

Análisis de la eficiencia de una red sísmica local. Aplicación al conocimiento de la sismicidad natural e inducida

R. LINDO^{1,2} y M. HERRAIZ¹

¹ Departamento de Geofísica y Meteorología, Facultad de Ciencias Físicas,
Universidad Complutense, 28040, Madrid.

² Ecole et Observatoire de Physique du Globe, 5, rue René Descartes, Université
Louis Pasteur (Strasbourg 1), 67084 Strasbourg Cedex, Francia

RESUMEN

En este artículo se analiza la eficiencia de una red sísmica local para determinar la localización hipocentral de microterremotos, y se describen las características generales de un programa de cálculo, basado en el Hypoinverse (Klein, 1978), que evalúa dicha eficiencia. Este programa también permite estimar, para cada una de las estaciones, la contribución a la solución hipocentral de las fases P y S registradas en ella. El programa se ha aplicado a dos redes ya estudiadas por otros autores. La comparación de los resultados pone de manifiesto la validez de las modificaciones realizadas y alerta sobre la influencia que tiene la forma de asignar los pesos a las observaciones. Finalmente, se muestra la utilidad del programa aplicándolo a casos reales de sismicidad natural y sismicidad inducida por embalses.

Palabras clave: Microsismicidad, embalses, sismicidad inducida, redes, configuración, capacidad de detección.

ABSTRACT

The performance of a local seismic network in determining microearthquake hypocentral coordinates and origin times is analyzed in this article. The main characteristics of a computer program, based on Hypoinverse (Klein, 1978) and aimed at evaluating the efficiency of this kind of networks, are also described. The proposed program allows us to estimate the contribution of every P or S phase to the hypocentral solution. Its application to two networks previously studied, confirms the utility of the modifications introduced and underlines the influence of the criterium chosen to assign weights to observations. Finally, the new program is applied to real cases of natural and reservoir-induced seismicity.

Key words: Microseismicity, reservoirs, induced seismicity, networks, configuration, detectability.

INTRODUCCIÓN

La correcta localización de los hipocentros constituye un dato fundamental en muchos estudios de Sismología aplicada a Ingeniería Civil. Por ejemplo, la determinación de fallas activas; el análisis de la sismicidad inducida por una presa o una explotación petrolífera, o el cálculo de la peligrosidad sísmica de un emplazamiento, son prácticamente imposibles sin un conocimiento preciso de dónde se han originado los fenómenos sísmicos. La solución de este problema, que debido a su carácter no lineal dista de ser sencilla, depende, básicamente, de tres factores: la exactitud en la lectura de las fases; la corrección del modelo de corteza empleado, y el número y la distribución de las estaciones utilizadas. La importancia relativa de estos factores ha sido objeto de análisis continuo, sobre todo desde el inicio del uso de los ordenadores electrónicos. (Ver por ejemplo: Bolt, 1960; Flynn, 1960; Nordquist, 1962; Cisternas, 1964; Freedman, 1968; Lee and Lahr, 1974; Klein, 1978; Lahr, 1979; Ellsworth and Roecker, 1981; Uhrhammer, 1982; Mykkelleit *et al.*, 1983; Lienert *et al.*, 1986; Gomberg *et al.*, 1990; Lahr, 1992; Gomberg, 1995). La aplicación de estos estudios a redes permanentes en España, en especial a la Red Sísmica Nacional, ha sido realizada en numerosos trabajos (García Fernández, 1986; Martínez Solares, 1992; Mezcua y Rueda, 1993; Rueda, 1995), pero la optimización de pequeñas redes locales ha recibido mucha menos atención, a pesar de su notable interés práctico. El presente trabajo busca contribuir a llenar este vacío evaluando la eficacia de una red sísmica para localizar eventos y la importancia relativa que en esta localización tiene una determinada fase registrada en una estación concreta. Para ello utiliza la línea de estudio iniciada por Uhrhammer (1980) y desarrollada por Lienert *et al.*, (1986) que analiza estas cuestiones en el marco de la inversión linealizada. La realización del trabajo ha dado lugar a un programa informático desarrollado en base a Hypoinverse (Klein, 1978) y que ha sido aplicado a problemas concretos.

PLANTEAMIENTO TEÓRICO

Si representamos por \mathbf{x}^* el vector de las coordenadas de un hipocentro de ensayo y τ_k es el tiempo de llegada observado, $t_{k(\mathbf{x}^*)}$ el tiempo de llegada teórico y $r_{k(\mathbf{x}^*)}$ la diferencia entre ambos, y si el número total de observaciones es «m», la formulación del problema de la determinación hipocentral conduce al establecimiento del siguiente sistema sobredeterminado de «m» ecuaciones lineales,

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

En este sistema, denominado ecuación de condición, A_{ij} es la matriz de derivadas parciales de los tiempos de recorrido; $\delta \mathbf{x} = (\delta t, \delta x, \delta y, \delta z)^T$ el vector de ajuste de los parámetros hipocentrales y $\mathbf{r} = r_{i(\mathbf{x}^*)}^T$ el vector de los residuos.

Los índices i, k varían entre 1 y m y el tiempo de llegada teórico es el tiempo origen más el tiempo de recorrido.

Geoméricamente, la solución del problema planteado consiste en calcular la perturbación δx del hipocentro de ensayo x^* de manera que los residuos de r_k se hagan mínimos. Ello puede conseguirse, por ejemplo, estableciendo el sistema de ecuaciones normales, pero este procedimiento se enfrenta con la dificultad de que estos sistema son muchas veces singulares. Otro camino es efectuar la descomposición en valores singulares, SVD; con él es posible obtener una solución del problema y evaluar el grado de singularidad (Press *et al.*, 1992). En este método la matriz de derivadas parciales es expresada de la siguiente manera:

$$A_{(m \times 4)} = U_{(m \times 4)} S_{(4 \times 4)} V_{(4 \times 4)}^T \quad (2)$$

donde U es la matriz de los autovectores de AA^T ; V la matriz de los autovectores de $A^T A$ y S la matriz diagonal de los valores singulares de A tal que S_{ii}^2 son los valores comunes de los autovalores de AA^T y $A^T A$.

