



**SEGURIDAD**

SECRETARÍA DE SEGURIDAD  
Y PROTECCIÓN CIUDADANA



**CENAPRED**

CENTRO NACIONAL DE  
PREVENCIÓN DE DESASTRES

# **CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES**

## **Análisis de Sismicidad en el Estado de Hidalgo**

**Subdirección de Riesgos Sísmicos  
2018**

**Elaboró: Juan Carlos Jiménez Velázquez**



## Análisis de Sismicidad en el Estado de Hidalgo

### Índice

	Página
<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>
1.1 Objetivo	3
<b>2. Antecedentes de sismicidad</b>	<b>4</b>
2.1 Redes sismológicas del Servicio Sismológico Nacional	5
2.2 Sismos fuertes en la República Mexicana	7
2.3 Regiones sísmicas de México	7
<b>3. Catálogo del Servicio Sismológico Nacional</b>	<b>11</b>
3.1 Análisis estadístico de datos sísmicos	16
3.2 Caracterización superficial de fuentes generadoras de sismicidad	24
<b>4. Métodos Potenciales</b>	<b>27</b>
4.1 Magnetometría	27
4.1.1 Mapa de Intensidad Magnética Total (IMT)	28
4.1.2 Espectro de potencia	28
4.1.3 Mapa de Reducción al Polo (RTP)	29
4.1.4 Mapa de Primera Derivada Vertical	30
4.1.5 Mapa Residual Magnético	31
4.1.6 Mapa Regional Magnético	32
4.1.7 Mapa de Señal Analítica	32
4.1.8 Deconvolución de Euler	34
4.1.8.1 Soluciones con índice de 1.0	34
4.2 Gravimetría	36
4.2.1 Gravity Model Grid (GRACE) – NASA	36
4.2.2 Mapa de Pseudogravimetría	38
4.3 Inversión	39
4.3.1 Perfiles 2D	41
4.3.2 Interpretación 2D	47
4.3.2.1 Modelo 2D SE-NW	48
4.3.2.2 Modelo 2D W-E	48
<b>5. Estado de Esfuerzos</b>	<b>49</b>
<b>6. Análisis complementarios (USGS - Vs30)</b>	<b>50</b>
<b>7. Conclusiones</b>	<b>52</b>
<b>8. Recomendaciones</b>	<b>53</b>
<b>9. Bibliografía consultada</b>	<b>54</b>



## Análisis de Sismicidad en el Estado de Hidalgo

### 1. Introducción

Diferentes fenómenos naturales han afectado a la población de la República Mexicana, causando desastres a lo largo de la historia en varias regiones del territorio nacional. Uno de estos fenómenos son los sismos, los cuales desde tiempos prehispánicos, han sido vistos como fenómenos catastróficos y destructores; que desafortunadamente, esta percepción no es muy diferente en nuestros días no sólo en México, sino en todo el mundo.

Se tienen identificadas las principales zonas en donde ocurren los sismos a lo largo de todo el territorio nacional y es sabido que la mayor cantidad de estos mismos, se presentan en las zonas de subducción, y los cuales se identifican con ese mismo nombre específico, porque además son los de mayor magnitud y por ende, de mayor peligro, que ocurren en la frontera de las placas Rivera y de Cocos con la placa de Norteamérica.

Así mismo, también ocurren otros sismos aunque en menor cantidad y poco estudiados, estos se localizan lejos de los contactos entre las placas tectónicas y son los llamados intraplaca; que como su nombre lo dice, son originados dentro de una placa y generalmente a profundidades someras; en el caso de México en la placa de Norteamérica. La sismicidad intraplaca representa la deformación interna de la placa. La ocurrencia de estos eventos sísmicos es poco frecuente y generalmente sus magnitudes son pequeñas, lo que ha dificultado su estudio, tal como la sismicidad que se encuentra en la región sismogénica conocida como *Faja Volcánica TransMexicana* (FVTM) y en donde se encuentra el estado de Hidalgo y aproximadamente a 100 km al norte de la Ciudad de México. En Hidalgo hay una sismicidad recurrente, como en otros estados de la República Mexicana, que aunque no con las grandes magnitudes de los sismos en la Costa Pacífico de México, pero el Estado de Hidalgo sí presenta una sismicidad importante, como los enjambres sísmicos que se presentaron los días 17 y 18 de septiembre de 2013, o como la actividad sísmica presentada en mayo de 2010.

Las principales razones para la elección de esta región fueron:

- Es una región que ha sido poco estudiada en relación a otras zonas sísmicas (costa del Pacífico).
- Su ubicación en el centro del país (por la creciente población y cercanía a importantes centros de población e industriales y cercanía a la capital del país).
- Ha presentado actividad sísmica reciente e importante en diferentes ocasiones durante el transcurso del siglo pasado y en el inicio del presente.

El Servicio Sismológico Nacional (SSN), compartió al Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), su catálogo de los sismos históricos de la República Mexicana desde el año 1900 y hasta el año 2017. Sabiendo que, en el estado de Hidalgo ha habido sismicidad importante, así como en sus alrededores, se tomó un buffer de 50 km de acuerdo a los contornos o límites del estado para un mejor análisis.

#### 1.1 Objetivo

Caracterizar y clasificar la sismicidad en el estado de Hidalgo e inferir sus causas, así como identificar las zonas sismogénicas asociadas y los factores de mayor relevancia en esa actividad sísmica.



## 2. Antecedentes de sismicidad

En el centro de México han ocurrido varios sismos de magnitud considerable. Uno de los eventos más importantes es el sismo de Acambay, Estado de México, en 1912 con una magnitud 6.9 (Abe, 1981) y a tan sólo 100 km al noroeste de la Ciudad de México. El sismo representa el potencial sísmico de la parte central de FVMT. La falla sismogénica tuvo aproximadamente 41 km de largo y 50 cm de desplazamiento vertical (Urbina y Camacho, 1913). El sismo fue sentido en ciudades como Santa María del Río, San Luis Potosí; Chilpancingo, Guerrero; Ozotlán, Jalisco y Puebla, Puebla; y causó la muerte de 164 personas (Landgridge et al., 2000).

Por su parte Suter et al. (1996) describen 8 sismos someros ocurridos en la parte central del país. En Querétaro están los sismos de Pinal de Amoles en 1887 (M=5.3) y Landa de Matamoros 1989 (M=4.6). Estos sismos representan los únicos registros históricos en la zona de estudio (Figura 2.1).

Tabla 1.1. Sismos estudiados por Suter et al., (1996) que representan los antecedentes de sismicidad en el estado de Hidalgo.

Lugar	Fecha	Latitud	Longitud	Magnitud	Profundidad (Km)
<b>Pinal de Amoles, Hidalgo</b>	26/11/1887	21.14	-99.63	5.3	¿?
<b>Ixmiquilpan, Hidalgo</b>	30/11/1950	20.35	-99.97	4.9	5
<b>Cardonal, Hidalgo</b>	25/03/1976	20.62	-99.09	5.3	15
<b>Actopan, Hidalgo</b>	27/01/1987	20.31	-99.21	4.1	15

Tabla 1.2. Sismos estudiados por Suter et al., (1996) que representan los antecedentes de sismicidad en los alrededores del estado de Hidalgo.

Lugar	Fecha	Latitud	Longitud	Magnitud	Profundidad (Km)
<b>Acambay, Estado de México</b>	19/11/1912	19.83	-99.92	7	10
<b>Landa de Matamoros, Querétaro</b>	10/09/1989	21.04	-99.43	4.6	10

En el caso del sismo de Pinal de Amoles, ocurrido el 26 de noviembre de 1887, su magnitud fue estimada a partir de una relación magnitud-intensidad realizada por Suter et al. (1996). Se reporta que este sismo tuvo una intensidad de VIII en Pinal de Amoles (Orozco y Berra, 1887), causando fracturas en todas las casas. El sismo fue sentido en Lagos de Moreno, Jalisco; Ozuluama y Tantoyuca, Veracruz; Tepeji, Hidalgo; Morelia, Michoacán; y Peotillos y Ciudad del Maíz, San Luis Potosí (Suter et al., 1996).

Por otro lado el 10 de septiembre de 1989, aproximadamente a 15 km al sureste de Landa de Matamoros, Querétaro ocurrió un sismo de magnitud 4.6 (mb), causando el deslizamiento de bloques rocosos al sur de dicho municipio (Suter et al., 1996).

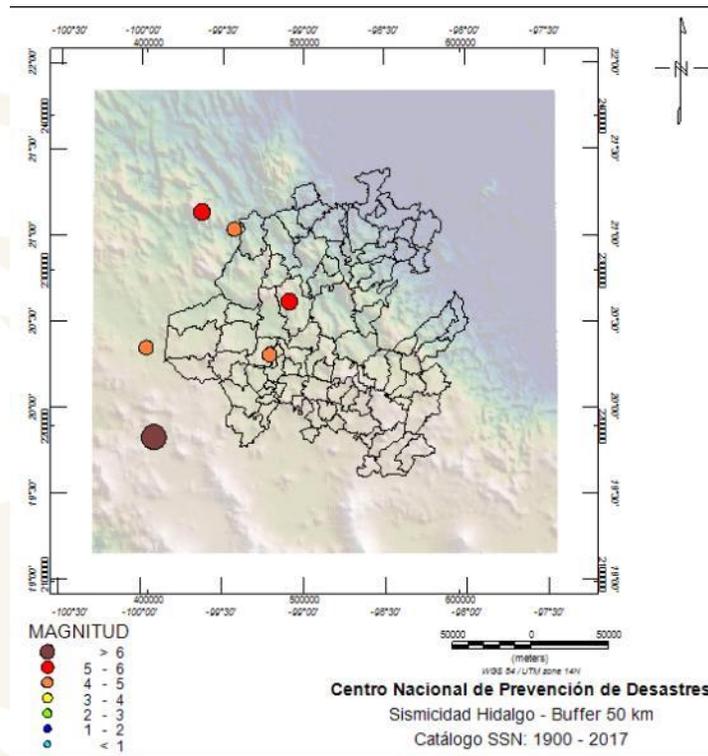


Figura 2.1. Sismicidad reportada en el trabajo de *Suter et al.*, (1996).

De los sismos descritos en el trabajo de *Suter et al.* (1996), seis de ellos se relacionan con la tectónica extensional intra-arco de la FVTM (*Suter et al.*, 1995; *Suter et al.*, 2001; *Ego y Ansan*, 2002; *Ferrari et al.*, 2011) mientras que los sismos ocurridos al norte de la FVTM aparentemente carecen de una relación directa con algún mecanismo regional principal.

## 2.1 Redes sismológicas del Servicio Sismológico Nacional

Actualmente, existen varias redes sismológicas registrando diariamente la actividad que ocurre en las diferentes zonas sismogénicas del país. El Servicio Sismológico Nacional (SSN) tiene como objetivo principal: el proporcionar información oportuna sobre la ocurrencia de sismos en el territorio nacional y determinar sus principales parámetros como son la magnitud y el epicentro. De igual manera, el SSN se encarga de proporcionar la información necesaria para mejorar nuestra capacidad de evaluar y prevenir el riesgo sísmico y volcánico a nivel nacional. El SSN cuenta con cerca de 50 equipos para el registro de temblores, organizado en diferentes subredes. Esta red está formada por 15 estaciones telemétricas distribuidas dentro del territorio nacional, las cuales emiten señal en tiempo real, directamente a la Estación Central localizada en el Instituto de Geofísica de la UNAM. También se tiene la red de atenuación de la brecha sísmica de Guerrero y la red del Instituto de Ingeniería, entre otras, como la del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE).

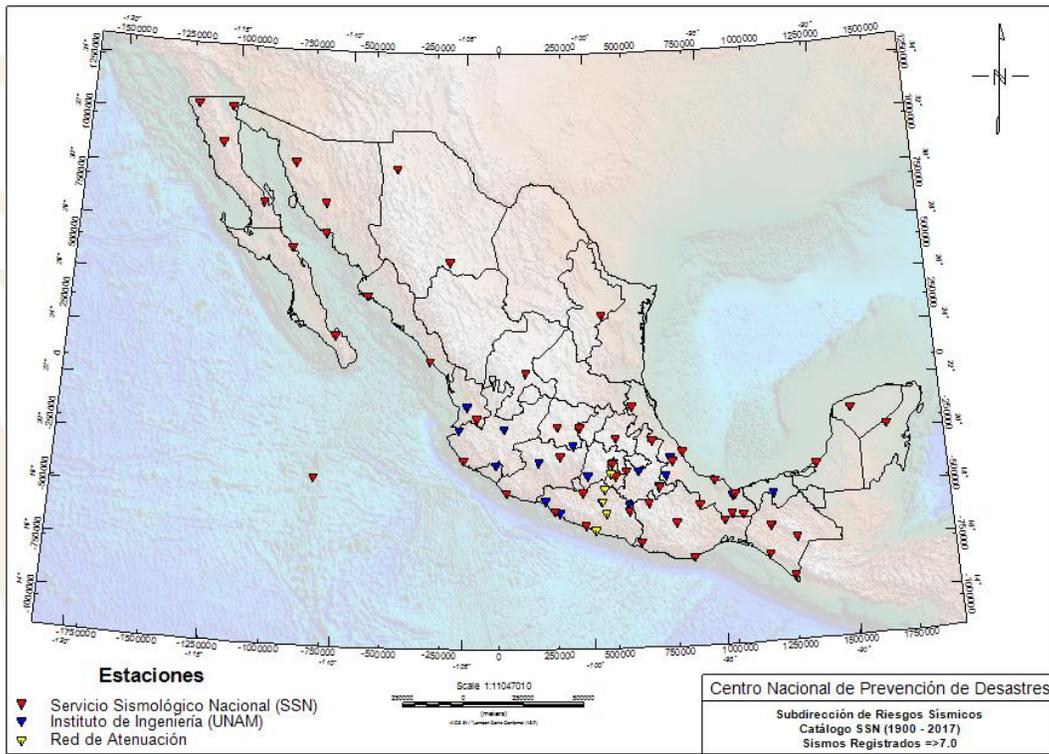


Figura 2.2. Distribución de la Red Sismológica de Banda Ancha a lo largo del territorio nacional.

El SSN mantiene una estación sismológica de primer orden en la población de Demacú en el Estado de Hidalgo. De igual forma el Centro de Geociencias de Juriquilla, también de la UNAM, mantiene una red al norte del Estado de Hidalgo, aunque no transmite en tiempo real sus datos, estos son procesados en forma regular. Y aunque sólo hay una estación, como se encuentra relativamente cerca de la Ciudad de México, hay varias estaciones en los alrededores.

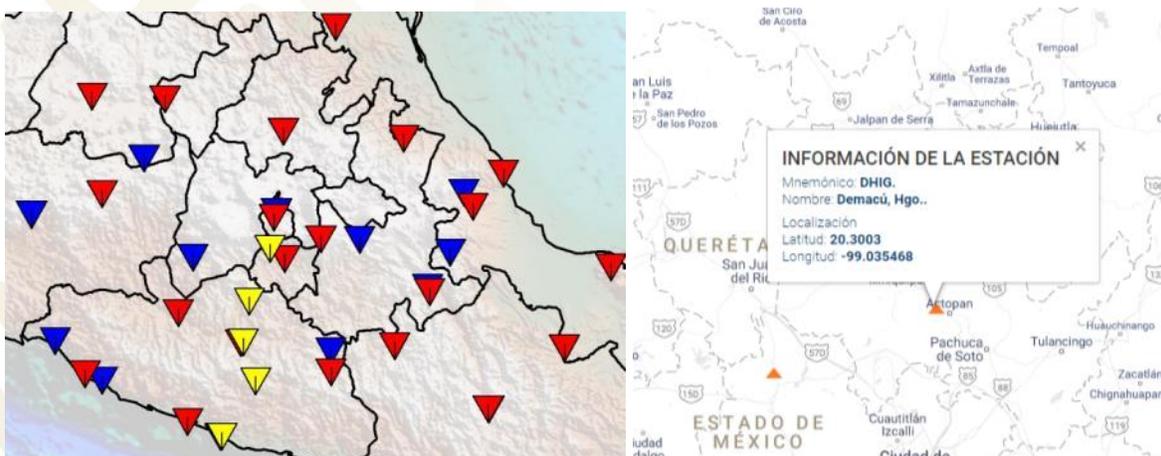


Figura 2.3. Distribución de la Red Sismológica de Banda Ancha en el estado de Hidalgo y alrededores.

## 2.2 Sismos fuertes en la República Mexicana

De los datos del catálogo del SSN, se obtuvieron los sismos de magnitud mayor a 6.7, que se aprecian en el mapa de la figura, en donde se observa que en la era instrumental, en el estado de Hidalgo, no se ha presentado un sismo mayor o igual a dicha magnitud, y el más cercano es el sismo de Acambay, de magnitud 6.9, y que por lo tanto, significa que sea una zona de interés en la sismicidad histórica del país debido a la zona en la que se encuentra geográficamente.

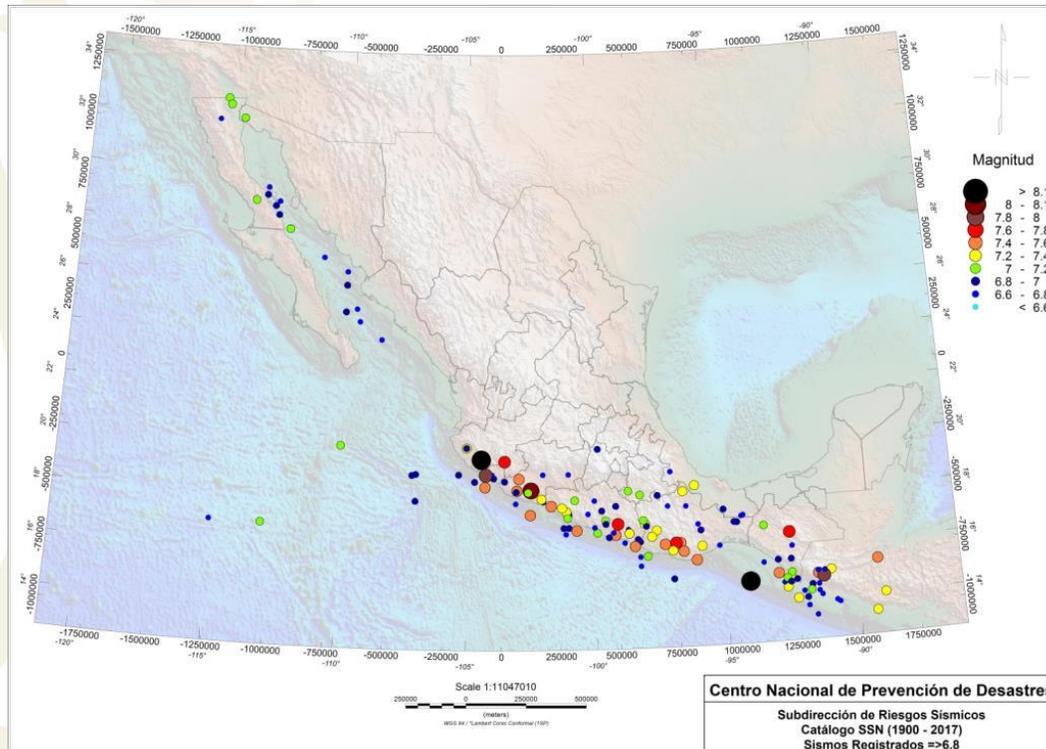


Figura 2.4. Sismos fuertes en México, magnitud mayor a 6.7.

## 2.3 Regiones sísmicas de México

A partir de una compilación de catálogos con datos instrumentales e históricos, *Zúñiga et al (1997)* presentan una división realizada desde el punto de vista sismotectónico. Las zonas propuestas se presentan como una herramienta de primer orden en la zonificación del peligro sísmico de la República Mexicana. Las regiones que se asocian a la sismicidad generada en la interface de las placas Cocos-Norteamérica y Rivera-Norteamérica se les asignó la nomenclatura de SUBR, SUB1, SUB2 y SUB3, todas ellas con fallamiento predominantemente inverso y característico de zonas de subducción, por lo tanto son las zonas con mayor peligro sísmico. La continuación en profundidad de estas zonas con fallamiento normal se localiza en el interior de la placa subducida con la nomenclatura IN1, IN2 e IN3 (*Zúñiga et al., 1997*). Para la zona norte, la región de Baja California se divide en dos sectores; BC1 (define la parte continental de la península) y BC2 (sistema de fallamiento lateral y transforme con la interacción de las placas Pacífico y Norteamericana en el Golfo de California) (*Zúñiga et al., 1997*). Hacia el sur de esta zona, se presentan dos sectores, los cuales se refieren a la sismicidad asociada a la dorsal del Pacífico marcando el límite de las placas Pacífico y Rivera, RIV1 con mecanismos focales normales y RIV2 con mecanismos focales de rumbo (*Zúñiga et al., 1997*).

Para el resto del territorio los sectores intraplaca se dividen en; MBV que corresponde a la provincia de la Faja Volcánica Transmexicana, donde se ha presentado un sismo de magnitud 7 en tiempos históricos con fallamiento normal con pequeñas componentes de rumbo, SMO corresponde a la Sierra Madre Occidental que es una región con baja productividad sísmica, BA corresponde a una zona en los estados de Chihuahua, Sonora y Durango donde se han presentado sismos históricos con magnitudes elevadas, podría corresponder a la continuación sur de la provincia Cuenca y Sierras (*Nataly y Sbar, 1992, Suter, 1987*). La región NAM tiene una actividad sísmica somera (hipocentros menores a 15 km) y se localiza al sur de la FVTM con fallamiento predominantemente normal. La región GMX se encuentra en el Golfo de México dónde los hipocentros tienen profundidades menores a los 15 km con mecanismos focales normales con una importante componente lateral. Finalmente el NE de México se engloba en la región BB y abarca los estados de Coahuila, Nuevo León, San Luis Potosí y Querétaro, la sismicidad es somera menor a 15 km, no se cuenta con información de mecanismos focales, pero se observa una tendencia general de epicentros Norte-Sur (*Zúñiga et al., 1997*).

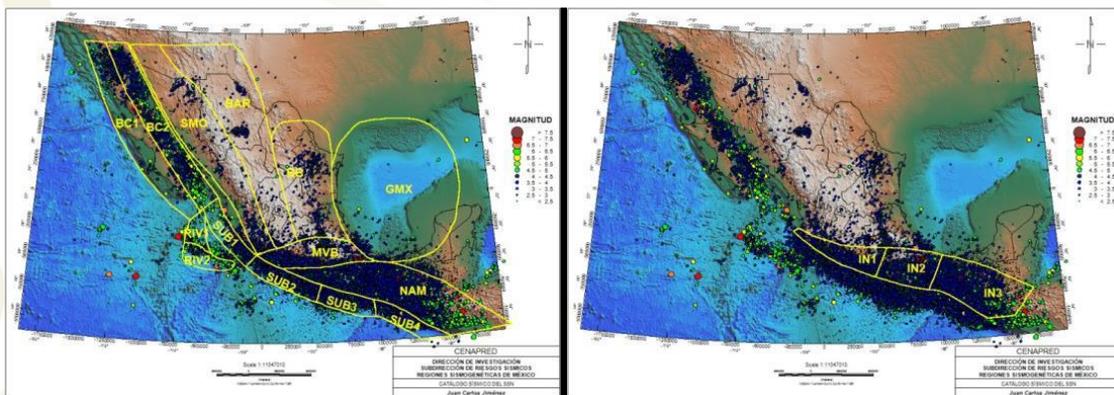


Figura 2.5. Regiones sísmogénicas de México, catálogo del SSN (izquierda ( $h \leq 40$  km), derecha ( $h \geq 40$  km)).

