

# Análisis y optimización de redes sismológicas. Aplicación al estudio de la sismicidad natural e inducida por embalses

*Analysis and optimization of seismological networks. Application to the study of natural and reservoir induced seismicity*

R. Lindo. y M. Herraiz

Departamento de Geofísica y Meteorología. Facultad de Ciencias Físicas. Universidad Complutense, 28040 MADRID

## ABSTRACT

*A methodology is proposed with the goal of obtaining optimal configurations of local seismological networks. This is performed by the analysis of characteristic parameters like covariance matrix, condition number, etc. Some tests have been made by using simple geometrical configurations and a local network has been proposed for the Entrepeñas reservoir.*

**Key words:** *Seismicity, reservoir induced seismicity, optimization, detectability.*

*Geogaceta, 20 (6) (1996), 1355-1357  
ISSN:0213683X*

## Introducción

La configuración geométrica de una red sismológica juega un papel decisivo en la precisión con que se localiza el hipocentro de un evento sísmico. Por ello este problema ha sido objeto de numerosos estudios (Kijko 1977; Rabinowitz & Steinberg, 1990; Steinberg *et al.* 1995; etc). Este aspecto y los gastos que imponen la instalación y el mantenimiento de una red sismológica, son motivaciones importantes en el momento de diseñar una red destinada a la vigilancia de la sismicidad natural y/o inducida.

La optimización de una red puede ser cuantificada en término de los errores en la determinación de los parámetros hipocentrales. Se espera que estos sean mínimos y constantes en el área de interés y que la importancia de los datos de cada una de las estaciones sea igual en la determinación hipocentral.

Con esta finalidad se presenta una metodología de optimización de redes sismológicas, en la que se utiliza un programa informático resultado de la adaptación de HYPOINVERSE (Klein, 1978). La metodología se caracteriza por una evaluación directa de parámetros que interpretan la eficiencia de la red para localizar hipocentros. También presenta la ventaja de posibilitar una simulación flexible de la capacidad de detección de la red estudiada.

## Método

Al formalizar el problema de la determinación hipocentral, se llega a un sistema de «m» ecuaciones lineales:

$$\mathbf{A}_{(m \times 4)} \delta \mathbf{x}_{(4)} = \mathbf{r}_{(m)} \quad (1)$$

denominada ecuación de condición, donde se tiene:

m = número de ecuaciones y número total de observaciones de las fases P y S  
x\* = hipocentro de ensayo

A<sub>ij</sub> = matriz de derivadas parciales de los tiempos de recorrido

$$\delta \mathbf{x} = (\delta t, \delta x, \delta y, \delta z)^T$$

$$\mathbf{r} = (r_{i(x^*)}, i=1, m)^T$$

$$r_{k(x^*)} = \tau_k - t_{k(x^*)}$$

$$= \tau_k - T_{k(x^*)} - t^*$$

τ<sub>k</sub> = tiempo de llegada observado

t<sub>k(x\*)</sub> = tiempo de llegada teórico = tiempo de recorrido + tiempo origen

Geoméricamente, para resolver este sistema lineal partimos de un hipocentro de ensayo que se perturba con el objetivo de conseguir que los residuos temporales r<sub>k</sub> sean mínimos. El cálculo de estos residuos implica el conocimiento del modelo de velocidades y la determinación final del hipocentro será realizada iterativamente.

Formalmente, la solución del problema antes citado conduce a una inversión de la matriz A que puede ser realizada usando el método denominado de descomposición en valores singulares (SVD). Este procedimiento presenta, entre otras, la ventaja de determinar el grado de singularidad de la matriz A y esti-

mar los parámetros que evaluarán la eficiencia de la red sismológica en cuestión.

Los parámetros de interés, antes mencionados, son los siguientes:

La matriz de covarianza, cuyos valores diagonales posibilitan el cálculo de los errores hipocentrales (para el tiempo y las coordenadas x, y, z).

El error epicentral, determinado a partir de los respectivos errores para las coordenadas x e y.

El condicionamiento de la matriz A, que estima su grado de singularidad.

La importancia de los datos, que mide la contribución del tiempo de llegada de una onda P o S a una estación dada en el proceso de la localización hipocentral.

En la práctica, el cálculo de estas variables se realiza como un resultado parcial de la localización.

## Program HIERR

El algoritmo descrito anteriormente ha sido desarrollado informáticamente adaptando el programa de localización hipocentral HYPOINVERSE (Klein, 1978). Para ello no se utiliza la parte donde se realiza la localización, pues suponemos una serie de hipocentros teóricos ubicados en una malla a una profundidad dada y calculamos las variables que estiman la eficiencia de la red en las posiciones ocupadas por ellos. Esto permite regionalizar el área de interés para cada variable y estimar cual es la subregión mejor vigilada por la red.

