

Capítulo 3

MARCO TEÓRICO

3.1. Hipocentro

La determinación de hipocentros es una de las tareas más importantes en la sismología práctica y la mayoría de los sismólogos se han visto envueltos en esta tarea alguna vez.

La localización de un terremoto está definida por el hipocentro sísmico (x_0, y_0, z_0) y el tiempo origen t_0 . El hipocentro es la ubicación física, generalmente longitud (x_0) , latitud (y_0) y profundidad debajo de la superficie (z_0, Km) . El epicentro es (x_0, y_0) . El tiempo origen es el tiempo de ocurrencia del sismo.

Cuando un sismo es grande, las dimensiones físicas pueden ser de varios cientos de kilómetros y el hipocentro puede estar principalmente ubicado en cualquier parte de la superficie de ruptura. Dado que el hipocentro y el tiempo origen están determinados por los tiempos de arribo de las fases sísmicas iniciadas por la primera ruptura, el cálculo de localización corresponderá al punto donde inicio la ruptura y el tiempo origen al tiempo de la ruptura inicial.

Esto es verdadero usando fases P y S dado que la velocidad de ruptura es menor que la velocidad de la onda S. Así que la energía de la onda P o S emitida por el fin de la ruptura siempre llega más tarde que la energía irradiada desde el inicio de la ruptura.

HYPOCENTER es un programa Fortran para localizar sismos locales, regionales y globales.

3.2. SEISAN

El sistema de análisis sísmico SEISAN es un conjunto completo de programas y una base de datos simple para el análisis de terremotos a partir de datos analógicos y digitales. Con SEISAN es posible utilizar sismos locales y globales para ingresar manualmente las lecturas o picarlas con un cursor, localizar eventos, editar eventos, determinar parámetros espectrales, momento sísmico, azimut de llegada de estaciones con tres componentes y desplegar epicentros.

El sistema consta de un conjunto de programas vinculados a la misma base de datos. Usando los programas de búsqueda, es posible utilizar diferentes criterios para buscar en la base de datos para eventos particulares y trabajar con este subconjunto sin extraer los eventos. La mayoría de los programas pueden funcionar tanto en forma convencional (mediante un único archivo con muchos eventos), o en forma de base de datos. Además SEISAN contiene algunos programas de investigación integrados tipo como Q coda, modelos sintéticos y un sistema completo para el calculo del riesgo sísmico [Ottemöller et al., 2011].

3.3. hypoDD

3.3.1. Justificación

El análisis de la sismicidad para el estudio de los procesos tectónicos, recurrencia sísmica e interacción entre terremotos requiere conocimientos precisos de las variaciones espaciales entre hipocentros [Waldhauser and Ellsworth, 2000]

Basado en este hecho y en la validación de nuestro catálogo se justifica la relocalización.

El proceso rutinario en la determinación absoluta de los hipocentros está controlado por diversos factores como son:

- Geometría de la red.
- Fases disponibles.
- La calidad de las lecturas de los tiempos de arribo.
- Conocimiento de la estructura cortical (modelo de velocidades).

Para nuestro caso, se puede decir que estos factores han sido constantes en el tiempo, excepto la geometría de la red, ya que esta ha ampliado durante estos 12 años. En la actualidad se cuenta con 6 estaciones de banda ancha en el estado de Guerrero, pero no siempre fue así.

En la tabla 1 se muestra la cronología de las estaciones más importantes en la determinación rutinaria de hipocentros en el Estado de Guerrero.

Tabla 1. Cronología de las estaciones del SSN para la determinación rutinaria de hipocentros en el Estado de Guerrero.

Estación	Nombre, Localidad	Fecha de Instalación
PLIG	Platanillo, Iguala, Guerrero.	23-Oct-1993
CAIG	Cayaco, Coyuca de Benítez, Guerrero.	02-Dic-1993
ZIIG	Zihuatanejo, Zihuatanejo, Guerrero.	05-Dic-1993
OXIG	Oaxaca, Oaxaca.	02-Mar-1994
HUIG	Huatulco, Santa María Huatulco, Oaxaca.	04-Mar-1994
PNIG	Pinotepa, Pinotepa Nacional, Oaxaca.	28-Mar-1994
CUIG	El Pozo, C.U, México D.F.	07-Jul-1994
YAIG	Yautepec, Yautepec, Morelos.	15-Jul-1995
PPIG	Popocatépetl, Amecameca, Edo. de México.	07-May-1998
MOIG	Morelia, Morelia, Michoacán.	22-Ago-1998
TPIG	Tehuacán, Tehuacán, Puebla.	10-Oct-2002
MEIG	Mezcala, Chilpancingo, Guerrero.	09-Mar-2005
MMIG	Maruata, Aquila, Michoacán.	08-Jul-2006
ARIG	Arcelia, Guerrero.	08-Mar-2009
TLIG	Tlapa, Tlapa de Comonfort, Guerrero.	13-Oct-2009
HLIG	Huajuapán, Huajuapán de León, Oaxaca.	08-Dic-2009

Cortesía Ingeniero Jorge Estrada, Jefe de Instrumentación SSN.

