

4. Metodología

4.1 Sismicidad de la zona

En el inicio de este proceso de investigación, se hizo una base de datos con los sismos ocurrido en las costas del Golfo de México así como de la zona central, entre los años de 1960 y 2009. Se utilizaron los catálogos en línea del International Seismological Center (ISC) y del Servicio Sismológico Nacional (SSN). Se seleccionaron sismos con una profundidad menor a 60 km y se descartando aquellos con una mala localización.

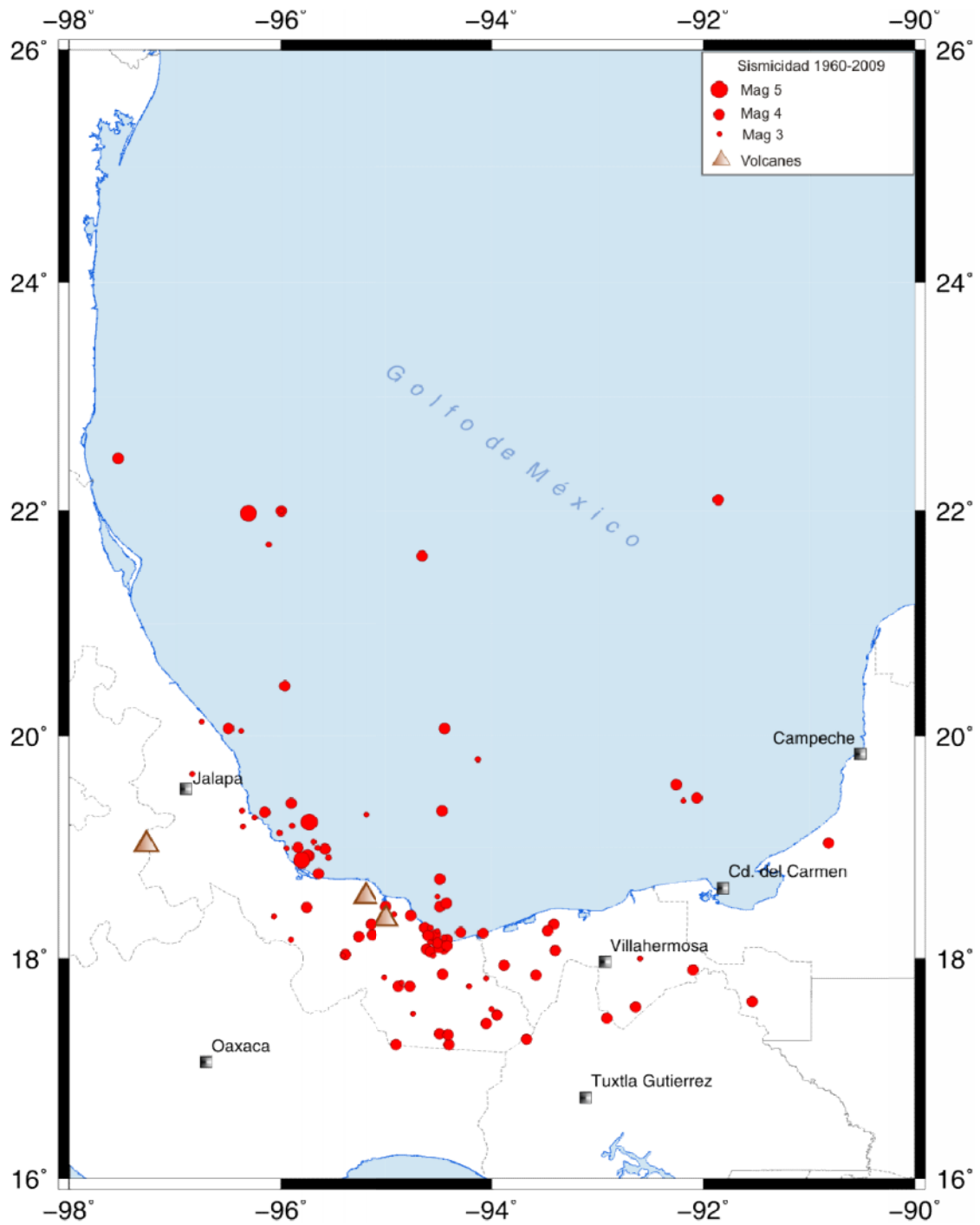
Para ubicarlos se graficaron con ayuda del programa Generation MappingTool (GMT) (Figura 4.1), y así decidir cuales sismos eran los más adecuados para el procesamiento; finalmente se eligieron dos eventos ocurridos cerca de las costas de Veracruz. La primera razón fue su magnitud ($m_b > 5$), debido a que son los más adecuados para realizar una inversión de onda. La segunda es que son eventos recientes y cercanos a los dos sismos modelados anteriormente en la literatura (Suárez, 2000), lo cual ayudaría a una mejor interpretación.

