singh, S. K; Pacheco, J; Ordaz, M; Kostoglodov, V; 2000; “Source time function and duration of Mexican earthquakes”; *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90, 2, pp. 468-482.



Singh, S. K; Mena, E; Castro, R; 1988; “Some aspects of source characteristics of 19 September 1985 earthquake and ground motion amplification in and near Mexico city from strong motions data”; *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 78, No. 2, pp. 451-477.

Singh, S. K; Ponce, L; Nishenko, S. P; 1985; “The great Jalisco, México, earthquake of 1932: Subduction of the Rivera plate”; *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75, 1301-1313.

Singh, S. K; Pardo, M; 1993; “Geometry of the Benioff zone and state of stress in the overriding plate in central Mexico”; *Geophysical Research Letters*; 20, 1483-1486.

Singh, S. K; Mena, E; Castro, R; Carmona, C; 1987; “Empirical prediction of ground motion in Mexico city from costal earthquakes”; *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 77, No. 5, pp. 1862-1867.

Suárez, Gerardo; Monfret, T; Wittlinger, G; David, C; 1990; “Geometry of subduction and depth of the seismogenic zone in the Guerrero gap, México”; *Nature*, 345, 336-338.

Tejeda Jácome, Juan de la Cruz y Chávez García, Francisco J; 2007; “Ecuaciones empíricas para la estimación de movimientos del terreno en Colima a partir de acelerogramas”; *Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Ixtapa-Zihuatanejo*, p. 14

Tanner, James G, and Shedlock, Kaye M; 2004; “Seismic hazard maps of Mexico, the Caribbean, and Central and South America”, *Tectonophysics*, 390, 159-175.

Trifunac, M. D and A. G. Brady, 1975, “On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 65, No. 1, pp. 139-162.

Wald, David J; Vincent Quitoriano, Thomas H. Heaton and Hiroo Kanamori, 1999, “Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified Mercalli intensity in California”; *Earthquake Spectra*, Vol. 15, No. 3, pp. 557-564.

Wessel, .P and Smith, H. F. W, 2003, “The Generic Mapping Tools, GMT”, *School of Ocean and Earth Science and Technology, University of Hawaii at Manoa*.

Wood, H. O. and F. Neumann, 1931, “Modified Mercalli Intensity scale of 1931”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 21: 277-283.

Yih-Min Wu, Ta-liang Teng, Tzay-Chyn Shin, and Nai-Chi Hsiao, 2003, “Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and intensity in Taiwan”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 93, No. 1, pp. 386-396.



*Youngs, R. R; Chiou, S. J; Silva, W. J; Humprey, J. R; 1997; “Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes”; Seismological Research Letters, Vol. 68, No. 1, pp. 58-73.*

Zúñiga, R; Guzmán, M; 1994; “Main seismogenic source zones in Mexico”, Technical Report, Seismic Hazard Project, IPGH.

*Zúñiga, R. Suárez, G. Ordáz, M. y García-Acosta, V; 1997; “Peligro sísmico en Latinoamérica y el Caribe: Capítulo2: México.”, Instituto Panamericano de Geografía e Historia.*



## Apéndice A.- Trazas

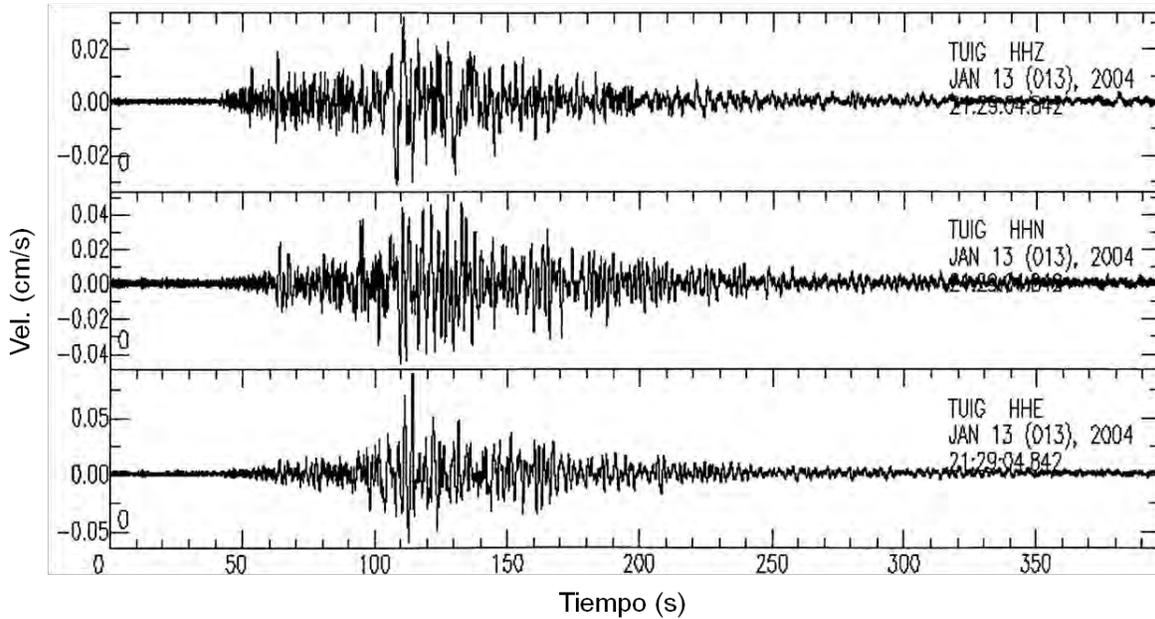


Figura A1.- Trazas de velocidad para el evento del 13-01-2004, en la estación TUIG.

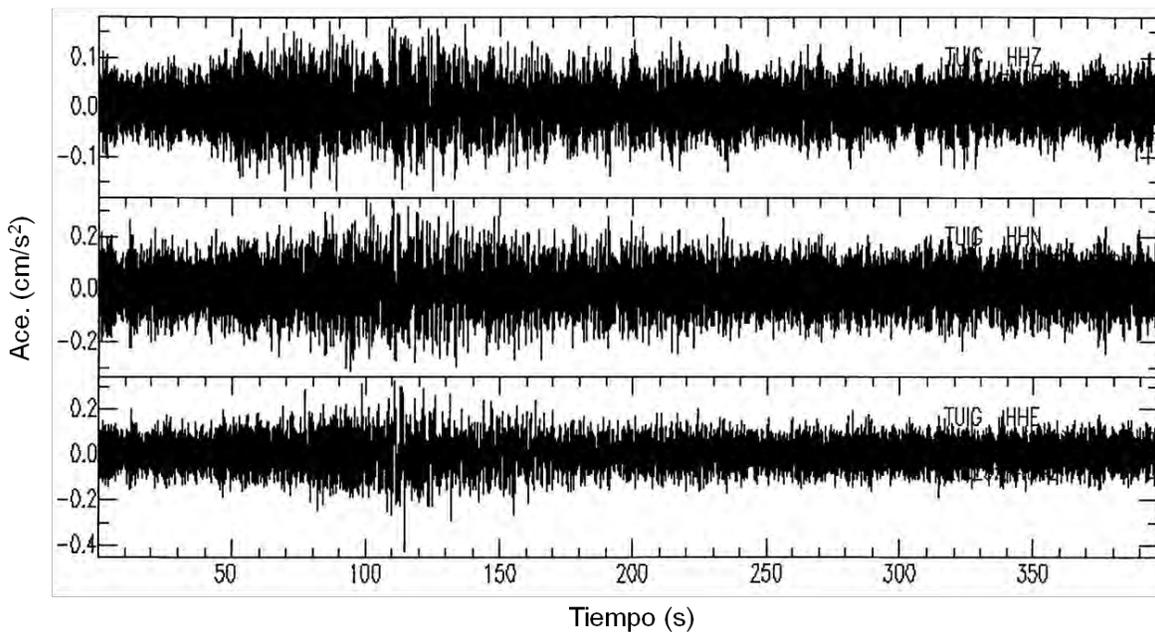


Figura A2.- Trazas de aceleración derivada de la velocidad para el evento del 13-01-2004, en la estación TUIG.

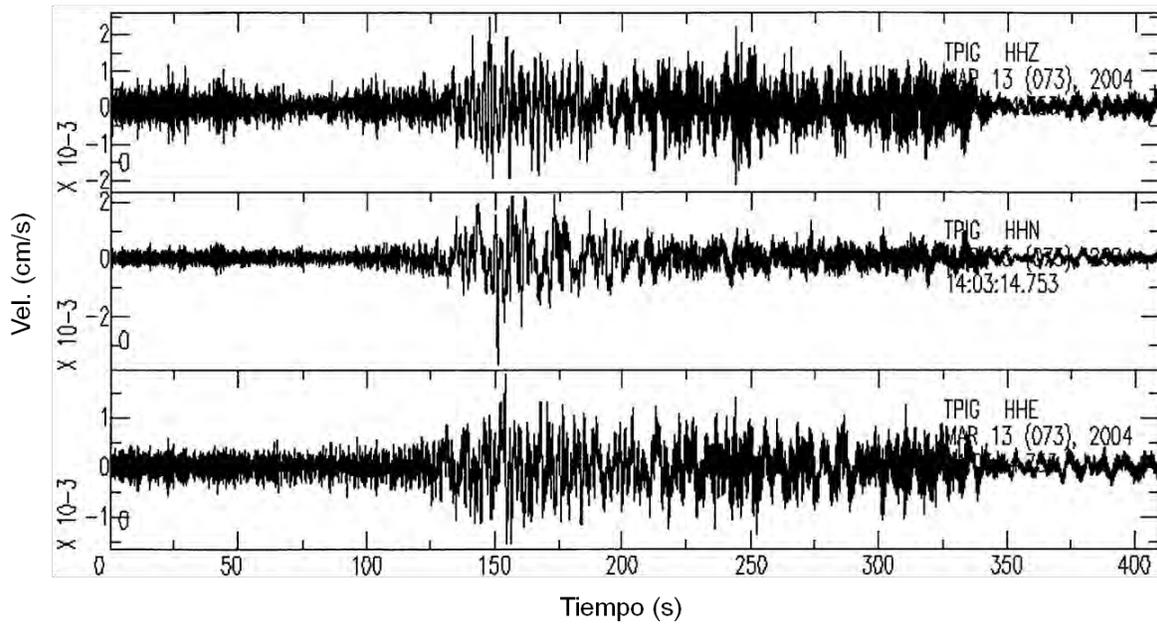


Figura A3- Trazas de velocidad para el evento del 13-03-2004, en la estación TPIG.

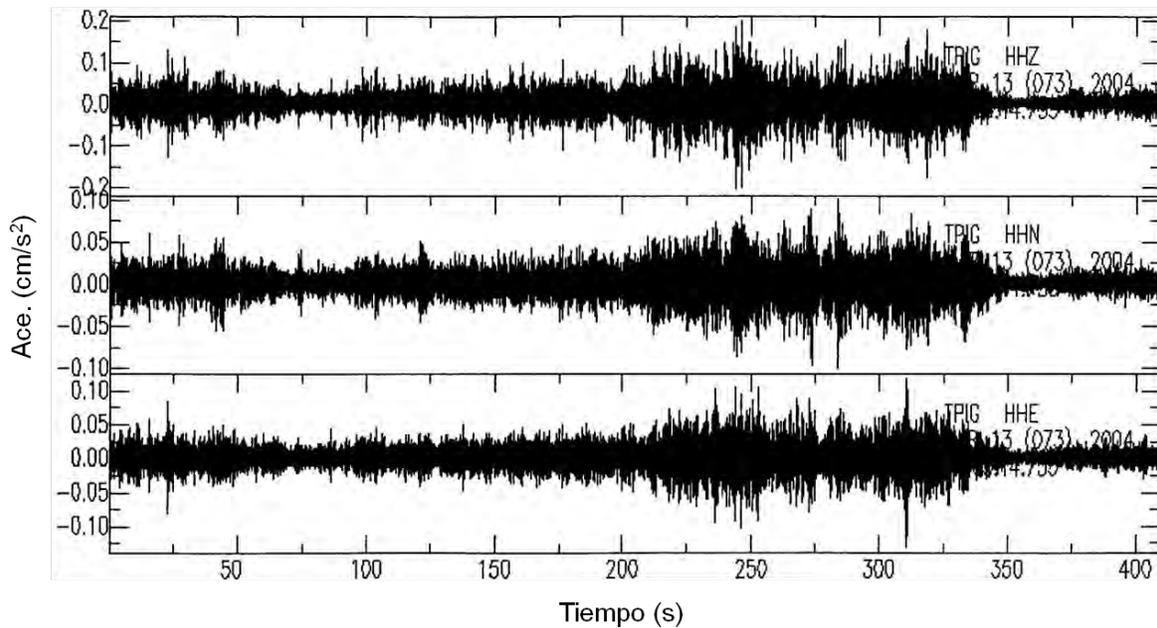


Figura A4.- Trazas de aceleración derivada de la velocidad para el evento del 13-03-2004, en la estación TPIG.

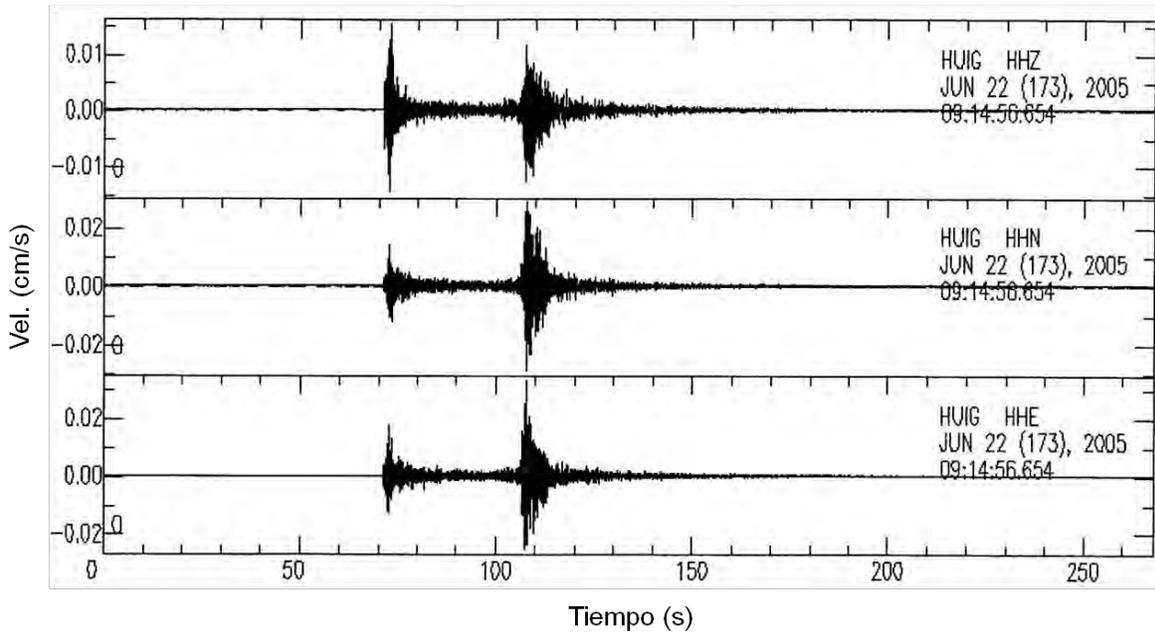


Figura A5.- Trazas de velocidad para el evento del 22-06-2005, en la estación HUIG.

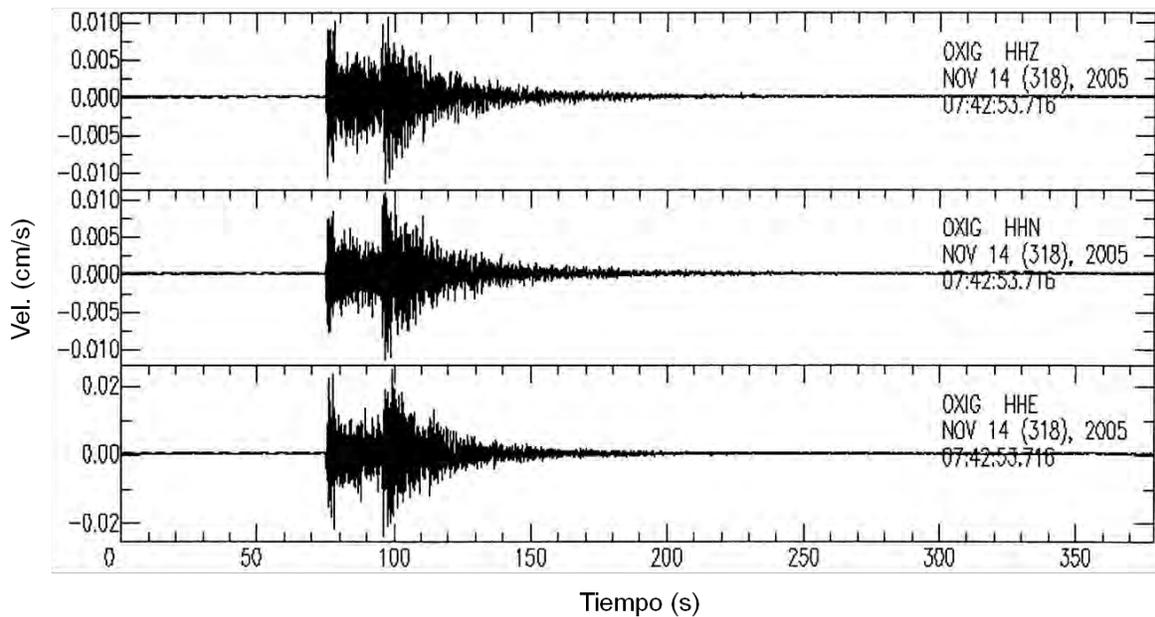


Figura A6.- Trazas de velocidad para el evento del 14-11-2005, en la estación OXIG.

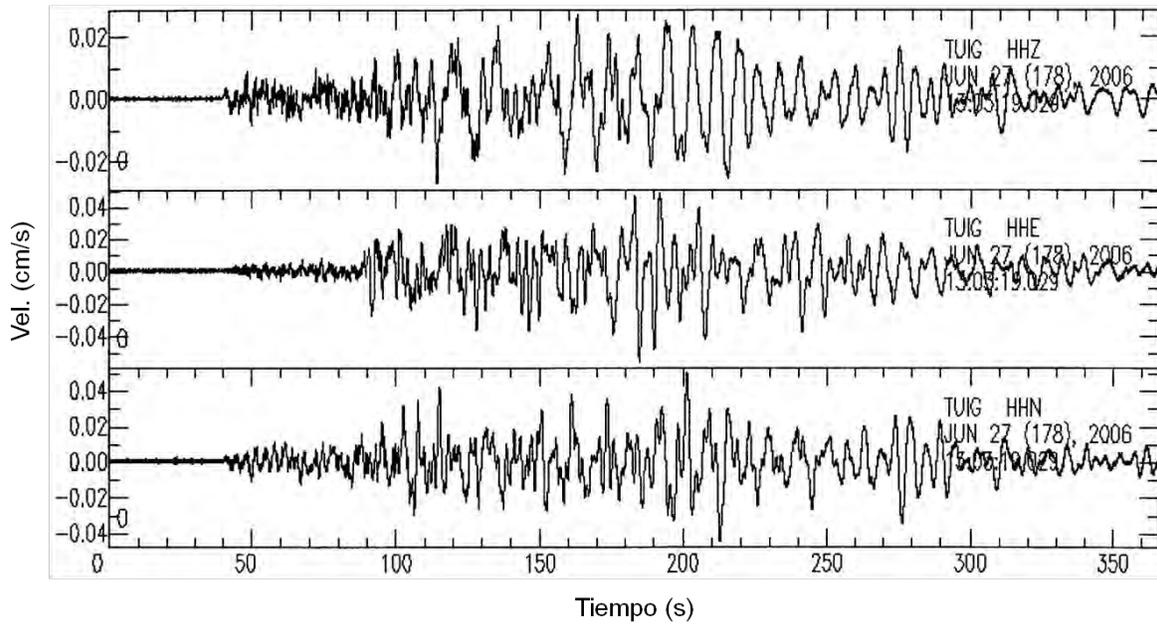


Figura A7.- Trazas de velocidad para el evento del 27-06-2006, en la estación TUIG.

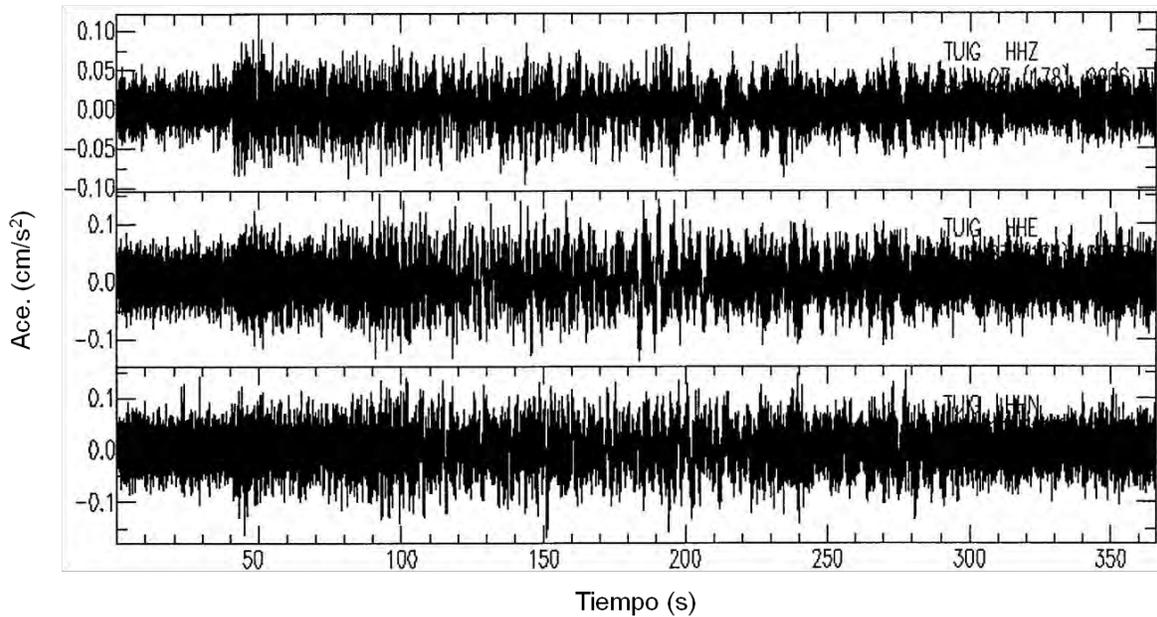


Figura A8.- Trazas de aceleración derivada de la velocidad para el evento del 27-06-2006, en la estación TUIG.

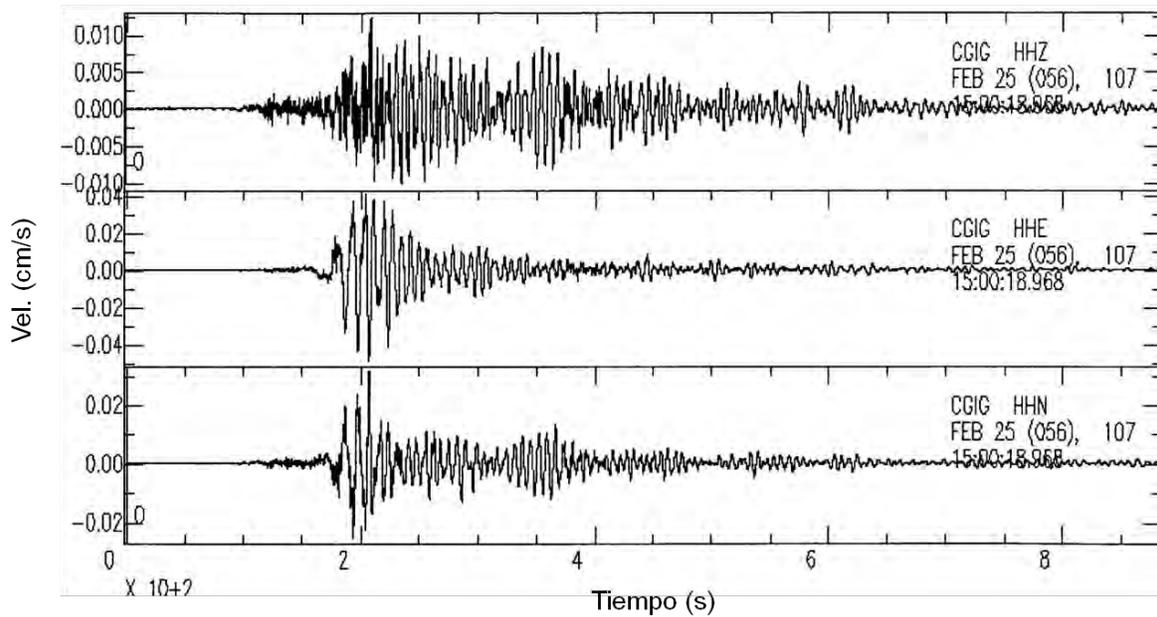


Figura A9.- Trazas de velocidad para el evento del 25-02-2007, en la estación CGIG.

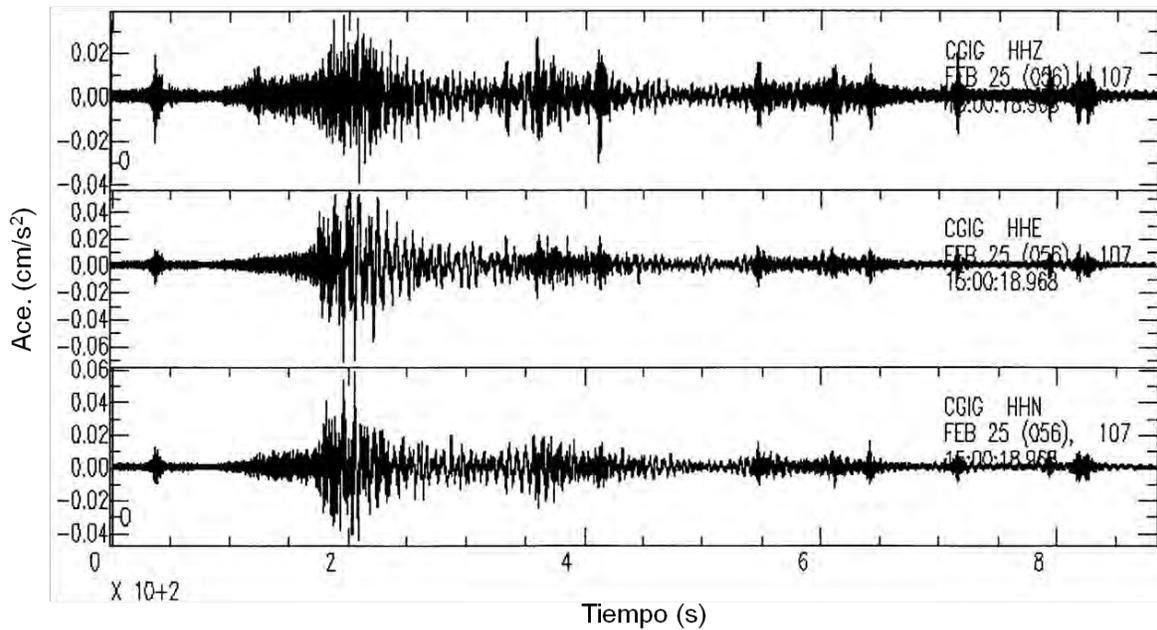


Figura A10.- Trazas de aceleración derivada de la velocidad para el evento del 25-02-2007, en la estación CGIG.

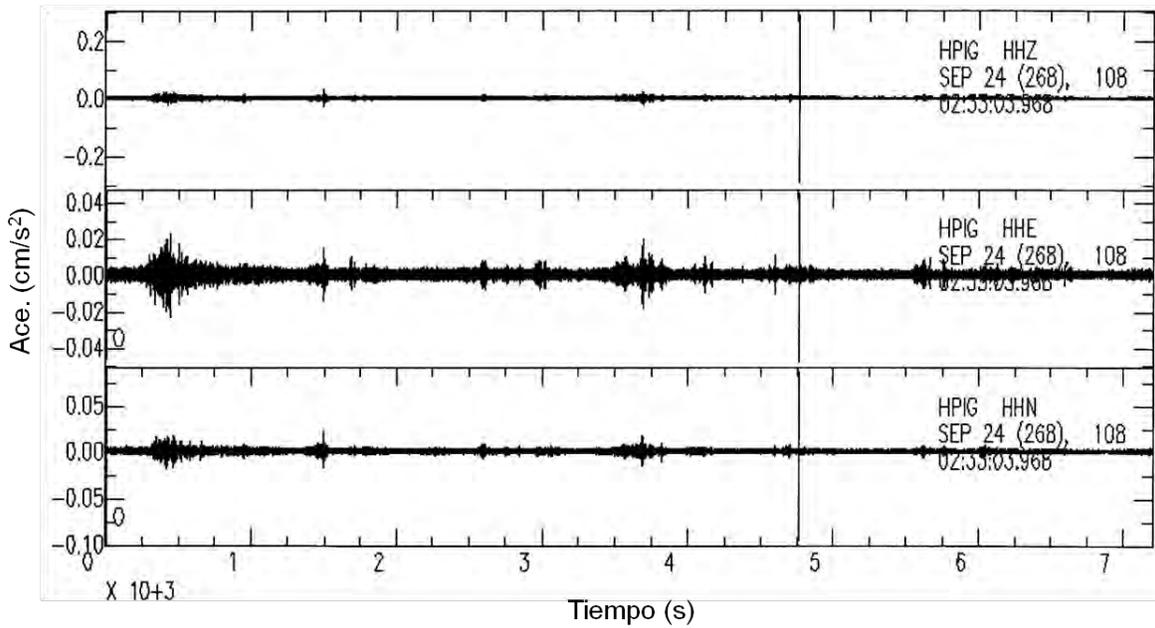


Figura A11.- Trazas de aceleración derivada de la velocidad para el evento del 24-09-2008, en la estación HPIG.

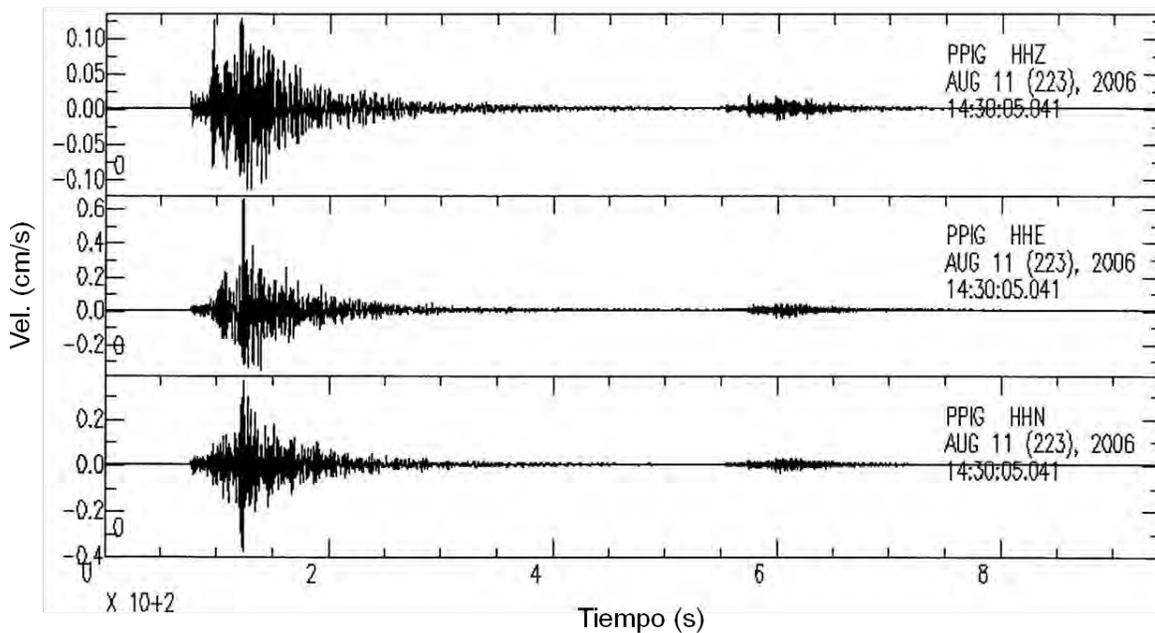


Figura A12.- Trazas de velocidad para el evento del 11-08-2006, en la estación PPIG.

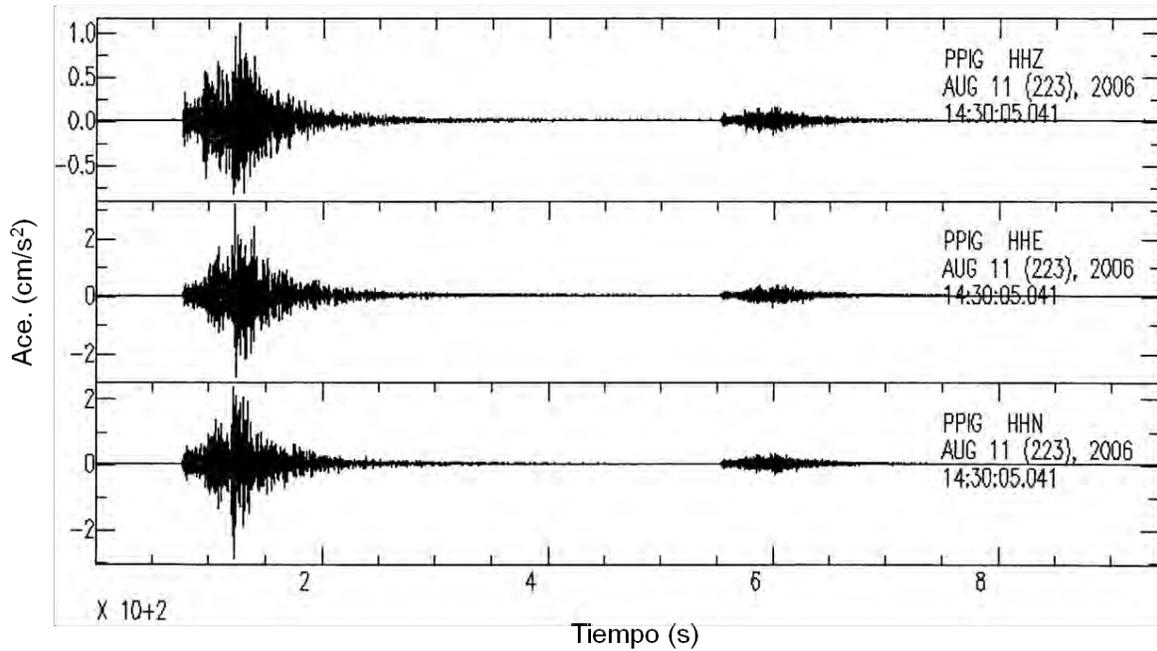


Figura A13.- Trazas de aceleración derivada de la velocidad para el evento del 11-08-2006, en la estación PPIG.



### Apéndice B.- Perfiles

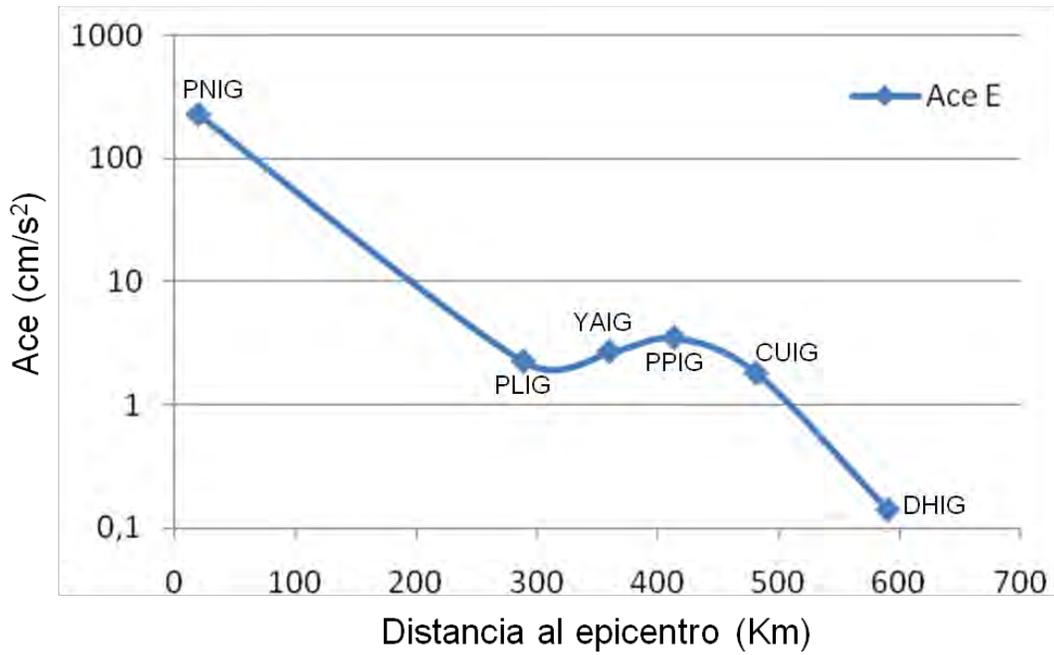


Figura B1.- Perfil hacia el Centro del país para el evento del 14-06-2004, en la componente Este.

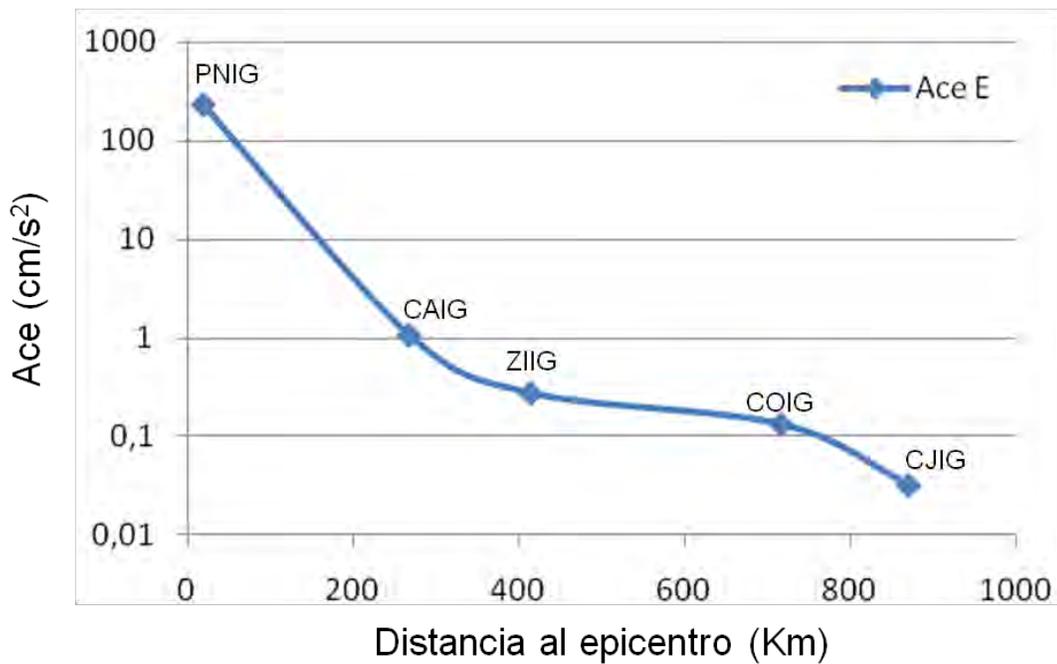


Figura B2.- Perfil sobre la costa del Pacífico para el evento del 14-06-2004, en la componente Este.

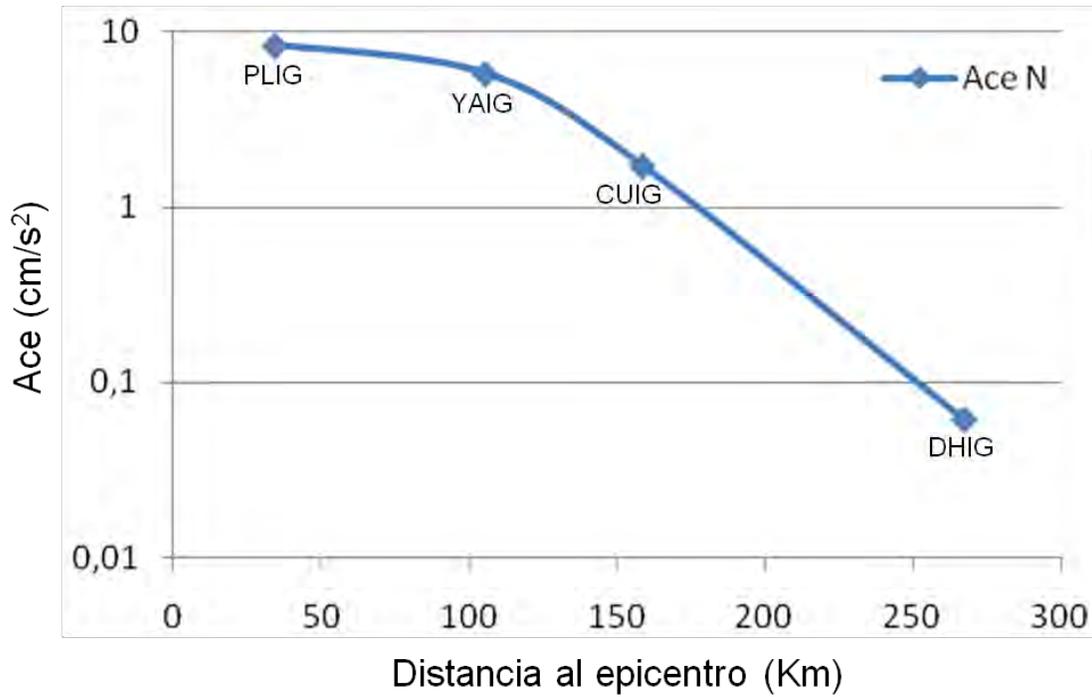


Figura B3.- Perfil hacia el Noreste del país para el evento del 28-10-2004, en la componente Norte.

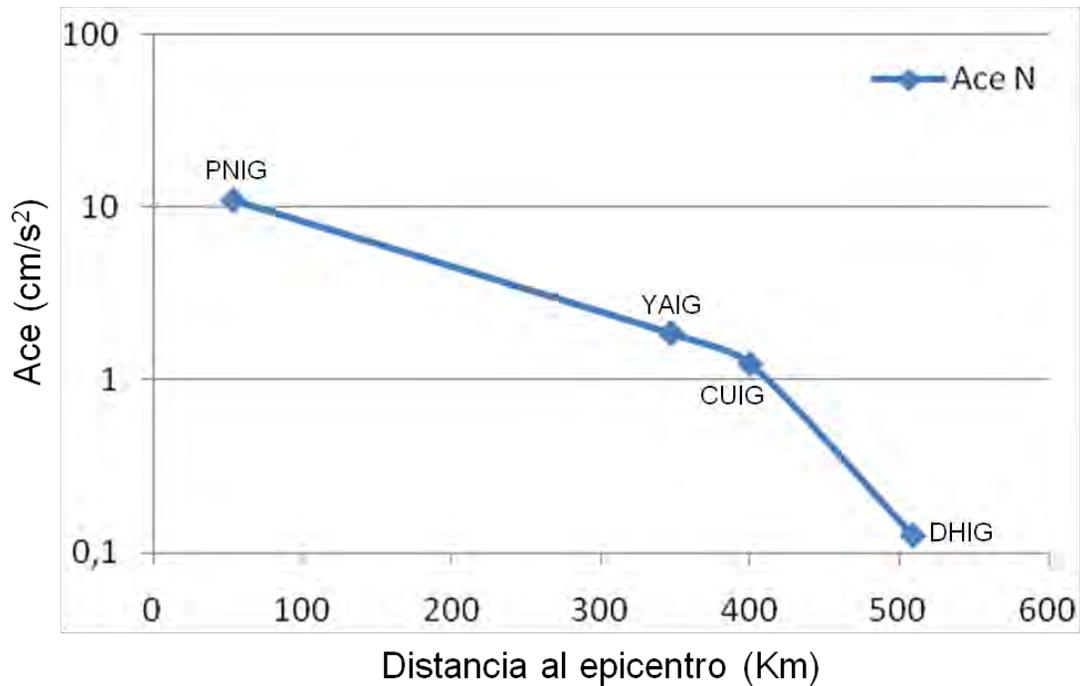


Figura B4.- Perfil hacia el Centro del país para el evento del 14-08-2005, en la componente Norte.

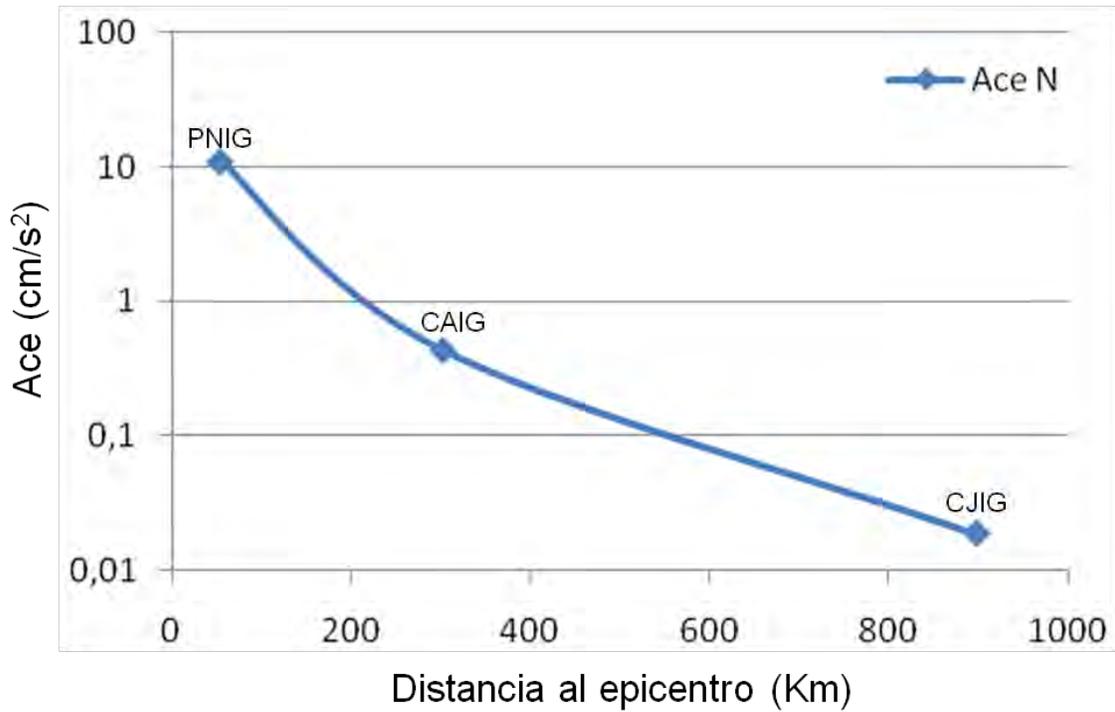


Figura B5.- Perfil sobre la costa del Pacífico Oeste para el evento del 14-08-2005, en la componente Norte.

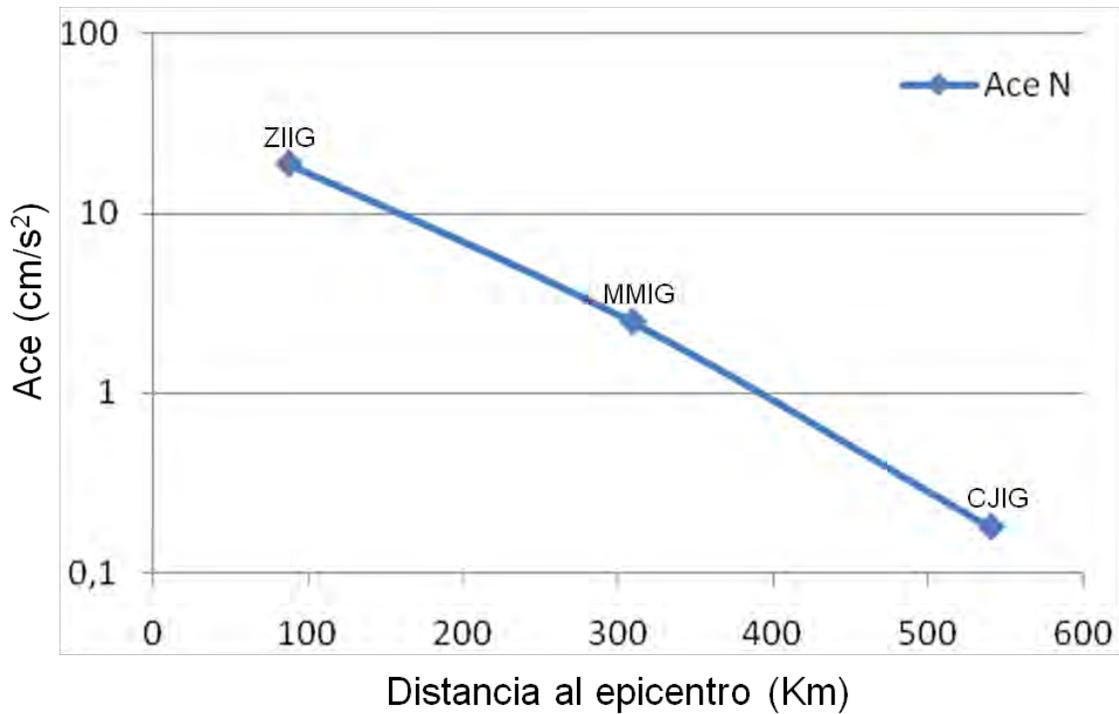


Figura B6.- Perfil sobre la costa del Pacífico Oeste para el evento del 11-08-2006, en la componente Norte.

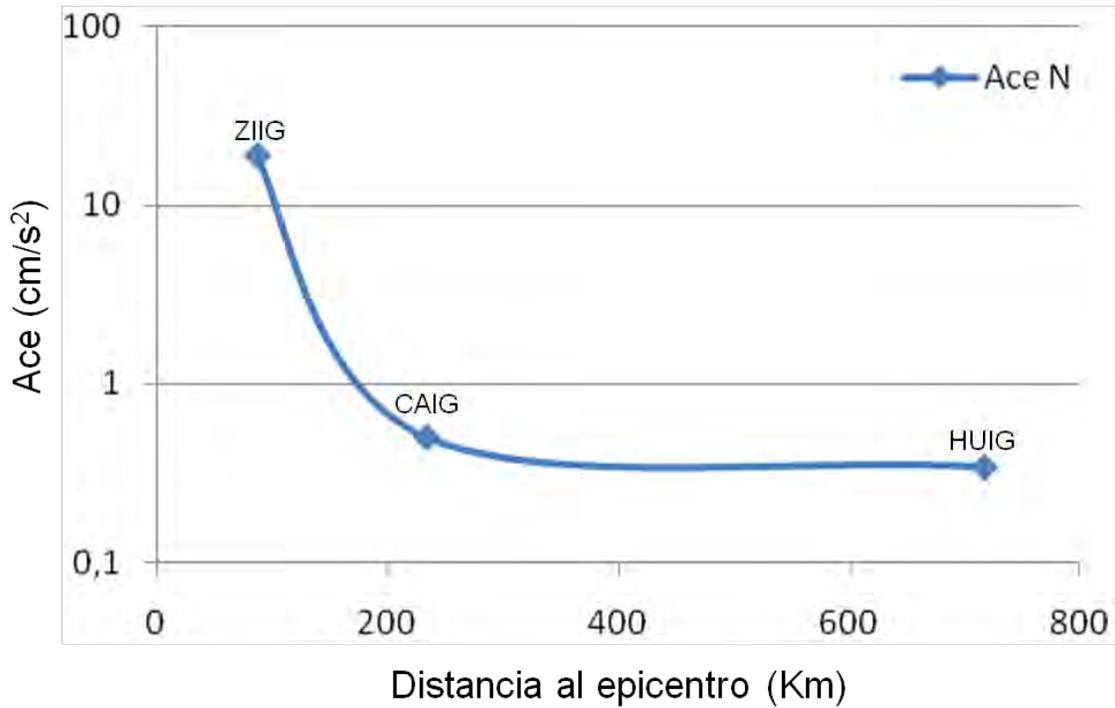


Figura B7.- Perfil sobre la costa del Pacífico Este para el evento del 11-08-2006, en la componente Norte.

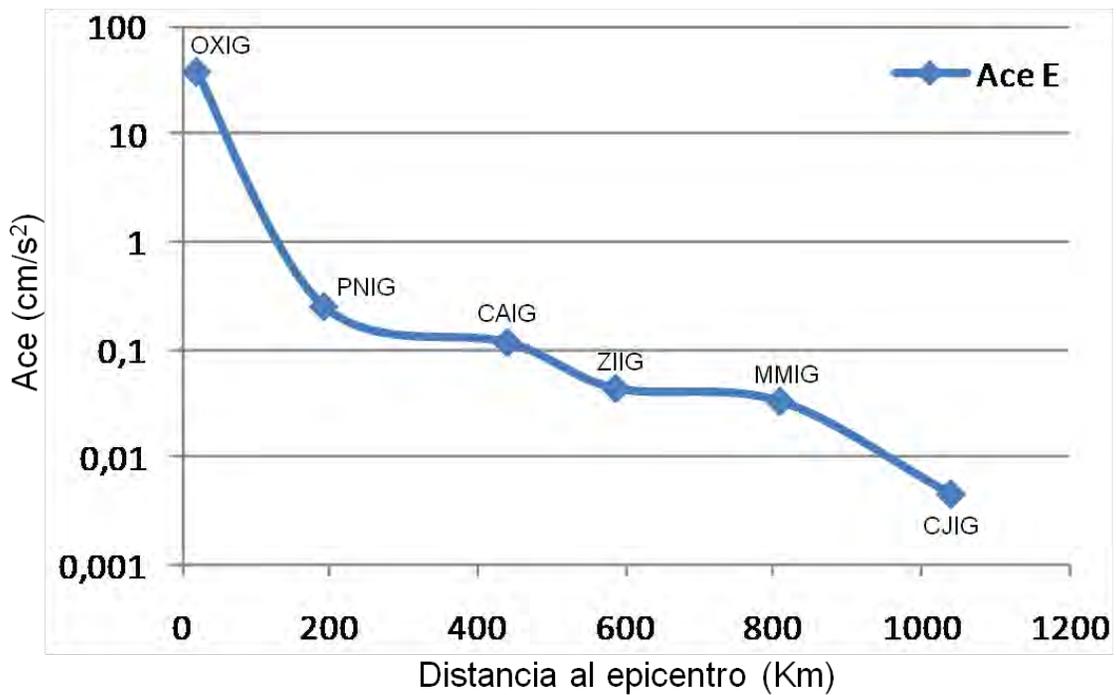


Figura B8.- Perfil sobre la costa del Pacífico para el evento del 04-05-2007, en la componente Este.

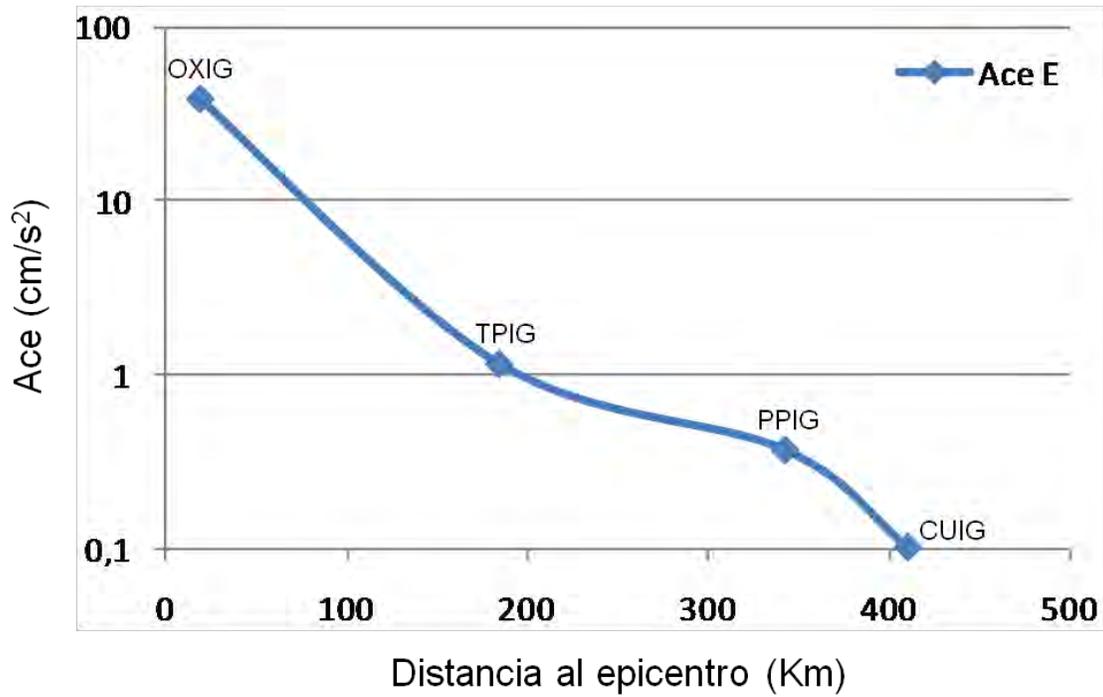


Figura B9.- Perfil hacia el Centro del país para el evento del 04-05-2007, en la componente Este.

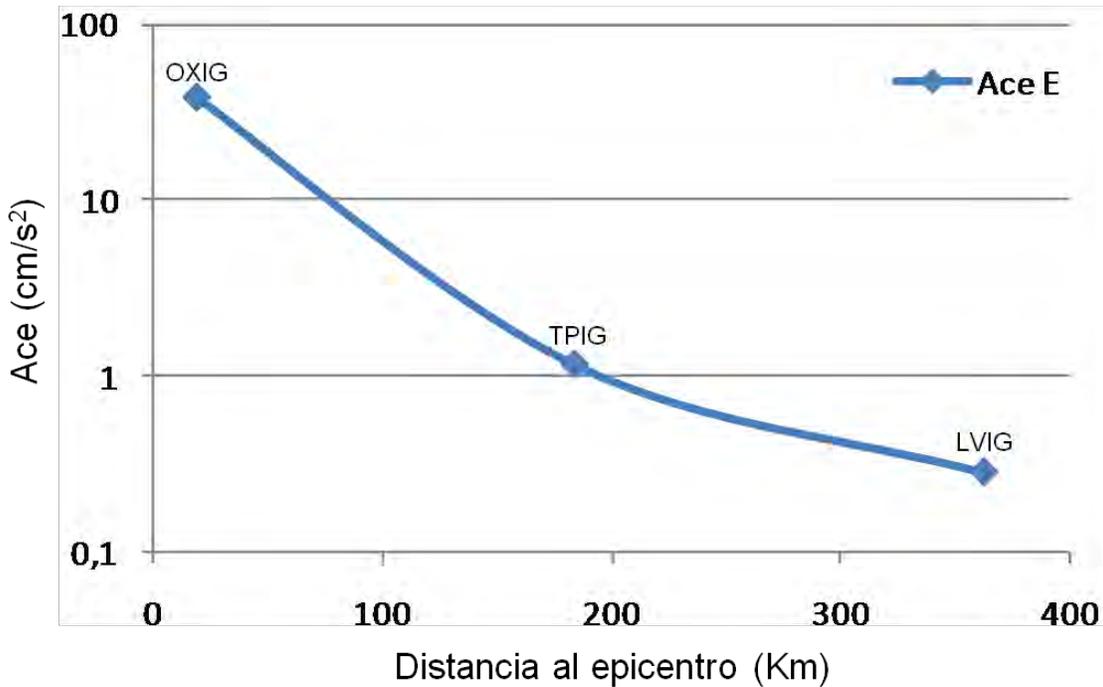


Figura B10.- Perfil hacia el Golfo de México para el evento del 04-05-2007, en la componente Este.

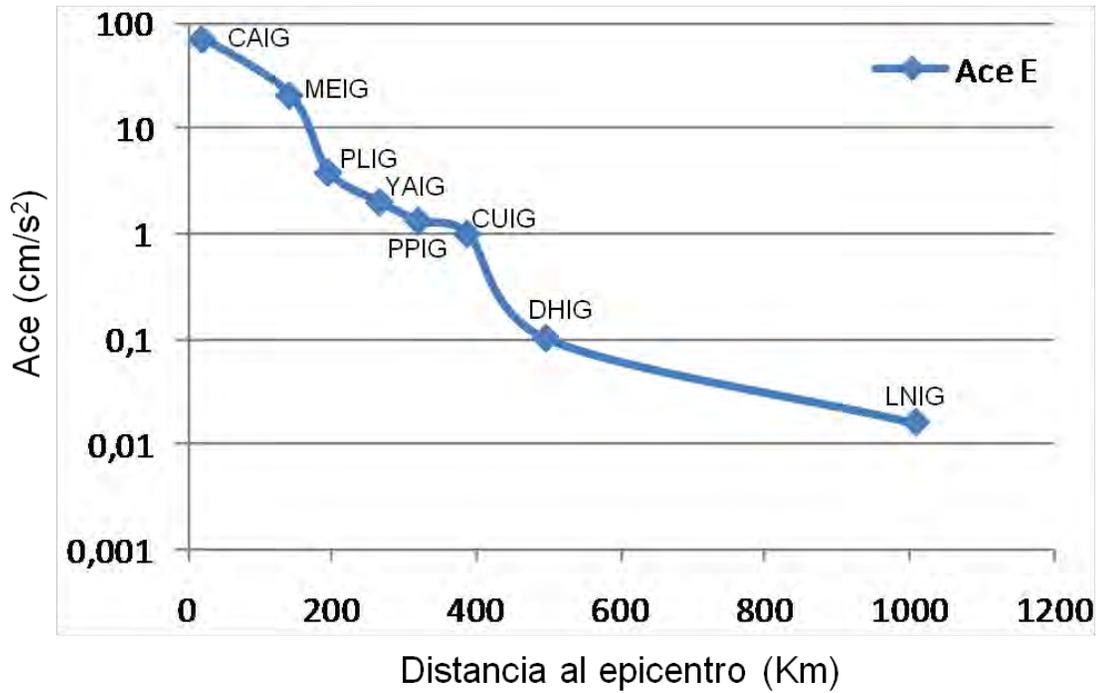


Figura B11.- Perfil hacia el Norte del país para el evento del 06-11-2007, en la componente Este.

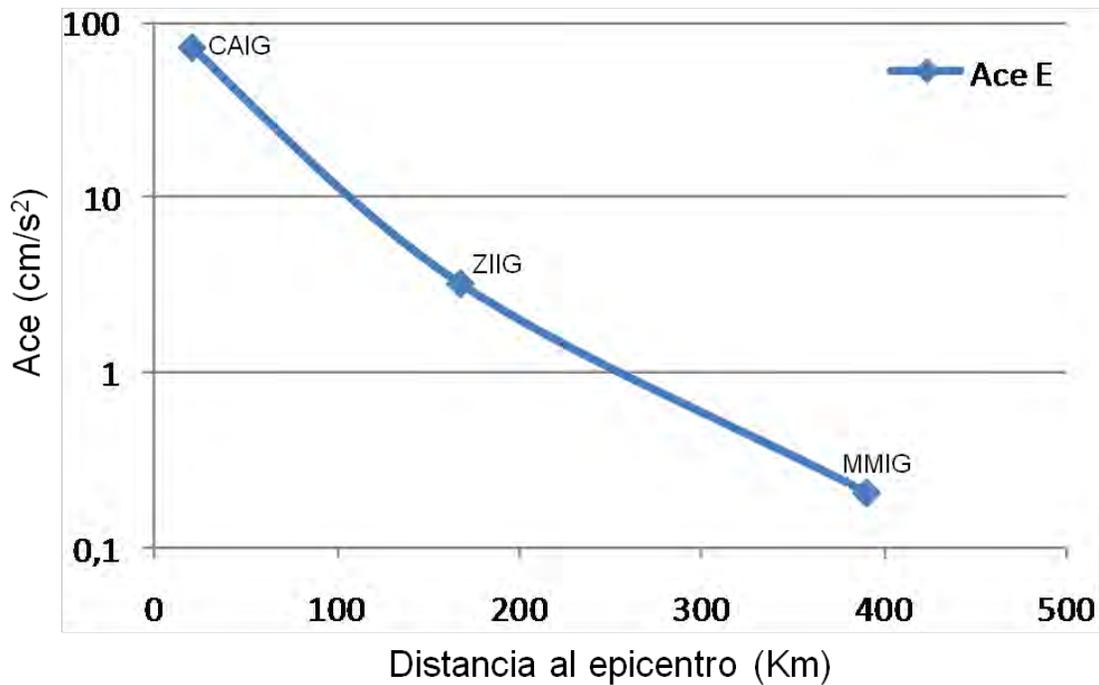


Figura B12.- Perfil sobre la costa del Pacífico Oeste para el evento del 06-11-2007, en la componente Este.

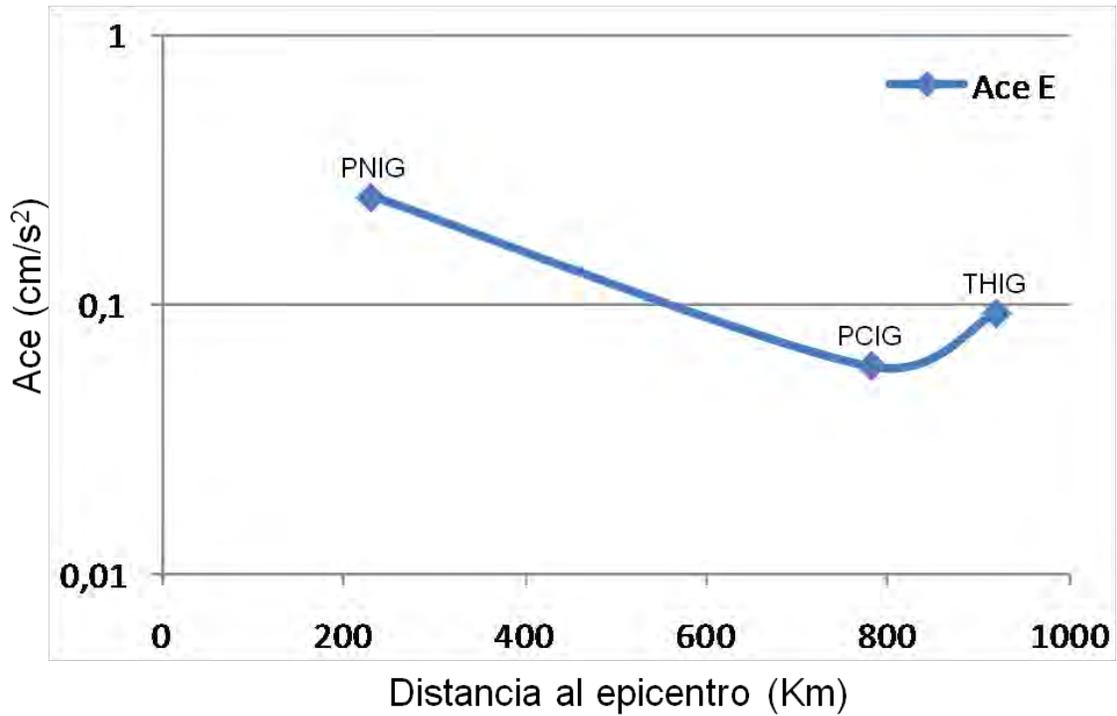


Figura B13.- Perfil sobre la costa del Pacífico Este para el evento del 06-11-2007, en la componente Este.

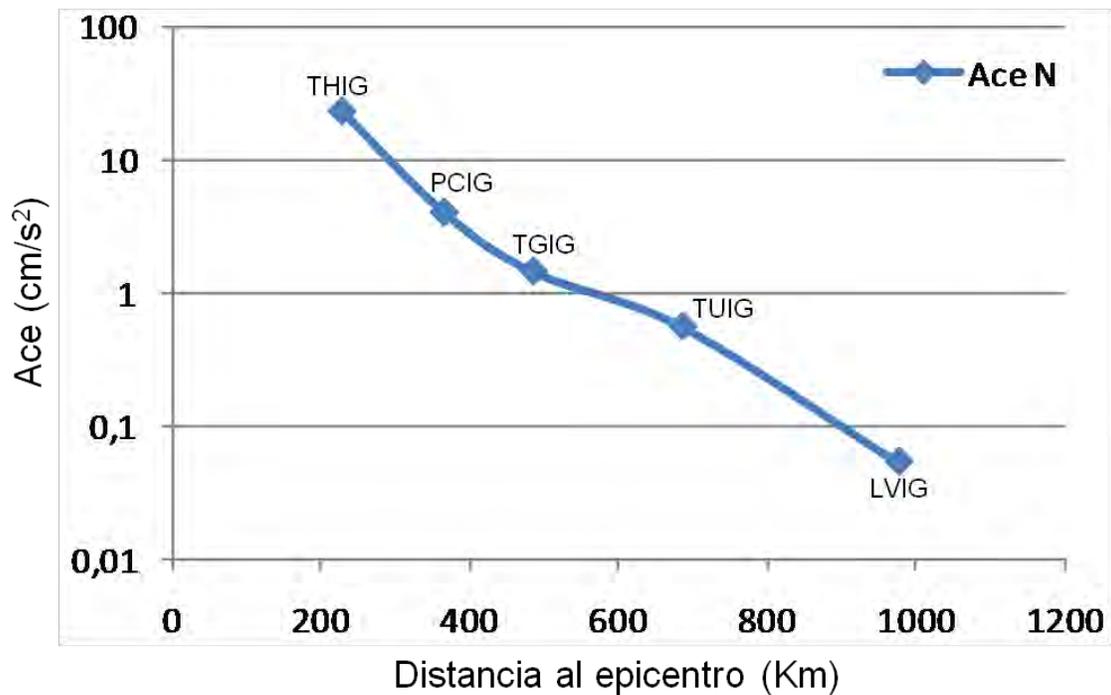


Figura B14.- Perfil hacia el Golfo de México para el evento del 15-04-2008, en la componente Norte.

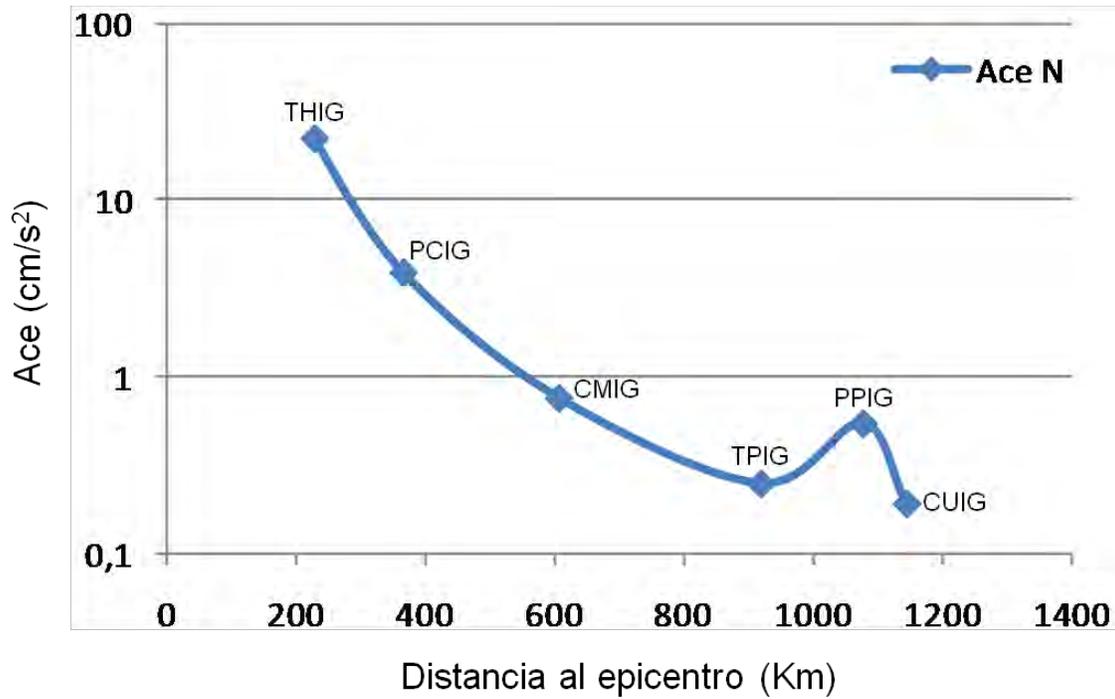


Figura B15.- Perfil hacia el Centro del país para el evento del 15-04-2008, en la componente Norte.

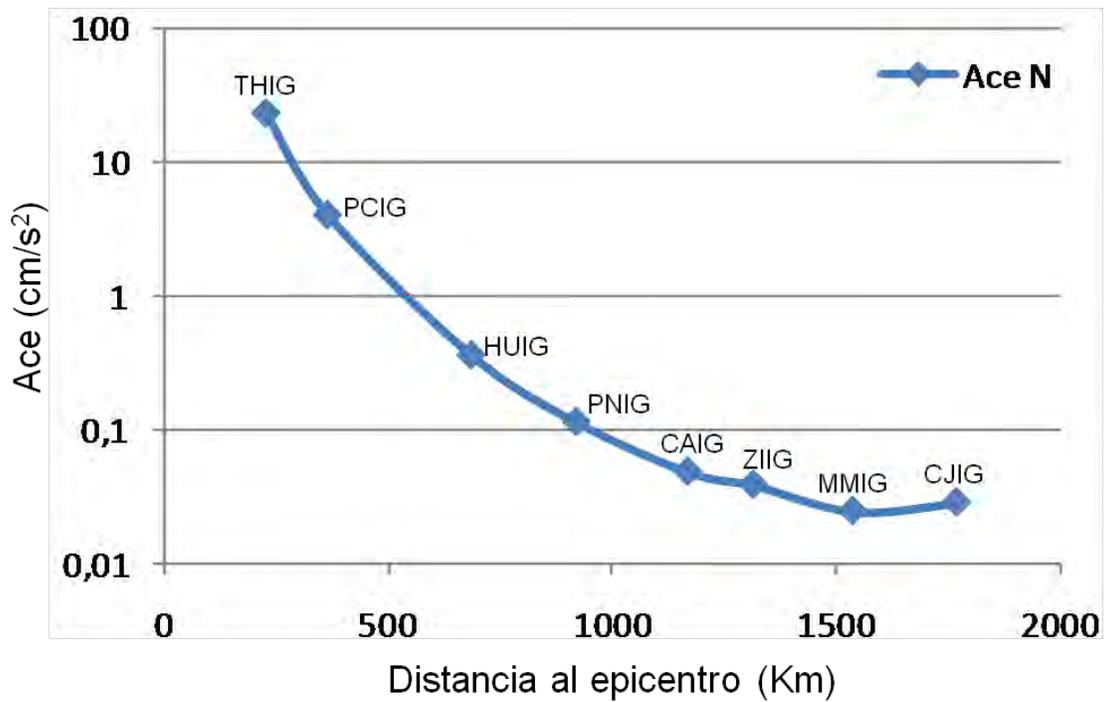


Figura B16.- Perfil sobre la costa del Pacífico para el evento del 15-04-2008, en la componente Norte.

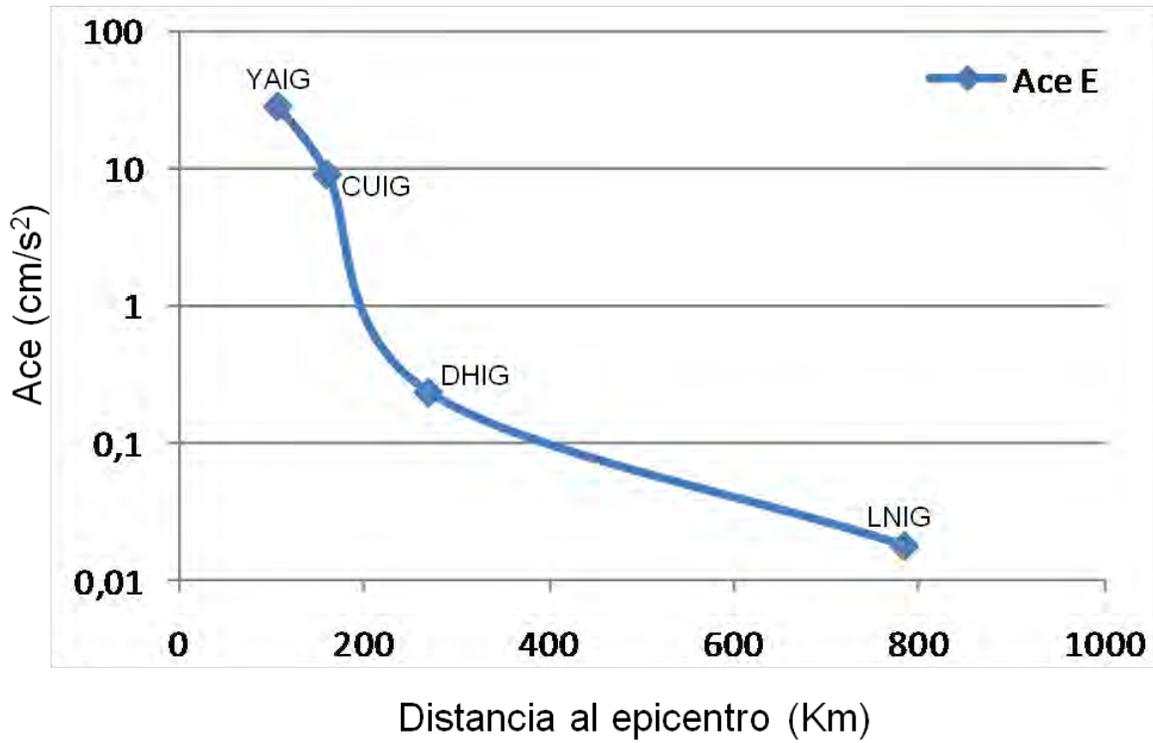


Figura B17.- Perfil hacia el Norte del país para el evento del 22-05-2009, en la componente Este.

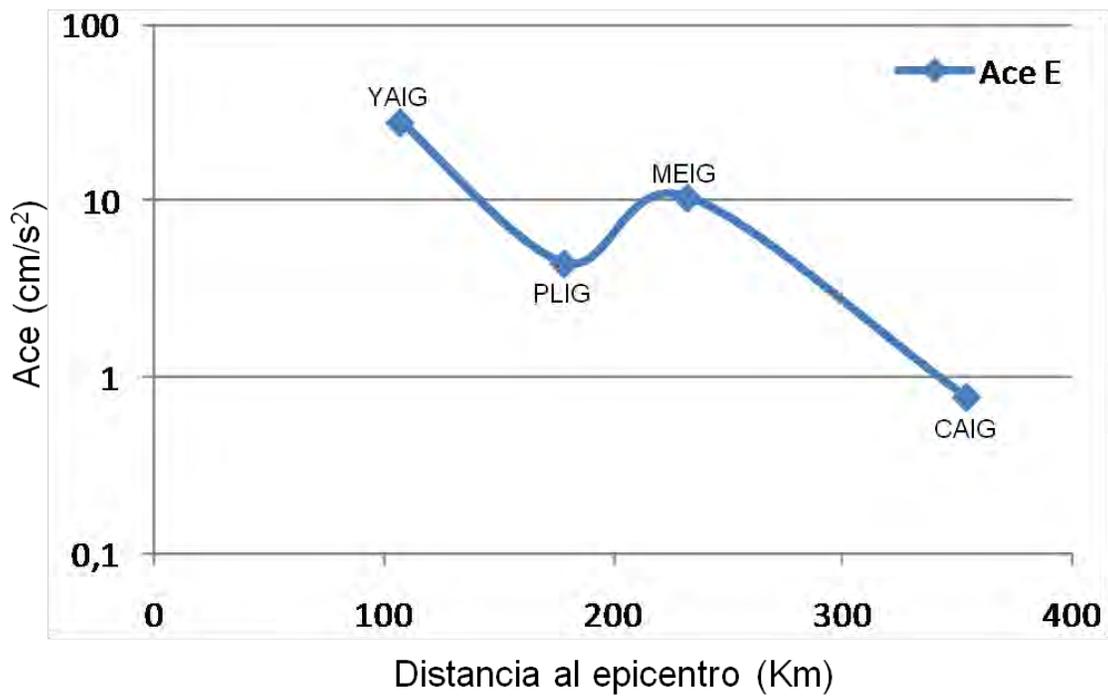


Figura B18.- Perfil hacia el Sur del país para el evento del 22-05-2009, en la componente Este.

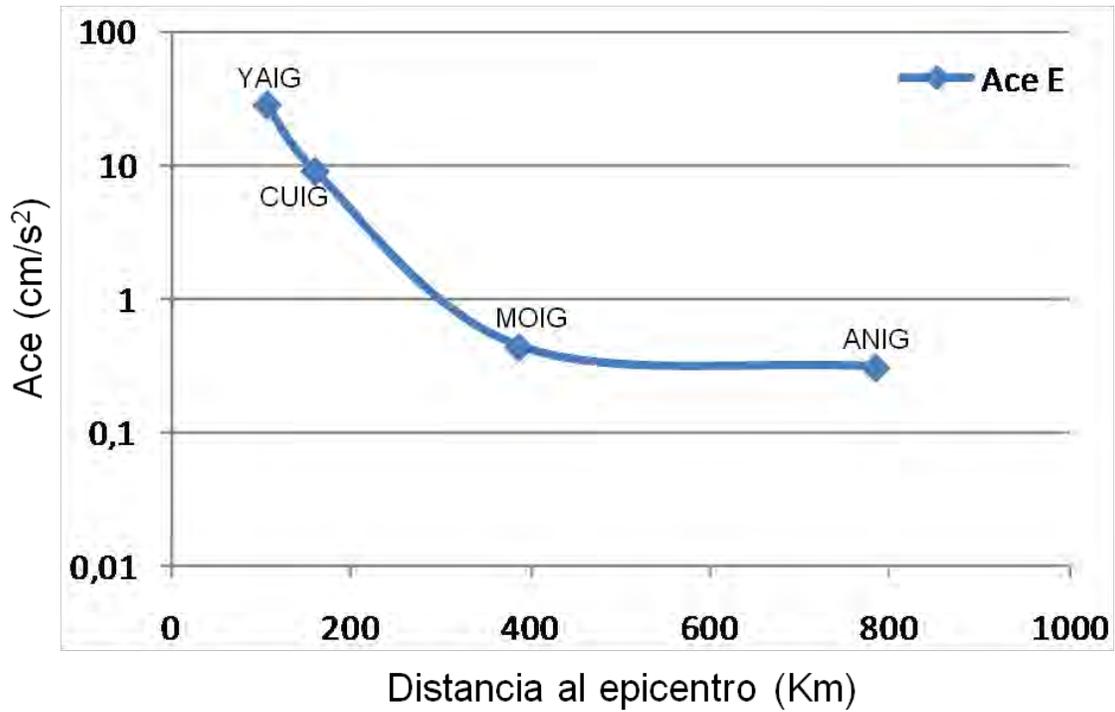


Figura B19.- Perfil hacia el Oeste del país para el evento del 22-05-2009, en la componente Este.

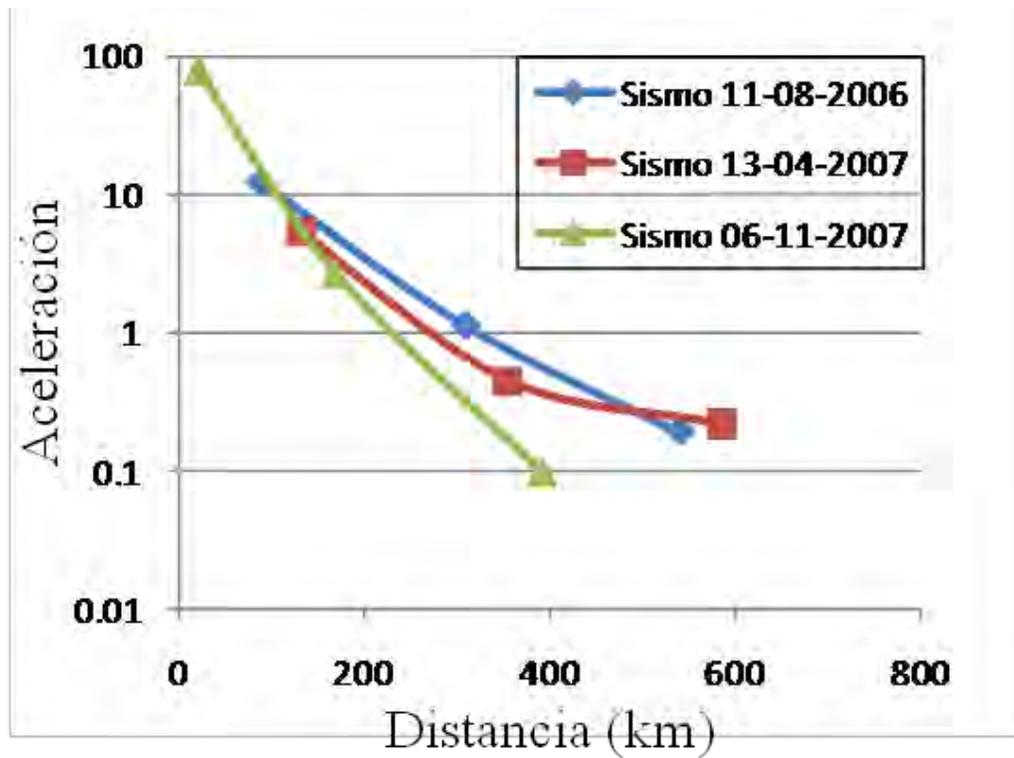


Figura B20.- Perfil a largo de la costa del Pacífico (Oeste), para sismos en el estado de Guerrero, en la componente vertical (Z).

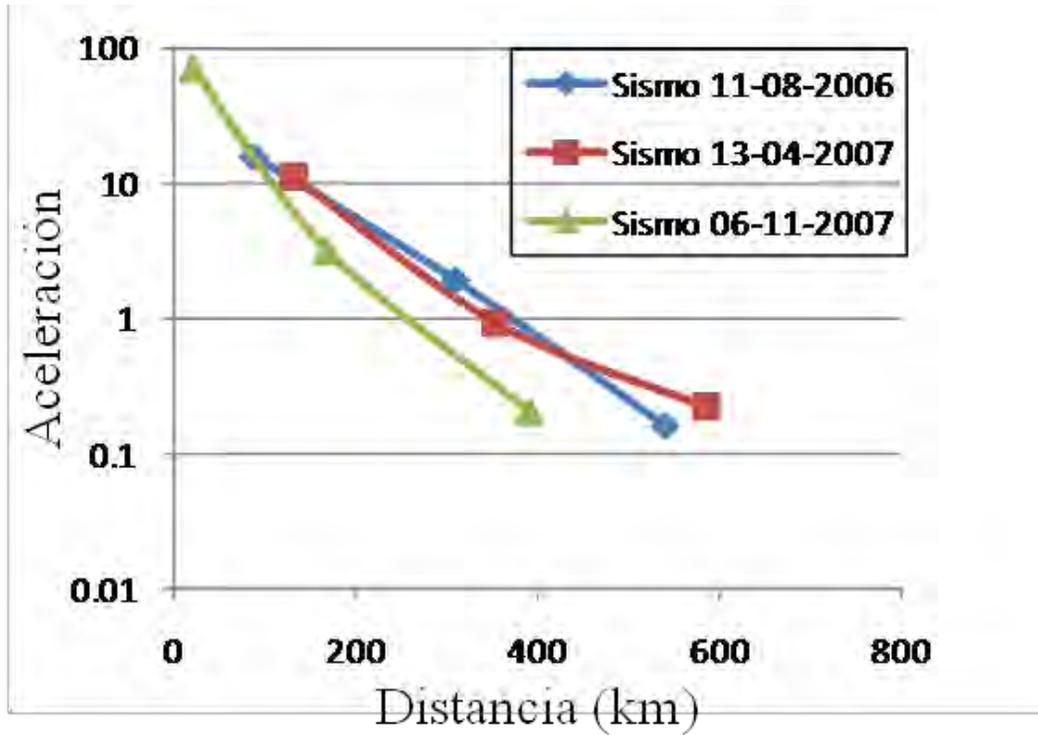


Figura B21.- Perfil a largo de la costa del Pacífico (Oeste), para sismos en el estado de Guerrero, en la componente Este.

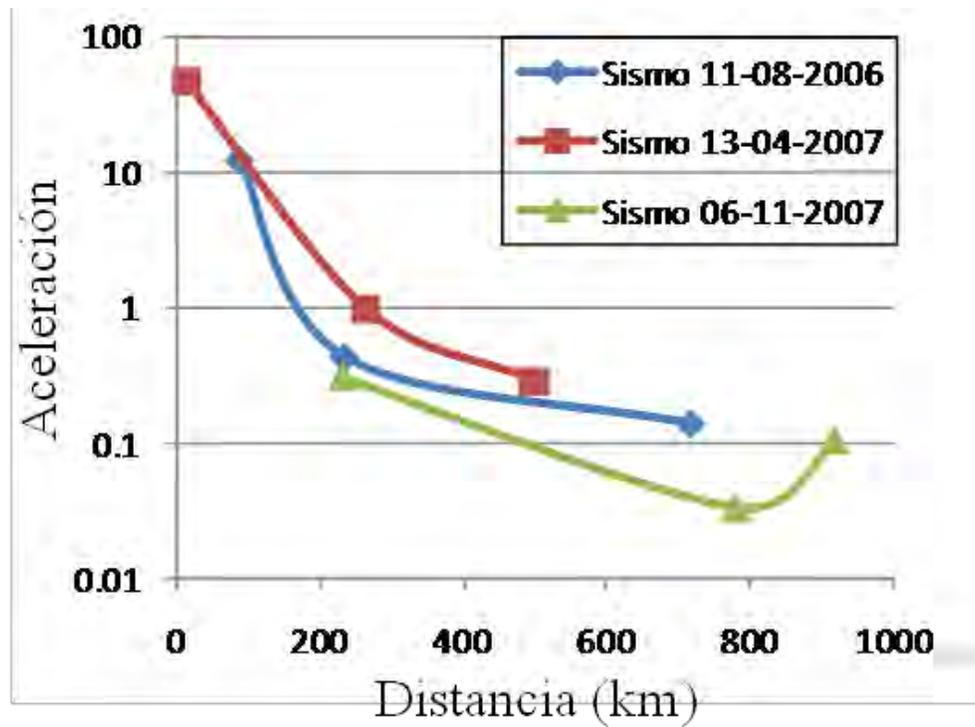


Figura B22.- Perfil a largo de la costa del Pacífico (Este), para sismos en el estado de Guerrero, en la componente vertical (Z).

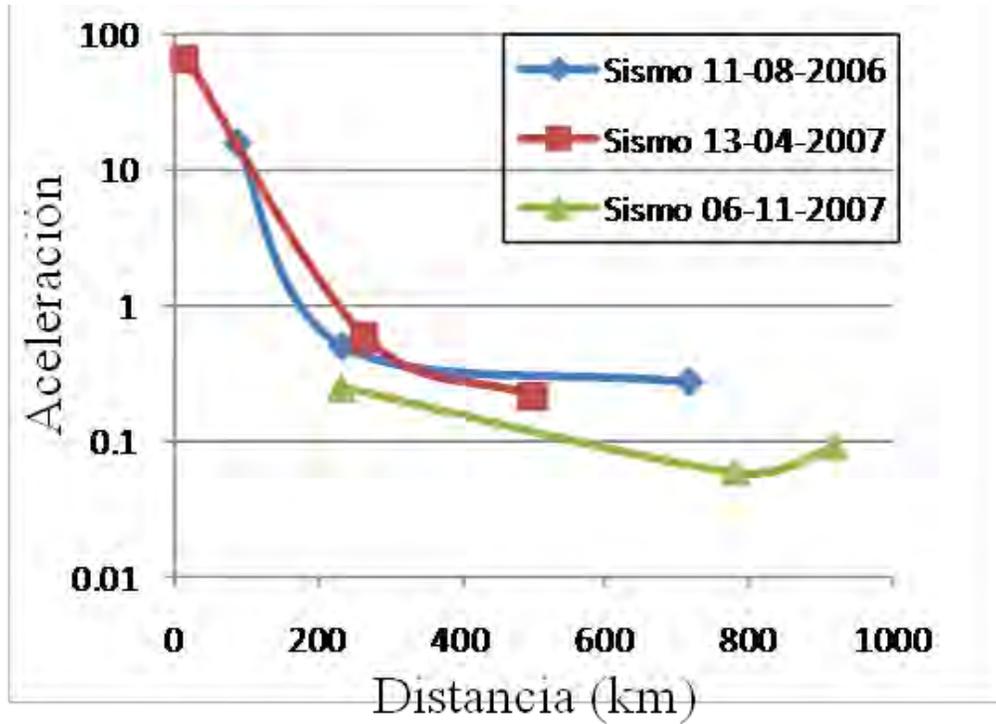


Figura B23.- Perfil a largo de la costa del Pacifico (Este), para sismos en el estado de Guerrero, en la componente Este.

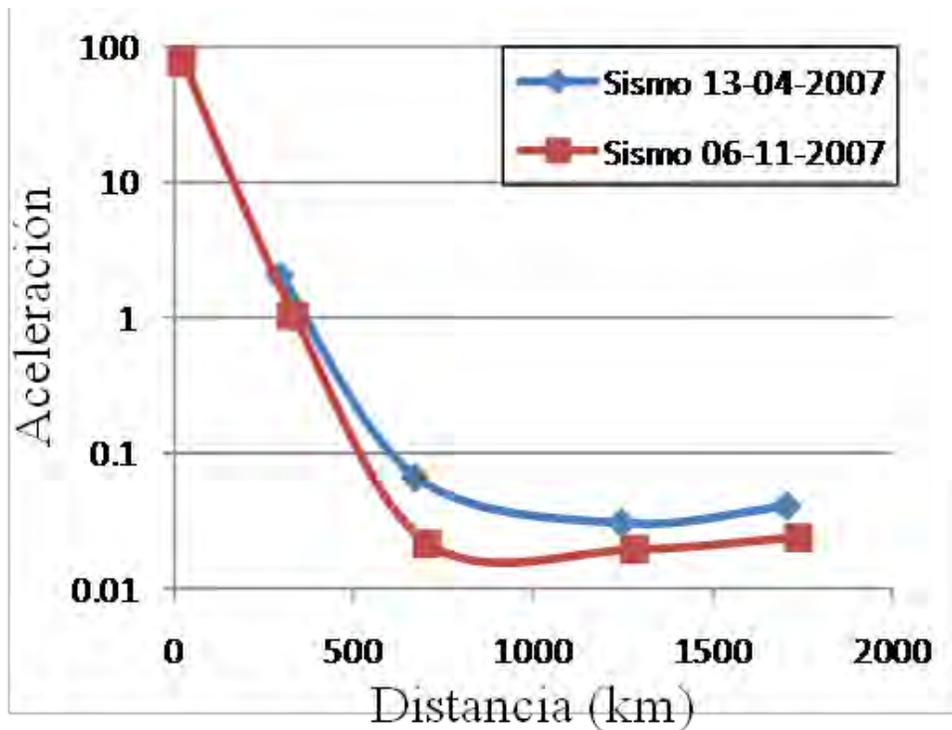


Figura B24.- Perfil hacia el noroeste del país, para sismos en el estado de Guerrero, en la componente vertical (Z).

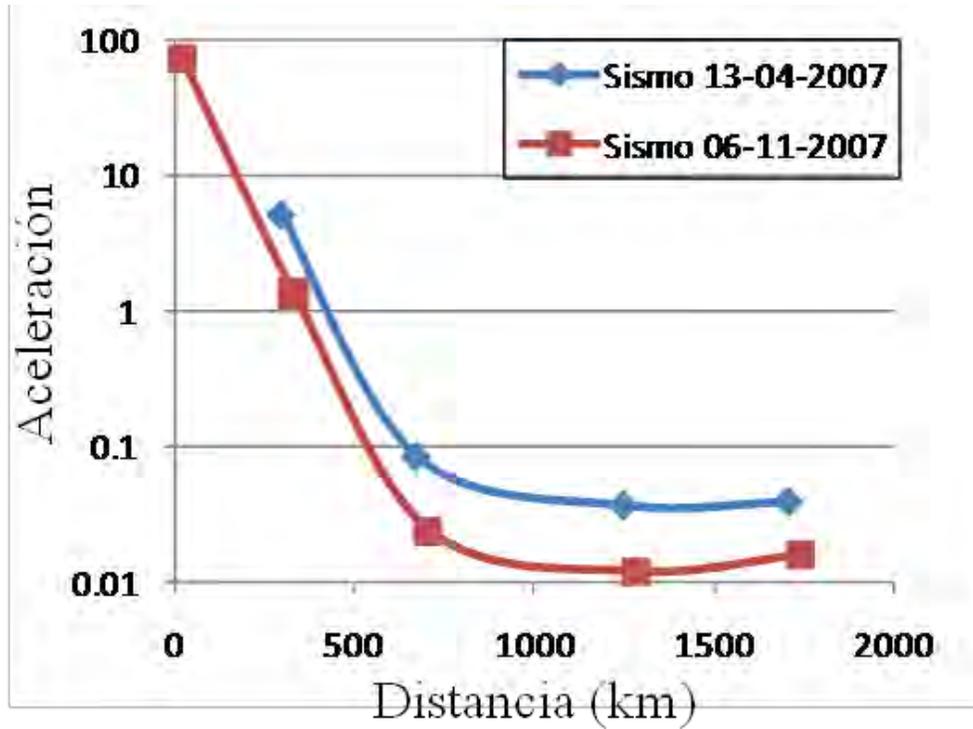


Figura B25.- Perfil hacia el noroeste del país, para sismos en el estado de Guerrero, en la componente Este.

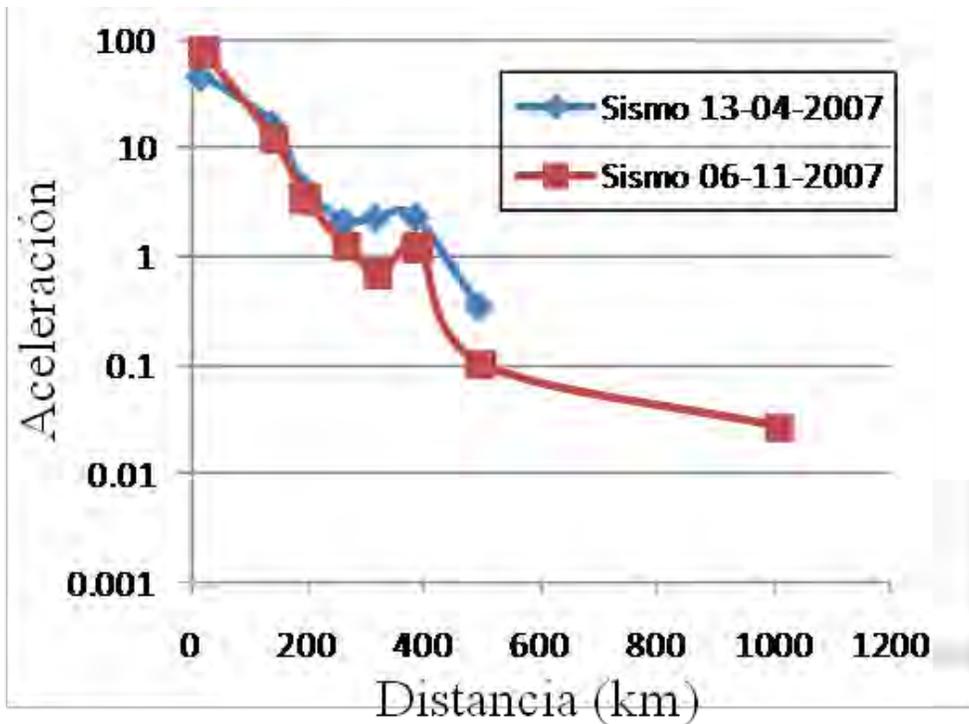


Figura B26.- Perfil hacia el centro del país (norte), para sismos en el estado de Guerrero, en la componente vertical (Z).

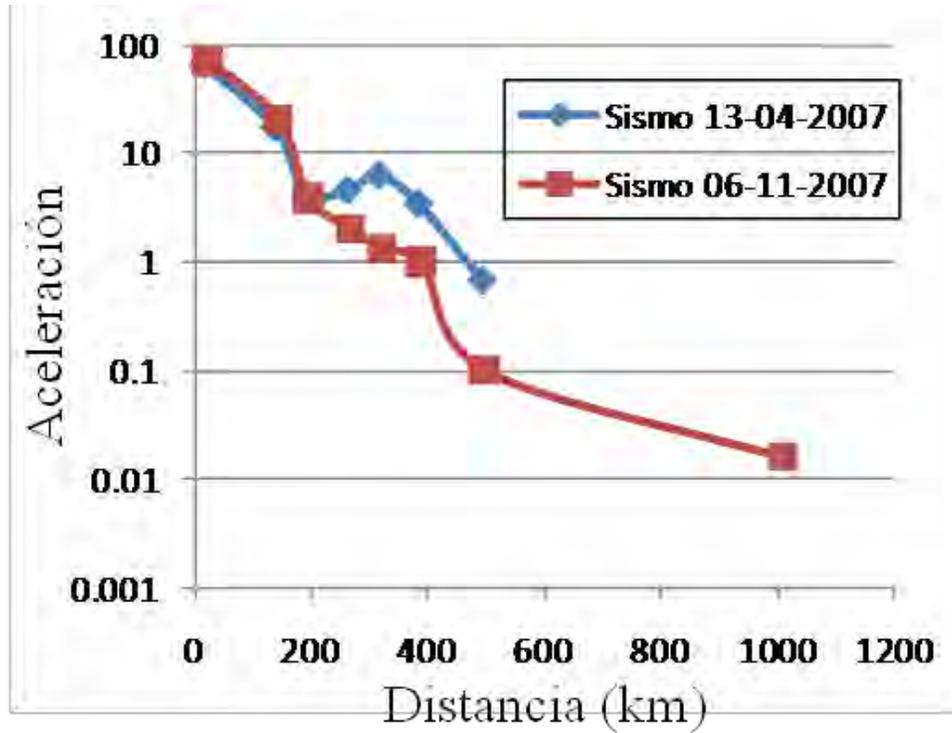


Figura B27.- Perfil hacia el centro del país (norte), para sismos en el estado de Guerrero, en la componente Este.

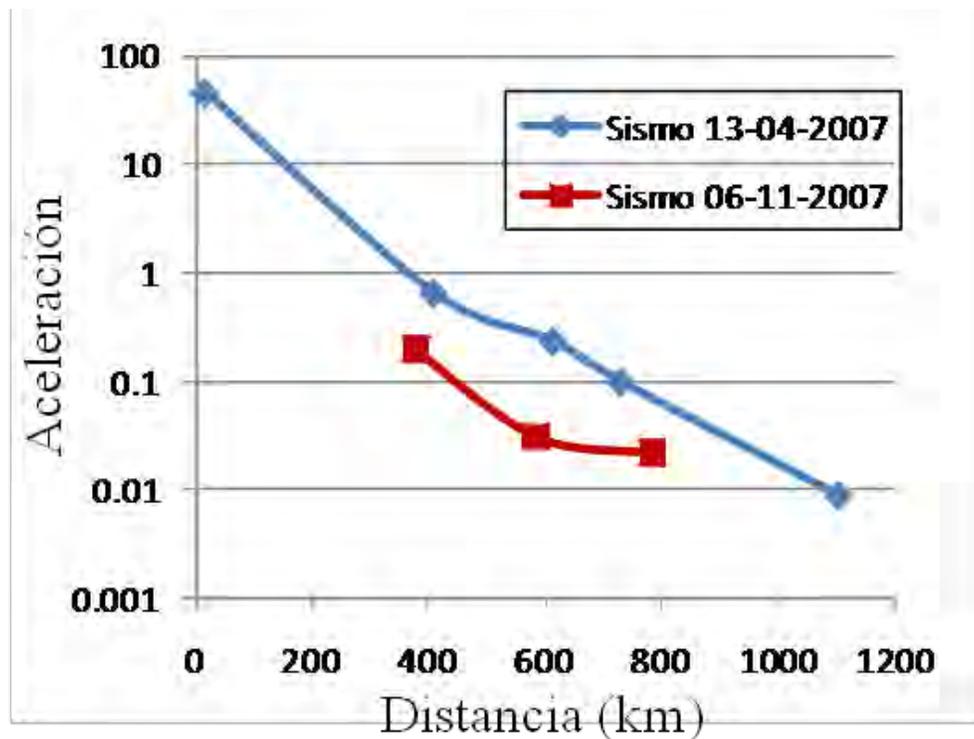


Figura B28.- Perfil hacia el noreste del país, para sismos en el estado de Guerrero, en la componente vertical (Z).

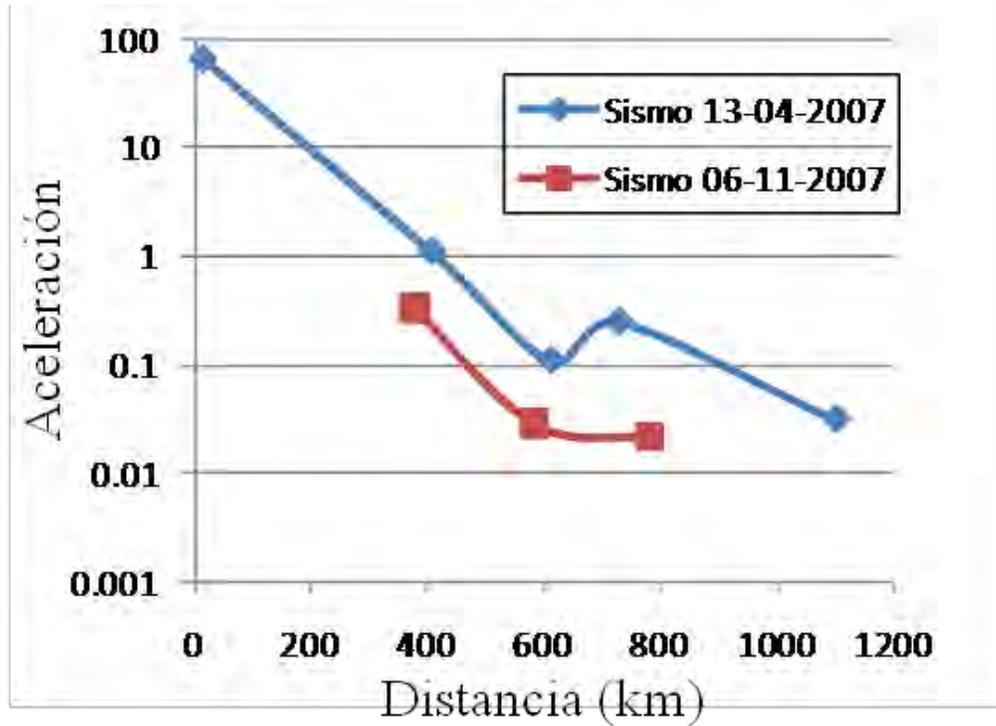


Figura B29.- Perfil hacia el noreste del país, para sismos en el estado de Guerrero, en la componente Este.

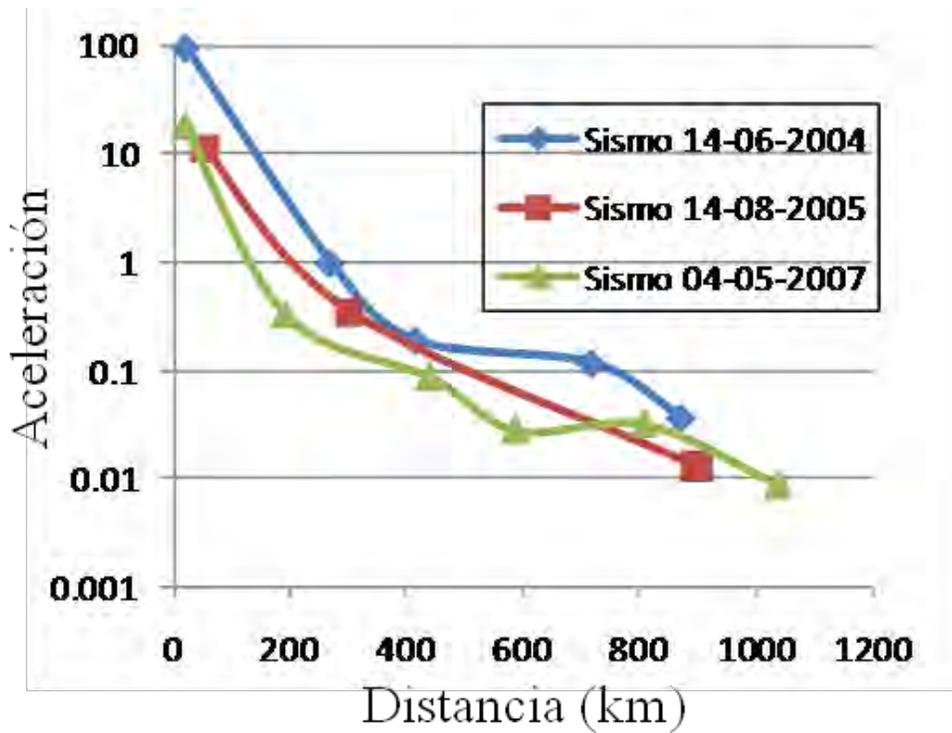


Figura B30.- Perfil a lo largo del pacífico (Oeste), para sismos en el estado de Oaxaca, en la componente vertical (Z).

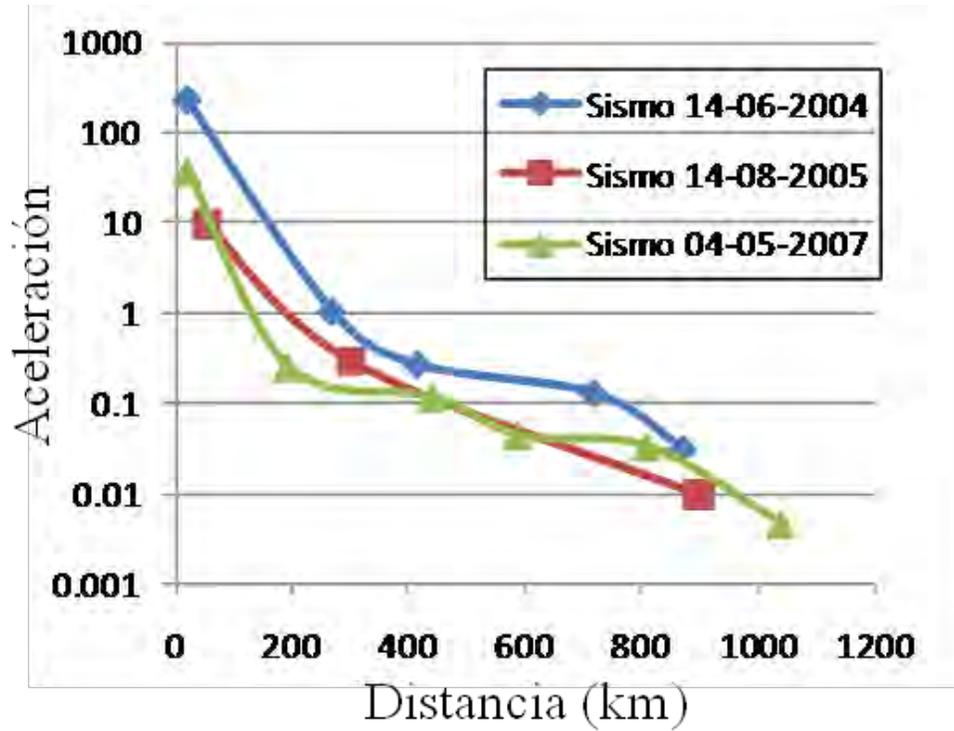


Figura B31.- Perfil a lo largo del pacífico (Oeste), para sismos en el estado de Oaxaca, en la componente Este.

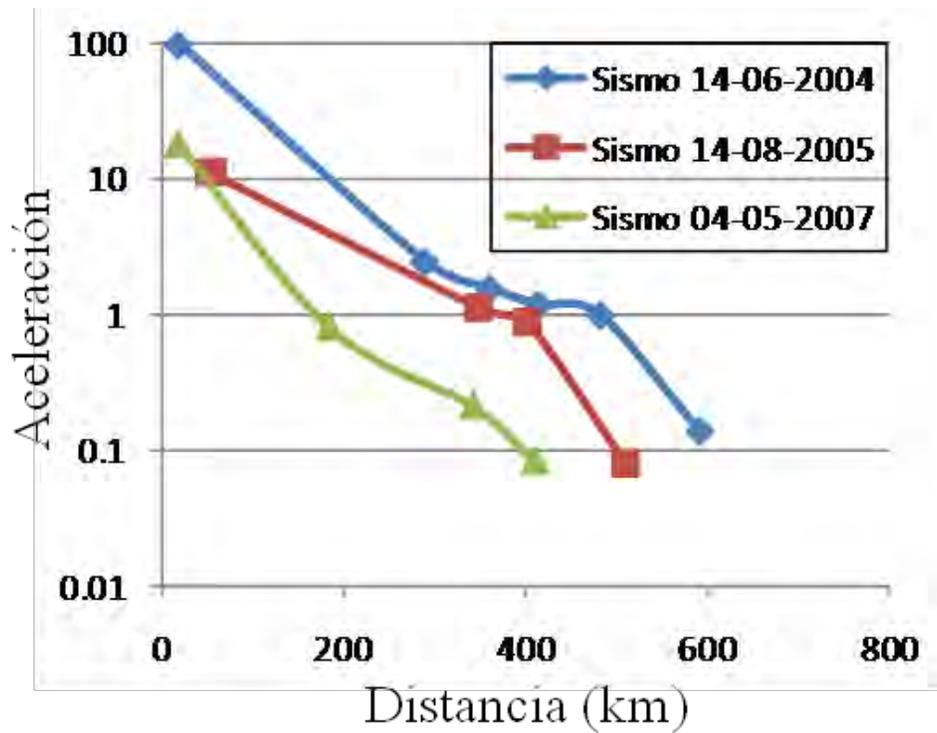


Figura B32.- Perfil hacia el centro del país, para sismos en el estado de Oaxaca, en la componente vertical (Z).

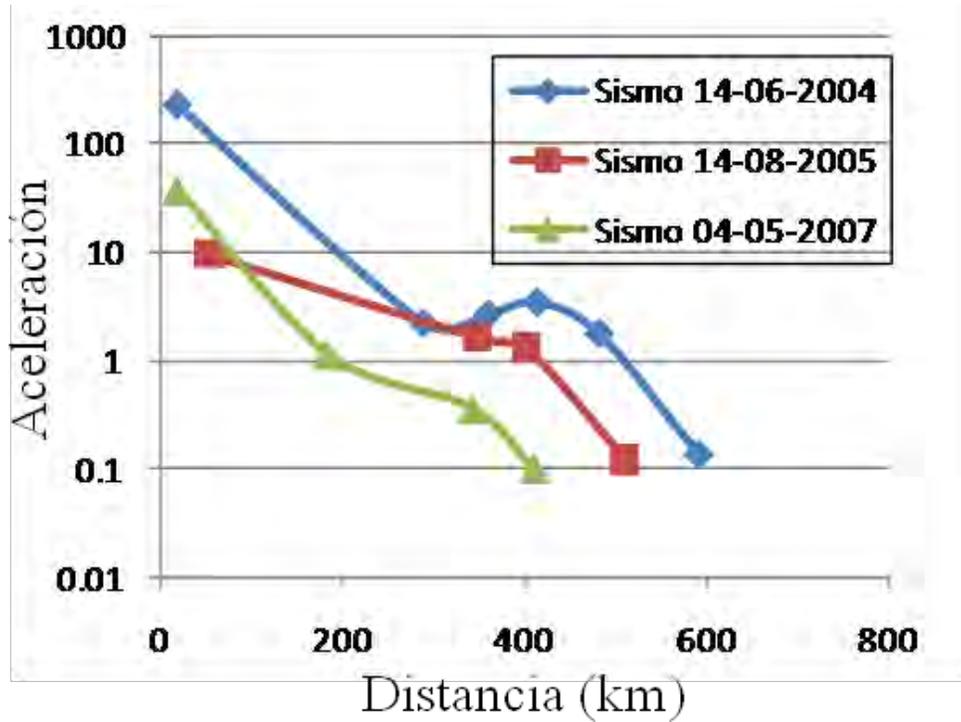


Figura B33.- Perfil hacia el centro del país, para sismos en el estado de Oaxaca, en la componente Este.

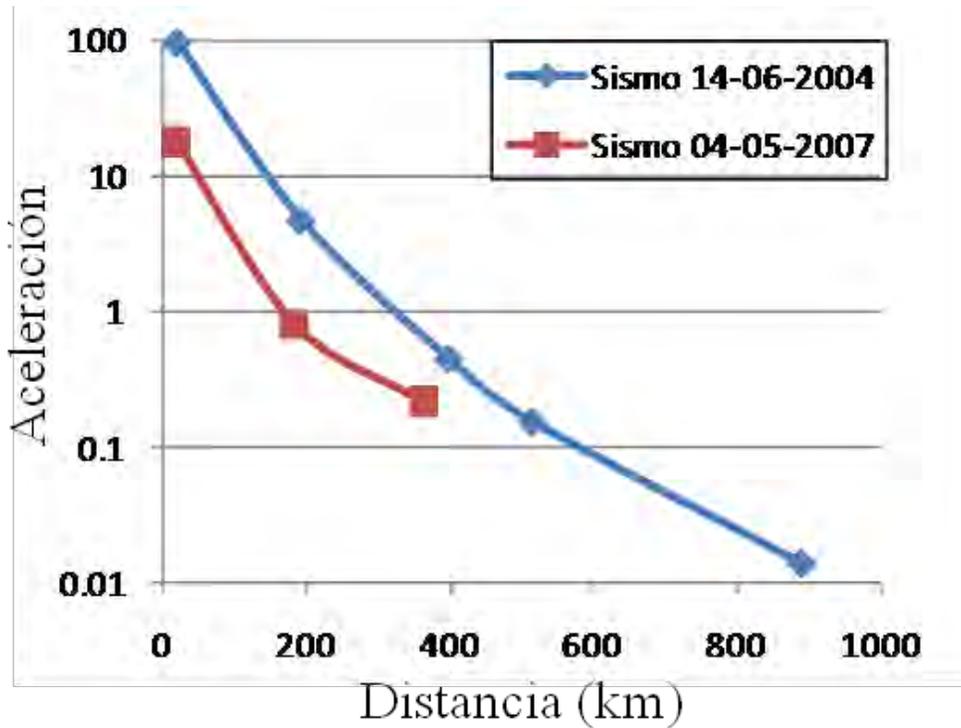


Figura B34.- Perfil hacia el Golfo de México, para sismos en el estado de Oaxaca, en la componente vertical (Z).

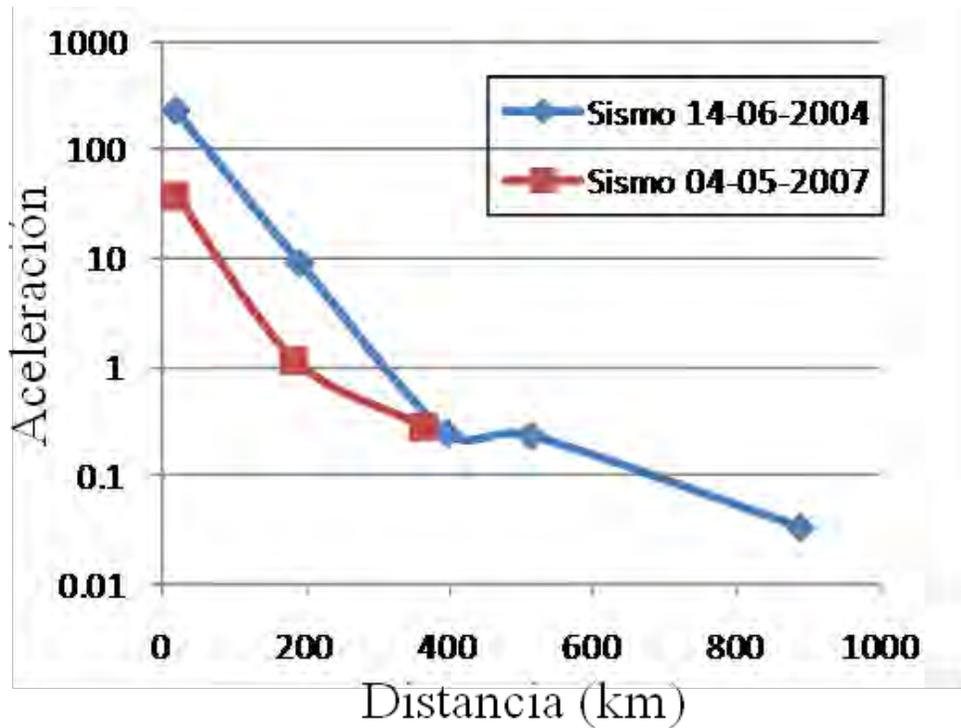


Figura B35.- Perfil hacia el Golfo de México, para sismos en el estado de Oaxaca, en la componente Este.

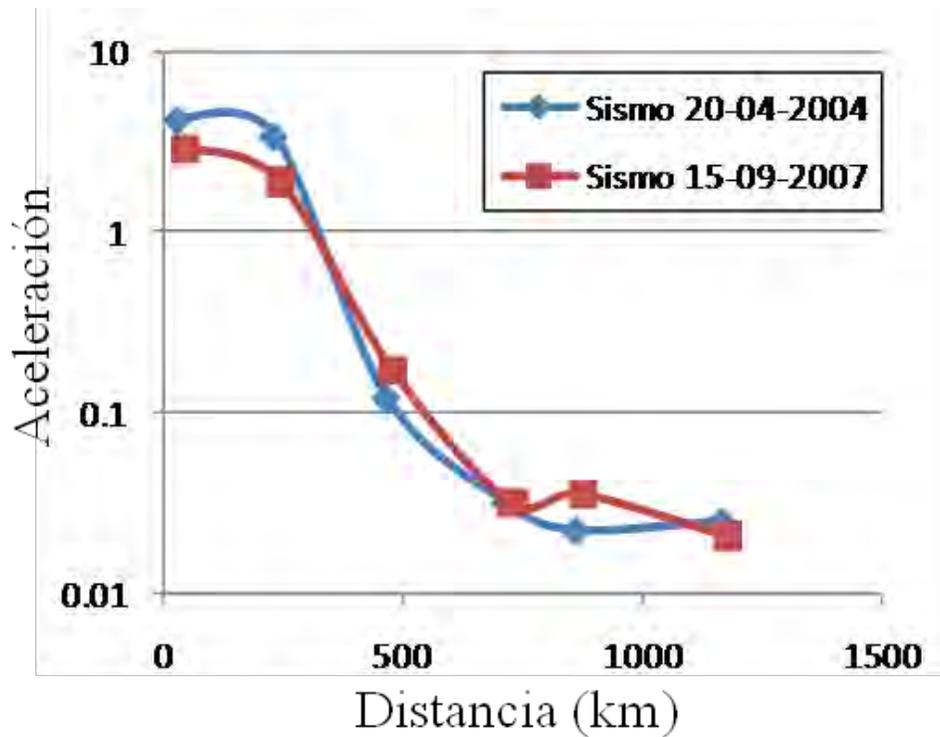


Figura B36.- Perfil a lo largo del pacífico (Oeste), para sismos en el limite este de los estados de Oaxaca y Veracruz, en la componente vertical (Z).

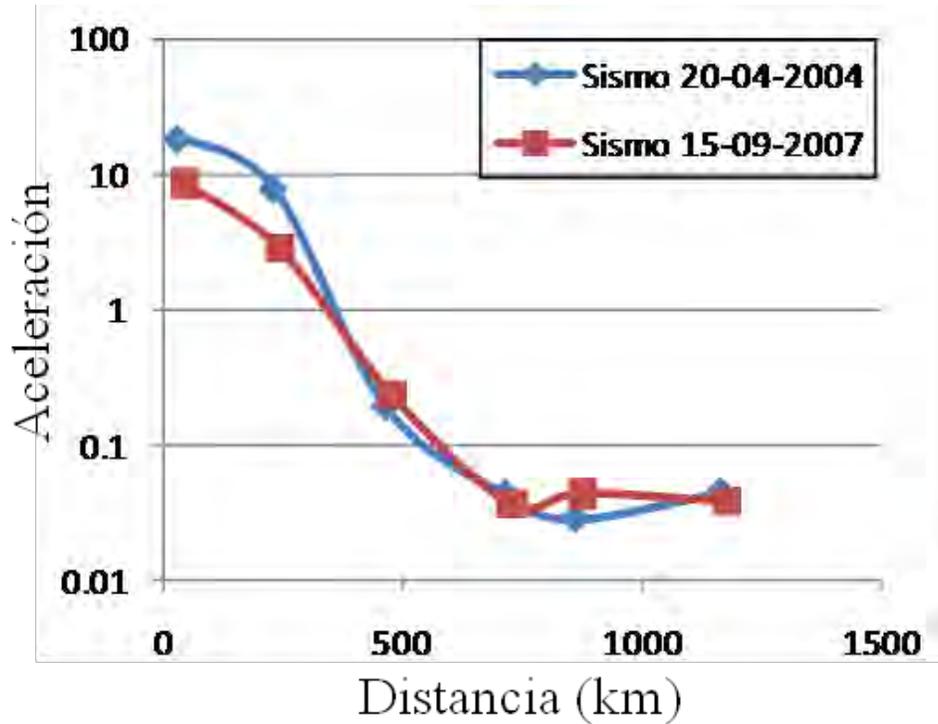


Figura B37.- Perfil a lo largo del pacífico (Oeste), para sismos en el limite este de los estados de Oaxaca y Veracruz, en la componente Este.

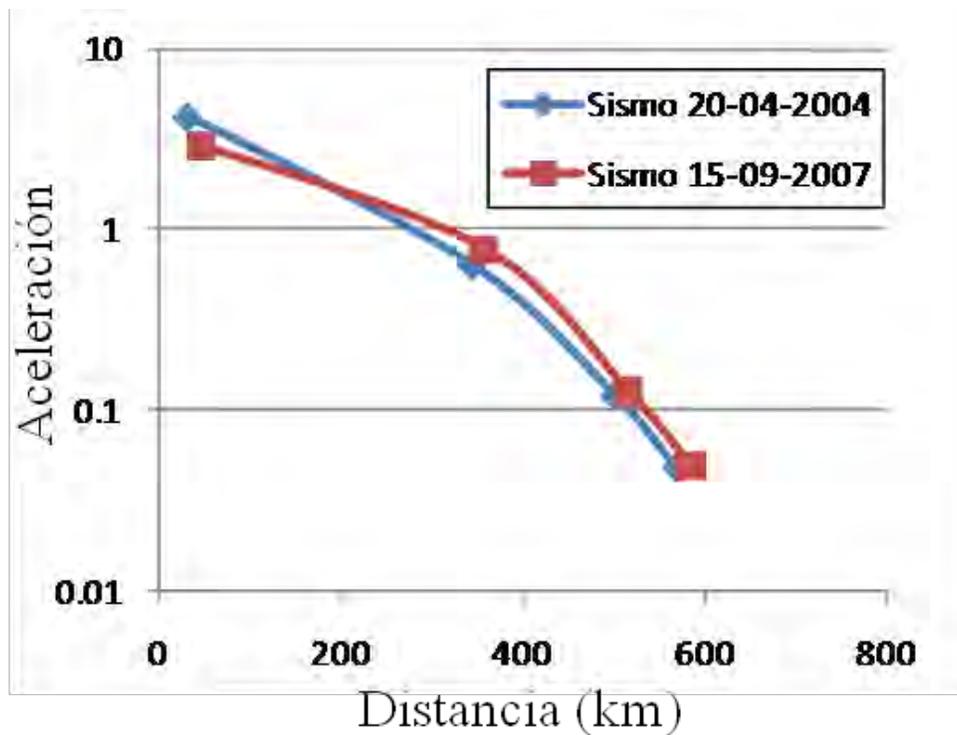


Figura B38.- Perfil hacia el centro del país, para sismos en el limite este de los estados de Oaxaca y Veracruz, en la componente vertical (Z).

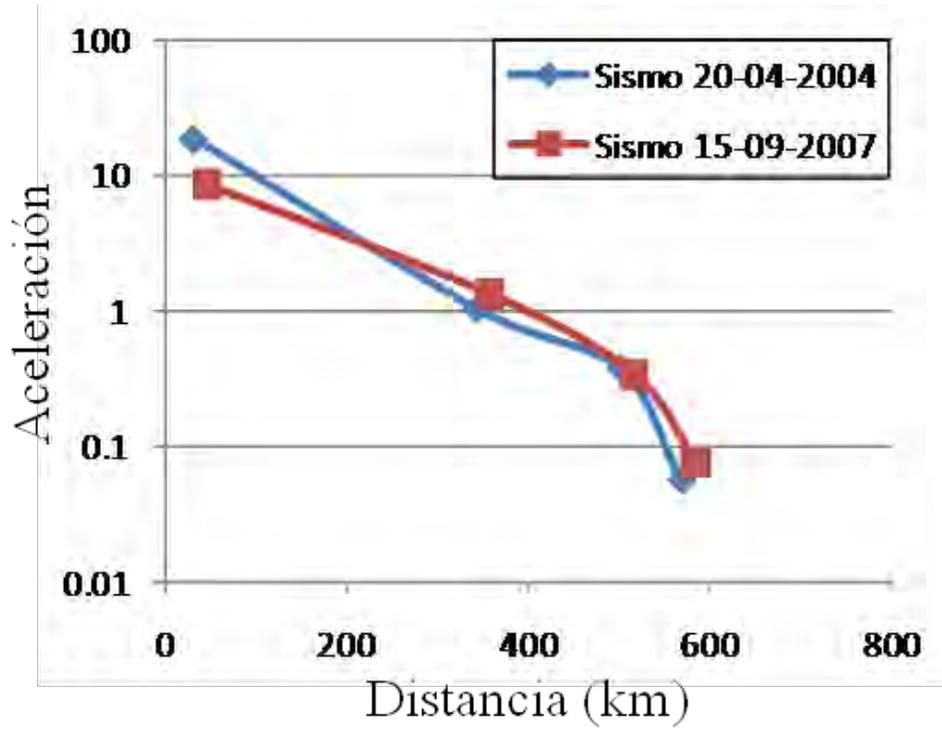
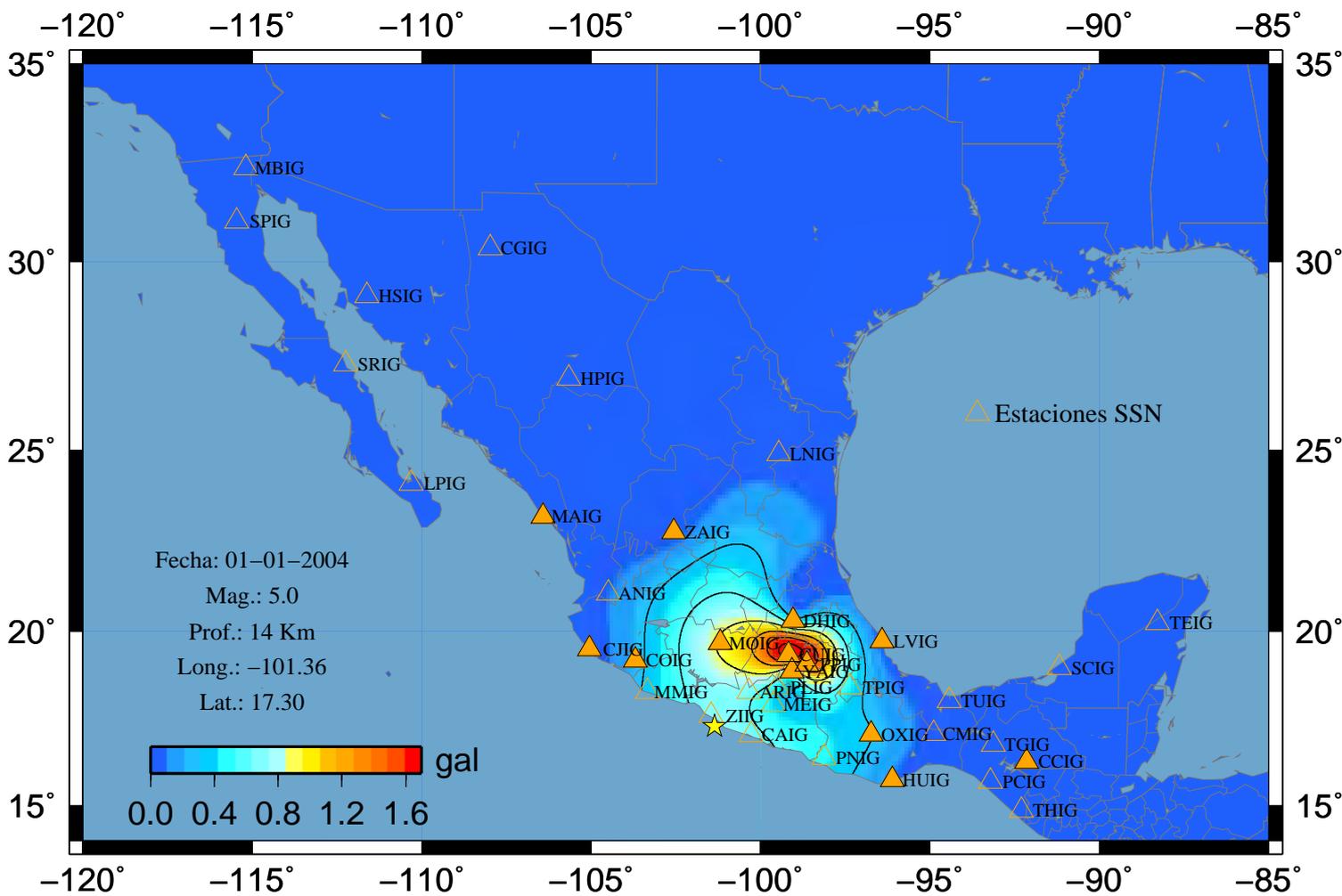
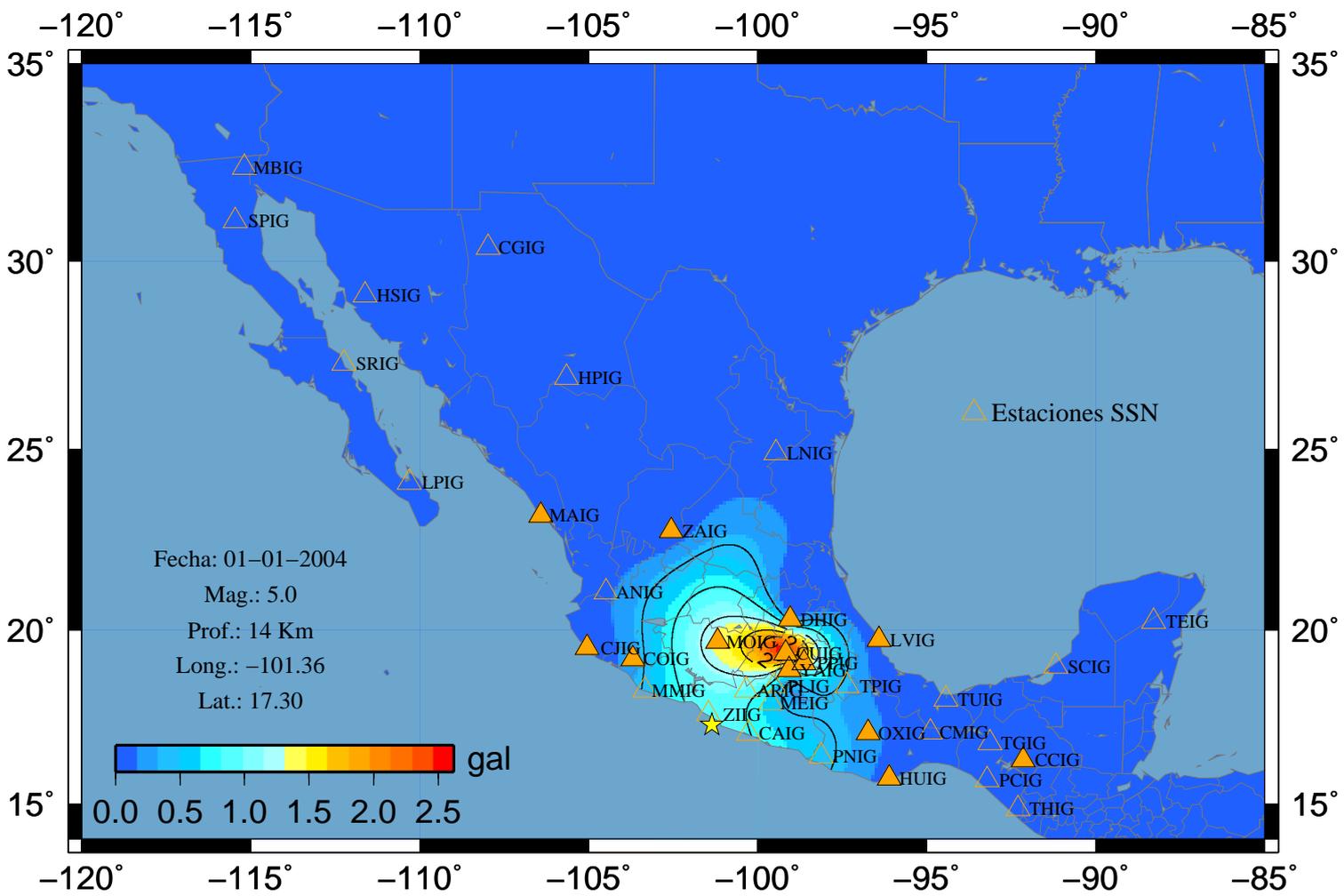


Figura B39.- Perfil hacia el centro del país, para sismos en el límite este de los estados de Oaxaca y Veracruz, en la componente Este.