Las matrices generadas originan los siguientes parámetros que permiten estimar la eficiencia de la red sísmológica.

1. La matriz de Covarianza C :

$$C_{(4 \times 4)} = \omega^2 V_{(4 \times 4)} S_{(4 \times 4)}^2 V_{(4 \times 4)}^T \quad (3)$$

donde ω^2 es una constante igual a la varianza de los tiempos de llegada (el cuadrado del error de lectura).

2. El elipsoide de error, definido a partir de la diagonalización de la parte espacial de la matriz de covarianza. Proporciona las longitudes y orientaciones (acimutes y ángulos respecto al Nadir) de los ejes principales que permiten estimar los errores vertical y horizontales.

3. Los errores en el tiempo origen y en las tres coordenadas espaciales

$$\sigma_{ii} = \sqrt{C_{ii}} \quad (4)$$

Las variables t, x, y, z se corresponden, respectivamente, con 1, 2, 3 y 4.

4. El error epicentral, definido como:

$$\sigma_{xy} = \sqrt{(\sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2)} \quad (5)$$

El programa Hypoinverse define este error como la longitud de la proyección sobre el plano horizontal del eje principal máximo del elipsoide de error (Klein, 1978).

5. El condicionamiento de la matriz A, $c(A)$, que estima su singularidad:

$$c(A) = \text{Max} (S_{ij}) / \text{min} (S_{ij}) \quad (6)$$

6. La importancia de los datos definida a partir de la matriz densidad de la información B

$$B_{(mxm)} = U_{(mx4)} U_{(4xm)}^T \quad (7)$$

$$ID_j = B_{jj} \quad (8)$$

Esta es una medida de la contribución que el tiempo de llegada de una onda P o S a una estación determinada tiene en la localización hipocentral e incluye el efecto de los pesos sobre cada fase. En la práctica, la interpretación de la importancia de un dato concreto es la siguiente: un valor próximo a la unidad indica que esta observación es esencial en la localización mientras que un valor cercano a cero implica que el dato es poco relevante.

EL PROGRAMA HIERR

Con objeto de buscar la distribución óptima de una red de pequeña densidad diseñada para el estudio de la sismicidad de carácter local, se ha desarrollado el programa HIERR. Este programa evalúa la variación espacial de los errores en la localización hipocentral y permite mejorar la distribución de las estaciones e incrementar su capacidad de localización. Como variables fundamentales considera la geometría de la red, el modelo de corteza, y el tipo y la calidad de las lecturas en cada una de las estaciones. El punto de partida ha sido el programa Hypoinverse (Klein, 1978), al que se le ha introducido una serie de modificaciones que permiten estimar las variables definidas en el apartado anterior para un conjunto de puntos distribuidos uniformemente bajo el área de interés. Posteriormente, y en base a estos resultados, es posible dibujar las curvas de nivel correspondientes.

Como es bien sabido, el programa Hypoinverse utiliza la descomposición en valores singulares para obtener por iteraciones sucesivas los parámetros hipocentrales. Asimismo, el programa proporciona la matriz de covarianza y el elipsoide de errores. Las modificaciones introducidas en nuestro trabajo afectan al programa principal y a las subrutinas Hyloc, Hyphs e Hysum, así como a los ficheros de entrada y salida. El hipocentro de ensayo, característico del proceso de localización en el Hypoinverse, es sustituido por hipocentros sintéticos situados en una trama construida bajo la zona de análisis, a una profundidad elegida. En vez de considerar tiempos de llegada observados se utilizan tiempos teóricos, por lo que los residuos para cada fase y estación son cero. La matriz de covarianza y los resultados relacionados con ella se obtienen después

de cada iteración. El parámetro z interviene desde el principio en la determinación de las variables de interés, a diferencia de Hypoinverse, que realiza varias pruebas considerando únicamente las variables t , x , y , y sólo cuando el epicentro cumple un criterio de convergencia introduce el parámetro z . Este cambio es necesario si tenemos en cuenta que, en nuestro caso, no se está realizando una localización. Además, las características del problema permiten no tener en cuenta el factor que evalúa la influencia de la distancia epicentral. Por tanto, únicamente se consideran los pesos por estación y fase.

Por último, mientras que los análisis realizados por Uhrhammer (1980) y Lienert *et al.* (1986) consideraban únicamente la posibilidad de que las fases S hubiesen sido registradas en todas o en ninguna de las estaciones, el programa Hierr también permite evaluar la respuesta de la red cuando la fase S ha sido registrada sólo en una o varias estaciones. De esta manera se analizan situaciones más reales y se facilita el estudio de la influencia de una estación concreta.

PRUEBA DEL PROGRAMA HIERR

El correcto funcionamiento del programa ha sido comprobado aplicándolo a las redes utilizadas por Uhrhammer (1980) y Lienert *et al.* (1986) y comparando los resultados obtenidos. Una adaptación del programa Hypoerr utilizado por estos últimos autores también ha sido empleada previamente por nosotros en otros trabajos (Lindo y Herraiz, 1995).