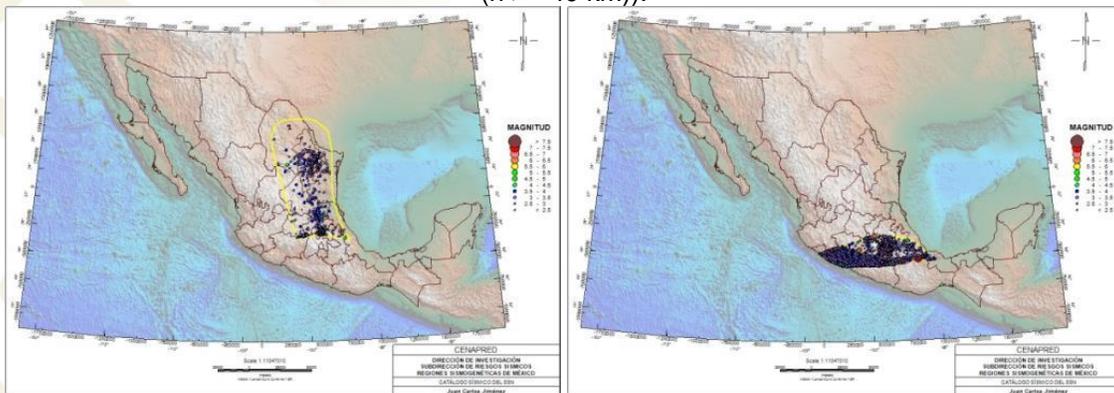


Figura 2.6. Regiones sísmogénicas (BB (izquierda), MVB (derecha)) relacionadas al estado de Hidalgo y alrededores.

Respecto a las regiones sísmogénicas de la Comisión Federal de Electricidad, el estado de Hidalgo se encuentra en las zonas: *Eje Volcánico* y *Sismicidad Difusa 1* (Figura 2.9), así mismo, para las regiones sísmogénicas de Zúñiga, se encuentra en las zonas: MVB y BB (figuras 2.5 y 2.6).

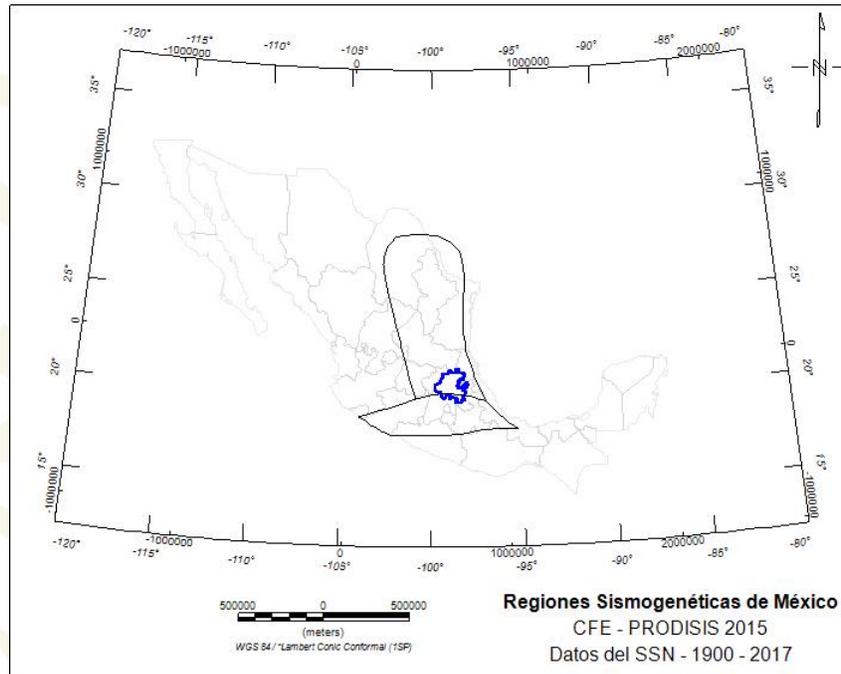


Figura 2.7. Regiones sismogénicas de Zúñiga que coinciden con el estado de Hidalgo.

En la región sismogénica BB, el valor  $b$  ha fluctuado entre 0.4 y 1, lo que significa que, es una región con mediana resistencia. La mayor probabilidad de ocurrencia para esta zona es para sismos superficiales y la magnitud máxima esperada para 500 años es de alrededor de 4.5. Como puede observarse en los histogramas, la recurrencia de sismos profundos es muy baja y casi nula. La magnitud máxima esperada tiene una tendencia muy parecida tanto para sismos superficiales como para sismos profundos. En la región sismogénica MVB, el valor  $b$ , oscila con un promedio de 0.75, y lo que implica que es una zona de mediana resistencia. La mayor probabilidad de ocurrencia para esta zona es para sismos profundos y la magnitud máxima esperada para 500 años es demasiado alta. De las dos anteriores regiones sismogénicas en donde se encuentra el estado de Hidalgo, aunque una mayor área se encuentra en la región BB, la sismicidad de mayor concentración se encuentra en MVB, que sin embargo, no necesariamente representa la sismicidad de nuestra área de interés, porque esta zona cubre toda la faja transversal mexicana.

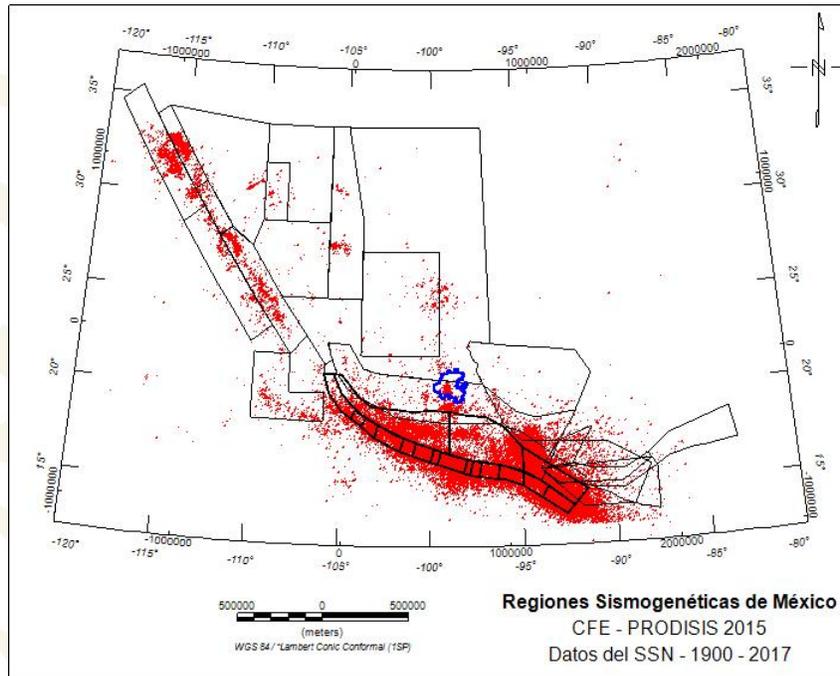


Figura 2.8. Sismicidad histórica de la República Mexicana, del catálogo del SSN desde 1900 y hasta 2017, en donde también se observan las regiones sismogénicas de la CFE.

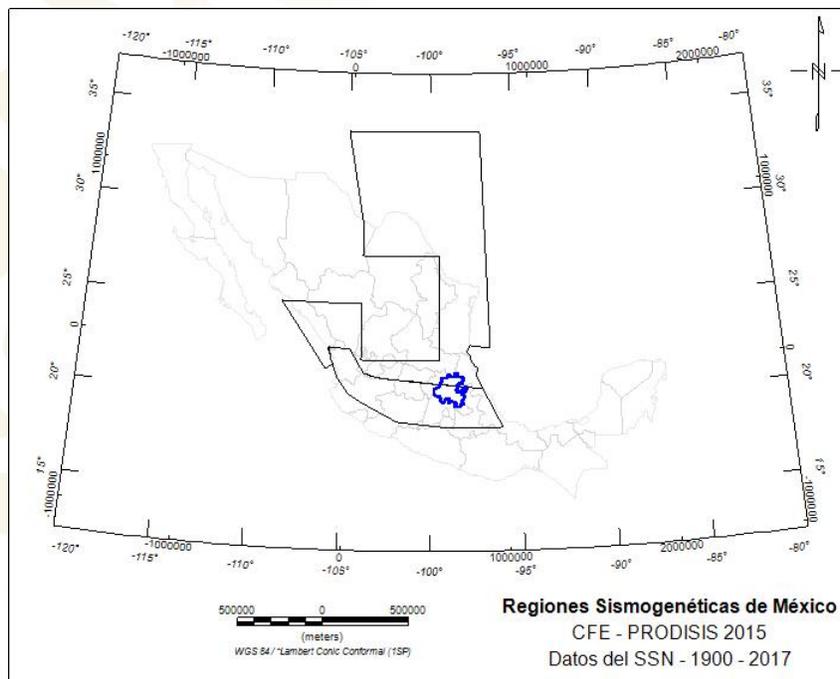


Figura 2.9. Regiones sismogénicas de la CFE que coinciden con el estado de Hidalgo.

Como se puede observar en el mapa de la Figura 2.9, en la última actualización del mapa de regionalización sísmica (CFE, 2015) obtenido con las anteriores regiones sismogénicas, se puede



observar que el estado de Hidalgo se encuentra en las regiones 33 (Eje Volcánico) y 34 (Sismicidad Difusa 1).

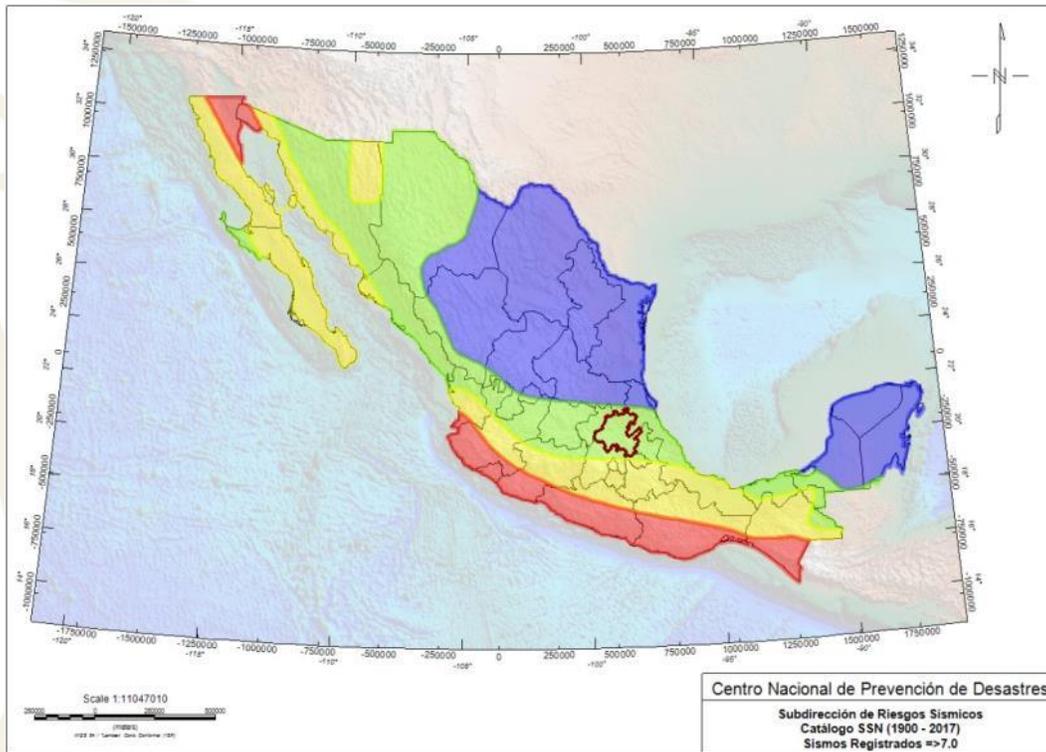


Figura 2.10. Sismos fuertes.

Como se puede apreciar en la figura en esta zona existe actividad sísmica de consideración, no se trata de una zona que pueda considerarse asísmica. Por lo que, tomando en cuenta: la creciente población en esta amplia región, su cercanía a importantes centros de población e industriales, así como a diversas obras de infraestructura (de comunicaciones, hidráulicas, energéticas, sanidad, etc.) dentro y en las cercanías de esta área; sería deseable conocer el potencial sísmico de esta zona.

La regionalización sísmica de México propuesta por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) con fines de construcción antisísmica (Manual de diseño de obras civiles, 2008), dividen el territorio nacional en varias regiones, basándose en las aceleraciones máximas esperadas en terrenos rocosos, donde, se considera que el mayor peligro sísmico se encuentra en la costa Pacífica, donde se presentan los sismos de mayor magnitud y frecuencia en el territorio nacional.

### 3. Catálogo del Servicio Sismológico Nacional

El Servicio Sismológico Nacional, compartió a la Subdirección de Riesgos Sísmicos del CENAPRED, su catálogo de los sismos históricos de la República Mexicana desde el año 1900 y hasta el año 2017, de donde se utilizaron los datos para el análisis de sismicidad del estado de Hidalgo.

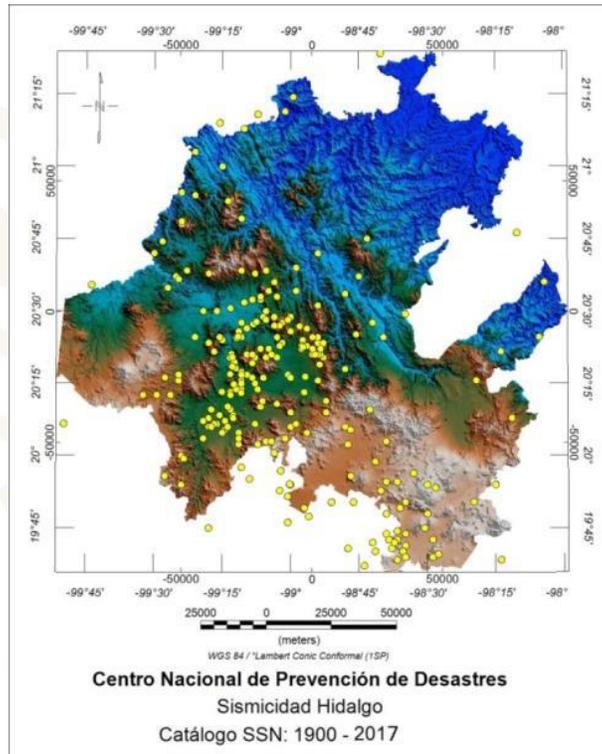


Figura 3.1. Sismicidad en el estado de Hidalgo, sin buffer de datos.

Como se puede ver en el mapa de la Figura 3.1, en donde se observa la topografía y límites del estado de Hidalgo, el cual tiene una extensión horizontal en área de aproximadamente 185 x 195 km. El estado de Hidalgo no tiene una forma geométrica muy homogénea para un análisis de sismicidad aislada. Si se realiza un perfil vertical con los hipocentros y la topografía, esto, para las zonas de sismicidad más importante (Actopan), como se puede ver en los perfiles Sur-Norte y Oeste-Este, de las figuras 3.2 y 3.3, respectivamente (obtenidos del mapa de la Figura 3.1), la continuidad de los eventos pierde cierta tendencia en los extremos y tampoco representa los mismos, además de que se pierde un poco la visualización debido a que hay eventos relativamente muy profundos.

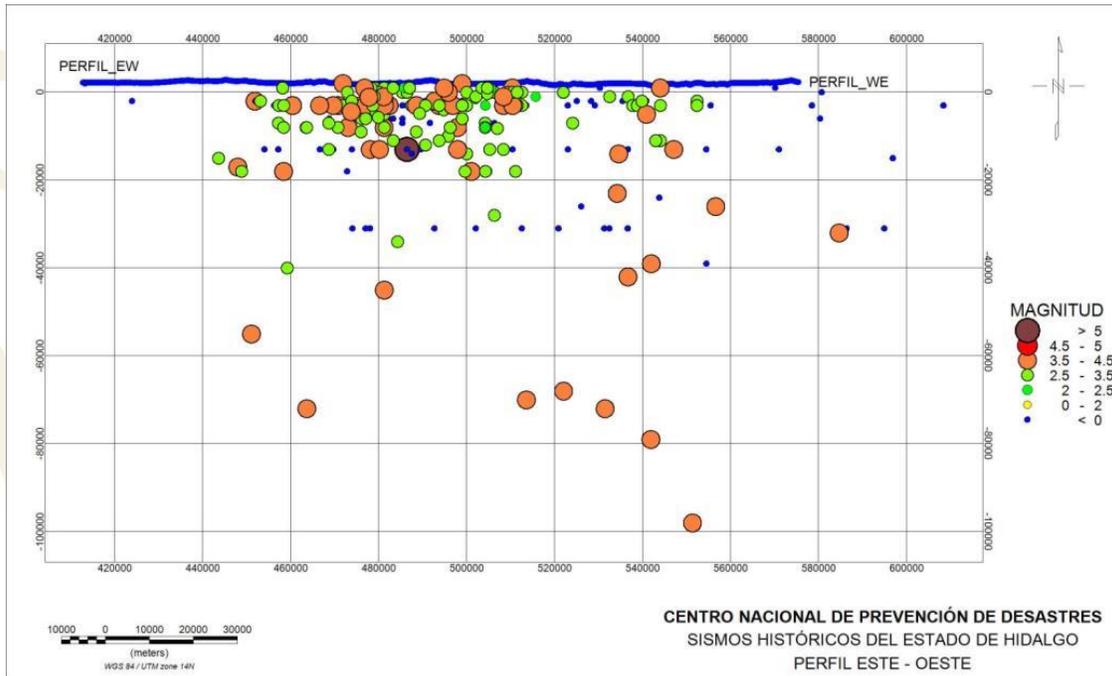


Figura 3.2. Perfil 2D con vista este – oeste, obtenido de una malla topográfica de 195 x 185 km.

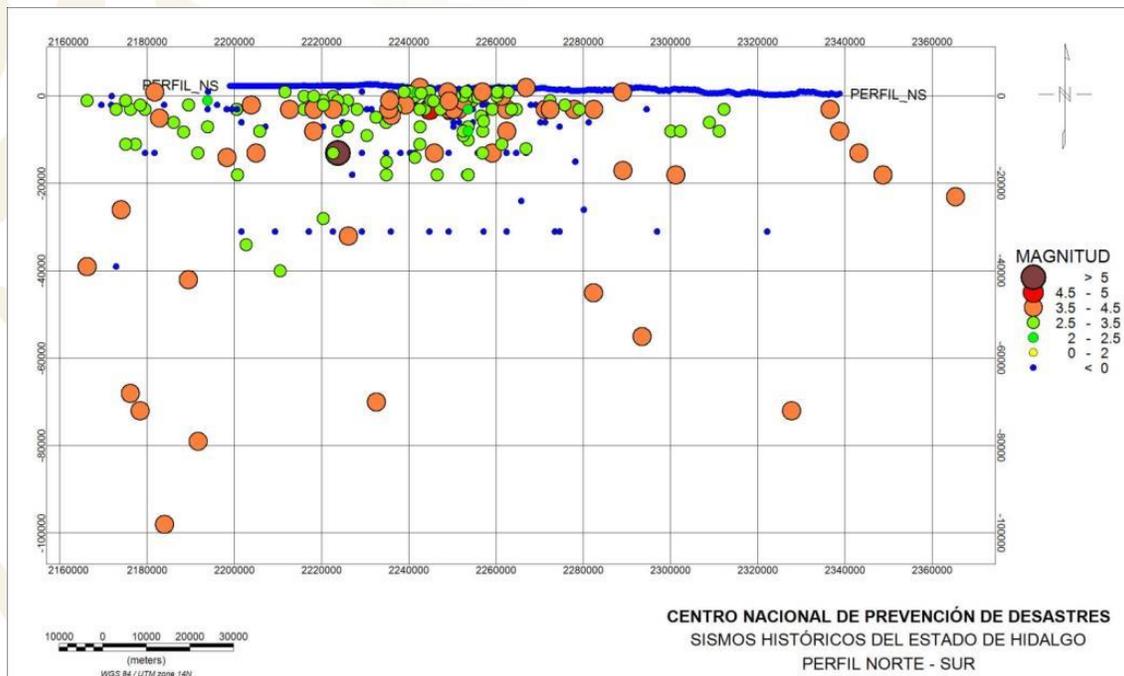


Figura 3.3. Perfil 2D con vista norte – sur, obtenido de una malla topográfica de 195 x 185 km.

Seleccionando los eventos epicentrales e hipocentrales y de acuerdo a los límites del estado de Hidalgo, realmente no representa la sismicidad de acuerdo a eventos históricos que se han presentado en los alrededores, como los eventos sísmicos que reporta Suter et al., (1996), y de entre ellos, el sismo de Acambay, que ha sido el de mayor magnitud en toda esa zona, y debido a



esto, se tomó la decisión de hacer un buffer de 50 kilómetros alrededor de los límites o contornos de todo el estado, por lo cual se manejó una malla de 299 x 298 km, como se puede observar en el mapa de la Figura 3.4. En este mapa, se trazaron 3 líneas, que son las mismas con las que se hicieron los perfiles de las figuras 3.2 y 3.3, pero además se trazó una tercer línea para otro perfil SE-NW, mismas que se pueden observar en las figuras 3.5, 3.6 y 3.7.

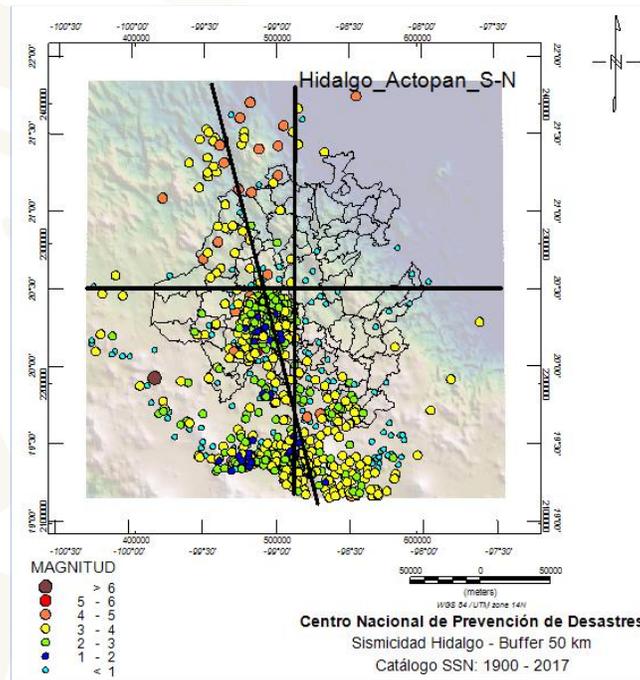


Figura 3.4. Mapa de sismicidad del estado de Hidalgo, con buffer de 50 km, con 3 líneas que representan perfiles verticales.

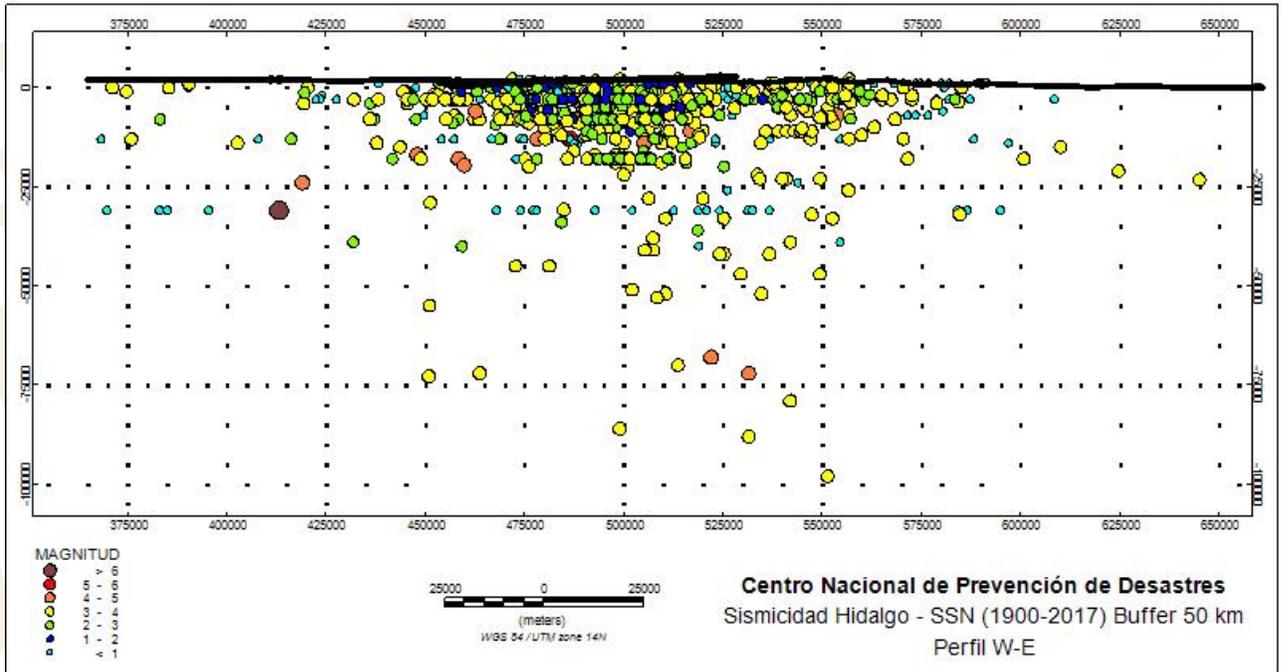


Figura 3.5. Perfil 2D con vista oeste – este, obtenido de una malla topográfica de 299 x 298 km.