Evento	Hora (GMT)	Magnitud (mb)	Latitud (°)	Longitud (°)	Profundidad (km)
29/10/2009	10:52:57	5.4	18.89	-95.81	13
23/05/2007	19:09:15	5.2	21.98	-96.31	24

Tabla 4.1. Datos de los dos eventos elegidos.

Se consultó en el catálogo Global Centroid Moment Tensor Catalog (GCMT), para buscar si se encontraban los mecanismos focales calculados para los dos sismos. Se graficaron junto con los dos mecanismos focales calculados por Suárez (2000) (Fig4.2)

Fig.4. 1. Mapa donde se muestra la localización de los epicentros de base de datos recopilada para este trabajo.



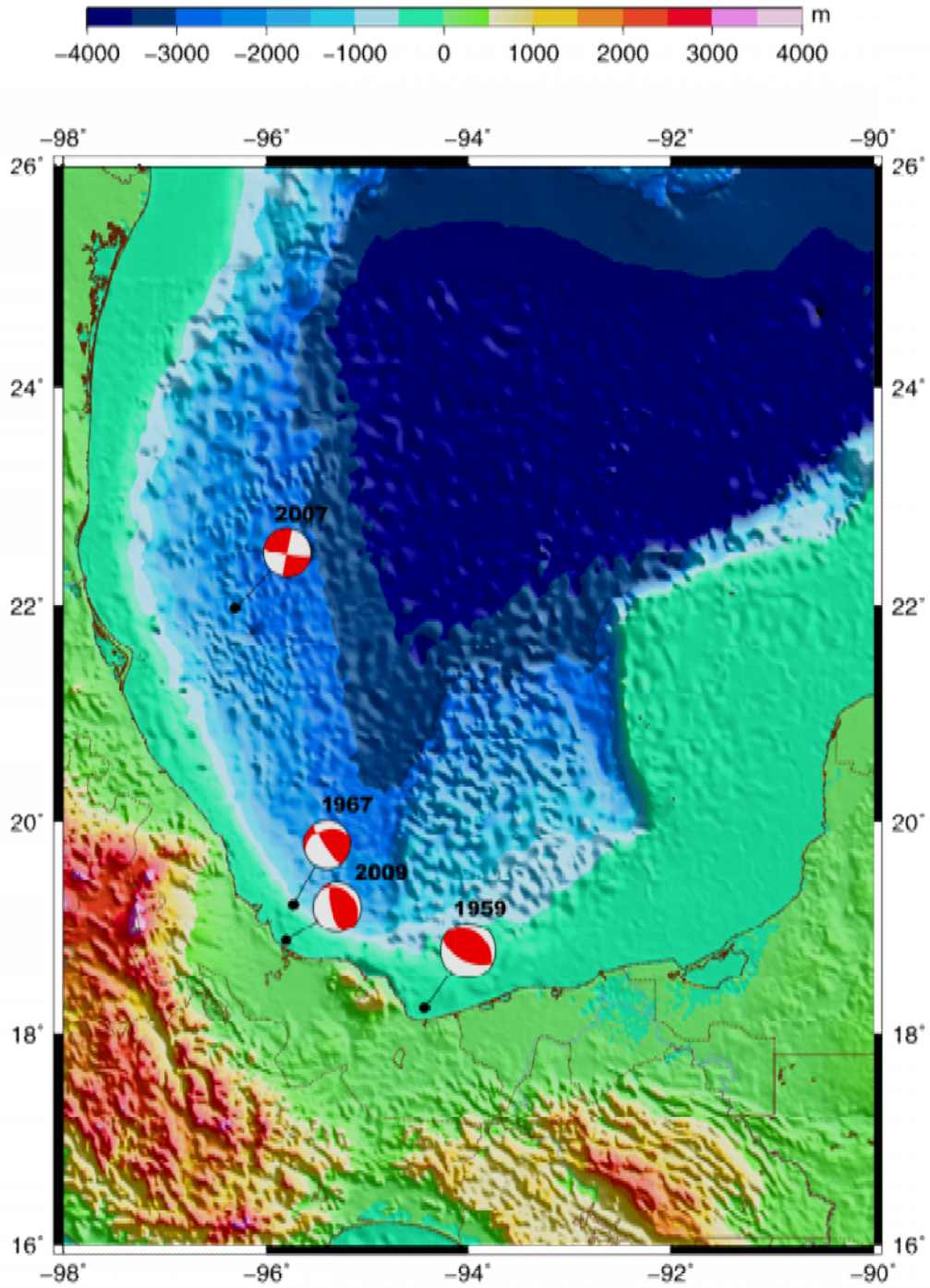


Fig.4. 2. Mapa batimétrico donde se muestran la localización de los eventos de mayor magnitud en la zona, junto con sus mecanismos focales, los mecanismos focales de los sismos de 1967 y 1959 reportados por Suárez (2000) y los de 2009 y 2007 reportados por CMT.

4.3 Procesamiento de los registros.

Se obtuvieron los registros de ambos sismo de la página web del Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS) utilizando el sistema Wilber II (<http://www.iris.edu/wilber>).

