

A.M. Posadas

(5-16)

$$A' = P_{pq}^T A P_{pq}$$

Obsérvese que  $P_{pq}^T A$  cambia sólo las filas  $p$  y  $q$  de  $A$ , mientras que  $A P_{pq}$  cambia sólo las columnas  $p$  y  $q$ . También ha de tenerse en cuenta que los subíndices  $p$  y  $q$  no notan las componentes de  $P_{pq}$ , sino que identifica de qué clase de rotación se trata, es decir, a qué filas y columnas afecta. Así, los elementos cambiados en la matriz  $A$  son sólo las filas y columnas  $p$  y  $q$ ; por tanto:

$$(5-17) \quad A' = \begin{pmatrix} \dots & a_{1p}' & \dots & a_{1q}' & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{p1}' & \dots & a_{pp}' & \dots & a_{pq}' & \dots & a_{pn}' \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{q1}' & \dots & a_{qp}' & \dots & a_{qq}' & \dots & a_{qn}' \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & a_{rp}' & \dots & a_{rq}' & \dots \end{pmatrix}$$

Con esta notación y teniendo en cuenta (5-16) pueden obtenerse las ecuaciones siguientes:

$$(5-18) \quad a_{rp}' = c a_{rp} - s a_{rq} \quad r \neq p, r \neq q$$

$$(5-19) \quad a_{rq}' = c a_{rq} + s a_{rp} \quad r \neq p, r \neq q$$

$$(5-20) \quad a_{pp}' = c^2 a_{pp} + s^2 a_{qq} - 2 s c a_{pq}$$

$$(5-21) \quad a_{qq}' = s^2 a_{pp} + c^2 a_{qq} + 2 s c a_{pq}$$

$$(5-22) \quad a_{pq}' = (c^2 - s^2) a_{pq} + s c (a_{pp} - a_{qq})$$

Según la idea del método de Jacobi, se trata de hacer cero los elementos de fuera de la diagonal. De acuerdo con esto, se quiere que  $a_{pq}' = 0$ , así que la ecuación (5-22) proporciona la siguiente expresión para determinar el ángulo de rotación  $\phi$ :

Implementación de los métodos

$$(5-23) \quad \theta = \cotg(2\phi) = (c^2 - s^2)/2sc = (a_{qq} - a_{pp})/2a_{pq}$$

y si se toma:

$$(5-24) \quad t = s/c$$

la expresión que define a  $\theta$  puede ser escrita:

$$(5-25) \quad t^2 + 2t\theta - 1 = 0$$

La raíz más pequeña de esta ecuación corresponde a un ángulo de rotación menor que  $\pi/4$ ; esta elección proporciona en cada etapa un resultado más estable (Press et al, 1989); resolviendo (5-25) se tienen como raíces:

$$(5-26) \quad t_1 = -\theta + (\theta^2 + 1)^{1/2} = 1/(\theta + (\theta^2 + 1)^{1/2})$$

$$(5-27) \quad t_2 = -\theta - (\theta^2 + 1)^{1/2} = 1/(-\theta + (\theta^2 + 1)^{1/2})$$

y como  $t_1$  es menor que  $t_2$ , la raíz más pequeña corresponde a la expresión (5-26). Si  $\theta$  es tan grande que  $\theta^2$  pudiera dar un error de overflow, se tomará:

$$(5-28) \quad t = 1/(2\theta)$$

Si con este resultado se vuelve al conjunto de ecuaciones (5-18) a (5-22):

$$(5-29) \quad a_{pq}' = 0$$

de donde tenemos que:

A.M. Posadas

$$(5-30) \quad a_{qq} = a_{pp} - a_{pq} * (s^2 - c^2)/sc$$

y de aquí puede obtenerse fácilmente:

$$(5-31) \quad a_{pp}' = a_{pp} - t a_{pq}$$

$$(5-32) \quad a_{qq}' = a_{qq} + t a_{pq}$$

$$(5-33) \quad a_{rp}' = a_{rp} - s (a_{rq} + \tau a_{rp})$$

$$(5-34) \quad a_{rq}' = a_{rq} + s (a_{rp} - \tau a_{rq})$$

donde  $\tau$  (que es igual a  $\text{tg}(\phi/2)$ ) viene dado por:

$$(5-35) \quad \tau = s/(1 + c)$$

Por tanto, es posible obtener una matriz D diagonal (hasta la precisión del ordenador usado) cuyos elementos son los autovalores de la matriz A, ya que:

$$(5-36) \quad D = V^T A V$$

donde:

$$(5-37) \quad V = P_1 P_2 P_3 \dots$$

siendo  $P_i$  las sucesivas matrices de rotación de Jacobi. Las columnas de V son los autovectores (puesto que  $A V = V D$ ) y pueden ser calculados aplicando:

$$(5-38) \quad V^T = V P_i$$

### *Implementación de los métodos*

en cada etapa de cálculo. Inicialmente  $V$  es la matriz identidad.

Para concluir hay que hacer referencia a la convergencia del método. Esta está asegurada y puede probarse de varias formas (Wilkinson, 1965; Wilkinson & Reinsch, 1971; Faddeeva, 1973; Stoer & Burlirsch, 1980; Mason, 1986; Press et al, 1989)

### **II.3. Características generales de la implementación del ACPE y del ACPT.**

La aplicación del método ACPE y la del método ACPT se ha llevado a cabo mediante la implementación de sendos programas: el ACPEPSP y el ACPTM. Los dos programas pueden leer los datos de localización generados por la Red Sísmica de Andalucía directamente, escogen la ventana espacial, la ventana móvil de sismos y la corona de sismos, diagonalizan las matrices de dispersión construidas con estos subconjuntos, presentan los resultados directamente por pantalla, impresora o plotter y crean los archivos de resultados necesarios.

Los programas ACPTM y ACPEPSP han sido escritos en Basic por su facilidad, accesibilidad y abundancia de rutinas ya existentes; estas pueden adecuarse a las necesidades propias efectuando las modificaciones oportunas. La implementación del método en el ordenador se ha efectuado en un PC, lo cual permite su utilización en cualquier modelo compatible. Ambos programas están dimensionados para analizar una distribución de 300 sismos, aunque en un PC con 640 K de memoria es posible estudiar una muestra de 15000 eventos aproximadamente. Sin embargo, por encima de 300 el tiempo de computación empleado aconseja la utilización de otro sistema informático.

### II.3.1. El programa ACPEP.

El programa ACPEP está destinado a realizar el análisis ACPE de una distribución de sismos. Necesita un fichero de datos secuencial con los datos ordenados según la estructura de los que generan los programas de localización y archivado de la Red Sísmica de Andalucía del Instituto Andaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos. La adaptación de ACPEP a otros formatos de datos es relativamente sencilla.

El programa ACPEP tiene cuatro bloques fundamentales: el primero es el de presentación, el segundo es el de preparación de los datos, el tercero es el de diagonalización y el cuarto el de resultados.

En el primer bloque (fig. 5.2) se incluye el menú principal del programa que permite elegir entre las siguientes posibilidades:

- *Creación de un fichero de datos.* El programa permite construir un fichero de datos propios que pueden introducirse manualmente.
- *Modificación de un fichero de datos.* El programa permite abrir uno de los ficheros de datos existentes y cambiar los datos que se deseen.
- *Selección por magnitud.* El programa permite escoger los sismos que estén comprendidos entre dos magnitudes y genera con ellos un nuevo archivo.
- *Selección por profundidad.* El programa permite escoger los sismos que estén comprendidos entre dos profundidades y genera con ellos un nuevo archivo. Esta opción puede ser simultánea a la elección del intervalo de magnitud.

Implementación de los métodos

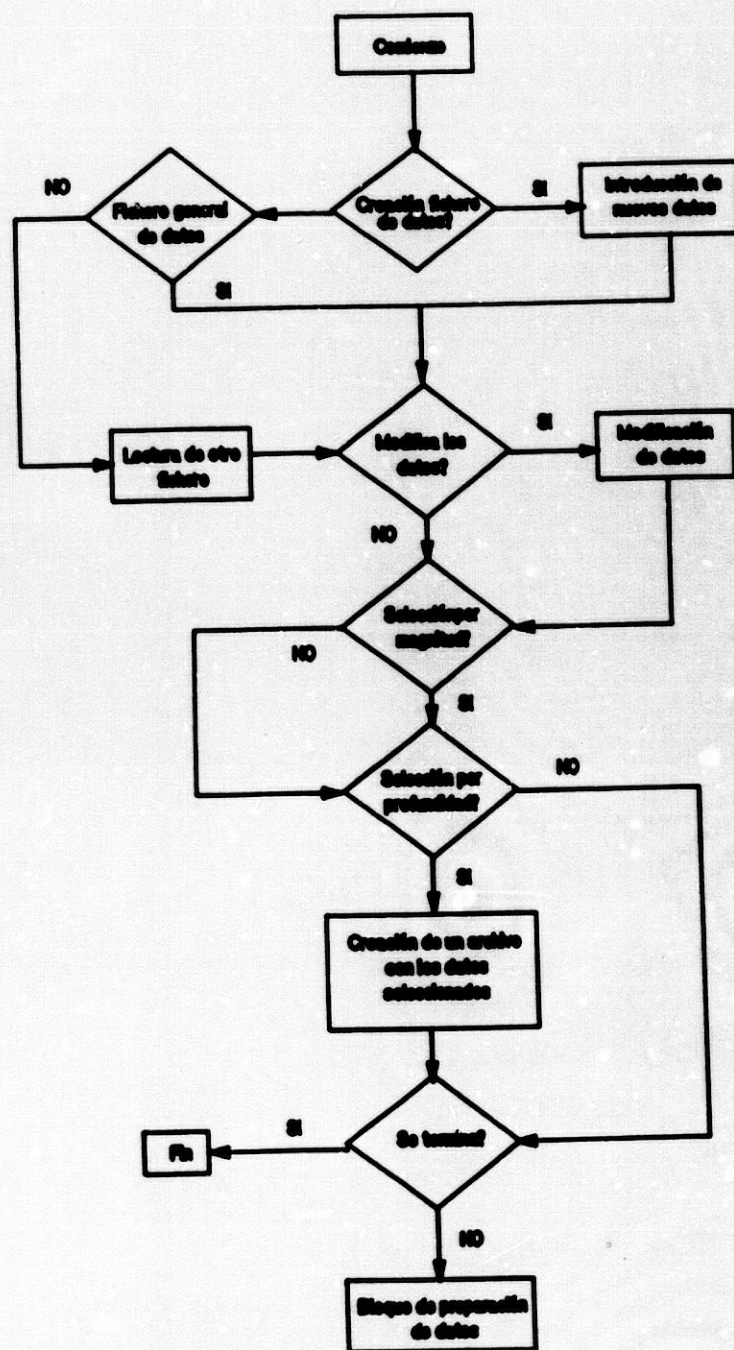
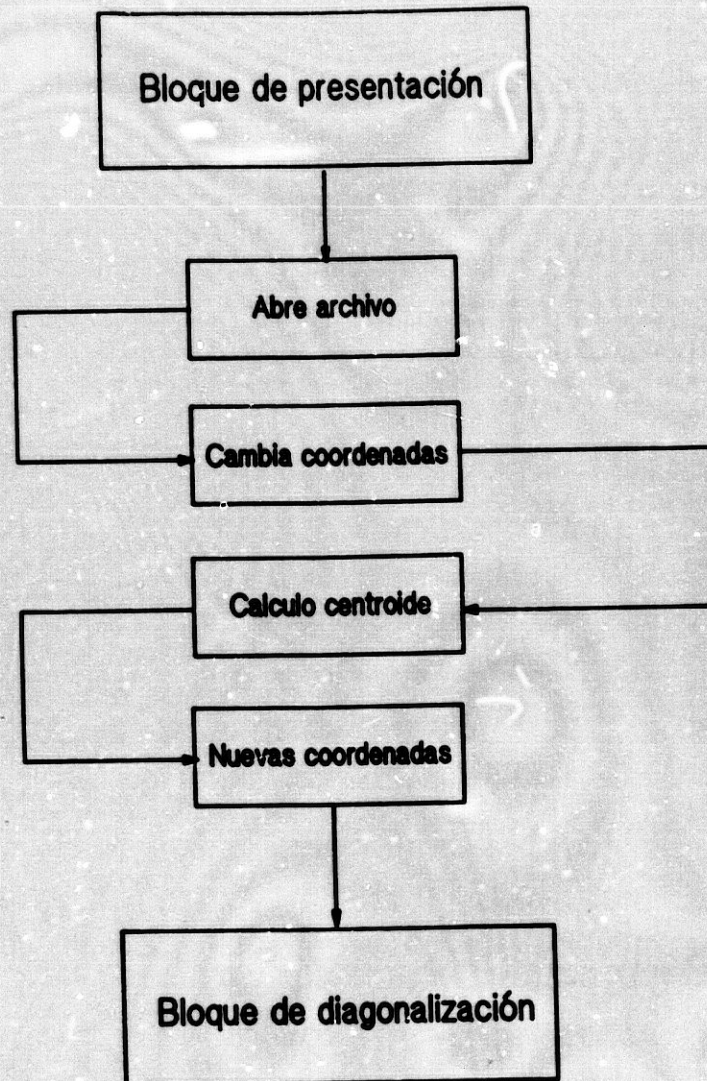
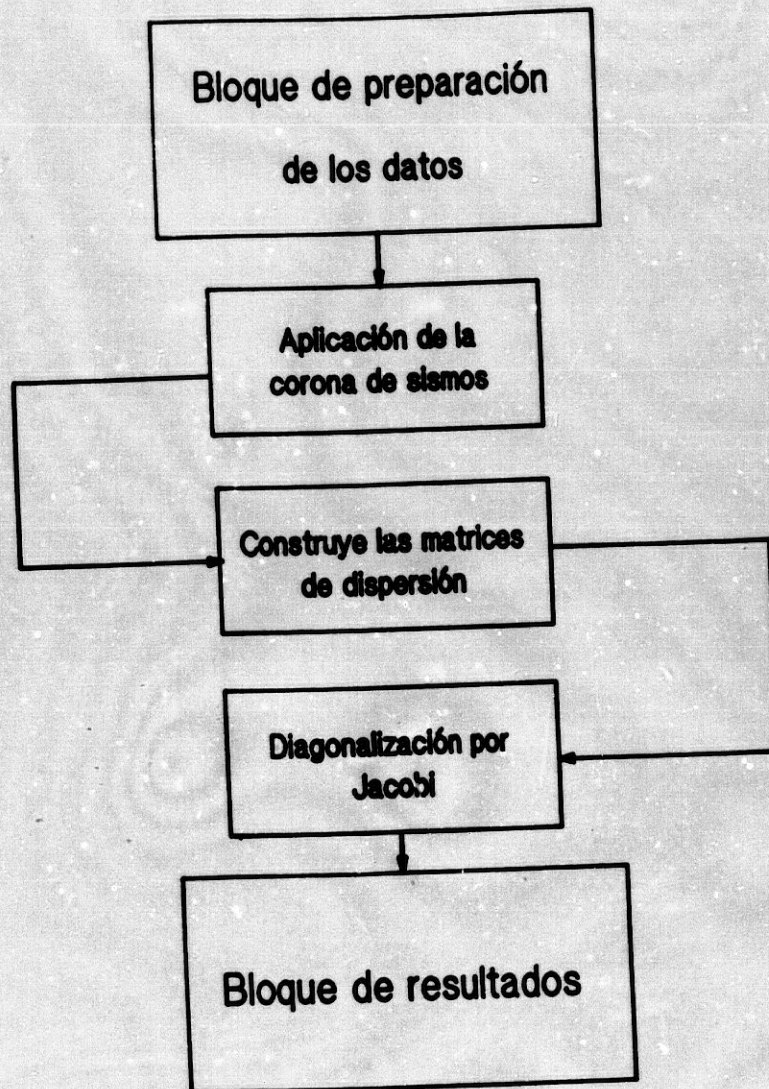


Fig. 5.2 En el bloque de presentación del programa ACPESP y ACPTEM se incluye el menú principal que permite elegir entre las siguientes posibilidades: creación de un fichero de datos, modificación de un fichero de datos, selección por magnitud, selección por profundidad y aplicación.

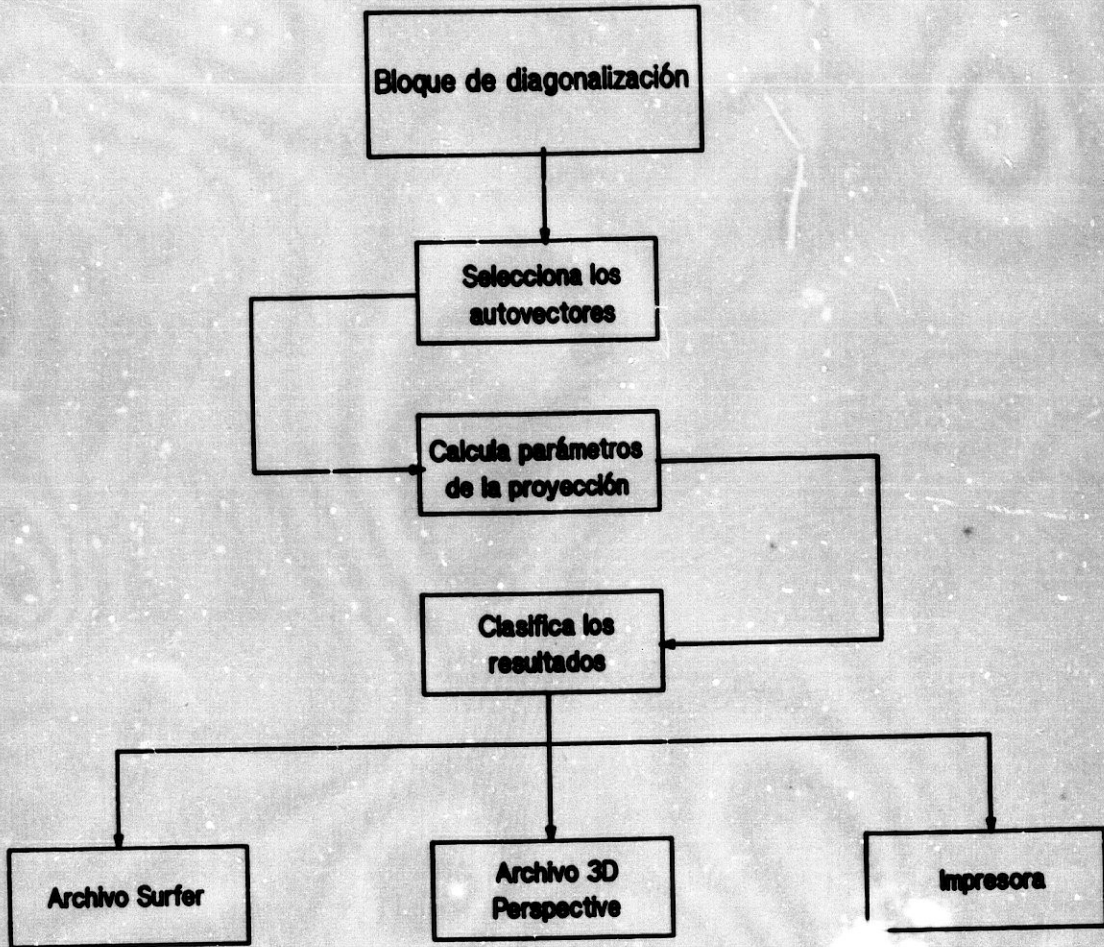


**Fig. 5.3.** *Bloque de preparación de los datos para los programas ACPESP y ACPTEM. En este bloque se abre el fichero de datos escogido, se lee, se transforman las coordenadas geográficas a cartesianas, se calcula el centroide de la muestra y se corrige esta de la media.*



**Fig. 5.4.** *Bloque de diagonalización del programa ACPESP. En este conjunto de subrutinas se aplica la ventana espacial de sismos, se construyen las matrices de dispersión oportunas y se diagonalizan siguiendo el algoritmo de Jacobi.*





**Fig. 5.5.** *Bloque de resultados para el programa ACPEP. Aquí se seleccionan aquellos autovectores que cumplen el criterio voluminar-planar, se calculan los parámetros de los polos con los que se representan los elipsoides y se clasifican los resultados de acuerdo a la retícula escogida. Esta clasificación es archivada para su posterior interpretación.*

### *Implementación de los métodos*

- *Aplicación.* Si se elige esta opción el programa pasa al bloque de preparación de datos.

El segundo bloque de subrutinas (fig. 5.3) es el de preparación de datos. En él se abre el archivo donde se encuentre la muestra de sismos a analizar, transforma los datos de coordenadas geométricas a coordenadas cartesianas con un modelo de tierra plana (es posible otro modelo), corrige los datos de la media y les asigna las variables adecuadas para su posterior tratamiento.

El tercer bloque de subrutinas (fig. 5.4) es el de diagonalización. En este bloque se construyen todas las matrices de dispersión con los elementos que componen a cada una (ya que ahora este valor no es constante), diagonaliza cada una de ellas y asigna variables a los resultados.

El cuarto bloque de subrutinas (fig. 5.5) es el de resultados. En este bloque se seleccionan aquellos autovectores que cumplen el criterio volumnar-planar, se clasifican los restantes de acuerdo a la malla acimut-buzamiento que se haya elegido y se prepara esta clasificación para ser mostrada por impresora o bien para archivarla en un fichero al que se accederá después. Los ficheros de salida se han dispuesto para ser leídos por programas comerciales de representación tridimensional (Surfer o 3D-Perpspective).

En el apéndice E puede verse un listado del programa principal ACPEP.

#### **II.3.2. El programa ACPTEM.**

El programa ACPTEM requiere el mismo sistema de ordenación de datos que el programa ACPEP; está dividido en cinco bloques: el de presentación, el de

preparación de los datos, el de elección de la ventana, el de diagonalización y el de resultados.

Los dos primeros bloques de subrutinas son idénticos a los del programa ACPEPSP y su objetivo es por tanto el mismo (figs. 5.2 y 5.3).

El tercer bloque busca la ventana móvil de sismos óptima (fig. 5.6). Existen pues dos versiones del programa. Una utiliza la función  $Q(N, K)$  de Ebblin & Michelini (1986) y otro utiliza la función  $C_{mi}^{m2}(N, K)$  propuesta en esta Tesis Doctoral. Si se ha estimado el valor de la ventana por algún otro método o por el conocimiento previo de la zona que se estudia es posible obviar esta búsqueda y proporcionar directamente el valor de  $K$  óptimo al programa.

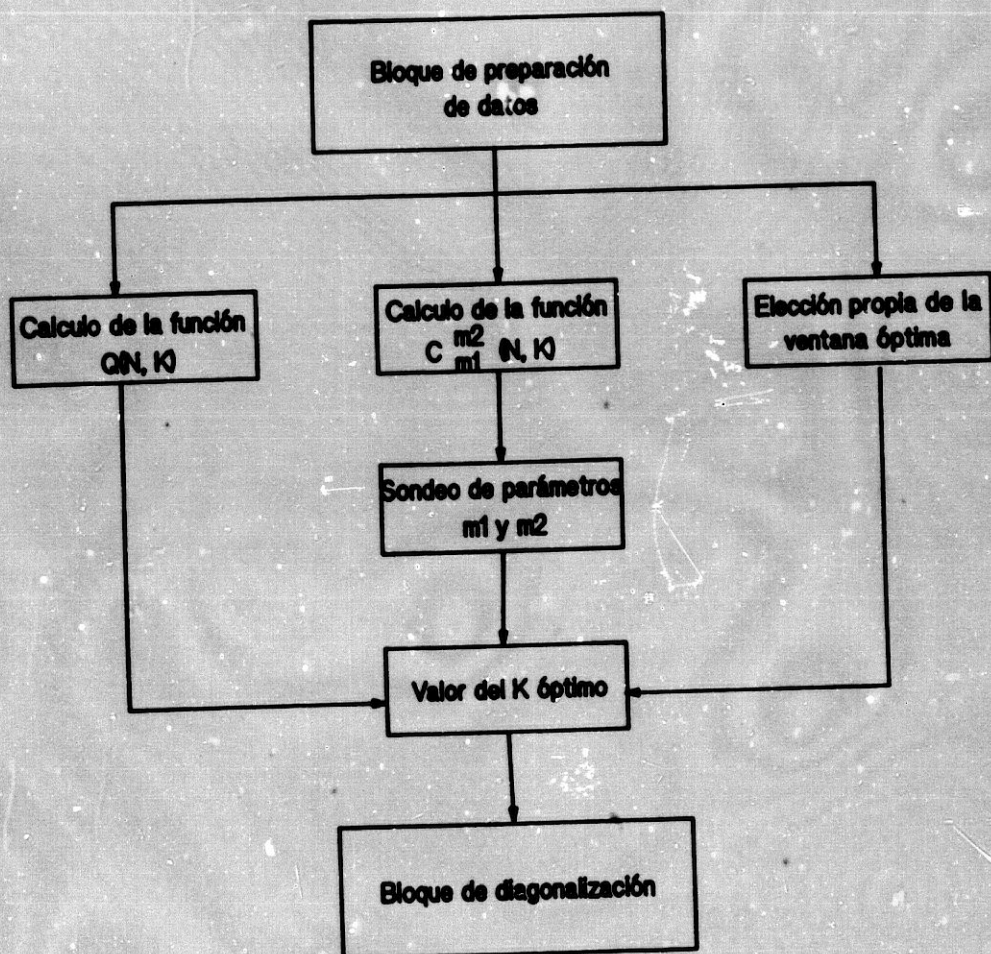
El cuarto bloque es el de diagonalización y varía muy poco del que se presentaba en el programa ACPEPSP. Este conjunto de subrutinas acaba en tres subbloques de resultados (fig. 5.7): el de presentación de resultados numéricos obtenidos por impresora o por pantalla, el de análisis sólo espacial de la distribución de planos (fig. 5.8) y el del análisis espacio-temporal completo (fig. 5.9).

En el apéndice E puede verse un listado del programa principal ACPTM.

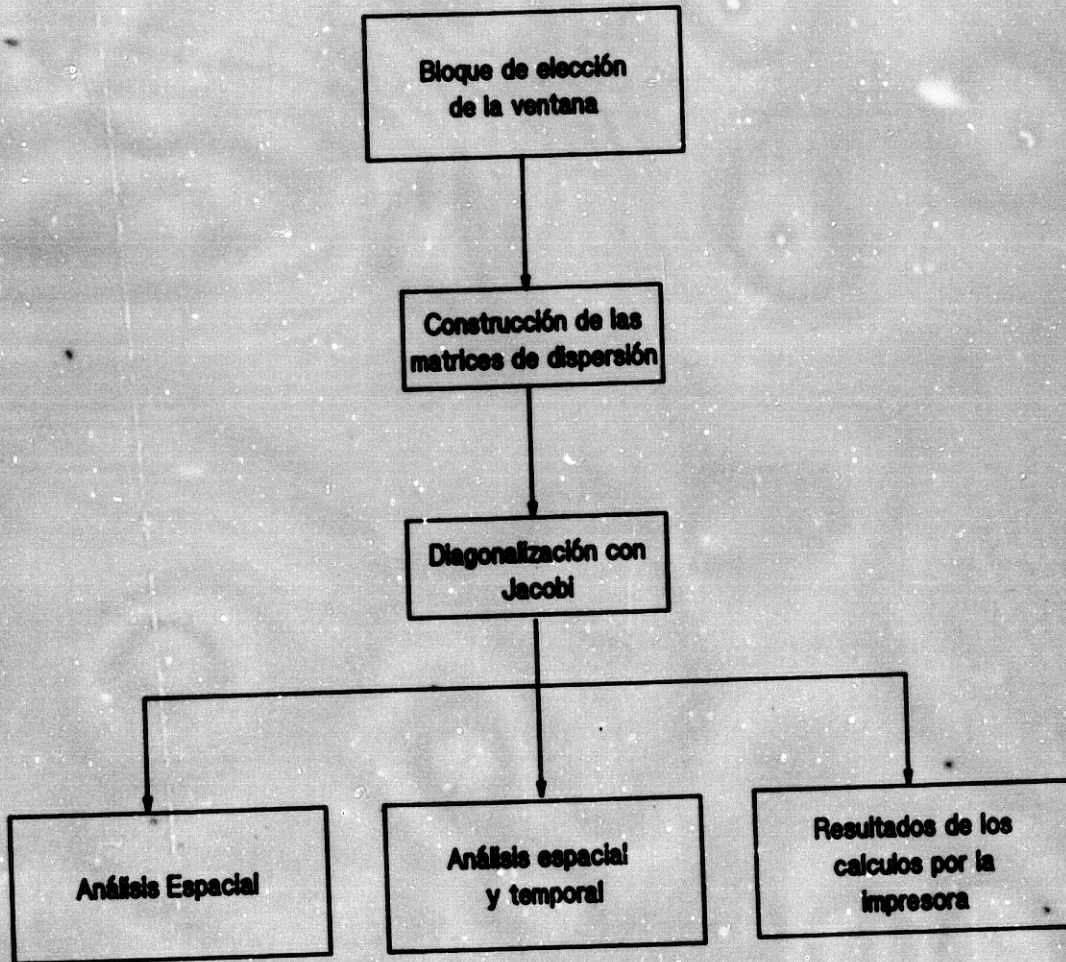
### III. IMPLEMENTACION DEL METODO DE LOS TRES PUNTOS