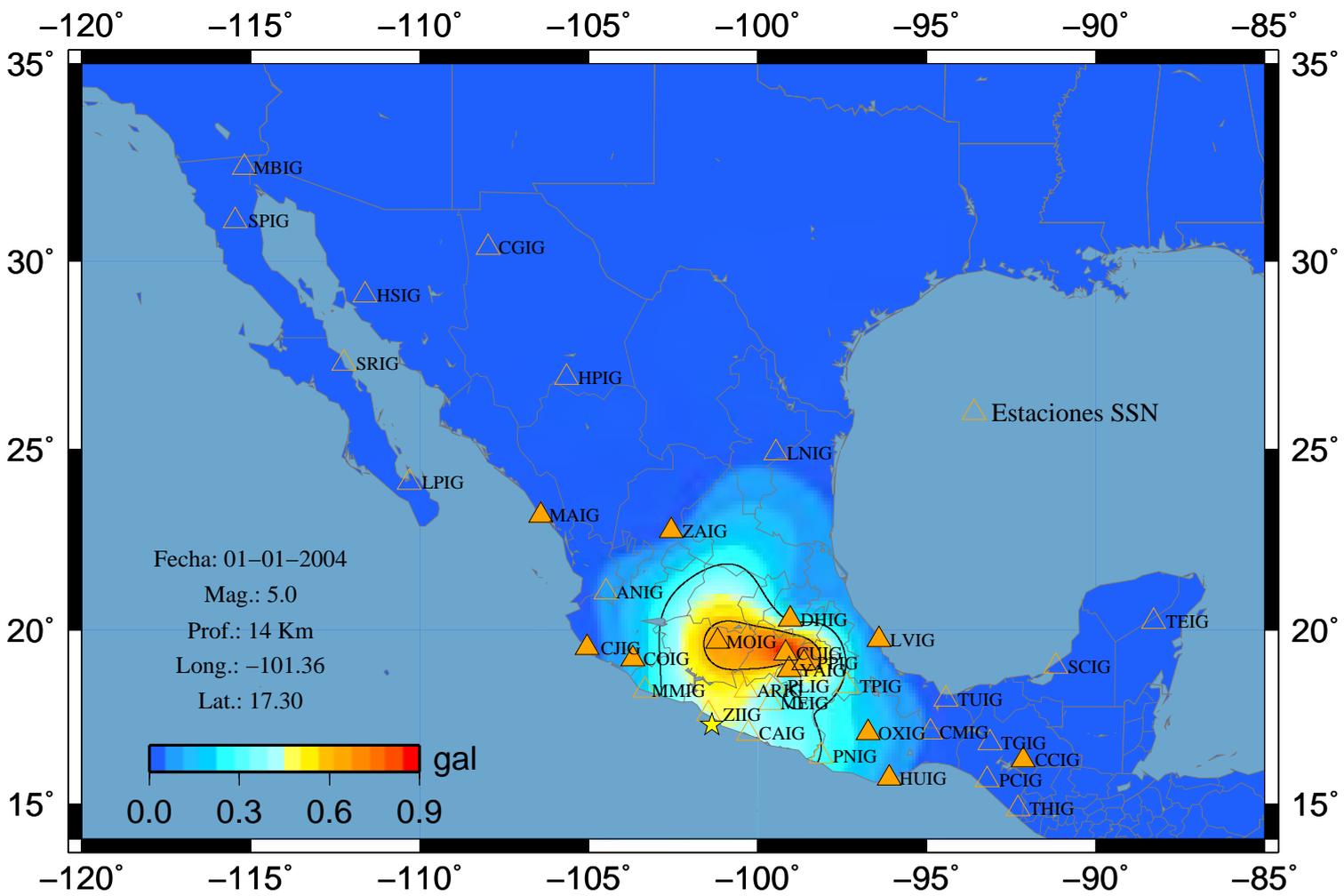
# Sismo 1 A-Este



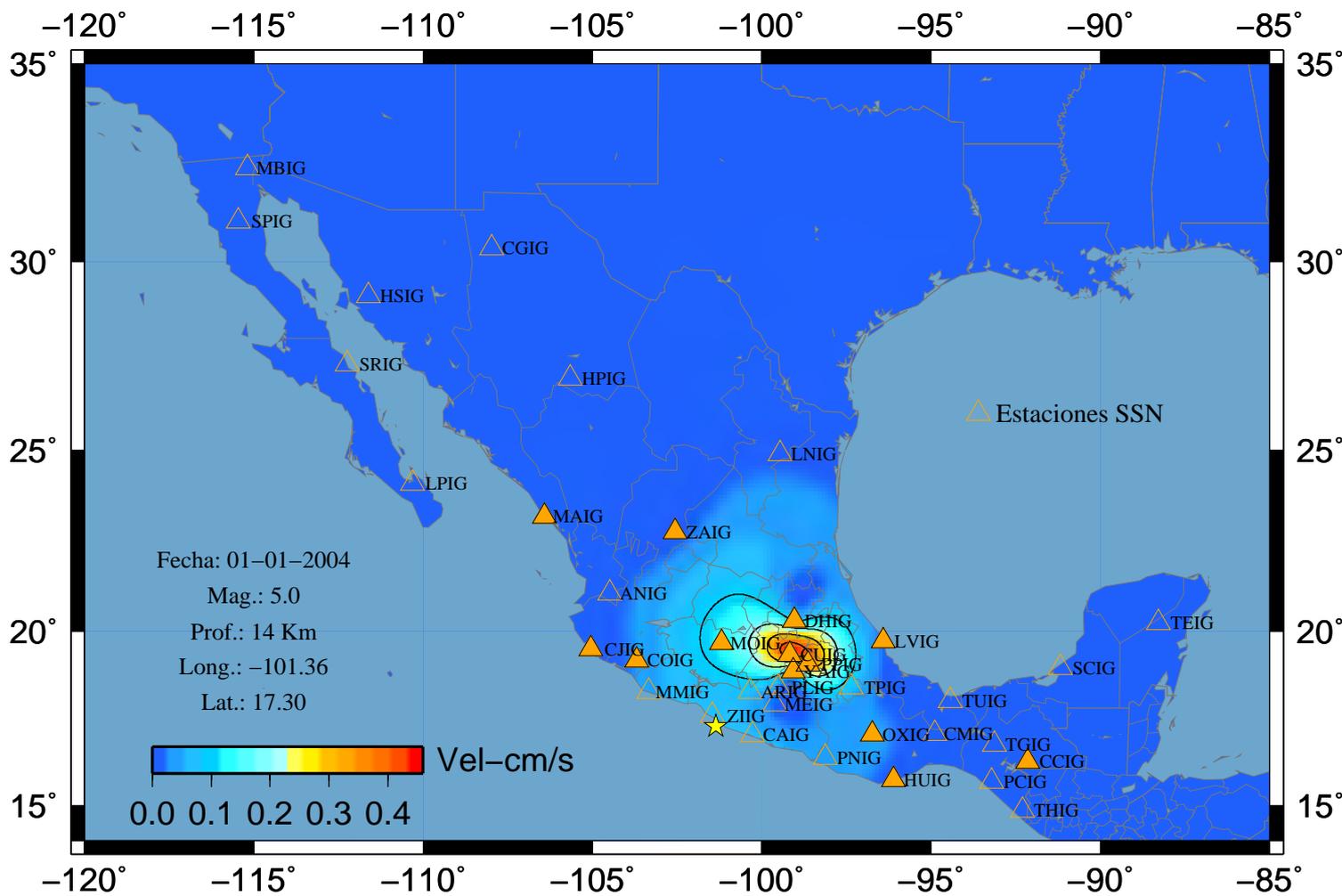
# Sismo 1 A-Norte



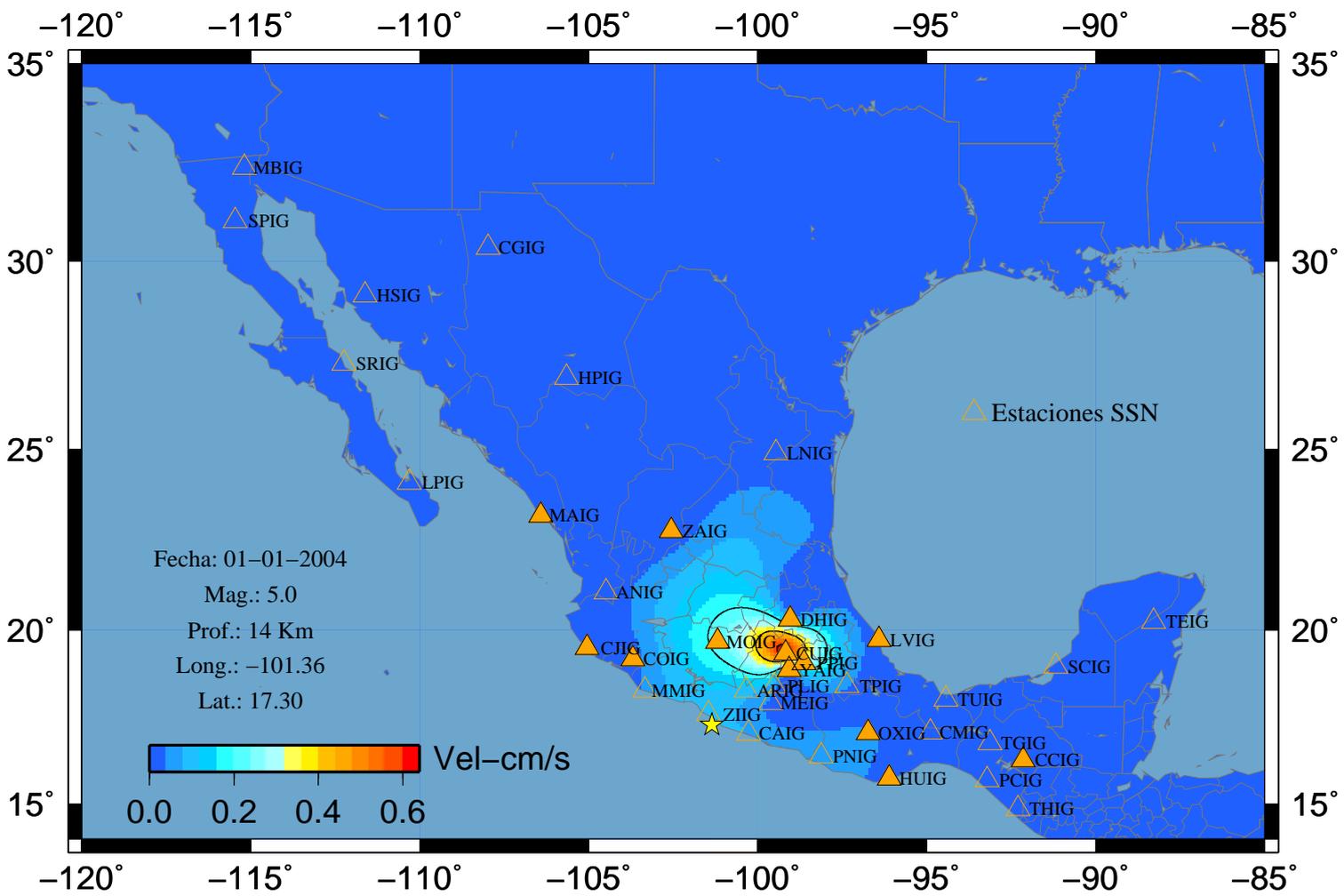
### Sismo 1 A-Vertical



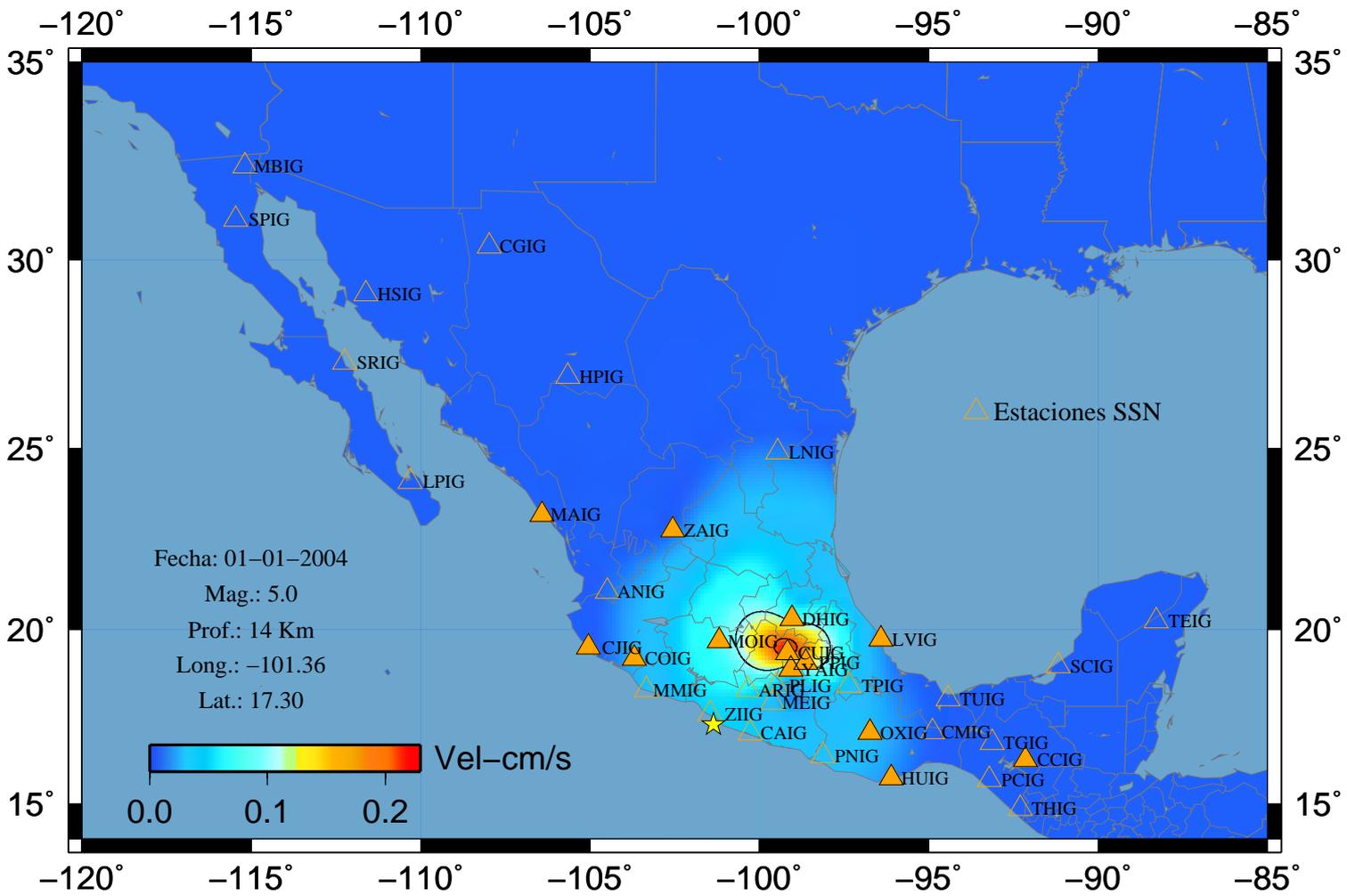
# Sismo 1 V-Este



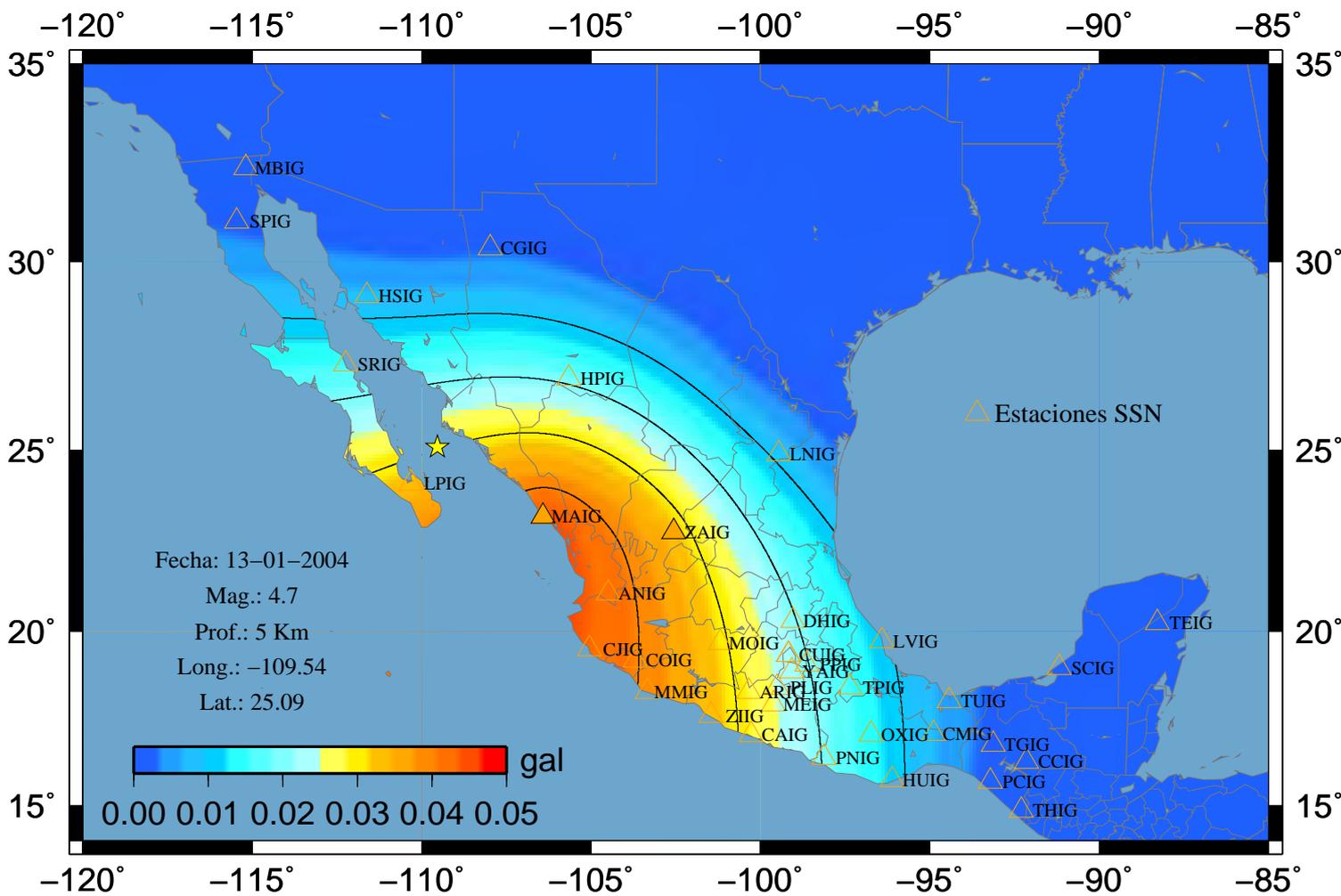
# Sismo 1 V-Norte



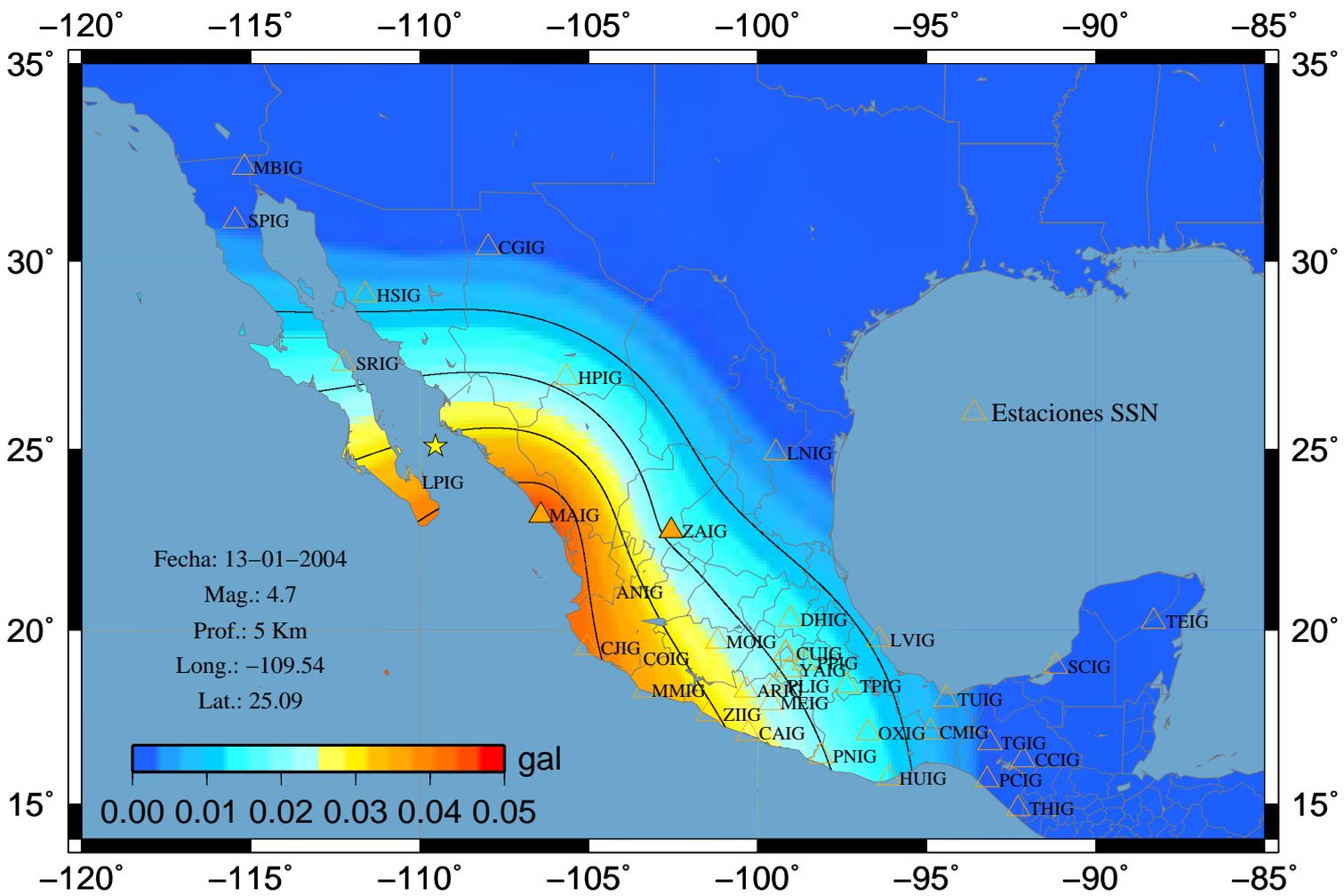
### Sismo 1 V-Vertical



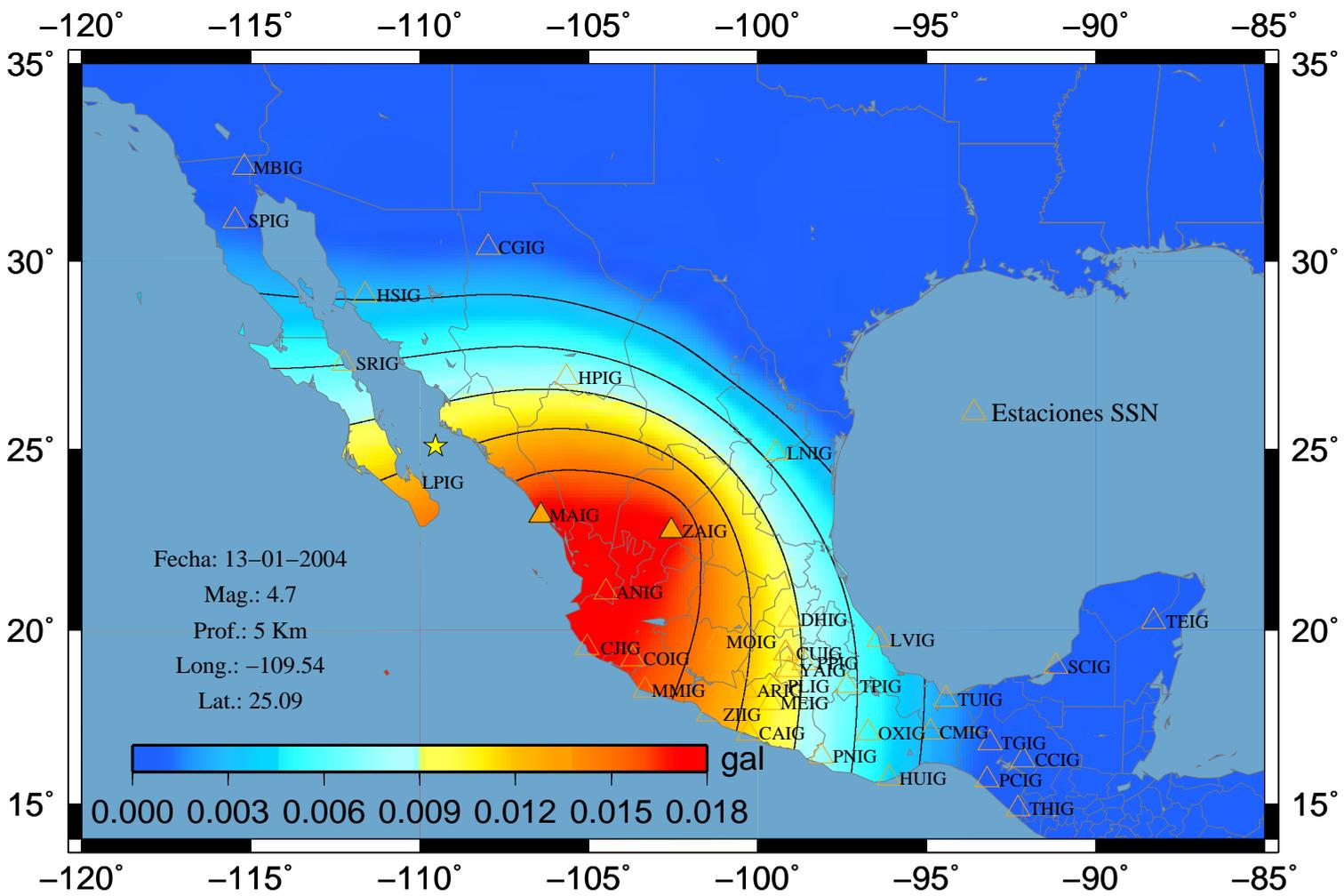
# Sismo 2 A-Este



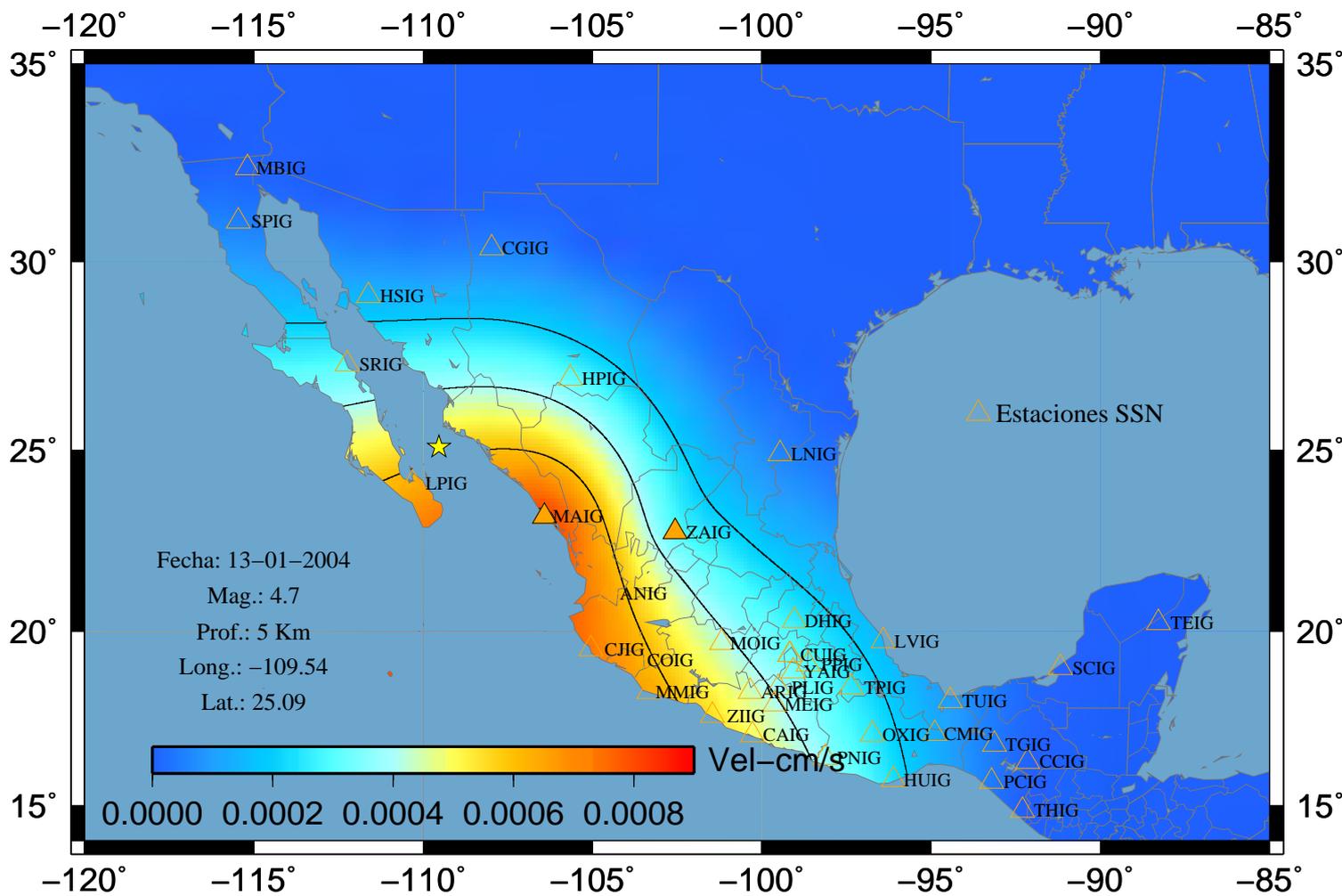
# Sismo 2 A-Norte



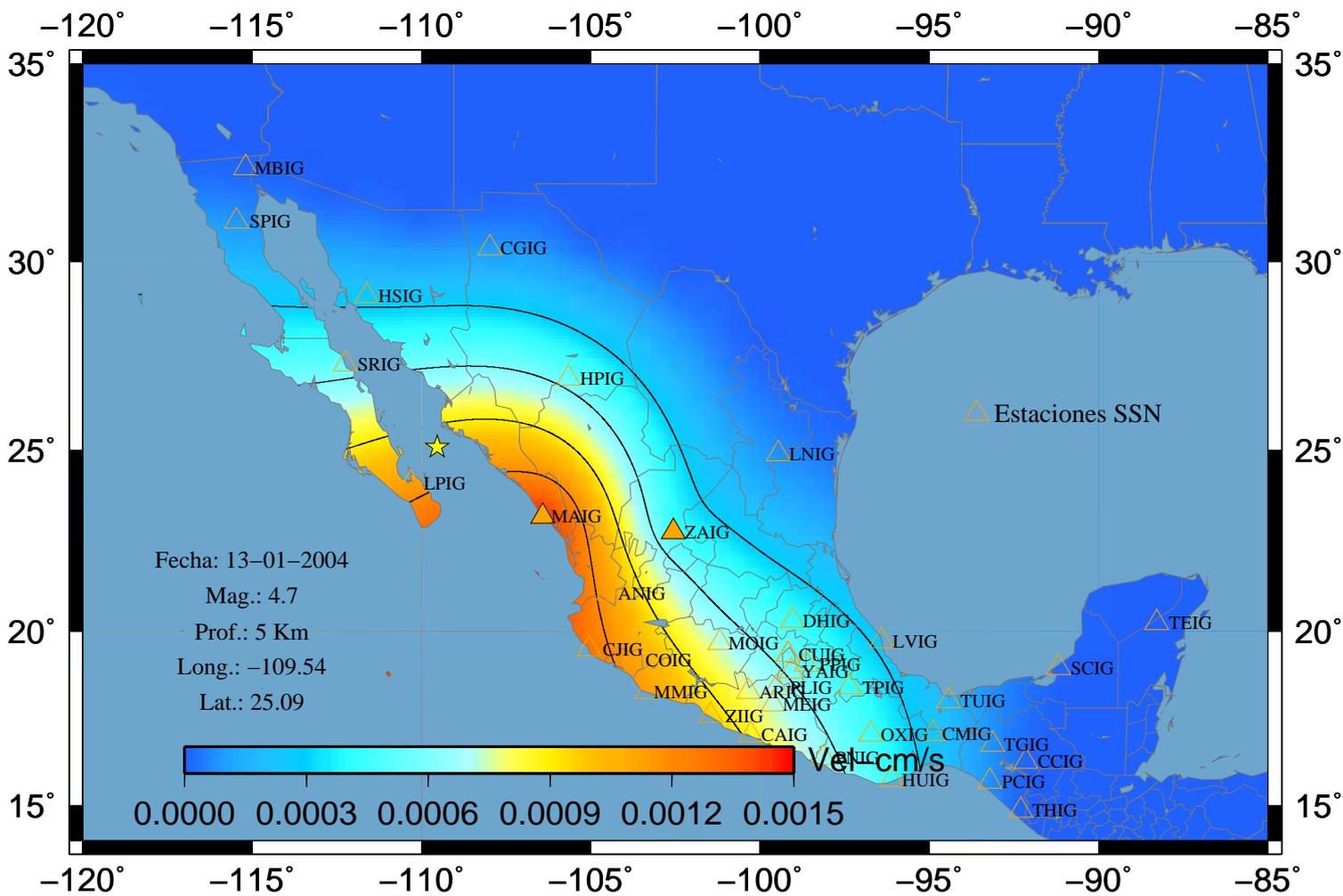
### Sismo 2 A-Vertical



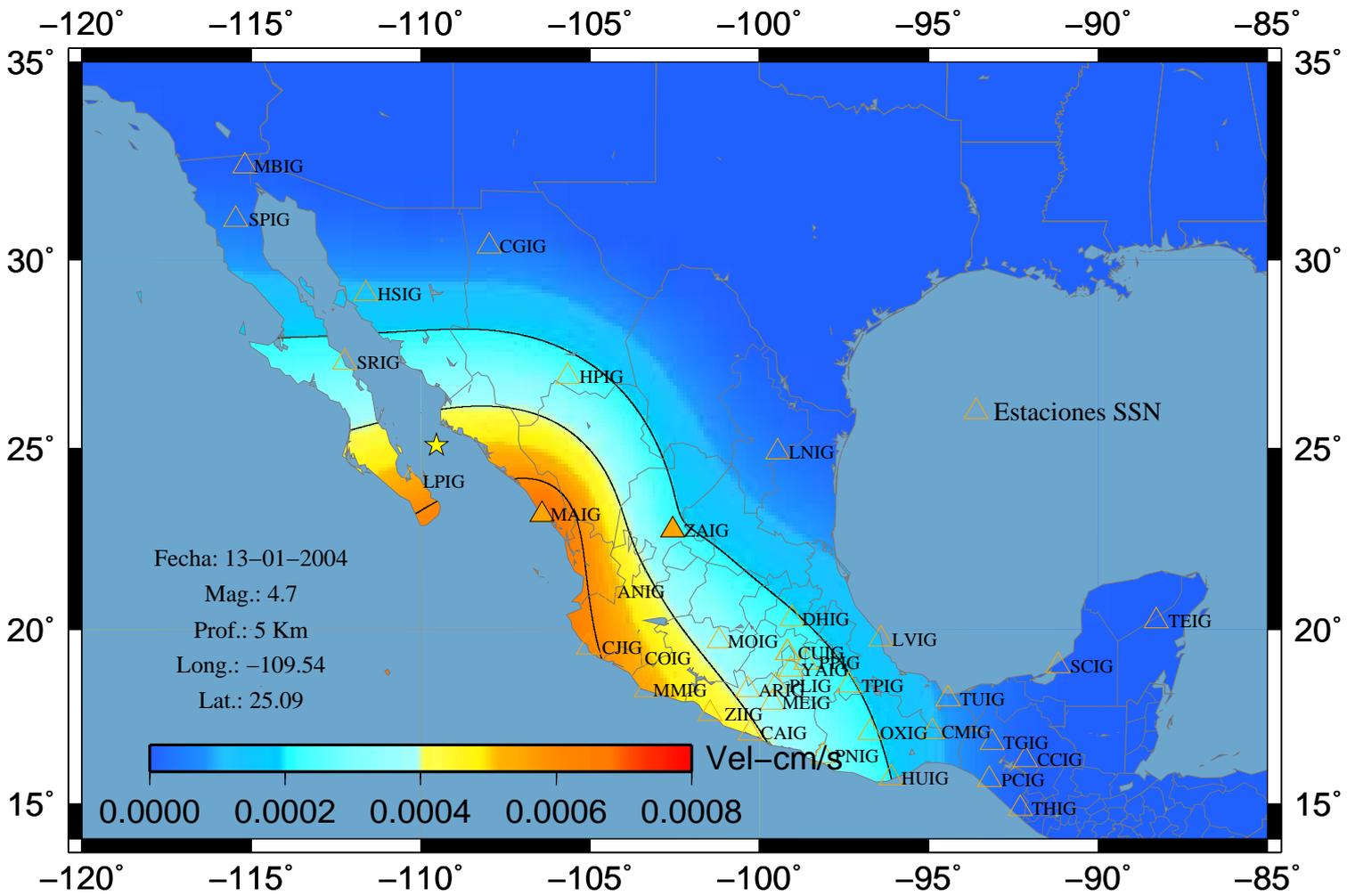
### Sismo 2 V-Este



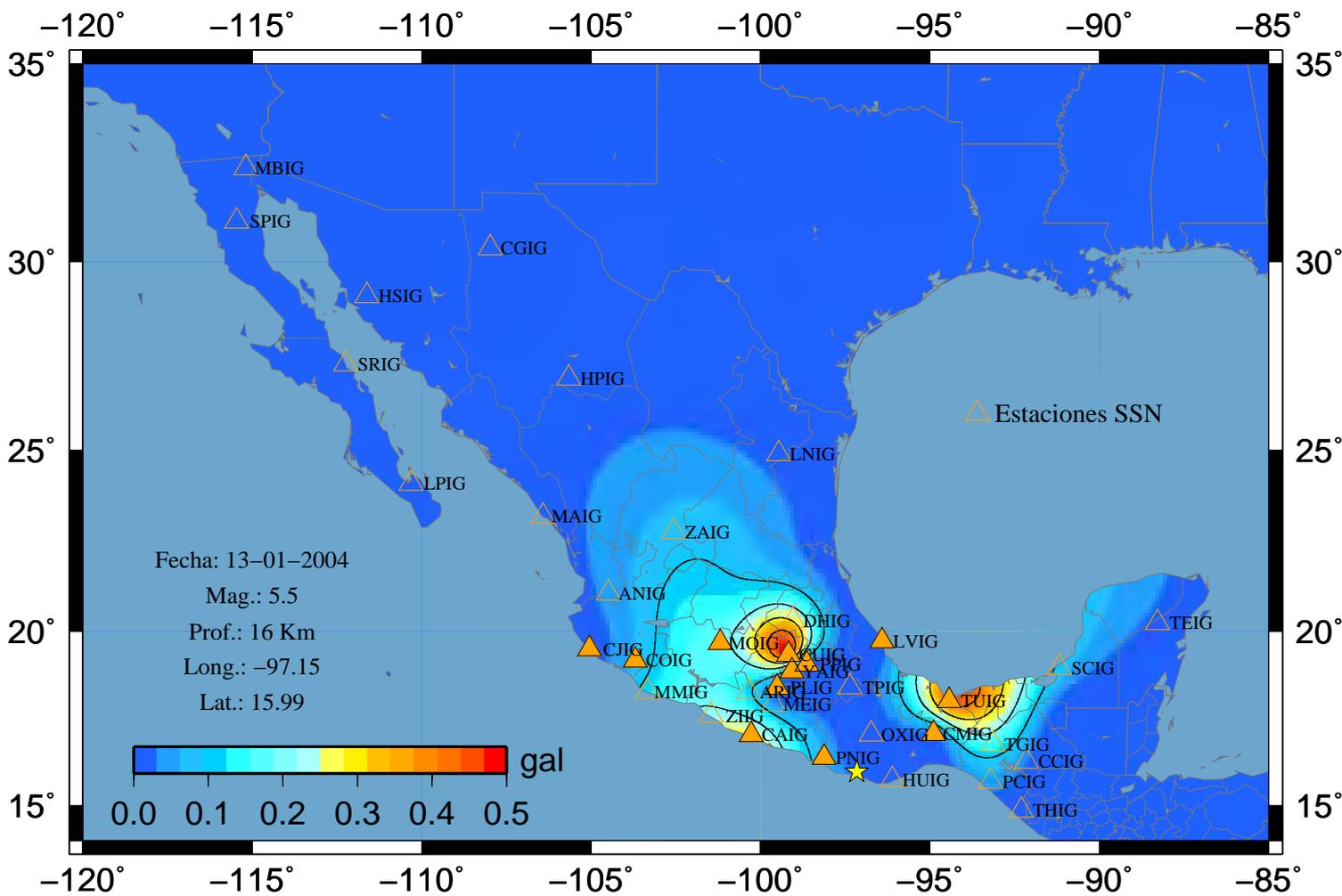
### Sismo 2 V-Norte



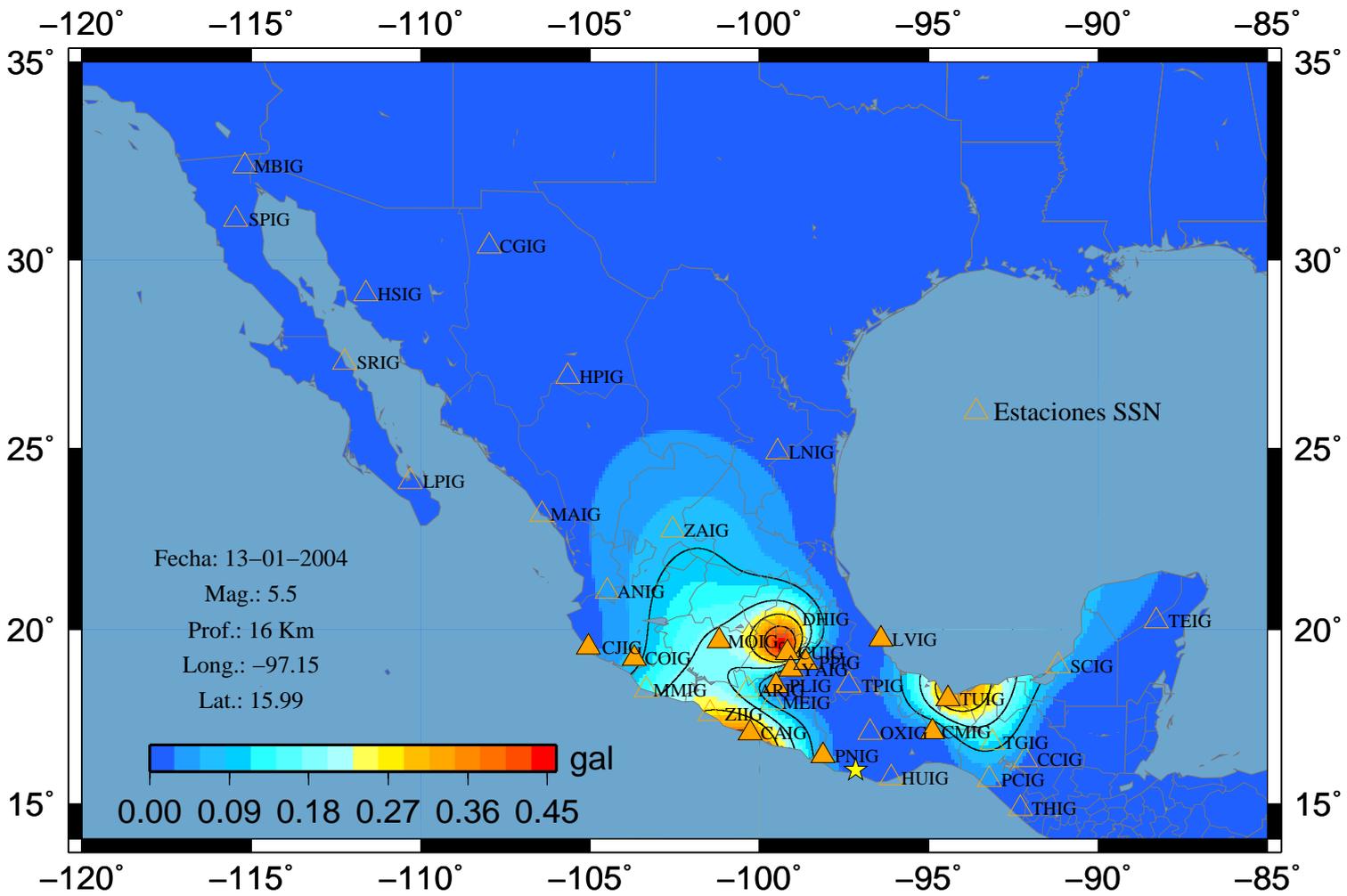
### Sismo 2 V-Vertical



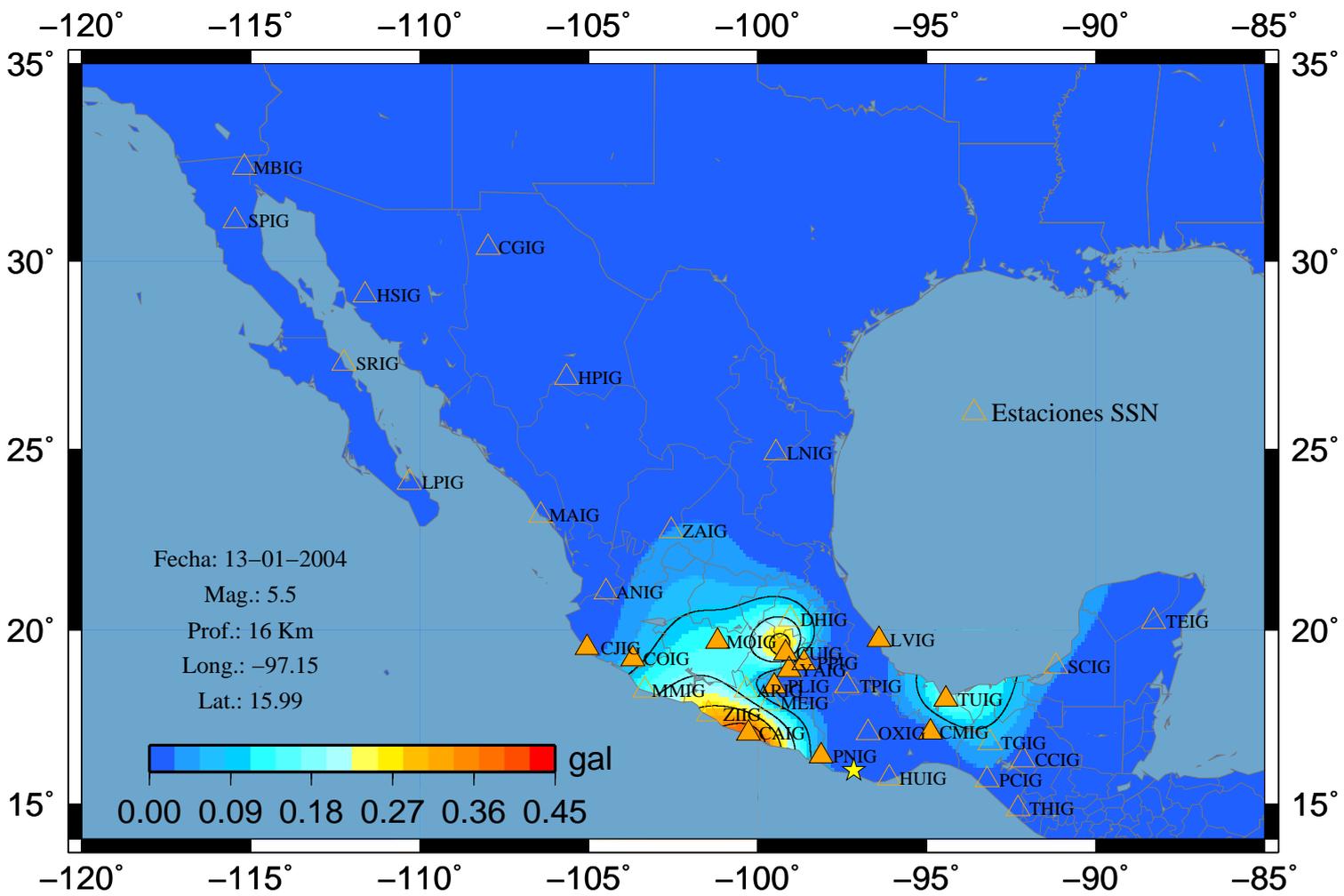
### Sismo 3 A-Este



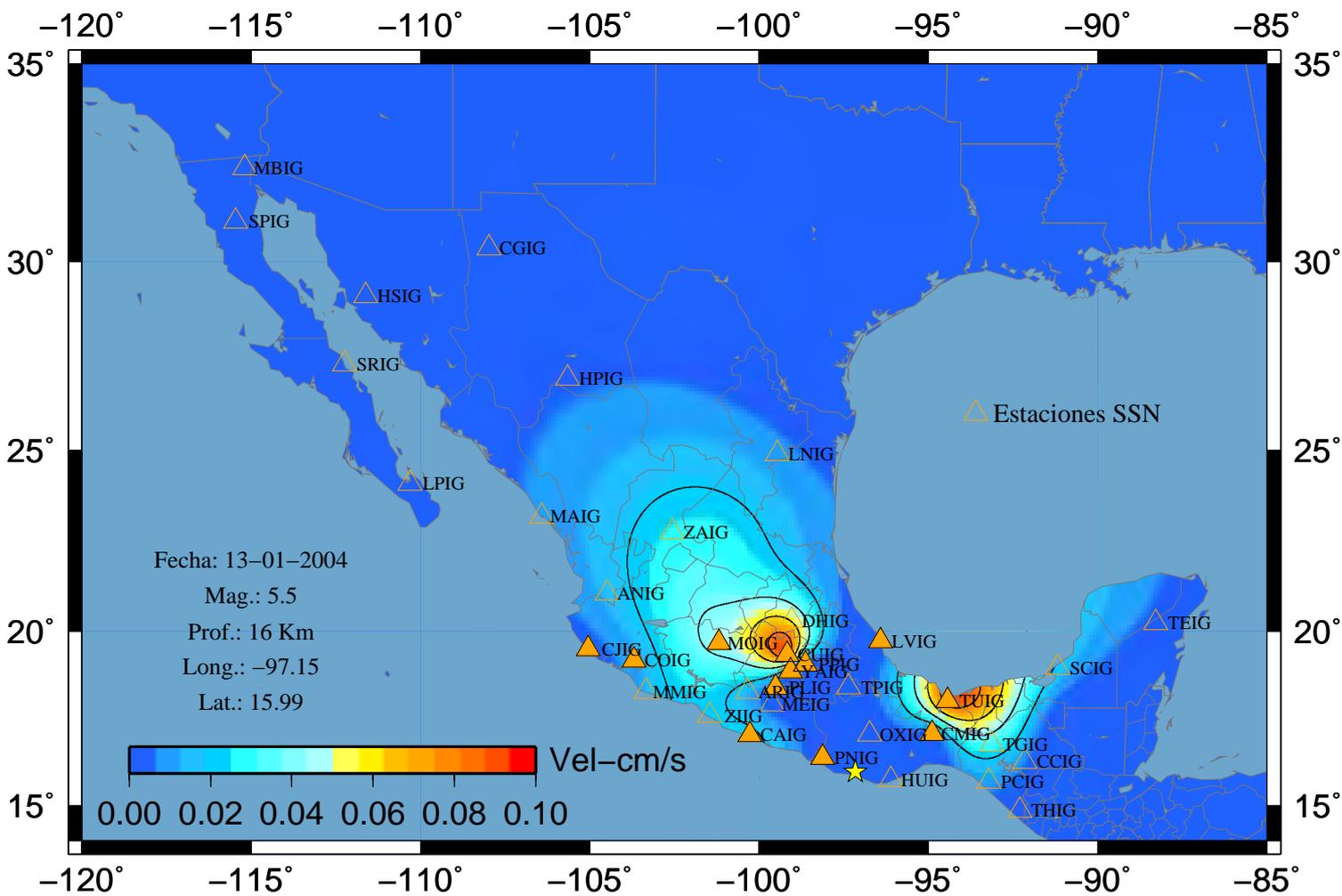
# Sismo 3 A-Norte



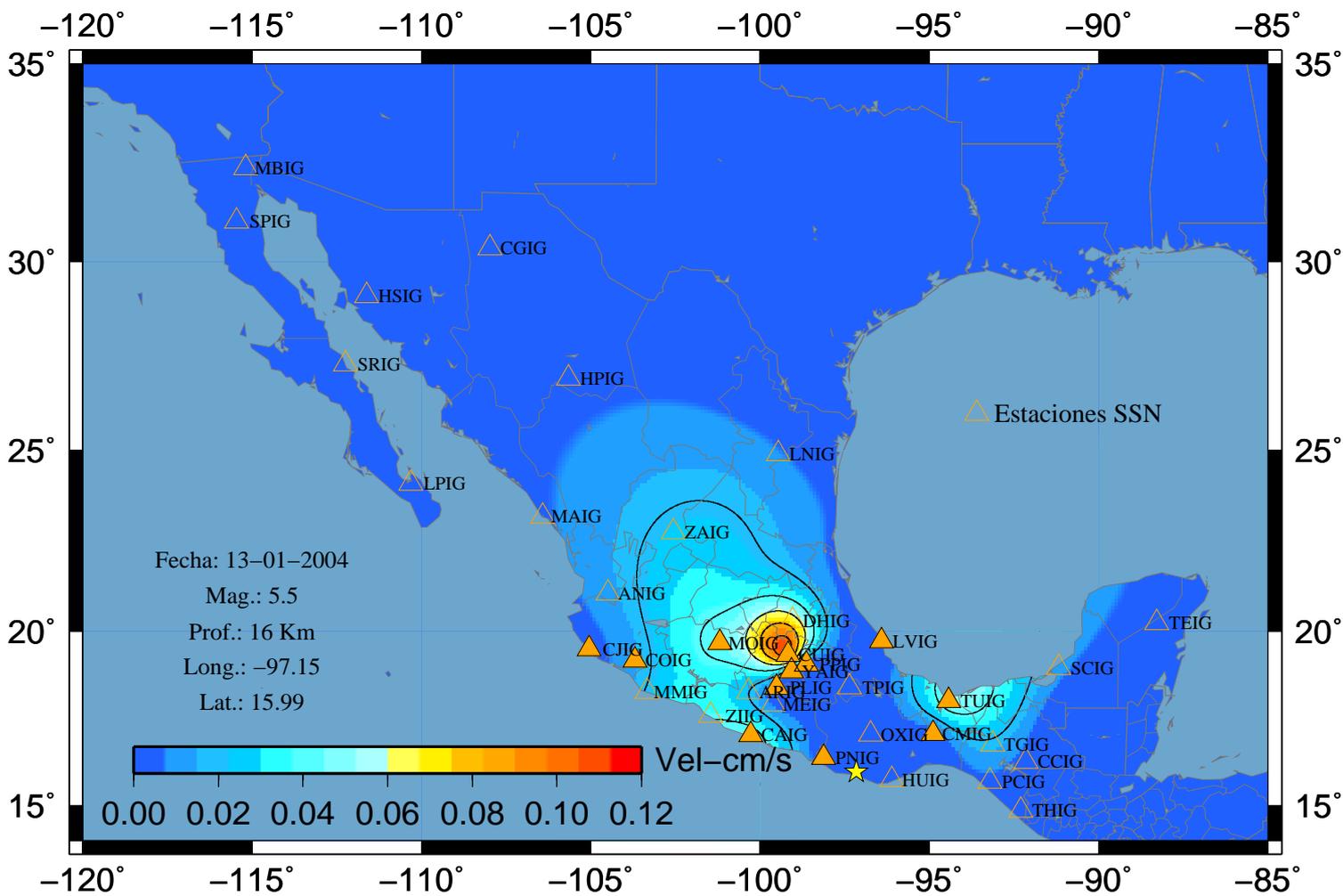
### Sismo 3 A-Vertical



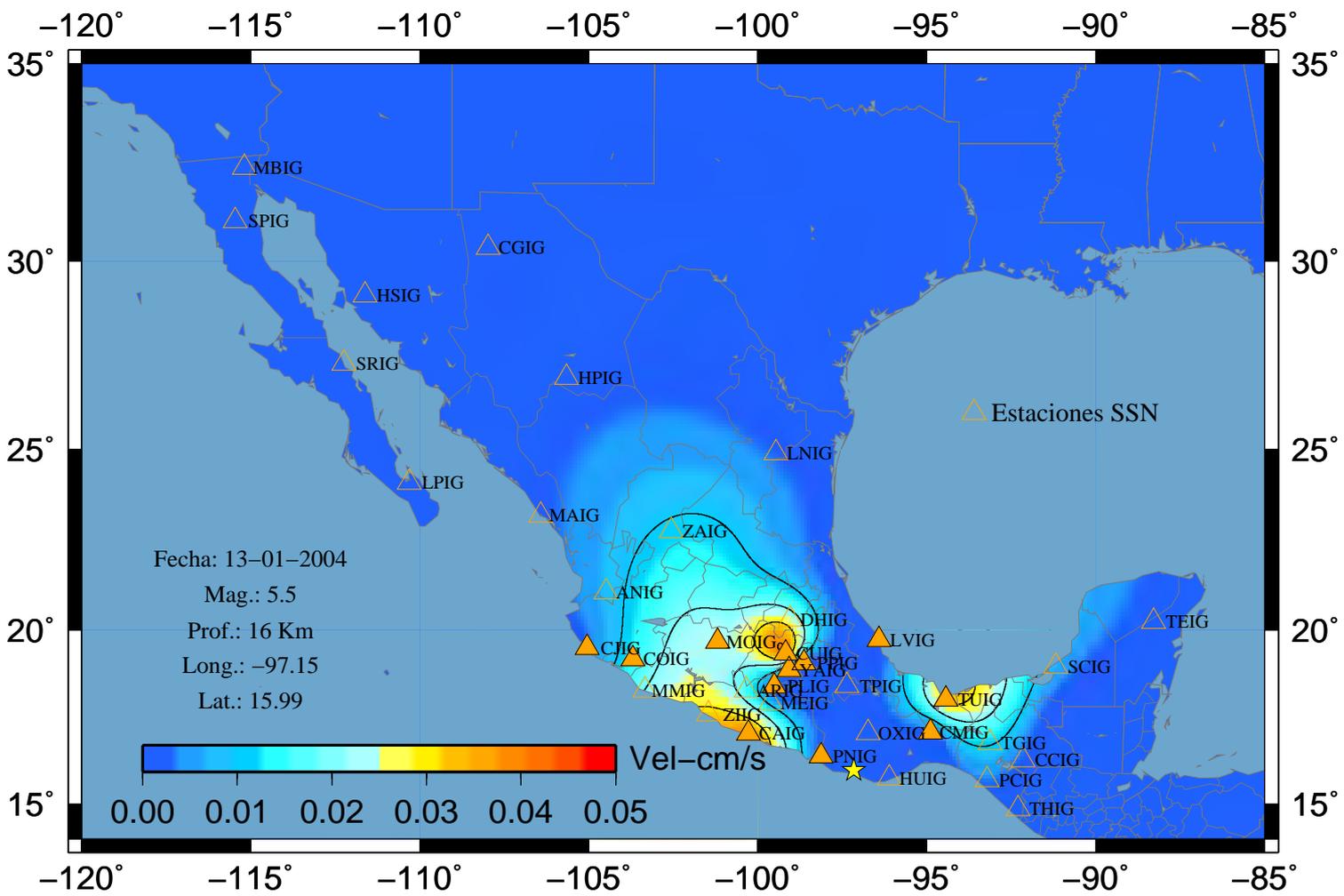
### Sismo 3 V-Este



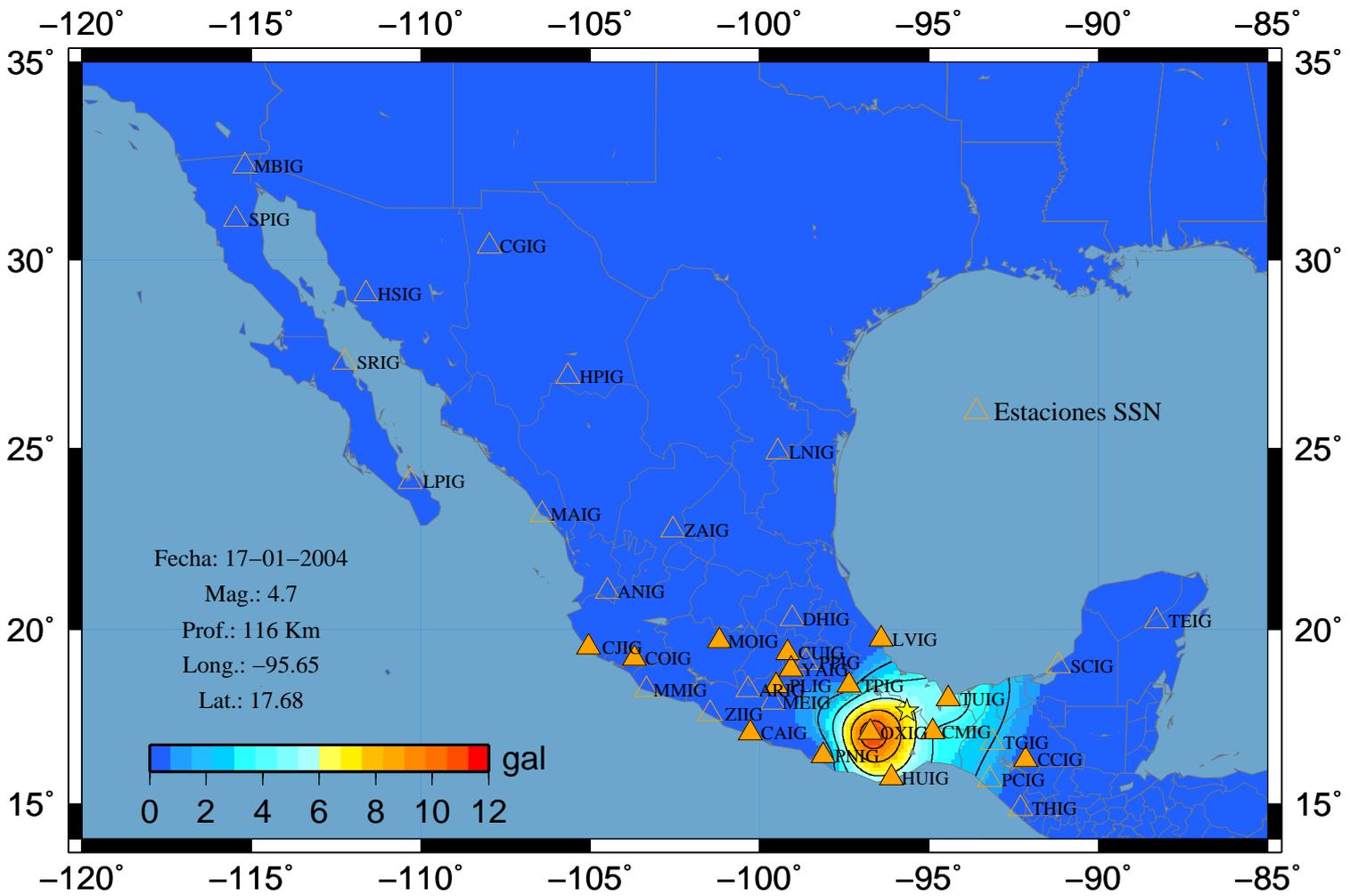
### Sismo 3 V-Norte



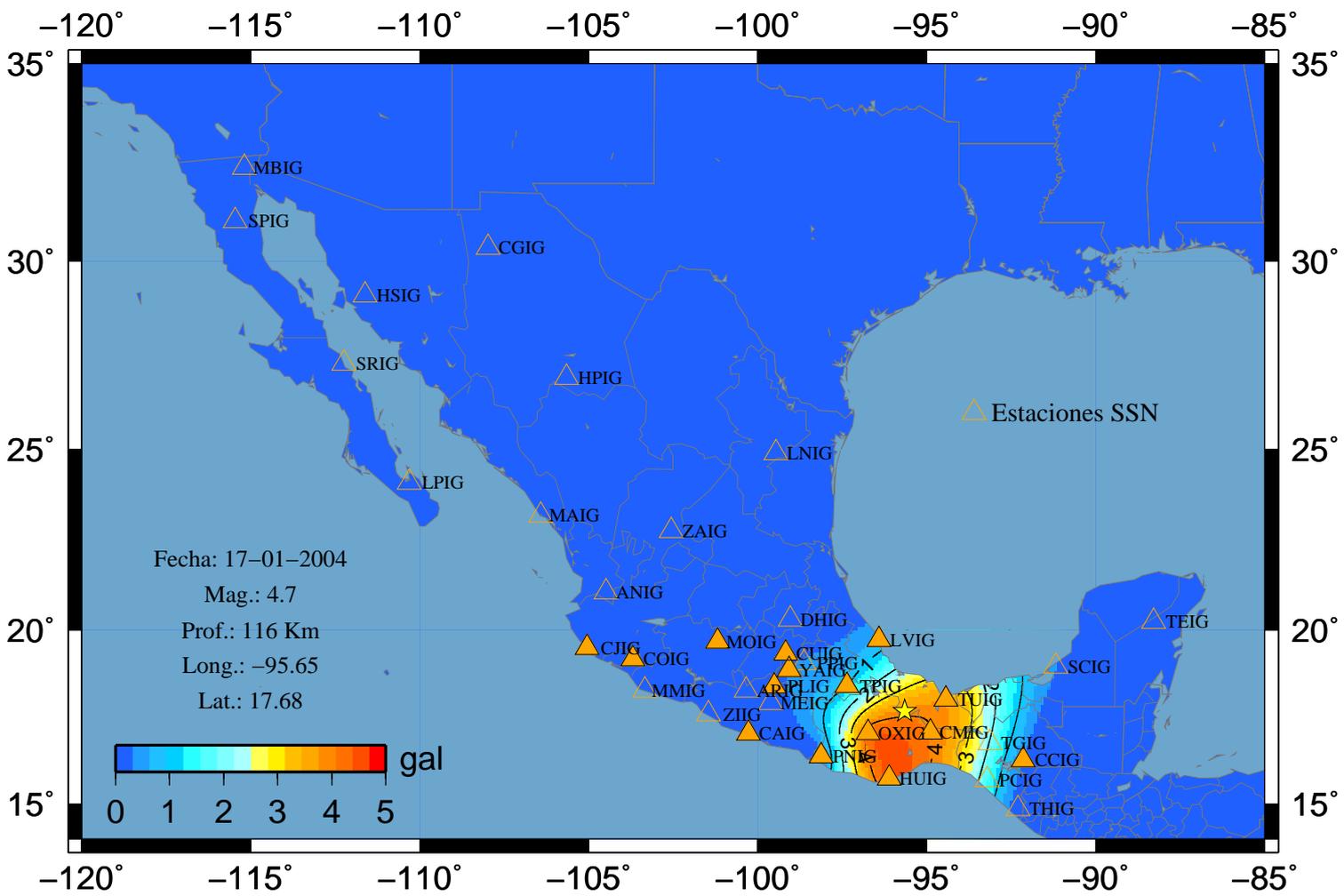
### Sismo 3 V-Vertical



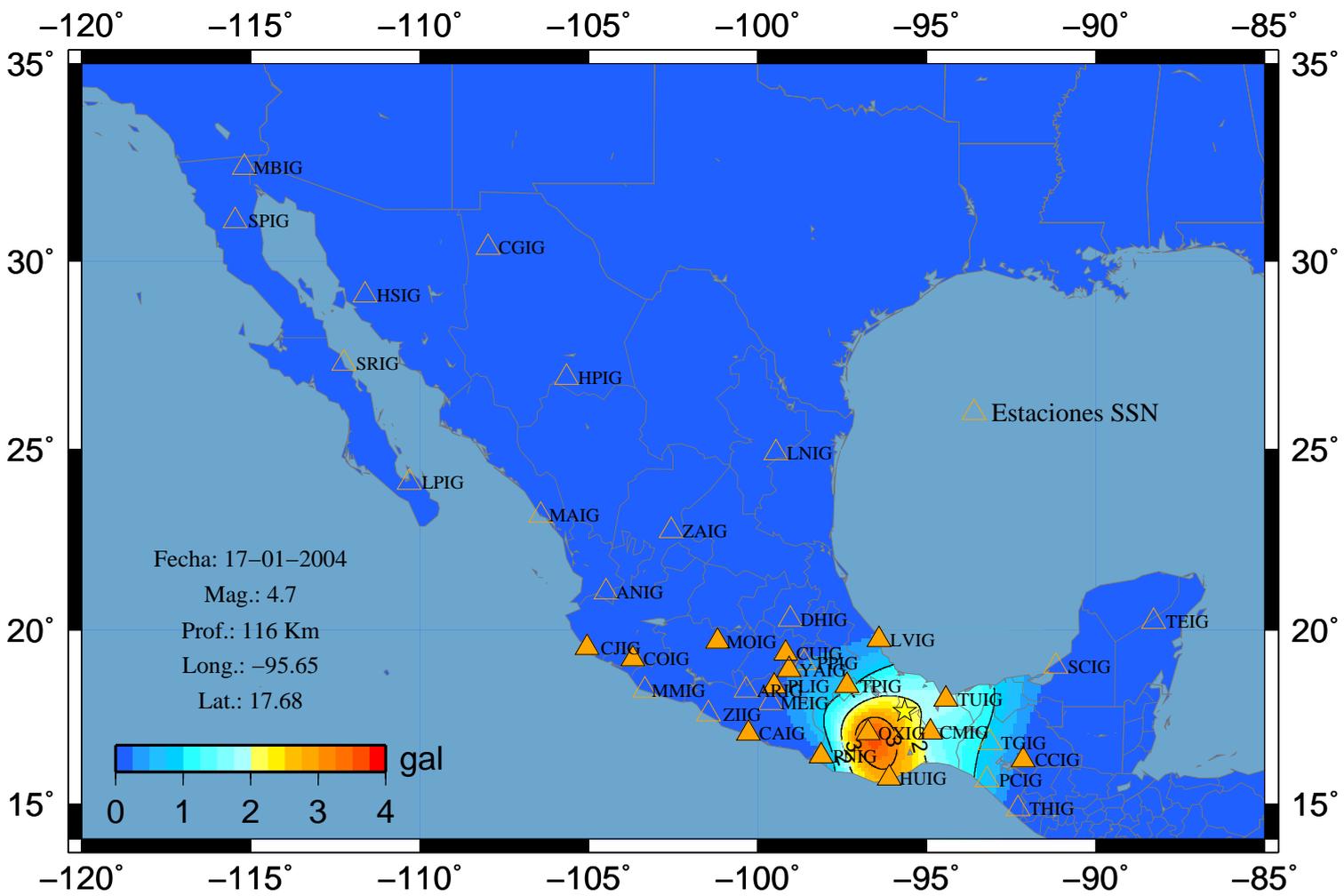
### Sismo 4 A-Este



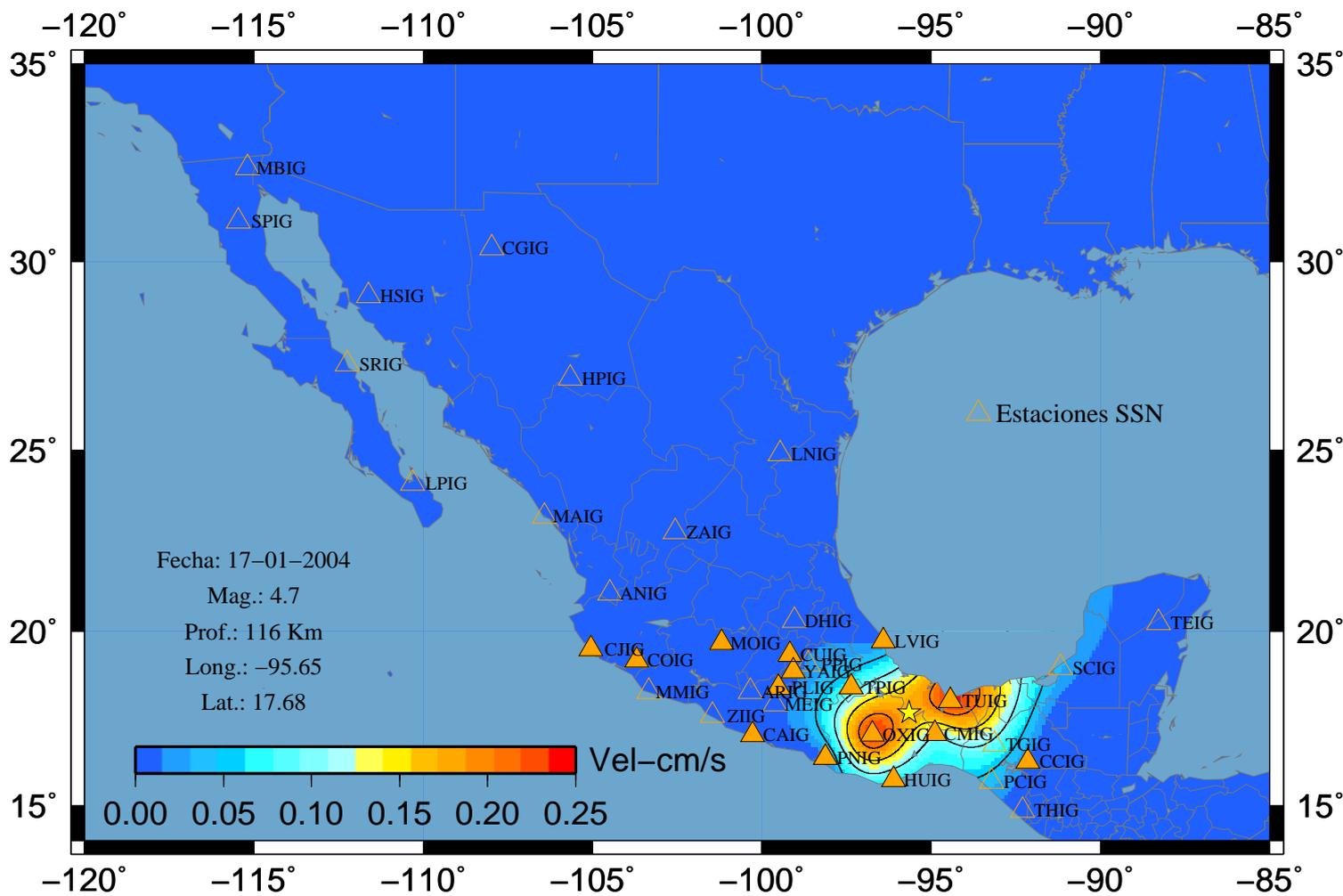
# Sismo 4 A-Norte



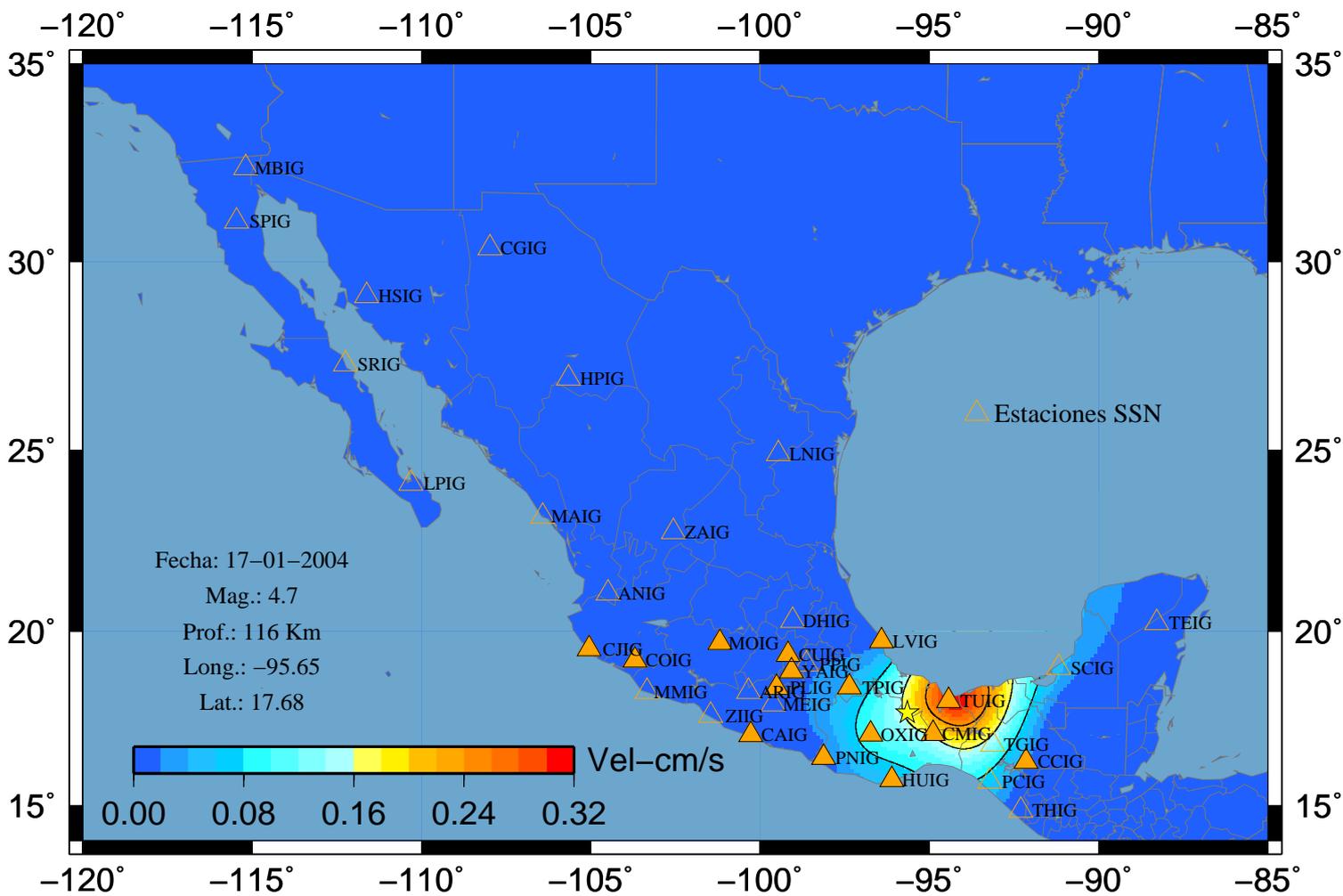
### Sismo 4 A-Vertical



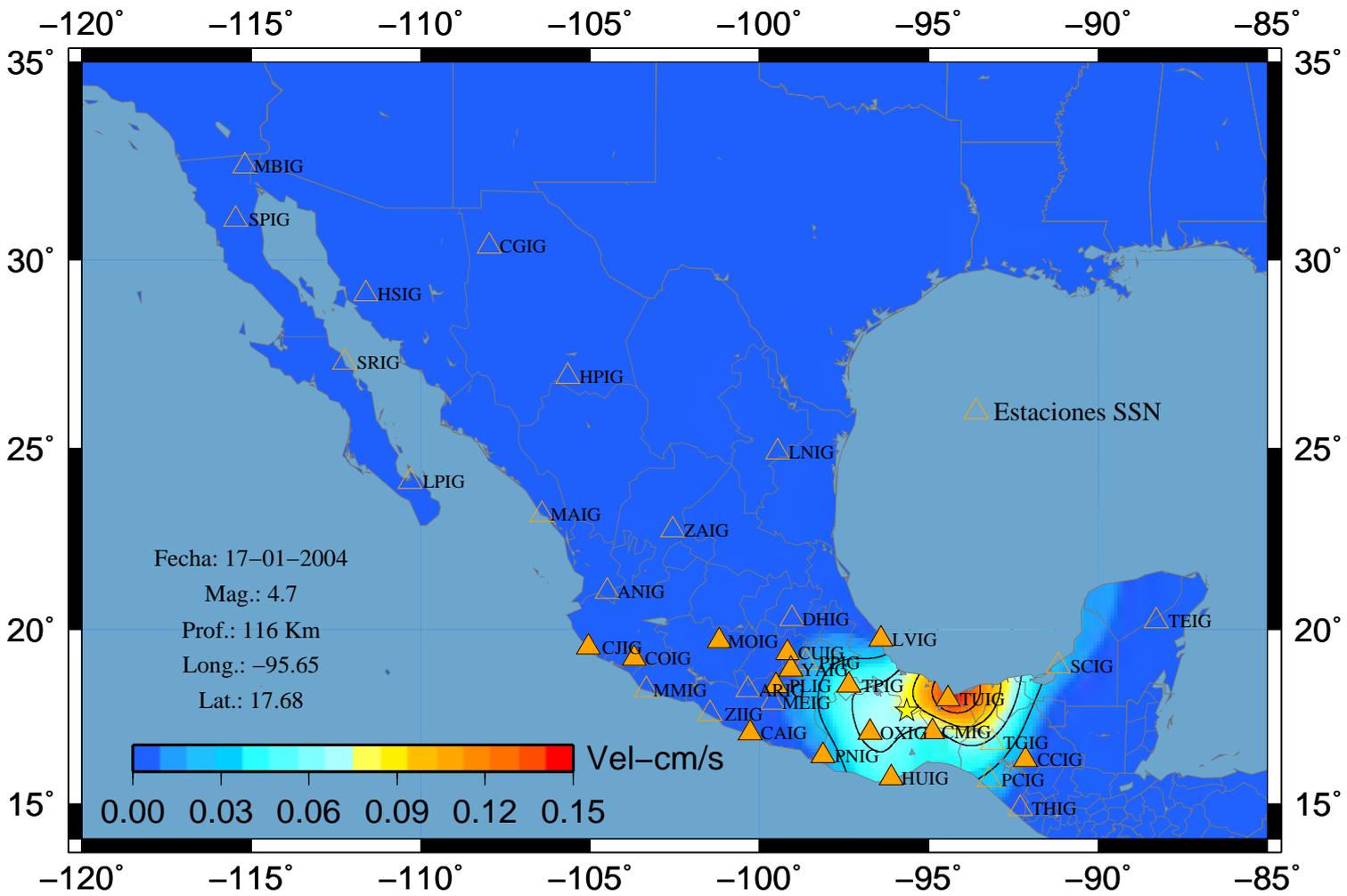
### Sismo 4 V-Este



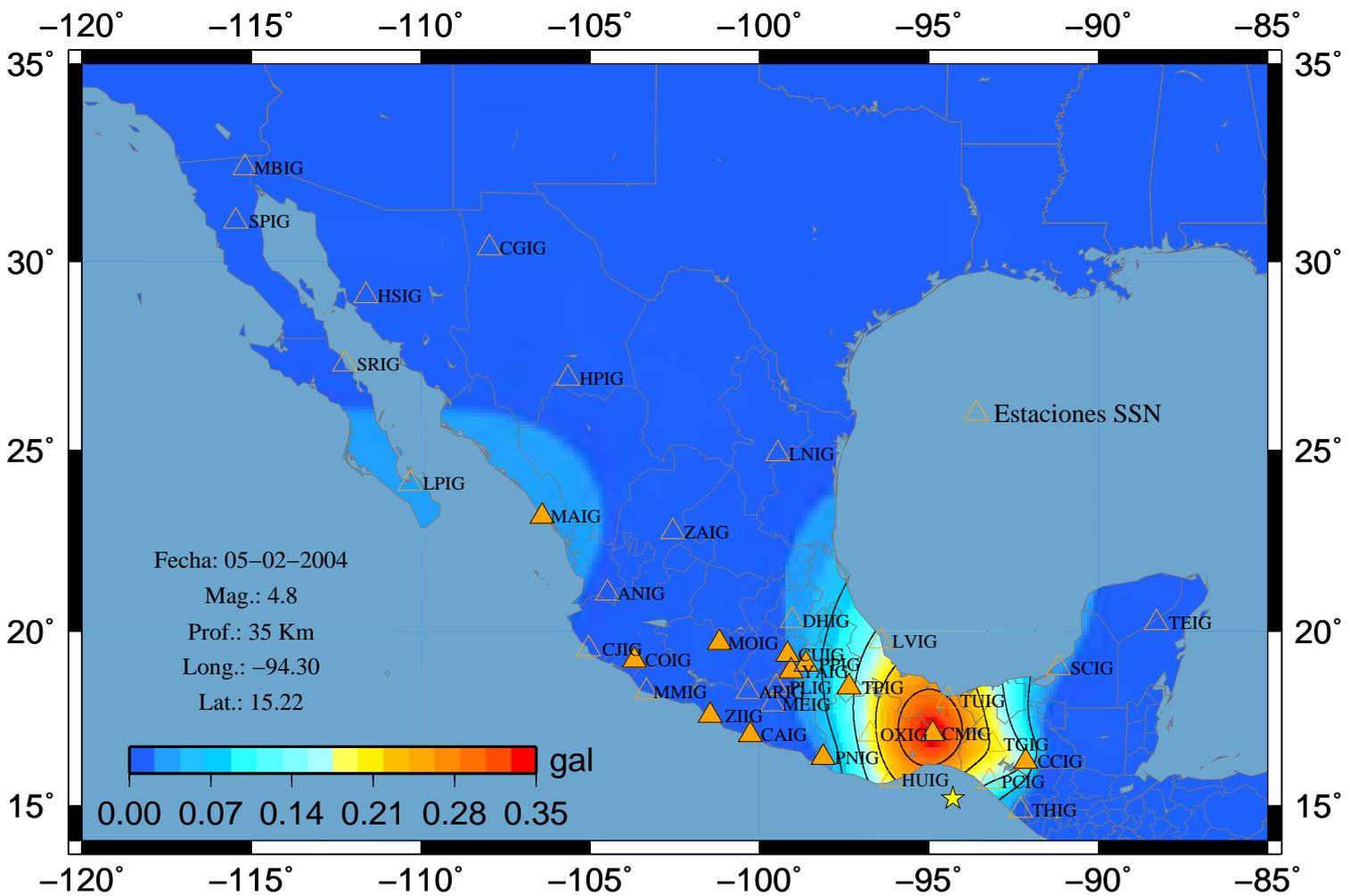
### Sismo 4 V-Norte



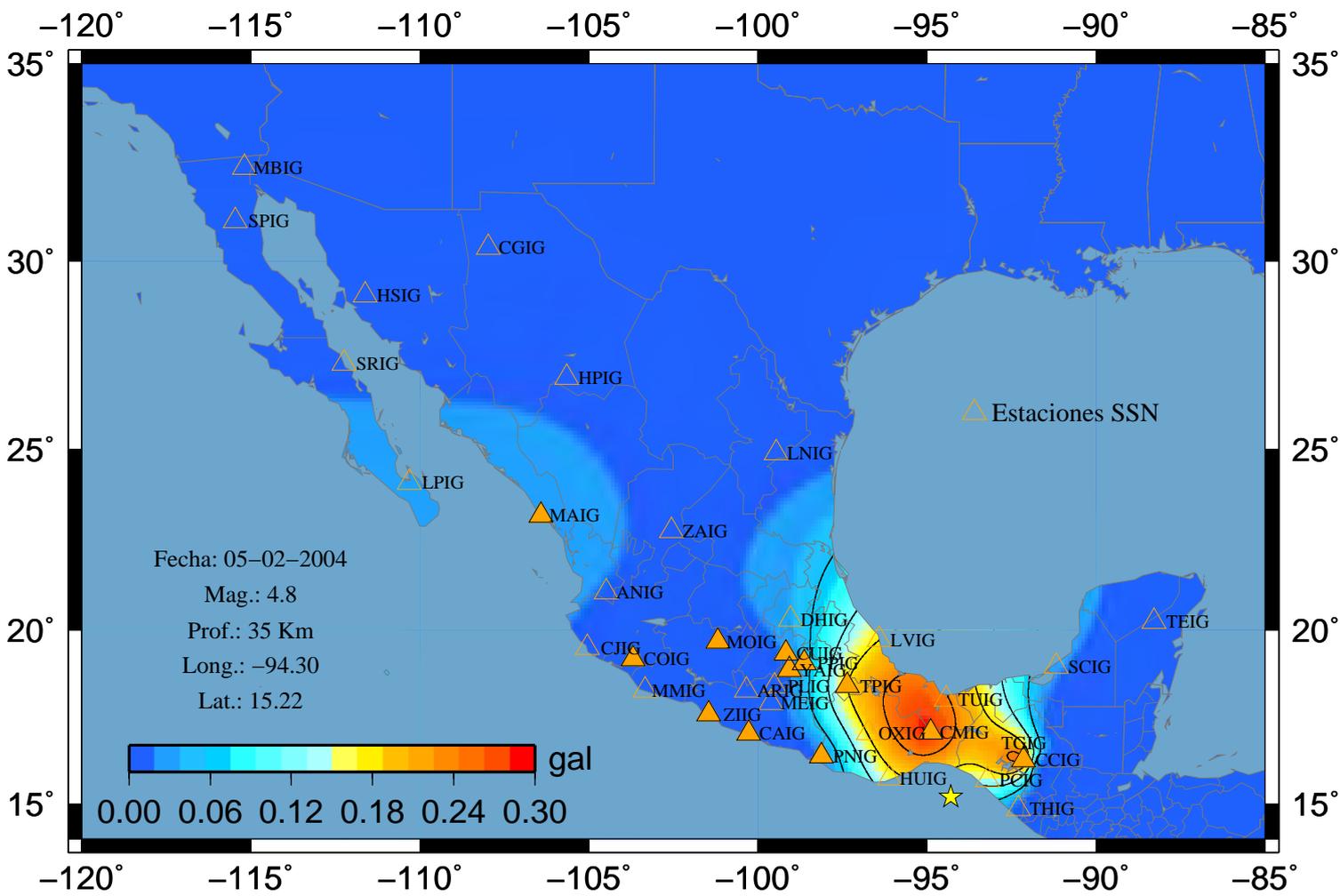
### Sismo 4 V-Vertical



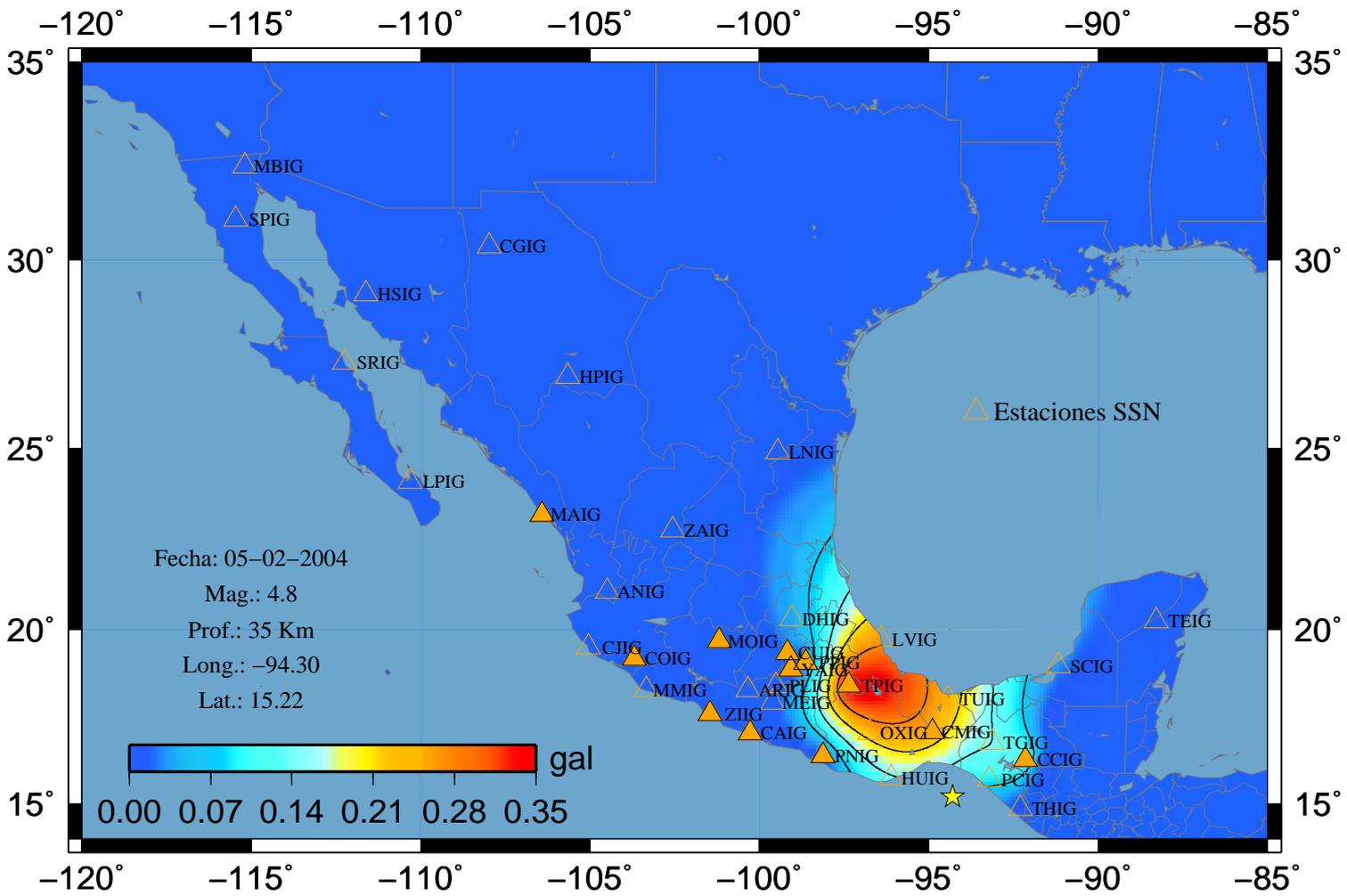
### Sismo 5 A-Este



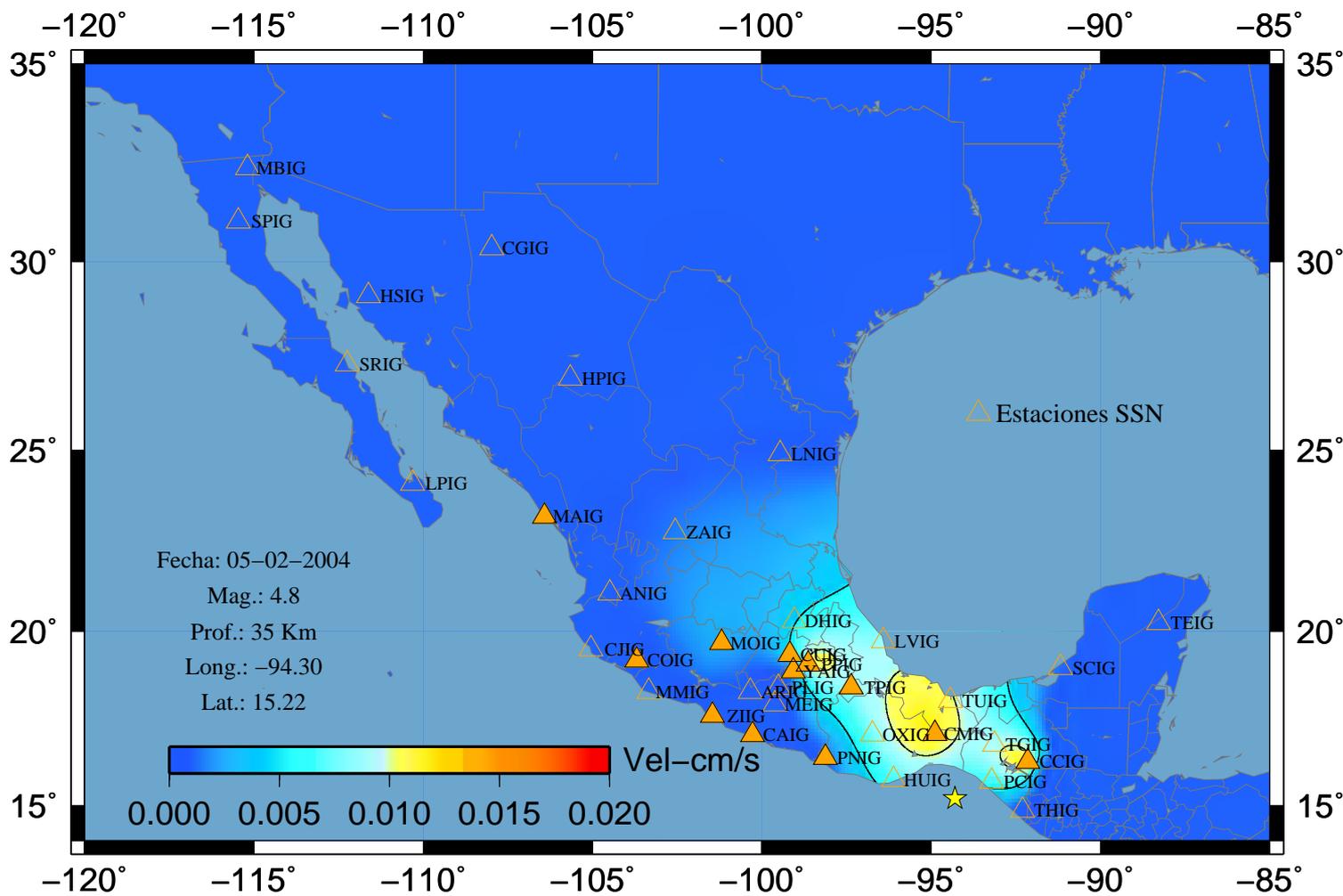
### Sismo 5 A-Norte



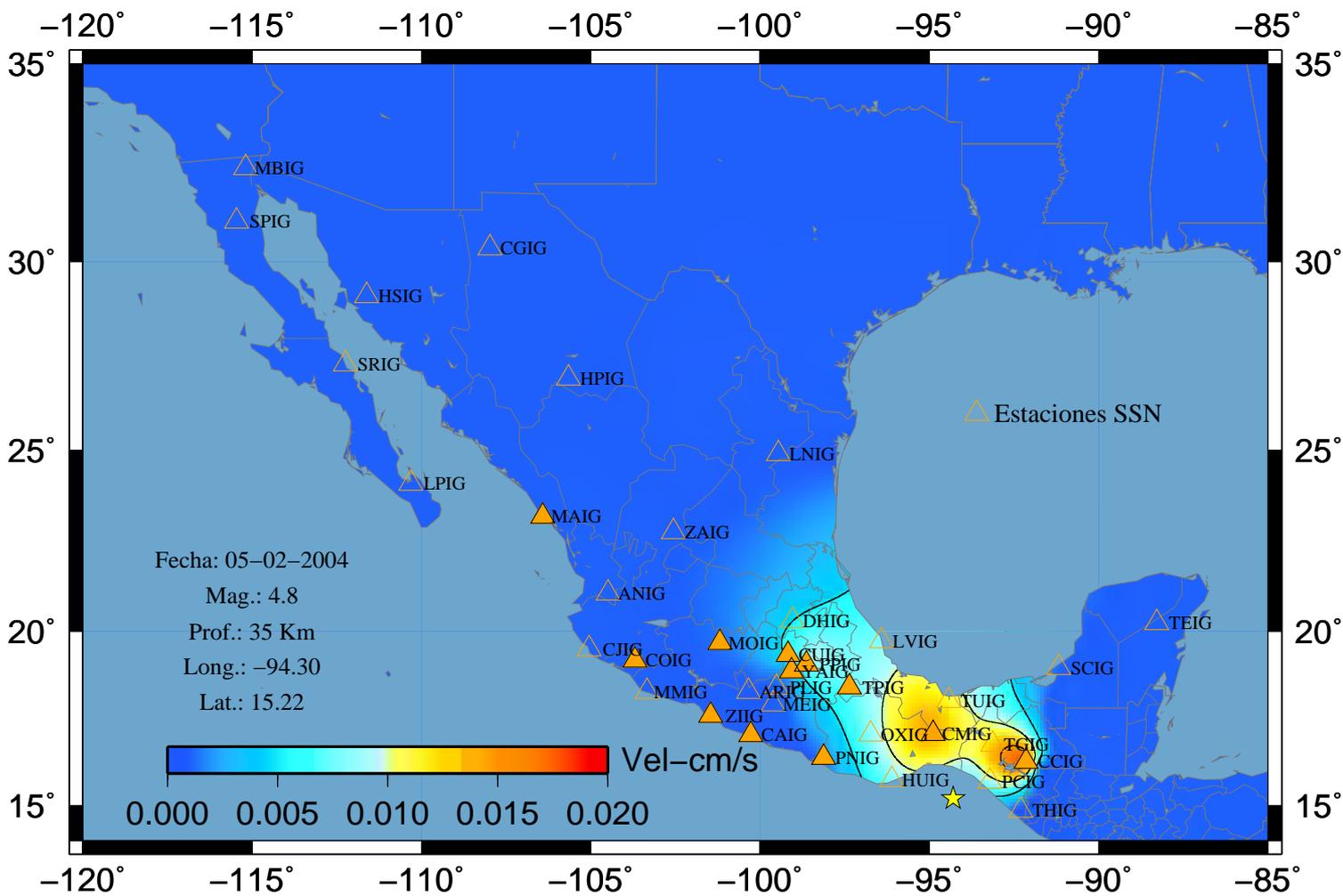
### Sismo 5 A-Vertical



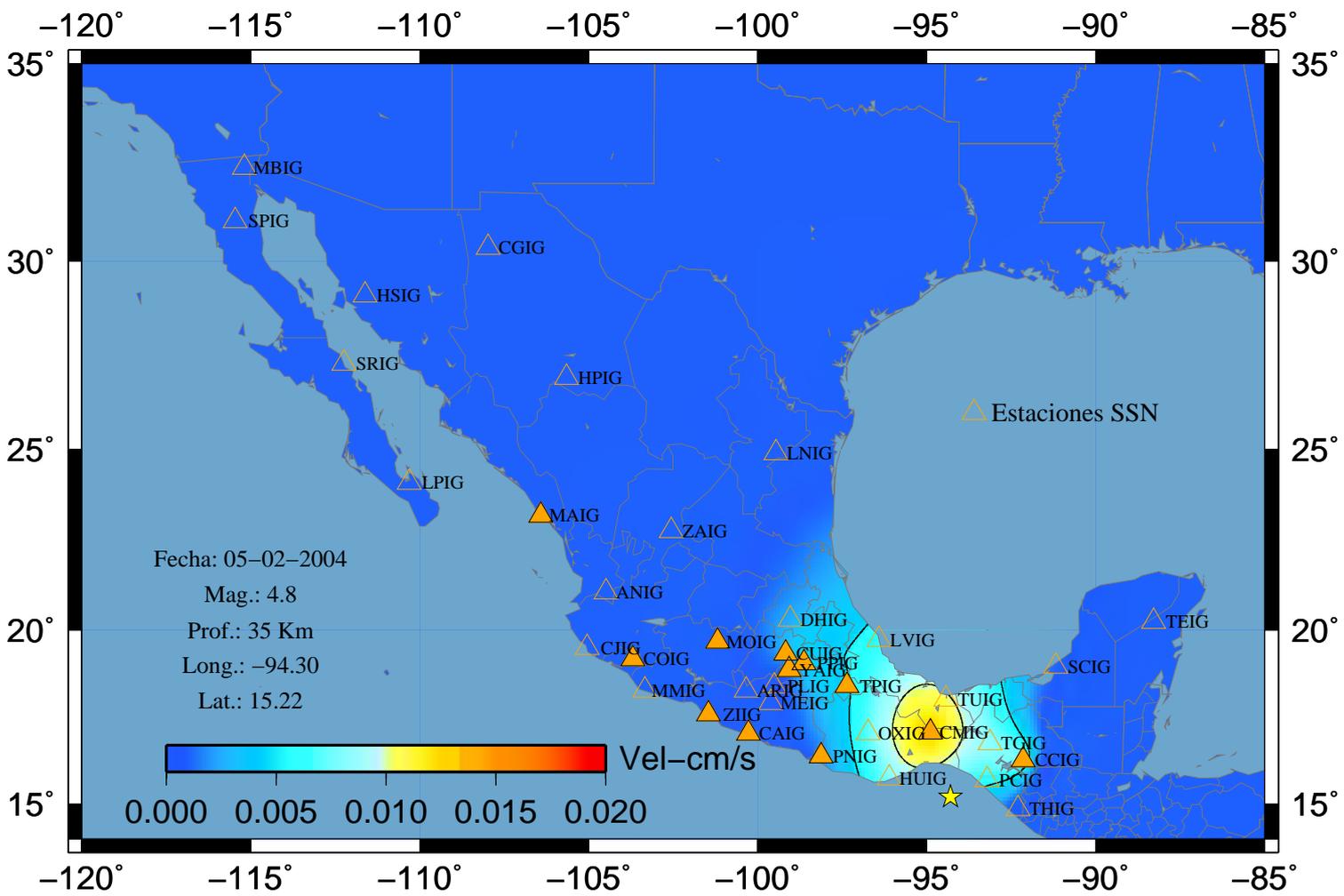
### Sismo 5 V-Este



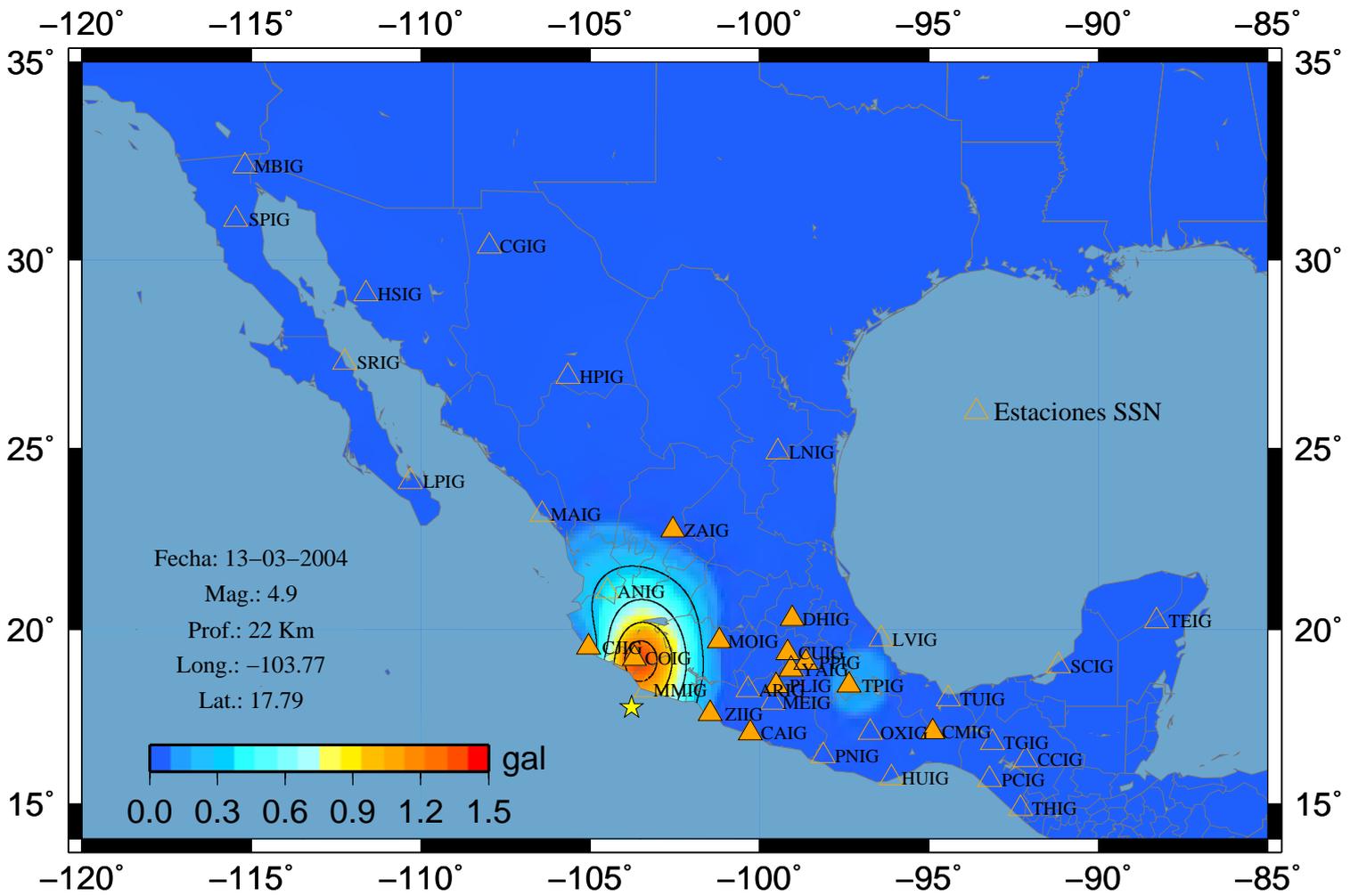
### Sismo 5 V-Norte



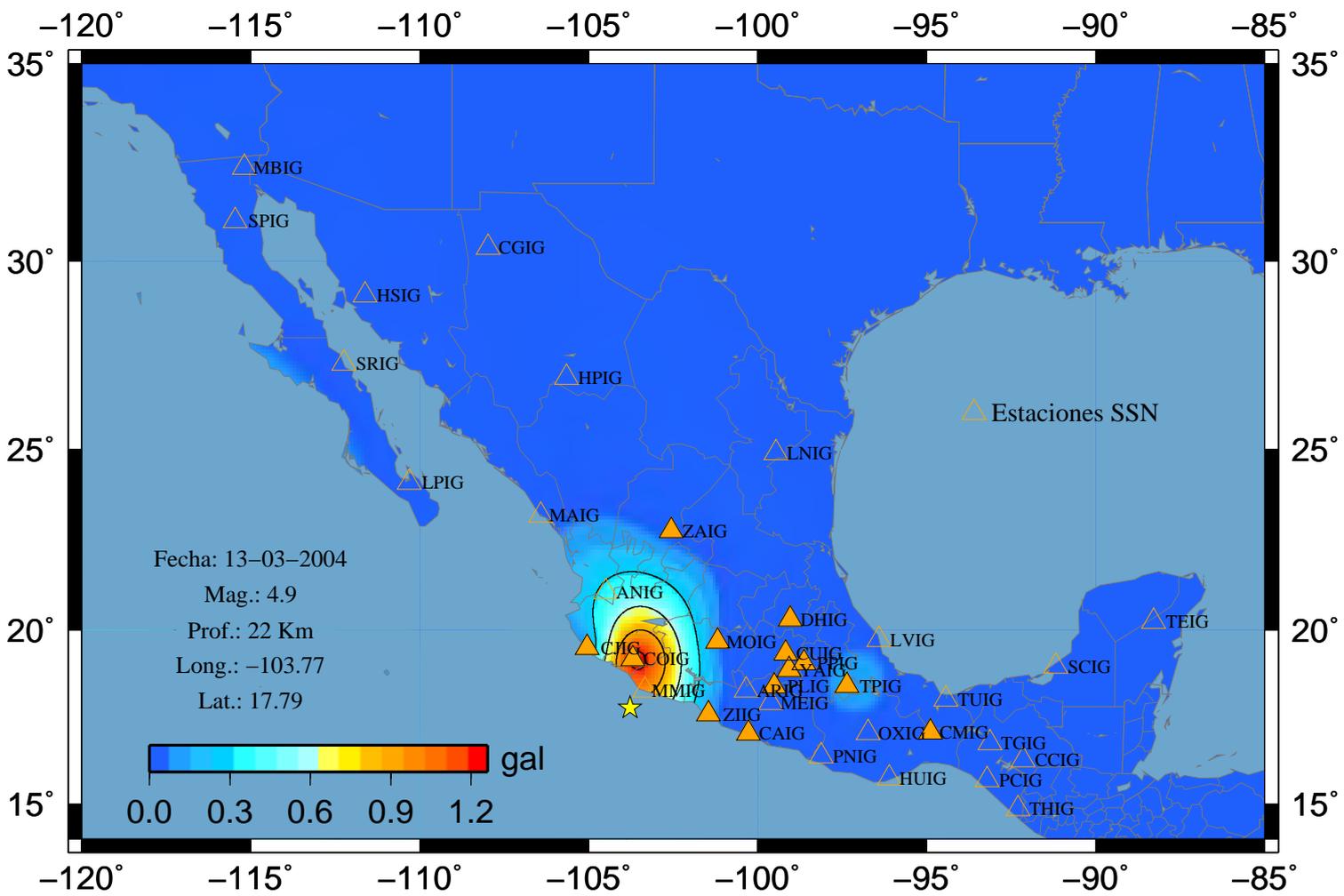
### Sismo 5 V-Vertical



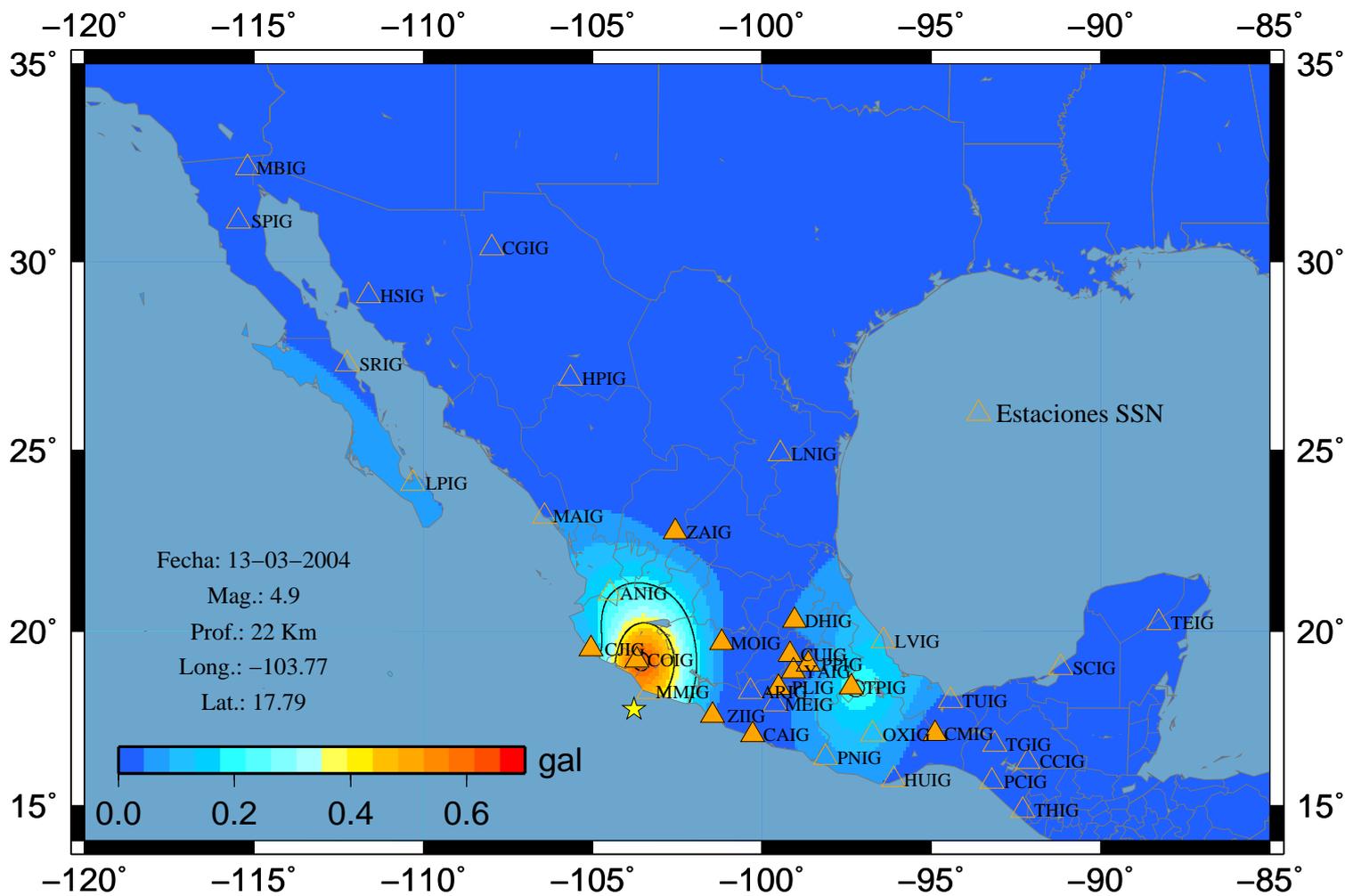
# Sismo 11 A-Este



# Sismo 11 A-Norte

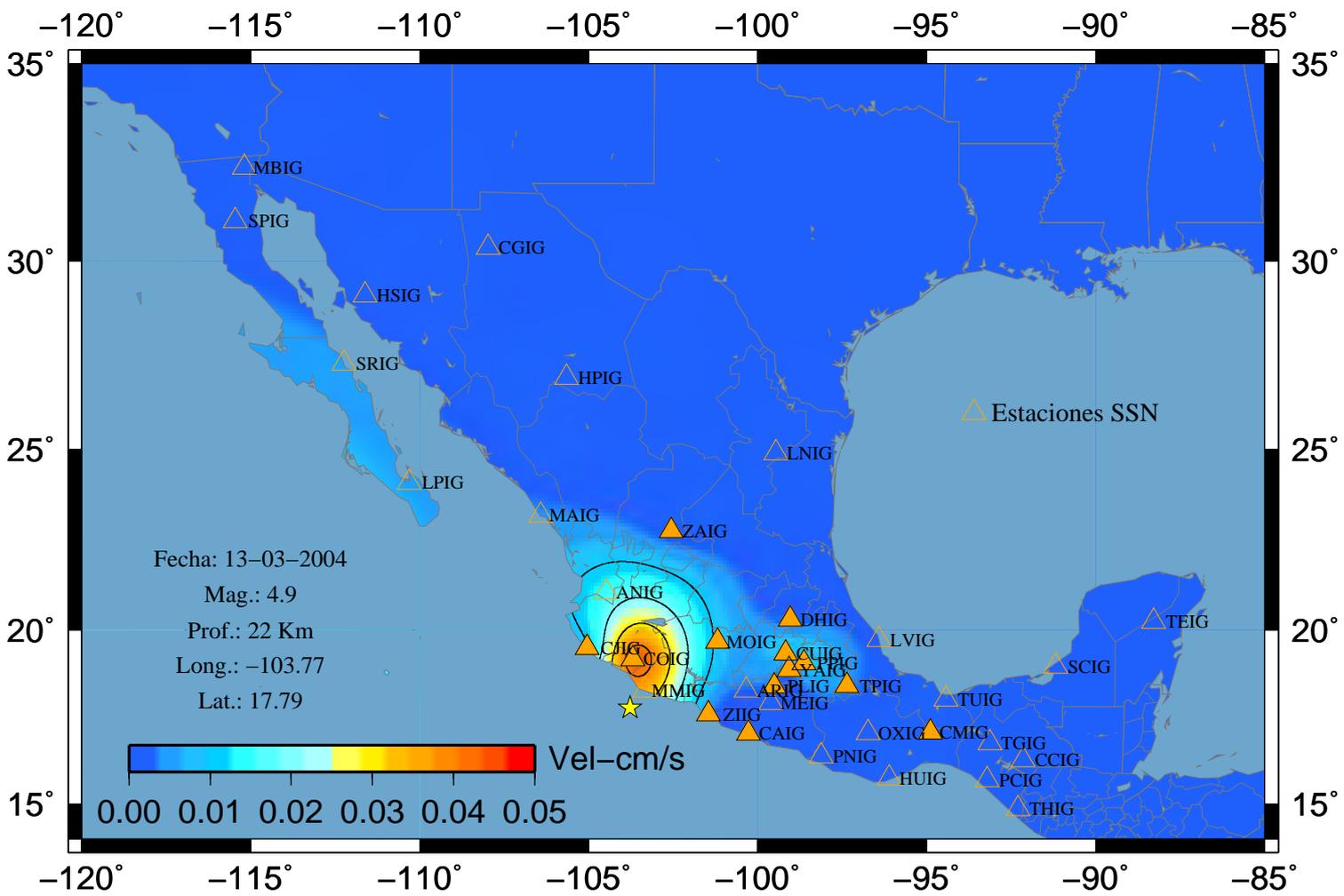


# Sismo 11 A-Vertical

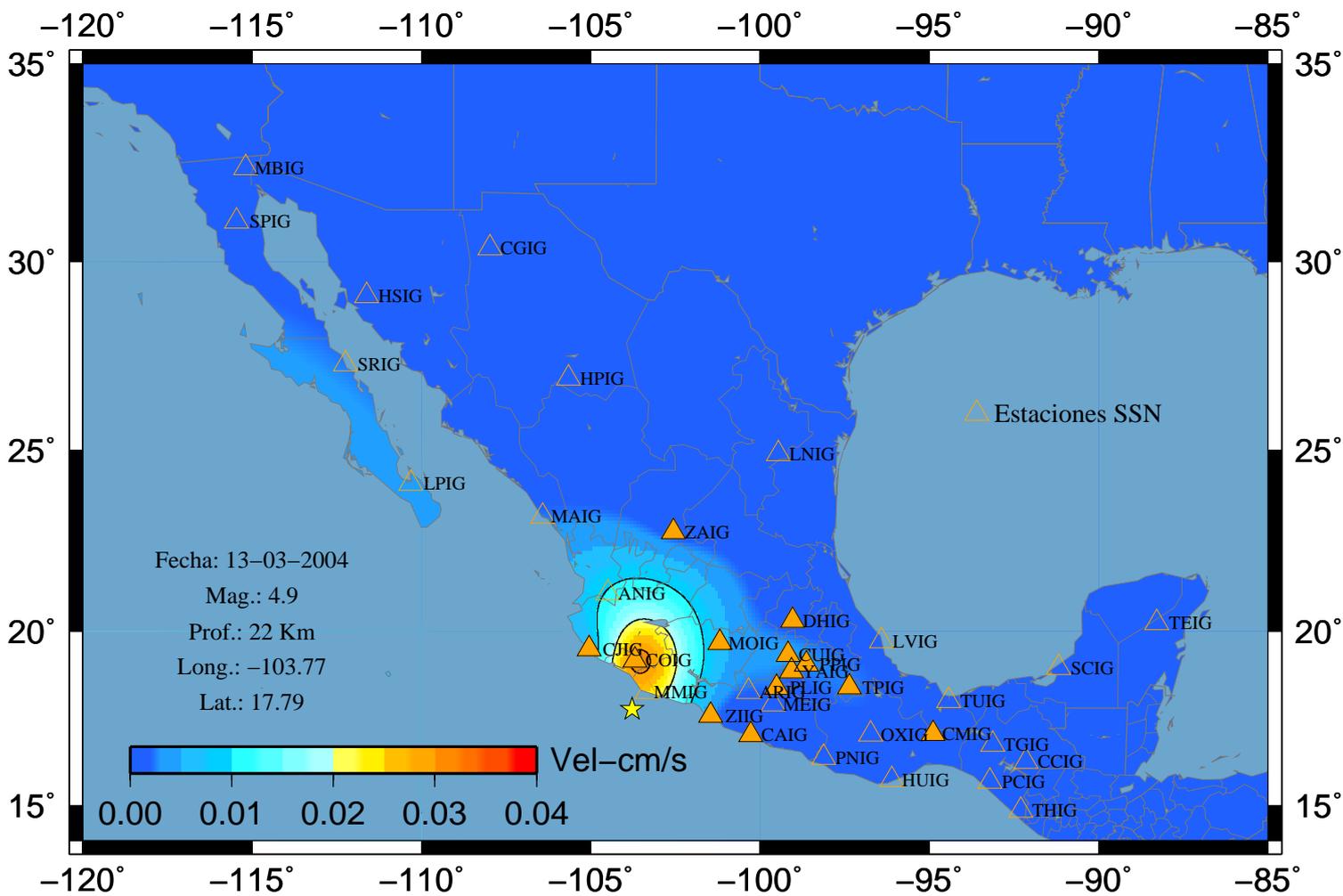




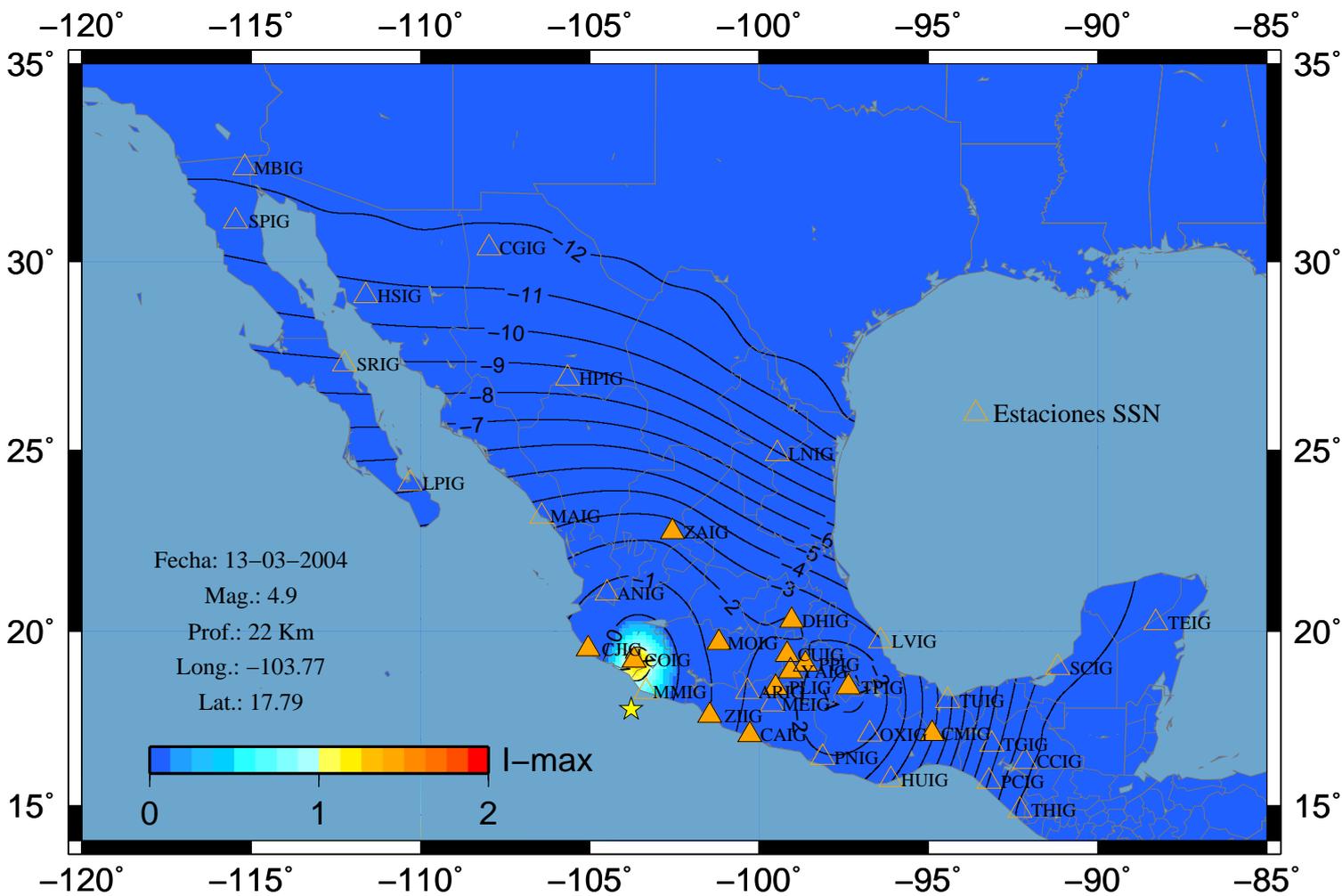
# Sismo 11 V-Norte



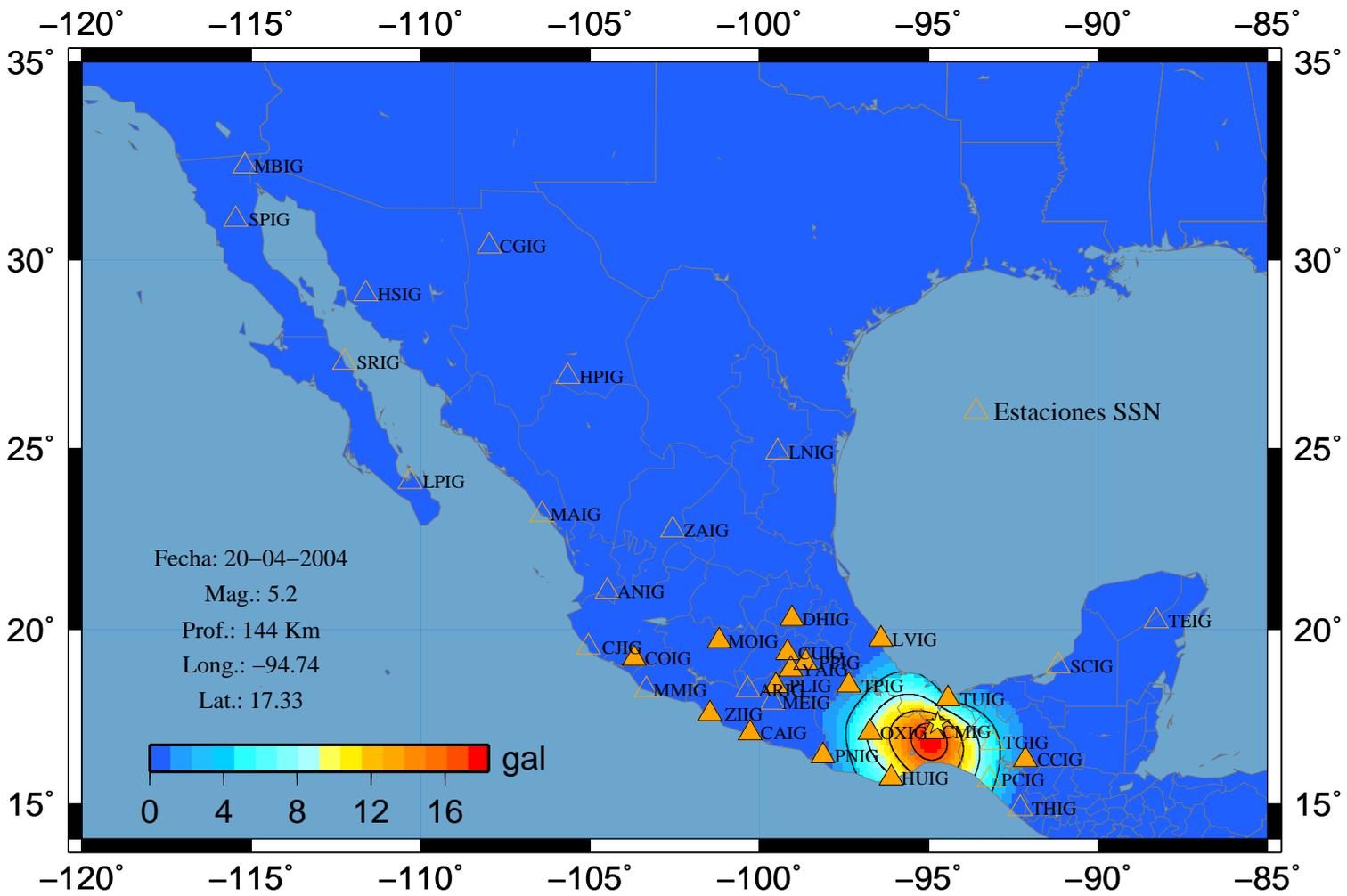
# Sismo 11 V-Vertical



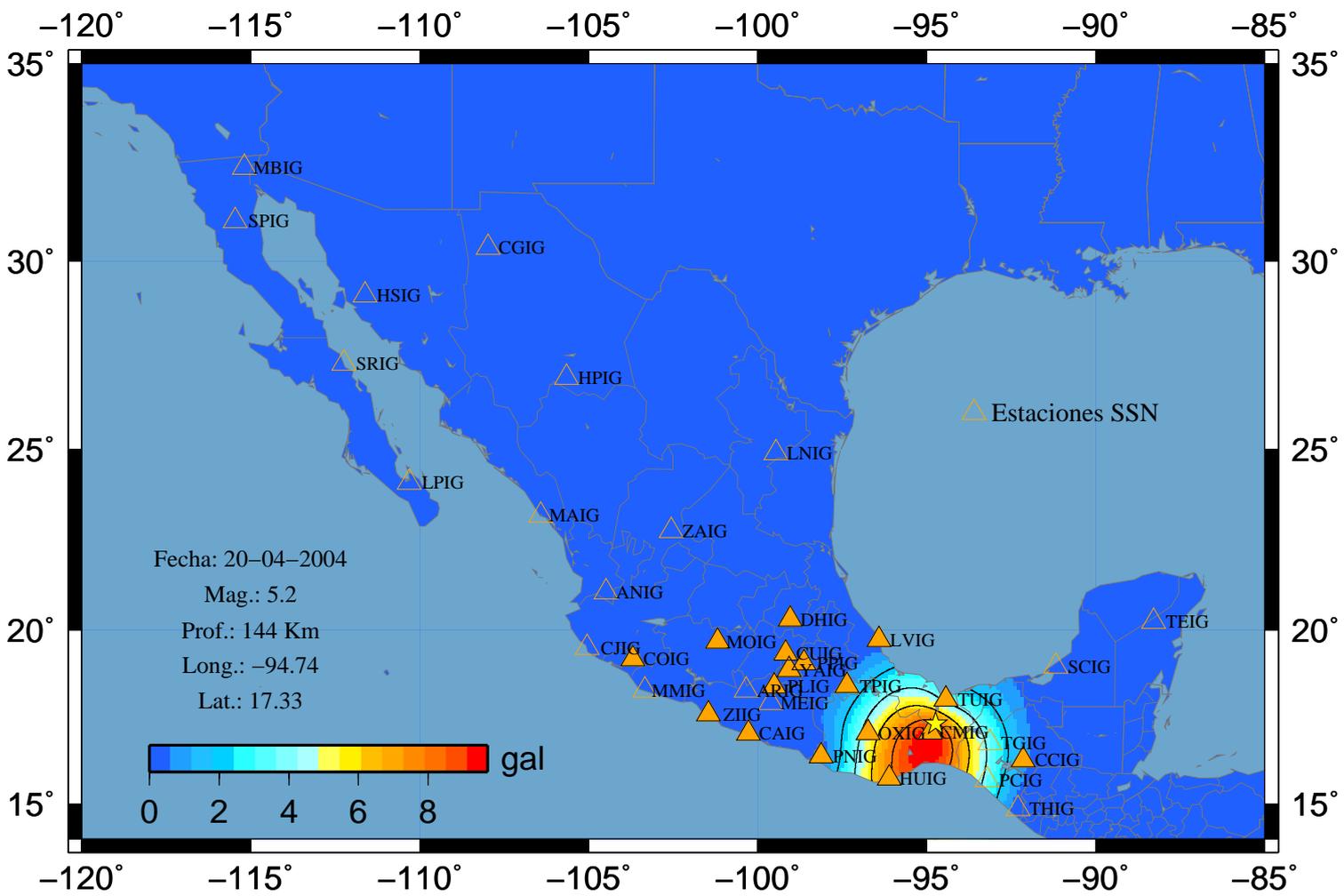
# Sismo 11 I (Max)



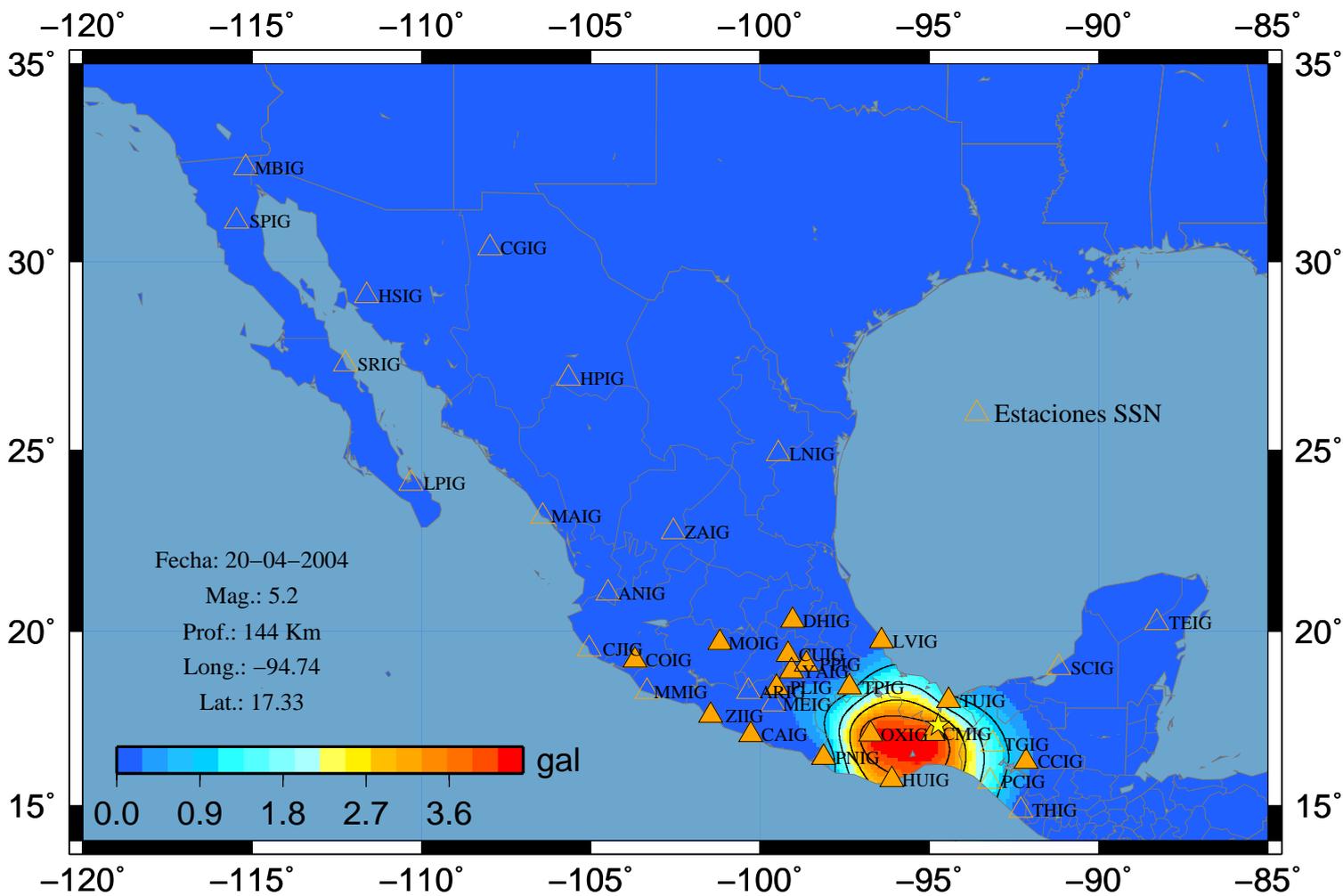
# Sismo 13 A-Este



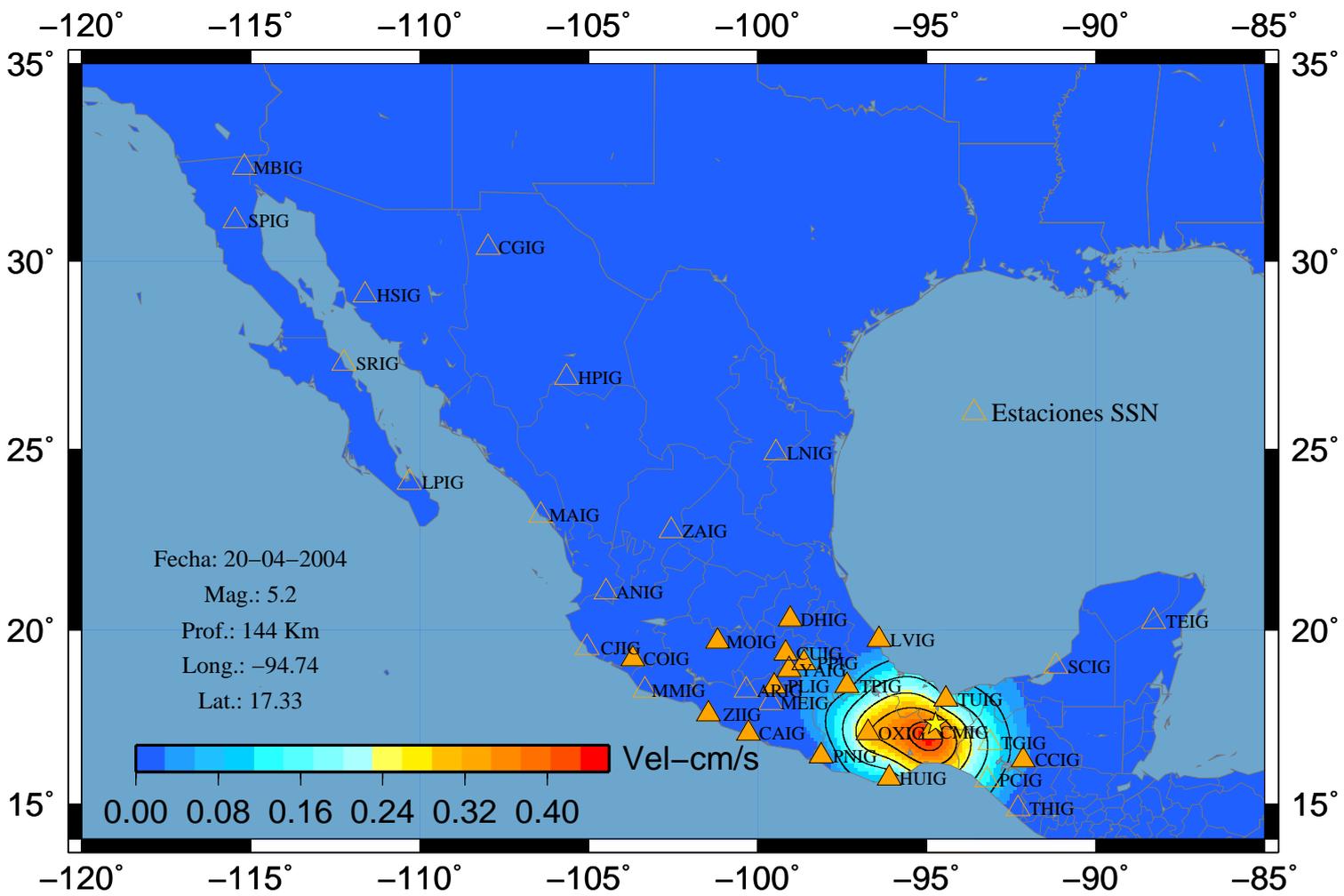
# Sismo 13 A-Norte



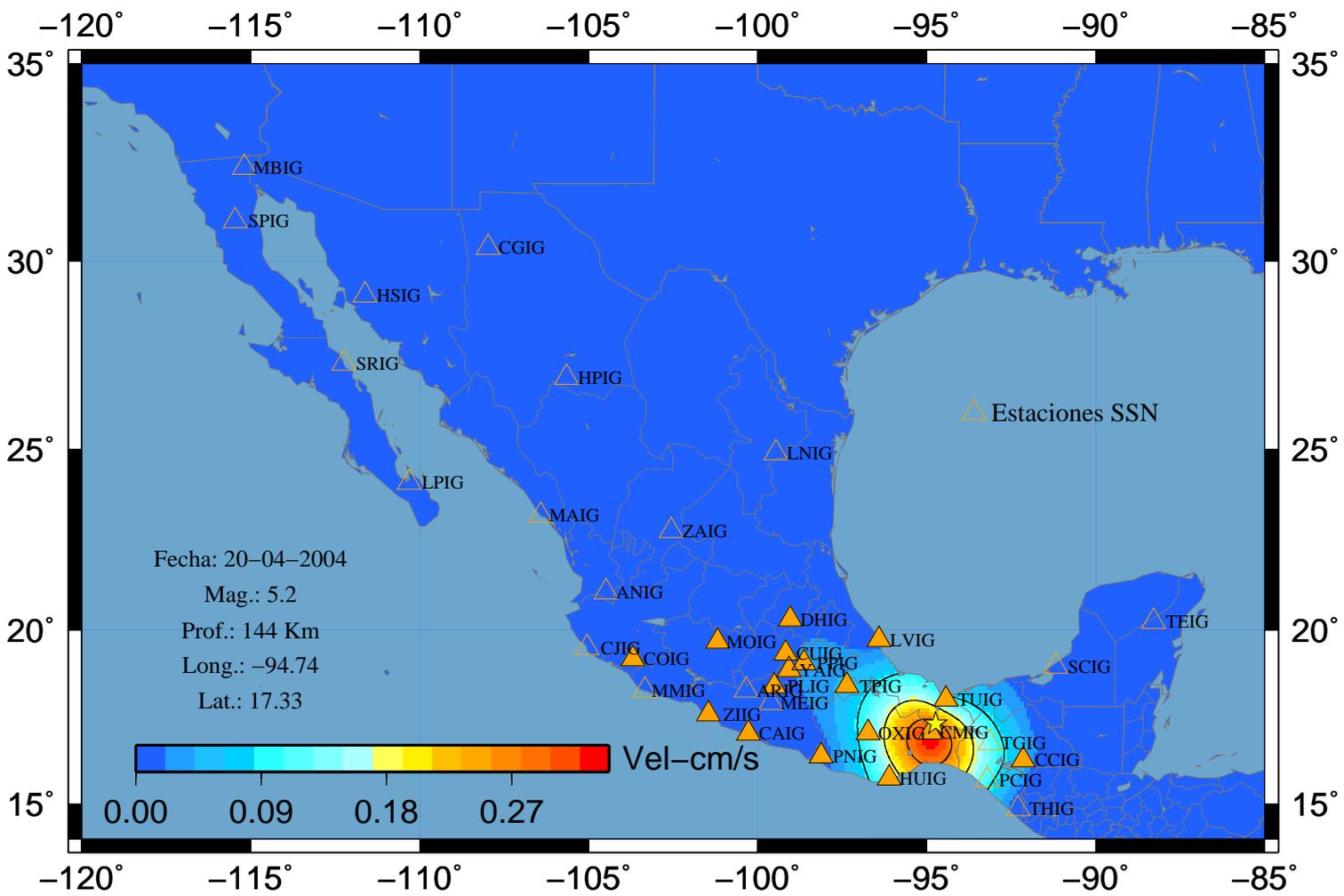
### Sismo 13 A-Vertical



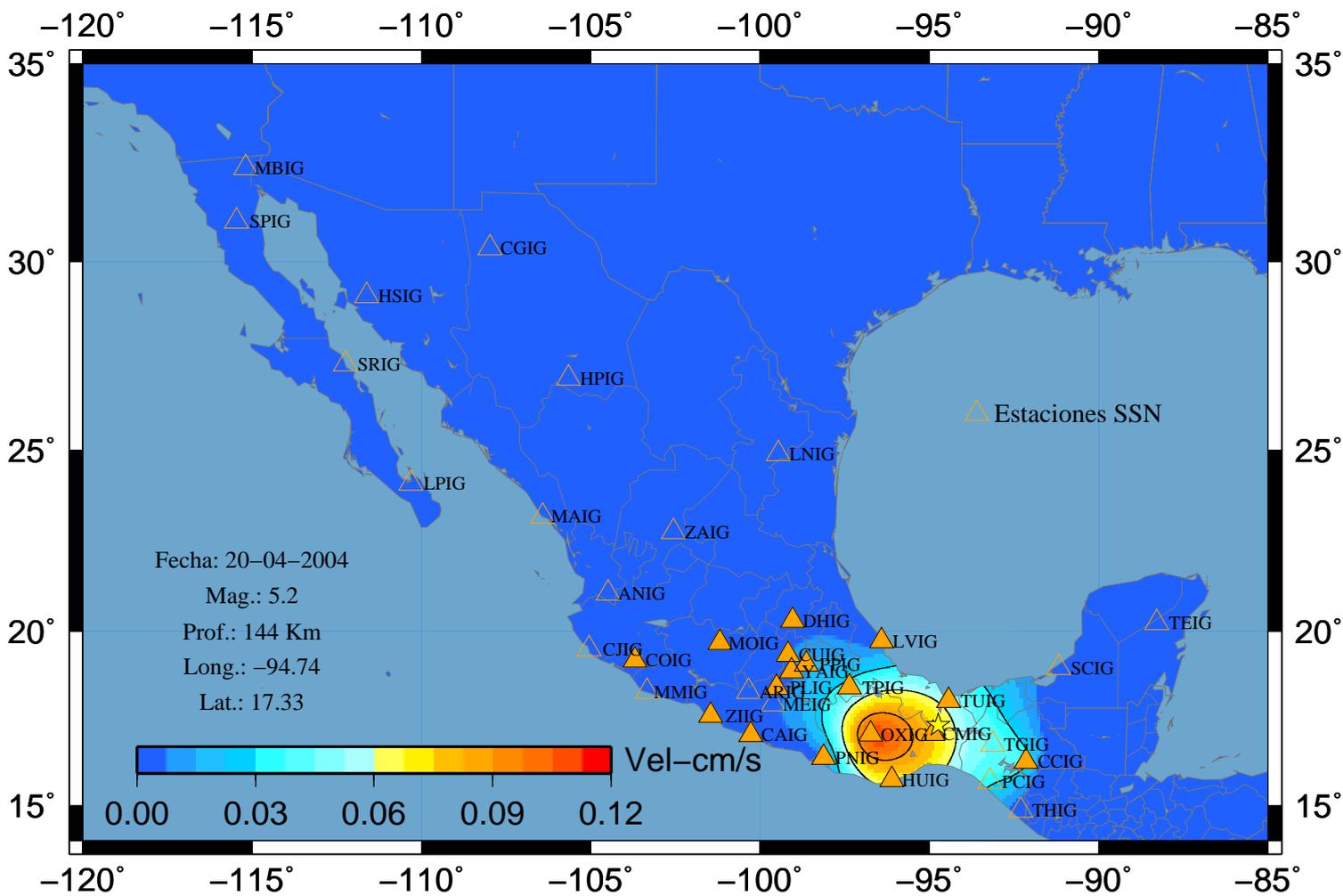
# Sismo 13 V-Este



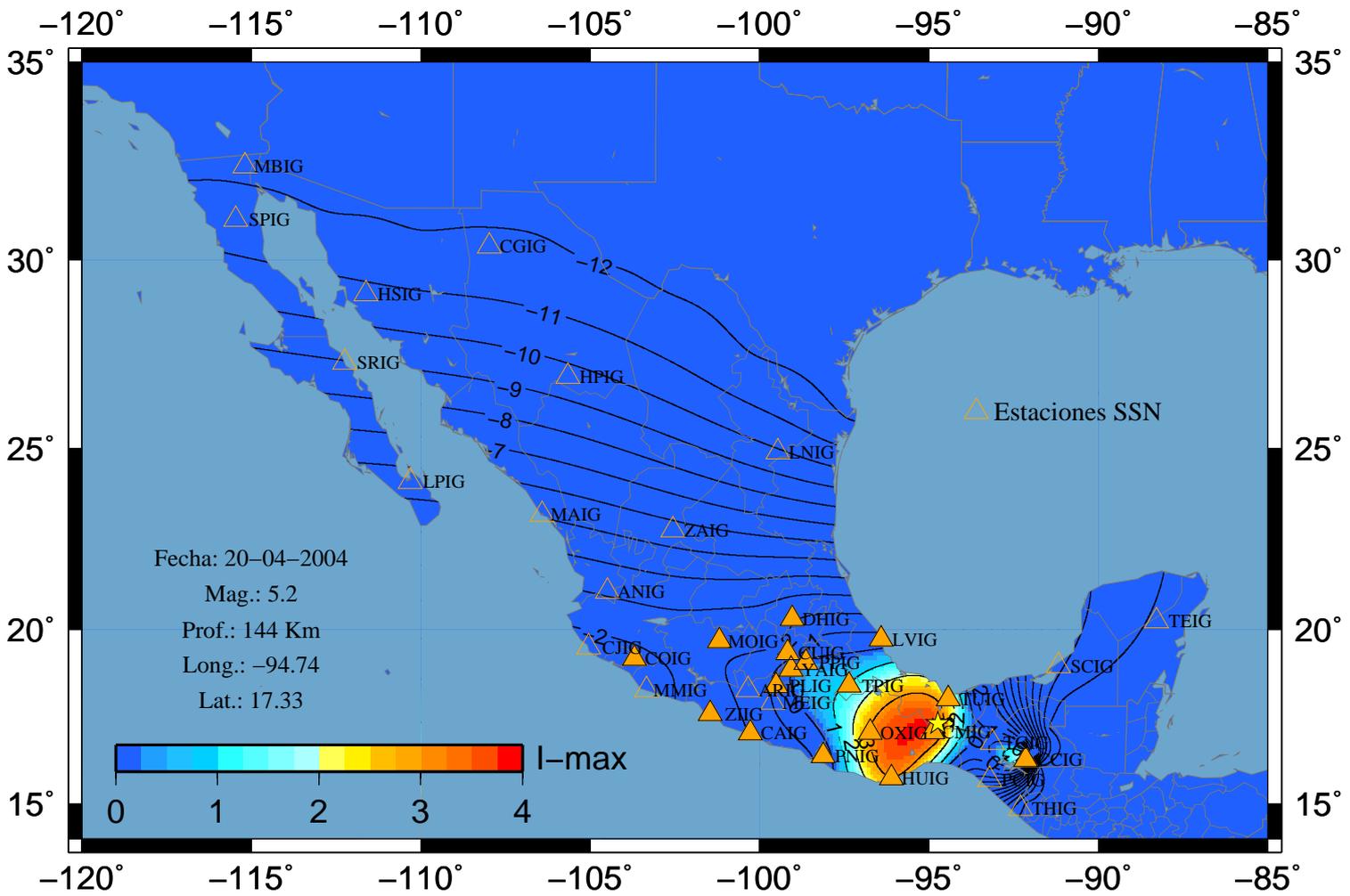
# Sismo 13 V-Norte



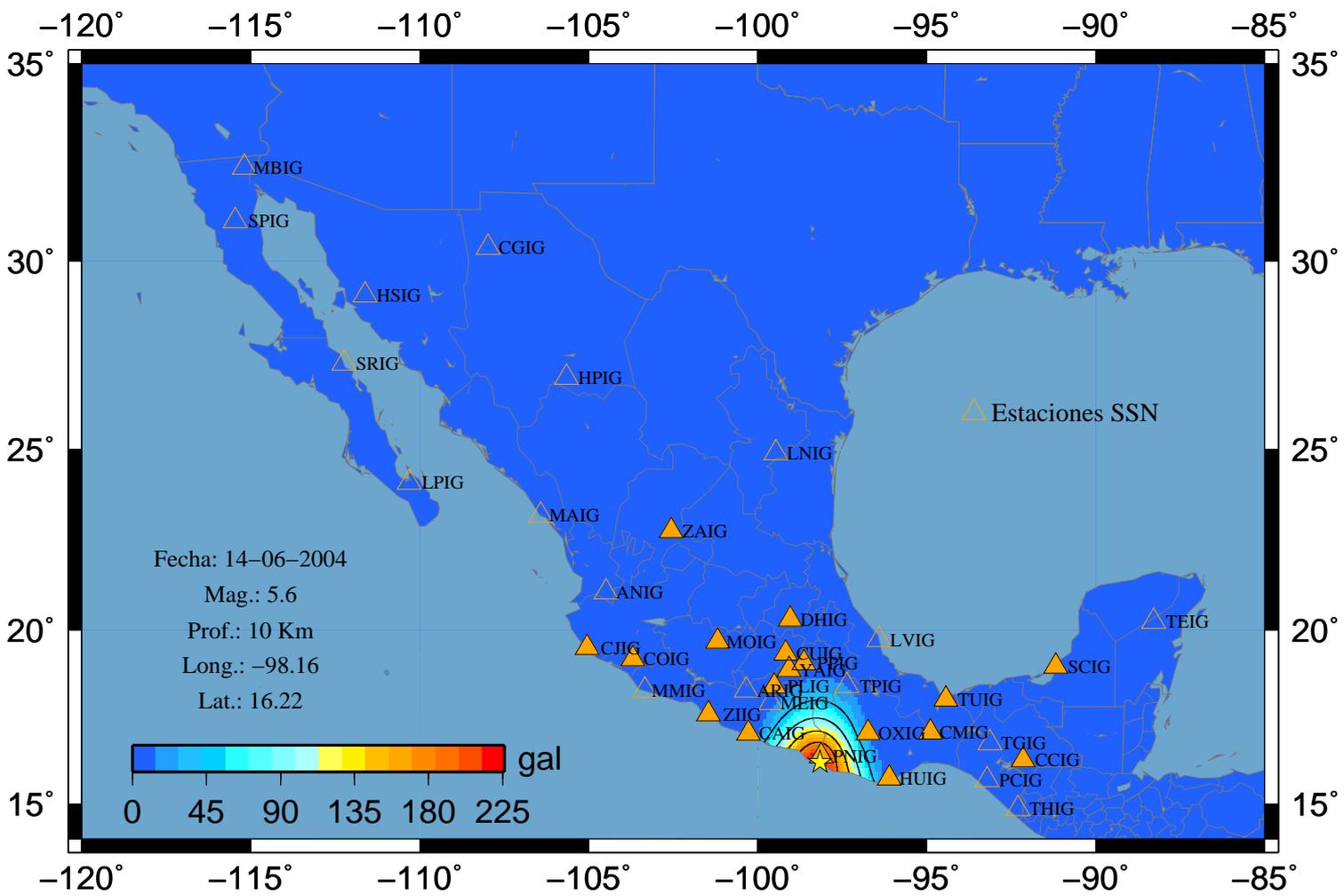
### Sismo 13 V-Vertical



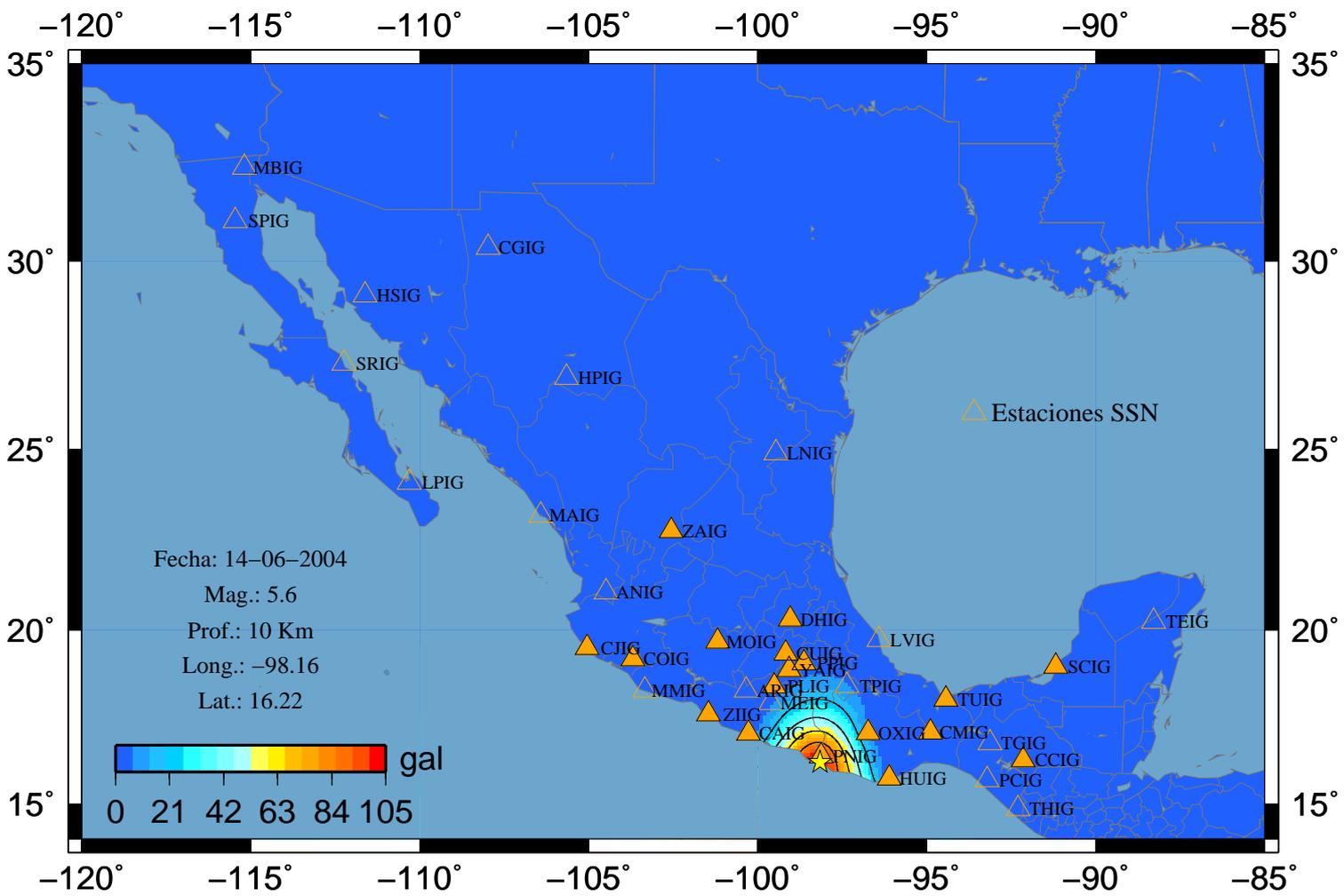
# Sismo 13 I (Max)



