

# MF96: Un programa interactivo para determinación gráfica de mecanismos focales

*MF96: An interactive program to graphical determination of focal mechanisms*

L. Cabañas, R. Lindo y M. Herraiz

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

## ABSTRACT

*This communication describes the characteristics of a computer program based on the analyses of polarities of first P-wave motions and aimed at determining fault-plane solutions. The program allows to estimate nodal planes and stress axes in a graphical and interactive way. The results are expressed in both, seismological and geological notation.*

**Key words:** *Computer program, focal mechanism, fault-plane solutions, P-wave polarity*

*Geogaceta, 20 (6) (1996), 1377-1379  
ISSN:0213683X*

## Introducción

La ocurrencia de un terremoto está relacionada con un fenómeno de fractura en la corteza terrestre. Para representar esta fractura se formulan modelos físico-matemáticos, cuyo objetivo es determinar el campo de desplazamientos elásticos producidos por el terremoto y, mediante la comparación de éstos con los desplazamientos observados, determinar posteriormente la naturaleza del foco sísmico (Udías 1985, 1994). Se plantea así un problema inverso en el que a partir de las observaciones y conociendo las propiedades elásticas del medio de propagación de las ondas sísmicas, han de calcularse los parámetros que definen los procesos ocurridos en el foco (Udías 1985, Buforn 1994). El modelo teórico más sencillo que puede considerarse en el estudio del mecanismo de un terremoto es el de un foco puntual (sin dimensiones) correspondiente a una fractura de cizalla infinitesimal. Este modelo se representa por un doble par de fuerzas sin momento resultante actuando en dicho punto, o bien por un sistema de fuerzas resultantes de presión y tensión contenidas en el mismo plano, orientadas a 45° respecto al plano de la dislocación, y que definen en caso de no existir rozamiento los ejes principales de esfuerzo máximo y mínimo (Bullen y Bolt 1985). En este caso, el problema del cálculo del mecanismo consiste por una parte, en determinar la función temporal de la fuente sísmica, que es función de la velocidad de desplazamiento de la dislocación sobre el plano de falla, y por

otra, en hallar la orientación del plano de fractura y el deslizamiento sobre éste o bien la orientación de los ejes principales de esfuerzos P y T. De esta última parte es de la que se ocupa este trabajo.

## Método de las polaridades de la onda P

Calculando el campo de desplazamientos elásticos (solución del problema directo) se obtiene la distribución de las amplitudes de éstos en torno al foco (patrón de radiación). Para el modelo de foco puntual, el patrón de radiación de la onda P tiene la forma de cuatro cuadrantes con signo alternado separados por dos planos nodales y con los máximos de amplitud a 45° de éstos. Uno de los planos corresponde al plano de falla y el otro a un plano normal a éste denominado plano auxiliar. Los cuadrantes positivos corresponden a compresiones (desplazamientos en la dirección foco-estación: definen eje T) y los negativos a dilataciones (desplazamientos en la dirección estación-foco: definen eje P). El método de las polaridades del primer impulso de la onda P, basado en este patrón de radiación, es uno de los métodos más sencillos y utilizados para obtener la orientación del mecanismo focal. Para la aplicación del método se emplea el concepto de esfera focal, esfera de material homogéneo y radio unidad con centro en el foco (Buforn 1985). Cada estación se proyecta sobre la superficie de la esfera focal recorriendo en sentido inverso la trayectoria de propagación, calculada desde el foco para un medio elástico. Una estación queda representada sobre la es-

fera por un punto definido por las coordenadas polares  $i_n$ , ángulo de incidencia en el foco,  $\Phi$ , acimut de la estación en el foco, y un símbolo que permita distinguir dilatación (D) y compresión (C) según la dirección o polaridad del primer impulso de la onda P (medida en la componente vertical del sismograma). El cálculo de  $i_n$ , requiere utilizar un modelo de estructura interna de la Tierra. Para distancias telesísmicas,  $\Delta > 1000$  km, este ángulo puede deducirse a partir de las tablas de Jeffreys-Bullen o de Herrin y, en el caso de distancias regionales, a partir del modelo de velocidades de corteza y manto superior de la región considerada (Buforn 1994). Por razones prácticas, de visualización entre otras, se utiliza directamente una proyección estereográfica (de Schmidt o de Wulf) de uno de los hemisferios (generalmente el inferior) de la esfera focal. Una vez reducidas las observaciones a la esfera focal, el problema consiste en separarlas en cuatro cuadrantes de signo alternado mediante dos planos ortogonales. La solución puede hallarse bien numéricamente, con algoritmos que permiten obtener la orientación de los ejes y de los planos nodales, y las estimaciones de sus desviaciones típicas (Brillinger *et al.* 1980, Rivera y Cisternas 1990), o bien gráficamente (Angelier et Mechler, 1977). En este caso, se da inicialmente la orientación de uno de los planos nodales y un tercer parámetro del otro plano, o la posición de los ejes T y P y se calculan entonces los parámetros restantes y el porcentaje de aciertos u observaciones correctas (ver apéndice). En ambos pro-