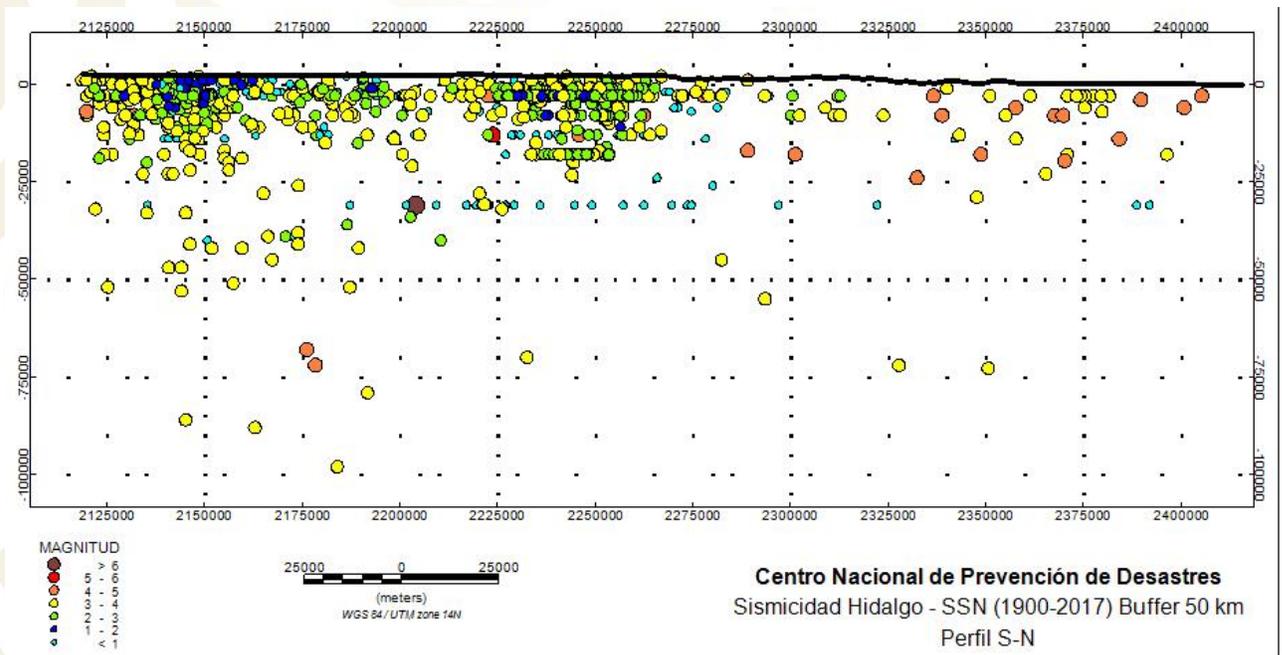


Figura 3.6. Perfil 2D con vista norte – sur, obtenido de una malla topográfica de 299 x 298 km.

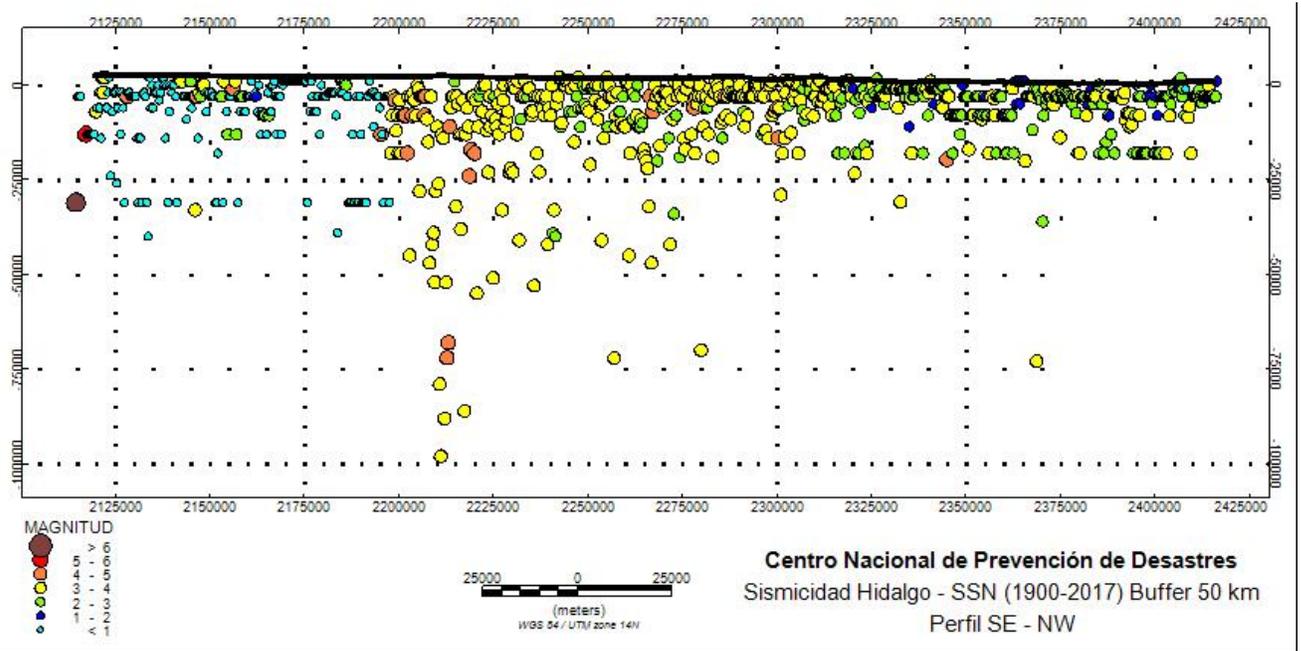


Figura 3.7. Perfil 2D con vista SE – NW, obtenido de una malla topográfica de 299 x 298 km.

Como se puede observar en los perfiles de las figuras 3.5 a 3.7, estos representan más la sismicidad tanto en el estado de Hidalgo, como en sus alrededores y en donde ya es notable el sismo de Acambay.

Como se puede observar en los perfiles, en el catálogo de sismos históricos, ha habido muchos eventos sísmicos en la parte sur del estado de Hidalgo, además del cumulo de eventos en la zona cercana a Actopan. Así mismo, se puede observar que la mayor cantidad de sismos es de profundidad relativamente somera. Más adelante se hará un análisis de estos perfiles, pero con el resultado de estructuras obtenidas a partir de datos de métodos potenciales, así como la inversión o modelado de los mismos.

### 3.1 Análisis estadístico de datos sísmicos

En el mapa de la Figura 3.8, se observa nuevamente el total de los datos que se utilizaran para el análisis de sismicidad del estado de Hidalgo, que como es visible, la mayor cantidad de eventos, cae en la zona sur del estado y en los linderos con la Ciudad de México, así como en la zona de Actopan. Como puede verse en el mapa, se nota una tendencia de eventos en dirección SE-NW, y esto es en la misma dirección de los rasgos geomorfológicos mayores accidentados y en donde se presenta mayor elevación topográfica y esto es más al sur y centro del estado en cuestión.

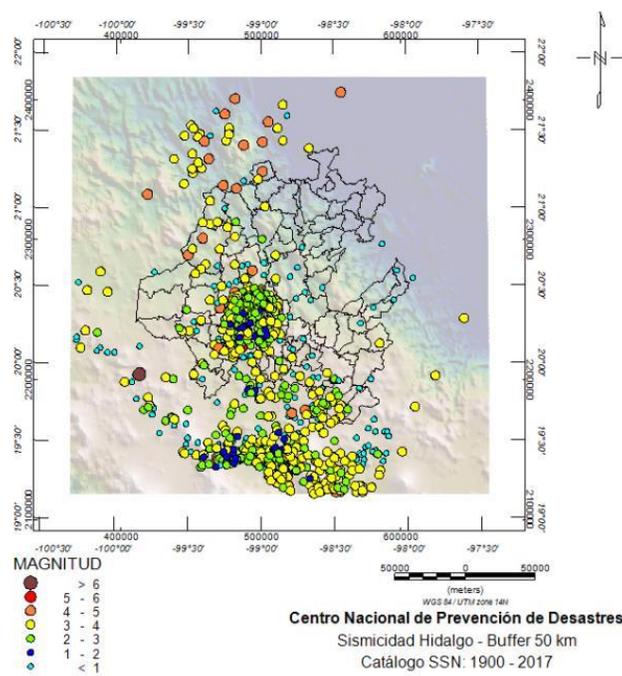


Figura 3.8. Mapa de Hidalgo, con el total de eventos localizados del SSN para un buffer de 50 km.

De los datos seleccionados del buffer de 50 km para el estado de Hidalgo, se realizó un análisis estadístico de los mismos. De los datos seleccionados, hay un total de 917 eventos sísmicos, aunque hay algunos con magnitud y profundidad cero, a lo que llamamos el buffer de los datos sin depurar (Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Catálogo del SSN sin depurar.

	No. Eventos	Máximo	Mínimo	Mean	Median	Moda	StdDev
<b>Magnitud</b>	917	6.9	0	2.396	3.0	0.0	1.428
<b>Profundidad</b>	917	100	0	9.8	5.0	5.0	11.71

De la cantidad total de datos sin depurar, del buffer de hasta 50 km, se realizó un gráfico en donde se muestran los datos de magnitud y profundidad, pero ordenados por tiempo (Figura 3.9).

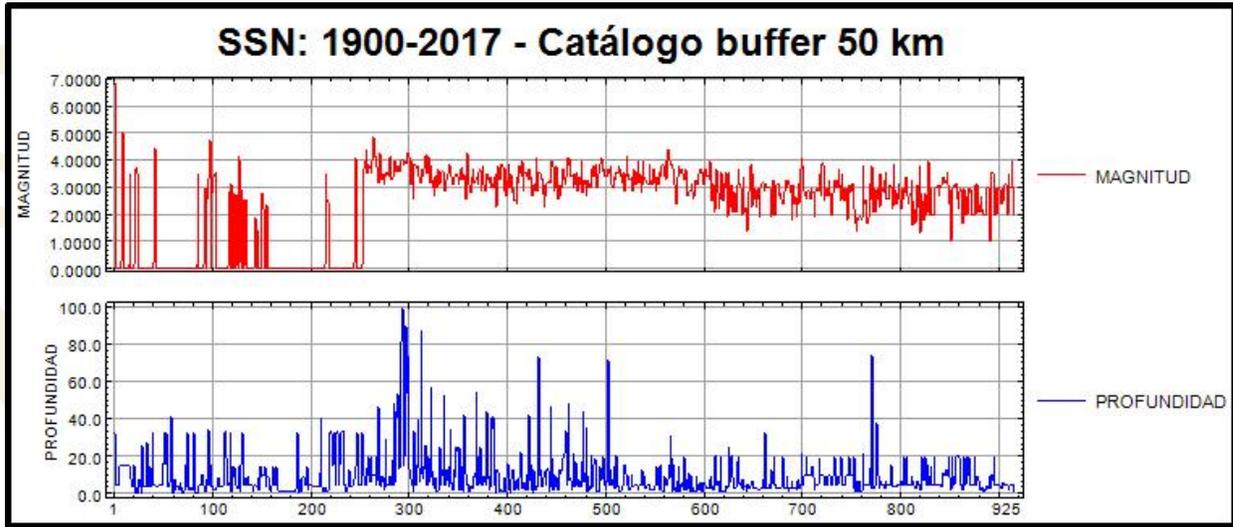


Figura 3.9. Datos del SSN sin depurar y ordenados por fecha o tiempo.

Como puede observarse en el grafico la Figura 3.9, a partir de 1988 ya no hay magnitudes de cero, lo que podría indicar que antes de ese año había muy poca instrumentación y que a partir de ese año aumento la red de estaciones sísmicas en la República Mexicana y en las cercanías al estado de Hidalgo, incluyendo la única estación que hay actualmente en dicho estado.

En la Tabla 3.2, se tienen los datos depurados de magnitud y profundidad cero, en donde se observa que quedan 703 datos de magnitud, con una diferencia de 214 datos de magnitud cero (Figura 3.10), y 905 datos de profundidad, con una diferencia de 12 datos con profundidad cero.

Tabla 3.2. Catálogo del SSN depurado, sin valores de magnitud y profundidad cero.

	No. Eventos	Máximo	Mínimo	Mean	Median	Moda	StdDev
<b>Magnitud</b>	703	6.9	1.0	3.1253	3.1	3.0	0.6154
<b>Profundidad</b>	905	100	1.0	9.926	5.0	5.0	11.7337

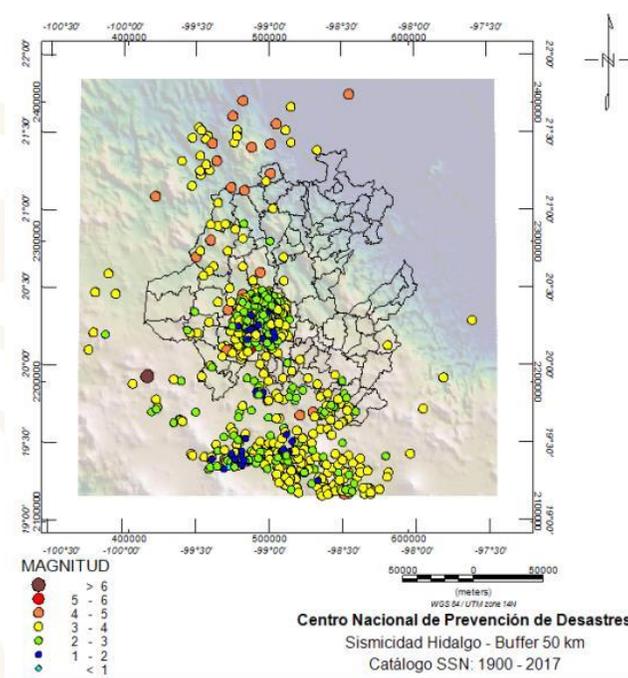


Figura 3.10. Mapa del estado de Hidalgo, con el total de localizaciones epicentrales de eventos sísmicos sin magnitud cero.

Del total de datos del buffer a 50 km, se realizó una separación de eventos superficiales y profundos, presentando la relación Gutenberg-Richter para el catálogo completo de cada región sísmogénica, de los eventos superficiales ( $\leq 10$  km de profundidad) y para los eventos profundos ( $> 10$  km de profundidad), así como la magnitud máxima esperada para cada uno y la probabilidad de ocurrencia también para cada uno, y finalmente se presenta el valor  $b$  y la magnitud de completos de cada región pero a partir del año de 1985 y hasta el año 2017. Además se realizaron varias separaciones, por magnitud y profundidad.

Del catálogo completo, para la obtención de la relación Gutenberg-Richter se utilizó una subrutina en Matlab, que por default elimina datos de magnitud cero, debido a que en dicho cálculo modifica la pendiente cuando hay mayor frecuencia de magnitud cero que altera demasiado la media de los datos. El valor  $b$  para el catálogo completo es de 0.8739 y la magnitud de completos es de 3.0.

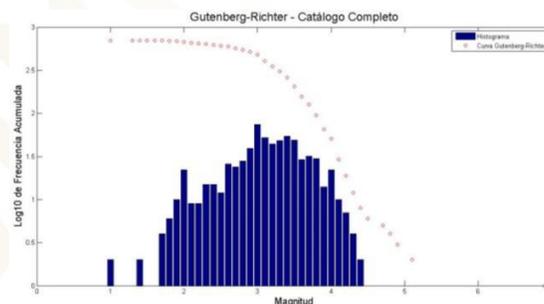


Figura 3.11. Relación Gutenberg-Richter para el catálogo completo del buffer de 50 km.

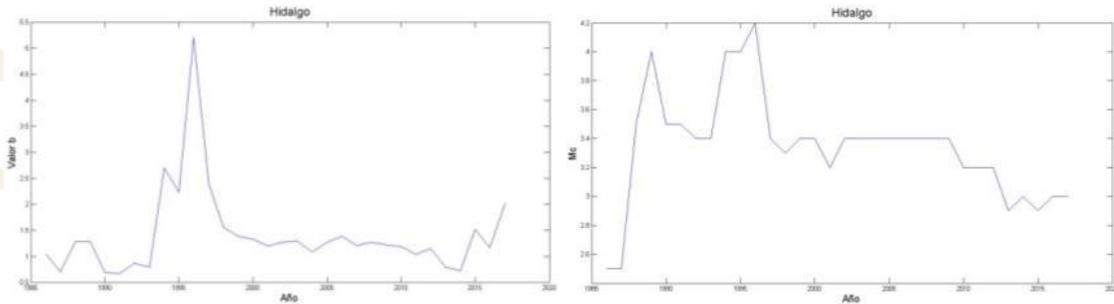


Figura 3.12. Valor b y Magnitud de completos desde el año 1985 y hasta 2017.

Como hay mayor cantidad de datos con magnitud cero y muy pocos datos de profundidad cero, podría deberse a muchos factores, por ejemplo en profundidad podría deberse a un error muy grande en el cálculo de la localización, con un modelo de velocidades muy robusto para esos años, y en el caso de magnitud, podría deberse principalmente a que son magnitudes muy pequeñas, incluso de magnitud negativa, esto porque hay actividad hidrotermal en varios sitios del estado de Hidalgo.

En el siguiente mapa se graficaron los eventos sísmicos de magnitud mayor o igual a 4 (Figura 3.13), es decir, los eventos de magnitud mayor, esto porque la media en magnitud es de 3.1. En este mapa con magnitudes altas de los eventos sísmicos, se sigue observando una tendencia SE-NW.

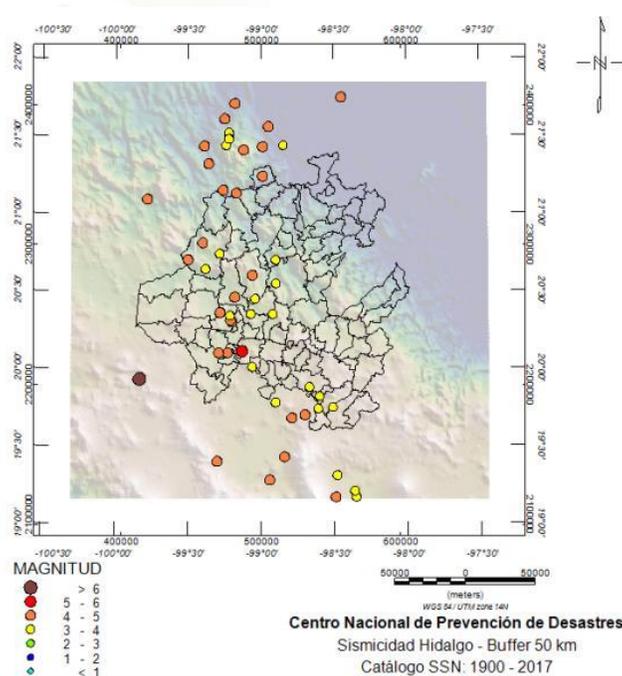


Figura 3.13. Mapa del estado de Hidalgo, con localizaciones de sismos con magnitud mayor o igual a 4.



En el mapa de la Figura 3.14, se graficaron los eventos sísmicos con profundidades entre 0 y 5 km, esto debido a que la moda de los hipocentros es de 5 km, siendo que la actividad sísmica en la región es relativamente somera.

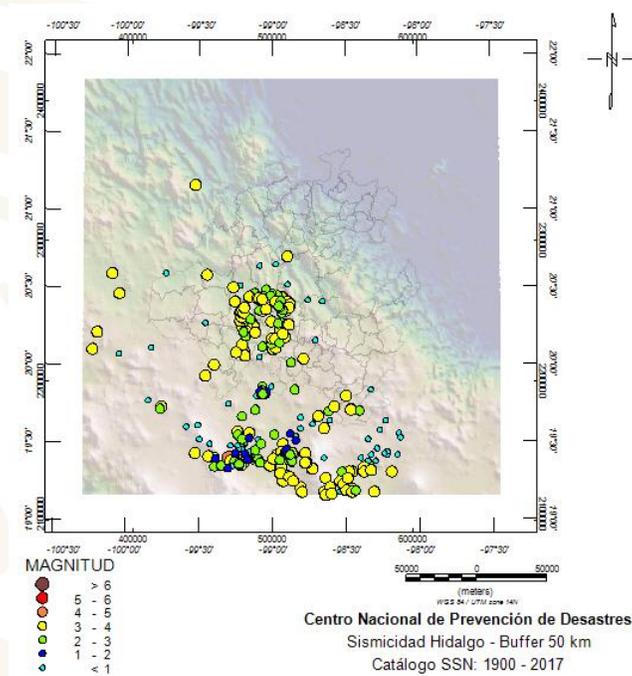


Figura 3.14. Mapa del estado de Hidalgo, con localizaciones de sismos de profundidad entre 0-5 km.

En el mapa de la Figura 3.15, se graficaron los eventos sísmicos con profundidades entre 5 y 10 km, es decir, después de la moda en la profundidad que es de 5 km y antes de la media que es cercana a 10 km de profundidad.

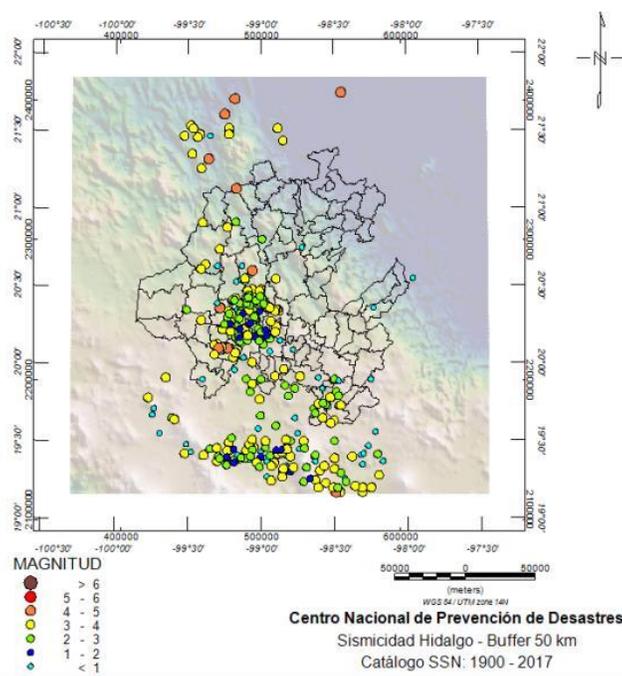


Figura 3.15. Mapa del estado de Hidalgo, con localizaciones de sismos de profundidad entre 5-10 km.

Para los eventos sísmicos con profundidad menor o igual a 10 km, el valor b, es de 0.9318 y la magnitud de completes es de 3.0 (Figura 3.16).