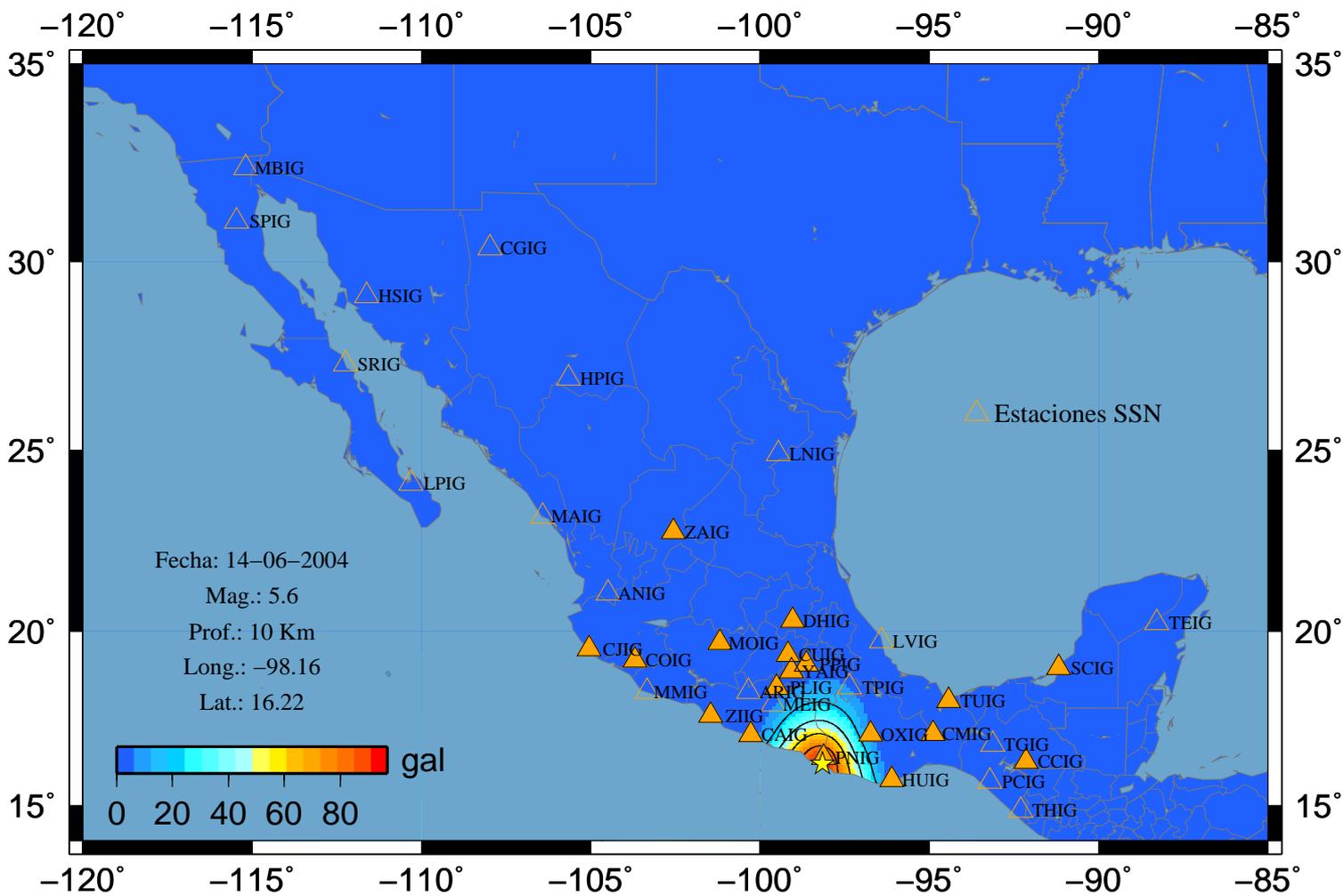
# Sismo 16 A-Este



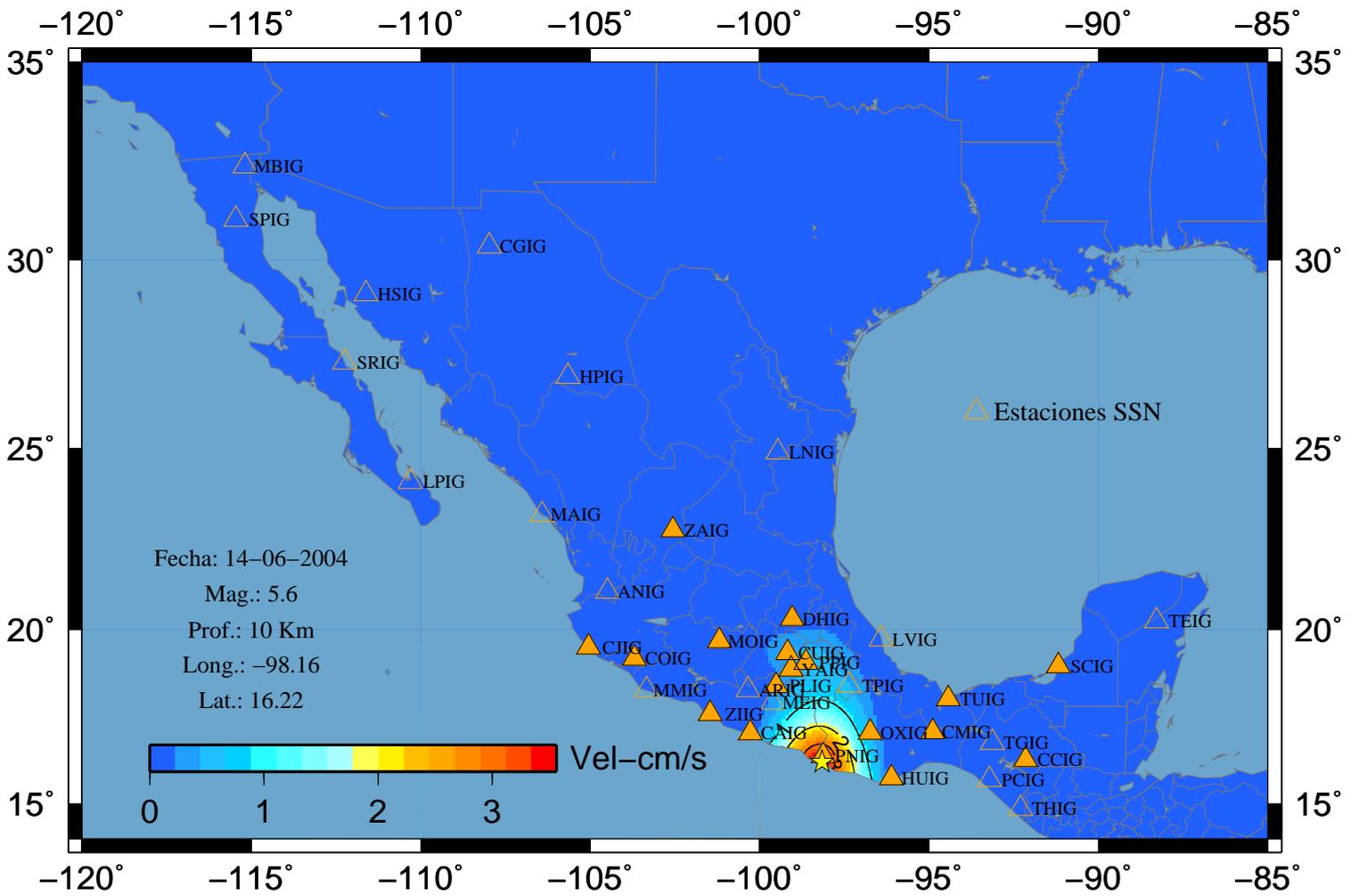
### Sismo 16 A-Norte



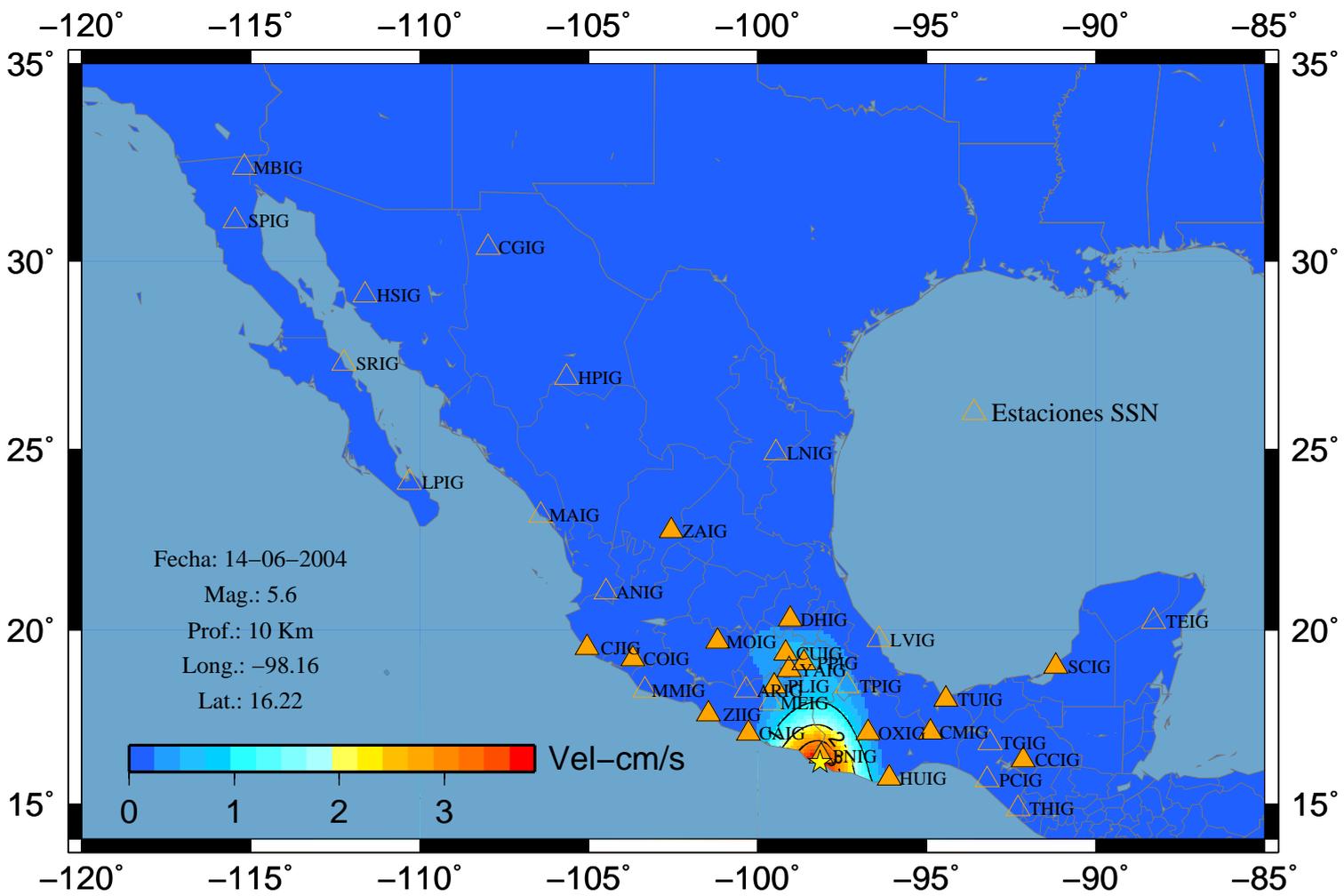
# Sismo 16 A-Vertical



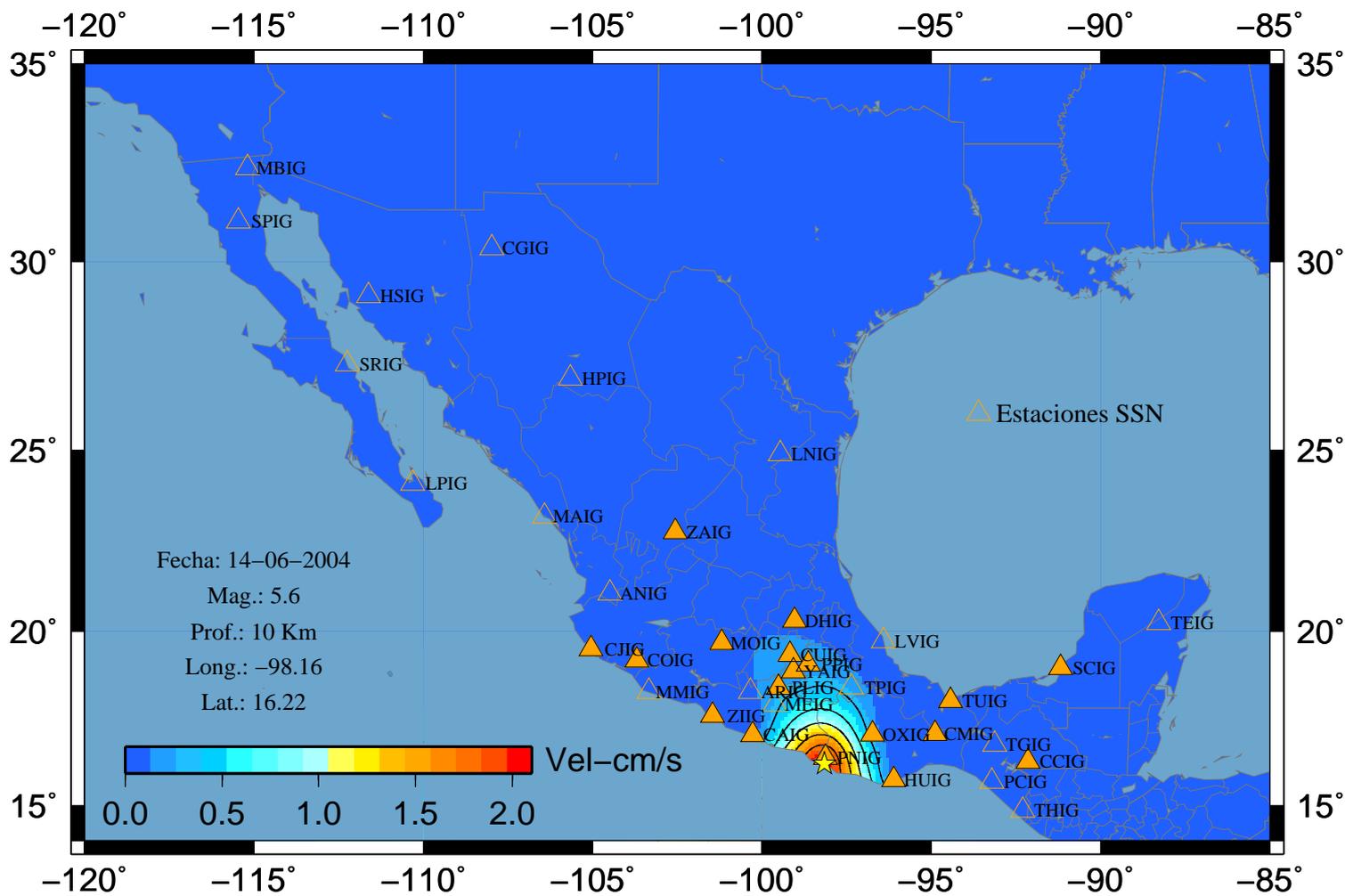
# Sismo 16 V-Este



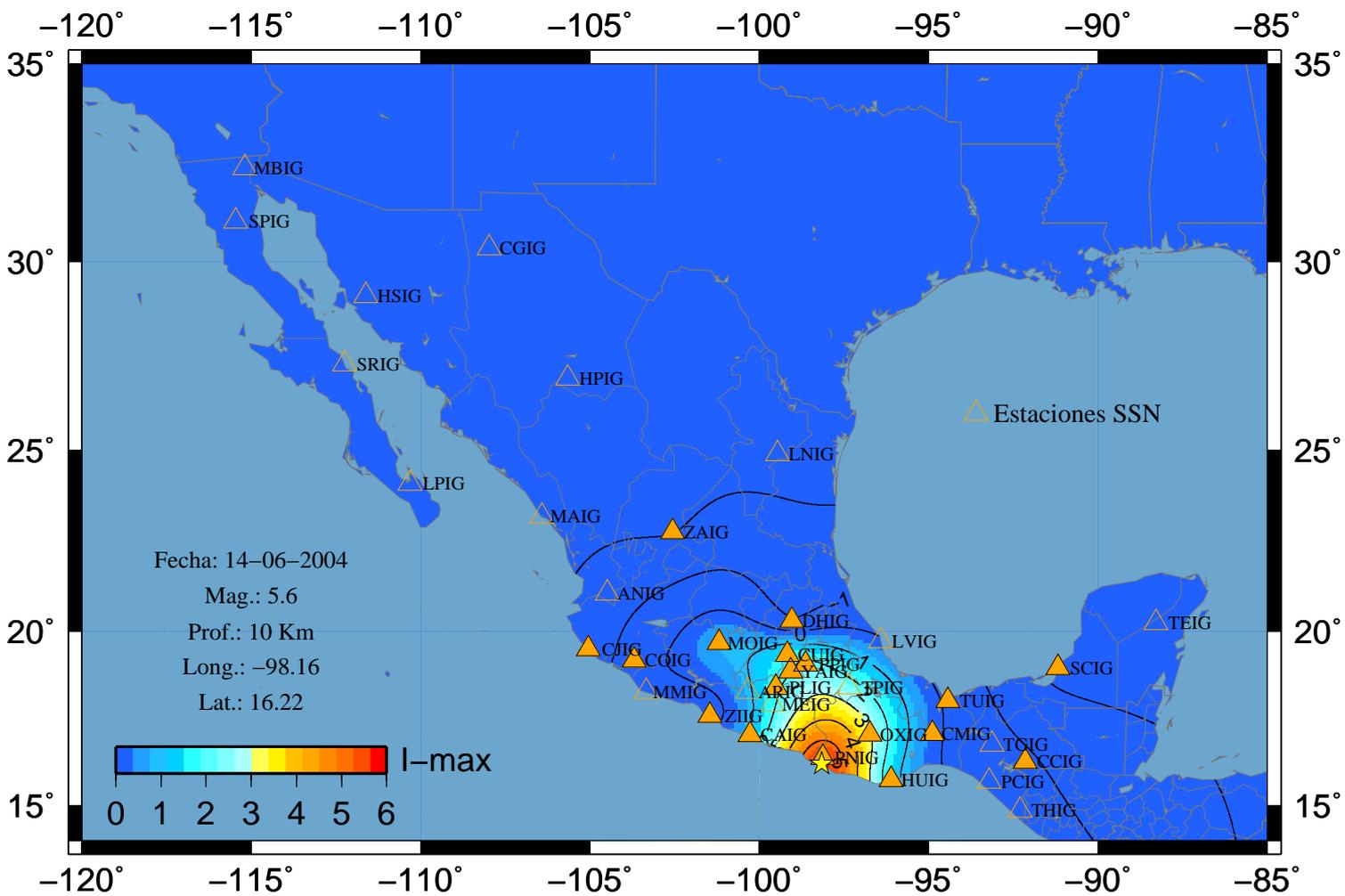
### Sismo 16 V-Norte



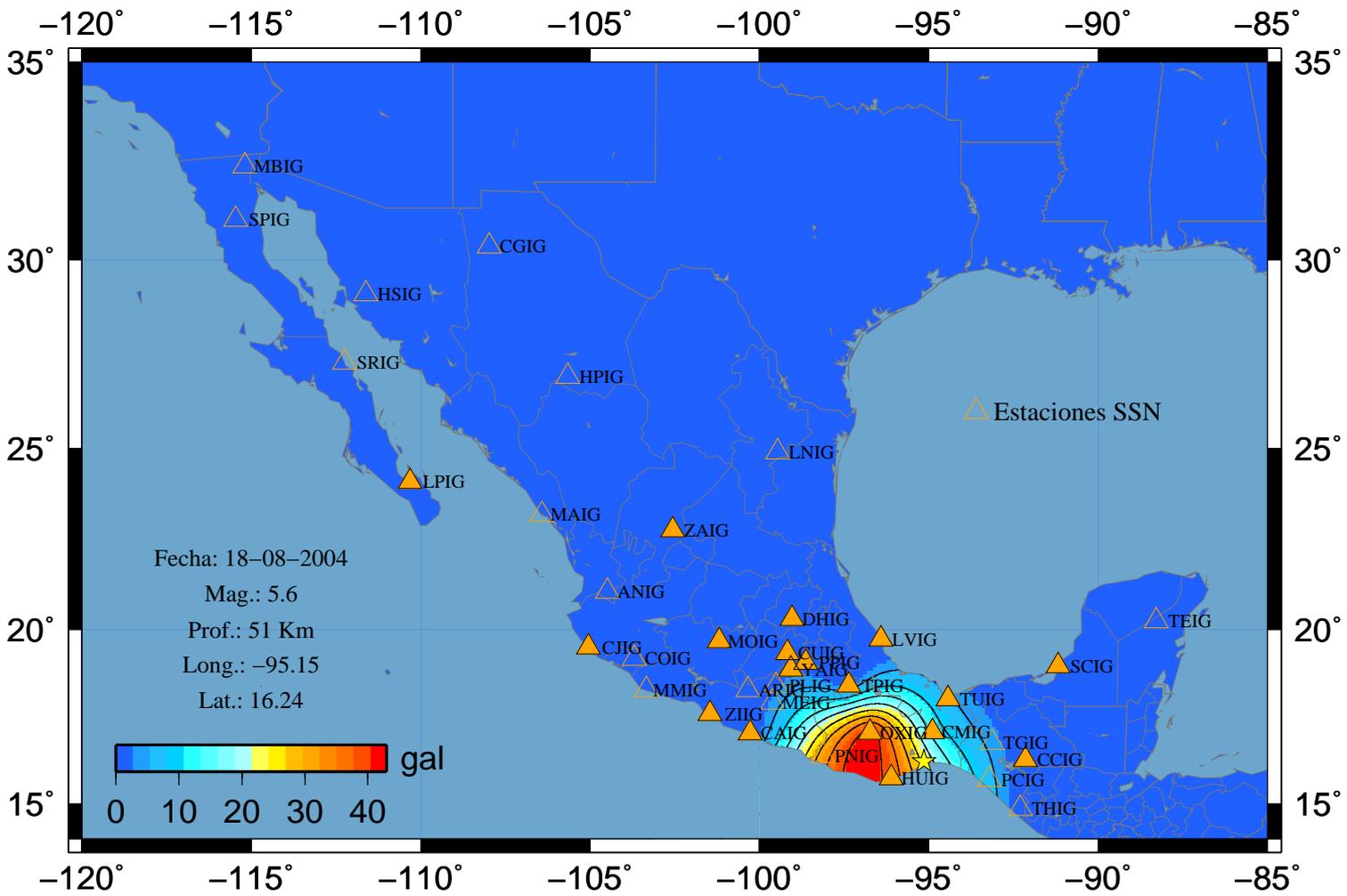
### Sismo 16 V-Vertical



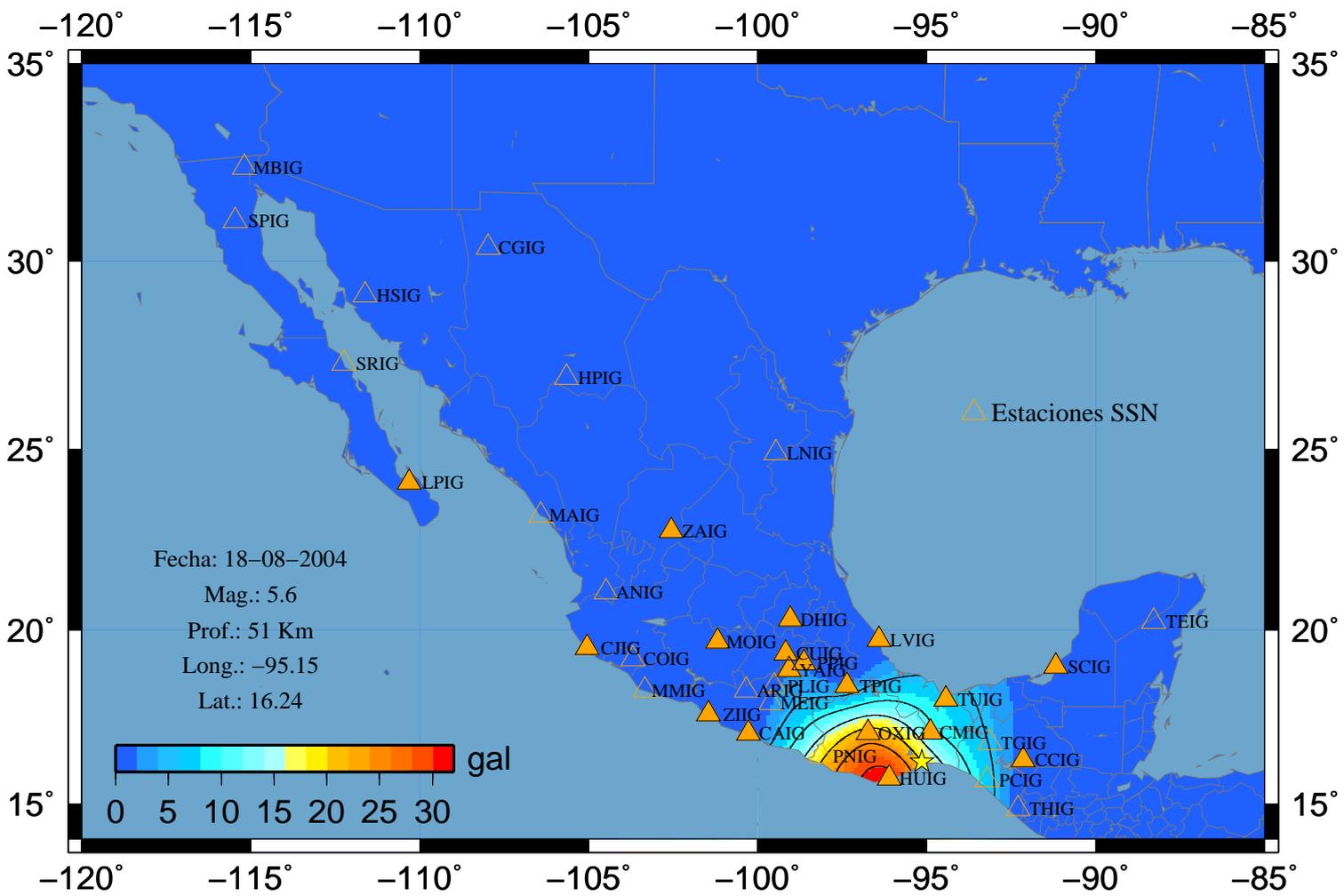
# Sismo 16 I (Max)



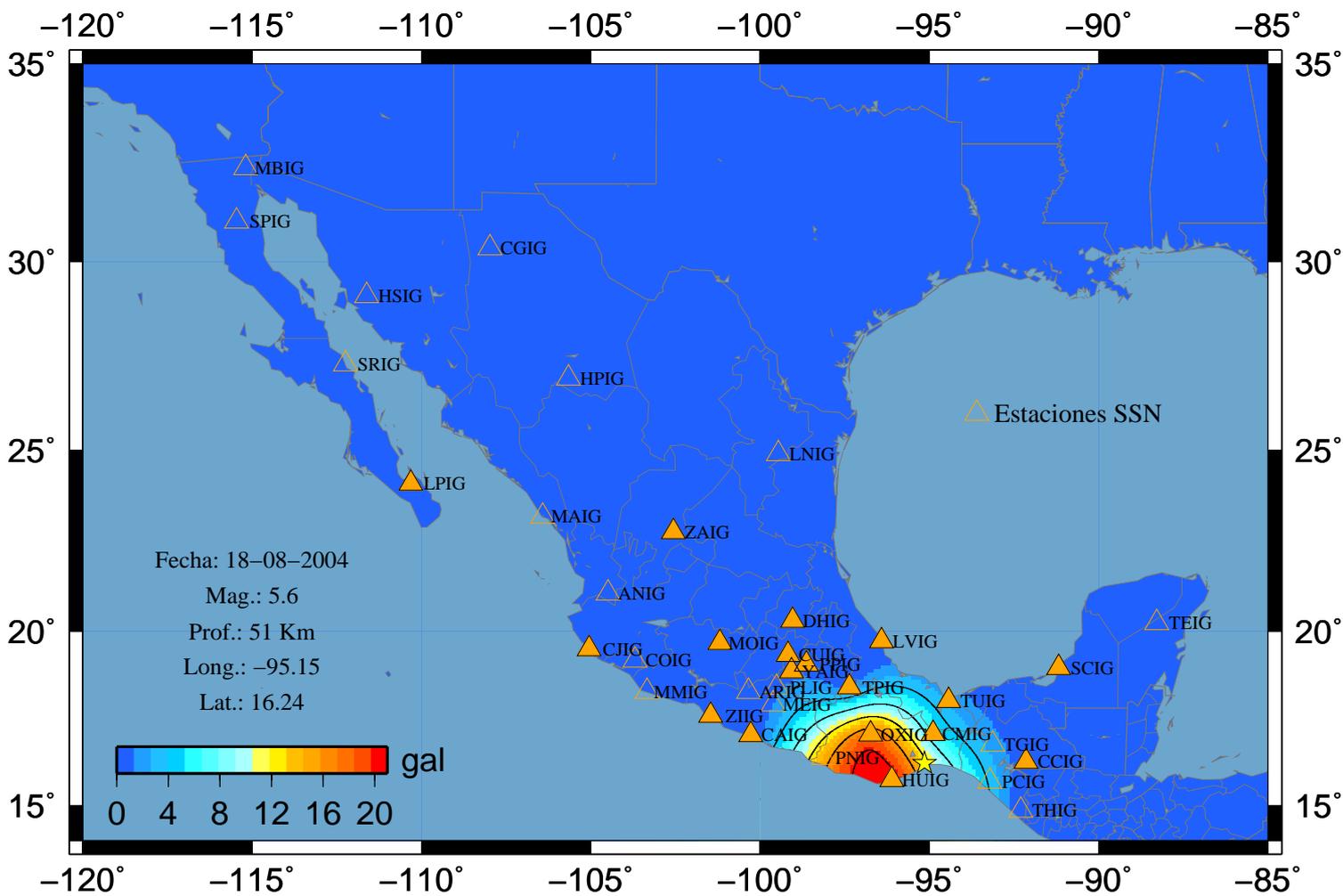
# Sismo 19 A-Este



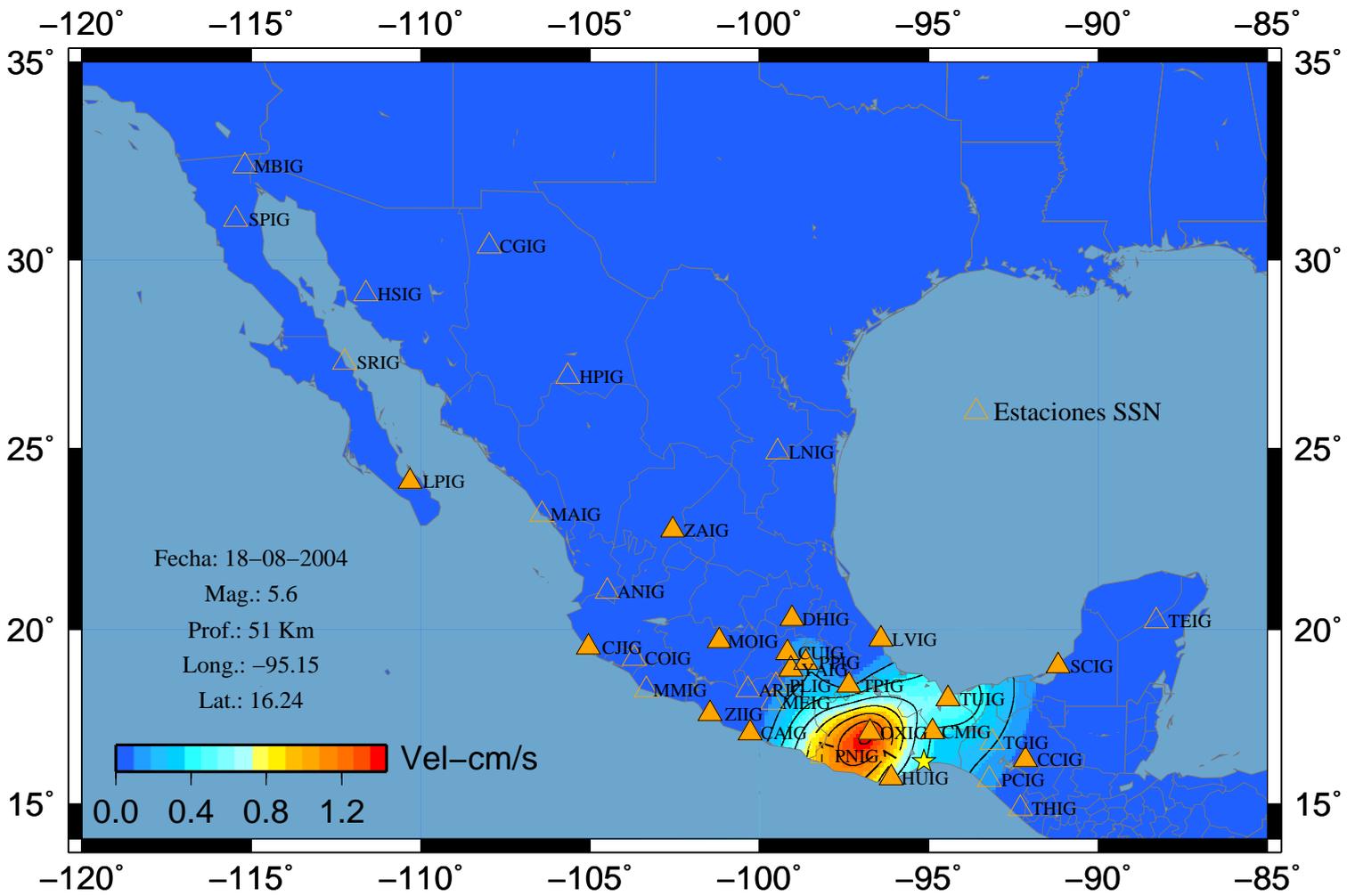
### Sismo 19 A-Norte



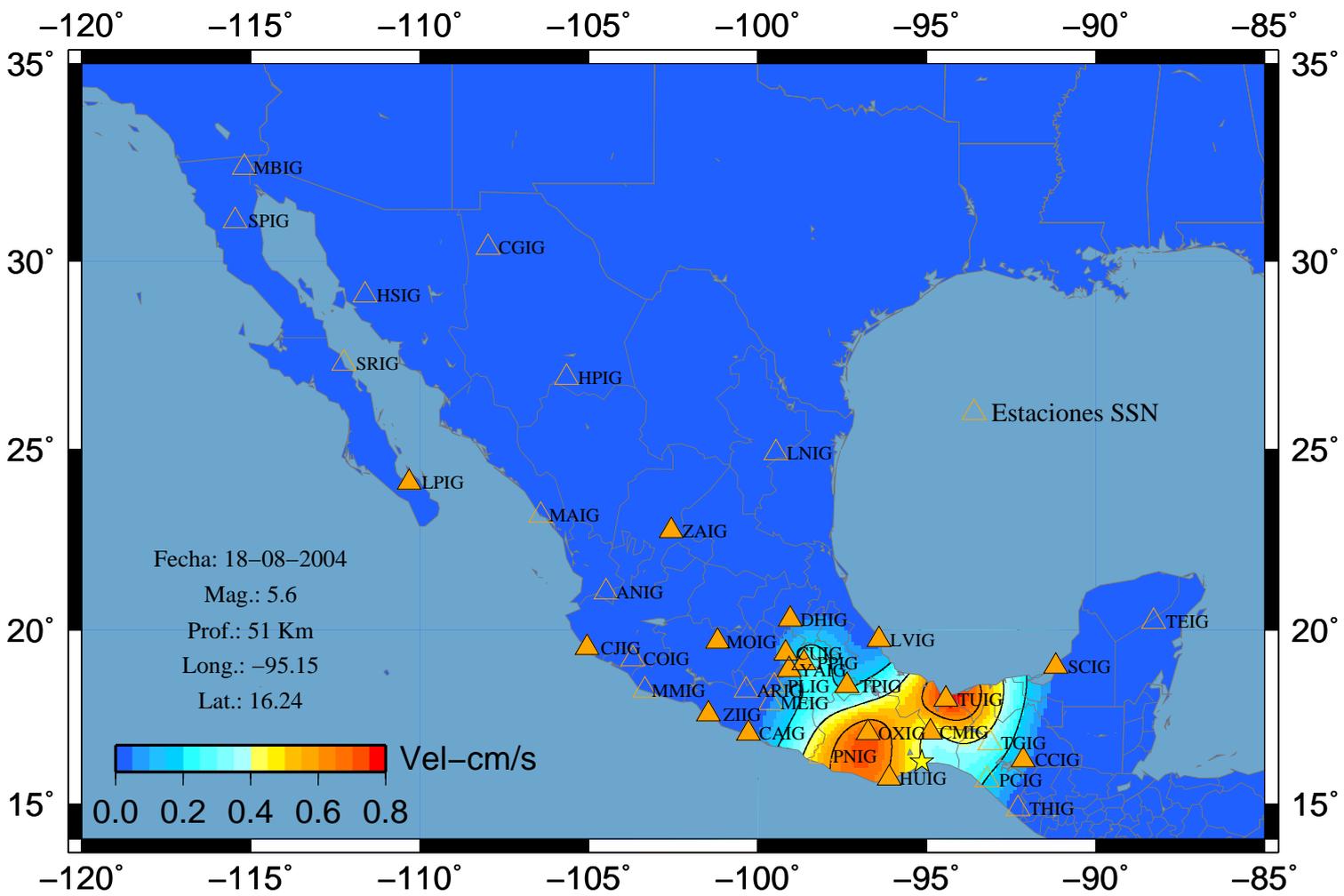
# Sismo 19 A-Vertical



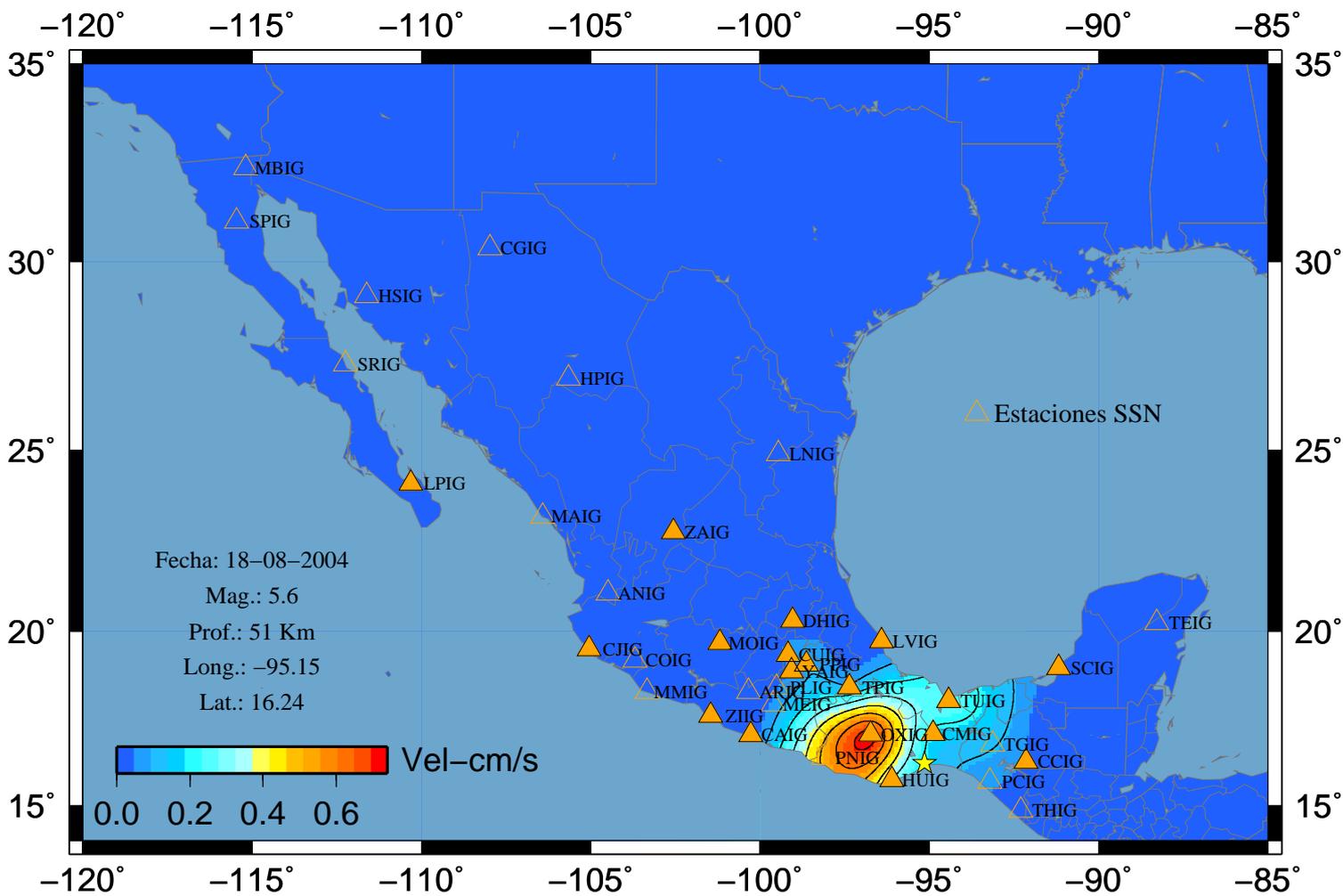
# Sismo 19 V-Este



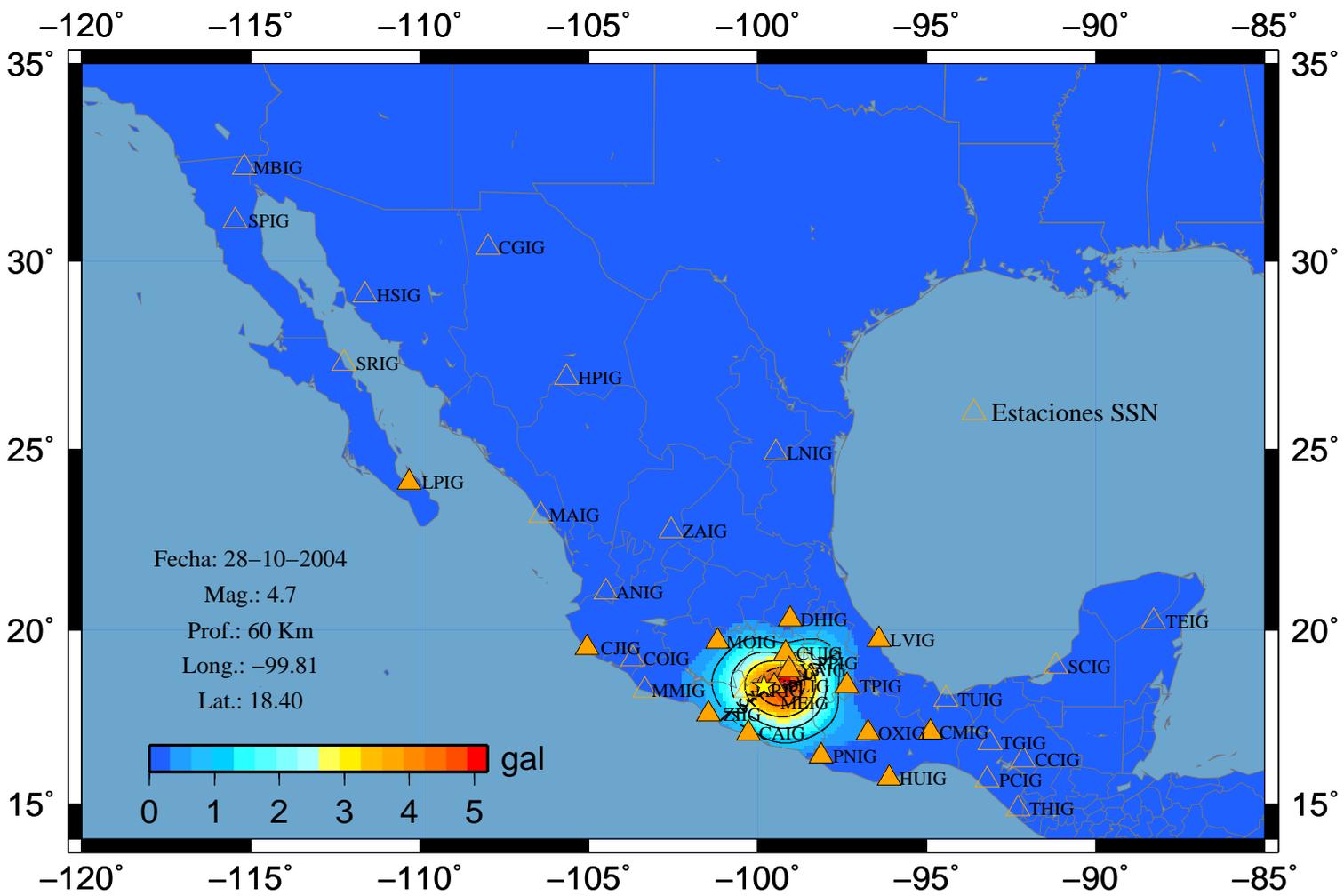
### Sismo 19 V-Norte



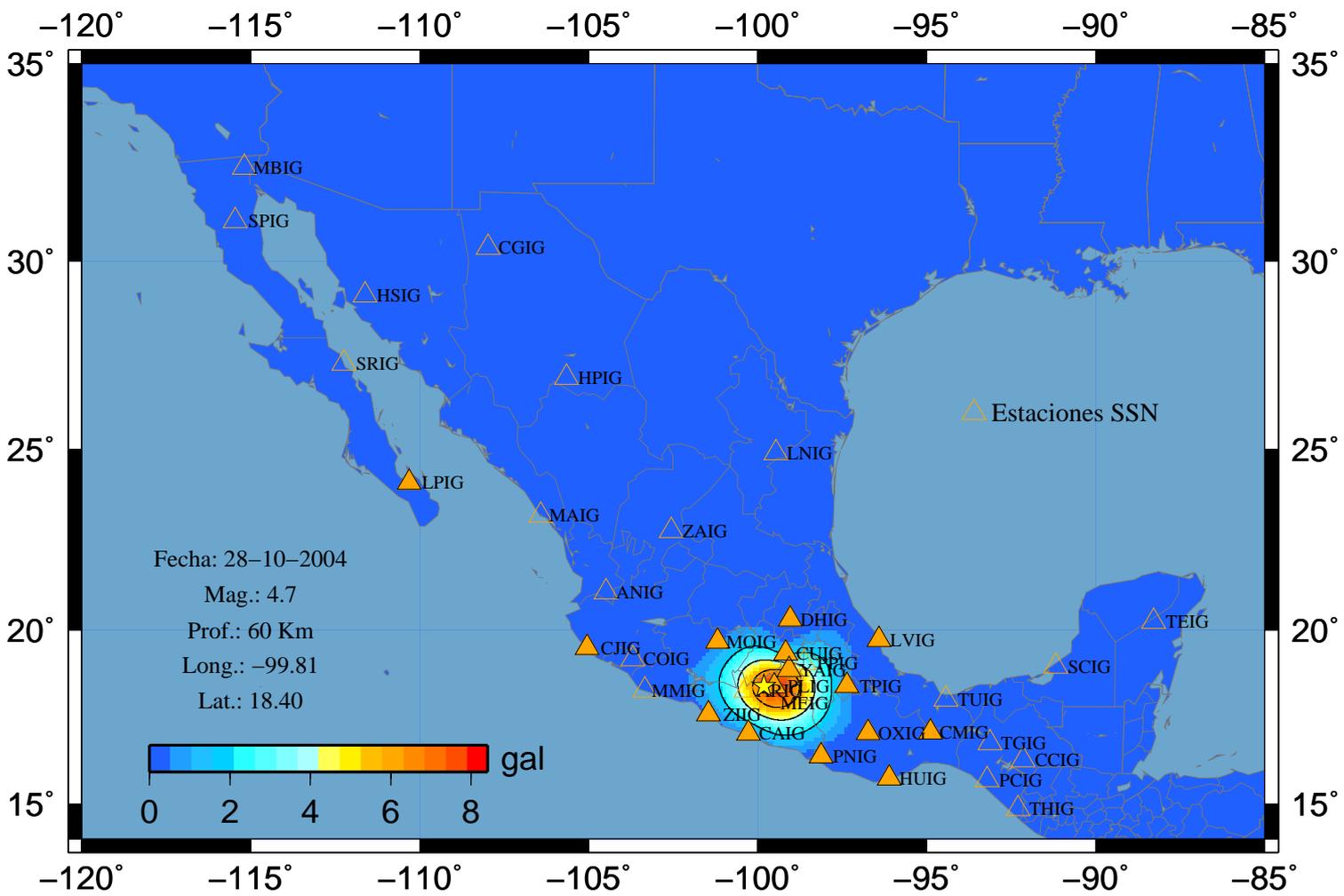
# Sismo 19 V-Vertical



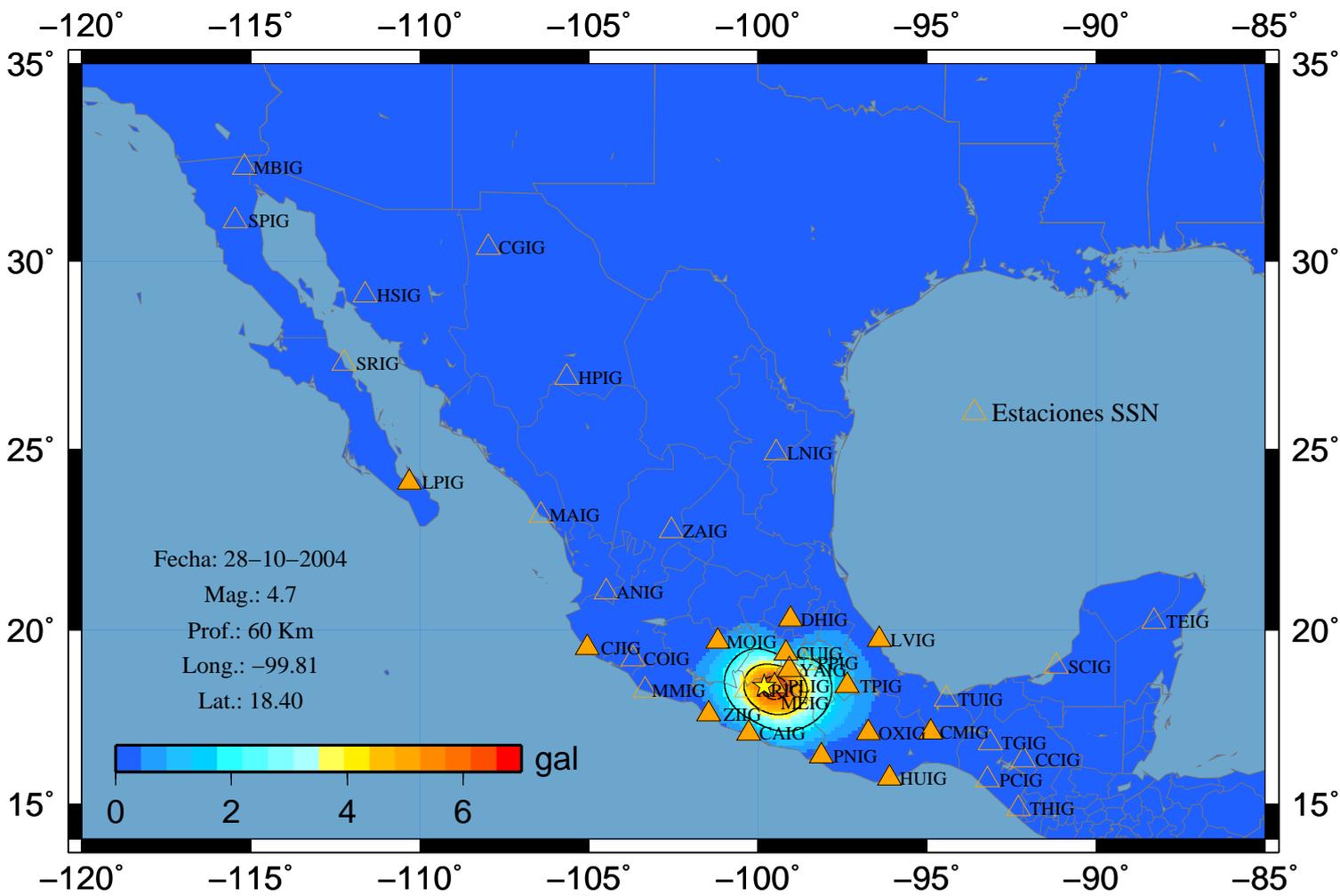
# Sismo 23 A-Este



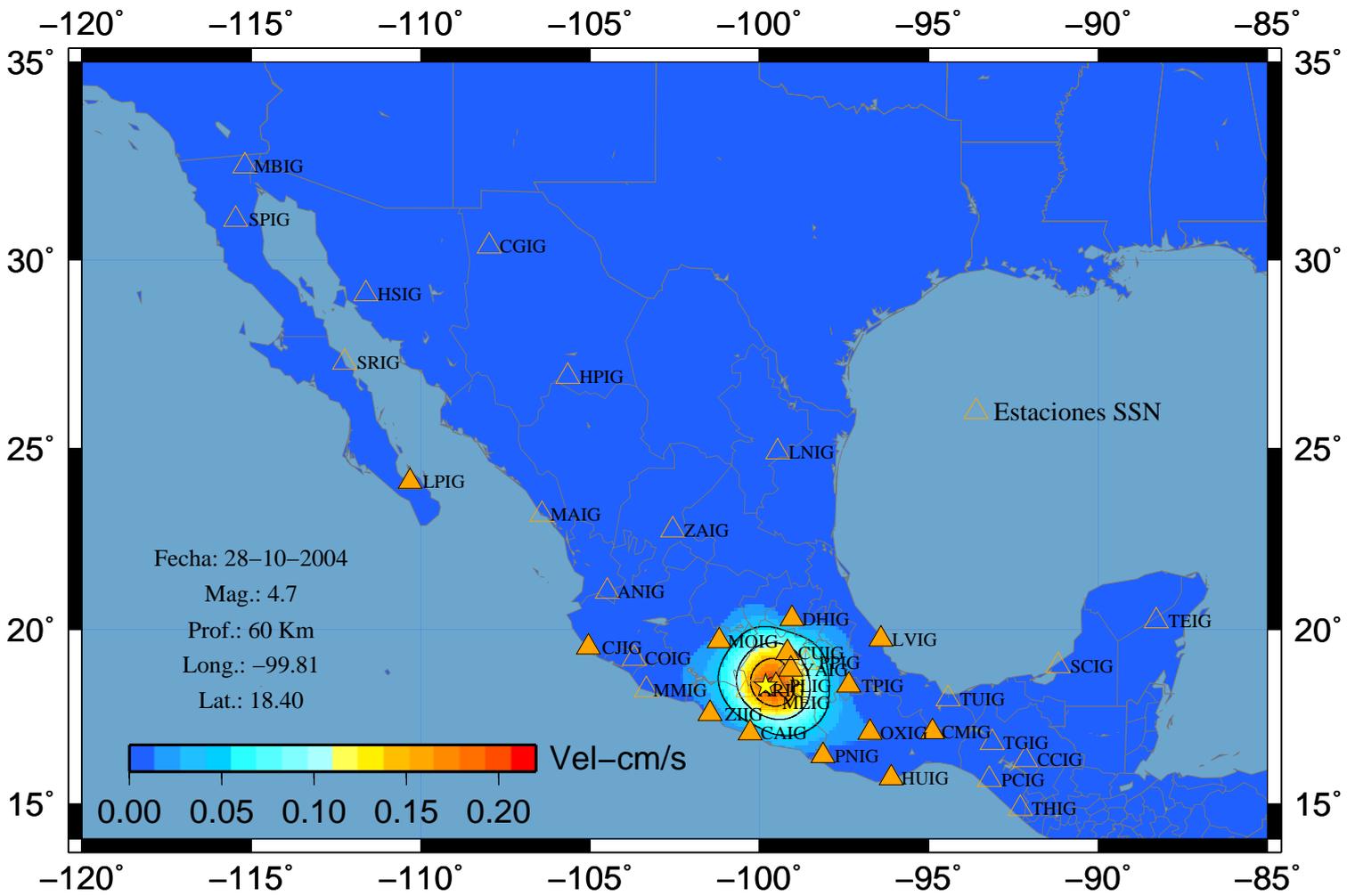
# Sismo 23 A-Norte



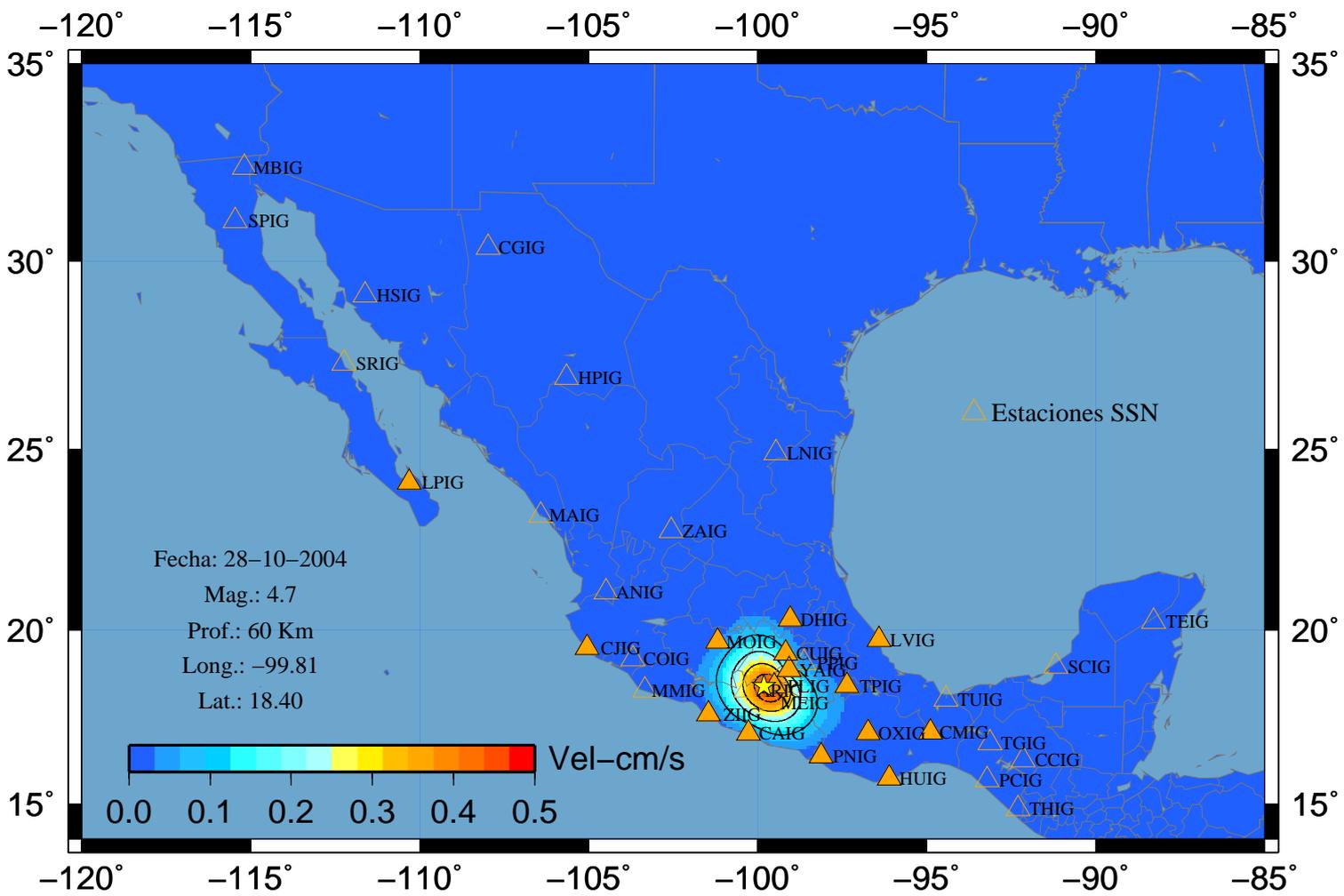
# Sismo 23 A-Vertical



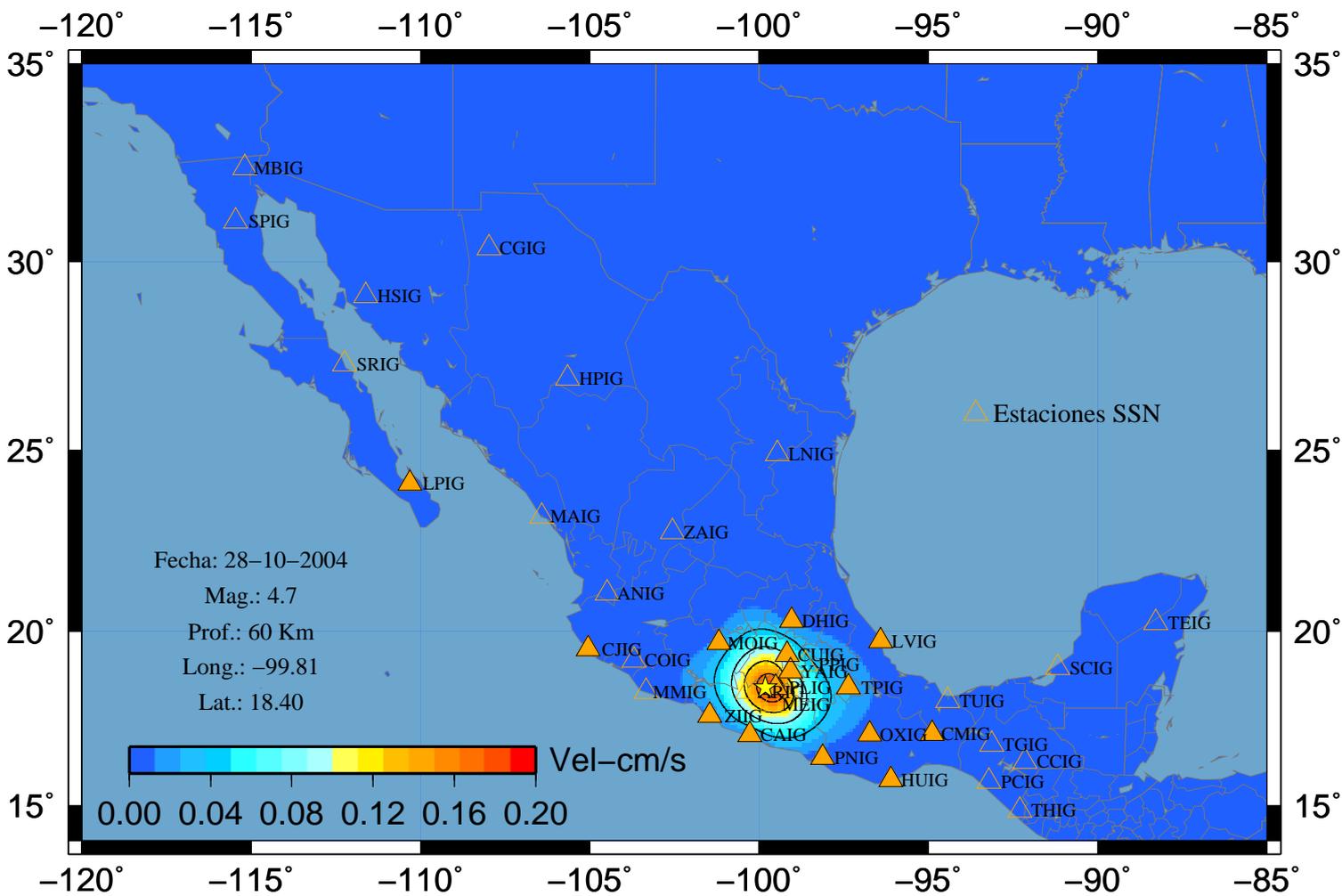
### Sismo 23 V-Este



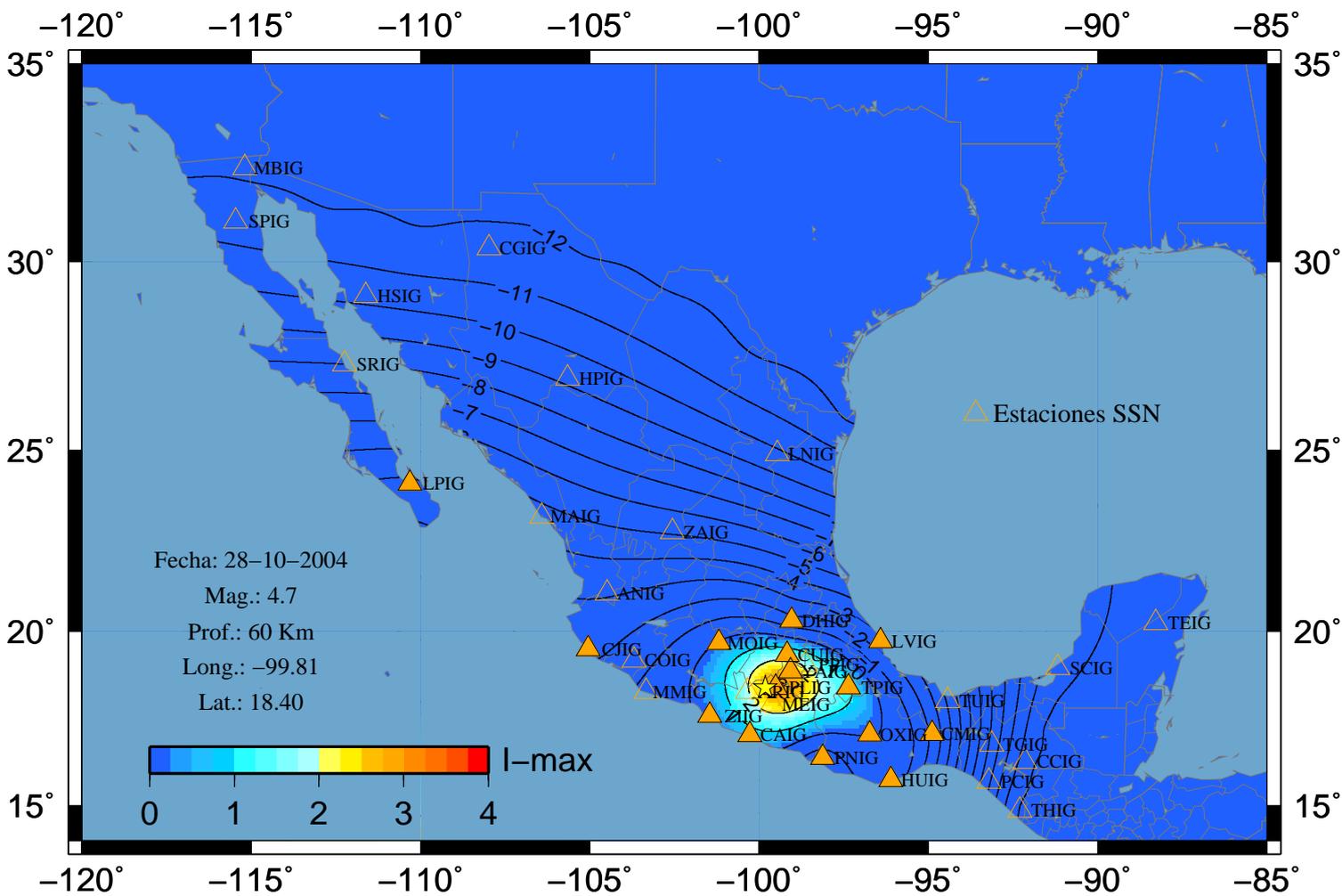
### Sismo 23 V-Norte



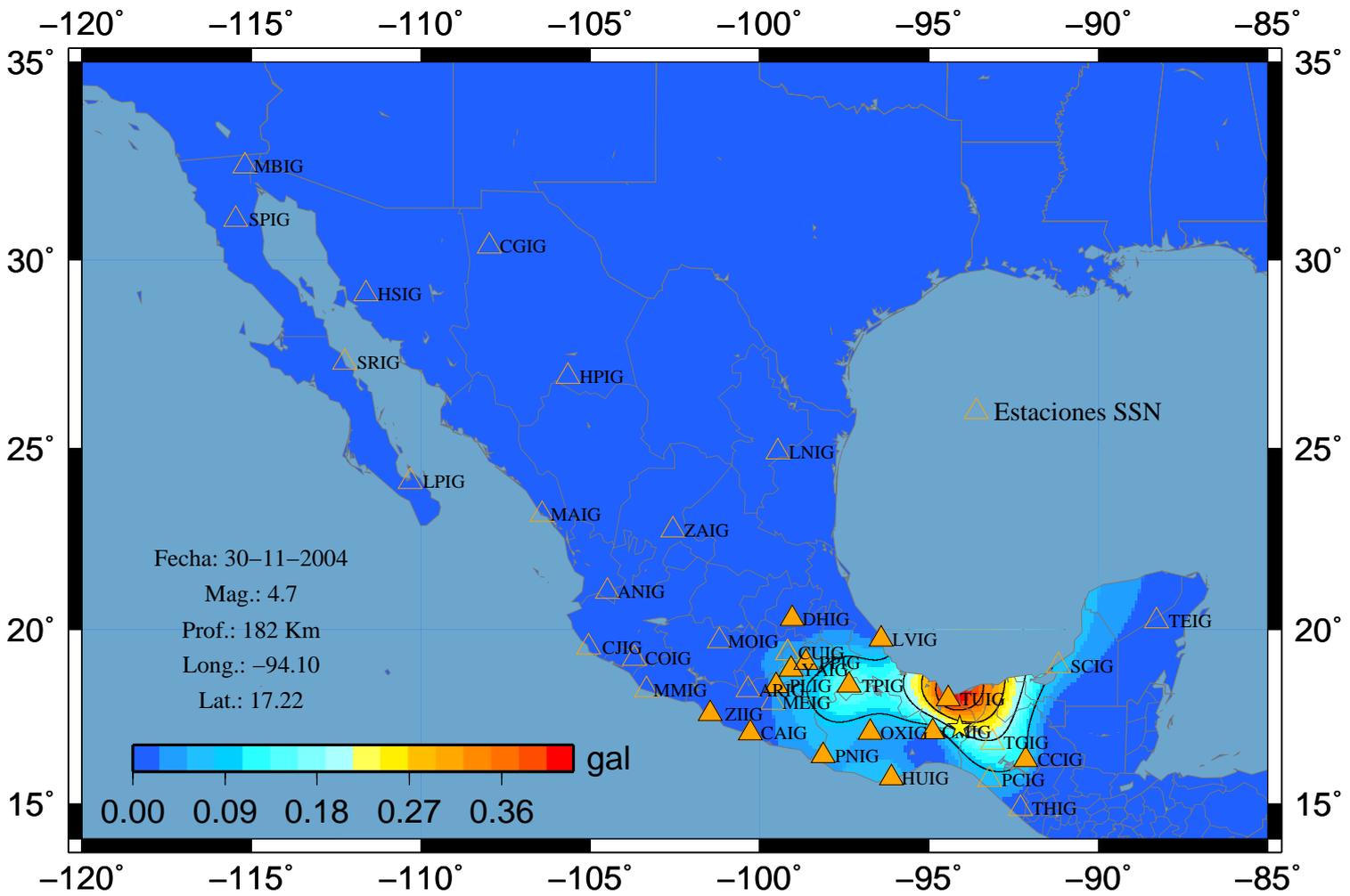
### Sismo 23 V-Vertical



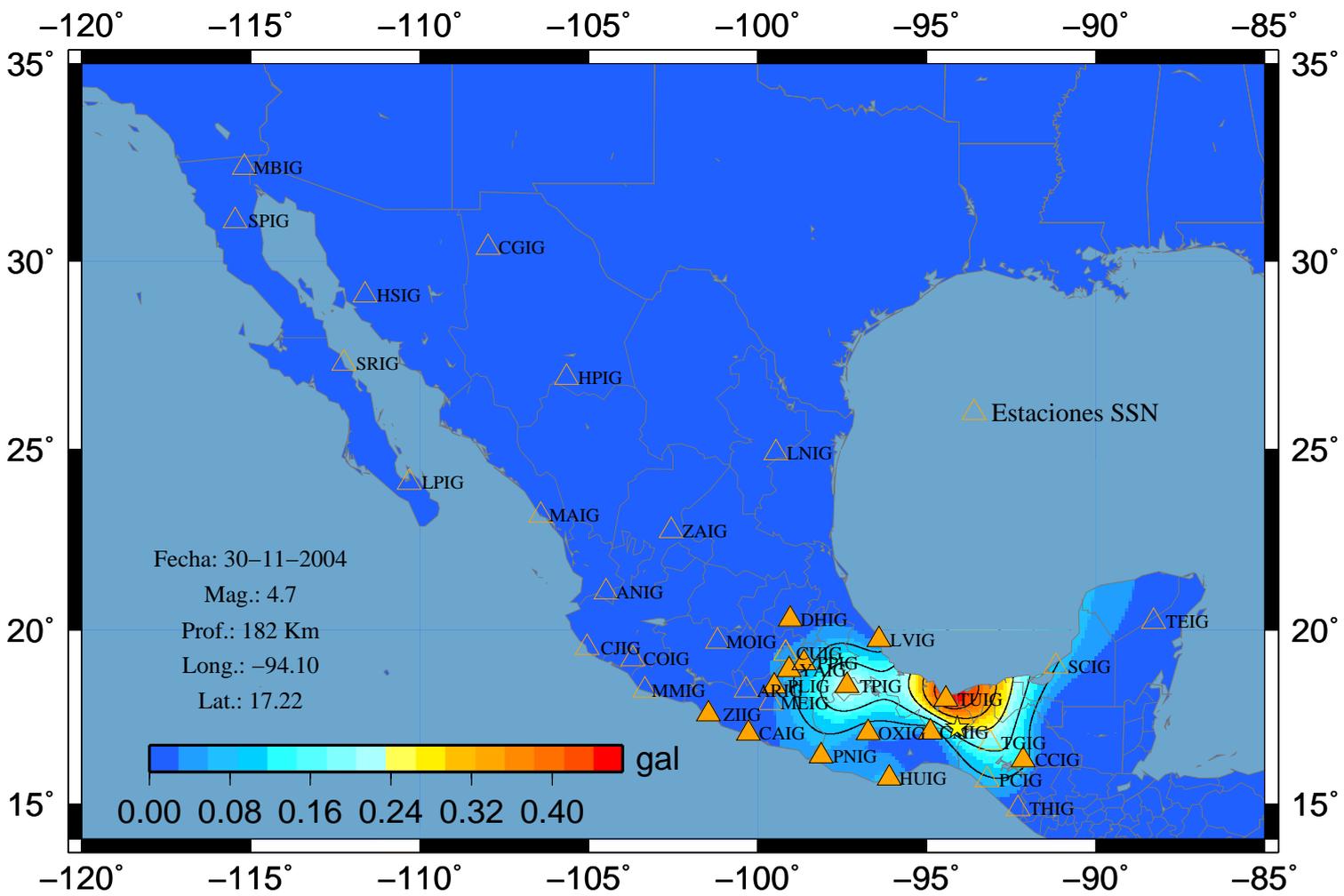
# Sismo 23 I (Max)