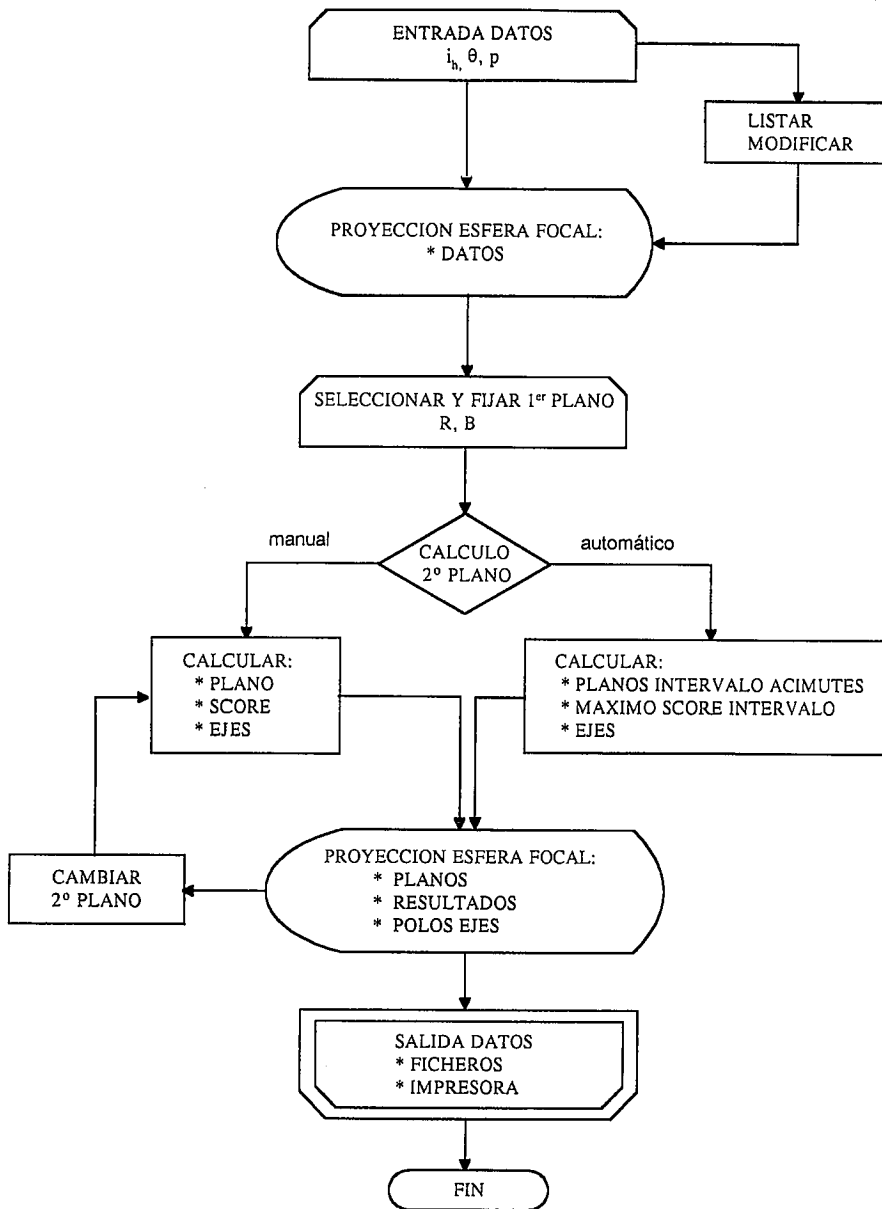


Fig. 1.- Diagrama de flujo del programa MF96

Fig. 1.- Flowchart of the MF96 program.

cedimientos la calidad de la solución depende del número y distribución acimutal de estaciones con buenas lecturas, así como del modelo de velocidad utilizado. Finalmente, ni el método, ni el modelo en que se basa, permiten distinguir cuál de los dos planos calculados corresponde al plano de falla, y para ello es necesario la utilización de otro tipo de información (Buforn 1994). El programa informático que se presenta en esta comunicación, utiliza este método para calcular de modo gráfico la orientación del mecanismo focal.