La red utilizada por Uhrhammer (1980) consta de cuatro estaciones, de las que tres forman un triángulo equilátero de 10 km de lado, en cuyo centro se sitúa la cuarta estación. El modelo de corteza asumido 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 con una distancia entre ellos de 2,5 km en x e y . La rejilla utilizada en el área de interés (50 x 50 km²) comprende 21 x 21 = 441 puntos. La figura 1 muestra las desviaciones estándar de los parámetros hipocentrales. El error mínimo del tiempo origen es 0,06 s. Los errores para x e y dentro del área ocupada por la red son menores de 0,25 km y presentan la previsible simetría respecto del eje y . En todos los casos, la forma de las isóneas coincide con la obtenida por Uhrhammer (1980) y Lienert *et al.*, (1986). Esto puede comprobarse, por ejemplo, comparando el error en z de la figura 1 con la figura 2 que presenta los resultados obtenidos por Uhrhammer (1980) (arriba) y por nosotros utilizando la adaptación del programa Hypoerr (abajo). Se aprecia también que los valores conseguidos con esta adaptación, que coinciden con los de Lienert *et al.* (1986) utilizando la versión original, son la mitad de los indicados por Uhrhammer. Dicha discrepancia parece deberse a que este autor representa, realmente, los límites de confianza del 95 por ciento en lugar de las desviaciones estándar (Lienert *et al.*, 1986).

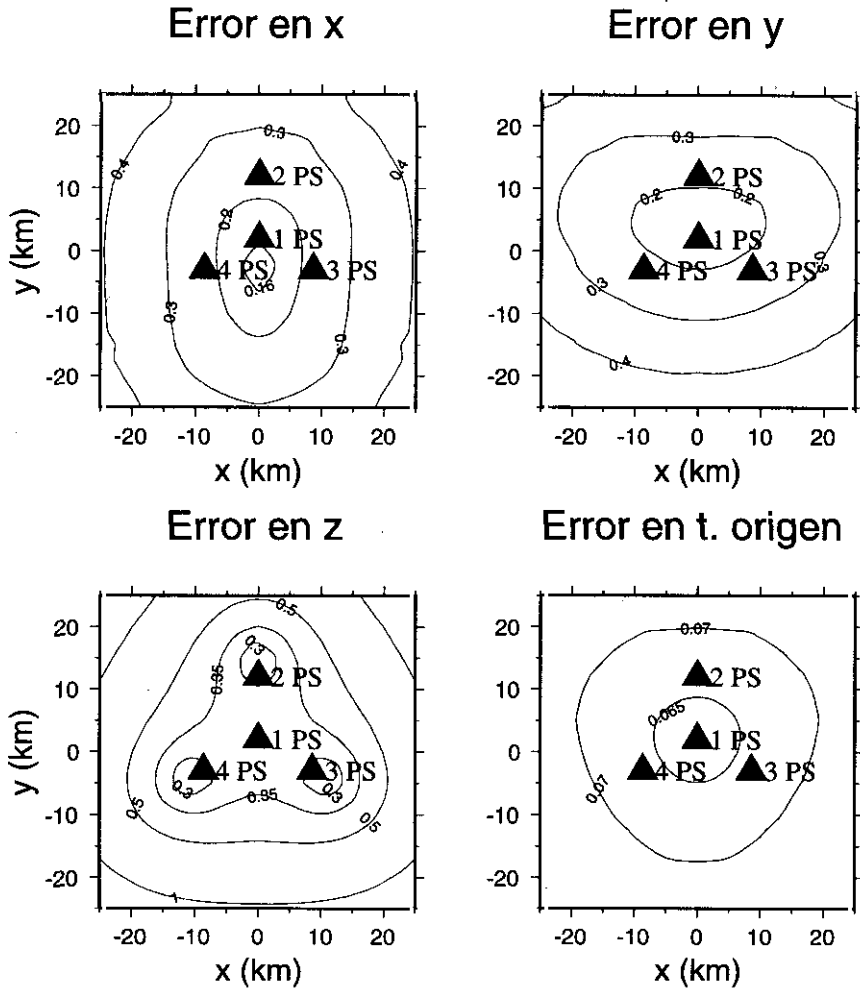


Fig. 1. Desviaciones estándar de los parámetros hipocentrales, x , y , z , y el tiempo origen, para la red triangular introducida por Uhrhammer (1980). Los triángulos representan las estaciones y se han indicado las fases utilizadas en el cálculo. El error de lectura es 0,05 s. para todas las fases. El modelo utilizado es un semiespacio con velocidad de ondas P de 5,6 km/s y la profundidad de los hipocentros sintéticos es 10 km. Los valores de las isolíneas corresponden a kilómetros para x, y, z y segundos para t .