Se eligieron registros de estaciones localizadas a una distancia epicentral entre 30° y 95°, es decir, a una distancia telesísmica. Se buscaron sismogramas que contasen con una buena relación señal ruido (mayor a 1.5). A continuación se muestran las tablas con la relación de registros elegidos para cada evento.

Tabla 4.2. Estaciones que registraron el sismo de 23/05/2007.

Estación	Distancia	Azimut	SNR	
HUMO.BK	30.17	318	2.28	Hull Mountain, OR, USA
WIFE.CC	30.35	322	4.39	Wifes at 3-Sisters, WA
DBO.UO	30.64	319	1.99	Dodson Butte, OR
COR.IU	31.52	321	3.57	Corvallis, Oregón, USA
FFC.II	32.8	353	1.9	FlinFlon, Canadá
GRGR.CU	34.48	101	3.43	Grenville, Grenada
EGAK.US	51.66	337	1.74	Eagle, Centro de Alaska, USA
COLA.IU	54.19	335	2.95	College Outposts, Alaska, USA
GAMB.AK	63.92	331	2.97	Gambell,Alaska
TNA.AK	62.45	333	4.32	Tin City,Alaska
BILL.IU	72.33	336	7.81	Bilibino, Rusia
TIXI.IU	84.46	346	2.38	Tiksi,Rusia
MA2.IU	82.02	331	2.46	Magadan, Rusia

Tabla 4.3. Estaciones que registraron el sismo de 29/10/2009.