**Descripción y desarrollo del programa MF96**

Las especificaciones de este programa están basadas en las de un programa realizado por Núñez (1987), que han sido revisadas y ampliadas sustancialmente. Después de leer los datos de identificación del terremoto a analizar, el programa toma como datos de entrada para el cálculo, el acimut, el ángulo de incidencia en el foco y la polaridad de la onda P de cada una de las estaciones en las que se ha registrado el evento. Estos datos pueden ser

leídos de un fichero o pueden ser introducidos desde teclado. Una opción permite listar los datos leídos, así como modificarlos, y guardarlos en fichero. El cálculo del mecanismo focal constituye el núcleo central del programa. Las estaciones son representadas en pantalla sobre una proyección de Schmidt de la esfera focal. Las polaridades, designadas (C), compresión y (D) dilatación, se representan con un cuadrado lleno y un cuadrado vacío respectivamente. A continuación ha de elegirse gráficamente el primer plano nodal, pudiendo variar para ello el rumbo (R [0°,360°]), y el buzamiento (B∈(0°,90°)). No está permitido elegir el plano horizontal como primer plano. Una vez fijado el primer plano se prosigue con la determinación del segundo. Dada la condición de ortogonalidad, el cálculo de éste se realiza en función del rumbo y el buzamiento del primer plano y del acimut que se elija para el segundo. Este acimut puede introducirse como un único valor (procedimiento manual), o como un intervalo de acimutes y un incremento para recorrerlo (procedimiento automático). En la opción manual, el programa dibuja el plano ortogonal correspondiente al acimut elegido e indica la proporción de aciertos de la solución, calculando la amplitud teórica de cada estación y comprobando que el signo de ésta corresponde a la polaridad leída. En el cálculo automático el programa recorre el intervalo de acimutes dado, halla la proporción de aciertos máxima en dicho intervalo y dibuja todos los planos ortogonales que alcancen este máximo de observaciones correctas. Los resultados que se obtienen para ambos planos se expresan tanto en nomenclatura sismológica (rumbo, buzamiento y deslizamiento), como geológica (sentido de buzamiento, buzamiento, cabeceo y sentido de movimiento). A partir de aquí se entra en modo interactivo. Variando el rumbo del segundo plano, puede obtenerse una nueva orientación de los planos y de los ejes Y, Z, T, y P (ver apéndice). Finalmente, estos resultados pueden imprimirse en papel y almacenarse en un fichero de salida. Es posible elegir un formato de fichero similar al de entrada al programa, en el que se guarde además de los datos, la solución final elegida, o un formato en el que se almacenen tan solo los datos de todas las soluciones que se consideren posibles. El primer caso guarda los parámetros según criterio sismológico y permitiría realimentar el programa para ir directamente a la representación del mecanismo obviando los cálculos. El segundo almacena los parámetros según criterio geológico, creando un fichero con una lista de meca-

nismos focales posibles, adecuado para un tratamiento posterior de análisis poblacional de fallas (De Vicente 1991). El programa ha sido escrito en lenguaje Basic. Consta de un módulo principal y una serie de procedimientos y funciones. El módulo principal incluye los prototipos de todos estos procedimientos y funciones; la declaración de constantes y variables globales del programa; la inicialización de la pantalla; una pequeña subrutina para detectar errores producidos en tiempo de ejecución, y la conexión con los demás procedimientos del programa mediante una estructura de decisión (select case). La estructura del programa puede dividirse en cuatro partes: entrada de datos; listados y modificación de datos; cálculo y representación de la orientación del mecanismo focal, y salida de datos. En cada una de estas partes se conecta con las funciones y procedimientos que realizan las tareas básicas necesarias, como son los diferentes menús, las ayudas, la lectura y grabación de ficheros, la impresión de resultados etc. El mayor número de éstos son utilizados en la parte del cálculo del mecanismo, que incluye tareas como representar en pantalla datos, ayudas y resultados; dibujar planos y polos de los ejes; mover planos, y calcular buzamientos, deslizamientos, orientación de los ejes e índice de aciertos de cada solución. Se ha conseguido de esta forma una estructura modular que puede facilitar revisiones y adaptaciones posteriores.