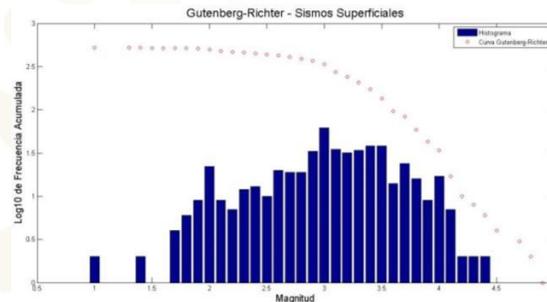


Figura 3.16. Relación Gutenberg-Richter para sismos superficiales del buffer de 50 km.

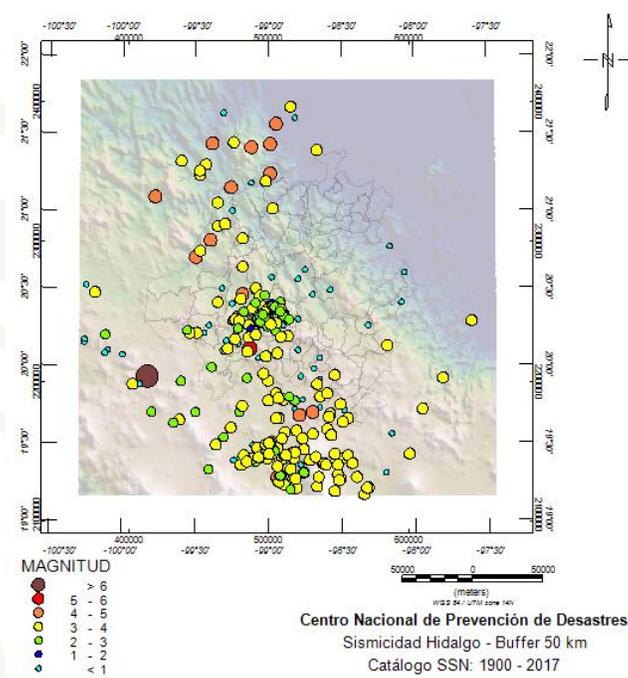


Figura 3.17. Mapa del estado de Hidalgo, con localizaciones de sismos de profundidad entre 10-100 km.

Para eventos sísmicos con profundidades mayores a 10 km, el valor b, es de 0.8368 y la magnitud mínima de completos es de 3.1 (Figura 3.18).

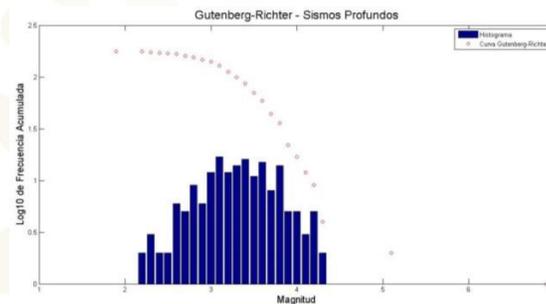


Figura 3.18. Relación Gutenberg-Richter para sismos profundos del buffer de 50 km.

Con los datos del catálogo del buffer de 50 km, se realizó el cálculo de la probabilidad de ocurrencia hasta 500 años (Figura 3.19), desde la magnitud 3.5 y hasta la magnitud 8.0. Como se puede observar en el gráfico, la mayor probabilidad de ocurrencia para años menores a 200, es para magnitudes de hasta 5.0, y para magnitudes mayores de 5.5 la probabilidad va disminuyendo.

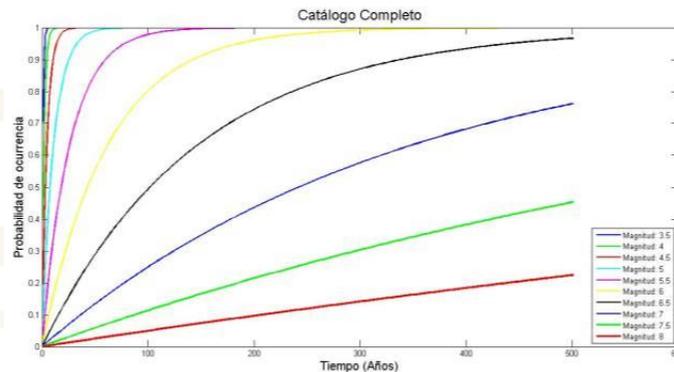


Figura 3.19. Probabilidad de ocurrencia para 500 años, para el catálogo completo del buffer de 50 km.

Con la misma base de datos, se realizó el cálculo de la magnitud máxima esperada para hasta 500 años para el mismo catálogo. Dicho cálculo se realizó con los datos separados en sismos profundos y someros, así como en la totalidad de los datos. Como se puede ver en el gráfico de la Figura 3.20, la tendencia del resultado de la magnitud máxima esperada es muy similar en el catálogo de sismos profundos con el catálogo completo, y aparentemente, para magnitudes de sismos superficiales, la magnitud máxima esperada es menor y muestra una tendencia muy desfasada de las otras dos anteriores.

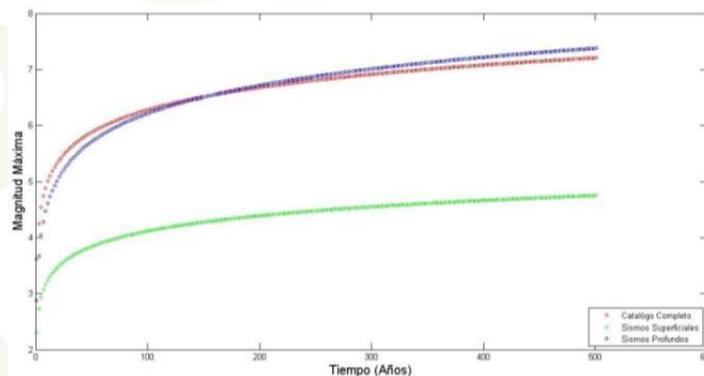


Figura 3.20. Magnitud máxima esperada para 500 años para el catálogo completo del buffer de 50 km.

### 3.2 Caracterización superficial de fuentes generadoras de sismicidad

De acuerdo a la clasificación de fallas que reportó Cid Villegas (2015), las cuales son:

- Fallas Tipo A: Son fallas que presentan desplazamientos en el Holoceno (últimos 11700 años). Estas fallas presentan gran cantidad de información con indicadores contundentes que sustentan este desplazamiento. Las principales técnicas que brindan indicadores son: sismología instrumental, medición de GPS, sismos históricos y paleosismología. De igual manera se cuenta con información de geología y geomorfología.
- Fallas Tipo B: Son fallas con desplazamientos en el Pleistoceno que posiblemente presentaron desplazamientos en el Holoceno. Sin embargo la información disponible así como sus indicadores son insuficientes para sustentar el desplazamiento reciente. Los

- indicadores son: sismos históricos (sismos que pueden estar asociados a las fallas), paleosismología, geomorfología y geología.
- Fallas Tipo C: Corresponden a fallas con desplazamientos en el Pleistoceno sin ninguna información que indique posible desplazamiento en el Holoceno. La información obtenida corresponde a la cartografía geológica. Sus indicadores corresponden principalmente a la geomorfología y a la geología.

En el mapa de la Figura 3.21 se colocaron las fallas tipo A, B y C, para visualizar otras fuentes que pudieran ser generadoras de sismicidad en el estado de Hidalgo y alrededores.

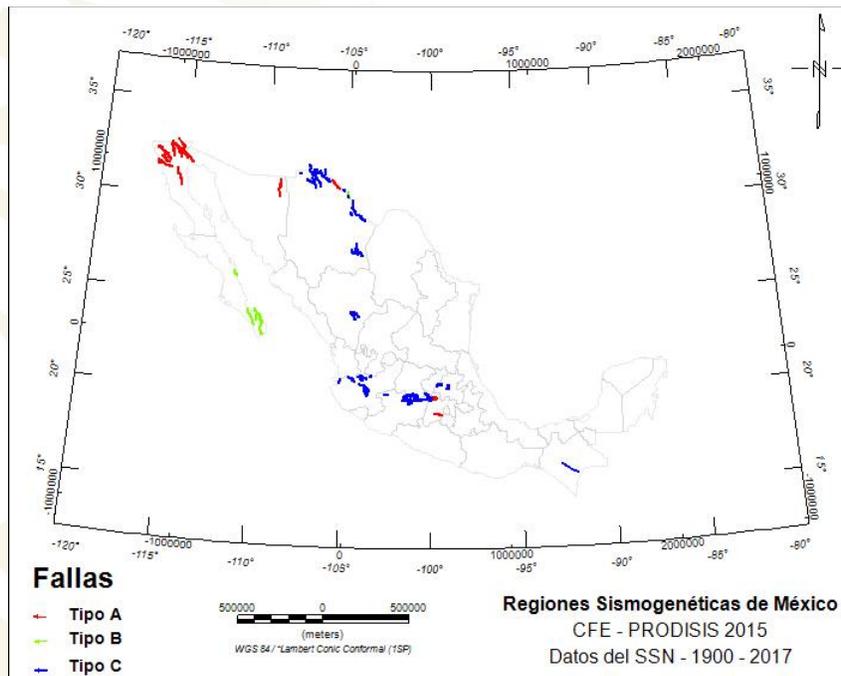


Figura 3.21. Fallas tipo A, B y C en la República Mexicana.

Como puede observarse en los mapas de las figuras 3.22 y 3.23, hay fallas tipo A (rojas) y fallas tipo C (azules), en donde se aprecia que dichas fallas se encuentran relacionadas a la sismicidad histórica que se ha presentado tanto en Hidalgo, así como en sus alrededores, particularmente con los sismos que ha reportado *Suter et al.* (1996).

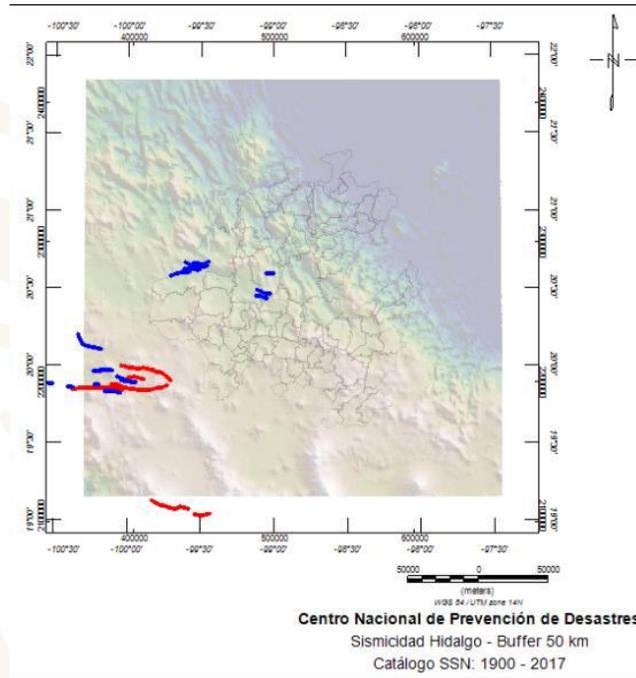


Figura 3.22. Fallas tipo A y tipo C en el estado de Hidalgo y alrededores.

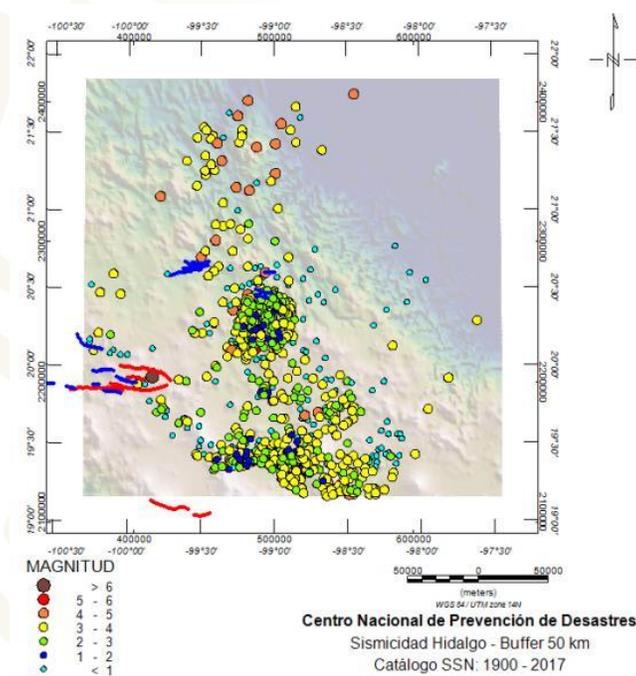


Figura 3.23. Fallas tipo A y tipo C en el estado de Hidalgo y alrededores, y la sismicidad histórica del buffer de 50 km.

## 4. Métodos Potenciales

### 4.1 Magnetometría

Los mapas de anomalías magnéticas proporcionan información sobre la estructura y composición subsuperficial de la corteza terrestre, tendencia paralela a la isócrona (líneas de igual edad) en los océanos que revela la evolución temporal de la corteza oceánica, en la exploración de recursos, así mismo, muestra distintos patrones y firmas magnéticas se puede atribuir a la formación (expansión del lecho marino) y destrucción (zonas de subducción) de la corteza oceánica, la formación de la corteza continental, áreas cratónicas y vulcanismo gran escala (continentes y océanos).

Para un análisis más específico de las posibles fuentes que producen la sismicidad en el estado de Hidalgo, se realizó un análisis de datos magnéticos, a partir de un raster de intensidad magnética total (IMT) obtenido del DAP de geosoft, que es de uso libre o de dominio público y en donde se pueden encontrar datos de la NASA. Dicho raster es el llamado EMAG2 (Earth Magnetic Anomaly Grid), el cual se cortó de acuerdo al área de estudio y de la escala del mapa que se presenta en este trabajo. EMAG2 es una malla de resolución global de 2 arc-minutos de la anomalía de la intensidad magnética a una altitud promedio de 4 km sobre el nivel del mar, el cual se compiló a partir de estudios magnéticos satelitales, marinos, aeromagnéticos y terrestres.

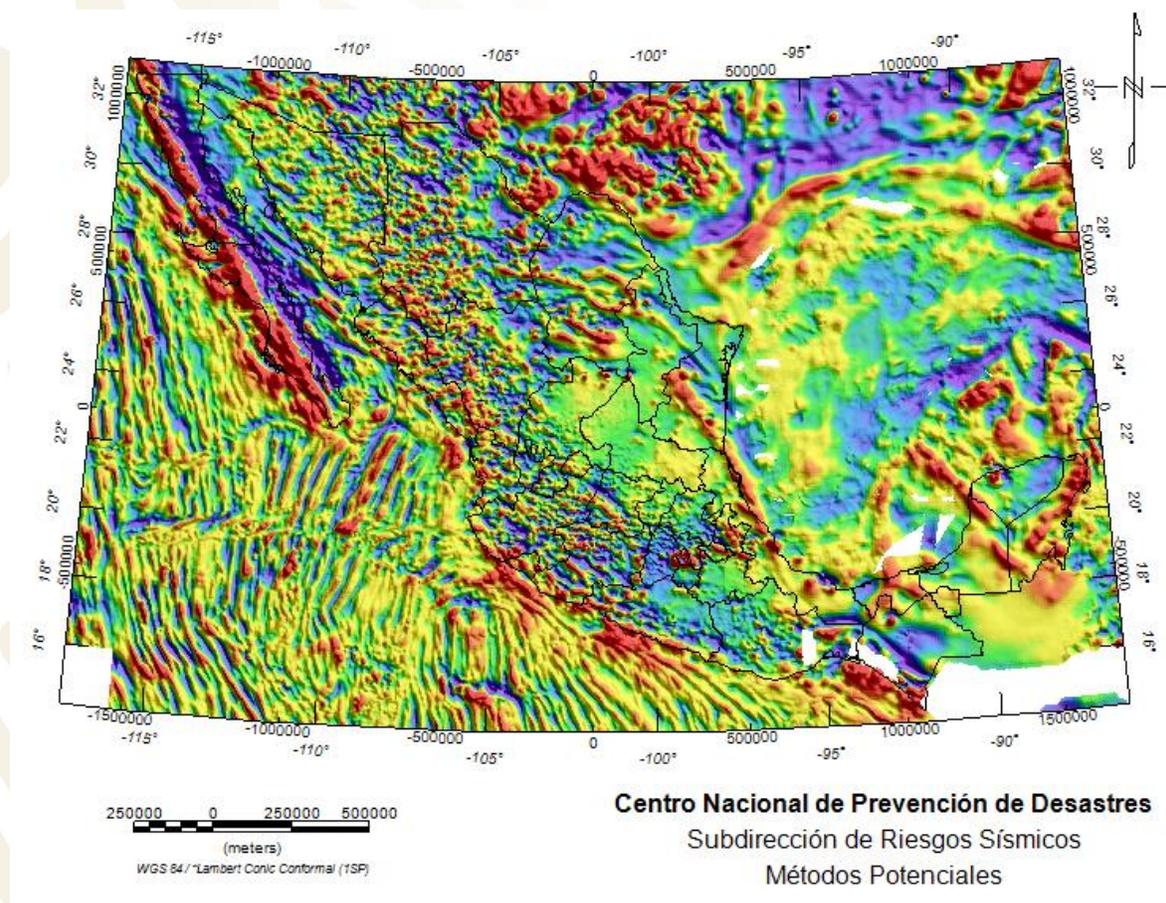


Figura 4.1. EMAG2 de la República Mexicana.

## 4.1.1 Mapa de Intensidad Magnética Total (IMT)

De la malla de los datos del EMAG2, se obtuvieron los datos para llevarlos a una base de datos, esto para el tratamiento de los mismos, así como para convertir todo a coordenadas UTM, así como para eliminar todo tipo de ruido de alta frecuencia. De la base de datos, se obtuvo el mapa de intensidad magnética total (IMT), en donde se observan dos respuestas magnéticas de alta magnitud considerando siempre que se trata de anomalías dipolares sin todavía llegar a una interpretación definitiva en este tipo de mapas a menos que nos encontráramos en el ecuador o en el polo magnético.

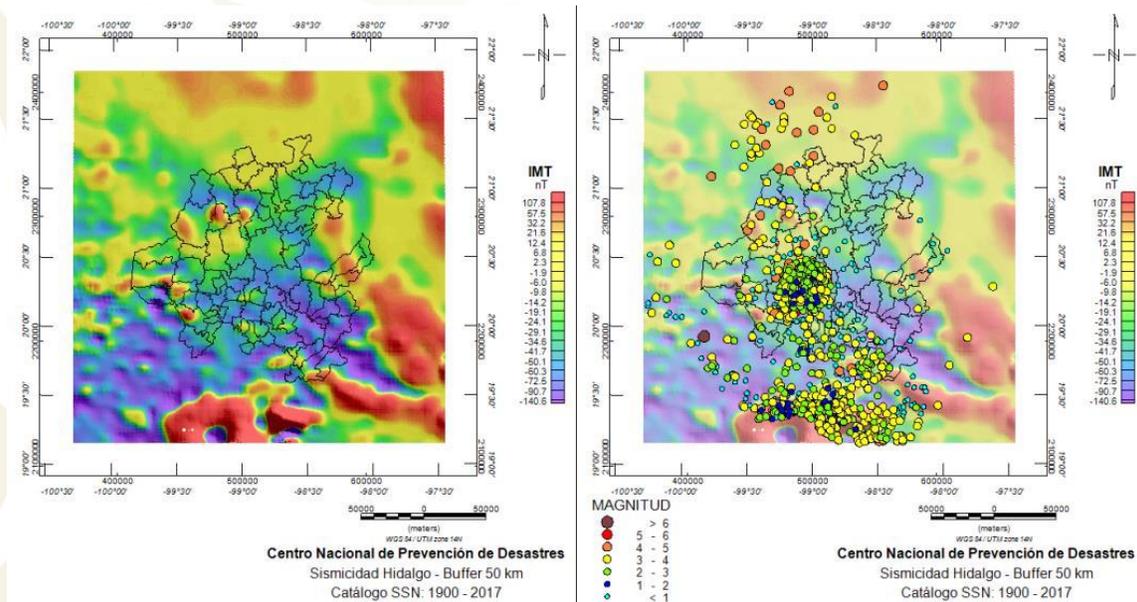


Figura 4.2. Mapa de IMT, con localización de eventos sísmicos completos.

## 4.1.2 Espectro de potencia

La profundidad del conjunto de fuentes es fácilmente determinada gracias a las pendientes que se obtienen del espectro de potencia, dividiéndolas entre  $4\pi$ . Un típico espectro de potencia de datos de potenciales, se puede dividir en tres partes, como son, la componente de fuentes profundas, la componente de fuentes someras y la componente de fuentes de ruido. Así mismo, el espectro de potencia puede ayudar a la separación regional y residual e incluso para antes de un proceso en el tratamiento de los datos para la calidad de los mapas de las respuestas anómalas de datos magnéticos, como el aplicar un filtro con la frecuencia de corte adecuada que muestra el espectro, para eliminar ruido de alta frecuencia que distorsiona o enmascara la respuesta real de las fuentes que dan respuesta al parámetro anómalo de susceptibilidad magnética. Esto, con datos obtenidos y depurados y representados por una malla (GRID) con datos igualmente espaciados, mediante el análisis espectral de la señal geofísica, podemos pasar del dominio del espacio al dominio de frecuencias mediante la transformada de Fourier.

Con los datos del GRID de intensidad magnética total (IMT), se obtuvo el espectro de potencia para ver el conjunto de la profundidad de las posibles fuentes, así como del ruido de alta frecuencia (Figura 4.3).

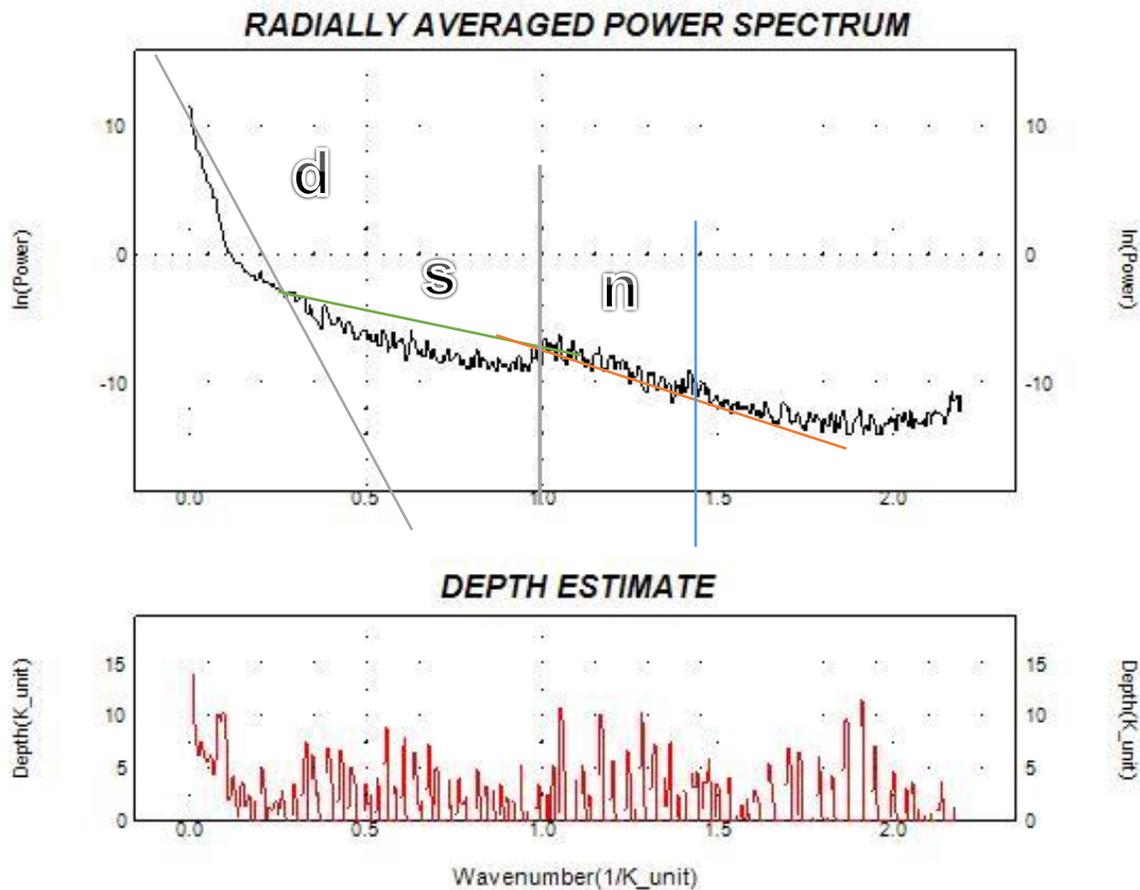


Figura 4.3. Espectro de potencia de los datos de IMT.