Estación	Distancia	Azimut	SNR	
BBSR.IU	30.61	58	1.91	Estación de investigación biológica, Bermuda
SAML.IU	42.28	128	4.25	Samuel, Brasil
LPAZ.GT	44.24	140	5.06	La Paz, Bolivia
LVC.IU	48.88	146	2.09	Limón Verde, Chile
LCO.IU	53.44	152	1.96	Las Campanas Observatorio , Chile
CPUP.GT	58.37	139	4.4	Villa Florida, Paraguay
RCBR.IU	63.65	106	3.94	Riachuelo, Brasil
PLCA.GT	63.84	159	2.04	Paso Flores, Argentina
TRQA.IU	64.95	151	3.08	Tornquist, Argentina
KPL.GB	74.08	34	1.56	PLOCKTON, Escocia
GAL1.GB	75.07	36	1.74	GALLOWAY, Escocia
EDI.GB	75.69	35	1.79	EDINBURGH, Escocia

JSA.GB	77.92	42	1.85	SAINT AUBIN, Islas del Canal
PAB.IU	78.96	51	3.14	San Pablo, España
BFO.II	84.77	40	2.04	Black Forest Observatory, Schiltach, Germany
SENIN.CH	84.87	42	3.48	Red Sismológica de Suiza
GRFO.IU	85.96	38	4.44	Grafenberg, Alemania
FUORN.CH	86.65	41	3.71	Red Sismológica de Suiza
DBIC.GT	88.43	83	2.92	Dimbokro, Cote d'Ivoire

Se utilizó el programa SAC (Seismic Analysis Code desarrollada en Lawrence Livermore National Laboratory) para marcar los primeros arribos de las ondas P para cada uno de las componentes verticales de las estaciones, en el caso de contar con registros de banda ancha, periodo largo o periodo corto, y si se tenía más de uno, se compraron los resultados, además de verificarlo con las componentes horizontales.

Después se cortaron los archivos en una ventana comprendida entre 5 s antes de la llegada de la onda P y 20 s después del arribo de la onda P. Esto es debido a que a se marcarían las fases de profundidad pP y sP. Se tomó en cuenta que son sismos poco profundos, dichas fases arriban en esta ventana de tiempo.

Para marcar las fases de profundidad se utilizaron, el programa SEISAN y las tablas de tiempos de arribo correspondientes al modelo de AK135 recopiladas por Kennett (2005). Para profundidades no definidas en las tablas se calculó un tiempo de arribo aproximado con las formulas (4.1) y (4.2).

Al terminar de marcar las fases de profundidad se obtuvo una aproximación de la profundidad para ambos sismos.

$$T_{pP-P} = \frac{2H}{V_p} \quad (4.1)$$

$$T_{sP-P} = \frac{H(V_p+V_s)}{V_p+V_s} \quad (4.2)$$

Donde:

T_{pP-P} = diferencia de tiempo entre la llegada de la onda P y la fase pP.

T_{sP-P} = diferencia de tiempo entre la llegada de la onda P y la fase sP.

H = profundidad.

V_p = velocidad de la onda P(6.5 km/s)

V_s =velocidad de la onda S (4.5 km/s)

Del análisis de las fases de profundidad pP y sP, se obtuvieron profundidades de 35 km y 10 km, para el sismo de Alvarado y Tuxpan respectivamente.

4.2 Preparación de datos para la inversión.

Los registros se agruparon de acuerdo al azimuth y se eligió para cada familia el registro para el cual se tuviera los primeros arribos y los arribos de las fases de profundidad más claros.

Para el evento del 29/10/2009 se escogieron los registros de la tabla 4.4. En la Fig. 4.3 se muestra la distribución de las estaciones.

Tabla 4.4. Estaciones elegidas para el sismo de 29/10/2009.