#### III.1. Introducción.

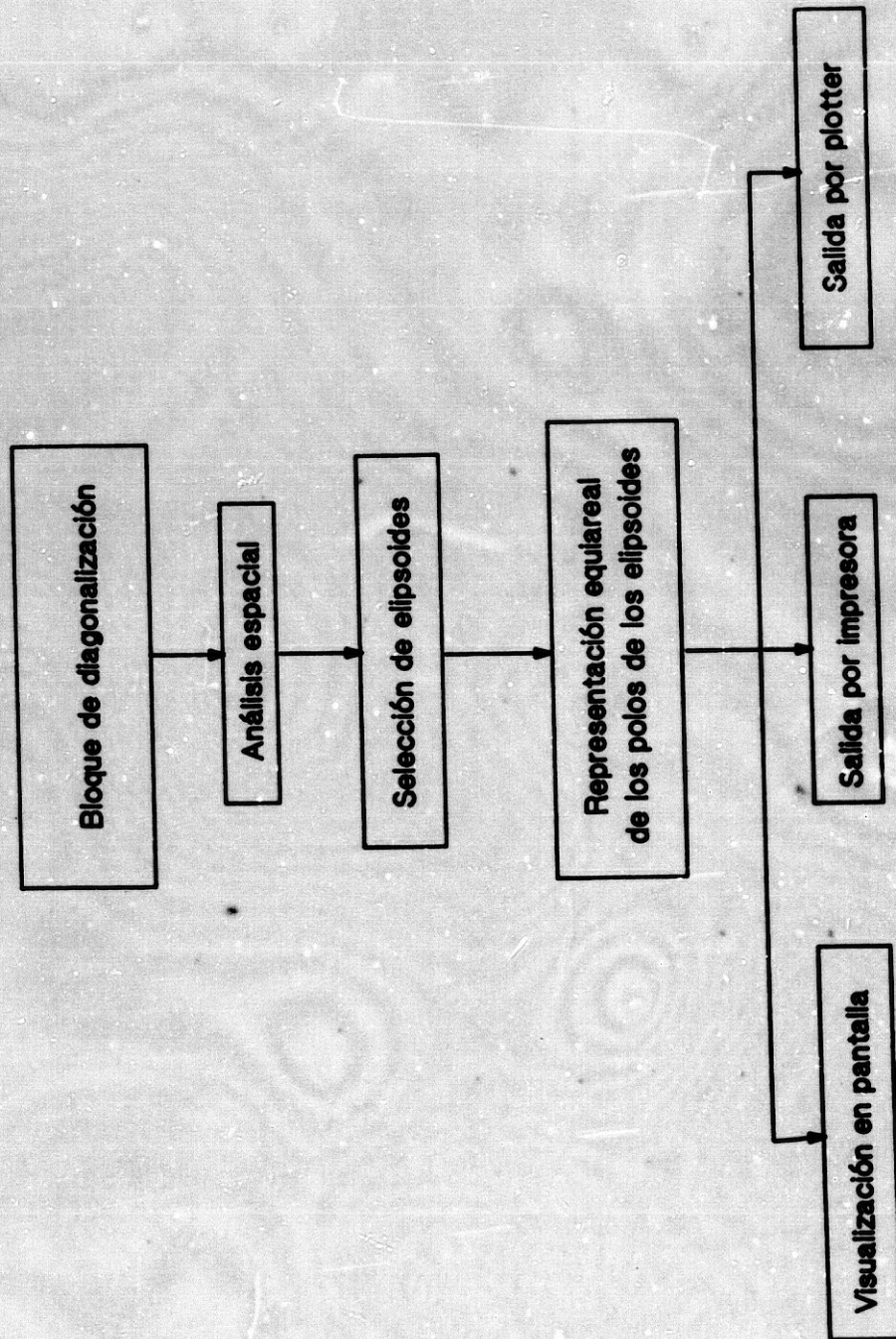
La implementación del método de los tres puntos, por haberse diseñado para su uso en PC, se ha hecho mediante una serie de programas que pueden encadenarse entre



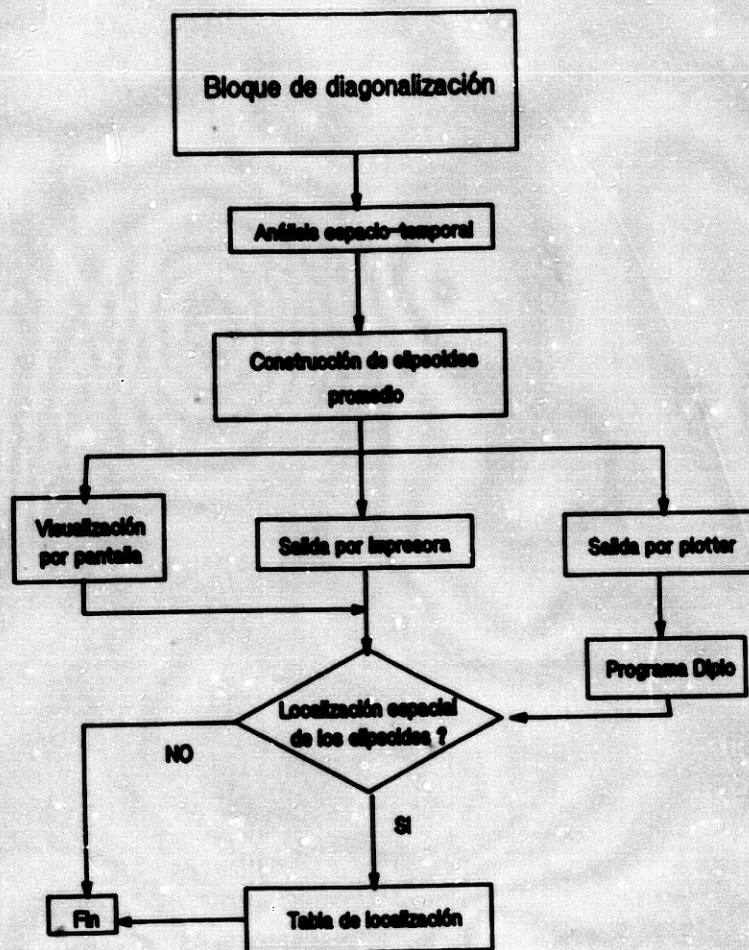
**Fig. 5.6.** *Bloque de elección de la ventana móvil de sismos para el programa ACPTEM. Existen dos posibilidades, basarse en la función  $Q(N, K)$  de Ebbin & Michelini (1986) o construir la función  $C_{m1}^{m2}(N, K)$  propuesta en esta Tesis. Si se ha podido calcular el valor óptimo de  $K$  por algún otro método, se le puede proporcionar directamente.*



**Fig. 5.7.** *Bloque de diagonalización en el programa ACPTEM. Básicamente este conjunto de subrutinas realiza los mismos cálculos que el del programa ACPESP, pero tiene una salida triple para permitir un análisis espacial de los resultados, un análisis espacio-temporal o simplemente, obtener vía impresora el conjunto de autovalores, autovectores y otros datos de interés.*



**Fig. 5.8.** Bloque para el análisis espacial de los resultados en el programa ACPTM. Consiste en una representación estereográfica de todos los polos seleccionados tras comprobar que verifican el criterio volumen-plano. Pueden obtenerse diferentes salidas.



**Fig. 5.9.** *Bloque para el análisis espacio temporal de los resultados en el programa ACPTEM. Este conjunto de subrutinas agrupa los polos de aquellos planos que no difieran entre sí más de ciertos límites preestablecidos según un criterio de similitud. Tras este agrupamiento se construye un plano medio con todos ellos, y que tiene la particularidad de que agrupa polos sucesivos temporalmente. También es posible obtener la localización de los distintos elipsoides.*

### *Implementación de los métodos*

sí y que realizan parcialmente los cálculos que le son encomendados archivando los resultados en un fichero creado a tal fin. Este sistema es el idóneo puesto que el tiempo de computación que hace falta para realizar todos los cálculos necesarios en este método sería muy grande y porque los resultados intermedios pueden utilizarse para otro tipo de análisis. Así, por ejemplo, se ha escrito un programa que analiza la distribución de un conjunto de hipocentros en longitud, latitud y profundidad, y estos resultados se usan para hacer una descripción estadística de la muestra.

La implementación del método de los tres puntos se ha realizado con la creación de los siguientes programas: *Distri*, *Simu*, *TRP*, *Ji2*, *Prefer*, *Tsuj*, *Parti*, *Sorting* y *Evefal*. A continuación se hace una descripción de cada uno de estos programas.

### **III.2. Características generales de la implementación del MTP.**

El problema principal en la ejecución práctica del MTP es el tiempo computacional que necesita. El programa principal, TRP, que es el encargado de encontrar todos los planos formados con ternas de terremotos y clasificarlos en una de las retículas elegidas puede necesitar muchas horas para realizar su tarea. Obsérvese que si se dispone de una muestra de  $N$  sismos, el número de planos que pueden formarse asciende a  $N(N-1)(N-2)/6$ ; para un conjunto de 200 hipocentros esto significa más de  $1,3 \cdot 10^6$  planos que formar y analizar. Este análisis además, debe de realizarlo no sólo para la muestra real de sismos sino también para todas las simulaciones que se hayan construido a fin de corregir del efecto de forma.

Esta dificultad motivó la creación de varios programas que realizan cálculos parciales de forma que pueden usarse varios PC simultáneamente que realizan tareas sucesivas. Estos programas se describen brevemente a continuación.



*El programa DISTRI.*

Este programa analiza la distribución de sismos original para luego usarla en la generación de las simulaciones. Se trata de un algoritmo que divide todo el volumen en el que se encuentran los sismos en cubos elementales de unas dimensiones determinadas. A continuación se detectan los cubos que contienen sismos y se cuentan cuántos hay en cada cubo; el resultado proporciona información acerca de la distribución de los sismos en la zona. Estos datos se archivan en ficheros que usaran los programas siguientes.

*El programa SIMU.*

Es un programa que crea tantos conjuntos de datos aleatorios (simulaciones) como se quieran; la condición que cumplen cada uno de ellos es que tienen la misma distribución en longitud, latitud y profundidad que la muestra real. Para ellos se sirve de la información que ha generado el programa DISTRI.

*El programa TRP.*

Es el programa principal para el análisis MTP. Con este programa se estudia la muestra real de sismos y las simulaciones generadas por el programa Simu; este estudio comprende la formación de un plano con cada combinación de tres eventos, la obtención del polo correspondiente a este plano y la búsqueda de la retícula en la que se encuentra. En este programa se imponen las condiciones espaciales que deben darse para que los tres eventos escogidos sean válidos, es decir, que no estén más cerca que el error hipocentral en las localizaciones ( $D_1$ ) y que no estén más separados que las dimensiones máximas esperadas en el volumen de fracturación ( $D_s$ ).

*El programa JI2.*

Este programa comprueba que los conjuntos de datos aleatoriamente distribuidos son estadísticamente diferentes de los reales, pese a tener su misma distribución en el sentido antes explicado. Para ello se utiliza la distribución  $\chi^2$ , aunque puede implementarse otra.

*El programa PREFER.*

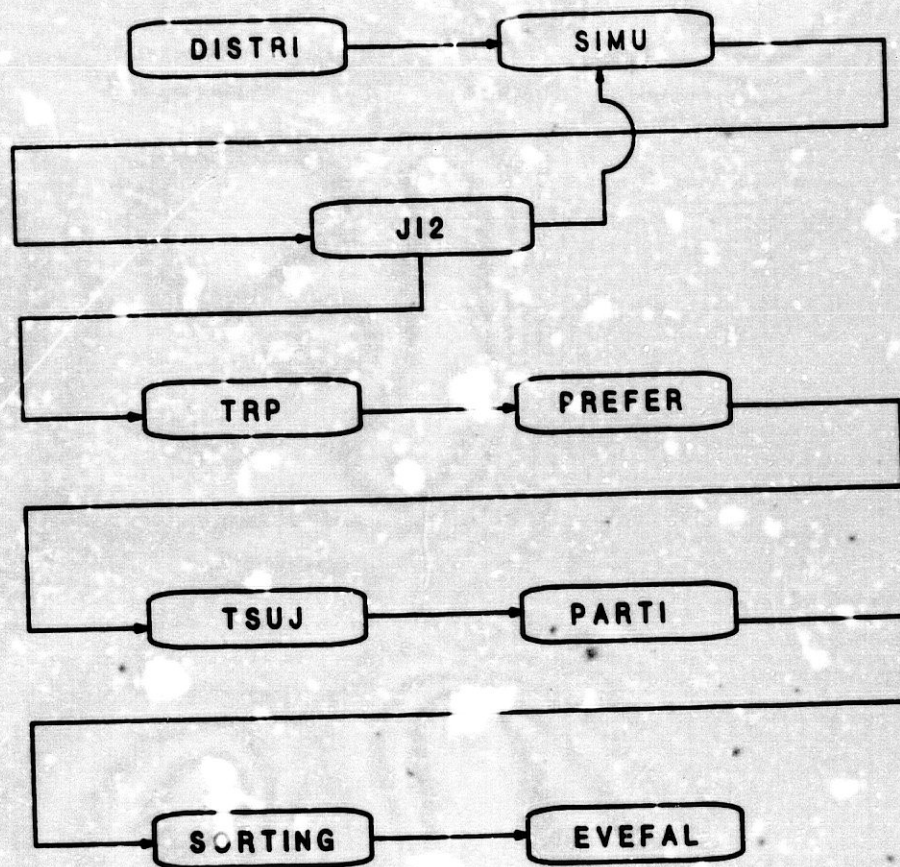
Es un programa que analiza los datos que TRP previamente ha obtenido con datos reales y aleatorios y determina las orientaciones preferidas de acuerdo al criterio mencionado en el capítulo anterior. En este programa se corrige el efecto de forma y se presentan las orientaciones dominantes de los planos encontrados por TRP.

*El programa TSUJ.*

Es un programa que obtiene cuántas veces contribuye un sismo a la construcción de un plano que corresponda a una de las orientaciones consideradas dominantes en la zona. Este programa genera un archivo secuencial en el que se recogen estos datos globalmente para todos los terremotos. Esto se realiza así para ahorrar tiempo de computación aunque tiene el inconveniente de que es necesario dividir de manera conveniente este fichero general en subficheros que correspondan a cada una de las orientaciones preferentes.

*El programa PARTI.*

Este programa divide de manera adecuada el archivo de resultados generado



**Fig. 5.10.** Esquema de trabajo de los distintos programas que permiten el análisis mediante el método de los tres puntos. La implementación de este método conlleva los siguientes cálculos: obtener la distribución de sismos en latitud, longitud y profundidad (DISTRI), creación de tantos conjuntos de datos aleatorios como se quieran con la condición de que cada uno de ellos tenga la misma distribución en longitud, latitud y profundidad que la muestra real (SIMU), la formación de los planos con cada combinación de tres eventos (TRP), la comprobación de que los conjuntos de datos aleatorios estadísticamente diferentes de los reales (JI2), la determinación de las orientaciones preferidas (PREFER.), la determinación de cuantas veces contribuye un sismo a la construcción de un plano que corresponda a una de las orientaciones consideradas dominantes (TSUJ, PARTI, SORTING y EVEFAL).

por TSUJ construyendo subficheros que utiliza el programa siguiente.

***El programa SORTING.***

Es un programa que ordena de mayor a menor los datos que contienen cada uno de los subficheros que PARTI ha encontrado. Se ha usado el método de la burbuja que es uno de los más usuales, simples y eficaces. Su nombre proviene de la semejanza con las burbujas en un depósito de agua, donde cada una busca su propio nivel. En el Apéndice F se da una descripción de este método.

***El programa EVEFAL.***

Es un programa que selecciona de la muestra real los sismos que se han contribuido más veces a la generación de planos dominantes los dibuje si se cree conveniente.

En la figura 5.10 se representa a modo de resumen el *modus operandi* de la serie de subrutinas que se han descrito.

**IV. REPRESENTACION DE LOS RESULTADOS: LA PROYECCION DE SCHMIDT**

Cuando se analizan gran cantidad de datos resulta muy conveniente disponer de una representación simple bidimensional de los mismos. Como lo que se pretende representar son planos, éstos pueden ser descritos por sus polos o por una línea simple que indique la dirección y buzamiento de los mismos. Asimismo, en el caso de representación de vectores, como es el caso de los autovectores menor (polo de la distribución planar) y mayor (dirección espacial dominante de dicha distribución planar)

en el caso del ACP, éstas representaciones bidimensionales son muy adecuadas y fácilmente interpretables.

Las Componentes Principales, que están determinadas por los vectores propios obtenidos de cada matriz de dispersión, pueden ser representadas en la Proyección de Schmidt o equiareal, que es la que aquí se ha elegido. A diferencia de la Proyección de Wulf o estereográfica, que preserva los ángulos transferidos desde la esfera focal, la de Schmidt conserva la proporcionalidad de las áreas situadas en la esfera focal. Asimismo, los planos obtenidos mediante MTP pueden representarse por su polo en la misma proyección.

Cualquier vector queda determinado conociendo su punto de aplicación, dirección, sentido y módulo. El punto de aplicación, O, se define para cada autovector en el centroide de los datos con los que se construye la matriz de dispersión correspondiente. La dirección y sentido viene dada por los ángulos de acimut,  $\phi$ , e inclinación,  $i$  (fig. 5.11). Finalmente, su módulo,  $|OP|$ , puede conocerse fácilmente a partir de sus componentes. Estas son conocidas puesto que la subrutina Jacobi o Prefer nos las proporcionan.

En la representación equiareal o de Schmidt un punto P se proyecta como P' siguiendo el esquema de proyección de la figura 5.12.

La distancia AP' viene dada por (Hobbs et al, 1981):

$$(5-39) \quad AP' = 2^n R \text{ Sen}(\pi/4 - i/2) = 2^n R \text{ Sen}(i/2)$$

donde se introduce el factor de escala  $2^n$ . Cuando se usen datos cuyos ángulos  $i$  son

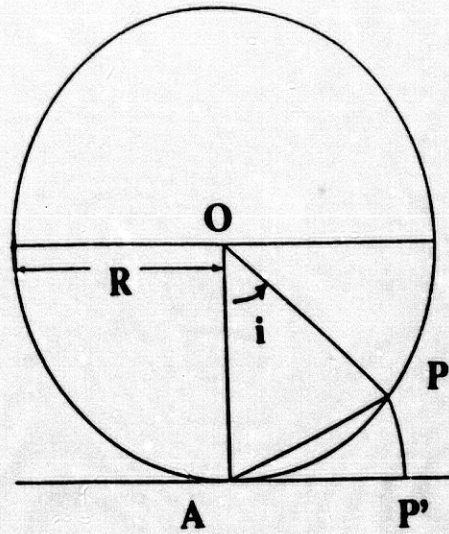


Fig. 5.11. Fundamento de la proyección de Schmidt para el punto P. Su representación equiareal sería el punto P'.

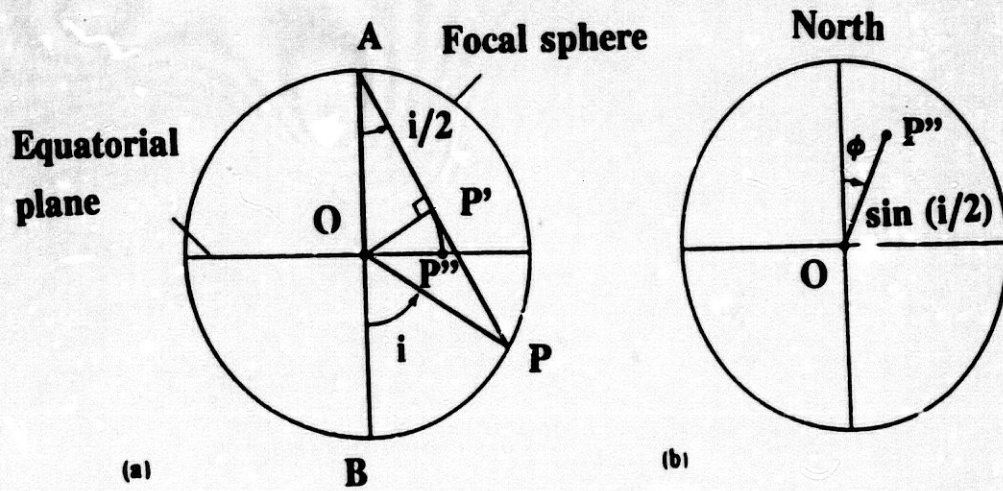


Fig. 5.12. (a) Otra forma de mostrar el valor del vector  $OP$  según la proyección de Schmidt, normalizado ( $OP'$ ) y tal como queda representado en el plano de proyección ( $OP''$ ). (b) Posición del punto proyectado  $P''$  en el plano de representación.

mayores de  $90^\circ$ , la parte que se proyecta de la esfera focal es la superior.

Si se mezclan datos con  $i$  menores y mayores de  $90^\circ$ , estos últimos se trasladan en la esfera focal a un punto opuesto situado en el hemisferio inferior (Guirao et al, 1983). Para realizar esta transformación se pone como ángulo de acimut  $\phi + \pi$ , y como ángulo de inclinación  $\pi - i$ . Con esta transformación ya puede usarse la operación dada por la expresión anterior.

Para determinar en la práctica la proyección de los autovalores se cuenta con las coordenadas de estos sobre el sistema de referencia X (Longitud), Y (Latitud) y Z (Profundidad). Sean  $x$ ,  $y$  y  $z$  las coordenadas del autovector (mayor o menor) que quiere proyectarse. El ángulo de inclinación viene dado por:

$$(5-40) \quad i = \arctan \left\{ \frac{x^2 + y^2}{z} \right\} \quad \text{si } z > 0$$

$$(5-41) \quad i = \pi/2 \quad \text{si } z = 0$$

En caso de ser  $z < 0$ , esto es, que el vector tenga un ángulo de inclinación mayor de  $90^\circ$  entonces:

$$(5-42) \quad i' = \pi - i$$

con lo que ya puede calcularse el valor de la proyección. La determinación del acimut se consigue tan solo con las dos primeras coordenadas:

$$(5-43) \quad \phi = \arctan \left\{ \frac{x}{y} \right\} \quad \text{si } z > 0, y \neq 0$$

$$(5-44) \quad \phi' = \phi + \pi \quad \text{si } z < 0, y \neq 0$$

debiendo considerar el signo de  $x$  e  $y$ . Si  $y = 0$  puede ocurrir que:

### Implementación de los métodos

$$(5-45) \quad \phi = \pi/2 \quad \text{si } x > 0$$

$$(5-46) \quad \phi = 3\pi/2 \quad \text{si } x < 0$$

Finalmente, antes de representar cualquier vector, han de tenerse presentes las coordenadas de la pantalla y la posible existencia de un factor de escala en alguno de sus ejes. Así, las coordenadas en pantalla de un vector en el primer cuadrante definido por  $AP'$  y  $\phi$  para una tarjeta gráfica Hércules están dadas por:

$$(5-47) \quad x = AP' \text{ Sen } (\phi) + x_0$$

$$(5-48) \quad y = (2/3) AP' \text{ Cos } (\phi) + y_0$$

donde  $2/3$  es un factor de escala para las ordenadas y el punto  $(x_0, y_0)$  es el centro elegido para el círculo sobre el que se hará la proyección.

### V. COMENTARIOS.

En este capítulo se ha descrito la implementación de los métodos que se proponen para el análisis morfológico de un sistema de fallas sísmicamente activo. Aunque la dificultad teórica de los métodos ACP y MTP no es muy grande, la cantidad de cálculo necesaria para su ejecución con muestras de sismos suficientemente grandes obliga al uso del ordenador y de un software adecuado. Los programas que se han desarrollado en este trabajo han sido implementados en un PC para su amplia utilización y se han escrito en Basic, lo cual permite su adaptación a cualquier modelo compatible o a ordenadores más potentes para el caso de muestras de sismos grandes.

La principal dificultad en la implementación de los métodos ACP (el ACPE y el



ACPT) radica en la diagonalización de las matrices de dispersión. Como este cálculo ha de repetirse muchas veces, es necesario un algoritmo de diagonalización rápido y eficiente. Por ello, se ha hecho un repaso de las técnicas de diagonalización de matrices que ha permitido decidir sobre el método a usar. Un estudio teórico y práctico de los principales algoritmos puso de manifiesto las ventajas del método de rotaciones de Jacobi, que pueden resumirse en:

- es el método más eficiente para matrices de orden moderado
- proporciona los tres autovalores y los correspondientes autovectores simultáneamente
- tiene su convergencia asegurada para matrices reales simétricas, que es nuestro caso
- es una técnica sencilla de implementar y simple de usar
- es rápida para matrices del orden aquí usado si se compara con algoritmos similares (p.e. el método de la potencia)

Con un algoritmo de diagonalización basado en el método de rotaciones de Jacobi se han escrito los programas necesarios para el análisis completo mediante ACPE y ACPT. Estos programas se denominan ACPEP y ACPTM respectivamente y han sido descritos en este capítulo y en el apéndice E.

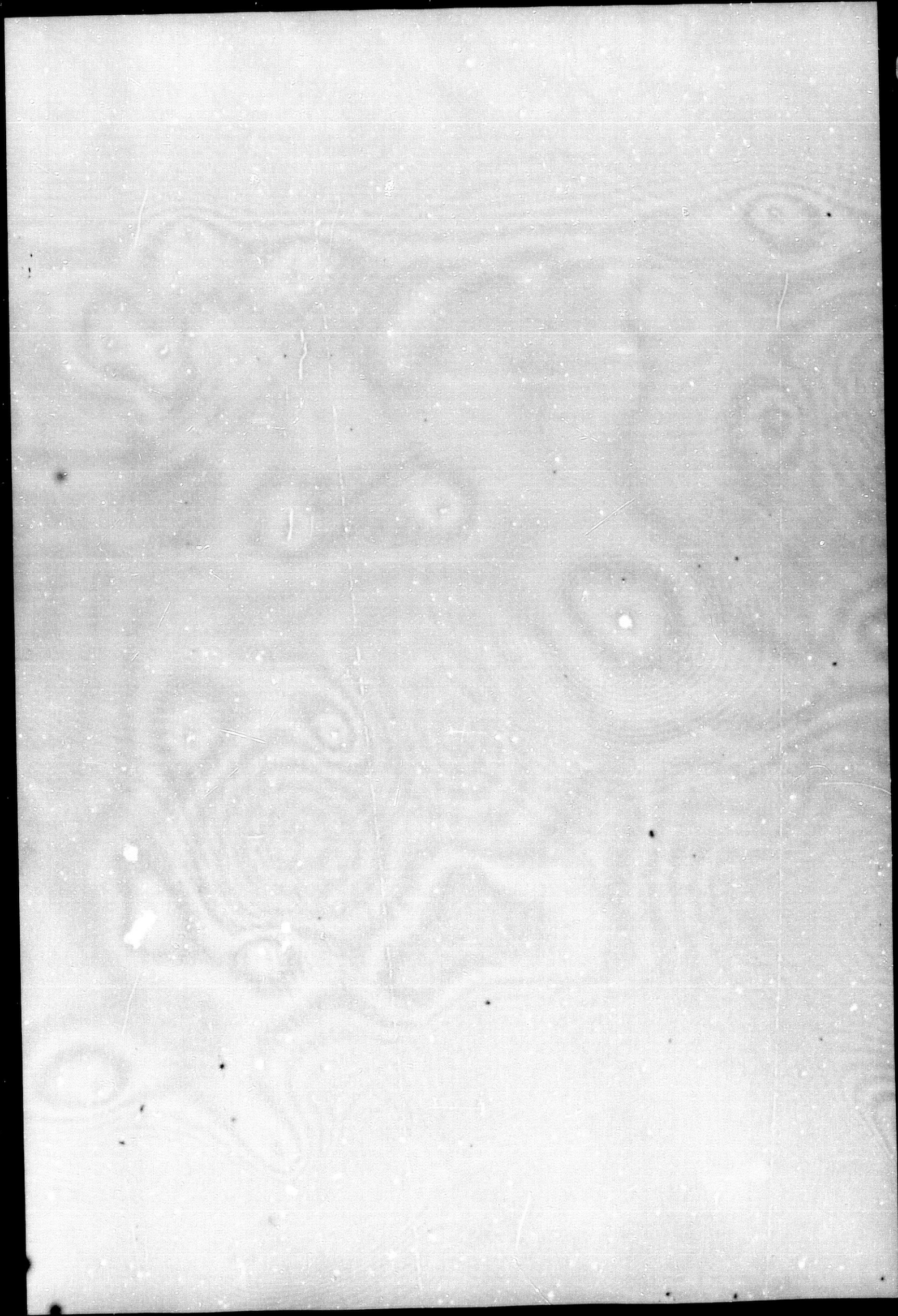
El método de los tres puntos requiere mayor tiempo de computación para su ejecución con muestras moderadamente grandes. Este hecho ha llevado a construir los programas para su realización práctica de forma independiente pero encadenada si quieren usarse ordenadores tipo PC. El conjunto de programas que la llevan a cabo ha sido descrito en este capítulo. La característica fundamental de este paquete de subrutinas es que todos los resultados parciales, por su cantidad, no pueden ser

### *Implementación de los métodos*

archivados como variables (al menos en un PC bajo DOS) y tienen que ser temporalmente guardados en ficheros que utilizará el programa siguiente. Esto, por otro lado, presenta la ventaja de que se dispone de estos datos parciales para eventuales estudios de otro tipo.

Finalmente, la interpretación de resultados es mucho más rápida y directa si se utilizan formas habituales de representación de los mismos y si estas son comparables con resultados obtenidos a partir de otros métodos. En este trabajo se ha optado por una proyección equiareal o de Schmidt por ser esta una de las representaciones más habituales de planos y polos.

Todo este bagaje de programas y subrutinas permite utilizar los métodos ACP y MTP de forma prácticamente rutinaria ante una serie sísmica o un enjambre, permitiendo reconocer de forma inmediata las tendencias dominantes en el fenómeno de fracturación y como va evolucionando la ruptura. Además, si las magnitudes son pequeñas y la serie ocurre fuera de la red, a menudo es difícil evaluar, mediante mecanismos focales, los esquemas de fracturación, por lo que estos métodos, implementados en los programas descritos en este capítulo, permiten una rápida visualización de las orientaciones preferidas de las fracturas antes de proceder al detalle del mecanismo, o bien para auxiliar en la elección del plano de falla.



*Tests y evaluación de errores*

**CAPITULO SEXTO**

**TESTS Y EVALUACION DE ERRORES EN LOS METODOS**

## I. INTRODUCCION

En este capítulo se tratarán los aspectos relacionados con la eficacia de los métodos, es decir, su capacidad para detectar planos de falla definidos por una distribución de focos, y por otra parte, la acotación de errores en los distintos métodos. Los objetivos que se persiguen no son únicamente éstos, se pretende además el establecimiento de los criterios que nos permitan elegir los valores de la ventana espacial de sismos D y de la ventana móvil de sismos K sabiendo de antemano los resultados que se tienen que obtener. Para ello nos ayudaremos de distribuciones hipotéticas de focos sísmicos colocados en el espacio de forma que definan un plano o un conjunto de planos con unas orientaciones predeterminadas. Los métodos ACP y MTP se aplicarán a tales distribuciones en sucesivos tests; estos tests nos permitirán establecer una metodología que pueda aplicarse a distribuciones reales de sismos.

Además, las distribuciones hipotéticas de sismos colocados de manera perfecta sobre un plano, serán considerados sismos con error de localización cero; a partir de aquí, se les introducirá error deformando este plano euclídeo y transformándolo en una estructura planar. Este procedimiento proporcionará la información necesaria para correlacionar errores en los datos con errores en los resultados. Esta es la idea que se desarrollará en el apartado de análisis de errores también en este capítulo.

Las novedades incorporadas a los métodos originales ACPT y MTP y el desarrollo del ACPE, desarrollado por completo en esta Tesis, ha llevado a que se hagan distintos tests que permitan comprobar la eficacia de los análisis que se proponen. Los métodos ACPT y MTP presentados en los capítulos segundo y tercero han sido probados en sus versiones originales por Ebbelin & Michelini (1986), Michelini & Bolt (1986), Fehler et al, (1987), Fehler & Johnston (1989) y Fehler (1990). En sus trabajos

estos autores usaron casos reales y han comprobado que las tendencias encontradas estaban de acuerdo con las determinadas por otros métodos sismológicos y geológicos. Los trabajos anteriores no realizaban un análisis de errores en los resultados; por ello, se propone también en este capítulo una forma de llevar a cabo tal análisis.

## **II. TESTS CON DISTRIBUCIONES SINTETICAS DE SISMOS.**

### **II.1. Introducción.**

En este apartado se probará la capacidad de los métodos para detectar los planos definidos por un conjunto de focos distribuidos espacialmente de forma que caractericen geoméricamente una falla o un conjunto de fallas. Para ello se van a usar distintas distribuciones de focos que definen diversos conjuntos de fallas. Estas distribuciones serán denominadas distribuciones sintéticas de sismos (DSS), ya que han sido generadas mediante programas de ordenador para crear fallas con orientaciones diferentes, distinto número de sismos en cada una, y una secuencia temporal en las formación de las fracturas. Con ello se pretende verificar si los métodos ACPE y MTP son capaces de detectar tales distribuciones, y si el método ACPT las encuentra y además nos informa acerca del avance temporal del proceso de fracturación.