### 4.1.3 Mapa de Reducción al Polo (RTP)

El método de reducción al polo (RTP por sus siglas en inglés), tiene como objetivo facilitar la comprensión de los mapas magnéticos, ubicando las anomalías exactamente sobre las fuentes que las producen. El mapa calculado es un mapa magnético reducido al polo y es producto de un procesamiento de datos que recalcula los datos de intensidad de campo magnético total simulando que son afectados por un vector de intensidad magnética con una inclinación magnética igual a 90 grados. Este proceso transforma anomalías dipolares en anomalías monopulares, centradas directamente sobre los cuerpos que las originan, simplificando la interpretación de los datos.

Debe tenerse en cuenta que el algoritmo de RTP asume que la magnetización y el campo regional son uniformes a lo largo del área de estudio. Además de la suposición de que el vector de magnetización es paralelo al vector del campo magnético de la tierra. Esto solo se cumple cuando en las rocas solamente hay magnetización inducida, sin embargo la magnetización remanente no será tratada correctamente si la dirección de la remanencia es diferente a la del campo magnético regional.

## 4.1.4 Mapa de Primera Derivada Vertical

Realza anomalías de corta longitud de onda y suprime las de mayor longitud, que corresponden a la componente regional de los datos magnéticos, permitiendo analizar las respuestas de cuerpos relativamente pequeños emplazados a poca profundidad. Así mismo, en términos generales, acentúan las anomalías de alta frecuencia generadas por cuerpos someros, que quedan generalmente enmascaradas por efectos regionales que son debidas generalmente a fuentes más profundas.

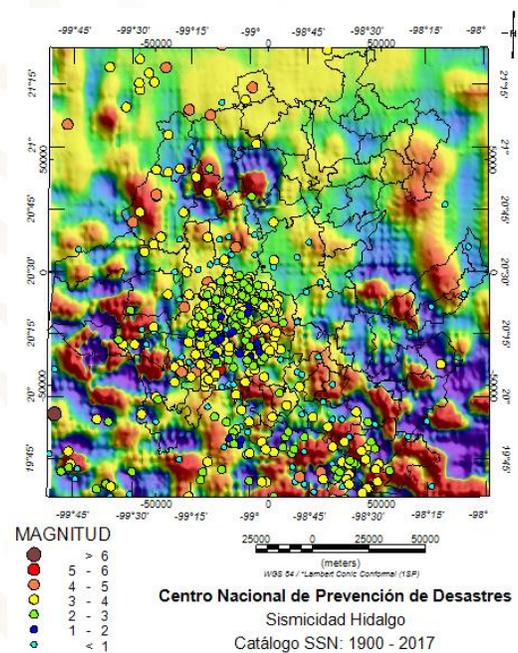


Figura 4.4. Mapa de primera derivada vertical con localización de eventos sísmicos completos.

Se aprecian en forma discontinua algunos máximos y los mínimos sobre la malla de primera derivada vertical, que nos marcan el punto de inflexión en la malla original con lo cual nos están indicando donde se produce el contacto entre cuerpos superficiales con alto contraste de *magnetización* [ $=-(\text{susceptibilidad magnética}) \times (\text{campo geomagnético})$ ], permitiendo analizar las respuestas de cuerpos relativamente pequeños emplazados a poca profundidad, así como de zonas de cizalla, es decir, que resalta las unidades geológicas someras con respecto a las más profundas y produce un realce de los rasgos estructurales. Por lo tanto, debe aplicarse un filtro pasa-bajos para remover el ruido de número de onda alto.

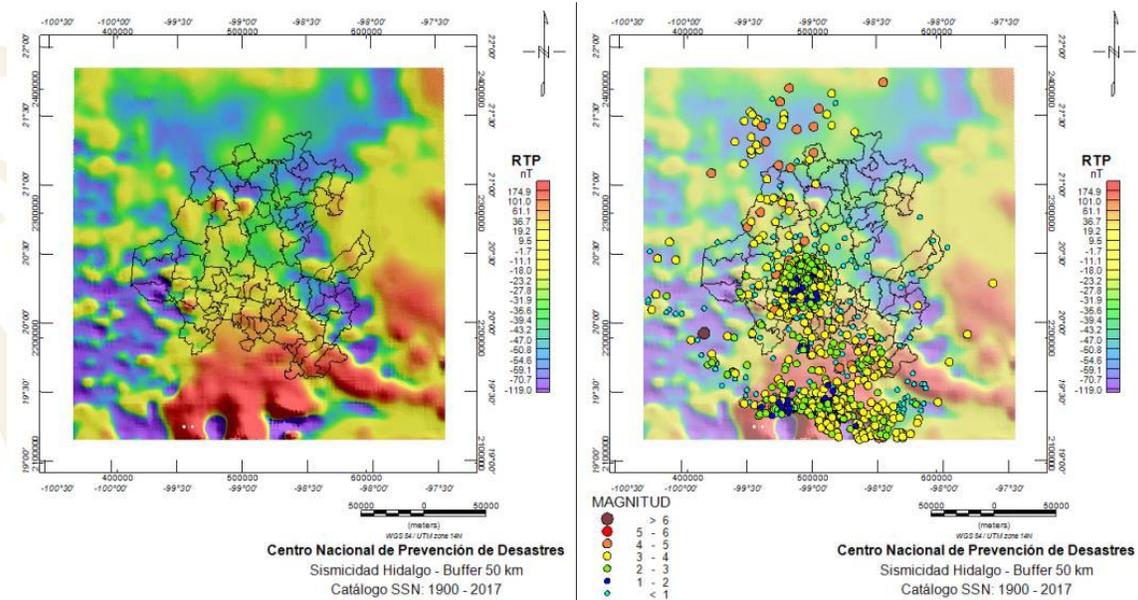


Figura 4.5. Mapa de RTP, con localización de eventos sísmicos completos.

#### 4.1.5 Mapa Residual Magnético

En este mapa se elimina el efecto regional y nos proporciona la respuesta de materiales o depósitos con contenido de ferromagnetos o bien, de posible presencia de rocas básicas relativamente superficiales. Se utilizó una tenencia polinómica de tercer orden.

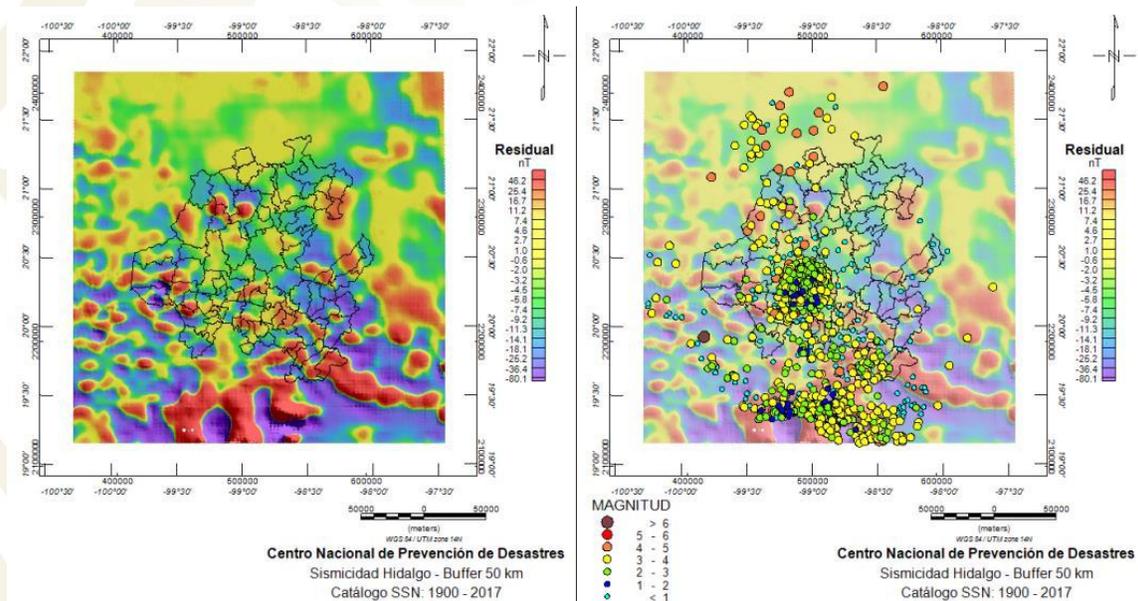


Figura 4.6. Residual a partir de un polinomio de tercer orden y a partir de los datos de RTP.

Como puede observarse, el mapa residual es muy parecido o con una misma tendencia en la respuesta que muestra el resultado del mapa de RTP, esto significa que los rasgos de anomalías



En el mapa se puede observar que la zona de sismicidad o bien en donde caen los eventos, no existe ningún gradiente, lo que indica que es una zona de debilidad con baja resistencia al corte y con material débil, encajonado entre materiales más competentes y con gran competencia debido a que seguramente la vertiente de inclusiones fluidas de material ígneo intrusivo provocó fracturamiento pero a su alrededor, y así mismo provocando eventos posteriores que generaron deposición de material pero que provocó un magnetismo remanente secundario por material singenético para que los esfuerzos principales que seguramente debieron ser verticales provocaran una falla principal en esa zona.

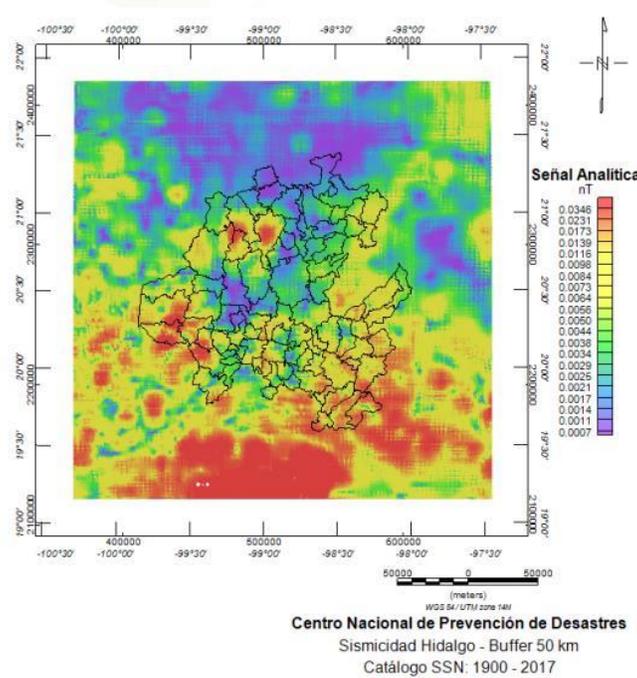


Figura 4.8. Mapa de señal analítica a partir de RTP con fallas y fracturas del INEGI y con localización de eventos sísmicos completos.

De acuerdo al mapa regional hasta 12 km, aparentemente la zona geomorfológicamente más alta y accidentada y en donde se presenta la zona en donde predominan la sismicidad, en profundidad se trata de un cuerpo denso pero sin contenido de ferromagnesianos y como se puede ver en los demás mapas, el cuerpo anómalo que está al NE parte desde zonas más superficiales y continua hasta esa profundidad, siendo un cuerpo aparentemente básico y que compite con el otro cuerpo que está al SW. El mapa de señal analítica, que fue realizado a partir de reducción al polo, se puede apreciar que los gradientes debidos a ferromagnesianos, se encuentran en los alrededores a la zona en donde predomina la sismicidad, pero que está asociado a las zonas de posible mineralización de fuentes hidrotermales pero muy superficiales. Se debe considerar que no se sabe la profundidad de las fallas y fracturas, por lo que no se pueden poner eventos superficiales y relacionarlos a las mismas.



## 4.1.8 Deconvolución de Euler

Esta técnica permite obtener soluciones cuantitativas, útil para localizar profundidades de las fuentes y/o la delimitación de discontinuidades (fracturas), mediante índices estructurales. La siguiente tabla muestra los índices estructurales para la interpretación del método.

Tabla 4.1. Índices estructurales de las recomendaciones de interpretación por “Northwest Geophysical Associates”, Ángeles Cordero (2007).

Índice Estructural	Modelo Geológico Simple
0	Dipolos aislados. Rocas magnéticas aisladas.
0.5	Lineamientos.
1	Líneas de dipolos magnéticos, fallas, fracturas.
1.5	Líneas de dipolos finitos, contactos, fallas.
2	Estructuras bidimensionales, diques, galerías bien delimitadas.
2.5	Estructuras cuasidimensionales en 2D, cuerpos de magnetización contrastante con respecto al medio que se extiende horizontalmente.
3	Cuerpos de volumen finito.

Se realizó el método de Deconvolución de Euler para encontrar soluciones hasta una distancia máxima de 4000 m de profundidad (se realizó para esta profundidad debido a que se buscan profundidades relativamente someras y de acuerdo a la moda de las profundidades en las localizaciones del catálogo del SSN (5.0 km)), para índice estructural de 1.0 con la finalidad de ver la variación en la respuesta que puedan arrojar y se pueda comparar con los lineamientos interpretados a partir de los métodos potenciales respecto a fallas, fracturas y/o contactos y realizar un mejor análisis para localizar fuentes que den origen a la sismicidad de los eventos localizados por el SSN.

### 4.1.8.1 Soluciones con índice de 1.0

De la interpretación de la Deconvolución de Euler para fallas y fracturas se utiliza el índice estructural de 1.0. Como puede observarse en las soluciones, y de acuerdo a las estructuras del INEGI, hay algunas soluciones que coinciden, aunque no en su mayoría, sin embargo, aparentemente las soluciones sí parecen coincidir con el mapa de primera derivada vertical, lo cual indica que en esa zona SW del estado de Hidalgo, se presenta una fábrica estructural con estructuras relativamente someras que en su mayoría no rebasan más de 1500 m de profundidad.

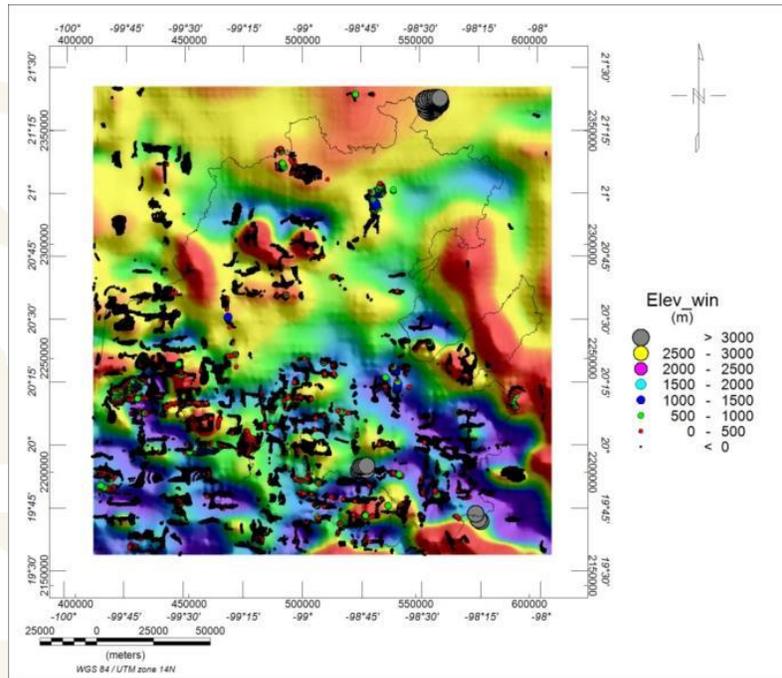


Figura 4.9. Mapa de intensidad magnética total, con soluciones de Deconvolución de Euler para índice 1.0.

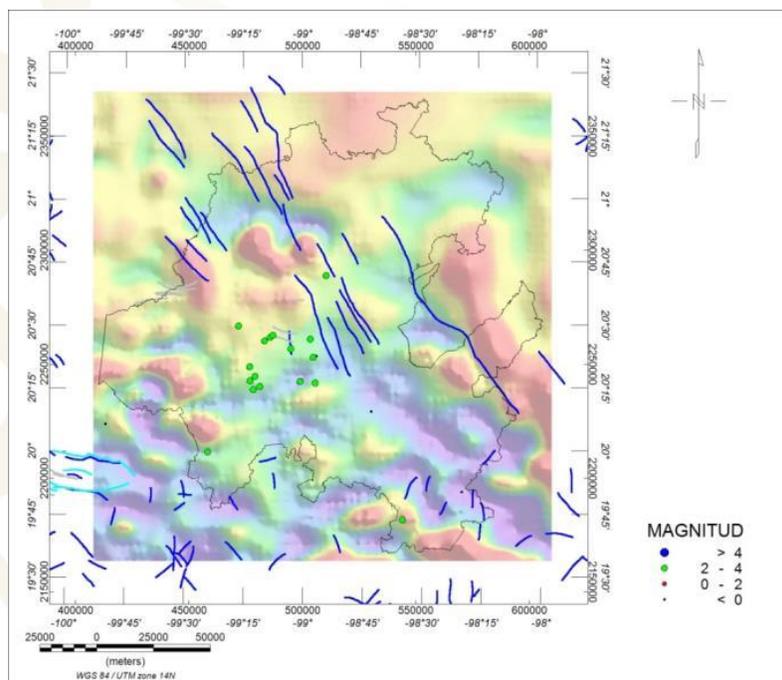


Figura 4.10. Mapa de intensidad magnética total, con fallas y fracturas del INEGI, así como fallas y fracturas tipo A, así como con localizaciones de sismos con profundidades menores a 1.5 km.

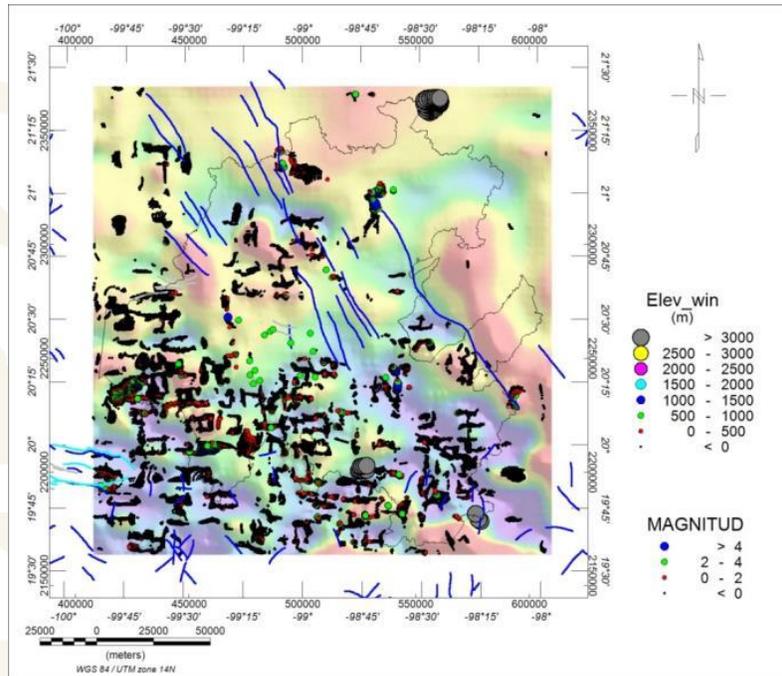


Figura 4.11. Mapa de intensidad magnética total, con soluciones de Deconvolución de Euler para índice 1.0 con fallas y fracturas del INEGI, así como fallas y fracturas tipo A, así como con localizaciones de sismos con profundidades menores a 1.5 km.

## 4.2 Gravimetría

### 4.2.1 Gravity Model Grid (GRACE) – NASA

Para un análisis más específico de las posibles fuentes que producen la sismicidad en el estado de Hidalgo y para complementar el análisis de los datos magnéticos, también se realizó un análisis de datos gravimétricos, a partir de un raster obtenido del DAP de geosoft, que es de uso libre o de dominio público y en donde se pueden encontrar datos de la NASA. Dicho raster es el llamado GRACE (Gravity Earth Model), el cual se cortó de acuerdo al área de estudio y de la escala del mapa que se presenta en este trabajo.

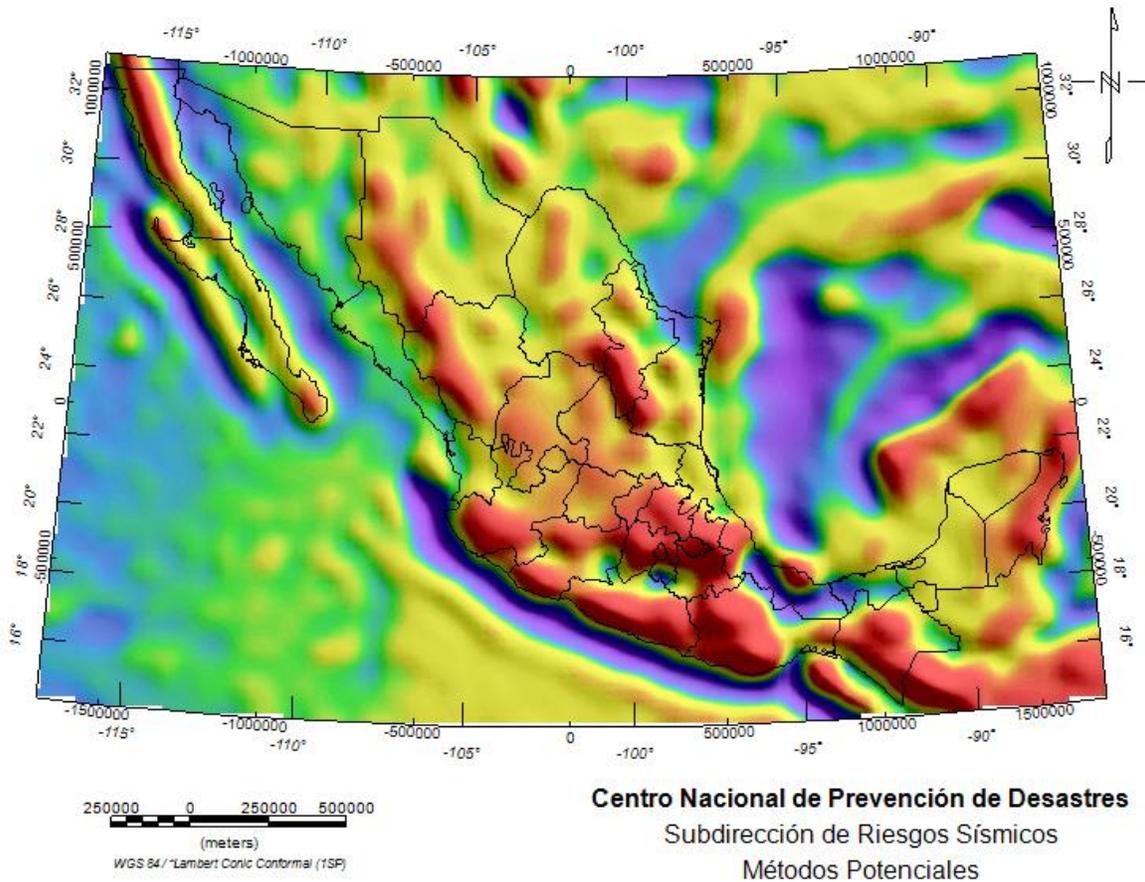


Figura 4.12. GRACE de la República Mexicana.