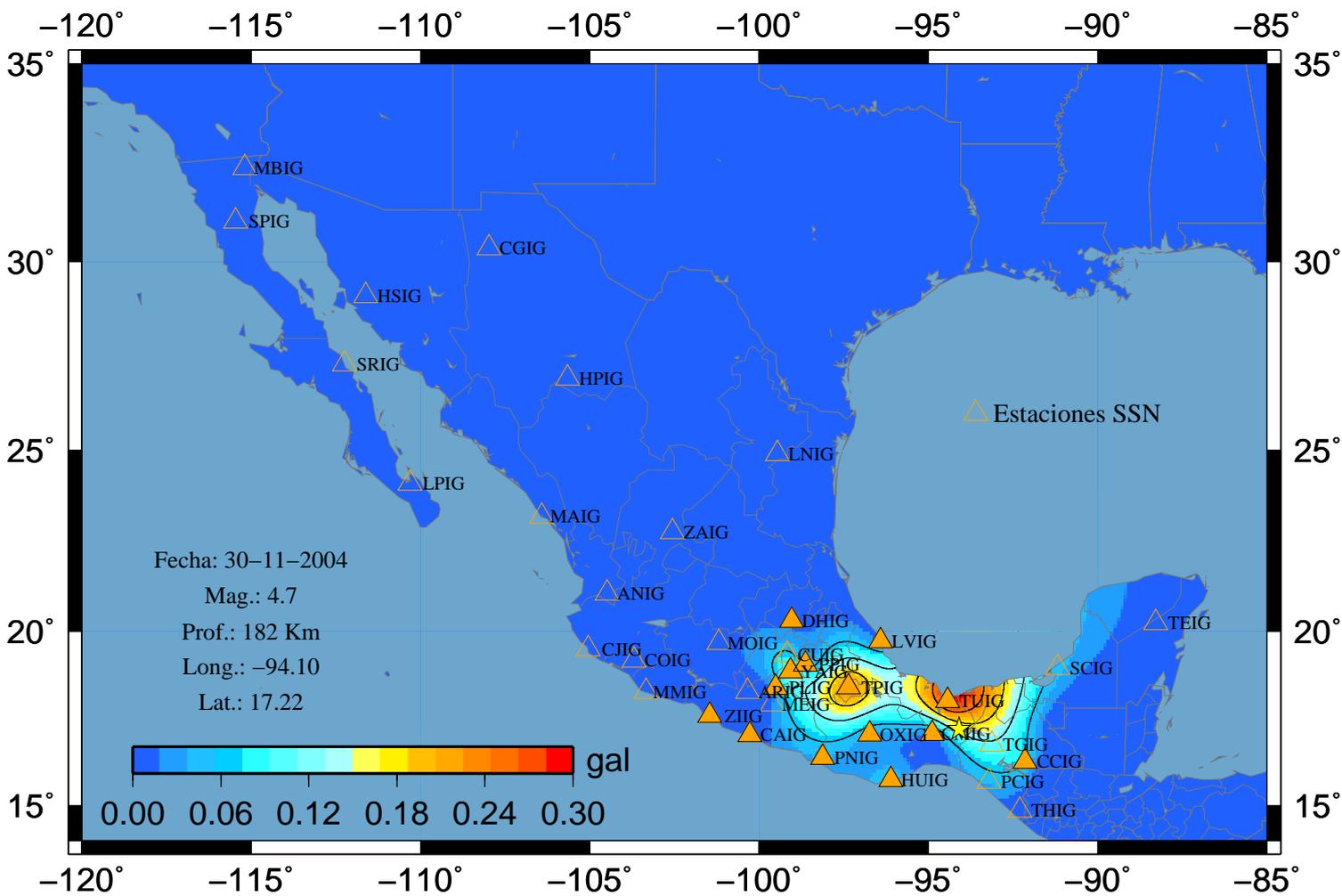
# Sismo 24 A-Este



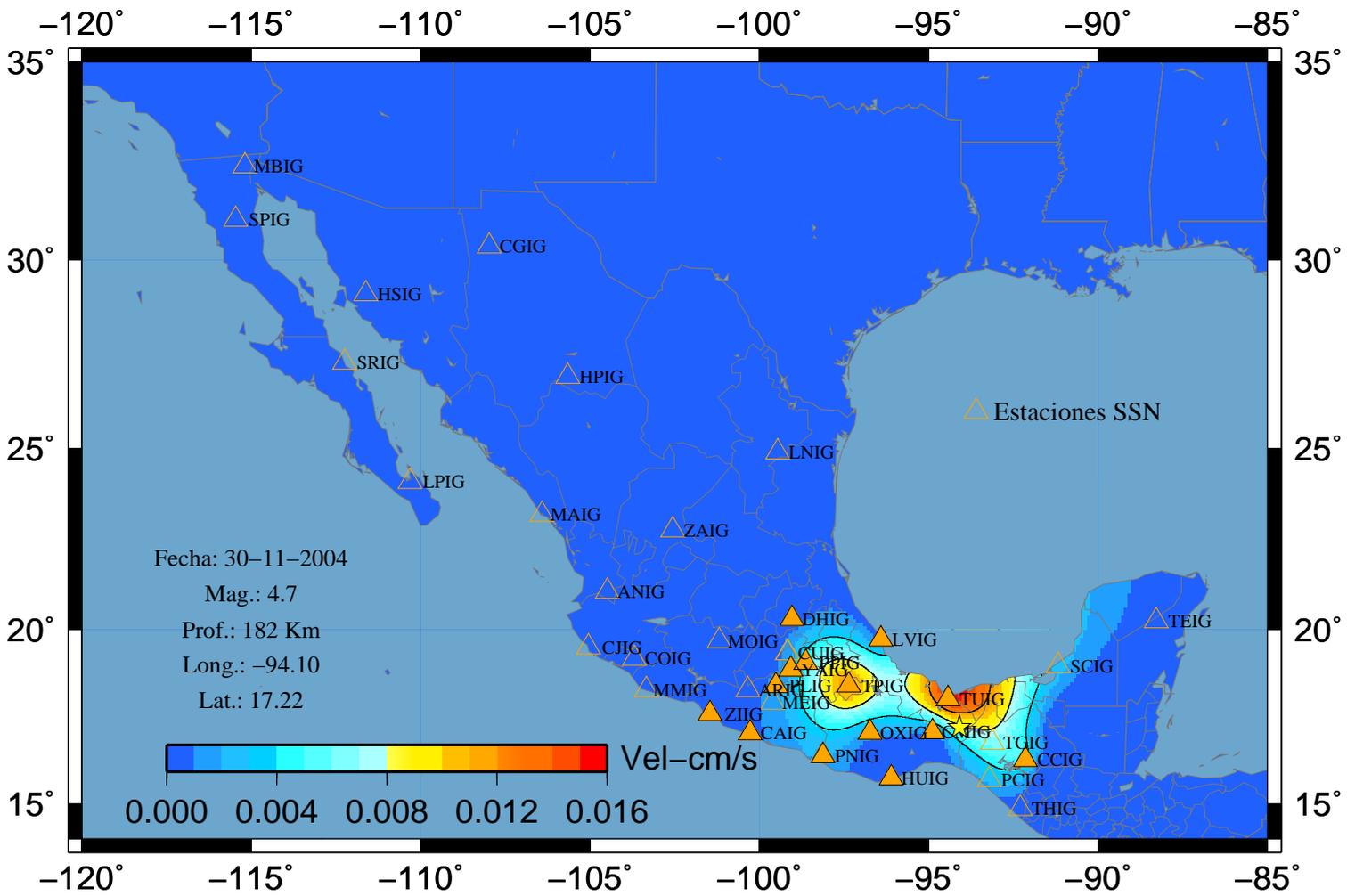
### Sismo 24 A-Norte



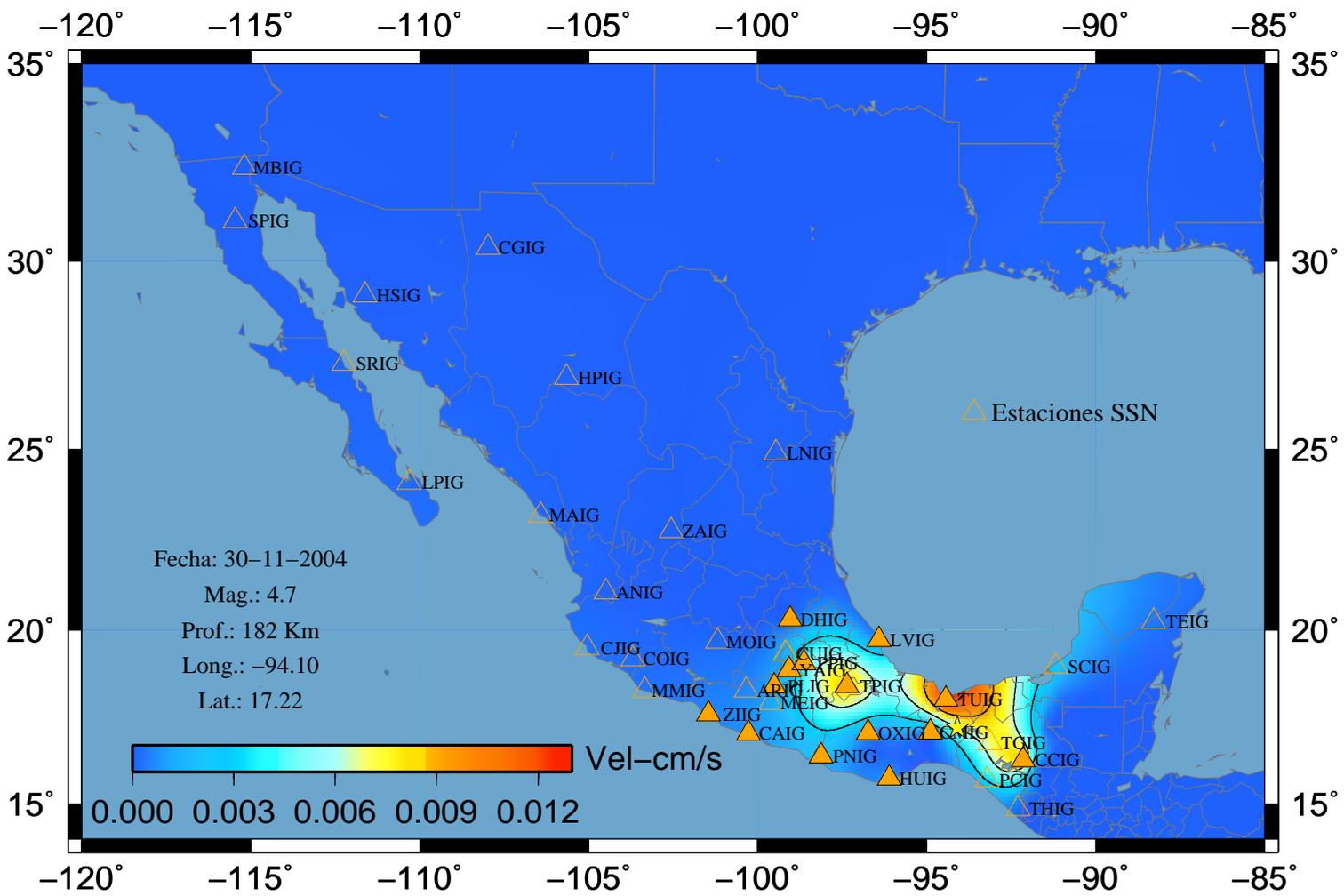
### Sismo 24 A-Vertical



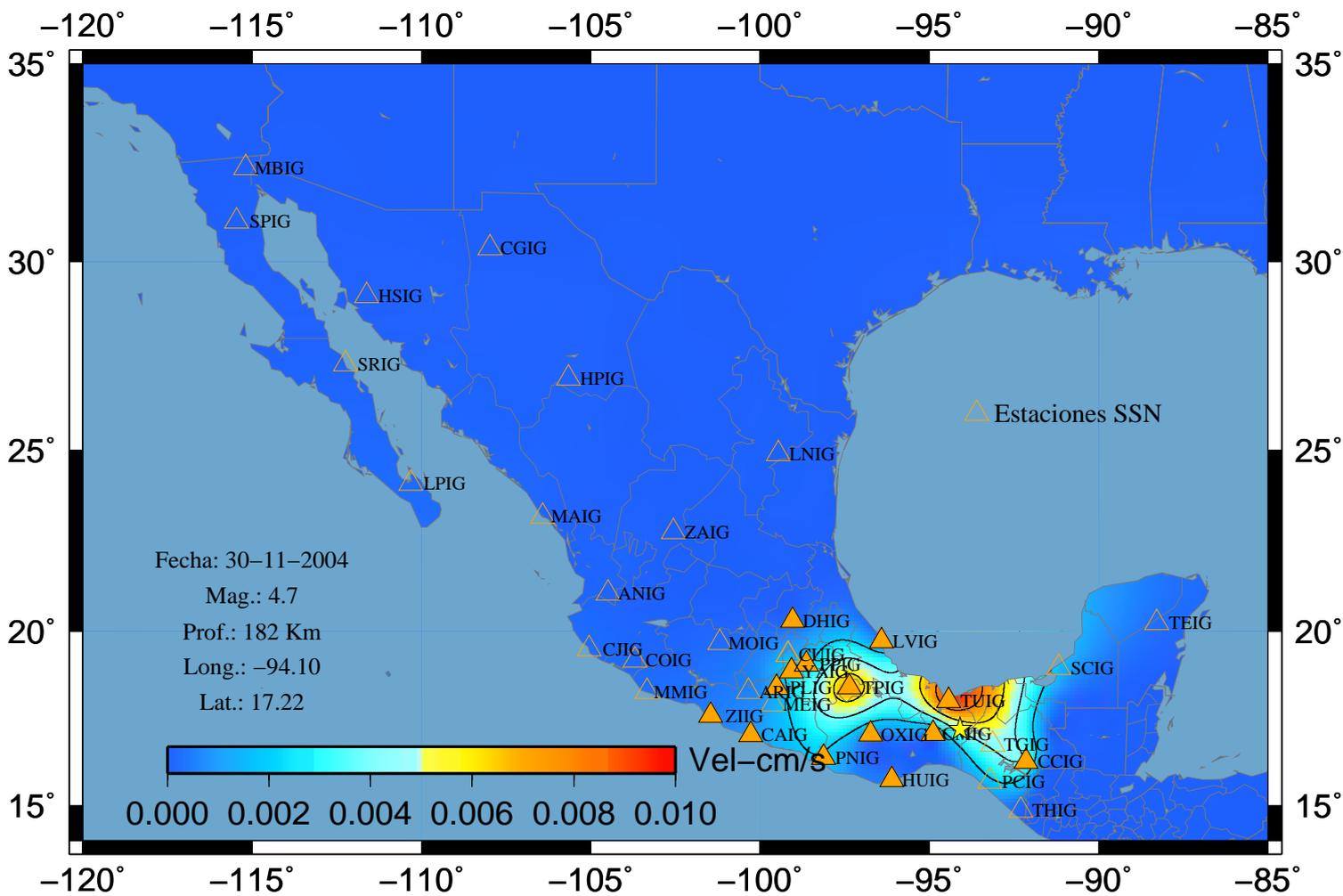
# Sismo 24 V-Este



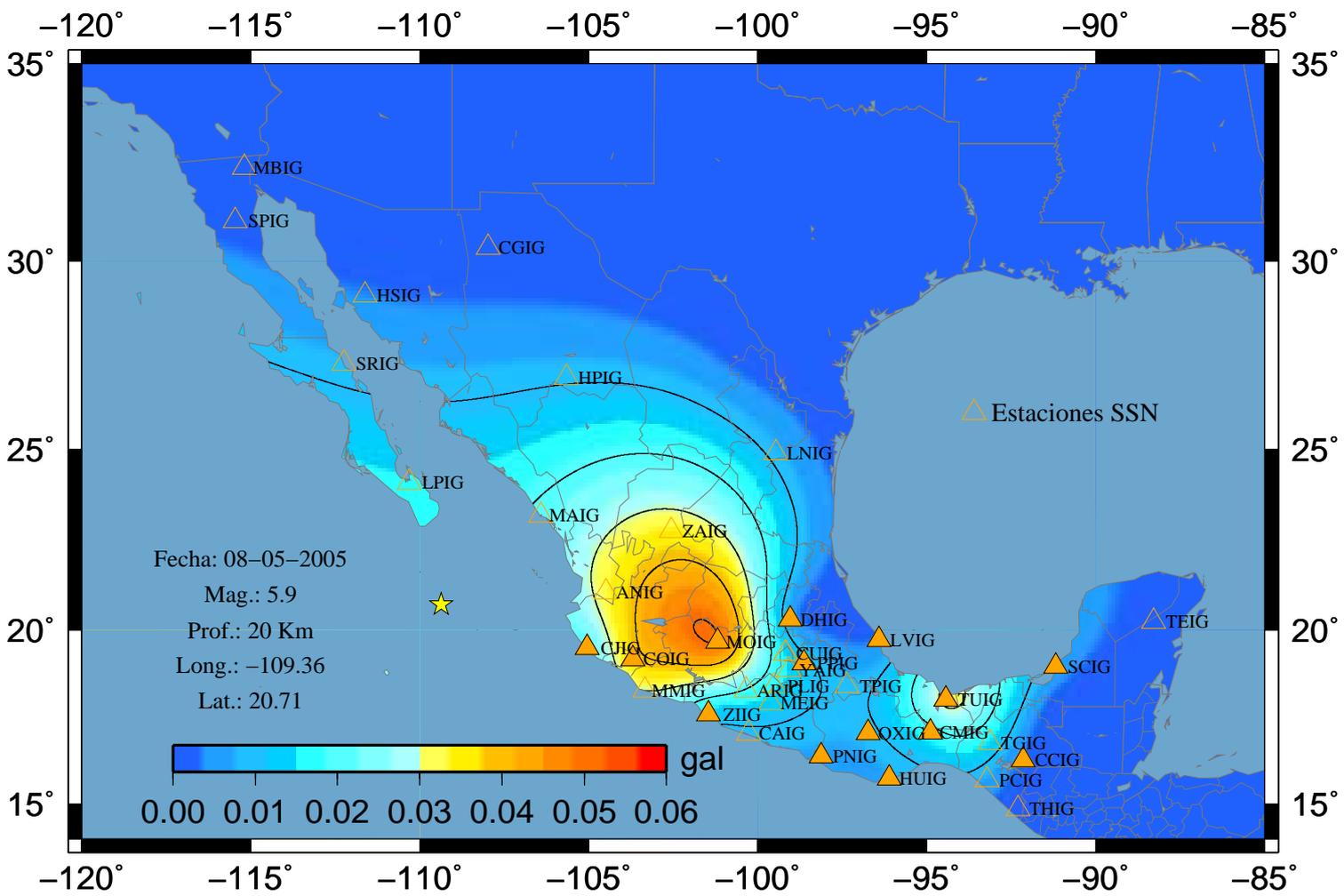
### Sismo 24 V-Norte



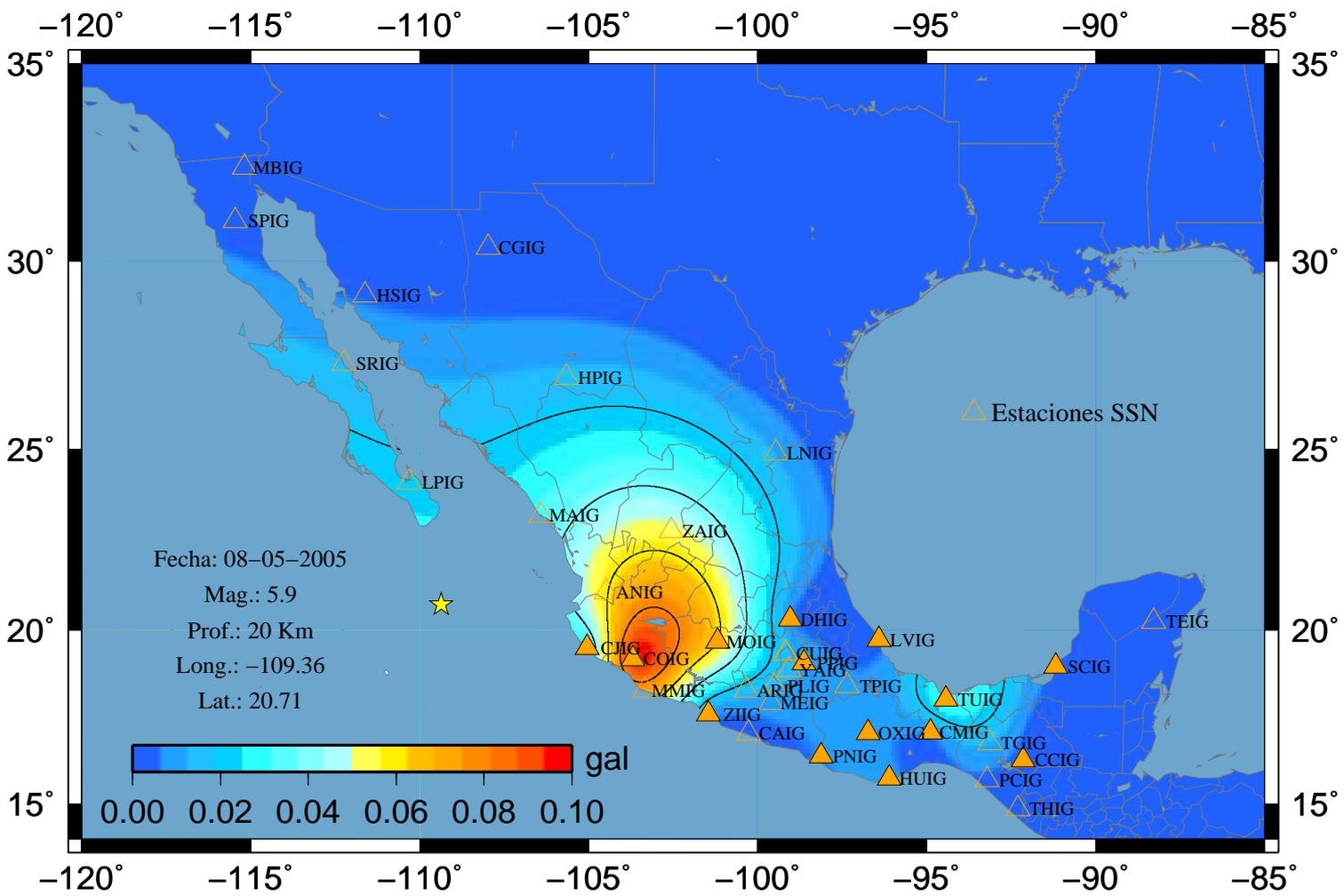
### Sismo 24 V-Vertical



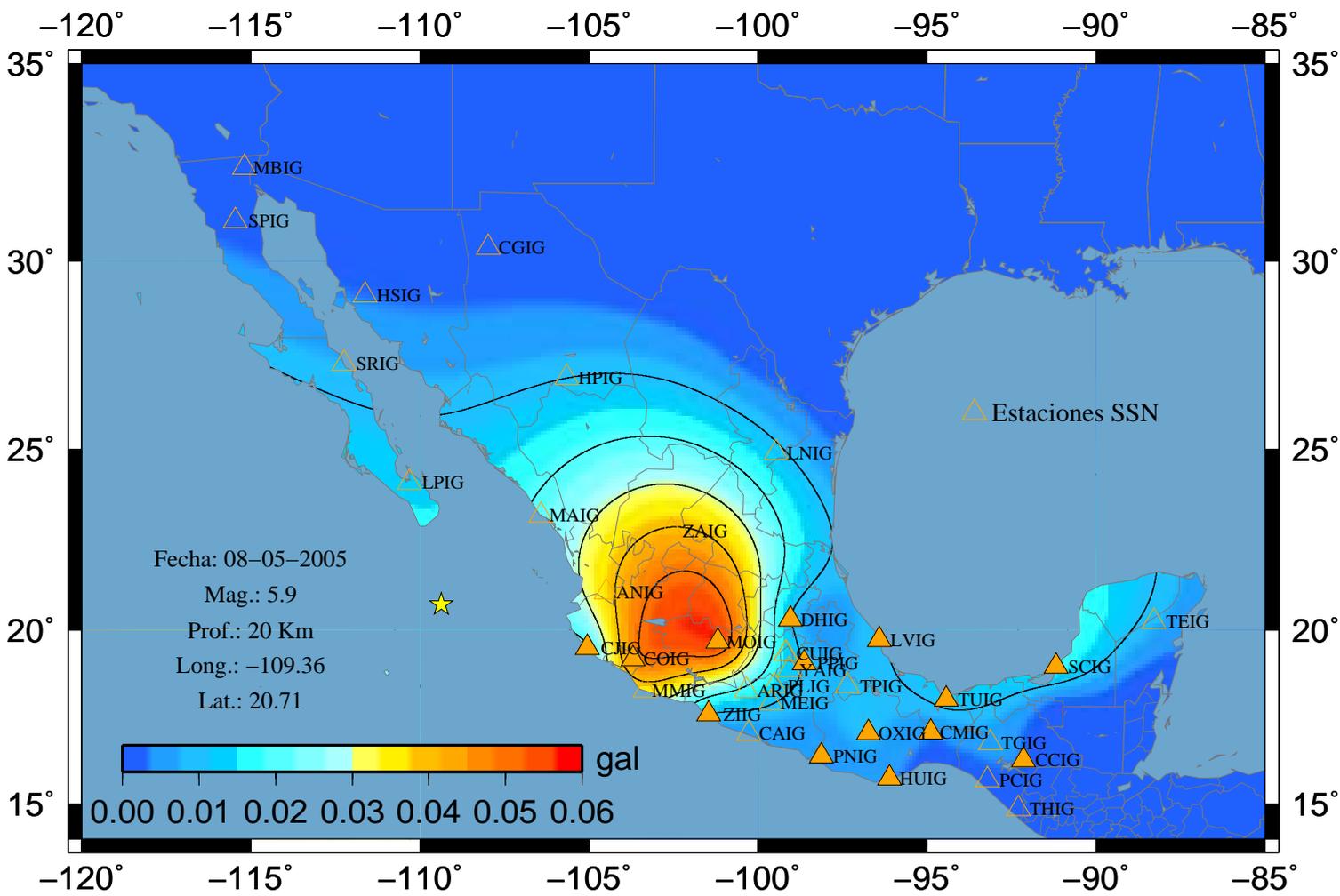
# Sismo 28 A-Este



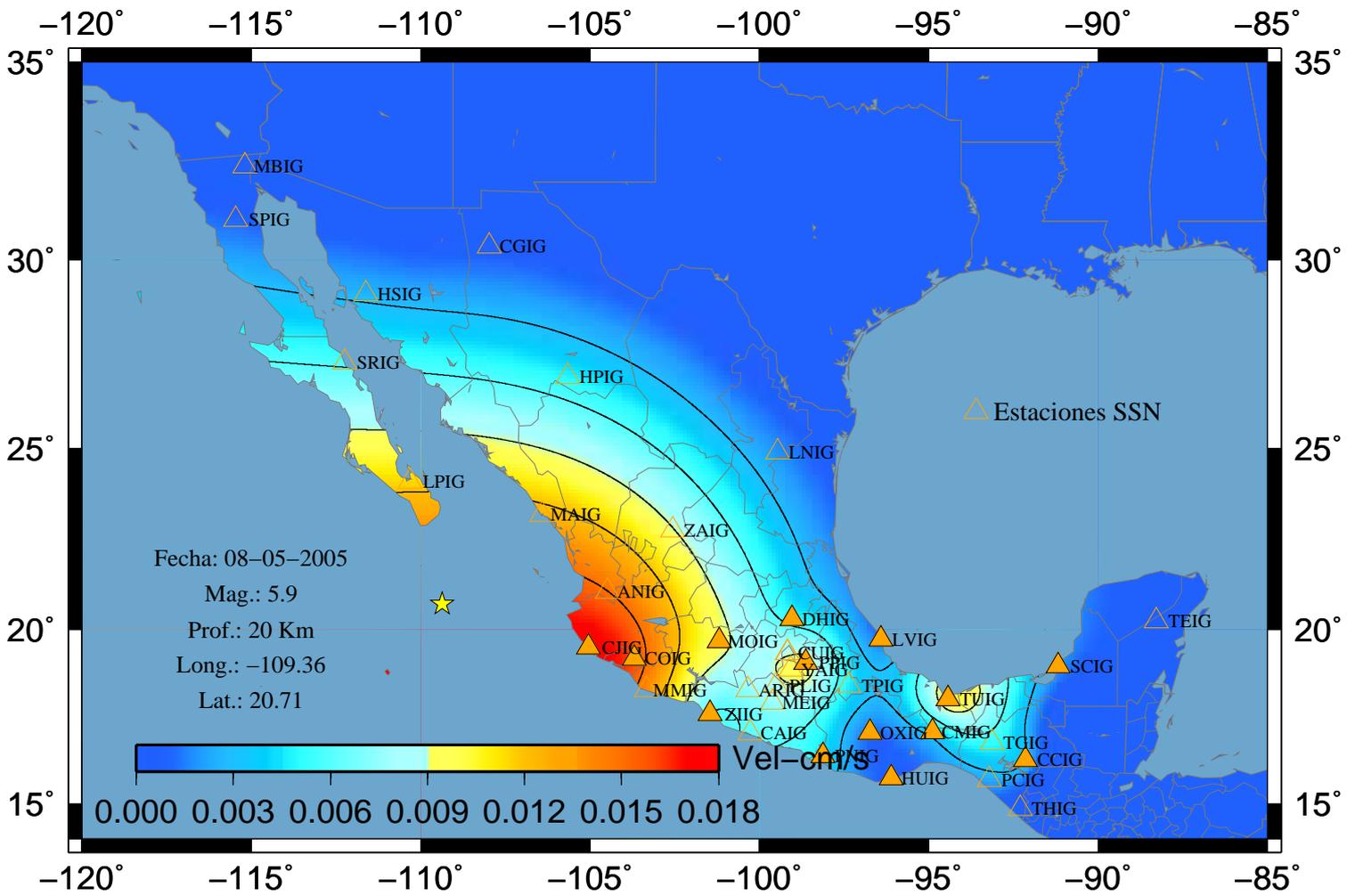
### Sismo 28 A-Norte



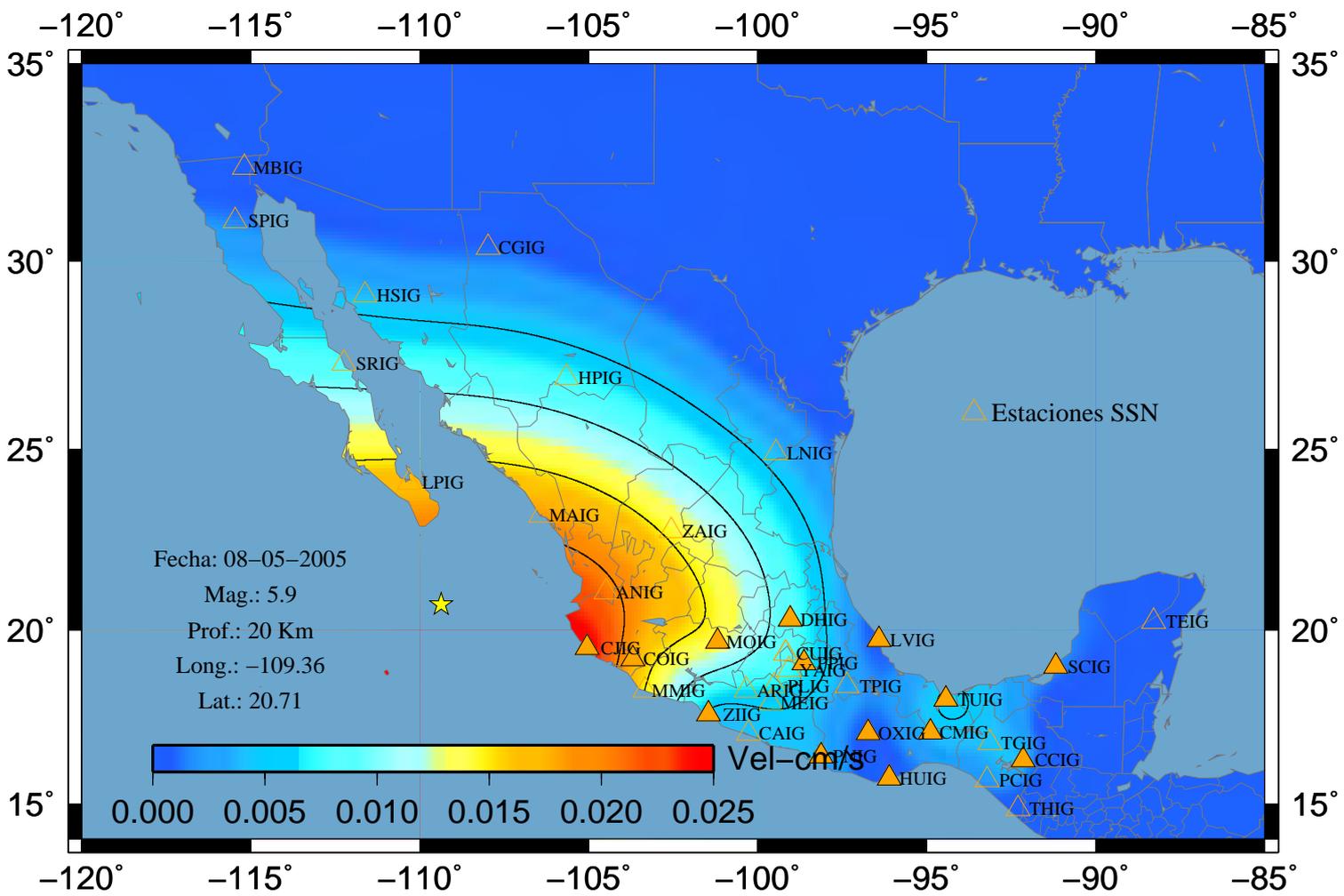
### Sismo 28 A-Vertical



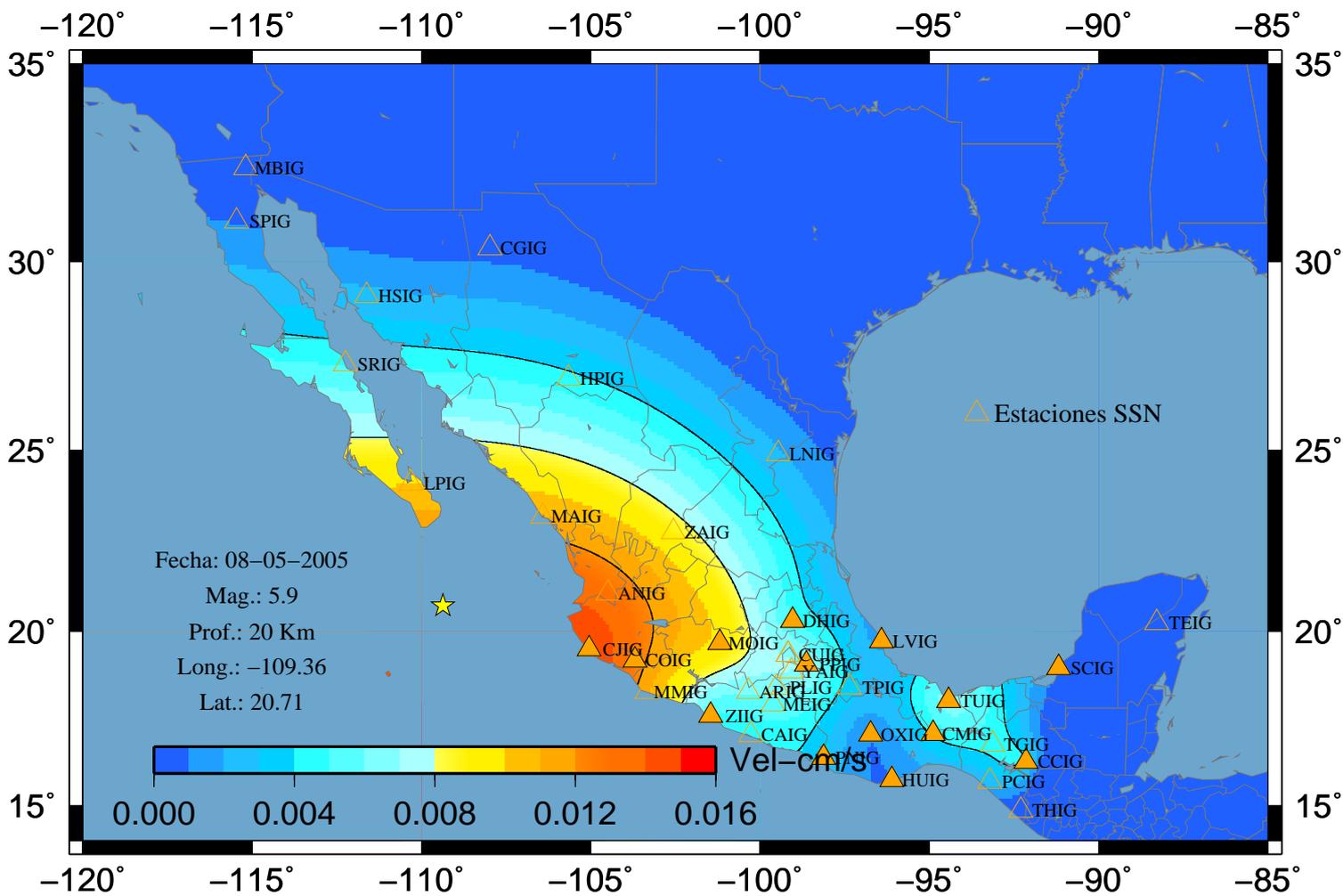
# Sismo 28 V-Este



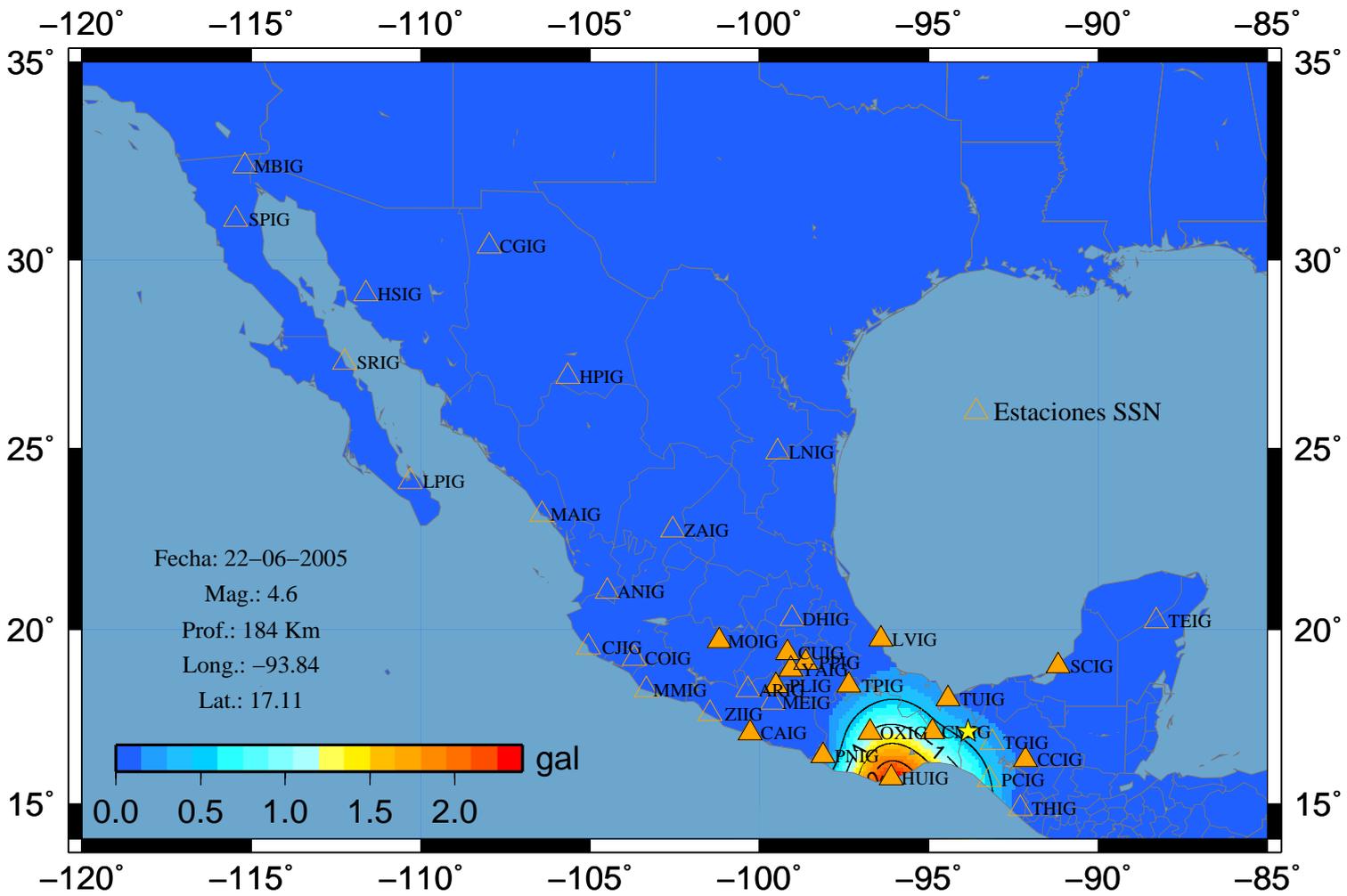
### Sismo 28 V-Norte



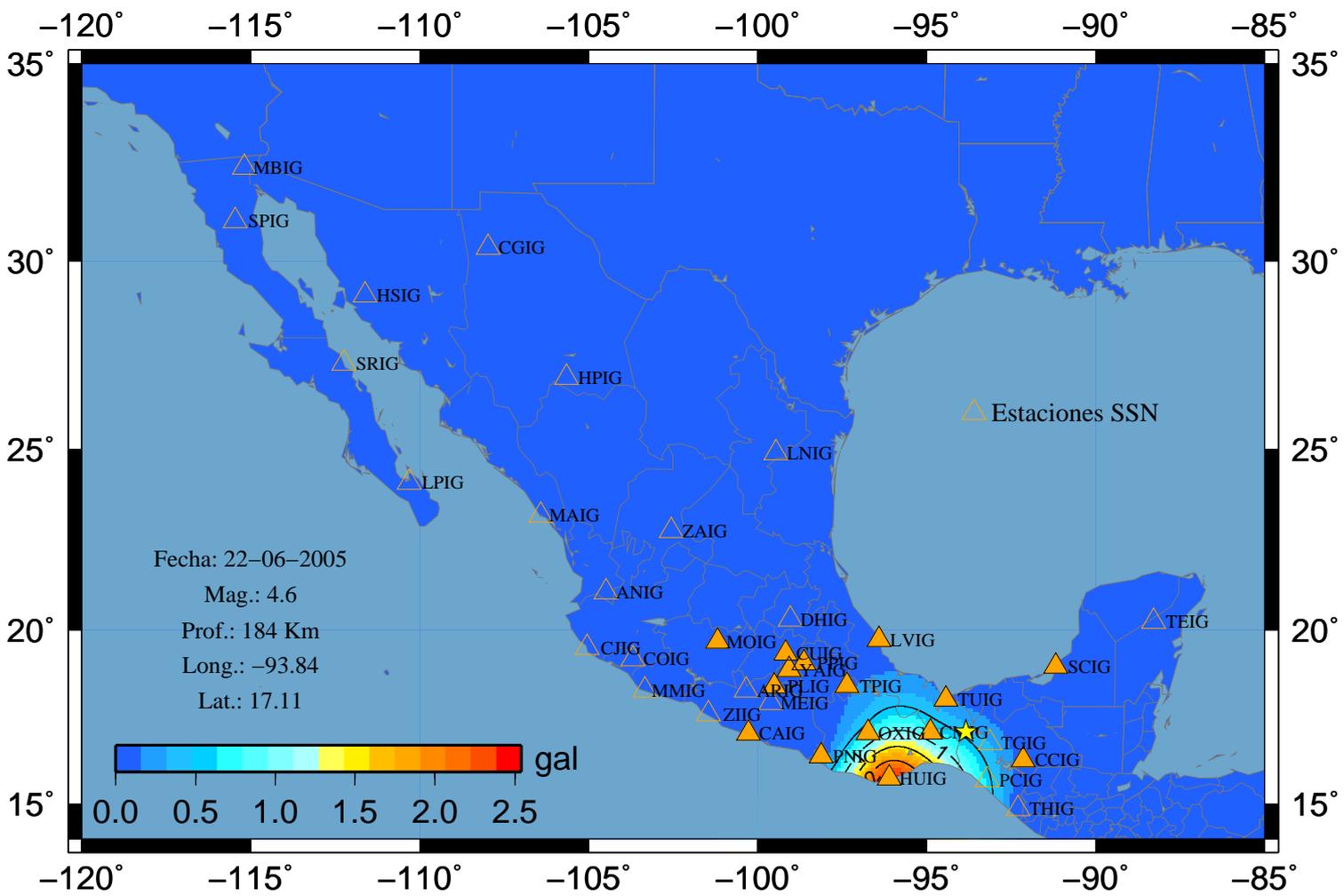
### Sismo 28 V-Vertical



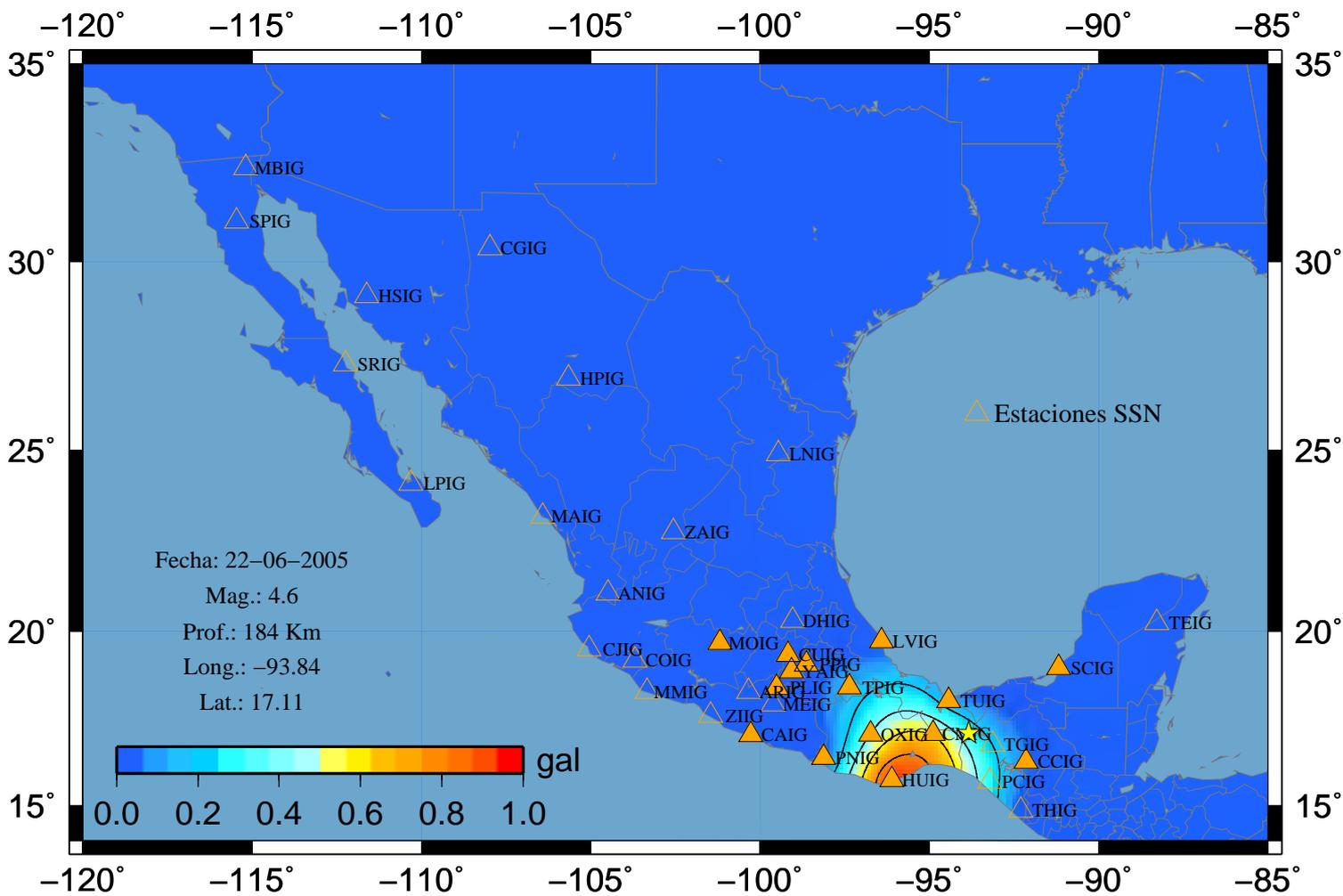
# Sismo 30 A-Este



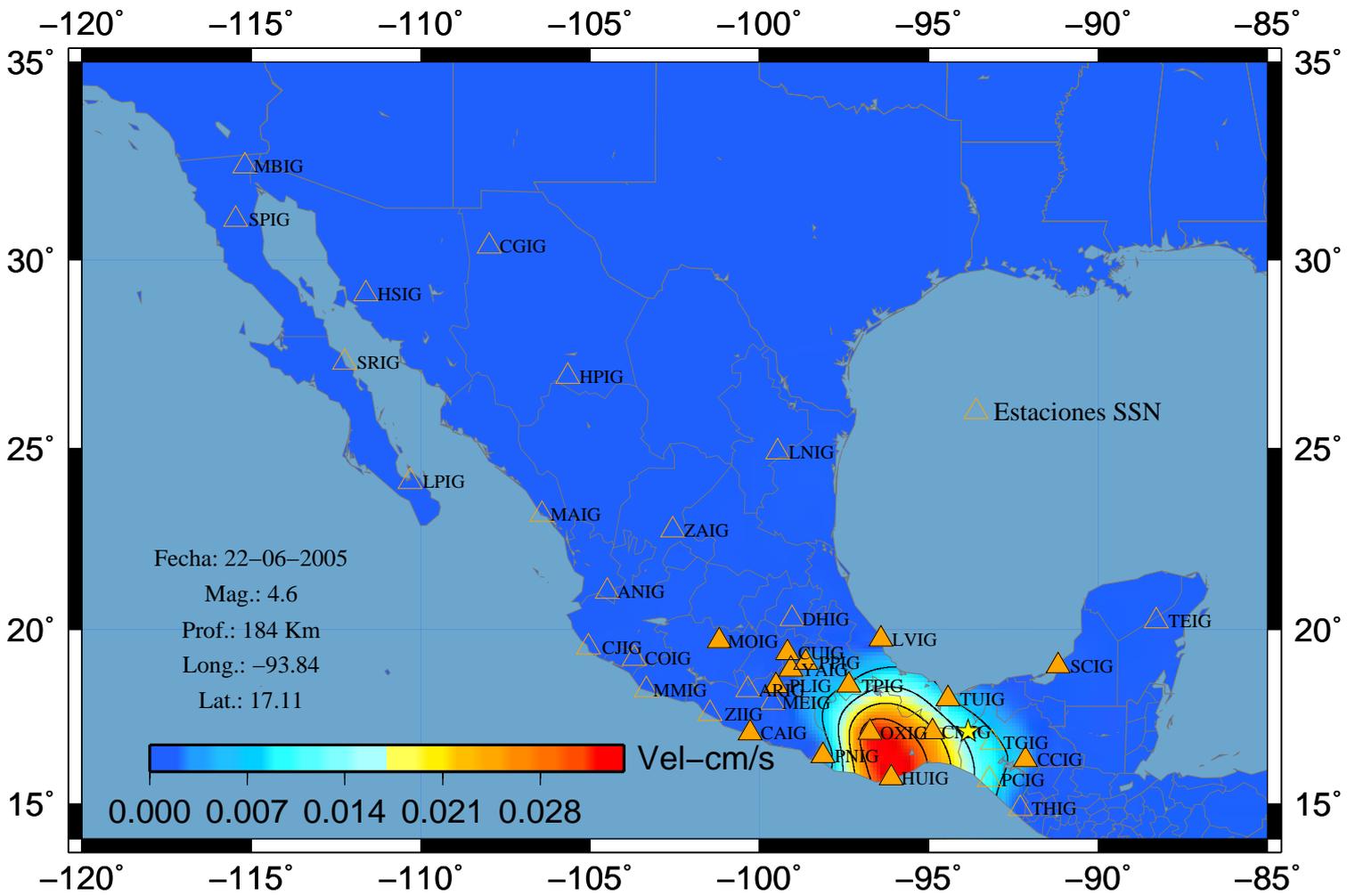
### Sismo 30 A-Norte



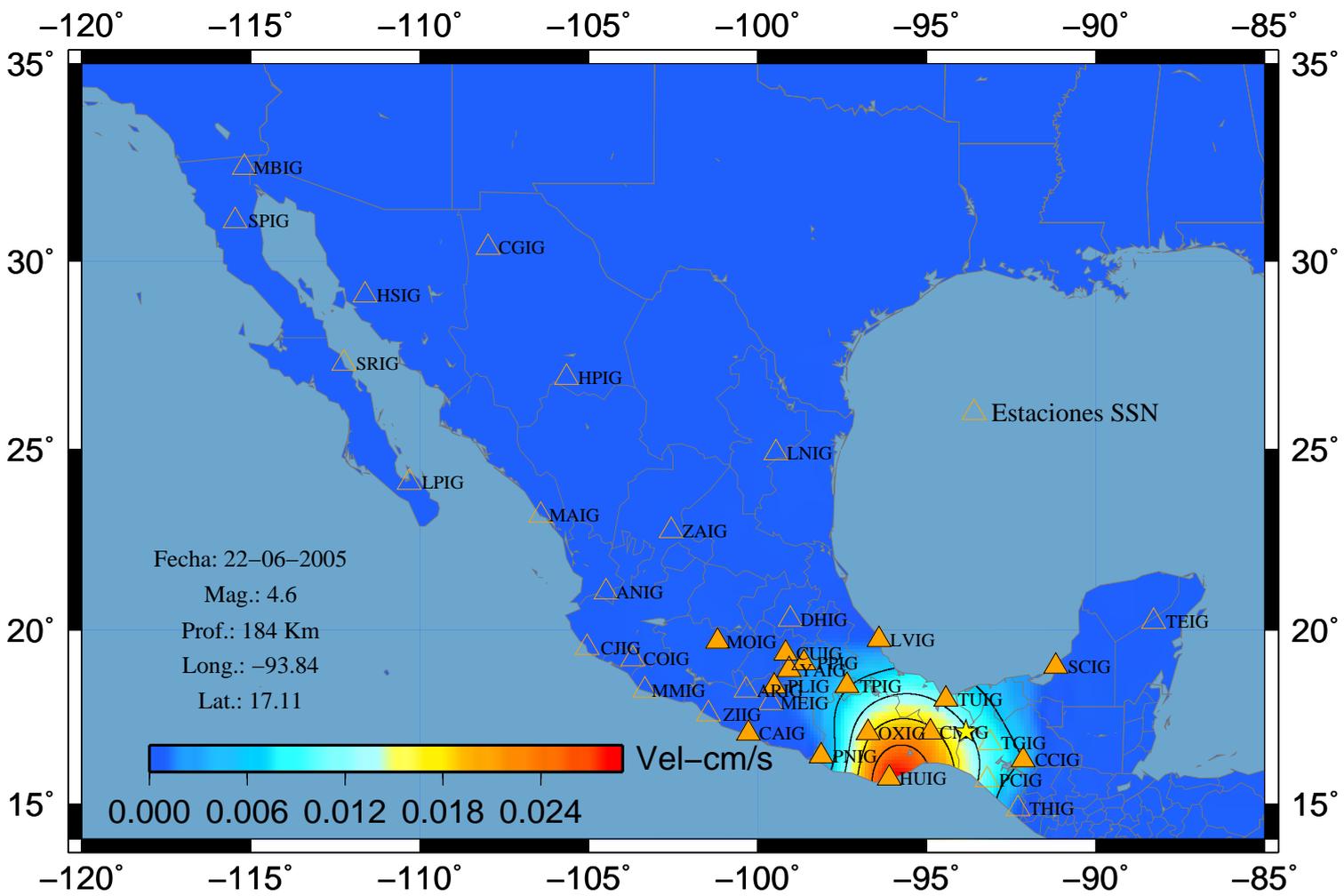
### Sismo 30 A-Vertical



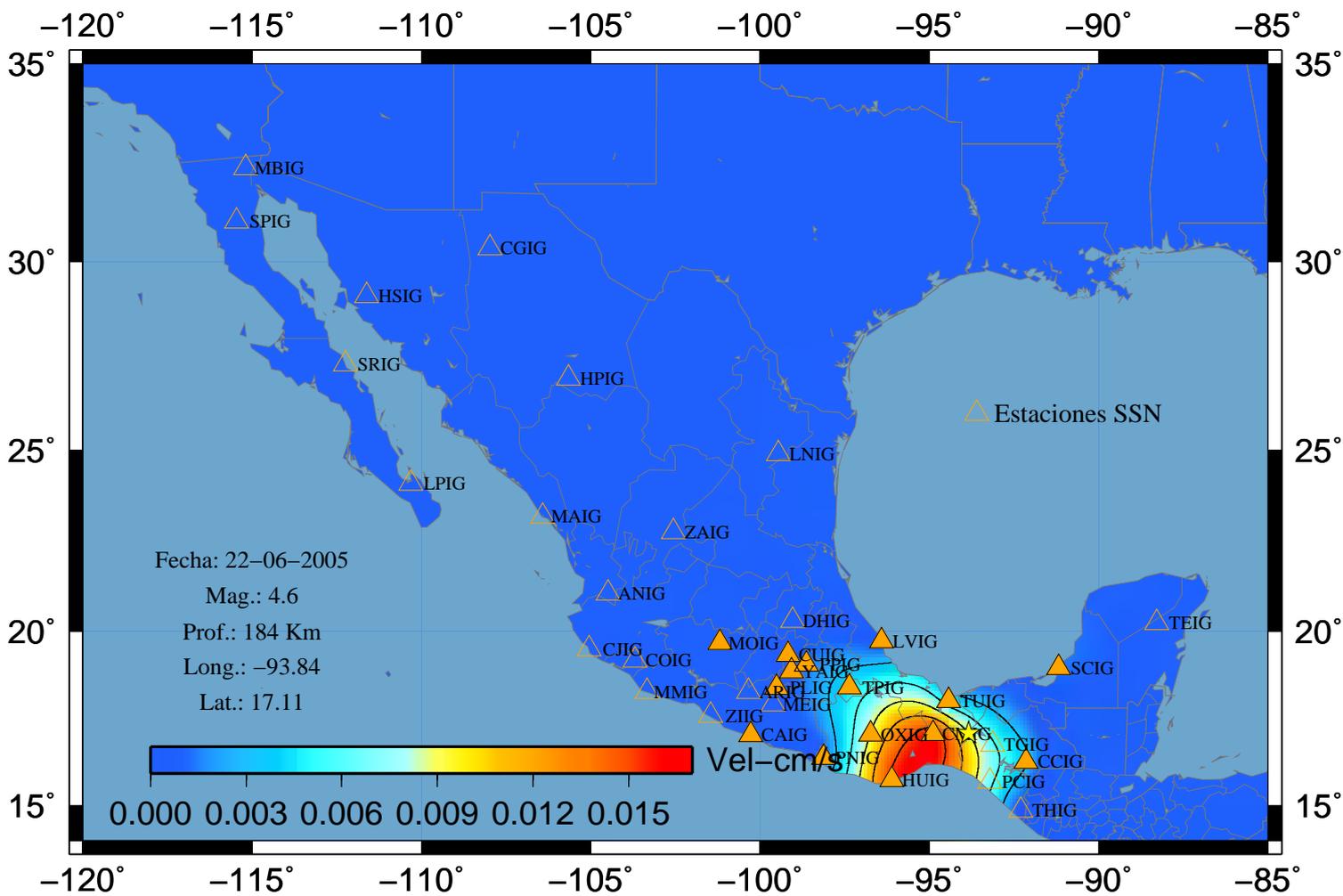
### Sismo 30 V-Este



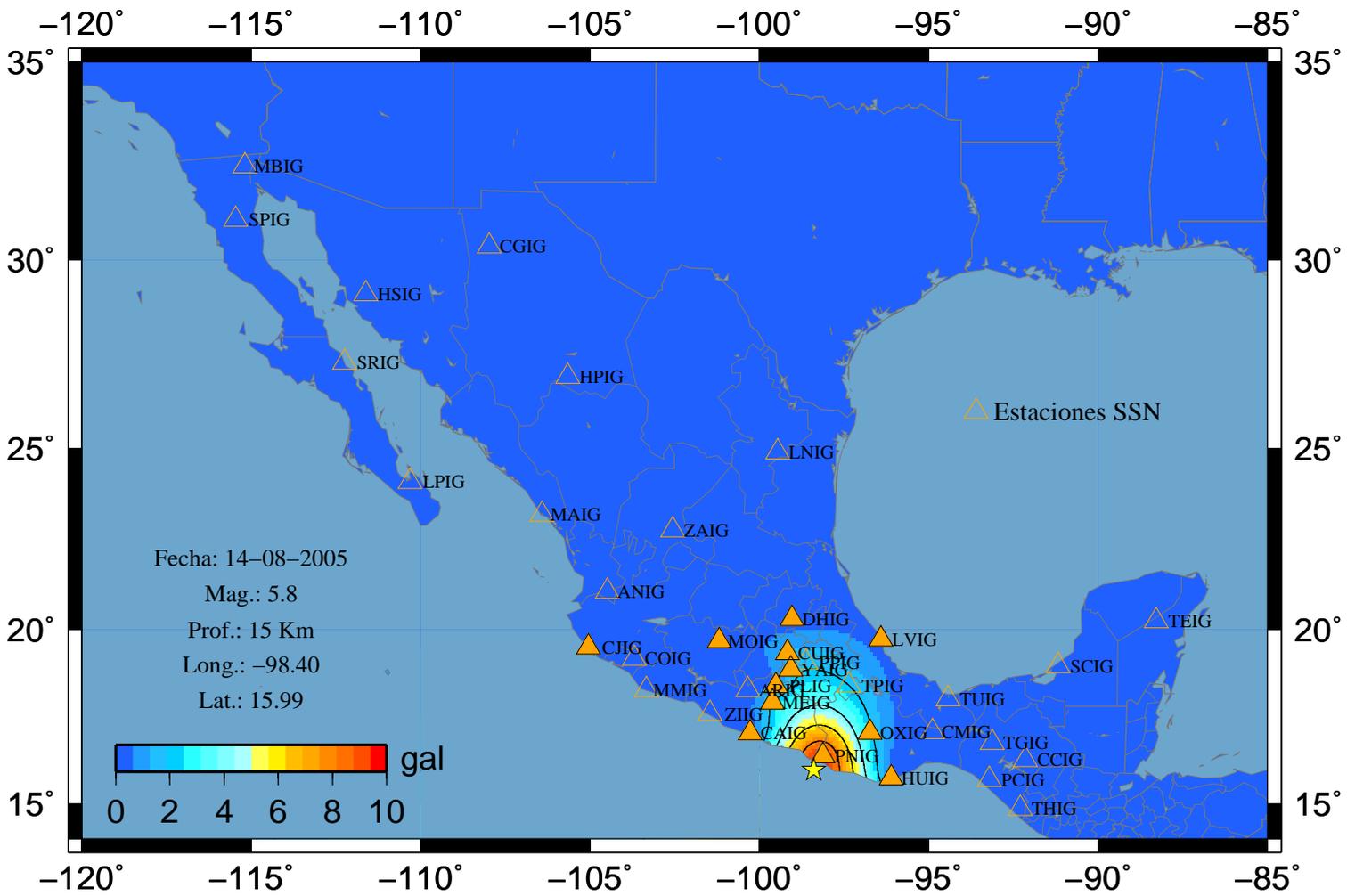
### Sismo 30 V-Norte



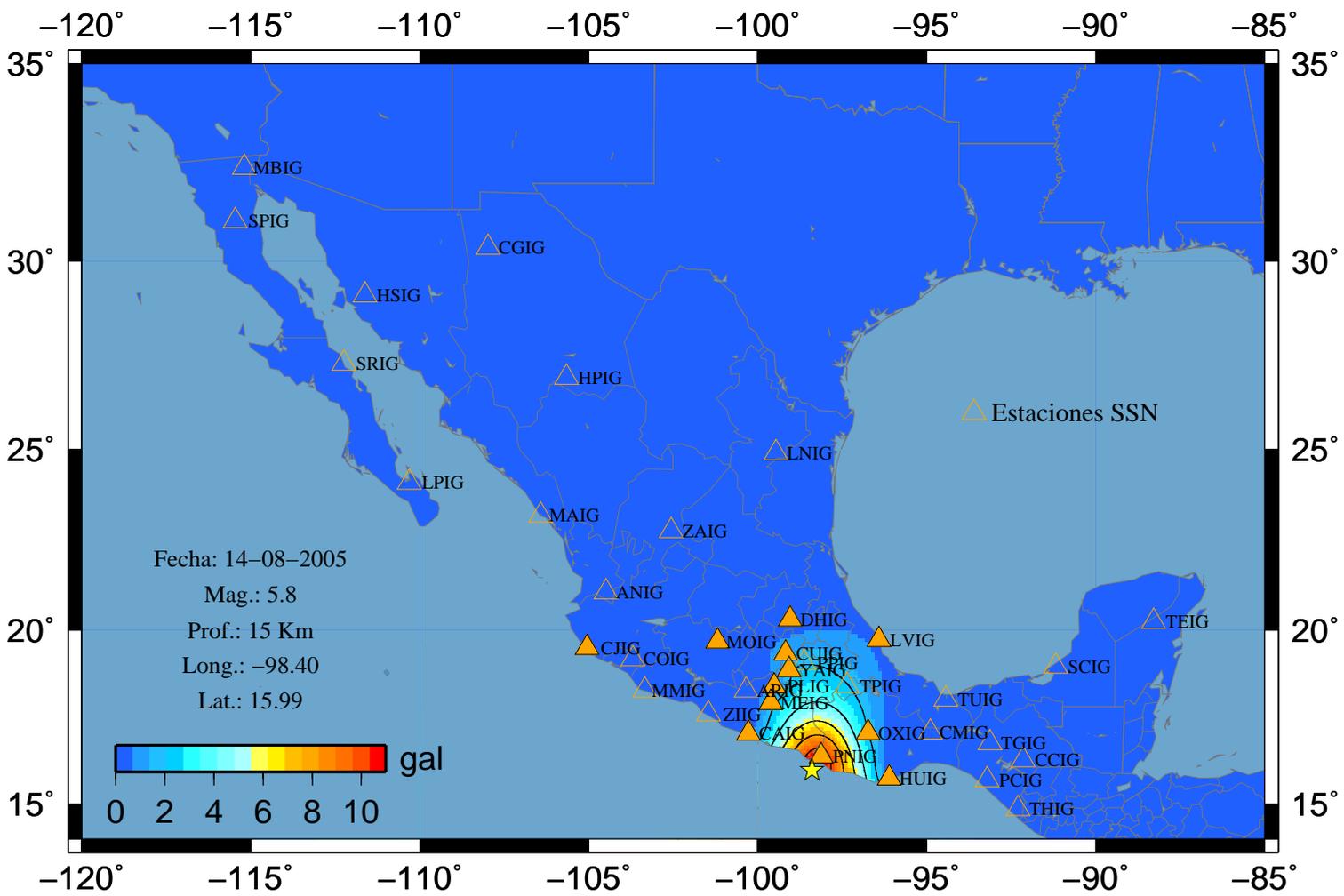
### Sismo 30 V-Vertical



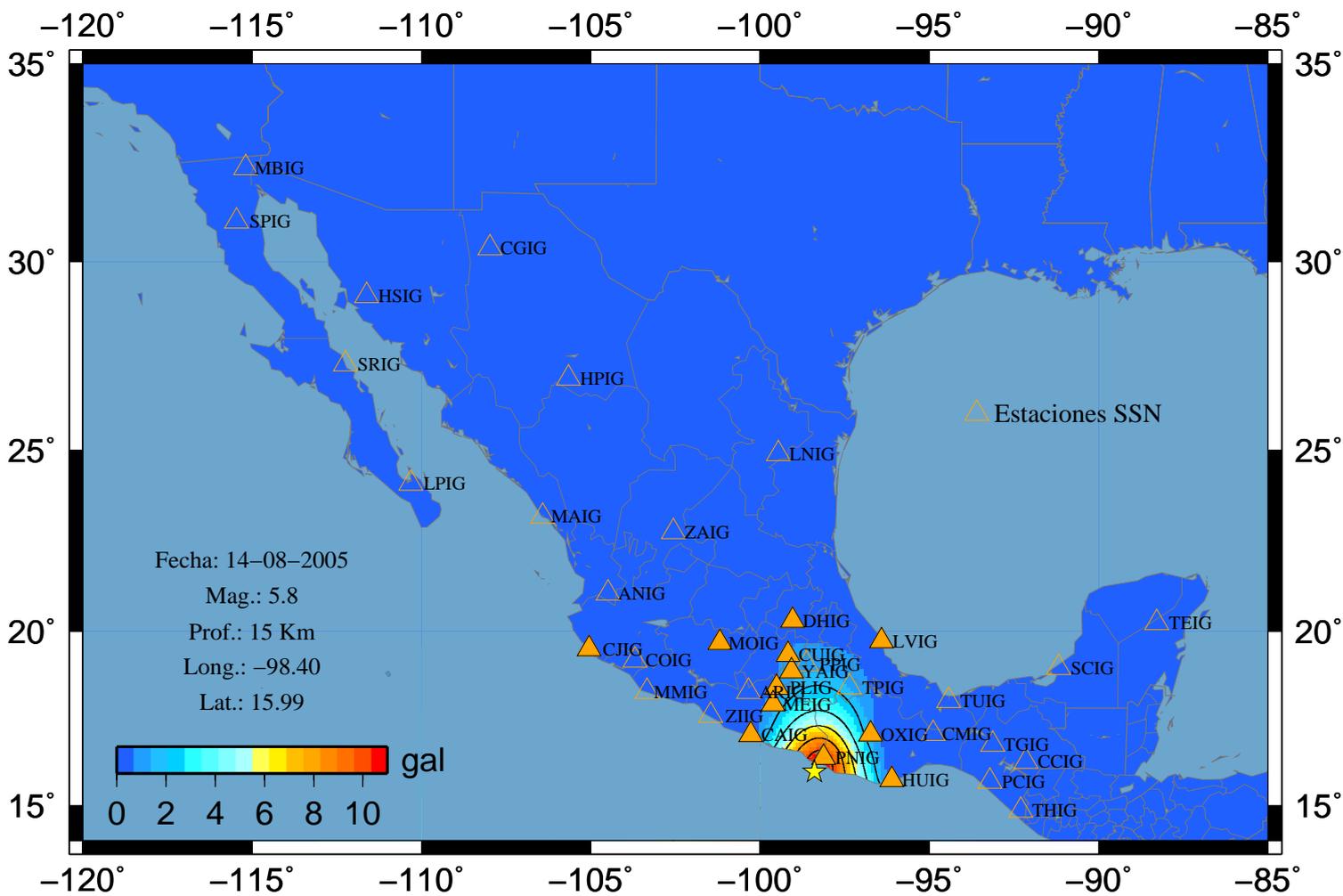
# Sismo 34 A-Este



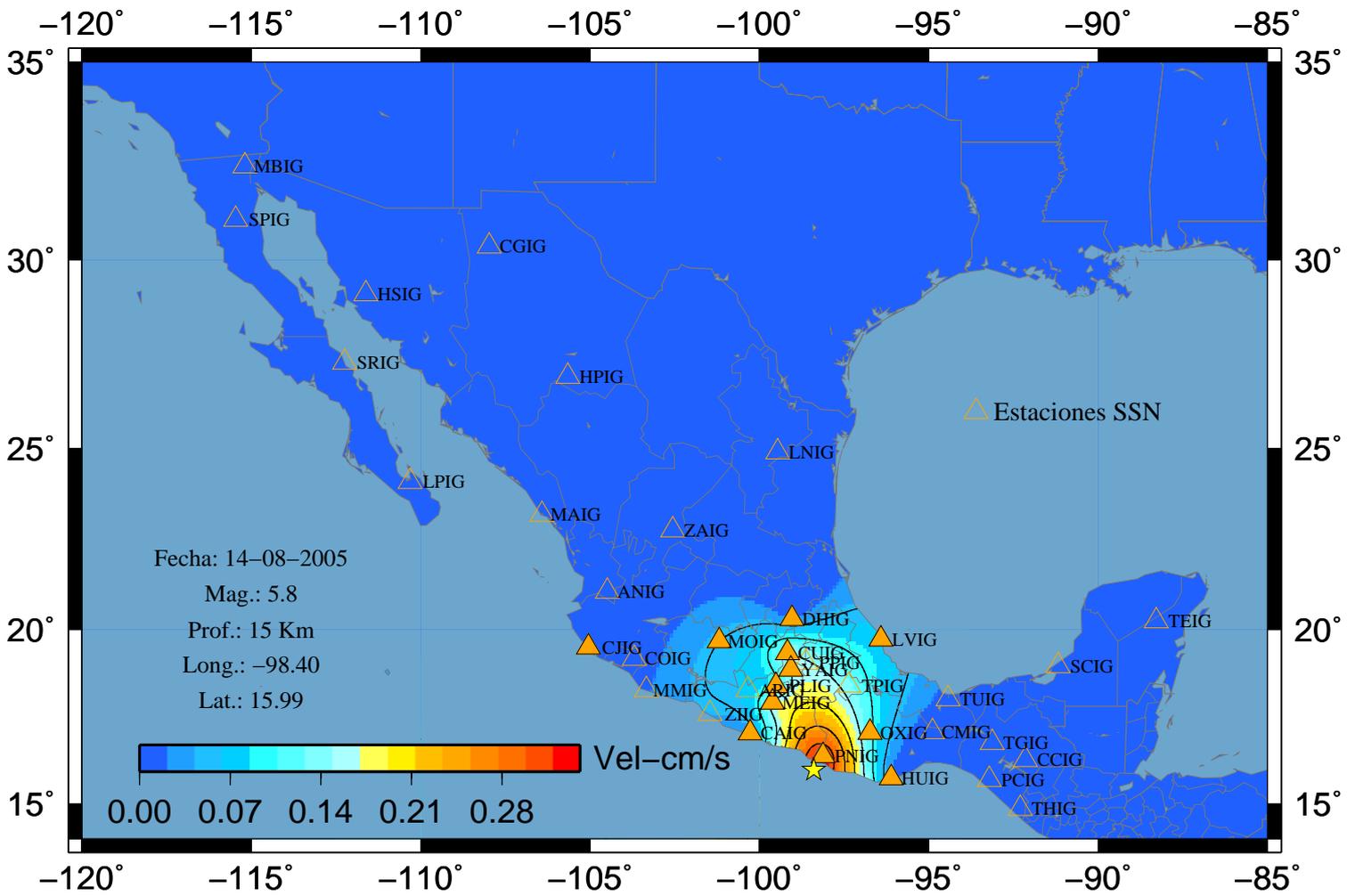
### Sismo 34 A-Norte



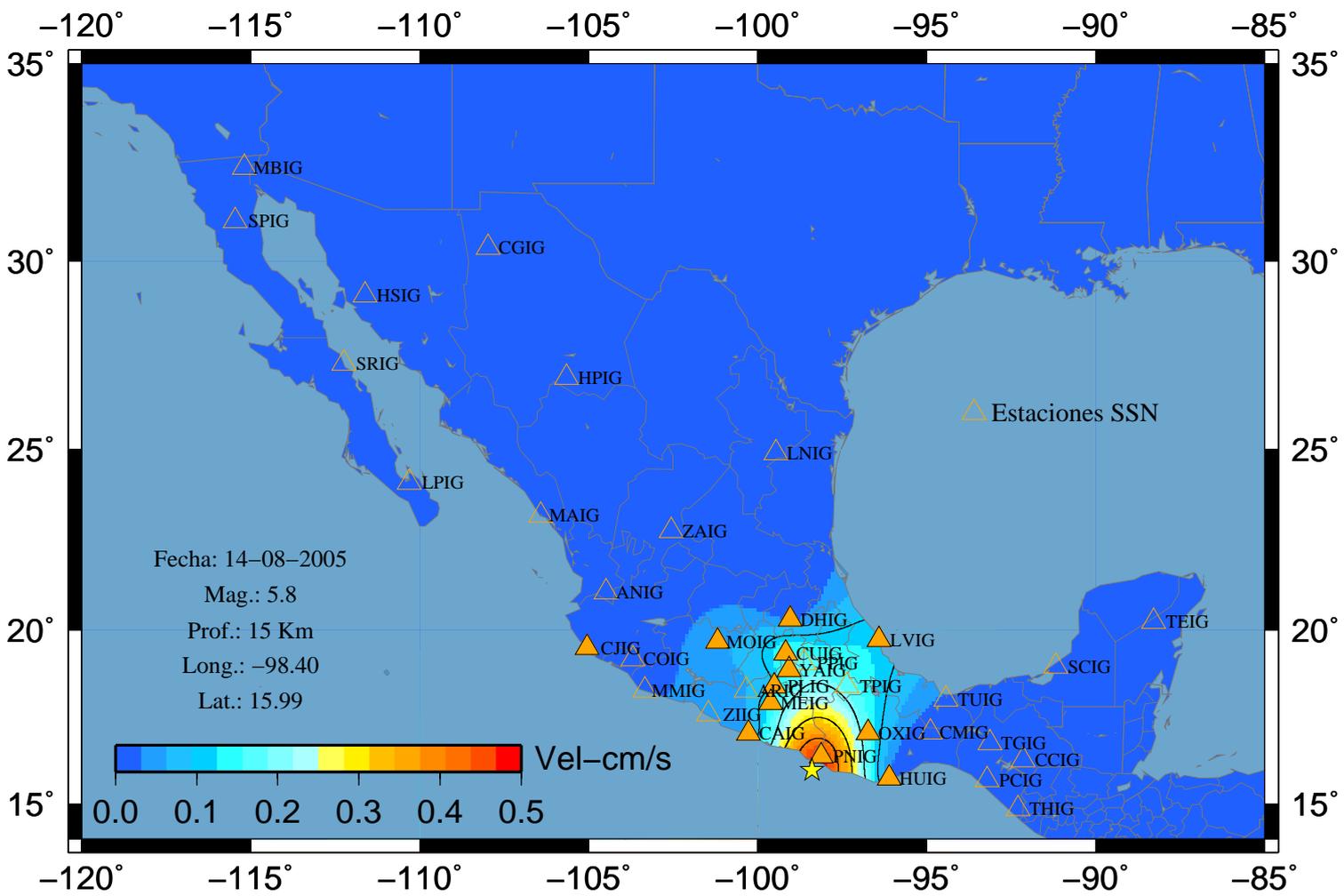
# Sismo 34 A-Vertical



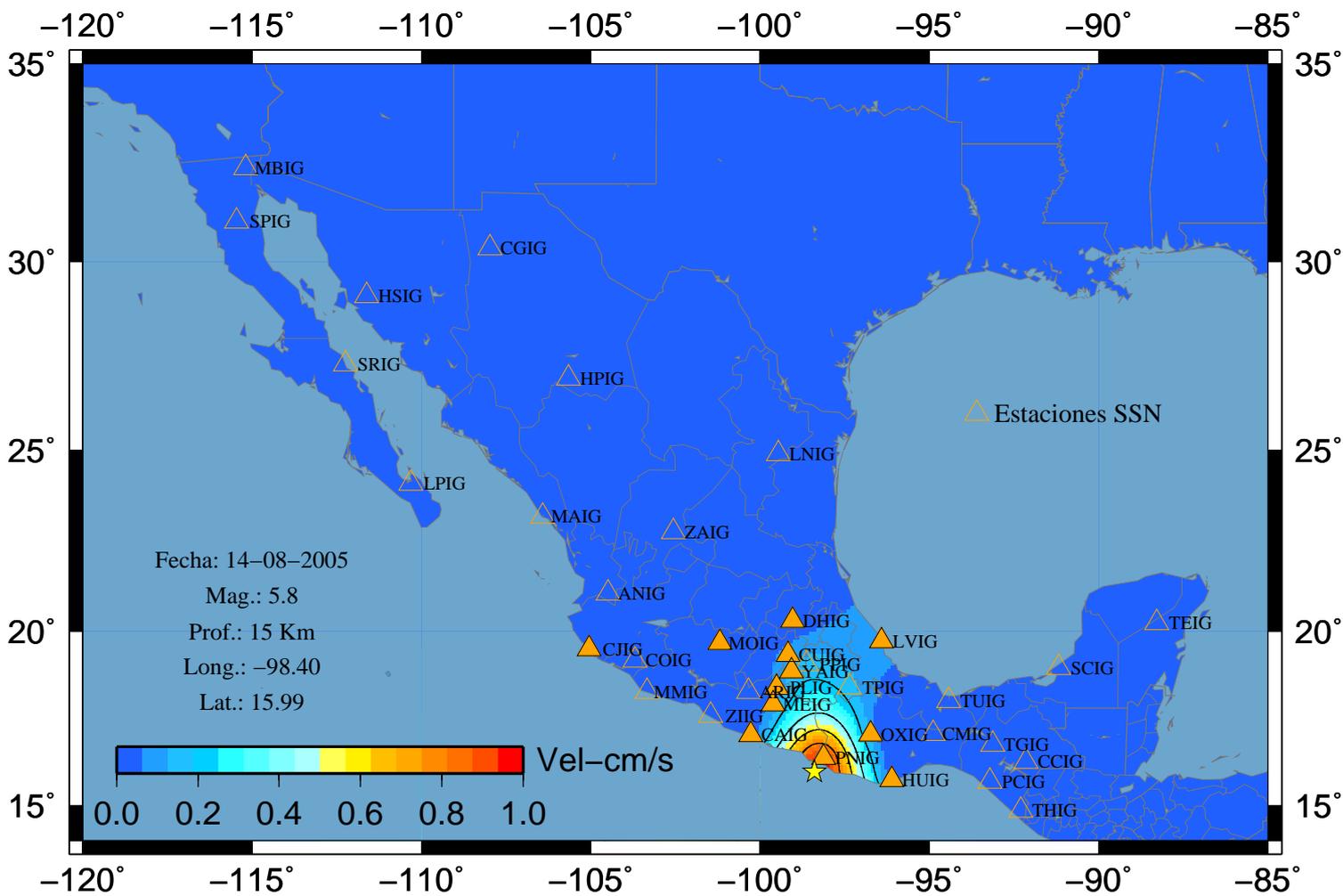
### Sismo 34 V-Este



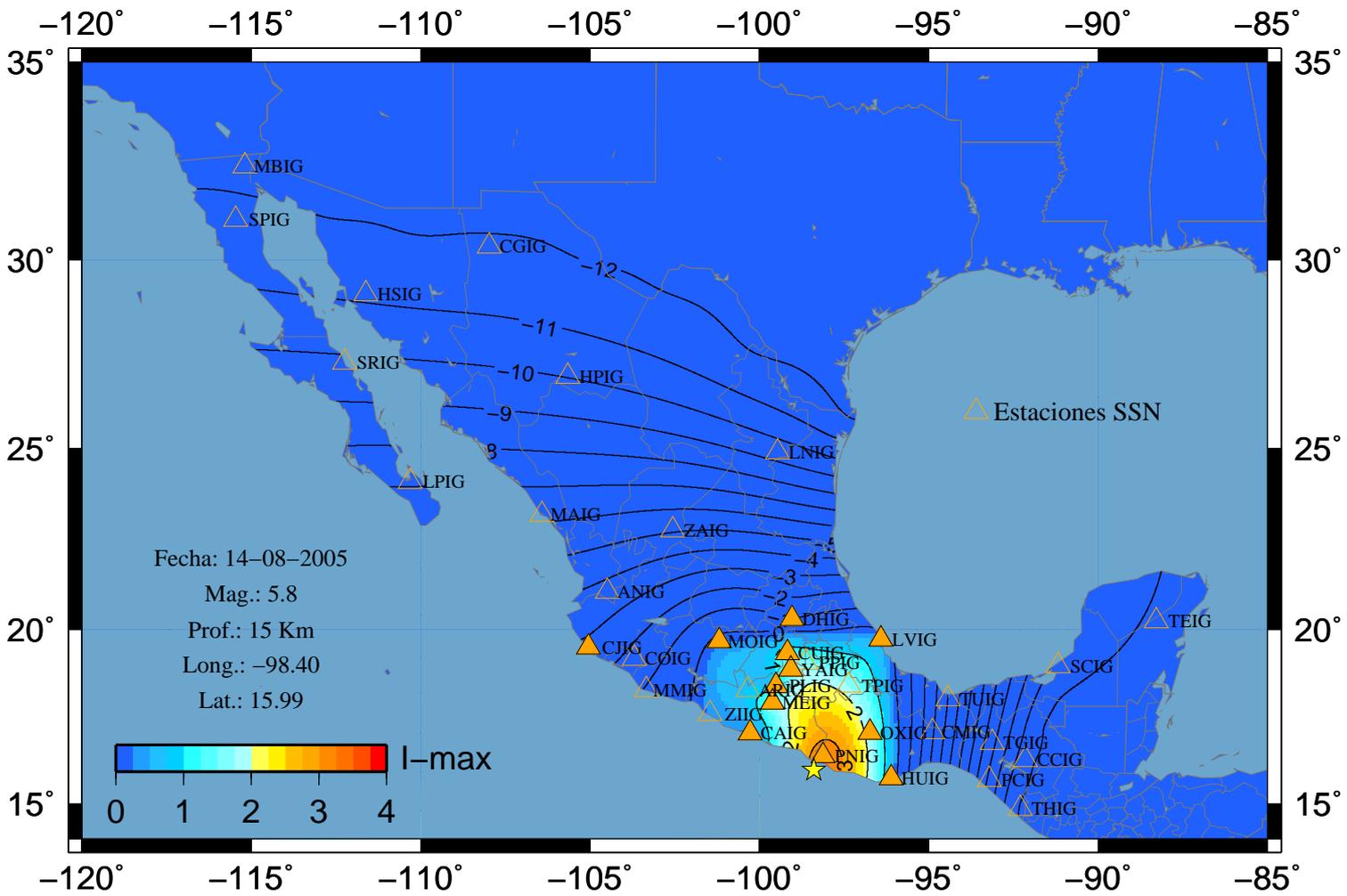
### Sismo 34 V-Norte



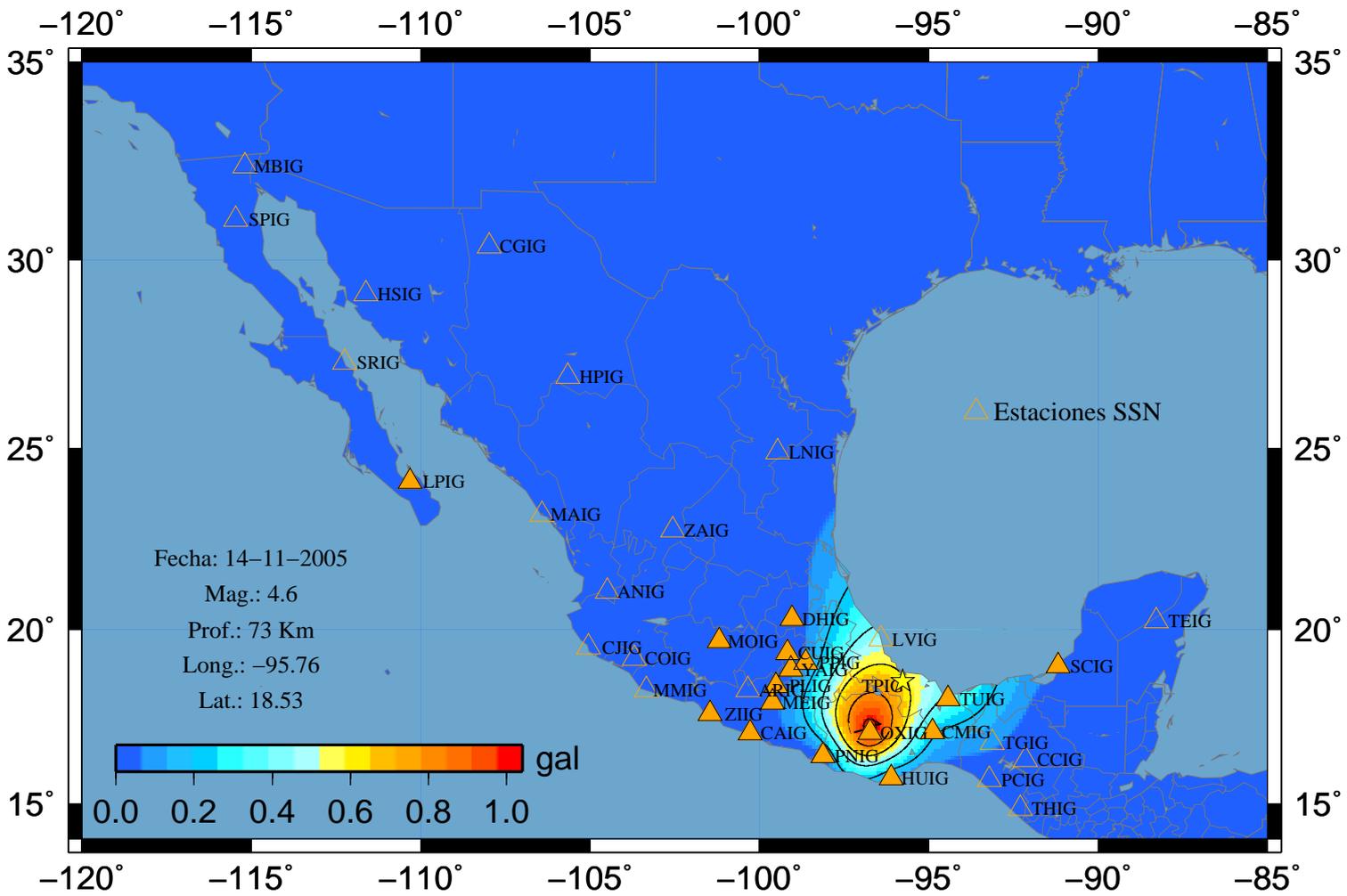
### Sismo 34 V-Vertical



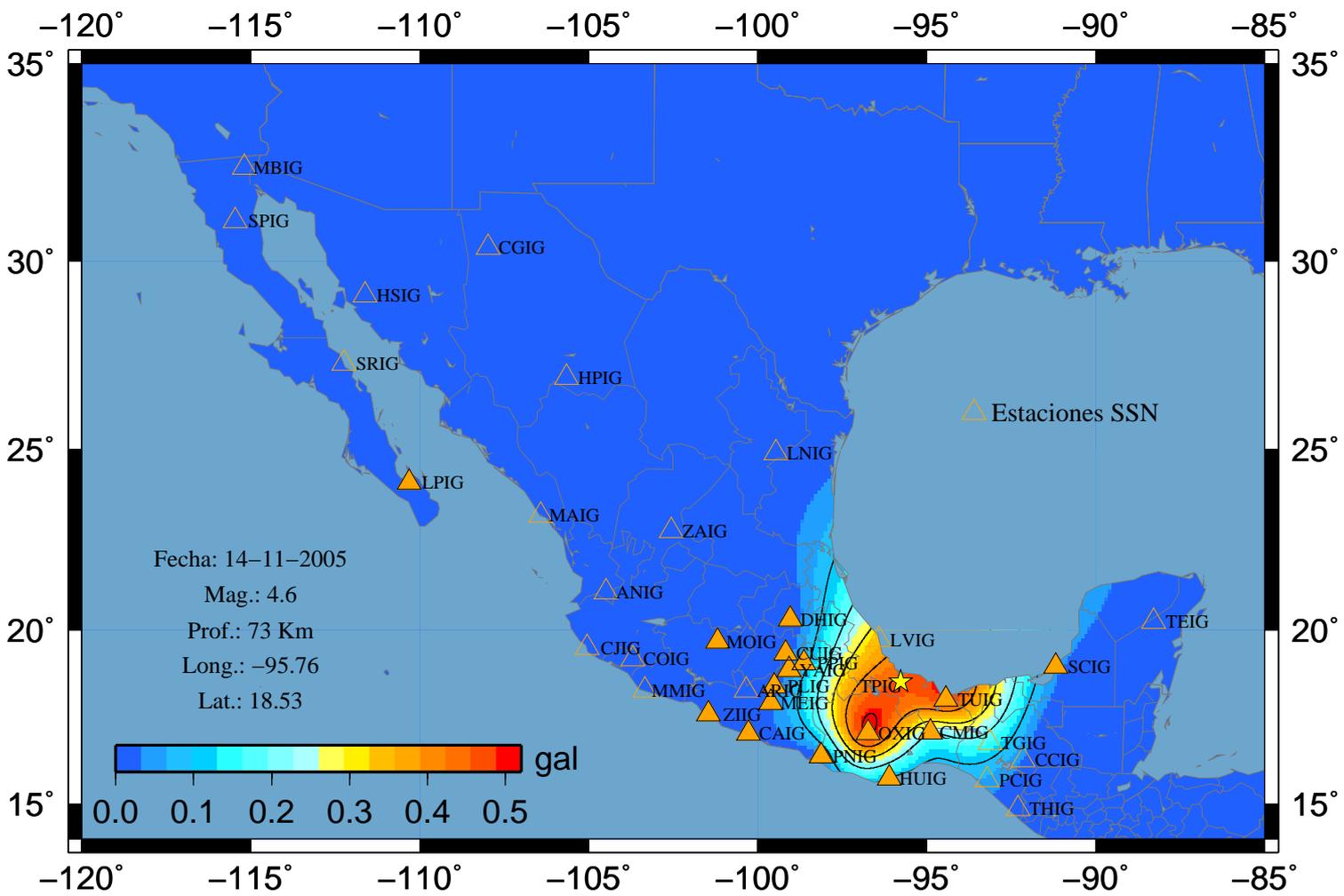
### Sismo 34 I (Max)