### **II.2. Descripción de las distribuciones sintéticas.**

Se han generado tres DSS que permitan estudiar la capacidad de los métodos para detectar planos de falla, el avance del proceso de fracturación y los márgenes de error en cada uno de los métodos. Las distribuciones se han denominado P45, P4590, P459000.

La distribución de sismos sintética P45 consiste en una secuencia de 80 hipotéticos terremotos localizados uniformemente sobre un plano N 45 E que buza 45 grados al SE (fig. 6.1), y será utilizada para comprobar la precisión de los métodos, para el estudio del comportamiento de la función  $Q(N, K)$  y para la evaluación de los errores en los resultados.

La distribución de sismos sintética P4590 consiste en una secuencia de 140 hipotéticos terremotos localizados sobre dos planos: el primero de 30 eventos de dirección N 45 E que buza 45 grados al SE y el segundo de 60 sismos con dirección EW buzando 60 grados al S (fig. 6.2). La ruptura ha sido simulada de forma que la primera falla que se completa es la N 45 E y le sigue la EW. Por ello, esta distribución será usada para la comprobación de la eficacia de los métodos ACPE y MTP y se aprovechará la disposición temporal para comprobar el ACPT.

La distribución de sismos sintética P459000 consiste en una secuencia de 200 hipotéticos terremotos localizados en tres planos: uno N 45 E buzando 45 grados al SE, otro EW buzando 60 grados al S y finalmente, otro NS que buza 30 grados al W (fig. 6.3). Este modelo es el más complejo puesto que engloba tres planos que se cruzan; esta complejidad se traducirá en incertidumbre con los distintos planos que se construyan en la zona de intersección. La distribución está compuesta de 200 sismos que completan sucesivamente el primer plano, el segundo y el tercero. Por ello, será usada en el ACPE y en el ACPT. La aplicación del MTP a P459000 es impracticable en PC's, ya que el tiempo de computación puede alcanzar las 48 horas o más en cada ejecución del programa TRP; si se realizan, por ejemplo, 10 distribuciones aleatorias para corregir del efecto de forma, esto supondría un tiempo total de más de 20 días de uso del ordenador de forma continuada, y esto sólo con el programa TRP.

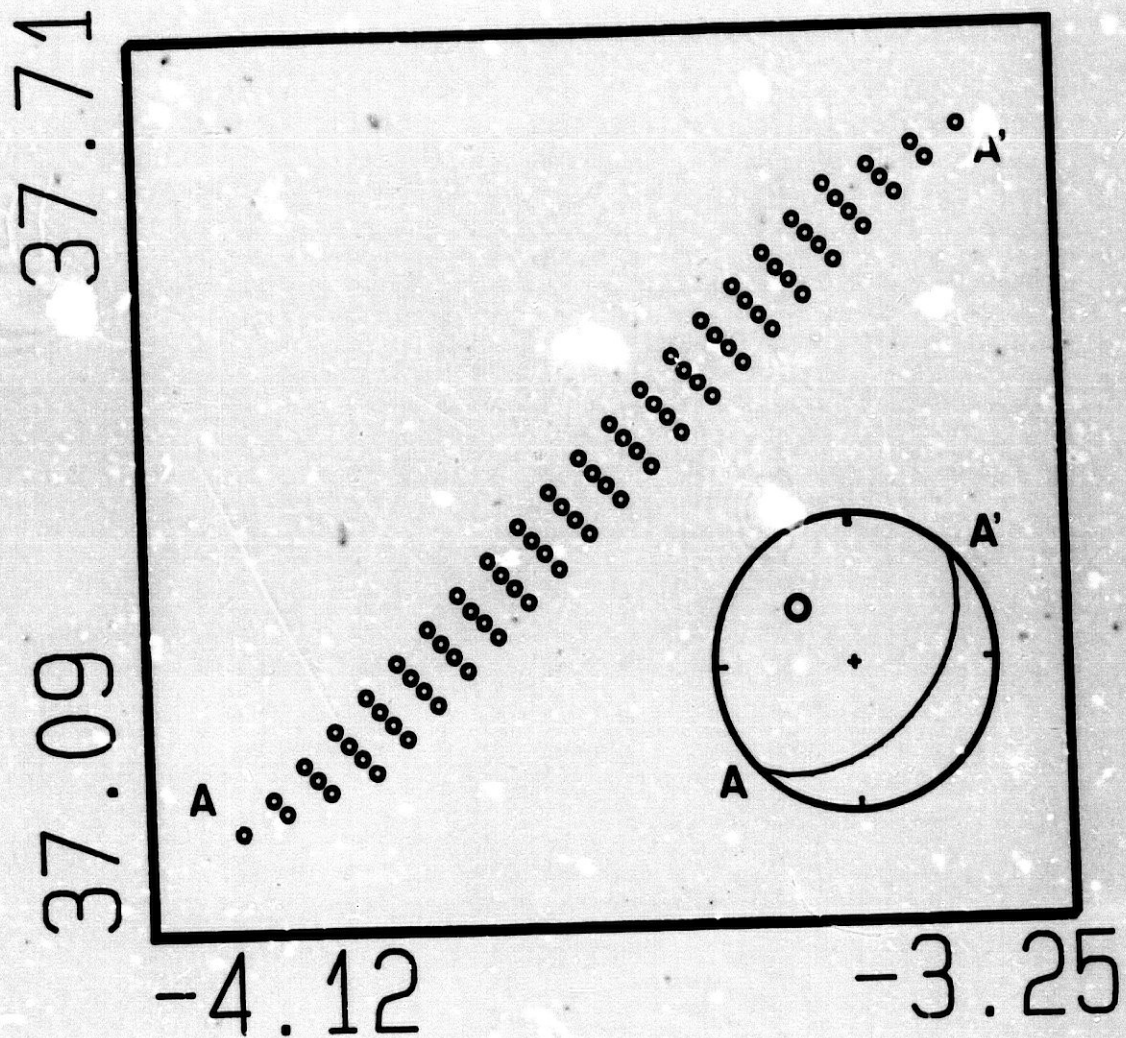


Fig. 6.1 *La distribución sintética de sismos P45. Cuenta con 80 eventos que forman un plano perfecto N 45 E buzando al SE. En la esquina inferior derecha se ha representado el plano que definen estos hipotéticos sismos en una proyección de Schmidt. Los sismos están situados a distintas profundidades y la fractura evoluciona desde el SW hasta el NE.*



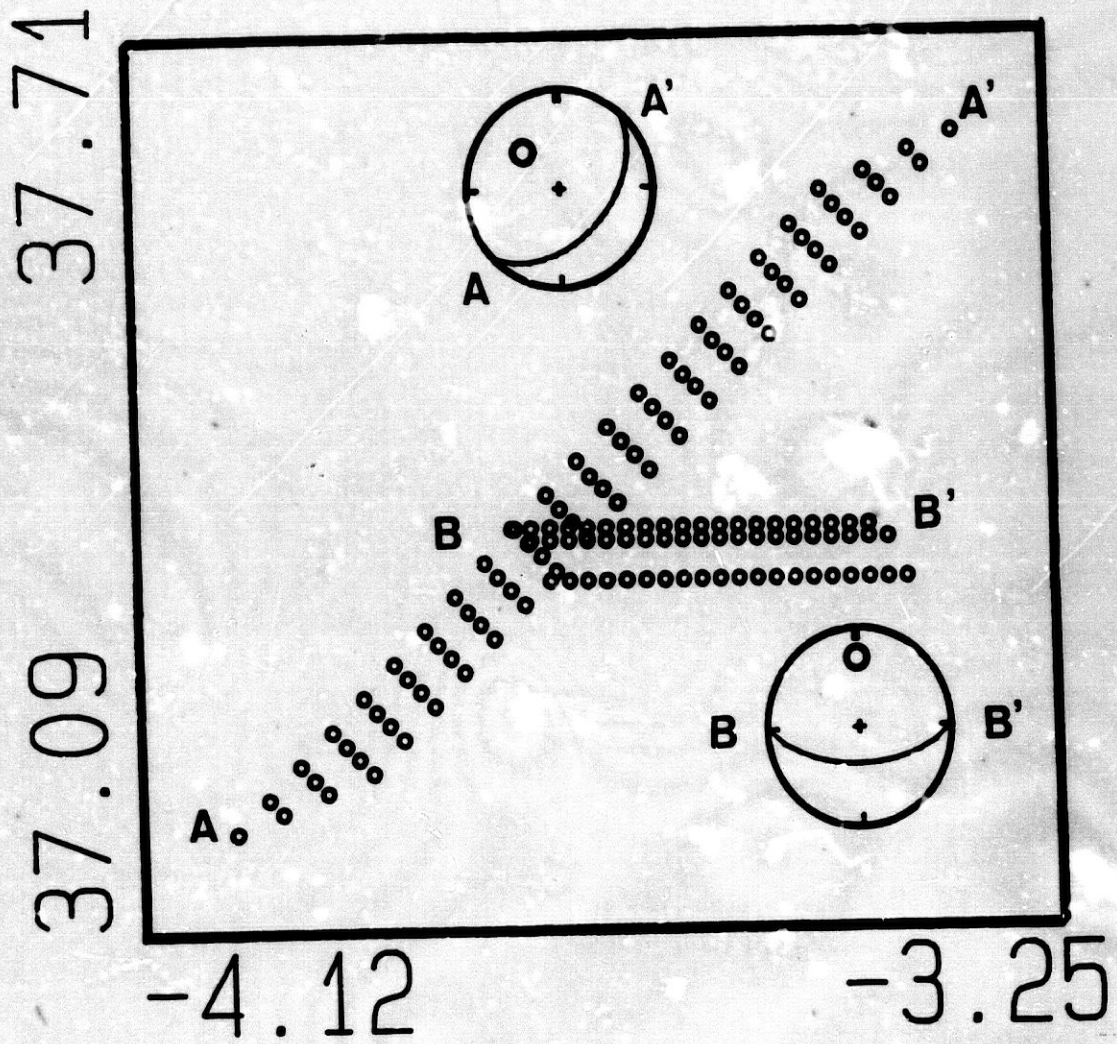


Fig. 62 *La distribución sintética de sismos P4590. Cuenta con 140 eventos que definen dos planos: el primero N 45 E es el primero en formarse; a continuación comienza a definirse el plano EW buzando 60 grados al S. Se han representado las proyecciones de Schmirk correspondientes para una mejor visualización de las fracturas.*

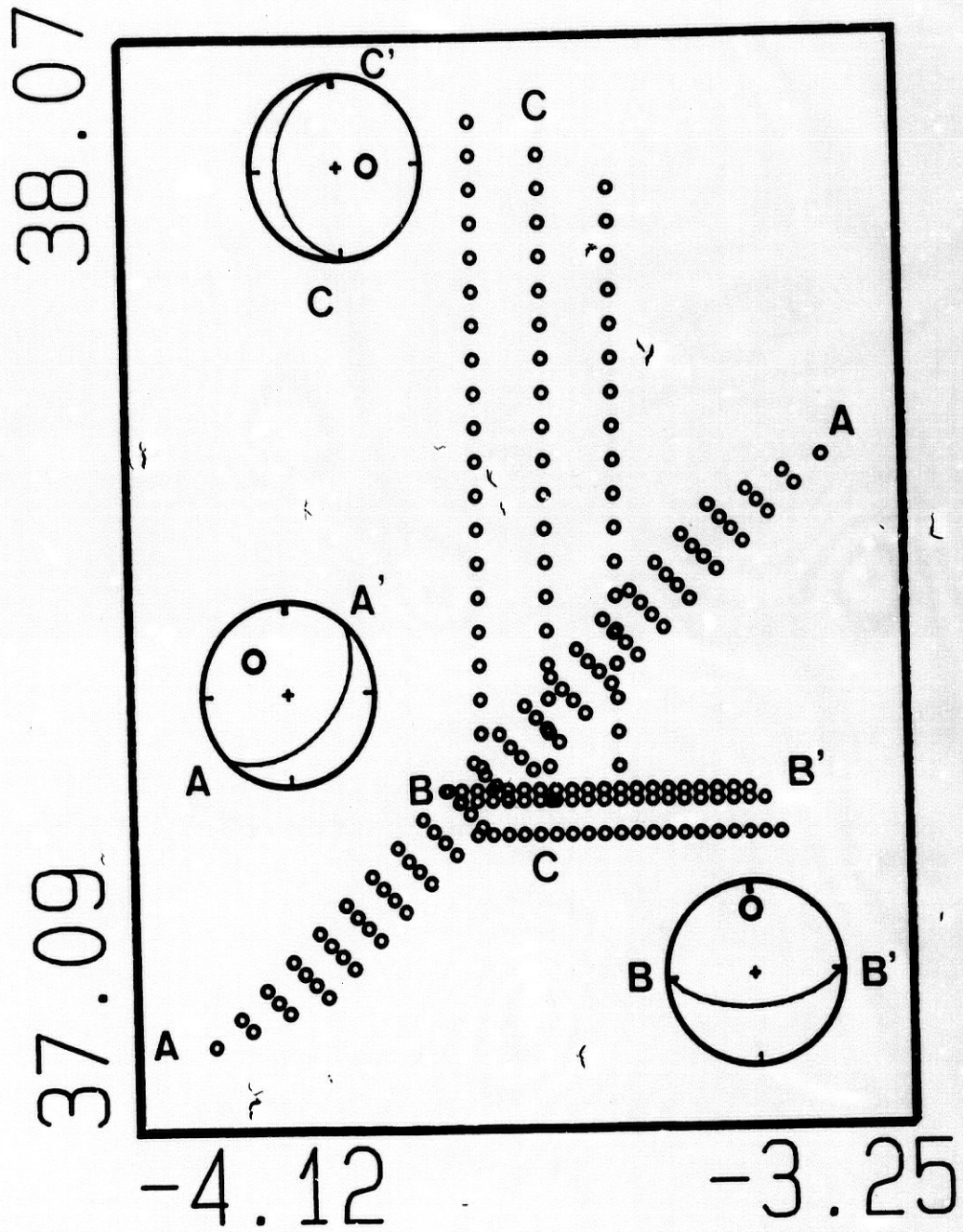


Fig. 6.3 La distribución sintética de sismos P459000. Cuenta con 200 eventos repartidos en tres fracturas que se supone evolucionan sucesivamente en el tiempo: la primera es N 45 E, la segunda EW y la tercera NS. Sus buzamientos son, respectivamente 45 grados al SE, 60 grados al S y 30 grados al W.

### II.3. Aplicación del método ACPE.

La aplicación del método ACPE a las distribuciones anteriormente descritas persigue dos objetivos: en primer lugar, comprobar que el método ACPE es resolutivo y eficaz y en segundo lugar, extraer conclusiones sobre el comportamiento del parámetro  $F$  y la utilización de histogramas de distancias para obtener la ventana espacial de eventos  $D$ .

#### II.3.1. Aplicación a la distribución P45.

El primer paso en la aplicación del ACPE consiste en construir un histograma de distancias para obtener la ventana espacial  $D$ . En la figura 6.4. puede verse este histograma y una curva que promedia los valores obtenidos. Según el criterio establecido en el capítulo tercero, y a la vista de este histograma, la distancia  $D$  que deberíamos tomar debe situarse en torno a los 60 km. La figura 6.5. muestra el resultado de la aplicación del ACPE cuando se toma como valor de  $D$  el de 60 km. No obstante, en esta distribución plana todos los valores de  $D$  son válidos siempre que esta tenga valga como mínimo el de separación entre tres eventos.

Como se observa en la figura 6.5. el resultado es el esperado, es decir, un plano con acimut N 45 E que buza 45 grados al SE.

#### II.3.2. Aplicación a la distribución P4590.

El histograma de distancias para esta distribución puede verse en la figura 6.6. Según el criterio establecido en el capítulo tercero,  $D$  debería tomar un valor alrededor de los 50 km. Para la distribución P4590 el valor de  $D$  coincide, de forma aproximada,

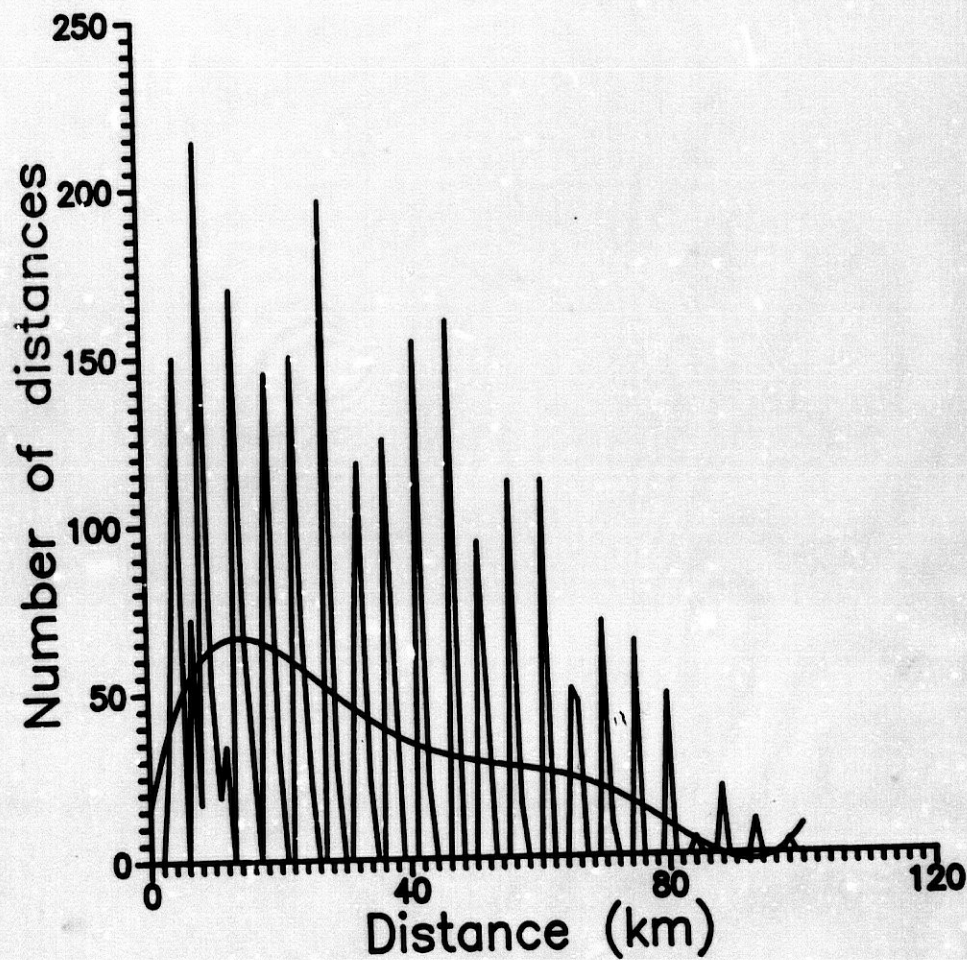


Fig. 6.4 *Histograma de distancias para la DSS P45. Para determinar la distancia D, que constituirá la ventana espacial en el método ACPE, se comienza por determinar el número de interdistancias entre terremotos frente a la medida de esa distancia. Se tiene así una gráfica de la que se puede obtener una estimación de la distancia para la cual la mayoría de los sismos, pero no todos, quedarían interconectados. La idealización del modelo P45 origina una curva muy quebrada como la que puede verse en esta figura; para evitarlo se ha realizado un ajuste de los puntos con los que se construye dicha gráfica y se ha superpuesto sobre la curva original.*

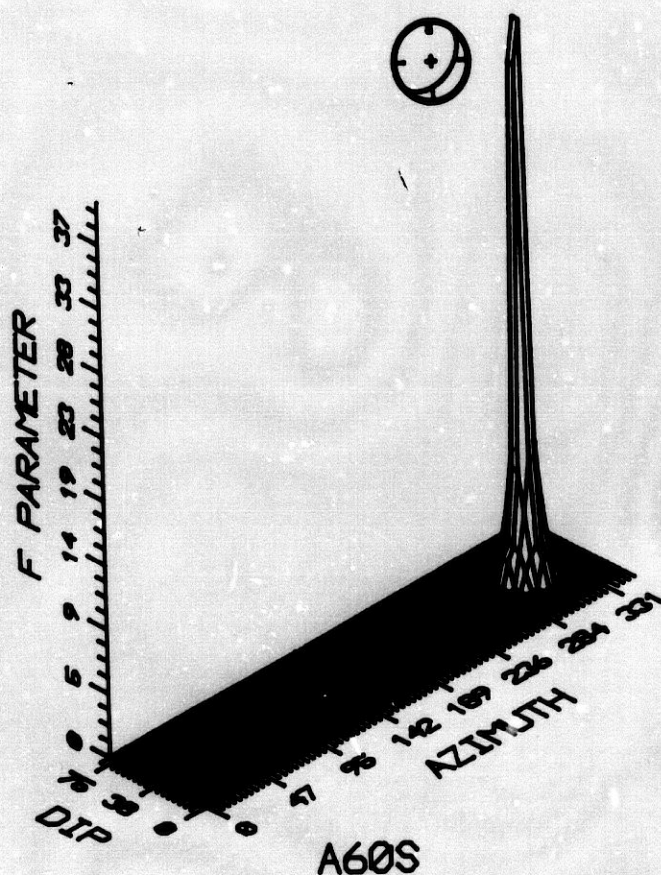


Fig. 6.5 Resultado de la aplicación del método ACPE a la DSS P45. ACPE, con cualquier ventana espacial que sea capaz de conectar al menos tres eventos, origina un diagrama acimut-buzamiento versus parámetro F como la que se muestra en esta figura. El pico aislado que se obtiene corresponde a un plano cuyo polo tiene 315 grados de acimut y 45 grados de buzamiento, plano al que se asemejarían los distintos elipsoides aplanados. En la parte superior derecha de la figura puede verse también la proyección de Schmidt del plano hallado.

con el punto de inflexión (o valores un poco menores) de la curva que se ajusta a los puntos del histograma.

Para corroborar este hecho se ha aplicado ACPE con diferentes distancias  $D$  y representando los resultados en distintas gráficas azimuth-buzamiento versus parámetro  $F$ . Las figuras 6.7a...i. muestran dichas gráficas tridimensionales para las ventanas de sismos establecidas con distancias  $D$  de 100, 80, 60, 50, 45, 40, 30, 10 y 5 km respectivamente. Obsérvese que cuando  $D$  es muy grande lo único que se establece es el plano promedio de la distribución total de los sismos; a medida que  $D$  se hace más pequeña, otras tendencias comienzan a aparecer (fig. 6.7b y c). Para el  $D$  que en principio consideramos óptimo, 50 km, (fig. 6.7d) pueden apreciarse dos picos relevantes, siendo más importante uno que otro, según se desprende del valor de  $F$ . Además, se aprecian otras tendencias subsidiarias mucho menos significativas. Con valores de  $D$  aun menores se tienen más orientaciones; esto se observa en las figuras 6.7e, f, g, h, i. Con los grupos formados para distancias menores de 50 km el parámetro  $F$  nos indica varias tendencias presentes en la distribución espacial, las 2 formadas por los planos generales de la distribución y otras (sobre todo cuando  $D$  es muy pequeña) que corresponden a aquellos elipsoides formados sobre todo en la zona de intersección; además, también se puede observar que a medida que los sismos considerados están todos más cercanos entre sí, los errores de localización (aquí generados como desviaciones aleatorias de los planos generales) influyen en la orientación de los elipsoides. Esto además nos hace evaluar mal la importancia de las tendencias de las dos distribuciones planares.

A medida que tomamos  $D$  más pequeña se están considerando tan solo las características de cada uno de los diferentes sectores de las estructuras planares y despreciando la relación de los eventos con los del resto de la distribución.

La aplicación del ACPE a esta distribución nos ha permitido establecer que la elección de  $D$  debe situarse en torno a valores ligeramente menores que donde se sitúa el punto de inflexión de la curva del histograma de distancias y que para este valor podremos determinar no sólo las tendencias preferidas sino otras secundarias. Además, ha quedado reflejado en la figura 6.7d otras tendencias que son el resultado de la incertidumbre en la intersección de los planos; estas también se muestran pero de forma mucho menos significativa que las que realmente existen.

### II.3.3. Aplicación a la distribución P459000.

El histograma de distancias para esta distribución puede verse en la figura 6.8. Para corroborar el resultado obtenido en la DSS P4590 se han elegido como valores óptimos de  $D$  aquellos situados ligeramente antes del punto de inflexión de la curva que se ajuste a los puntos del histograma de distancias. Al igual que en los casos anteriores, en la figura 6.9a, ... i se han representado distintas elecciones de  $D$  que nos permiten extraer algunas conclusiones útiles para la posterior aplicación del ACPE a casos reales.

Las características que se presentaban antes se mantienen, es decir, a medida que la ventana espacial  $D$  se hace más pequeña, aparecen una multitud de picos que indican más tendencias. Obsérvese que al principio, para  $D = 100$  km, sólo aparece una tendencia, la que promedia toda la distribución. A partir de la figura 6.9c ( $D = 60$  km) se tienen las tres tendencias que realmente existen en la muestra, pero la importancia relativa de estas no queda reflejada por los valores de  $F$ . No obstante, las tendencias han sido detectadas correctamente aunque con lógicas dispersiones debidas a la incertidumbre que se tiene en la zona de intersección de planos. Por otra parte, a partir de la figura 6.9.f ( $D < 30$  km) las orientaciones encontradas son muchas, por lo que para  $D$  menores de 30 km los resultados dejan de ser significativos.

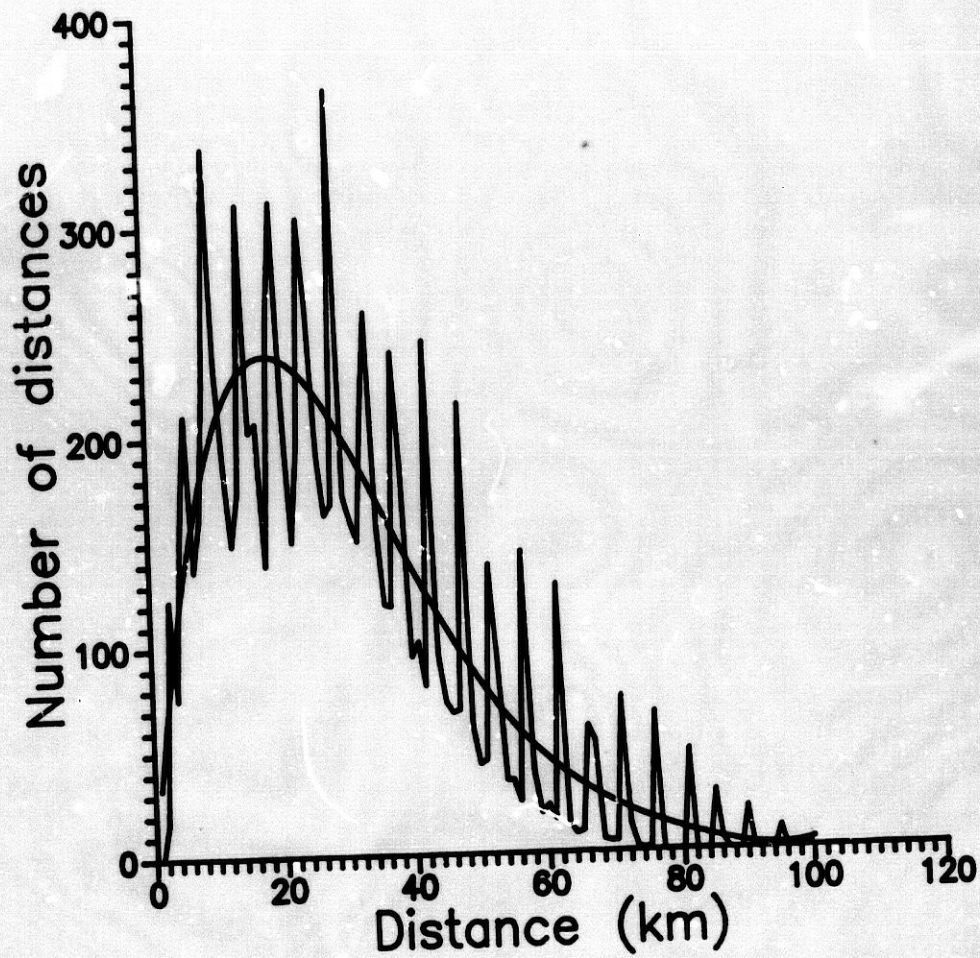
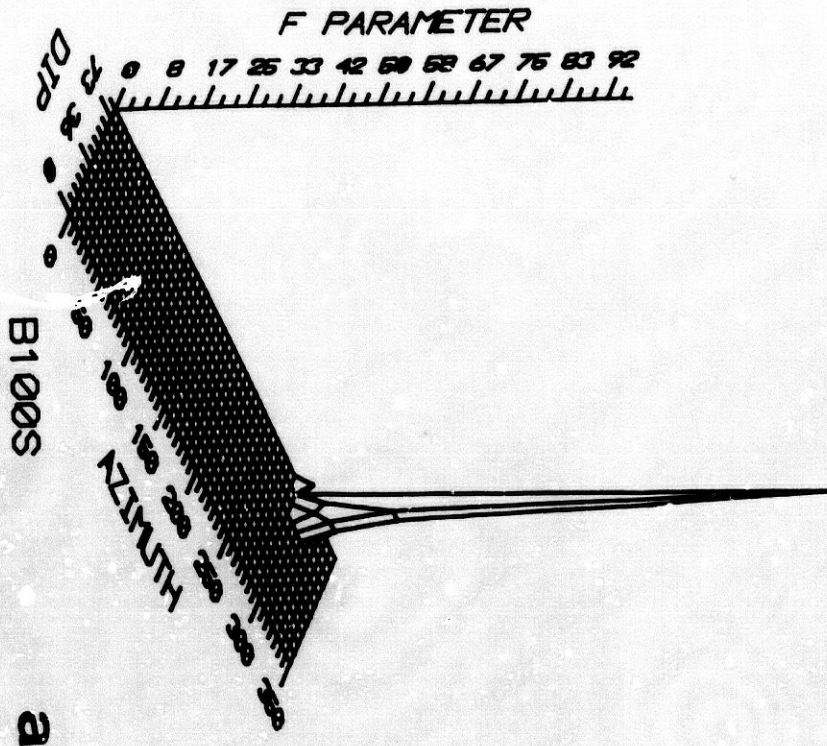


Fig. 6.6 *Gráfica de número de distancias entre terremotos frente a la medida de la distancia para la distribución sintética de sismos P4590. Para explicación véase figura 6.4. En este caso se ha tomado un valor de  $D = 50$  eventos.*