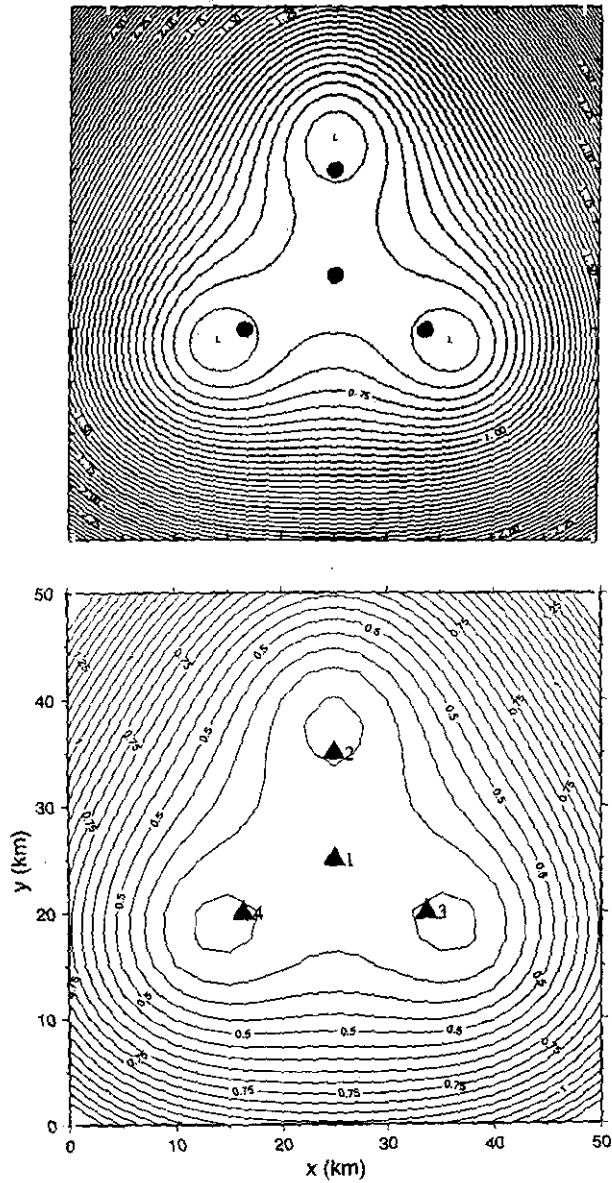


Fig. 2. Distribución de errores para z en la red triangular. Arriba, resultado obtenido por Uhrhammer (1980). Abajo, resultado obtenido utilizando el program Hypoerr de Lienert *et al.* (1986). Los valores indican kilómetros.

La figura 3 representa la importancia de los datos evaluando de una manera independiente el papel de las fases P y S en cada estación. La estrella indica la estación y la fase consideradas en cada uno de los análisis. Así, 1 y 2 corresponden, respectivamente, a las fases P y S en la estación 1; 3 y 4 a las fases P y S en la estación 2, etc. Los valores de las isolíneas indican la distribución de la importancia de la observación estudiada, medida de 0 a 1. Se puede comprobar la mayor importancia de las fases S señalada por muchos autores (Gomberg *et al.*, 1990), y la preponderancia de las lecturas en las estaciones periféricas respecto de la estación central. El papel de las fases S observadas en estas estaciones es fundamental para la determinación de los epicentros situados fuera de la red.

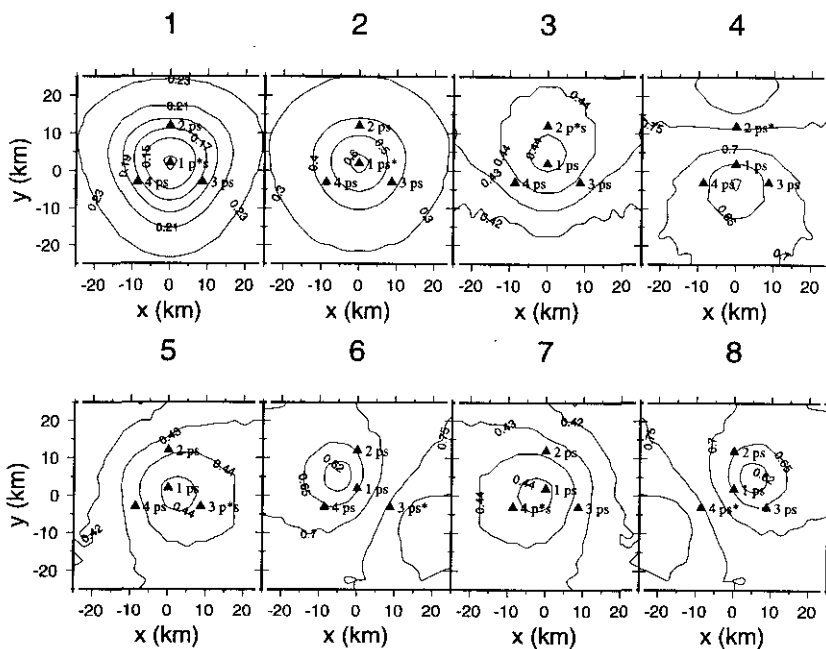


Fig. 3. Importancia de los datos para la red triangular y la fase señalada con un asterisco. El parámetro puede variar entre 0 y 1. Cabe resaltar los mayores valores correspondientes a las estaciones periféricas (2, 3 y 4) y a las fases S.

Otro ensayo del programa Hierr ha sido realizado utilizando la red de 8 estaciones establecida por el Instituto de Geofísica de Hawai en el archipiélago de Galápagos. Lienert *et al.* (1986) aplican el programa Hypoerr a esta red considerando un modelo de corteza de 8 capas, una relación V_p/V_s igual a 1,78. En nuestro caso, además de estos parámetros, se han tomado fases P y S en todas las estaciones y se ha aceptado para ambas un error de