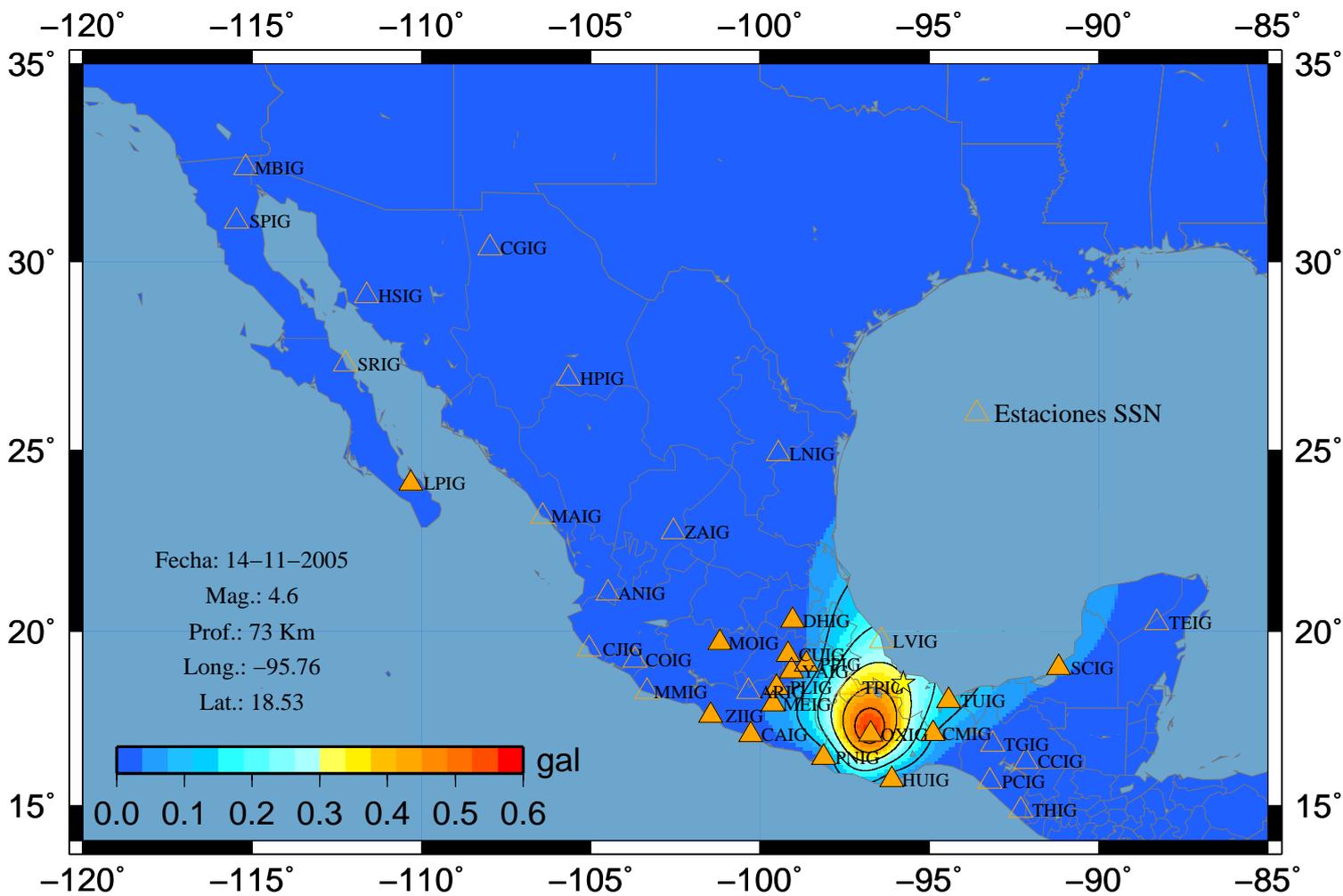
# Sismo 37 A-Este



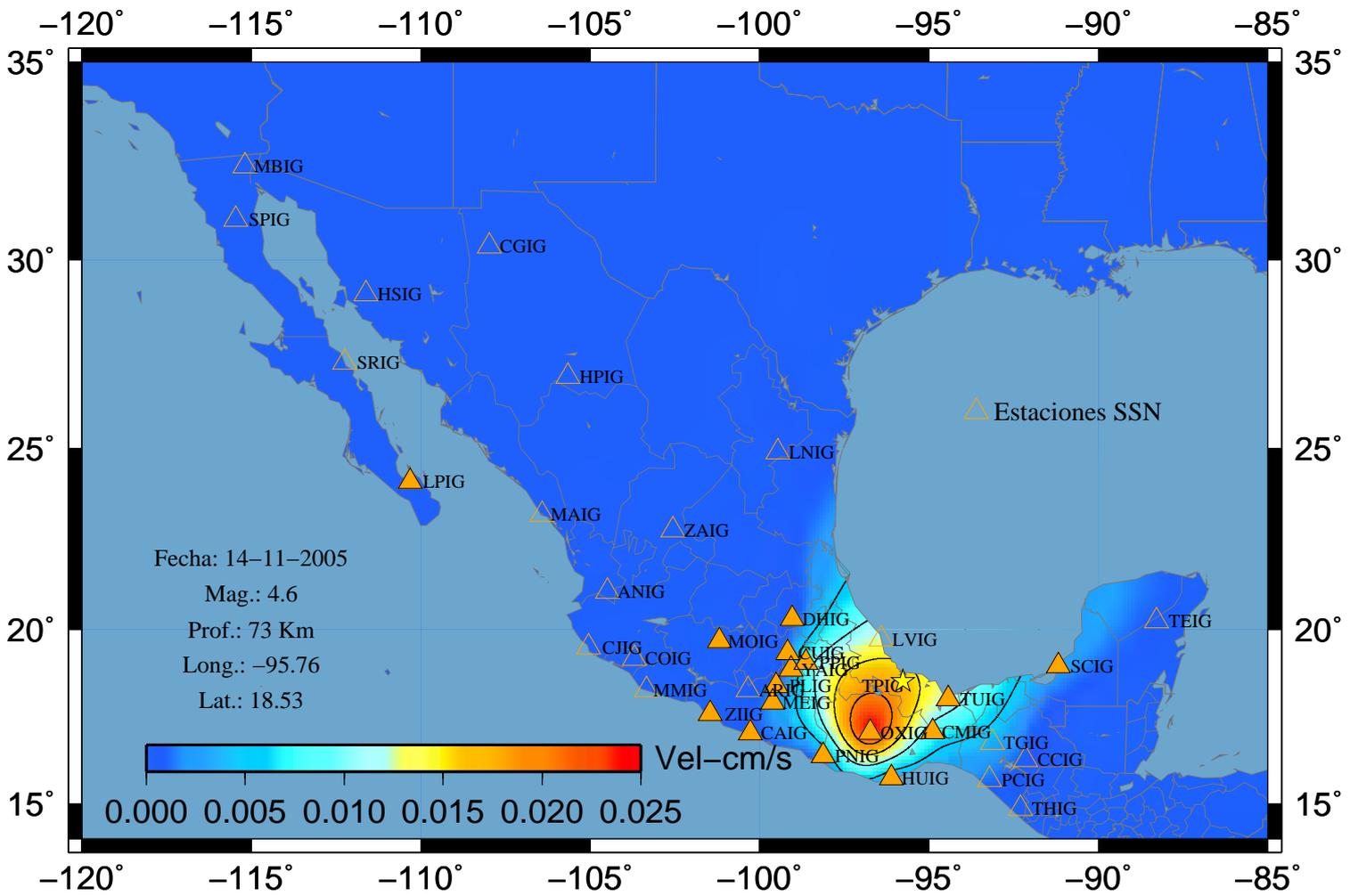
### Sismo 37 A-Norte



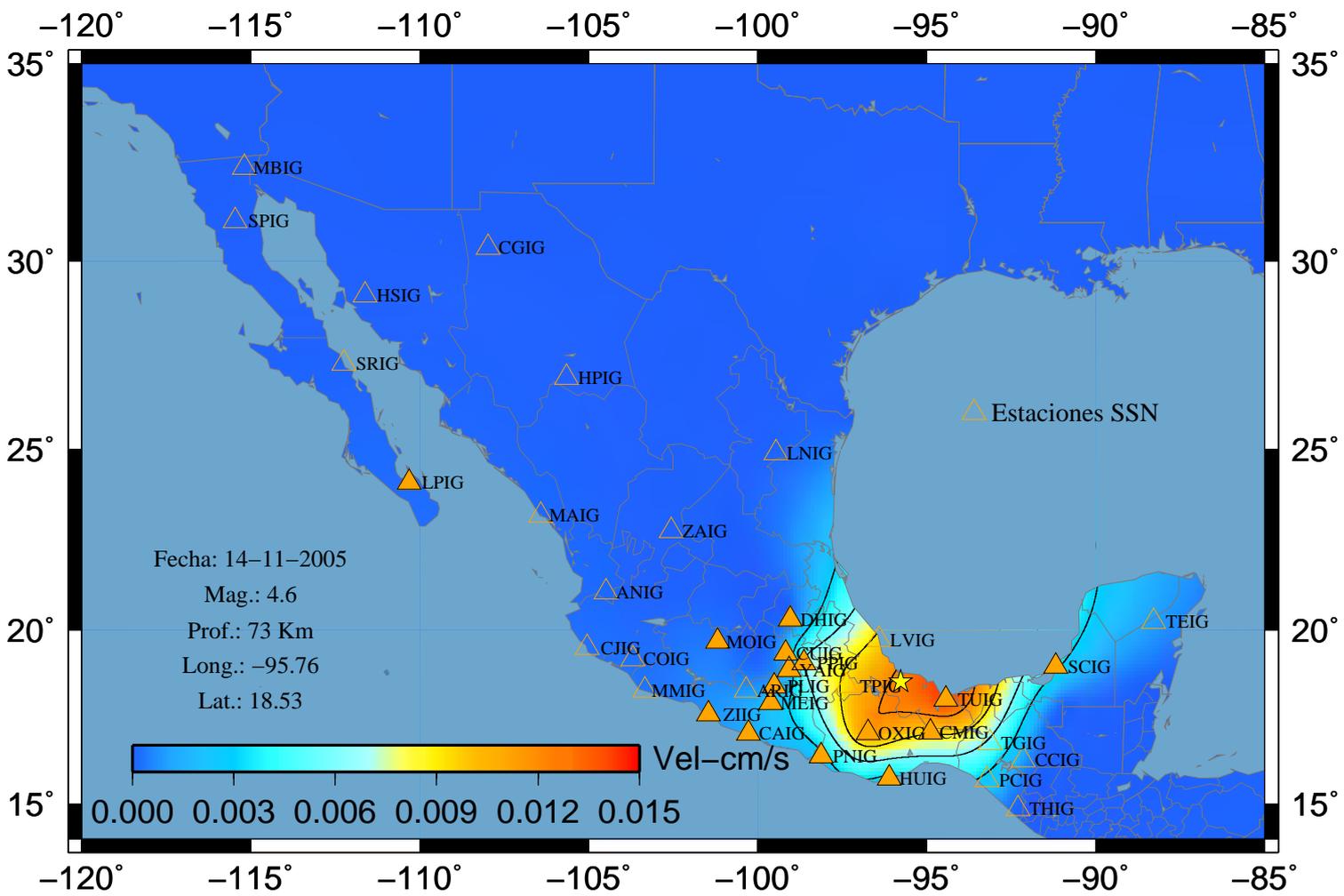
### Sismo 37 A-Vertical



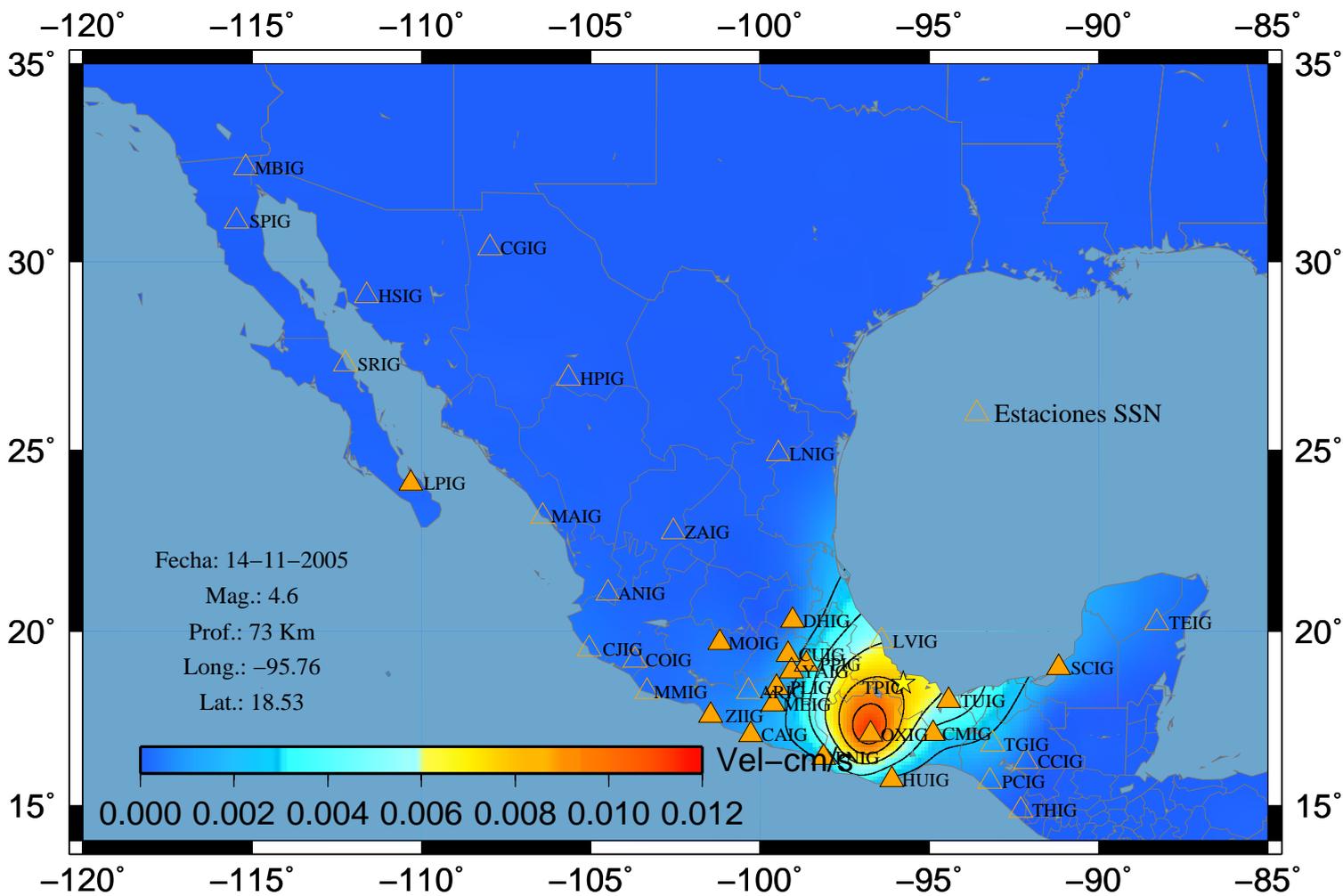
### Sismo 37 V-Este



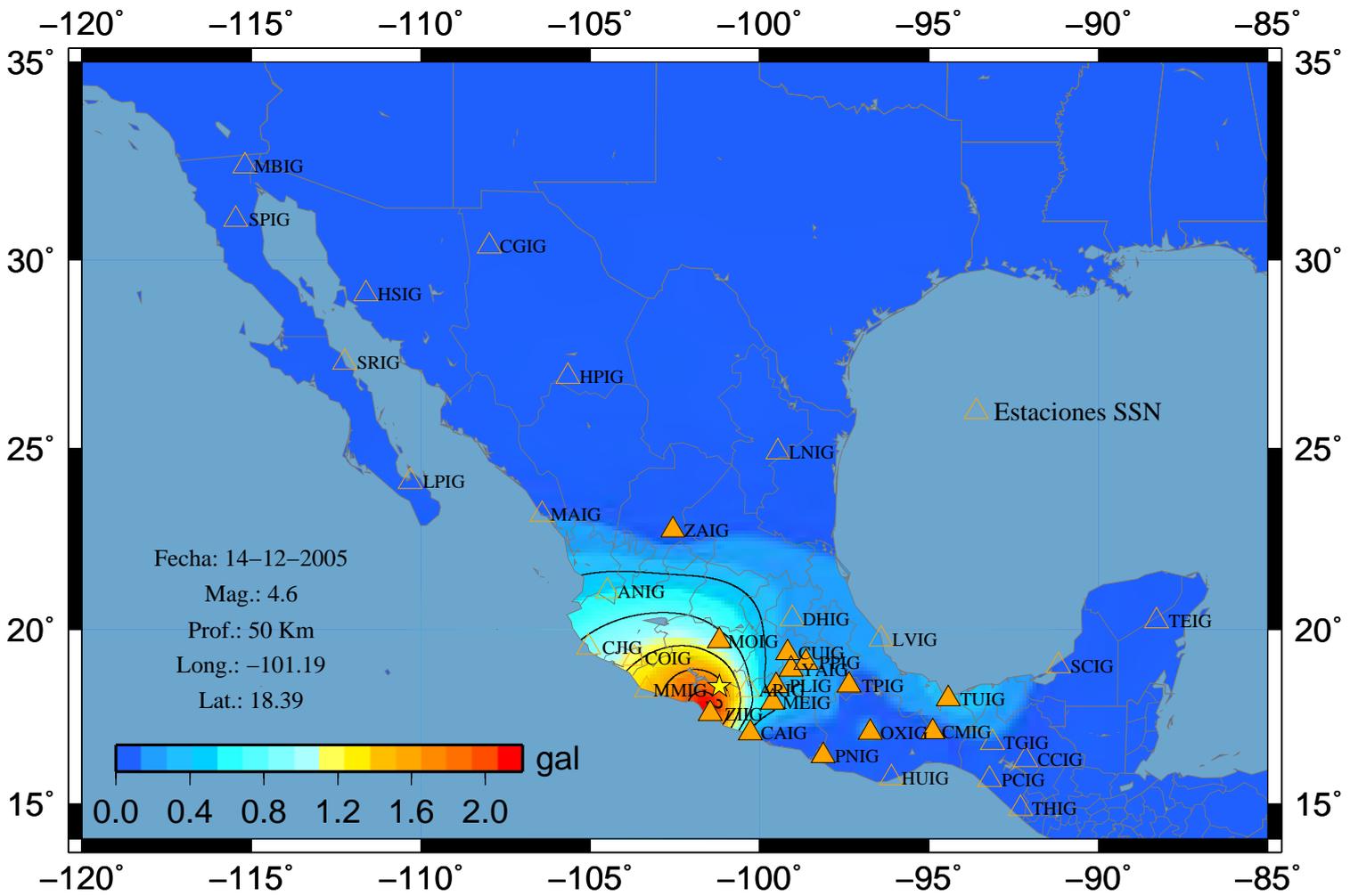
### Sismo 37 V-Norte



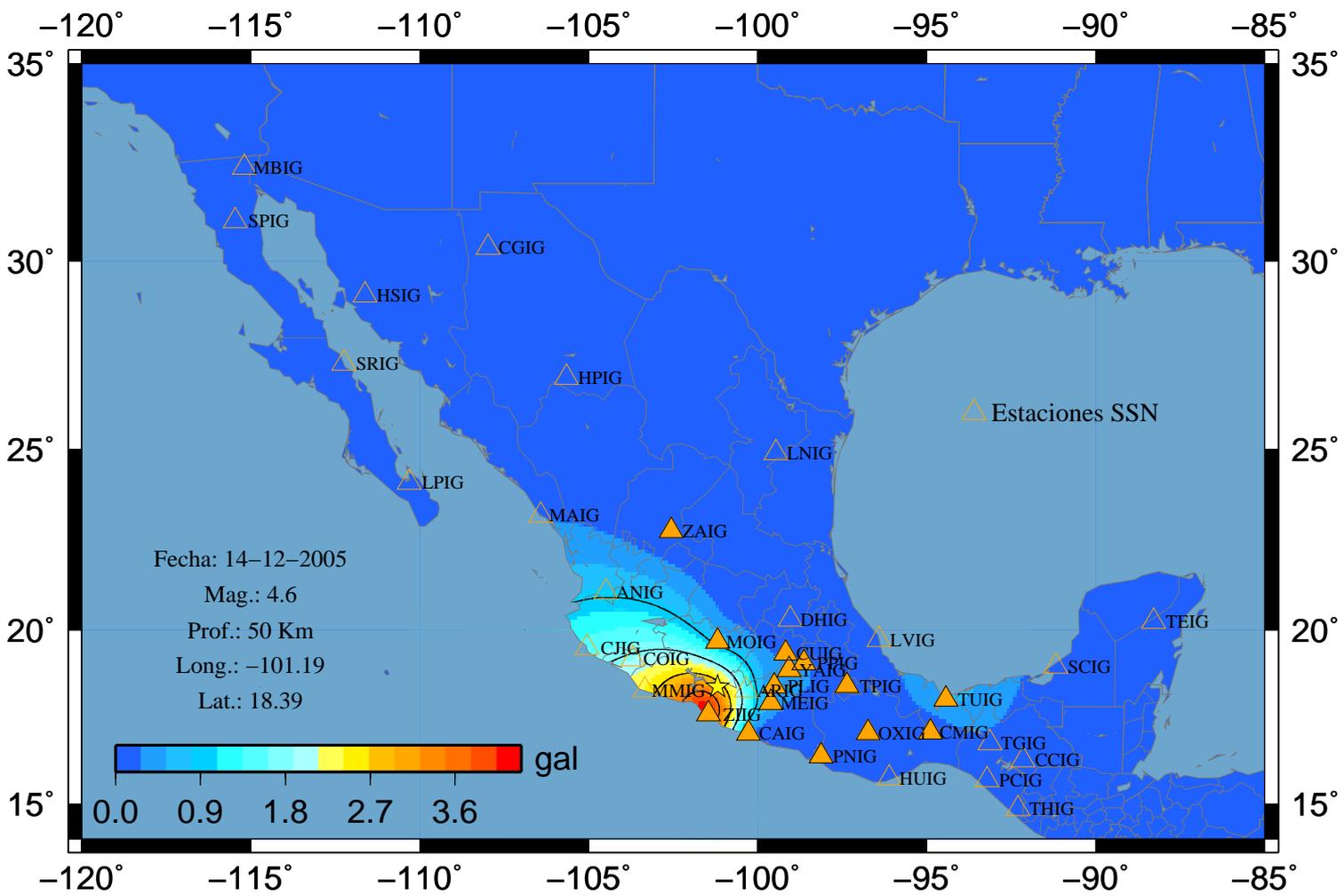
### Sismo 37 V-Vertical



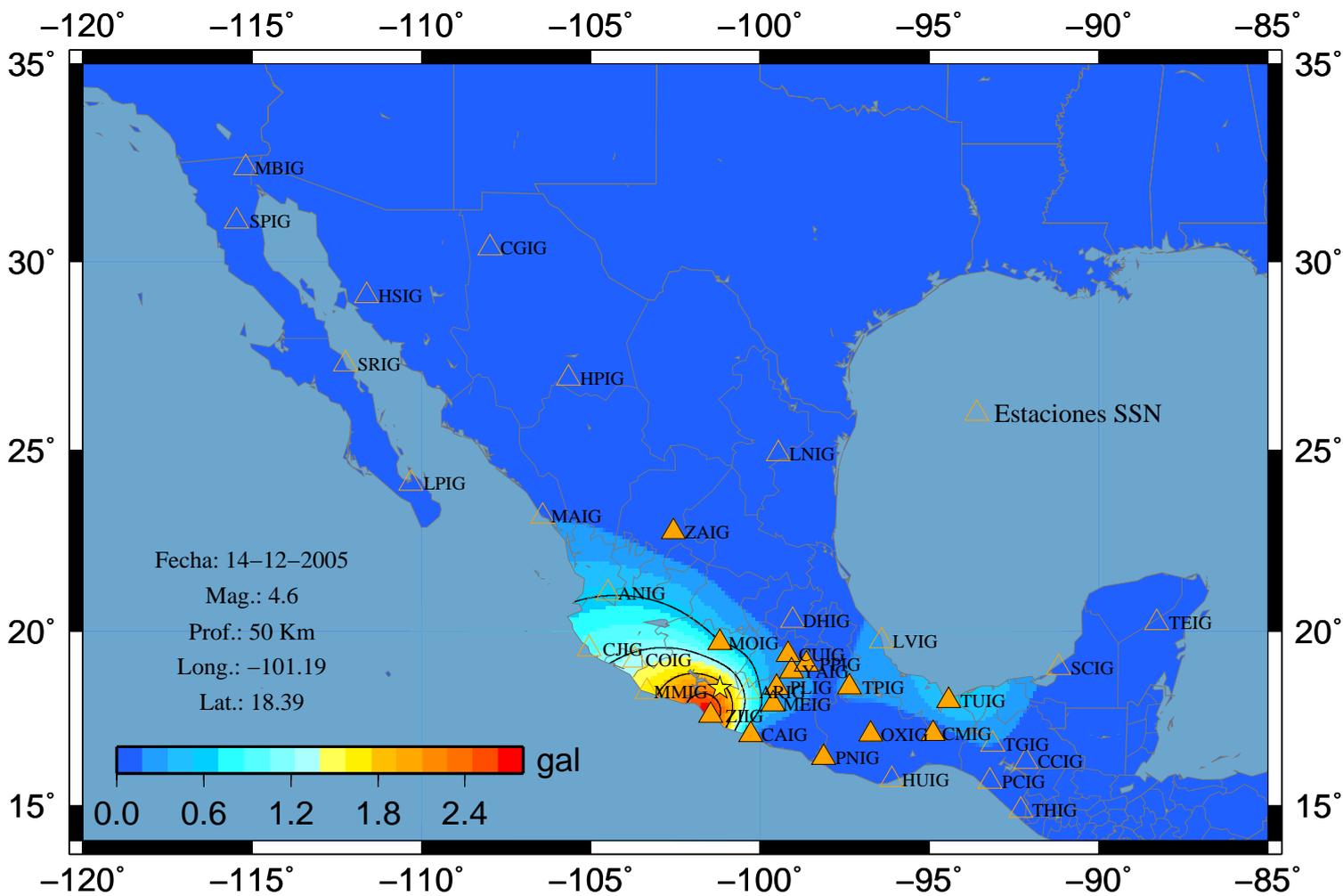
### Sismo 39 A-Este



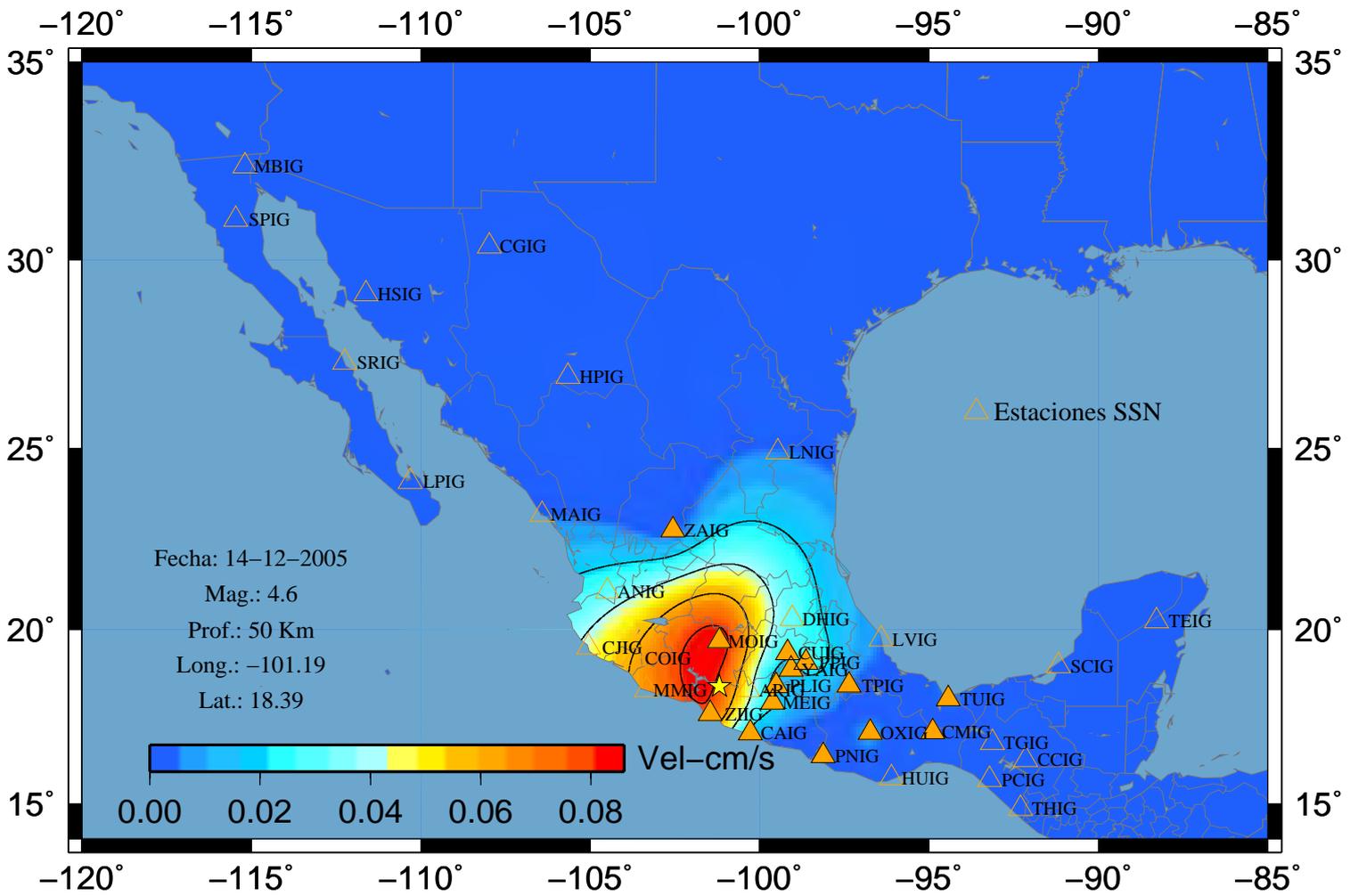
### Sismo 39 A-Norte



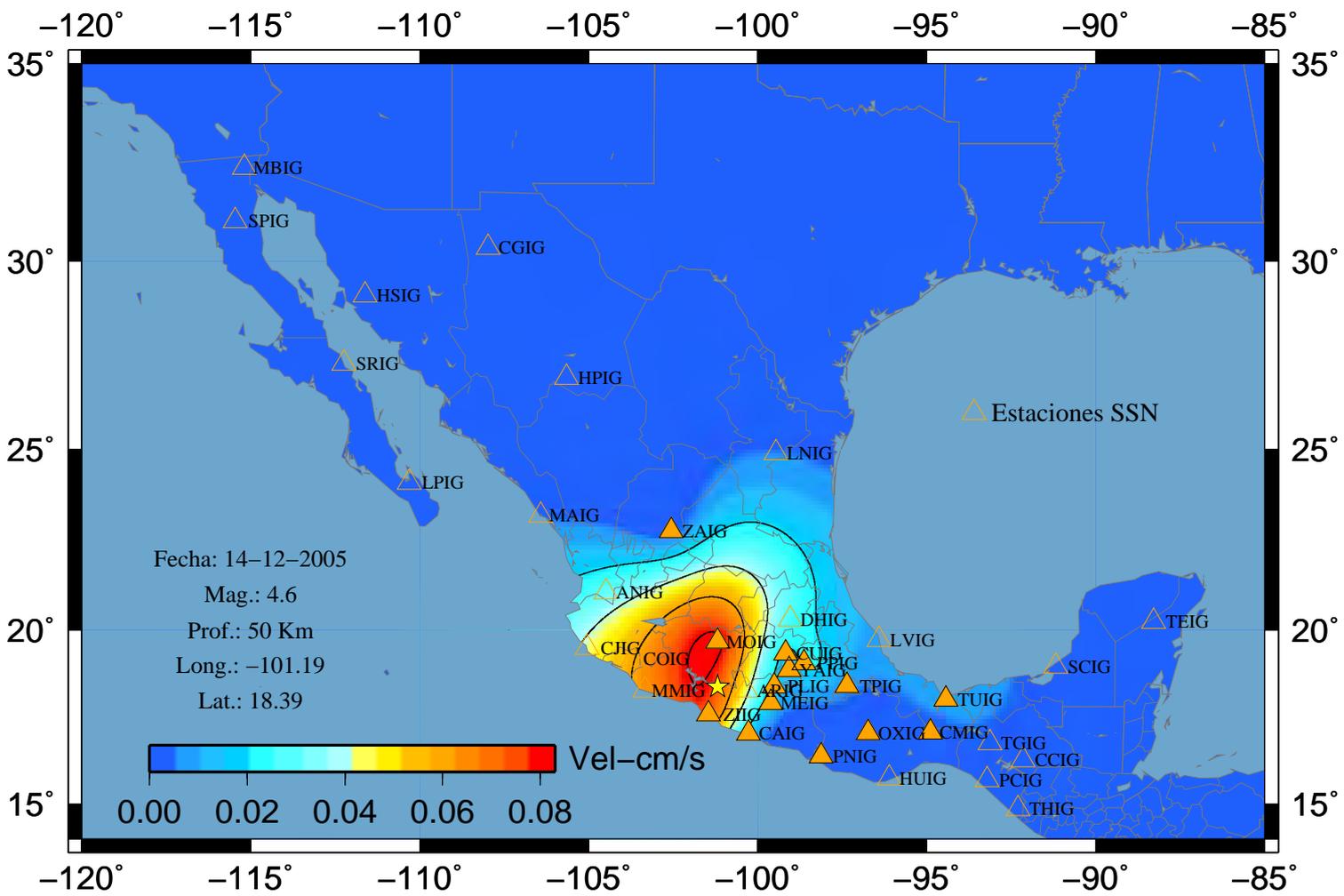
### Sismo 39 A-Vertical



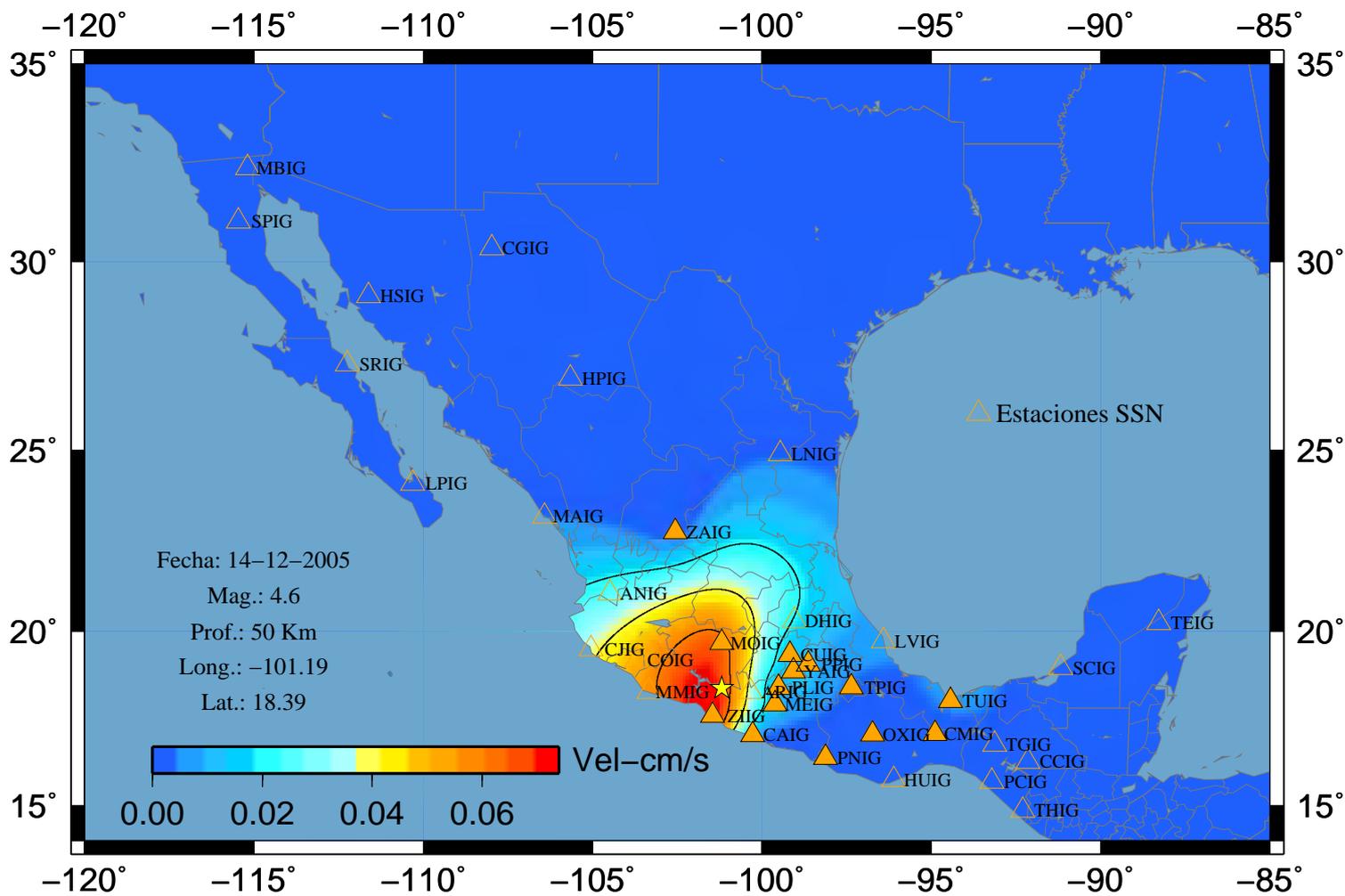
### Sismo 39 V-Este



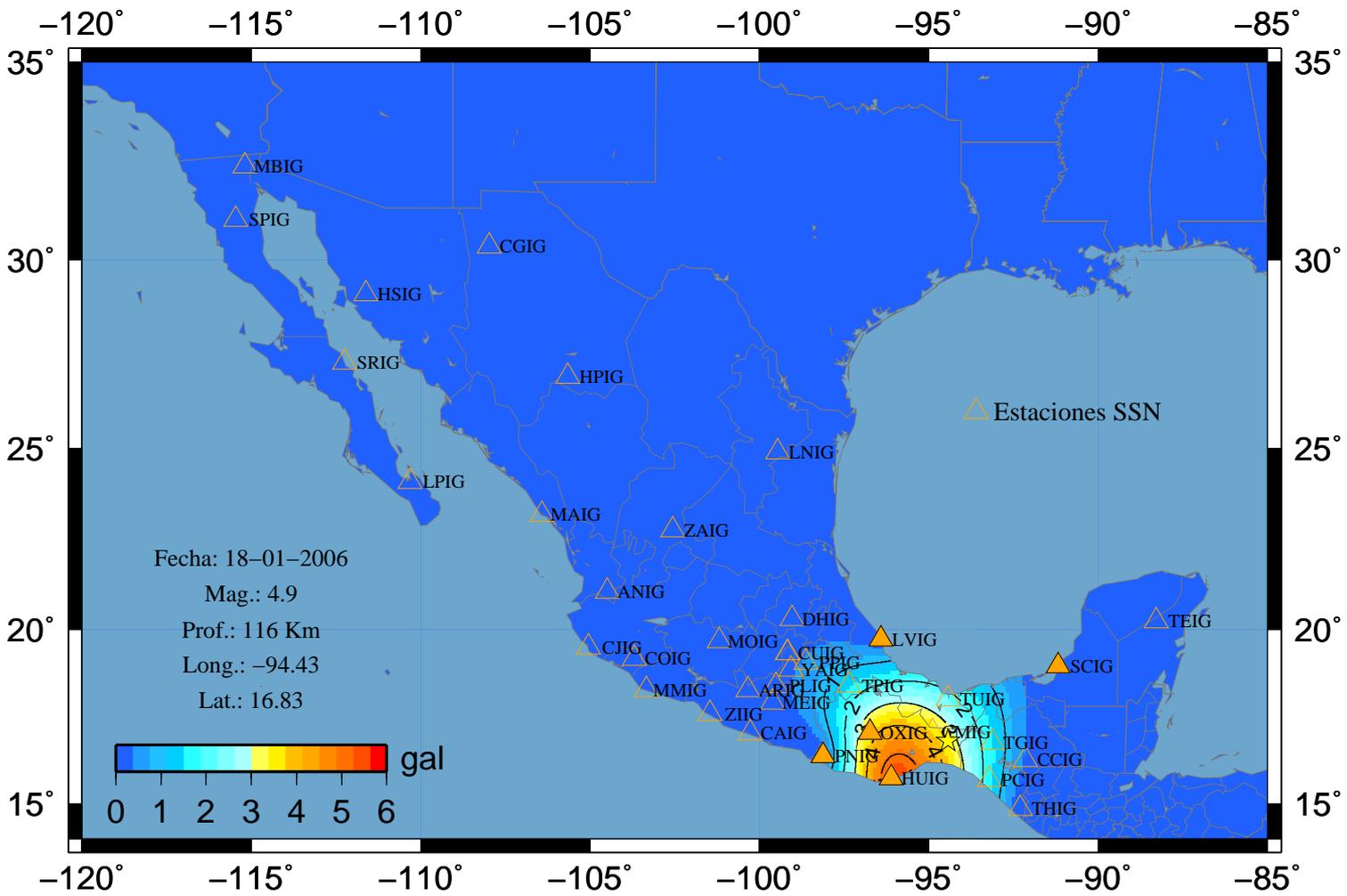
### Sismo 39 V-Norte



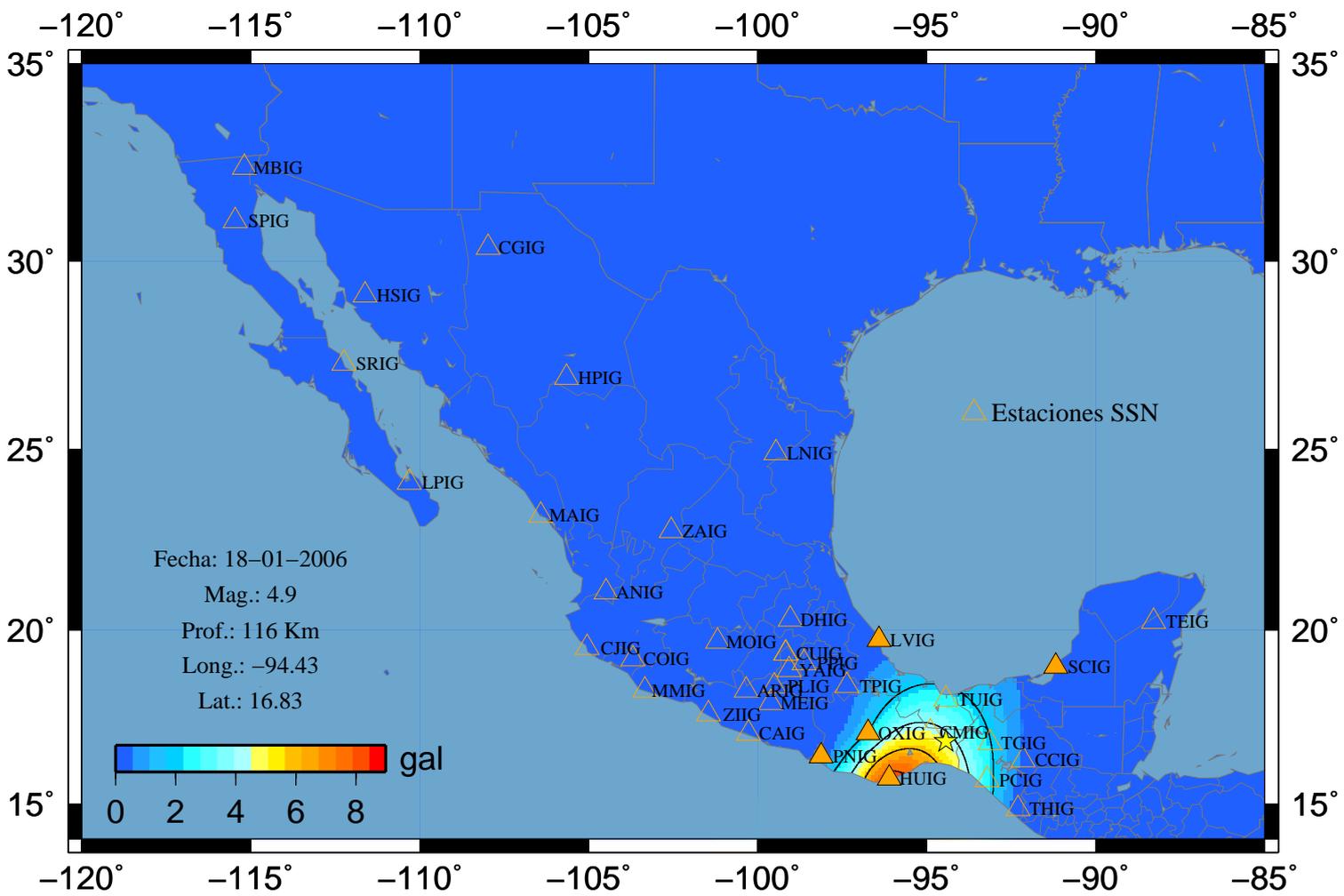
### Sismo 39 V-Vertical



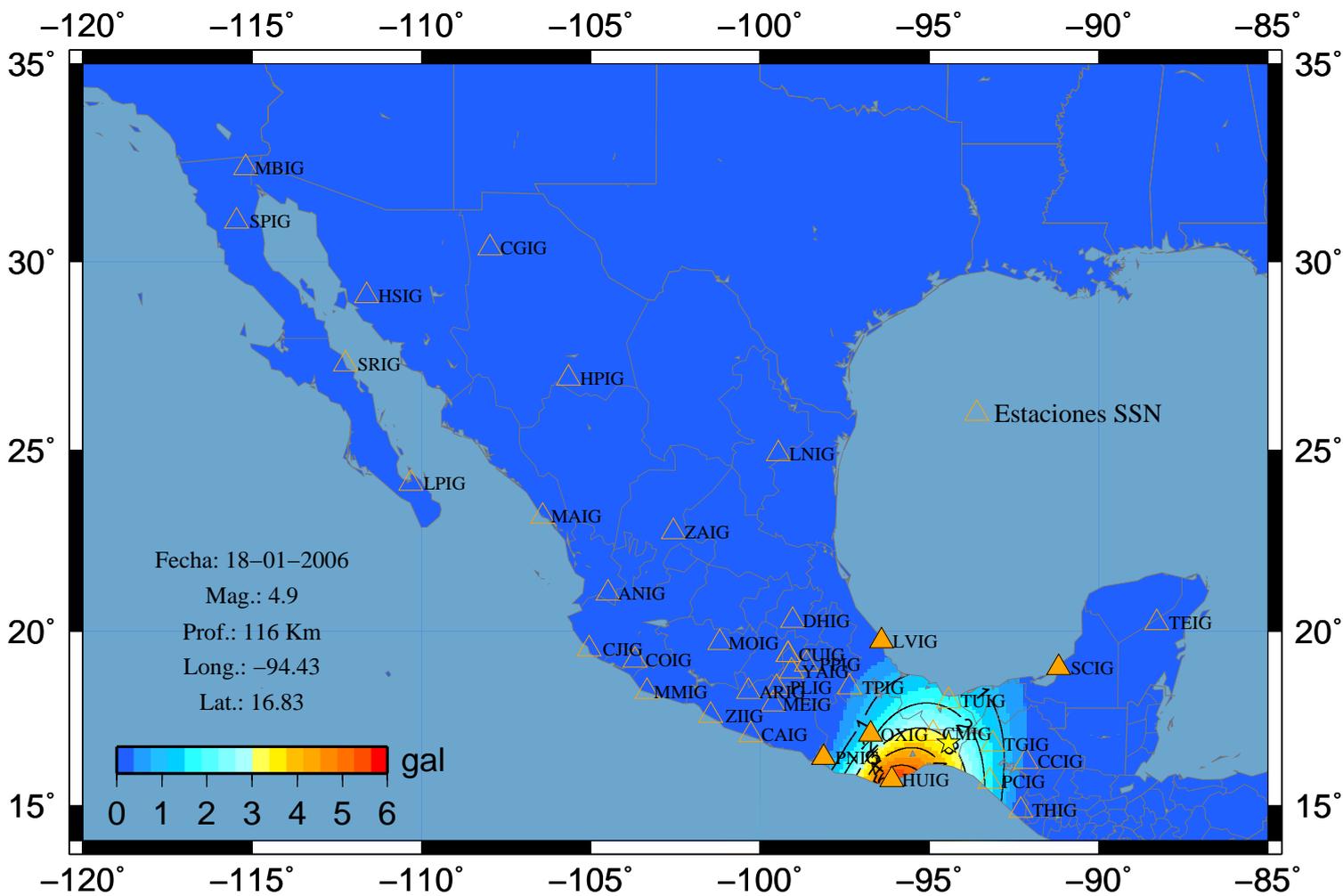
# Sismo 42 A-Este



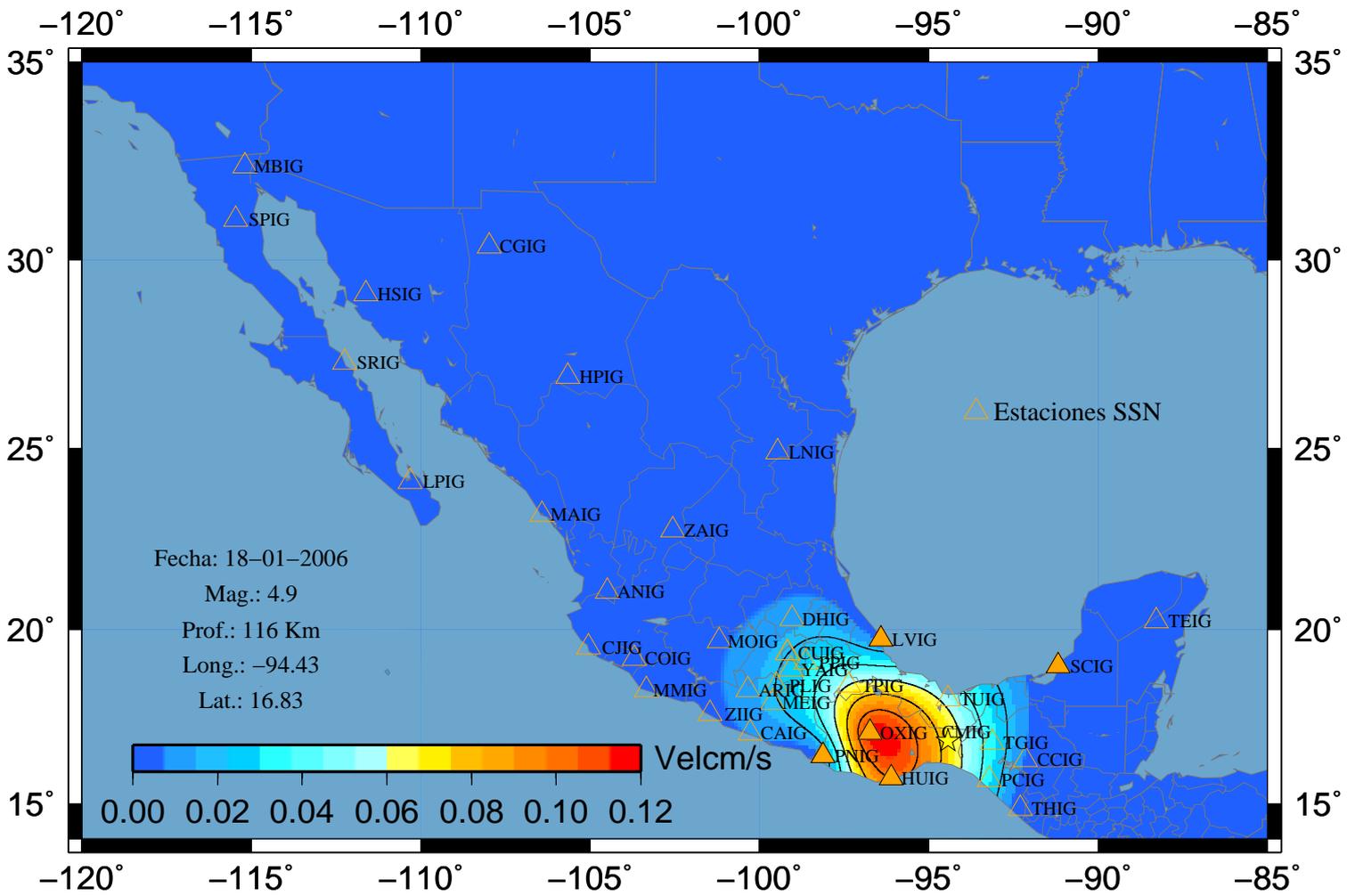
### Sismo 42 A-Norte



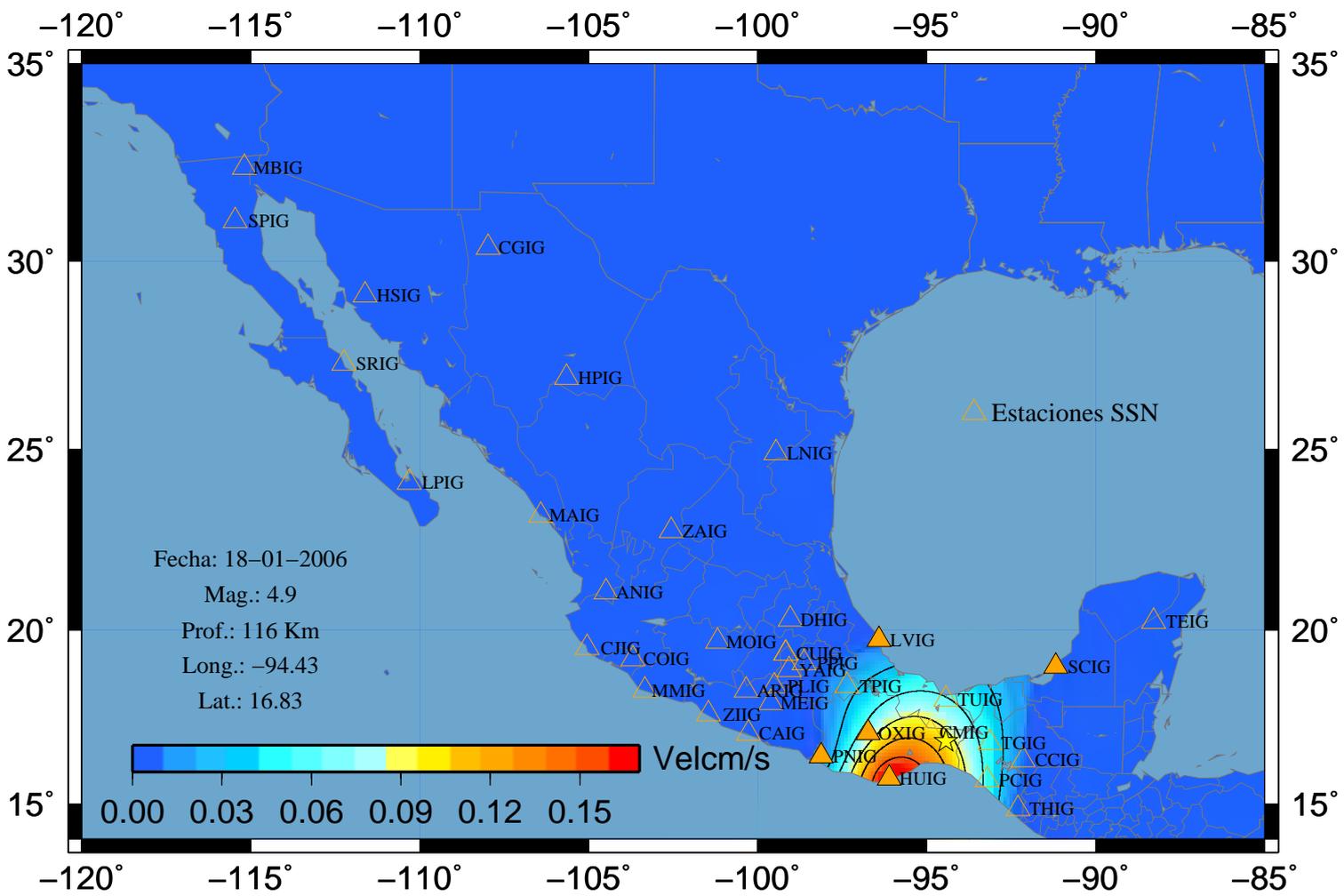
### Sismo 42 A-Vertical



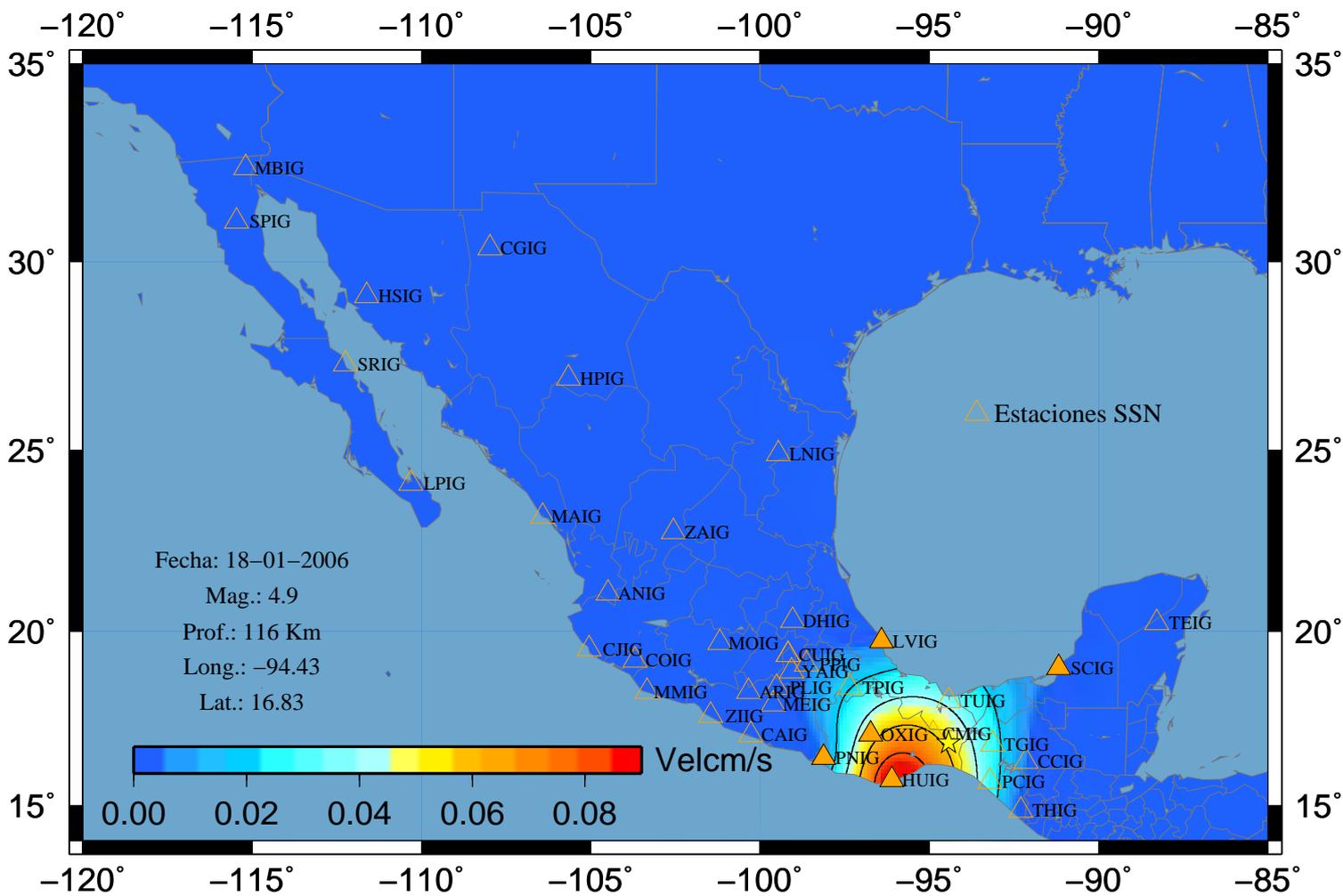
# Sismo 42 V-Este



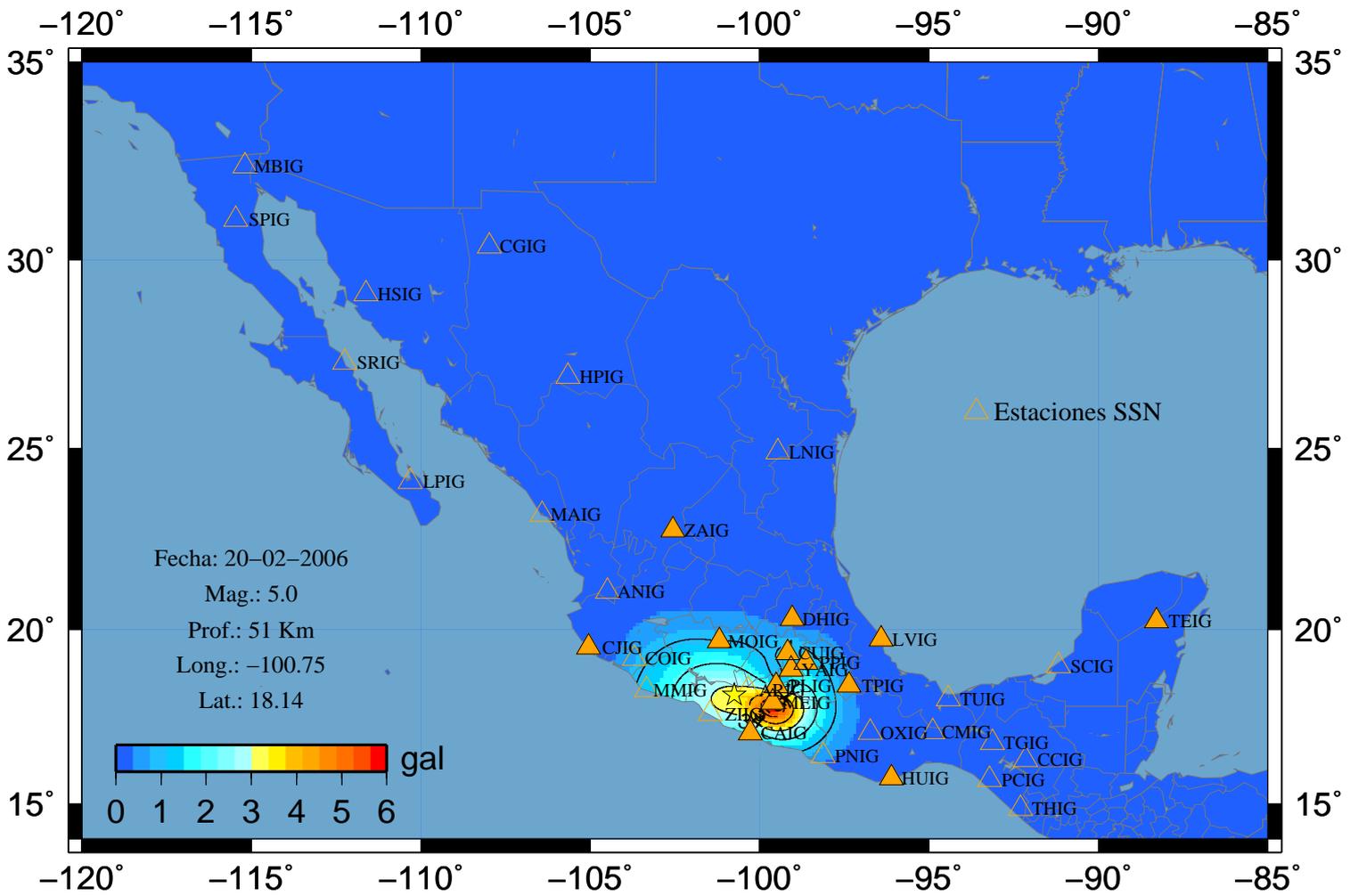
### Sismo 42 V-Norte



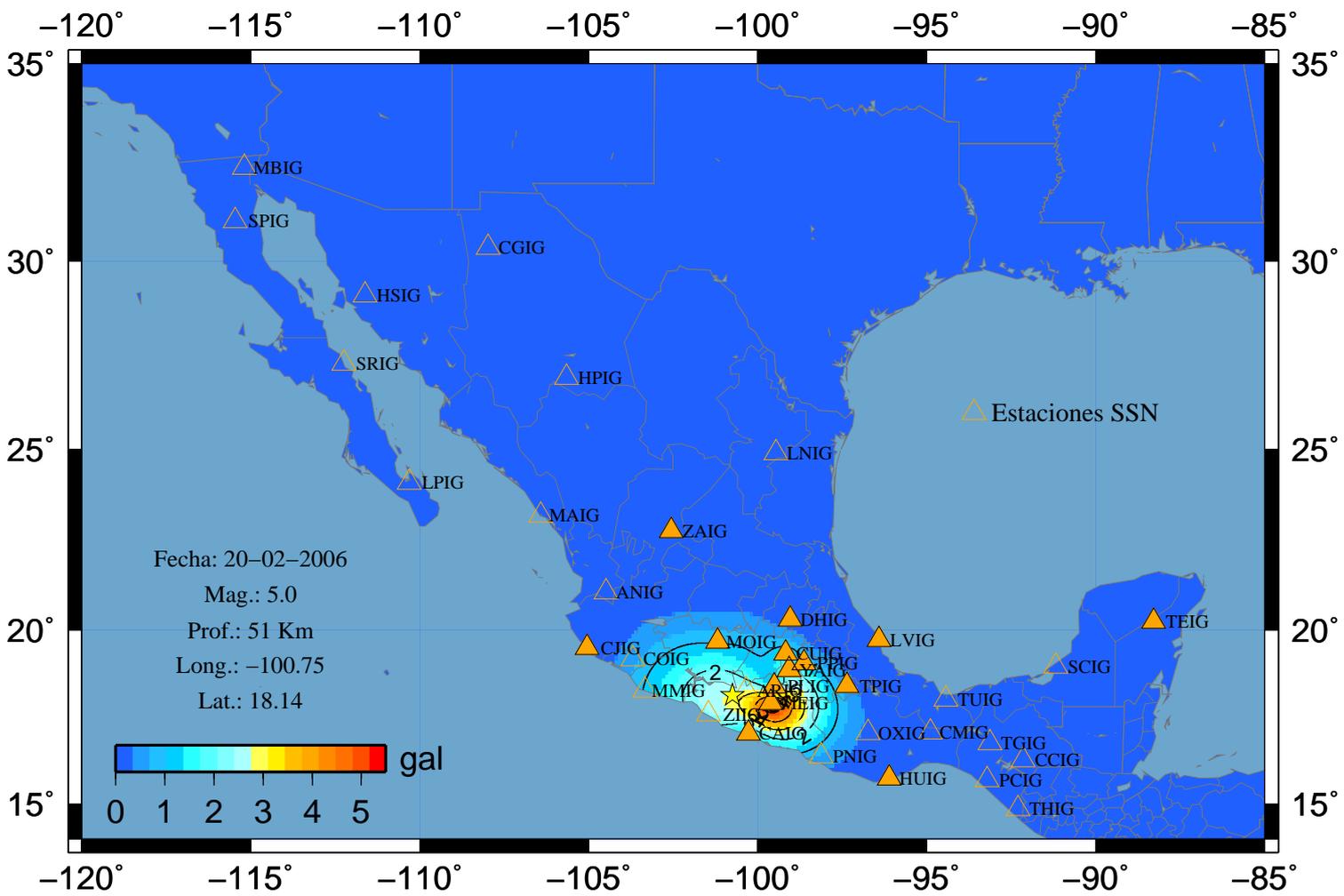
### Sismo 42 V-Vertical



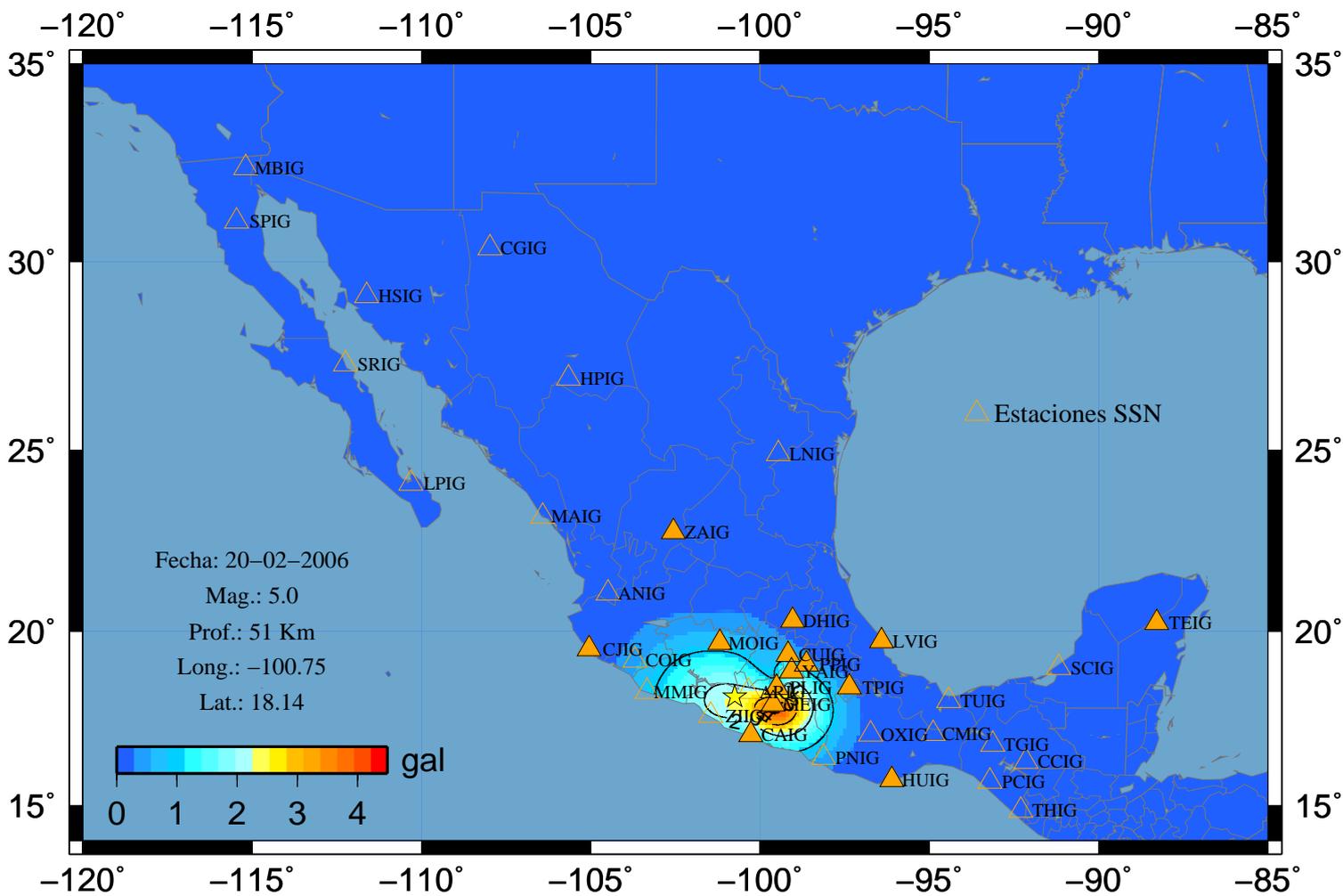
### Sismo 45 A-Este



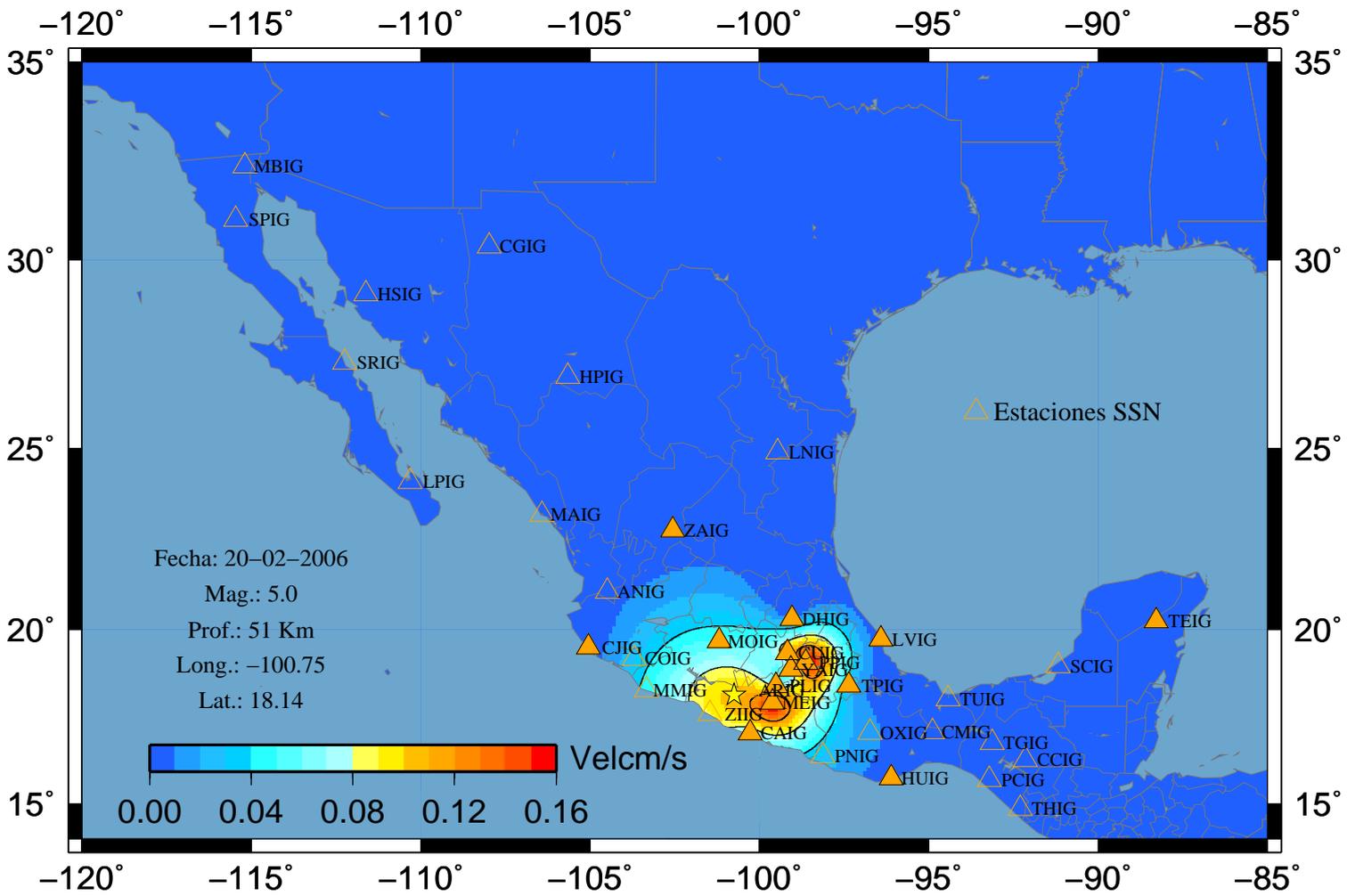
### Sismo 45 A-Norte



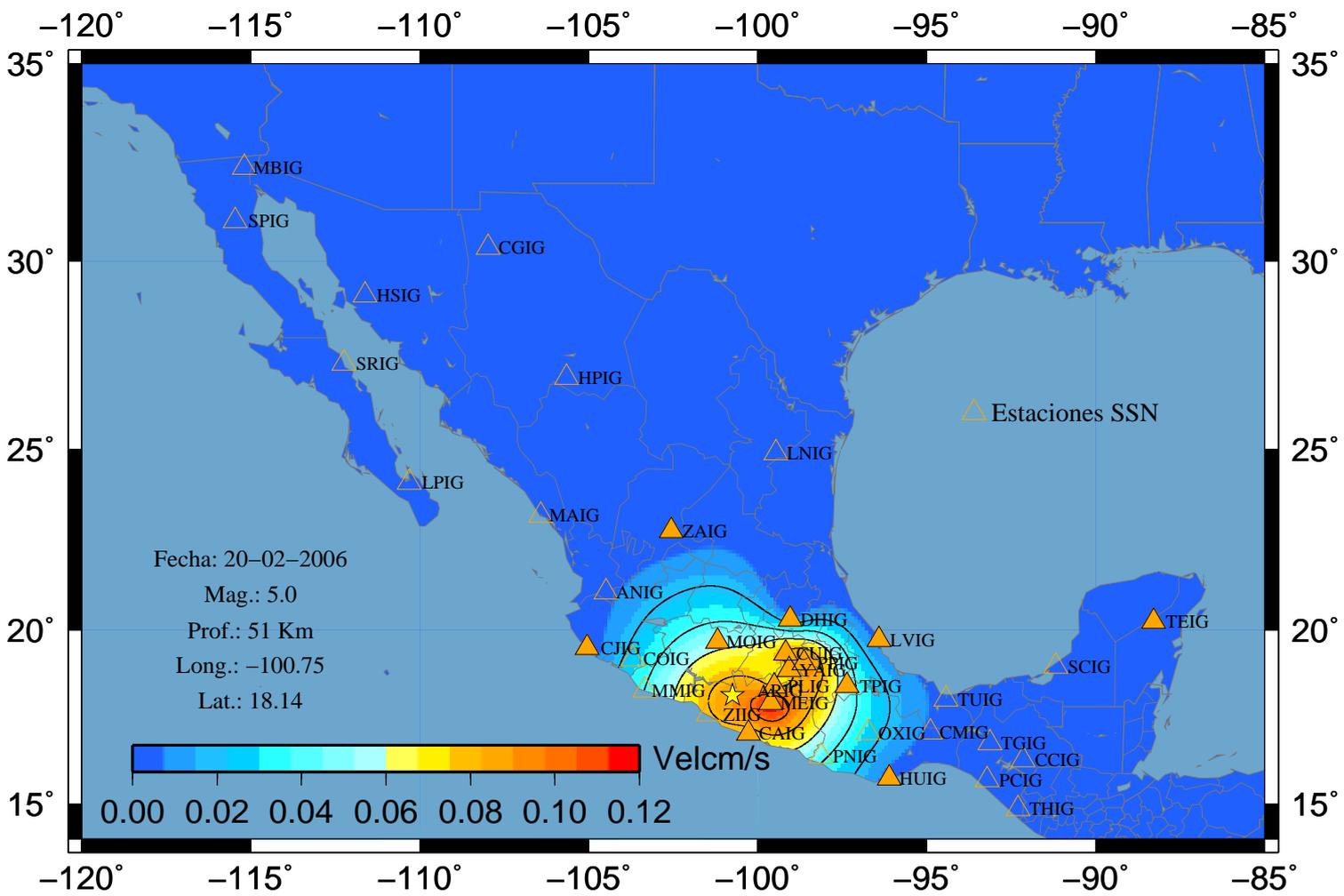
### Sismo 45 A-Vertical



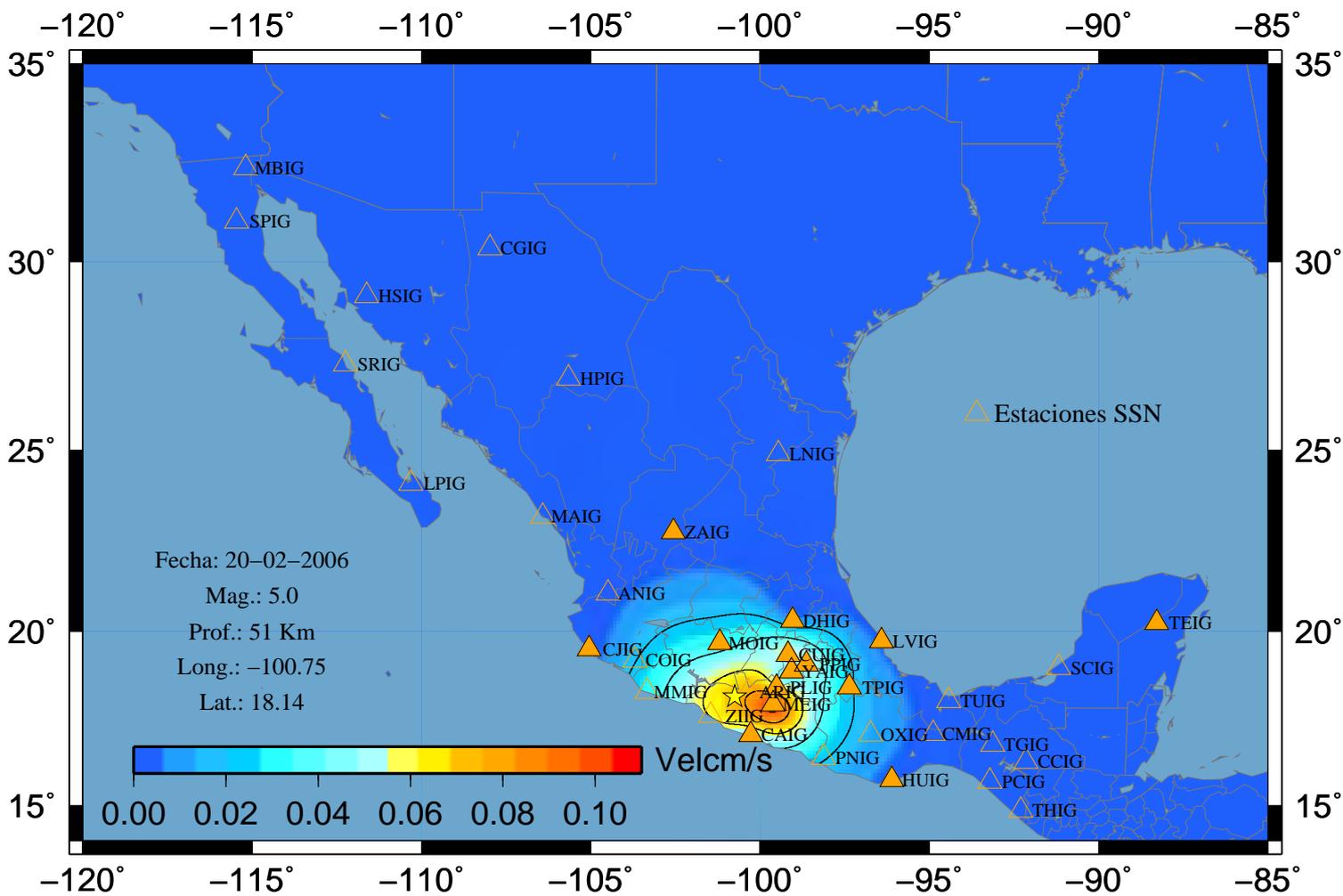
# Sismo 45 V-Este



### Sismo 45 V-Norte

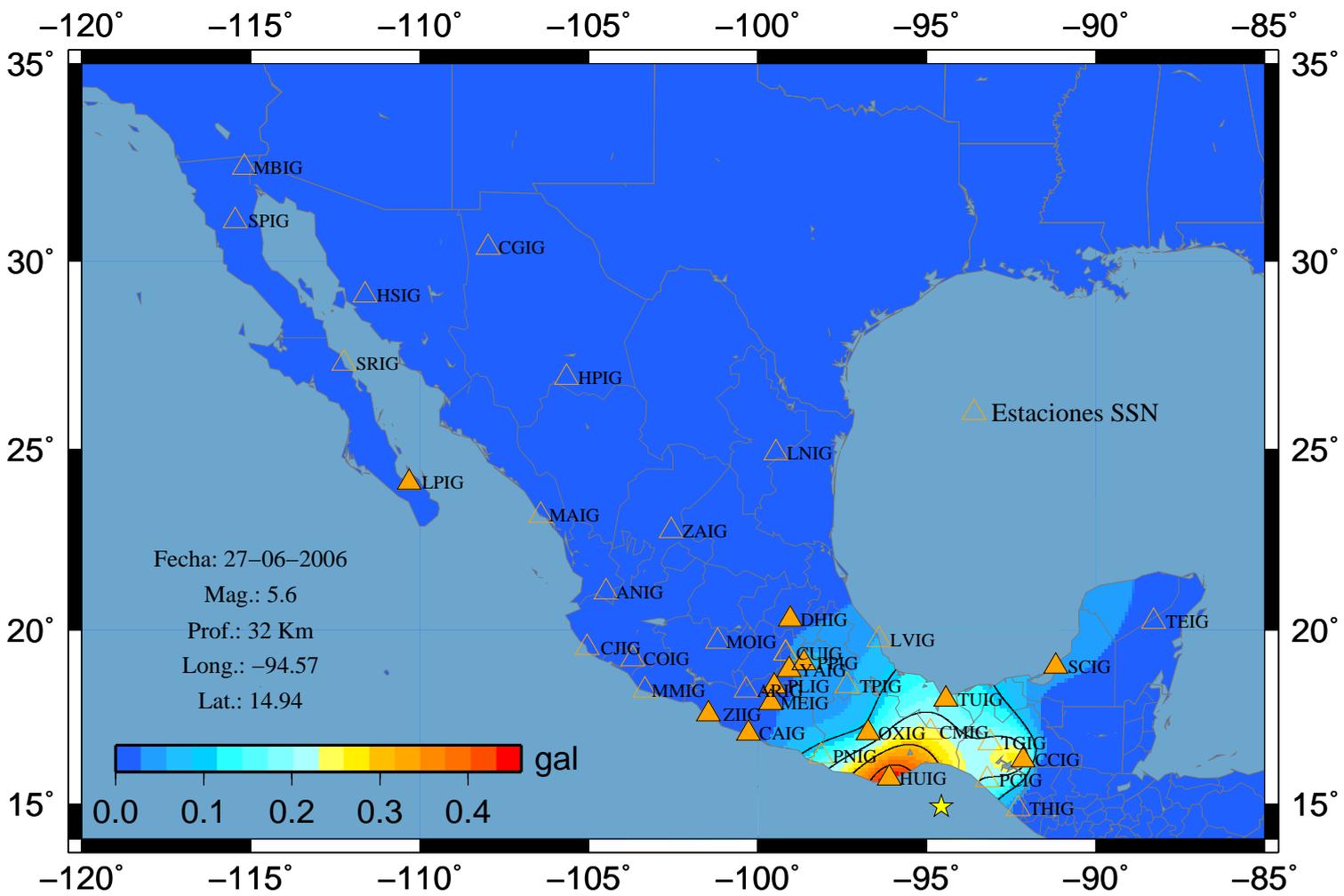


### Sismo 45 V-Vertical

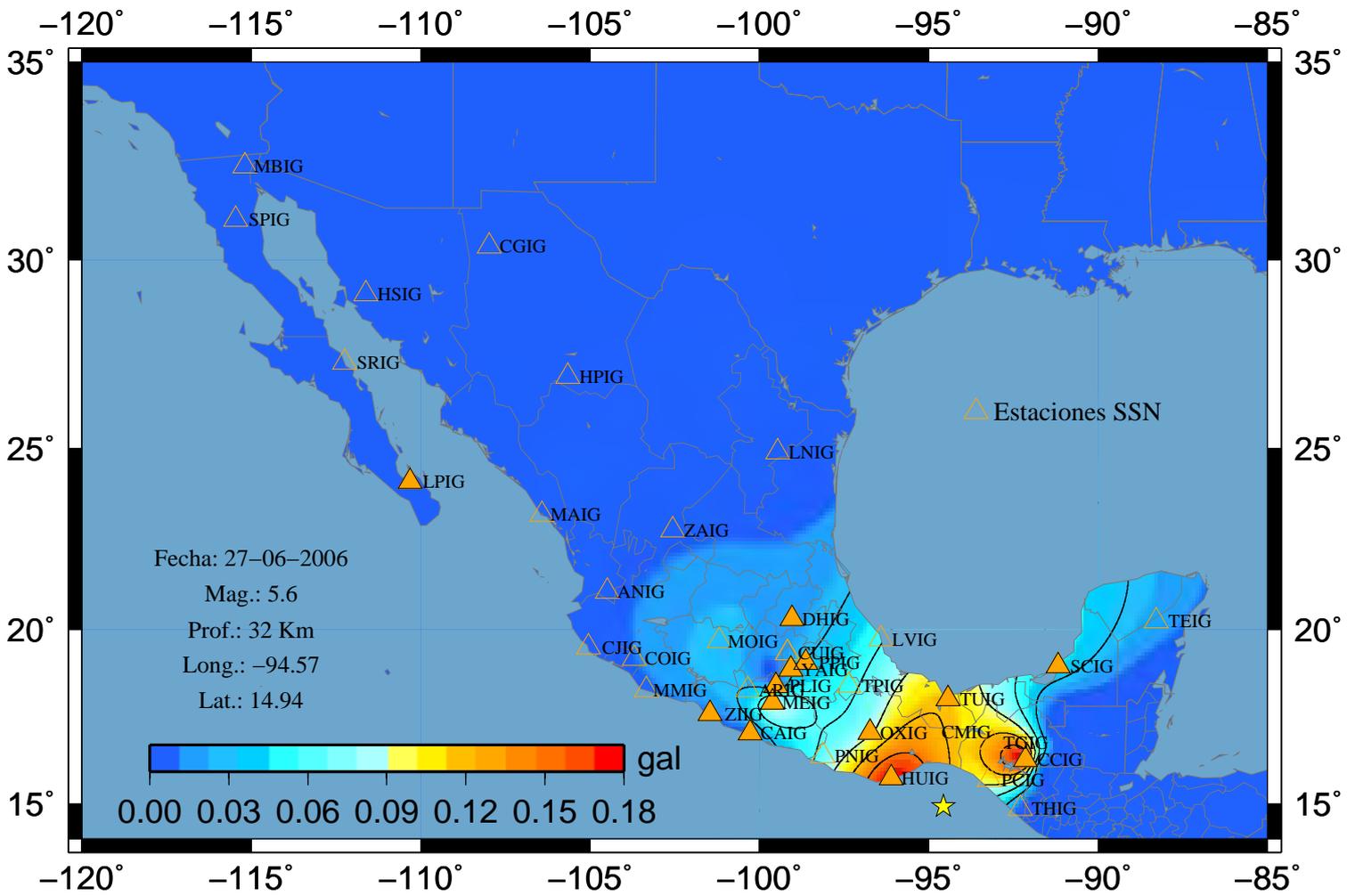




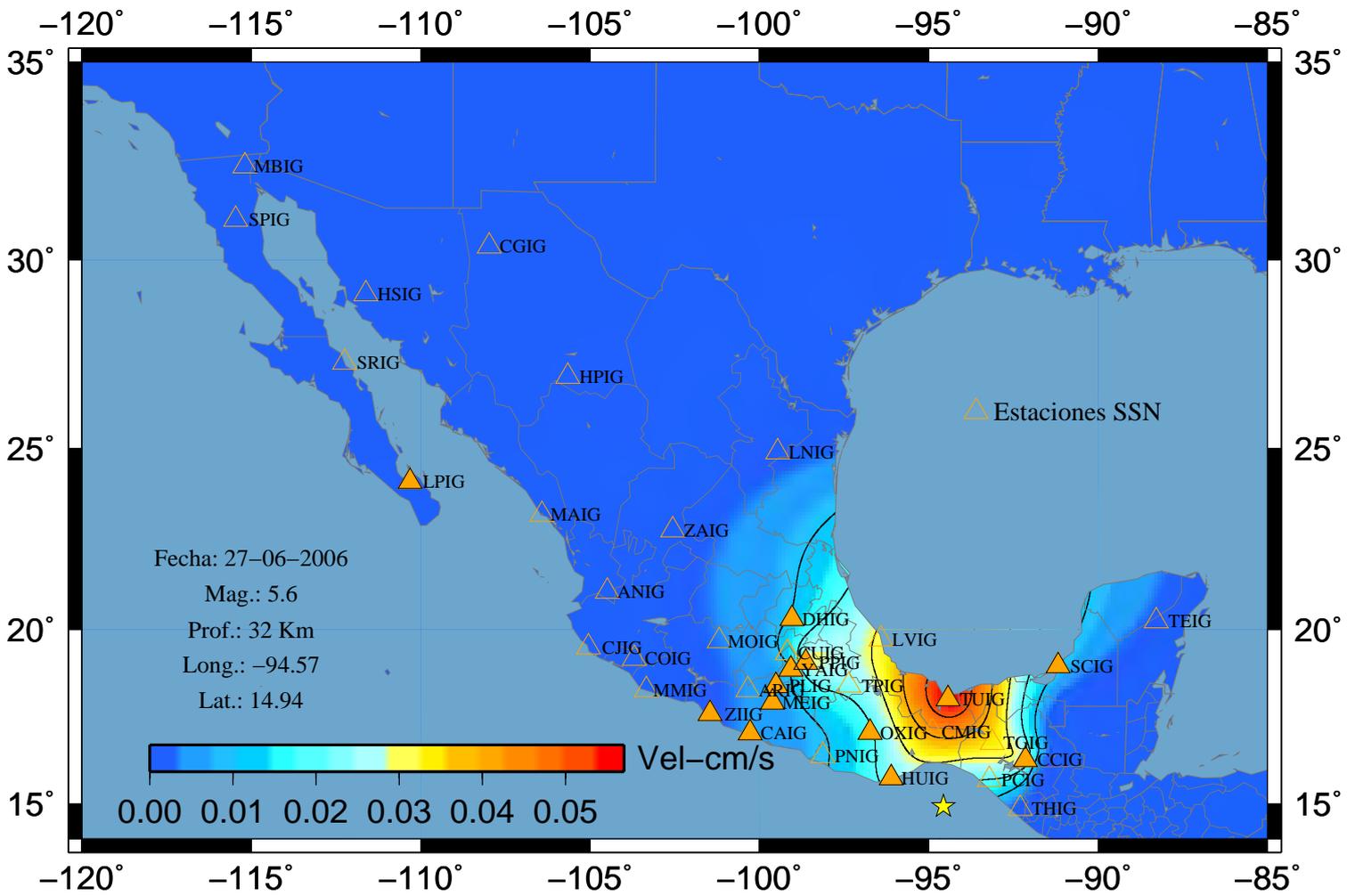
### Sismo 49 A-Norte



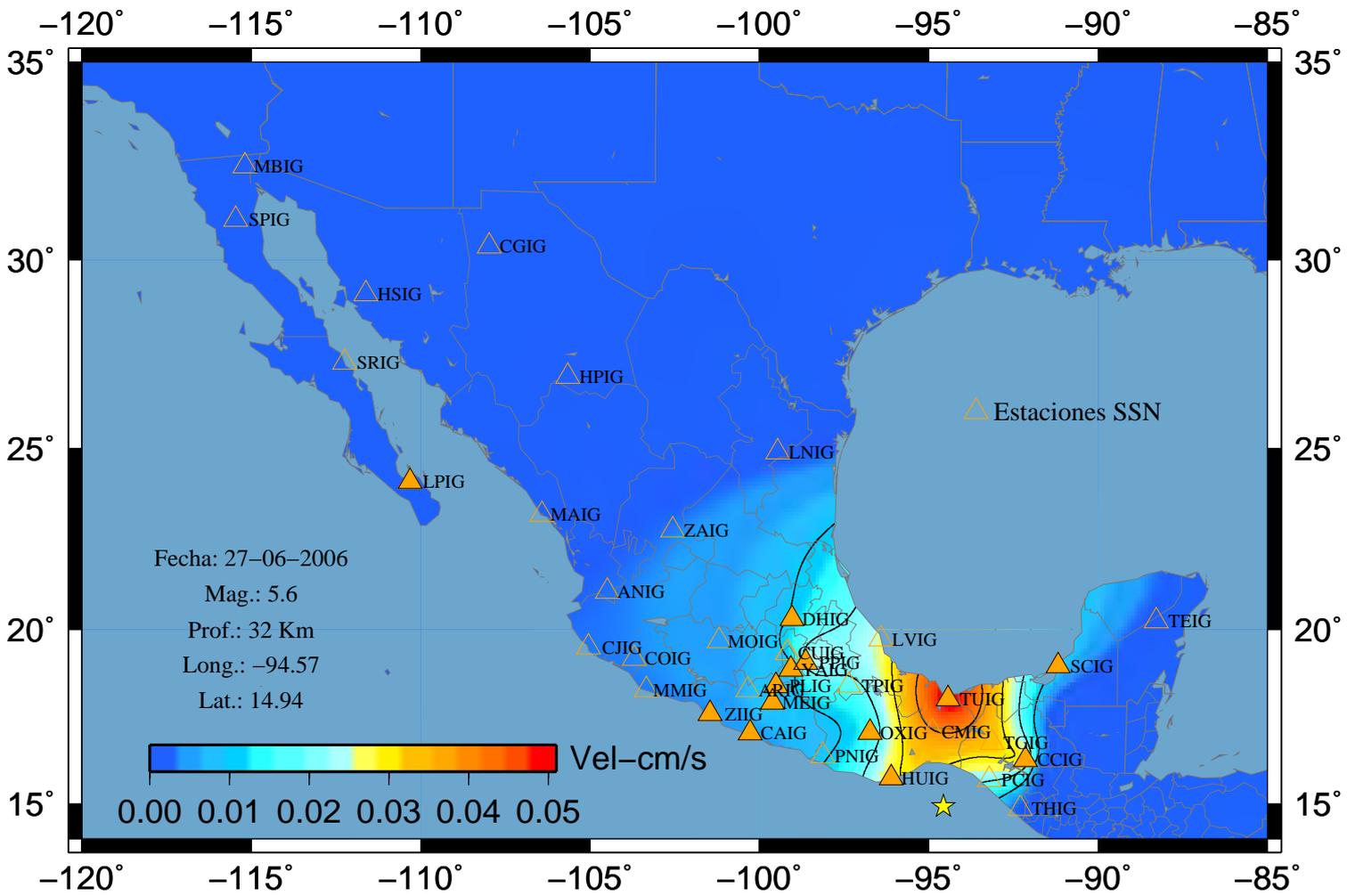
### Sismo 49 A-Vertical



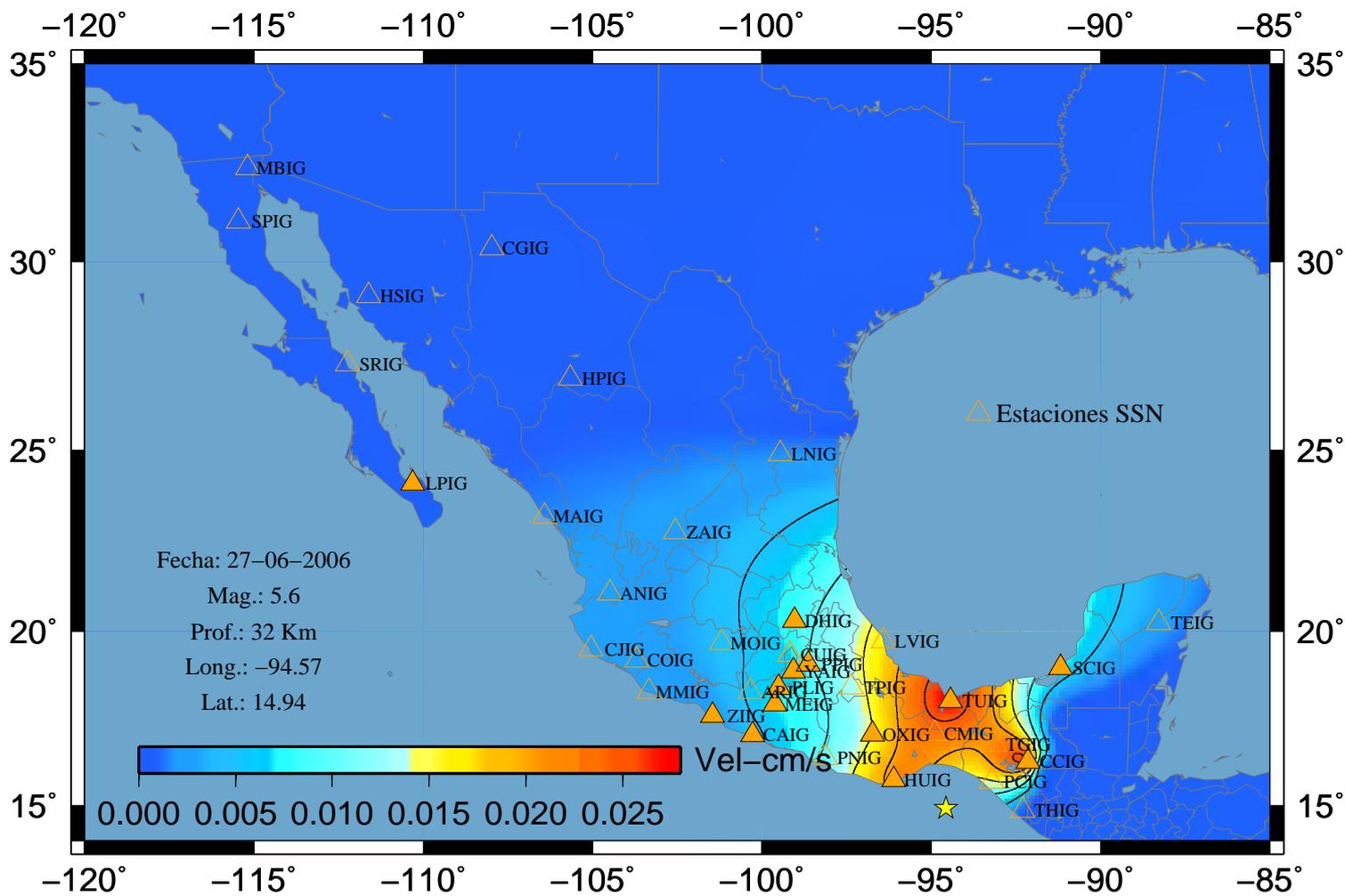
### Sismo 49 V-Este



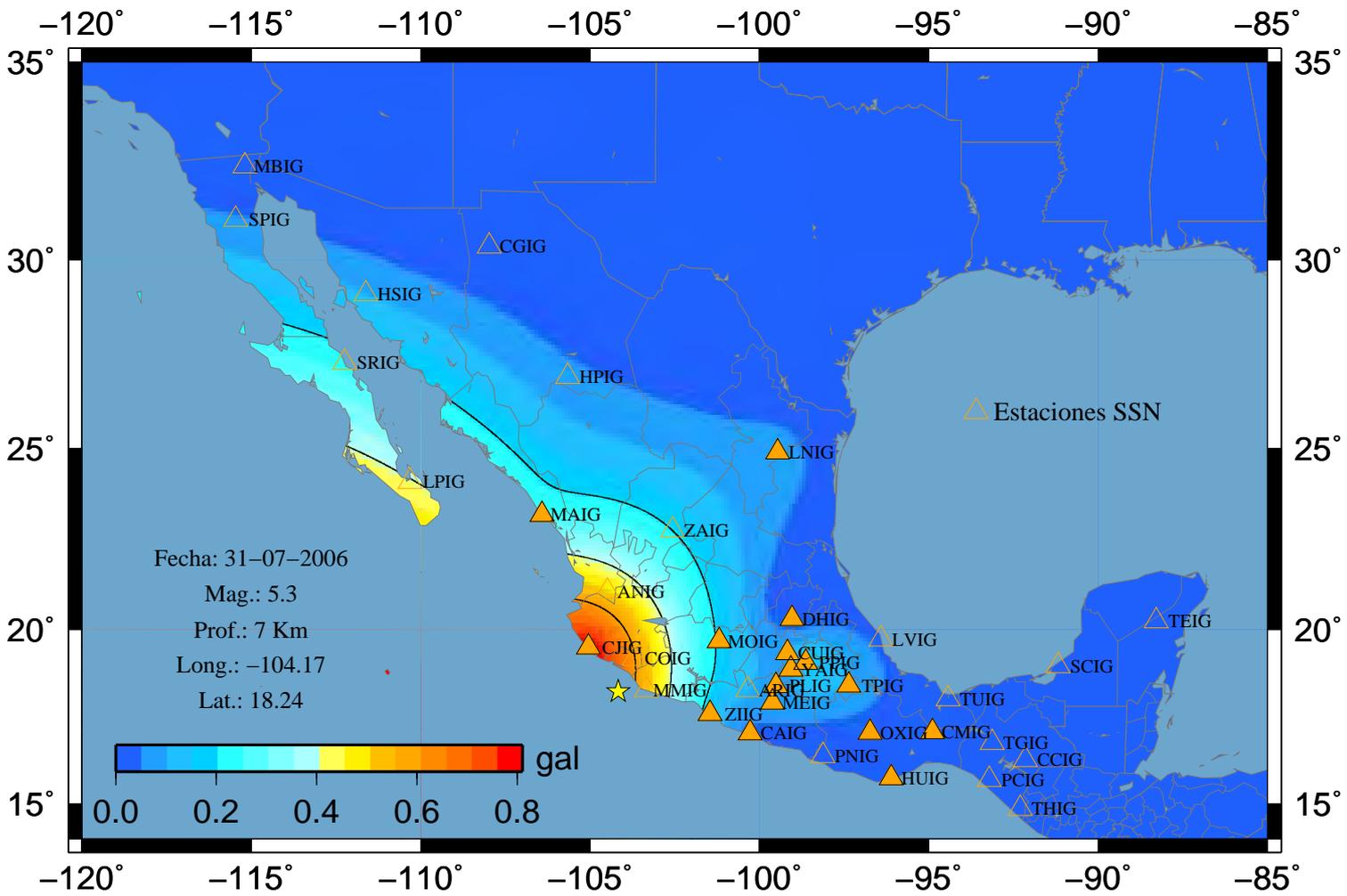
### Sismo 49 V-Norte



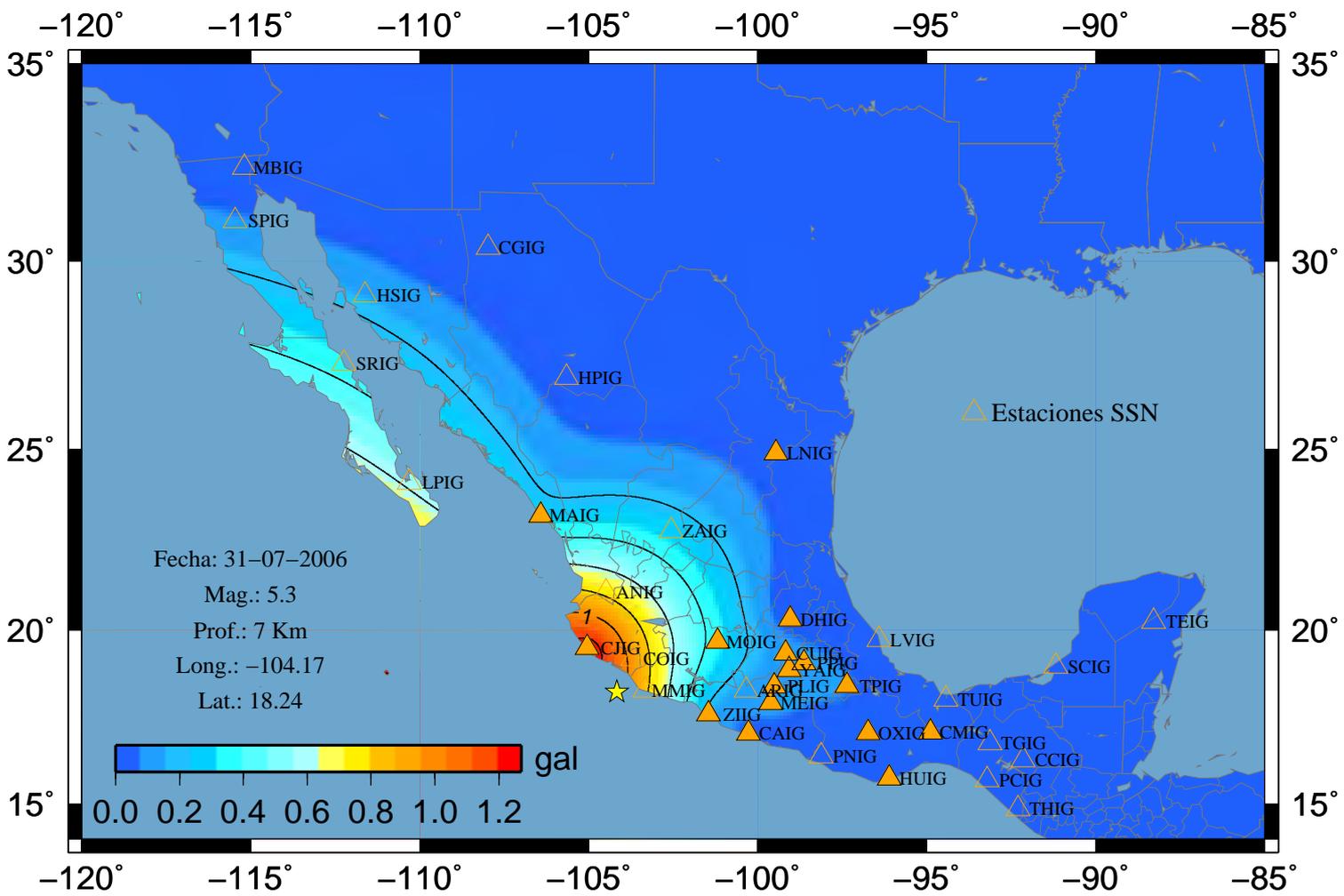
### Sismo 49 V-Vertical



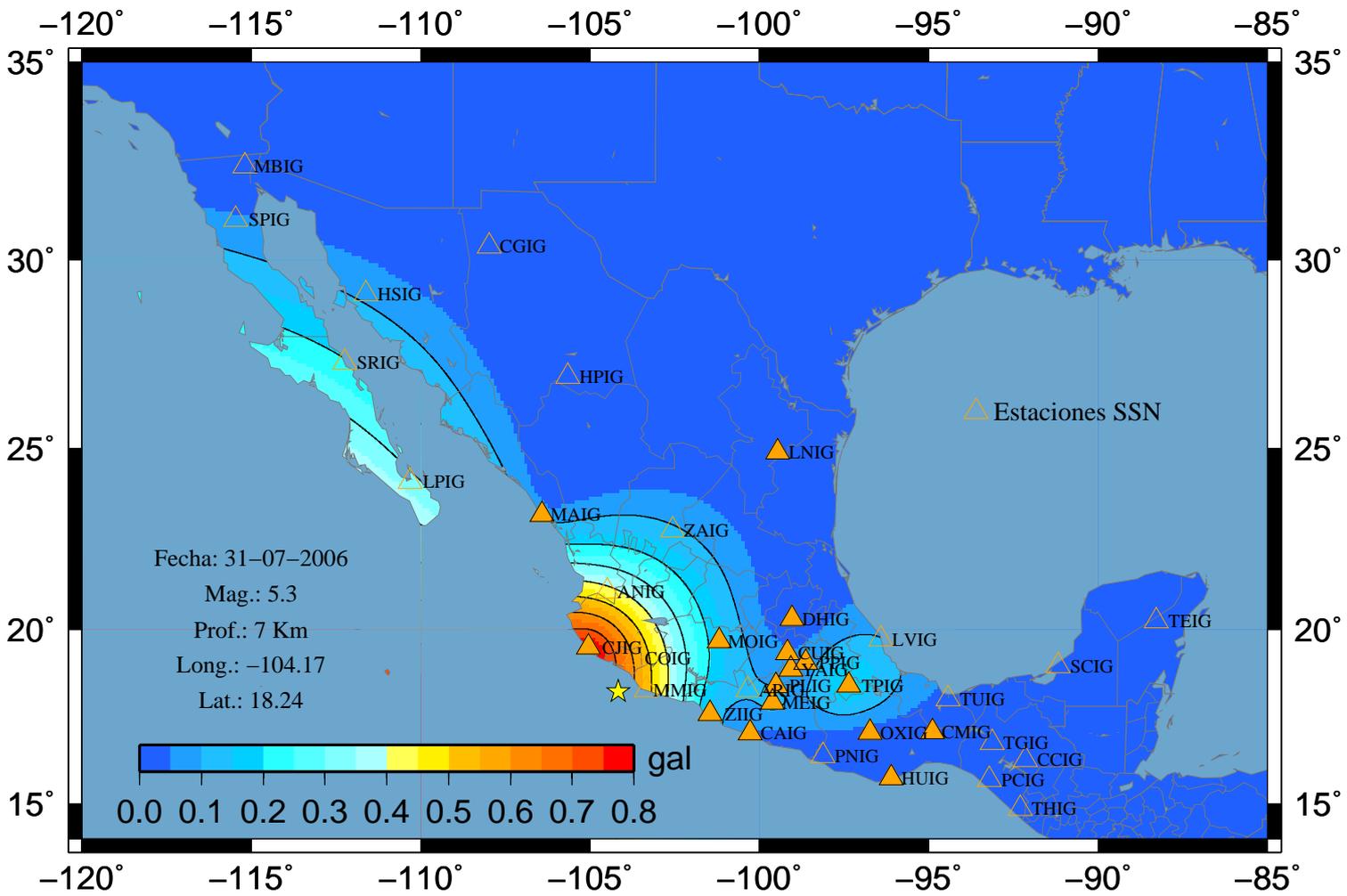
### Sismo 51 A-Este



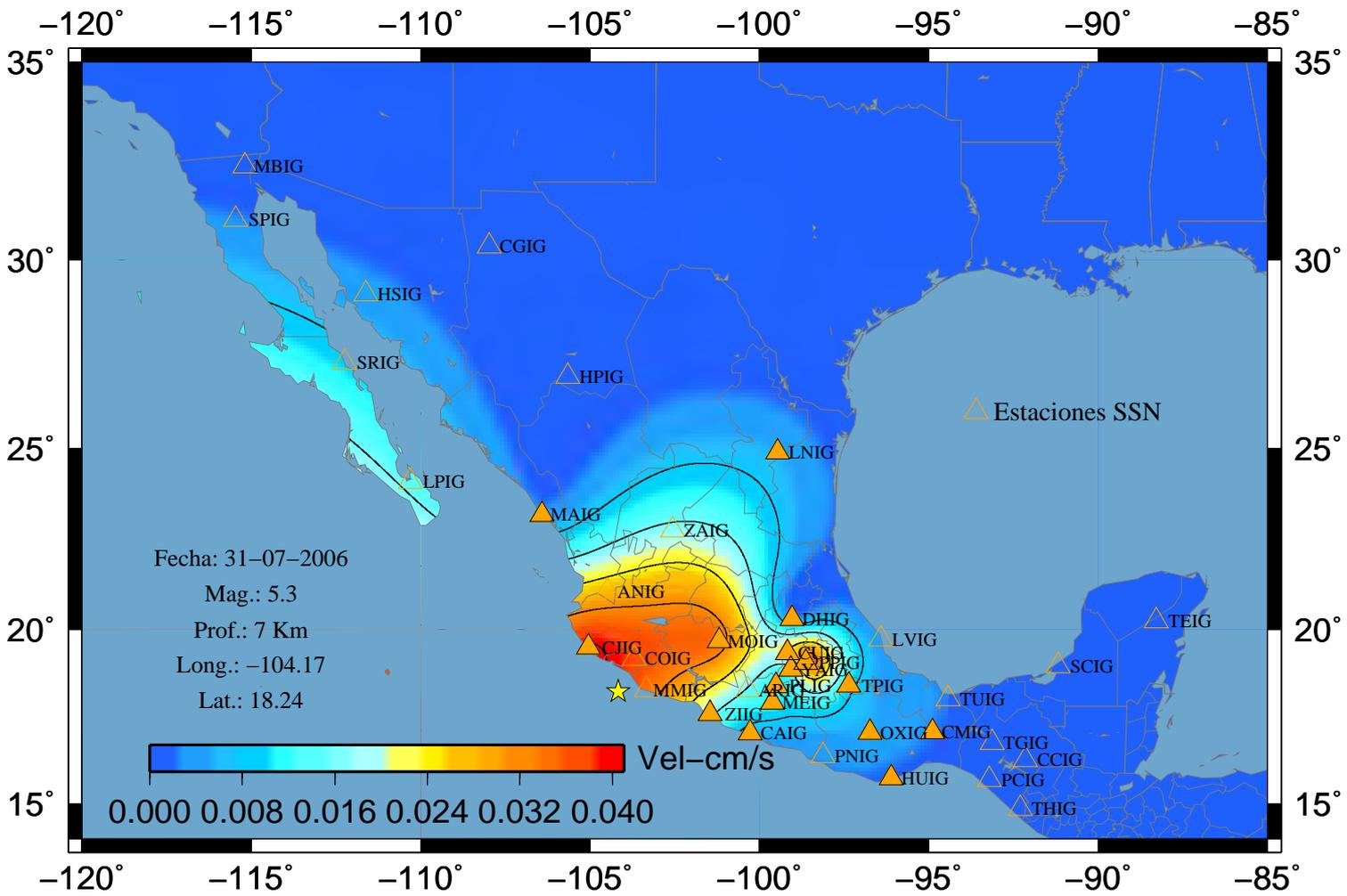
### Sismo 51 A-Norte



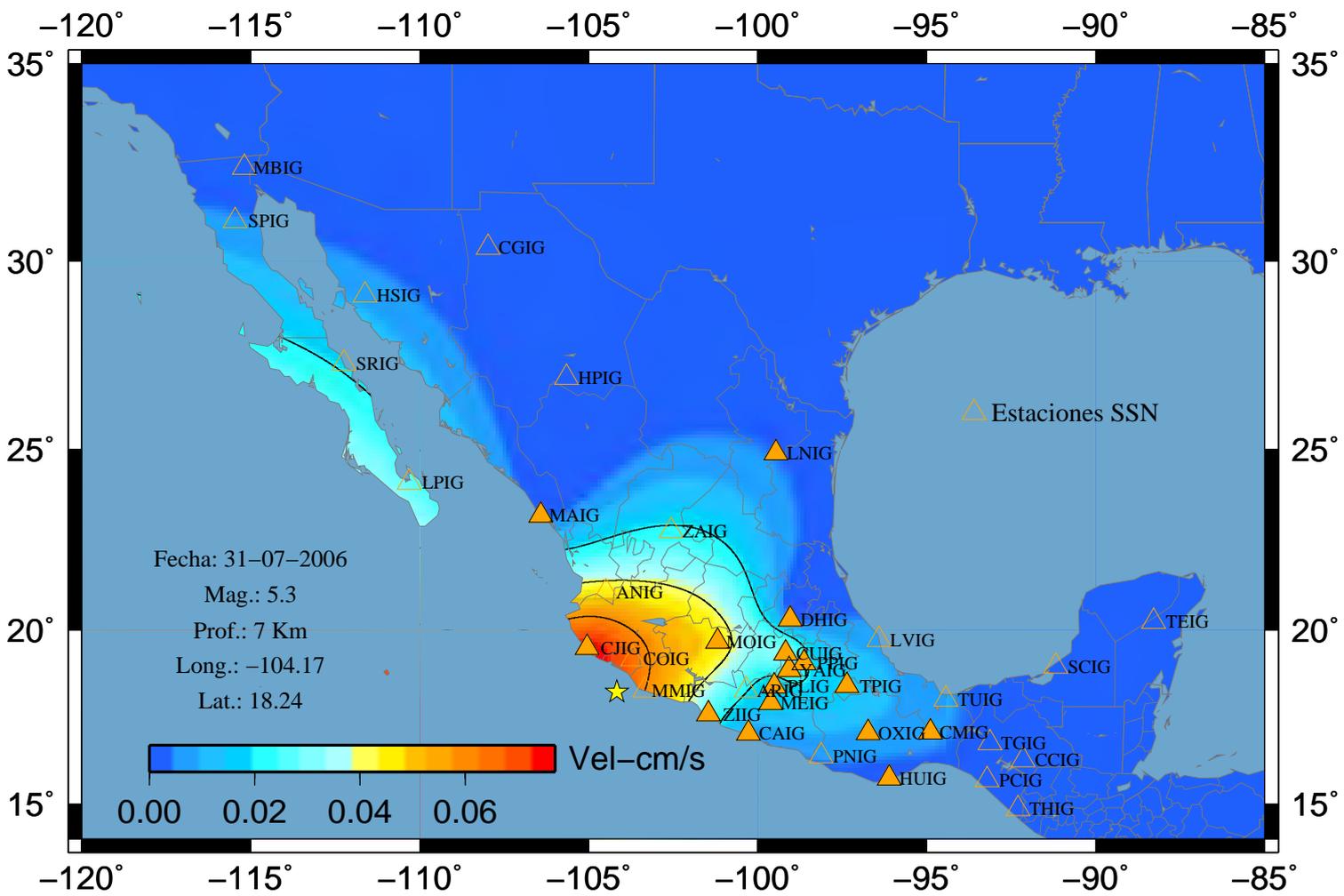
# Sismo 51 A-Vertical



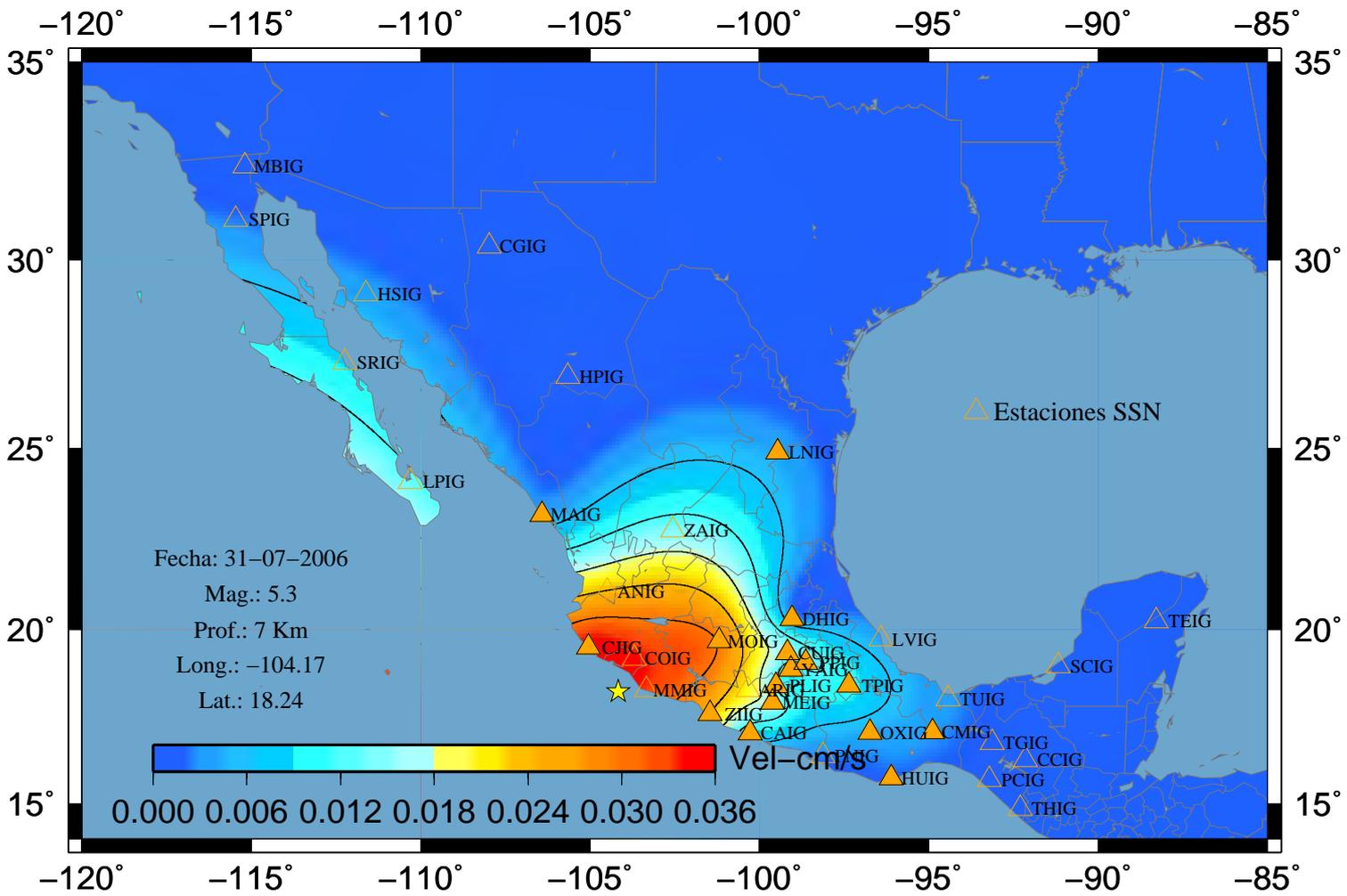
# Sismo 51 V-Este



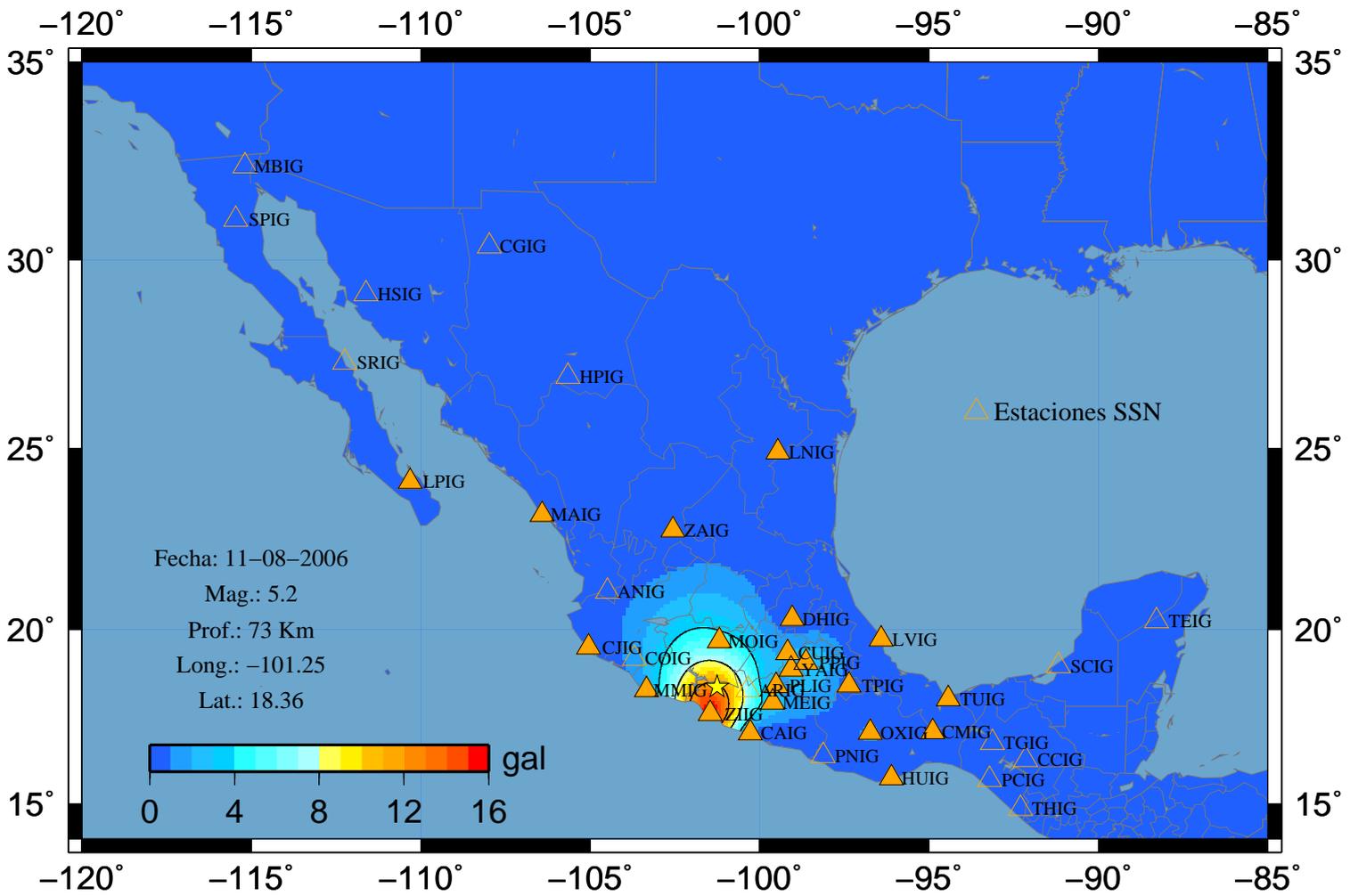
### Sismo 51 V-Norte



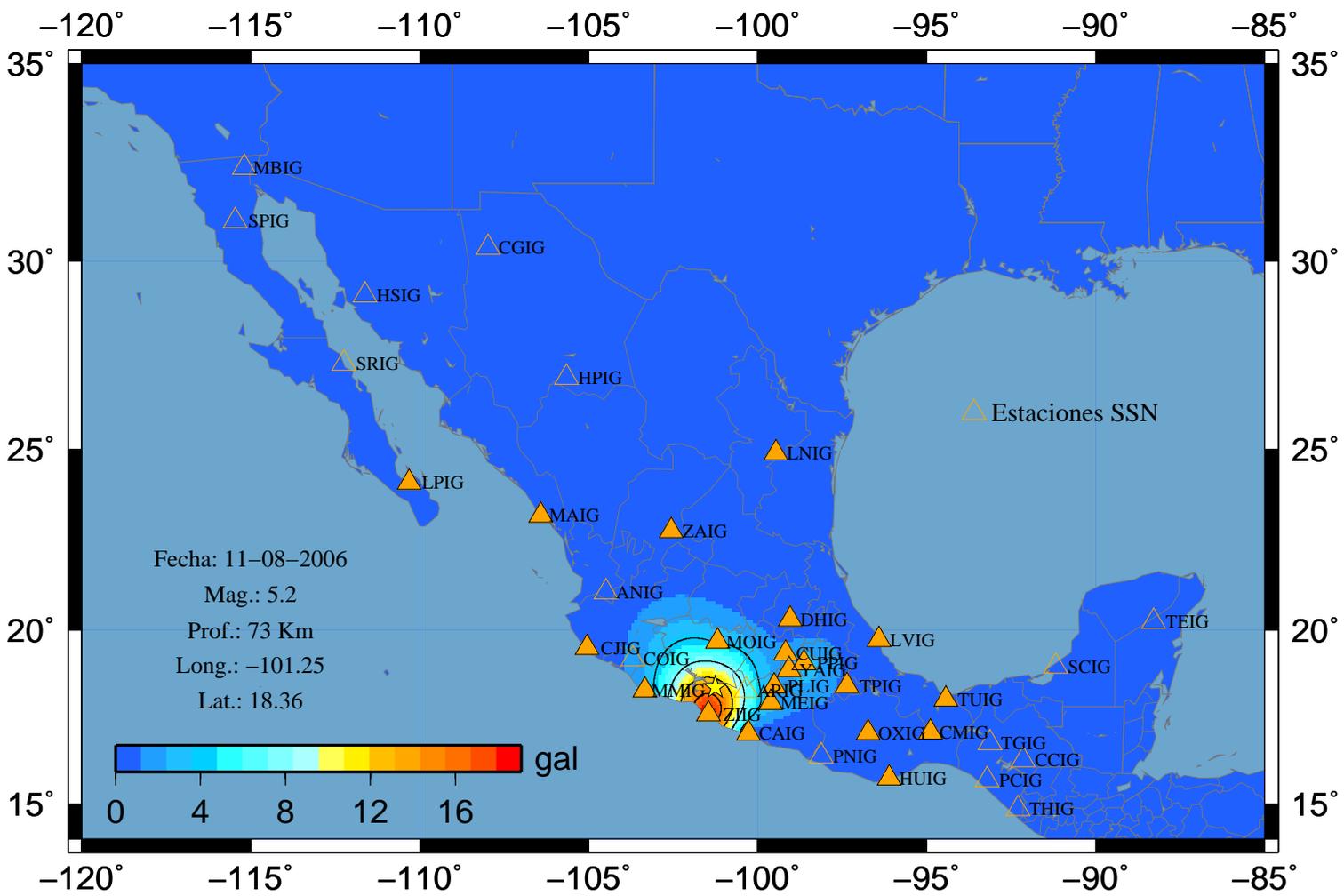
### Sismo 51 V-Vertical



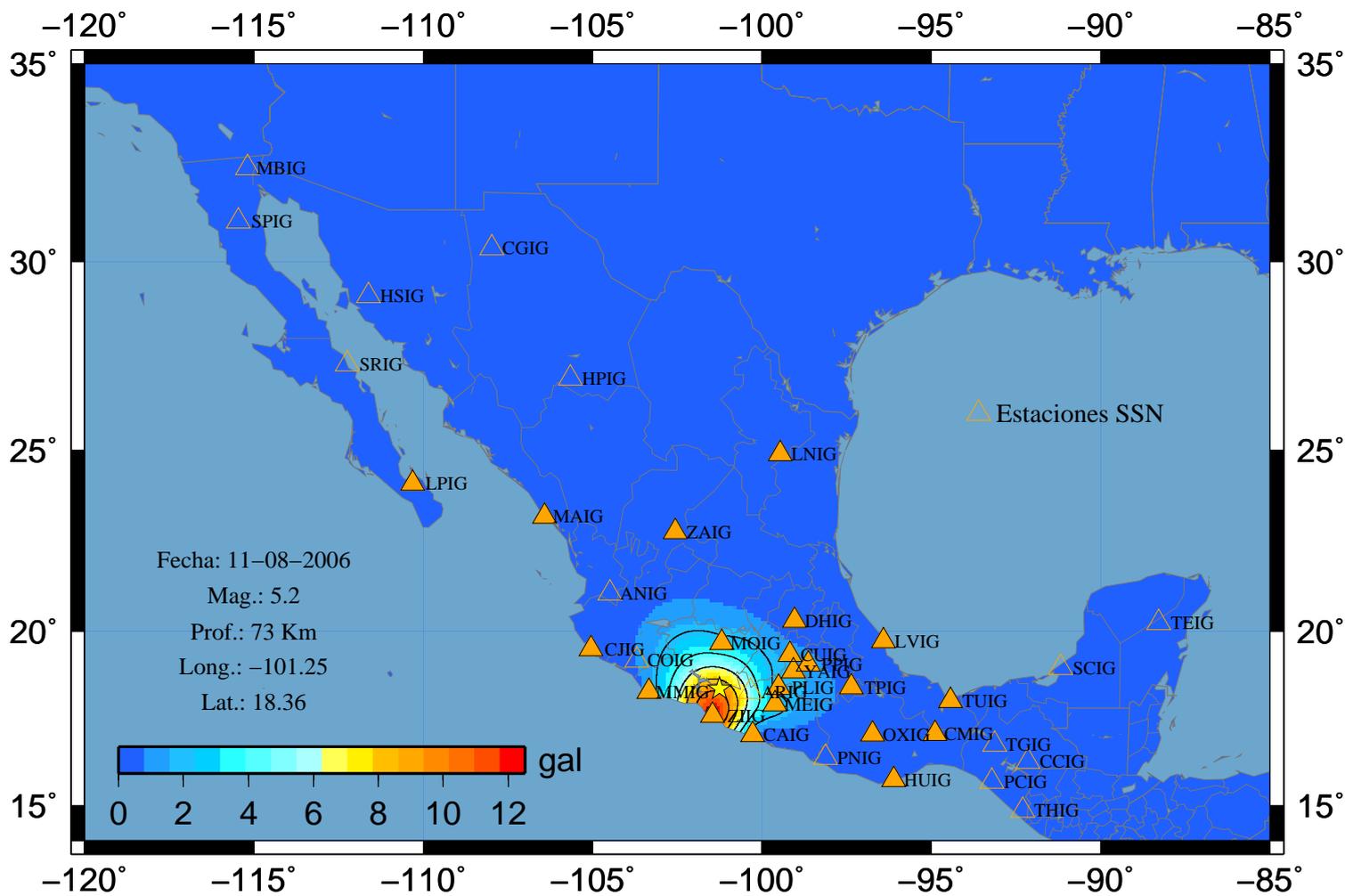
# Sismo 52 A-Este



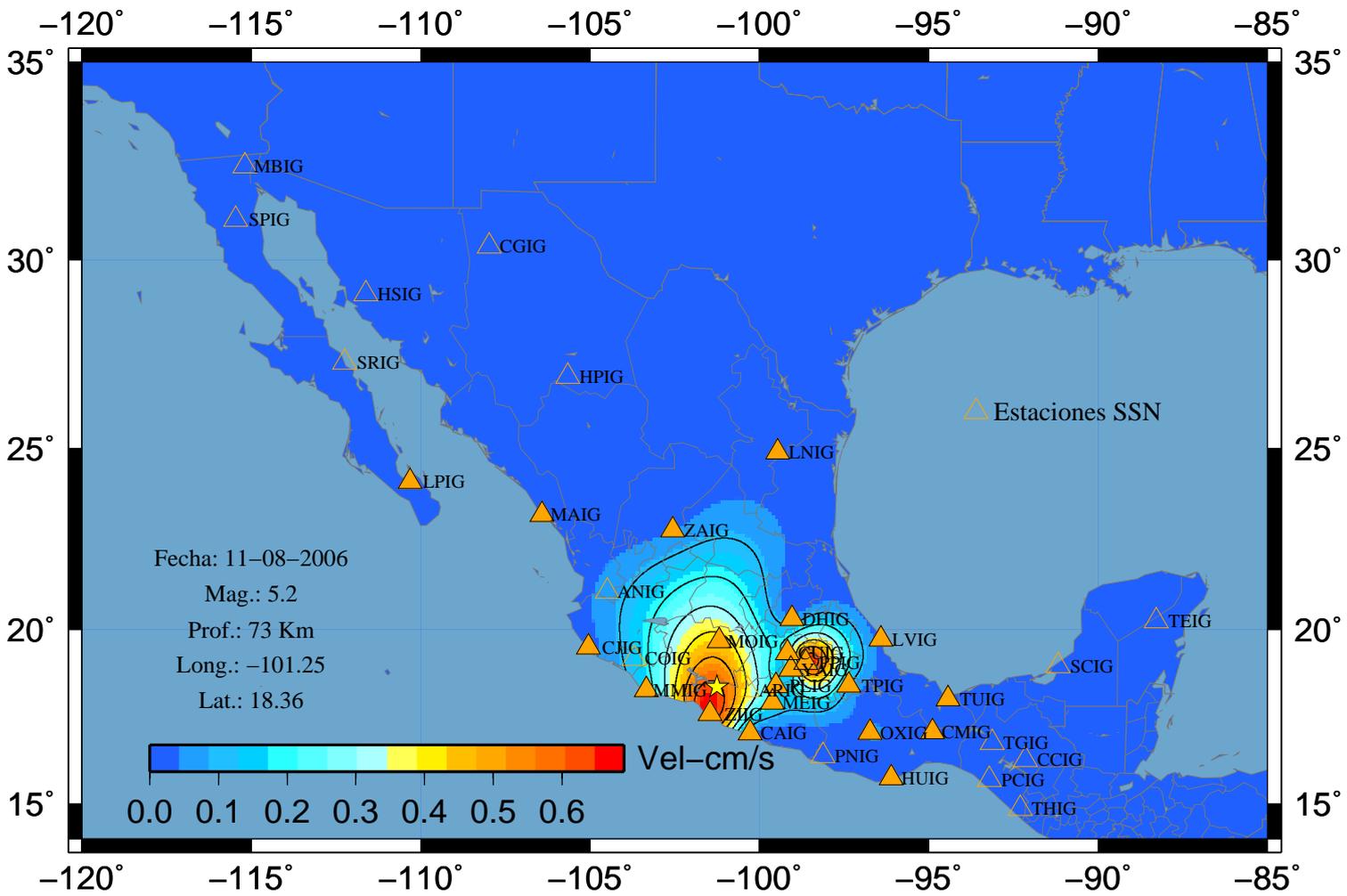
### Sismo 52 A-Norte



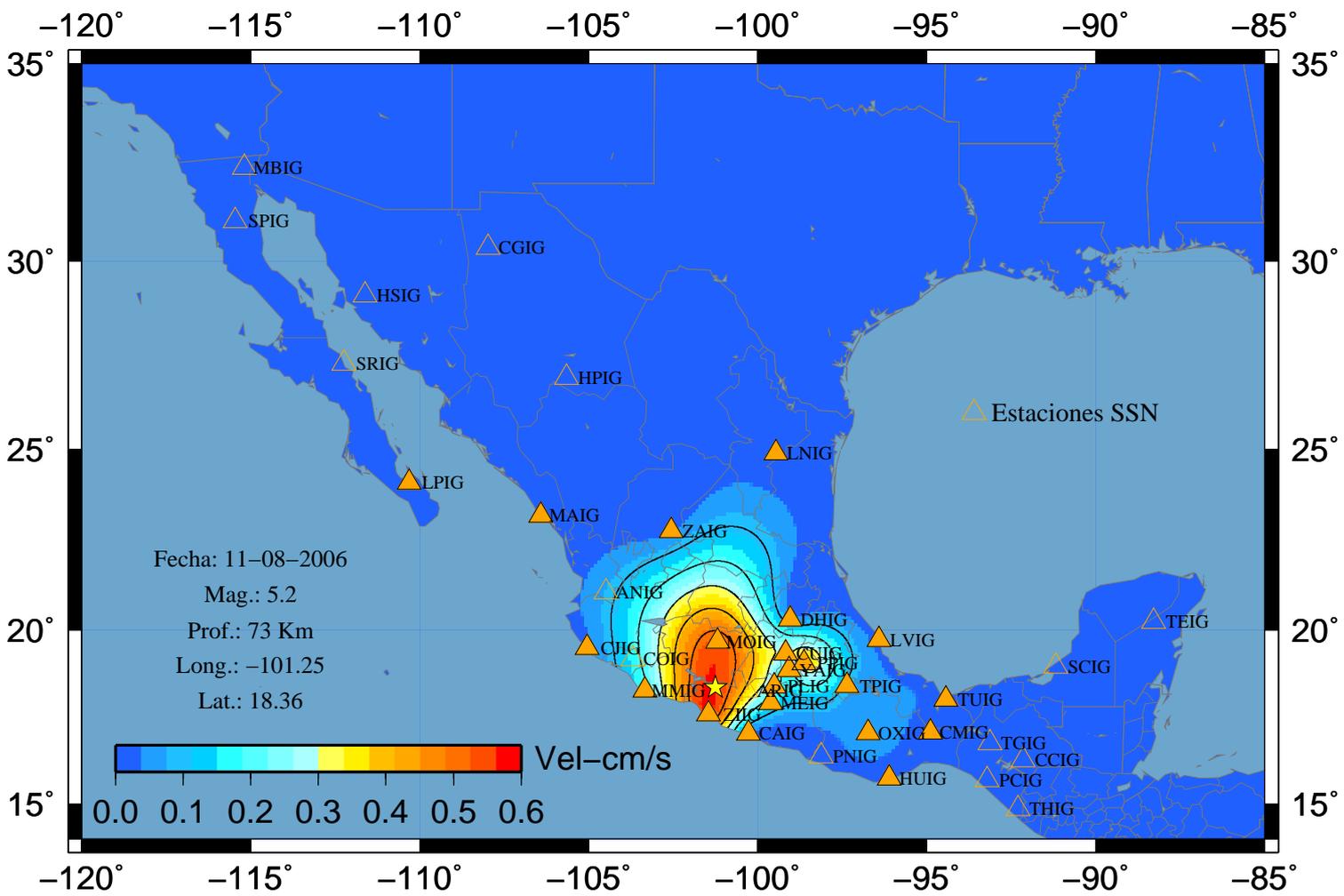
### Sismo 52 A-Vertical



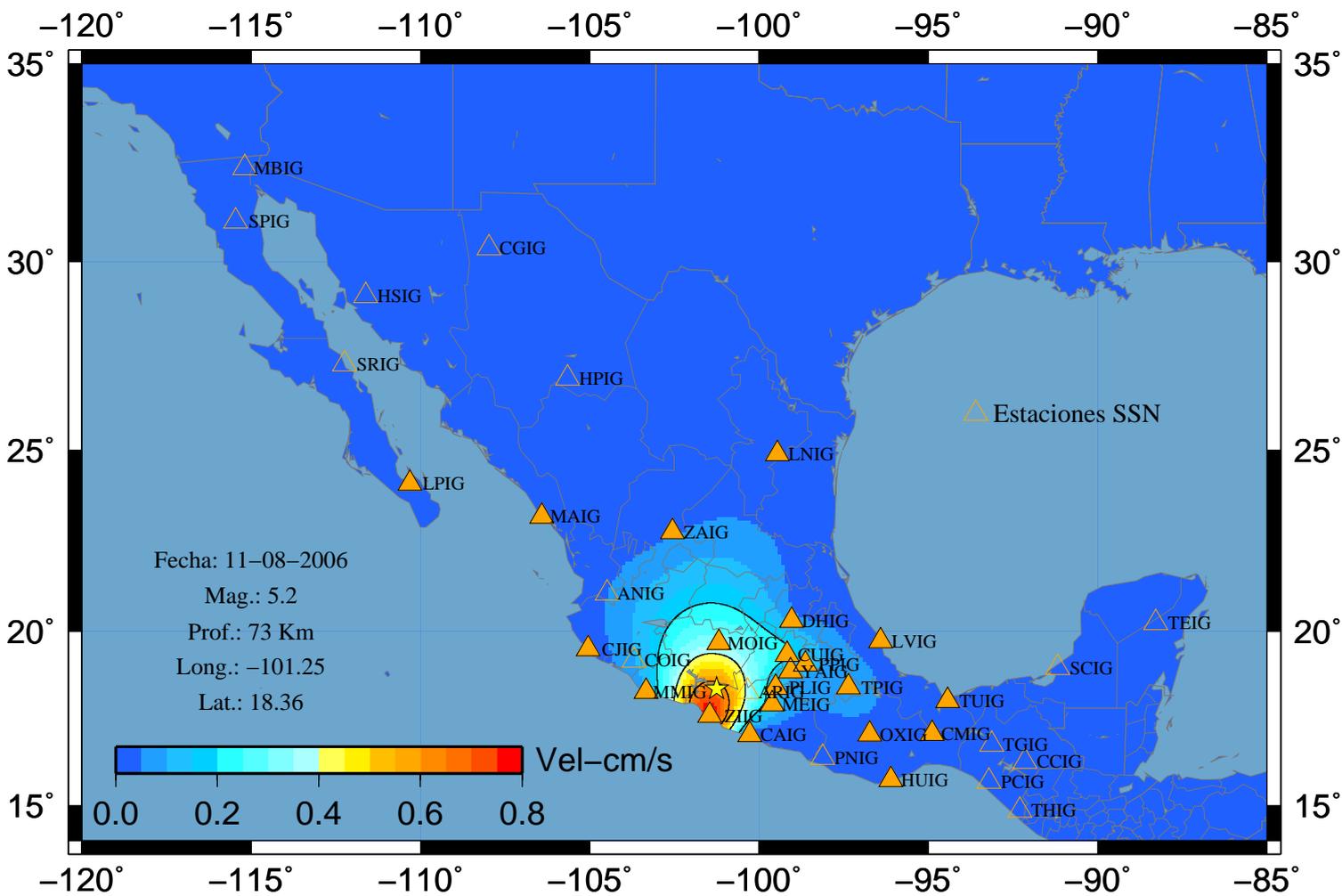
# Sismo 52 V-Este



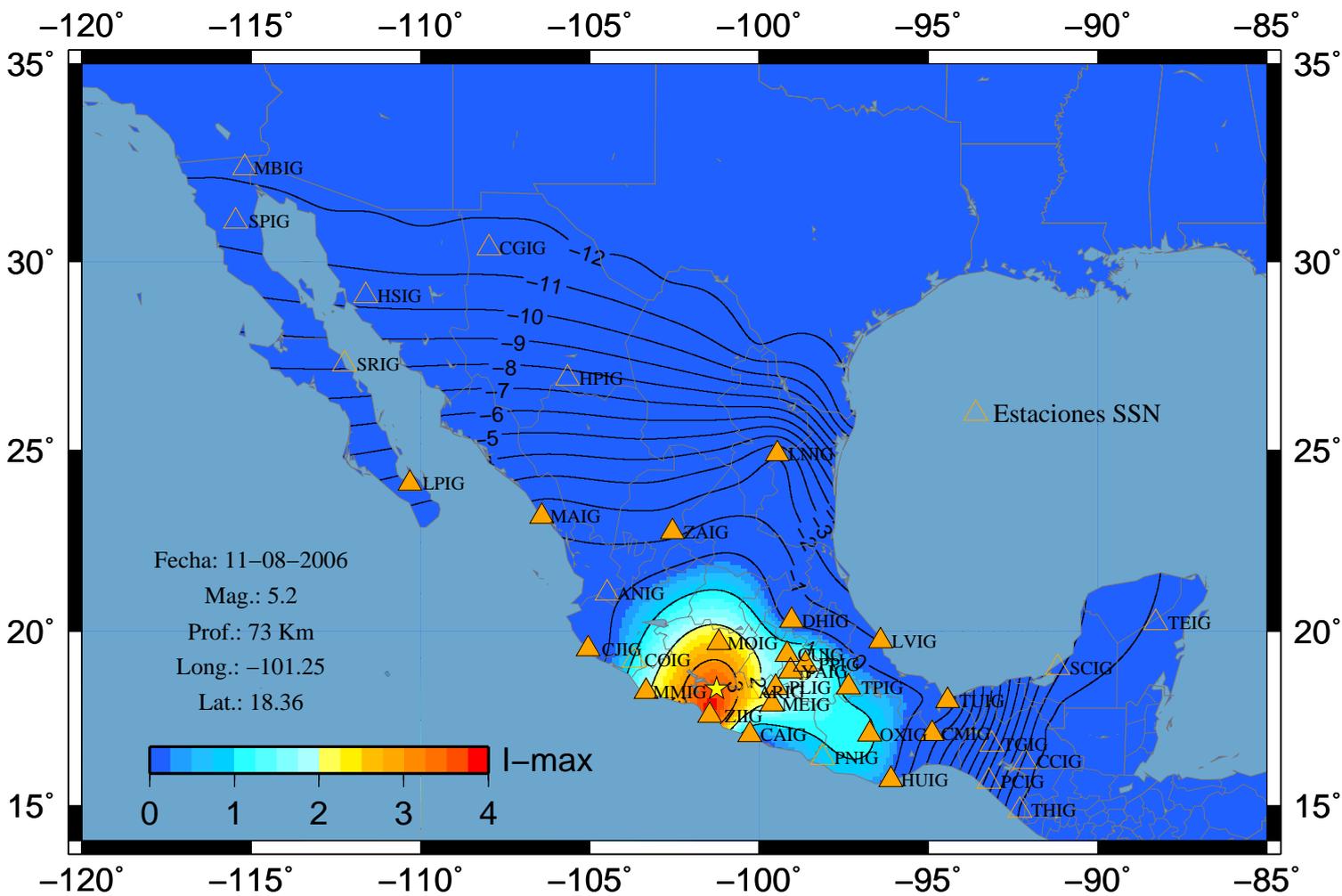
# Sismo 52 V-Norte



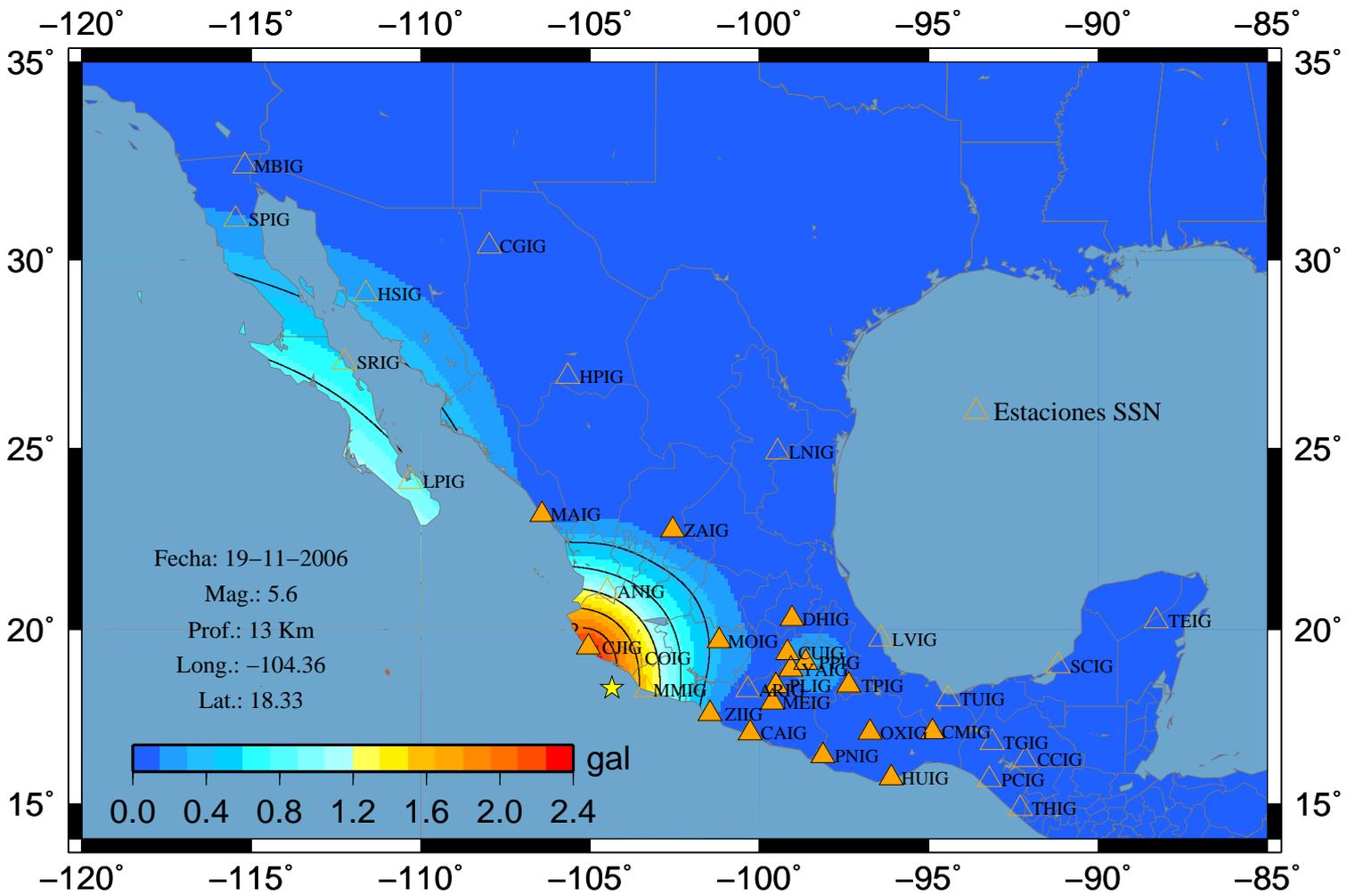
### Sismo 52 V-Vertical



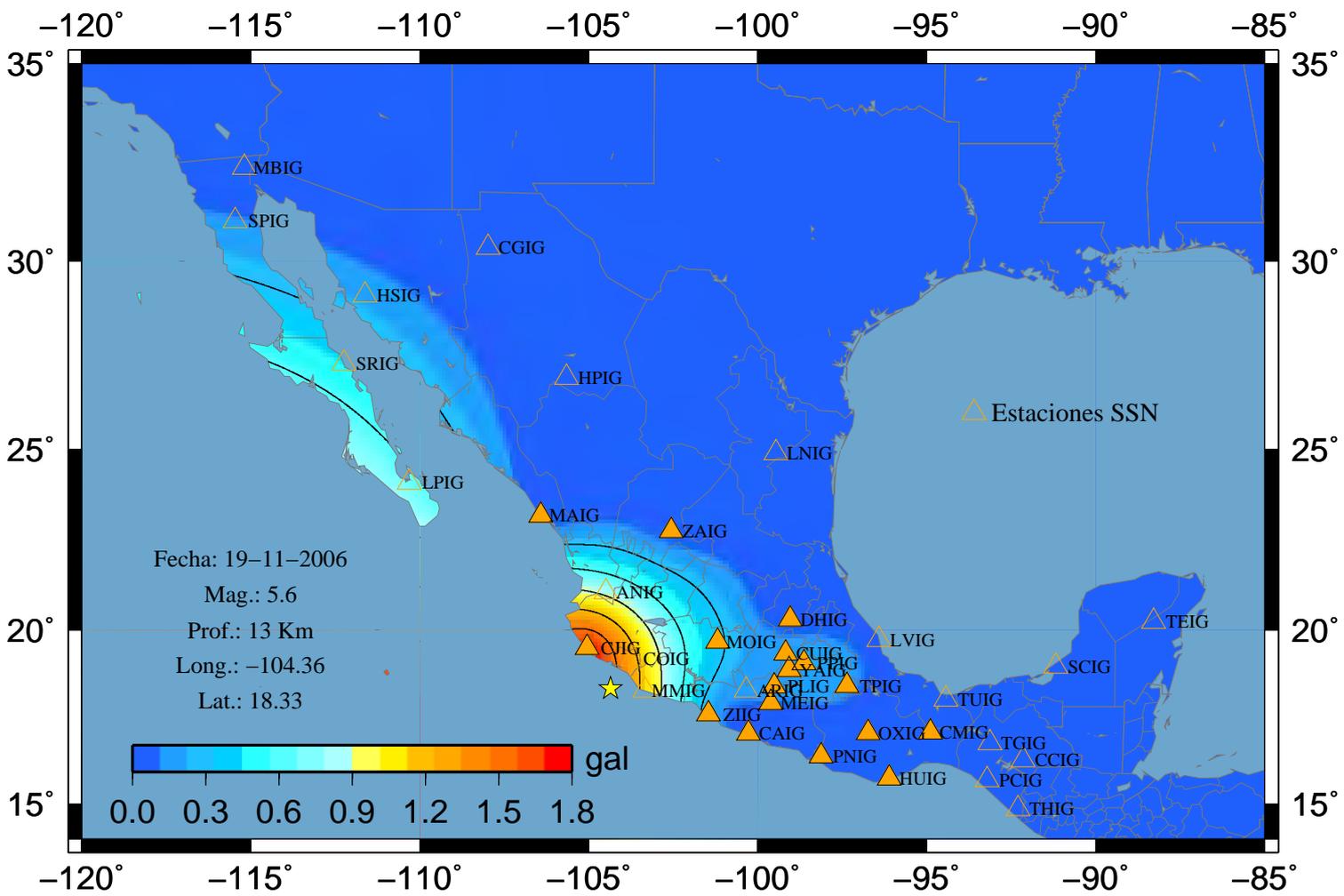
### Sismo 52 I (Max)