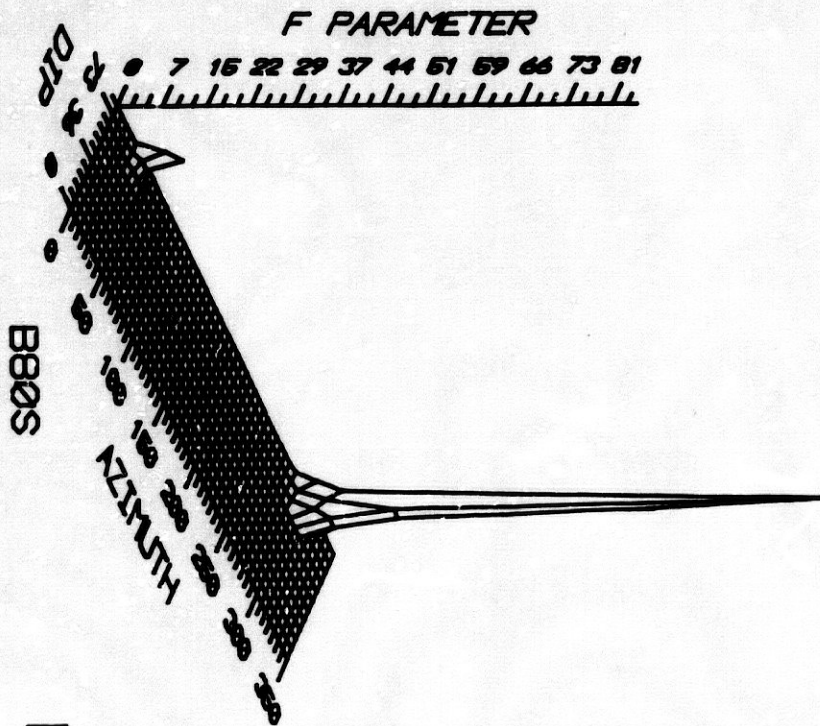


Fig. 6.7

Resultado de la aplicación del ACPe a la DSS P4550. En las figuras (a) hasta la (i) se presentan distintas gráficas acimut-buzamiento versus parámetro F para valores de D = 100, 80, 60, 50, 45, 40, 30, 10 y 5 km respectivamente. Puede observarse como a medida que D decrece aparecen una multitud de picos asociados a distintas orientaciones. Para el valor de D = 50 km se obtienen dos picos importantes y pequeñas orientaciones entre ellos. Este es el valor de D que debe tomarse, ya que detecta las orientaciones dominantes y la importancia de cada una de ellas si se tiene en cuenta el valor del parámetro F.



a



b

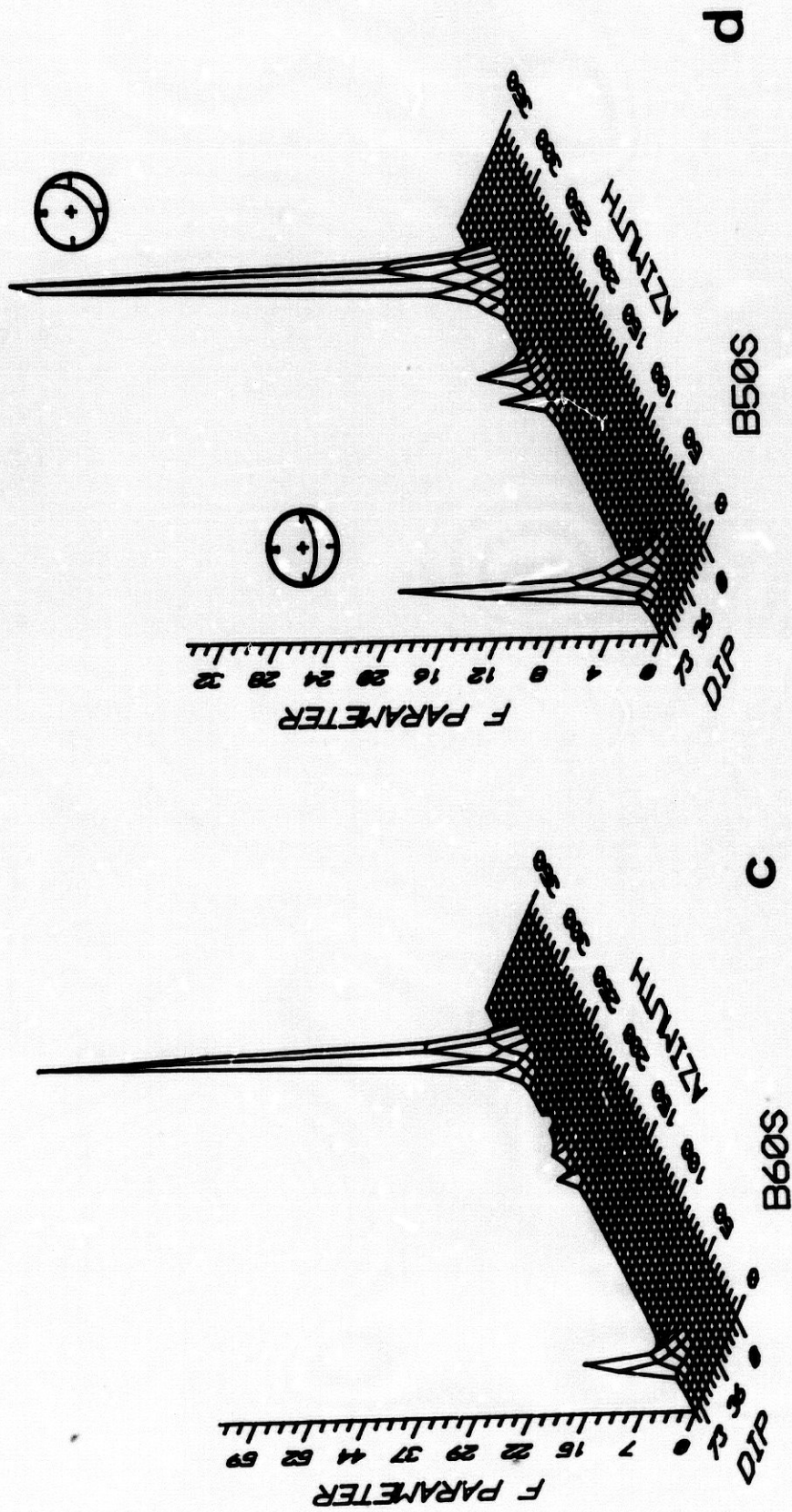
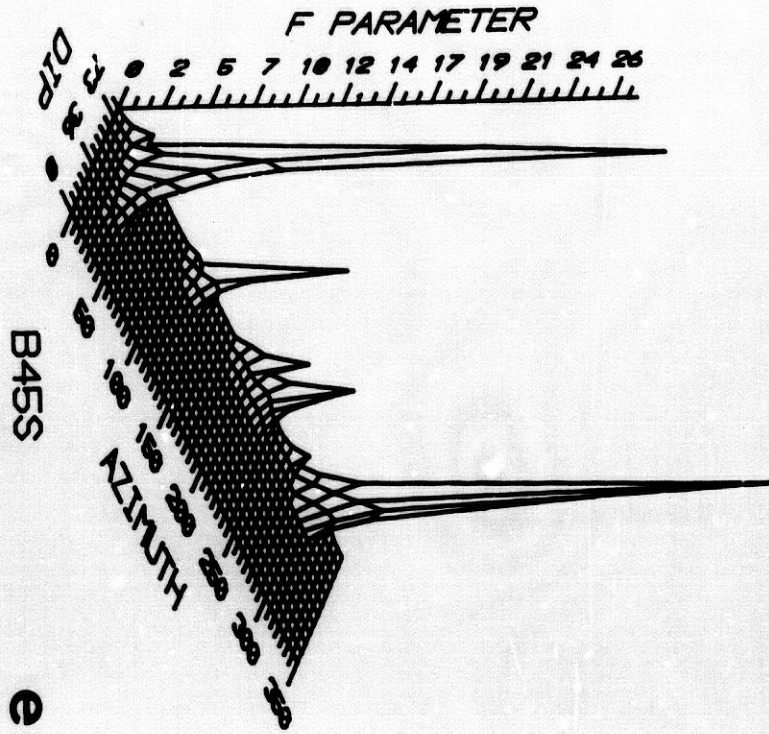
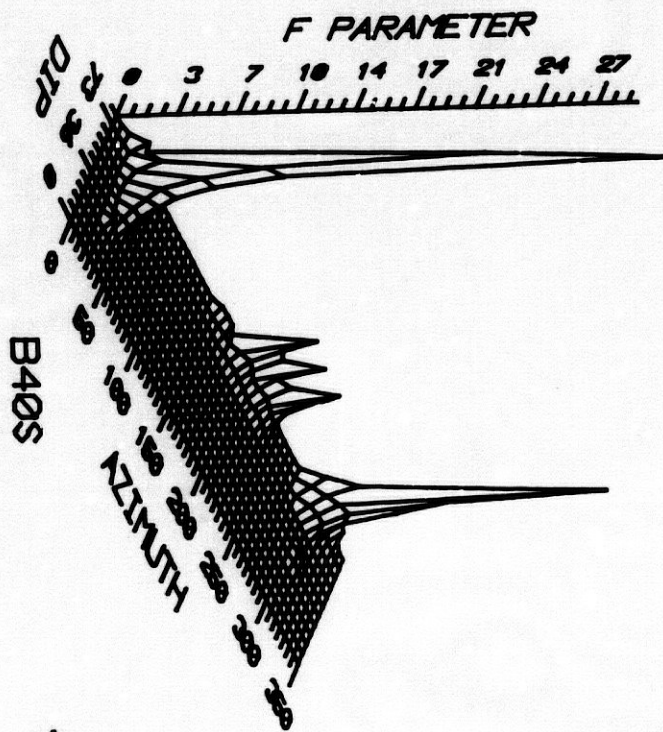


Fig. 6.7 ... continuación.



e



f

Fig. 6.7 ... continuation.

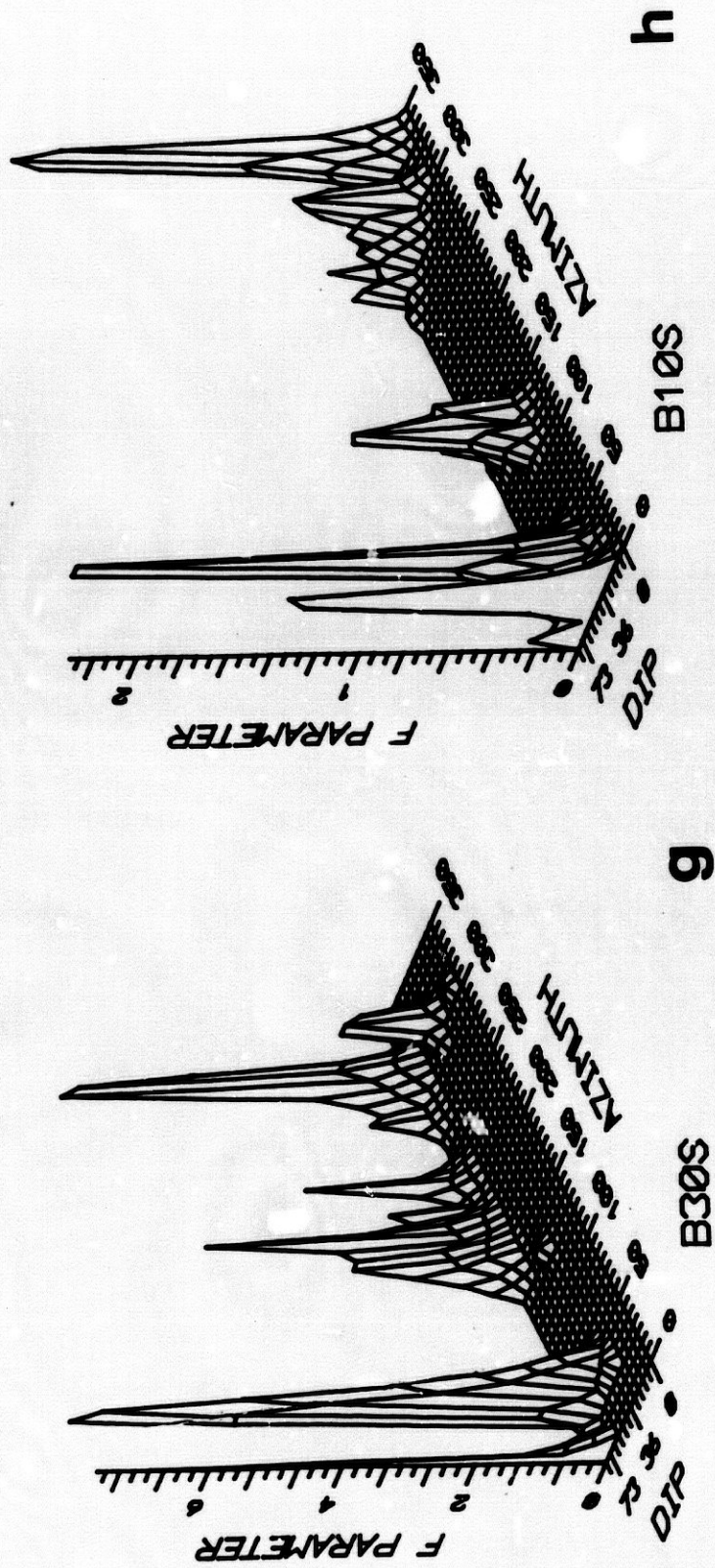


Fig. 6.7 ... continuación.

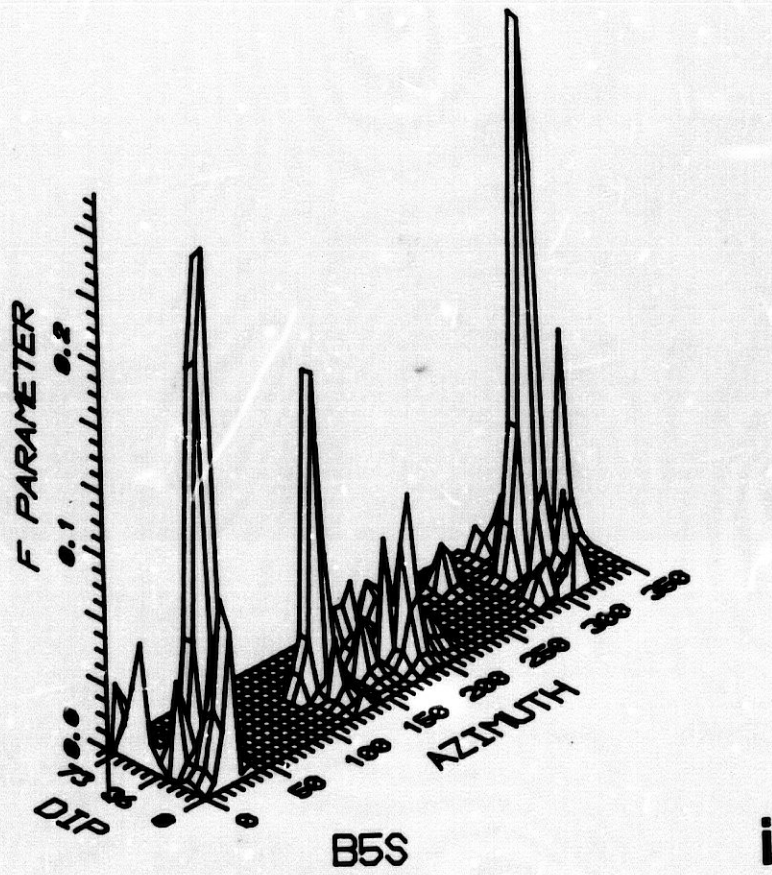


Fig. 6.7 ... continuación.

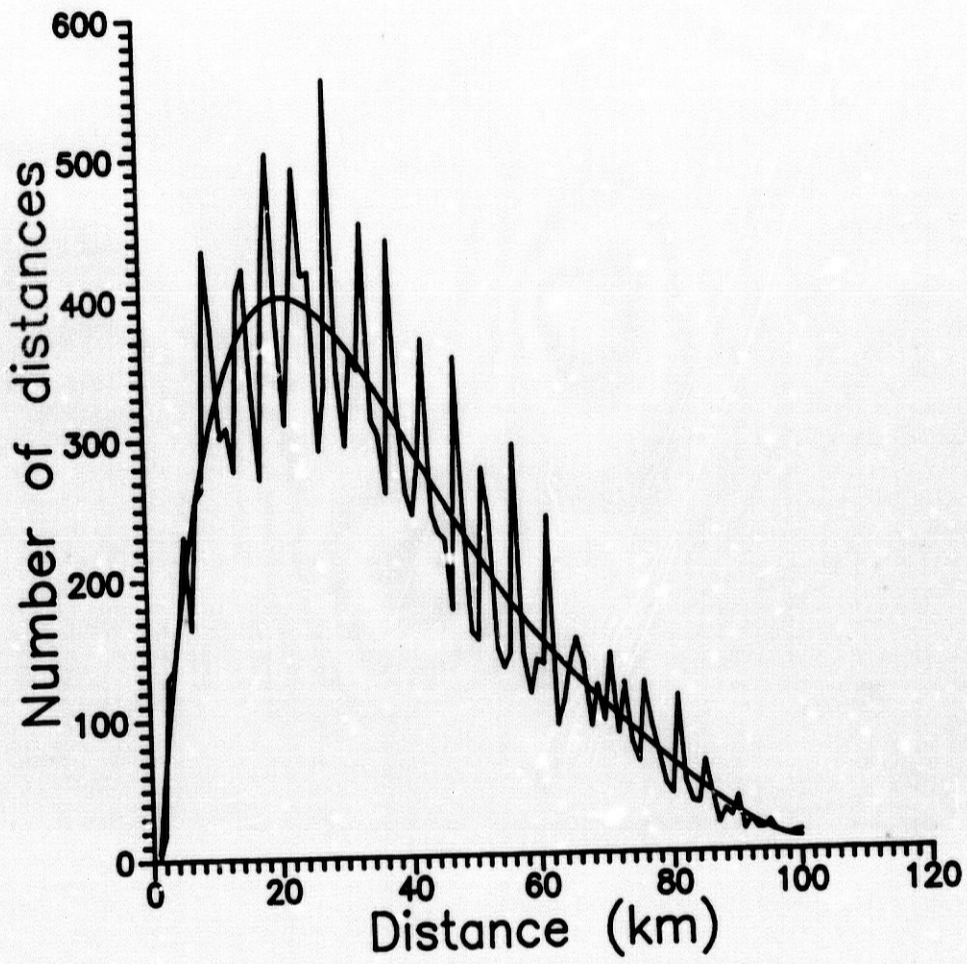


Fig. 6.8 *Diagrama de distancias entre eventos frente a la medida de la distancia para la distribución sintética de sismos P459000. Para una explicación véase figura 6.4. En este caso se ha tomado un valor de  $D = 40$  sismos.*

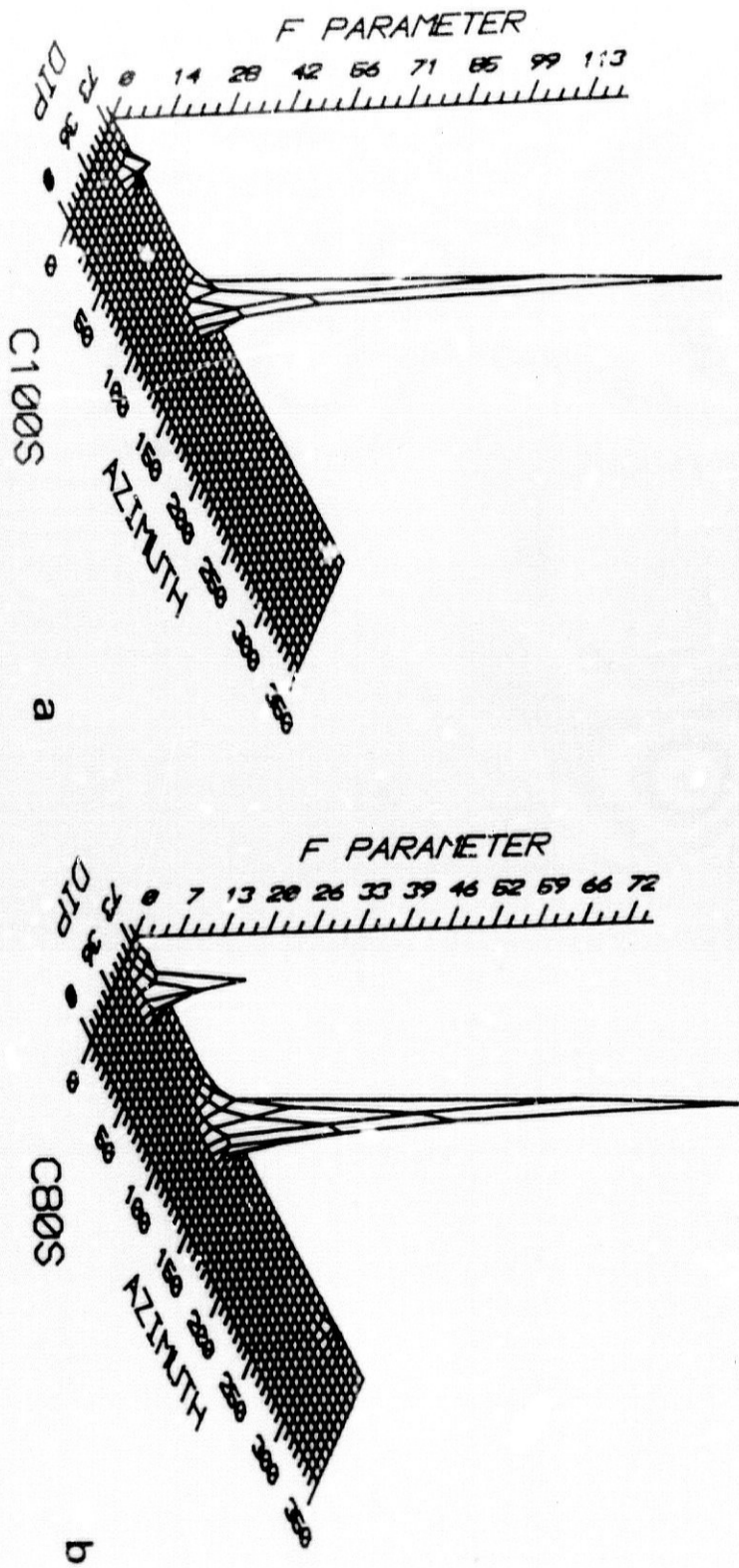


Fig. 6.9

Resultados de la aplicación del ACPE a la DSS P459000. En las figuras (a) hasta la (j) se presentan distintas gráficas acimut-buzamiento versus parámetro F para valores de  $D = 100, 80, 60, 50, 45, 40, 30, 20, 10$  y  $5$  km. Fue le observarse como a medida que  $D$  decrece aparecen una multitud de picos asociados a distintas orientaciones. Para el valor de  $D = 40$  km se obtienen tres picos importantes y pequeñas orientaciones entre ellos. Este es el valor de  $D$  que debe tomarse, ya que detecta las orientaciones dominantes y la importancia de cada una de ellas si se tiene en cuenta el valor del parámetro F.

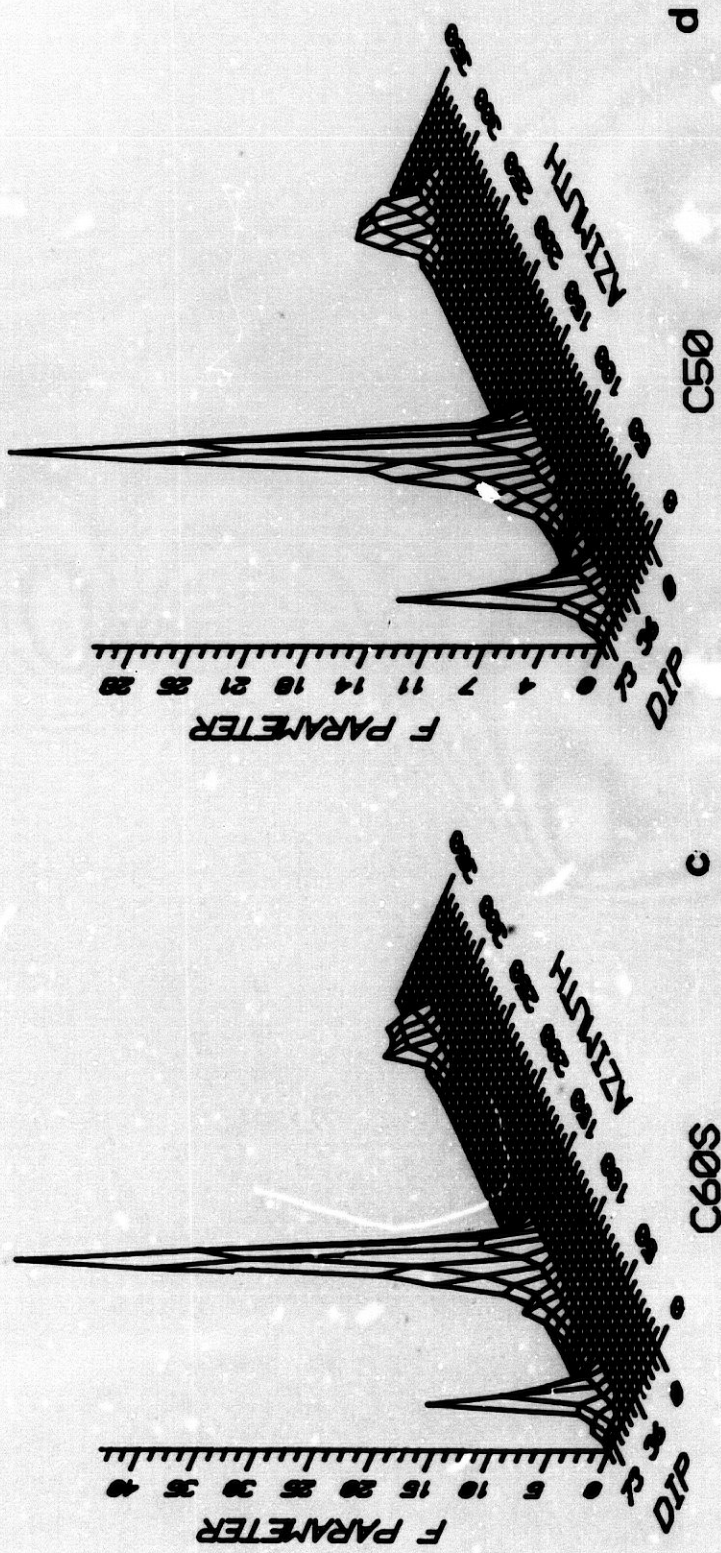


Fig 6.9 ... continuación.



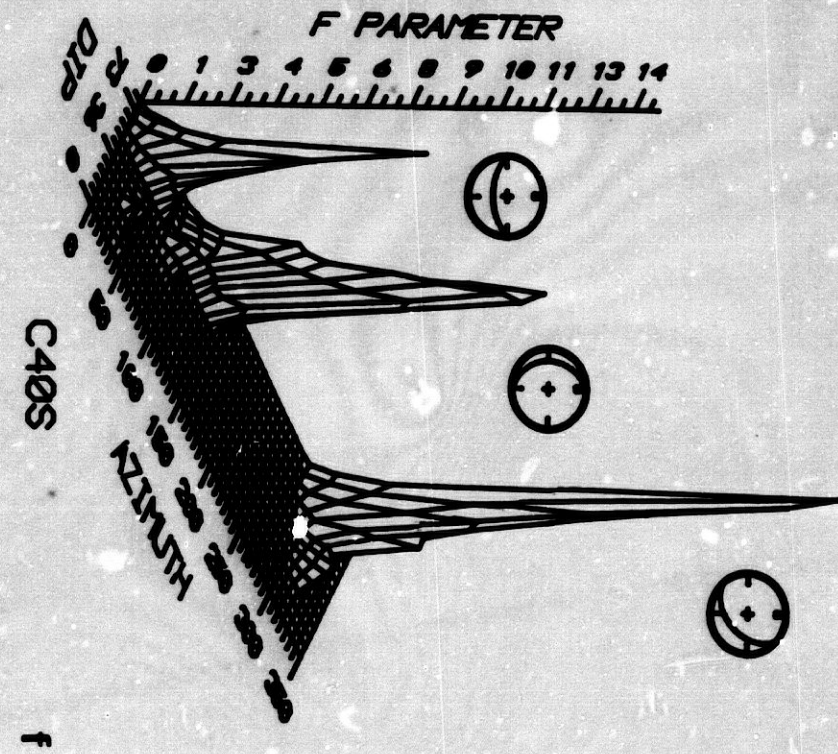
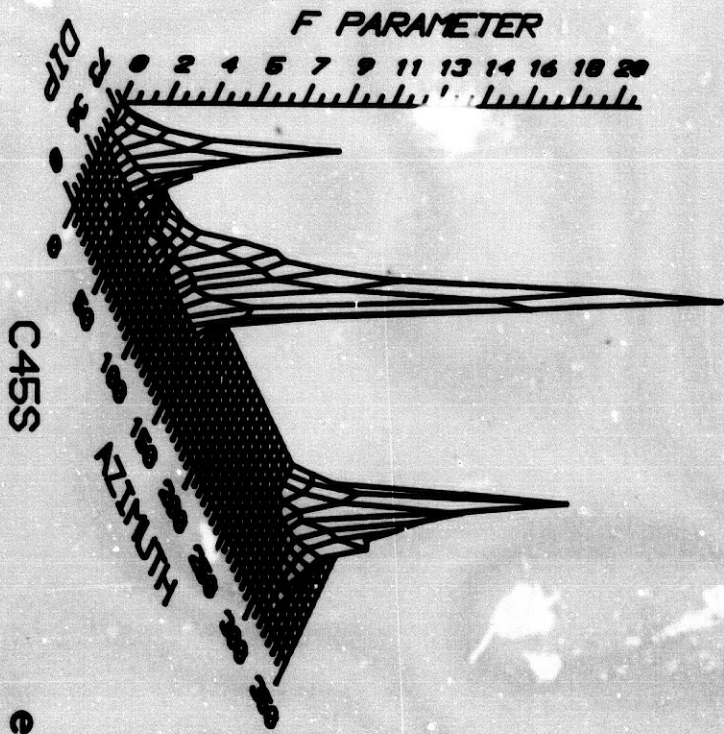


Fig. 69 -- continuation.