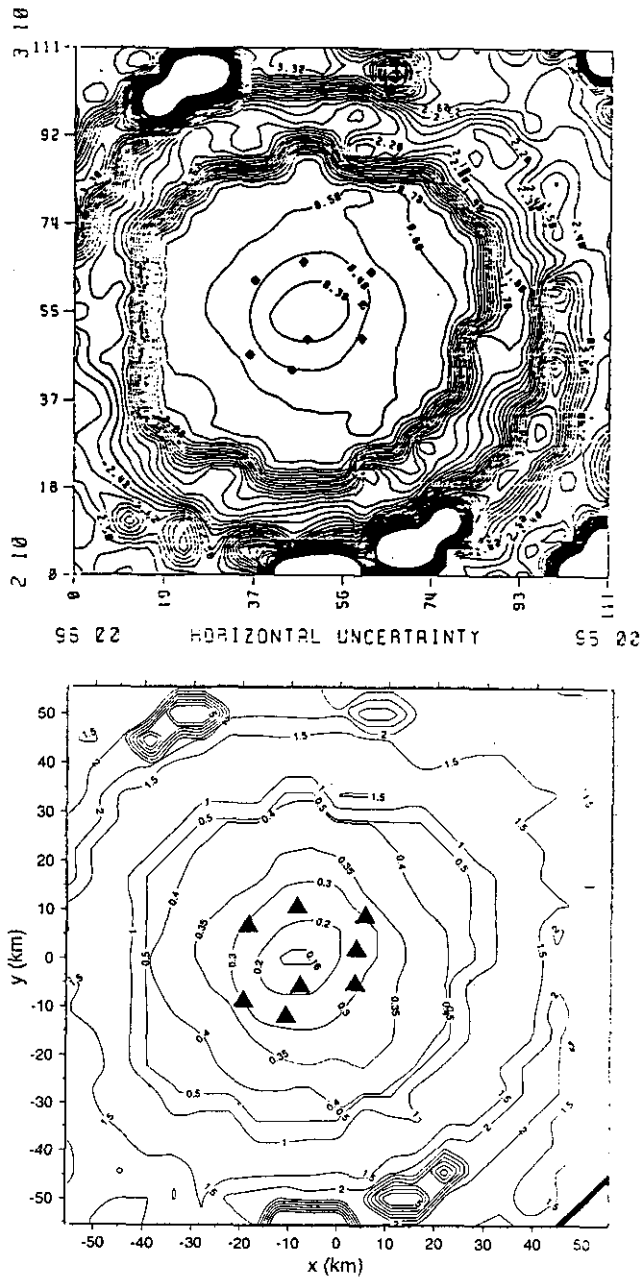


Fig. 4. Aplicación de los programas Hypoerr (Lienert *et al.*, 1986) (arriba) y Hierr (abajo) a la red de Galápagos. La profundidad de los terremotos de ensayo es 5 km y se han considerado fases P y S en todas las estaciones. Los valores de las isólineas indican kilómetros.

lectura de 0.05 s. La profundidad de los terremotos de ensayo es 5 km y, como en el caso anterior, se han estimado las variables en un área de 50 x 50 km². Como puede apreciarse en la figura 4, que presenta los resultados del cálculo de incertidumbres epicentrales obtenidos con Hypoerr (arriba) y Hierr (abajo), las isolíneas tienen la misma forma pero los valores son, en el segundo caso, un 30% menores. Ello puede atribuirse al diferente tratamiento de los errores utilizado en estos programas. Así, mientras en el programa Hypoerr, Lienert *et al.* (1986) introducen los errores de P y S separadamente, en Hierr se declara un error de lectura común a ambas fases y se asignan pesos a las lecturas en cada estación y fase de acuerdo con su calidad. Es decir, en el primer caso se diferencian inicialmente las fases P y S, pero luego se trata igual a todas las del mismo tipo. En el segundo, se atribuye el mismo error en la lectura a ambas fases y la diferencia de calidad se incluye en el peso de cada lectura en cada estación. Esta importante discrepancia obliga a considerar el sentido físico de los dos procedimientos y a evaluar nuevamente algunos de los resultados obtenidos anteriormente por distintos autores. Sin embargo, no impide la aplicación del programa a la optimización de redes ya que, en este caso, lo importante son las diferencias en los valores obtenidos con una u otra distribución de estaciones, no sus valores absolutos.

APLICACIONES

El programa Hierr ha sido aplicado a la red de microsismicidad que la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos S.A. (ENRESA) operó, durante varios años, en torno al depósito de residuos sólidos de baja y moderada radiactividad de El Cabril (Córdoba). Su objetivo era reunir información acerca de la actividad sísmica de la zona. Para ello contaba con 7 estaciones, separadas aproximadamente 20 km entre sí; seis de ellas dispuestas en torno al emplazamiento del depósito y la séptima situada en sus instalaciones. La red de microsismicidad se completaba con un acelerómetro colocado en las proximidades de esta última estación. Nuestro ensayo se ha realizado utilizando un modelo de corteza de 3 capas y una relación V_p/V_s de 1,72. Los hipocentros sintéticos se han situado a una profundidad de 10 km, cada 2,5 km en x e y . El error de lectura considerado ha sido 0,25 s. Como ejemplo, la figura 5 presenta la distribución de los errores epicentrales (arriba) y del parámetro z (abajo). El análisis detallado de esta red comprobó la gran mejora en la determinación hipocentral conseguida al utilizar fases S. Asimismo puso de relieve la escasa influencia de sustituir el modelo de corteza por otro similar pero con cuatro capas, y permitió elaborar una propuesta de ampliación de la red que mejoraba notablemente su capacidad teórica de localización.

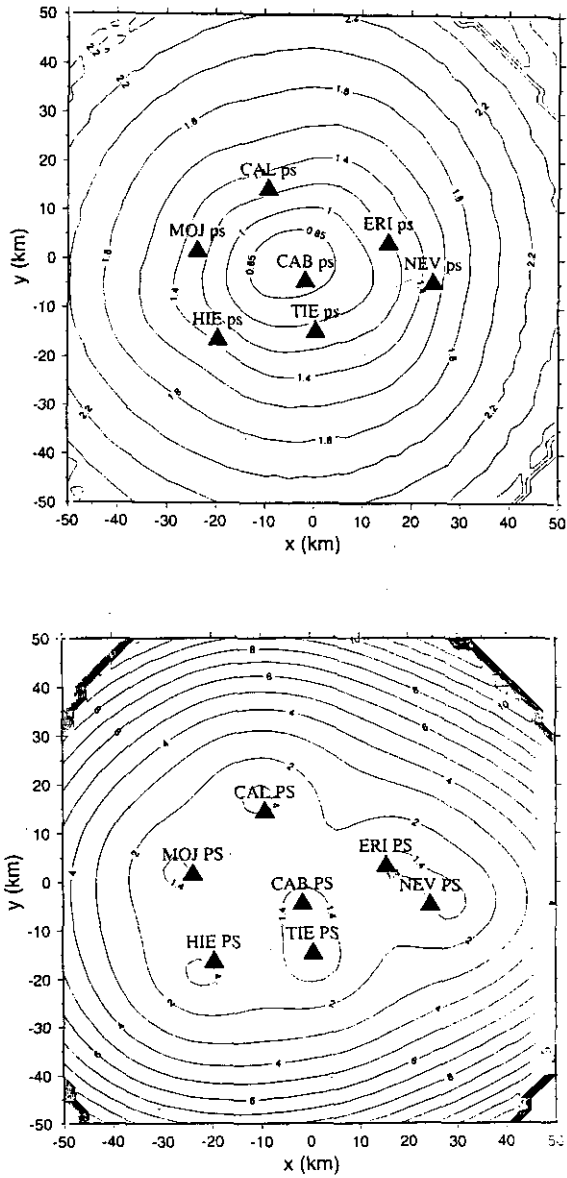


Fig. 5. Aplicación del programa Hierr a la red de El Cabril. Arriba, distribución de errores epicentrales. Abajo, distribución para z. Se han tomado fases P y S en todas las estaciones y se ha considerado un error de lectura de 0,01 s. Los valores de las isolíneas corresponden a kilómetros.