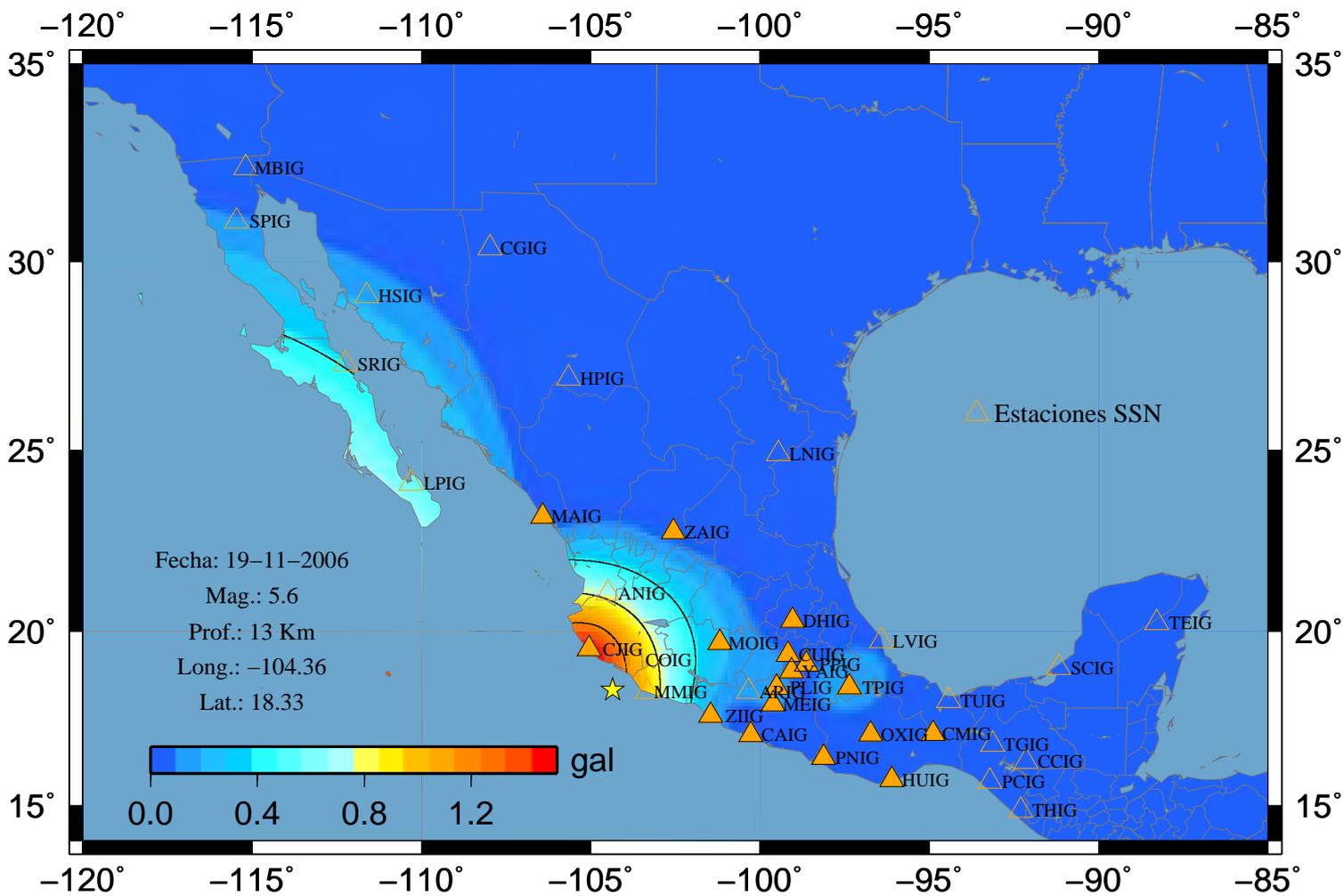
# Sismo 54 A-Este



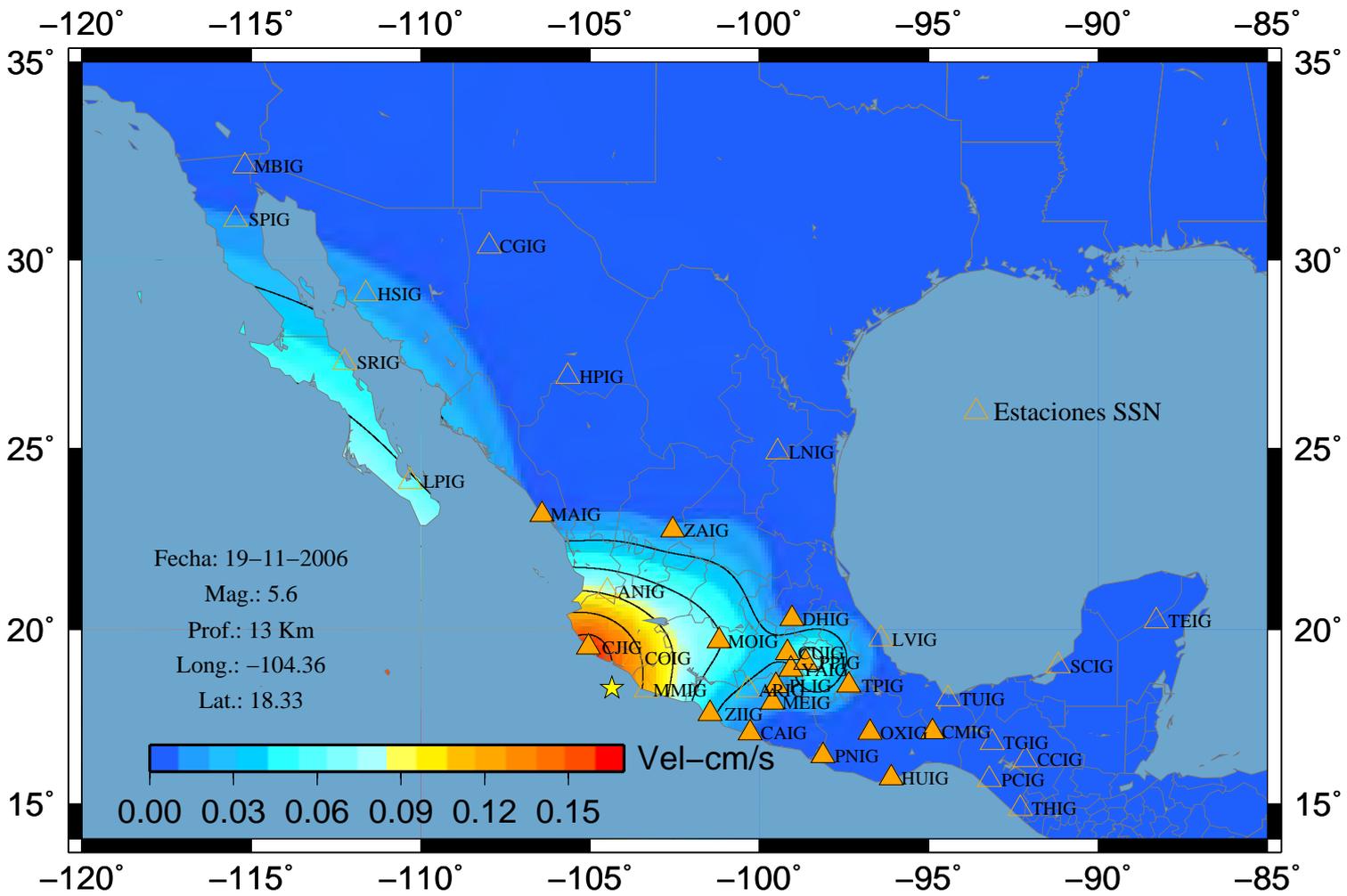
### Sismo 54 A-Norte



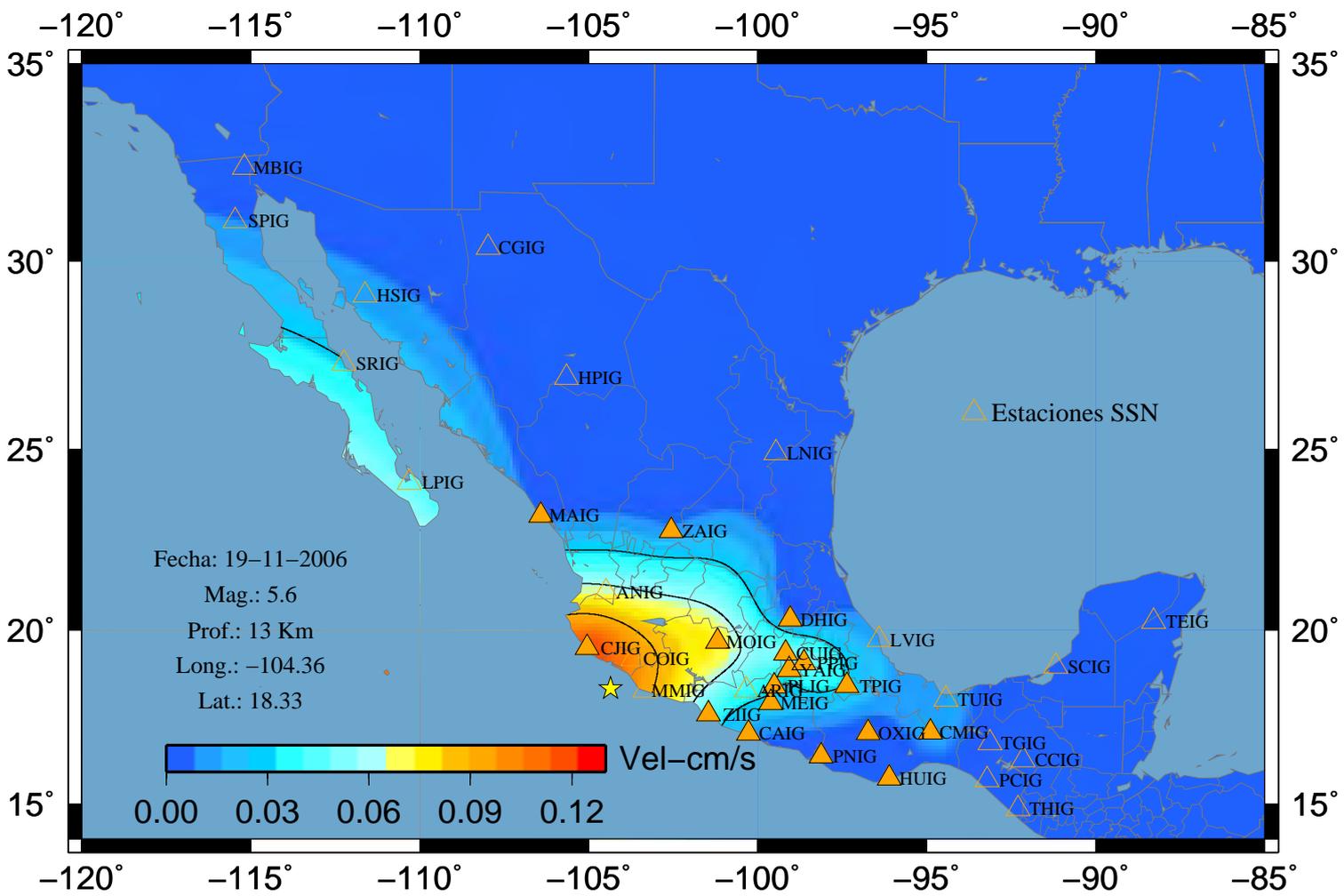
### Sismo 54 A-Vertical



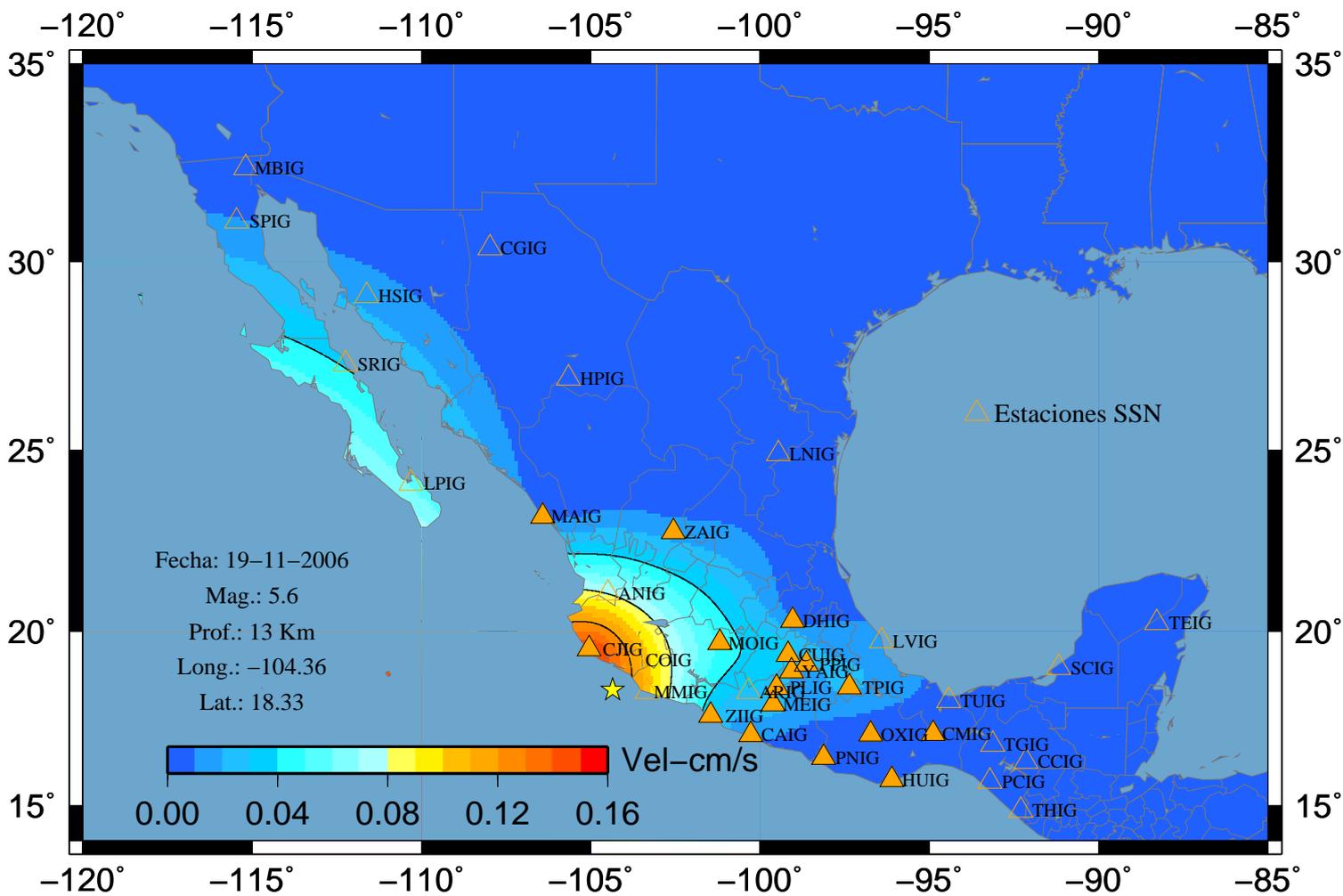
### Sismo 54 V-Este



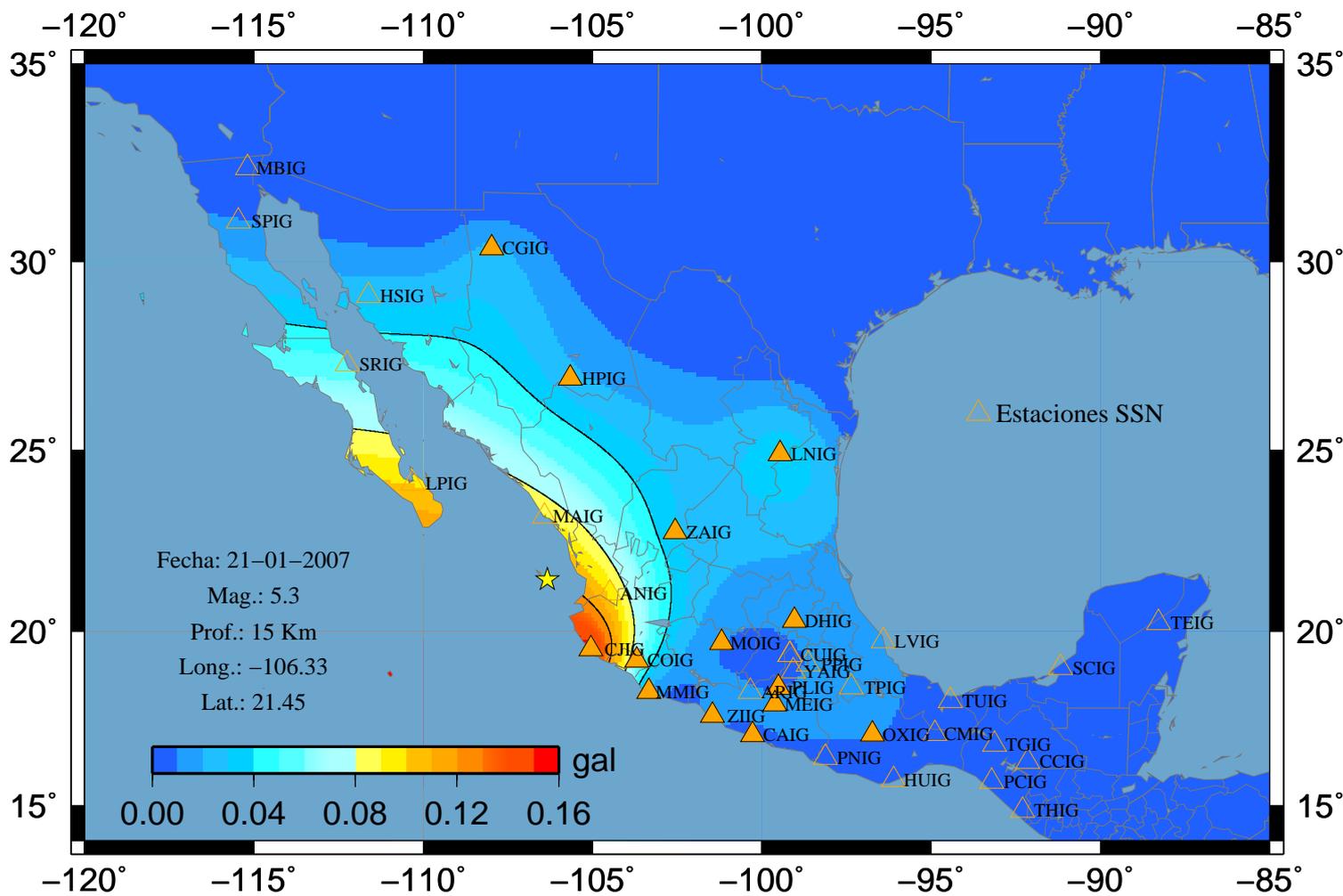
### Sismo 54 V-Norte



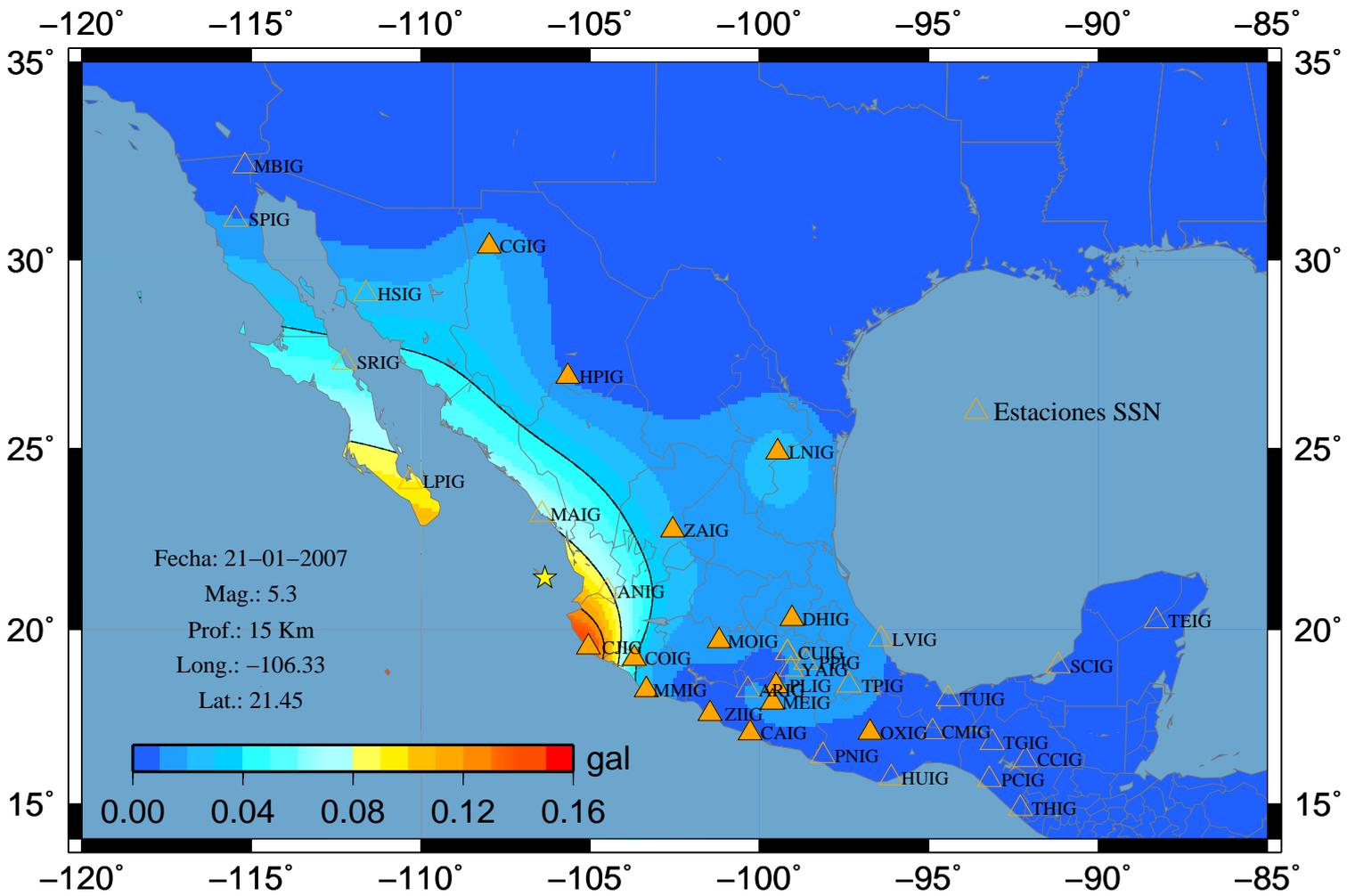
### Sismo 54 V-Vertical



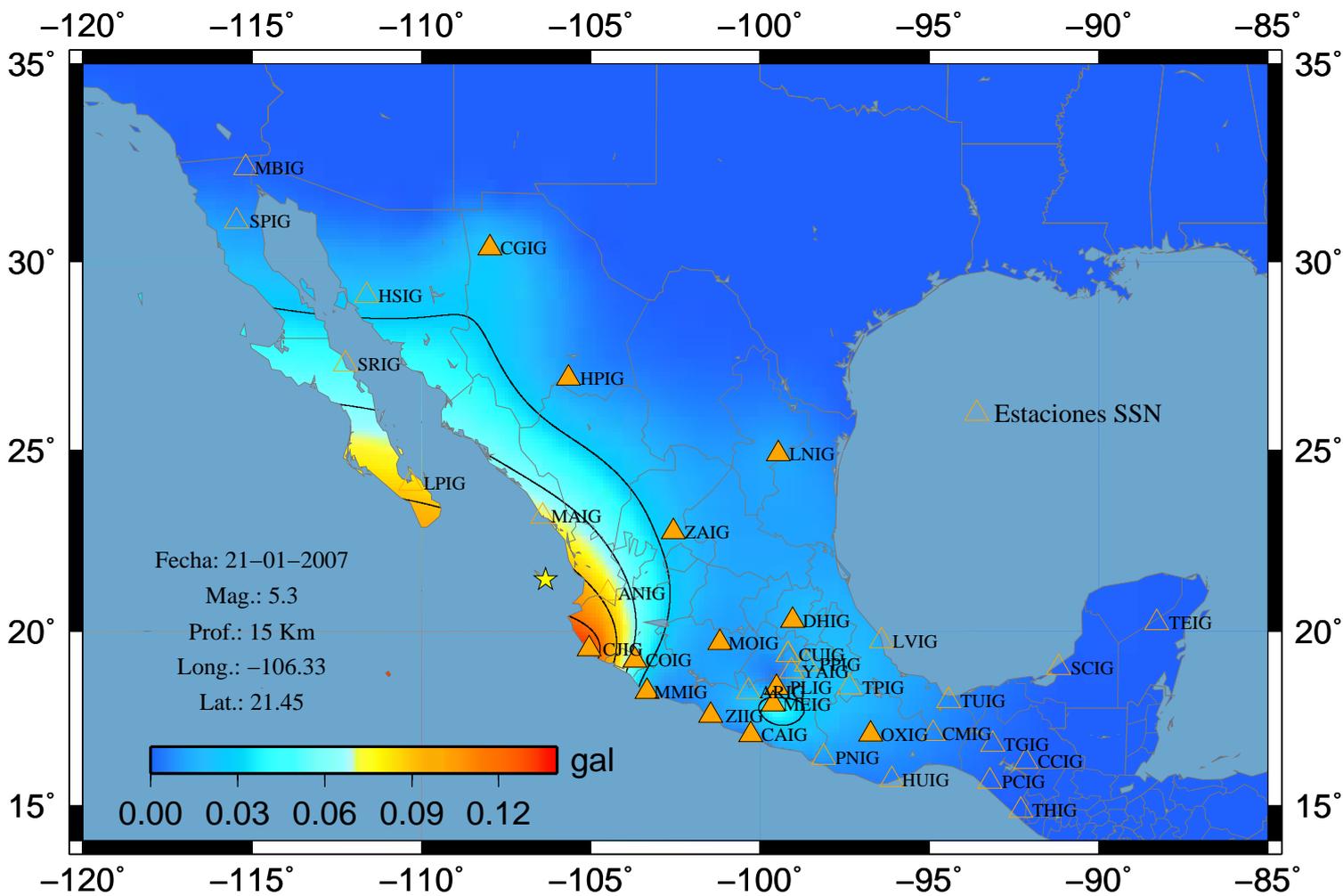
### Sismo 57 A-Este



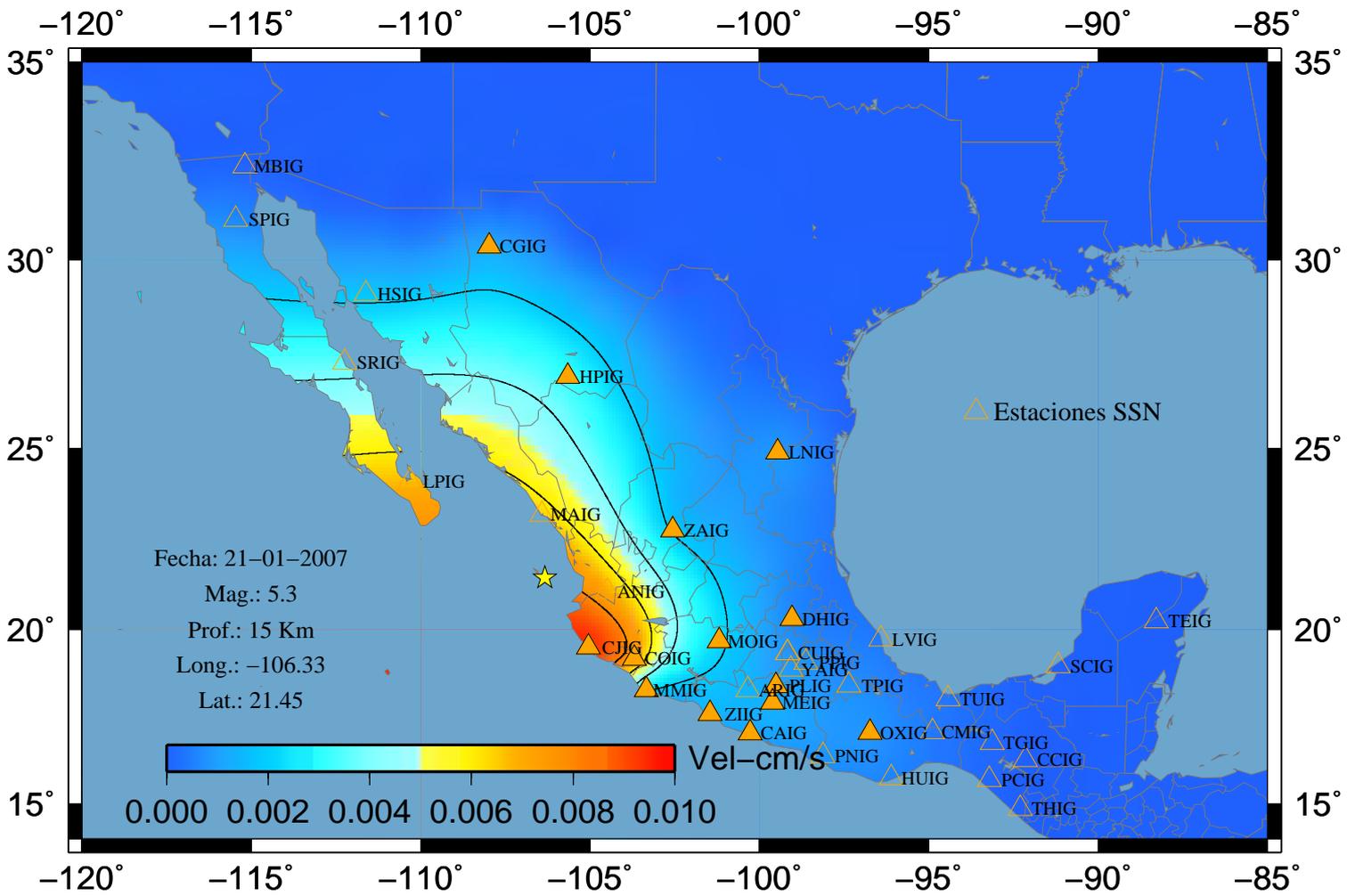
### Sismo 57 A-Norte



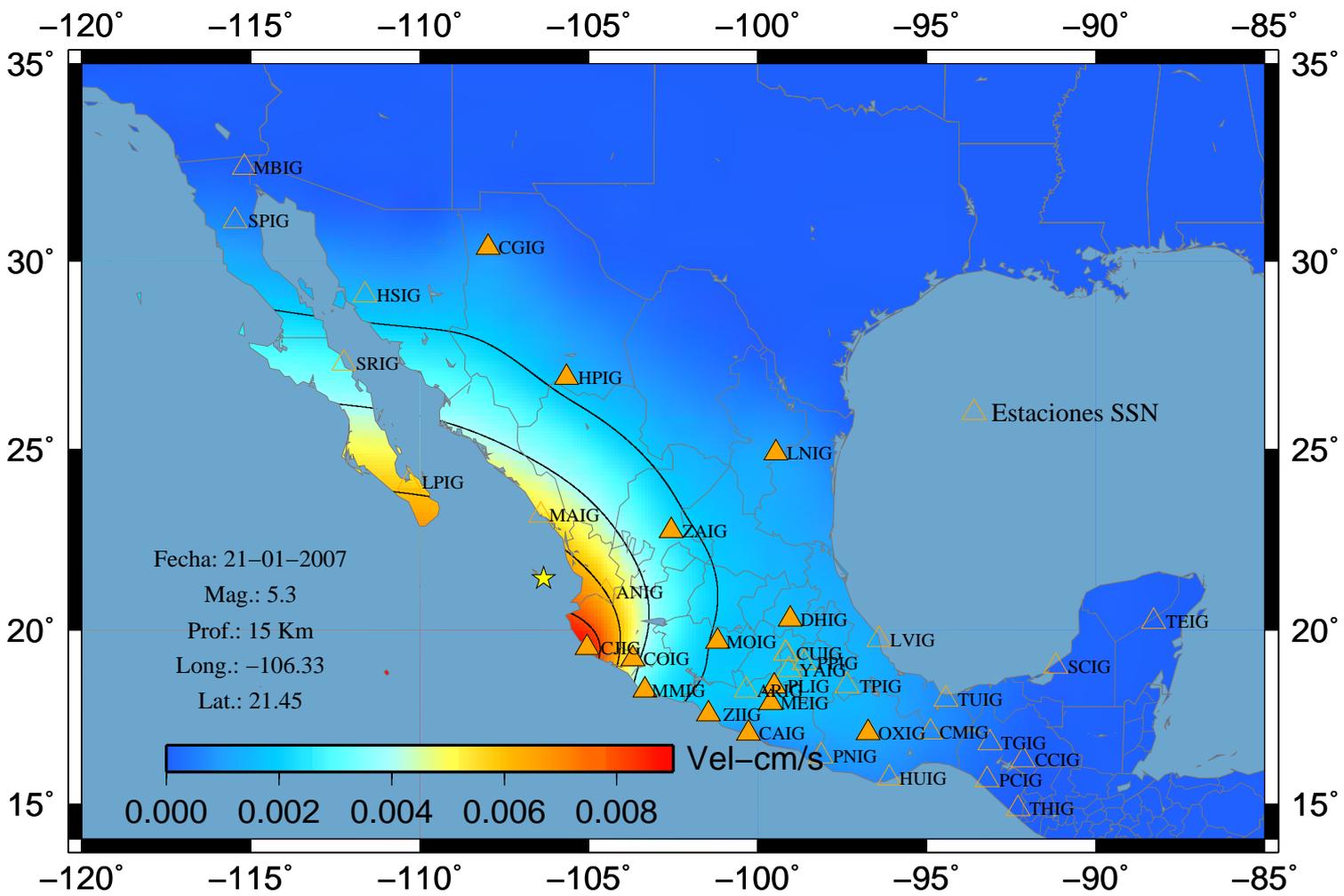
# Sismo 57 A-Vertical



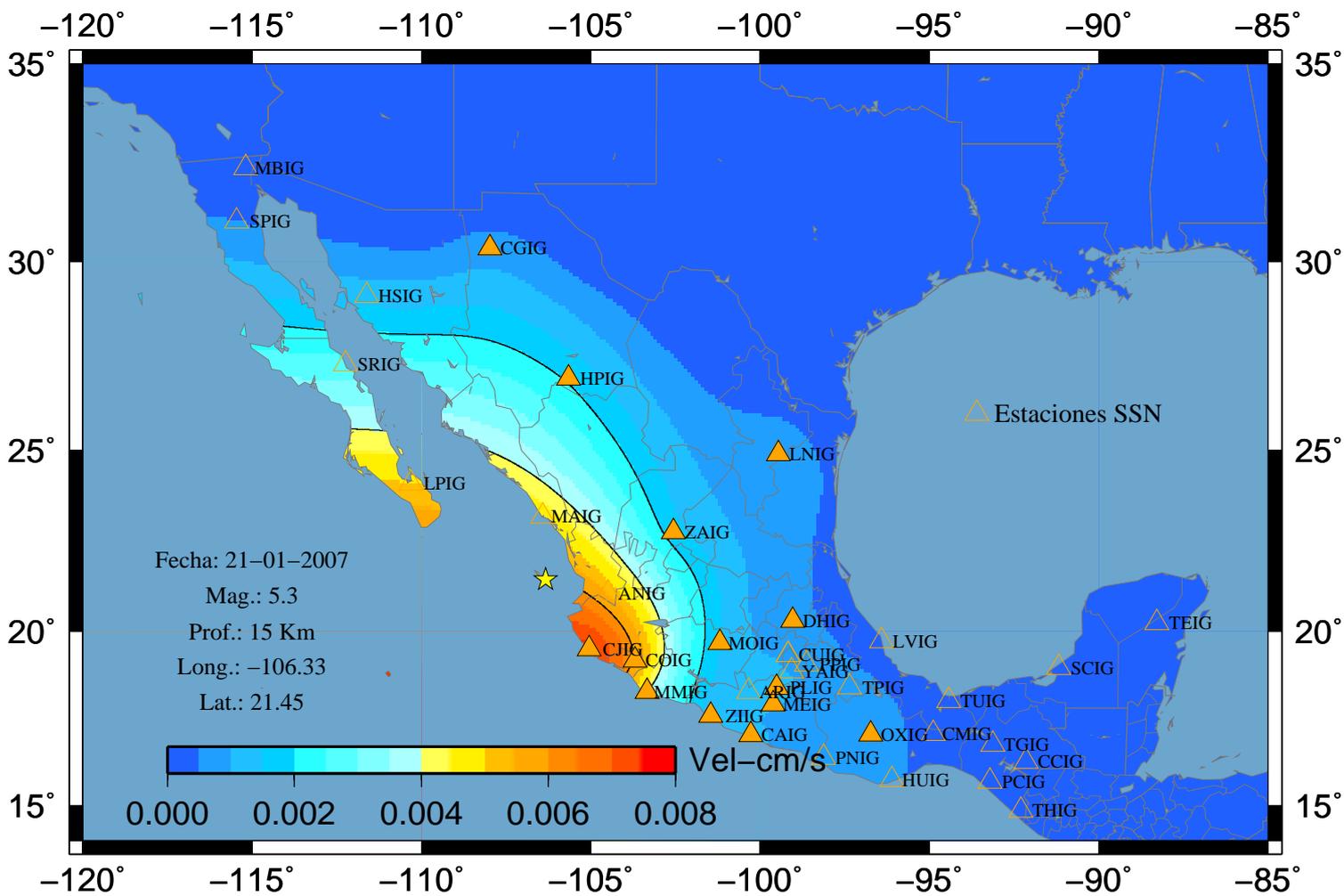
### Sismo 57 V-Este



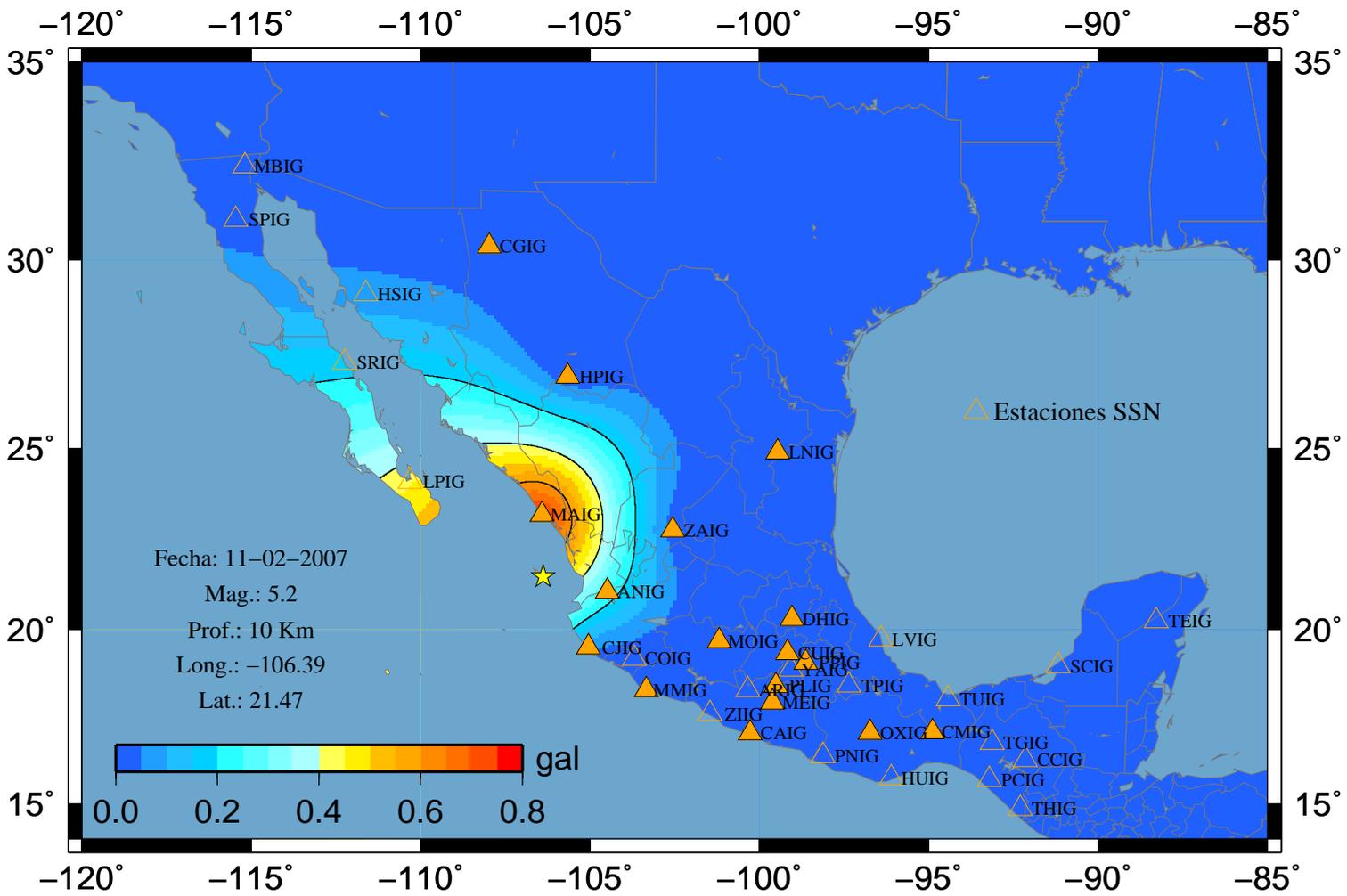
### Sismo 57 V-Norte



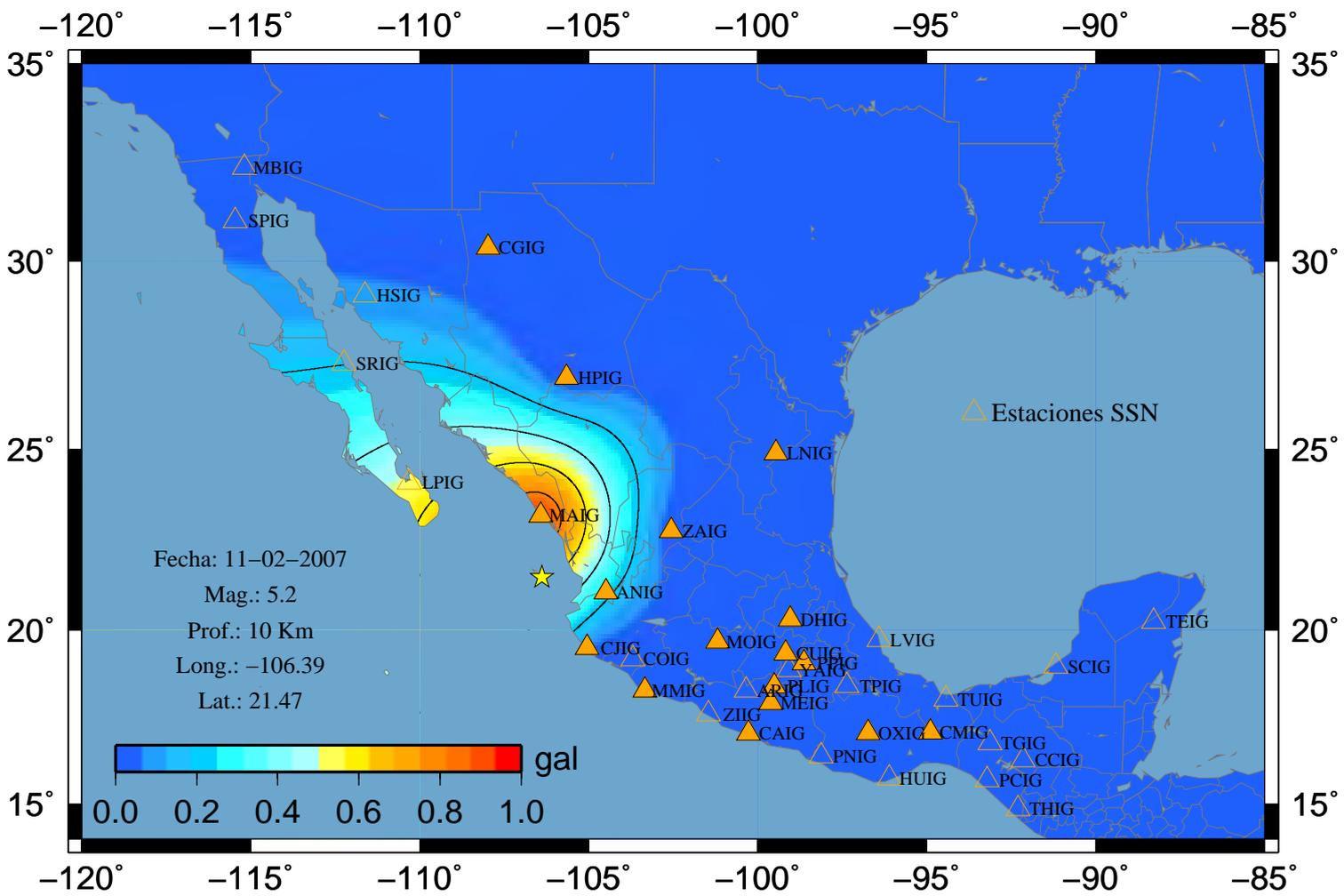
### Sismo 57 V-Vertical



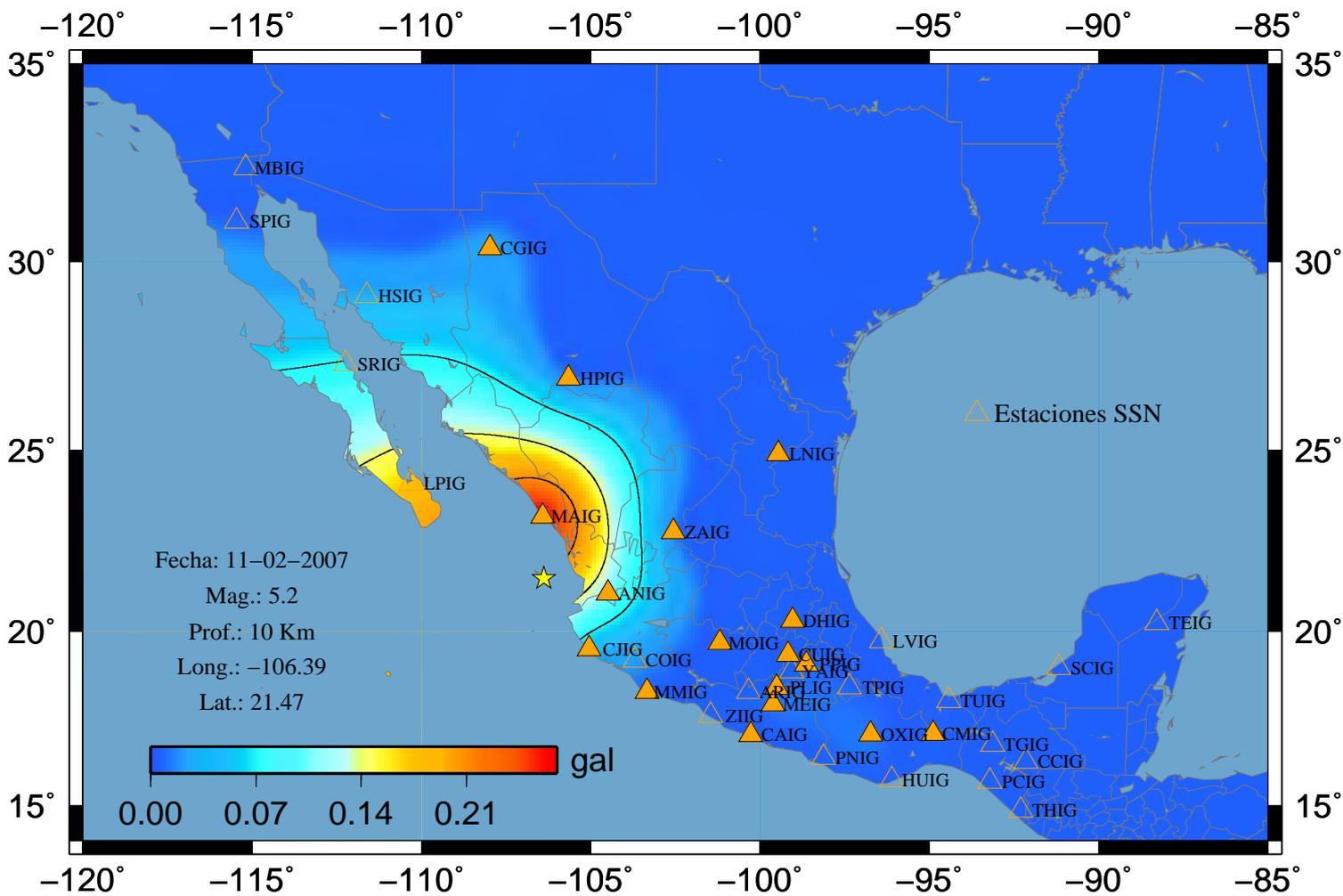
### Sismo 59 A-Este



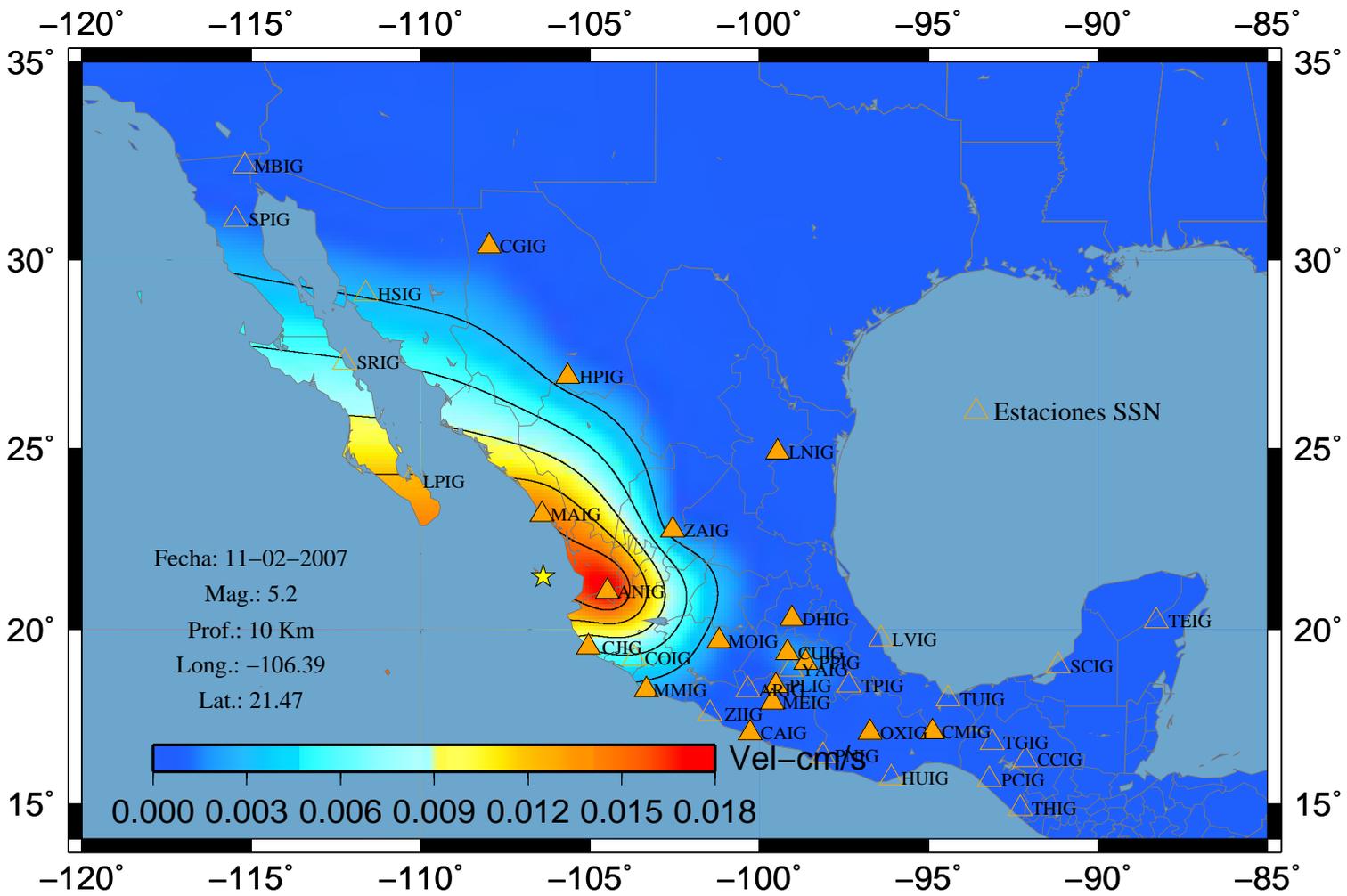
### Sismo 59 A-Norte



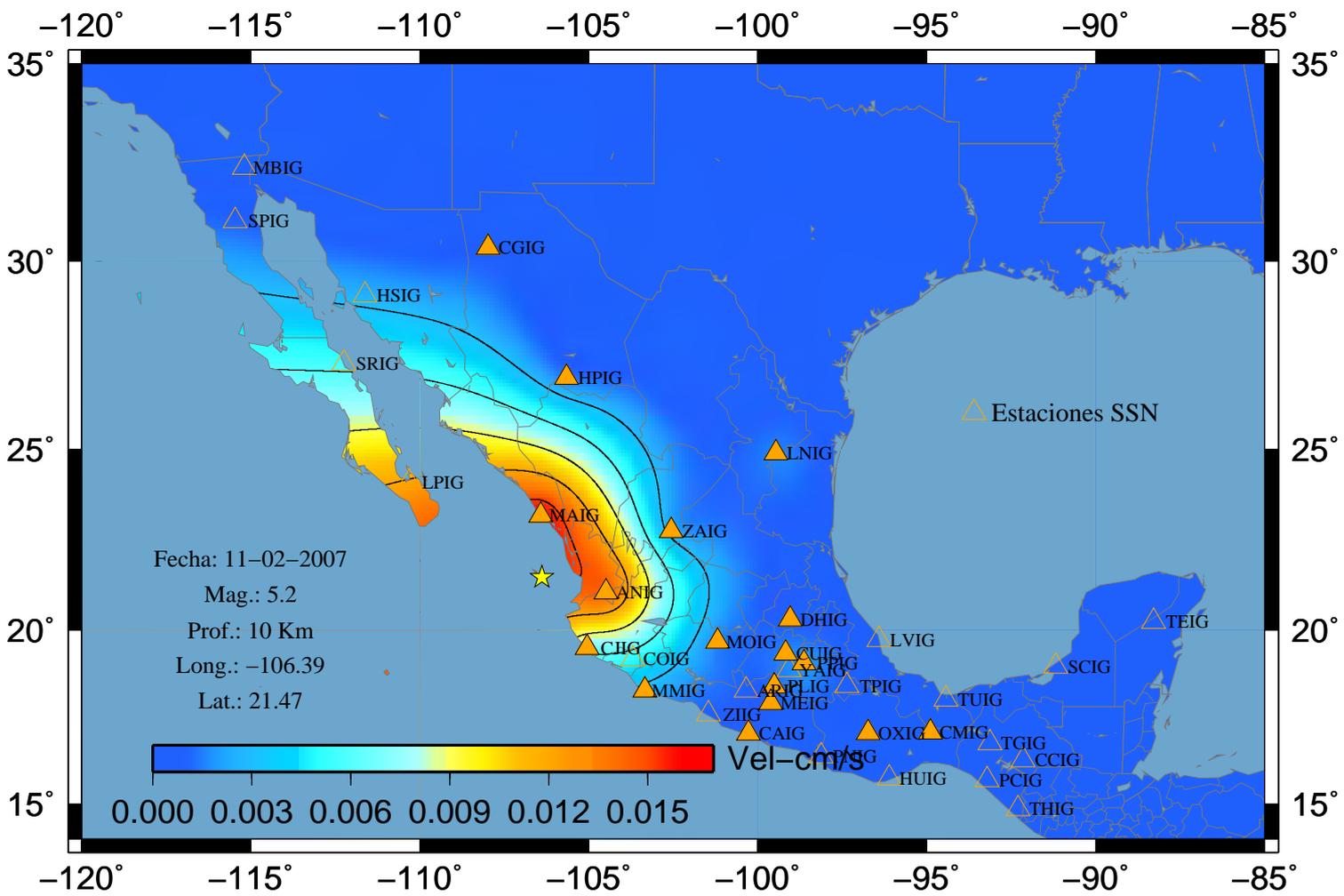
### Sismo 59 A-Vertical



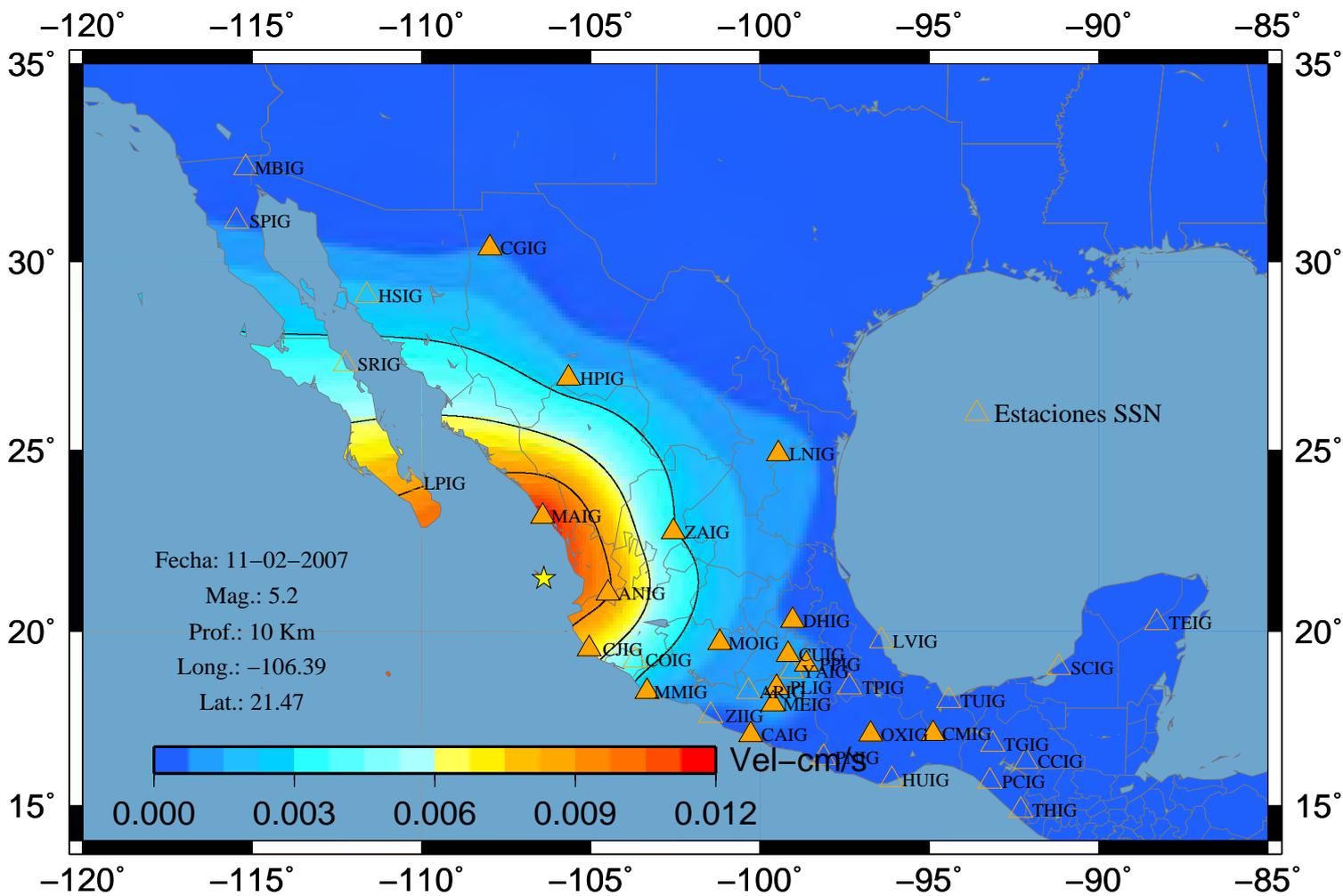
### Sismo 59 V-Este



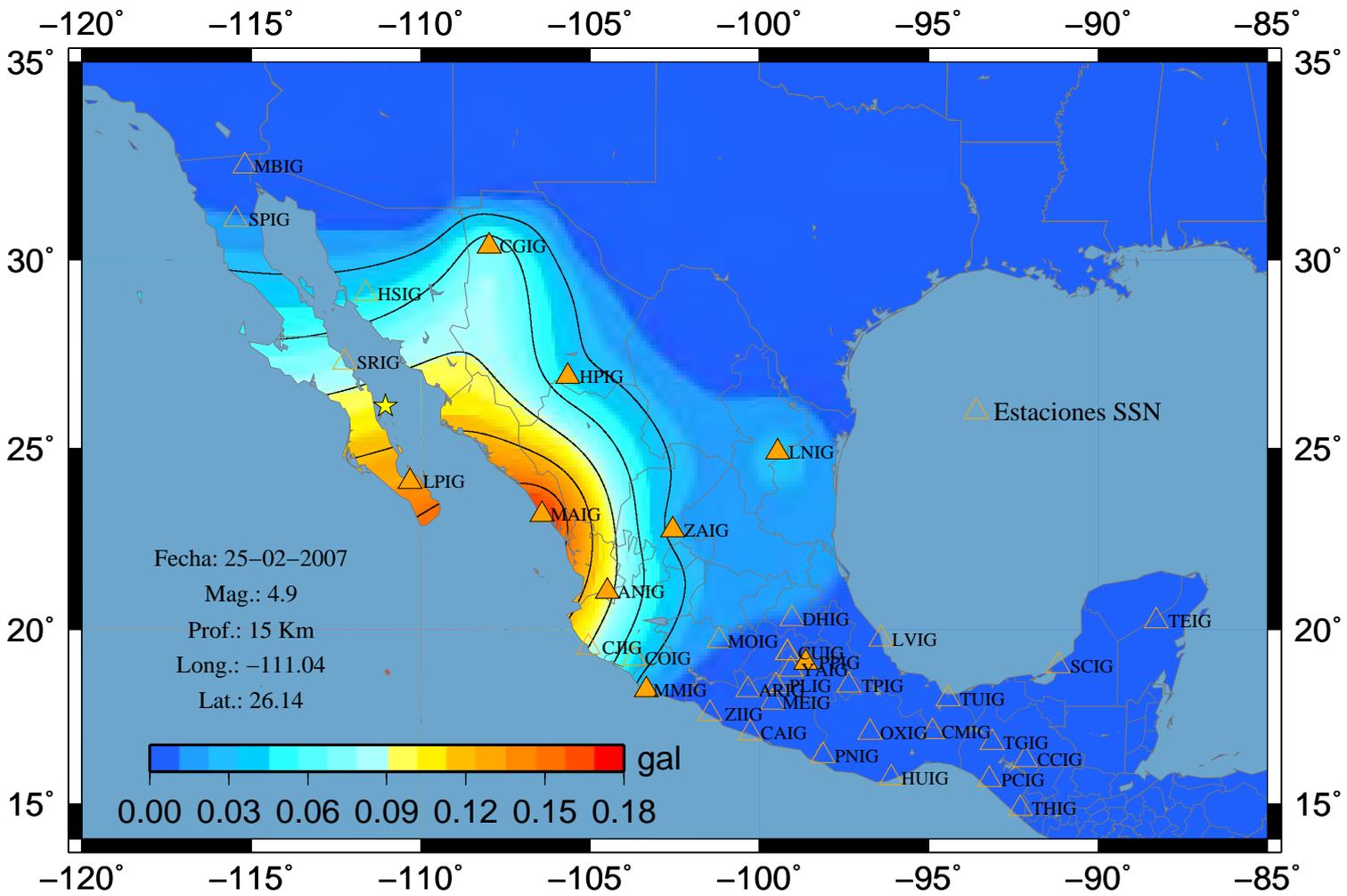
### Sismo 59 V-Norte



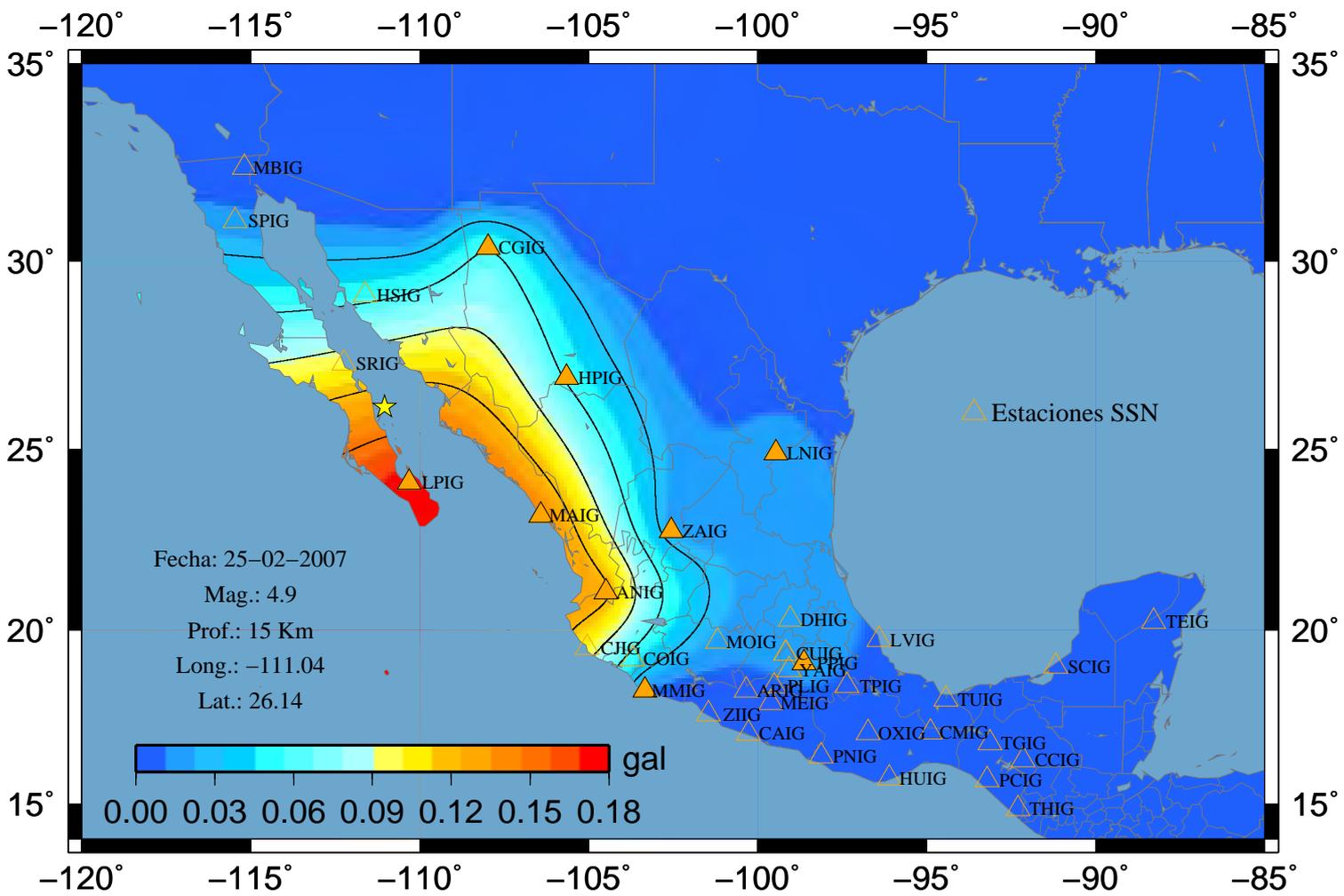
### Sismo 59 V-Vertical



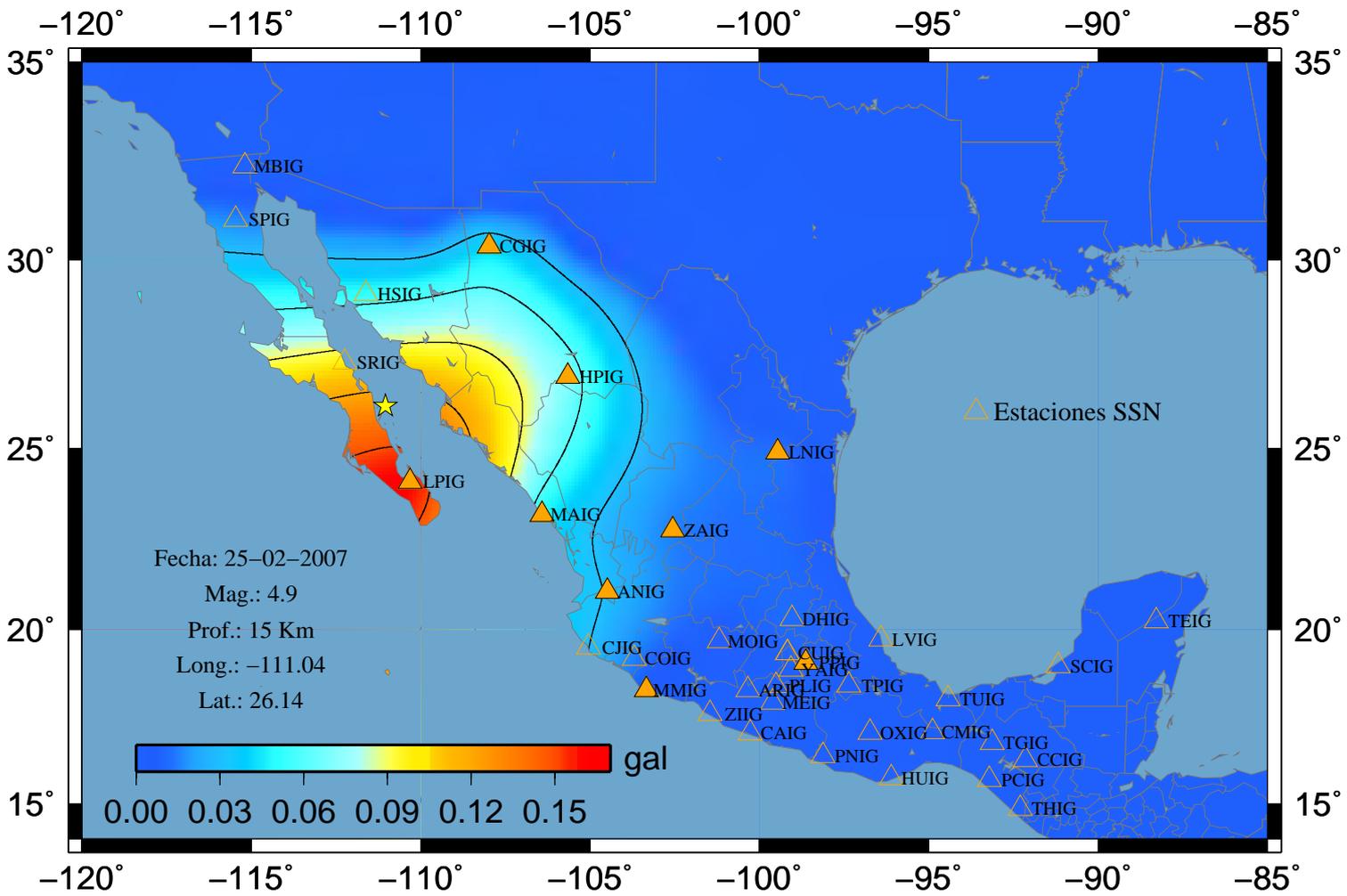
### Sismo 63 A-Este



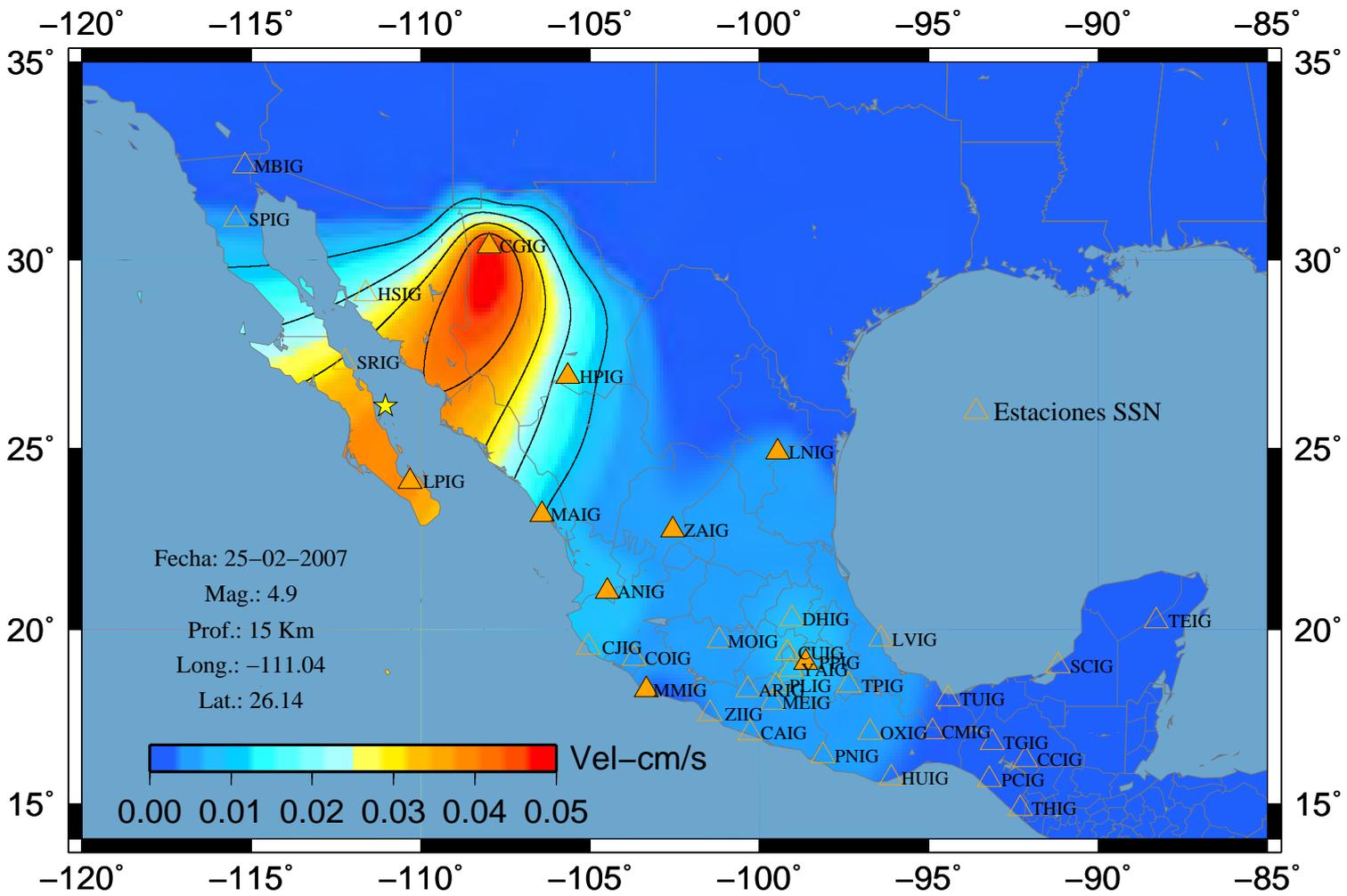
### Sismo 63 A-Norte



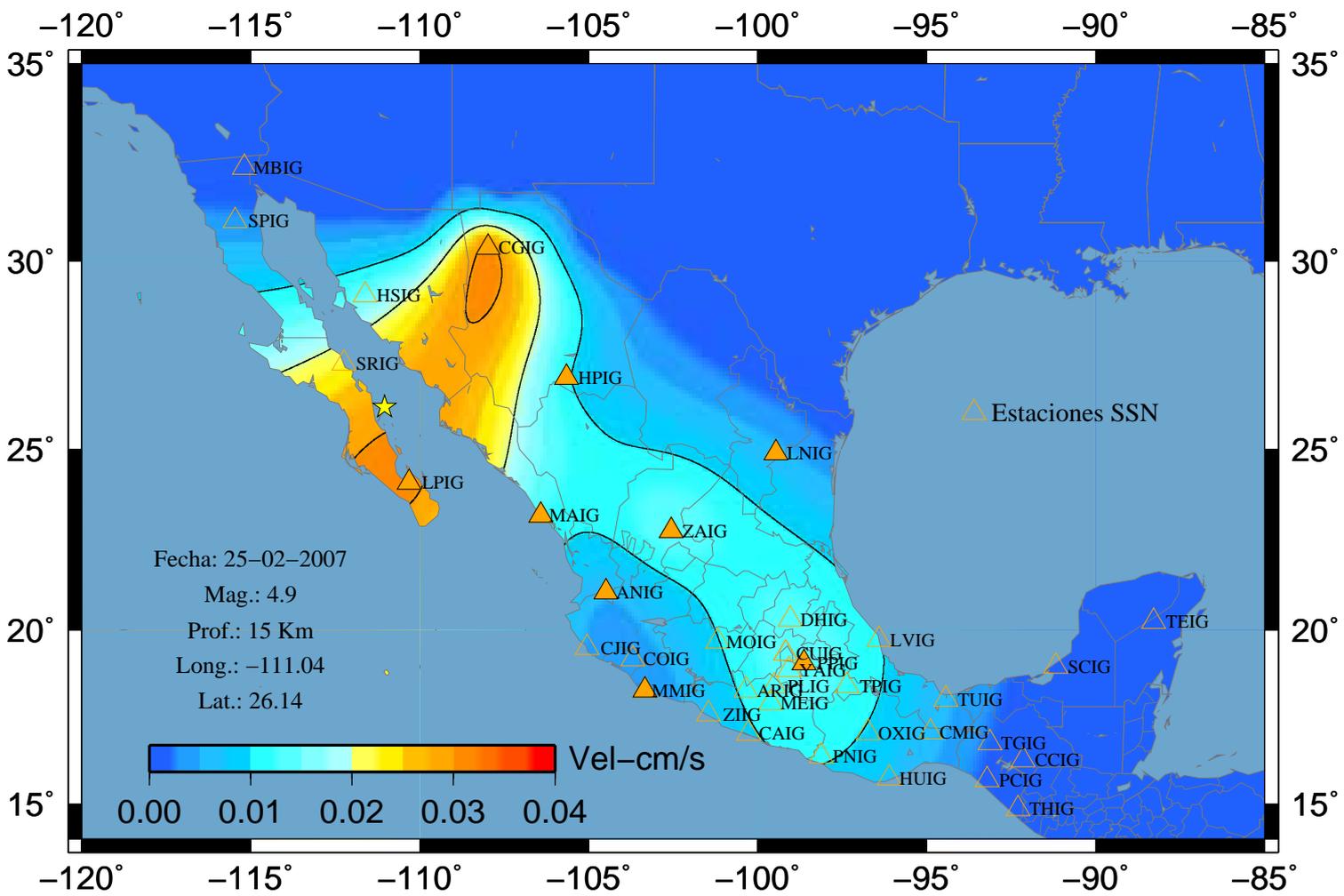
### Sismo 63 A-Vertical



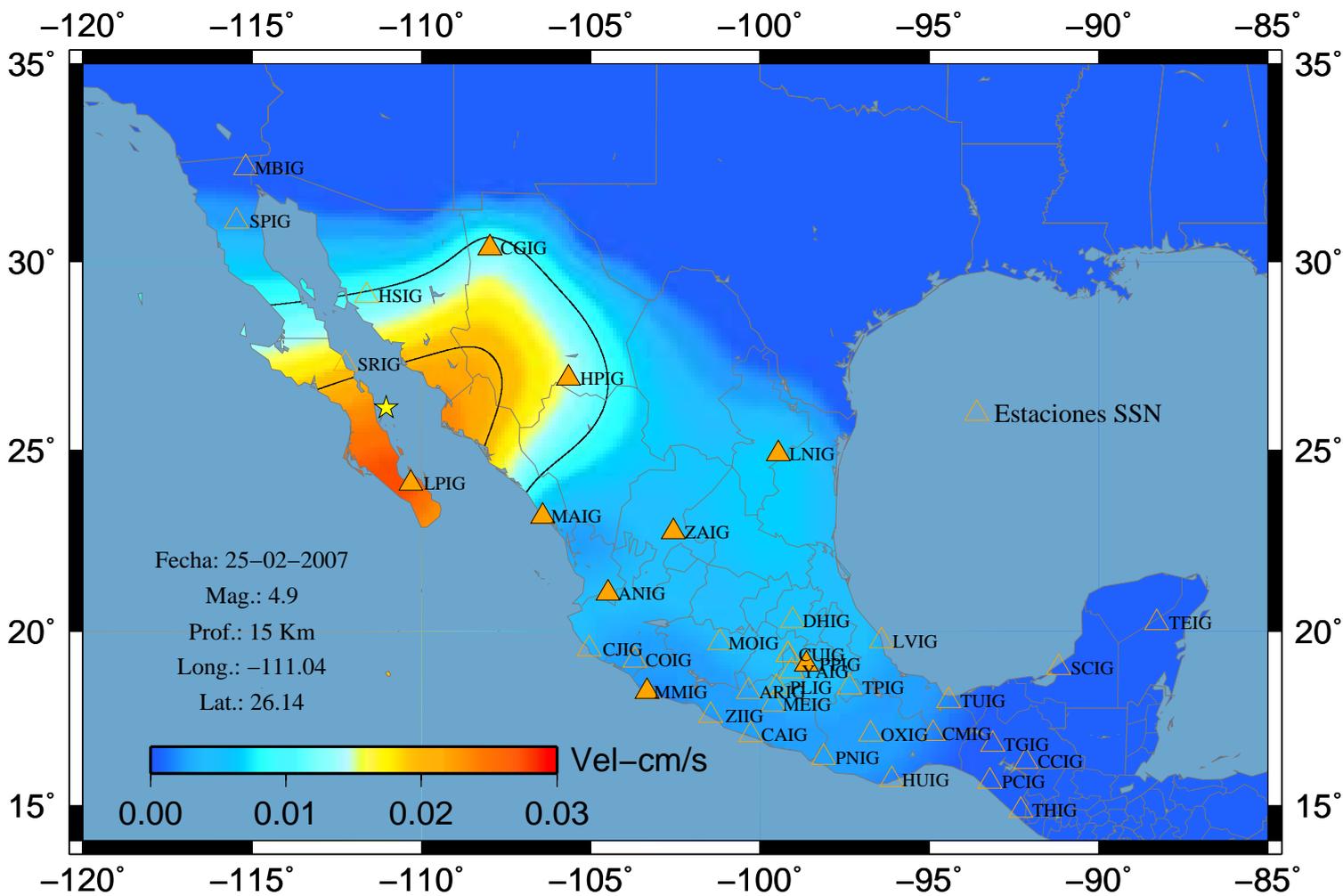
### Sismo 63 V-Este



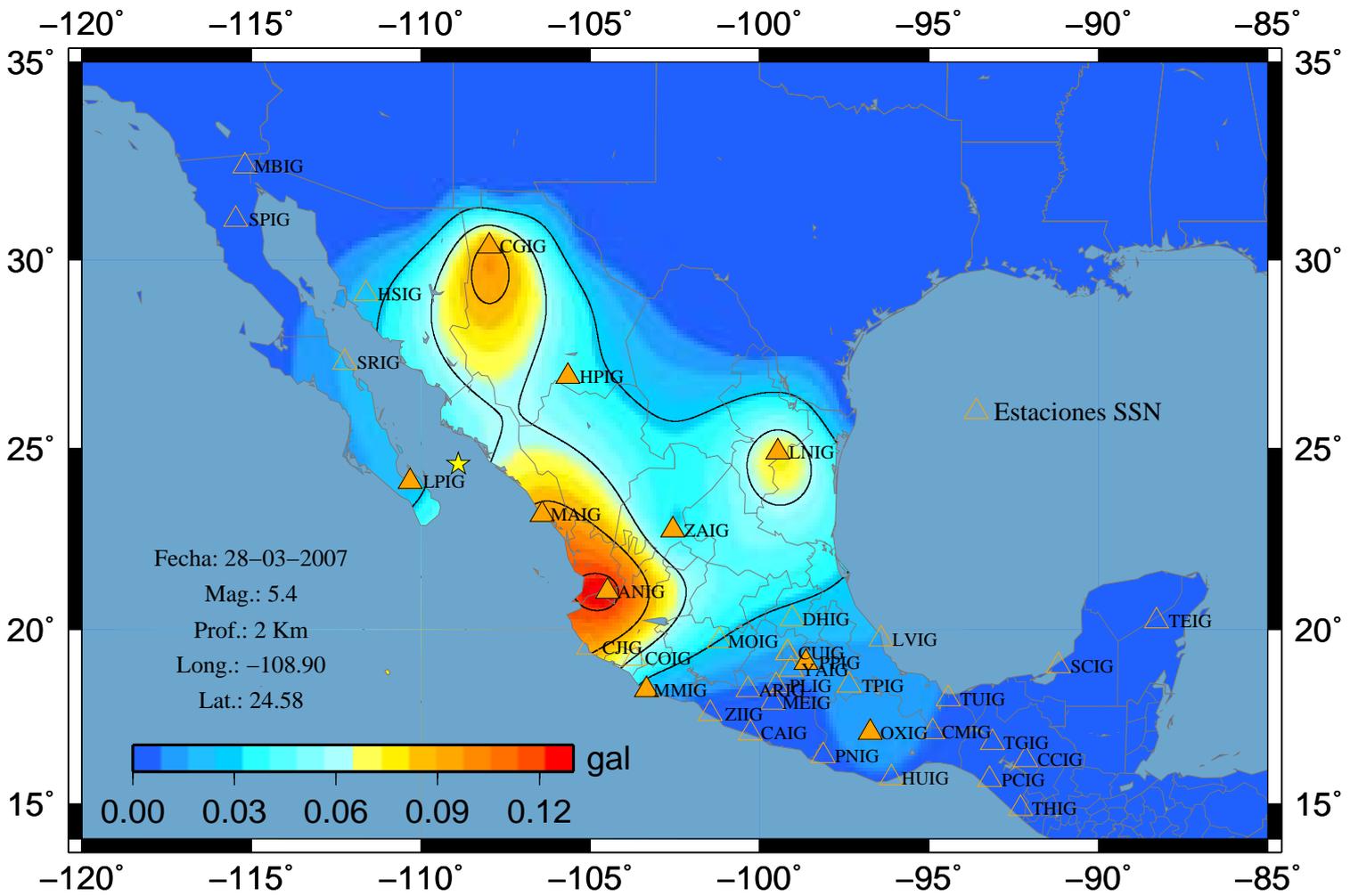
### Sismo 63 V-Norte



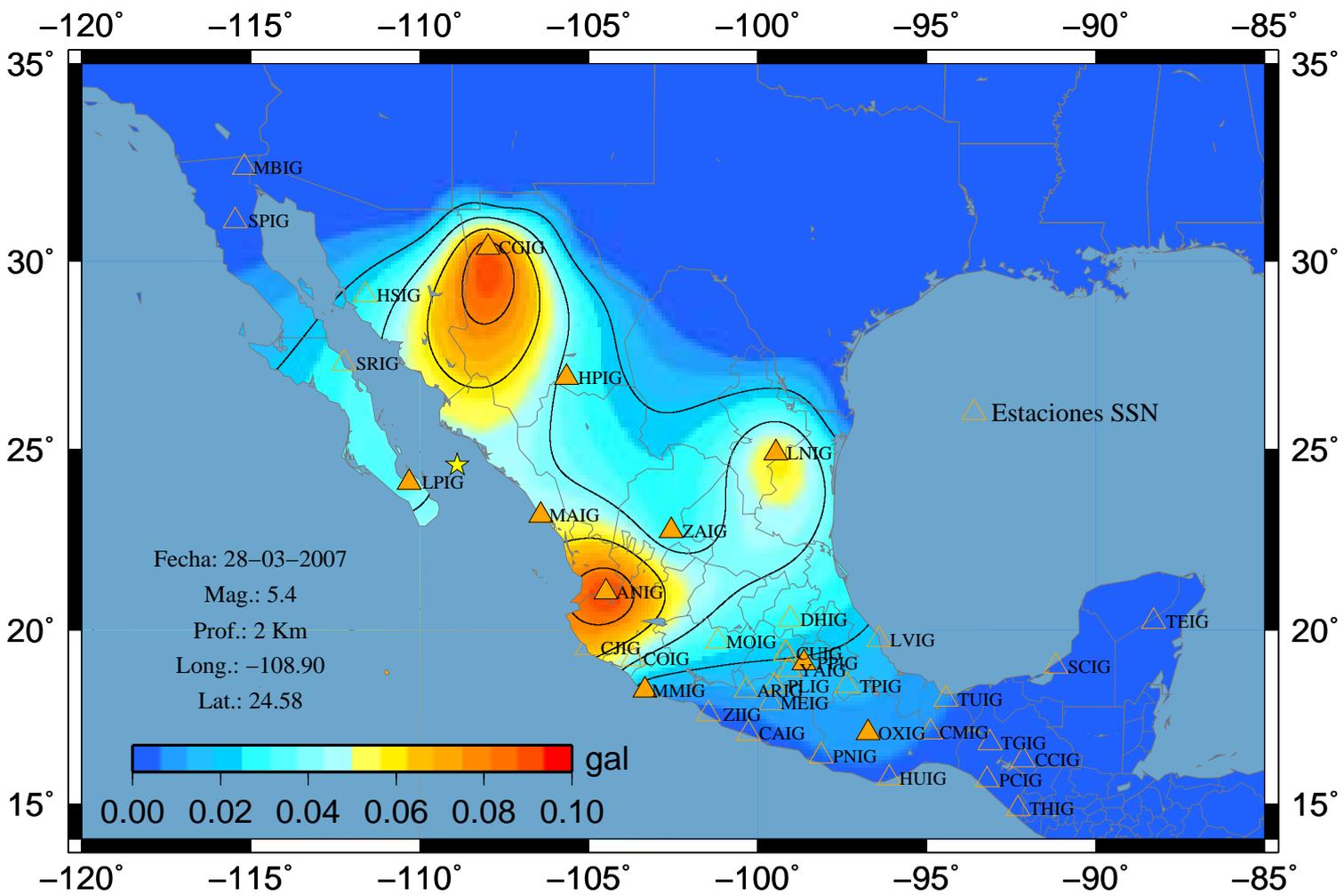
### Sismo 63 V-Vertical



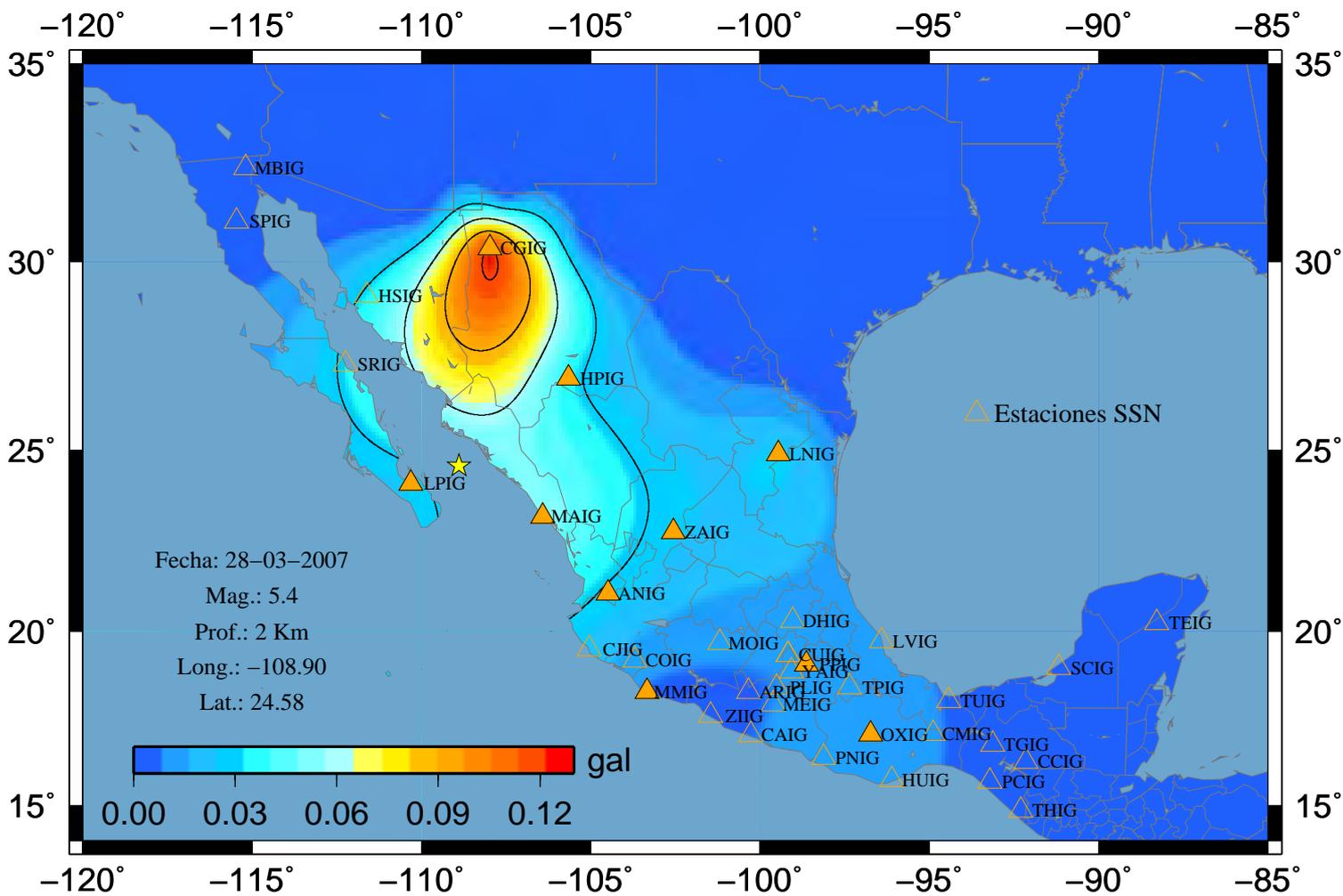
### Sismo 66 A-Este



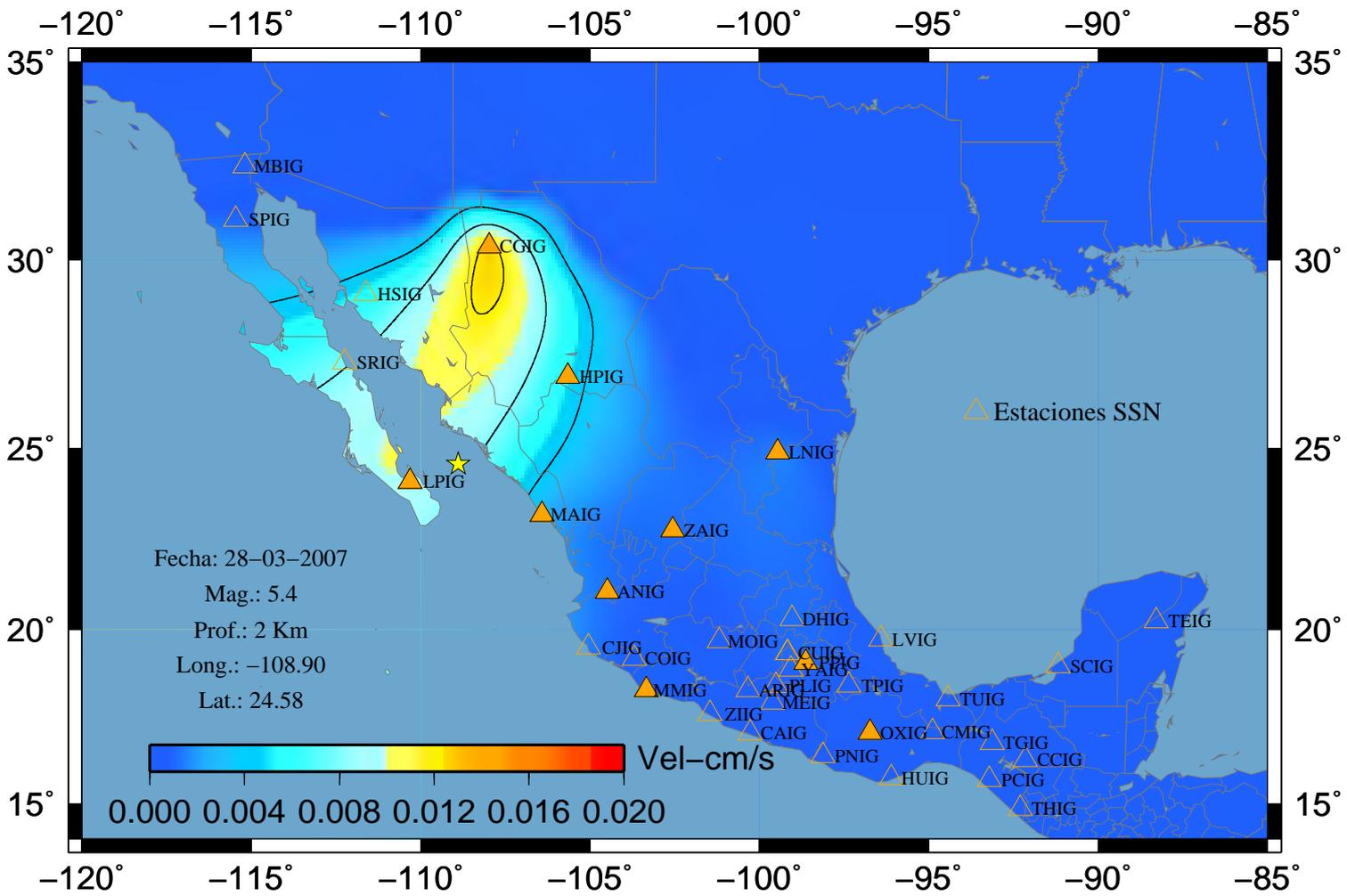
### Sismo 66 A-Norte



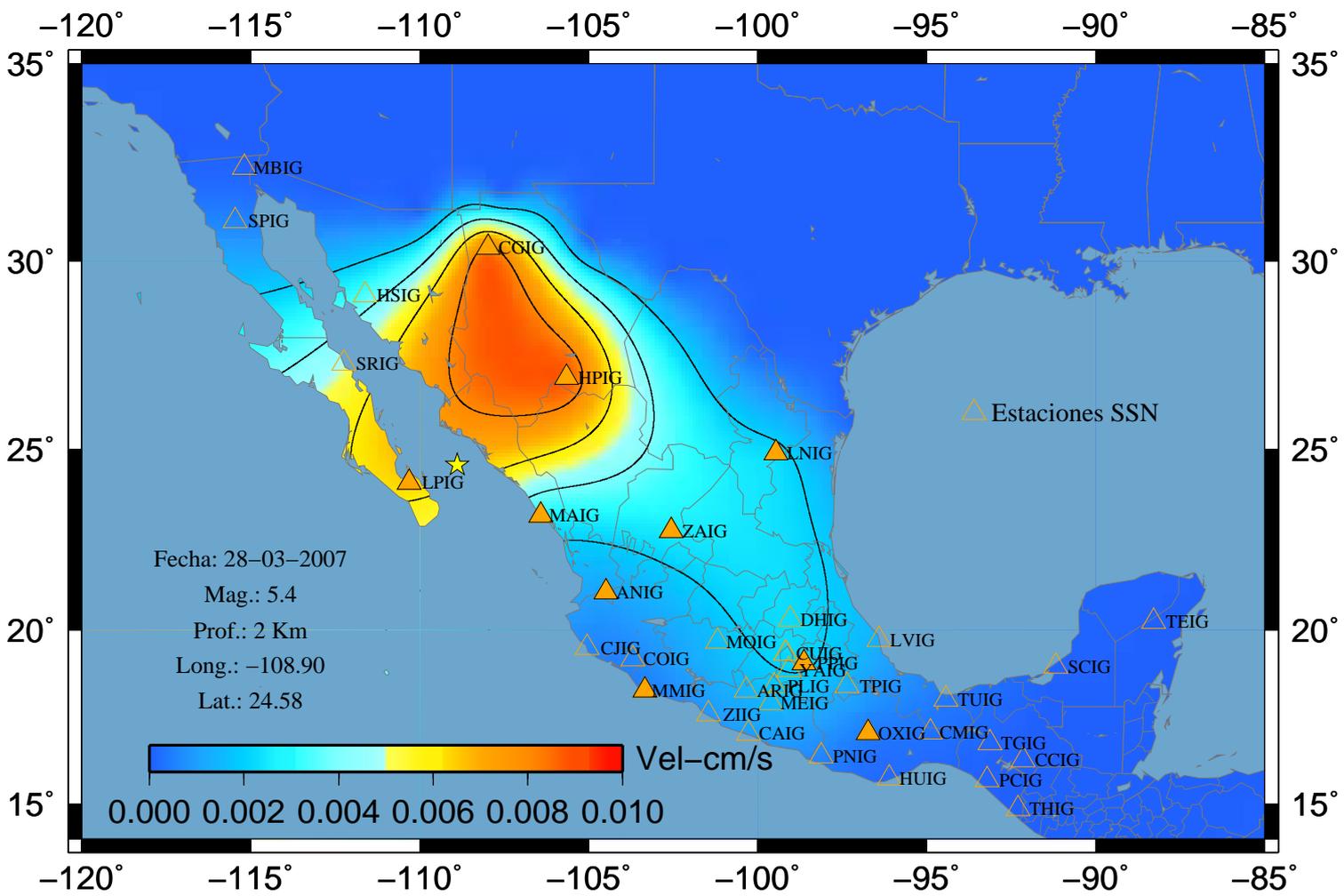
### Sismo 66 A-Vertical



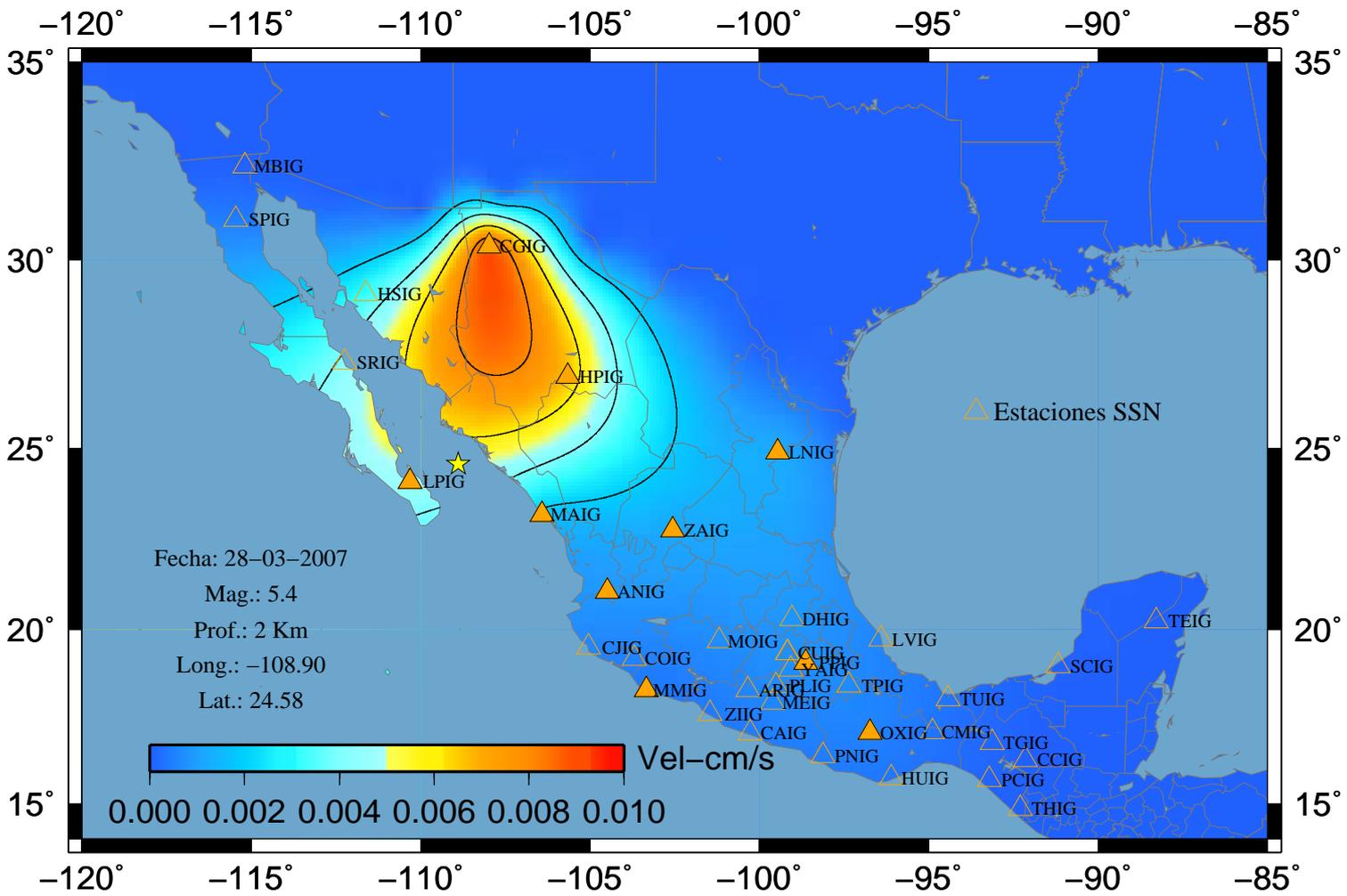
### Sismo 66 V-Este



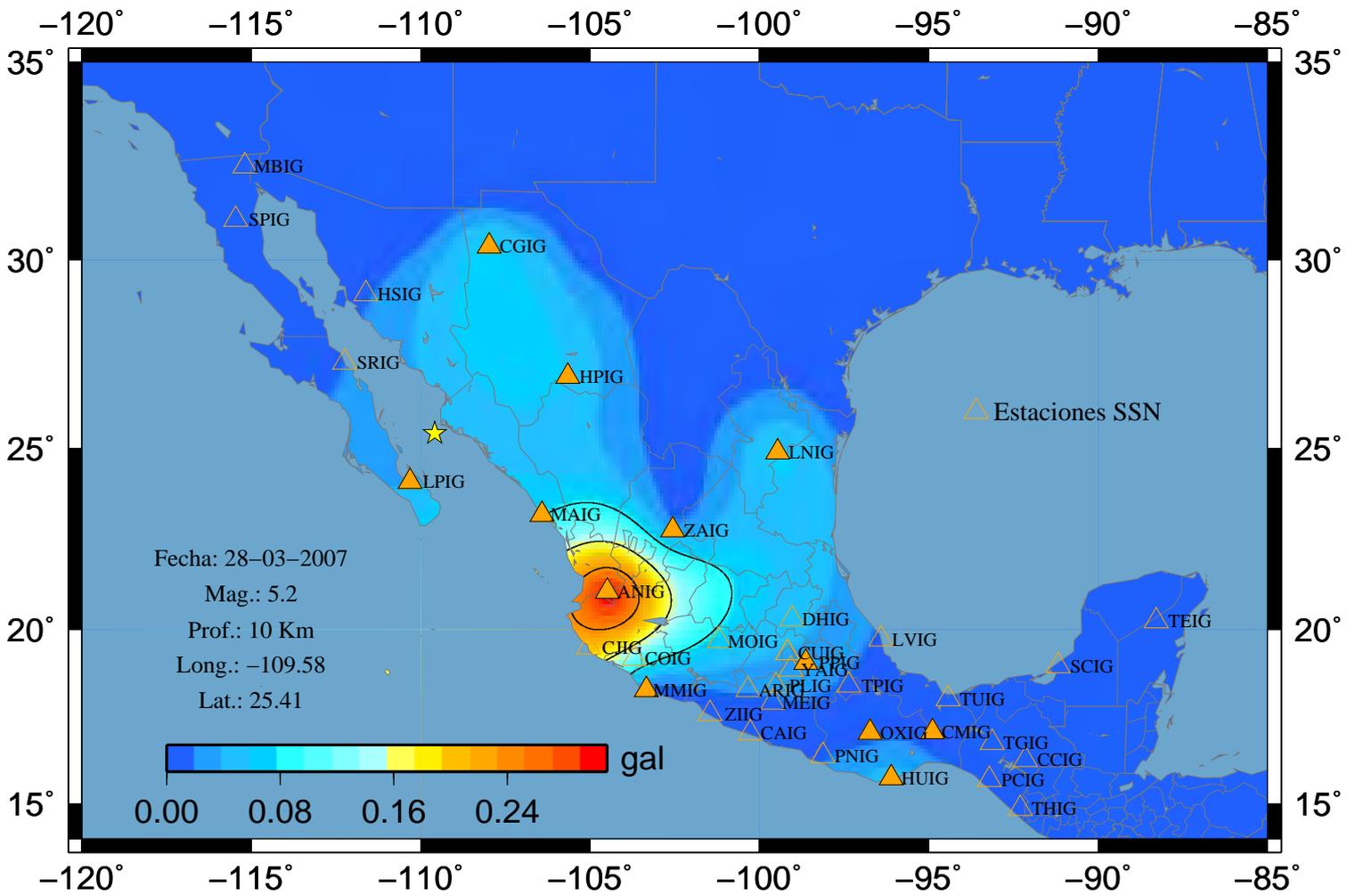
### Sismo 66 V-Norte



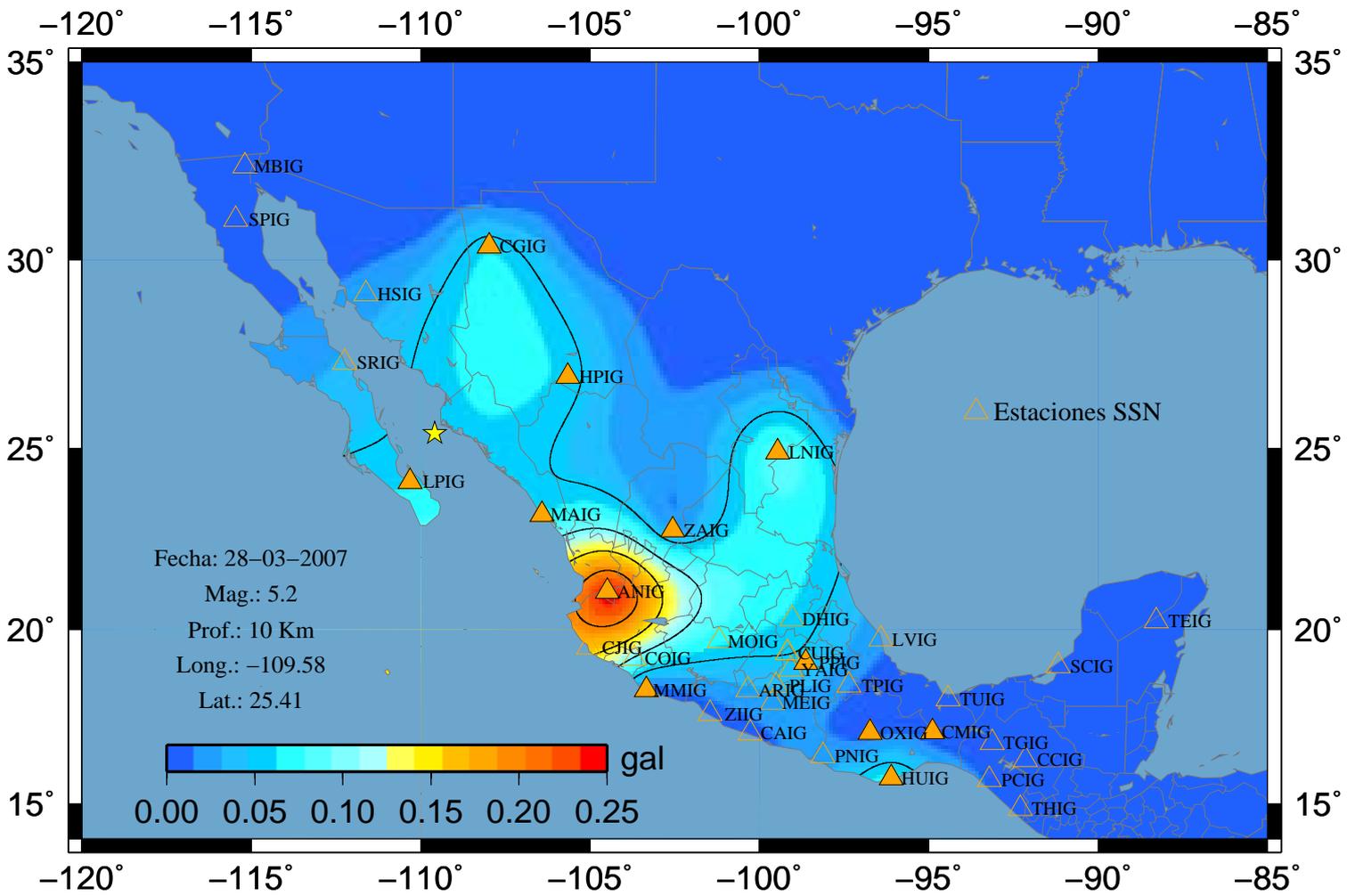
### Sismo 66 V-Vertical



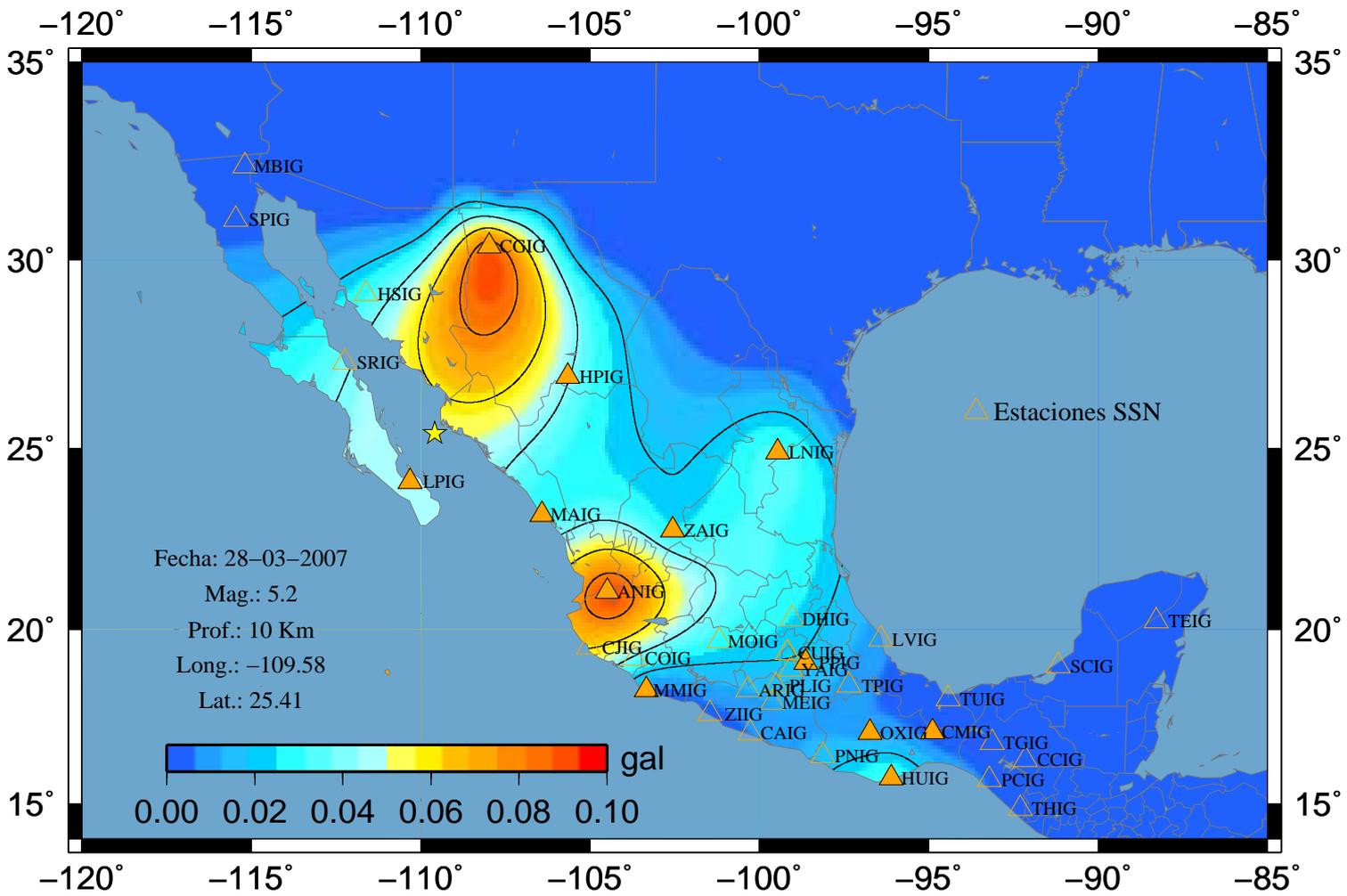
### Sismo 67 A-Este



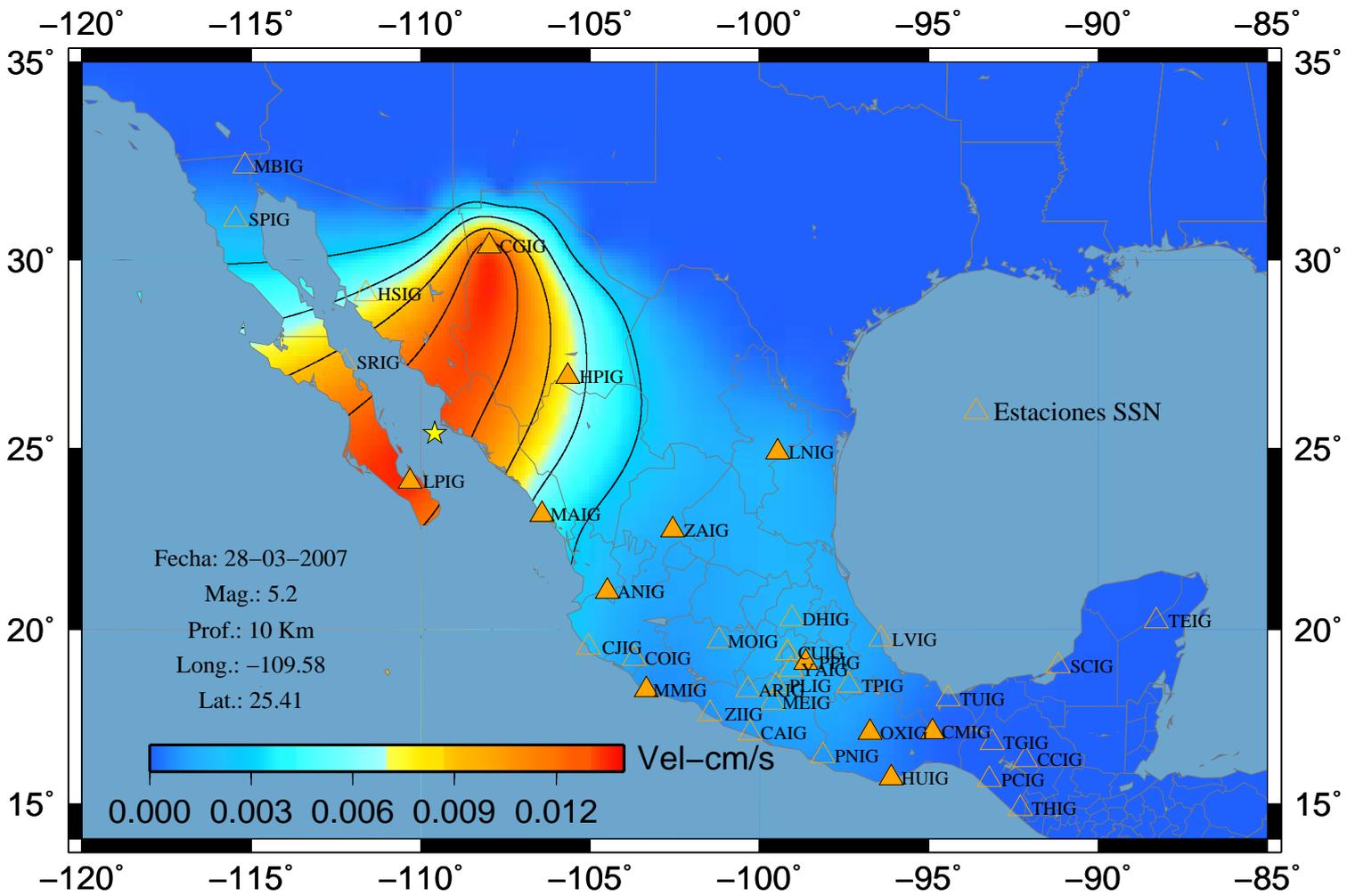
### Sismo 67 A-Norte



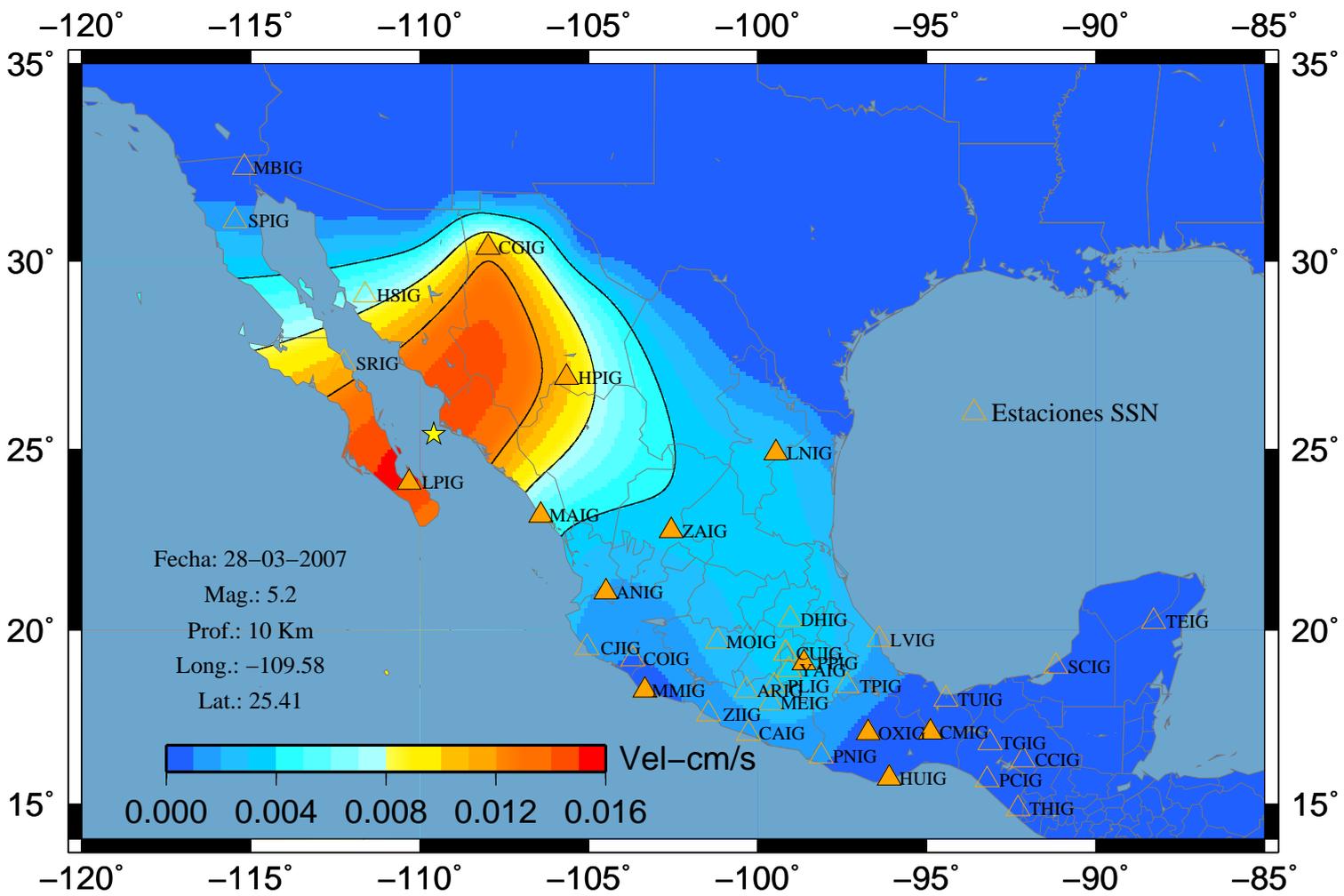
### Sismo 67 A-Vertical



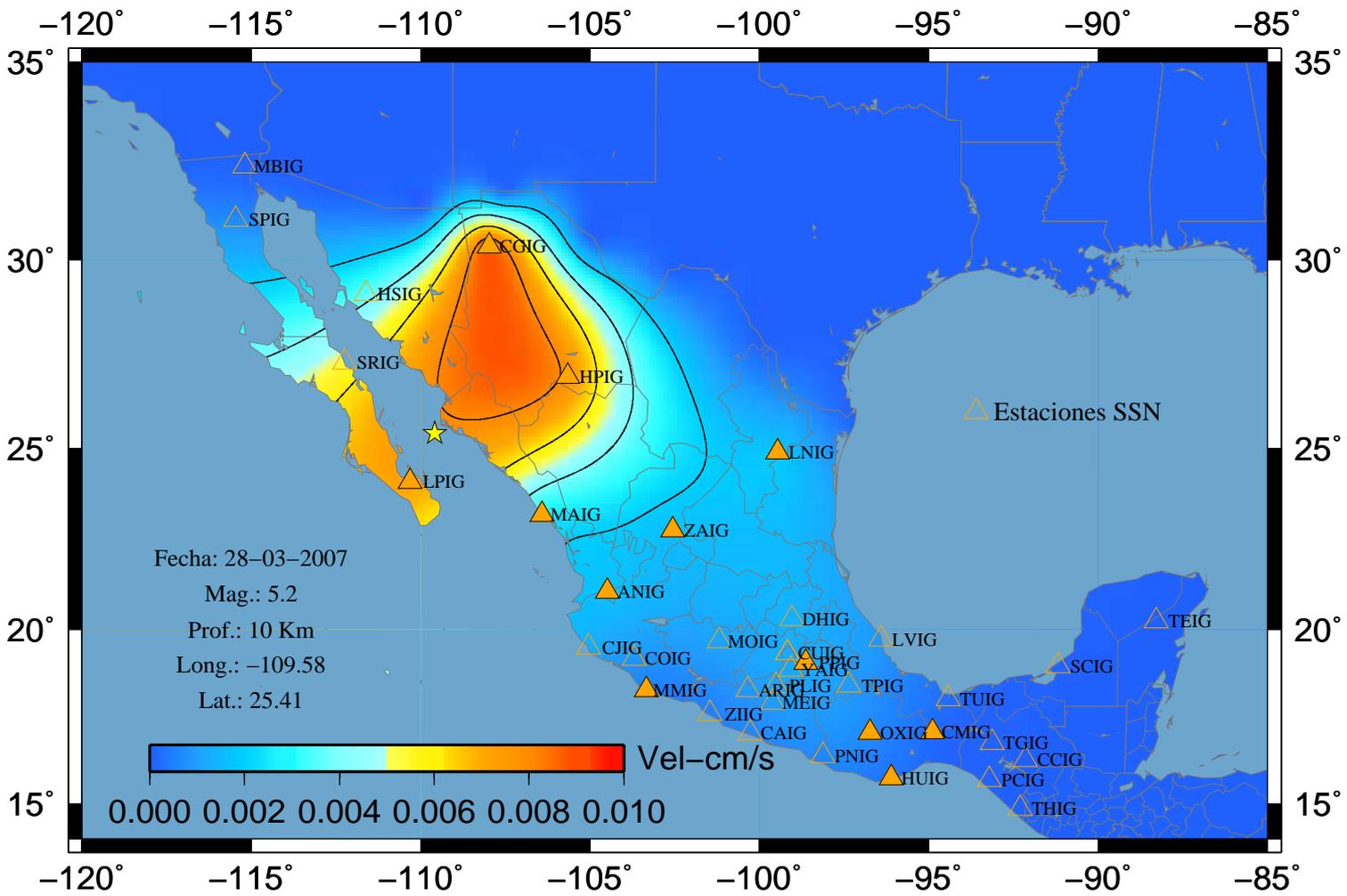
### Sismo 67 V-Este



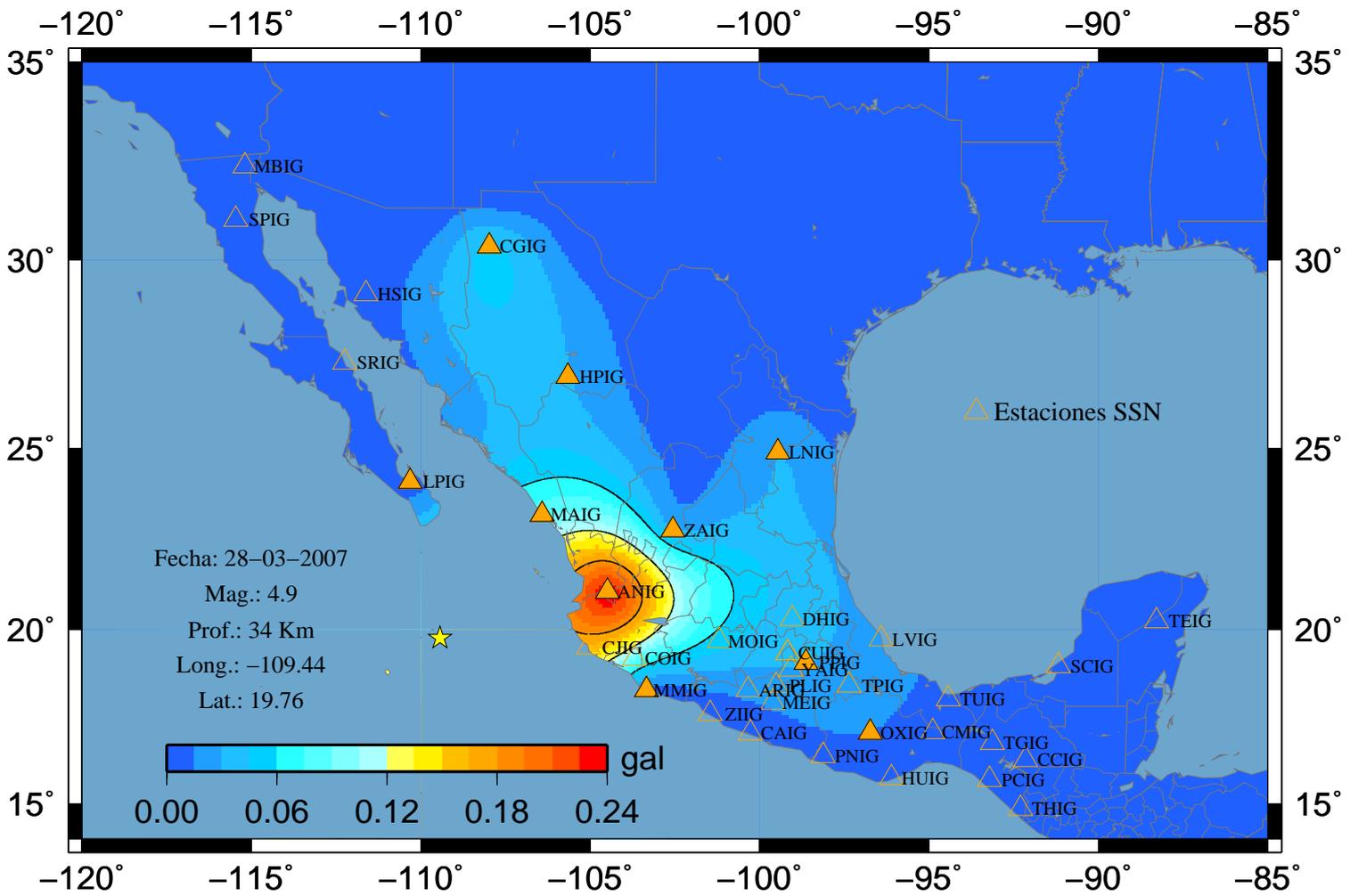
### Sismo 67 V-Norte



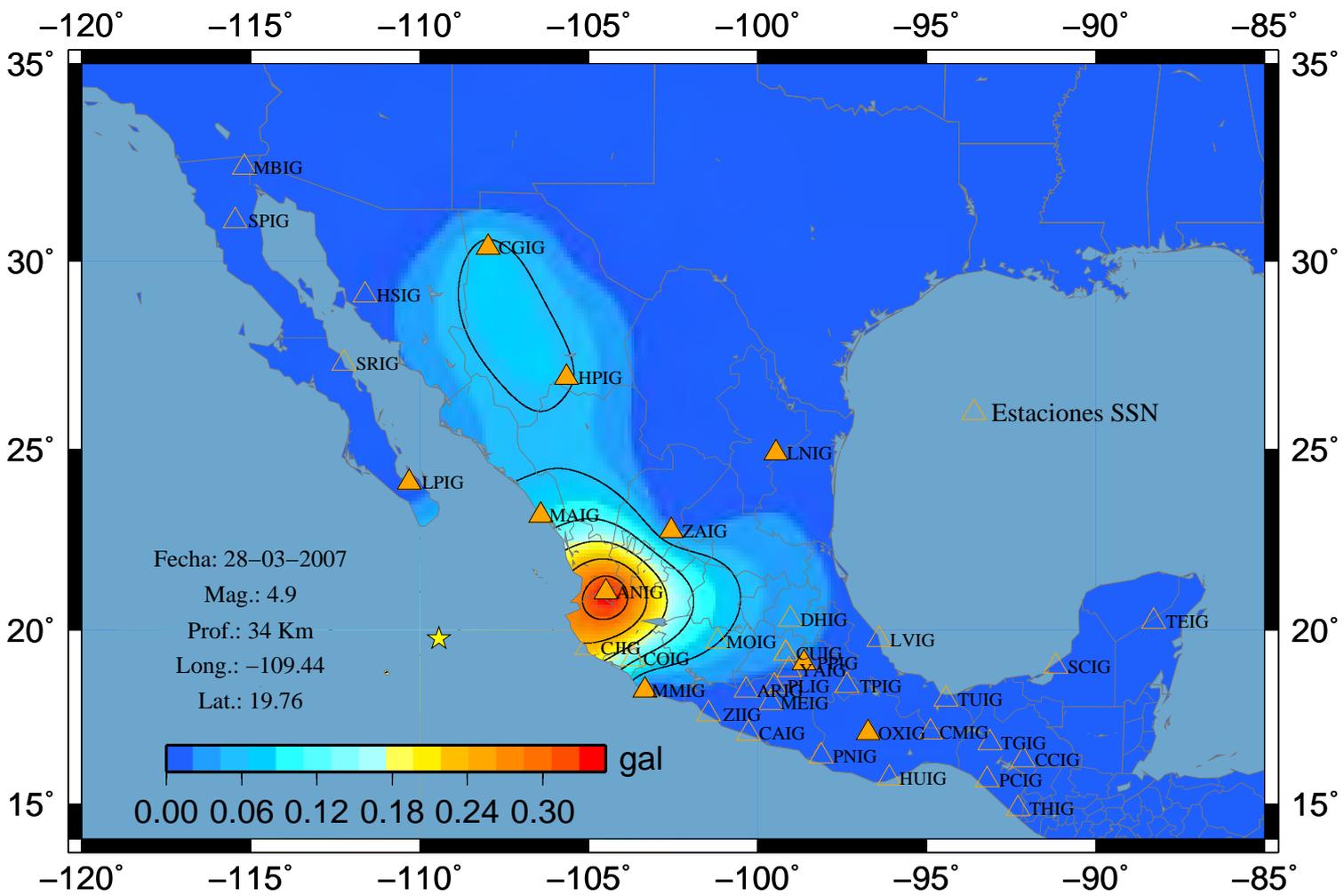
### Sismo 67 V-Vertical



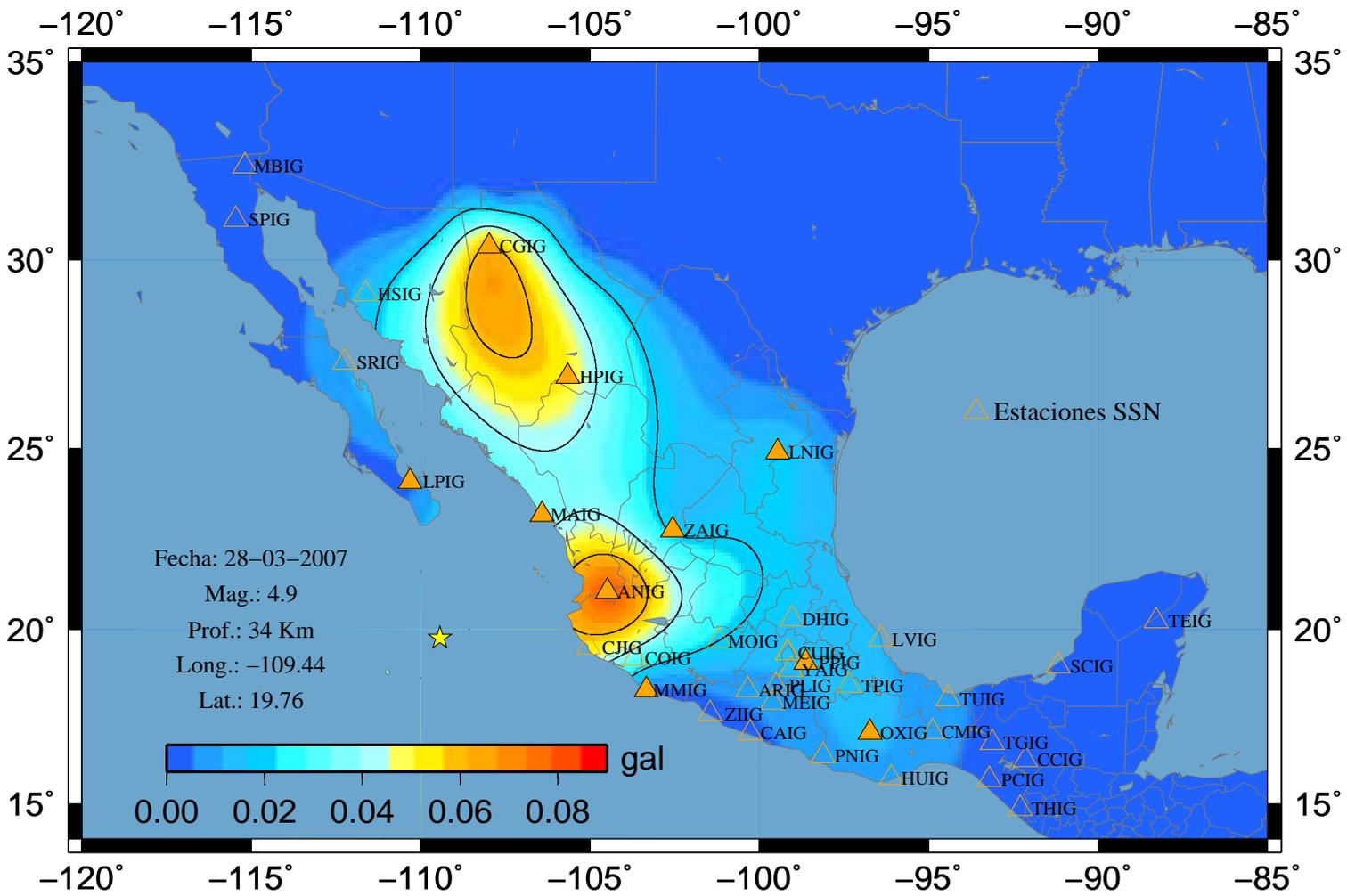
### Sismo 68 A-Este



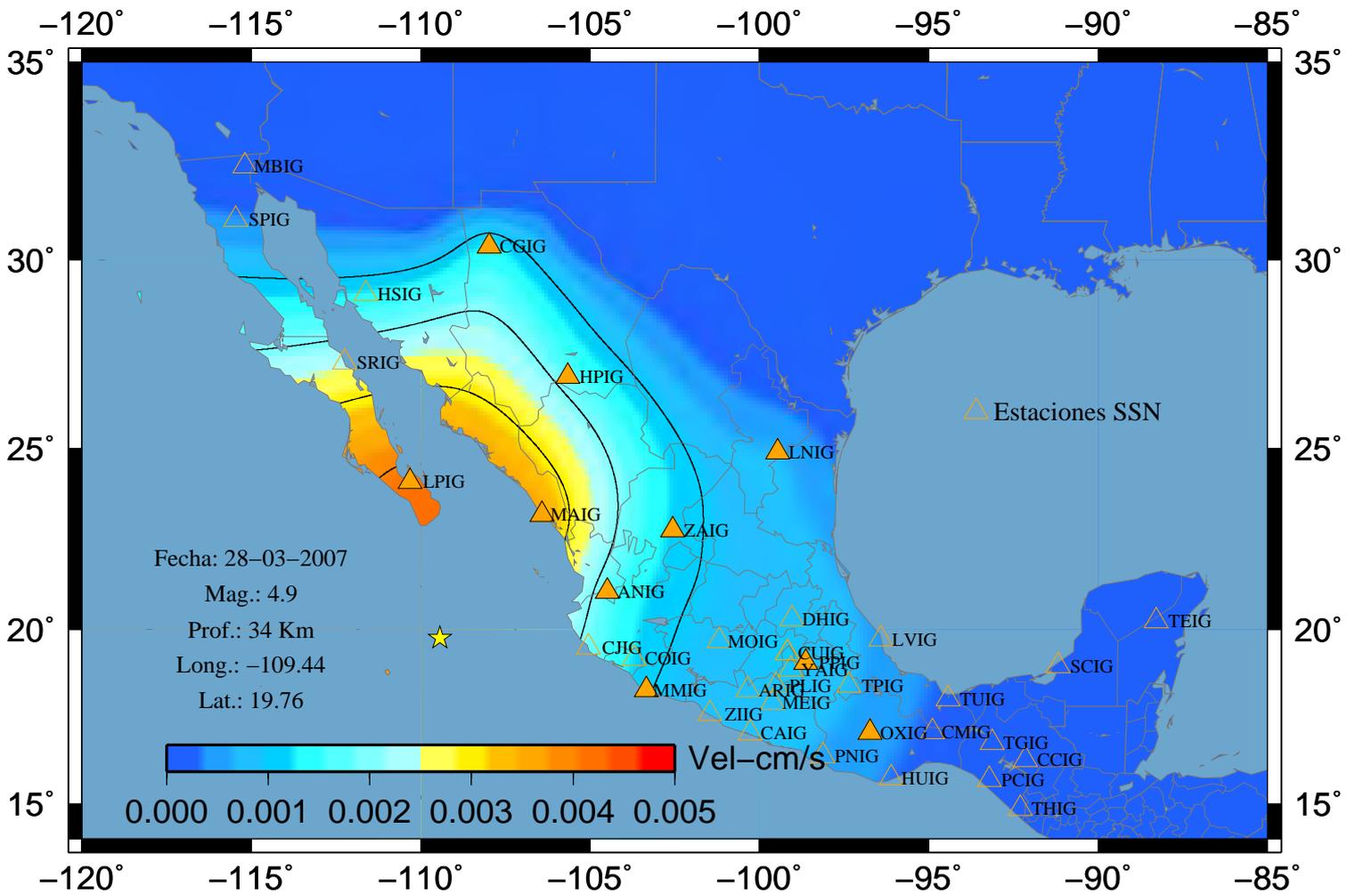
### Sismo 68 A-Norte



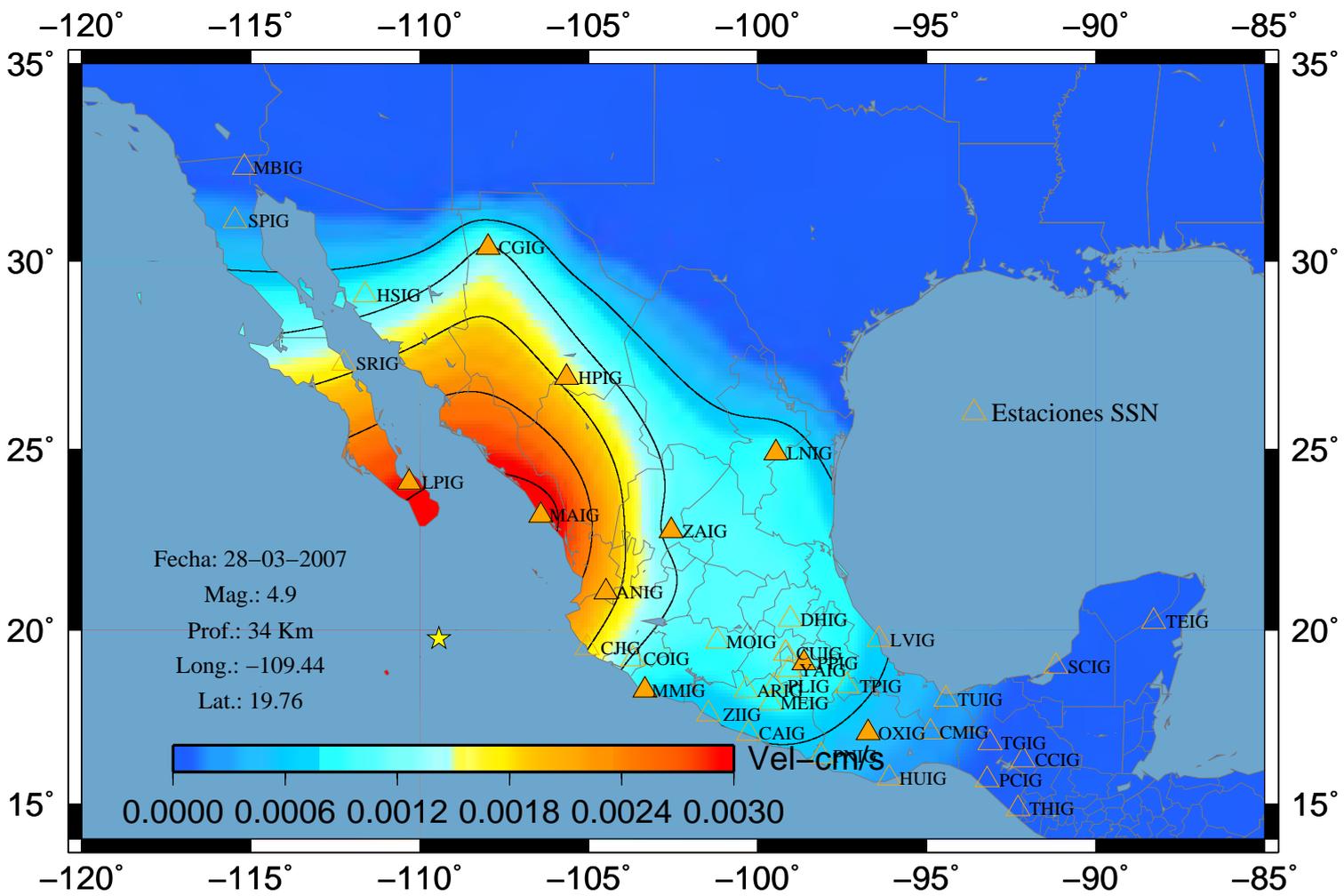
### Sismo 68 A-Vertical



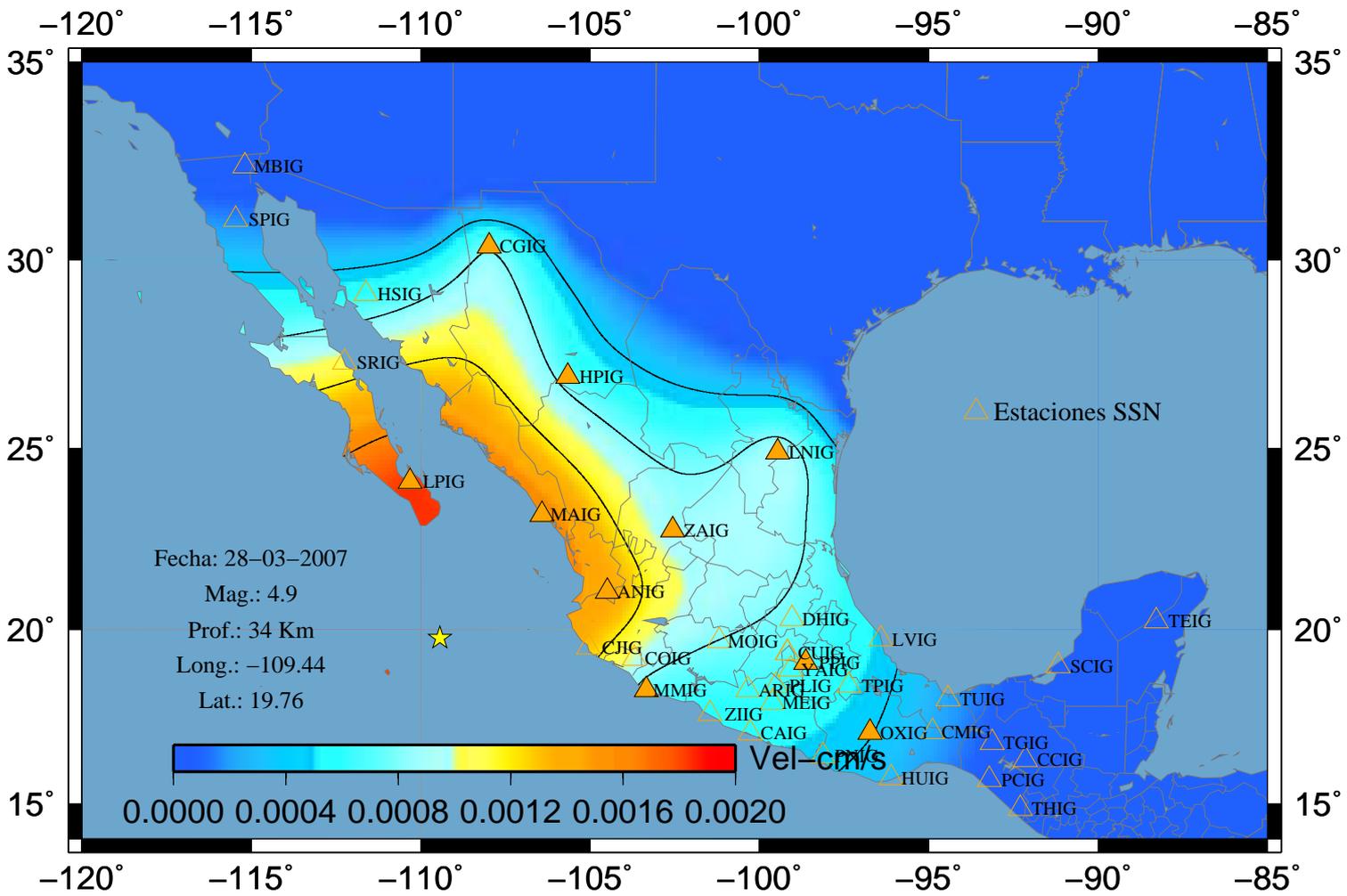
### Sismo 68 V-Este



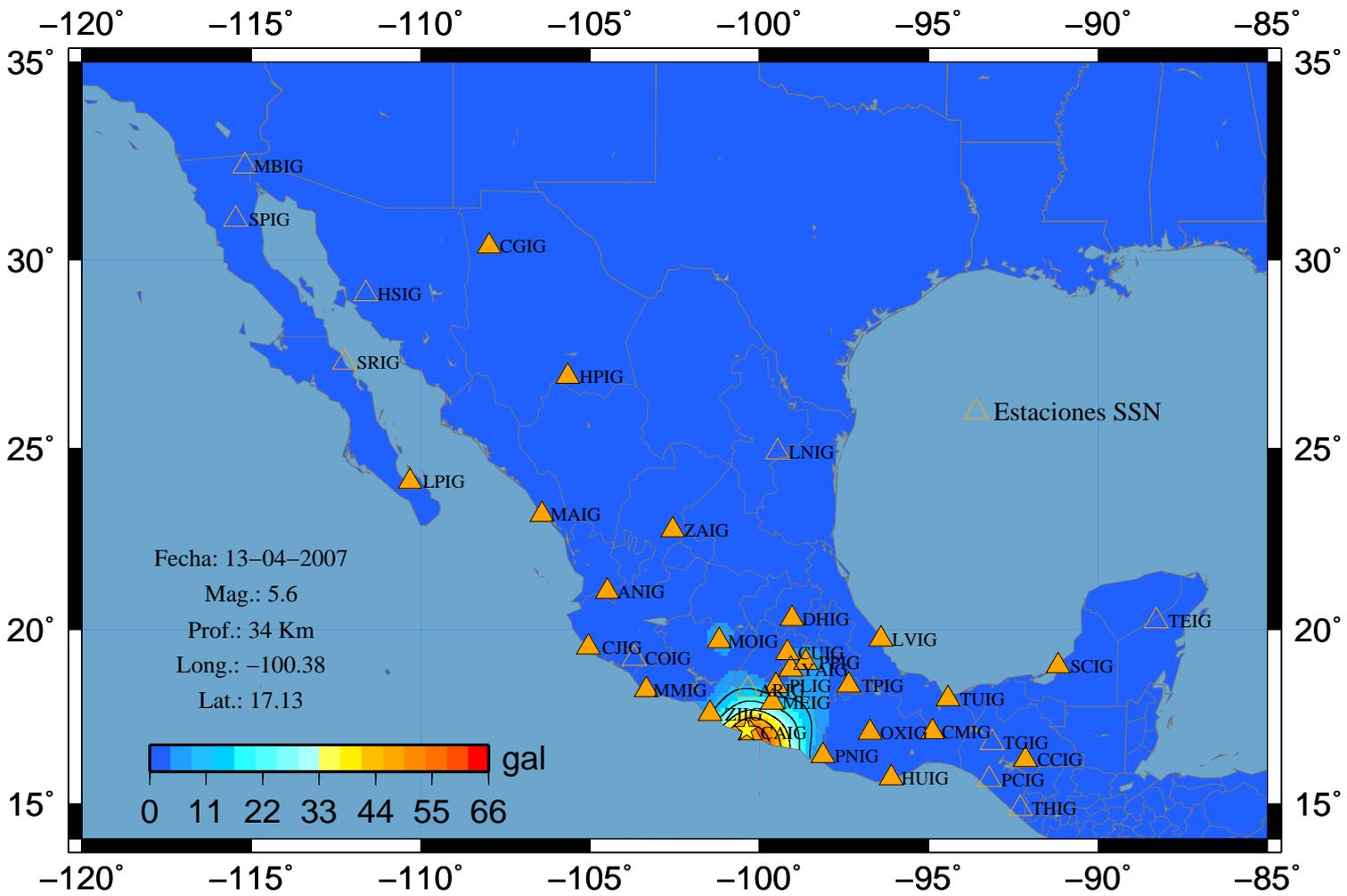
### Sismo 68 V-Norte



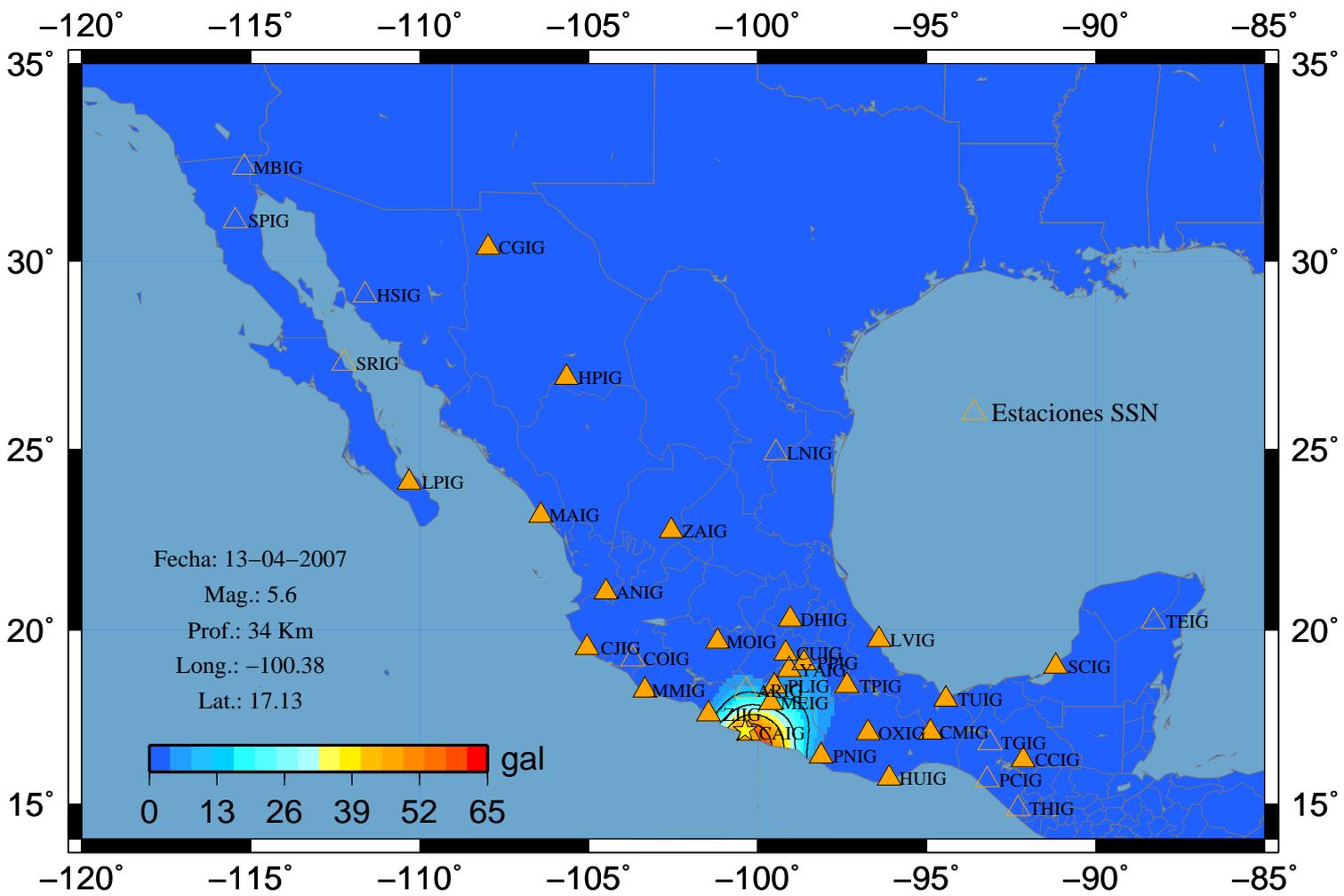
### Sismo 68 V-Vertical



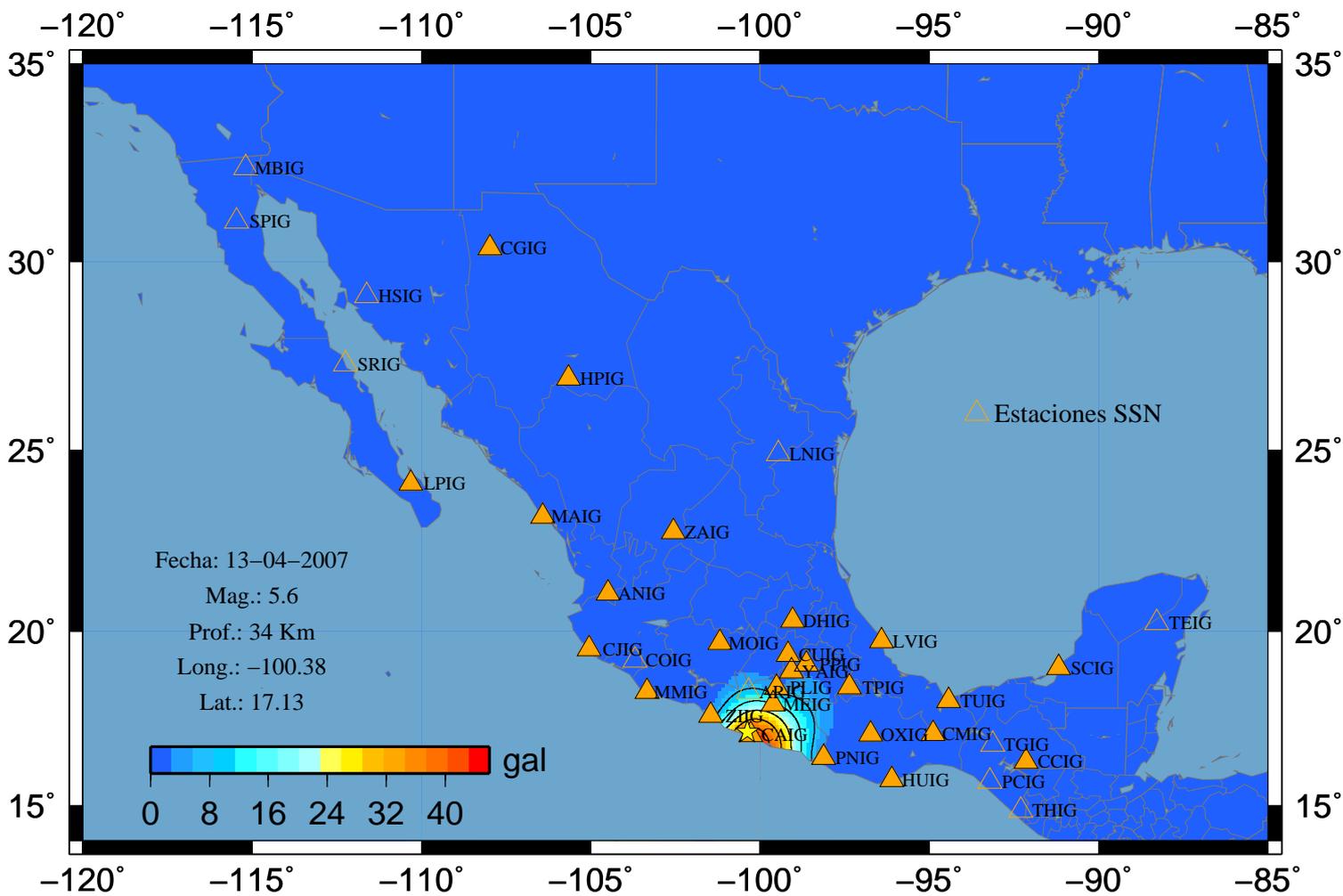
# Sismo 69 A-Este



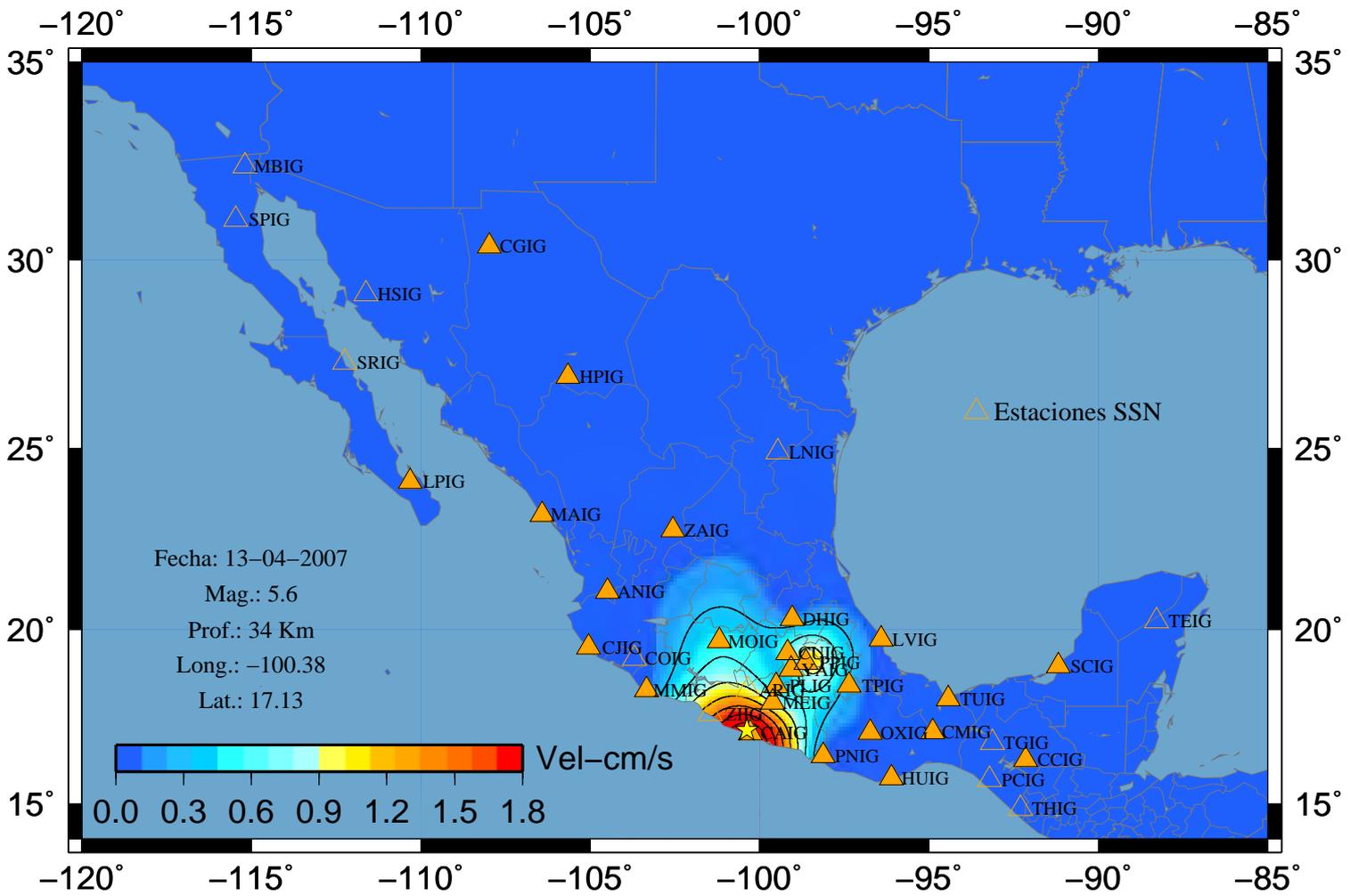
# Sismo 69 A-Norte



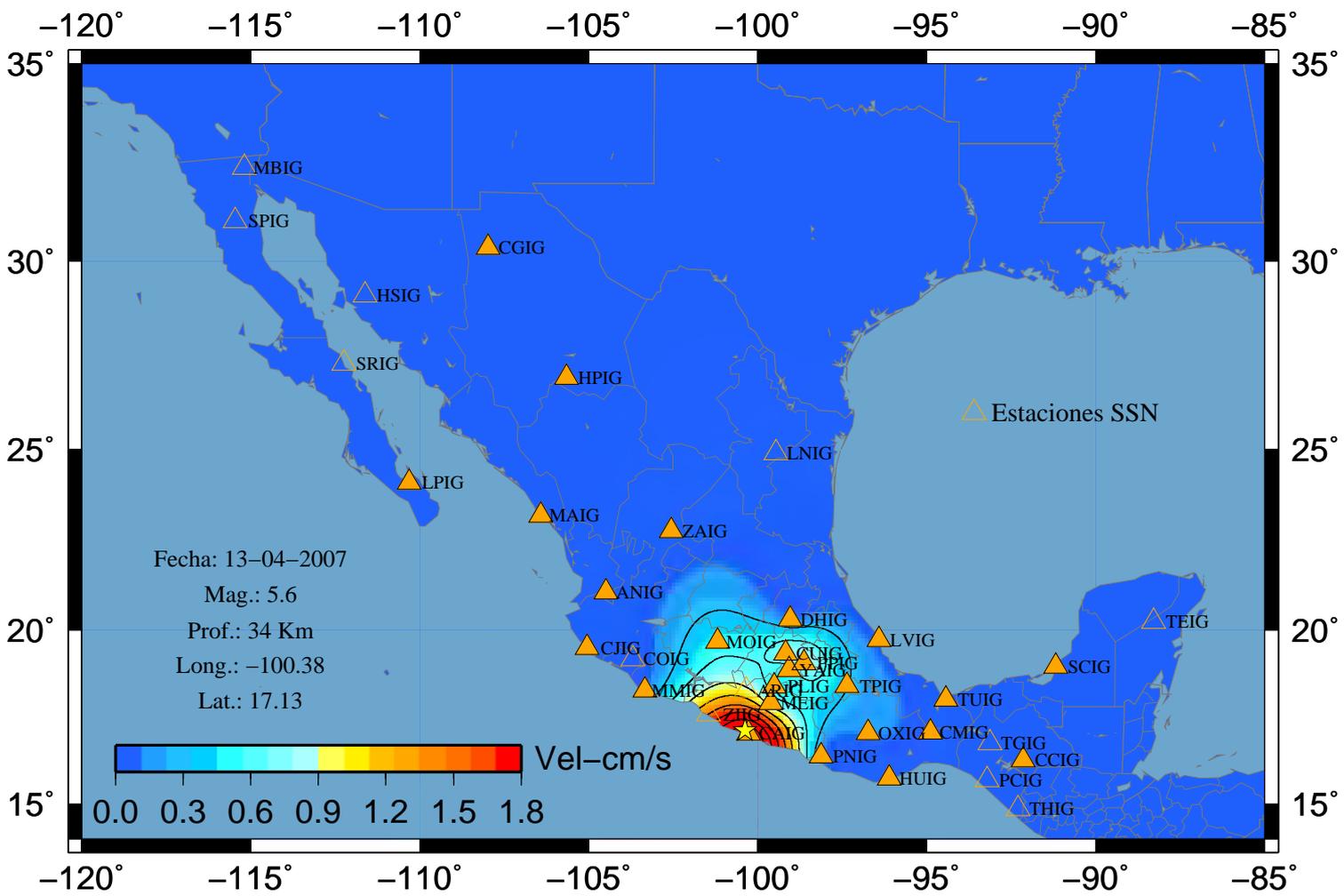
### Sismo 69 A-Vertical



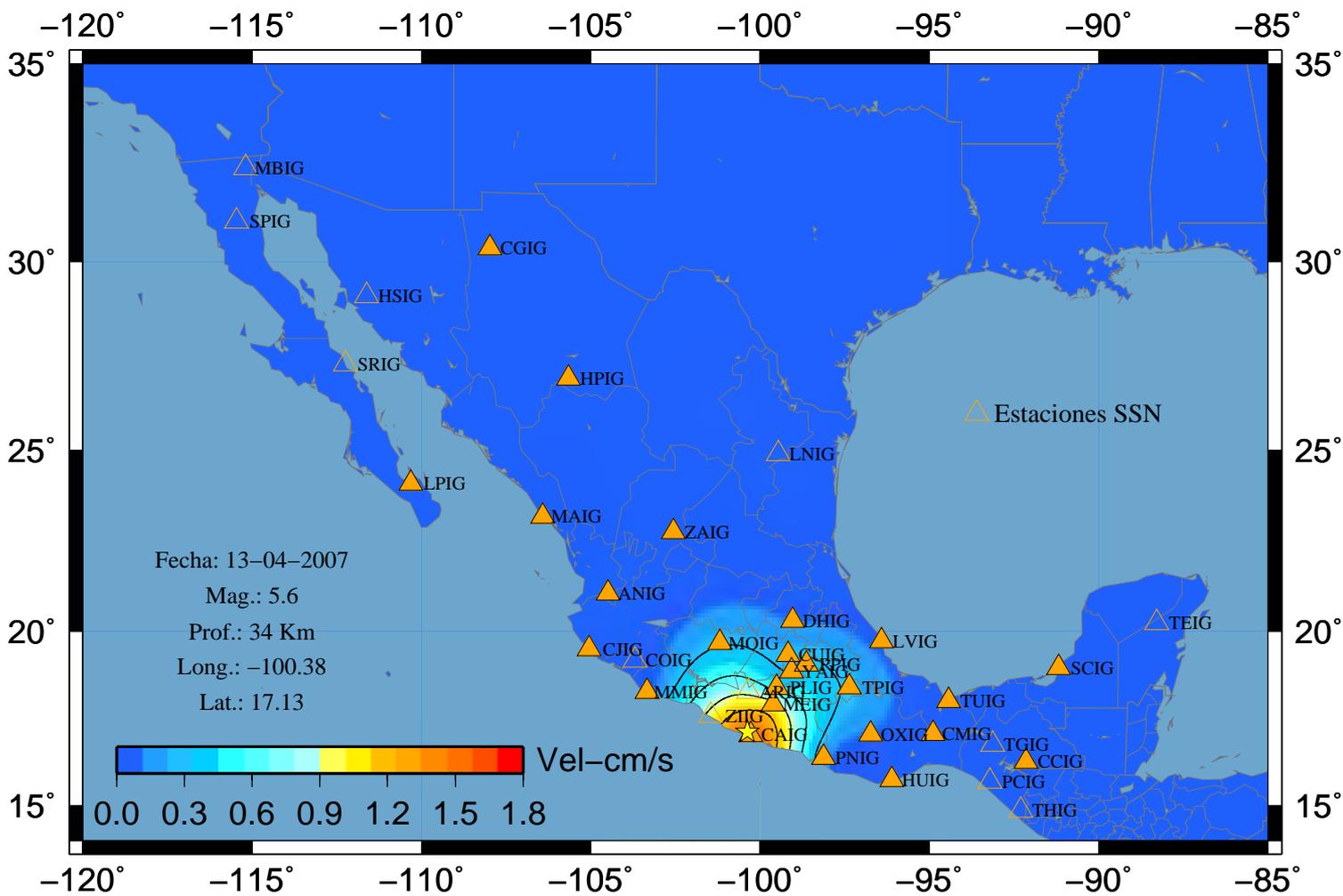
# Sismo 69 V-Este



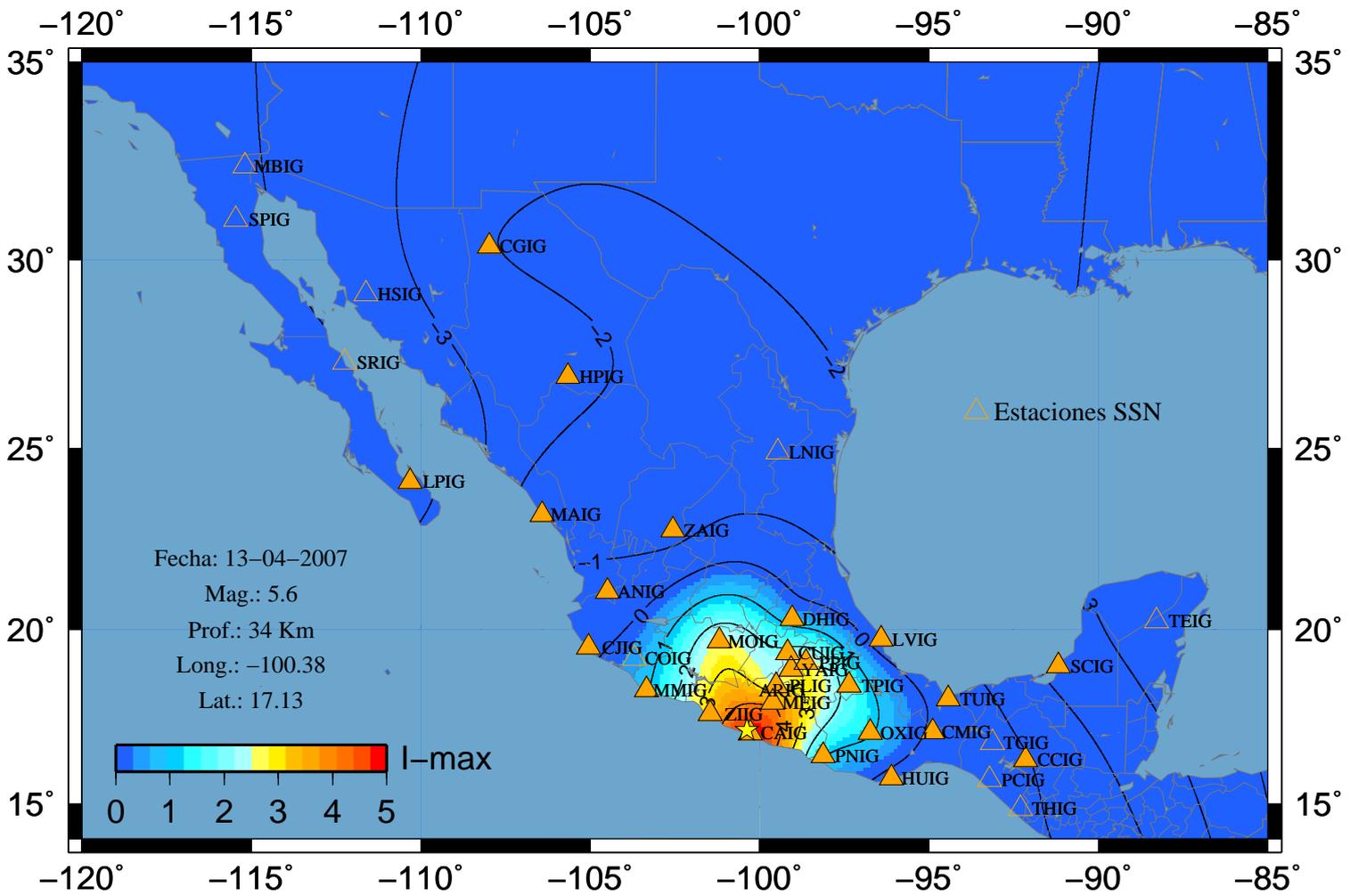
# Sismo 69 V-Norte



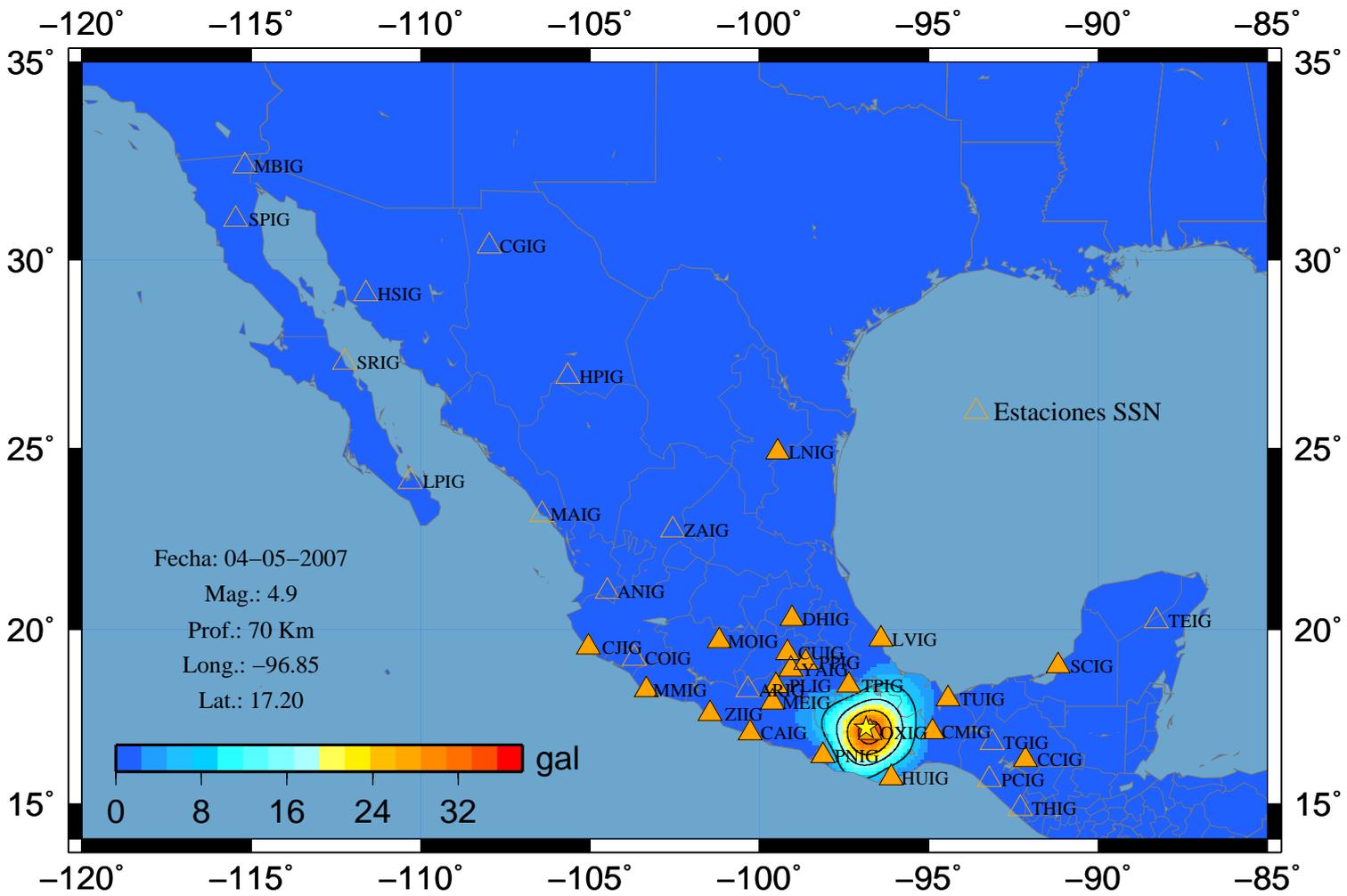
### Sismo 69 V-Vertical



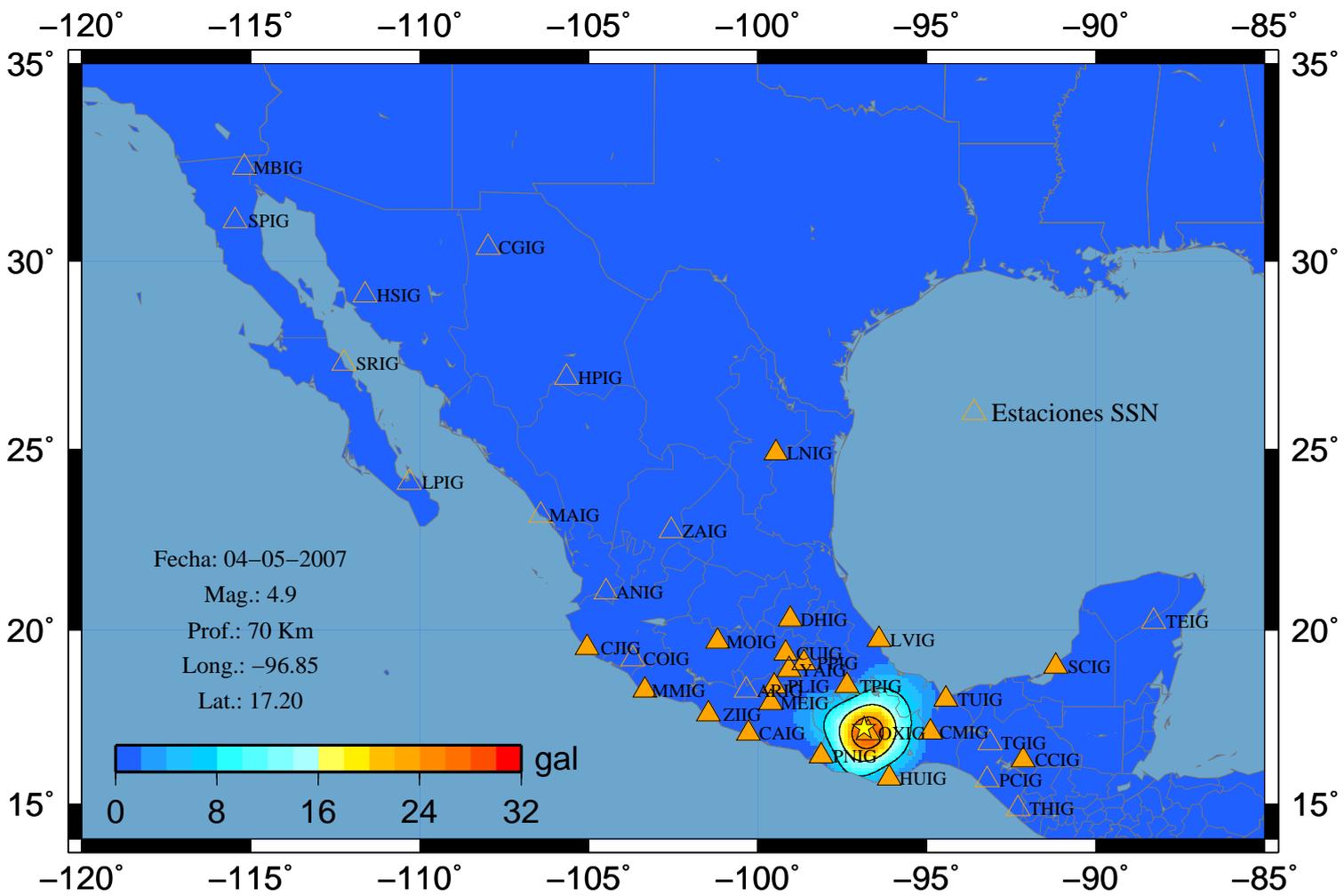
### Sismo 69 I (Max)



# Sismo 70 A-Este

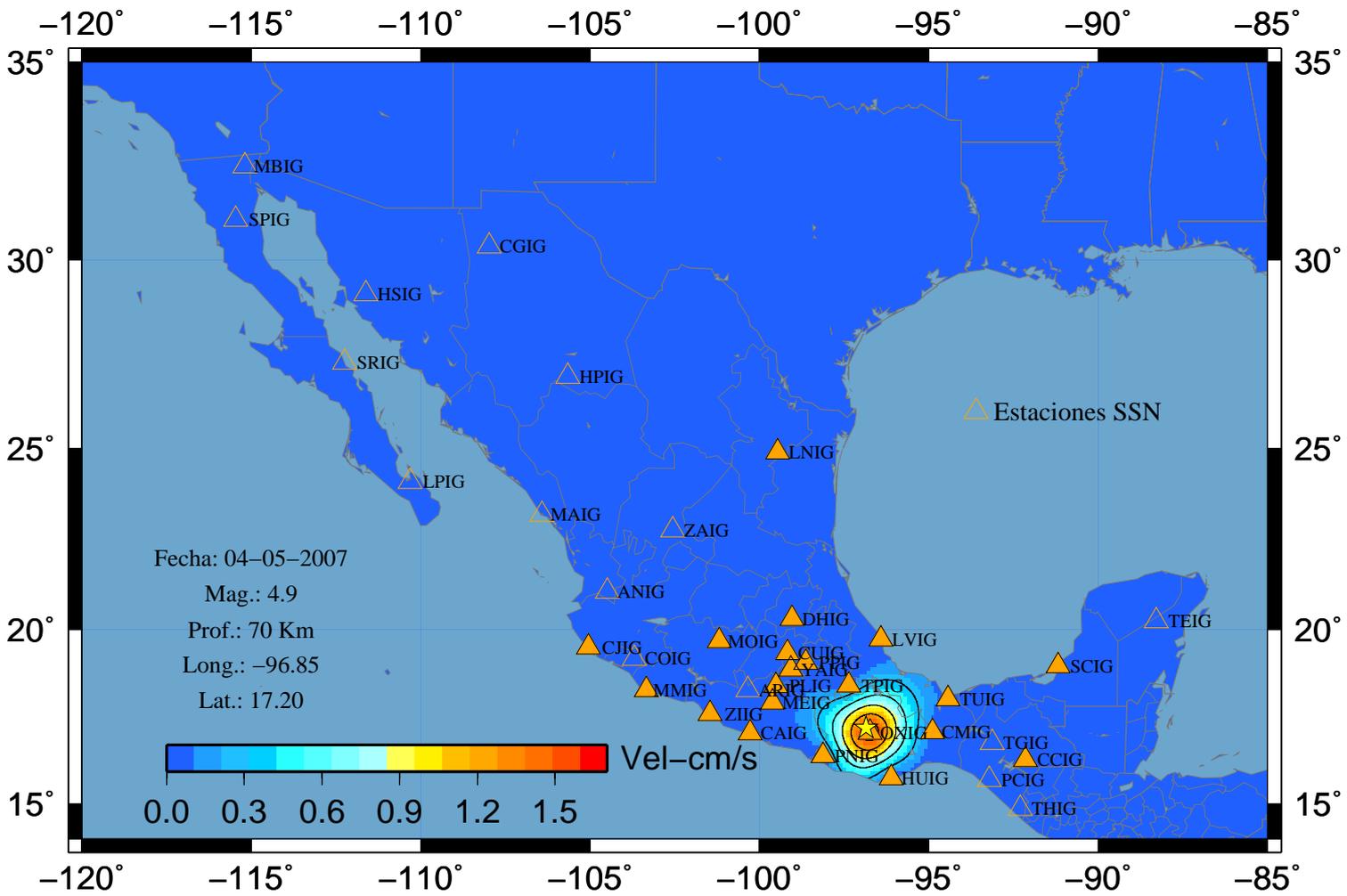


# Sismo 70 A-Norte

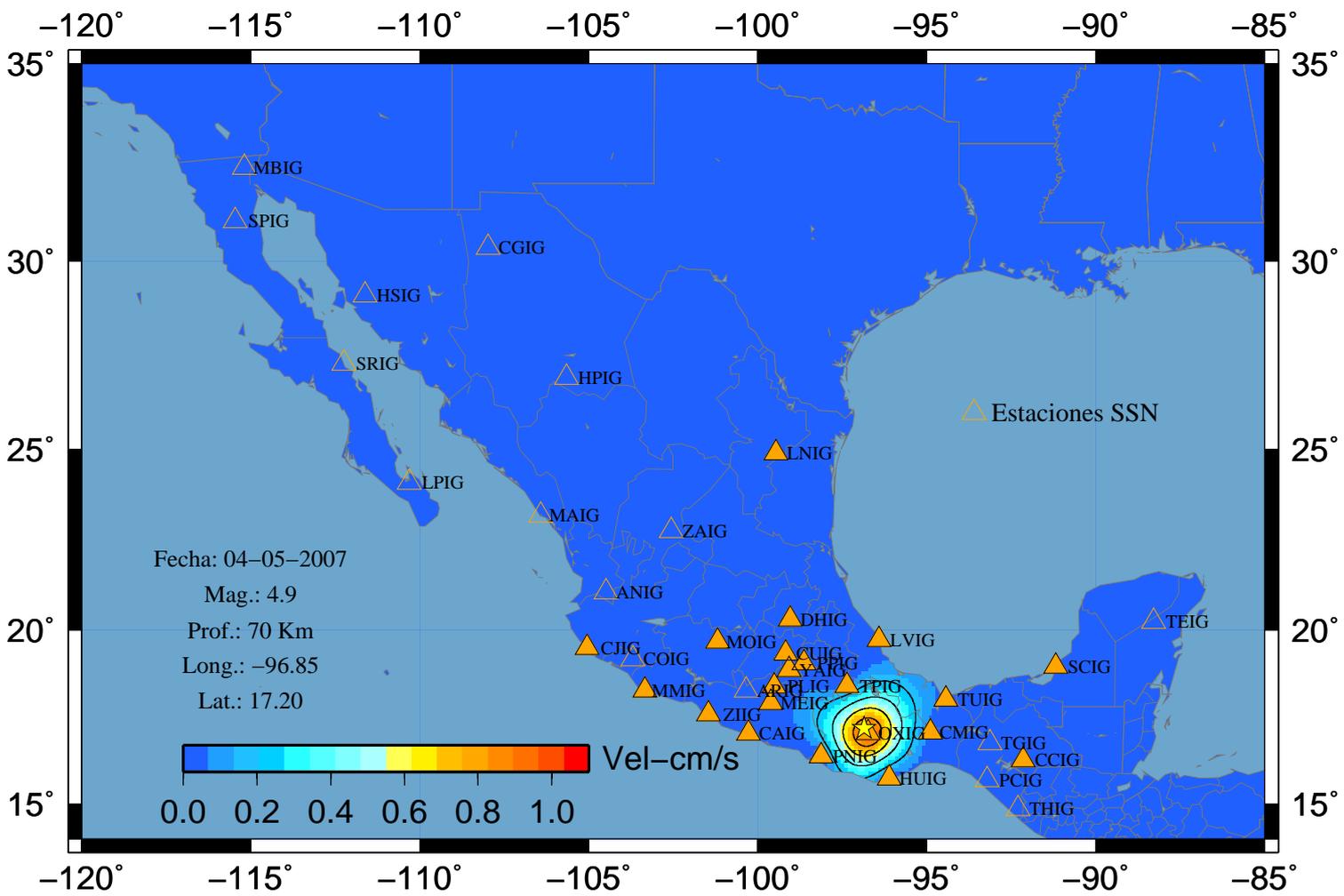




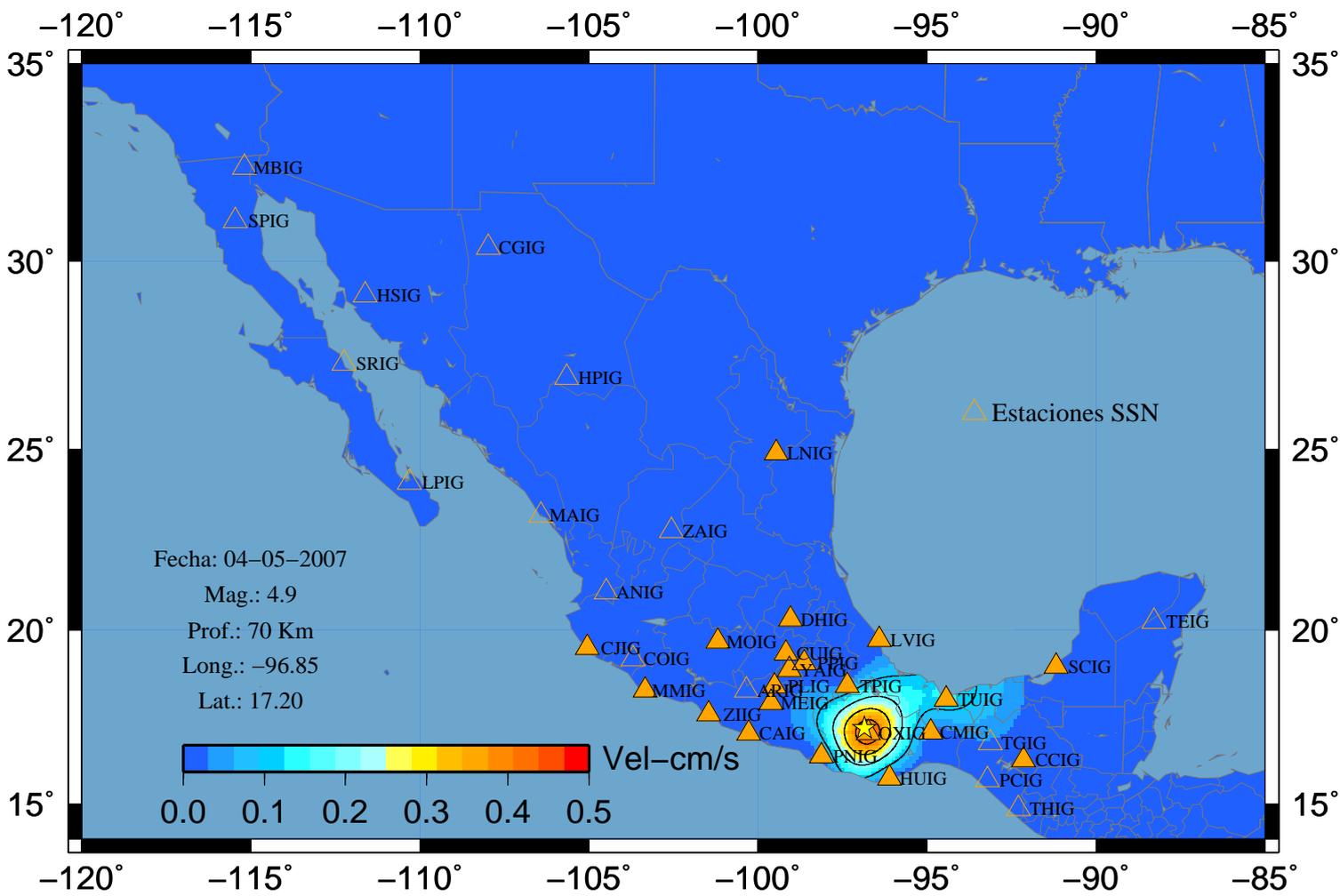
# Sismo 70 V-Este



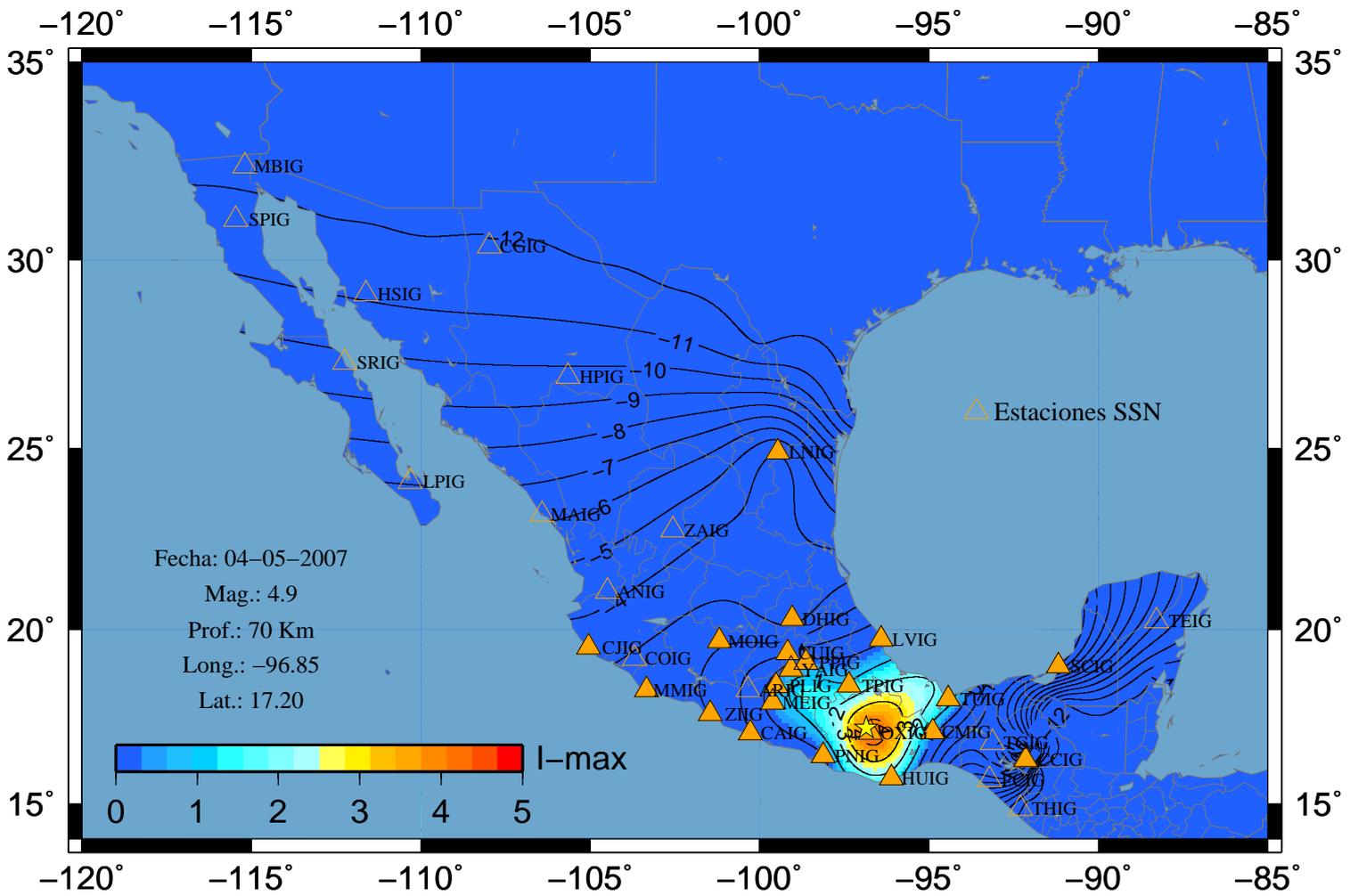
# Sismo 70 V-Norte



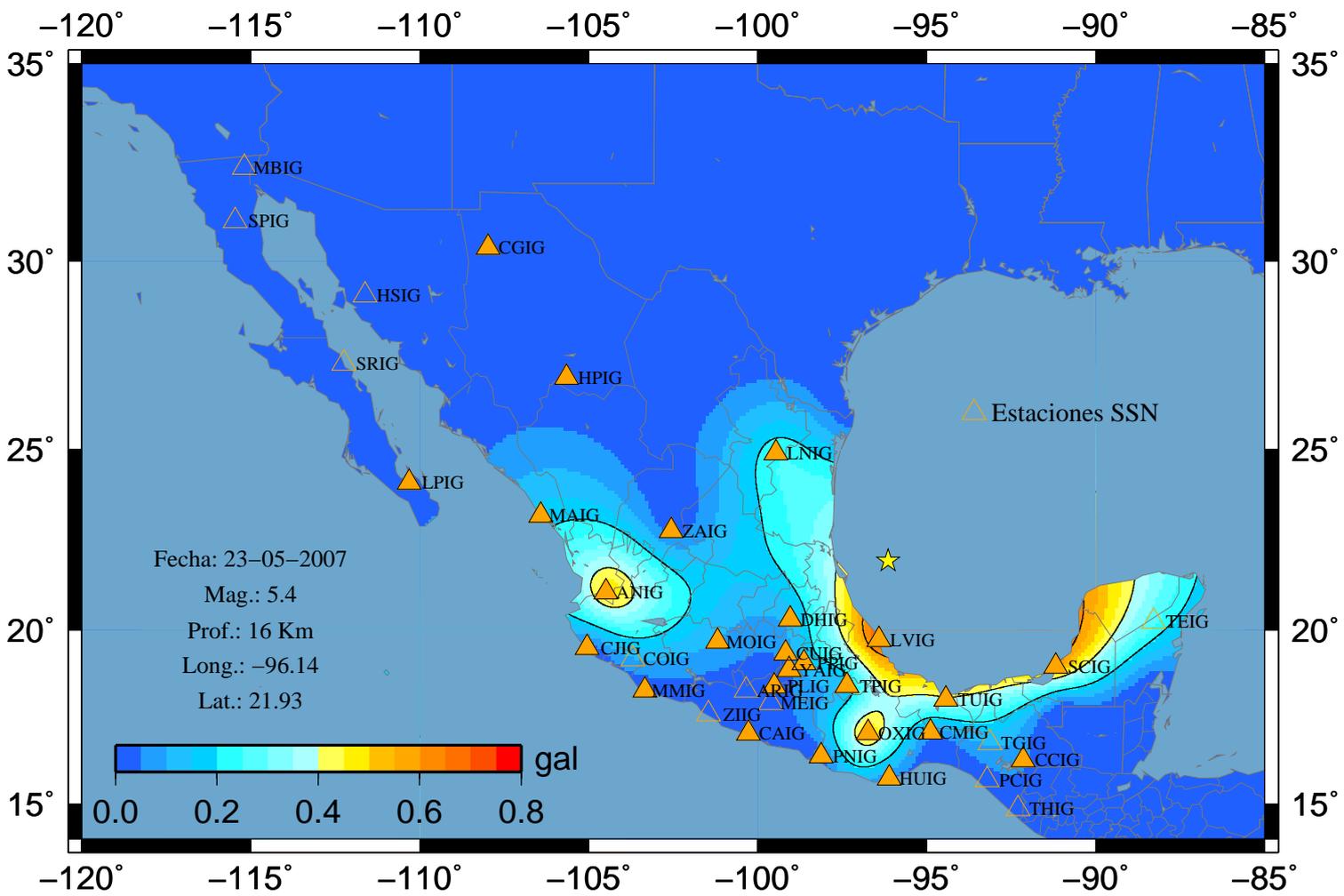
# Sismo 70 V-Vertical



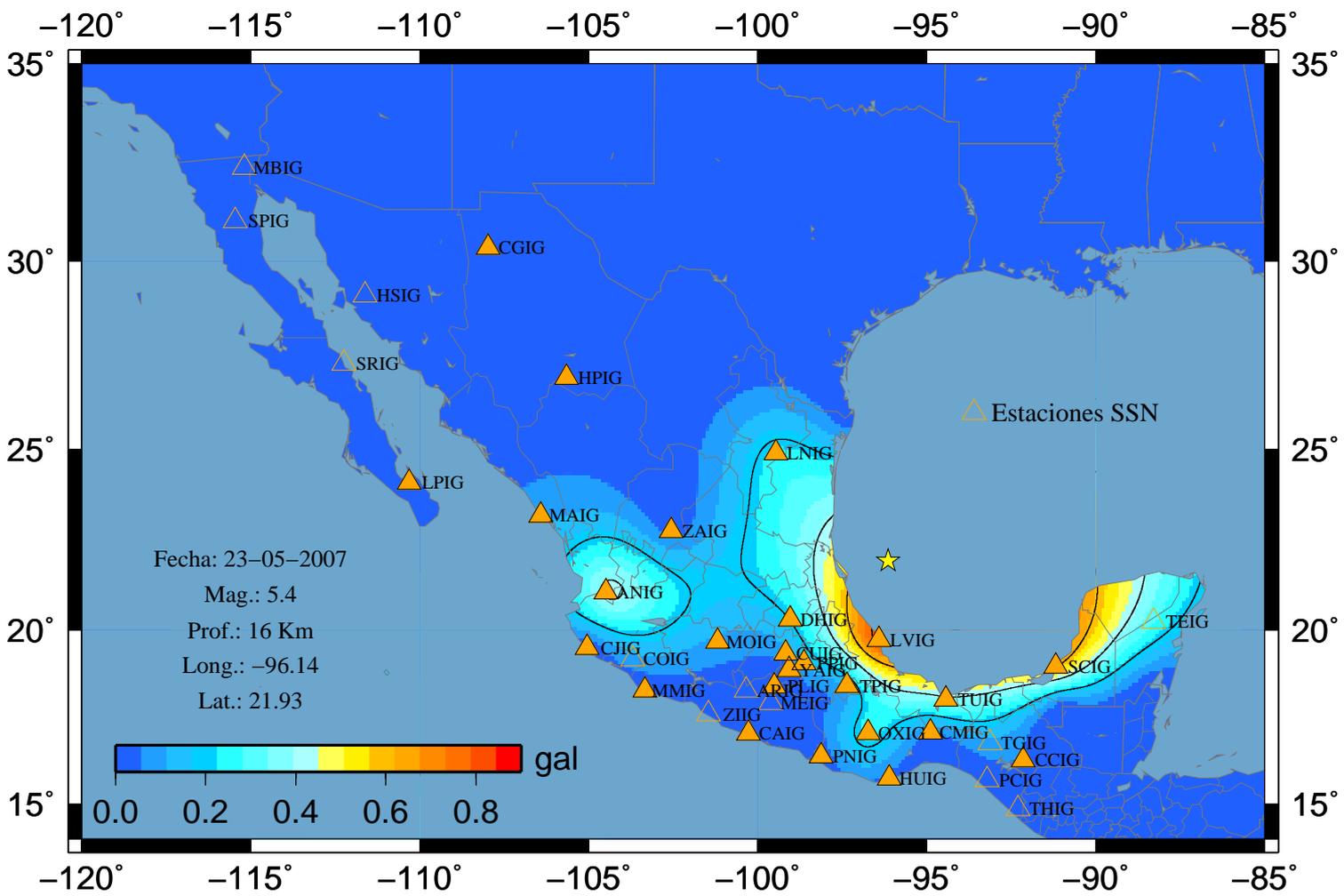
### Sismo 70 I (Max)



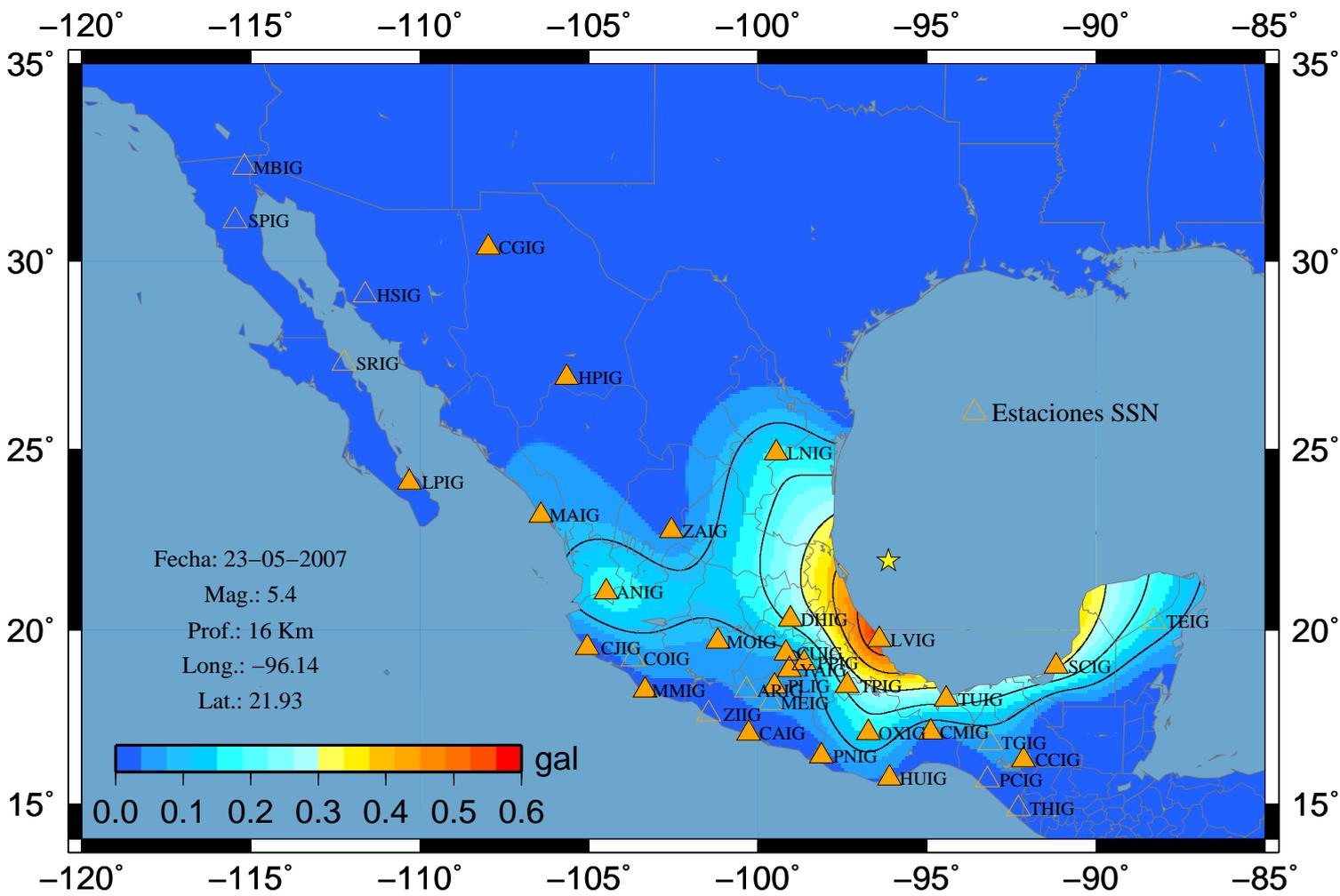
# Sismo 71 A-Este



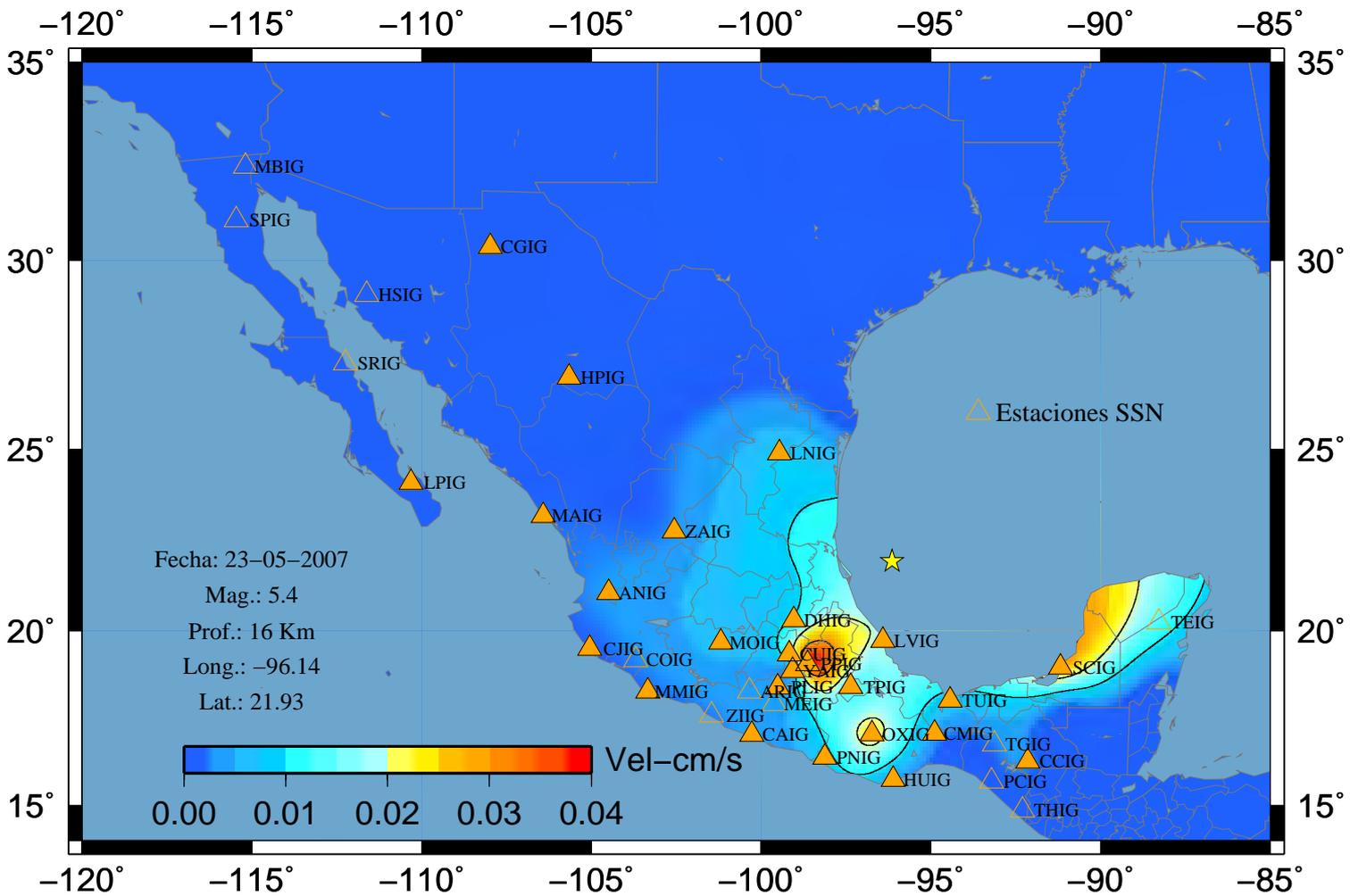
### Sismo 71 A-Norte



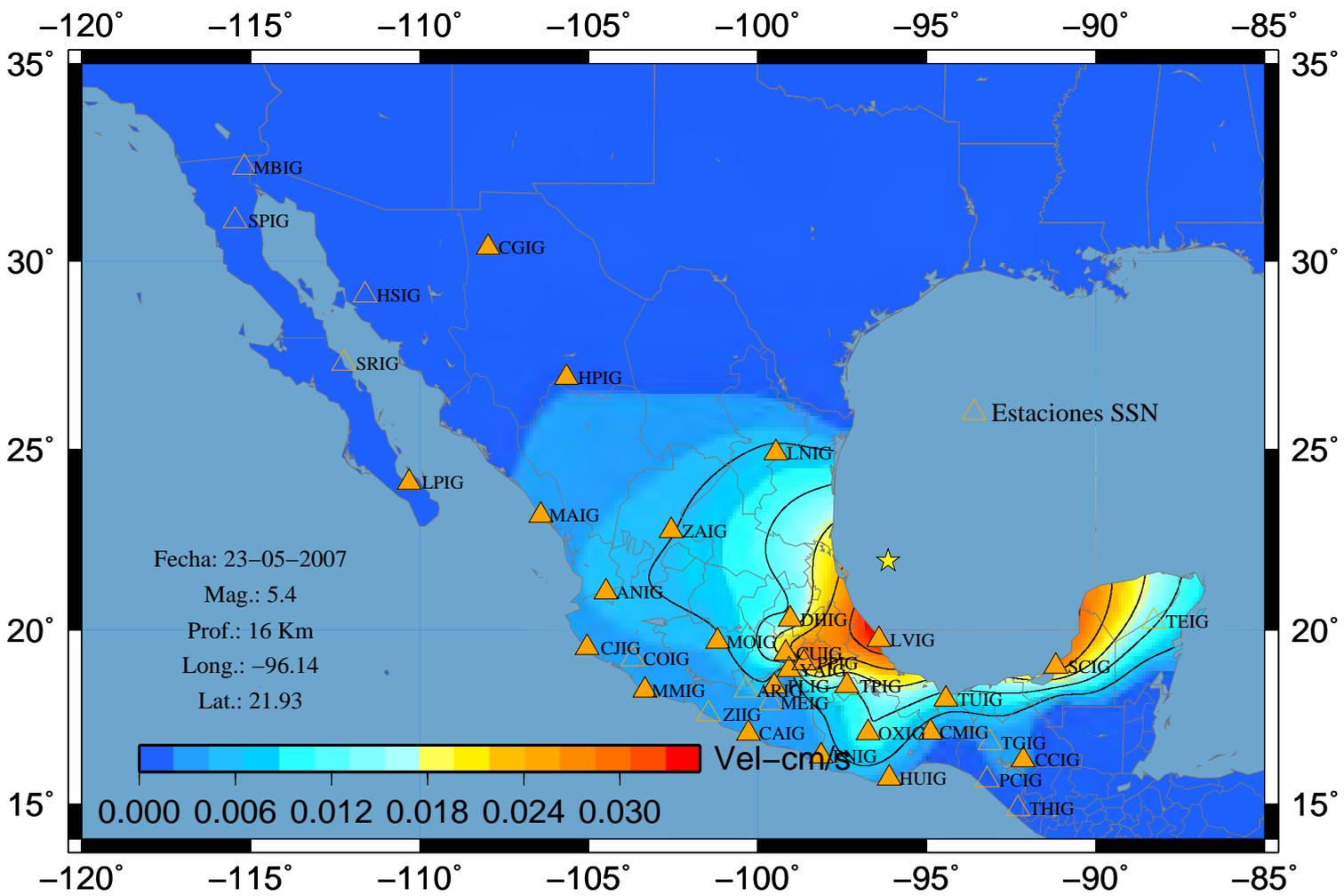
# Sismo 71 A-Vertical



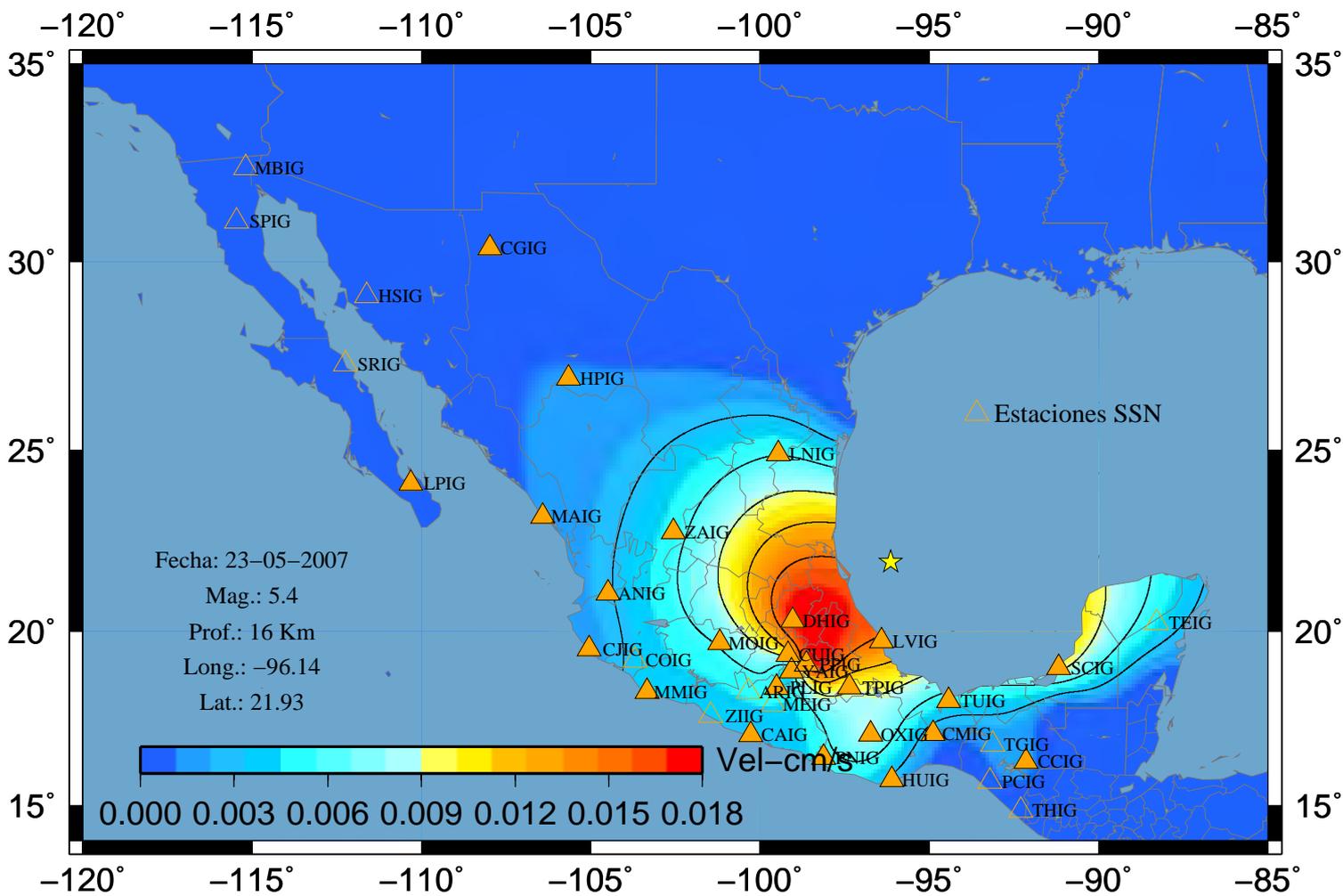
# Sismo 71 V-Este



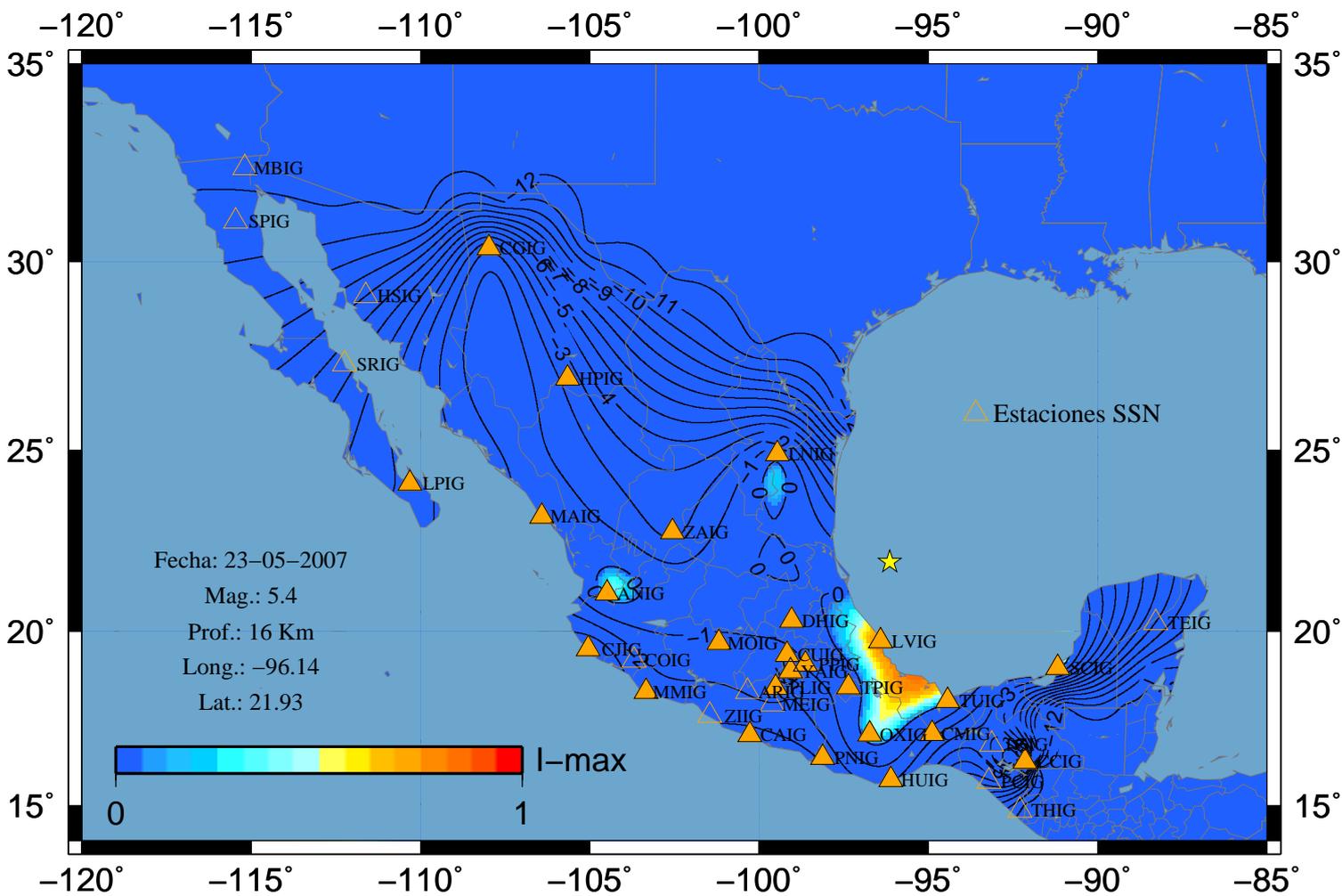
### Sismo 71 V-Norte



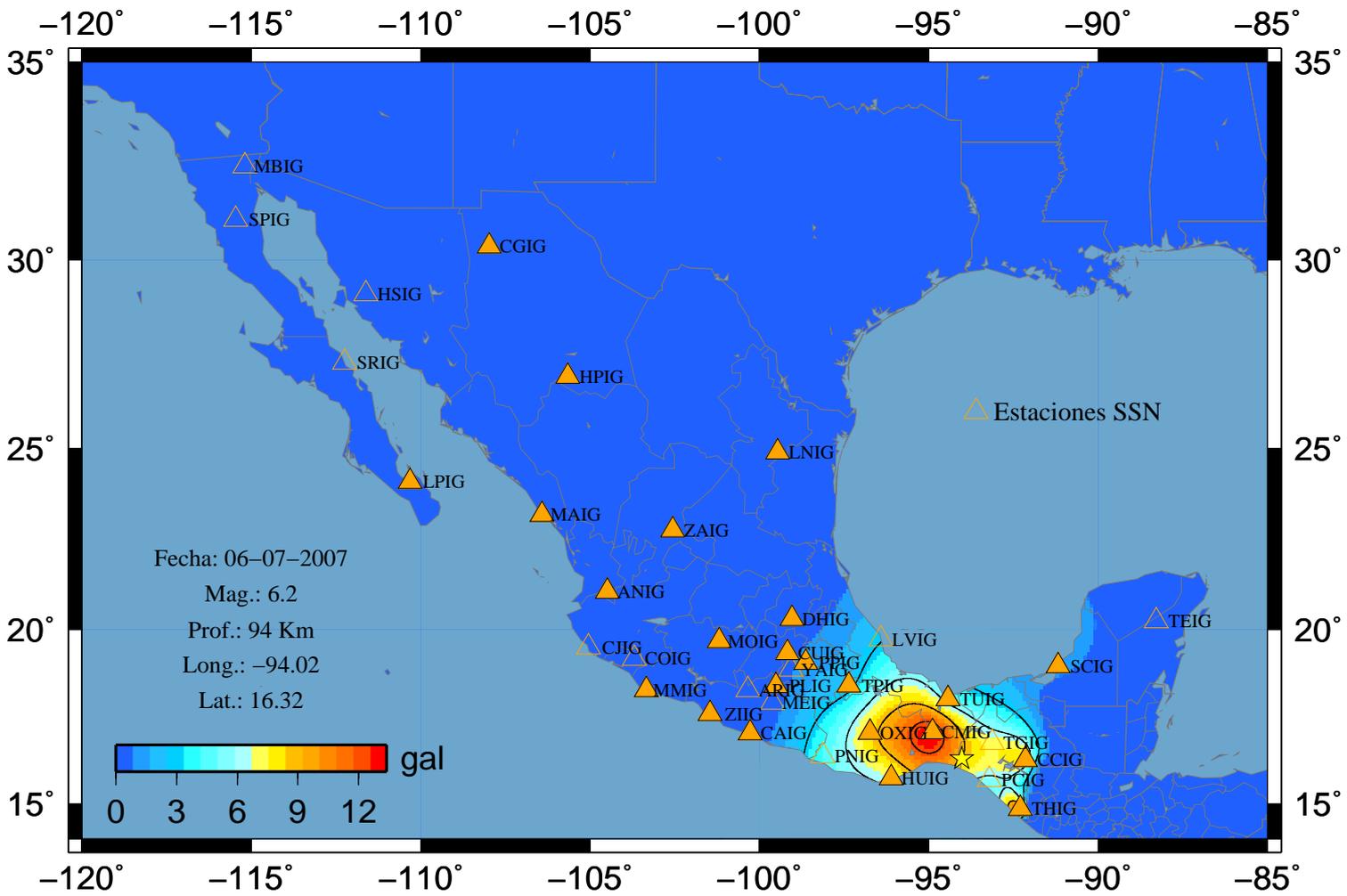
### Sismo 71 V-Vertical



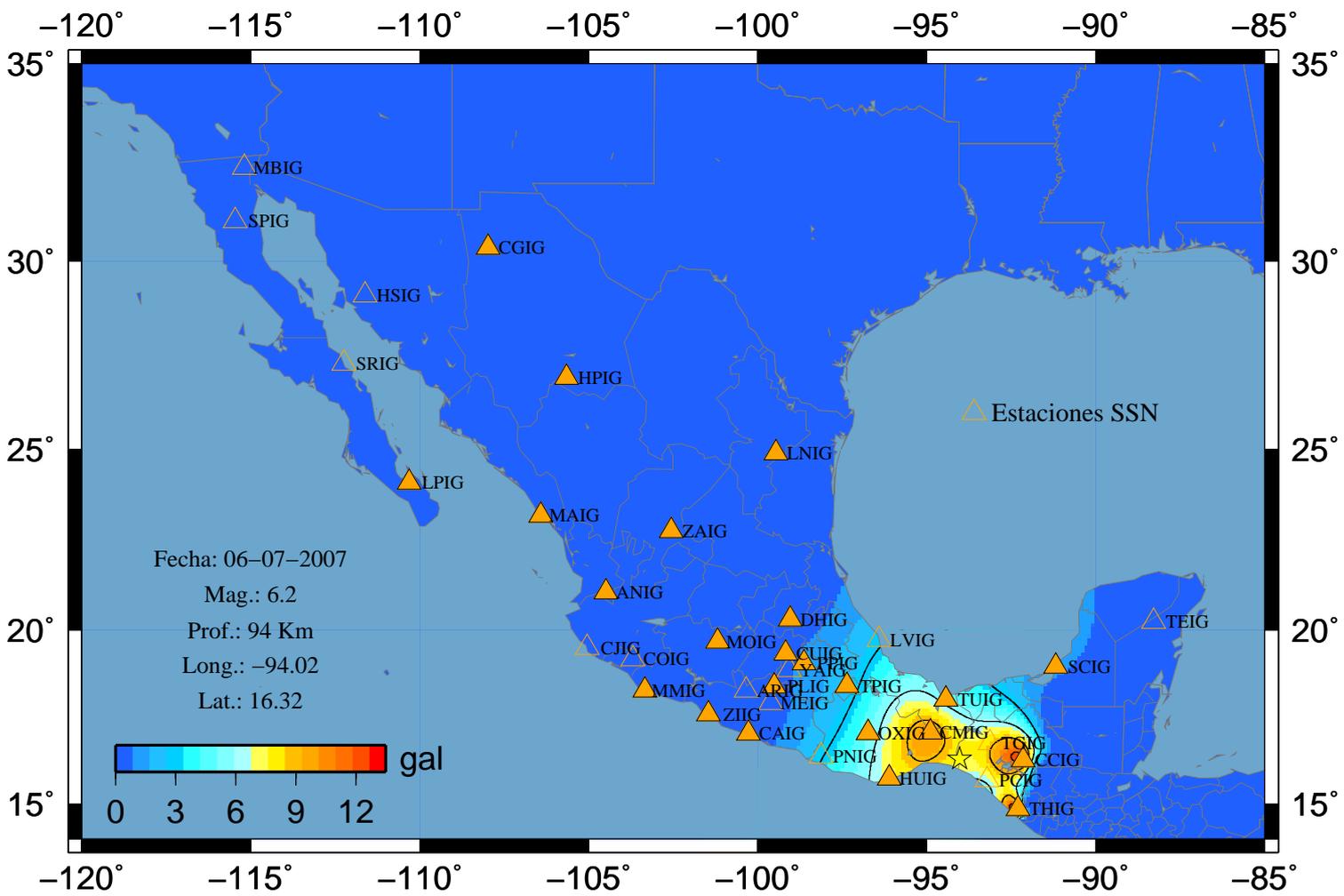
# Sismo 71 I (Max)



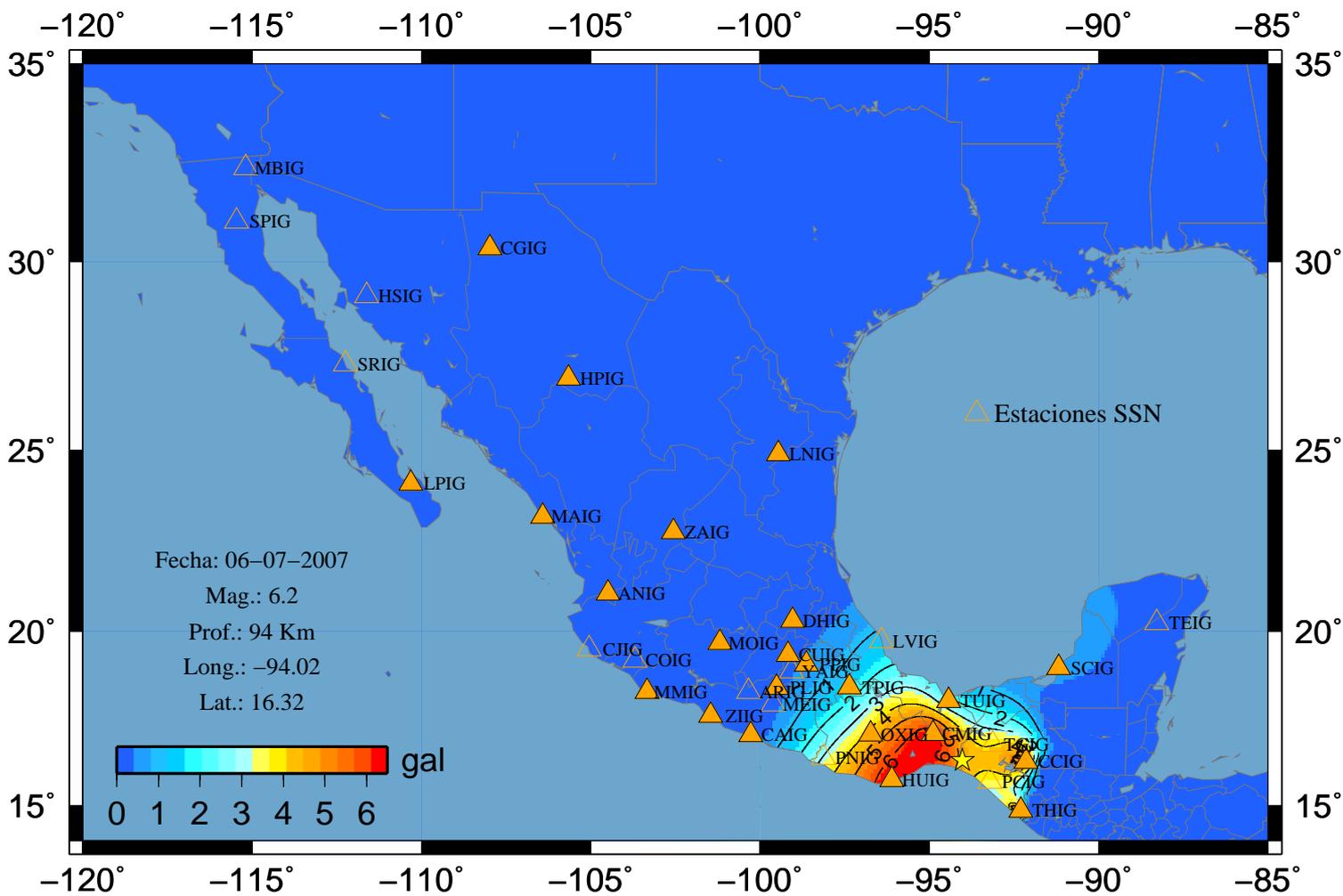
# Sismo 74 A-Este



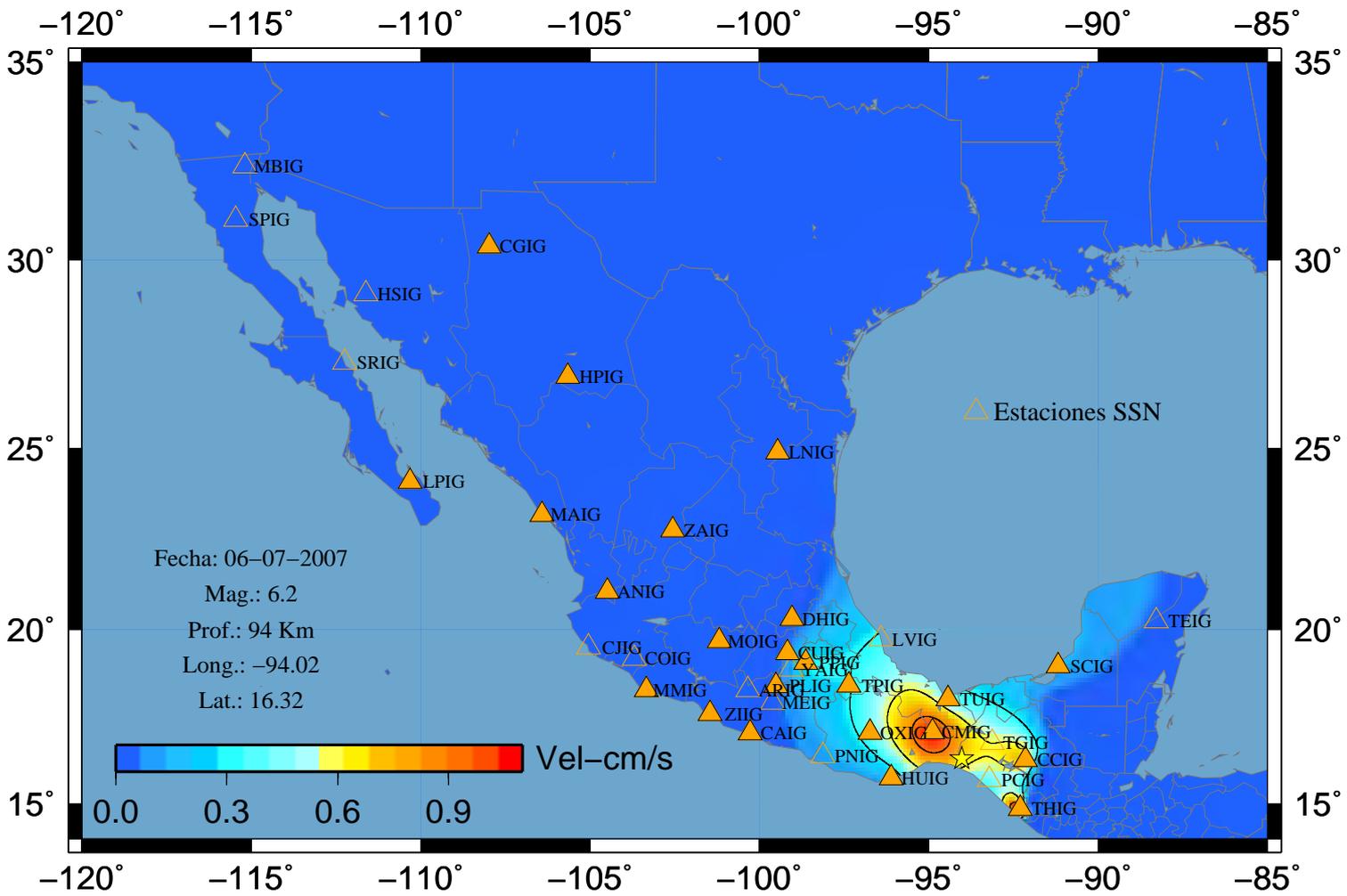
# Sismo 74 A-Norte



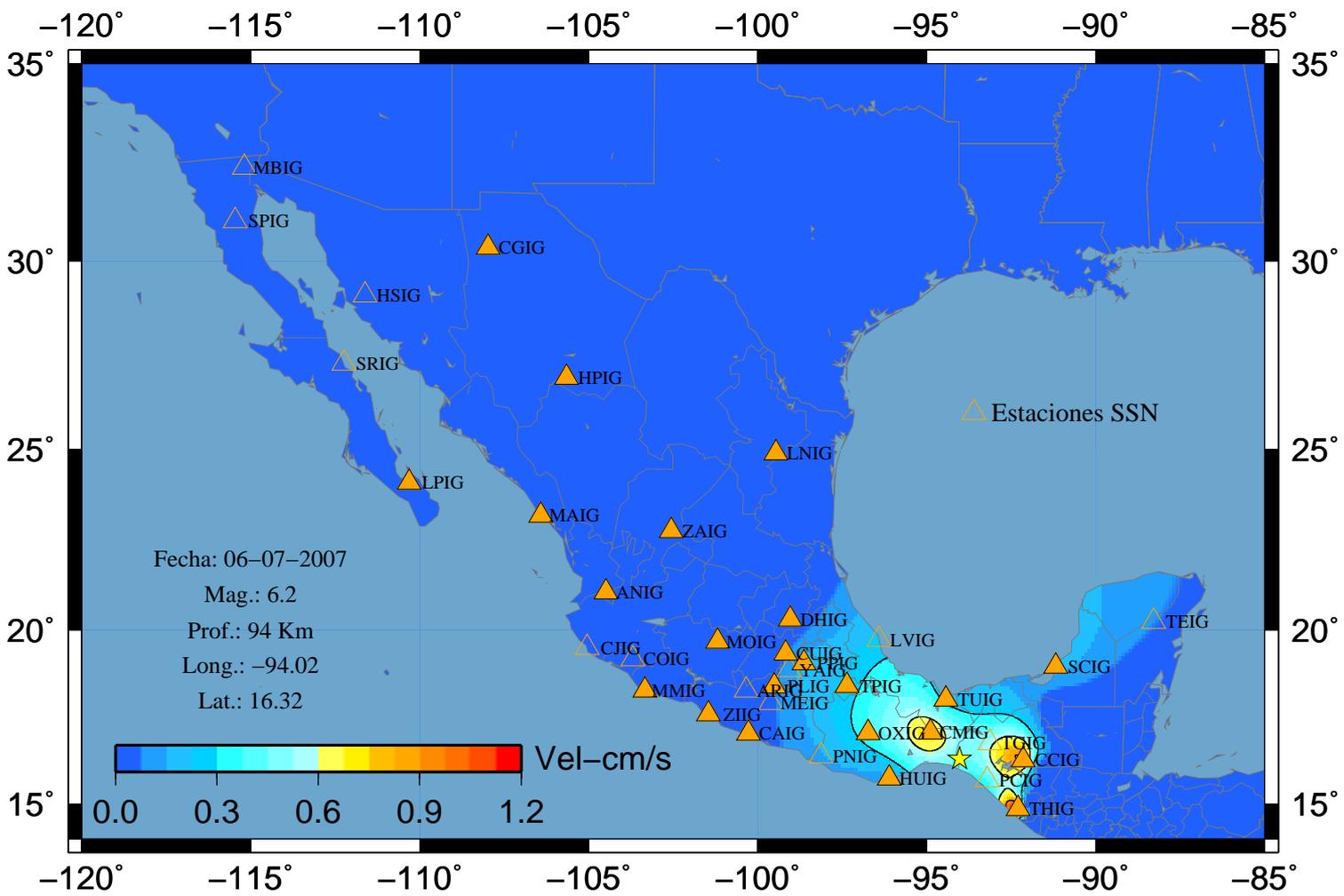
### Sismo 74 A-Vertical



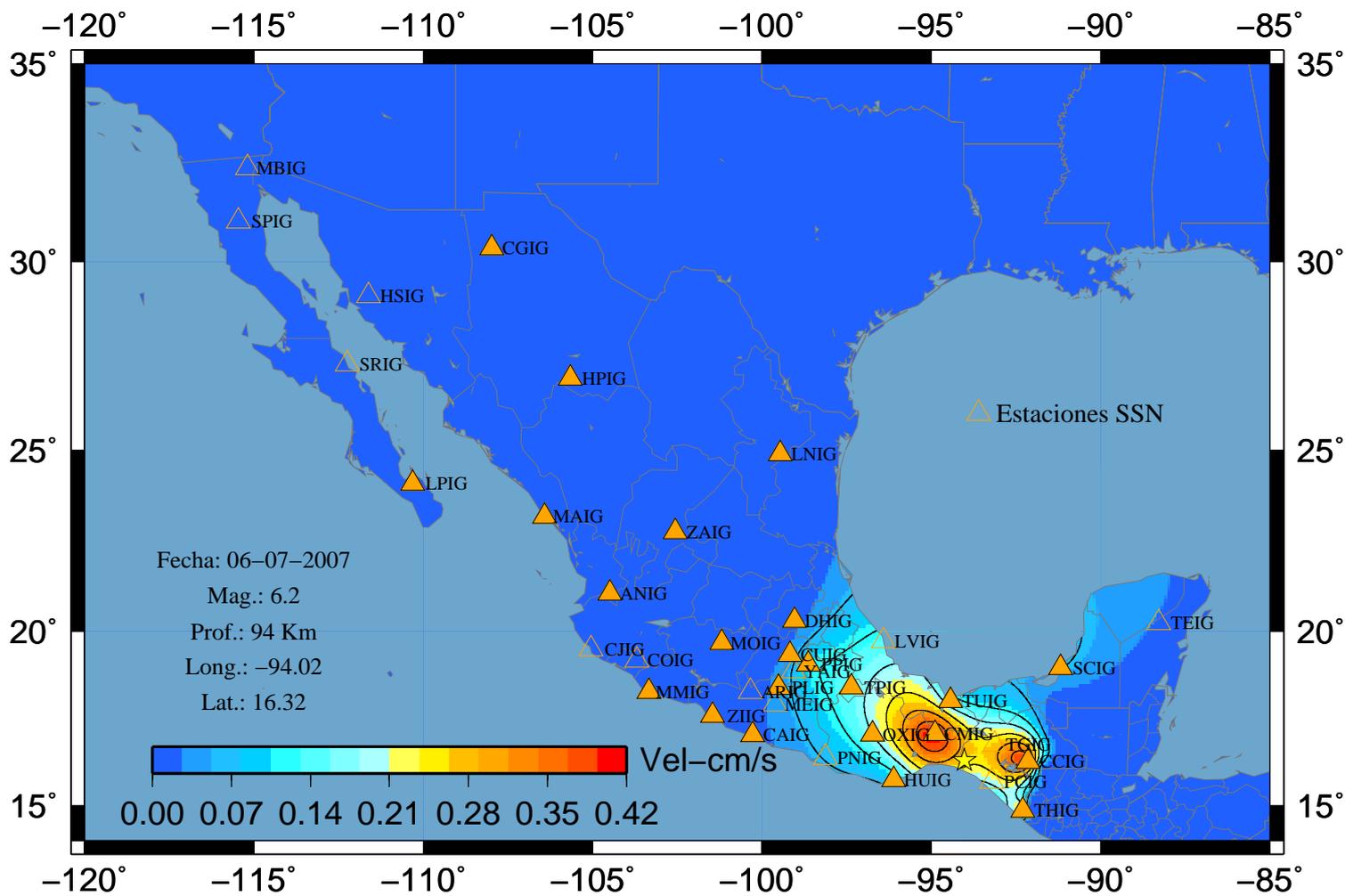
### Sismo 74 V-Este



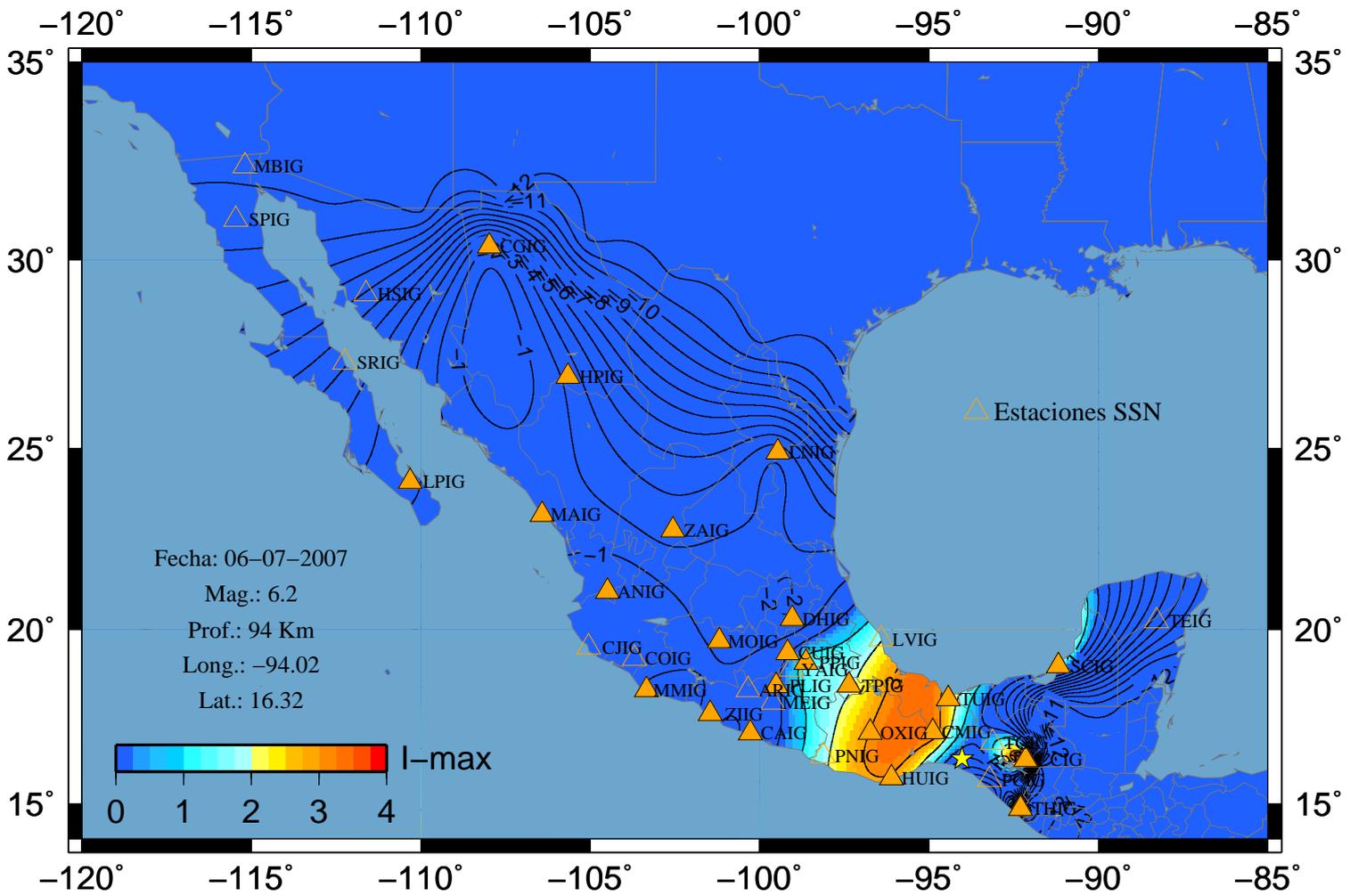
### Sismo 74 V-Norte



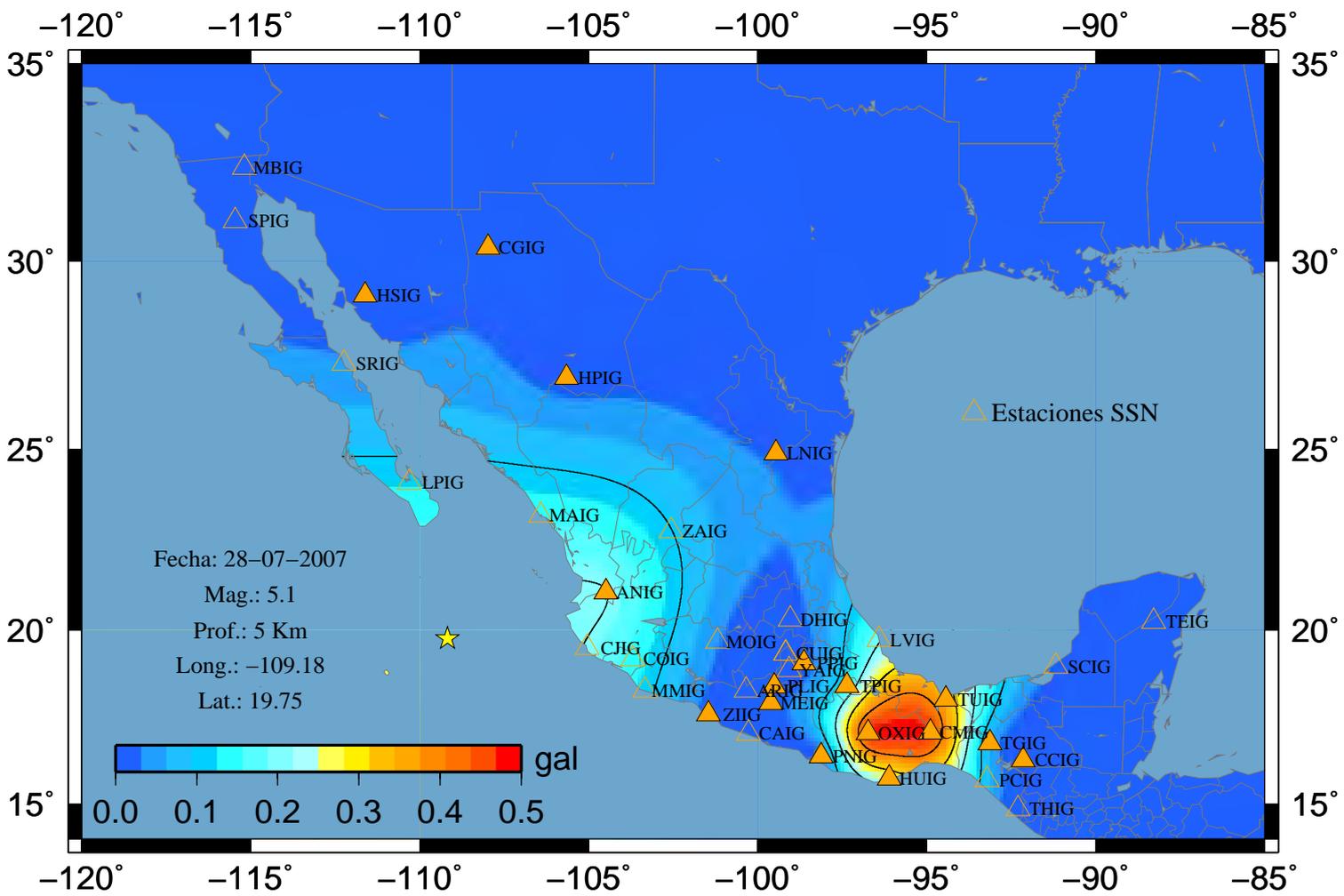
# Sismo 74 V-Vertical



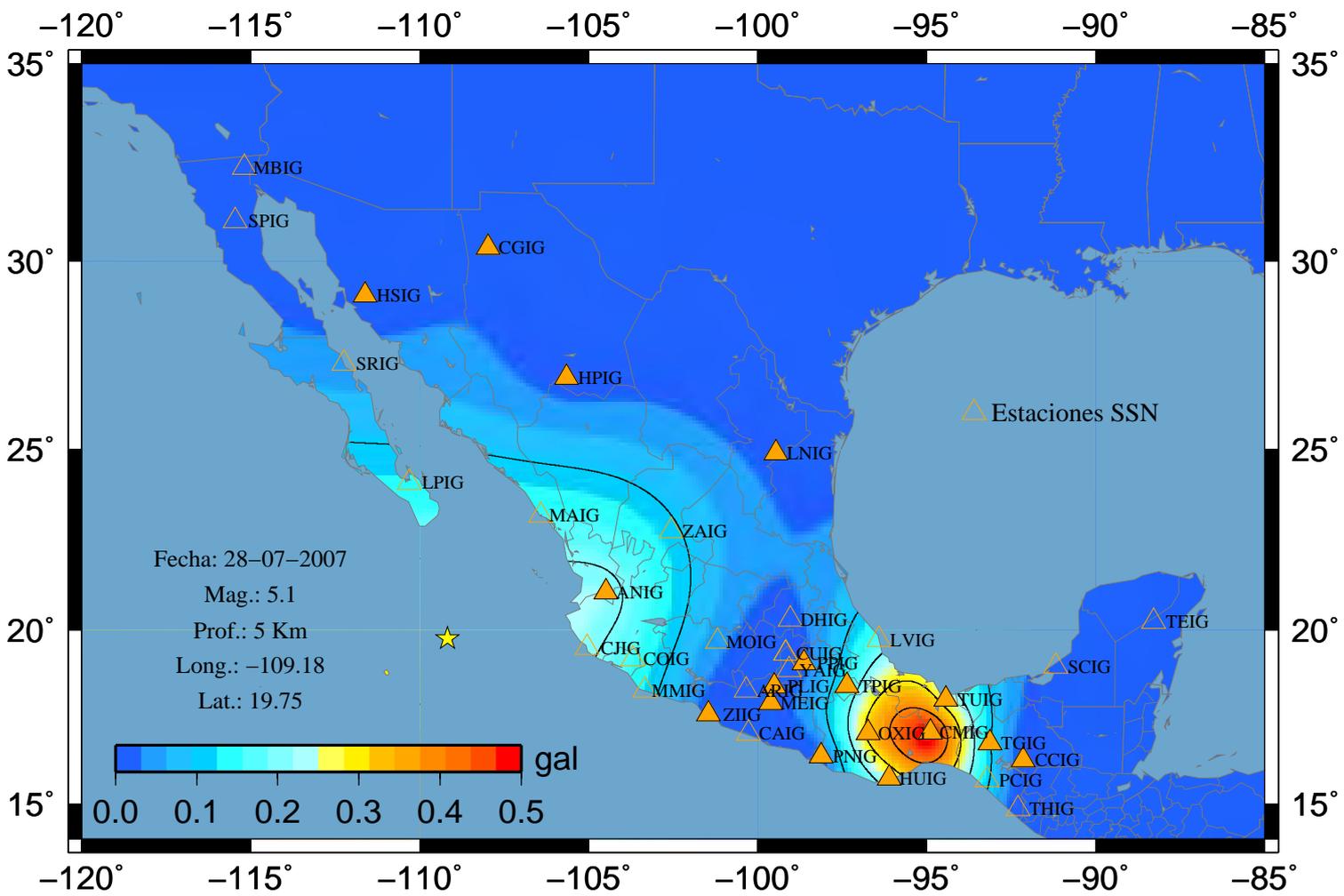
# Sismo 74 I (Max)