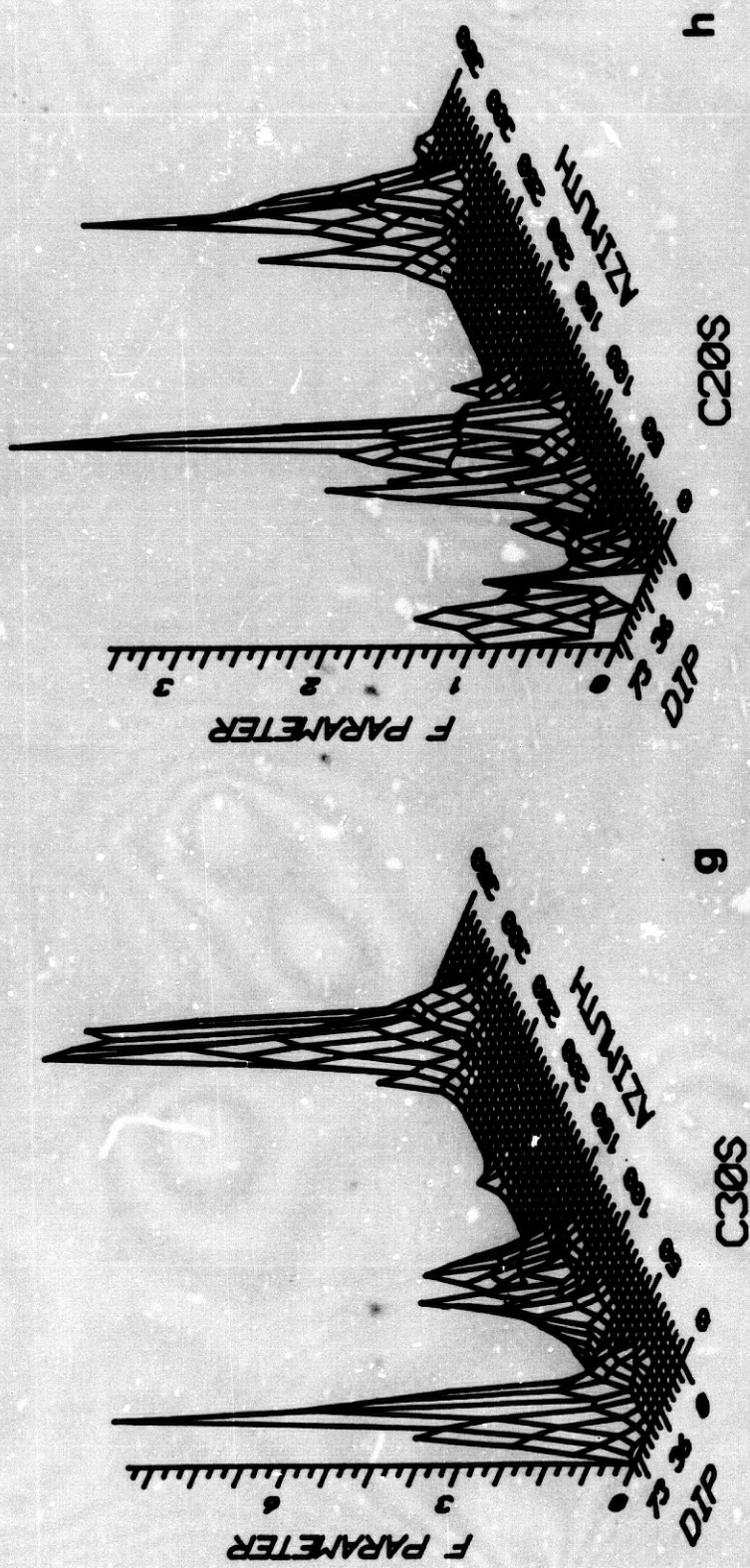


Fig. 69 ... continuación.

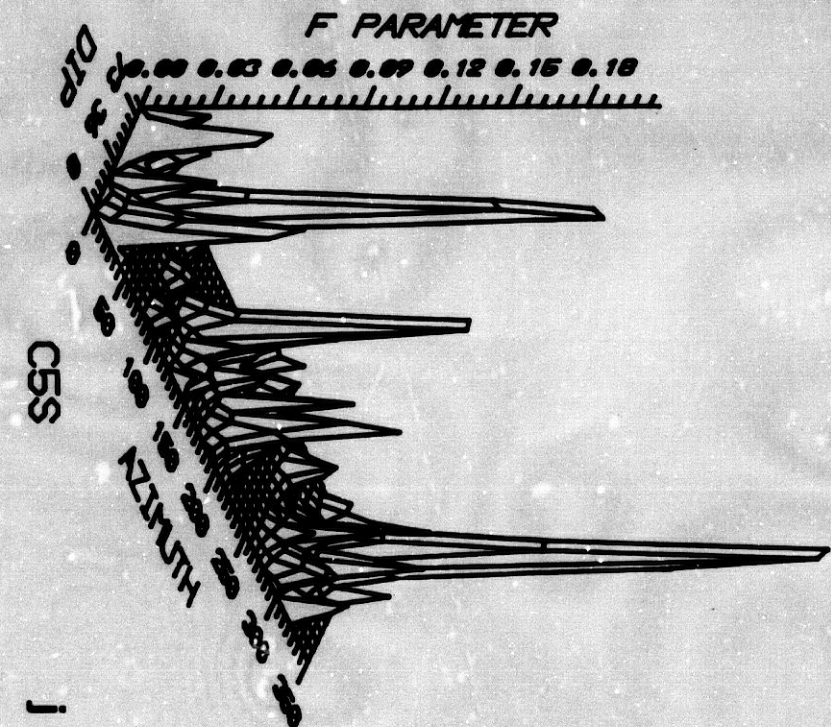
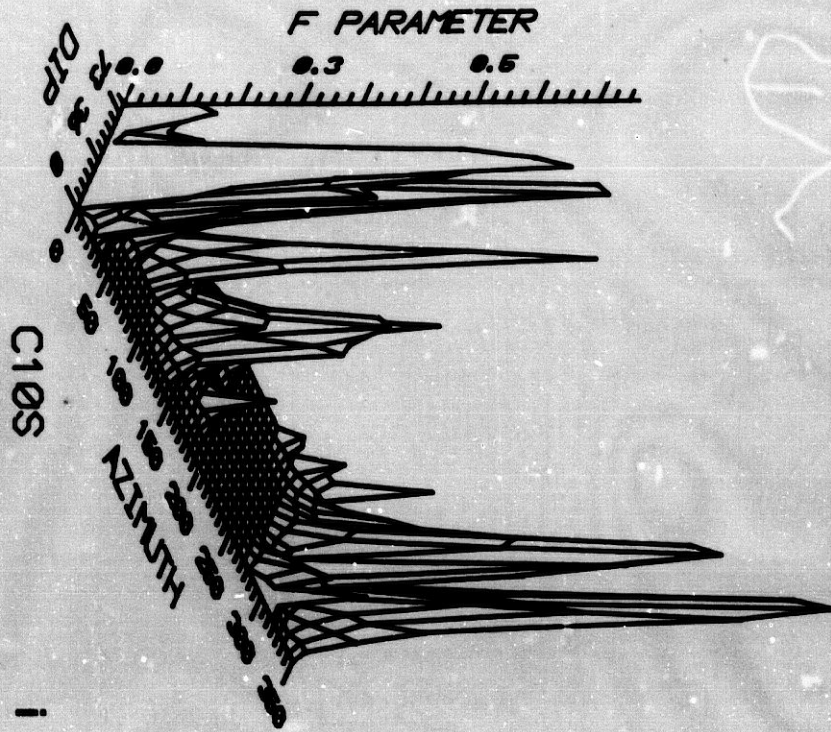


Fig. 69 -- continuation.

### *Tests y evaluación de errores*

La figura 6.9e corresponde a un valor de  $D = 50$  km. En este diagrama queda patente la existencia de tres orientaciones preferidas, una de las cuales se muestra como dominante si se tienen en cuenta los valores de  $F$ . Para este valor de  $D$ , ligeramente inferior al del punto de inflexión de la curva del histograma de distancias, la interpretación de los resultados (como con la DSS P4590) vuelve a ser la correcta.

Los resultados obtenidos de la aplicación del análisis ACPE a la distribución sintética P459000 muestran que el criterio establecido en el capítulo tercero para la elección de  $D$  coincide, aproximadamente, con valores ligeramente inferiores al punto de inflexión de la curva que ajusta los datos en el histograma de distancias. Esta elección sería un "ajuste fino", pero como hemos visto con las DSS P4590 y P459000, un ajuste primario ya sería capaz de proporcionar las orientaciones presentes en la zona.

#### **II.4. Aplicación del ACPT.**

En este apartado se llevará a cabo la aplicación del método ACPT sobre las distribuciones P45, P4590 y P459000. Se pretende encontrar las orientaciones presentes en las DSS y también el proceso de avance de la fracturación. La aplicación del método comienza con la elección de la ventana móvil de sismos. Esta elección puede hacerse a partir de la función  $Q(N, K)$  definida en el capítulo tercero. Lo primero que se analizará, por tanto, es el comportamiento de esta función para su posterior aplicación a los casos reales.

##### **II.4.1. Comportamiento de la función $Q(N, K)$ .**

La función  $Q(N, K)$  fue definida en el capítulo tercero como:

$$Q(N, K) = (N - K + 1)^{-1} \sum_{q=1}^{N-K+1} (\lambda_2^q(K) / \lambda_3^q(K))$$

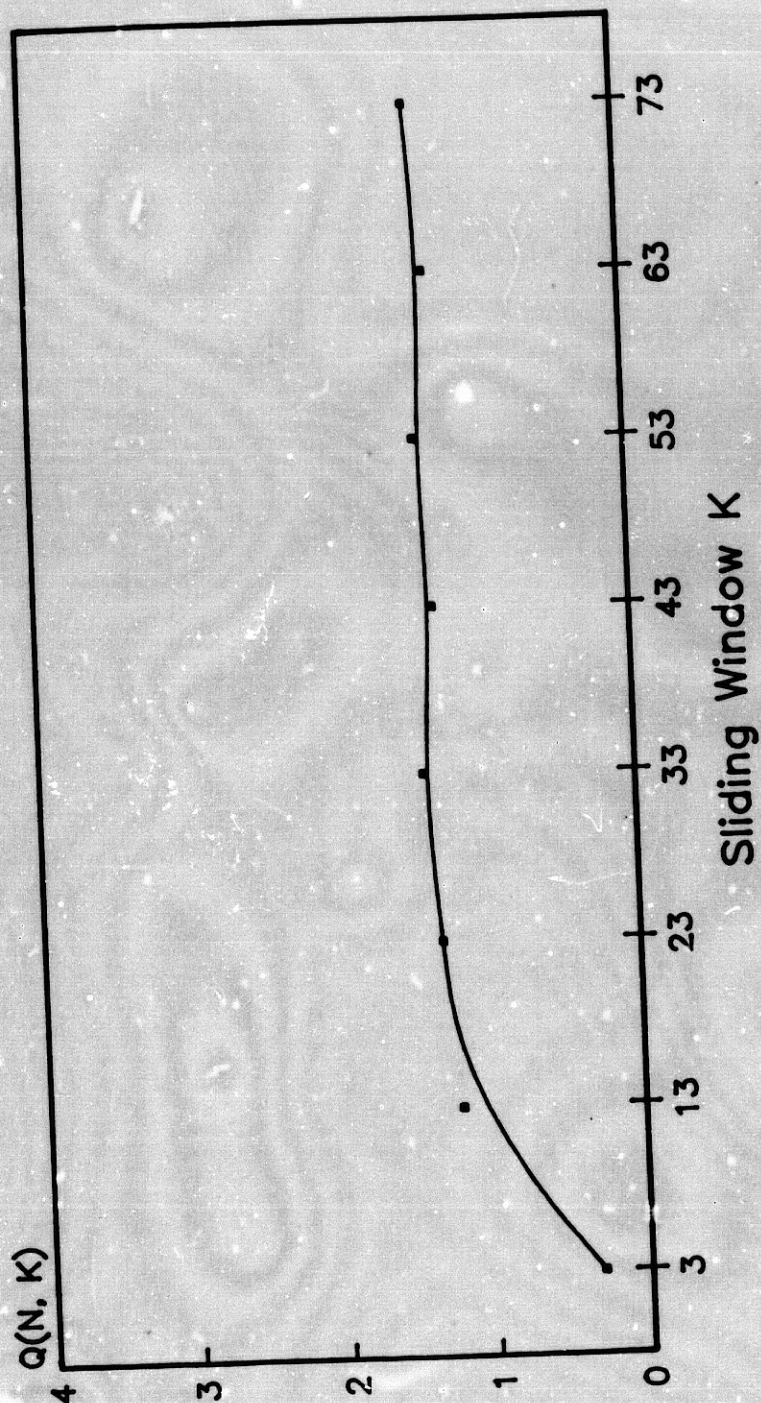
donde N es el número total de sismos, K el valor de la ventana móvil de sismos (VMS),  $\lambda_2^q$  es el autovalor medio y  $\lambda_3^q$  es el autovalor más pequeño de la VMS número q. El comportamiento teórico de esta función se representó en la figura 3.8; como ya se explicó entonces, el K óptimo corresponde al valor de la VMS a partir del cual la función Q(N, K) se hace constante.

La apariencia en la práctica de esta función y la elección del K óptimo en estos casos requiere algunas puntualizaciones tal y como se desprende del análisis efectuado sobre las distribuciones hipotéticas de sismos.

La figura 6.10 representa la gráfica obtenida para la función Q(N, K) cuando se aplica a la DSS P45. Como esta distribución es un solo plano, cualquier valor de la ventana K es un valor óptimo. Esto queda reflejado en la constancia de la función que desde el principio hasta el final permanece inalterable. Este comportamiento se explica porque la distribución de sismos es una idealización perfecta de una falla.

La figura 6.11 representa la gráfica obtenida para la función Q(N, K) cuando se aplica a la DSS P4590. Obsérvese que el comportamiento teórico de la función no se refleja fielmente y que tampoco se da la situación ideal perfecta que se presentaba en la anterior curva asociada a la DSS P45; ahora la distribución es un poco más compleja y esto queda reflejado en la forma de la curva Q(N, K). De acuerdo con esta, en principio, debería tomarse una ventana alrededor de los 60 sismos.

# P45 Q - Function



**Fig. 6.10** Función  $Q(N, K)$  para la distribución sintética de sismos P45. La constancia de la curva indica que cualquier valor de  $K$  ajustará de manera óptima los elipsoides correspondientes. Lo ideal de esta distribución hace que la forma de la gráfica no se ajuste al comportamiento teórico esperado; a medida que el modelo se haga más complejo este comportamiento aparecerá de forma más clara.

# P4590 Q - Function

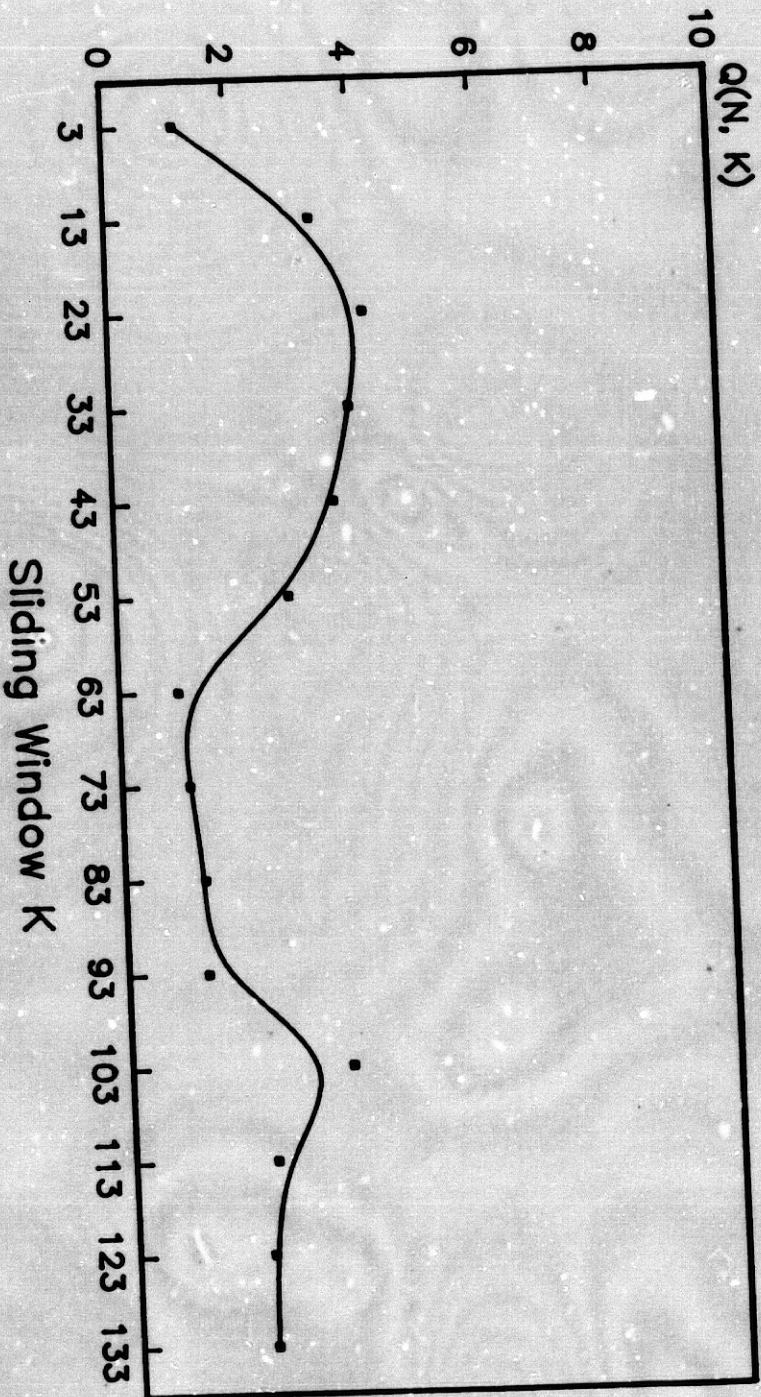


Fig. 6.11 Función  $Q(N, K)$  para la distribución sintética de sismos P4590. El comportamiento de la función aun no aparece claro pero la curva ha dejado de ser plana. Esta gráfica ya puede ser usada para determinar el  $K$  óptimo. En este caso  $K = 45$ .

# P459000 Q - Función

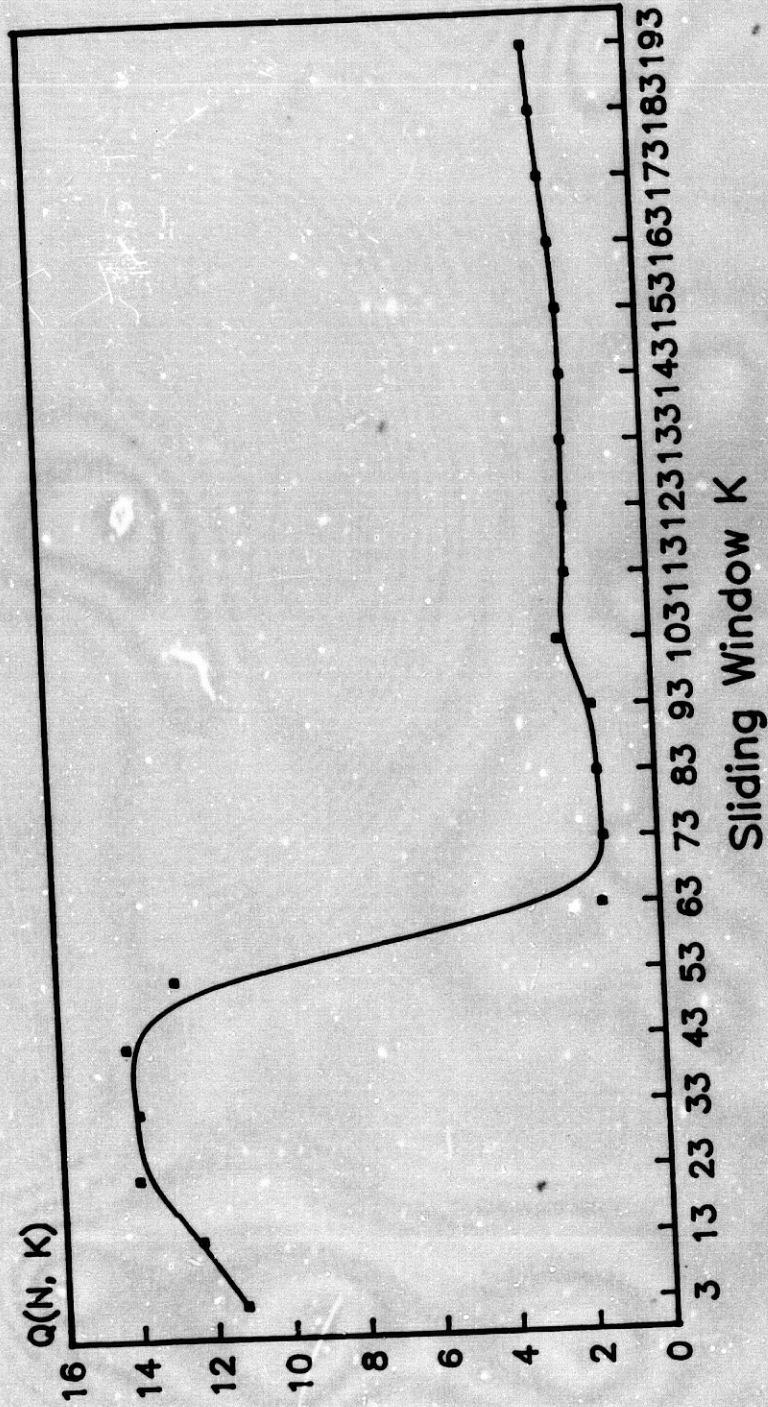


Fig. 6.12 Función  $Q(N, K)$  para la distribución sintética de sismos P459000. La gráfica si presenta ya un comportamiento claramente similar al esperado teóricamente; esto se debe a que el modelo comienza a ser lo suficientemente complejo. El K elegido en esta ocasión ha sido de 45 sismos.



Finalmente, la figura 6.12 representa la función  $Q(N, K)$  para la DSS P459000; esta distribución es más real que las otras dos en lo que se refiere a complejidad, por lo que vemos que la función  $Q(N, K)$  comienza a parecerse al caso teórico presentado en el capítulo tercero (fig. 3.8); esto se debe a que esta distribución se aparta de la situación ideal de la DSS P45 e incluso de la P4590. Según esta gráfica, la ventana óptima debe situarse también en torno a los 60 sismos.

La elección de estos valores para las ventanas móviles de sismos proporciona los resultados correctos aunque no con la rotundidad que cabía esperar. Sin embargo, si se toman valores un poco más pequeños, los resultados esperados aparecen de forma contundentemente clara. La explicación de este hecho es la siguiente. Las distribuciones P4590 y P459000 presentan una característica relevante frente a algunas series de datos reales. Se trata de su carácter volumnar o planar; el criterio que se estableció para distinguir una estructura planar de otra volumnar (capítulo tercero) se basaba en el cociente entre el autovalor más grande y el más pequeño para un subconjunto de sismos que definiría un elipsoide. Si se toma la distribución de focos en su globalidad y se calcula el elipsoide que los contiene a todos, suelen obtenerse valores que oscilan entre 2.6 (por ejemplo, para la serie de Loja) y 5.05 (para la de Antequera); si se calcula este cociente para P4590 y P459000 los resultados son 52 y 67 respectivamente. Esto ocurre también con algunos de los datos reales (por ejemplo con la serie de Agrón, que arroja un resultado de 52). Quiere esto decir que para estos últimos casos el carácter planar es mucho más acusado. Esto origina una subclasificación de las distribuciones planares. Basándonos en la distinción de clusters o agrupamientos de Michael (1989) se definirá el parámetro I como:

$$(6-1) \quad I = \frac{\lambda_{\text{MAYOR}}(\text{Toda la distribución})}{\lambda_{\text{MENOR}}(\text{Toda la distribución})}$$

### Tests y evaluación de errores

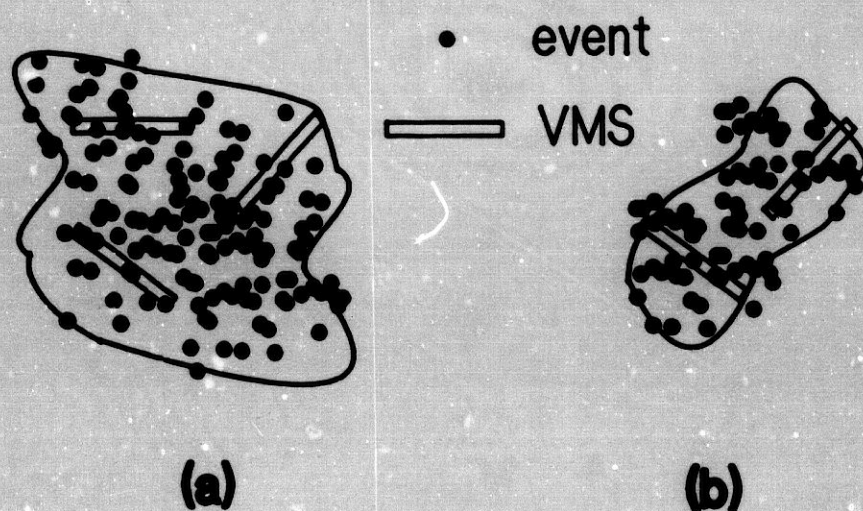
La distribución será planar suave si  $2.5 < I \leq 10$ , planar fuerte si  $10 < I$  o volumnar si  $I \leq 2.5$ . El parámetro  $I$  define el carácter de la serie en su conjunto, y no el de un determinado elipsoide.

Cuando el carácter es planar suave o volumnar, entonces  $I$  es relativamente pequeño y se interpreta como que el elipsoide que engloba la muestra total de sismos tiende a la esfericidad; por el contrario, con valores altos de  $I$  se tienen elipsoides más alargados. Esto tiene implicaciones directas sobre la elección de la ventana óptima,  $K$ . Si  $I$  toma valores pequeños hay que ser más restrictivo a la hora de elegir los valores de  $K$  en el sentido de que este sea lo mayor posible de acuerdo a la función  $Q(N, K)$ . Esto se debe a que si se toma una VMS excesivamente pequeña tendríamos planos en cualquier dirección y el método tendría más dificultades para obtener direcciones predominantes (fi . 6.13). Si  $I$  toma valores grandes, es decir, si la distribución es planar fuerte, entonces se puede ser más permisivo en el sentido de elegir valores de  $K$  más bajos, lo cual permitirá caracterizar posibles alineaciones más pequeñas.

El criterio de elección del  $K$  óptimo a partir del estudio realizado sobre las distribuciones reales y de las sintéticas se resume en lo siguiente. Si la distribución es volumnar o planar suave, se tomará como  $K$  óptimo aquel a partir del cual la función  $Q(N, K)$  se hace constante tras el brusco descenso en sus valores; si la distribución es planar fuerte, se tomará el  $K$  anterior al fuerte descenso en los valores de  $Q(N, K)$ .

#### II.4.2. Aplicación a la distribución P4590.

El objetivo de este apartado es comprobar que el método ACPT es capaz de encontrar las tendencias presentes en la DSS P4590; además, quiere probarse su capacidad para encontrar el proceso de avance de la fracturación.



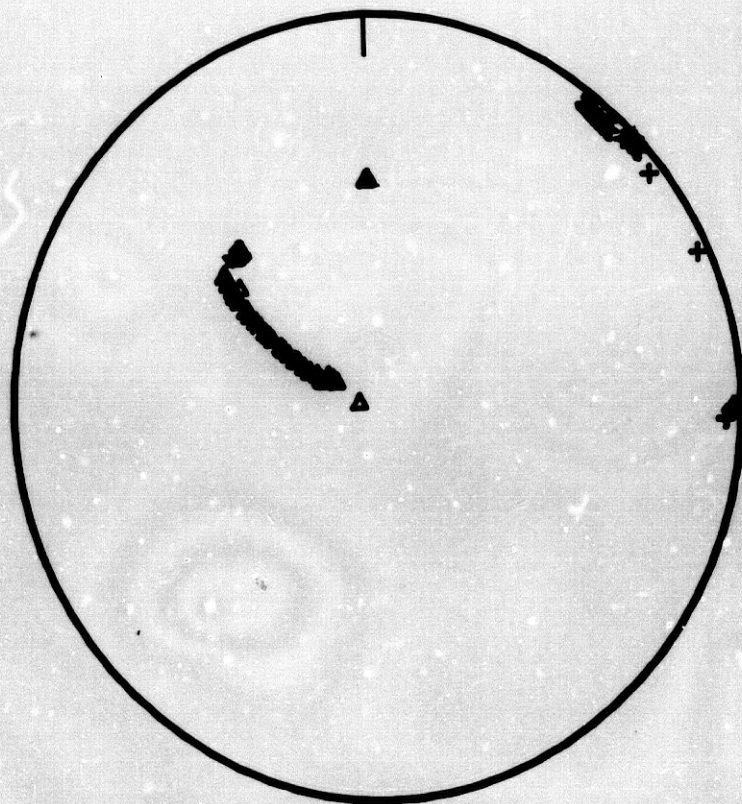
**Fig. 6.13** Diagrama gráfico que explica por qué es necesario ser más restrictivo en la elección de la ventana óptima de sismos en el caso de estructuras planares suaves o volumnares. (a) Con estructuras planares suaves o volumnares hay que ser restrictivo en la elección de la ventana en el sentido de tomar la mayor posible de acuerdo con la función  $Q(N, K)$ . Esto es debido a que las pequeñas ventanas pueden orientarse en cualquier dirección. (b) Con estructuras planares fuertes se puede ser más permisivo y tomar ventanas más pequeñas que caractericen alineamientos más pequeños.

### Tests y evaluación de errores

El primer paso consiste en elegir la VMS óptima; como se ha puesto de manifiesto en el apartado anterior, elegiremos aquel valor a partir del cual la función  $Q(N, K)$  decrece drásticamente hasta alcanzar un valor constante. Se tomará por tanto (fig. 6.11) un valor de  $K = 45$  sismos.

Con este valor de  $K$  se aplica el método ACPT; el primer resultado es el que se presenta en la proyección estereográfica de todos los polos que se han formado con la distribución. La figura 6.14 muestra los distintos autovectores obtenidos tras el análisis; los triángulos que se observan corresponden a los autovectores asociados a los autovalores más pequeños, esto es, al polo del plano que se ajustaría al elipsoide; las cruces corresponden a los autovectores asociados a los mayores autovalores, es decir, indican la dirección del elipsoide. En la figura 6.14 puede verse una gran concentración de triángulos con un acimut en torno a los 315 grados y un buzamiento de unos 45. Esta orientación corresponde a un plano N 45 E buzando 45 grados al SE, que coincide con el resultado esperado. También se observa una gran concentración de triángulos en un punto situado a 0 grados y con un buzamiento próximo a los 30 grados. A este polo le corresponde un plano EW buzando 60 grados al S; también en este caso, el resultado coincide con la realidad.

A continuación se intentará verificar el proceso de avance de la fractura. La figura 6.15 muestra los cuatro planos más significativos obtenidos tras aplicar el ACPT. Los planos son sucesivos en el tiempo, y por tanto deben interpretarse como sucesivos estadios del proceso de ruptura. Cada plano o etapa de la ruptura va acompañado de un número en la esquina superior derecha de la proyección de Schmidt; este número indica con cuántos elipsoides individuales se ha calculado el plano promedio representado; es pues una medida cuantitativa de la importancia relativa de una orientación respecto de otra.