En la figura 1 se presenta el diagrama de flujo del programa. Los ficheros de entrada son los siguientes:

test: incluye todos los parámetros de cálculo del programa original HYPOINVERSE.

field.par: coordenadas en km de los puntos extremos del área de interés (al SO y al NE), con respecto al centro de la red, y el número de puntos (en x e y) donde se calculan las variables de interés.

phasalt: descripción del estado de de-

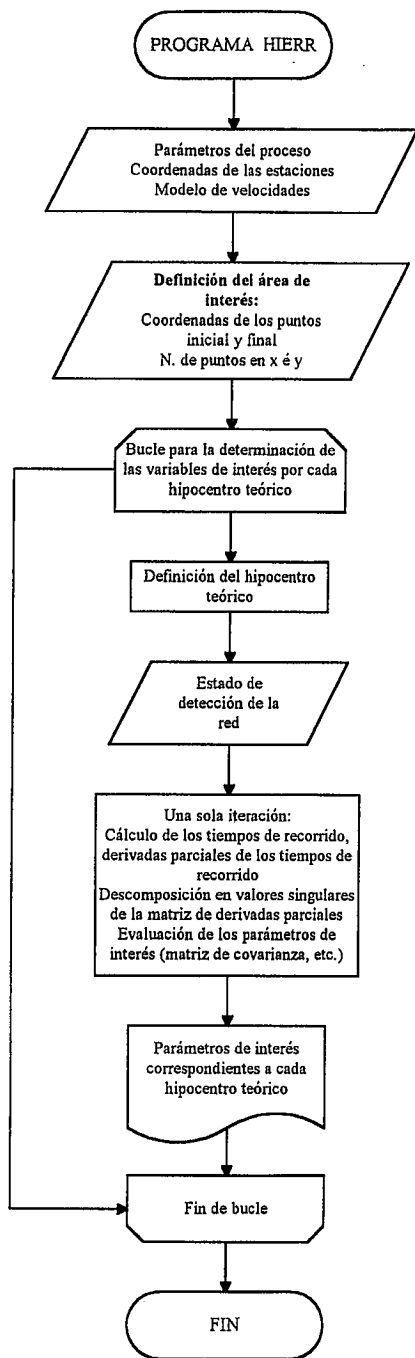


Fig. 1.- Diagrama de flujo del programa HIERR.

Fig. 1.- Flow-chart of HIERR program.

tección de la red; comprende los nombres de las estaciones que detectan un evento teórico y los pesos de las fases P y S. En principio, phasalt contiene la descripción relativa a un subconjunto de estaciones del fichero «estacion».

modelo: modelo de velocidades.

El fichero de salida más importante es fort.10. Contiene todas las variables o parámetros de interés calculados en cada punto (x,y) que corresponde al epicentro de un evento teórico.

La validez del programa HIERR ha sido confirmada aplicándolo al caso de una red con configuración triangular previamente estudiado por Lienert *et al.* (1986) y por Uhrhammer (1980). La figura 2 muestra las desviaciones estándar de los parámetros hipocentrales (tiempo origen, x,y,z) obtenidos con el programa y que concuerdan básicamente con los al-

canzados por dichos autores. El modelo de corteza utilizado es un semiespacio con velocidades para las ondas P y S iguales a 5.6 y 3.3 km/s, respectivamente. Se supone un error de lectura de 0.05 s para ambas fases y los hipocentros sintéticos se localizan a 10 km de profundidad separados entre sí por 2.5 km en x e y. Es necesario recalcar que el error en z (parámetro siempre crítico) es menor en la proximidad de las estaciones periféricas.

**Aplicación: propuesta de una red para el embalse de Entrepeñas**

Una vez comprobada la corrección del programa, ha sido aplicado a un caso práctico relacionado con el embalse de Entrepeñas (Guadalajara). En la Comunicación sobre el análisis del efecto de la carga en la producción de sismicidad in-