**Apéndice. Orientación de los ejes, planos nodales e índice de aciertos**

Sistemas de ejes sobre la esfera focal: XYZ, sistema geográfico (N,E, Nadir); XYZ, sistema de fuerzas; PTZ

sistema de ejes principales de esfuerzo (presión, tensión, nulo). La posición de los ejes respecto al sistema geográfico viene dada por:

$X(\theta_x, \Phi_x), Y(\theta_y, \Phi_y), Z(\theta_z, \Phi_z);$   
 $P(\theta_p, \Phi_p), T(\theta_t, \Phi_t), Z(\theta_z, \Phi_z),$   
 siendo  $\theta, \Phi$  coordenadas esféricas,  $\theta$  medido desde la dirección positiva del eje Z ( $0^\circ < \theta < 90^\circ$ );  $\Phi$  medido desde la dirección positiva del eje X ( $0^\circ < \Phi < 360^\circ$ ).

Orientación y deslizamiento de los planos nodales 1 y 2:  $\Phi_1 = \Phi_x + 90^\circ;$   
 $\Phi_2 = \Phi_y + 90^\circ$  rumbos;  $\delta_1 = \theta_x; \delta_2 = \theta_y$  buzamientos;

$\lambda_1 = \arcsen \{ \cos \theta_y / \sin \theta_x \}; \lambda_2 = \arcsen \{ \cos \theta_x / \sin \theta_y \}$  deslizamientos.

Debido a la condición de ortogonalidad, para cada sistema de ejes solo hay 3 ángulos independientes. Dados por ejemplo  $\theta_x, \Phi_x, \Phi_y$  se tiene:

$$\theta_r = \left( \frac{-\cos \theta_r}{\sin \theta_x \cos \phi_r \cos \phi_r + \sin \theta_x \sin \phi_r \sin \phi_r} \right)$$

Ejes T y P: Conocida la posición de X e Y, la de los ejes T y P se obtiene a partir de la relación entre los cosenos directores de ambos sistemas respecto al sistema geográfico:

$$\alpha_T = (1/2)^{1/2}(\alpha_x + \alpha_y);$$

$$\beta_T = (1/2)^{1/2}(\beta_x + \beta_y);$$

$$\gamma_T = (1/2)^{1/2}(\gamma_x + \gamma_y);$$

$$\alpha_P = (1/2)^{1/2}(\alpha_x + \alpha_y);$$

$$\beta_P = (1/2)^{1/2}(\beta_x + \beta_y);$$

$$\gamma_P = (1/2)^{1/2}(\gamma_x + \gamma_y);$$

siendo  $\alpha = \text{sen} \theta \cos \Phi; \beta = \text{sen} \theta \sin \Phi; \gamma = \cos \theta$

El eje Z se determina unívocamente por ortogonalidad.

Índice de aciertos: La amplitud teórica (normalizada) de cada estación está dada por  $U_p = x'^2 - y'^2$  o bien  $U_p = 2xy$ , donde las coordenadas ( $x', y', z'$ ) están referidas al sistema PTZ, y ( $x, y, z$ ) al sistema XYZ.

Calculando la amplitud, se determina el índice de aciertos de la solución.

**Referencias**

Angelier, J. et Mechler, P. (1977), *Bull. Soc. Geo. Fr.*, 19-6, pp 1309-1318  
 Brillinger D.R., Udías A., Bolt B.A. (1980). *BSSA Vol. 70 N° 1*, pp 149-170.  
 Bullen K.E., Bolt B.A. (1985). *An Introduction to the Theory of Seismology. Cambridge Press.* pp 398-415  
 Buforn E. (1985). *Mecanismo de los Terremotos y Tectónica.* Edit. Complutense. pp 117-154  
 Buforn E. (1994). *Física de la Tierra N° 6.* Edit. Complutense. pp 113-139  
 De Vicente G. (1991); *III Reunión de la Comisión de Tectónica. Soc. Geolog. de España.* pp 1-13  
 Núñez Cornú F.J. (1987). *Rev. de Geofísica*, Vol. 43, pp 209-212  
 Rivera L., Cisternas A. (1990). *BSSA Vol. 80 N° 3*, pp 600-614.  
 Udías A. (1985). *Mecanismo de los Terremotos y Tectónica.* Edit. Complutense. pp 15-60  
 Udías A. (1994). *Física de la Tierra N° 6.* Edit. Complutense. pp 11-27