**Fig. 6.14** *Proyección de Schmidt de todos los polos que se han encontrado en la distribución sintética de sismos P4590 con un  $K = 45$  eventos aplicando al ACPT. Los triángulos son los autovectores asociados a los autovalores más pequeños, de forman que son el polo del plano que puede ajustarse al elipsóide. Las cruces son los autovectores asociados a los autovalores más grandes e indican la dirección del elipsoide.*

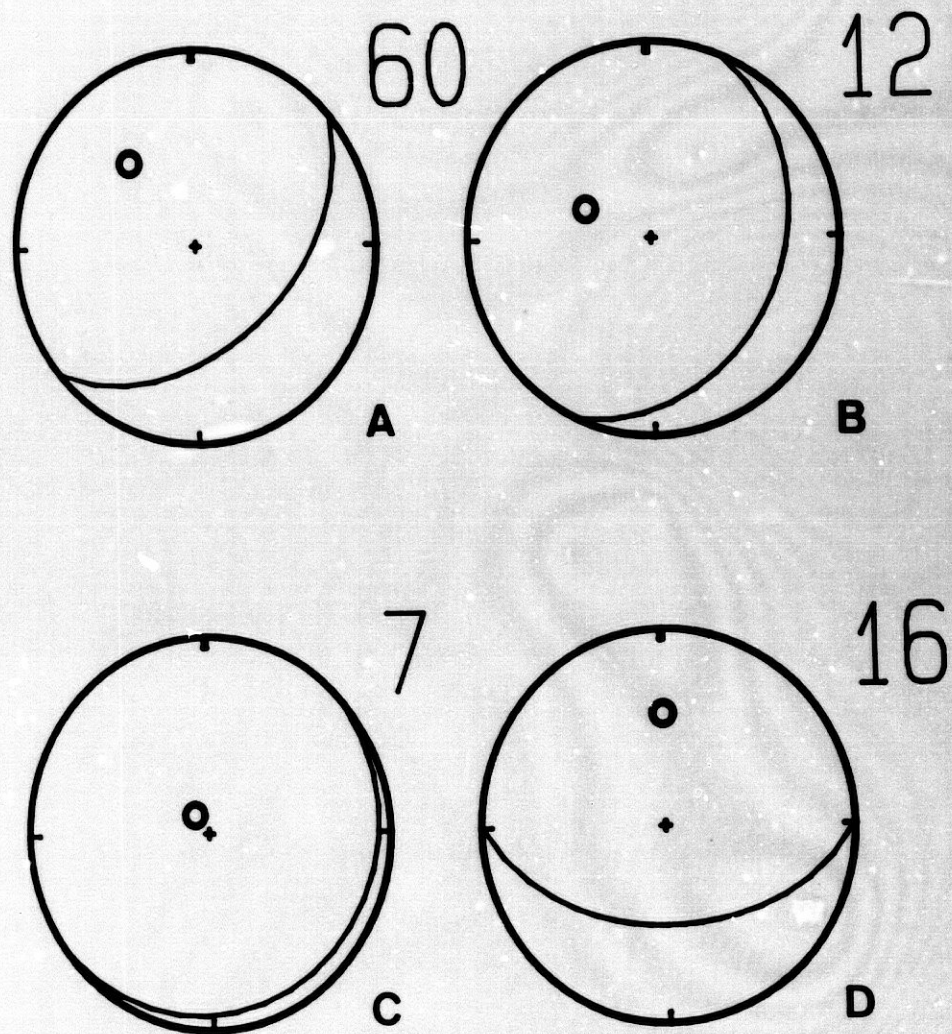


Fig. 6.15 Evolución temporal del proceso de fracturación de la distribución sintética de sismos P4590 determinada con el ACPT. Los planos que aquí se representan son el promedio del número de planos individuales sucesivos temporalmente que son semejantes según el criterio establecido en el capítulo tercero. El número de planos individuales con los que se ha construido uno promedio es el que figura en la esquina superior derecha de cada proyección; este número es indicativo, por tanto, de la importancia de cada plano.

La interpretación de la figura 6.15 sería la siguiente; en primer lugar se tiene una ruptura importante con dirección aproximada N 45 E y buzamiento al SE; esta fase continúa con otra de dos planos menos significativos con orientaciones diferentes; el proceso termina con otra ruptura destacada EW y buzando unos 30 grados al S. Como los planos intermedios son menos significativos debe interpretarse que éstos son orientaciones secundarias poco importantes o que no deben considerarse porque se interpretan como planos debidos a la zona de transición entre uno de los planos principales y otro.

El análisis puede completarse con una localización de los elipsoides encontrados en el apartado anterior (Tabla VI-1); la figura 6.16 muestra con dos estrellas la localización del centroide de los elipsoides hallados en el paso anterior. Esta información es de gran ayuda en el modelado de las fallas de la zona sismogénica.

#### II.4.3. Aplicación a la distribución P459000.

Los objetivos de este apartado son los mismos que los del anterior pero probando ahora con una distribución de sismos más compleja: la DSS P459000. El método tiene ahora que detectar tres tendencias que se entrelazan y averiguar la secuencia temporal de la ruptura.

La ventana óptima que se considera en este caso (fig. 6.12) es de  $K = 45$  sismos. Para este valor la distribución de polos que se ha encontrado puede verse en la figura 6.17. La dispersión de puntos es, lógicamente, mayor que en el caso anterior. No obstante, existen varias concentraciones de polos que se pondrán de manifiesto de manera clara cuando se analice la evolución temporal de la fracturación.

### *Tests y evaluación de errores*

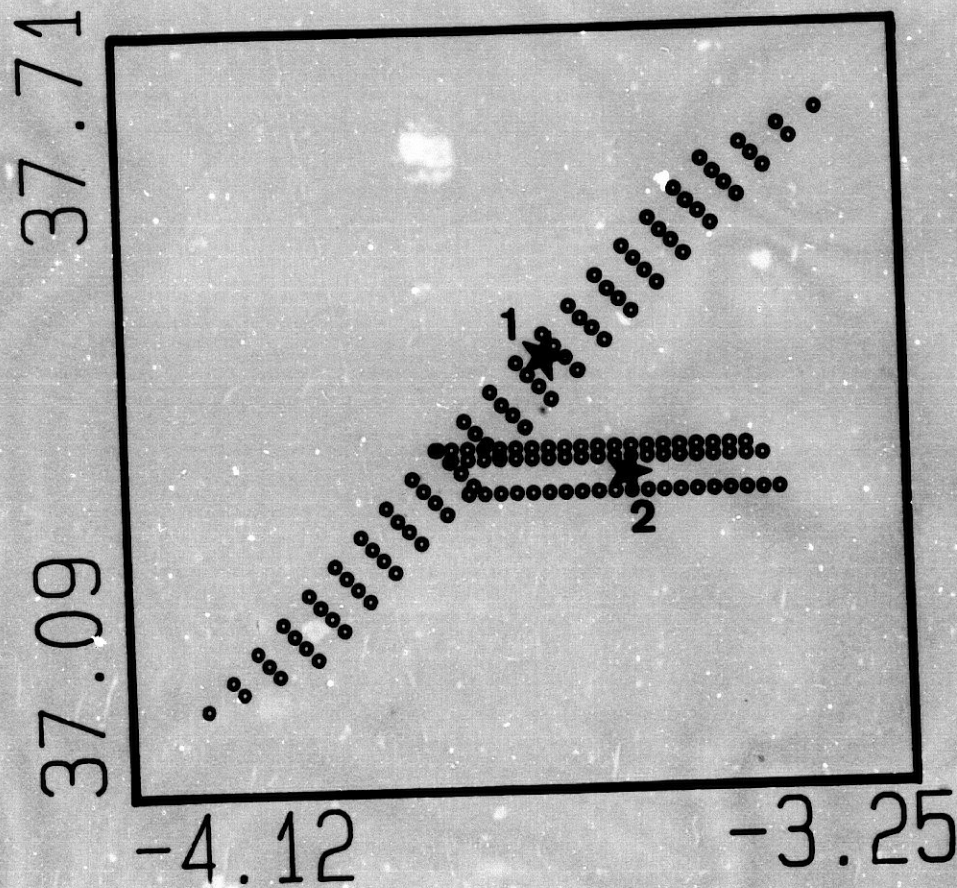
En la figura 6.18 pueden verse los planos más significativos que se han podido construir con el promedio de sucesivos semejantes. Como ahora aparecen muchos planos, en la esquina superior derecha de cada proyección aparecen dos números; el primero indica el orden secuencial en el que se ha construido el plano promedio en cuestión; el segundo, como en el caso anterior, es el número de planos individuales con los que se ha construido este plano promedio y mide, por tanto, la importancia relativa del mismo.

El análisis de las distintas orientaciones que aparecen en la figura 6.18 revela tres tendencias dominantes (como cabía esperar). Se trata de las representadas por los planos 1, 5 y 15, que coinciden, aproximadamente, con los planos que formaban la DSS P459000. La interpretación del proceso de ruptura sería pues la siguiente: existe una primera ruptura N 45 E que buza unos 45 grados al SE; el proceso continúa formando algunos planos menos relevantes hasta llegar a una nueva etapa de ruptura caracterizada por un plano EW que buza al S, aproximadamente, 60 grados; finalmente, el proceso se completa, tras la formación de algunos planos subsidiarios, con una ruptura NS y buzamiento 30 grados al W.

El análisis puede extenderse con una localización espacial tal y como se ha hecho en el caso de la DSS P4590. Para ello se localiza sobre el mapa el centroide de cada una de las tendencias principales. El resultado puede verse en la figura 6.19 y la Tabla VI-2.

A veces resulta útil valerse de una gráfica como la de la figura 6.20 para discernir entre las tendencias predominantes y aquellas que son sólo el resultado de las etapas de transición. La figura 6.20 es el resultado de representar el número secuencial del plano promedio que se trate, frente al número de planos individuales con los que se





**Fig. 6.16** *Los elipsoides más relevantes encontrados en el estudio del avance de la fractura pueden ser localizados especialmente; esto permite un modelado de las distintas fracturas presentes en la zona. En el caso de la distribución P4590 se ha detectado que el avance de la fracturación comenzó con un plano N 45 E buzando 45 grados al SE y este plano se ha localizado en el punto donde se ha colocado la estrella número 1. La fractura continuó con un plano EW buzando 60 grados al S que se ha localizado en el punto de la estrella número 2.*



**Fig. 6.17** *Proyección de Schmidt de todos los polos que se han encontrado en la distribución sintética de sismos P459000 con un  $K = 45$  eventos. Los triángulos son los autovectores asociados a los autovalores más pequeños, de forma que son el polo del plano que puede ajustarse al elipsoide. Las cruces son los autovectores asociados a los autovalores más grandes e indican la dirección del elipsoide.*

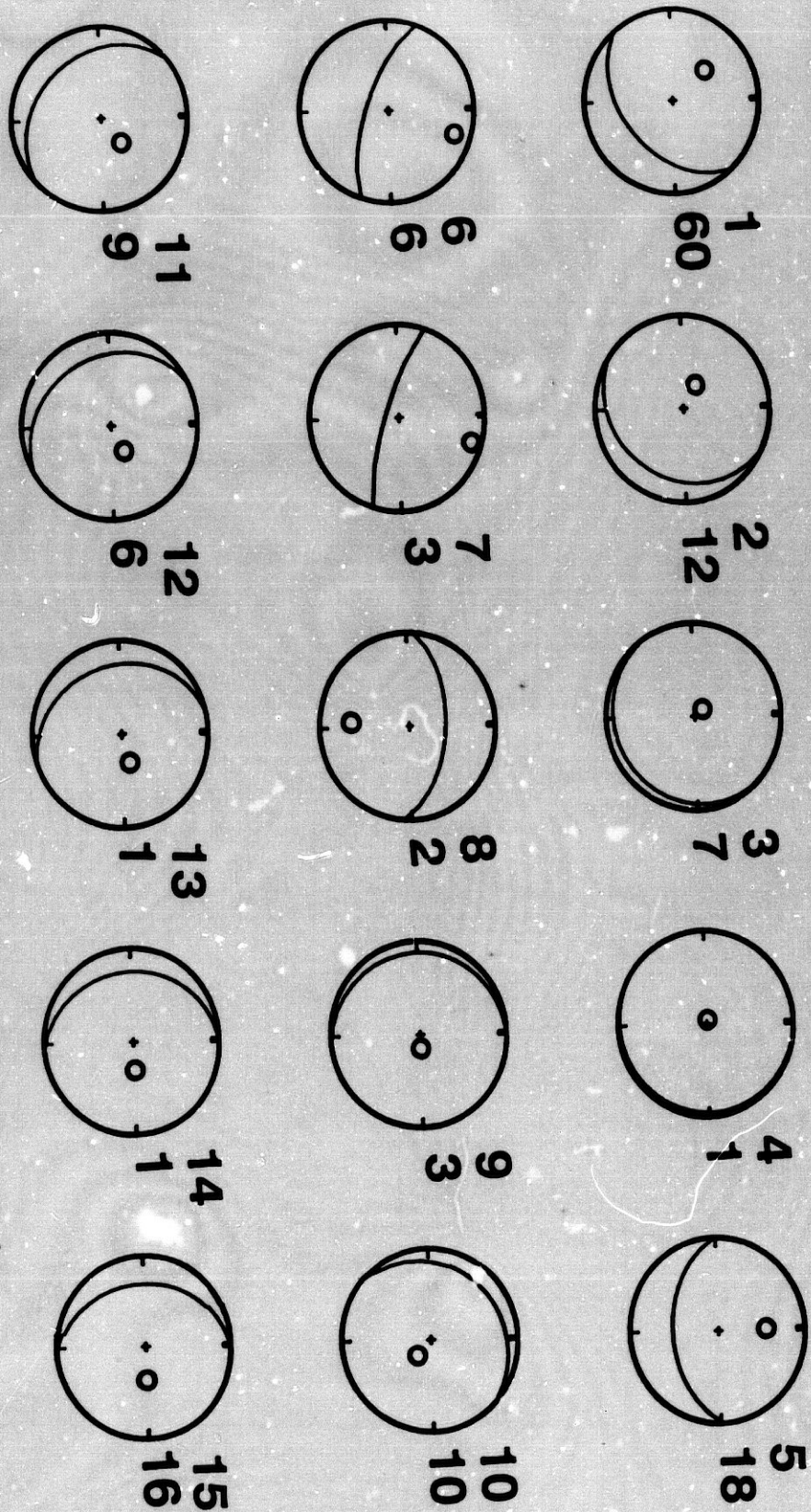
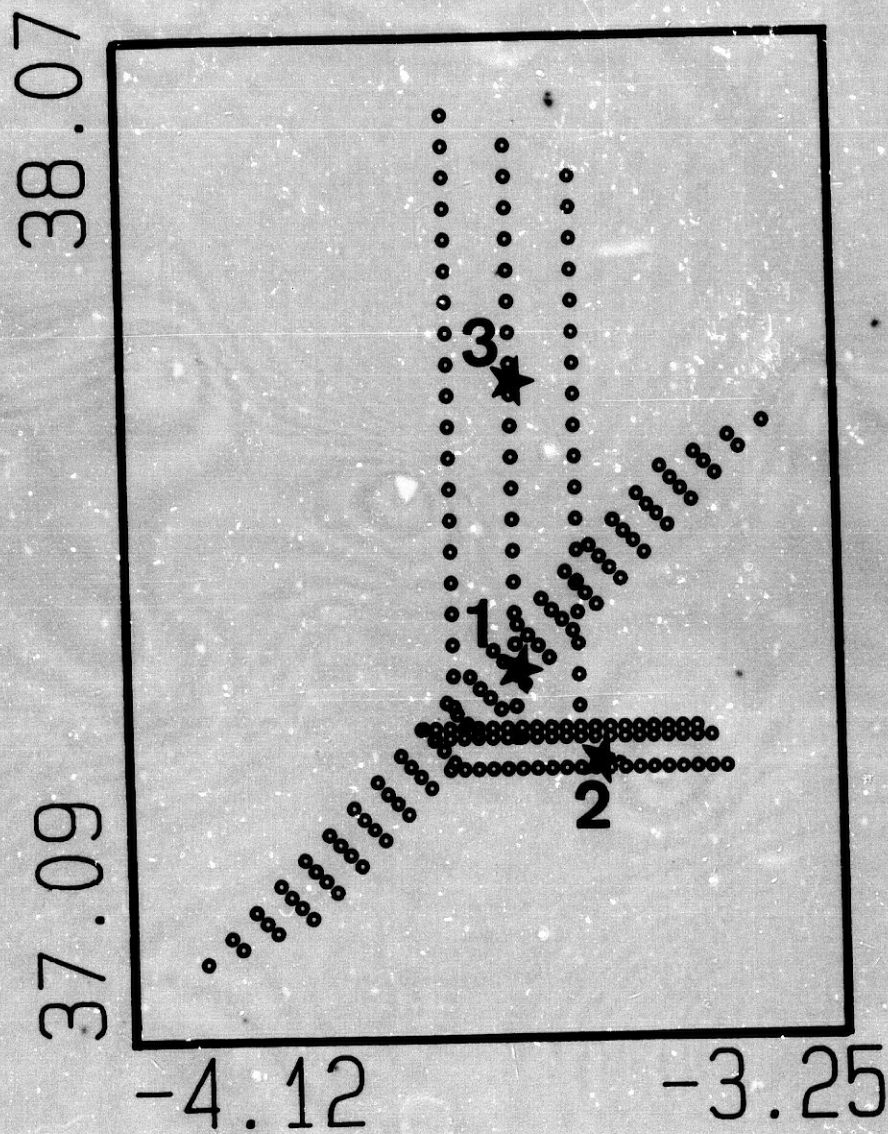


Fig. 6.18 Evolución temporal de la fracturación cuando se aplica el método ACPPT a la distribución sintética de sismos P459000. Cada proyección se acompaña de dos números; el superior indica el orden temporal que le corresponde a la tendencia representada; el inferior es el número de planos nodales con los que ha sido formado.



**Fig. 6.19** Localización espacial de los planos 1, 5 y 15 de la figura anterior. Este procedimiento puede ser de gran utilidad para el modelado de las distintas fracturas presentes en la zona. A la vista de este resultado puede afirmarse que el método ACPT no sólo detecta las fracturas presentes en la zona, sino que además es capaz de asignar un orden temporal correcto a cada una de ellas.

# Detección de orientaciones principales

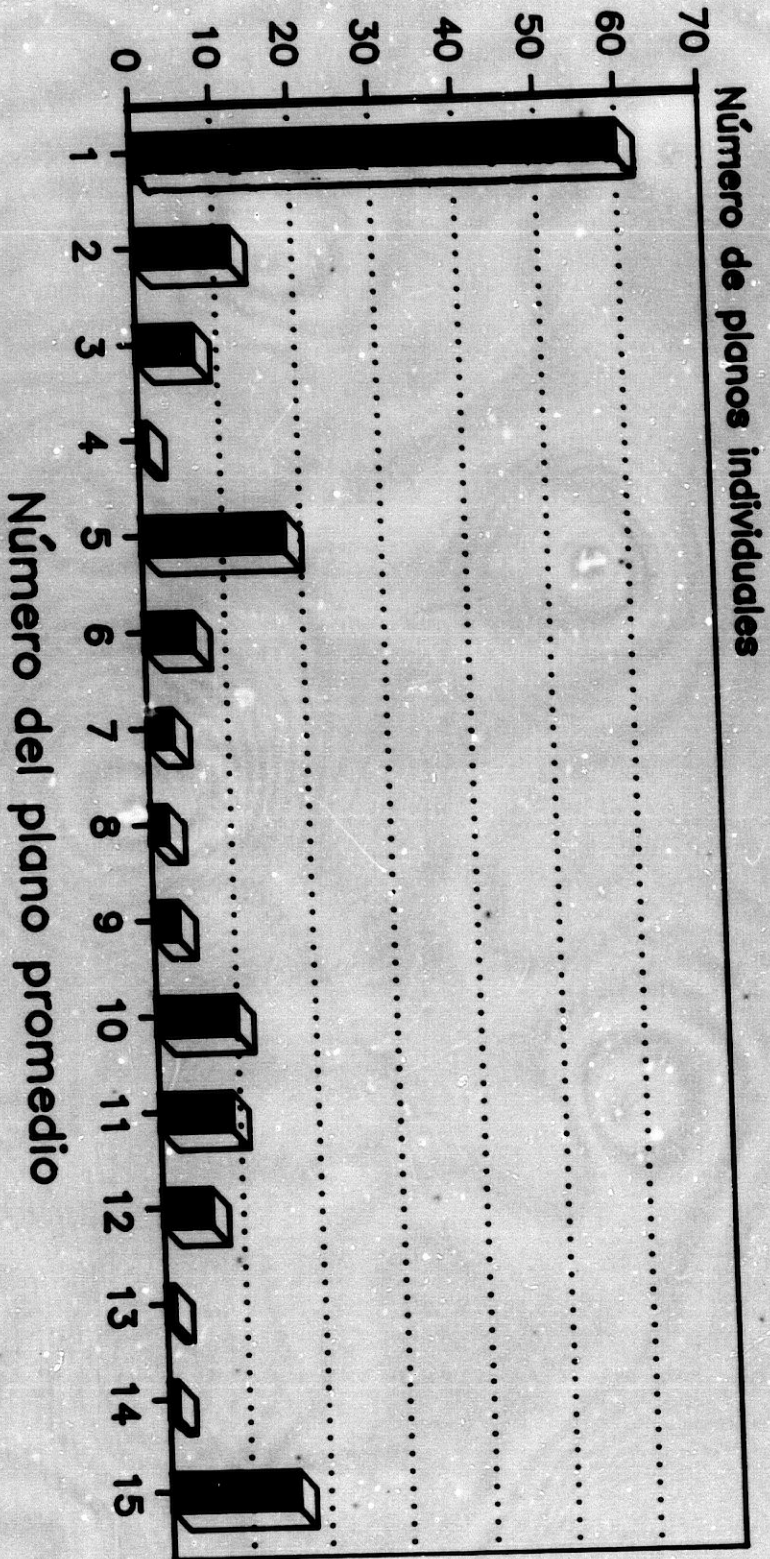


Fig. 6.20

La construcción de histogramas en los que se representa el número del plano promedio, correspondiente a un determinado tiempo, frente al número de planos individuales con los que ha sido construido, puede ser de gran ayuda a la hora de interpretar qué planos son los que deben considerarse en el modelado de las distintas fallas en la zona. En la figura el histograma obtenido para la distribución sintética de simos P49000.

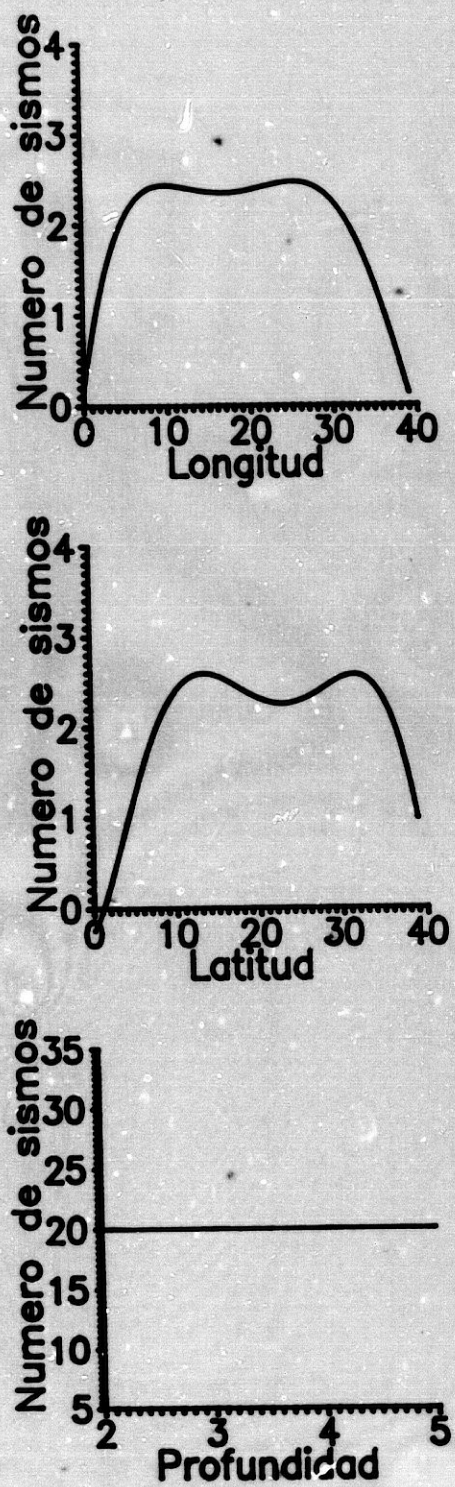


Fig. 6.21 Curvas de distribución en longitud, latitud y profundidad para la distribución sintética de sismos P45. Con ayuda de estas gráficas se construirán las denominadas simulaciones, cuyo objetivo es corregir los resultados del efecto de forma.

forma el mismo. A partir de este histograma se han detectado las orientaciones principales 1, 5, y 15.

## II.5. Aplicación del método MTP.

La aplicación del método de los tres puntos se va a hacer sobre las distribuciones sintéticas de sismos P45 y P4590; los resultados sobre una y otra confirmarán la capacidad del método para hallar las orientaciones preferentes y la habilidad para diferenciar una tendencia sobre otra. Además, el método selecciona los sismos que conforman cada una de las orientaciones consideradas dominantes, siendo así posible establecer espacialmente las fracturas encontradas.

### II.5.1. Aplicación a la distribución P45.

El primer paso en la aplicación del MTP consiste en averiguar qué distribución siguen los sismos, tanto en longitud, como en latitud y profundidad; con ello se pretende generar una serie de conjuntos de hipocentros aleatoriamente distribuidos en la misma región que los datos originales y con la única condición de que su distribución según cada una de las variables espaciales sea la misma que la real. Con ello se pretende corregir del efecto de forma los resultados.

La figura 6.21 presenta la distribución de sismos en longitud, latitud y profundidad de los datos de la DSS P45. A partir de estas gráficas se han generado datos aleatorios situados en el mismo volumen que la muestra P45 y que simulen estas distribuciones. Fehler et al (1987) llamaron a estos conjuntos simulaciones. Las simulaciones tienen que ser distintas estadísticamente de la muestra real. Por ello se les ha sometido a un test chi-cuadrado (véase capítulo cuarto). Cuando  $\chi^2$  es mayor que 551

### Tests y evaluación de errores

puede considerarse que las simulaciones son diferentes de los datos reales con un nivel de confianza del 99% (Fehler & Johnston, 1989). En el caso de la DSS P45 se ha obtenido un valor mucho mayor que 500, por lo que tenemos asegurada la diferencia entre los datos reales y las simulaciones.

Con estas simulaciones y los datos de la DSS P45 se procede a averiguar qué orientaciones, corregidas del efecto de forma, puede detectar el MTP; para ello, estas direcciones preferentes deben verificar el criterio establecido en el capítulo cuarto (ecuación 4-15):

$$[ H_{u,i} * ( A_r / A_d ) - H_{r,i} ] / S_{u,i} > D$$

donde  $H_{u,i}$  es el número de polos en la retícula  $i$  a partir de los datos reales de la zona,  $H_{r,i}$  es el promedio de polos en la retícula  $i$  a partir de los datos de los  $M$  conjuntos de datos aleatorios,  $A_d$  es el promedio de polos en cada retícula a partir de los datos reales,  $A_r$  es el promedio de polos en cada retícula a partir de los datos aleatorios,  $D$  una constante y  $S_{u,i}$  la desviación estándar del número de polos en la retícula  $i$  calculada a partir de los conjuntos de datos aleatorios (Ostle, 1970):

$$(6-2) \quad S_{u,i} = \frac{\sum_{j=1}^M S_{j,i}^2 - (\sum_{j=1}^M S_{j,i})^2 / M}{M - 1}$$

donde  $S_{j,i}$  es el número de polos en la retícula  $i$  con el conjunto de datos número  $j$  y  $M$  el número de simulaciones. La constante  $D$  tiene el significado siguiente; si  $D$  toma el valor 1 entonces hay una posibilidad frente a 6 de que el alineamiento observado sea debido sólo a variaciones aleatorias alrededor de la media; si  $D$  es igual a 2, esta

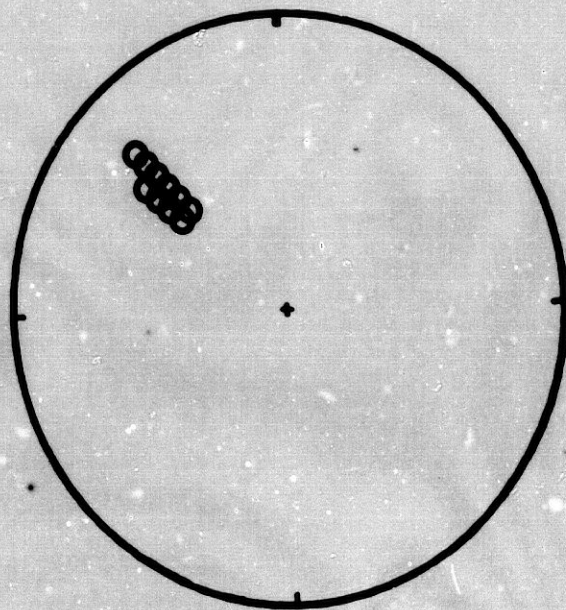


probabilidad es de 1 a 44. Generalmente se ha elegido como mínimo  $D = 3.62$ ; esto significa que la probabilidad a la que se hacía alusión anteriormente es de 1 frente a 10000 (Fehler & Johnston, 1989).

La figura 6.22 muestra los polos de los planos que han sido formados y que verifican el criterio que acaba de exponerse. Se puede observar que estos polos corresponden a planos N 45 E con un acimut que varía entre los 30 y 60 grados. Las tendencias representadas en la figura 6.22 se numeran para su posterior tratamiento (Tabla VI-3). Hasta aquí lo que se ha conseguido es establecer las tendencias más significativas en la zona sin que se vean afectadas, con un alto grado de probabilidad, de la forma global de la muestra. El siguiente paso es establecer un orden jerárquico en estas tendencias, de manera que pueda escogerse una o varias que destaquen sobre las demás.

Para conseguir esta jerarquía entre las orientaciones obtenidas en el paso anterior, se determina el número de veces que cada sismo contribuye a la formación del plano que se ha considerado dominante. Si esto se hace con cada una de las tendencias encontradas en la figura 6.22, encontramos que el sismo número uno de la tendencia de orden 2 ha contribuido cerca de 3000 veces a la formación de ese plano; el sismo número uno de la tendencia de orden número 3 ha contribuido sólo 30 veces; y así sucesivamente. Si se representan estos resultados para cada tendencia, se tiene un histograma como el de la figura 6.23. Obviamente, la tendencia dominante en esta muestra es la número 2; la poca relevancia de las otras hace que las ignoremos.

La figura 6.24 representa cada una de las ordenaciones de las tendencias encontradas para determinar cuántos sismos corresponden a cada una; con ello se pretende encontrar el Límite de Sismos ( $L_s$ ) definido en el capítulo cuarto. Sólo se ha



**Fig. 6.22** Resultado de aplicar el método MTP a la muestra sintética P45. En la figura se muestran los polos de los planos que han verificado el criterio de selección de tendencia dominante. Estas tendencias ya han sido corregidas del efecto de forma; el paso siguiente es elegir las más destacadas. Obsérvese que todas se encuentran agrupadas con muy poca dispersión alrededor de los 315 grados de acimut y 45 de buzamiento.