Estación	Distancia	Azimut	SNR	
BBSR.IU	30.61	58	1.91	Estación de investigación biológica, Bermuda
SAML.IU	42.28	128	4.25	Samuel, Brasil
LPAZ.GT	44.24	140	5.06	La Paz, Bolivia
LVC.IU	48.88	146	2.09	Limón Verde, Chile
RCBR.IU	63.65	106	3.94	Riachuelo, Brasil
PLCA.GT	63.84	159	2.04	Paso Flores, Argentina
TRQA.IU	64.95	151	3.08	Tornquist, Argentina
PAB.IU	78.96	51	3.14	San Pablo, España
GRFO.IU	85.96	38	4.44	Grafenberg, Alemania
FUORN.CH	86.65	41	3.71	Red Sismológica de Suiza
DBIC.GT	88.43	83	2.92	Dimbokro, Cote d'Ivoire



Fig.4.3. Distribución de las estaciones elegidas para el sismo del 29/10/09. El círculo rojo representa el epicentro del sismo y los triángulos invertidos indican la localización de las estaciones.

Para el evento del 23/05/2003 escogieron los registros de la tabla 4.5. En la Fig. 4.4 se muestra la distribución de las estaciones.

Tabla 4.5. Estaciones elegidas para el sismo de 23/05/2007.

Estación	Distancia	Azimut	SNR	
WIFE.CC	30.35	322	4.39	Wifes at 3-Sisters, WA
GRGR.CU	34.48	101	3.43	Grenville, Grenada
COLA.IU	54.19	335	2.95	College Outposts, Alaska, USA
TNA.AK	62.45	333	4.32	Tin City,Alaska
BILL.IU	72.33	336	7.81	Bilibino, Rusia
TIXI.IU	81.46	346	2.38	Tiksi,Rusia

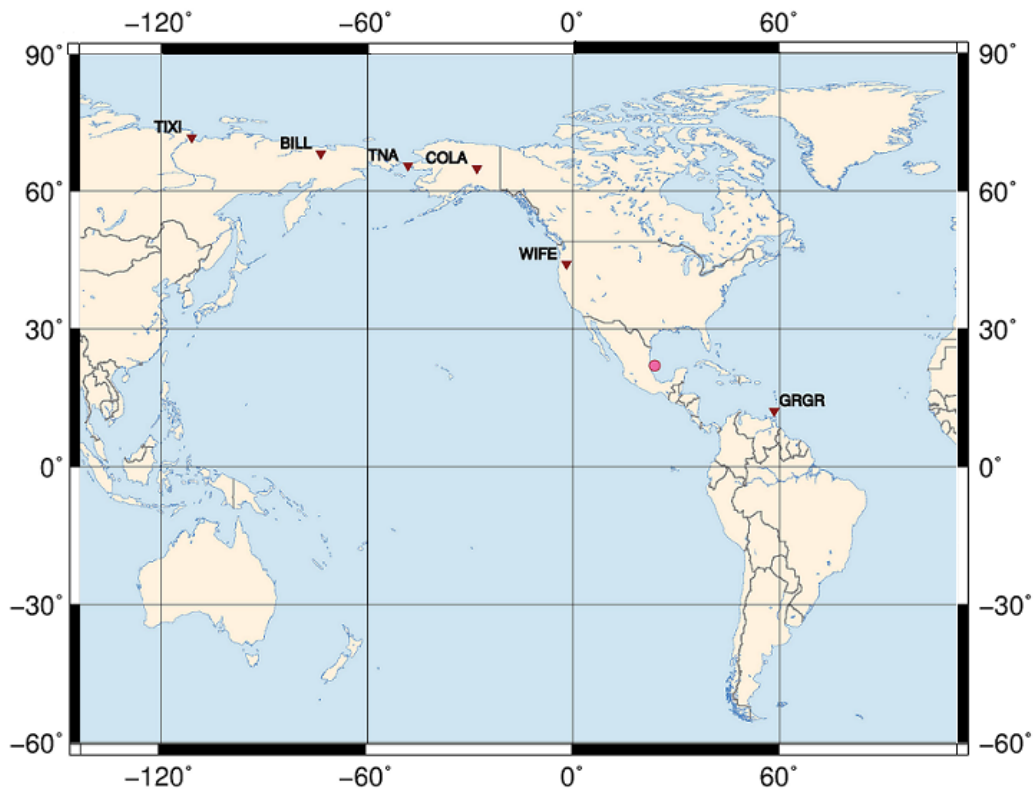


Fig.4.4. Distribución de las estaciones elegidas para el sismo del 23/05/07. El círculo representa el epicentro del sismo y los triángulos invertidos indican la localización de las estaciones.