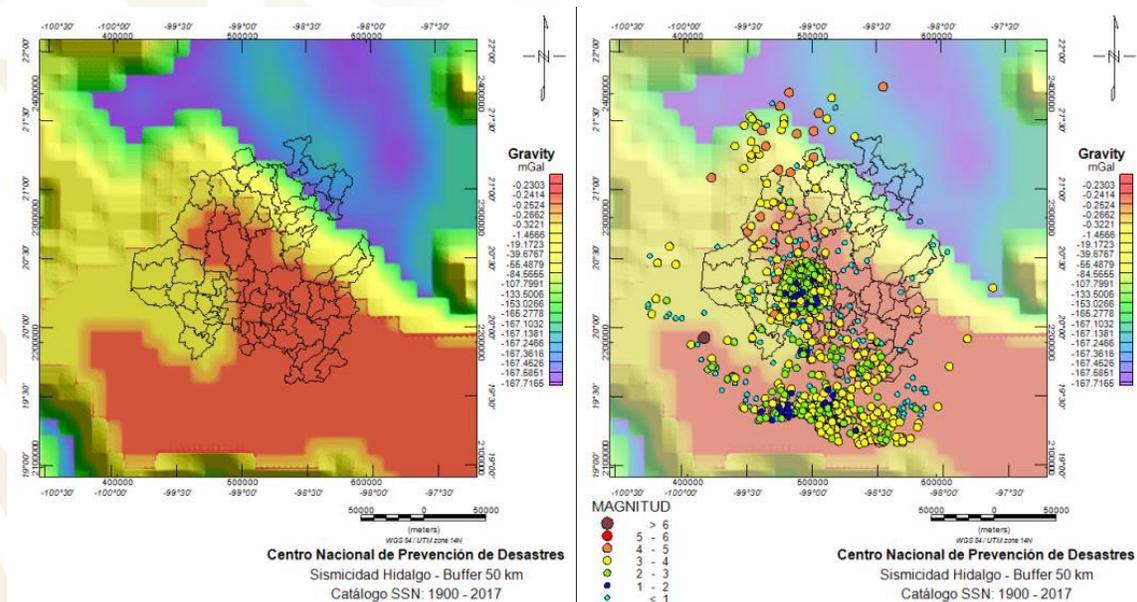


Figura 4.13. Mapa gravimétrico (GRACE), con localizaciones epicentrales del buffer de 50 km.

## 4.2.2 Mapa de Pseudogravimetría

La pseudogravimetría es un filtro aplicado a la intensidad magnética en función de la inclinación y declinación magnética, magnetización de gauss, la constante de gravitación, la inclinación de corrección del vector de magnetización y densidad de contraste. Este algoritmo fue hecho en base a la relación que existe en la densidad de un medio con la susceptibilidad magnética (Telford, 1990), esto considerando que existe una relación relativamente lineal, esto es, cuando se trata de campo magnético uniforme en la región local, sin embargo, aunque no es estrictamente una relación lineal, se asume que si consideramos que el cambio en porcentaje por volumen en la densidad de masa de las rocas es pequeño y que la magnetización cambia por un orden de magnitud, se consideran constantes para un volumen de interés, y por lo tanto es posible calcular con ambos gradientes (aceleración gravitacional y anomalía magnética) la pseudogravimetría.

El mapa de pseudogravimetría se realizó a partir del mapa de intensidad magnética total (IMT), utilizando un contraste de densidad de  $2.0 \text{ gr/cm}^3$  y una magnetización de 0.5 gauss, así como el promedio de declinación magnética (4.68) y de inclinación magnética (47.3), obtenidos a partir del IGRF 2005, esto debido a que se desconoce el año en el que se obtuvieron los datos magnéticos con los que se realizó el presente informe.

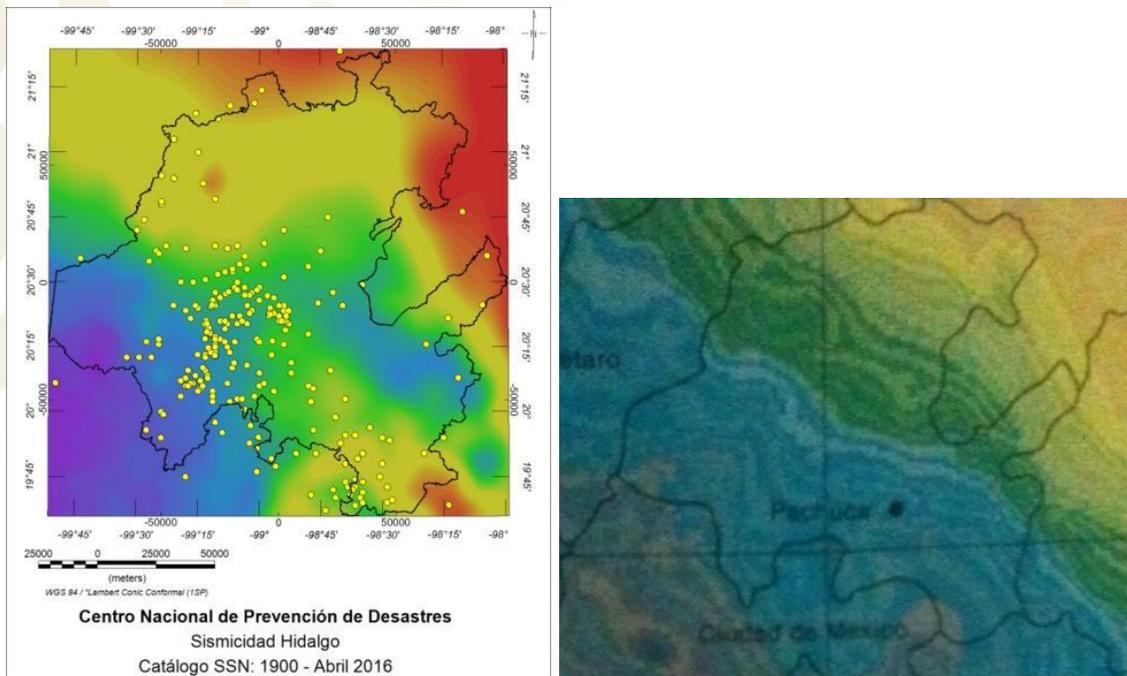


Figura 4.14. Mapa de pseudogravimetría con la sismicidad completa (izquierda) y fotografía tomada por Juan Carlos Jiménez de un mapa de Anomalía de Bouguer del instituto de Geofísica (UNAM) (derecha).

Como puede observarse, el mapa de pseudogravimetría tiene una respuesta parecida a la anomalía completa de Bouguer obtenida por el Dr. Mena.

De acuerdo a la respuesta gravimétrica, en la parte NE, se presenta un cuerpo de magnitud alta, lo que representa que se trata de un cuerpo altamente denso, misma que tiene una tendencia a



dirección que coincide con la tendencia predominante de la sismicidad, siendo que la distribución de las localizaciones epicentrales se encuentra en una zona de anomalía de magnitud baja.

### 4.3 Inversión

La teoría de problemas Inversos es un conjunto de técnicas matemáticas para extraer conocimiento acerca del mundo físico a partir de datos obtenidos mediante observación. Las soluciones inversas son problemas fundamentales en muchas áreas de las ciencias naturales. En geofísica, los datos observados son generados por fuentes naturales o artificiales y propagados a través de la Tierra. Lo que buscan los geofísicos es usar estos datos y establecer la estructura interna de la Tierra. La inversión de datos geofísicos se complica por el hecho de que los datos están invariablemente contaminados por ruido y se adquieren en un número nito de lugares. Por otra parte, los modelos matemáticos son generalmente complicados, y al mismo tiempo, son simplificaciones de los verdaderos procesos geofísicos. En consecuencia, las soluciones son ambiguas y propensas a errores.

En general, un problema geofísico inverso se describe mediante la ecuación:

$$Am = d, m \in M, d \in D,$$

donde  $D$  es el espacio de los datos geofísicos,  $M$  es el espacio de los parámetros geológicos, y  $A$  es el operador que calcula los datos  $d \in D$ , para un modelo dado  $m \in M$ . Es aquí donde, tal como en Matemáticas, las principales preguntas que se plantean son acerca de la existencia, unicidad y estabilidad de las soluciones.

Conjunto organizado de métodos matemáticos cuyo propósito común es analizar series de datos u observaciones para extraer información significativa sobre algún fenómeno físico, a partir de inferencias derivadas de las observaciones

Parametrización del sistema

Problema directo

Problema inverso

Convertir las propiedades en variables.  
Parámetros del modelo,  $m$

Asignar valores numéricos a los parámetros y predecir el resultado

A partir de los datos obtenidos,  $d$ , se infieren los parámetros

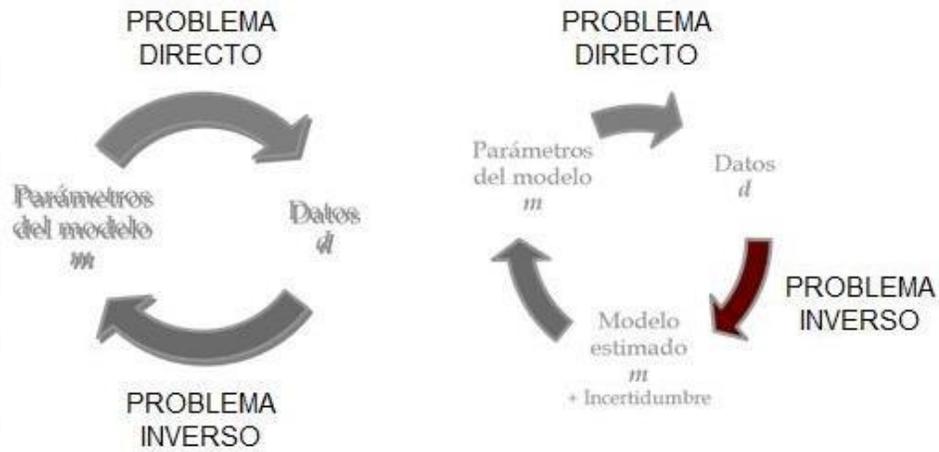


Figura 4.15. Teoría de la inversión.

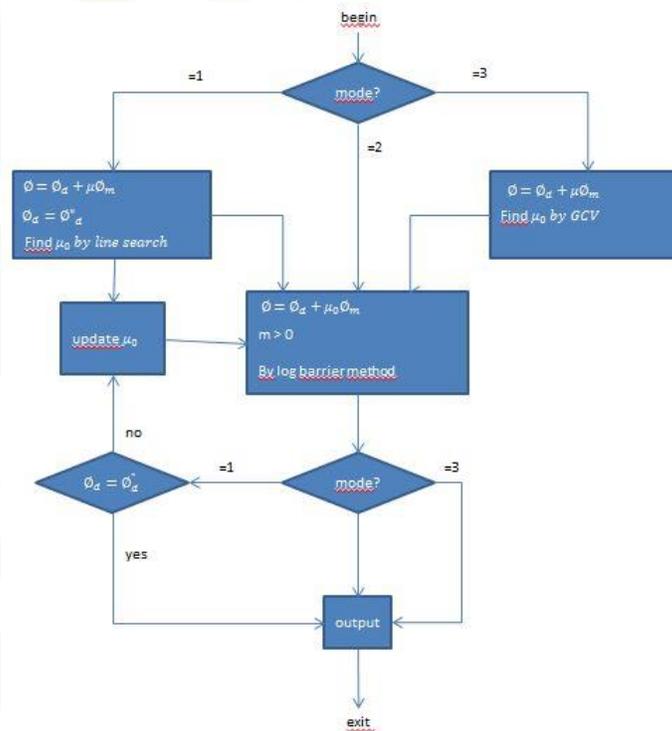


Figura 4.16. Diagrama de flujo del proceso de inversión 3D.

Para los modelos de inversión 3D, se utilizaron los datos de la malla EMAG2 (magnético) y del GRACE (gravimétrico), en donde los datos se manejaron en coordenadas UTM (x,y), y para topografía (z), se utilizaron los datos del modelo digital de elevación del INEGI a 15 metros de resolución, cubriendo todo el estado de Hidalgo, así como del buffer de los 50 km.

## 4.3.1 Perfiles 2D

De la inversión 3D tanto de datos magnéticos (EMAG2) como de datos gravimétricos (GRACE), de donde se obtuvieron datos de susceptibilidad magnética y de densidad, respectivamente, se realizaron 3 cortes verticales, como se puede ver en el siguiente mapa, dos que pasan por Actopan y en dirección Sur-Norte, y otro SE-NW, y otro en dirección Oeste-Este y que pasa por el centro del estado de Hidalgo, esto, porque como se comentó anteriormente, la mayor concentración de eventos sísmicos se encuentra en el municipio de Actopan.

Aunque la inversión llegó hasta 80 kilómetros, los perfiles tienen una profundidad máxima de 50 kilómetros, esto para una mejor resolución de las estructuras superficiales y porque la moda en los datos de profundidad, está a 5 km. Para mejor visualización, todos los perfiles tienen una exageración vertical de 4.0.

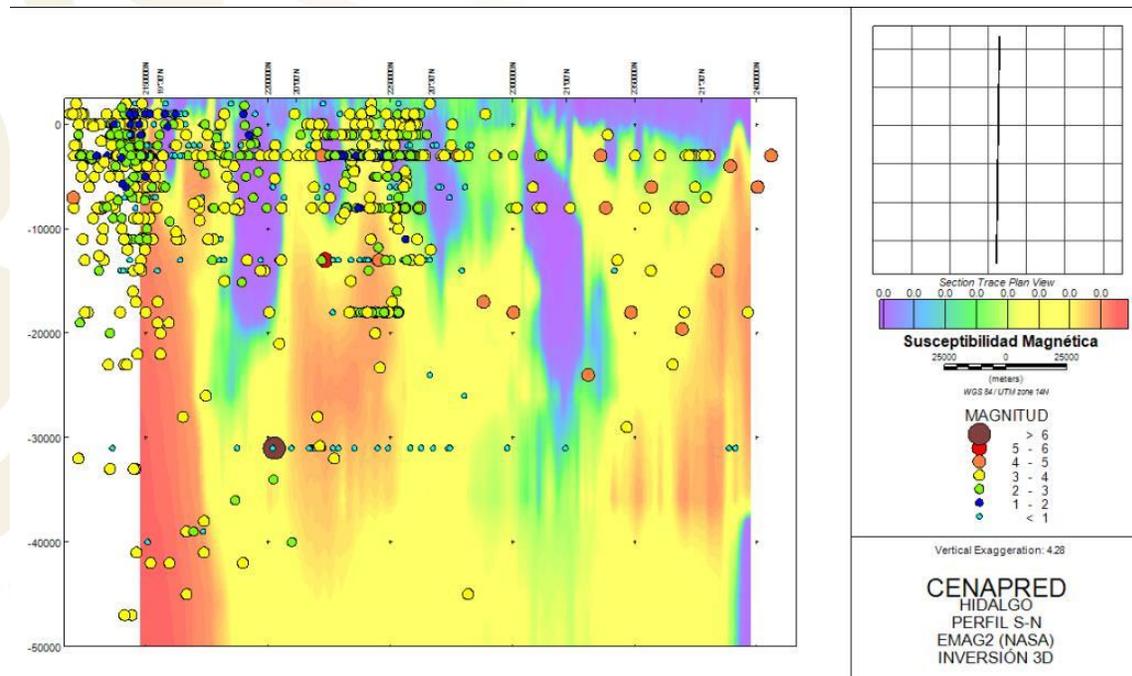


Figura 4.17. Perfil Norte-Sur de la inversión del EMAG2 con localizaciones hipocentrales.

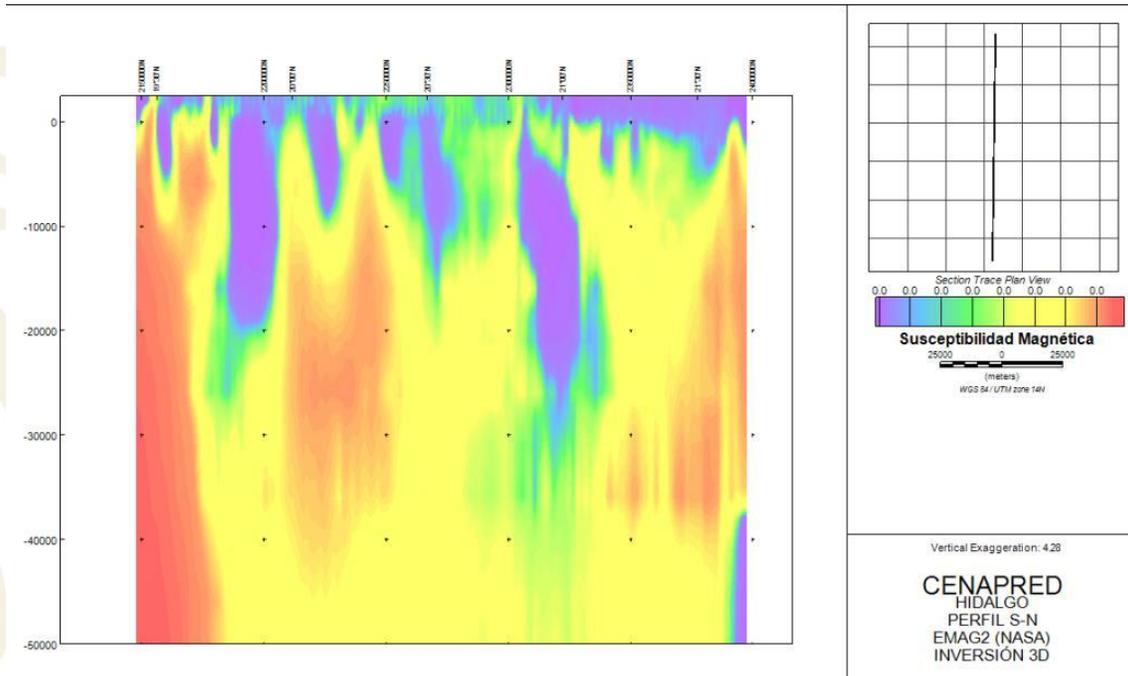


Figura 4.18. Perfil Sur-Norte de la inversión del EMAG2.

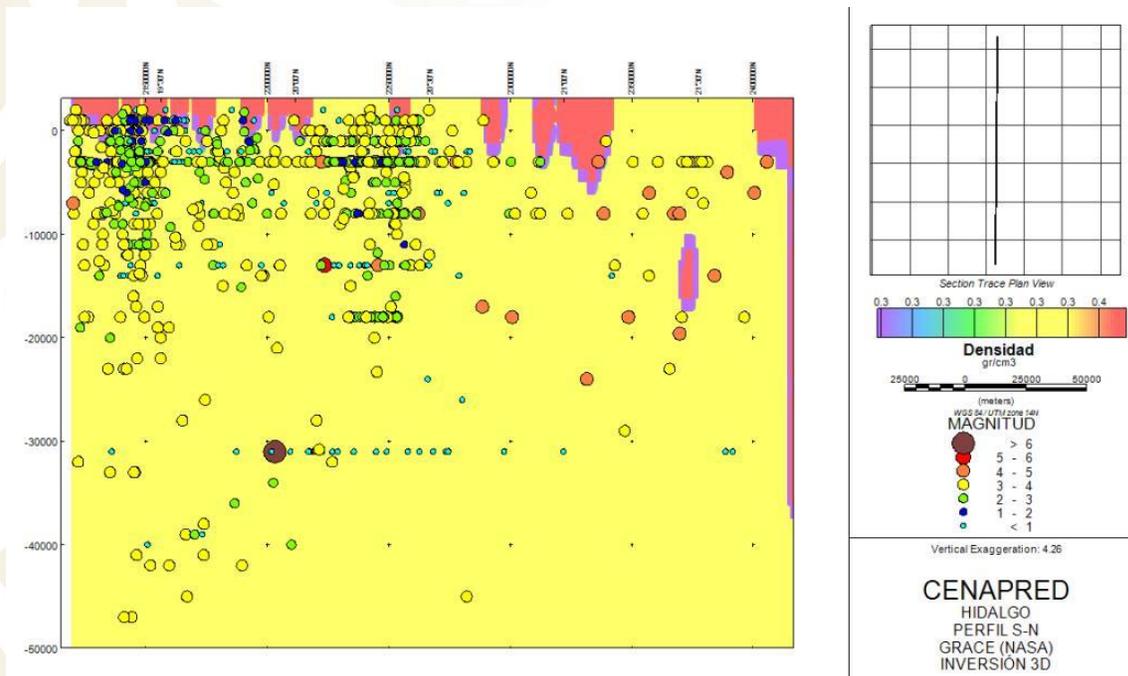


Figura 4.19. Perfil Sur-Norte de la inversión del GRACE con localizaciones hipocentrales.

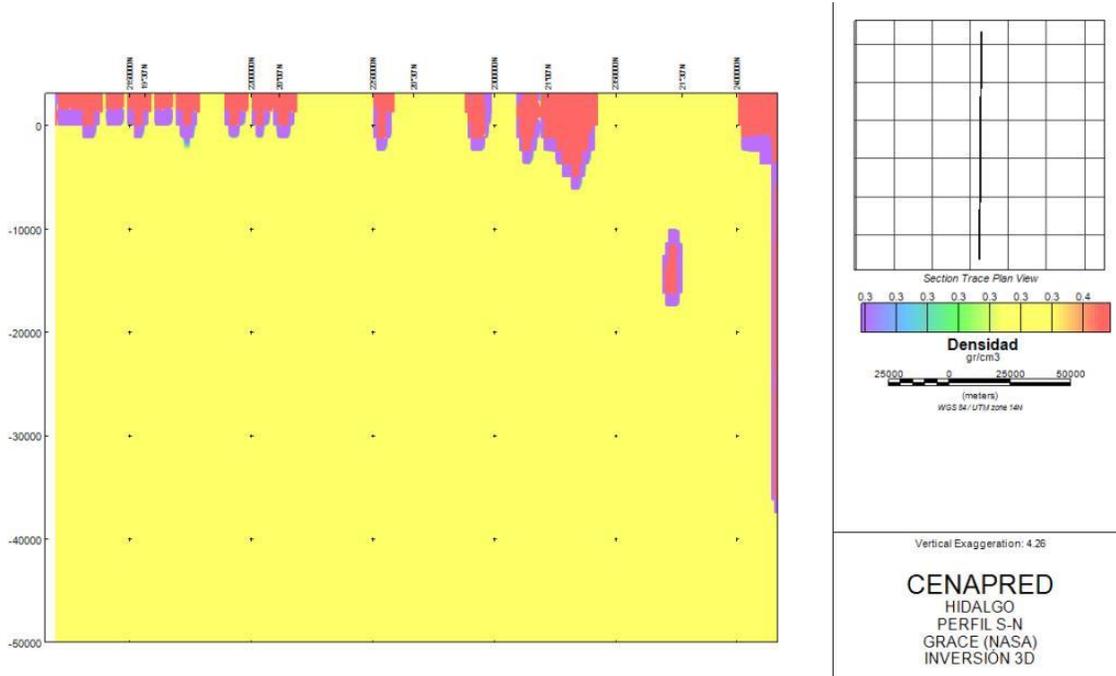


Figura 4.20. Perfil Sur-Norte de la inversión del GRACE.