# Tendencias dominantes – P45

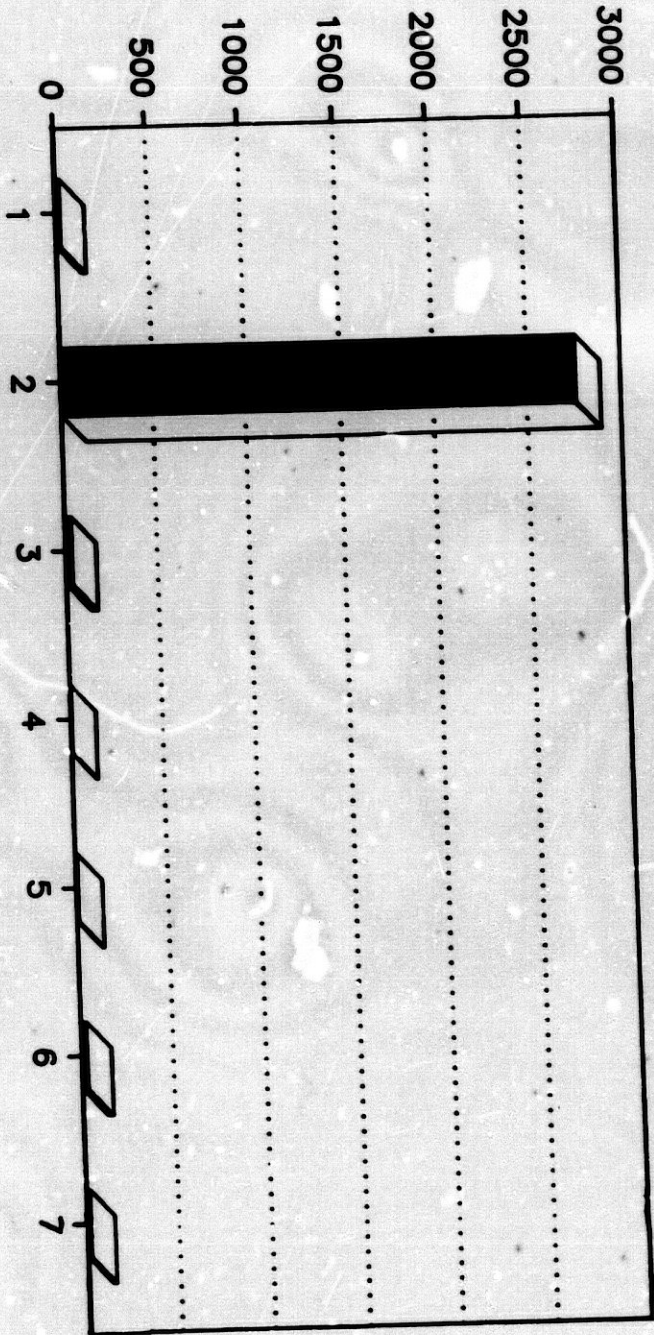


Fig. 6.23

Una forma de discernir sobre que tendencia o tendencias son más importantes consiste en calcular cuantos veces es usado un evento en la construcción de una determinada tendencia. Esto se hace con todos los eventos y el resultado se ordena de mayor a menor. Si se toma el primer número de esta ordenación para cada tendencia y se usa este para definirlo, se obtiene un histograma como el de la figura. Las orientaciones que se encuentran en la figura 6.22 y que se ven en la tabla VI-3 se representan aquí; obsérvese que sólo puede destacarse la tendencia número 2.

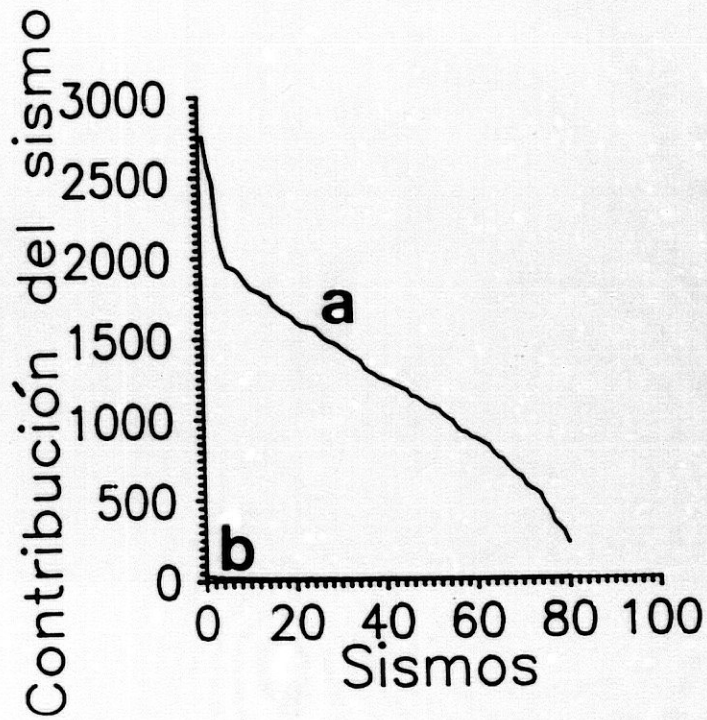


Fig. 6.24 En la figura se representa cada sismo frente a su contribución a la formación de una determinada tendencia. La notada por (a) corresponde a la tendencia número 2 de la tabla VI-3. La siguiente en importancia es la que aquí se ha representado por la letra (b). Obsérvese que esta ya no es relevante frente a la primera y que no ha podido establecerse el Límite de Sismos  $L_s$

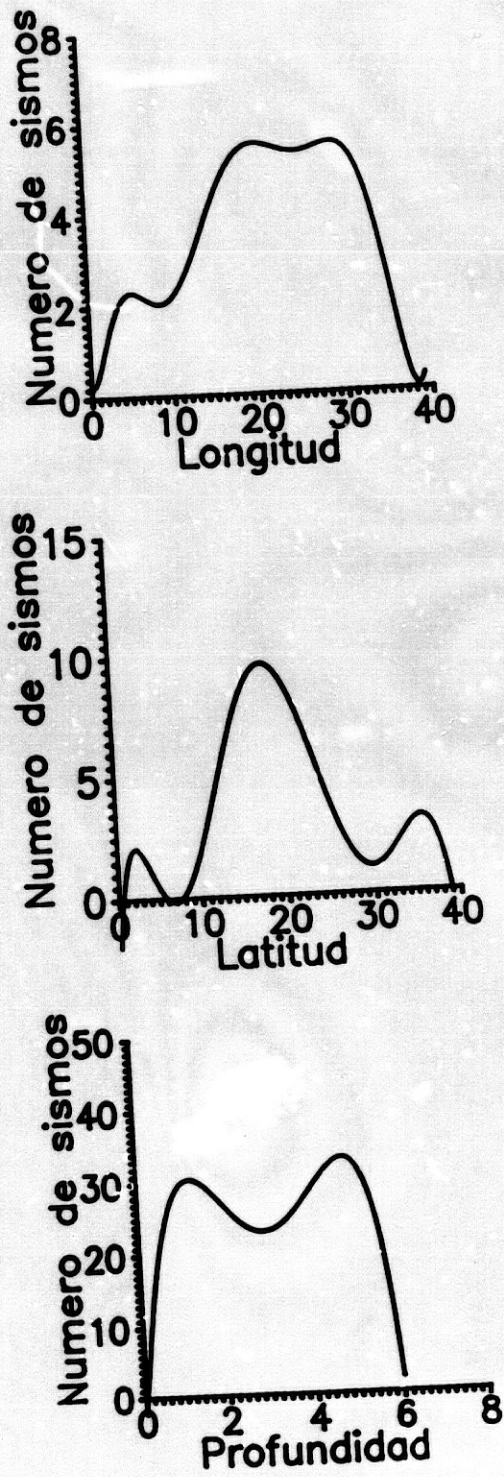
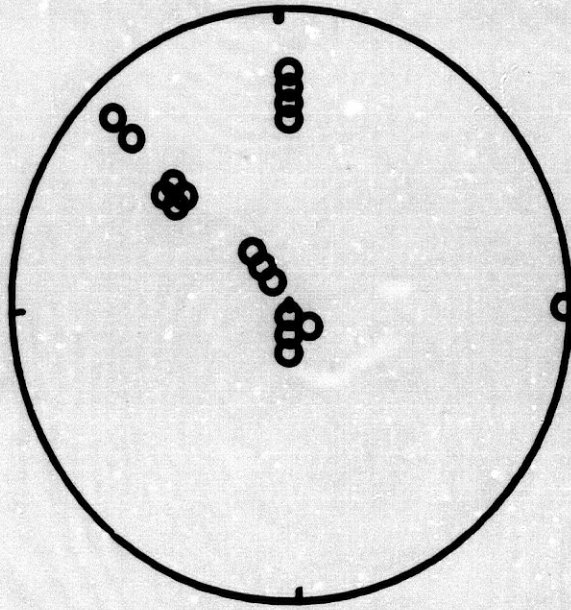


Fig. 6.25 *Distribución en longitud, latitud y profundidad de los sismos de la muestra P4590. Con la ayuda de esta curvas se construirán las simulaciones; estas simulaciones, a su vez, permitirán corregir del efecto de forma los resultados que se obtengan.*



**Fig. 6.26** *Tendencias obtenidas una vez que se ha corregido del efecto de forma. Obsérvese que ahora hay más dispersión que en el caso de la distribución P45; no obstante, las orientaciones esperadas, N 45 E buzando 45 grados al SE y EW buzando 60 grados al S han sido detectadas. Queda comprobar que son las más relevantes.*

representado la tendencia número 2 (en la figura, notada por a) y la 3 (notada por b), que es la que le sigue en importancia; puede apreciarse que hay 80 sismos en la primera (todos los de la DSS P45) y que la contribución de la segunda es apreciable; de hecho, en este caso ideal, no es posible establecer  $L_s$ .

Puede concluirse entonces que la orientación encontrada es efectivamente N 45 E buzando unos 45 grados al SE.

### II.5.2. Aplicación a la distribución P4590.

Se trata ahora de ver si el MTP consigue determinar las dos tendencias que presenta la DSS P4590 y obvia las orientaciones que resultan de la intersección de los planos. Los pasos a seguir son idénticos a los establecidos en el epígrafe anterior.

La figura 6.25 muestra la distribución de eventos en longitud, latitud y profundidad de la muestra P4590. Con estas curvas se han construido las simulaciones de la distribución en cuestión y se ha corregido esta del efecto de forma. Las simulaciones han sido sometidas a la prueba de chi-cuadrado (como se hizo anteriormente con la DSS P45) y se ha encontrado que  $\chi^2$  es mucho mayor que 500. Las orientaciones que han verificado la ecuación (4-15) pueden verse en la figura 6.26; los datos para su construcción están en la tabla VI-4. Como puede apreciarse, ahora hay más dispersión que en el caso anterior, aunque las orientaciones que debía detectar han sido localizadas y corregidas del efecto de forma. Queda por ver cuales son reconocidas como más significativas.

La figura 6.27 muestra el histograma que presenta las tendencias dominantes de la proyección anterior. Obsérvese que destaca en primer lugar la tendencia 10 y le sigue

la número 4. El MTP ha detectado, por tanto, correctamente las orientaciones de la muestra. Para finalizar el análisis puede encontrarse el Límite de Sismos de cada tendencia y representar ésta para obtener una localización espacial de las fracturas.

En la figura 6.28 se han representado las tendencias más relevantes. El Límite de Sismos de la primera tendencia se sitúa en torno a los 45 eventos; la fractura asociada con estos eventos puede verse en la figura 6.29. La otra fractura asociada a la segunda tendencia agrupa un número de sismos que viene dado por  $L_s' = 40$  (fig. 6.28). En la figura 6.29 puede verse también la localización espacial de esta fractura.

Podemos concluir afirmando que el MTP es eficaz en la localización de las tendencias principales de una zona y que es capaz de discernir entre ellas y los alineamientos debidos a las zonas de transición entre una y otra.

### **III. EVALUACION DE LOS ERRORES.**

#### **III.1. Introducción.**

La aplicación de cualquier nueva técnica debe incorporar forzosamente un análisis que permita cuantificar los márgenes de error en los resultados. La técnica ACP o MTP han sido estudiadas desde este punto de vista en este trabajo para establecer una relación entre los errores de los datos iniciales y los resultados obtenidos. La propagación de errores involucra además la capacidad y precisión del ordenador usado.

En el caso de cualquiera de las variantes del ACP (el ACPE o el ACPT), la propagación del error en los datos se refiere sobre todo a la diagonalización de la matriz a través del método de Jacobi (capítulo quinto). Los trabajos de Wilkinson



# Tendencias dominantes - P4590

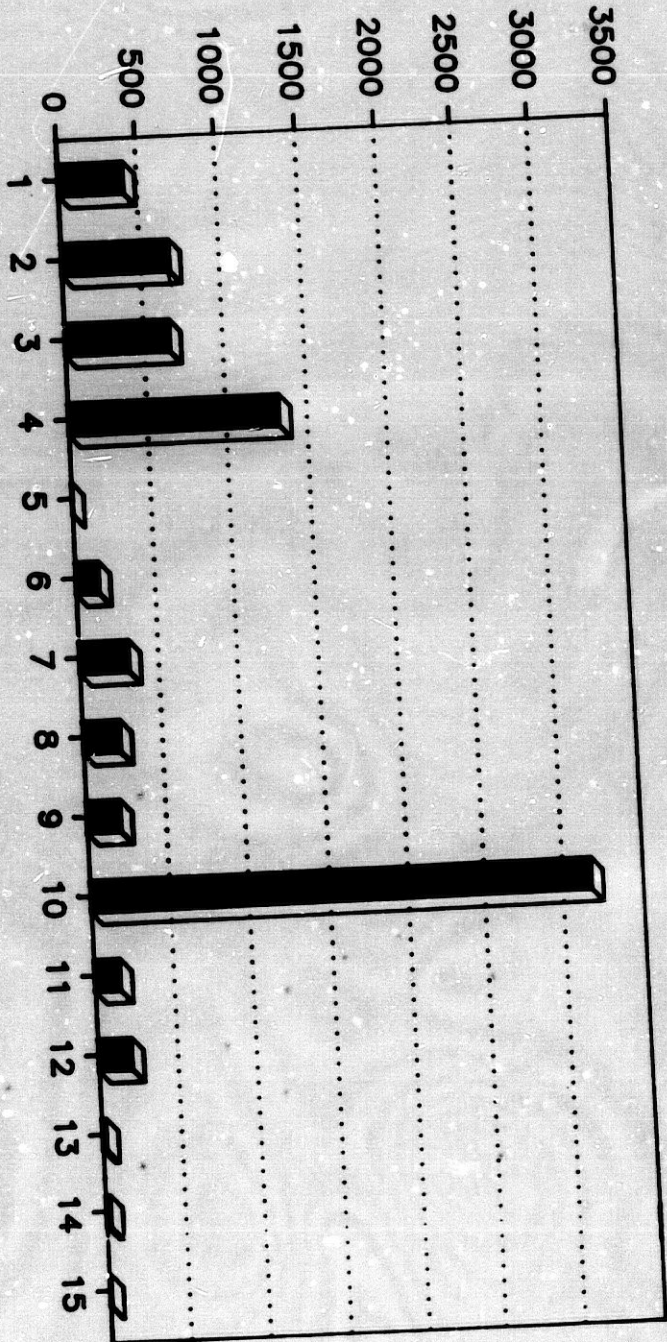
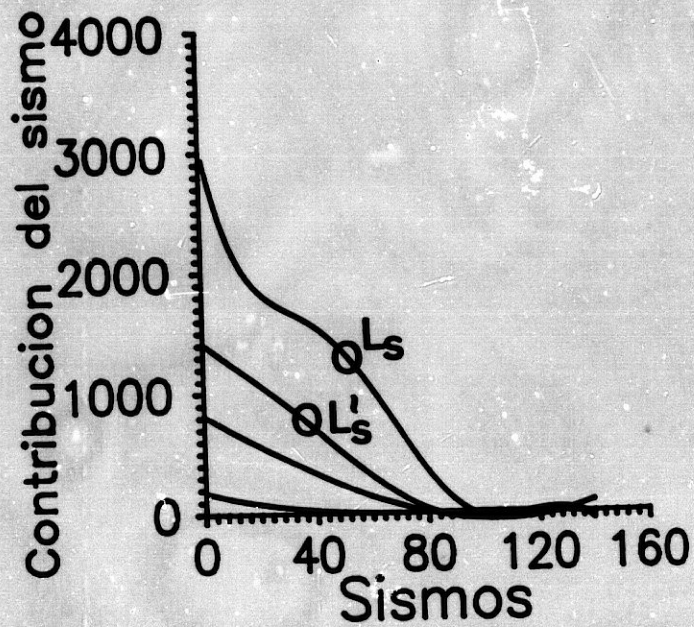
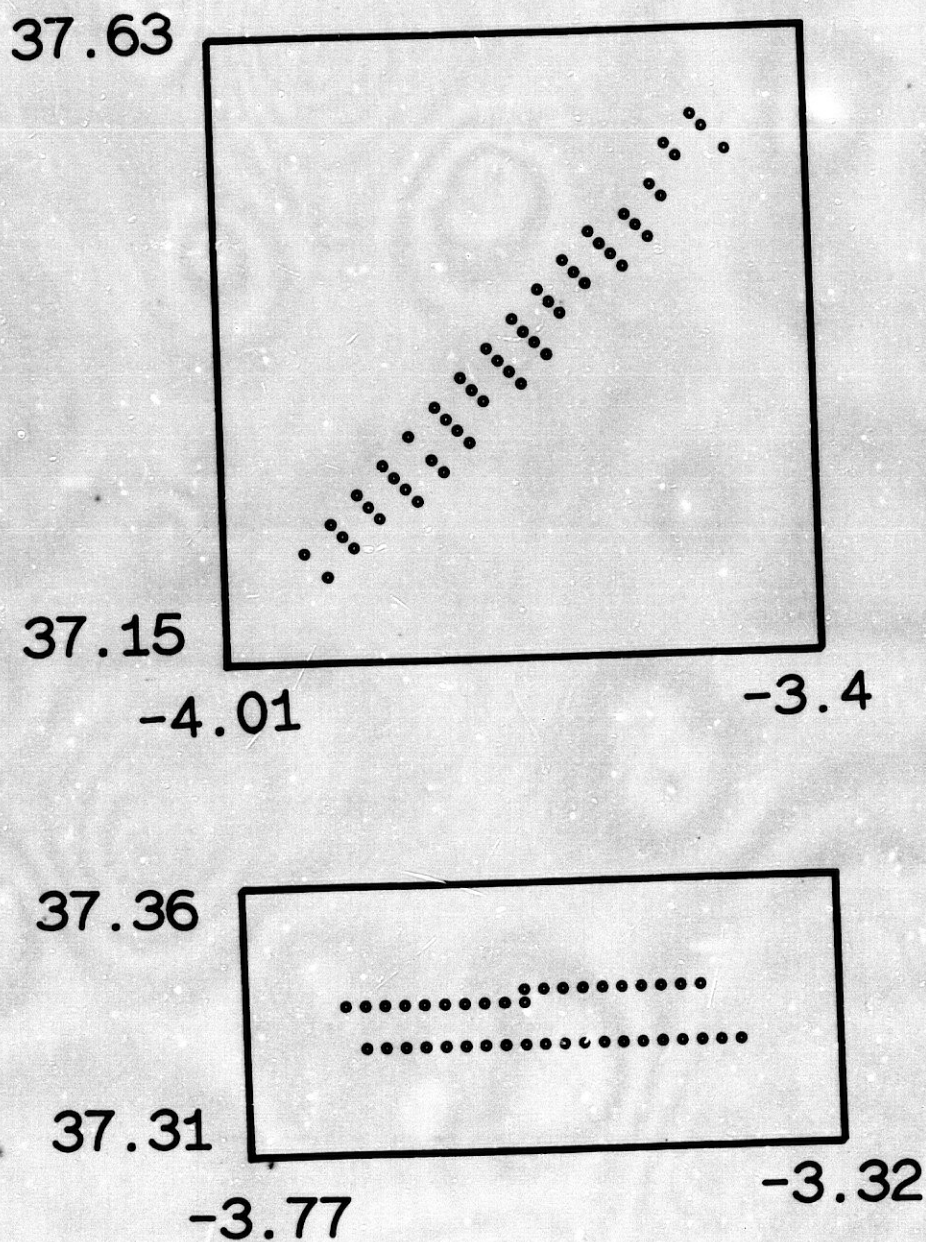


Fig. 6.27 Histograma para obtener qué tendencias son las más significativas entre las detectadas tras ser corregidas del efecto de forma. Para una explicación véase figura 6.23. La número 4 y la número 10 de la tabla VI-4 son las más importantes.



**Fig. 6.28** Gráfica para encontrar el Límite de Sismos de las distintas tendencias (véase figura 6.24). La primera tendencia es la número 10 de la tabla VI-4; le sigue la número 4. A partir de esta gráfica es posible obtener cuántos sismos y cuales pertenecen a una u otra tendencia. El Límite de Sismos  $L_s$  de la primera ha quedado establecido en 50 sismos. El Límite de Sismos de la segunda,  $L'_s$ , es de 40 sismos.



**Fig. 6.29** *Los sismos respectivos de cada tendencia dominante pueden ser representados para obtener una visualización espacial de las distintas fracturas. Esto se consigue tras determinar el Límite de Sismos correspondiente. En esta figura se representan los 50 sismos de la primera tendencia (arriba) y los 40 de la segunda (abajo).*

Tests y evaluación de errores

O	Azm	Bz
1	312	37
2	315	45
3	312	52
4	317	27
5	317	32
6	317	37
7	317	52

*Tabla VI-3. Tendencias dominantes obtenidas para la distribución P45. Estas son las orientaciones que se obtienen tras corregir del efecto de forma.*

O	Azm	Bz
1	2	22
2	2	27
3	2	32
4	2	37
5	92	2
6	137	82
7	182	77
8	182	82
9	182	87
10	315	45
11	12	317
12	22	317
13	72	327
14	77	327
15	82	327

*Tabla VI-4. Tendencias dominantes obtenidas para la distribución P4590. Estas son las orientaciones que se obtienen tras corregir del efecto de forma.*

Sec	N.v	Azm	Buz	Verg	Longitud	Latitud	Prof
1	60	50	49	-40	-3.6301	37.4441	7.7792
2	12	31	24	-59	-3.5743	37.4386	6.6481
3	7	52	11	-38	-3.5975	37.3788	6.2222
4	1	19	4	-71	-3.6081	37.3495	6.0222
5	16	89	49	-1	-3.5559	37.3406	6.0000

*Tabla VI-1. Localización espacial de los elipsoides encontrados al aplicar ACPT a la muestra P4590. Los más relevantes pueden verse en la figura 6.16.*

Sec	N.v	Azm	Buz	Verg	Longitud	Latitud	Prof
1	60	50	49	-40	-3.6301	37.4441	7.7792
2	12	31	24	-59	-3.5743	37.4386	6.6481
3	7	52	11	-38	-3.5975	37.3788	6.2222
4	1	19	4	-71	-3.6081	37.3495	6.0222
5	18	89	49	-1	-3.5494	37.3405	6.0296
6	6	99	71	9	-3.4977	37.3432	7.0777
7	3	108	78	18	-3.5006	37.3512	7.9777
8	2	95	56	-175	-3.5043	37.3583	8.4777
9	3	177	23	87	-3.5081	37.3668	8.9777
10	10	42	19	132	-3.5246	37.3980	10.277
11	1	46	18	136	-3.5447	37.4320	11.4
12	9	140	30	50	-3.5652	37.4705	12.3777
13	6	152	26	62	-3.6052	37.5399	13.8777
14	1	164	27	74	-3.6261	37.577	14.5555
15	1	177	26	87	-3.6327	37.5882	14.7777
16	16	179	31	89	-3.6421	37.691	15

*Tabla VI-2. Localización espacial de los elipsoides encontrados al aplicar ACPT a la muestra P459000. Los más relevantes pueden verse en la figura 6.19.*

### *Tests y evaluación de errores*

(1965), Wilkinson & Reinsch (1971), Faddeeva (1973), Press et al (1989) proporcionan fórmulas para estimar el error en la diagonalización de una matriz a través de distintos métodos iterativos.

El problema que se plantea en la utilización del ACPE o del ACPT es doble. En primer lugar, son muchas las matrices de dispersión que van a diagonalizarse, están construidas con distintos elementos cada uno de los cuales tiene un error diferente, y además se refieren a una zona espacial y a un instante temporal diferente; por ejemplo, una muestra de 50 terremotos en el método ACPT con una ventana de 20 sismos requiere la construcción de 31 matrices de dispersión; cada matriz de dispersión está formada por distintos eventos y cada uno de ellos, tiene un error diferente.

En segundo lugar, el error final depende del número de iteraciones que necesite cada diagonalización. Así, siguiendo con el ejemplo anterior, la diagonalización de cada una de las 31 matrices de dispersión requerirá, en general, distinto número de iteraciones, lo cual repercute directamente en el error final del resultado.

Después de este proceso, es necesario evaluar en su conjunto los errores obtenidos para poder interpretar adecuadamente el resultado. Todos estos problemas son resolubles, pero harían impracticable al método, ya que no sería fácil estimar el margen de error final.

En el MTP el único error que se propagaría sería el de formación de los planos a través de los tres puntos que lo definen. Aquí los problemas son más acusados en el sentido de que la misma muestra de 50 sismos anterior requiere la formación de 19600 planos; cada uno de estos planos tiene un error diferente y por tanto el resultado requerirá un pesado final.

Una complejidad añadida es que los errores no se propagan linealmente en ninguno de los dos métodos.

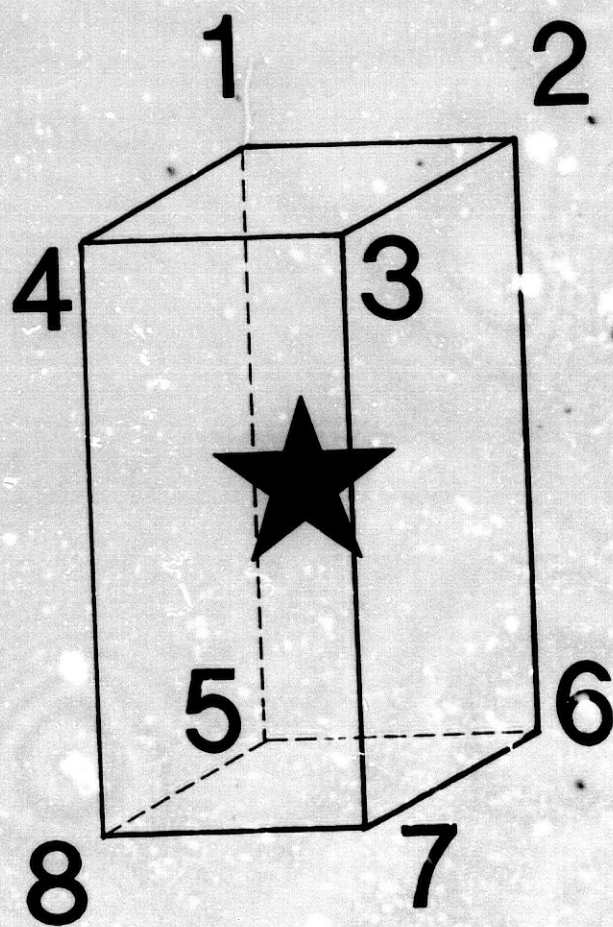
Estas dificultades numéricas nos han llevado a formular un método original en el análisis de errores que nos permita evaluar los mismos de manera más sencilla y aplicarlo de forma común a los dos. Esta técnica permite además comparar el nivel de confianza de los resultados obtenidos con los diferentes métodos.

### III.2. Análisis de errores.

La suposición básica del método es que los errores en los datos iniciales afectarán en mayor o menor medida a los resultados finales dependiendo de su magnitud. Para obtener una estima del error en la determinación de un plano con los métodos descritos, a partir de los errores en los datos, se ha usado la distribución sintética de sismos P45, esto es, un plano N 45 E buzando 45 grados al Este. Este plano se supone que está construido con datos de error cero; por tanto, se espera que su diagonalización, o su análisis mediante MTP, arroje como resultado error cero. A partir de aquí, se perturbarán los datos en modo creciente y se verá cuanto se aparta el resultado del que debería obtenerse. El objetivo de este estudio es obtener una "curva de evaluación relativa de errores", que nos permitirá, conociendo el error en los datos, estimar el margen de error en los resultados finales.

#### III.2.1. Perturbación de los datos.

La DSS P45 es un plano perfecto formado por 80 sismos. Cada dato es perturbado una cantidad relativa a la máxima magnitud del volumen que engloba a todos los sismos. Así, una perturbación del 2% en los datos significa que cada dato ha



**Fig. 6.30** Paralelepípedo de error para un dato. En la figura se muestra una hipotética localización hipocentral (la estrella) que estará afectada de error, los errores en longitud, latitud y profundidad constituyen la mitad de las respectivas aristas del paralelepípedo. Los ocho vértices, numerados del uno al ocho, constituyen las posiciones más desfavorables que podría tomar este dato si se perturbara con su error.



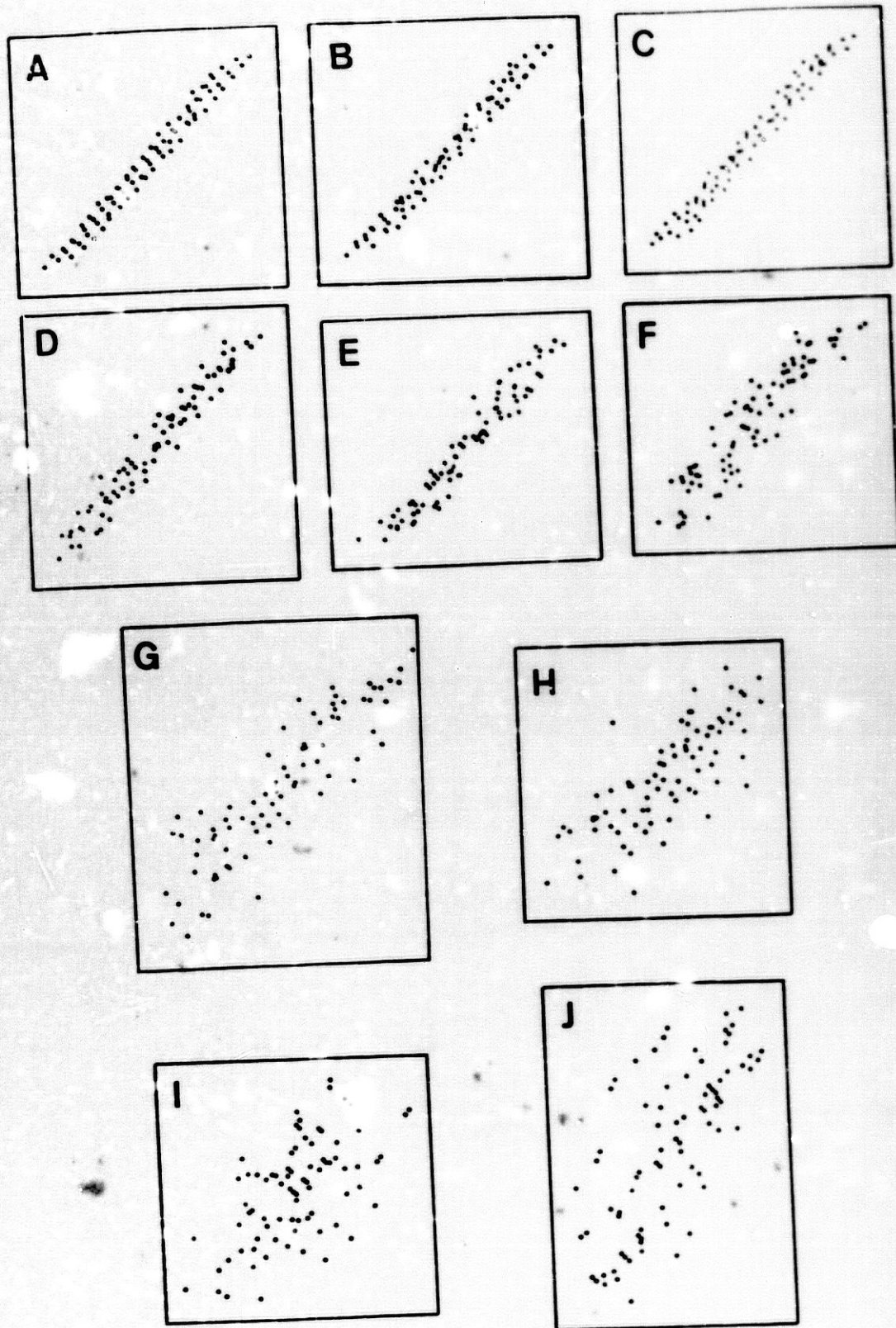


Fig. 6.31 La distribución sintética de sismos P45 ha sido tomada como un plano perfecto con error en los datos cero. Los datos de esta muestra han sido perturbados con valores de error crecientes de forma que cada dato pasa a ocupar alguna de las posiciones más desfavorables que podrían tener. Los resultados de las diez perturbaciones que se han llevado a cabo se presentan aquí ordenadas de la A a la J. Para cada grado de perturbación se han construido además distintos planos para evitar en lo posible sesgos o tendencias fortuitas en la elección de la posición más desfavorable.

sido perturbado de su posición original en un 2% de la medida de la diagonal del paralelepípedo que los contiene a todos.