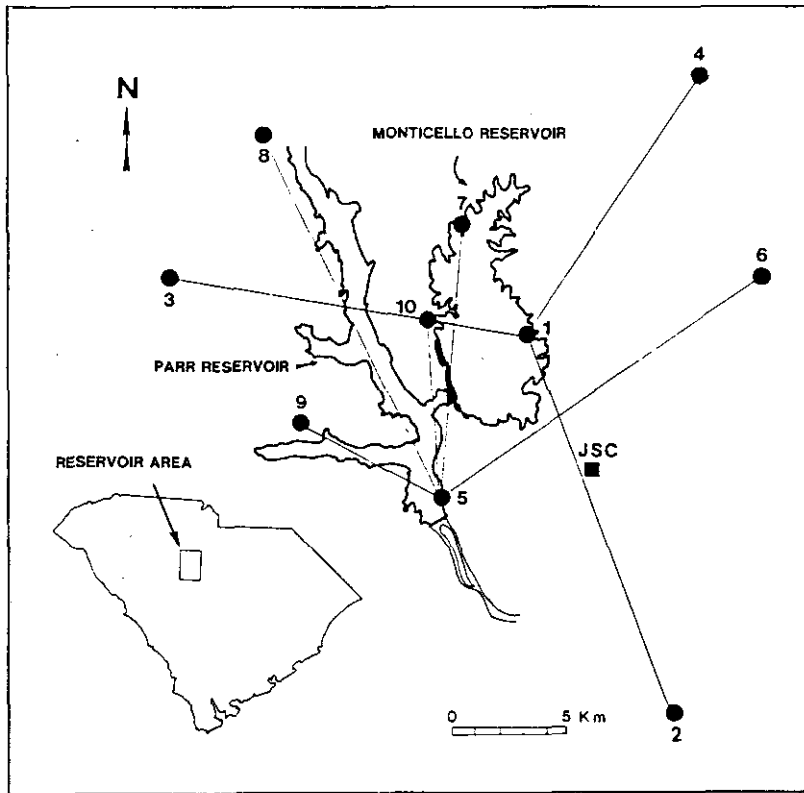


Fig. 6. Localización de la red sísmica del embalse de Monticello, Carolina del Sur, Estados Unidos. (Rajendran y Talwani, 1992).

El análisis de la Sismicidad Inducida por embalses o explotaciones petrolíferas es otro ejemplo de las posibilidades de este tipo de estudios. La figura 6 esquematiza la red sísmica establecida en torno al embalse de Monticello (Carolina del Sur, Estados Unidos), uno de los casos más claros de sismicidad inducida de respuesta rápida estudiados en todo el mundo (Simpson *et al.*, 1988). El volumen de almacenamiento es $0,43 \text{ km}^3$ y la profundidad del agua embalsada alcanza 32 m (Talwani y Acree, 1987; Rajendran y Talwani, 1992). Es por tanto, un embalse de dimensiones moderadas situado en una zona de baja sismicidad. La actividad sísmica se inició en forma de enjambre pocas semanas después de la puesta en marcha del embalse y alcanzó su máximo en las proximidades del primer llenado. La mayor parte de los eventos se localizaron a profundidades inferiores a 2 km y en el entorno próximo del embalse. La magnitud máxima fue 2,8. Estas características, —que pueden ser representativas de un tipo de sismicidad inducida posible en nuestro país—, hacen que la precisión en la localización de los sismos adquiera una importancia decisiva. La figura 7

representa el error teórico en profundidad estimado mediante el programa Hierr y pone de relieve la calidad de la red. Sin embargo, dichos resultados deben ser vistos sólo como una aproximación, ya que el modelo de corteza utilizado ha sido simplemente un semiespacio con velocidad para las ondas P de 4,5 km/s y una relación V_p/V_s de 1,8. Estos valores son típicos para el granito (Cara, 1989) que caracteriza la geología de la zona. La profundidad elegida para los hipocentros sintéticos es 2 km y el error de lectura 0,01 s. La figura 7 pone de relieve que, para estas condiciones, los errores teóricos para la profundidad en la zona más próxima al embalse son del orden de 100 m. La zona que presenta los mayores errores (en torno a 1 km) se encuentra en el extremo SO del área estudiada y la geometría juega, en este caso, un papel decisivo en la capacidad de localización de la red. Conviene tener en cuenta que en este caso, como en los vistos anteriormente, el error de lectura supuesto es muy bajo.