3.4. Método de la doble diferencia

Si la separación hipocentral entre 2 eventos sísmicos es pequeña comparada con la distancia entre fuente y estación, entonces las trayectorias entre la región de la fuente y la estación común son similares a lo largo de la totalidad de la trayectoria.

En este caso, las diferencias entre los tiempos de viaje para los 2 eventos observados en una estación se pueden atribuir a la distancia entre eventos [Waldhauser and Ellsworth, 2000]

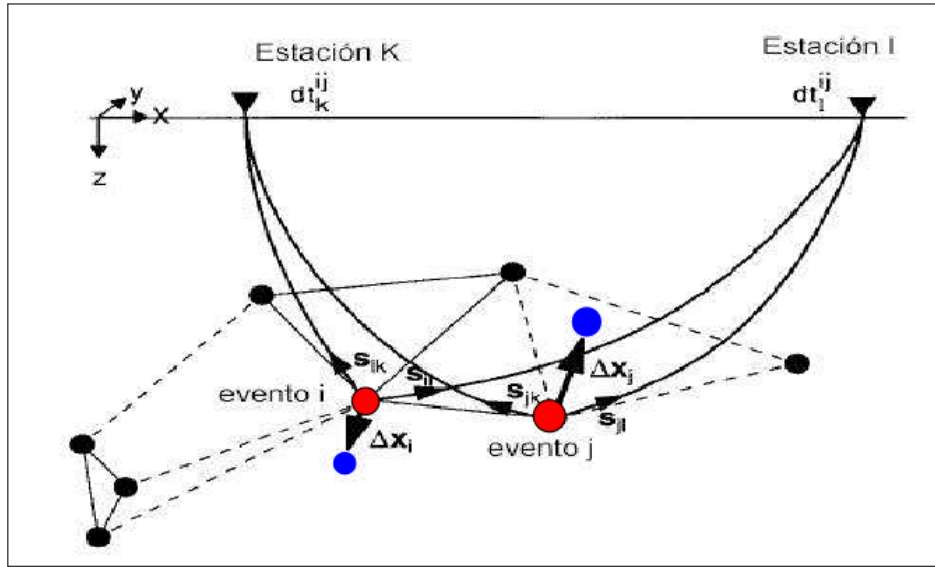


Figura 3.1: Los círculos negros y rojos representan hipocentros de prueba que son ligados a eventos vecinos por correlación cruzada (líneas continuas) o datos del catálogo (líneas punteadas). Para dos eventos i y j las localizaciones iniciales (círculos rojos) con sus respectivos vectores de lentitud s , con respecto a dos estaciones k y l . Las flechas Δx indican el vector de relocalización para los eventos i y j (puntos azules), Δt es la diferencia de tiempo de viaje entre los eventos i y j observada en las estaciones k y l , respectivamente.

Considerando que i es un sismo que se registra en una estación k , el tiempo de arribo de una fase sísmica puede representarse como una función del hipocentro, el tiempo origen, así como de la velocidad sísmica.

$$t_i^k = t_i^k(m_i, v_i^k) \quad (3.1)$$

donde

$$m_i = (x_i, y_i, z_i, \tau), \text{ función del hipocentro}$$

El tiempo de arribo T , para un sismo, i , en la estación sísmica k , puede expresarse usando teoría de rayos como una integral a largo del rayo.

$$T_k^i = \tau_i^k + \int_i^k u ds \quad (3.2)$$

donde

τ : *Tiempo origen de un evento i*

$u(x)$: *Vector de lentitud*

ds : *Elemento de longitud de la trayectoria*

Debido a la relación no lineal entre el tiempo de viaje y la localización del evento se utiliza una expansión en series de Taylor. El problema resultante es uno en el cual el residual para los tiempos de viaje, r , para un evento i , está relacionado linealmente con las perturbaciones Δm , de los parámetros hipocentrales para cada observación k .

$$\frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m^i = r_k^i \quad (3.3)$$

donde $r_k^i = (t^{obs} - t^{cal})_k^i$, t^{obs} y t^{cal} son los tiempos de viaje observados y teóricos respectivamente y $\Delta m^i = (\Delta x^i, \Delta y^i, \Delta z^i, \Delta \tau^i)$ son las variaciones de los parámetros hipocentrales. Tomando las diferencias de la ecuación 3.3, se obtiene una ecuación para los parámetros hipocentrales entre dos eventos i y j , como [Waldhauser and Ellsworth, 2000]:

$$\frac{\partial t_k^{ij}}{\partial m} \Delta m^{ij} = dr_k^{ij} \quad (3.4)$$

donde $\Delta m^{ij} = (\Delta x^{ij}, \Delta y^{ij}, \Delta z^{ij}, \Delta \tau^{ij})$, es el cambio en los parámetros hipocentrales entre dos eventos y las derivadas parciales de t con respecto a m son las componentes del vector de lentitud del rayo que conecta a la fuente con el receptor medido en la fuente.