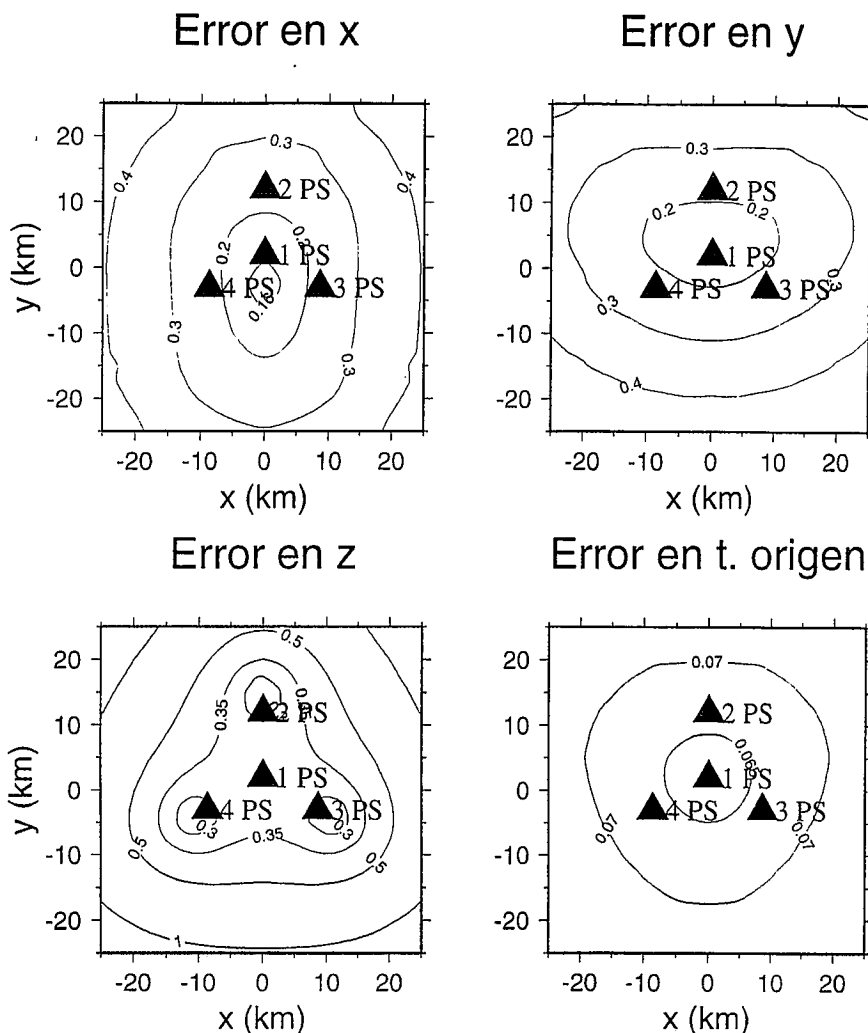


Fig. 2.- Desviaciones estándar de los parámetros hipocentrales (x, y, z y tiempo origen) para una red de cuatro estaciones representadas por triángulos. Los valores de las isofleas corresponden a kilómetros para x, y, z y segundos para t.

Fig. 2.- Standard deviations for the hypocentral parameters (x, y, z and origin time) for a four-station seismic array. Triangles stand for the stations. Contour lines are labeled in kilometers for x, y and z and in seconds for t

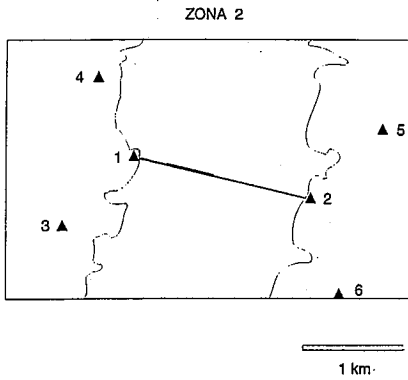


Fig. 3.- Configuración de la red sísmológica propuesta para una zona del embalse de Entrepeñas. La pequeña línea gruesa representa la proyección de la zona crítica producida por el efecto de carga (ver Herraiz y Lindo, en este número)

Fig. 3.- Configuration of the seismological network proposed for the Entrepeñas reservoir. The small thick line represents the horizontal projection of the critical zone generated by the load effect (see Herraiz y Lindo, in this issue)

ducida, se estudió dicho embalse (Herraiz y Lindo, en este número) estimándose una posible zona crítica en la que, eventualmente, podrían ocurrir eventos sísmicos inducidos por el efecto de carga. La aplicación que se presenta consiste en establecer diversas configuraciones de sísmógrafos que permitan realizar una localización hipocentral óptima de los eventos generados en dicha zona.