A los sismogramas seleccionados se les removió la respuesta del instrumento con ayuda del programa SAC, utilizando la función de transferencia y los archivos de polos y ceros para cada estación sismológica, generados a partir del programa *rdseed* de IRIS.

Después se utilizó el programa SACtoDSN.pl, obtenido de la página del Dr. Walter Szeliga (<http://bond.colorado.edu/~walter/professional/mt5.php>), para convertir los datos de formato SAC a formato DSN; dicho formato es el que utiliza MT5, el programa de inversión a utilizar en este trabajo, desarrollado por Rob McCaffery, Geoffrey Abers, y Peter Zwick (1991).

Después estos datos se procesan en el paquete MT5INT, con este paquete se marco la fase P en cada sismograma para genera un archivo con extensión .INV, el cual es requerido por el programa de inversión MT5.

4.3 Inversión de los datos.

Para comenzar la inversión de los datos se buscó un modelo de capas adecuado a la zona, se escogió el publicado por Castillo y Moore (1974) (Fig. 4.5 y Fig. 4.6). A partir del mapa de batimetría, se calculó el espesor del tirante de agua sobre el epicentro de los sismos. Además también se utilizó el modelo de capas general de la tierra, manejado por el programa MT5 (McCaffery, Abers, y Zwick ,1991) (Tabla 4.6) para comparar los resultados.

Tabla 4.6. Modelo general de la tierra manejado por el programa MT5.

Velocidad P(km/s)	Velocidad S(km/s)	Densidad (g/cm ³)
6.5	3.5	2.8

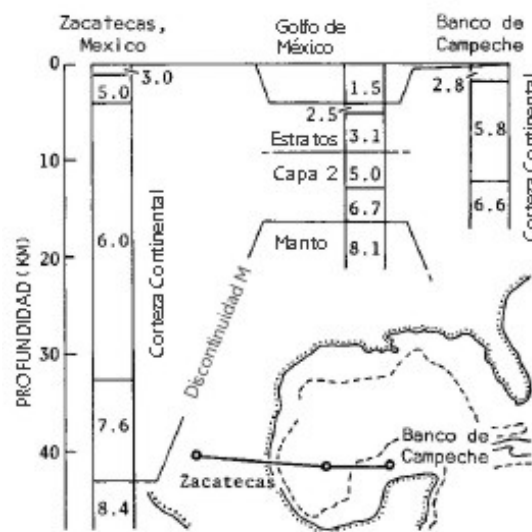


Fig. 4.5. Sección perfil sísmico, velocidad en kilómetros por segundo. Tomada de Castillo y Moore (1974).

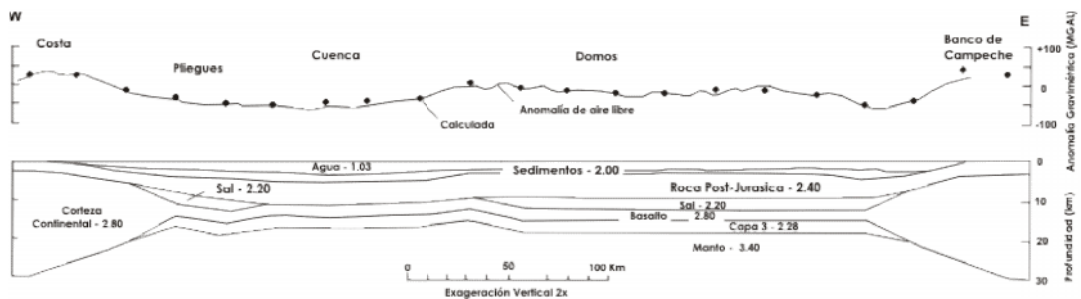


Fig. 4.6. Modelo de la corteza, densidades en g/cm³. Tomada de Castillo y Moore (1974).