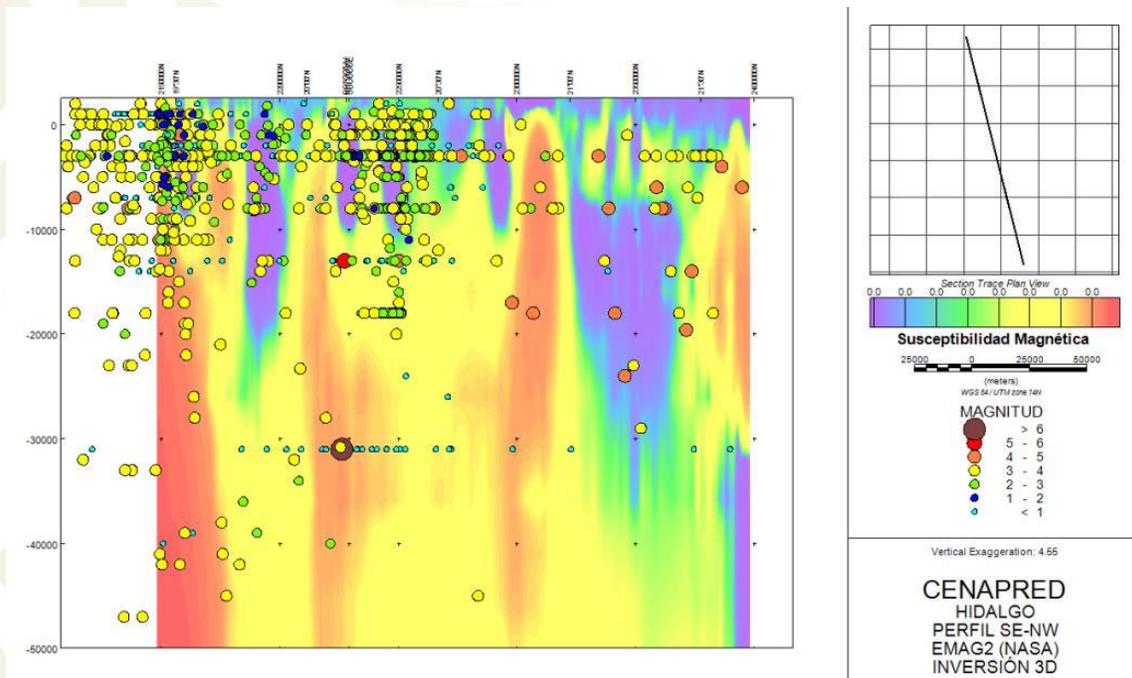


Figura 4.21. Perfil SE-NW de la inversión del EMAG2 con localizaciones hipocentrales.

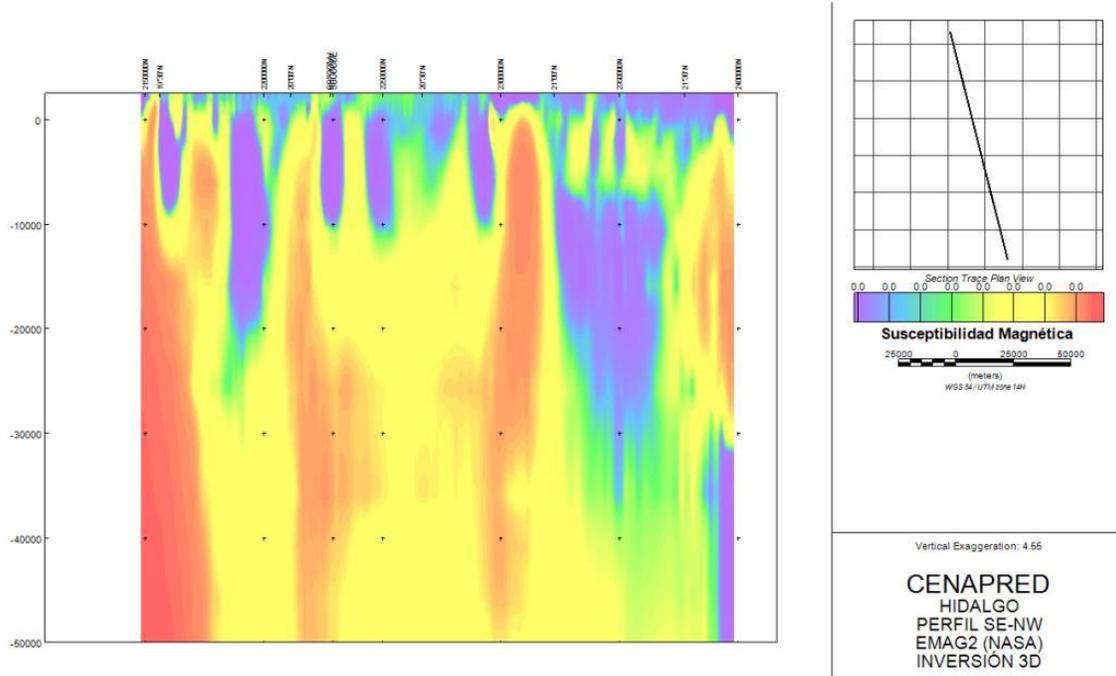


Figura 4.22. Perfil SE-NW de la inversión del EMAG2.

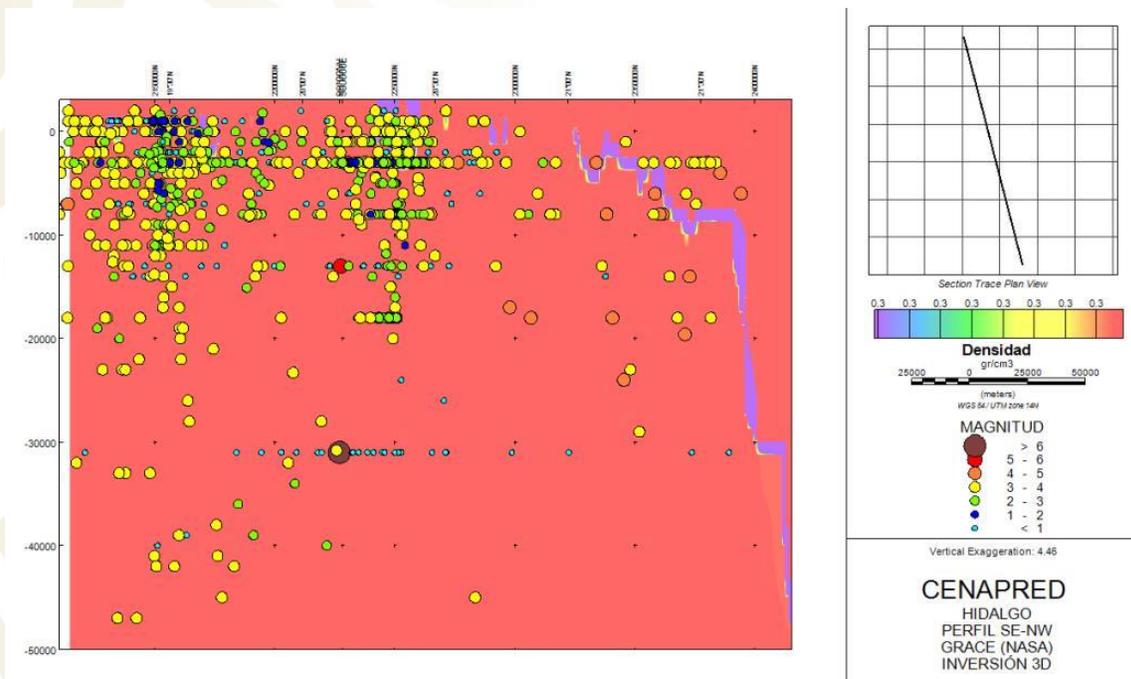


Figura 4.23. Perfil SE-NW de la inversión del GRACE con localizaciones hipocentrales.

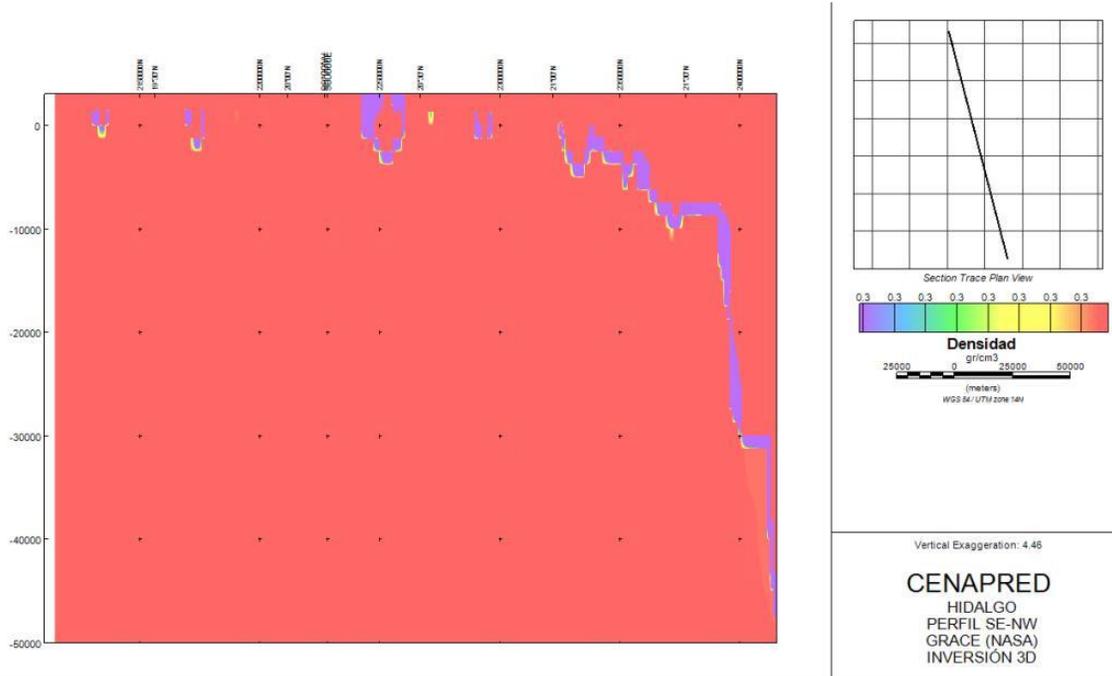


Figura 4.24. Perfil SE-NW de la inversión del GRACE.

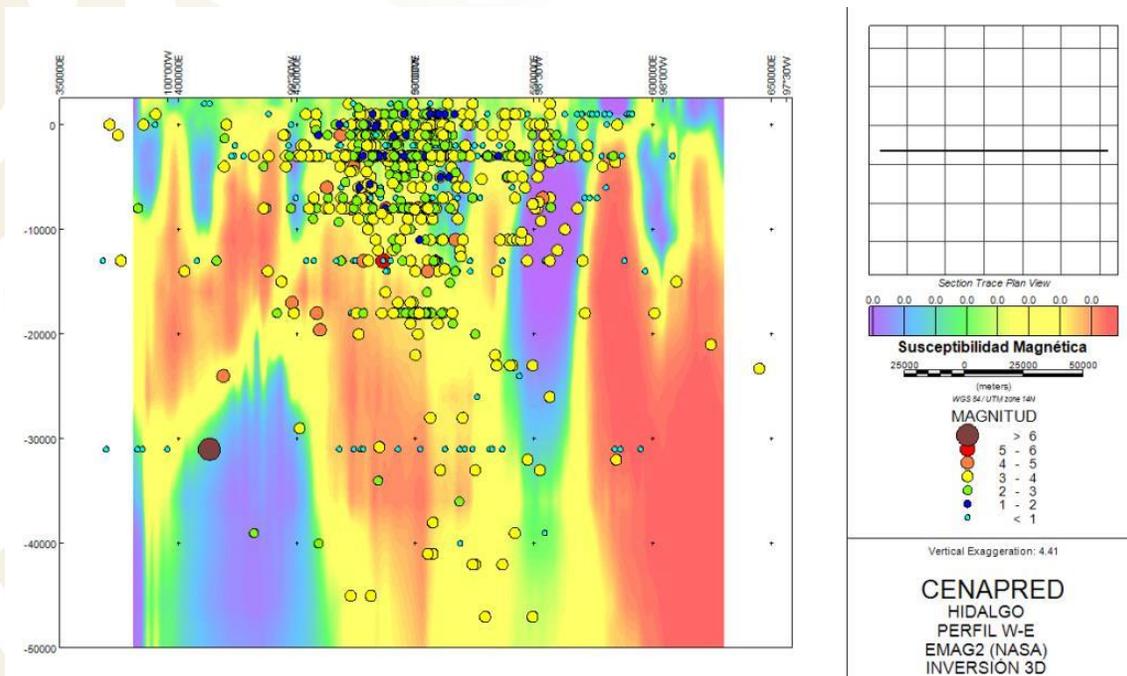


Figura 4.25. Perfil Este-Oeste de la inversión del EMAG2 con localizaciones hipocentrales.

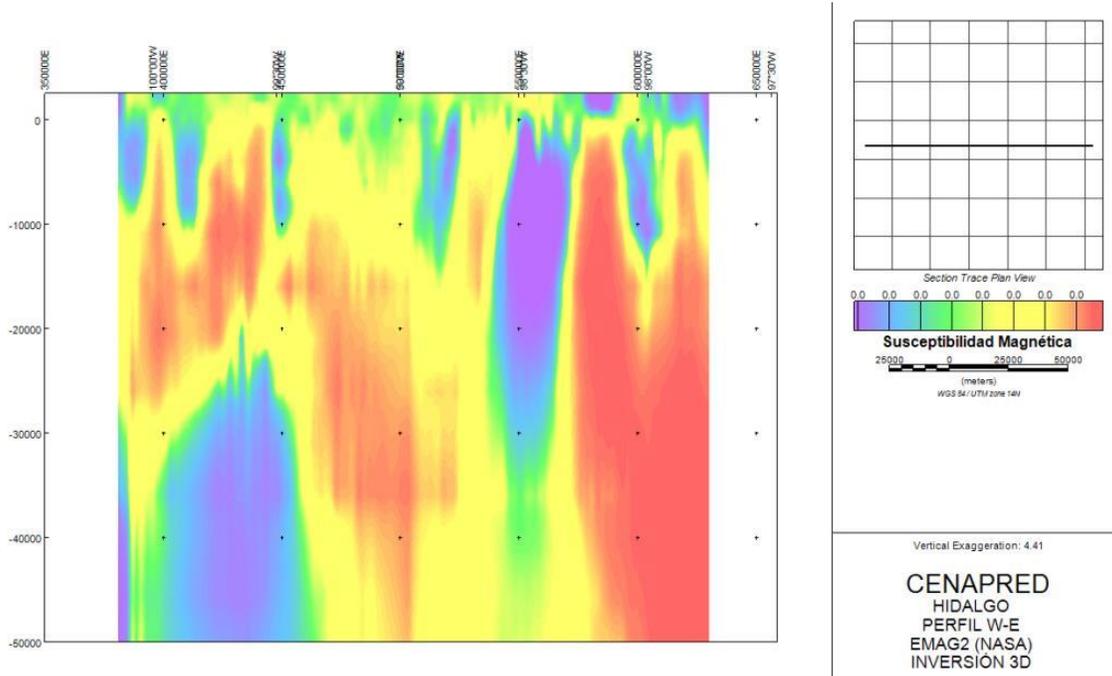


Figura 4.26. Perfil Este-Oeste de la inversión del EMAG2.

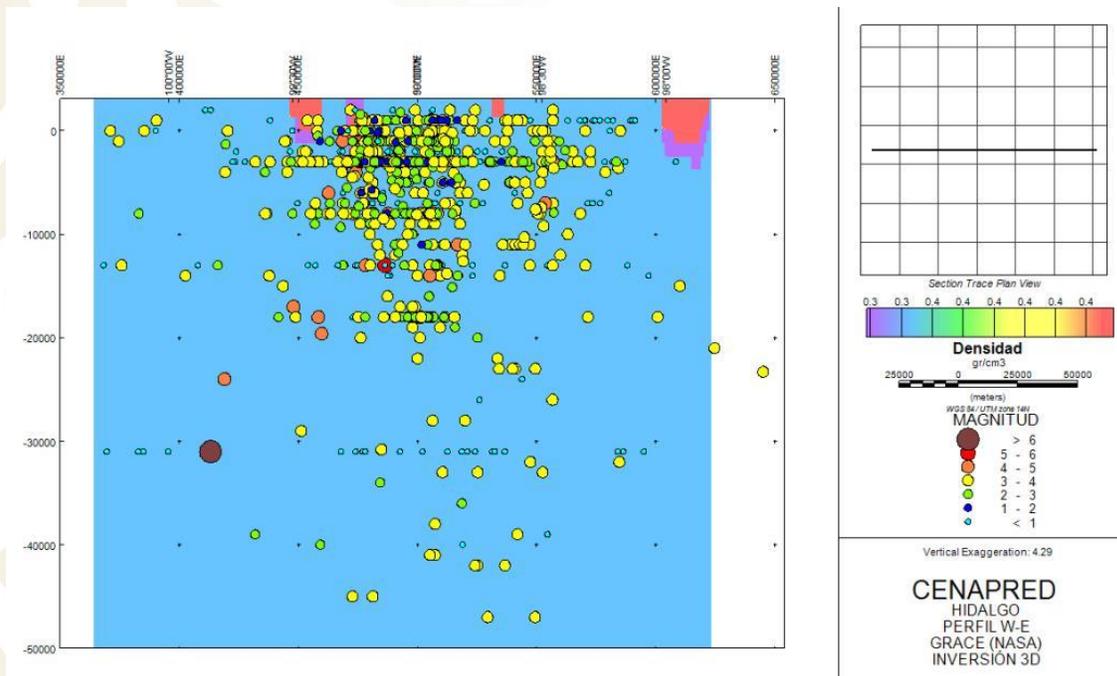


Figura 4.27. Perfil Este-Oeste de la inversión del GRACE con localizaciones hipocentrales.

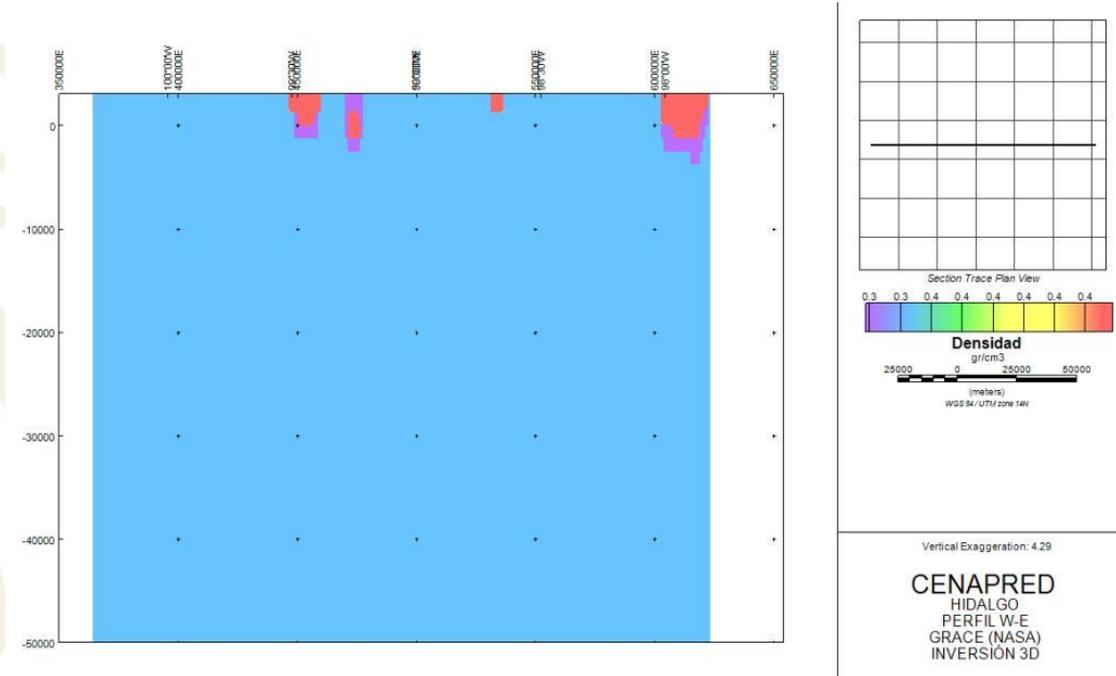


Figura 4.28. Perfil Este-Oeste de la inversión del GRACE.

### 4.3.2 Interpretación 2D

Para la interpretación, se realizaron 2 perfiles en 2D a partir de los datos de inversión magnética, esto debido a que la inversión gravimétrica fue muy regional, y siendo que aparentemente las fuentes generadoras son someras. Estos perfiles son en realidad una segunda modelación pero en dos dimensiones, y de acuerdo a la geología de la zona de estudio, se obtuvieron los siguientes modelos 2D. De la interpretación magnética se utilizaron los siguientes parámetros geológico-geofísicos:

Susceptibilidades magnéticas utilizadas en el modelo Geológico-Geofísico:

	Andesita	Susceptibilidad 0.003601 - 0.004001 cgs
	Andesita-Basalto	Susceptibilidad 0.00655 - 0.01 cgs
	Corteza Media	Susceptibilidad 0.0030007 cgs
	Caliza	Susceptibilidad 0 cgs

### 4.3.2.1 Modelo 2D SE-NW

El siguiente modelo geológico-geofísico se realizó a partir de datos de intensidad magnética total (EMAG2), con un error de 2.83.

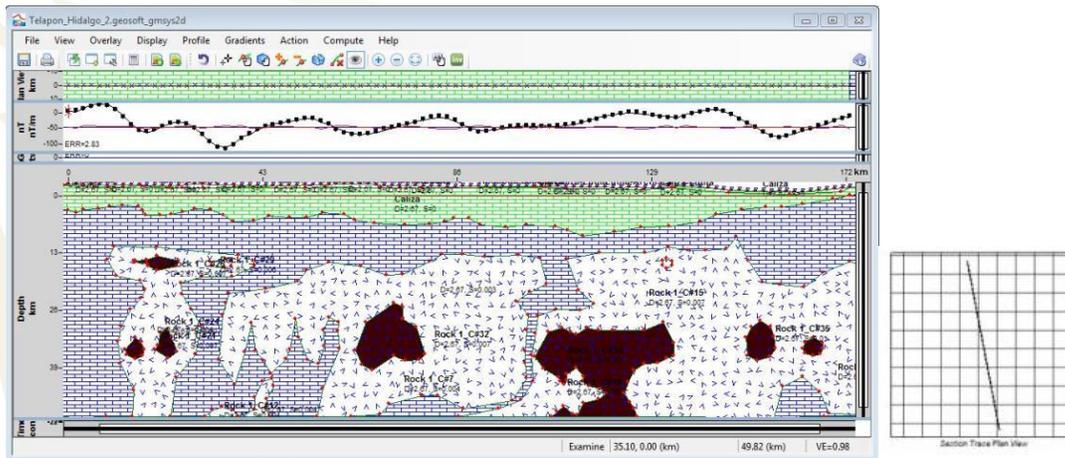


Figura 4.29. Modelo 2D SE-NW, que cruza por el municipio de Actopan, Hidalgo (S.S. Jesús Albarrán Cruz, 2018).

### 4.3.2.2 Modelo 2D W-E

El siguiente modelo geológico-geofísico se realizó a partir de datos de intensidad magnética total (EMAG2), con un error de 3.093.

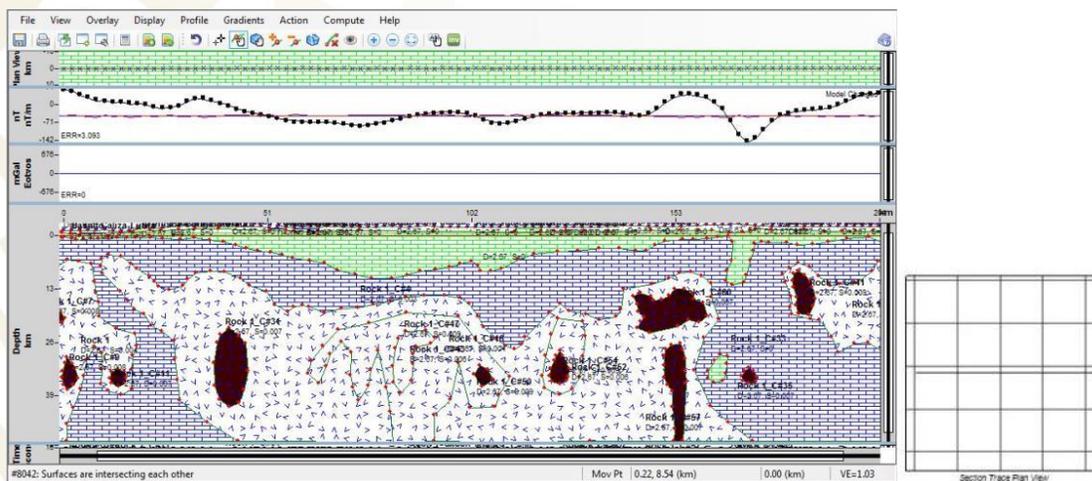


Figura 4.30. Modelo 2D SE-NW, que cruza por el municipio de Actopan, Hidalgo (S.S. Jesús Albarrán Cruz, 2018).