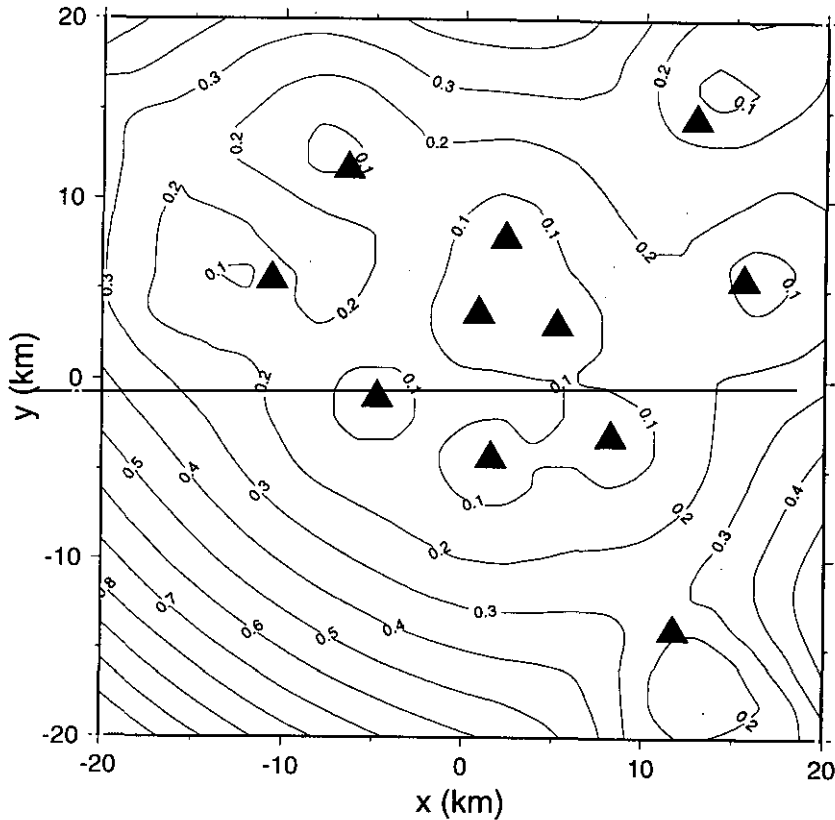


Fig. 7. Error de la profundidad para la red de Monticello. Los valores vienen dados en kilómetros.

La posibilidad introducida en el programa Hierr para analizar la influencia de cada fase S permite estudiar la evolución de la incertidumbre en función de

las fases consideradas, en un punto concreto. Así, la figura 8 describe esta evolución para el punto medio entre las estaciones 3 y 4 de la red triangular comentada más arriba. Este punto se puede considerar situado en la frontera de la red. La notación 4pns utilizada en el gráfico indica que se utilizan las fases P de todas las estaciones y las fases S de las primeras «n» estaciones. Los errores de lectura utilizados aparecen en el margen derecho y los pesos elegidos para las fases P y S son respectivamente, 0 y 2. El resultado pone de manifiesto la necesidad de utilizar al menos una fase S y subraya la importancia de los errores atribuidos a la lectura de fases.

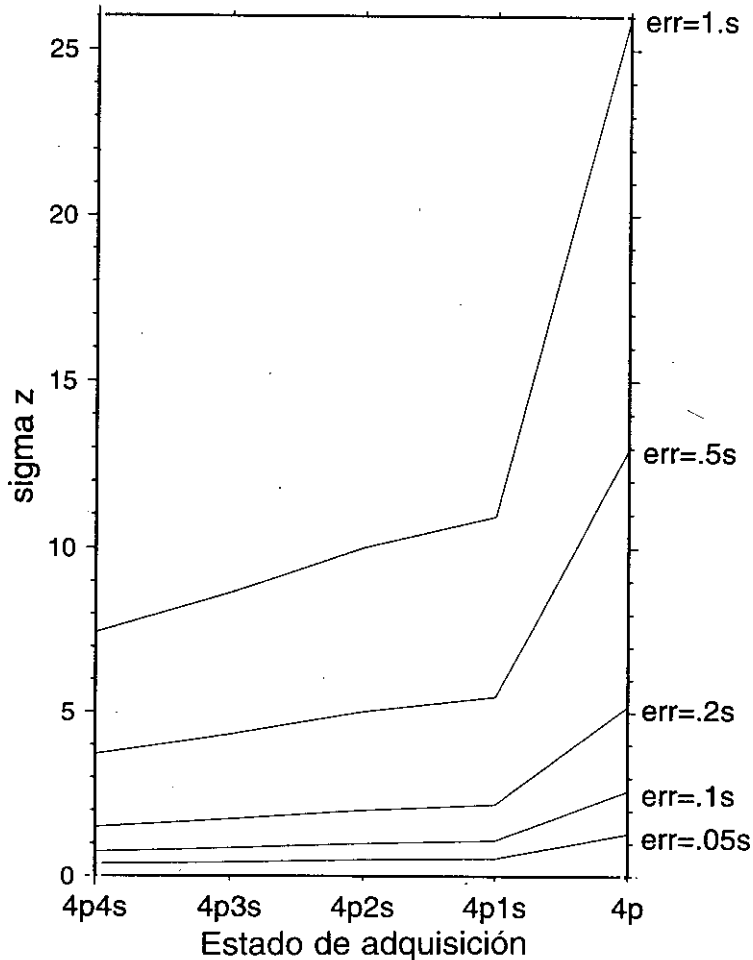


Fig. 8. Desviación estándar de z para varios valores de error de lectura y diferentes estados de observación de las fases P y S. La configuración considerada es la red triangular. La expresión «4pns» indica que se utilizan las fases P de todas las estaciones y las fases S de las primeras «n» estaciones. El punto de observación se localiza entre las estaciones 3 y 4 de la red (ver figura 1).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados descritos confirman numéricamente algunas apreciaciones obtenidas por otros autores acerca de la importancia de las fases S, y permiten afirmar que el programa Hierr puede ser una ayuda eficaz para estimar la capacidad teórica de una red sísmica en la localización de hipocentros. Pero, en cualquier caso, es necesario tener siempre presente que los valores numéricos obtenidos reflejan los resultados de un proceso matemático que puede verse modificado por condiciones física concretas: distribución real de velocidades, heterogeneidad del medio, etc.