Con base en estos dos modelos se escogió el siguiente modelo (Tabla (4.7)):

Tabla 4.7. Modelo utilizado para la inversión, Castillo y Moore (1974).

Espesor (km)	Velocidad P(km/s)	Velocidad S(km/s)	Densidad (g/cm ³)
10	3.10	1.78	2.4
	5	2.88	2.8

Para comenzar la inversión se necesita un modelo inicial. Para este fin se escogió el mecanismo focal publicado por CMT Harvard (Fig. 4.7) (Fig. 4.8). El epicentro utilizado es el publicado por el ISC para el sismo del 23/05/07 y debido a que aún no se publica la localización en ISC para el sismo del 29/10/09 se utilizó la del SSN. La profundidad utilizada para el modelo fue la calculada a partir de fases de profundidad (Tabla 4.8).

Tabla 4.8. Parámetros utilizados para iniciar el proceso de inversión.

Fecha	Hora	Lat.	Long.	Strike	Dip	Rake	Prof.	Tirante de agua
23/05/07	19:09:15	21.98	-96.31	102	80	-1	10	1.2
29/10/09	10:52:57	18.89	-95.81	310	25	59	30	0.3

Otros parámetros que se especificaron para la inversión son la duración media de la función de tiempo de la fuente sísmica, como valor inicial de la función de tiempo utilizó el publicado por el cmt. En este trabajo se seleccionó el realizar una inversión de forma, debido a que los principales objetivos eran el poder determinar el mecanismo focal y la profundidad, a partir de las fases pP y sP. En el algoritmo se forzó la positividad de la función de tiempo, pues tiene poco sentido físico el que sea negativa.

Después de especificar todos estos parámetros, se comenzó con el proceso de inversión, donde se tomó en cuenta la reducción de la variancia en cada iteración el cual calcula el programa de la siguiente forma

$$x = 100 \frac{var(i) - var(i-1)}{var(i-1)} \quad (4.3)$$

Donde i es el número de iteración.

Además de R/D% que es un porcentaje dado por la variancia residual de todos los datos entre la variancia total de los datos, debido a que es una inversión de forma esta variancia es normalizada.

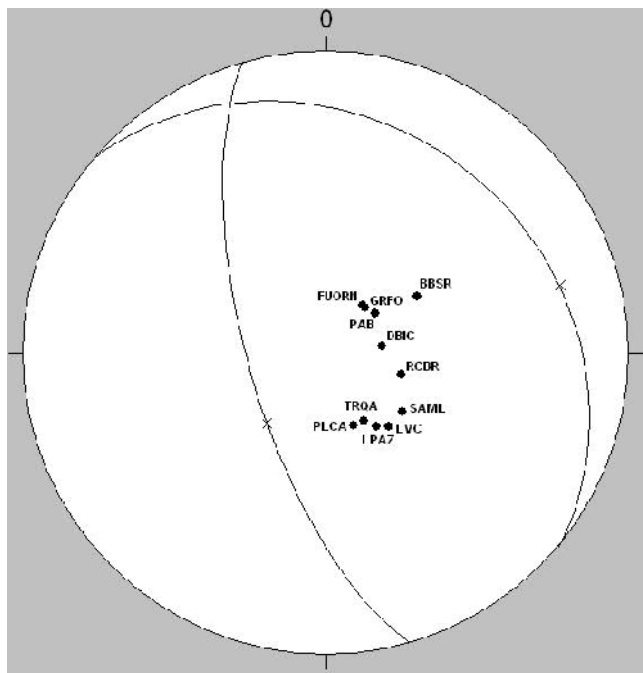


Fig.4. 7. Mecanismo focal publicado por Harvard de sismos de 29/10/09. Los puntos negros representan estaciones que indican compresiones y las cruces los polos de los planos nodales.