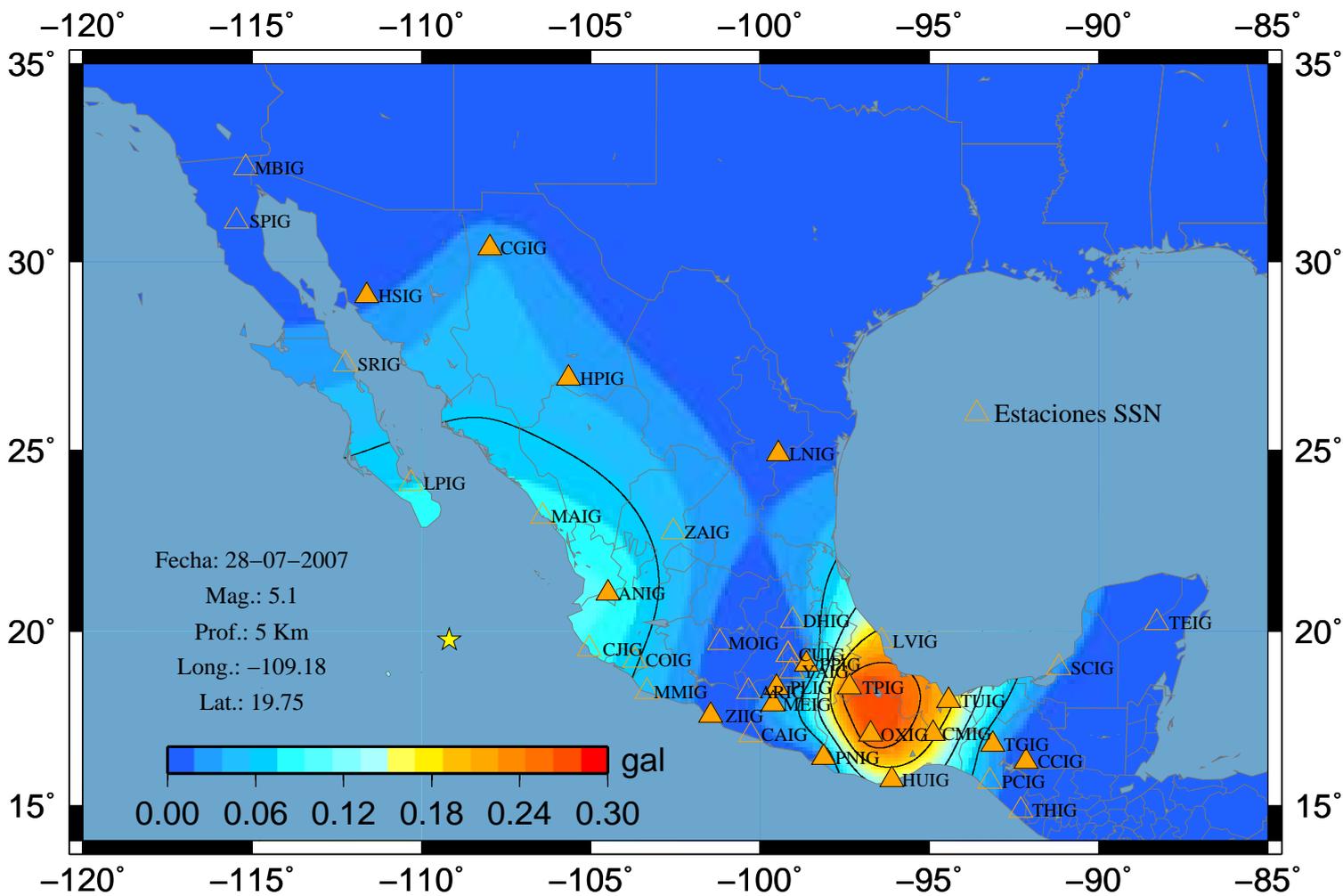
# Sismo 77 A-Este



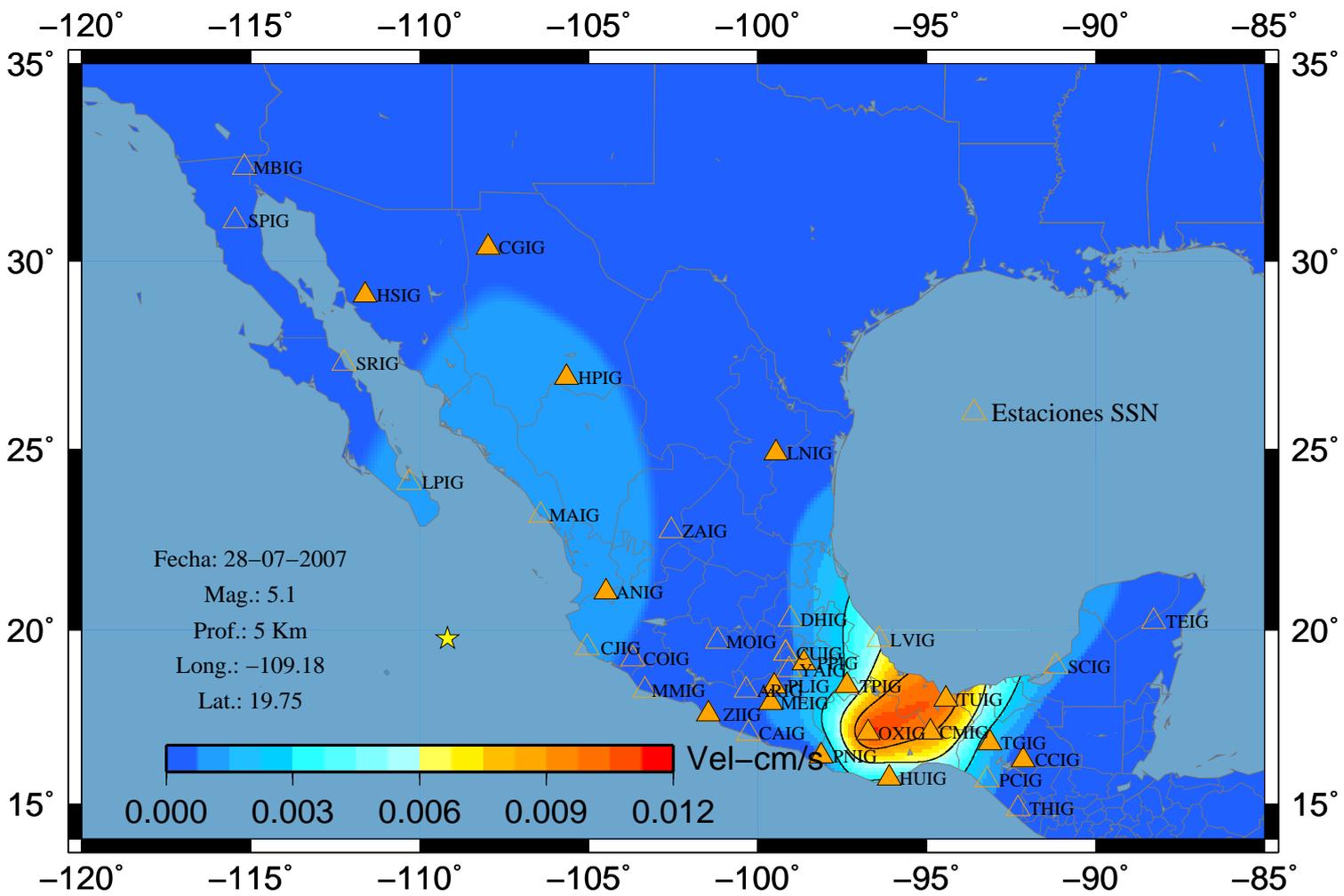
# Sismo 77 A-Norte



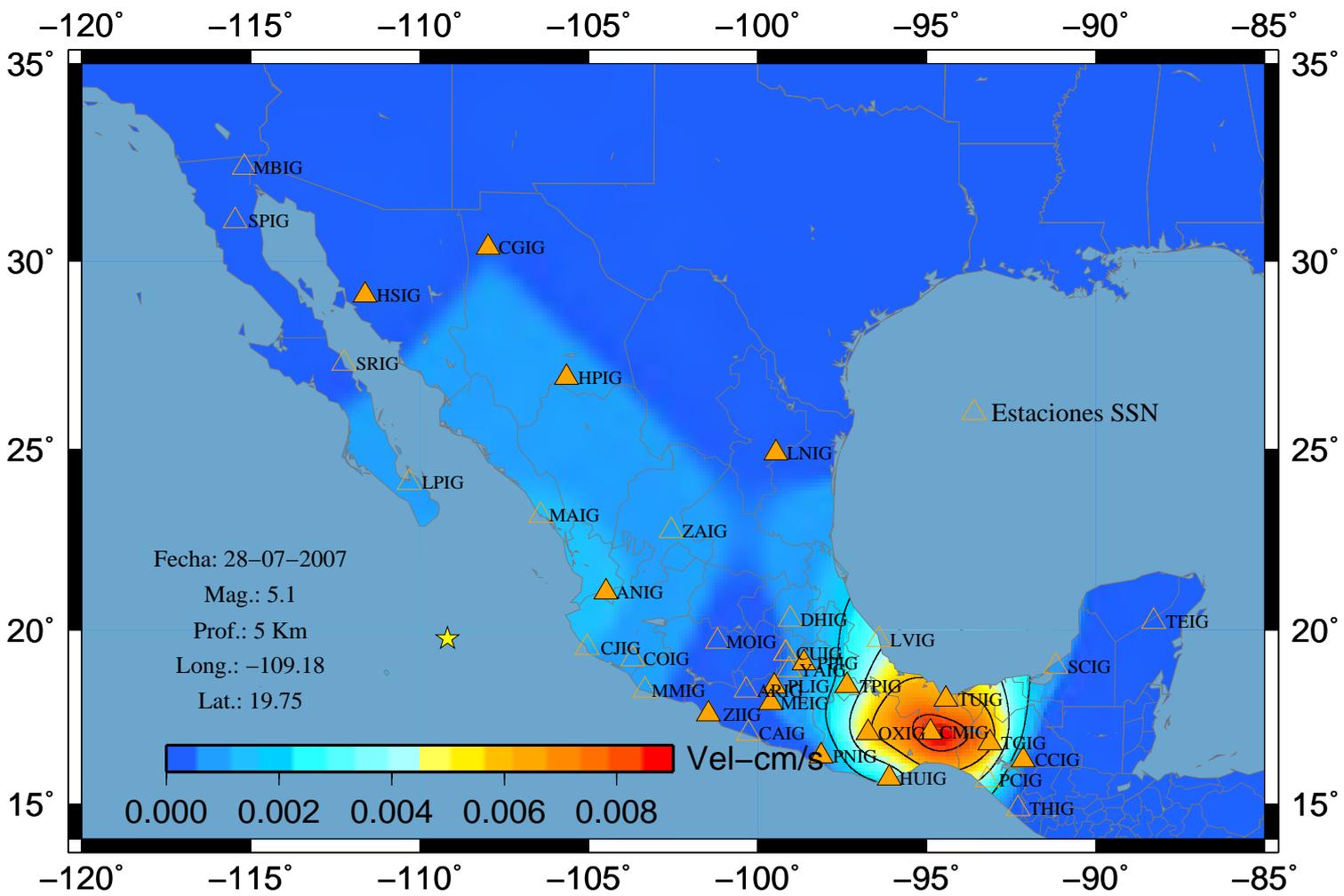
# Sismo 77 A-Vertical



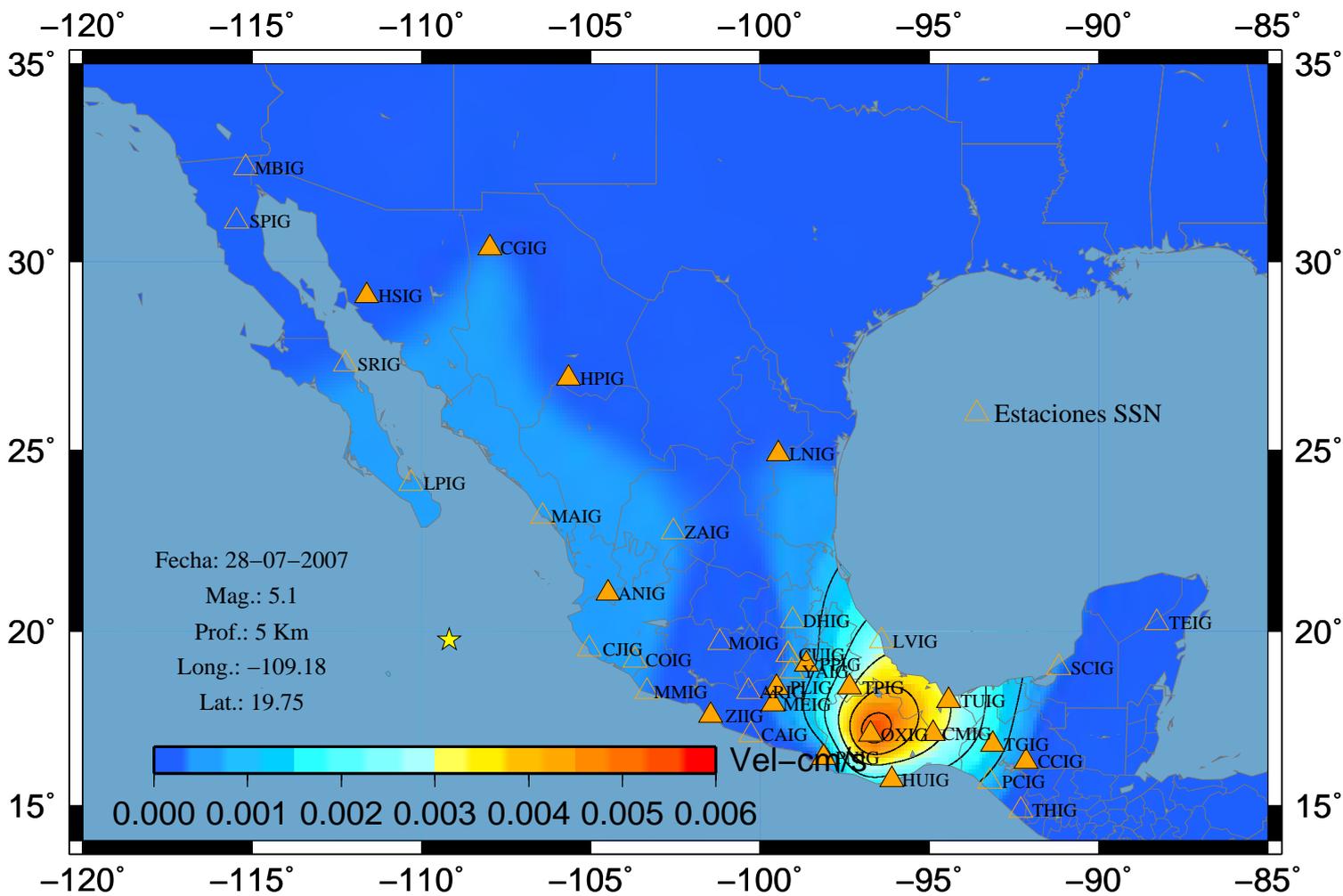
### Sismo 77 V-Este



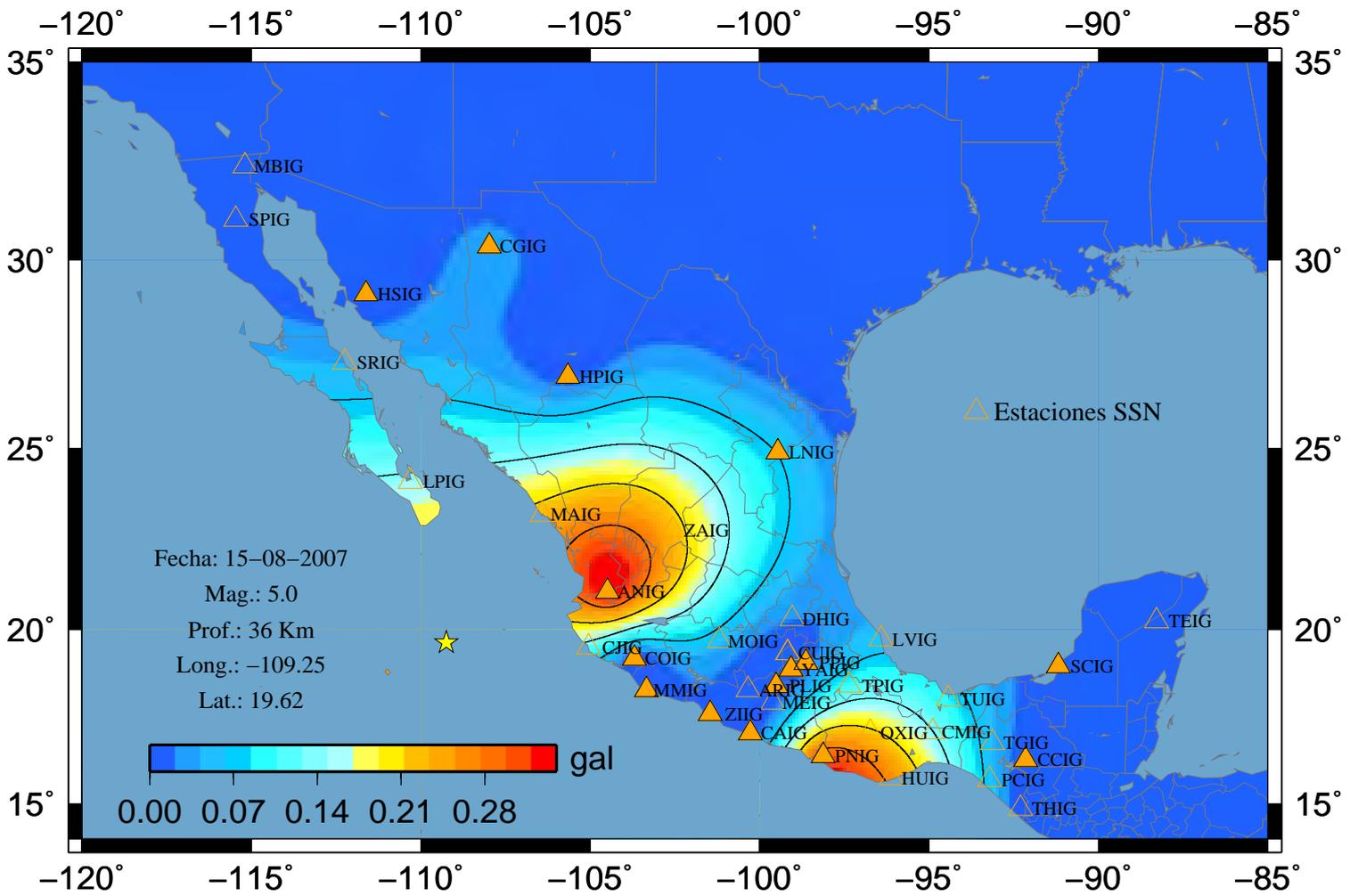
### Sismo 77 V-Norte



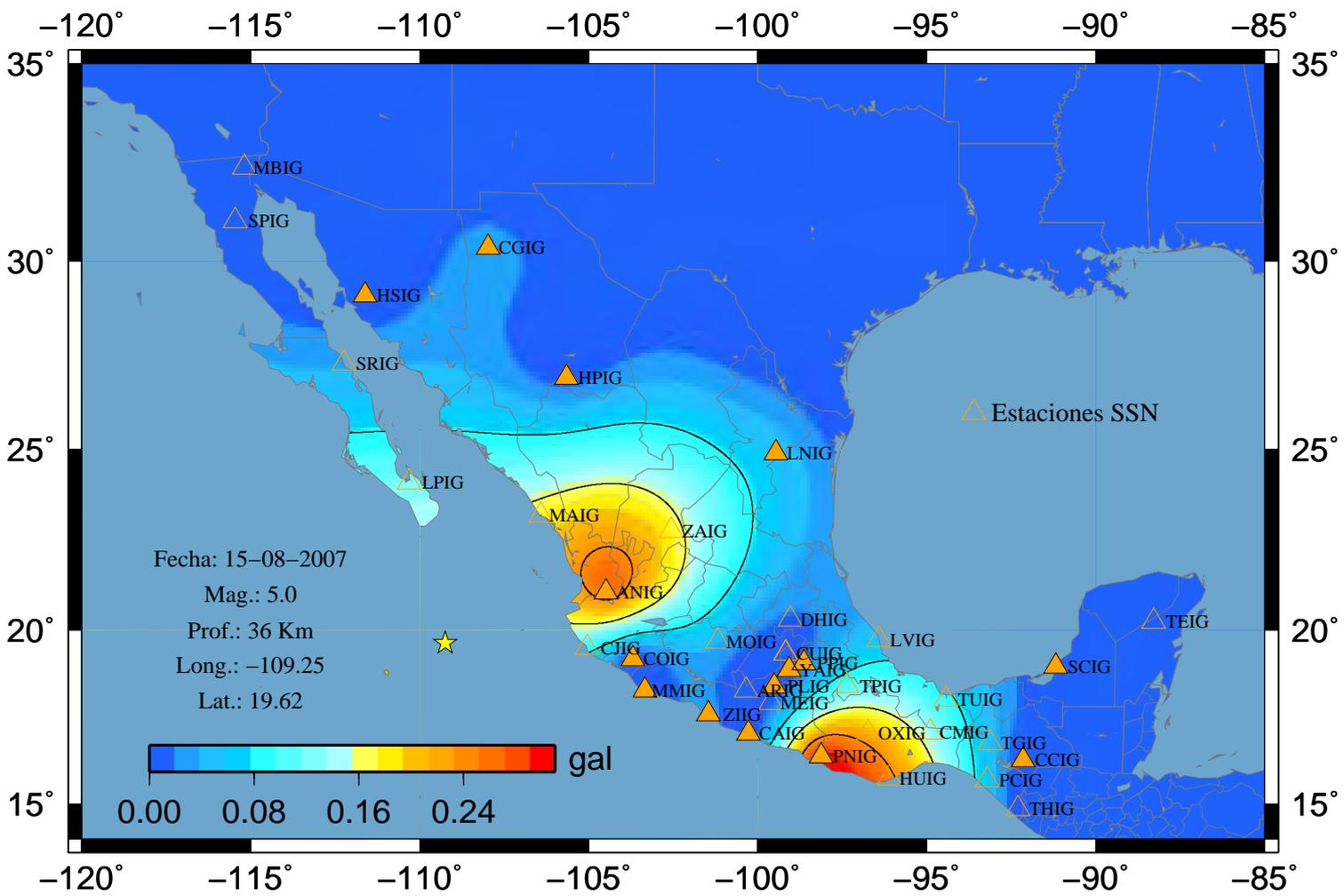
### Sismo 77 V-Vertical



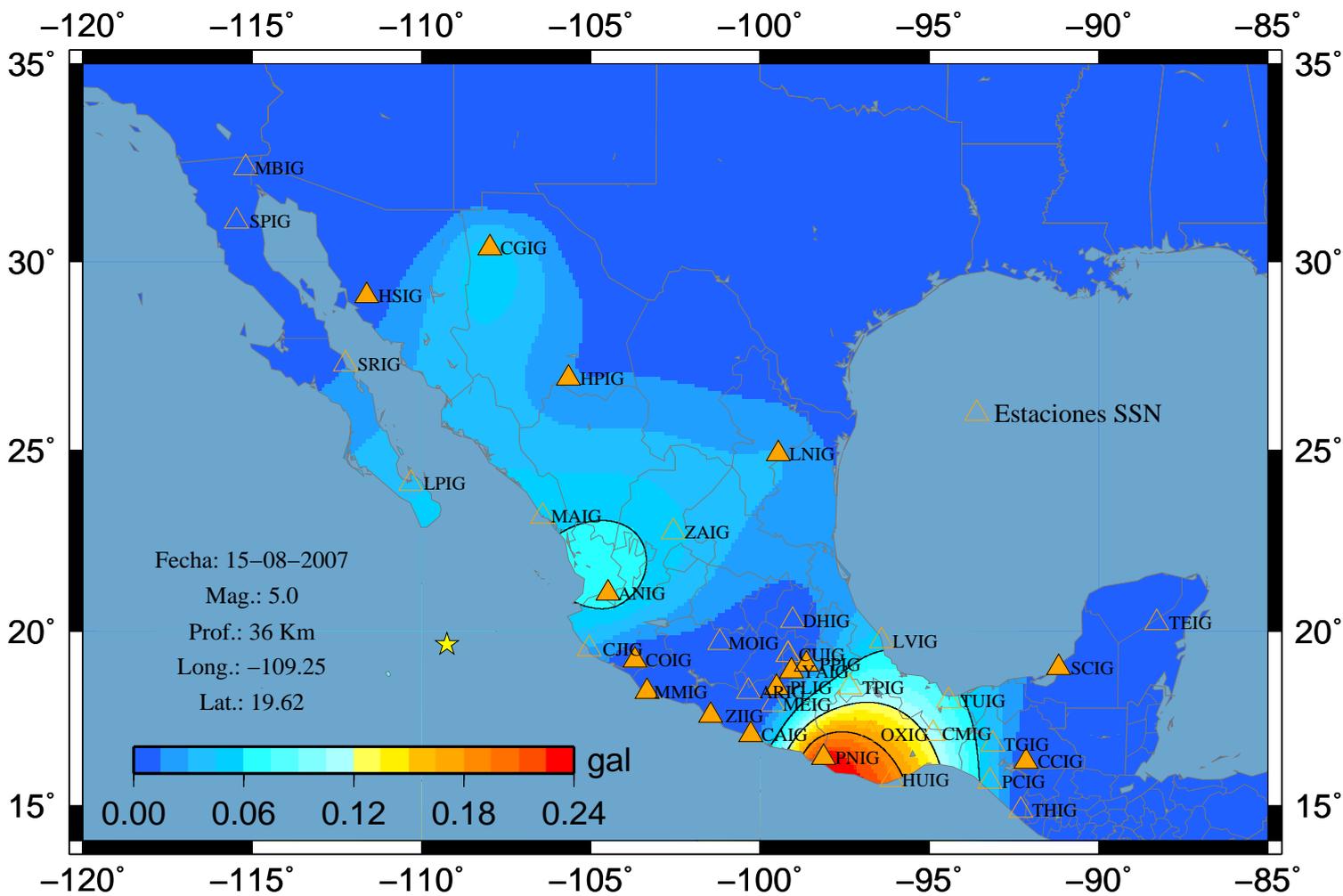
# Sismo 78 A-Este



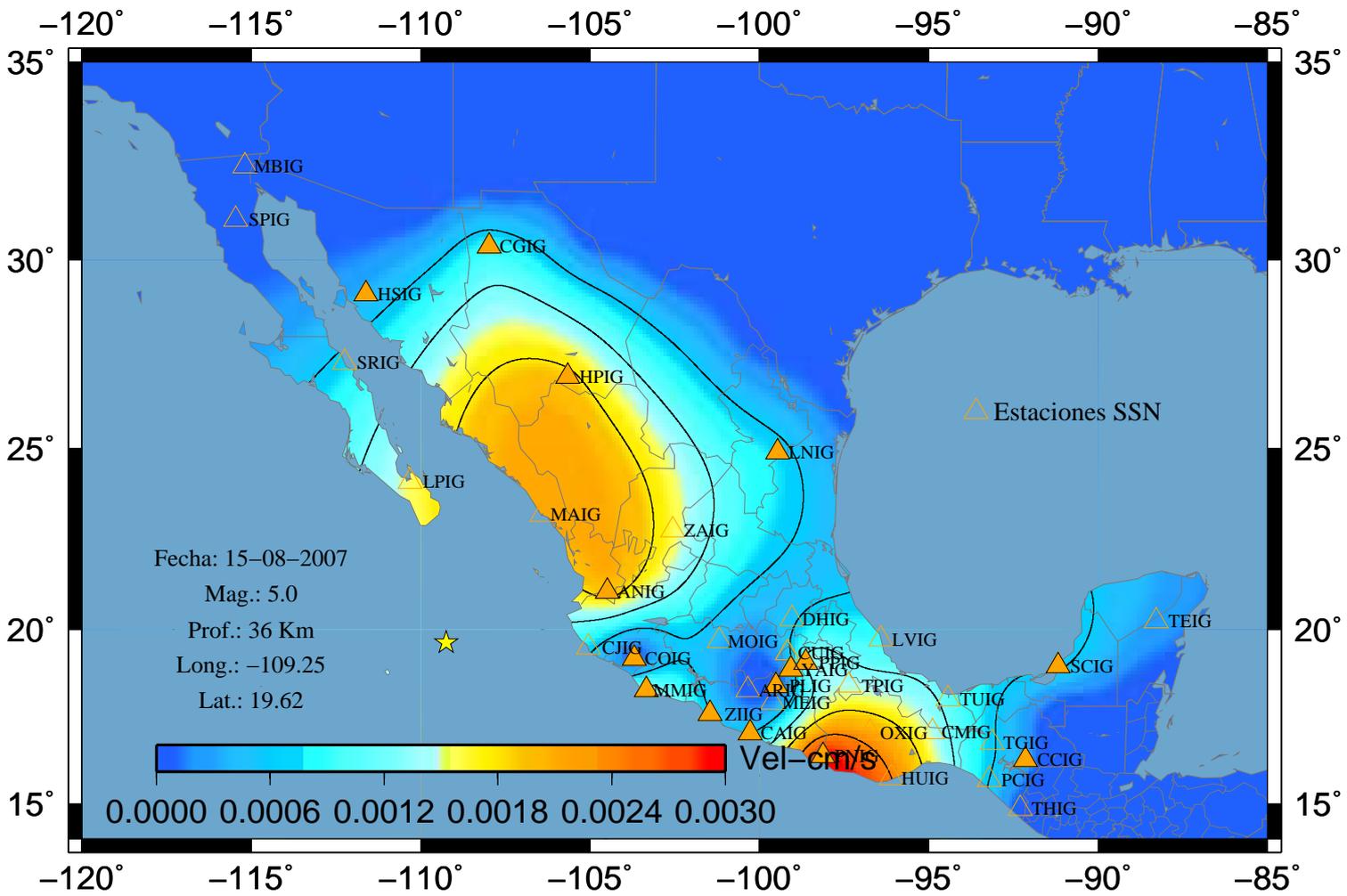
# Sismo 78 A-Norte



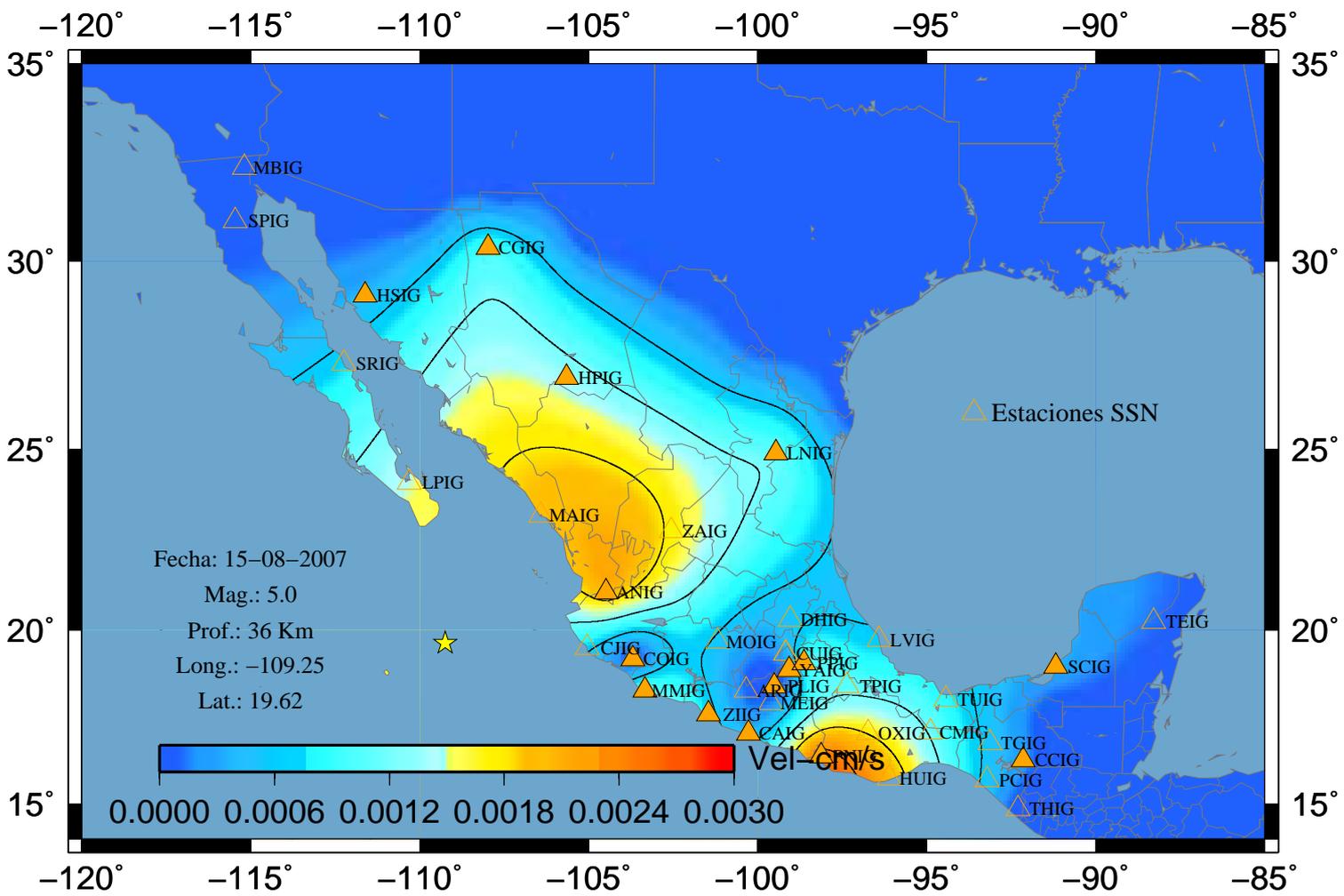
# Sismo 78 A-Vertical



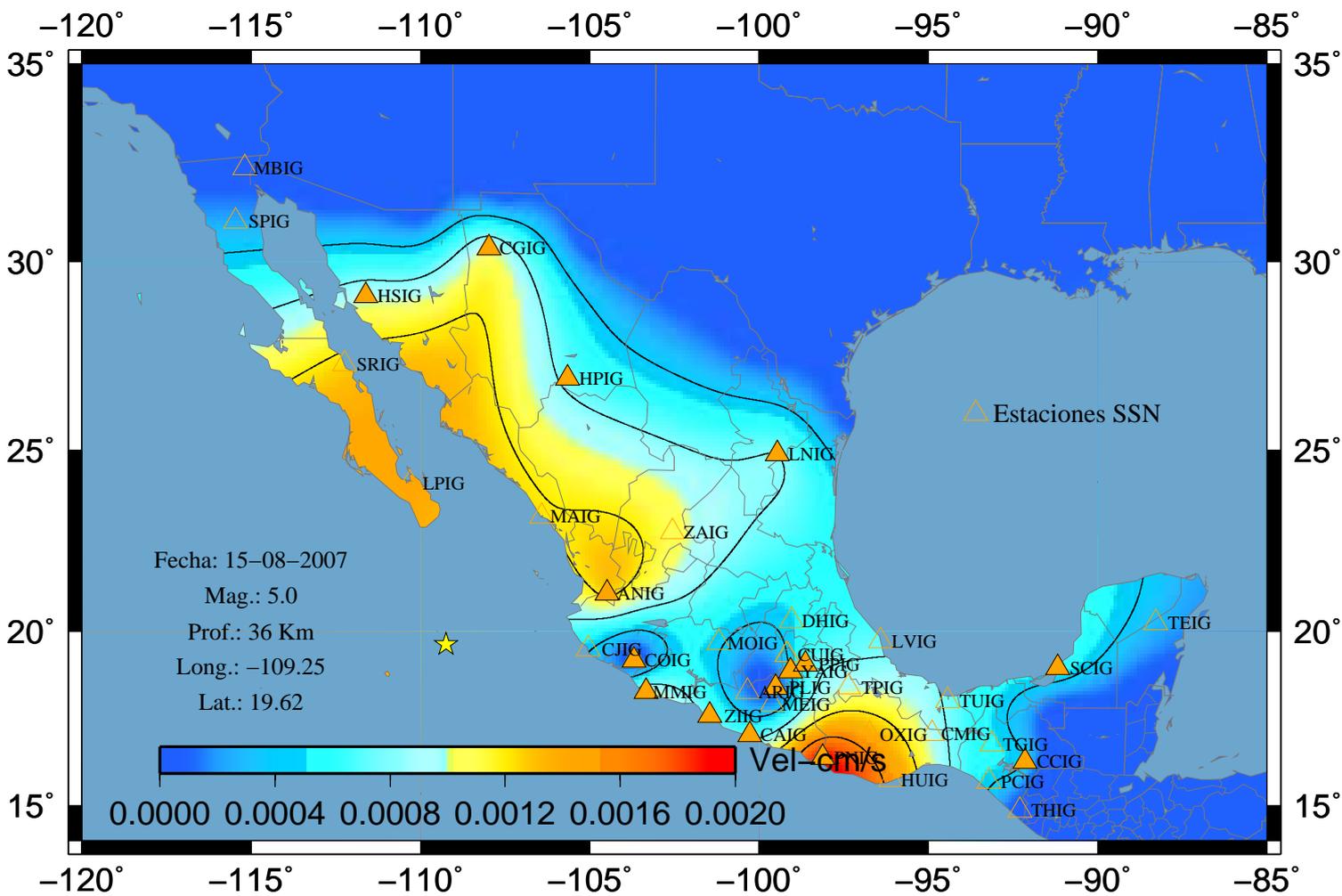
# Sismo 78 V-Este



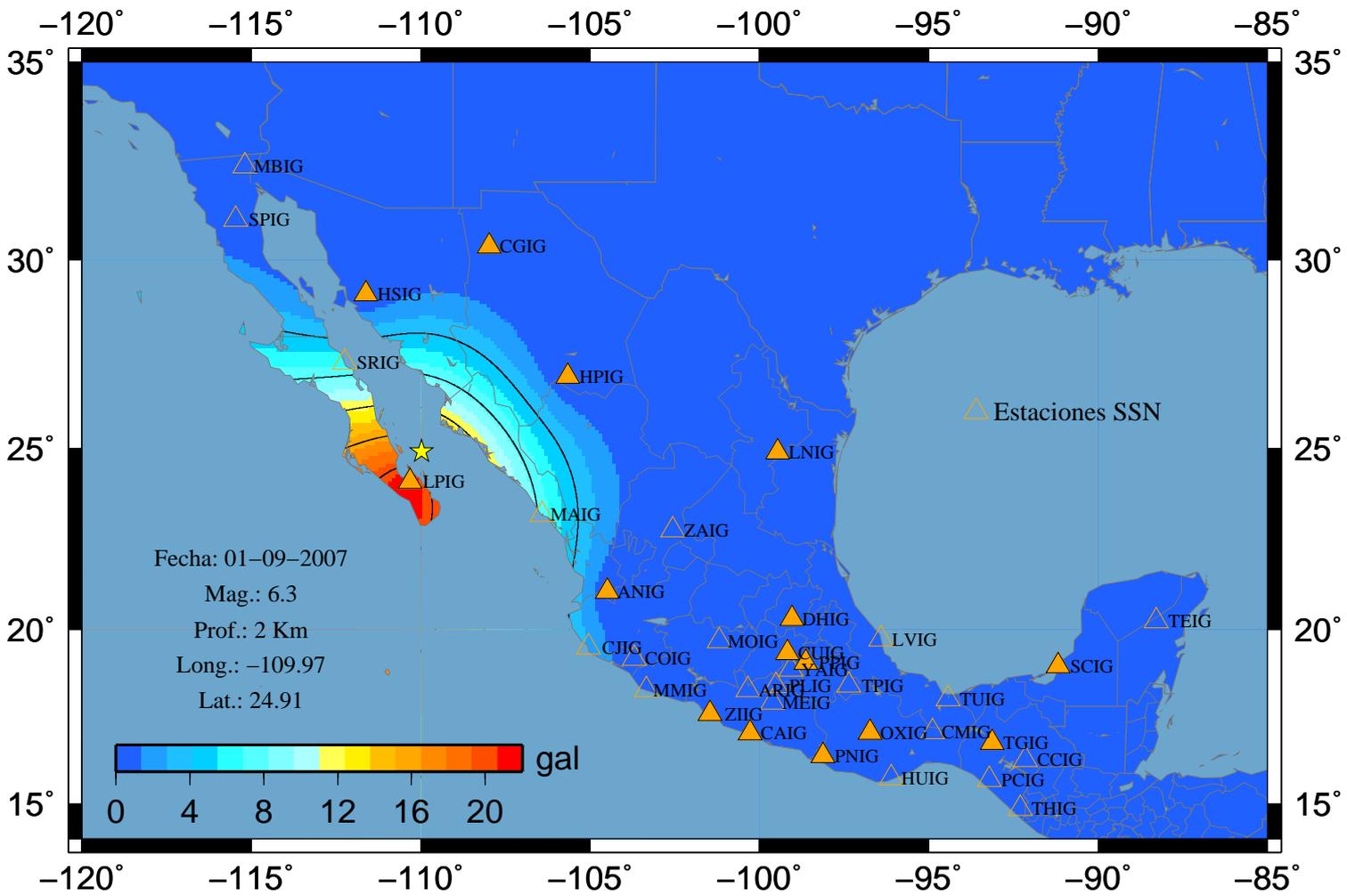
### Sismo 78 V-Norte



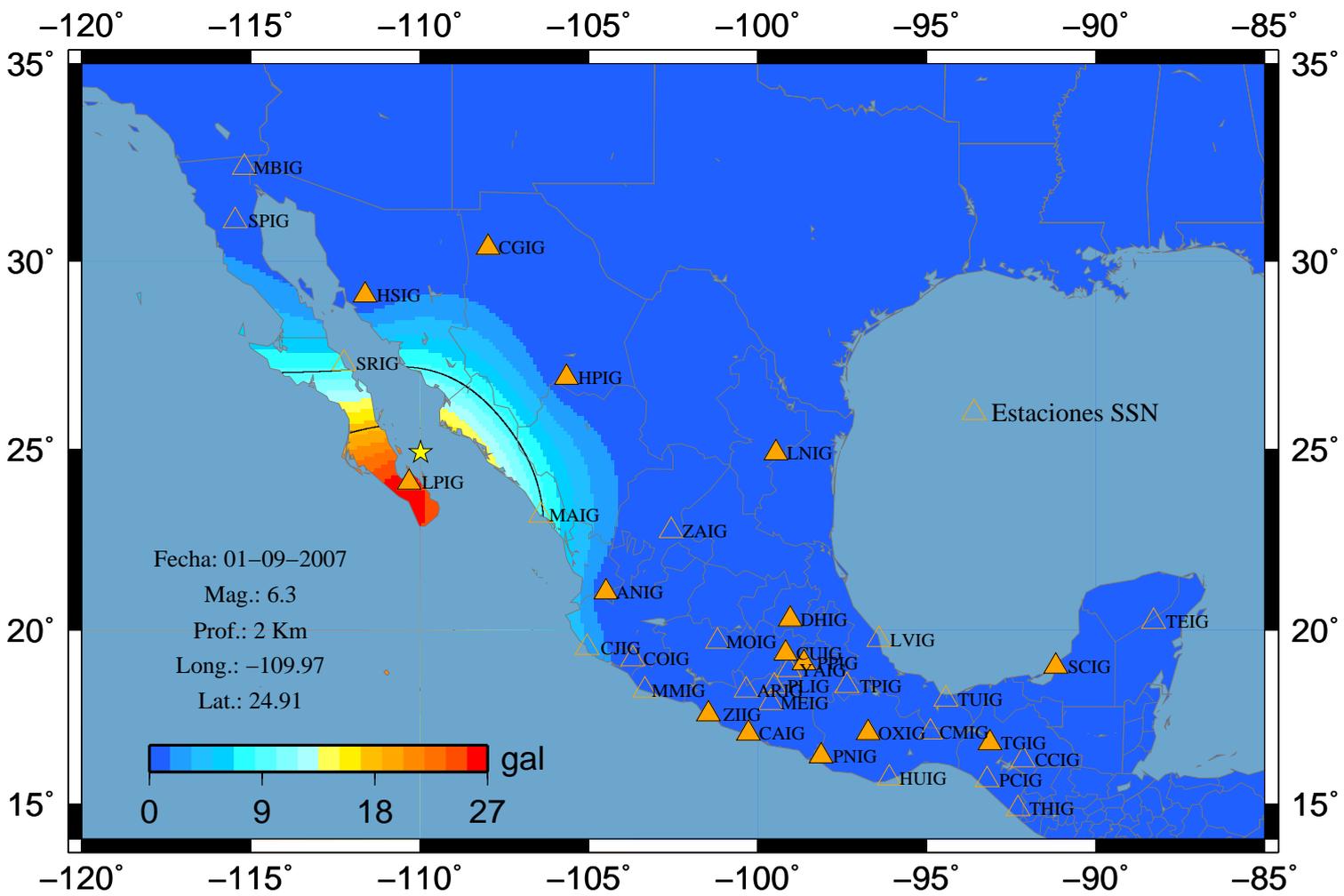
### Sismo 78 V-Vertical



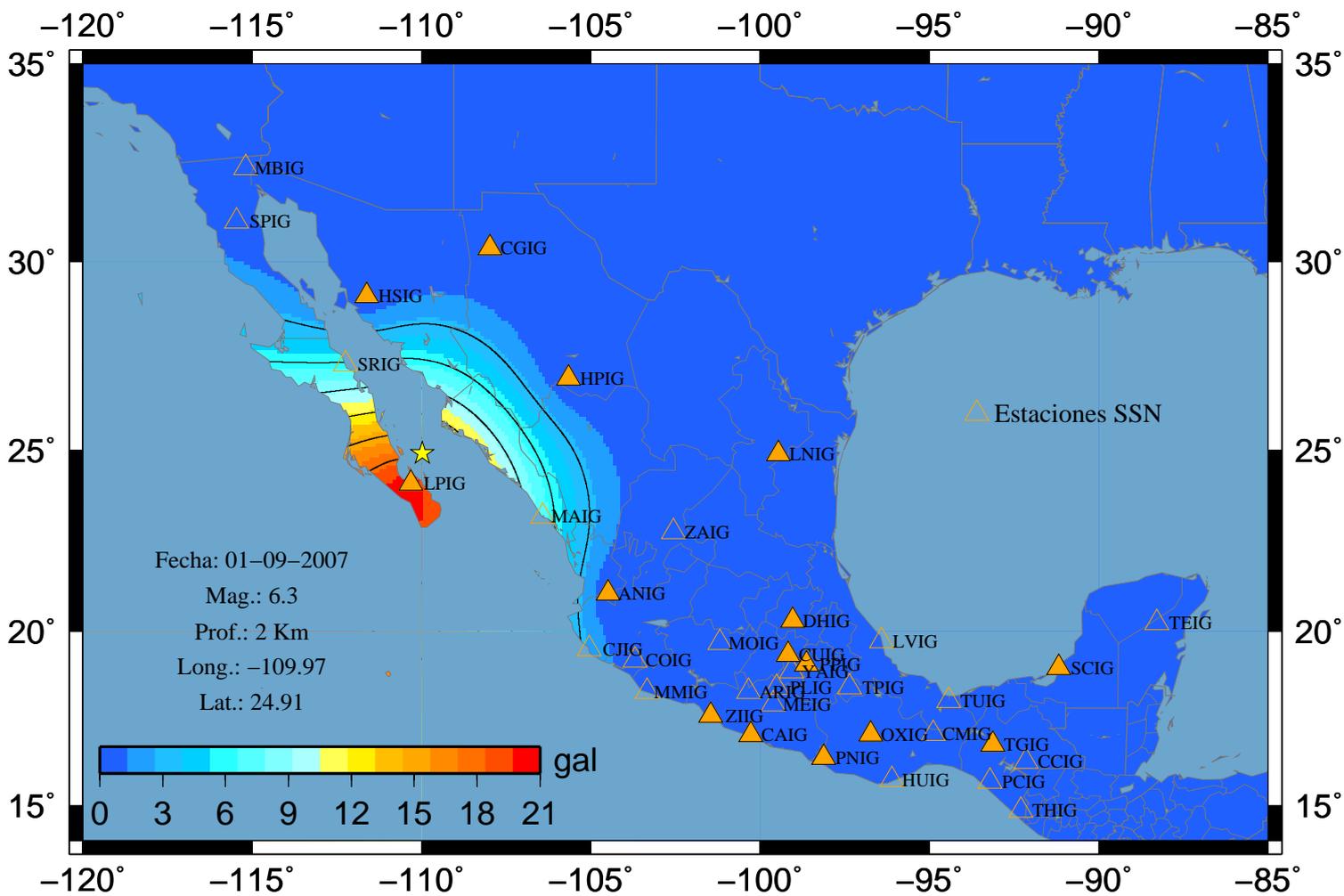
# Sismo 80 A-Este



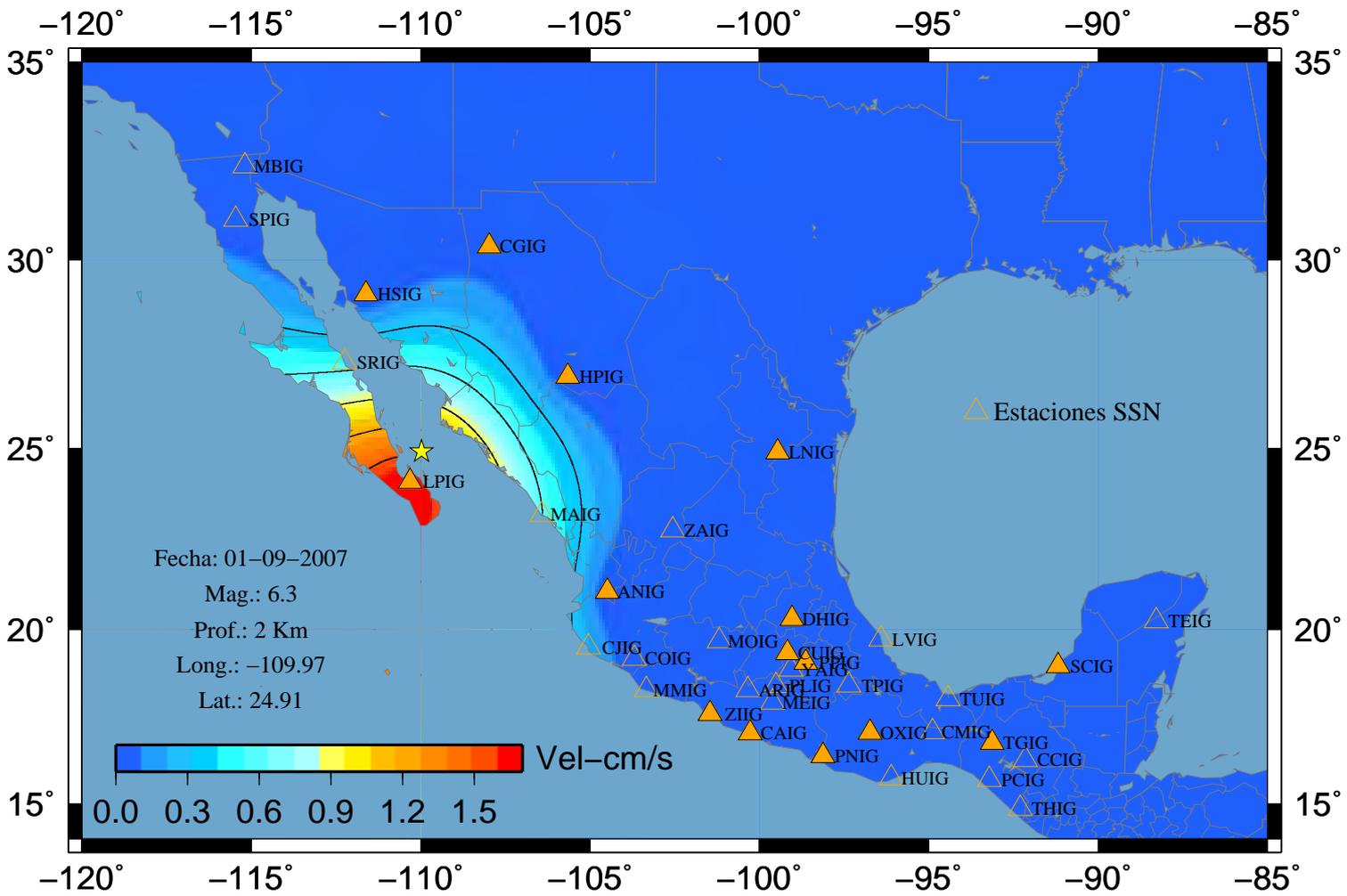
### Sismo 80 A-Norte



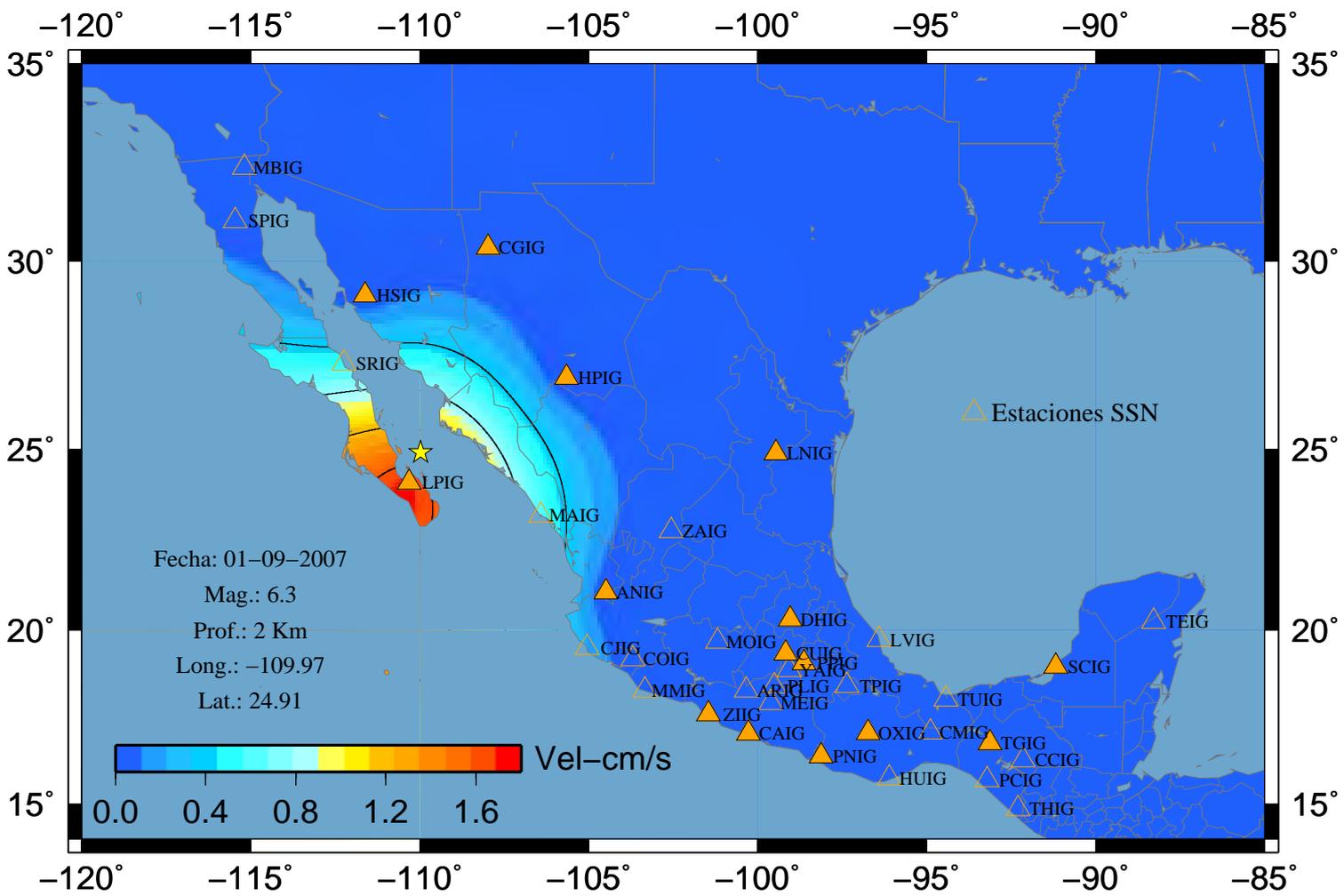
### Sismo 80 A-Vertical



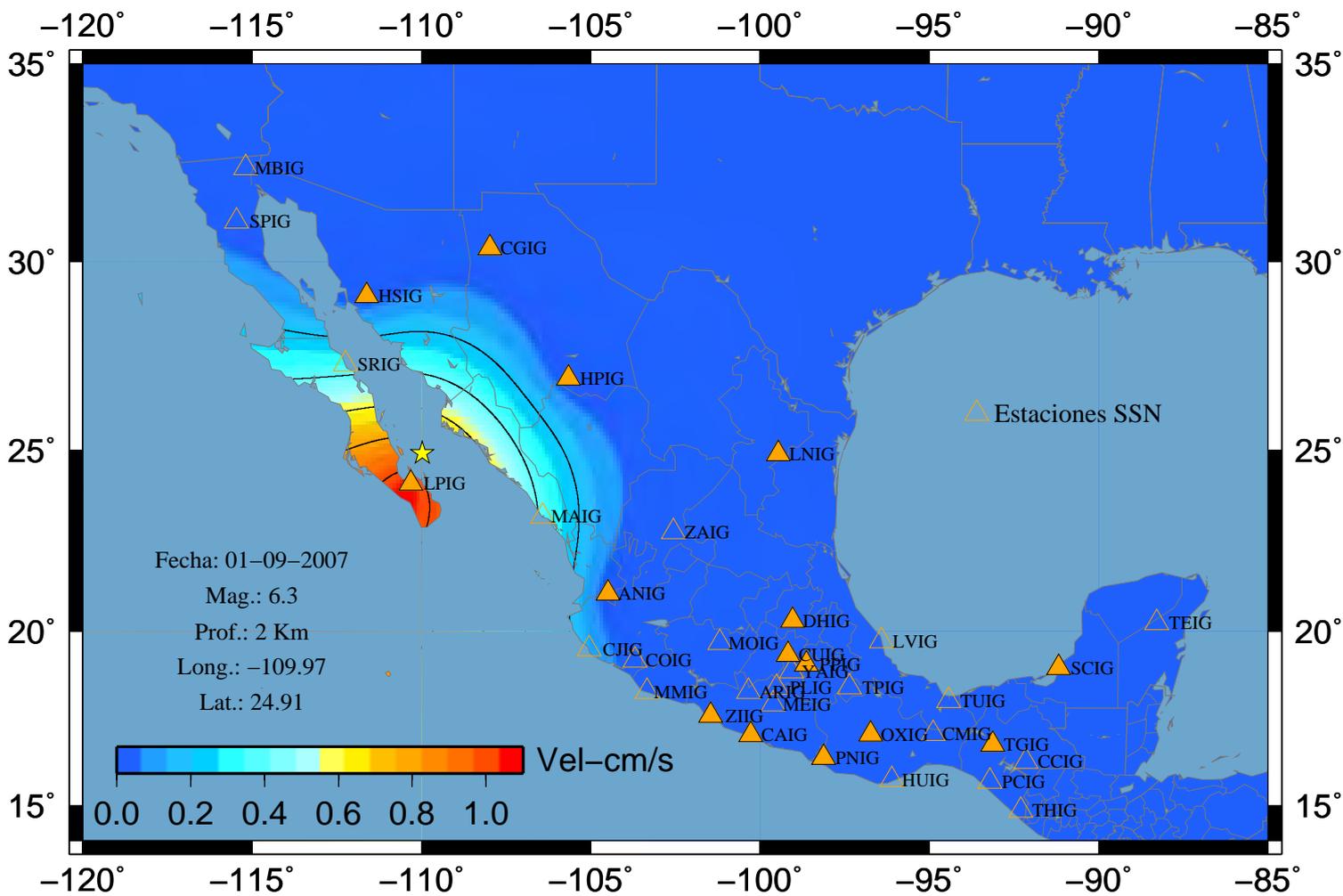
### Sismo 80 V-Este



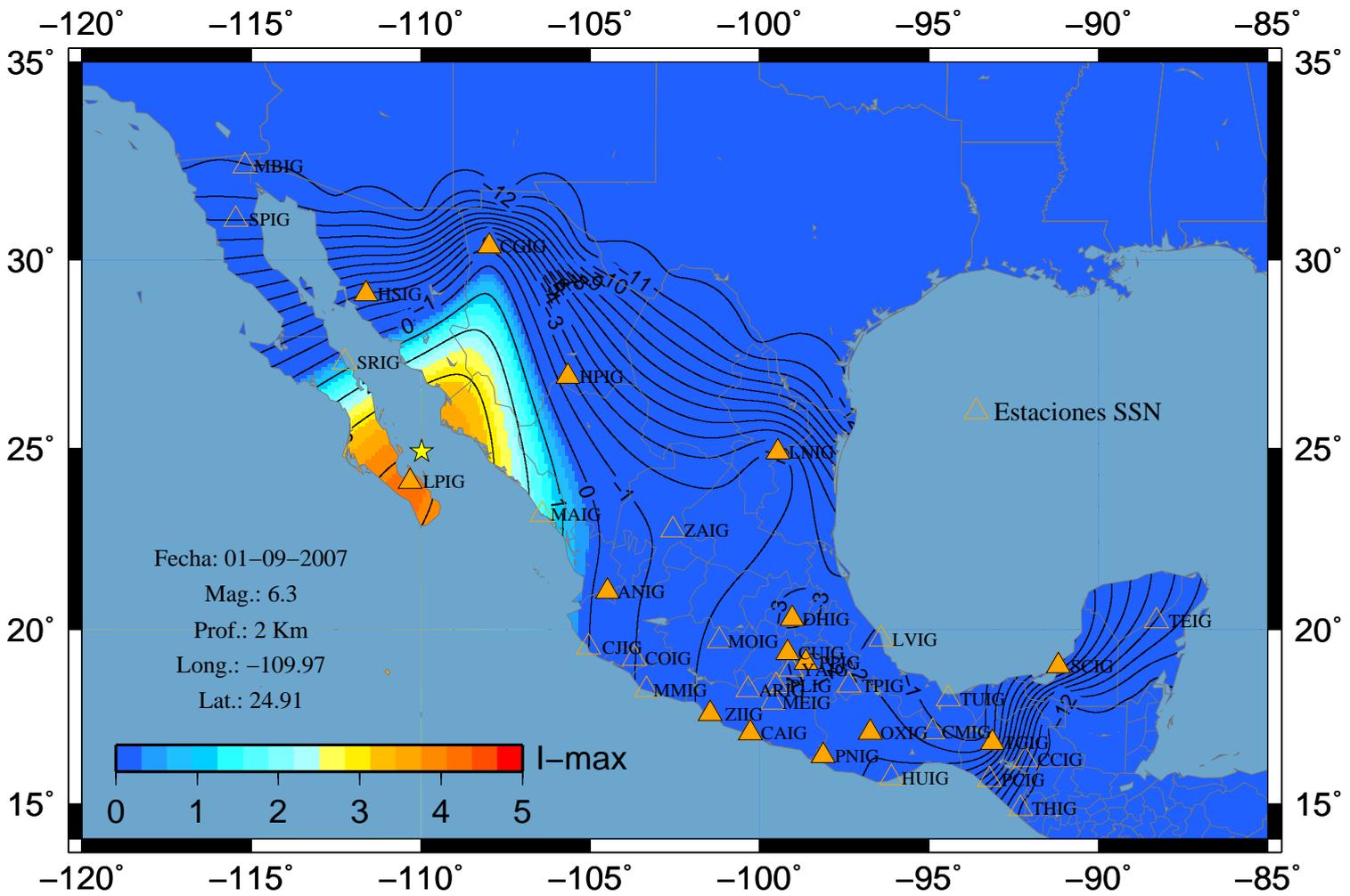
### Sismo 80 V-Norte



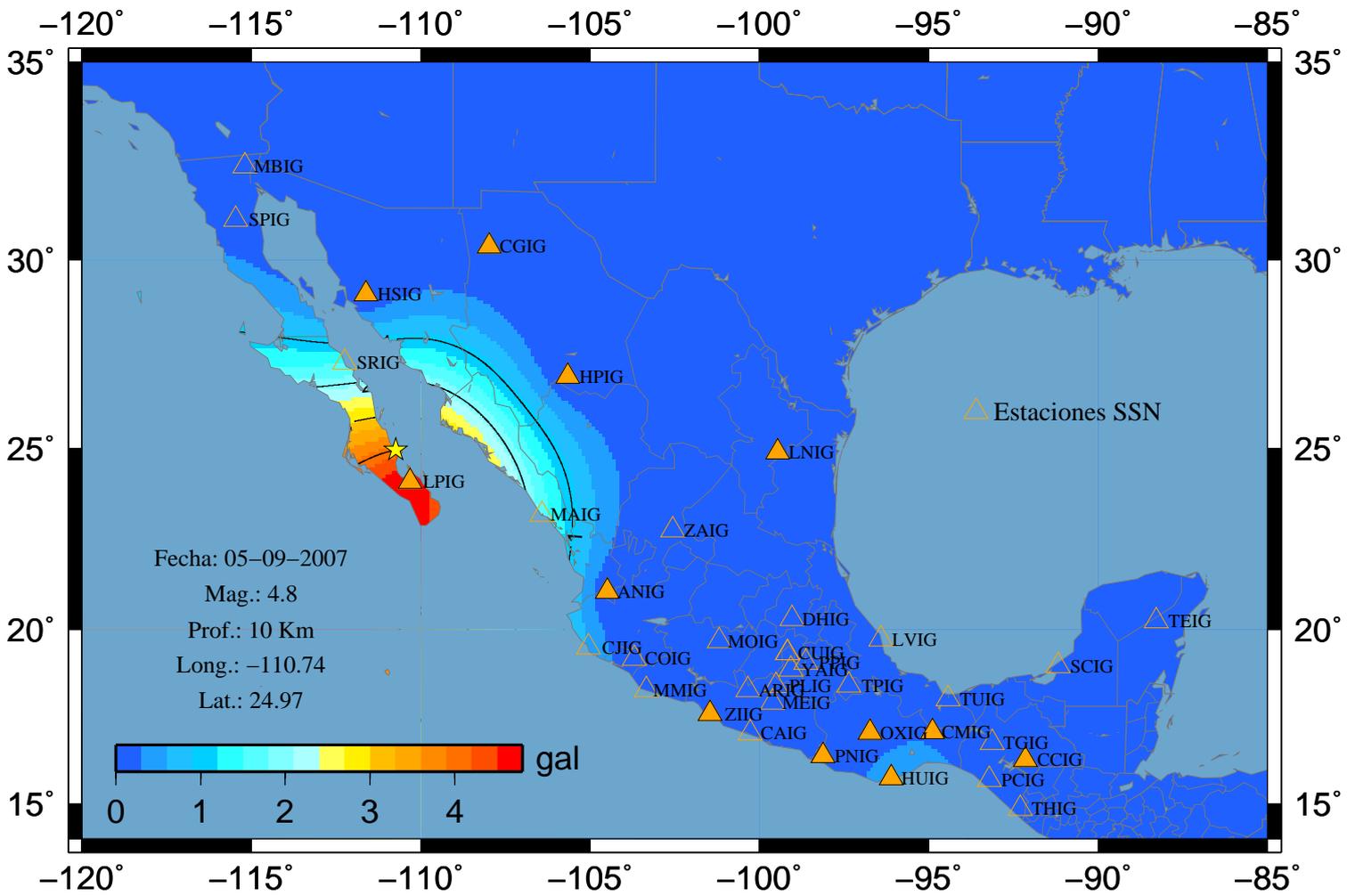
### Sismo 80 V-Vertical



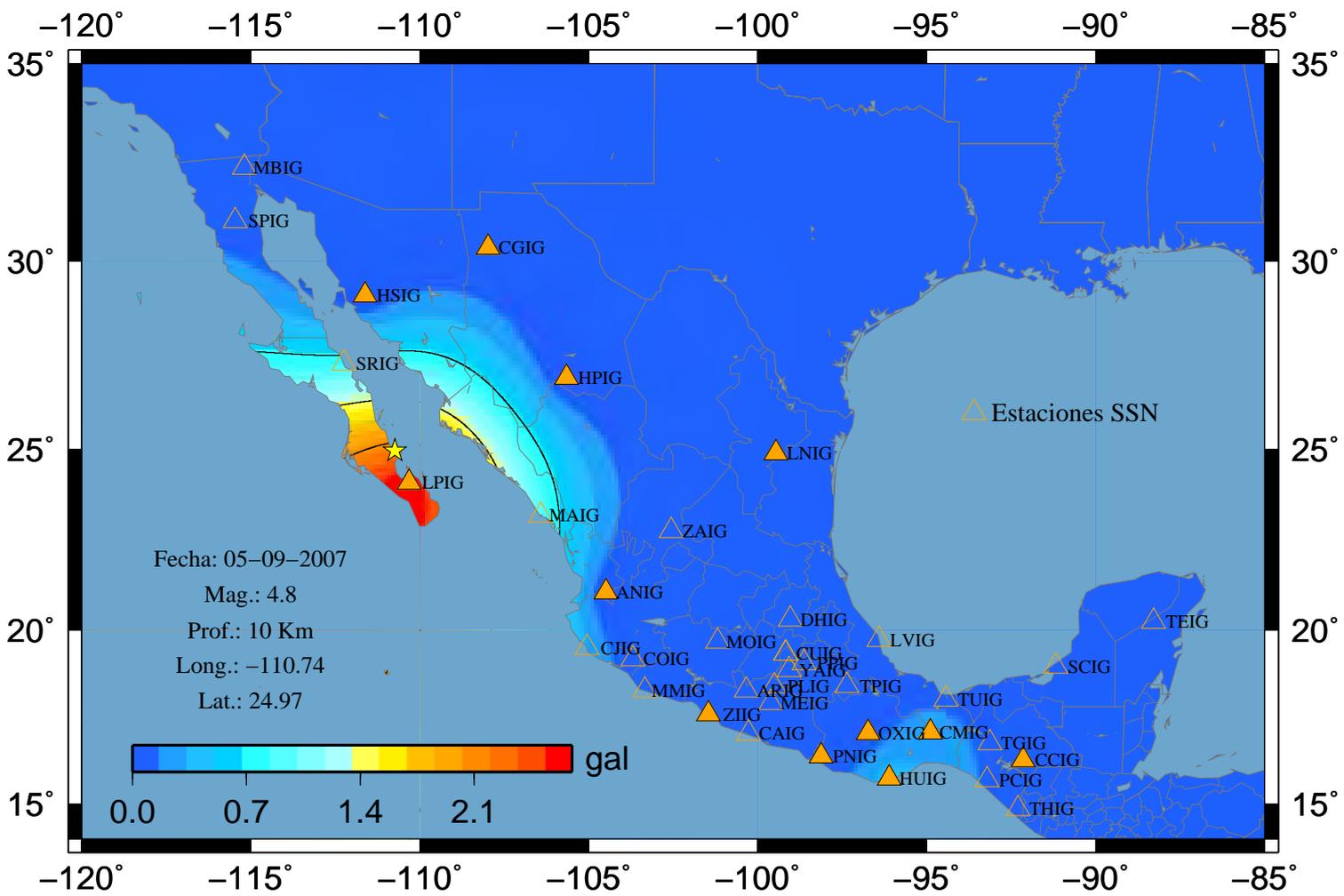
### Sismo 80 I (Max)



### Sismo 83 A-Este

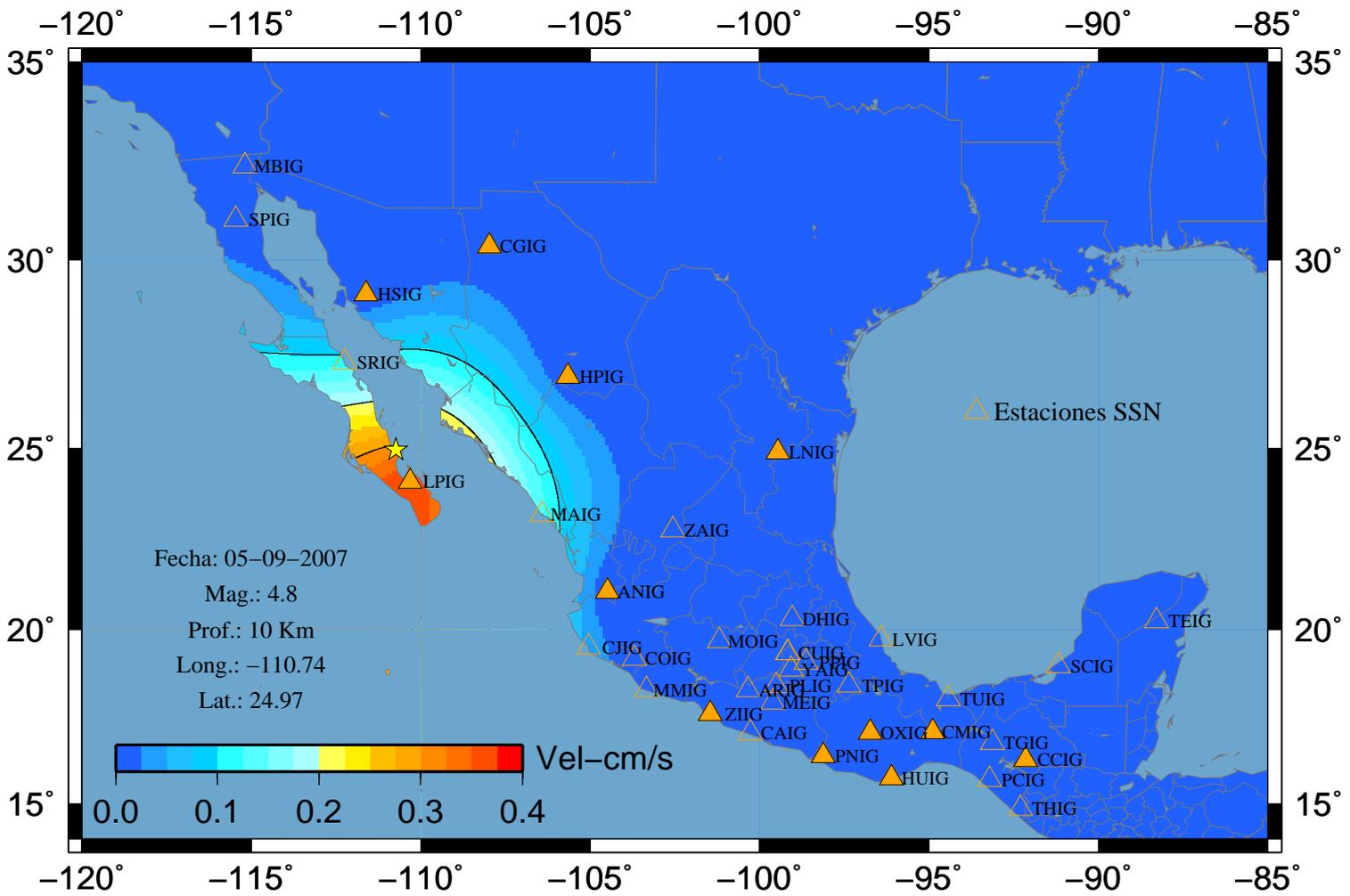


### Sismo 83 A-Norte

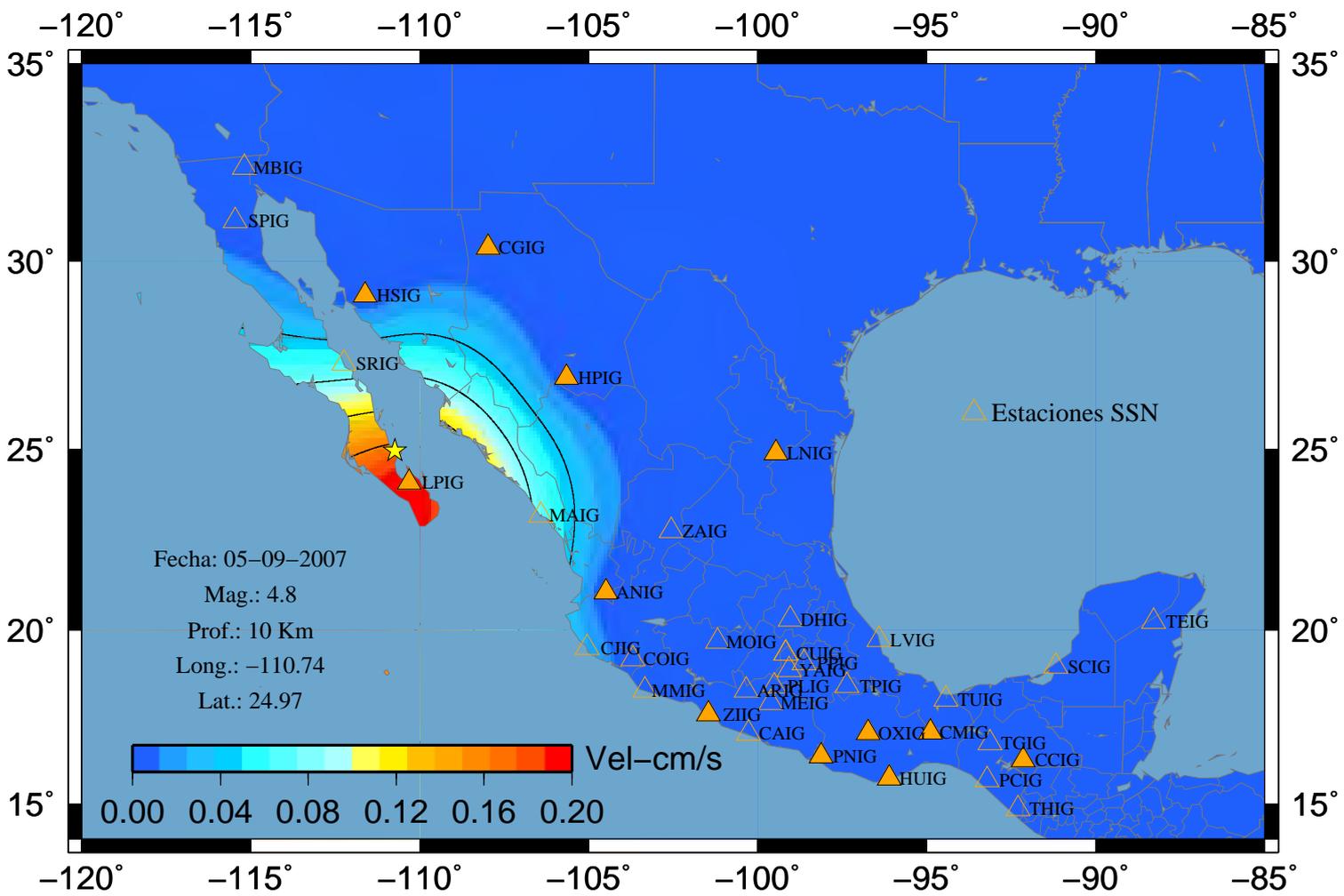




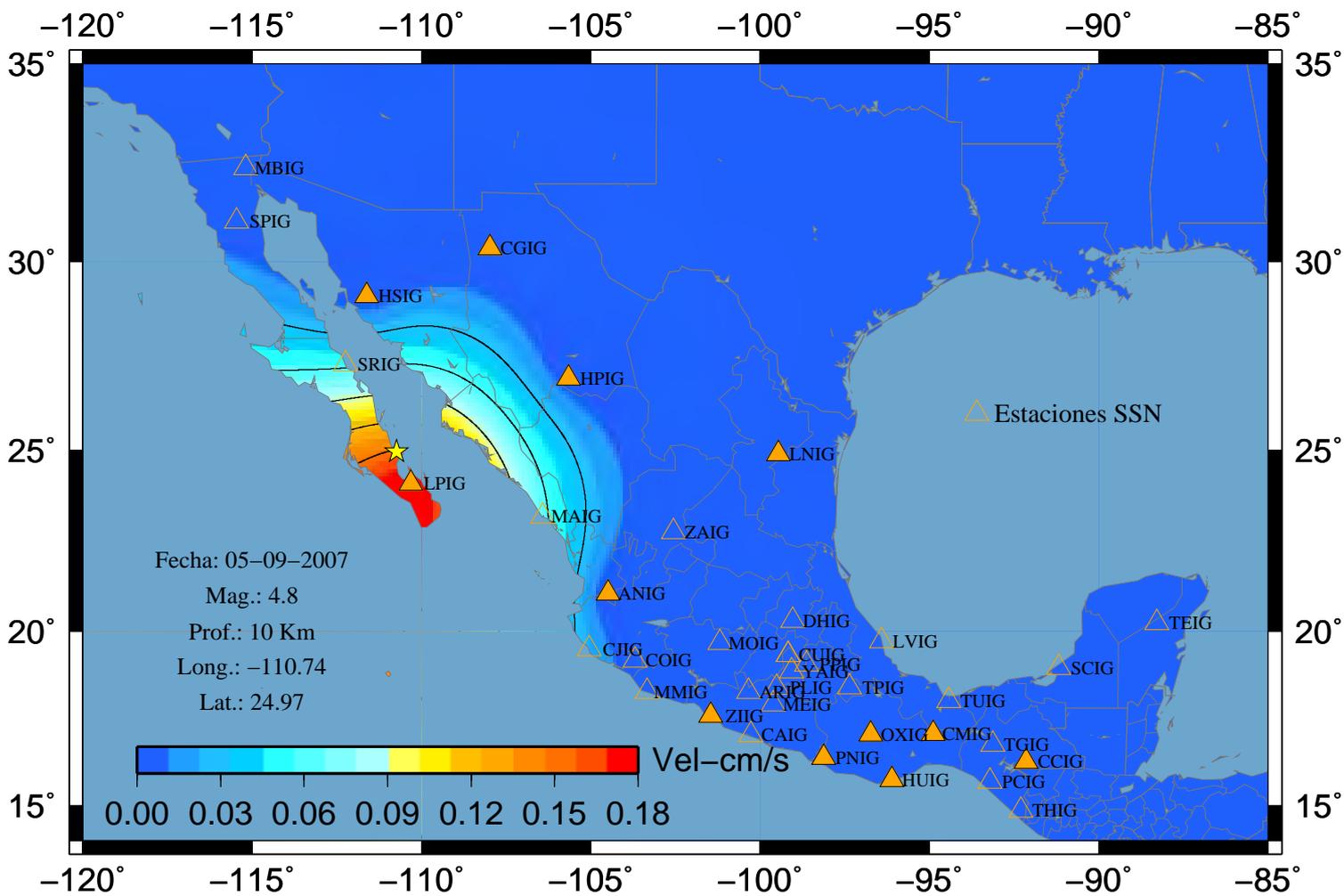
### Sismo 83 V-Este



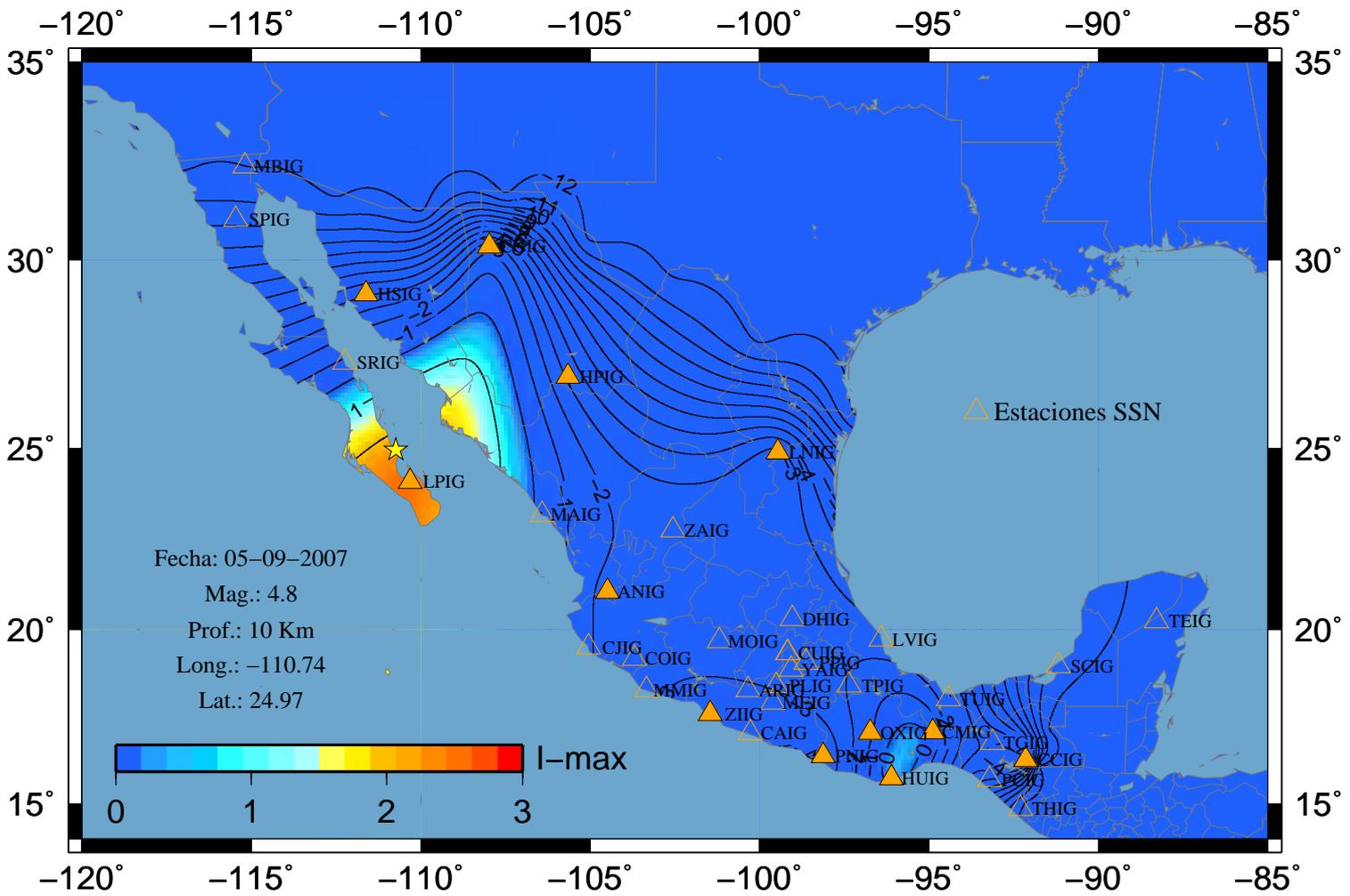
### Sismo 83 V-Norte



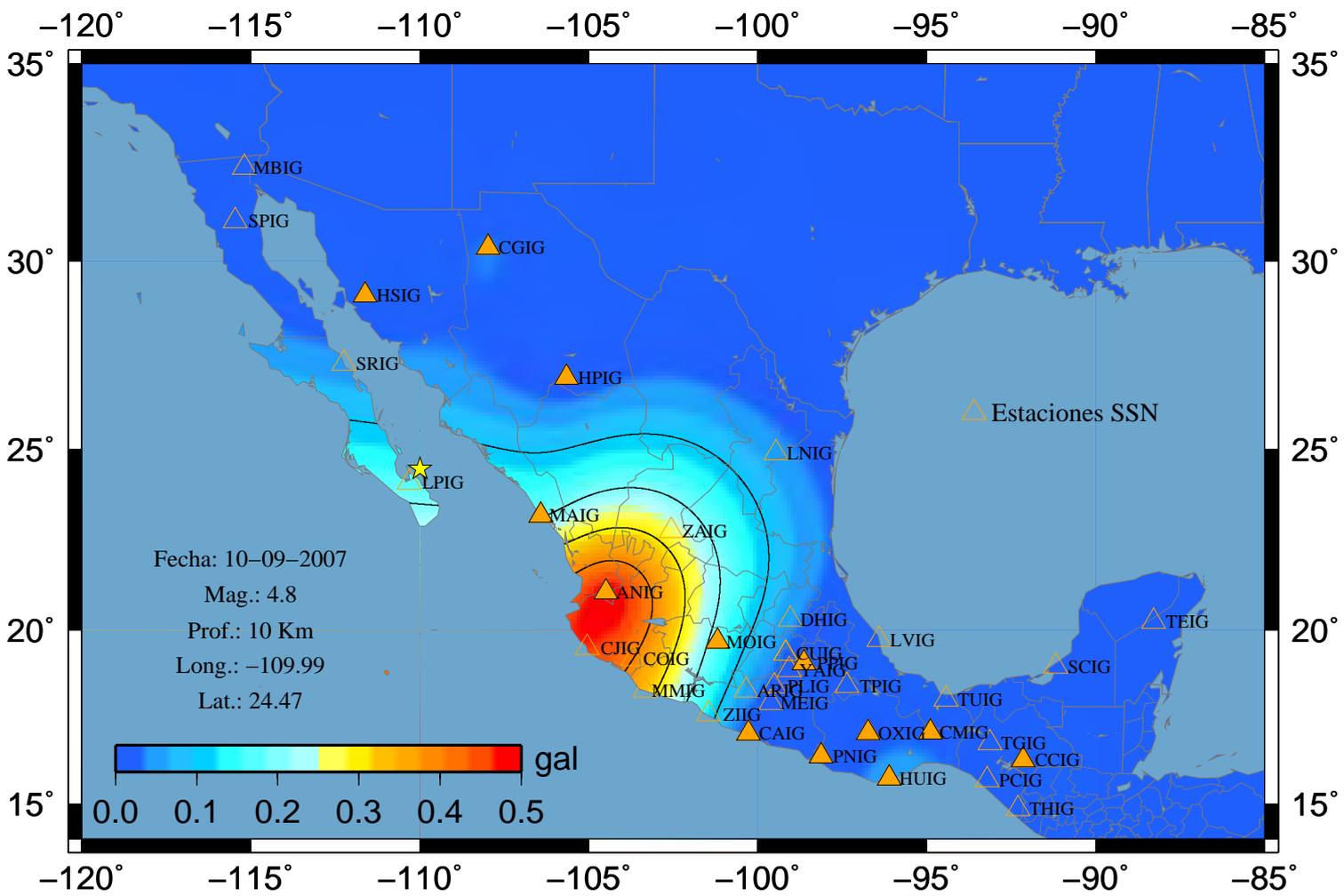
### Sismo 83 V-Vertical



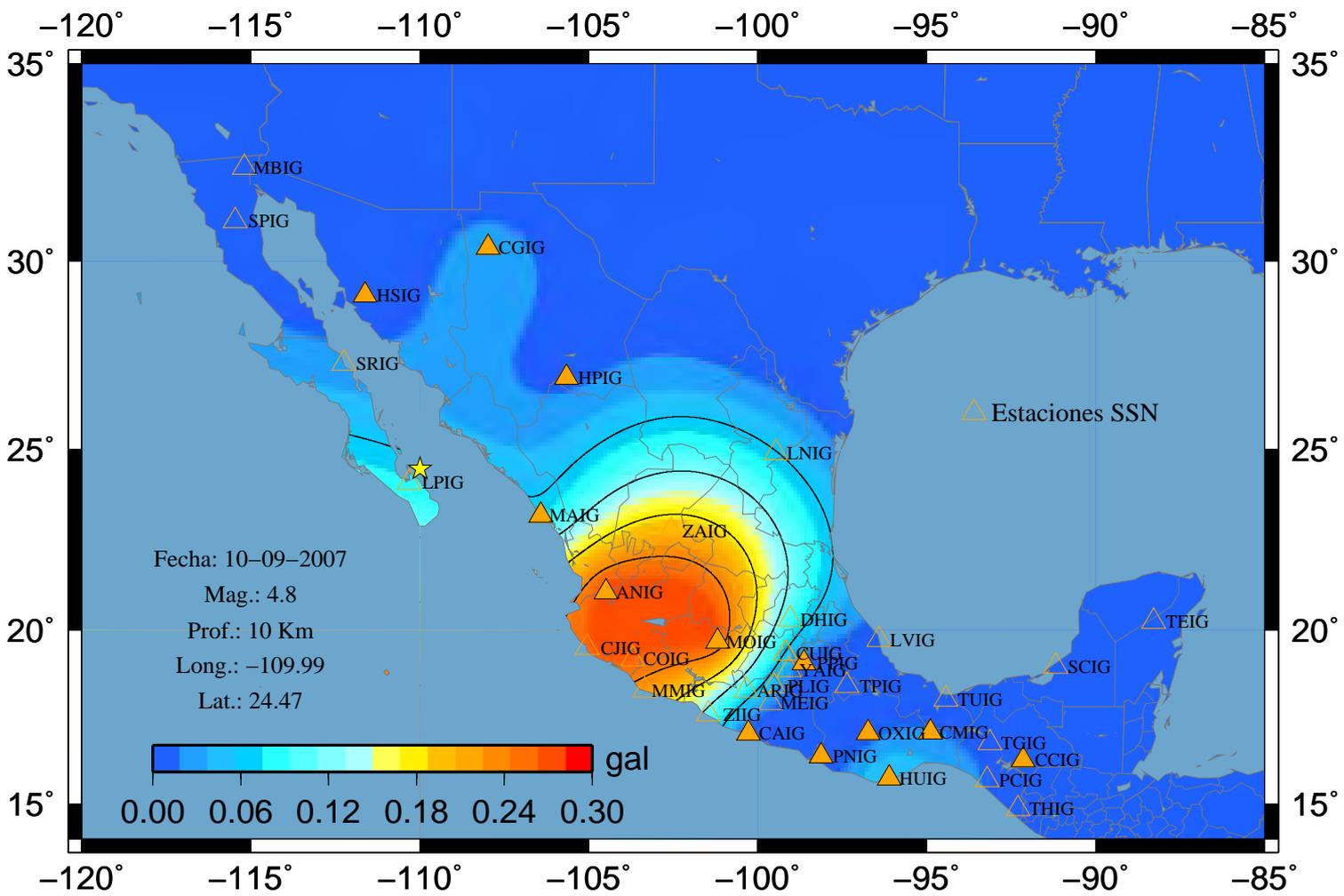
### Sismo 83 I (Max)



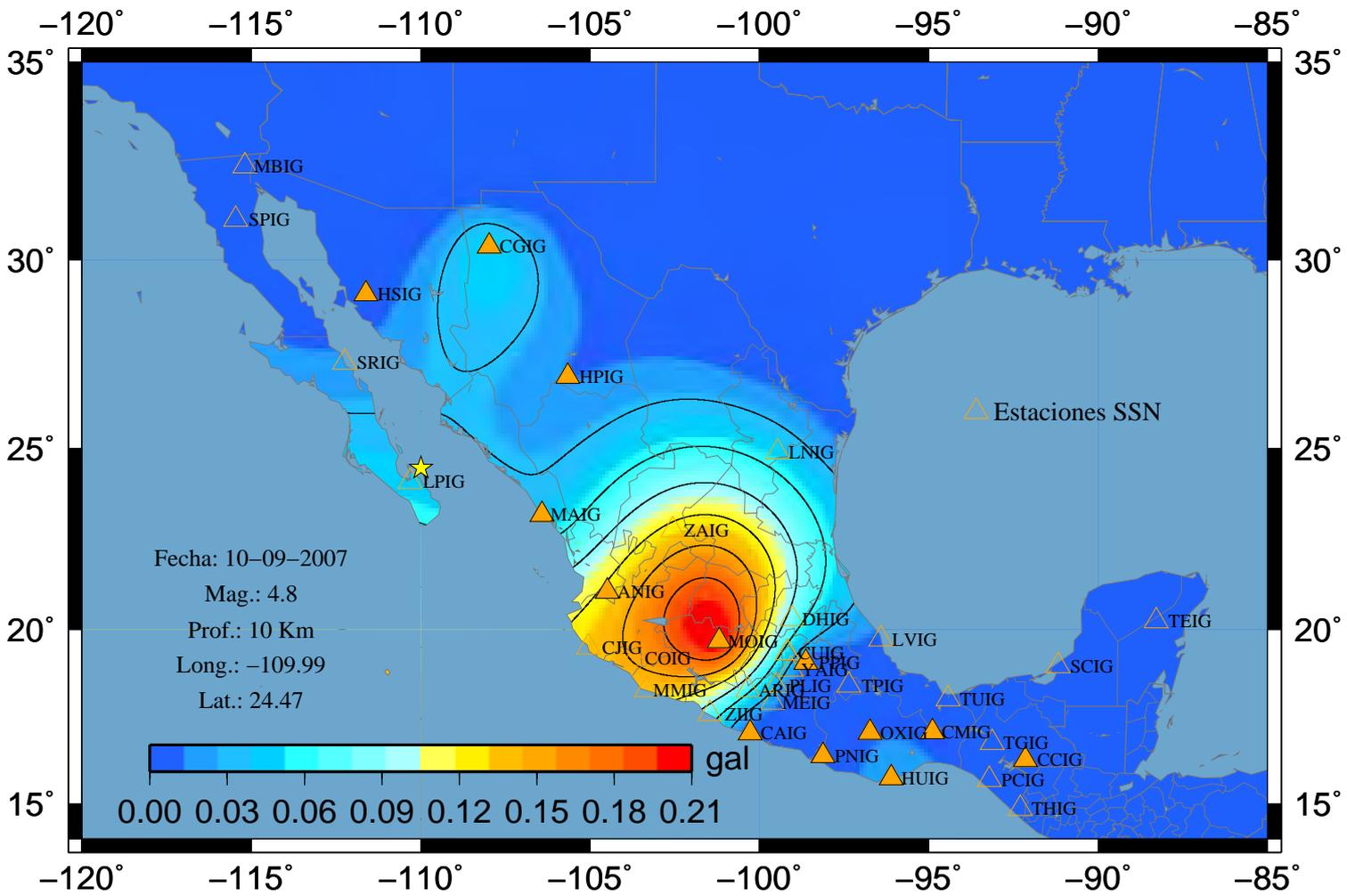
### Sismo 85 A-Este



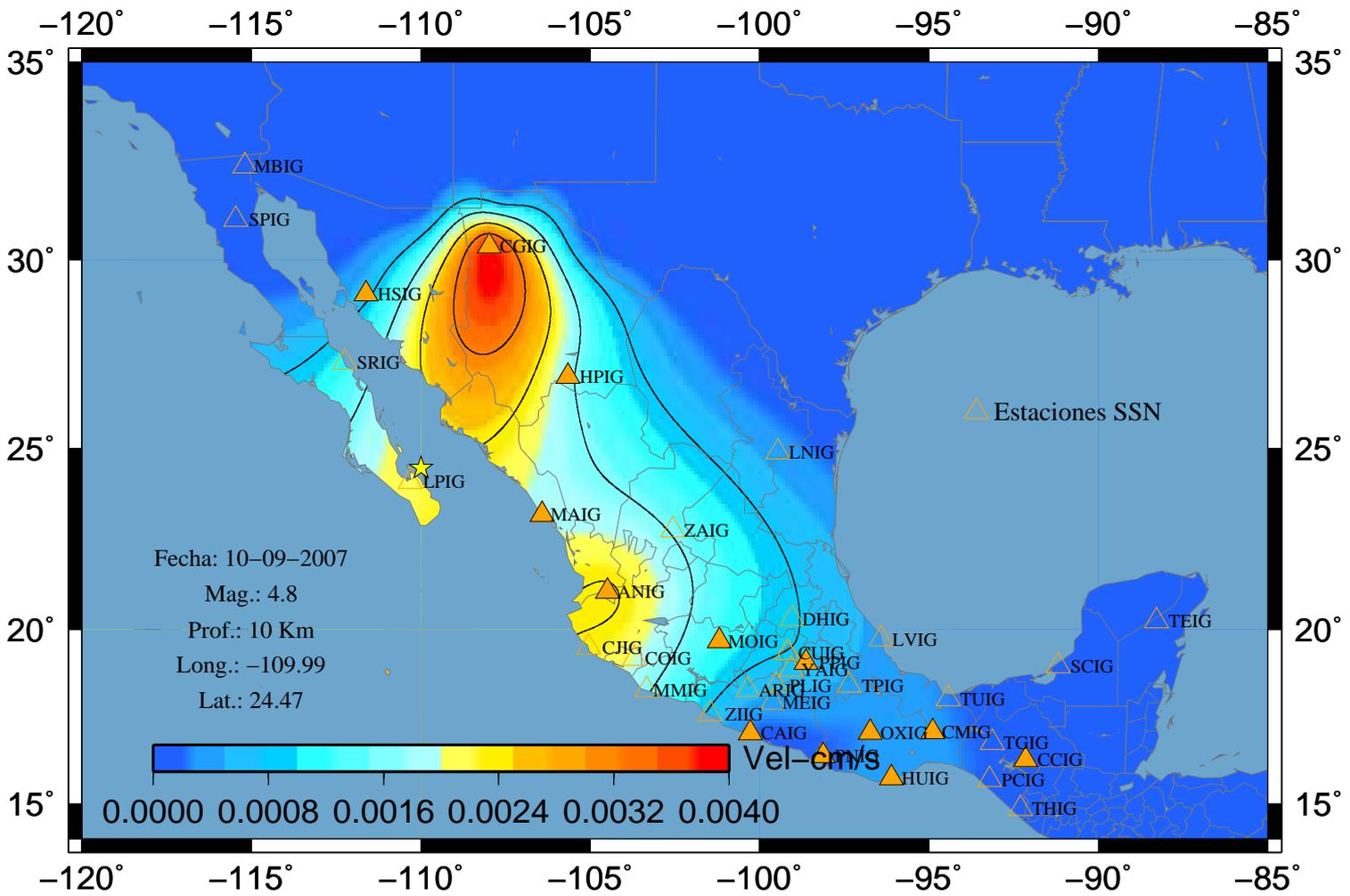
### Sismo 85 A-Norte



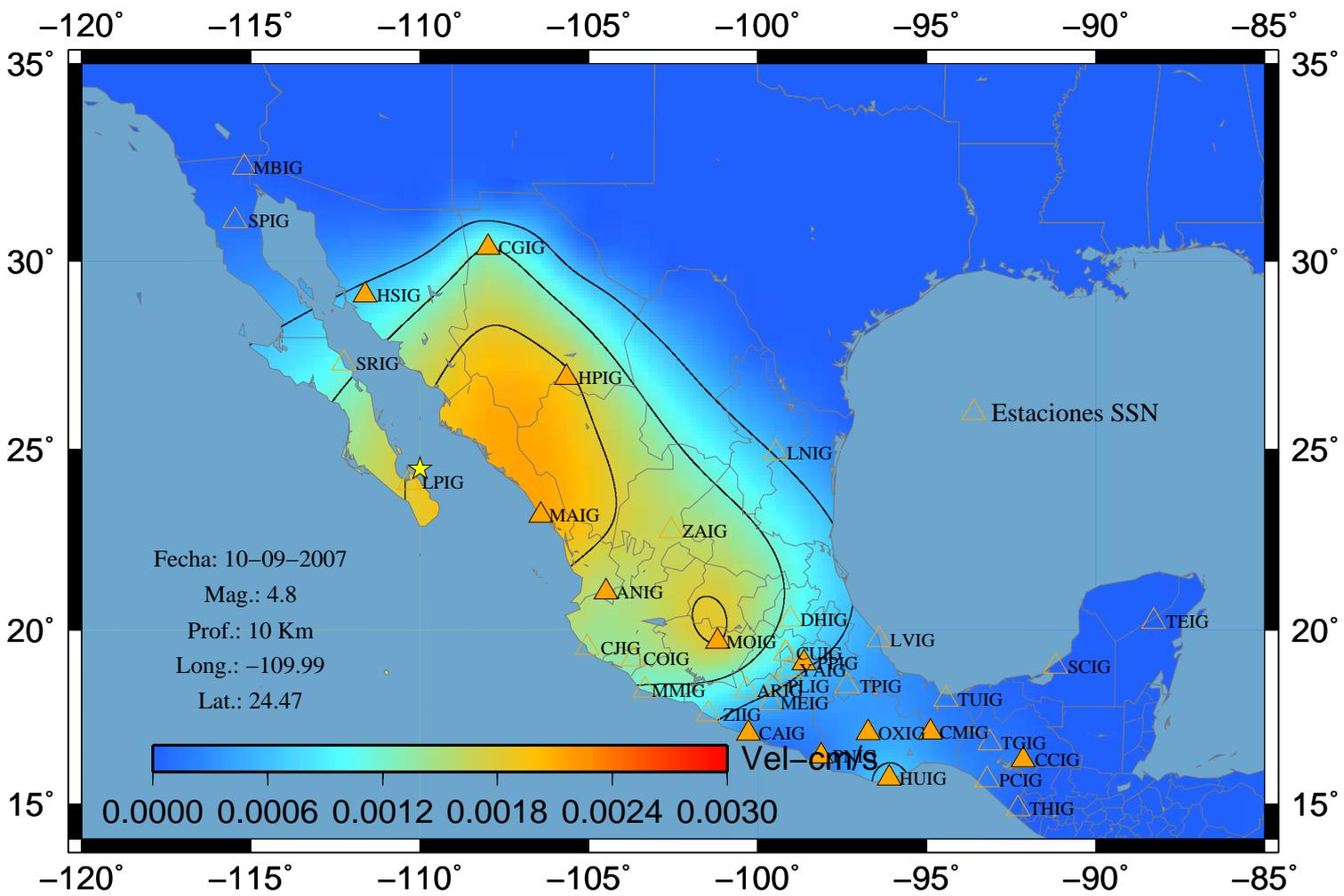
### Sismo 85 A-Vertical



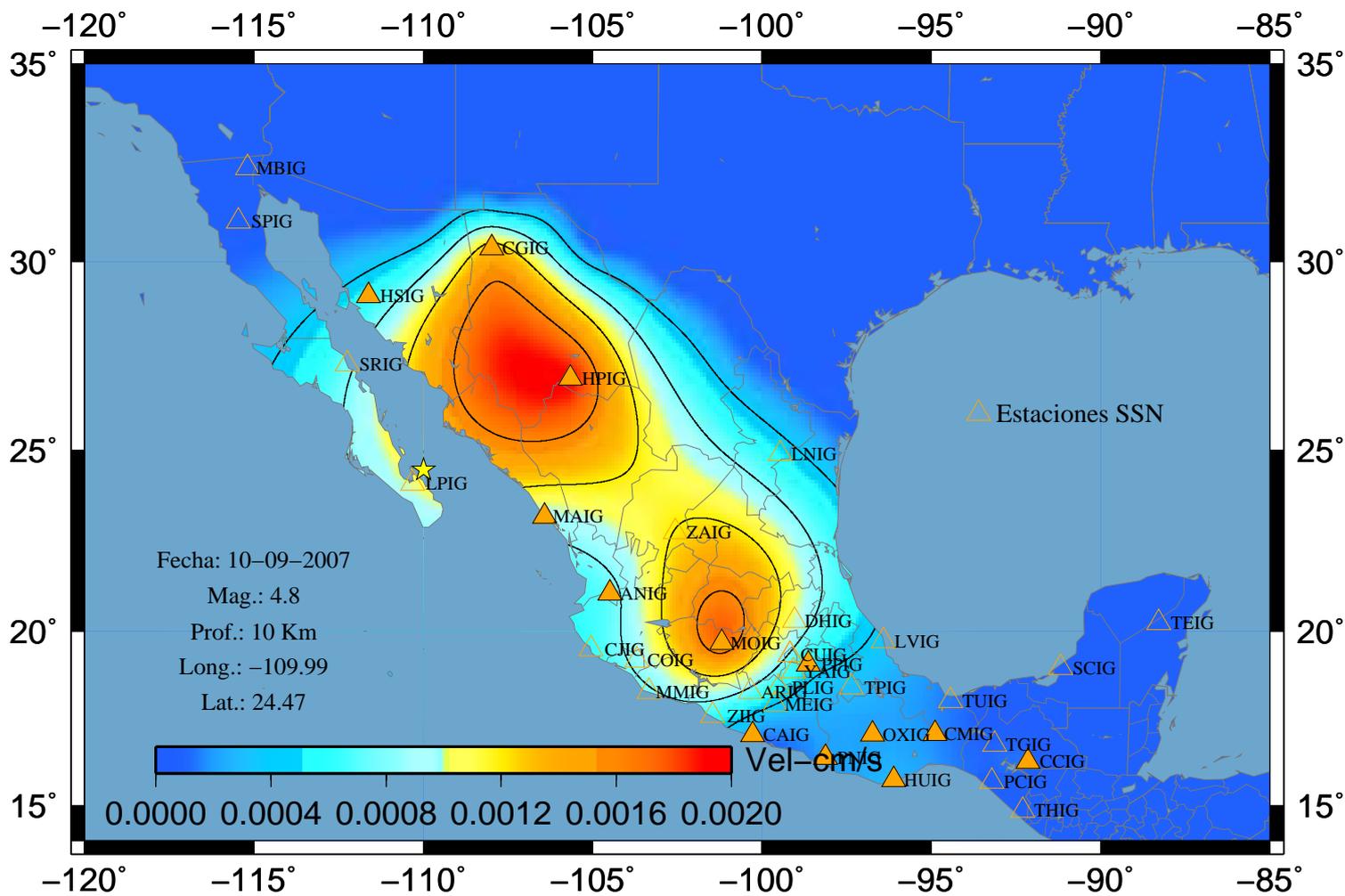
### Sismo 85 V-Este



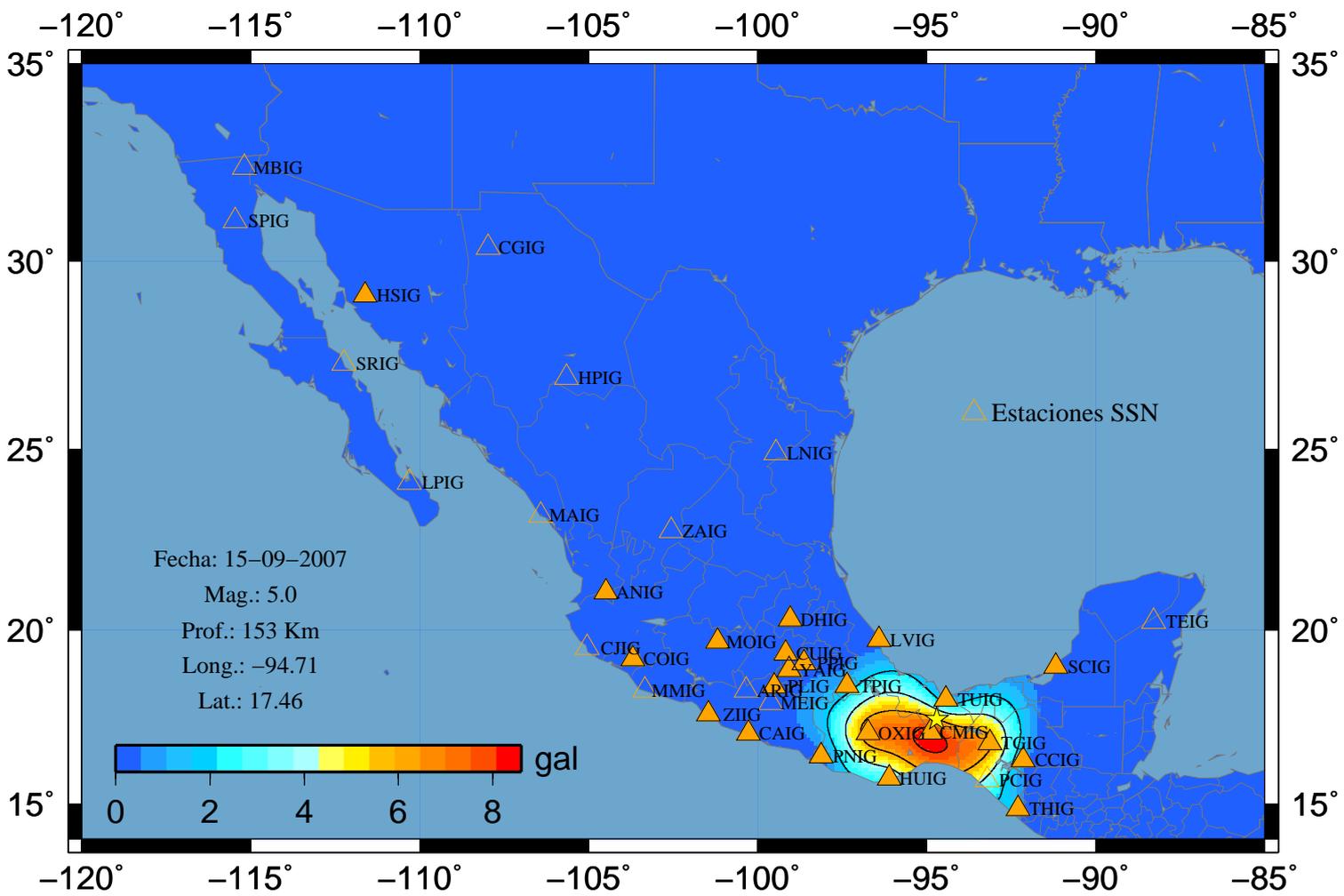
### Sismo 85 V-Norte



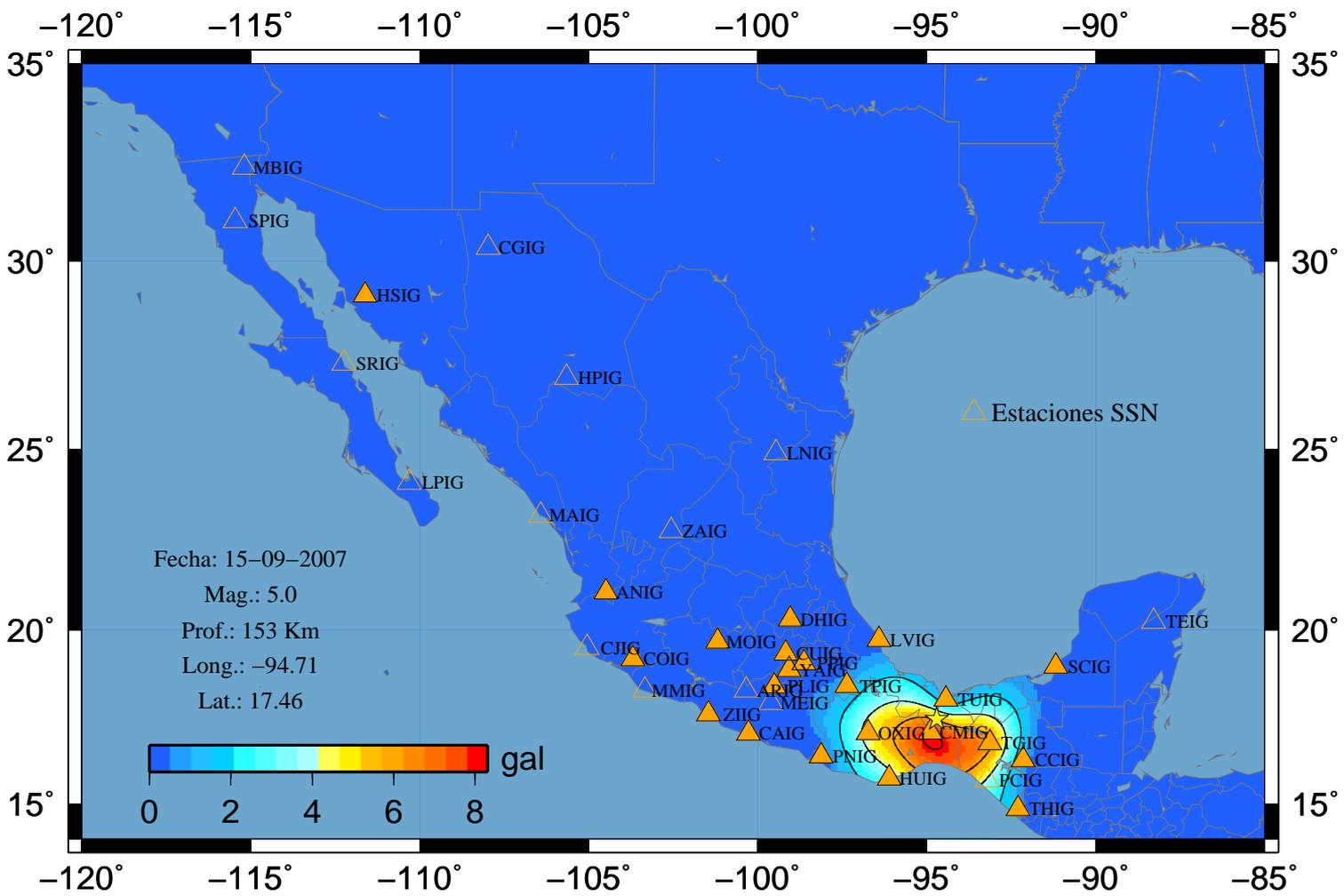
### Sismo 85 V-Vertical



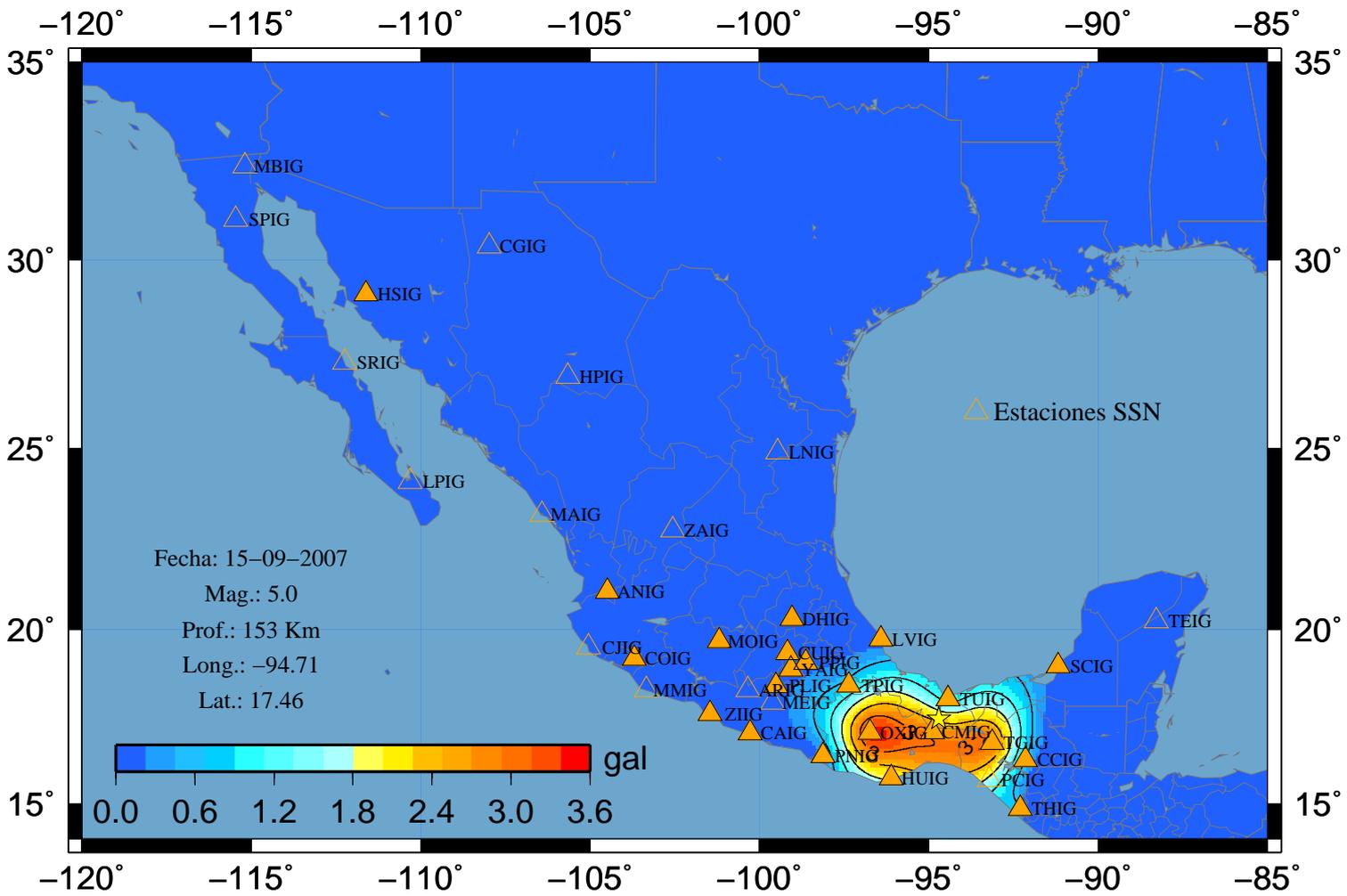
# Sismo 86 A-Este



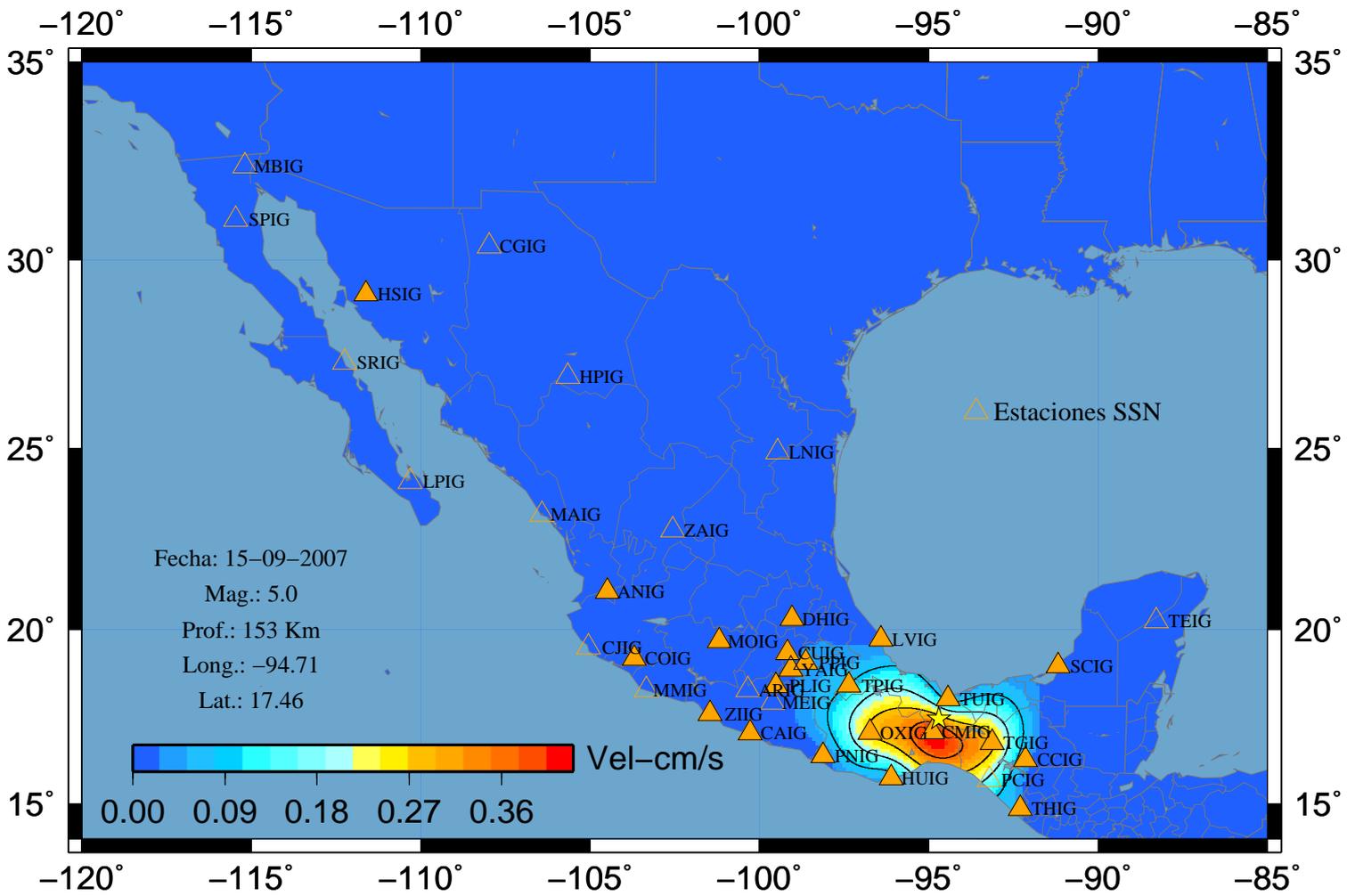
### Sismo 86 A-Norte



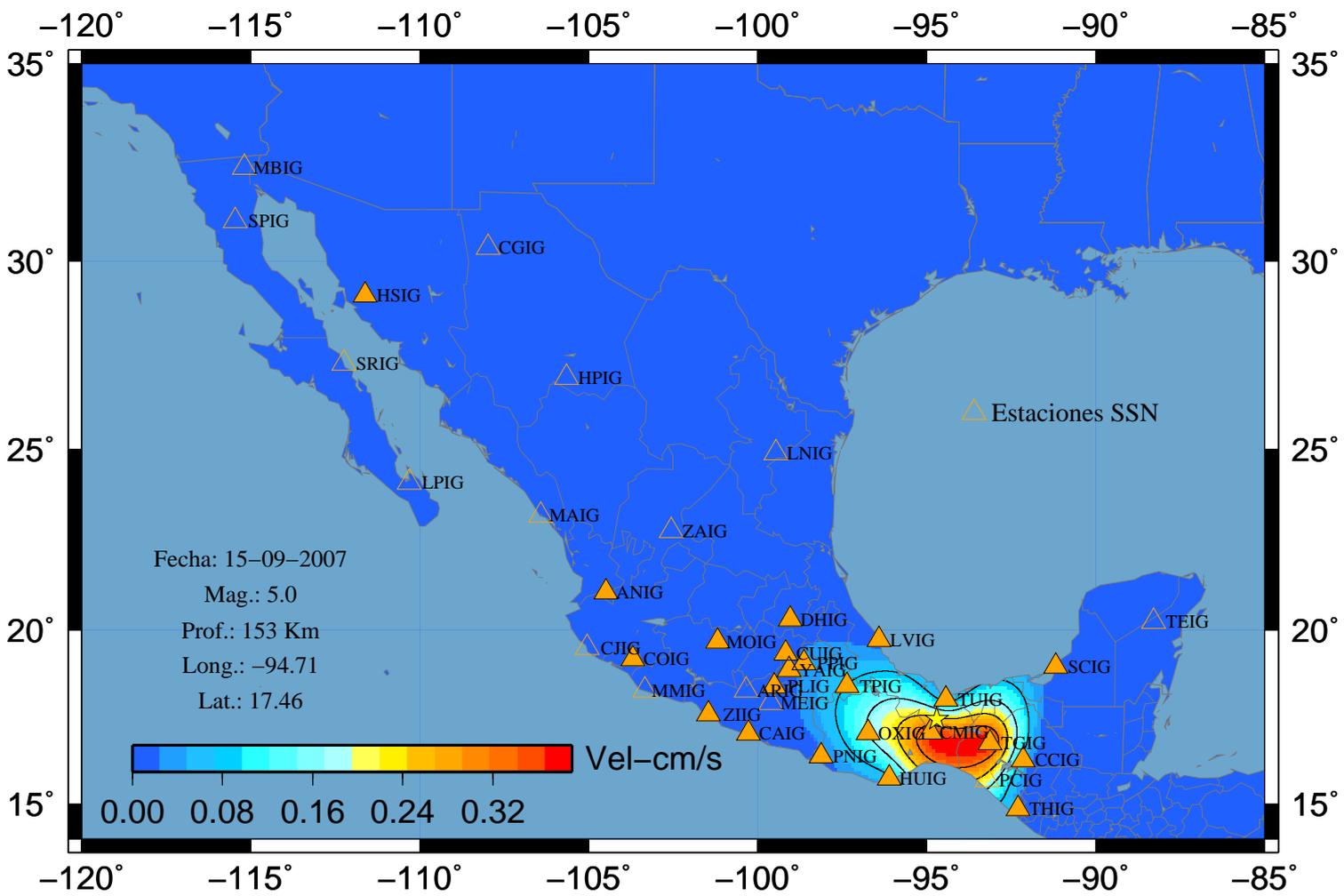
### Sismo 86 A-Vertical



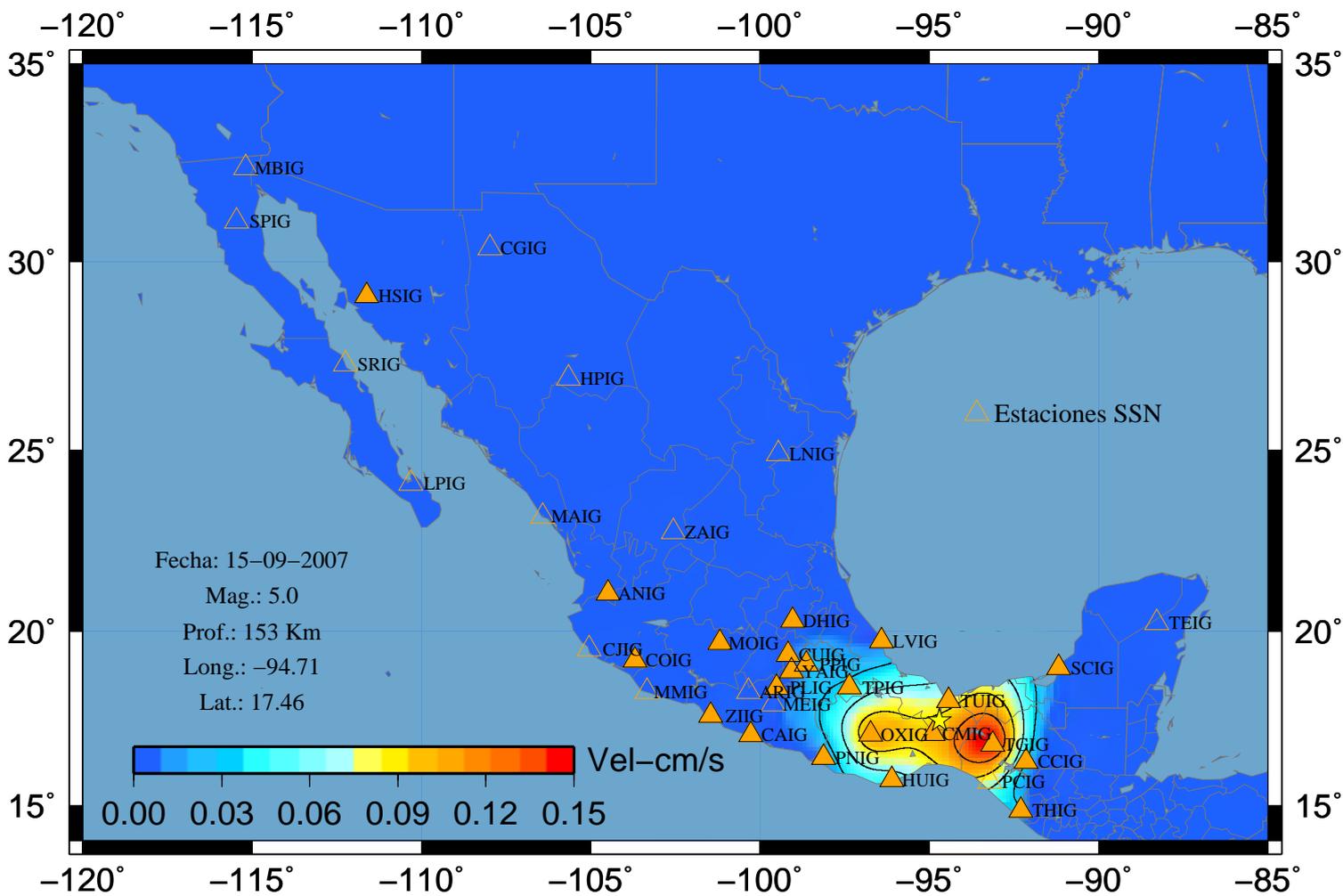
### Sismo 86 V-Este



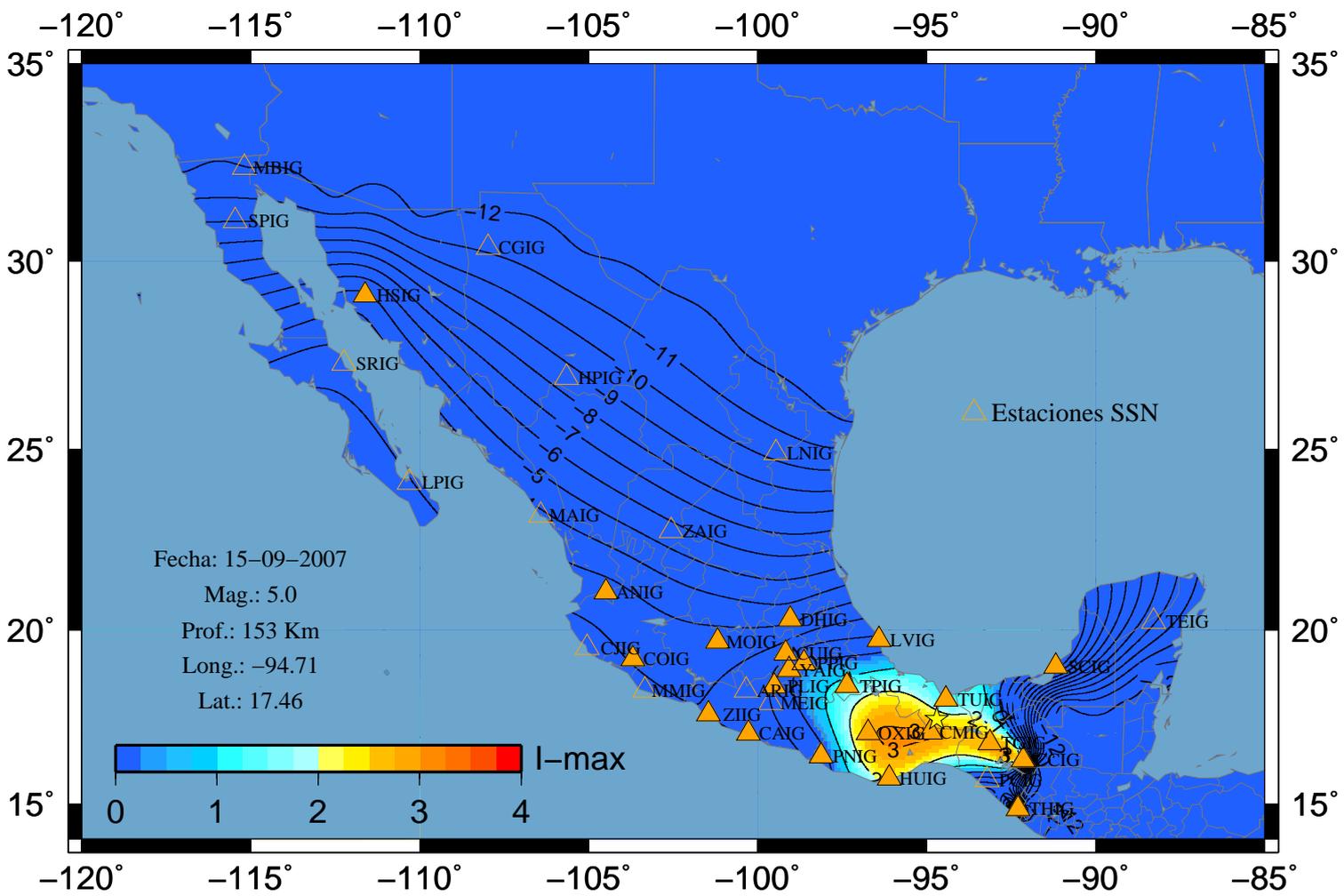
### Sismo 86 V-Norte



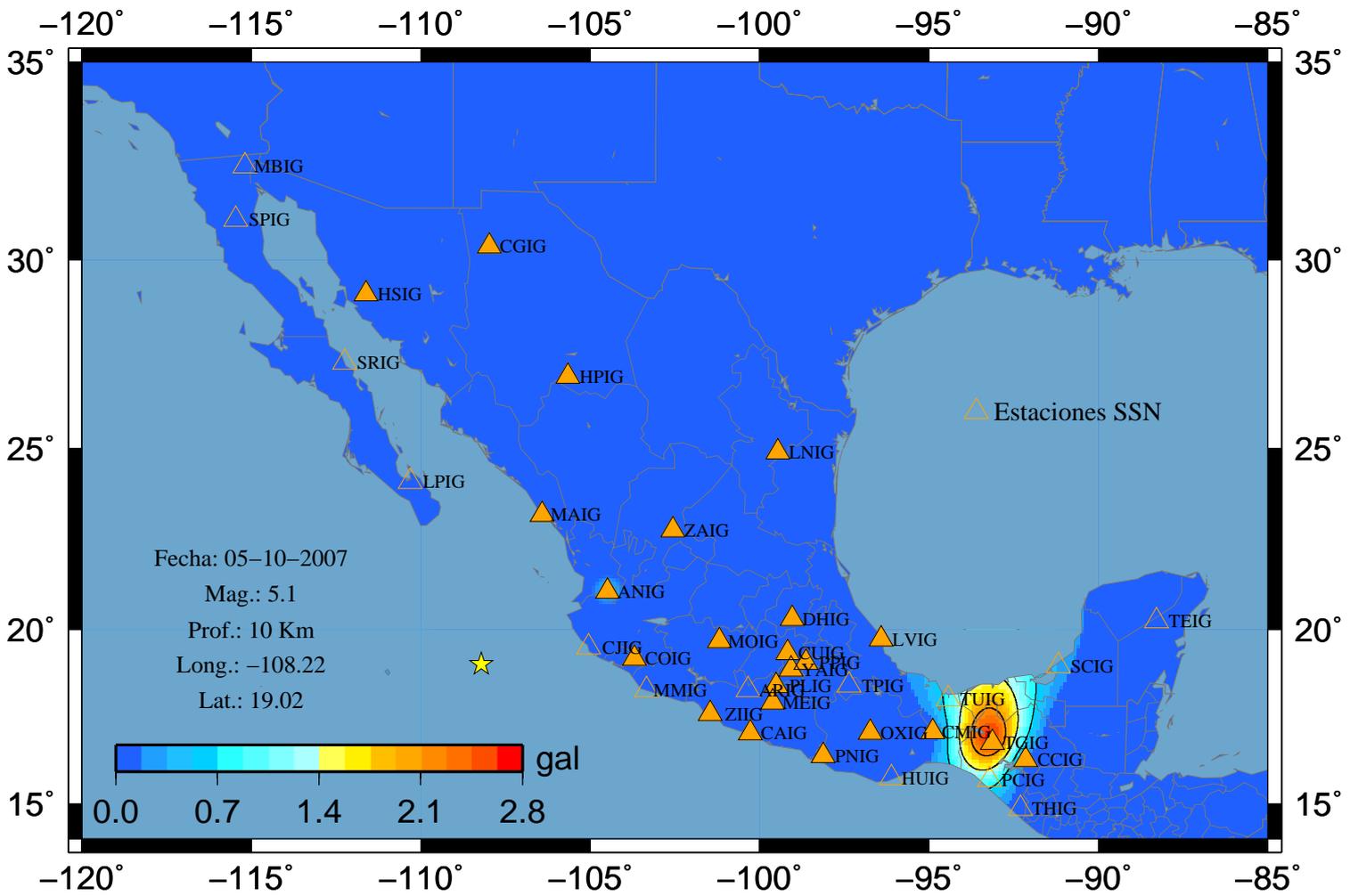
### Sismo 86 V-Vertical



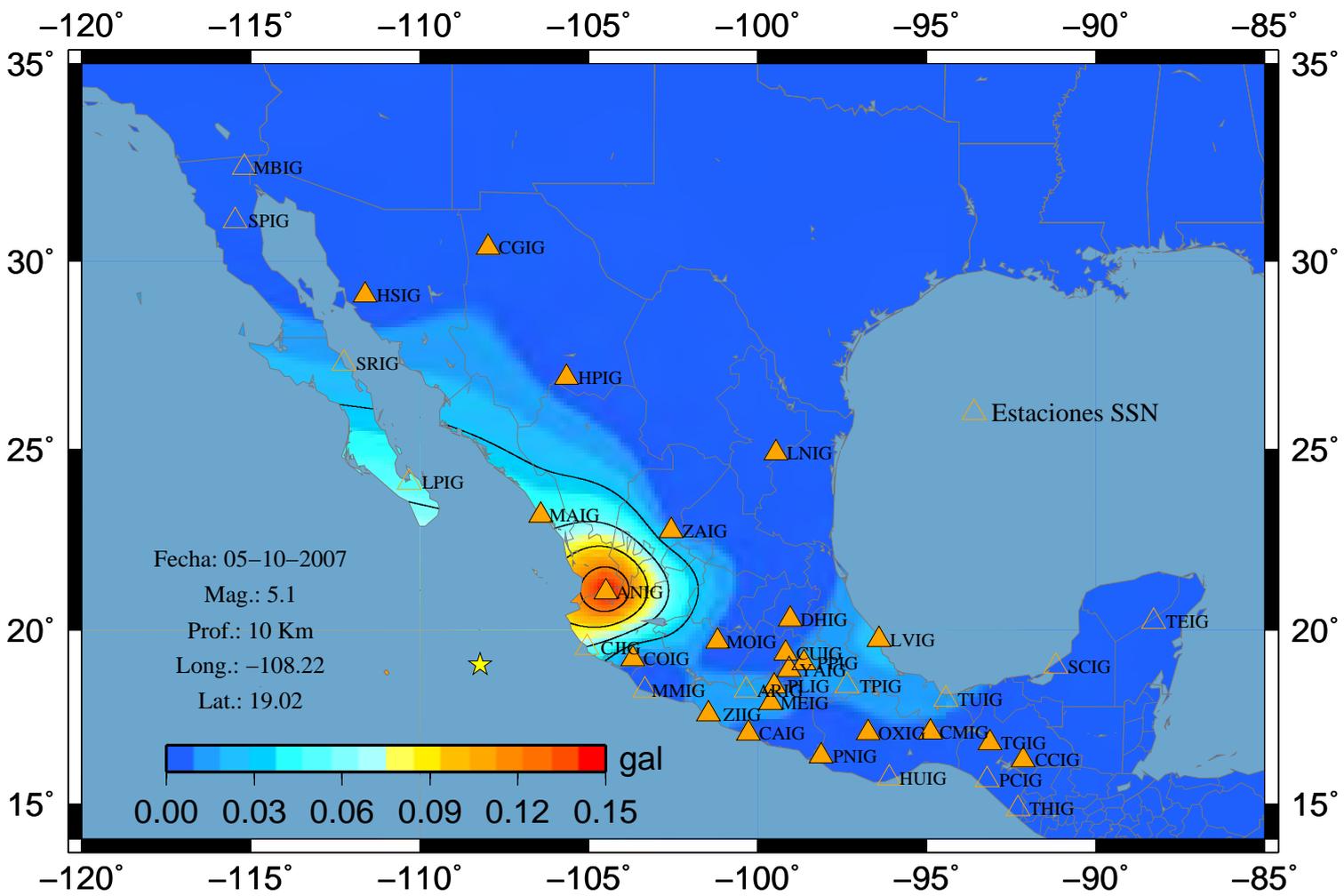
### Sismo 86 I (Max)