Suponiendo un vector lentitud constante para los dos eventos, dr_k^{ij} es el residual entre el diferencial del tiempo de viaje observado y el calculado entre dos eventos, definido de la siguiente forma:

$$dr_k^i = (t_k^i - t_k^j)^{obs} - (t_k^i - t_k^j)^{cal} \quad (3.5)$$

La ecuación 3.5 se define como una diferencia doble. La suposición de que el vector lentitud es constante, es valida únicamente para eventos que están suficientemente cercanos entre sí. Una ecuación generalizada para dos eventos i y j se obtiene tomando la diferencia entre la

ecuación 3.3, para cada uno de los eventos i y j y usando un vector de lentitud apropiado.

$$\frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial m} \Delta m^j = dr_k^{ij} \quad (3.6)$$

expandiendo la ecuación 3.6 se tiene:

$$\frac{\partial t_k^i}{\partial x} \Delta x^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial y} \Delta y^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial z} \Delta z^i + \Delta \tau^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial x} \Delta x^j - \frac{\partial t_k^j}{\partial y} \Delta y^j - \frac{\partial t_k^j}{\partial z} \Delta z^j - \Delta \tau^j = dr_k^{ij} \quad (3.7)$$

Las derivadas parciales de los tiempos de arribo t , para los eventos i y j , con respecto a sus localizaciones (x, y, z) y los tiempos de origen (τ) , respectivamente, son calculados para los hipocentros comunes y la localización de la estación donde la k -ésima fase es registrada. Δx , Δy , Δz , $\Delta \tau$ son los cambios requeridos en los parámetros hipocentrales para hacer un mejor ajuste de datos al modelo. La ecuación 3.7 se combina para todas las parejas hipocentrales para una estación, y para todas las estaciones para formar un sistema de ecuaciones lineales de la siguiente forma.

$$WGm = Wd \quad (3.8)$$

Donde G define a una matriz de tamaño $M \times 4N$ (M es el número de observaciones de diferencias dobles y N es el número de eventos) que contiene las derivadas parciales, d es el vector de datos que contiene las diferencias dobles, m es un vector de longitud $4N$, $[\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \tau]^T$ contiene los cambios en los parámetros hipocentrales que se quiere determinar, y W es una matriz diagonal para darle un peso diferente a cada ecuación.

Si un evento esta pobremente ligado a todos los demás, entonces G esta mal condicionada, y la solución de la ecuación 3.8 se vuelve numéricamente inestable. Una forma de regularizar tales sistemas mal condicionados es mediante el prefiltrado de datos, únicamente incluyendo eventos que estén bien ligados a otros. En general esto se logra mediante la selección de pares de eventos que tiene más de un número mínimo de observaciones. Este número depende de la distribución geométrica de las estaciones que registran los dos eventos. Otra forma de regularizar los sistemas mal condicionados es amortiguando la solución. Entonces se tiene el siguiente problema [Waldhauser and Ellsworth, 2000]:

$$W \begin{bmatrix} G \\ \lambda I \end{bmatrix} m = W \begin{bmatrix} d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

siendo λ el factor de amortiguamiento. Una aproximación a la ecuación 3.8 en un esquema pesado de mínimos cuadrados, mediante el uso de un sistema de ecuaciones normalizadas (norma L2), representado por [Waldhauser and Ellsworth, 2000]:

$$\hat{m} = (G^T W^{-1} G)^{-1} G^T W^{-1} d \quad (3.10)$$

Donde, \hat{m} es usada para denotar la estimación de mínimos cuadrados de m . Para conjuntos de datos pequeños y sistemas bien condicionados, la ecuación anterior se resuelve mediante el método de descomposición en valor singular (DVS) [Waldhauser and Ellsworth, 2000]:

$$\hat{m} = V \Lambda^{-1} U^T d \quad (3.11)$$

Donde U y V son dos matrices de los vectores singulares ortonormales de la matriz pesada G y Λ es una matriz diagonal con los valores singulares de G . Si el sistema a resolver es grande el método DVS es ineficiente. En este caso se encuentra la solución de sistema mediante el algoritmo de gradiente conjugado (LSQR) que resuelve el problema de mínimos cuadrados con amortiguamiento:

$$\left\| W \begin{bmatrix} G \\ \lambda I \end{bmatrix} m - W \begin{bmatrix} d \\ 0 \end{bmatrix} \right\|_2 = 0 \quad (3.12)$$

para encontrar \hat{m} .