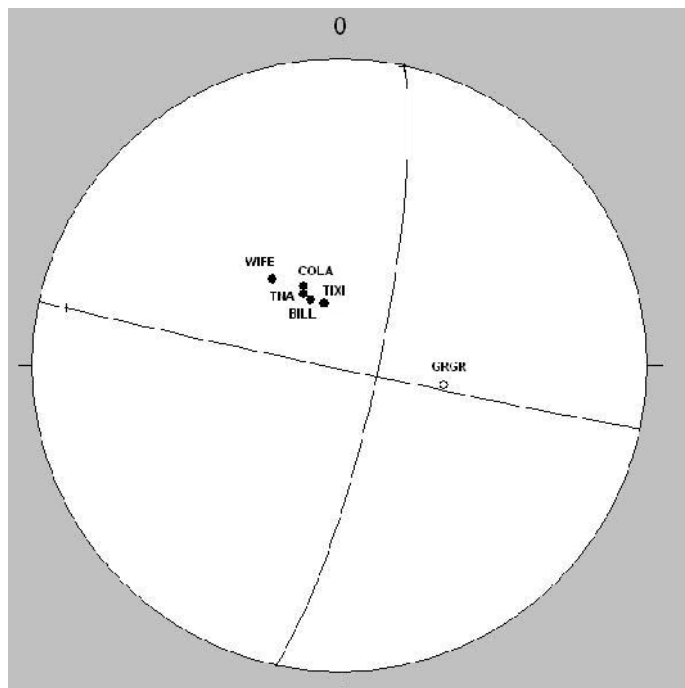


Fig.4. 8. Mecanismo focal publicado por Harvard de sismos de 23/05/07. Los puntos negros representan estaciones que indican compresiones y las cruces los polos de los planos nodales.

4.4 Análisis estadístico

Para llevar al cabo el análisis estadístico que se utilizó para determinar la profundidad, se realizaron los siguientes pasos:

- a. A partir del error estándar que calcula el programa MT5, se calcula la variancia para la estimación de la profundidad de cada sismo.

$$\sigma^2 = (ES)^2$$

- b. Se normalizaron estos valores dividiéndolos entre el menor valor y se graficaron.
- c. Se escogió como modelo de referencia, el modelo con una menor variancia a partir de la estimación de la profundidad.
- d. Se definió una nueva variable definida como

$$D_j = \sigma_a - \sigma_b$$

Donde $j=1,2,\dots,n$

n = número de sismogramas

a y b = dos profundidades diferentes

- e. Se calculo la media y la desviación estándar de D , μ_D y σ_D respectivamente.
- f. Después, se realizó una prueba de hipótesis. La hipótesis propuesta fue $H_0 : \mu_D = 0$ y $H_1 : \mu_D \neq 0$, con un nivel de significancia del 0.05, donde la profundidad a es la del modelo de referencia. Utilizando como distribución de probabilidad t-student.
- g. Se obtuvo un intervalo de profundidades para el cual no se excede el nivel de significancia.
- h. Finalmente se compararon las formas de onda en estos intervalos, para así escoger la que mejor reproduce las fases se profundidad.

Finalmente se hizo una comparación de los resultados obtenidos por los diferentes modelos utilizados.

- a. Se calculó la varianza y la media para los sismogramas resultado de la inversión para cada modelo.
- b. Se hizo una prueba de hipótesis donde $H_0 : \sigma_1 = \sigma_2$ y $H_1: \sigma_1 \neq \sigma_2$ utilizando una distribución F de Fisher, con un nivel de significancia del 0.05.