Se ha considerado una configuración general de 6 estaciones (figura 3) de la cual se seleccionan 2 subconjuntos de 4 estaciones cada uno, dispuestas en forma triangular. Estos subconjuntos se denominarán subred1=(1,2,3,4) y subred2=(2,1,5,6). La distancia aproximada entre las estaciones especificadas por los pares (1,4), (1,3), (2,5) y (2,6) es de 1 km, y la correspondiente entre las estaciones 1 y 2 es de 1.75 km. Otras condiciones de la experiencia han sido las siguientes: el modelo de velocidades corresponde a un semiespacio homogéneo con una velocidad para las ondas P de 6 km.s<sup>-1</sup> y una razón Vp/Vs de 1.74; la profundidad de los hipocentros teóricos es de 0.5 km y se encuentran localizados sobre una malla con nudos separados uniformemente de 0.5 km; la capacidad de detección de la red de las fases P y S, los pesos de lectura de dichas fases y el error

Red Entrepeñas ztr= .5 km Error en z(proj).

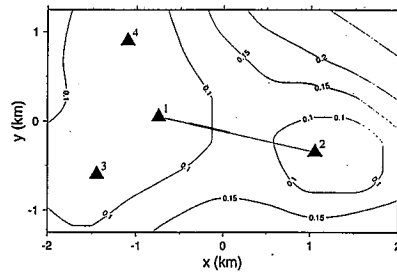


Fig. 4.- Error en profundidad para el caso 1 de la Red de Entrepeñas. Los triángulos indican las estaciones. La línea que une las estaciones 1 y 2 señala el corte utilizado en el cálculo de la variación de los esfuerzos y la pequeña línea gruesa representa la proyección sobre la superficie de la zona crítica. Los contornos indican los errores expresados en km.

Fig. 4.- Depth errors for the case 1 of the Entrepeñas network. Triangles represent stations; the line joining stations 1 and 2 shows the cross-section used in the determination of the stress increments and the small thick line stands for the horizontal projection of the critical zone. Contours represent errors in kilometers.

de lectura son particularizados para cada uno de los 4 casos. Se presenta como ejemplo los resultados del caso 1.

**Caso 1 (Figura 4):** La configuración considerada corresponde a la subred 1. La recepción de las fases P y S está asegurada en todas las estaciones; sus pesos son, respectivamente, 0 (calidad óptima) y 1 (calidad típica para datos digitales) y el error de lectura es de 0.01 s. Esta situación es la que mejor resultados ofrece: los errores para z, en el entorno del área crítica, son del orden de 0.1 km y en todo caso siempre menores de 0.15 km. Cuando se tiene en cuenta toda la extensión del área de interés los errores son, casi siempre, menores de 0.3 km.

**Discusión y conclusiones**

Se ha desarrollado un instrumento de análisis de la configuración de redes sísmológicas sobre la base de un programa estándar de localización hipocentral, de uso frecuente. La finalidad de este tipo de programas es el estudio de las diversas configuraciones posibles para una red sísmica local y la elección de la que permita obtener los errores de localización

mínimos. Los principales parámetros que sirven para estimar la eficiencia de la red son las desviaciones estándar, la importancia de las estaciones y el valor del condicionamiento. Su aplicación a un caso real (embalse de Entrepeñas) permite proponer una red mínima con la finalidad de realizar la vigilancia de una supuesta sismicidad inducida.

Una característica importante de la metodología aquí presentada es la posibilidad de simular diversos estados de detección de la red. Recientemente, autores como Steinberg *et al.* (1995) han subrayado que este aspecto debe ser considerado en todo los análisis de configuraciones de redes sísmológicas.

La técnica explicada en la Comunicación de Herraiz y Lindo (en este número) y la aquí descrita forman una metodología simple, económicamente viable, y que puede ser útil para realizar una vigilancia sistemática de zonas de España en las que es posible la presencia de sismicidad inducida.

**Agradecimientos**

El presente trabajo ha sido uno de los resultados del Proyecto de Investigación: «Optimización del diseño de redes de microsismicidad. Aplicación a la sismicidad natural e inducida por grandes presas en la Comunidad de Madrid y áreas próximas», financiado por la Fundación Caja de Madrid.

**Referencias**

Herraiz, M. y Lindo, R. (1996): *en este número*.  
 Kijko, A. (1977): *PAGEOPH* 115, 999-1009.  
 Klein, F. (1978): *U. S. Geol. Surv. Open-File Rept.* 78-694.  
 Lienert, B. R.; Frazer, L. N. y Rudman, A. J. (1986): *Geological Survey Occasional Paper* 52.  
 Rabinowitz, N. y Steinberg, D. M. (1990): *Bull. Seism. Soc. Am.* 80, 187-196.  
 Steinberg, D. M.; Rabinowitz, N.; Shmshon, Y. y Mizrahi, D. (1995): *Bull. Seism. Soc. Am.* 85, 1847-1857.  
 Uhrhammer, R. A. (1980): *Bull. Seism. Soc. Am.* 70, 1369-1379.