## 5. Estado de Esfuerzos

Se obtuvo el mapa de la tasa y distribución de las direcciones de esfuerzos de toda la República Mexicana.

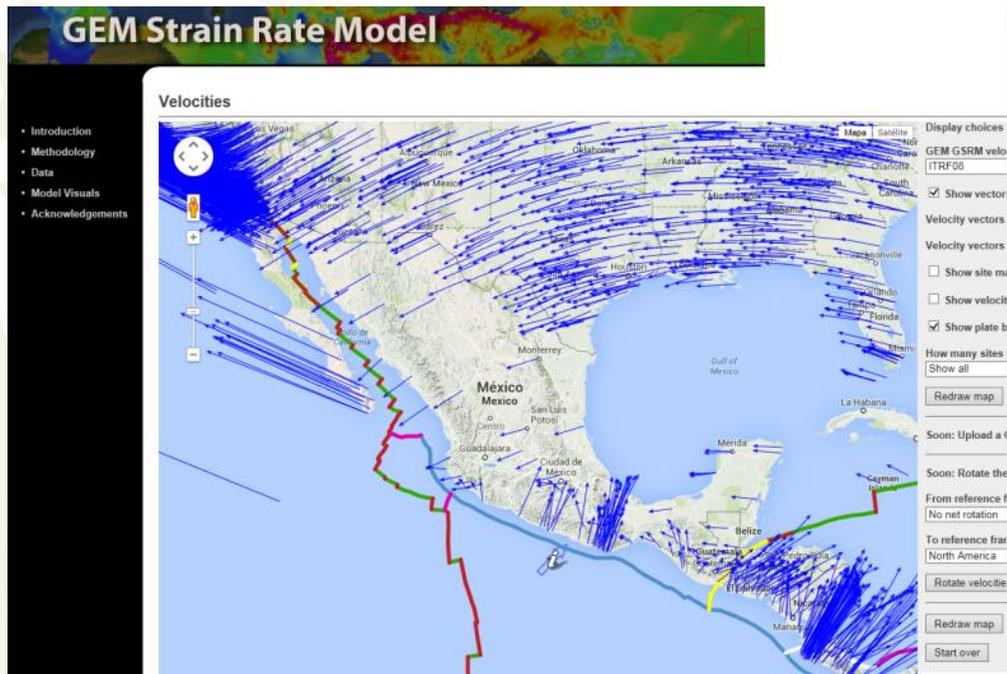


Figura 5.1. Mapa de la tasa de esfuerzos .

Para mejor detalle respecto al estado de esfuerzos de la zona de estudio, también se obtuvo el Word Stress Map. La información recopilada por el Word Stress Map se obtiene a partir de mediciones *in situ* de pozos, mecanismos focales y observaciones de actividad tectónica cuaternaria.

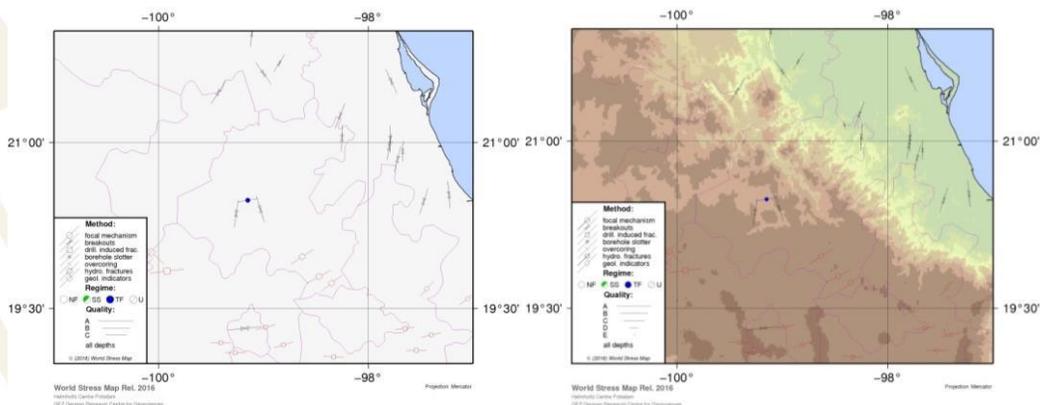


Figura 5.2. Mapa de las direcciones de esfuerzo horizontales SH realizadas por medio de mediciones en pozos, el régimen de fallamiento predominante es desconocido. Información obtenida de [www.world-stress-map.org/](http://www.world-stress-map.org/).



Con respecto al estado de esfuerzos en la zona de estudio se tiene poca información (Figuras 5.1 y 5.2), la base de datos del Word Stress Map contiene y la orientación de los esfuerzos compresivos máximos horizontales (SH) tiene varias mediciones y con distintas direcciones (N-S a NE-SW).

## 6. Análisis complementarios (USGS - Vs30)

Considerando que pudiera presentarse algún sismo importante en el estado de Hidalgo y alrededores, se realizó otro análisis complementario para identificar los posibles efectos de sitio, y para ellos se utilizaron los datos de velocidades Vs30 del suelo (Allen, T.I. et. al, 2008), publicados en el portal del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Los mapas de velocidades Vs30 aproximadas, el cual, toma en consideración la relación que existe entre la pendiente topográfica y las condiciones geológicas del sitio, tales como, las zonas de depósito, las zonas de transición y las zonas firmes. El método de pendiente topográfica, proporciona una evaluación robusta de primer orden de las condiciones sísmicas del suelo en el sitio y será una herramienta valiosa en la evaluación rápida de las zonas que tendrán mayor influencia en el movimiento del suelo debido a un evento sísmico. (Allen, T.I. et. al, 2008), a partir de la relación de la velocidad de onda de corte (Vs) y el mapa de pendientes, asumiendo que las zonas de depósito son las partes más planas de un valle aluvial. En la Tabla 6.1 se muestran los valores típicos del parámetro Vs30, como un criterio para la clasificación de suelos y, que de acuerdo a estudios recientes sobre el comportamiento del suelo y el comportamiento de las estructuras, y que se considera como el promedio de profundidad donde se presentan los mayores efectos de sitio que pueden afectar en mayor medida a las estructuras emplazadas sobre una determinada área o región. En la Figura 6.1 se muestra con y sin transparencia, el mapa de velocidades Vs30 para el estado de Hidalgo y alrededores, de los datos obtenidos con del USGS, estas velocidades Vs pueden correlacionarse directamente con un mapa de microzonificación sísmica y geotécnica.

Tabla 6.1. Tipos de suelo según el parámetro Vs30.

Clasificación del sitio	Tipo de suelo	Vs30
A	Roca dura	$Vs30 > 1500$
B	Roca	$760 < Vs30 < 1500$
C	Roca suave y/o suelo denso	$360 < Vs30 < 760$
D	Suelo Firme	$180 < Vs30 < 360$
E	Suelo Blando	$Vs30 < 180$

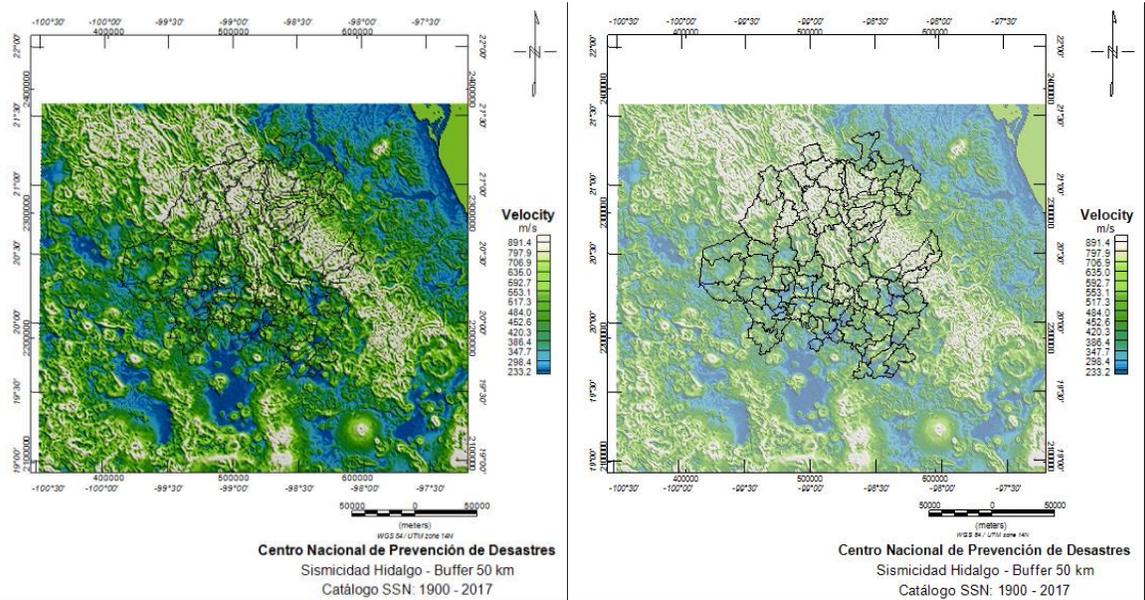


Figura 6.1. Derecha: Vs30 del USGS, para el estado de Hidalgo y alrededores. Izquierda: Vs30 del USGS con transparencia del 40%, para el estado de Hidalgo y alrededores.

Como se puede observar en el mapa de la Figura 6.1, principalmente algunos municipios del sur del estado de Hidalgo, tienen suelo blando y algunos municipios se encuentran a lo que se le podría llamar zona de transición, tal como: Actopan, Mixquiahuala de Juárez, Tezontepec de Aldama, Atotonilco de Tula, Atitalaquia, Tlaxcoapan, Francisco I. Madero, Tula de Allende, Tizayuca, Zapotlan de Juárez, Villa de Tezontepec, Mineral de la Reforma, Tulancingo, Cuautepec de Hinojosa y Pachuca de Soto.

Los únicos municipios con reglamento son: Pachuca de Soto, Mineral de la Reforma, Tulancingo de Bravo y Cuautepec de Hinojosa.



## 7. Conclusiones

Como hay actividad hidrotermal en algunas zonas del estado de Hidalgo, el hecho de que haya sismos de magnitud cero, podría tratarse de sismos con magnitudes muy pequeñas e incluso negativas.

En vista de que el valor  $b$  obtenido para el catálogo completo es 0.8739, para profundidades menores a 10 km es de 0.9318 y para profundidades mayores a 10 km es de 0.8368, siendo un valor mediano-bajo, significa que predomina el número de terremotos de pequeña magnitud o de magnitud media considerando el mayor de los mayores y el menor de los menores, lo que indica que es una región con alta resistencia en los materiales.

La interpretación cualitativa de los resultados del estudio con métodos potenciales a partir de la zona del estado de Hidalgo, que se encuentra en el borde de la sierra y hacia el noreste de la misma y en su vecindad, se basa en el examen de halos, de intensidad de anomalías de respuesta magnética y gravimétrica, que se asocian a diferentes estructuras, sin considerar para esto en ningún momento a la sismicidad. Así mismo, la interpretación de los lineamientos estructurales fue propiamente cualitativa, y por lo cual se realizó la Deconvolución de Euler y la inversión 3D para una interpretación cuantitativa y más aproximada de las fuentes generadoras de sismicidad.

En las soluciones de la Deconvolución de Euler, los eventos sísmicos no precisamente caen sobre las mismas, sin embargo, están en cercanía, y las soluciones concuerdan más con las estructuras presentadas en los mapas, cabe resaltar que, de acuerdo a primera derivada vertical y Deconvolución de Euler, hay lineamientos que se asocian a posibles estructuras que no han sido reportadas por el INEGI.

La mayor parte de las localizaciones o distribución espacial de la sismicidad, y de acuerdo a las fallas reportadas por el INEGI, se podría pensar que está relacionada directamente con los sistemas de fallas existentes en la entidad, especialmente en la porción centro-sur del Estado, sin embargo, como se puede ver en la respuesta magnética y Euler, no es así totalmente.

Considerando que la media en las profundidades está alrededor de los 5 km y que la fábrica estructural es relativamente somera (se pierde en el residual magnético) y de acuerdo a la Deconvolución de Euler, en donde la mayoría de las soluciones para el índice 1.0 se encuentran en una media de profundidad de poco más de 600 m, las estructuras no son las que causan la sismicidad en su mayoría en la zona del estado, sino se trata de la competencia entre dos estructuras regionales que cabalga una sobre la otra, en donde la resistencia al esfuerzo cortante es rebasada por los esfuerzos producidos por dichos cuerpos.

Las fuentes sísmicas asociadas a la actividad analizada en este informe aparentemente son diversas; por lo que se puede decir que la tectónica en esta región es activa y compleja y con una sola estación, se vuelve más compleja (por eso el modelo de velocidades o profundidades relativamente constantes que se reflejan muy claramente).

Debido a que sólo hay una estación sismológica, la distribución espacial de la sismicidad es aparentemente heterogénea y seguramente esta sismicidad no es realmente representativa de las fuentes sísmicas.

La presencia de lineamientos asociados con estructuras  $NW-SE$  y  $E-W$  en el estado de Hidalgo, podría ser resultado de los esfuerzos producidos por las extensiones este-oeste y norte-sur, los



cuales estarían presentándose simultáneamente, produciendo fallamiento tanto normal, como inverso.

El cuerpo longitudinal presumiblemente profundo que se encuentra al sur de la zona de estudio, al entrar en competencia con los materiales debidos al plegamiento en la zona noreste del estado de Hidalgo, que cuenta con materiales menos competentes pero de manera relativamente superficial, han provocado una zona de tensión, en donde los esfuerzos principales al parecer son horizontales, pero con ligeros buzamientos, siendo que los esfuerzos más pequeños son los verticales en dicha zona, dando como resultado una zona de alto fracturamiento en la zona más débil, la cual se encuentra en el centro de la zona de estudio y entre ambas zonas anómalas, siendo que definitivamente se trata en ese sitio de una zona con depósitos de material poco competentes, o bien con baja resistencia al corte. Así mismo, en el mapa del World Stress Map aparentemente no existe un estado de tensión significativo pero que se encuentra regionalmente en el plegamiento de la sierra y dicho estado de tensión que en algún momento de la historia geológica de ese lugar se debió estructuras y/o cuerpos muy antiguos, los cuales son los que han generado sismos regionales.

## 8. Recomendaciones

En el estado de Hidalgo y alrededores se ve una tendencia predominante en la sismicidad reportada por el SSN, la cual podría deberse debido a que sólo hay una estación del SSN, o bien, por la falta de equipo, por lo que se recomienda la instalación estratégica de más equipos.

Se recomienda obtener los datos aeromagnéticos del Servicio Geológico para mayor detalle en la interpretación geofísica respecto a la sismicidad de la zona de estudio expuesta en este informe.

Se recomienda aplicar el mismo proceso realizado en este proyecto a todos los estados del país, para tener información geológica regional con la modelación 3D y 2D, así como el Vs30 para análisis municipal y estatal.

Para tener un mejor conocimiento sobre las posibles zonas sismogénicas, así como un mejor cálculo de la estimación del peligro sísmico en el estado de Hidalgo y alrededores, se requieren estudios complementarios de reconocimiento y clasificación de estructuras geológicas, así como mayor número de estaciones sísmicas.



## 9. Bibliografía consultada

- Cid Villegas, G, (2015). Tesis de maestría: Aplicación de sistemas de información geográfica en la documentación de fallas cuaternarias en México. Centro de Geociencias, UNAM, Juriquilla, Qro.
- León, Rodrigo. Estado de clasificación de la microsismicidad en la parte central de la Sierra Madre Oriental. Tesis de Posgrado. Centro de Geociencias-UNAM, 2014.
- Pacheco, Omar. Aplicación del método de Deconvolución de Euler sobre datos aeromagnéticos. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2008.
- Quintanar, L., Rodríguez-González, M. y Campos-Enríquez, O. (2004). A shallow crustal earthquake doublet from the Trans-Mexican Volcanic Belt (Central Mexico). Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 94, No. 3, pp 845-855.
- Suter, M., Carrillo-Martínez, M. y Quintero-Legorreta, O. (1996). Macroseismic study of shallow earthquakes in the central and Eastern parts of the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 86, No. 6, pp 1952-1963.
- Servicio Sismológico Nacional (SSN), (2010). Reporte: Secuencia de Sismos en Hidalgo, Mayo 2010. Servicio Sismológico Nacional. Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. Mayo 2010.
- Servicio Sismológico Nacional (SSN), (2013). Reporte: Secuencia de Sismos en el Estado de Hidalgo, Septiembre, 2013. Servicio Sismológico Nacional. Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. Septiembre 2013.
- Soto Peredo, J., (2012). Sismicidad en el Estado de Hidalgo durante 1997-2010. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis de Licenciatura.
- Mendoza, Avith, 2012. Estudio de la estabilidad del valor b para regiones sismotectónicas de México. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Telford, W. M., Gerald L. Applied Geophysics, 2nd, Edition, 1990.
- UBC–Geophysical Inversion Facility. Department of Geophysics and Astronomy, University of British Columbia Vancouver, British Columbia. A Program Library for Forward Modelling and Inversion of Magnetic Data over 3D Structures. VERSION 4.0, May 2005.
- UBC–Geophysical Inversion Facility. Department of Geophysics and Astronomy, University of British Columbia Vancouver, British Columbia. A Program Library for Forward Modelling and Inversion of Gravity Data over 3D Structures. VERSION 3.0, May 2005.
- Utsu, T. (1965). A method for determining the value of b in a formula  $\log n = a - bM$  showing the magnitude frequency for earthquakes, Geophys. Bull. Hokkaido Univ., 13, pp. 99-103.
- Utsu, T. (1966). A statistical significance test of the difference in b-value between two earthquake groups. Journal of Physics of the Earth, 14(2), 37-40.
- Utsu, T. (1992). On seismicity, in Report of the Joint Research Institute for Statistical Mathematics, Institute for Statistical Mathematics, Tokyo, pp. 139-157.
- Utsu, T. (1999). Representation and analysis of the earthquake size distribution: a historical review and some new approaches, PAGEOP, 155, 509-535.
- León Loya, 2014. Estado y clasificación de la microsismicidad en la parte central de la sierra madre oriental. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Zúñiga, F.R., Suárez, Figueroa, A., Mendoza, A., 2017. A first-order sismotectonic regionalization of Mexico for seismic hazard and risk estimation. Journal of Seismology.
- Zúñiga, F.R., Suárez, G., Ordaz, M. y García-Acosta, V., 1997. Proyecto: Peligro Sísmico en Latinoamérica y el Caribe, Instituto Panamericano de Geografía e Historia, proyecto 89-0190.



# SEGURIDAD

SECRETARÍA DE SEGURIDAD  
Y PROTECCIÓN CIUDADANA



# CENAPRED

CENTRO NACIONAL DE  
PREVENCIÓN DE DESASTRES

## Páginas de internet consultadas:

Servicio Sismológico Nacional: <http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>

Servicio Geológico de los Estados Unidos: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/gsm2.unavco.org>  
[www.world-stress-map.org](http://www.world-stress-map.org)

<http://www.geomag.org/models/emag2.html>

<http://www.csr.utexas.edu/grace/gravity/>

<https://earthquake.usgs.gov/data/vs30/>



## Anexos

Sismos de magnitud mayor a 4.0 con un buffer de 50 km en el estado de Hidalgo:

FECHA	HORA	LATITUD	LONGITUD	PROFUNDIDAD (Km)	MAGNITUD	X	Y
19/11/1912	13:55:07	19.93	-99.83	33	6.9	413137	2203950
25/03/1976	23:05:07	20.11	-99.13	15	5.1	486411	2223659
04/10/1976	06:59:19	20.36	-99.28	5	4.5	470778	2251345
21/11/1980	22:49:38	20.30	-99.20	5	4.8	479119	2244693
22/08/1981	17:45:29	19.40	-99.30	3	4.2	468501	2145115
08/10/1981	18:18:19	20.70	-98.90	1	4.0	510414	2288950
27/01/1987	16:33:29	20.31	-99.21	15	4.1	478076	2245800
02/06/1988	12:02:34	20.01	-99.06	5	4.0	493724	2212589
21/06/1988	03:32:54	21.61	-99.25	6	4.4	474125	2389681
05/08/1989	23:42:21	19.17	-98.35	10	4.0	568344	2119765
10/09/1989	11:07:57	21.41	-99.12	10	4.7	487563	2367529
10/09/1989	13:28:41	21.43	-98.99	10	4.9	501036	2369738
10/09/1989	14:22:09	21.15	-99.26	10	4.1	473006	2338771
10/09/1989	16:43:11	21.24	-98.99	20	4.2	501038	2348710
26/10/1989	11:08:35	20.64	-99.38	5	4.0	460413	2282353
10/11/1989	13:52:37	19.28	-98.94	10	4.3	506304	2131810
17/06/1992	06:14:12	20.46	-99.18	10	4.1	481226	2262397
23/06/1992	05:32:32	20.60	-99.06	5	4.1	493748	2277881
17/07/1993	02:47:06	21.50	-99.22	5	4.0	477213	2377502
25/02/1994	08:33:22	19.82	-98.60	81	4.0	541890	2191612
25/02/1994	15:01:42	19.75	-98.51	100	4.0	551337	2183891
25/02/1994	19:57:43	19.88	-98.67	16	4.0	534546	2198236
26/02/1994	10:00:28	19.78	-98.90	54	4.0	510475	2187140
26/02/1994	16:38:34	19.70	-98.70	74	4.3	531441	2178312
26/02/1994	19:18:55	19.68	-98.79	70	4.1	522011	2176084
30/04/1994	08:10:30	19.43	-98.84	13	4.2	516796	2148415
11/05/1994	05:08:40	21.44	-98.85	5	4.0	515543	2370852
03/06/1996	12:53:40	21.09	-99.78	26	4.2	418982	2332307
05/06/1996	09:40:43	20.70	-99.50	19	4.2	447932	2289027
06/09/1996	06:55:01	19.21	-98.36	5	4.0	567276	2124187
22/09/1996	18:21:26	20.81	-99.40	20	4.2	458376	2301172
18/03/1998	11:56:05	20.10	-99.23	5	4.3	475956	2222564
20/06/1999	10:25:21	19.31	-98.48	3	4.0	554628	2135211
12/03/2000	03:44:49	20.10	-99.29	5	4.1	469684	2222574



# SEGURIDAD

SECRETARÍA DE SEGURIDAD  
Y PROTECCIÓN CIUDADANA



# CENAPRED

CENTRO NACIONAL DE  
PREVENCIÓN DE DESASTRES

22/05/2001	12:34:30	21.44	-99.24	20	4.0	475131	2370864
25/07/2002	09:14:51	21.13	-99.17	5	4.1	482347	2336545
16/11/2002	11:50:02	19.17	-98.49	9	4.1	553623	2119716
15/12/2003	10:39:38	20.35	-99.07	4	4.0	492694	2250215
07/08/2005	03:25:10	19.74	-98.61	7	4.0	540863	2182757
20/08/2005	08:06:20	21.71	-99.18	8	4.1	481383	2400739
18/05/2009	17:45:04	21.75	-98.45	5	4.2	556871	2405257
17/04/2010	07:03:29	20.45	-99.04	2	4.0	495828	2261280
18/05/2010	05:29:09	20.35	-98.92	5	4.0	508350	2250215
26/03/2011	17:08:15	21.52	-99.22	9	4.0	477216	2379715
25/06/2011	00:41:30	21.32	-99.36	8	4.4	462666	2357606
25/06/2011	04:31:21	21.56	-98.95	16	4.3	505177	2384127
27/06/2011	08:05:49	21.48	-99.22	8	4.0	477210	2375288
23/09/2013	06:45:54	20.34	-99.21	3.1	4.0	477746	2249176
27/09/2015	23:13:08	21.43	-99.39	21.6	4.1	459741	2370175
10/09/2017	02:03:55	20.55	-98.90	5	4.0	510559	2272150
05/12/2017	11:29:00	20.74	-99.28	5	4.0	470506	2293344