La divergencia en el valor de los errores esperados, —aunque no en su distribución espacial relativa—, según la forma de otorgar los pesos, es otra cuestión importante que debe ser estudiada con detalle. En cualquier caso, no afecta a la capacidad de esta técnica para comparar diferentes configuraciones de una misma red, por lo que su aplicación permite optimizar la distribución de estaciones, mejorar la respuesta de la red y disminuir su coste. Por ello, el programa descrito puede ser una ayuda eficaz para el análisis de la microsismicidad natural o el control de la sismicidad inducida por embalses, inyección o extracción de fluidos, o el laboreo de explotaciones mineras.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de los estudios realizados en el marco 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» subvencionado por la Caja de Ahorros de Madrid. Asimismo, los autores agradecen a ENRESA las facilidades concedidas para el estudio de la red de El Cabril. Contribución número 371 del Departamento de Geofísica y Meteorología de la Universidad Complutense.

REFERENCIAS

- BOLT, B. A. (1960): *The revision of earthquake epicenters, focal depths, and origin times using a high speed computer*, *Geophys. J. Royal Ast. Soc.*, 3, 433-440.
- CARA, M. (1989): *Geophysique*. Ed. Dunod, Paris.
- CISTERNAS, A. (1964): *Precision determination of focal depths and epicenters of earthquakes*, CIT Publication, AFOSR Contract No. AF-49,(638), 1337.
- ELLSWORTH, W. L., AND ROECKER, S. W. (1981): *Sensitivity of the earthquake location problem to network geometry*, in *Seismicity and Tectonics of the Pamir-Hindu Kush Region of Central Asia*, Ph. D. Thesis, MIT, Boston, Massachusetts.
- FLYNN, E. A. (1960): *Local earthquake location with an electronic computer*, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 50, 467-470.

- FREEDMAN, H. W. (1968): *Seismological measurements and measurement error*, Bull. Seism. Soc. Am., 58, 1261-1271.
- GARCÍA-FERNÁNDEZ, M. (1986): *Precisión relativa de la red sísmica española en la localización de terremotos de la región ibérica*. Rev. de Geofísica, 42, 3-8.
- GOMBERG, J. S. (1995): *Seismic networks; the basics of why, how and what we learn from them, en Redes Sísmicas Regionales*, Monografía n° 11, Instituto Geográfico Nacional, Madrid, 9-62.
- GOMBERG, J. S.; SHEDLOCK, K. M., AND ROECKER, S. (1990): *The effect of S-wave arrival time on the accuracy of hypocenter estimation*, Bull. Seism. Soc. Am., 80, 1605-1628.
- KUKO, A. (1977): *An algorithm for the optimum distribution of a regional seismic network- I*. Pageoph, 115, 999-1009.
- KLEIN, F. W. (1978): *Hypocenter location program HYPOINVERSE. Part I: Users Guide to Versions 1, 2, 3 and 4*. U.S. Geol. Surv. Open-File Rept. 78-694.
- LAHR, J. C. (1979): *A computer program for determining earthquake hypocentral parameters, magnitudes and first motion patterns*. U.S. Geol. Surv. Open-File Rept. 79-0431.
- LEE, W. H. K., AND LAHR, J. C. (1974): *HYPO71 (revised): a computer program for determining hypocenter, magnitude and first motion patterns of local earthquakes*, U.S. Geol. Surv. Open-File Rept. 75-311.
- LIENERT, B. R.; FRAZER, L. N., AND RUDMAN, A. J. (1986): *Evaluation of seismometer arrays for earthquake location*, U. S. Geol. Surv. Occasional Paper 52.
- LINDO, R., AND HERRAIZ, M. (1995): *Segundo informe semestral 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»*, 21 pp.
- MARTÍNEZ SOLARES, J. M. (1992): *Optimización de parámetros de localización para distintos tipos de redes sísmicas. Aplicación a la Península Ibérica*, Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 257 pp.
- MEZCUA, J., AND RUEDA, J. (1993): *Location of earthquakes under Iberia. Consequences of the ILIHA-DSS data*, Monografía n° 10, Instituto Geográfico Nacional, Madrid, 251-262.
- MYKKELTVEIT, S.; ASTEBOL, K.; DOORNBOS, D. J., AND HUSEBYE, E. S. (1983): *Seismic array configuration optimization*, Bull. Seism. Soc. Am., 73, 173-186.
- NORDQUIST, J. M. (1962): *A special-purpose program for earthquake location with an electronic computer*, Bull. Seism. Soc. Am., 52, 431-437.
- PETERS, D. C., AND CROSSON, R. C. (1972): *Application of prediction analysis to hypocenter determination using a local array*, Bull. Seism. Soc. Am., 62, 775-788.
- PRESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T., AND FLANNERY, B. P. (1992): *Numerical Recipes in Fortran. The Art of Scientific Computing* (2nd edition). Cambridge University Press, Cambridge.
- RAJENDRAN, K., AND TALWANI, P. (1992): *The role of elastic, undrained and drained responses in triggering earthquakes at Monticello reservoir. South Carolina*, Bull. Seism. Soc. Am., 82, 1867-1888.
- RUEDA, J. (1995): *Análisis y procesamiento de datos en la Red Sísmica Nacional, en Redes Sísmicas Regionales*, Monografía n.º 11, Instituto Geográfico Nacional, Madrid, 87-111.
- SIMPSON, D. W.; LEITH, W. S., AND SCHOLZ, C. H. (1988): *Two types of reservoir-induced seismicity*, Bull. Seism. Soc. Am., 78, 2025-2040.
- TALWANI, P., AND ACREE, S. (1987): *Induced seismicity at Monticello Reservoir: a case study. Final Technical Report*, U.S. Geological Survey, 271 pp.
- UHRHAMMER, R. A. (1980): *Analysis of small seismographic station networks*, Bull. Seism. Soc. Am., 70, 1369-1379.
- UHRHAMMER, R. A. (1982): *The optimal estimation of earthquake parameters*, Phys. Earth. Planet. Interiors, 4, 1369-1379.