# Sismo 90 A-Este

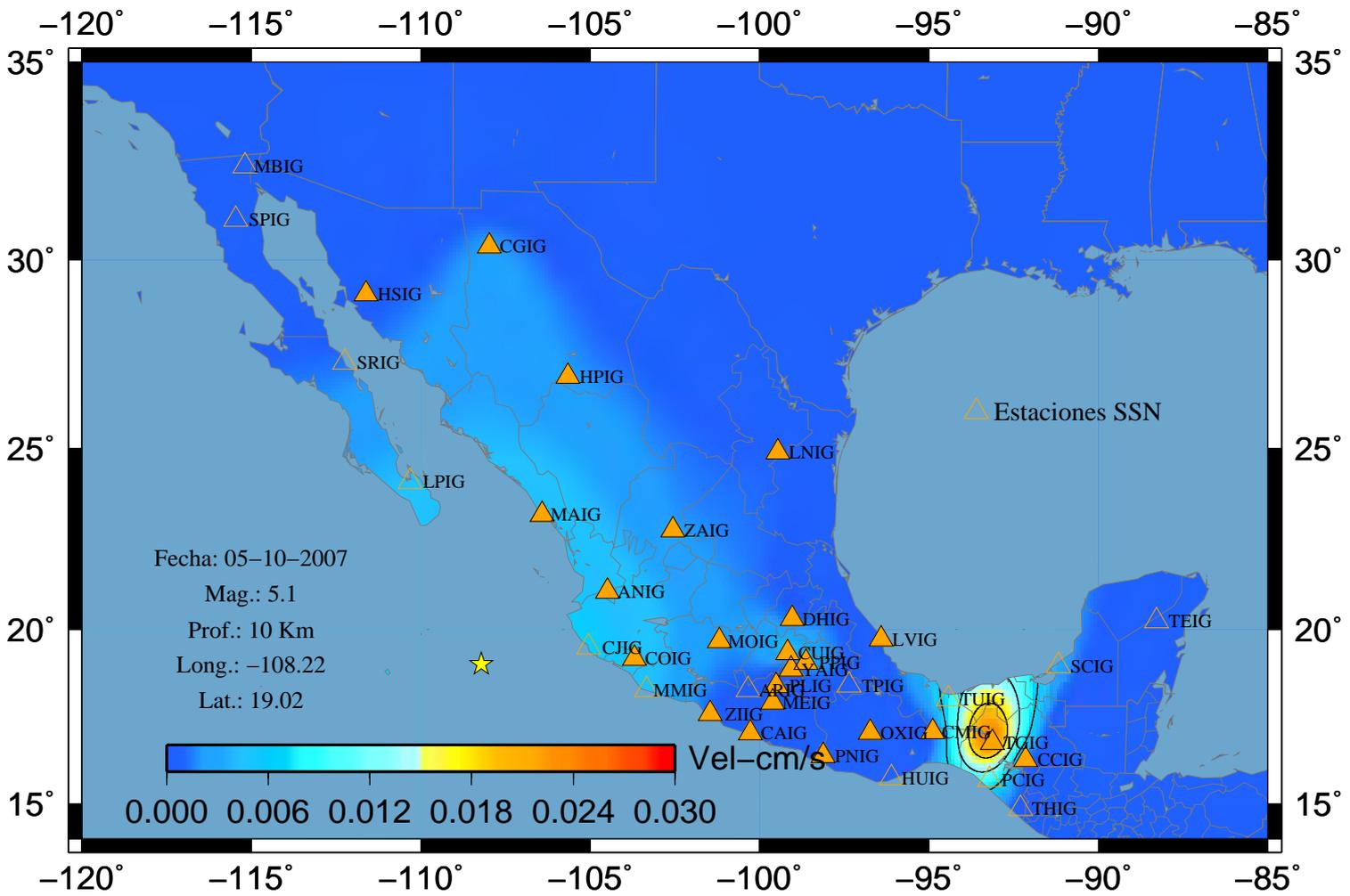


### Sismo 90 A-Norte

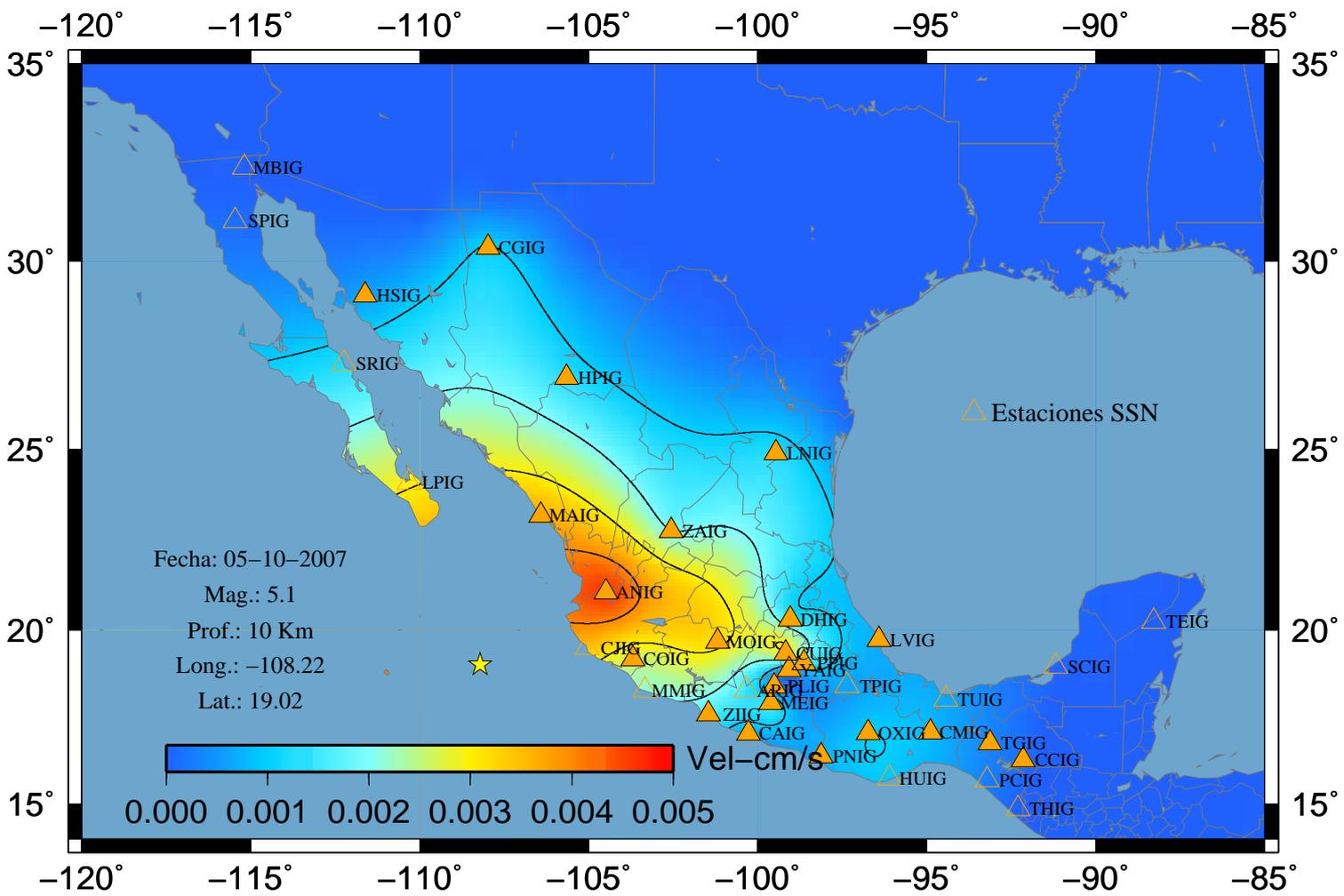




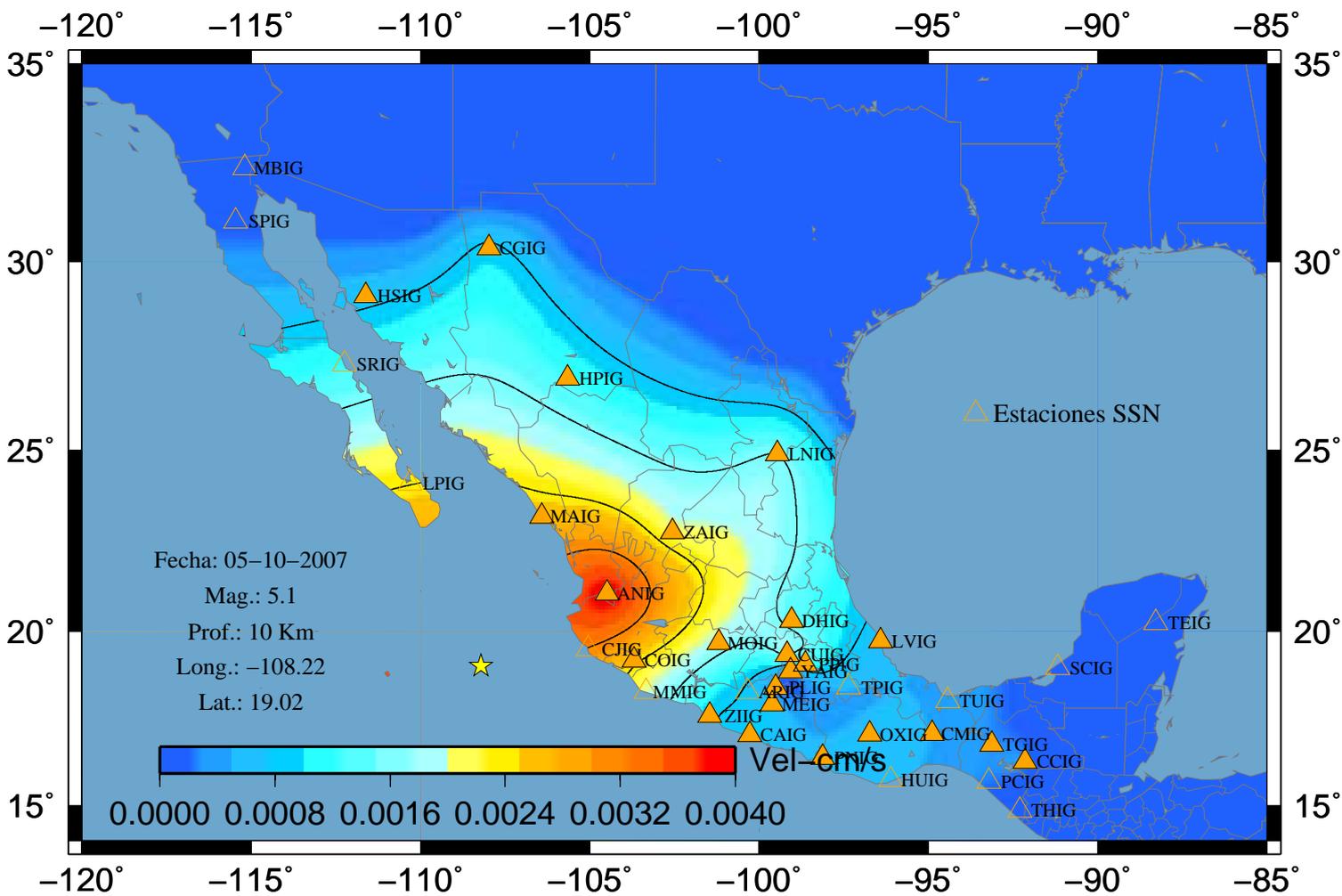
# Sismo 90 V-Este



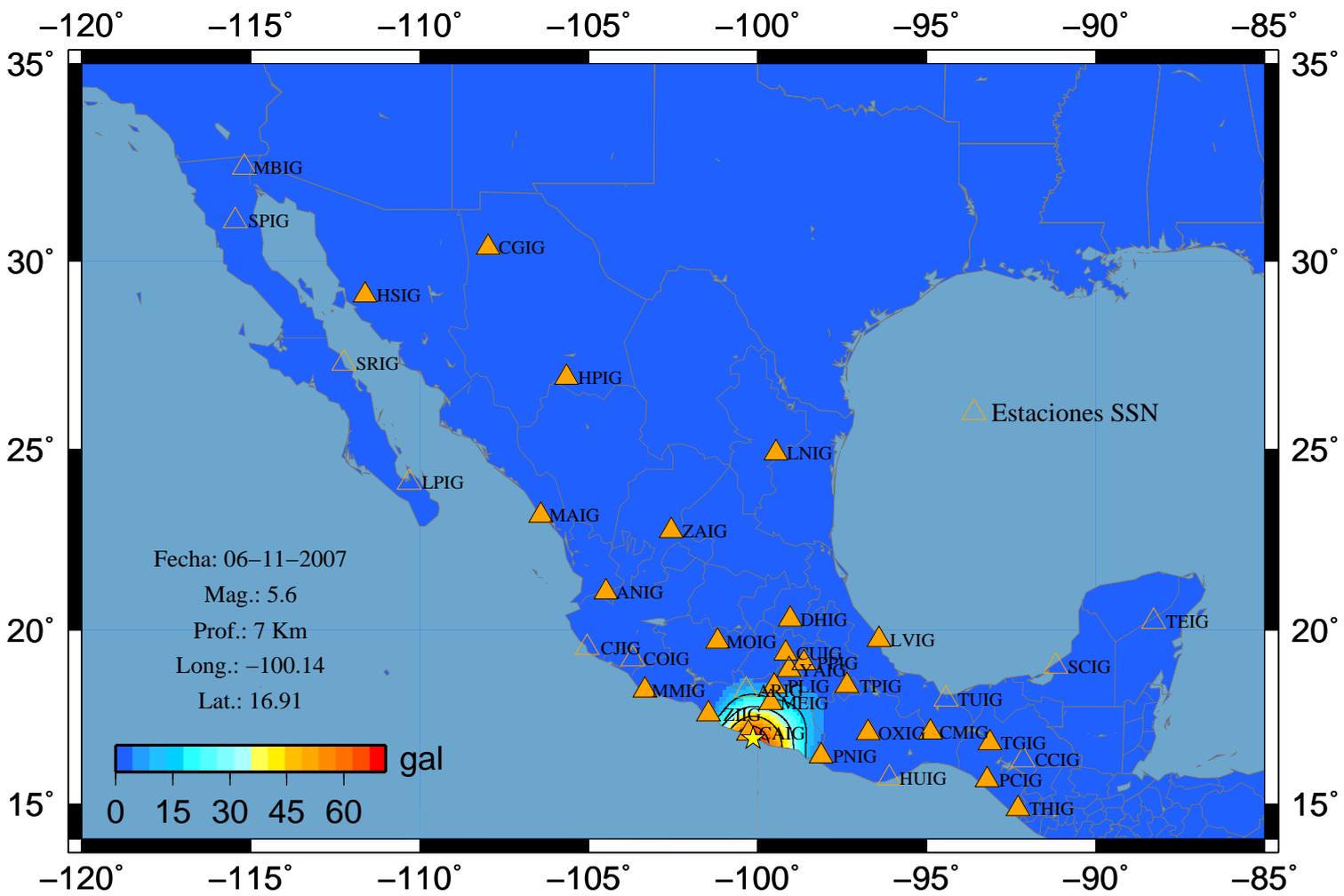
### Sismo 90 V-Norte



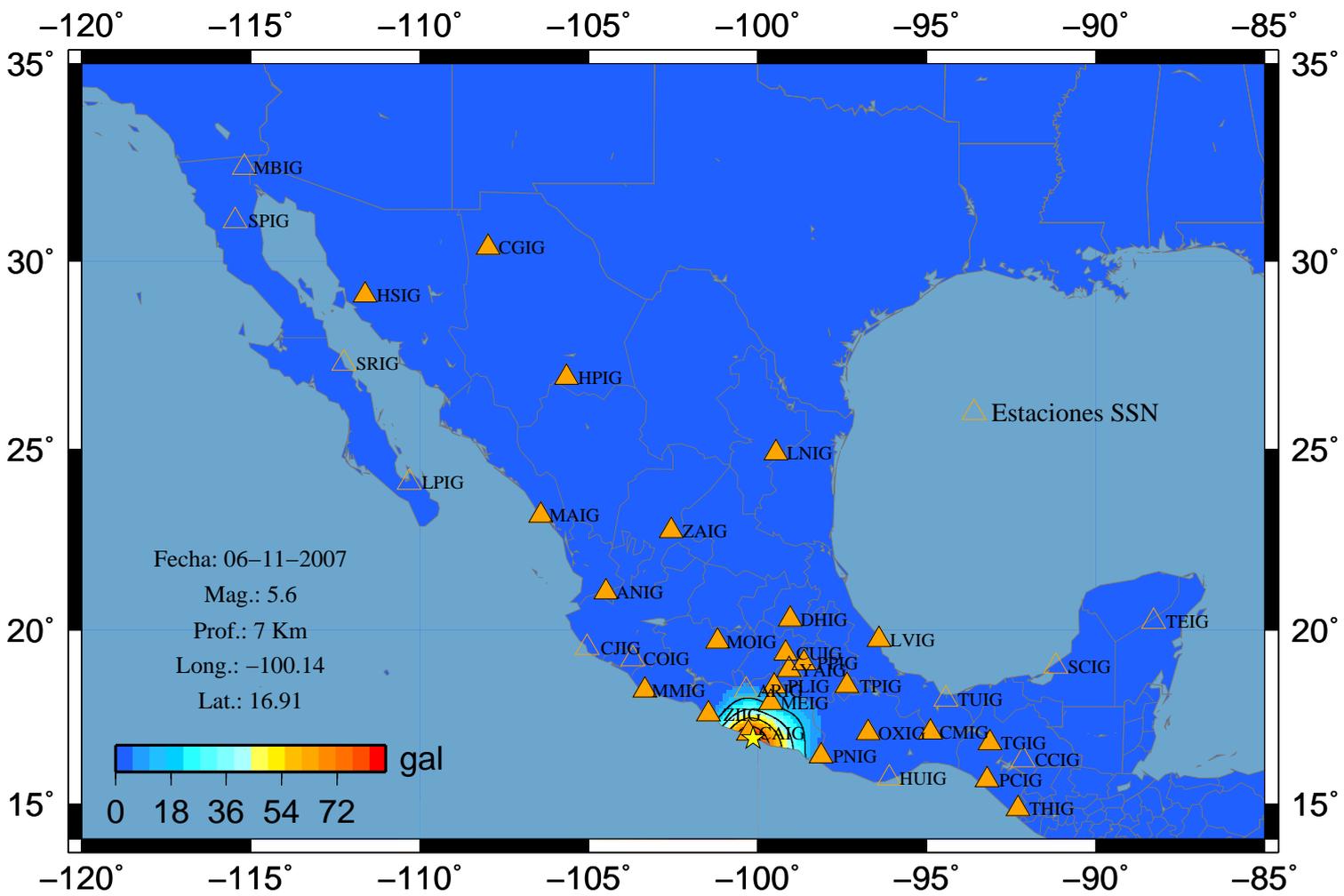
### Sismo 90 V-Vertical



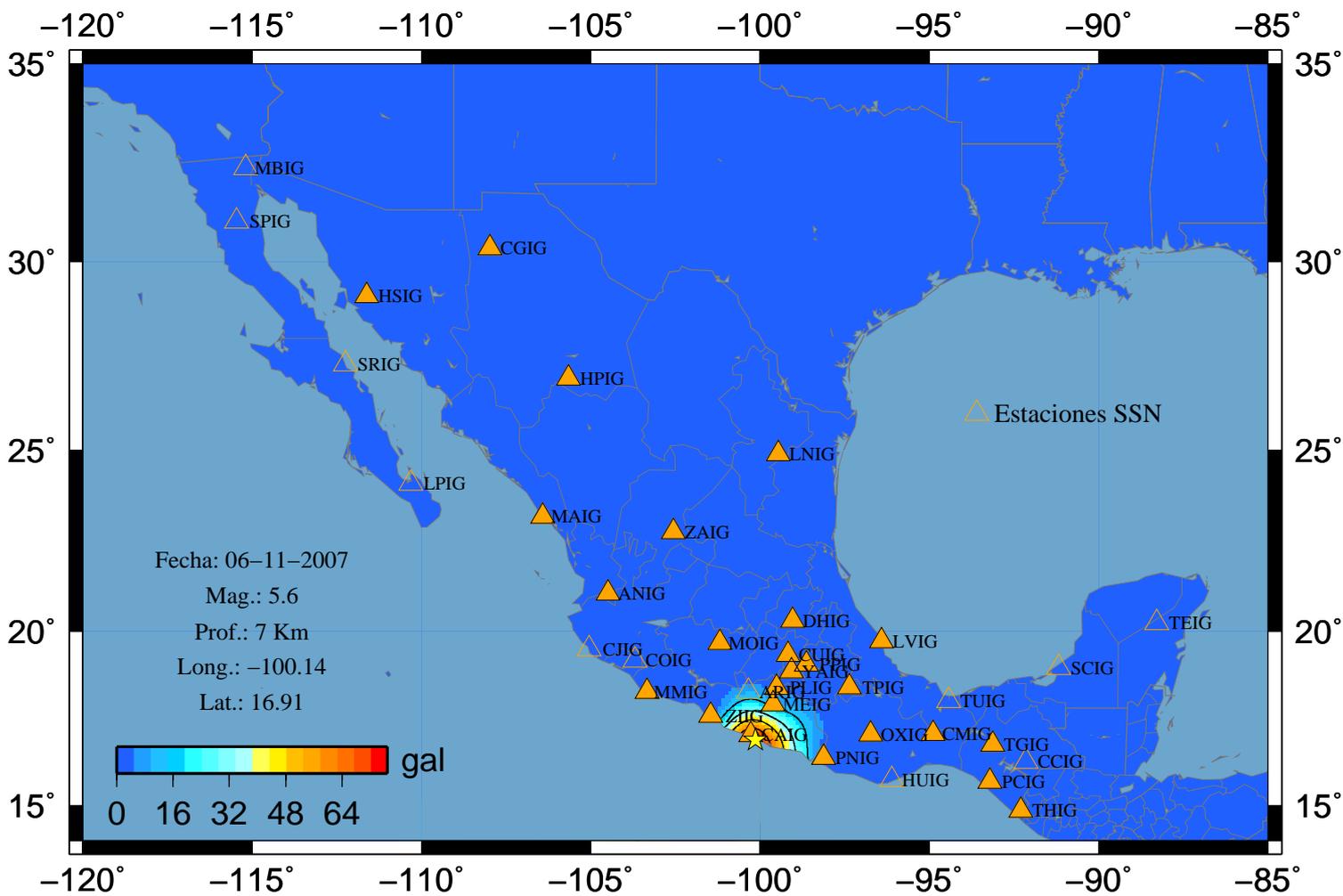
# Sismo 93 A-Este



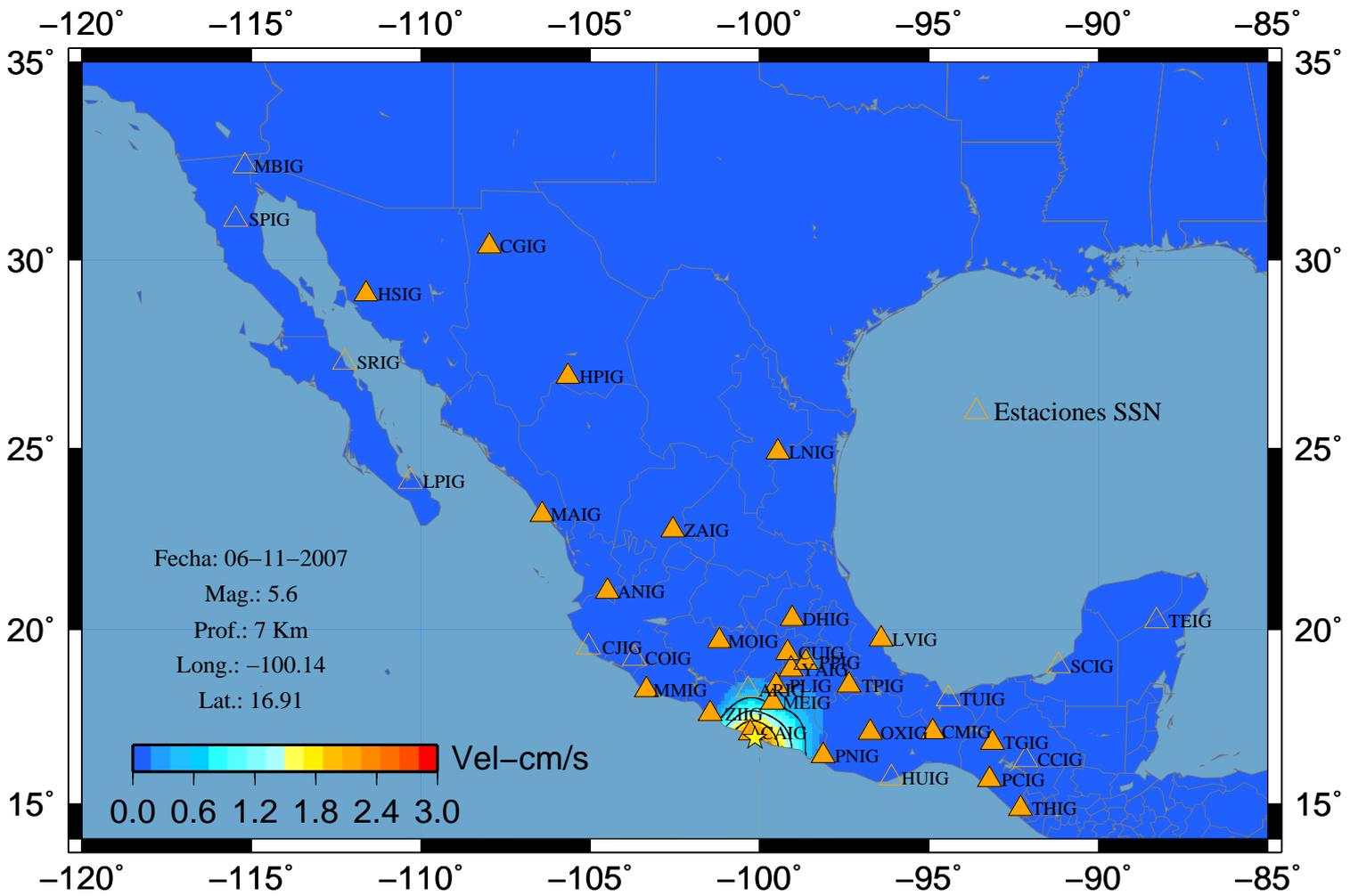
### Sismo 93 A-Norte



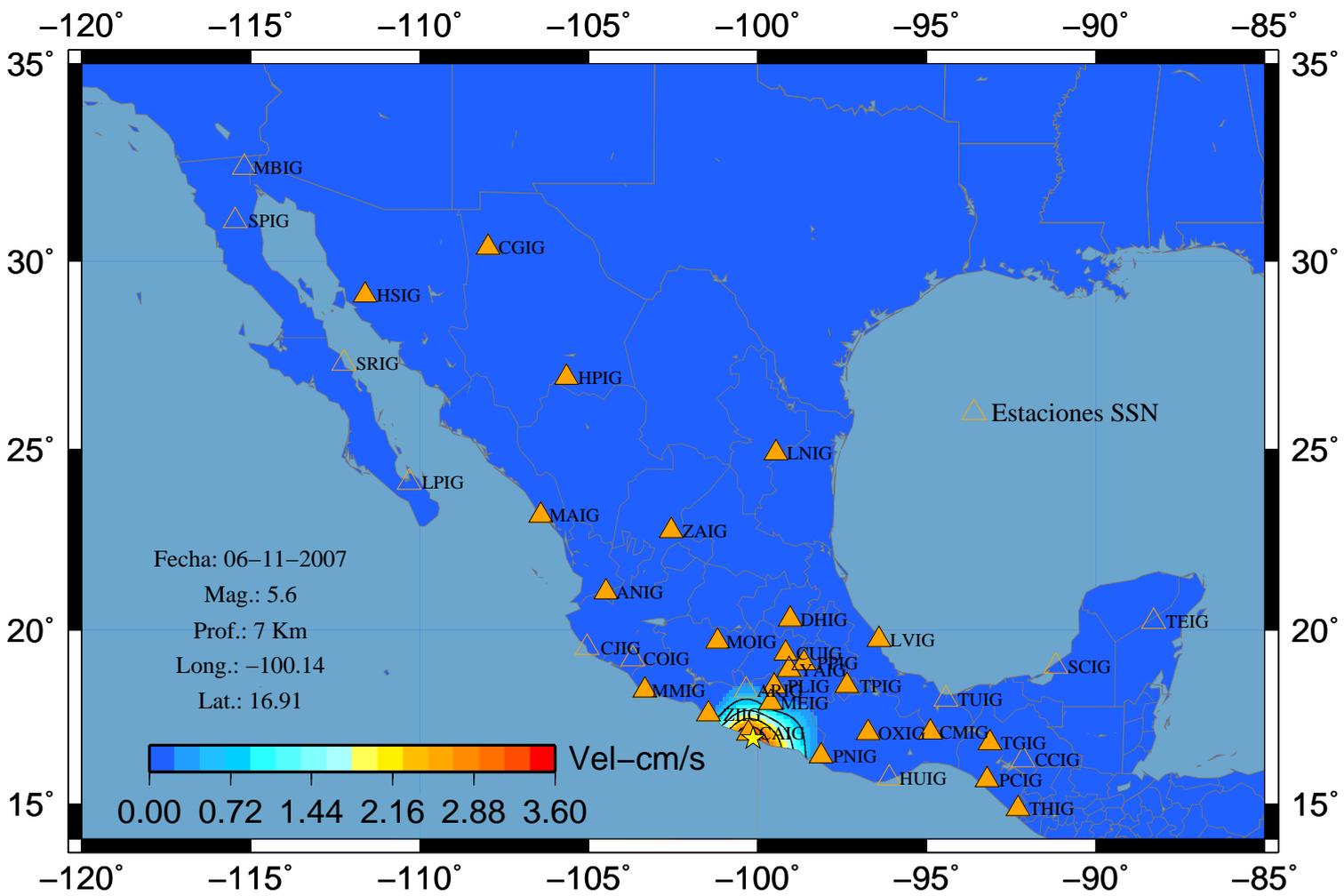
### Sismo 93 A-Vertical



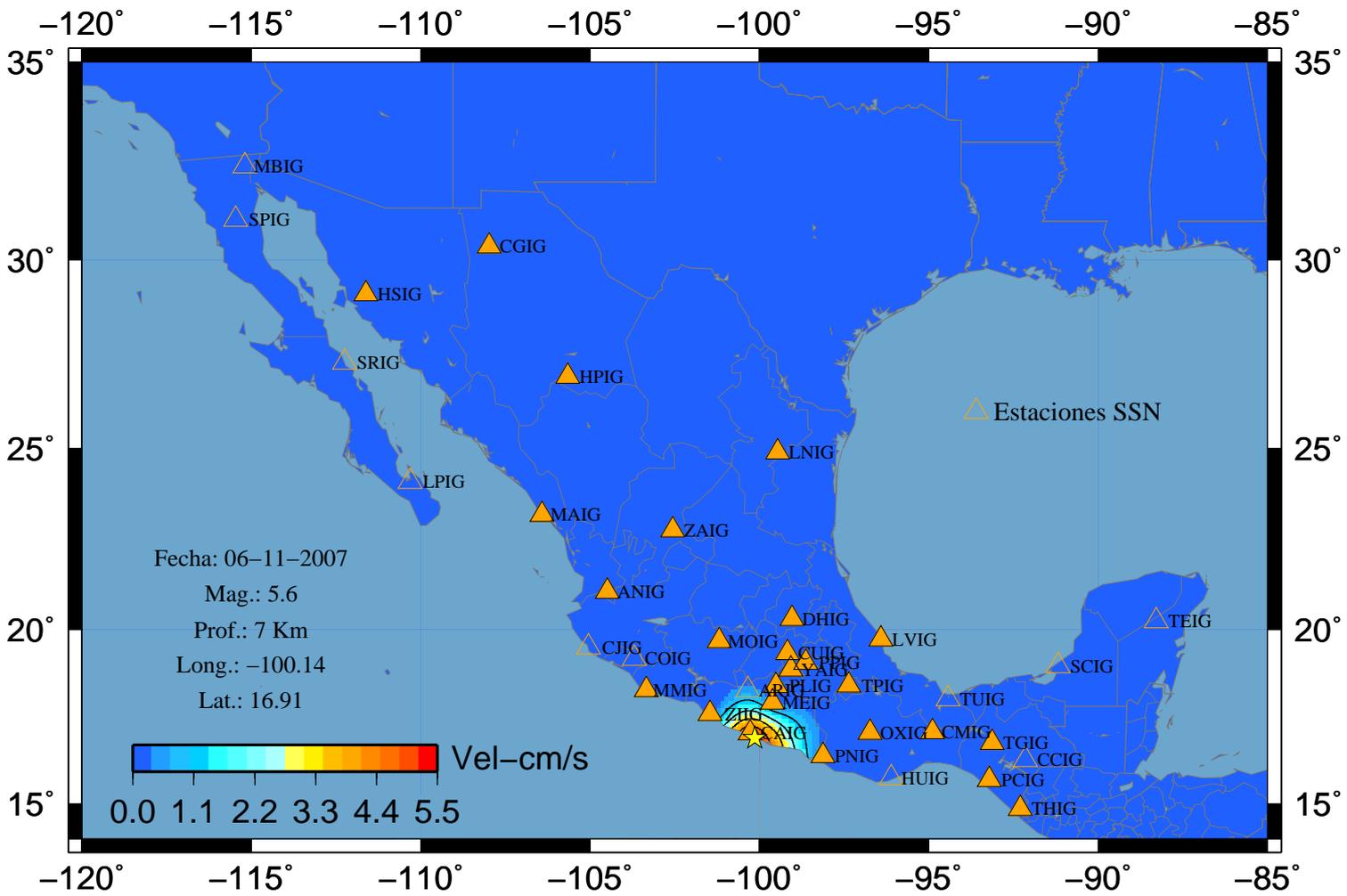
### Sismo 93 V-Este



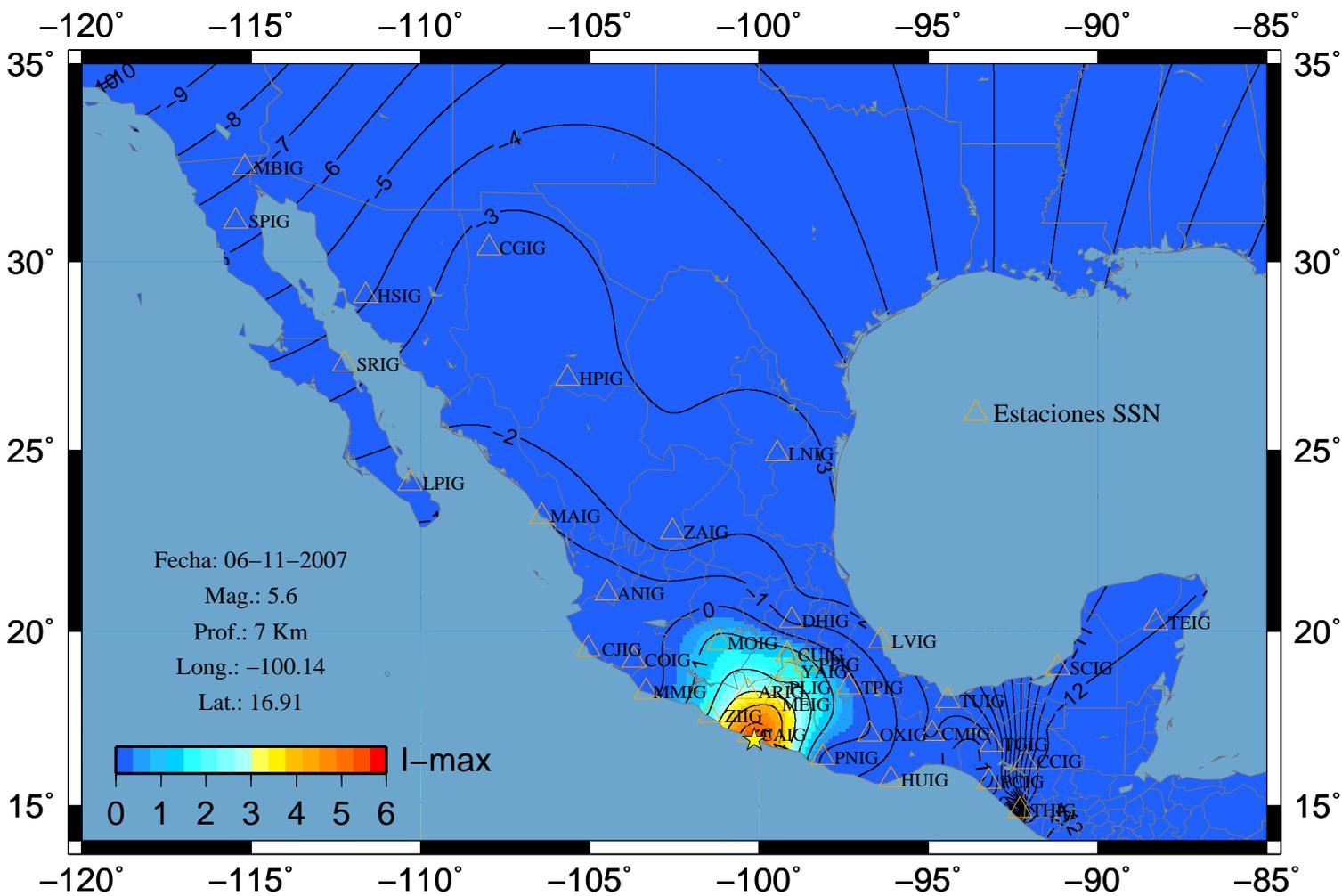
### Sismo 93 V-Norte



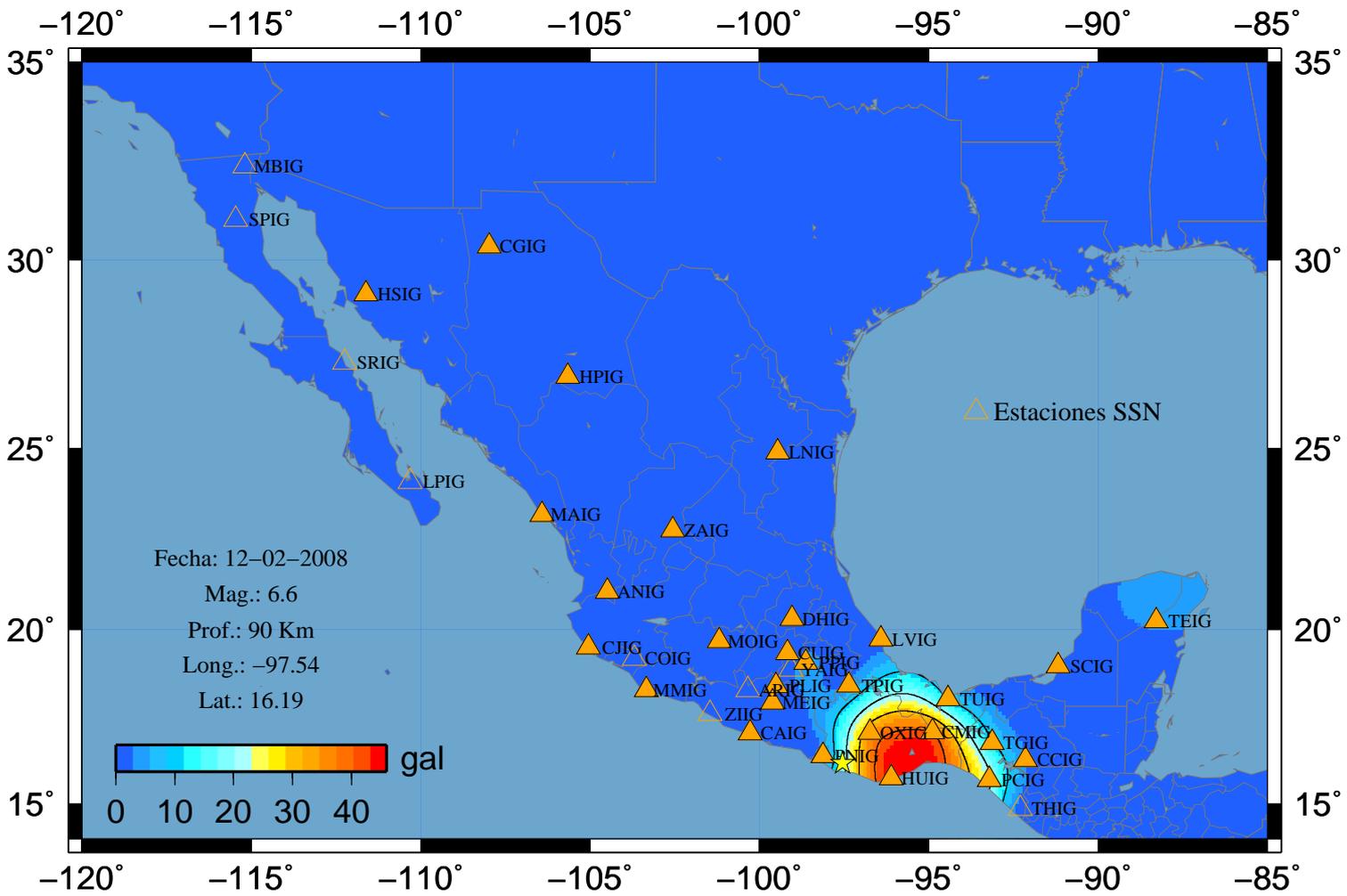
### Sismo 93 V-Vertical



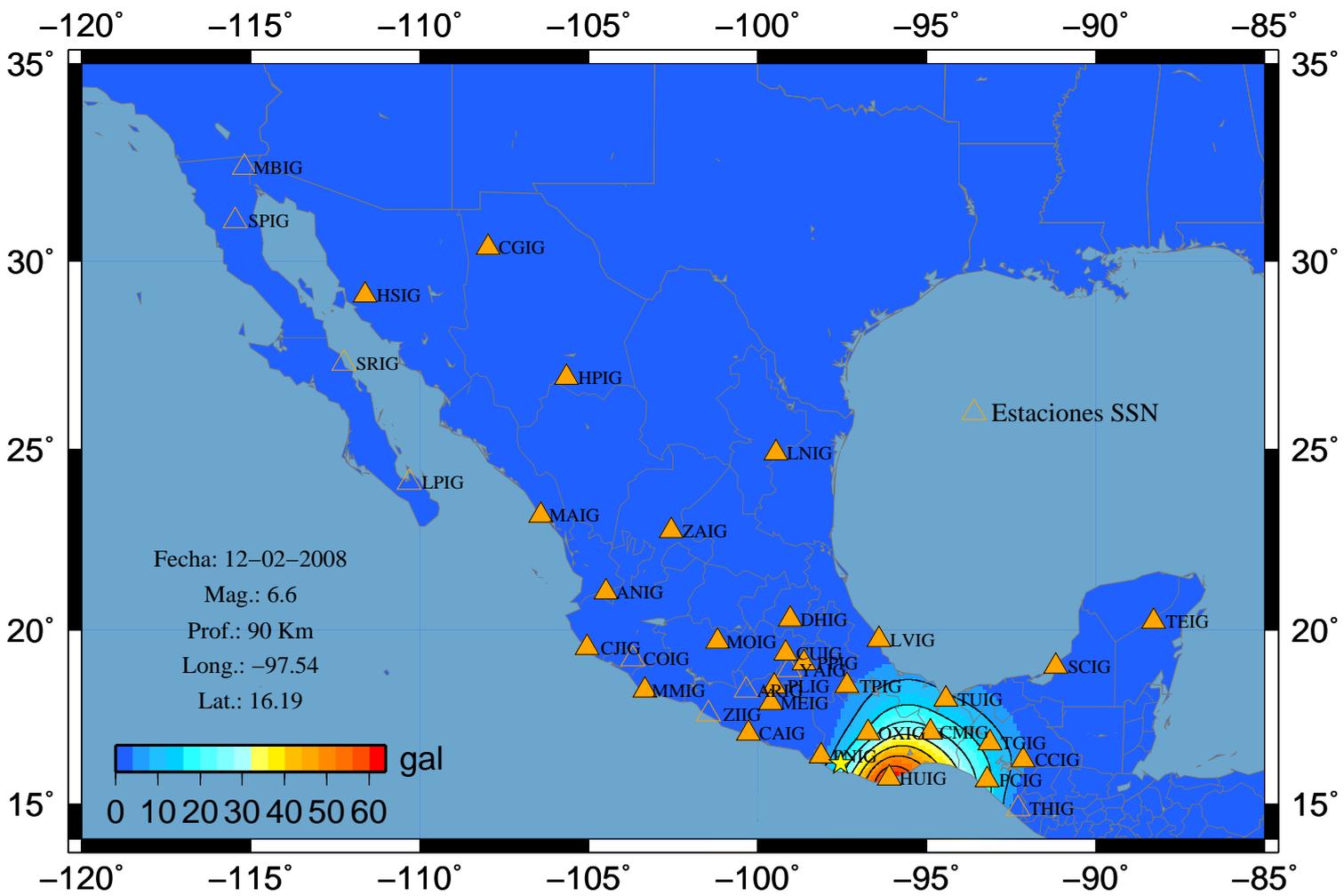
### Sismo 93 I (Max)



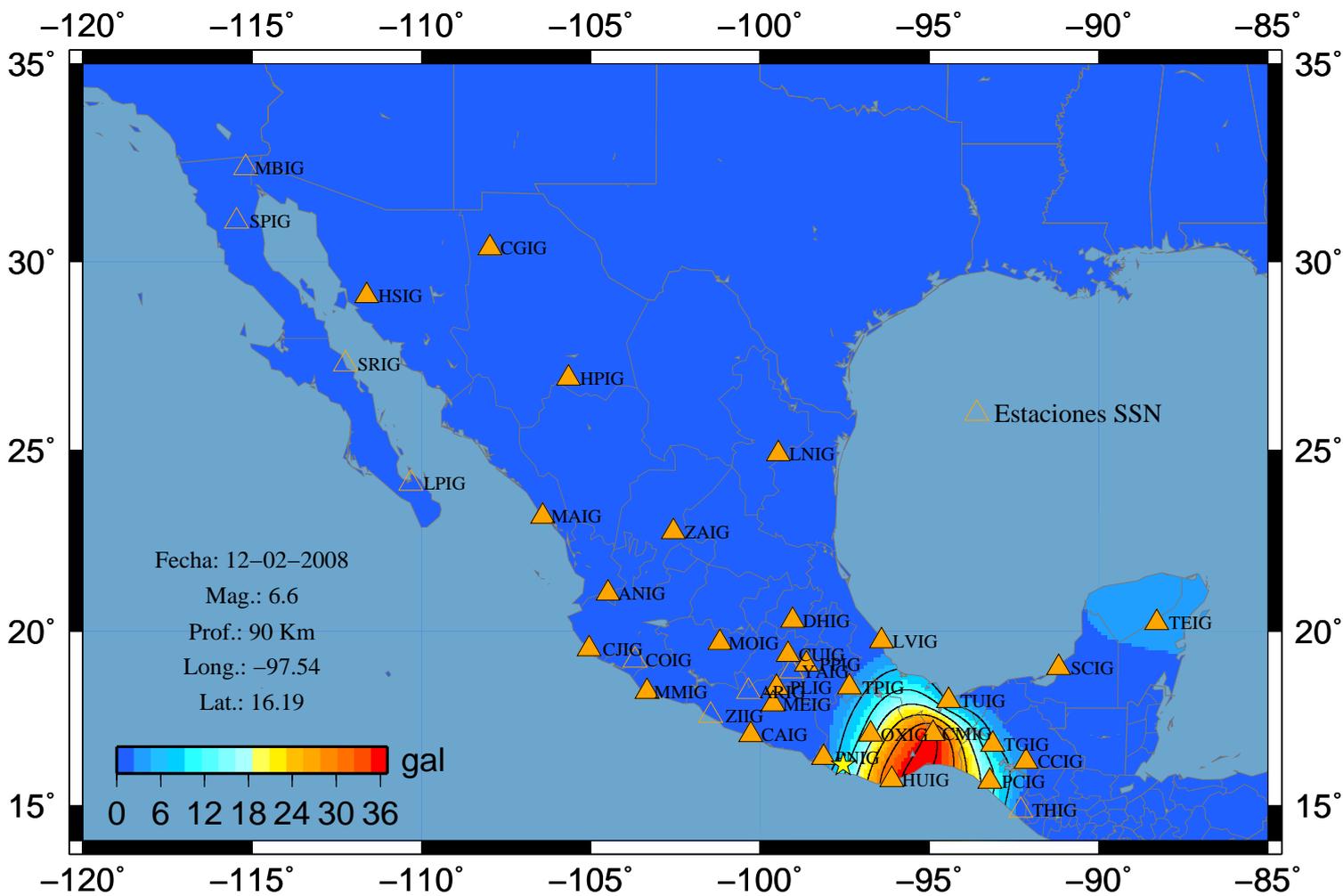
# Sismo 94 A-Este



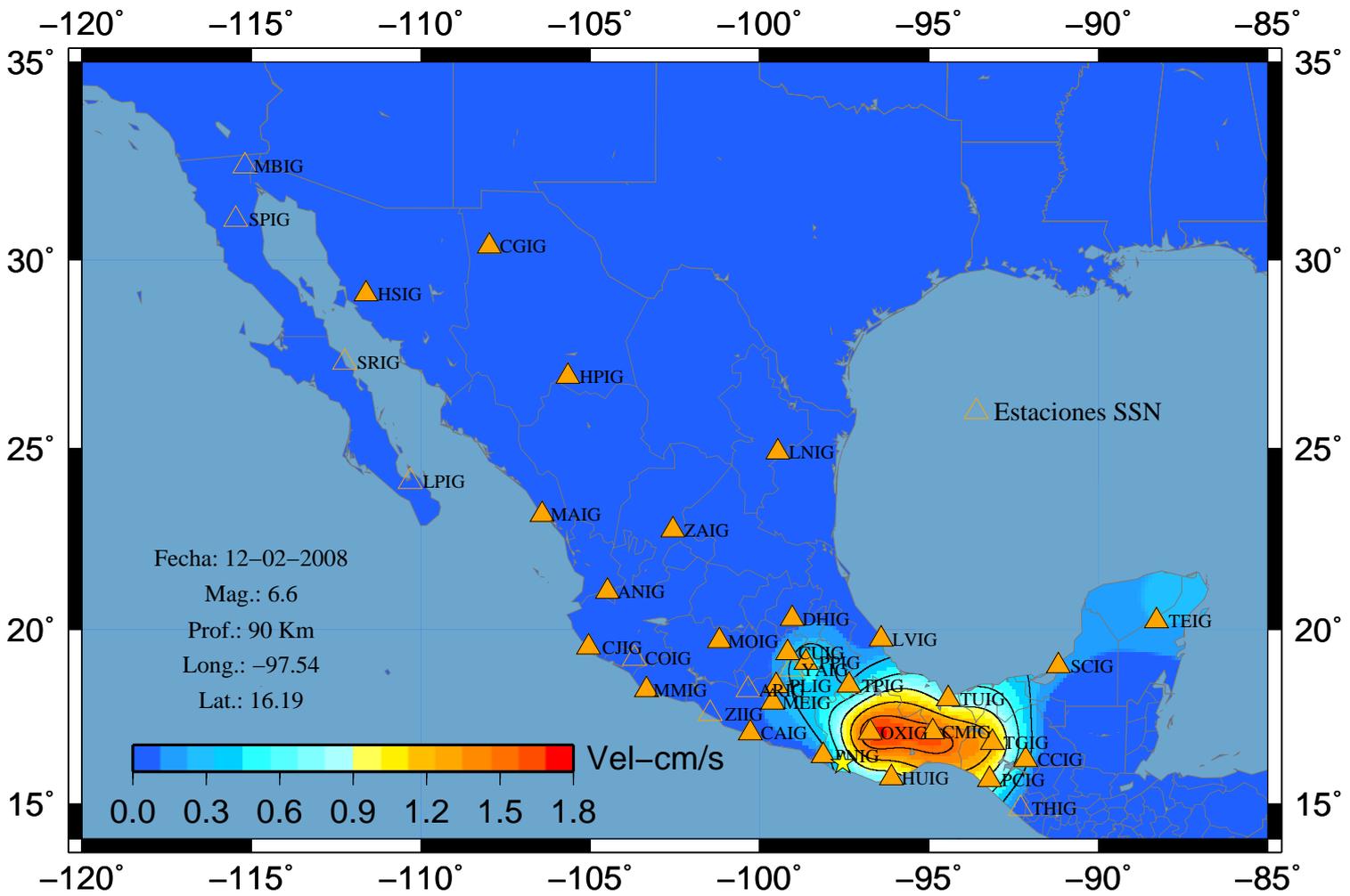
### Sismo 94 A-Norte



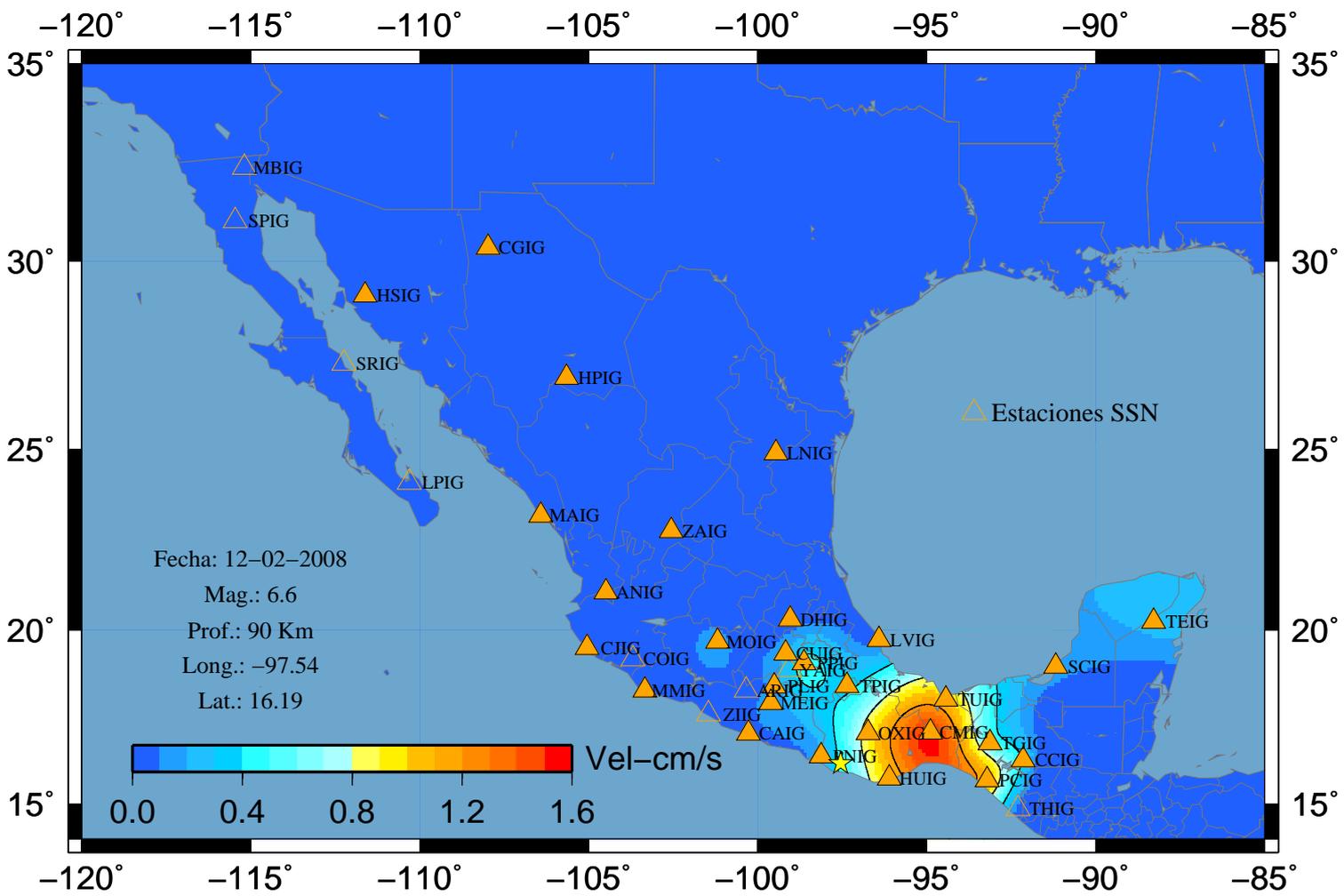
# Sismo 94 A-Vertical



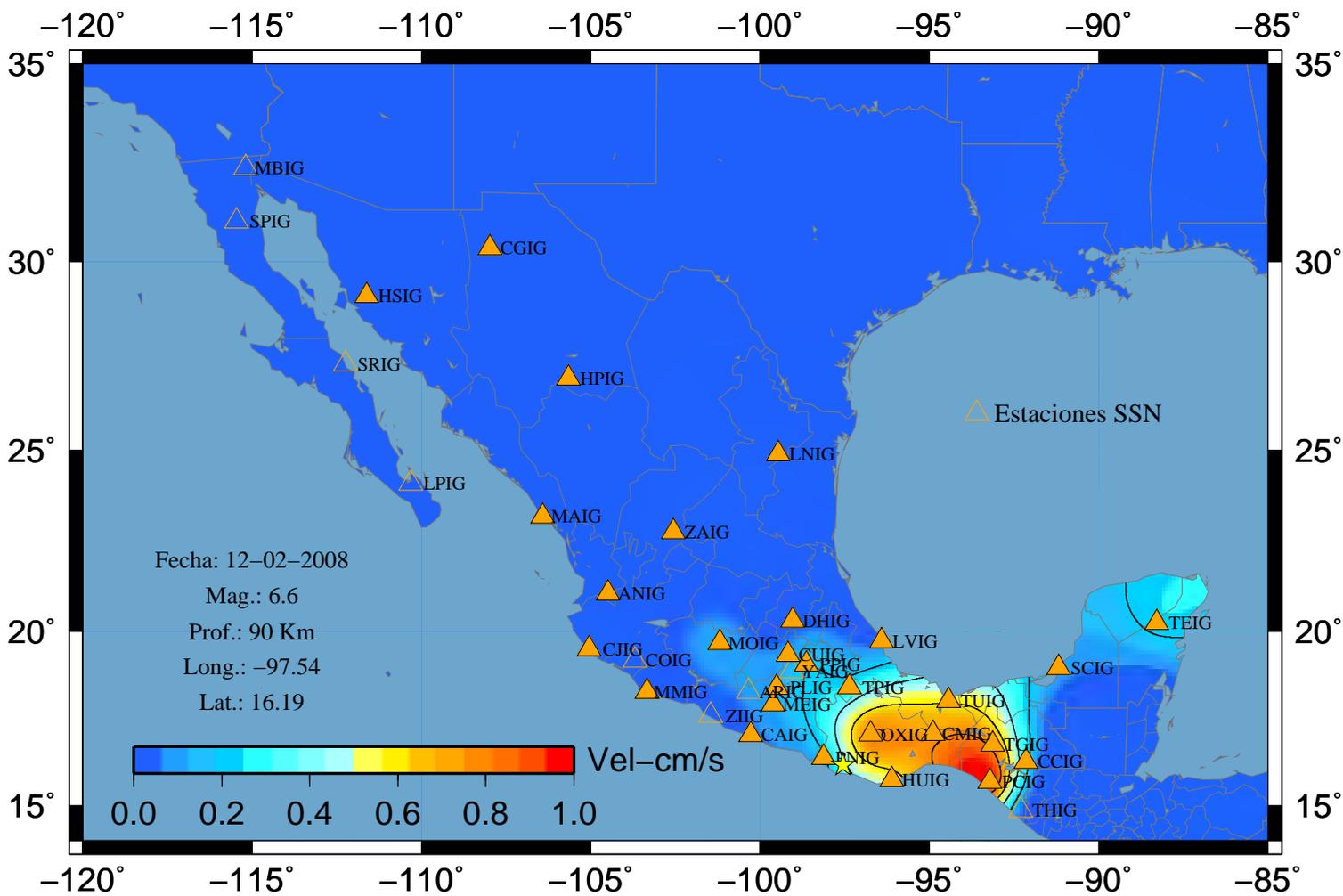
# Sismo 94 V-Este



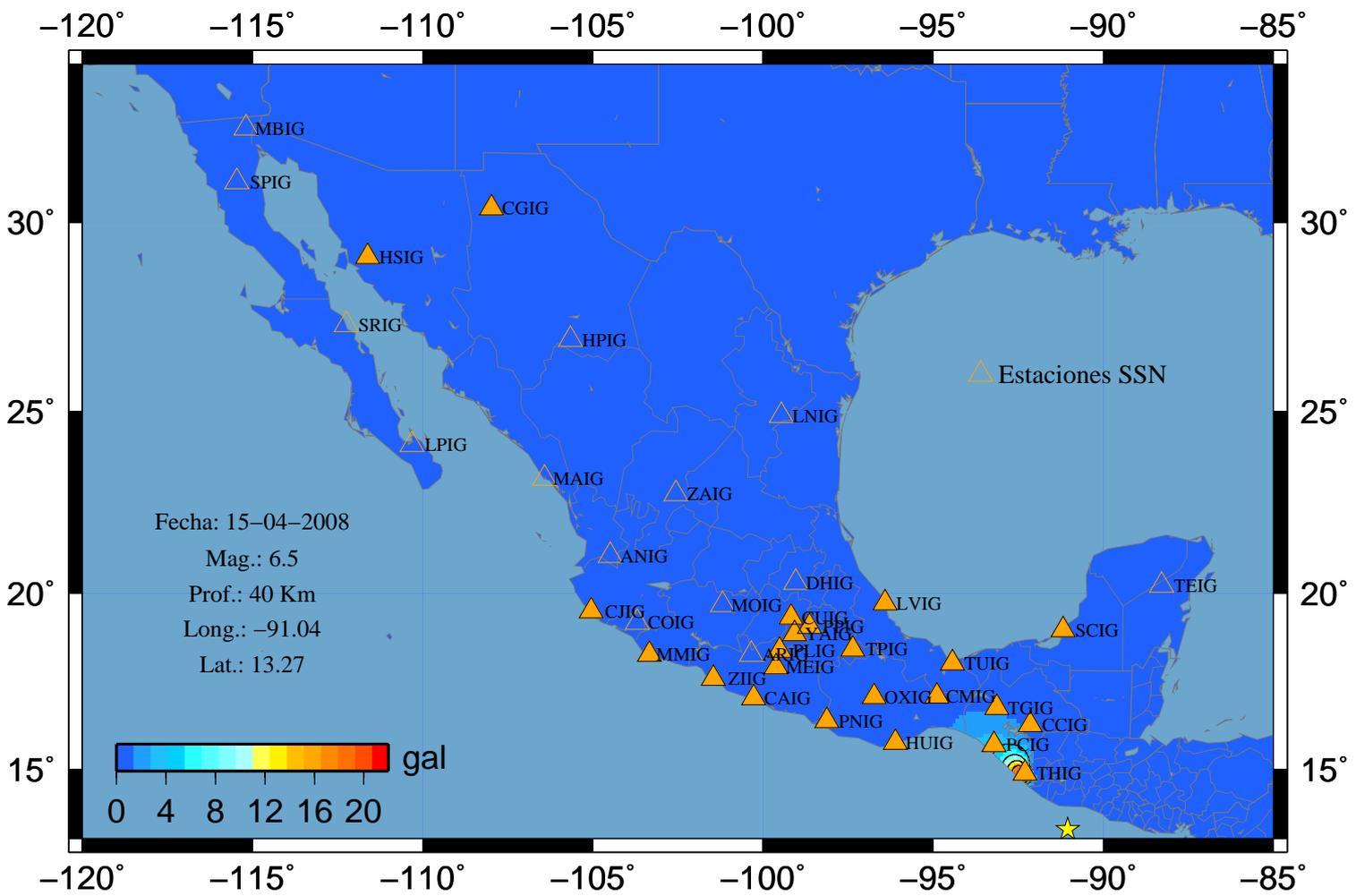
### Sismo 94 V-Norte



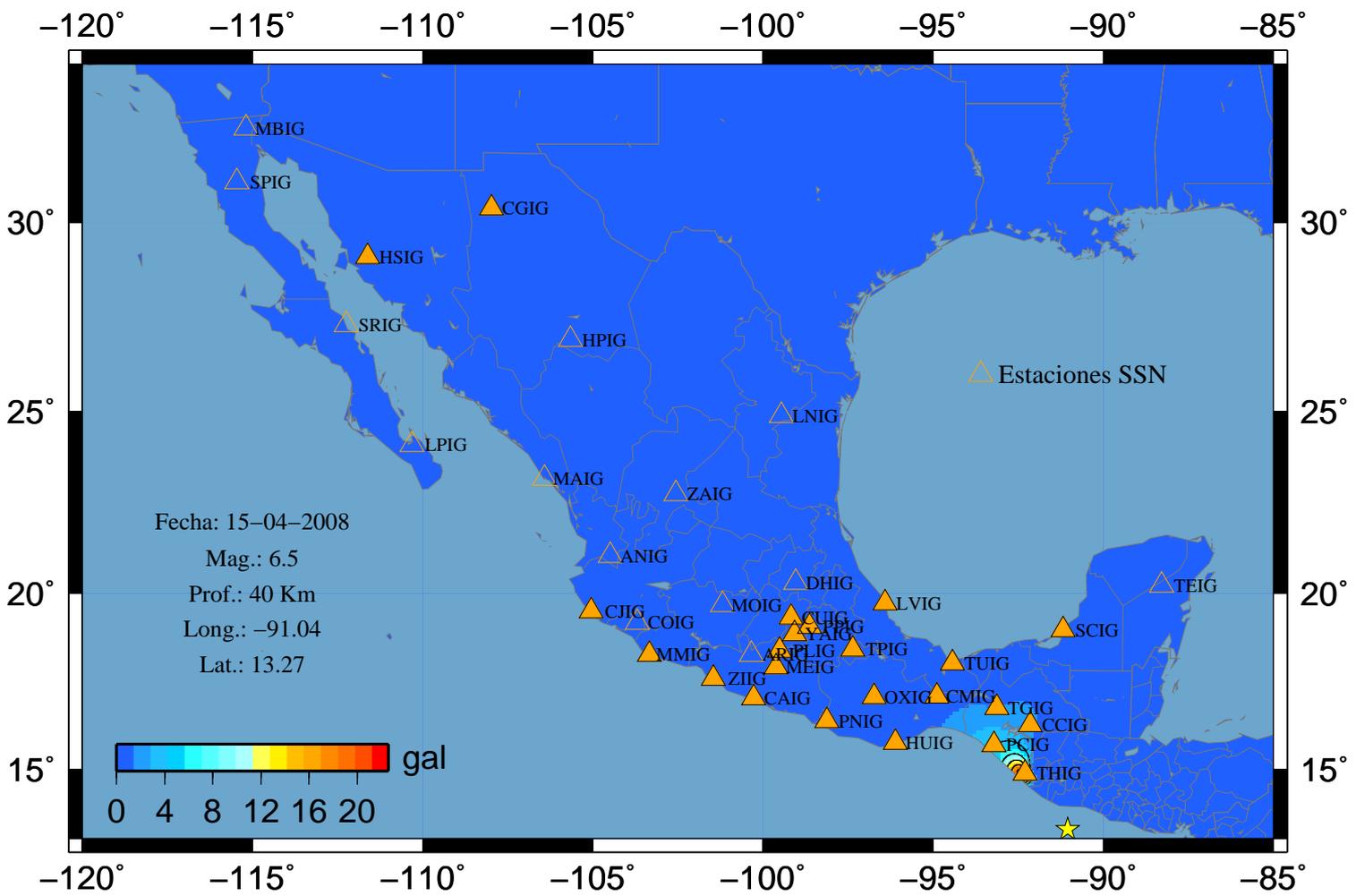
# Sismo 94 V-Vertical



# Sismo 95 A-Este

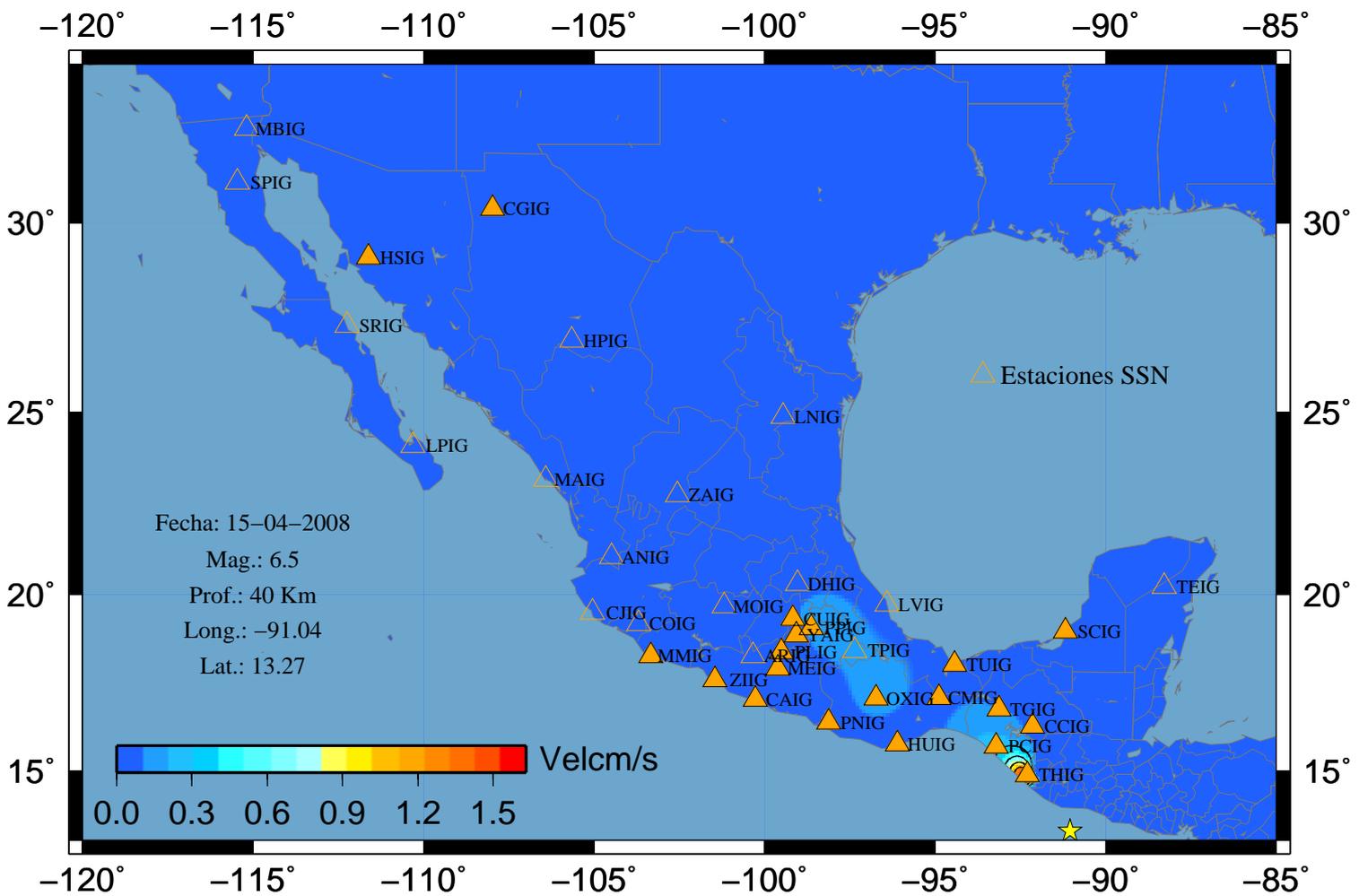


### Sismo 95 A-Norte

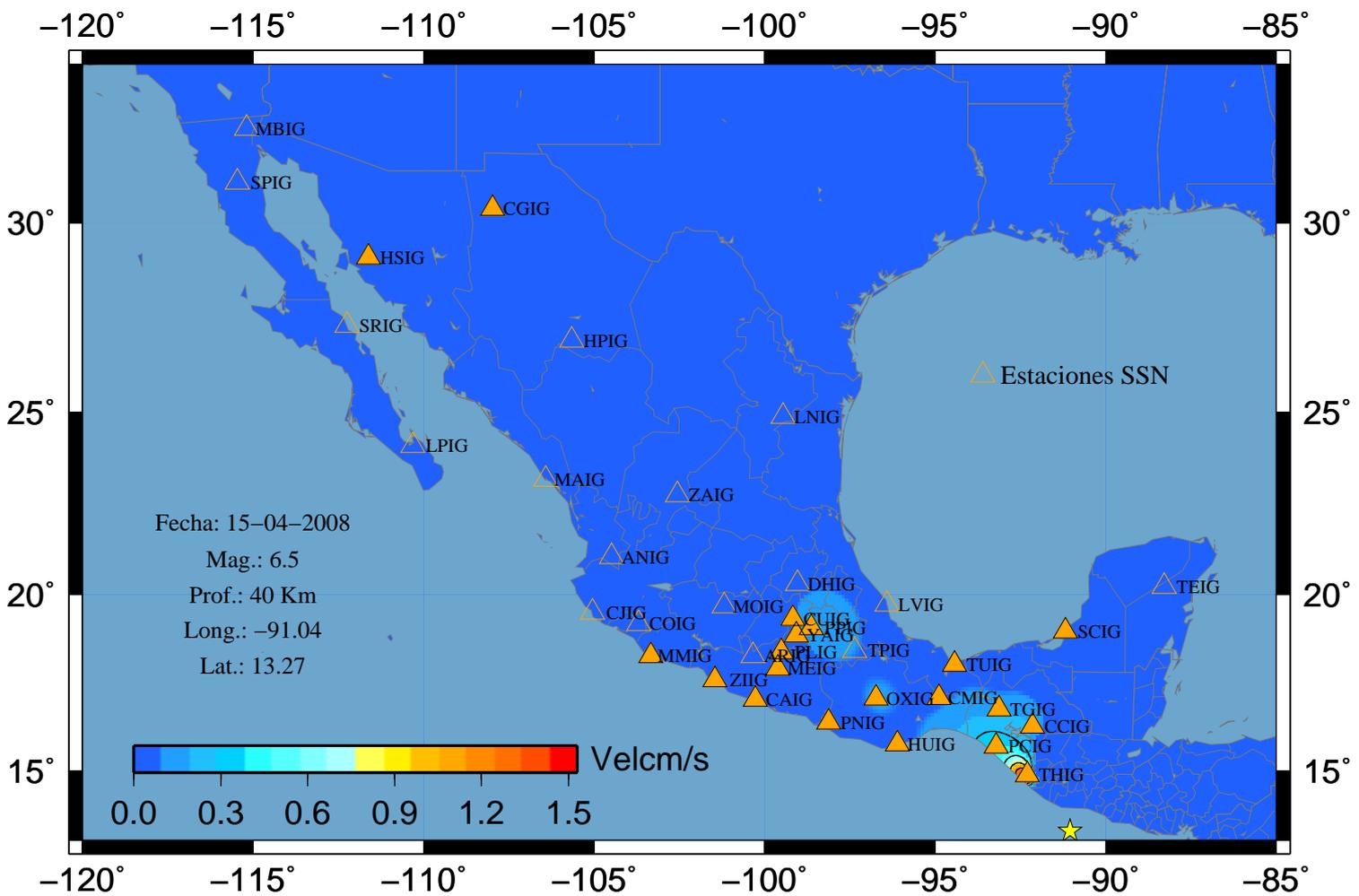




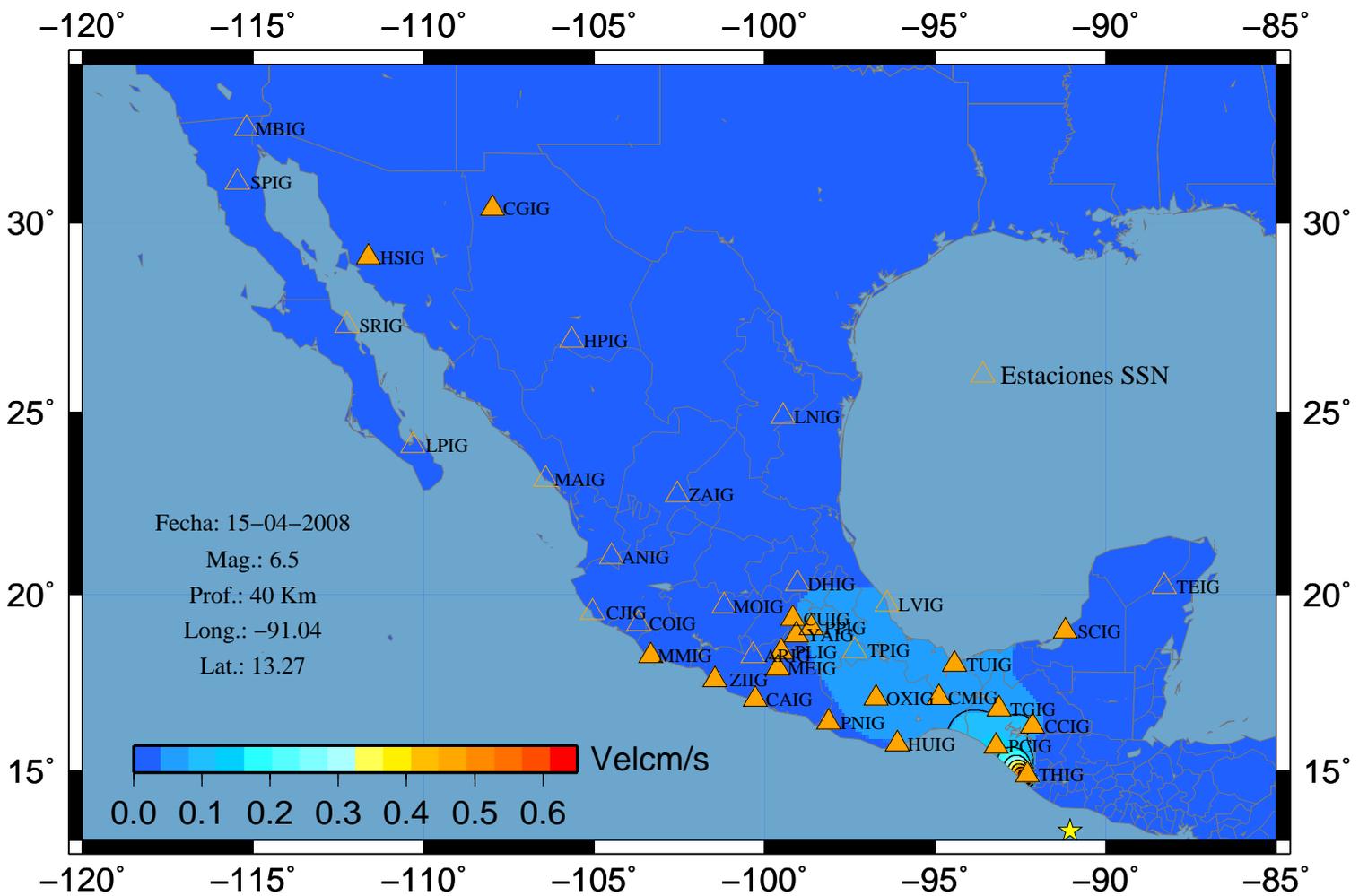
# Sismo 95 V-Este



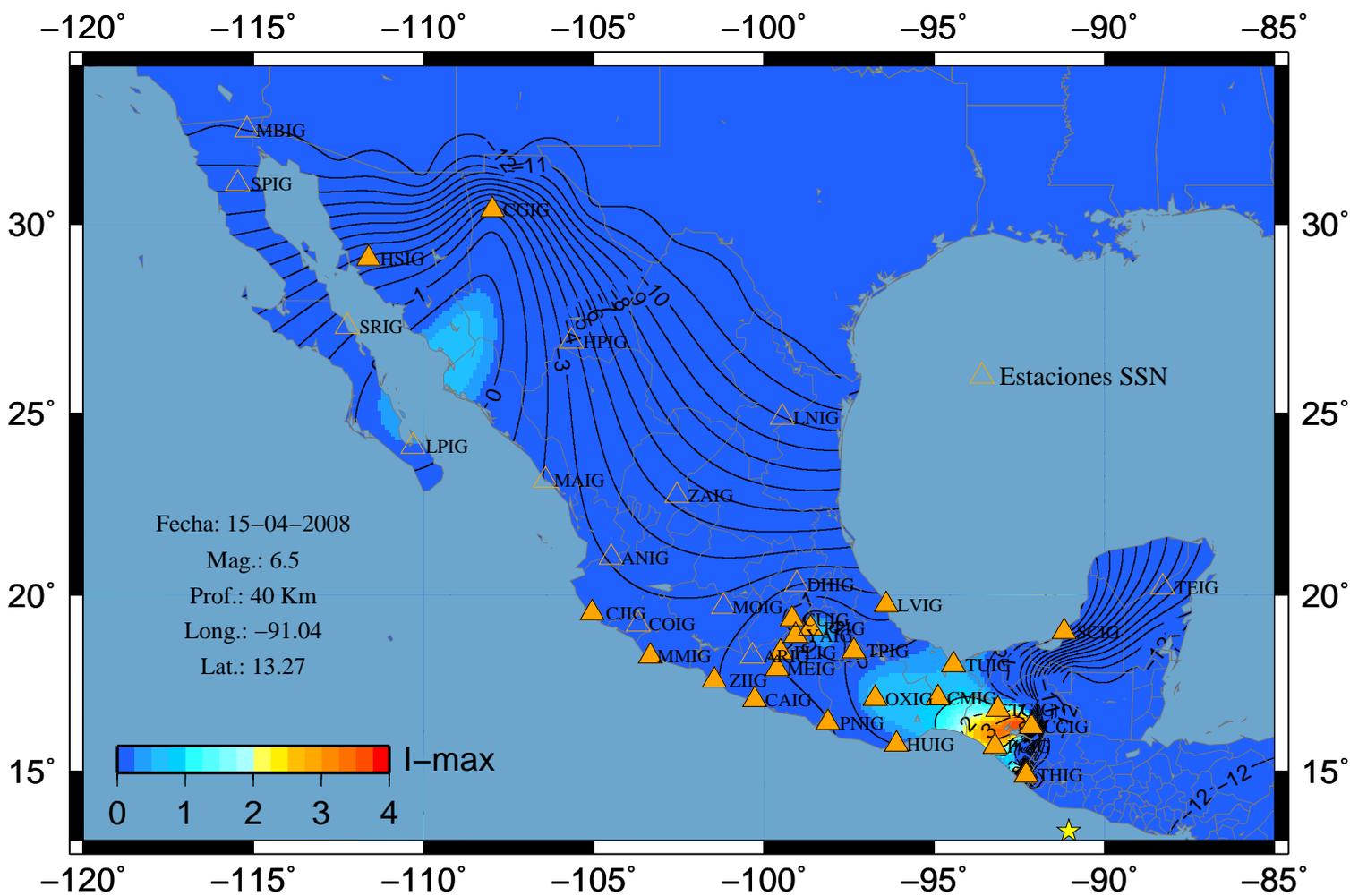
### Sismo 95 V-Norte



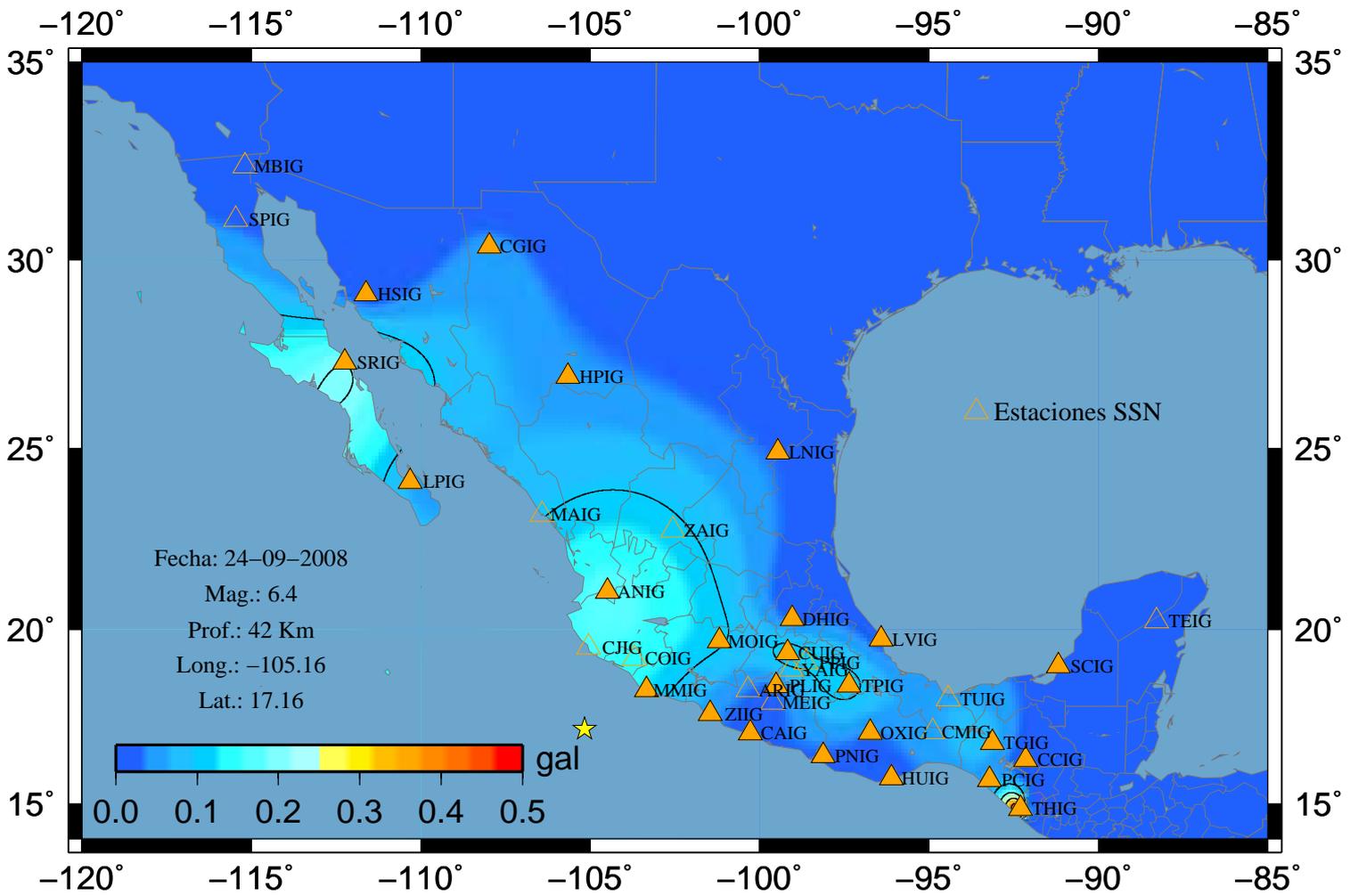
### Sismo 95 V-Vertical



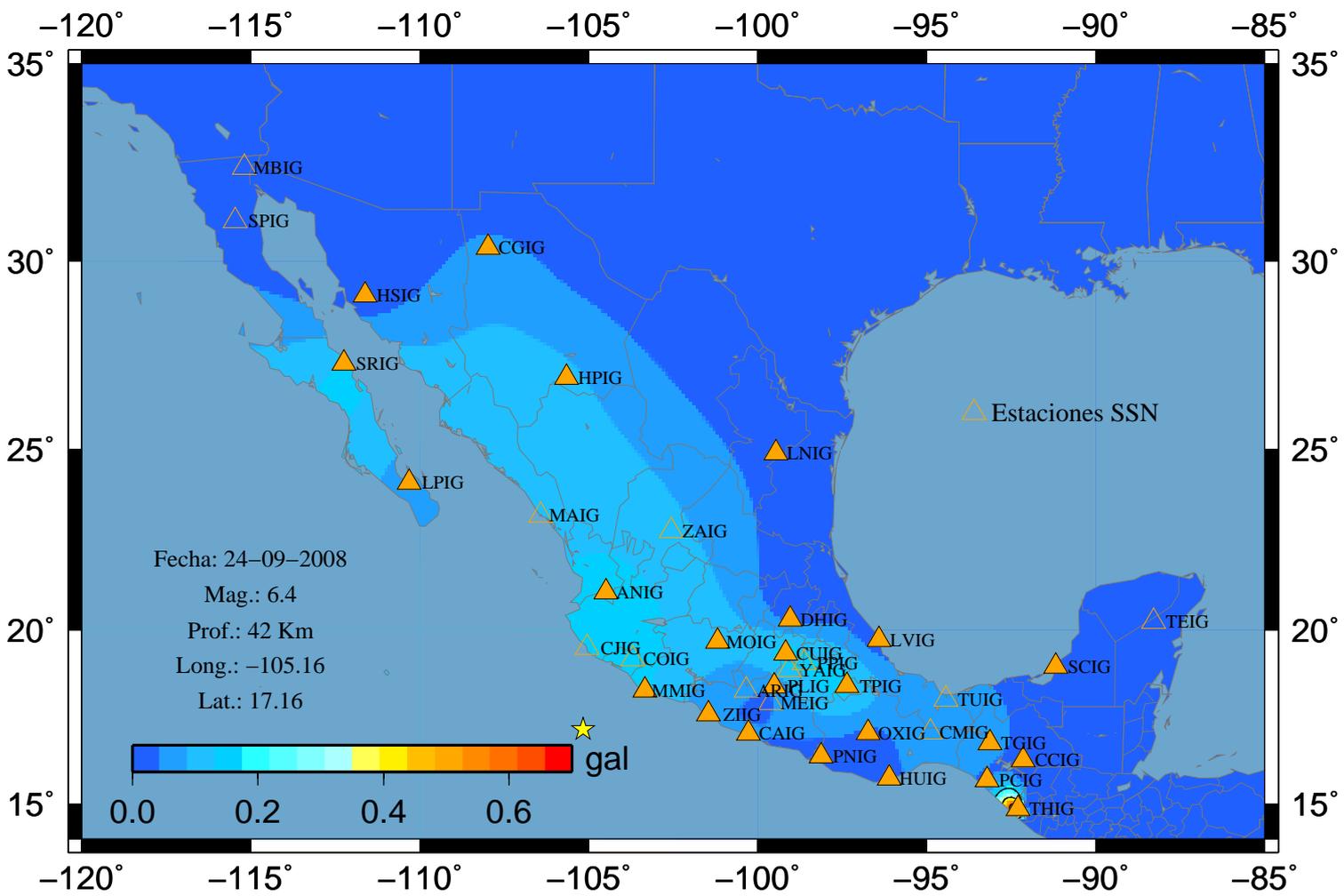
### Sismo 95 I (Max)



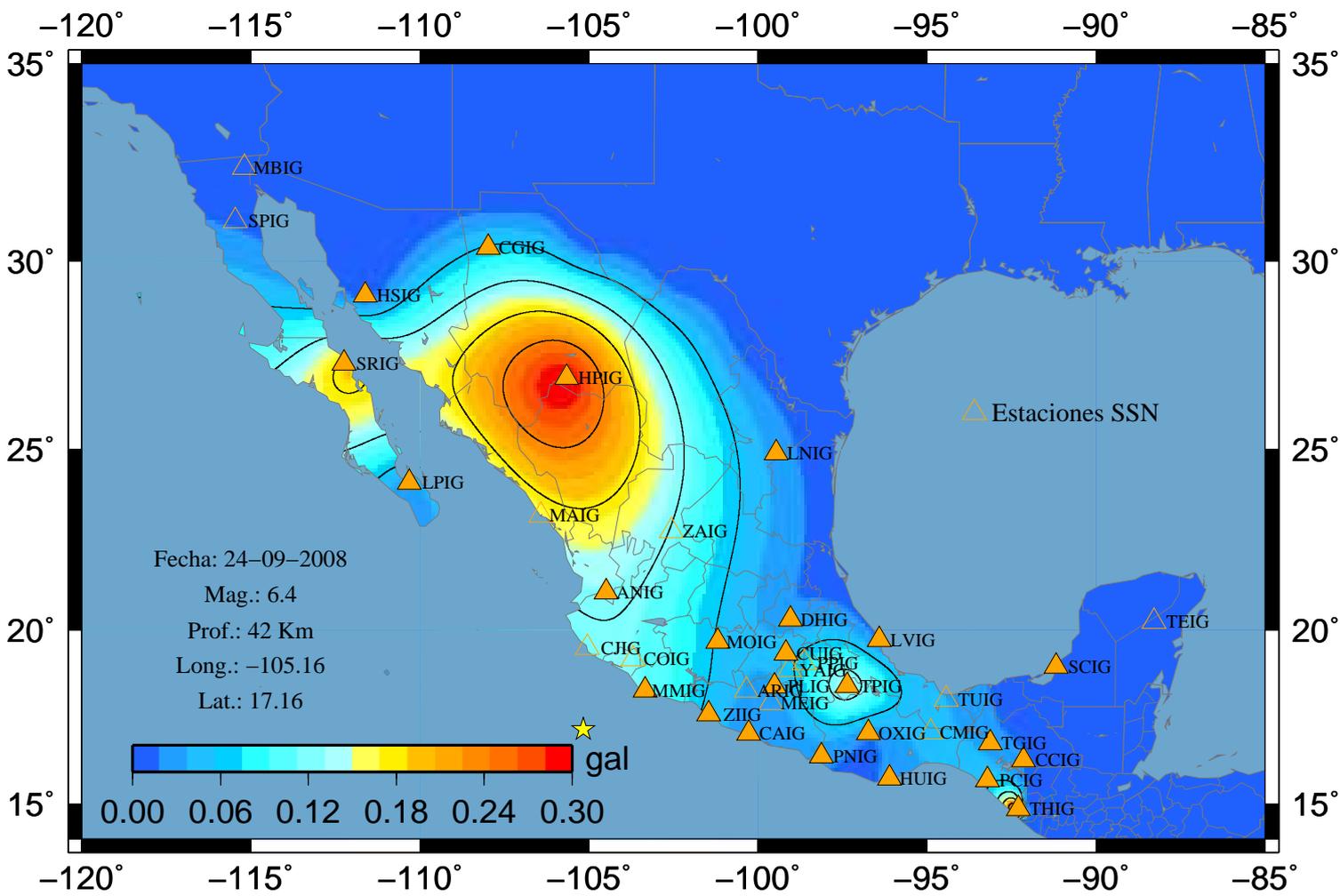
# Sismo 96 A-Este



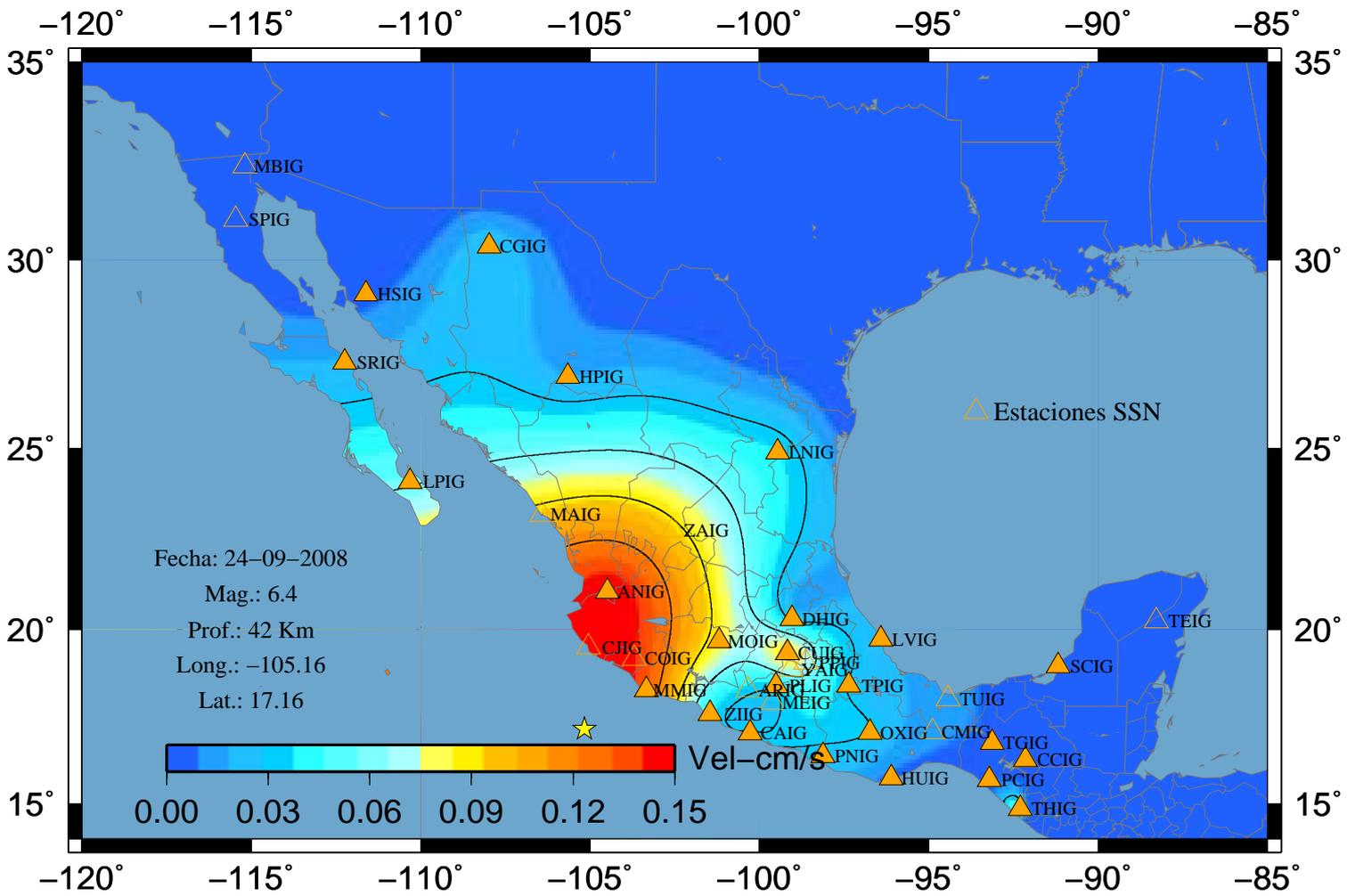
# Sismo 96 A-Norte



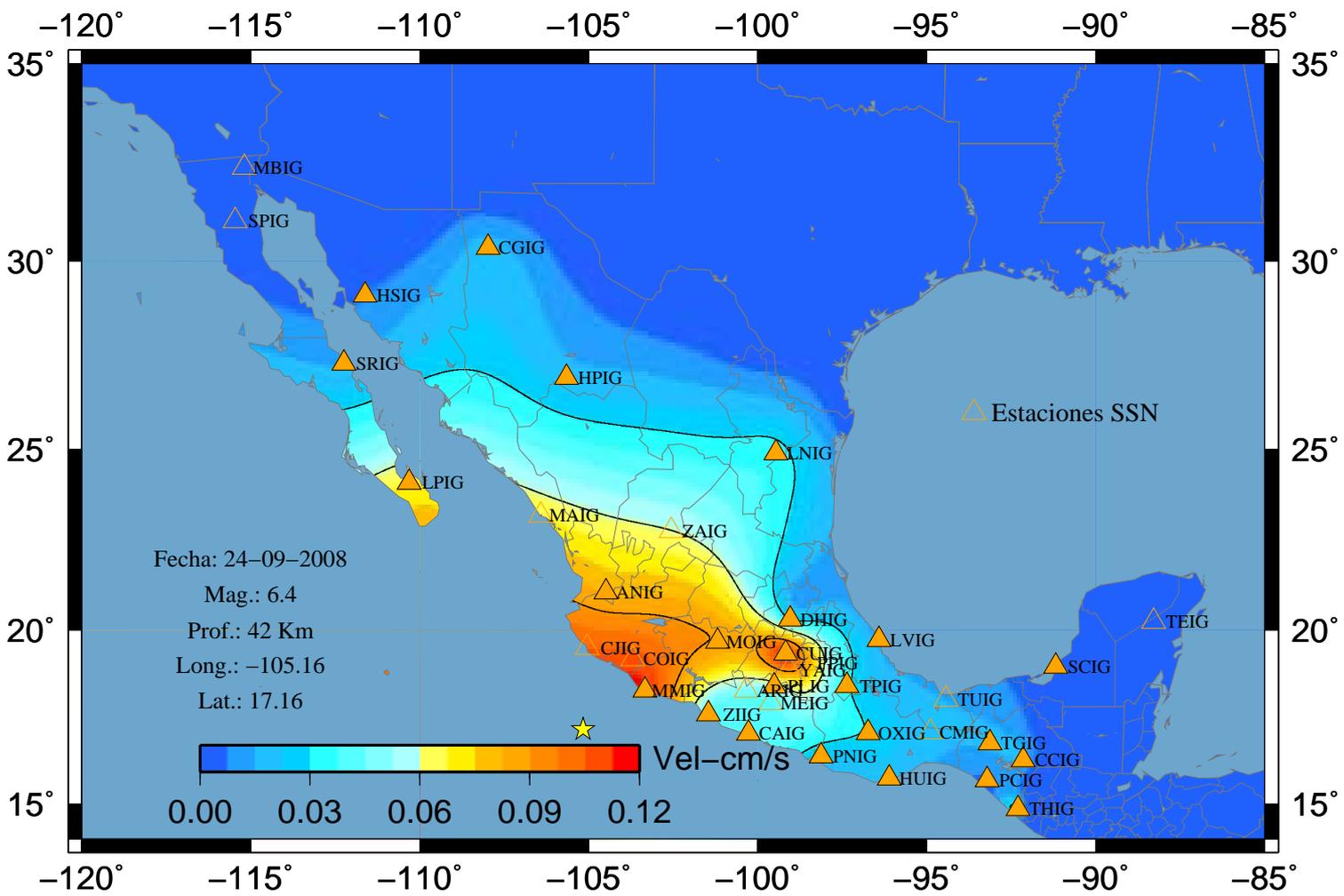
### Sismo 96 A-Vertical



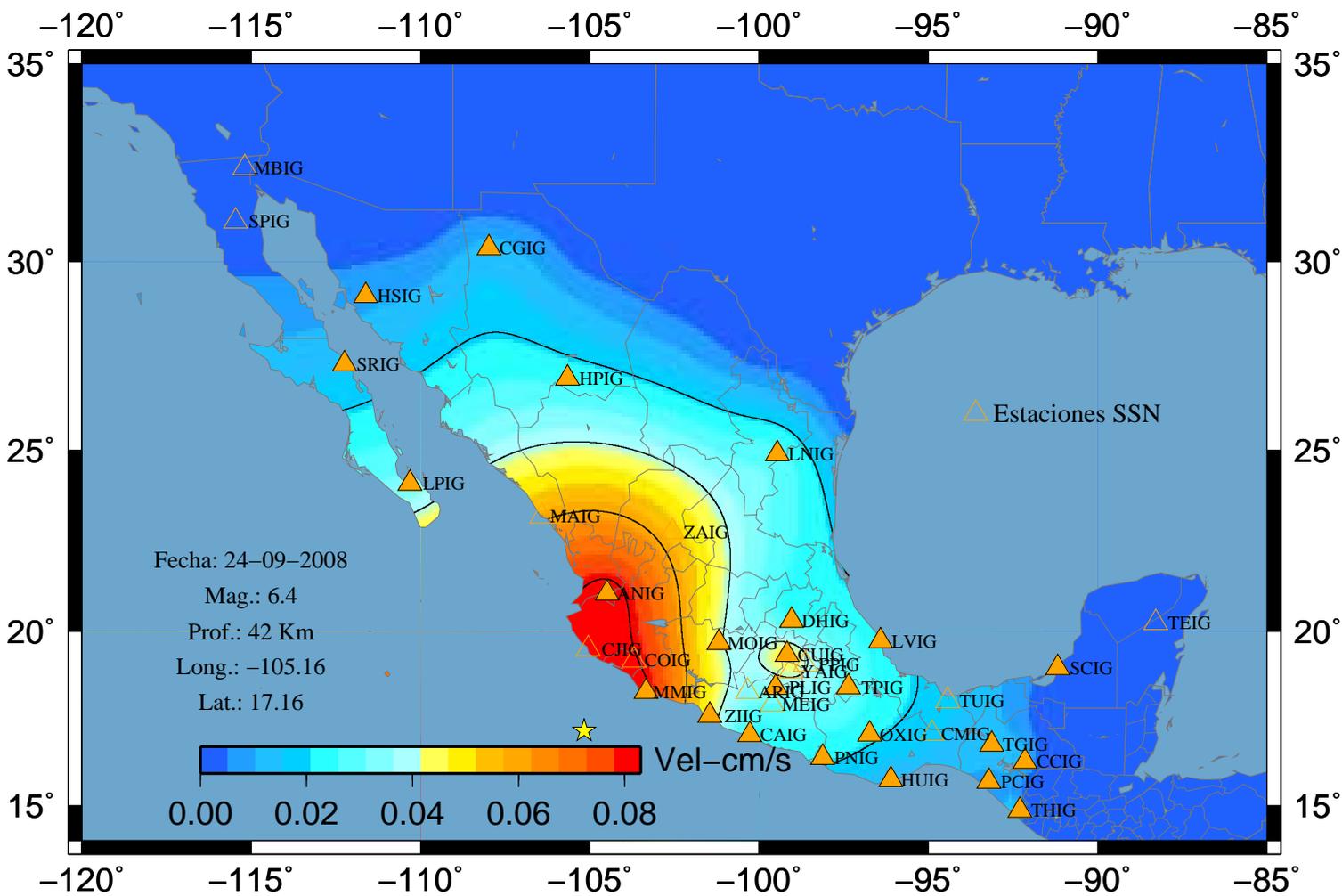
# Sismo 96 V-Este



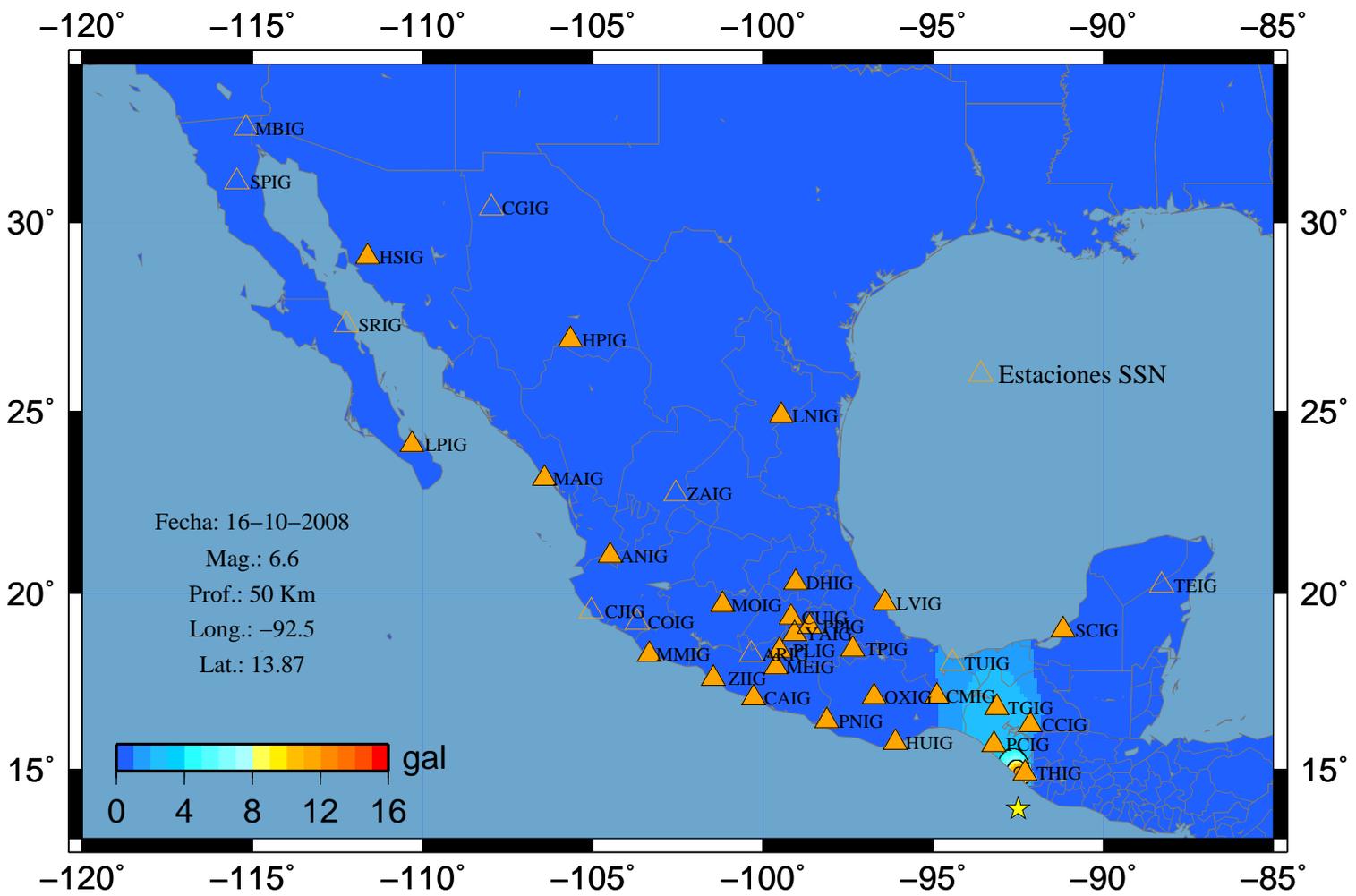
### Sismo 96 V-Norte



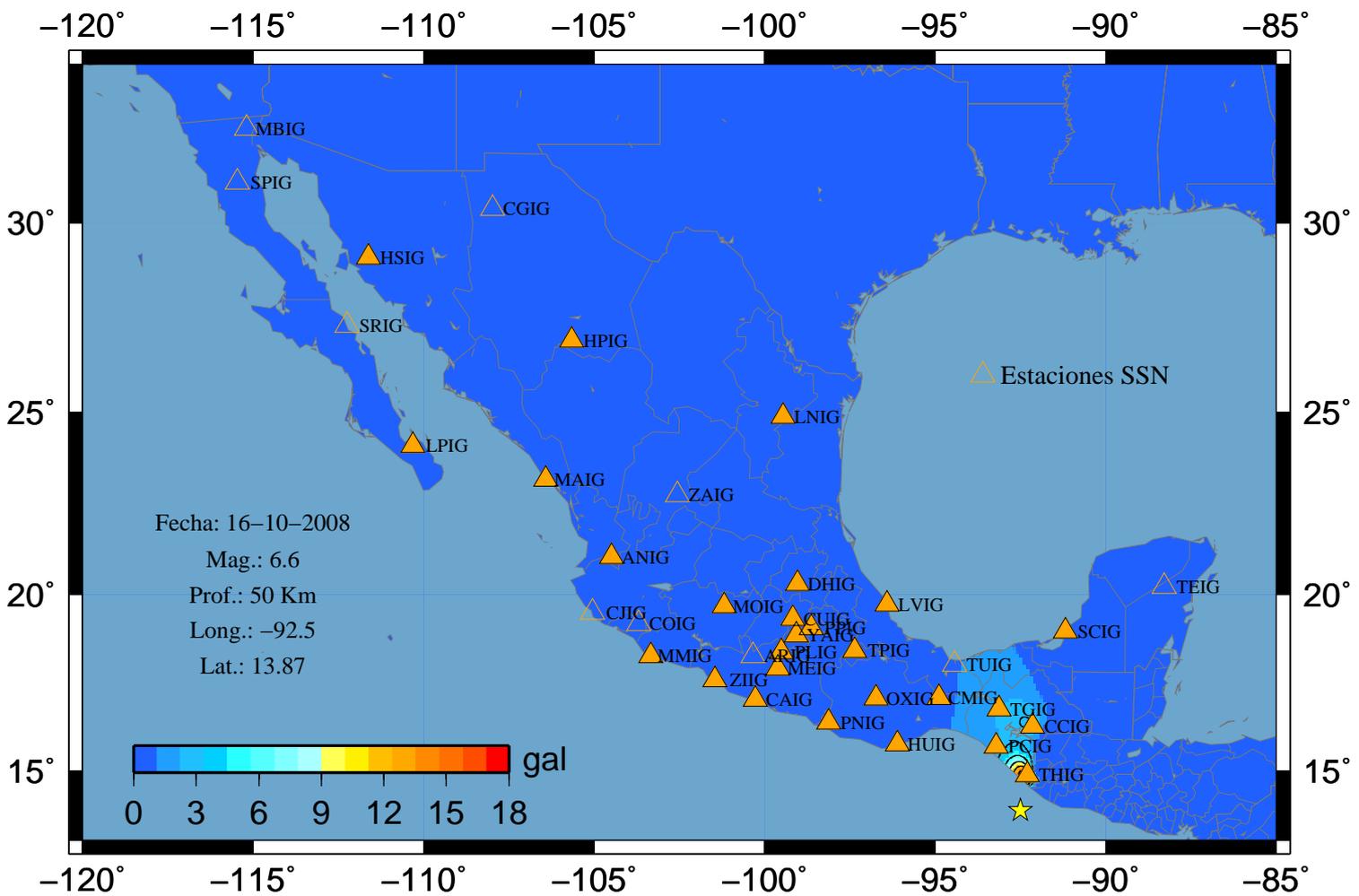
### Sismo 96 V-Vertical



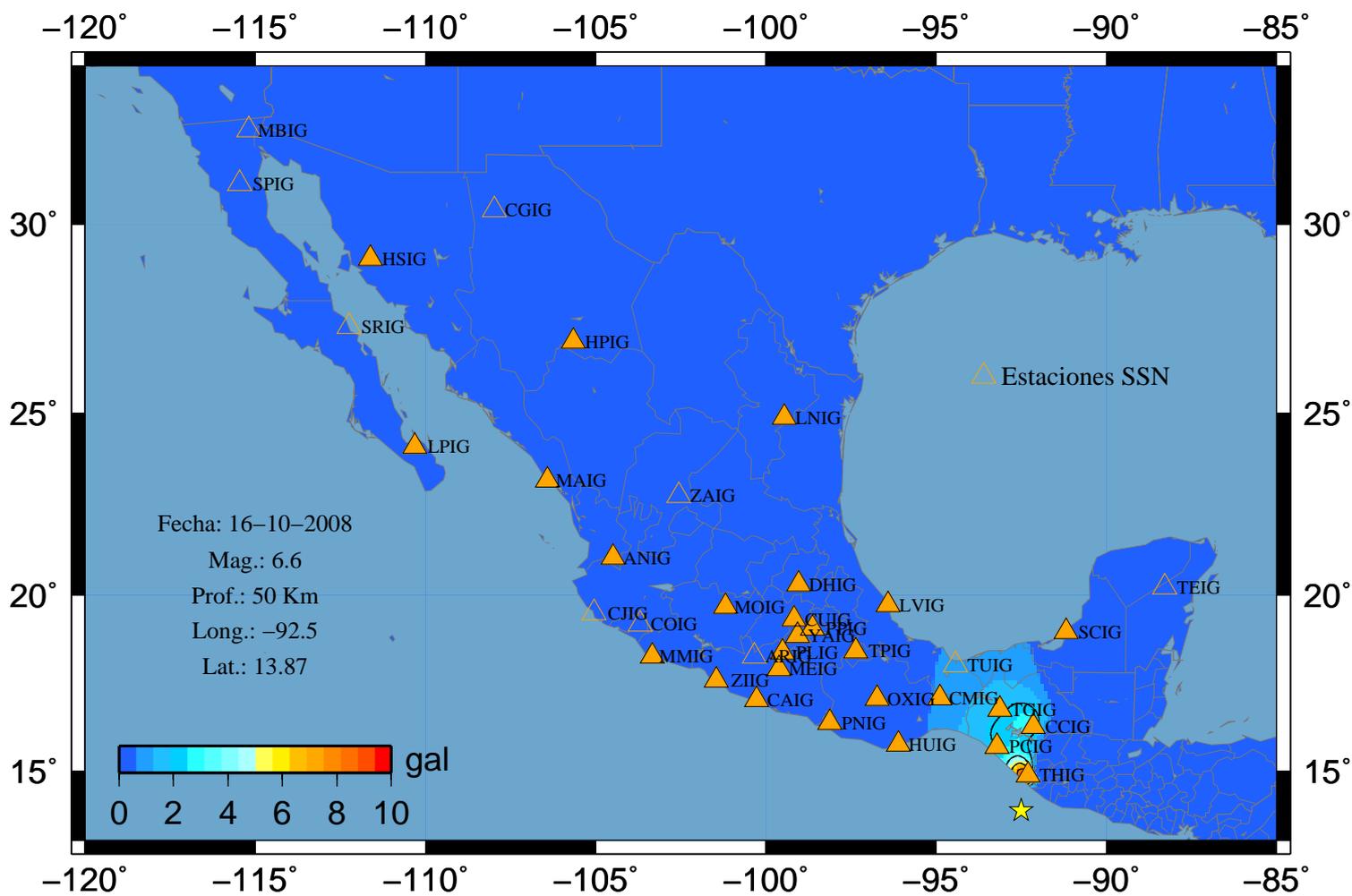
# Sismo 97 A-Este



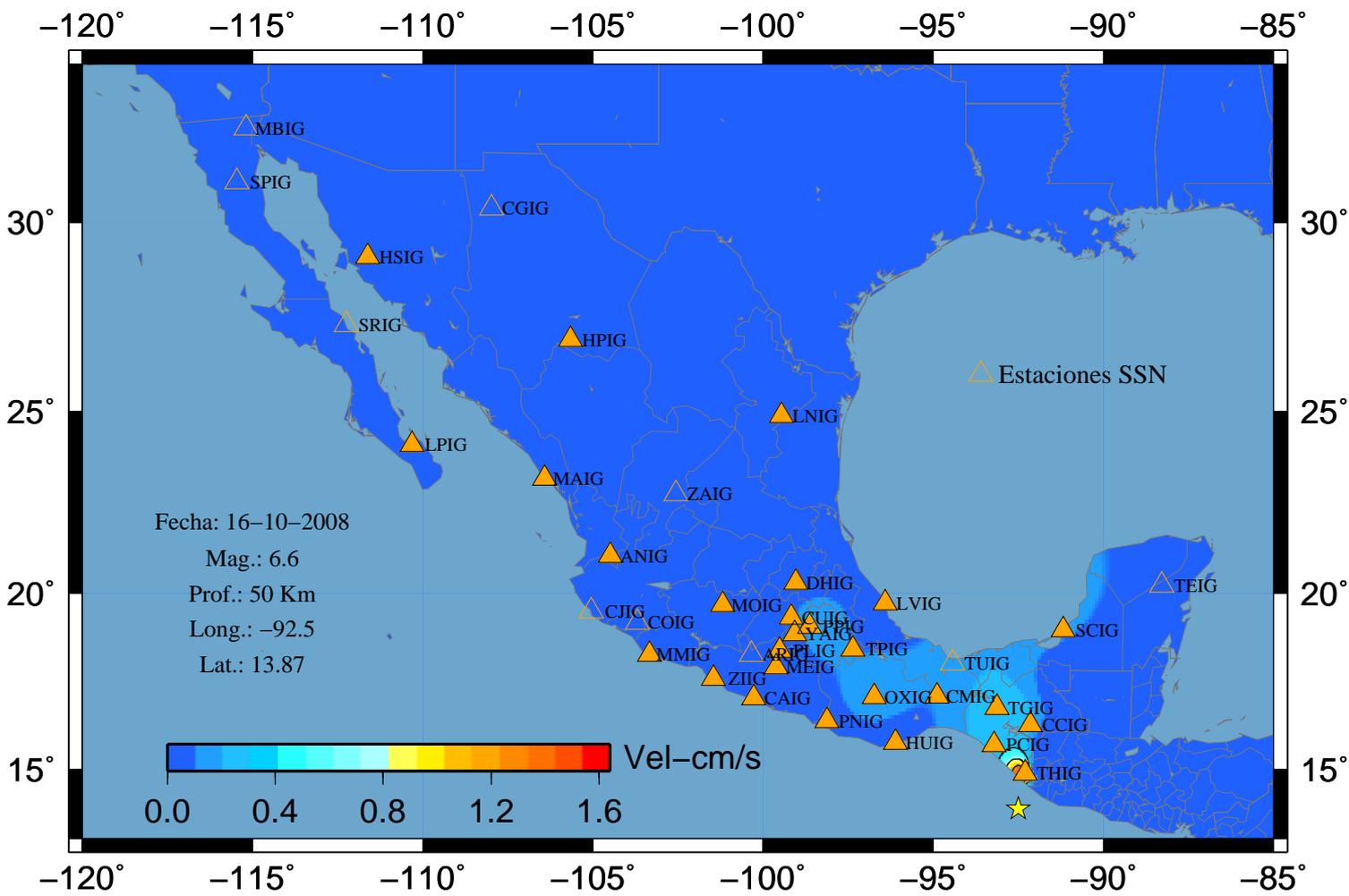
# Sismo 97 A-Norte



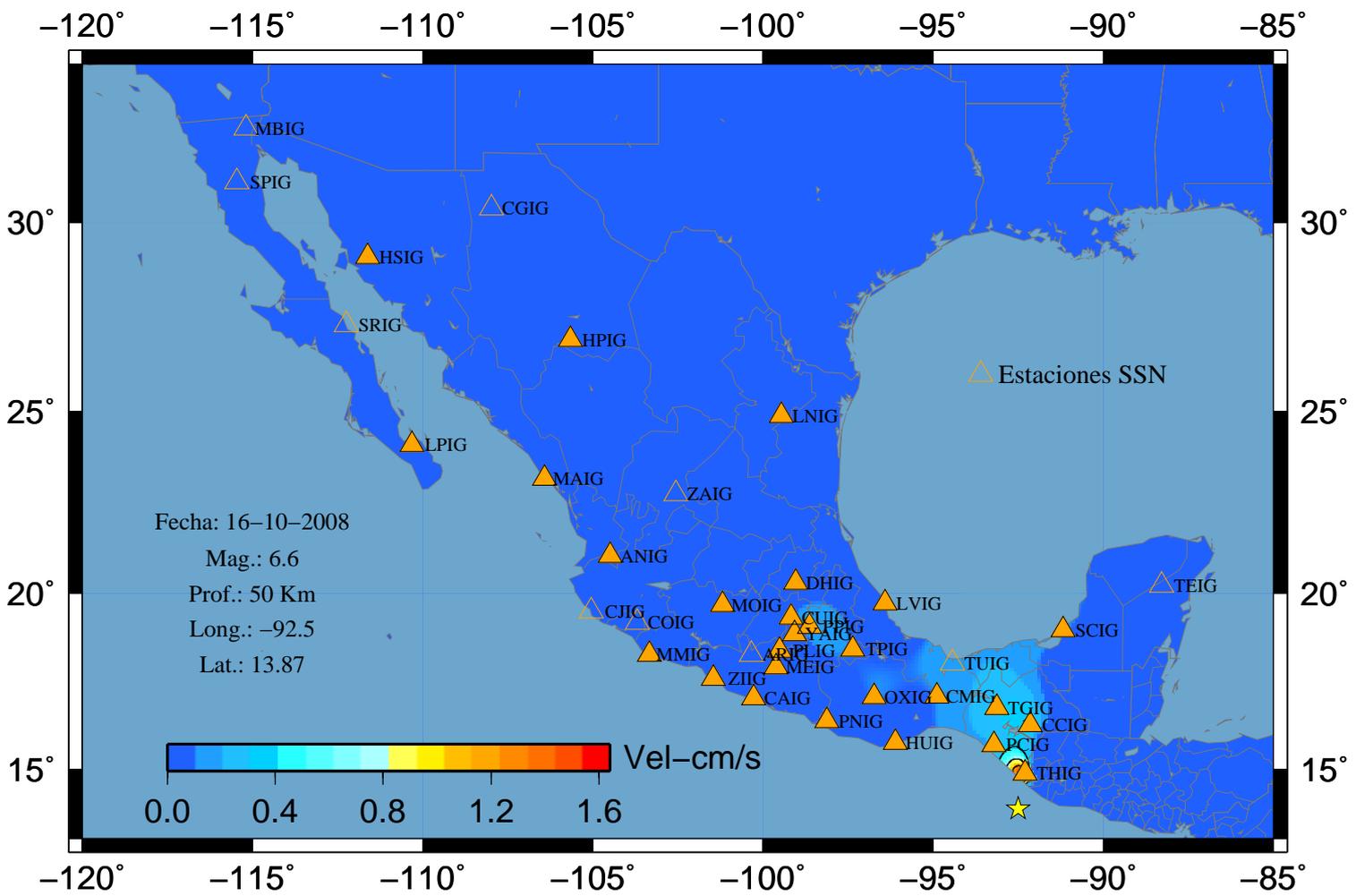
### Sismo 97 A-Vertical



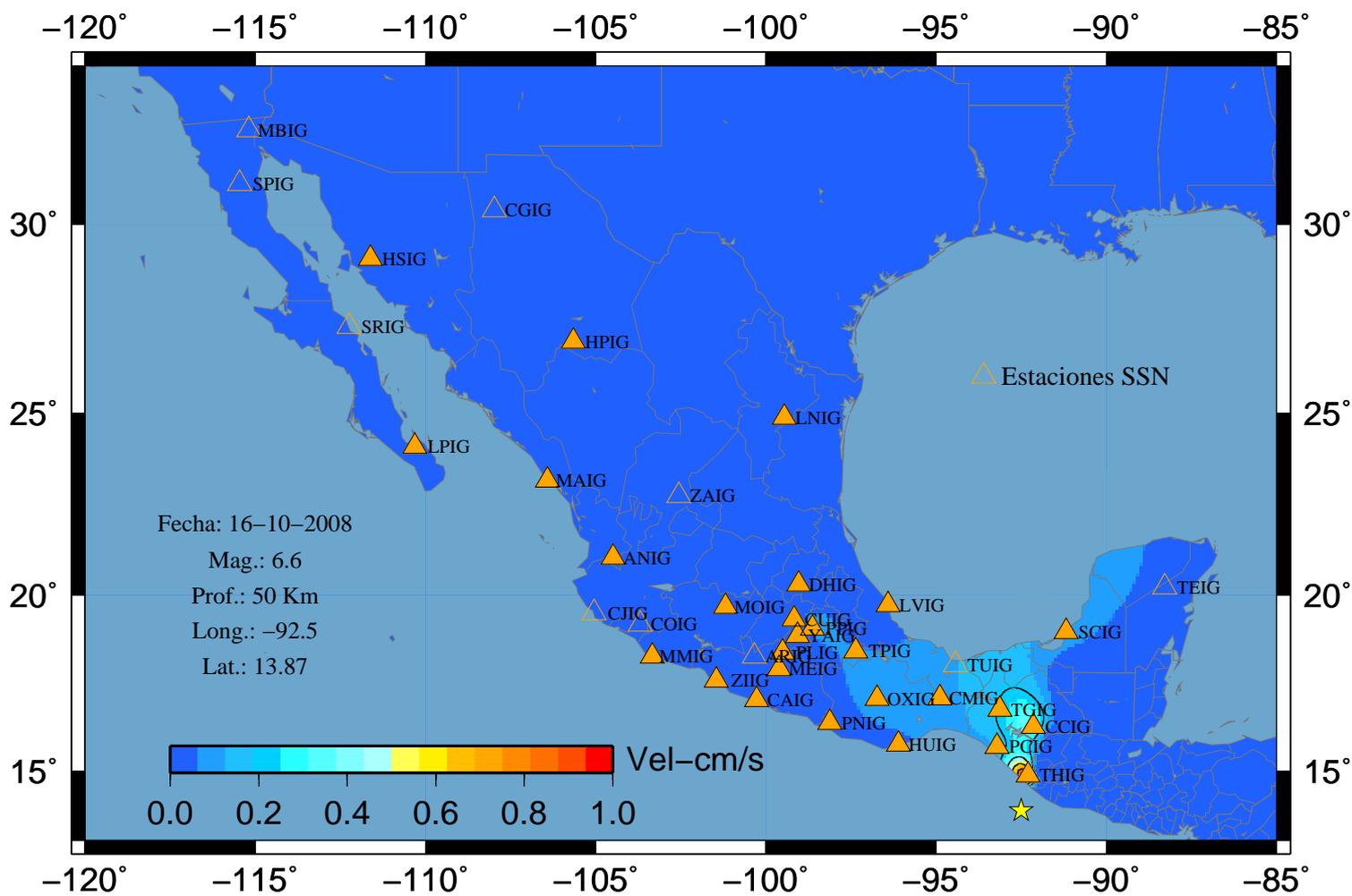
# Sismo 97 V-Este



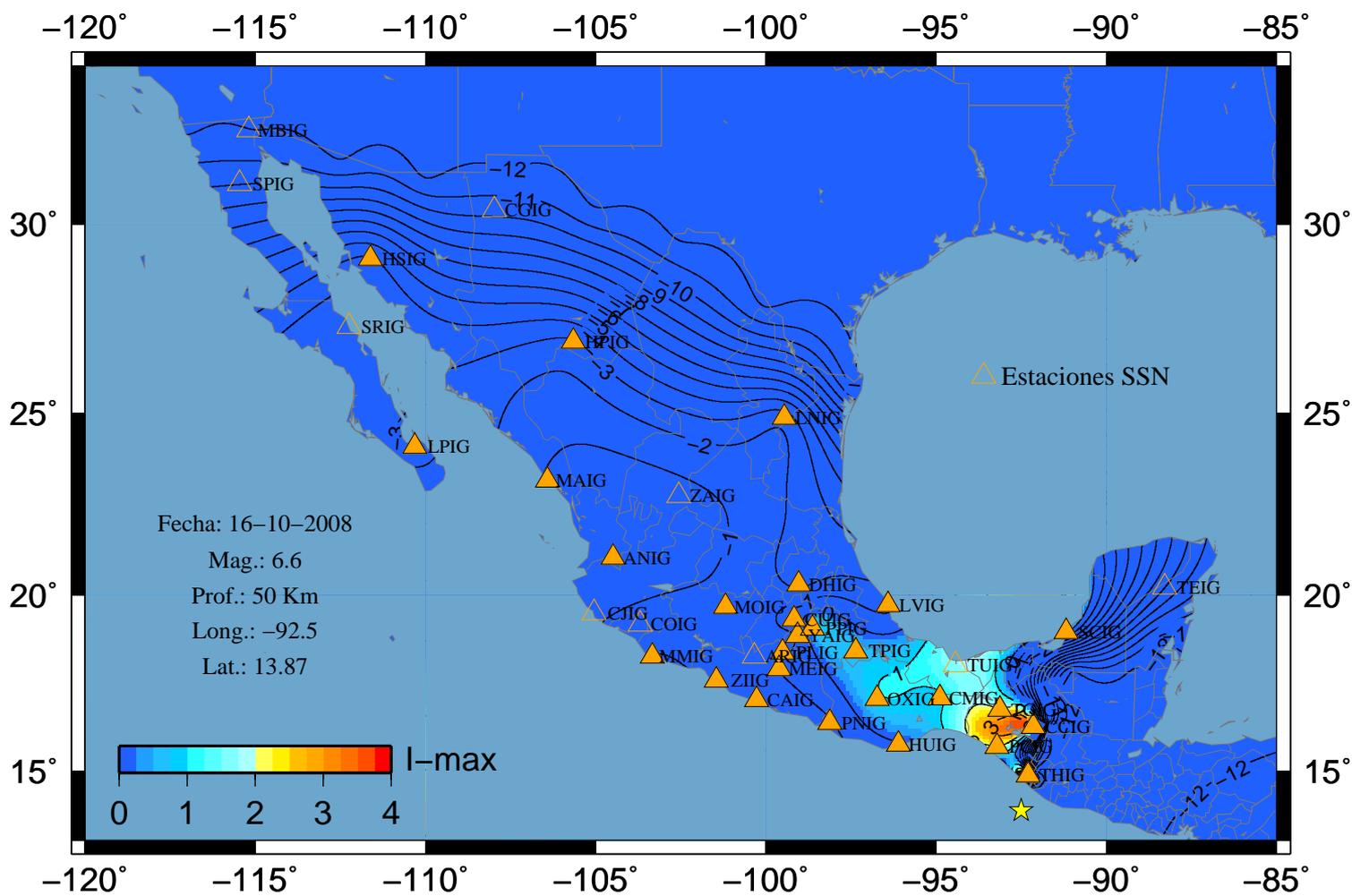
### Sismo 97 V-Norte



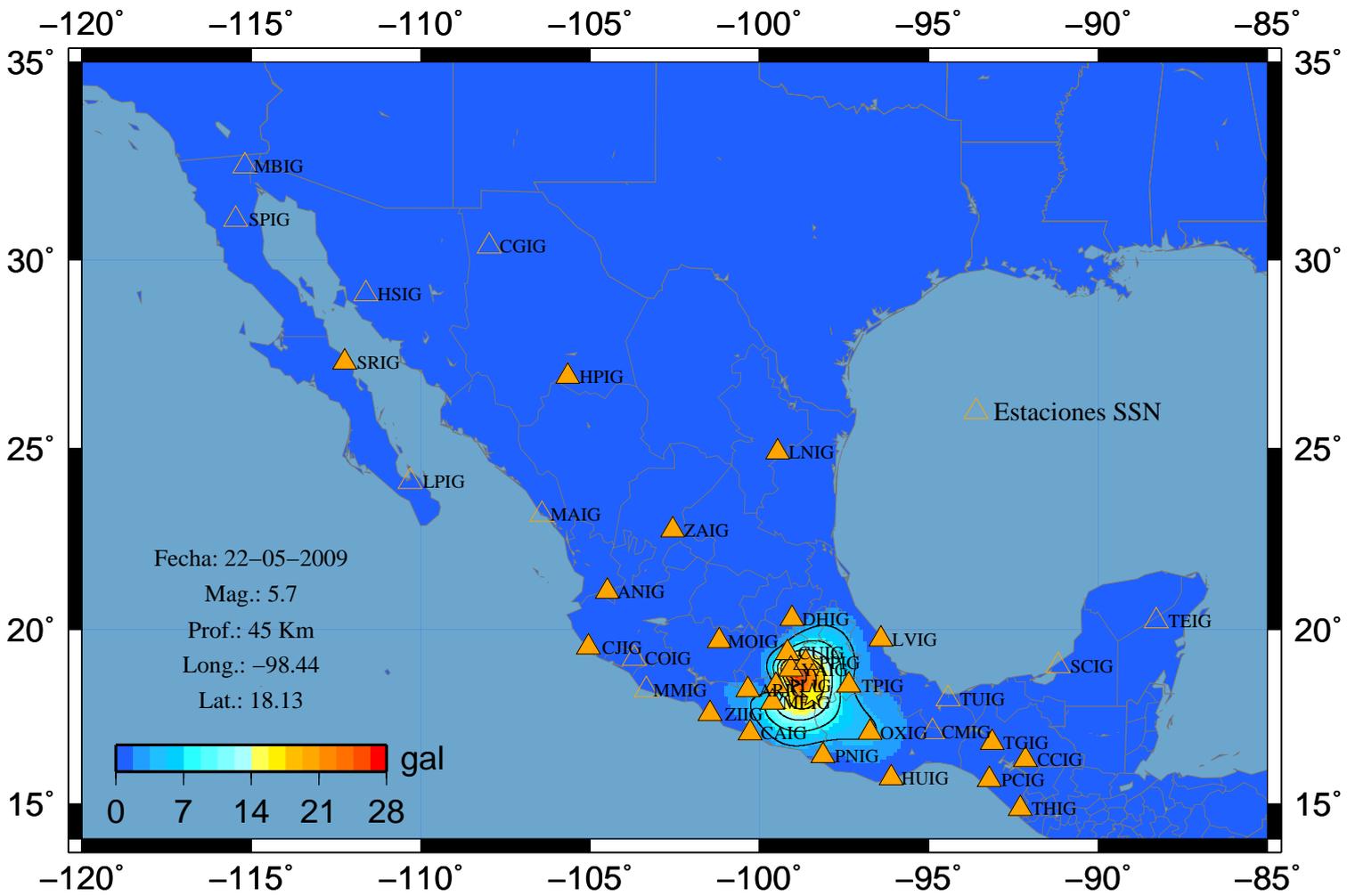
### Sismo 97 V-Vertical



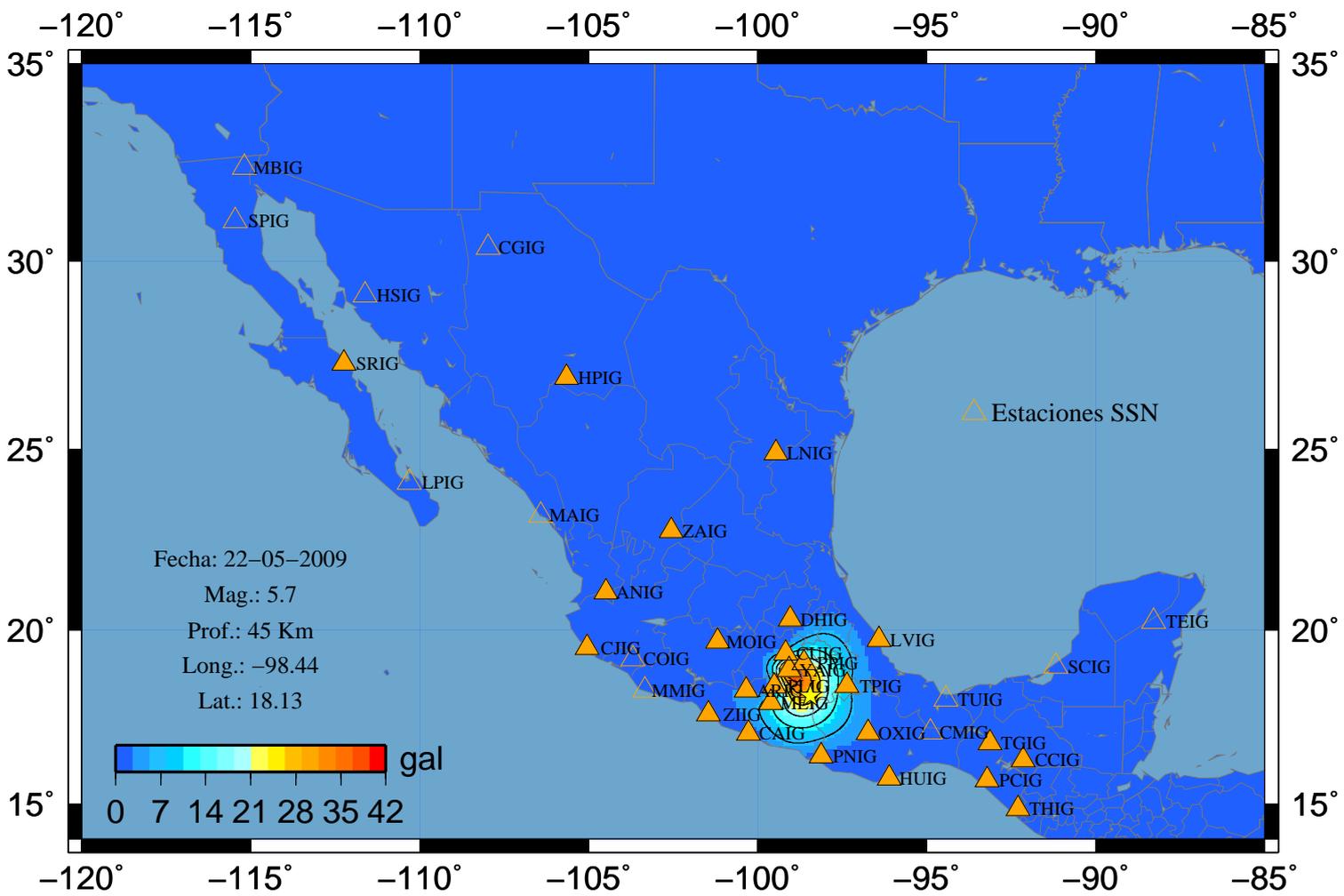
### Sismo 97 I (Max)



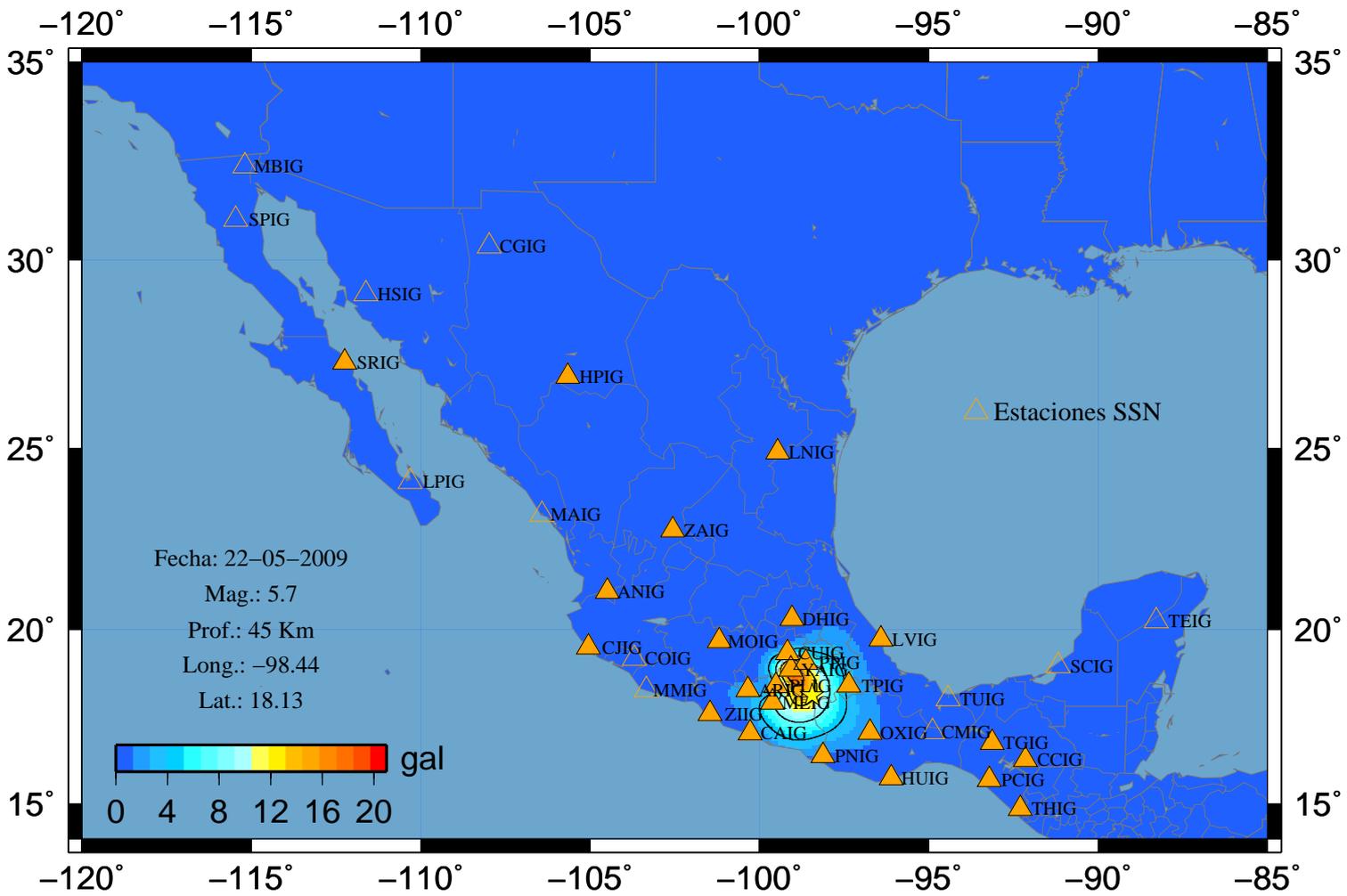
# Sismo 98 A-Este



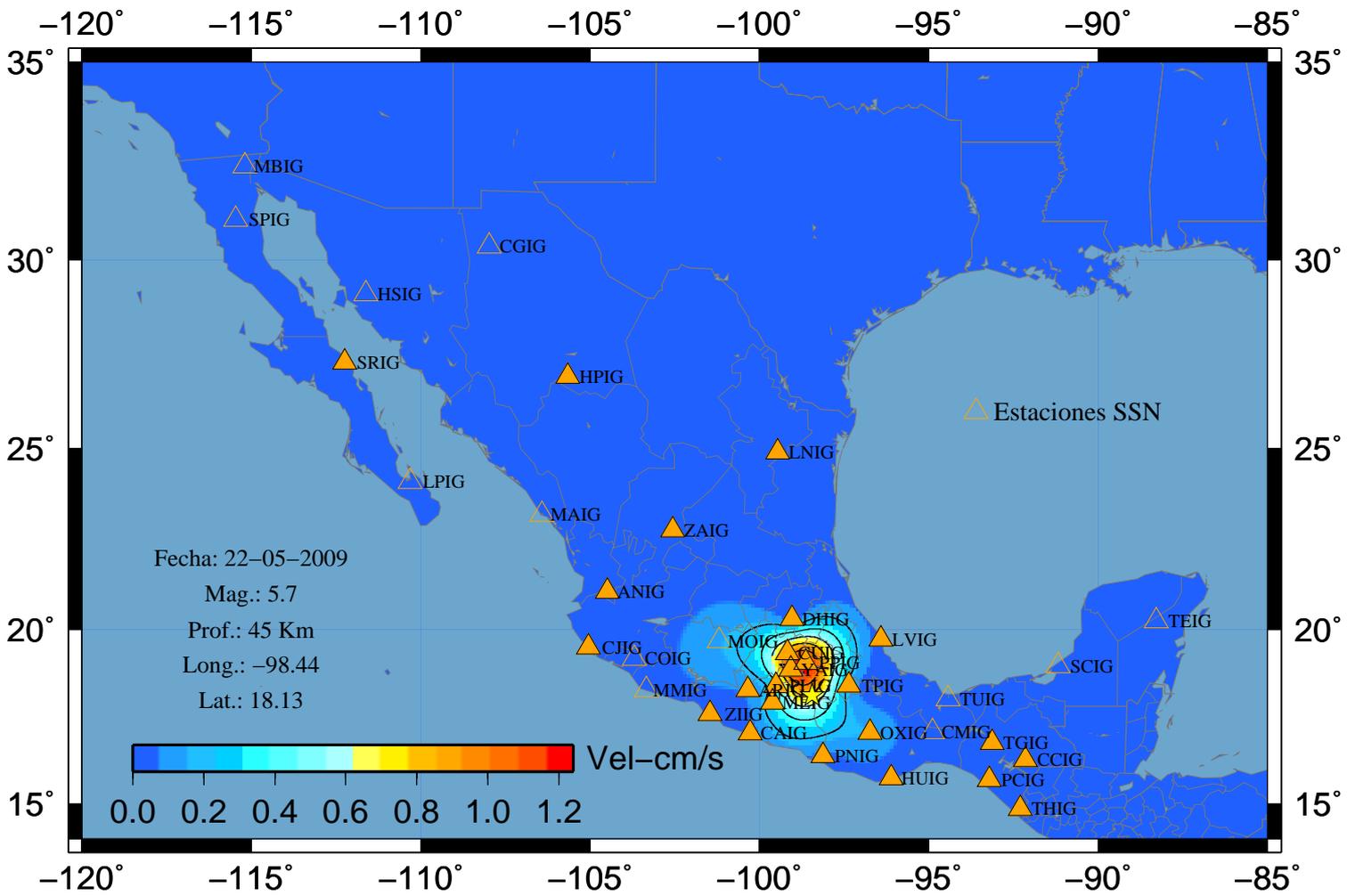
### Sismo 98 A-Norte



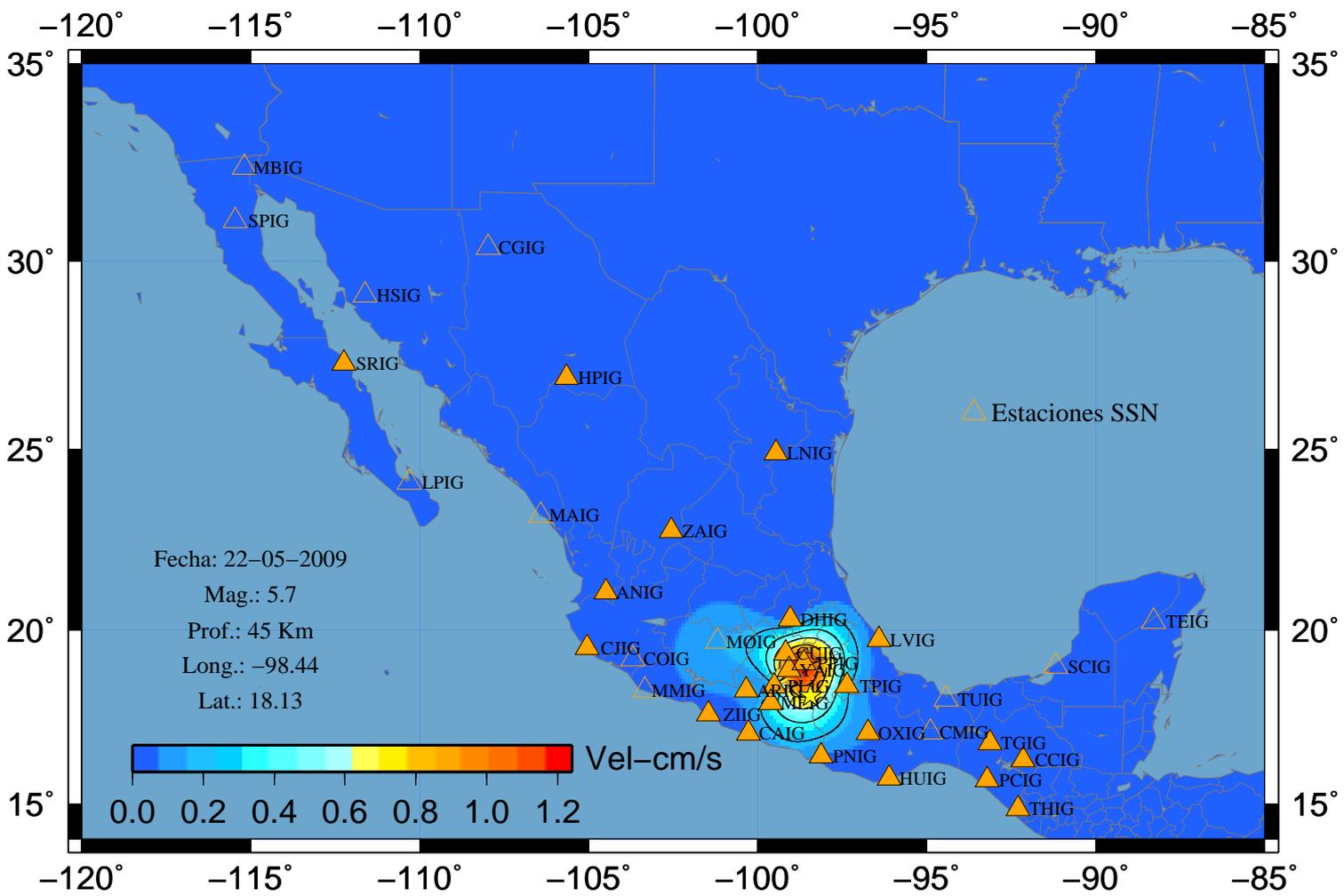
### Sismo 98 A-Vertical



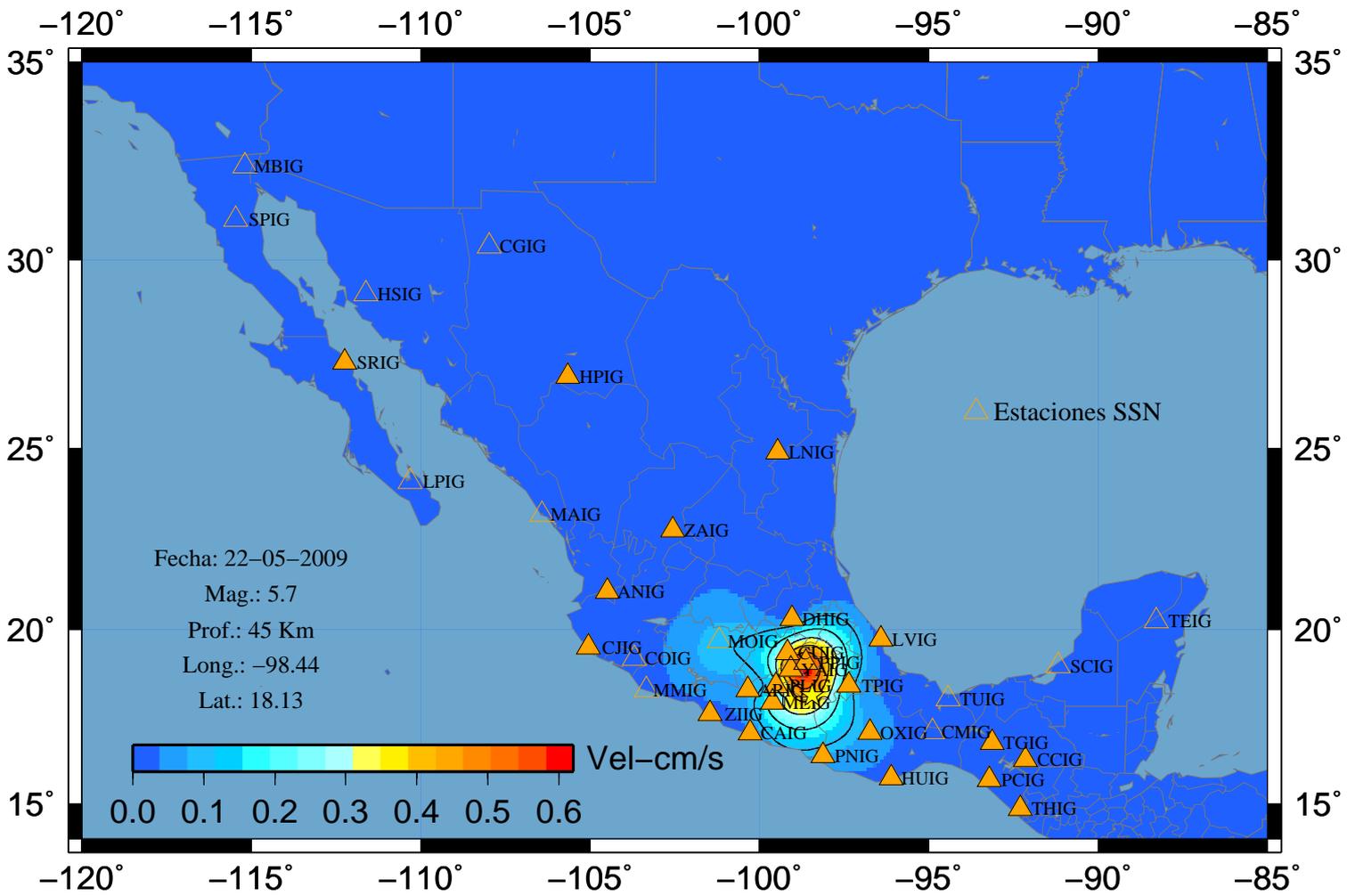
### Sismo 98 V-Este



### Sismo 98 V-Norte



### Sismo 98 V-Vertical



### Sismo 98 I (Max)