La ejecución de tal perturbación se lleva a cabo como sigue. Cada dato tiene asociado un paralelepípedo de error (figura 6.30) formado por los errores en longitud, latitud y profundidad que se obtienen tras el proceso de localización del foco sísmico. Cada arista es dos veces el error en cada una de estas magnitudes. Los ocho vértices de este paralelepípedo son las posiciones más desfavorables que el dato podría tomar (en la figura 6.30 se han numerado del 1 al 8). Cada dato ha sido llevado, aleatoriamente, a una de las ocho posiciones más desfavorables; el resultado es una perturbación global y aleatoria de los datos llevada a cabo en alguna de las posiciones más desfavorables. A medida que el tanto por ciento de error introducido en los datos ha sido mayor, el plano original se ha ido deformando gradualmente (fig. 6.31). A cada plano deformado se le aplica ahora el método en cuestión (ACP o MTP) y se determina el grado de desviación sobre el resultado correcto.

### **III.2.2. Generación de planos perturbados.**

Para evitar una posible tendencia o sesgo en los planos perturbados, se han creado al menos diez con cada grado de perturbación, es decir, diez planos perturbados un determinado tanto por ciento.

A cada uno de los planos perturbados se les ha aplicado el método ACP o MTP y se ha obtenido el resultado. Este se espera que sea próximo a N 45 E buzando 45 grados al SE. Finalmente, se ha hecho la media de los valores obtenidos en los diez conjuntos y ésta ha sido tomada como resultado final para esa perturbación.

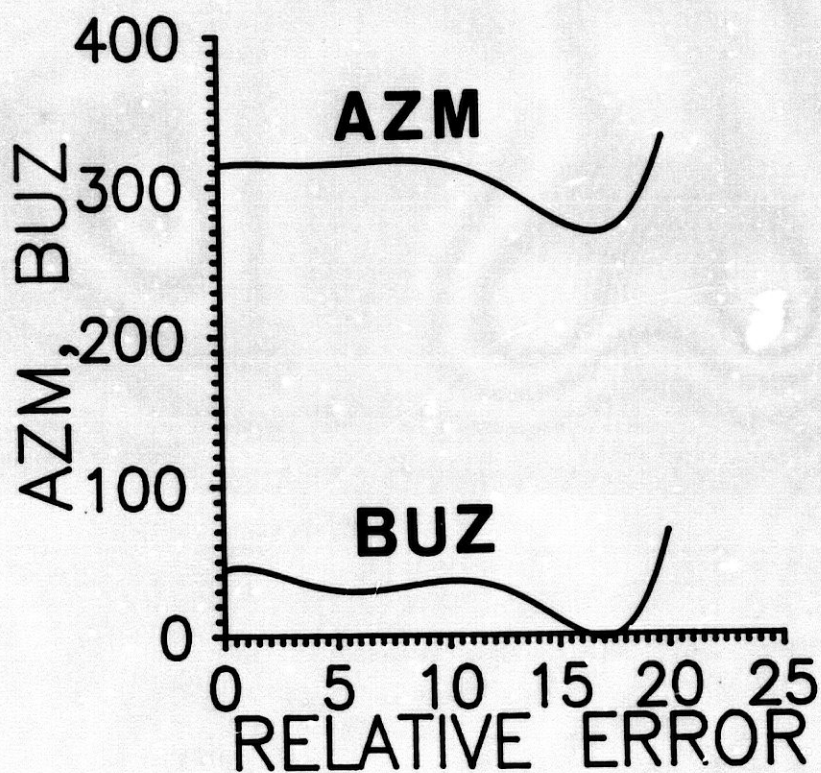
El proceso se repite ahora para cada grado de perturbación. Esto permite ajustar una curva de error corregida en lo posible de sesgos o tendencias que fortuitamente pudieran aparecer al aplicar el algoritmo que lleva los datos de forma aleatoria a las posiciones más desfavorables del paralelepípedo de error.

### III.3. Evaluación de los errores con el método ACP.

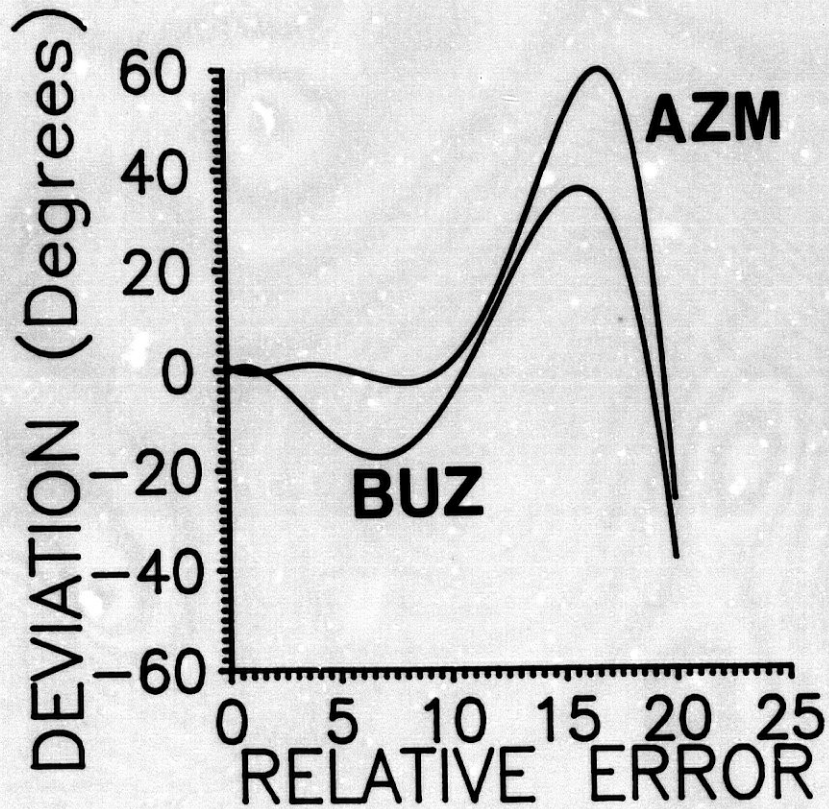
La tabla VI-5 muestra los distintos archivos Beta correspondientes a los planos perturbados junto con el tanto por ciento de error con el que se han perturbado las localizaciones hipocentrales originales y los resultados de acimut y buzamiento obtenidos con ese plano a través del ACP. La representación de los datos de esta tabla pueden verse en la figura 6.32; en ella se puede ver la variación del acimut y del buzamiento cuando se aumenta el error con el que se contamina a los datos originales.

El análisis de la figura 6.32 permite comprobar que el método es estable para errores relativos en la muestra de sismos de hasta el 10 o 15%; el buzamiento presenta ya oscilaciones a partir del 5%, aunque es relativamente estable también hasta el 10% de error. Una mejor visualización de esto se consigue si se estudia el grado de desviación del resultado obtenido frente al resultado correcto que se muestra en la tabla VI-6 muestra estos datos y que se ha representado en la figura 6.33. Obsérvese como el acimut es estable hasta valores del 10% en el error relativo, mientras que el buzamiento presenta inestabilidades a partir del 3 o 4%.

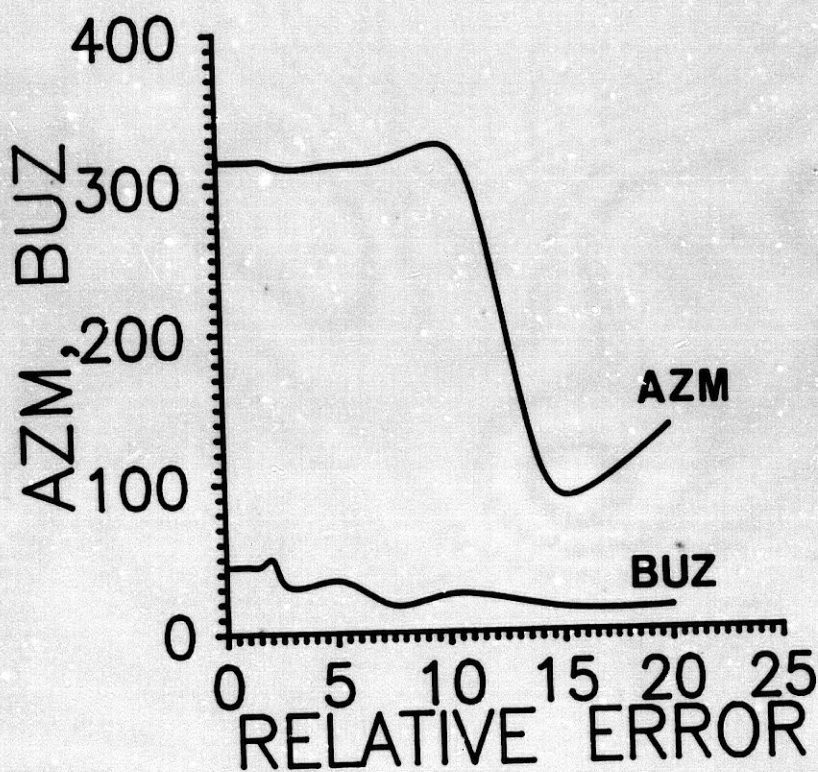
La explicación de por qué el buzamiento es más inestable se encuentra en la naturaleza misma del método ACP; el elipsoide que se ajusta a los datos tiene dos semiejes menores que pueden ser parecidos en magnitud y esto trae consigo el ajuste menos preciso de este eje. El acimut, sin embargo, es más fácil de ajustar en cualquier



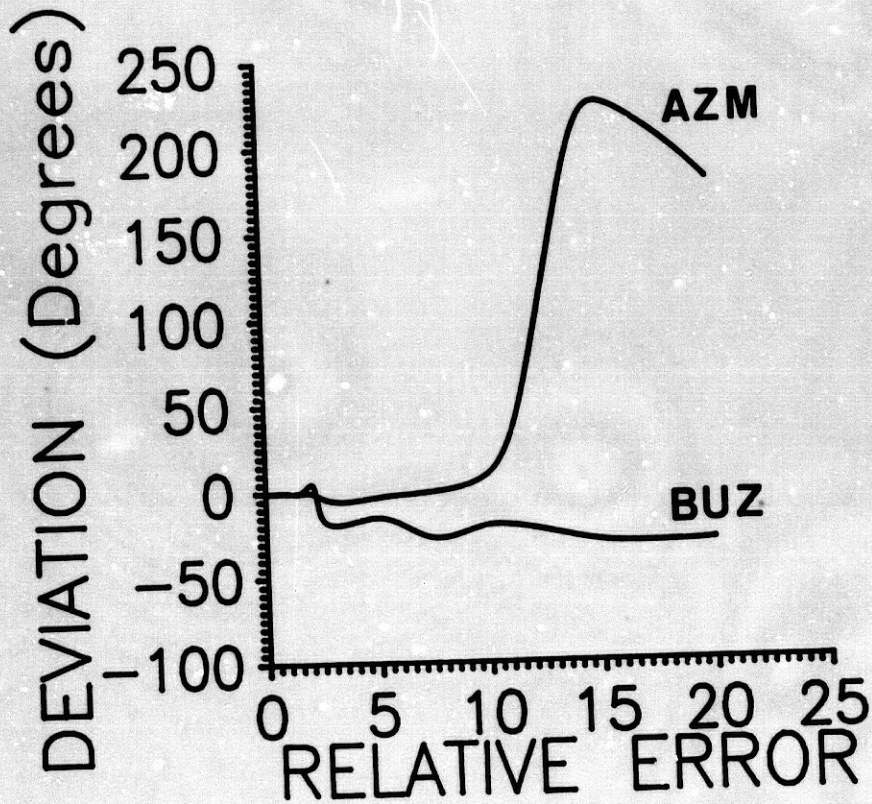
**Fig. 6.32** Los datos de la tabla VI-5 se han representado en esta figura para observar como responde el ACP a una perturbación de los datos originales. Como puede verse, el azimut es mucho más estable que el buzamiento; esta gráfica permite estimar como afectará el error en los datos al margen de error en los resultados. Así, puede afirmarse que si el error en los datos originales no es mayor que el 3%, los resultados obtenidos serán correctos; para errores relativos de hasta el 10% el azimut será fiable mientras que el buzamiento estará afectado de imprecisión.



**Fig. 6.33** Los datos de la tabla VI-6 se han representado gráficamente en esta figura; en ella se puede apreciar la desviación de los resultados obtenidos mediante el ACP con planos perturbados frente al error utilizado en la perturbación. Obsérvese que el acimut permanece estable con valores de error de hasta el 10%; el buzamiento se ve afectado con menores cotas de error.



**Fig. 6.34** *Representación de los resultados obtenidos mediante la aplicación del MTP a distintos planos perturbados con niveles crecientes de error. En este caso hay que destacar la mayor estabilidad en la obtención del buzamiento, aunque como en el caso anterior, los resultados no serán afectados si los niveles de error no superan el 3%. Hasta el 10% el acimut es notablemente estable mientras que surgen ligeras desviaciones para el buzamiento.*



**Fig. 6.35** *En esta figura se ha representado la desviación de los resultados obtenidos frente al resultado correcto en función del error relativo introducido en la construcción de los planos perturbados. En esta gráfica se ve de manera más clara que nivel de error es aceptable en los datos originales para la aplicación del MTP.*

Tests y evaluación de errores

Nombre	% error	AZM	$\sigma$ (AZM)	Buz	$\sigma$ (BUZ)
Beta0	0.0	315.0	0.00	45.0	0.00
Beta1	0.5	314.8	0.40	45.0	0.00
Beta2	1.0	314.2	0.40	45.4	0.49
Beta3	1.5	315.0	0.00	44.4	0.92
Beta4	2.0	314.7	0.46	42.8	0.87
Beta5	2.5	315.9	1.04	42.3	2.83
Beta6	5.0	316.0	0.89	27.5	11.98
Beta7	7.5	314.9	1.51	33.9	11.92
Beta8	10.0	315.4	2.69	35.5	8.41
Beta9	15.0	277.6	31.61	10.2	11.10
Beta10	20.0	332.1	7.62	69.0	19.51

Tabla VI-5. Los planos que contienen datos perturbados han sido denominados Beta0 , Beta1 , Beta2 , etc... Cada uno de ellos está construido a partir de la DSS P45 con un grado de perturbación creciente (expresado en tanto por ciento). En la tabla se presentan estos planos y el resultado que se ha obtenido (columna tercera y quinta) es la media de todos los planos construidos con un mismo nivel de perturbación. Se ha añadido la desviación estándar para cada dato, lo cual proporciona información sobre la dispersión de los mismos.

% error	$\Delta$ (AZM)	$\Delta$ (BUZ)
0.5	0.2	0.0
1.0	0.8	0.4
1.5	0.0	0.6
2.0	0.3	- 2.2
2.5	- 0.9	- 2.7
5.0	- 1.0	-17.5
7.5	0.1	-11.1
10.0	- 0.4	- 9.5
15.0	48.4	34.8
20.0	-26.1	-38.1

Tabla VI-6 En esta tabla se presenta el error relativo de los planos construidos con datos perturbados y la desviación media obtenida en los parámetros acimut y buzamiento.



caso por estar asociado al eje mayor del elipsoide y por ello es más estable.

Puede concluirse que la aplicación del ACP garantiza la precisión en los resultados siempre que los errores en la localización no sobrepasen el 3 o 4% de la diagonal del paralelepípedo que engloba a todos los sismos. Además, puede afirmarse que el acimut encontrado en los planos es el correcto con errores de hasta el 10%.

#### III.4. Evaluación de los errores con el método MTP.

La tabla VI-7 muestra los resultados del análisis de errores para el método MTP. Estos datos se han representado en la figura 6.34. Puede observarse que la obtención de acimutes es fiable con errores de hasta el 10%, sufriendo después una gran desviación. El buzamiento presenta ahora un comportamiento mucho más estable que en el caso anterior. Aunque se aparta del valor correcto con errores superiores al 5%, no sufre cambios tan bruscos para valores superiores de error tal y como ocurría en el ACP.

La figura 6.35 muestra la desviación respecto a los valores correctos de los resultados obtenidos frente a la magnitud relativa del error usado en la perturbación de los datos, donde puede apreciarse más claramente hasta que valores se encuentra la estabilidad en los resultados de acimut y de buzamiento.

Puede concluirse afirmando que los resultados son fiables con errores menores del 3%; el resultado en acimut está garantizado incluso para errores de hasta el 10 o 12%. Además, puede añadirse que la fiabilidad de los resultados en buzamiento es mayor en el método MTP que en el ACP, ya que en el primero los valores del buzamiento se mantienen aproximadamente constantes con ligeras desviaciones del valor

verdadero.

#### **IV. COMENTARIOS.**

En este capítulo se han perseguido tres objetivos básicos: verificar la capacidad de los métodos ACPE, ACPT y MTP para encontrar planos dominantes y subsidiarios, establecer un análisis para la evaluación de los errores en los resultados obtenidos a partir de los errores en los datos iniciales, y finalmente, extraer conclusiones de la aplicación del método a distribuciones sintéticas de sismos.

Para llevar a cabo los objetivos mencionados nos hemos ayudado de la construcción de distribuciones hipotéticas de sismos que definen un plano de falla o un conjunto de fallas entrelazadas y se han perturbado las posiciones espaciales de los eventos para ver la influencia de los errores de los datos en los resultados que se obtienen. Los métodos ACPE, ACPT y MTP han sido aplicados a estas distribuciones para obtener en cada caso las orientaciones presentes en la zona o el avance en el tiempo del proceso de fracturación. Los tests han probado la eficacia de la aplicación de los métodos en función de los errores en los datos de entrada.

La aplicación de los métodos propuestos en esta Tesis Doctoral a las distribuciones sintéticas de sismos ha proporcionado información muy útil en cuanto a la necesaria elección de los parámetros K (la ventana móvil de sismos óptima) y D (la distancia entre eventos típica de la muestra). Con esta información será más fácil la elección de dichos parámetros en el caso del análisis de distribuciones reales.

Hay que destacar la capacidad del método ACPT en la reconstrucción de las distintas etapas del proceso de ruptura; además, al contar con la localización espacial

de cada uno de los elipsoides más relevantes, es posible modelar la evolución del proceso de ruptura y representar espacialmente esa evolución en un mapa de la región fracturada como ha sido el proceso de ruptura. Esto puede ser de gran ayuda en posteriores estudios geológicos y tectónicos que se realicen sobre la zona.

El análisis de los errores sobre las técnicas ACP ha permitido establecer un amplio margen de fiabilidad para la estimación de los acimutes en la aplicación del método. El buzamiento se obtiene fiablemente con el ACP cuando los errores en la localización son menores del 3 %. El análisis de los errores sobre el método MTP ha llevado a conclusiones parecidas, aunque esta técnica permite estimar un buzamiento fiable con errores de localización mayores que en el caso de aplicar el ACP.

Una conclusión relevante del análisis de errores efectuado es la importancia que tiene en la fiabilidad final de los resultados, la dimensión máxima de los errores de localización de cada evento en relación a la correspondiente de la distribución espacial del conjunto de eventos.

Tests y evaluación de errores

Nombre	% error	AZM	BUZ	$\Delta$ (AZM)	$\Delta$ (BUZ)
Beta0	0.0	315	45	0.0	0.0
Beta1	0.5	315	45	0.0	0.0
Beta2	1.0	315	45	0.0	0.0
Beta3	1.5	315	45	0.0	0.0
Beta4	2.0	315	50	0.0	5.0
Beta5	2.5	312	35	-3.0	-15.0
Beta6	5.0	312	35	-3.0	-15.0
Beta7	7.5	315	18	0.0	-27.0
Beta8	10.0	325	25	10.0	-20.0
Beta9	15.0	90	15	225.0	-30.0
Beta10	20.0	135	15	180.0	-30.0

*Tabla VI-7 El método para estudiar como afectan los errores en los datos al método MTP es análogo al seguido en el caso del ACP. En esta tabla se presentan conjuntamente los resultados obtenidos con diferentes niveles de error así como la desviación del resultado obtenido frente al resultado correcto.*

*Aplicación de los métodos*

**CAPITULO SEPTIMO**

**APLICACION DE LOS METODOS ACP Y MTP**

## I. INTRODUCCION.

En este capítulo se van a aplicar los métodos basados en el Análisis de Componentes Principales (ACPE y ACPT) y en el Método de los Tres Puntos (MTP), desarrollados de forma teórica en esta Tesis Doctoral, a las series de terremotos ocurridas en Superstition Hills en California (1987) y a las dos series que han tenido lugar dentro de las Béticas Centrales: en Loja (1985) y en Antequera (1989).

Las características más relevantes de la primera de estas series ha sido descrita en el capítulo segundo y es un ejemplo contundente de la evolución temporal de un sistema de fallas. Los datos utilizados han sido proporcionados por el Seismological Laboratory del California Institute of Technology (CALTECH); corresponden a los 421 sismos ocurridos a finales del mes de Noviembre y que perfilan completamente el sistema de fallas activo (Magistrale et al, 1989). Esta serie, perfectamente estudiada por otros autores mediante la aplicación de diversos métodos sismológicos y geológicos (Hudnut et al, 1989; McGill et al, 1989; Mori, 1989; Sharp et al, 1989; Magistrale et al, 1989; Wald et al, 1989) nos permitirá comprobar la similitud de los resultados obtenidos a partir de nuestro método. En cierto modo, es un nuevo test a los métodos (como los aplicados en el capítulo anterior), pero en esta ocasión, con datos reales.

Las otras dos series ocurrieron en Andalucía Oriental y fueron detectadas por la Red Sísmica de Andalucía (RSA) y posteriormente localizadas y analizadas en el Instituto Andaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos (IAGPDS). Las dos series se conocen como la de Loja, ocurrida en Febrero de 1985 cerca de esta localidad granadina, y la de Antequera, en las proximidades de esta ciudad y que tuvo lugar en Junio de 1989.

## II. LOS TERREMOTOS DE SUPERSTITION HILLS (1987) EN CALIFORNIA.

### II.1. Descripción de la serie sísmica.

A las 01:53 UT del 24 de Noviembre de 1987 ocurrió un terremoto de magnitud  $M_s = 6.2$  en el área de la falla de Elmore Ranch y fue asociado con fracturas de un complejo conjunto de fallas localizadas justo al Noreste de la falla de Superstition Hills (figura 2.71). Los desplazamientos máximos medidos en superficie asociados a este sismo fueron de hasta 13 cm debidas a un movimiento levógiro sobre la falla de Elmore Ranch (Budding & Scharp, 1988; Williams & Magistrale, 1989). Alrededor de 11 horas más tarde, a las 13:16 UT del 24 de Noviembre de 1987, la falla de Superstition Hills y dos fallas más al Sur se rompieron produciendo el terremoto de Superstition Hills de magnitud  $M_s = 6.6$  (Budding & Scharp, 1988; Williams & Magistrale, 1989).

En Superstition Hills, las evidencias superficiales que se estudiaron al Noreste de la región indican un fallamiento levógiro, y son significativamente diferentes en el comportamiento dextrógiro que se dio tras el segundo terremoto (Sharp et al, 1989; Magistrale et al, 1989). La serie de terremotos de Superstition Hills fue inusual desde este punto de vista (Magistrale et al, 1989) por involucrar un sistema de fallas levógiro, en la estructura del Noreste (la falla de Elmore Ranch) y otro dextrógiro en la falla de Superstition Hills.

Estos dos terremotos y sus réplicas son de interés, no sólo por sí mismos, sino por las implicaciones que puedan tener en la actividad sísmica en el lago de Salton (McGill et al, 1989) (figura 2.71). Históricamente, las fallas activas del lago de Salton han tenido un movimiento dextrógiro de desgarre y el comportamiento de todas ellas ha sido similar (McGill et al, 1989). Así, la falla de Coyote Creek, la falla Imperial, la falla de

Superstition Hills y la parte Sur de la falla de San Andrés (fig. 2.71) han exhibido todas un deslizamiento asísmico (creep) así como desplazamientos que se han ido desencadenando debidos a otros terremotos de magnitud moderada en regiones próximas (Allen et al, 1982). Con la ocurrencia del terremoto de Superstition Hills en 1987, tres de estas cuatro fallas tienen ahora su período de ruptura sísmica completo, ya que las fallas Imperial y de Coyote Creek ya se habían desplazado anteriormente. Esta situación nos lleva a pensar en cuando las seguirá el Sur de la falla de San Andreas.

La serie de réplicas de los terremotos perfilan el sistema de fallas sísmicamente activo; además, la distribución espacio-temporal de las réplicas puede informarnos de como ha sido el proceso de ruptura. En la figura 7.1 puede verse el conjunto de los terremotos de Superstition Hills. En ella puede apreciarse claramente la activación de una estructura N 30-45 E y otra N 30-45 W. La primera de ellas corresponde a la falla de Elmore Ranch mientras que la segunda está asociada a la falla de Superstition Hills. El primer evento principal tuvo lugar sobre la falla de Elmore Ranch y fue seguido de un serie de réplicas que migraron hacia el Suroeste. Cuando estas réplicas alcanzaron la falla de Superstition Hills se produjo el segundo evento principal, de mayor magnitud y que activó la segunda falla. Sobre esta se produjeron numerosas réplicas.

Para un análisis de la distribución de las réplicas y del proceso de ruptura se han realizado las figuras 7.2. En esta serie de figuras se ha simbolizado con una circunferencia los sismos que tuvieron lugar antes del segundo evento principal y con un cuadrado los que acontecieron después. En las figuras se han representado los epicentros de los terremotos para diferentes valores de magnitud umbral. Así, las figuras 7.2a-g corresponden a los terremotos de la serie con magnitudes superiores a 6.0, 4.5, 4.0, 3.5, 3.0, 2.5 y 2.0 respectivamente. En la figura 7.2a se muestran los dos terremotos



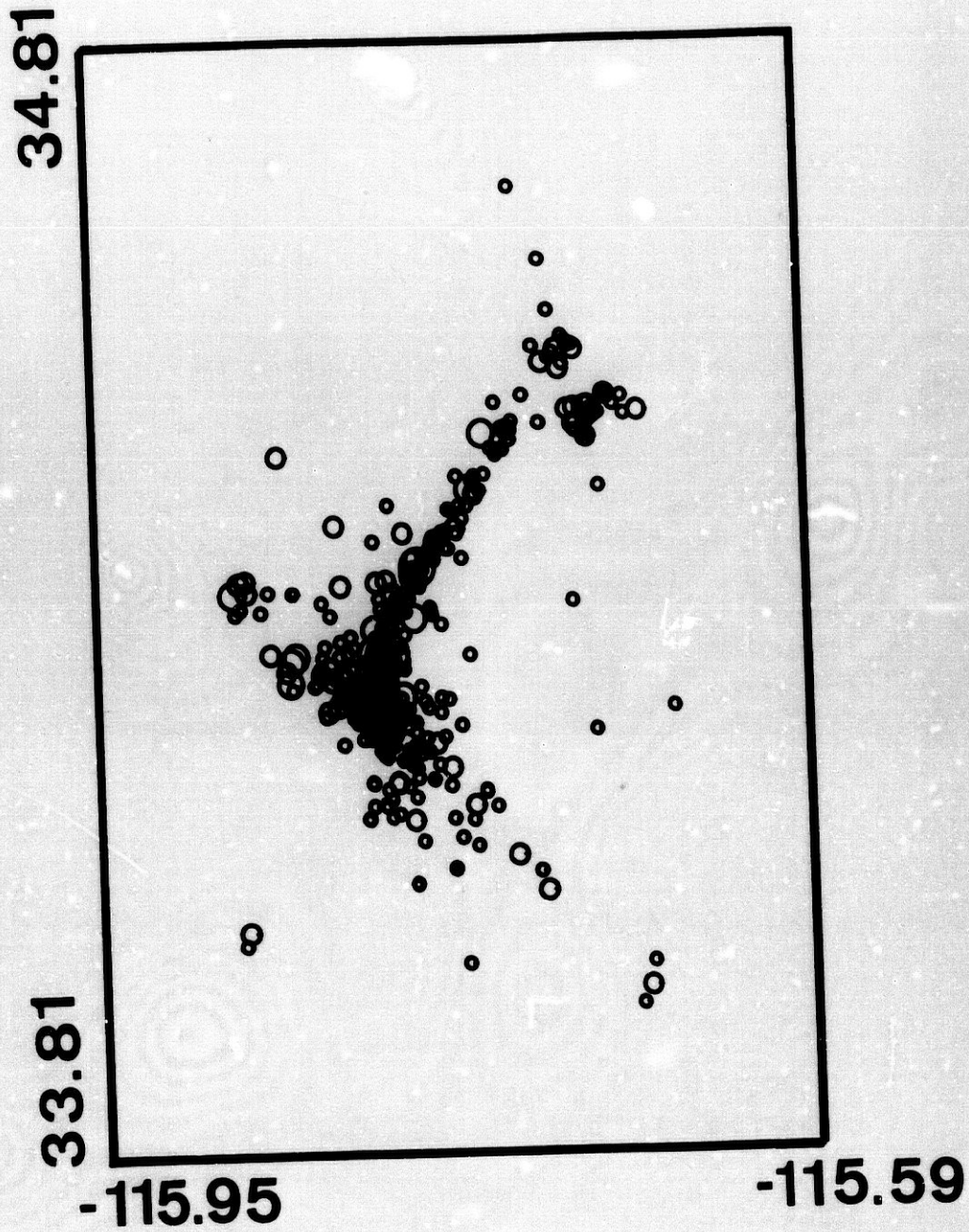
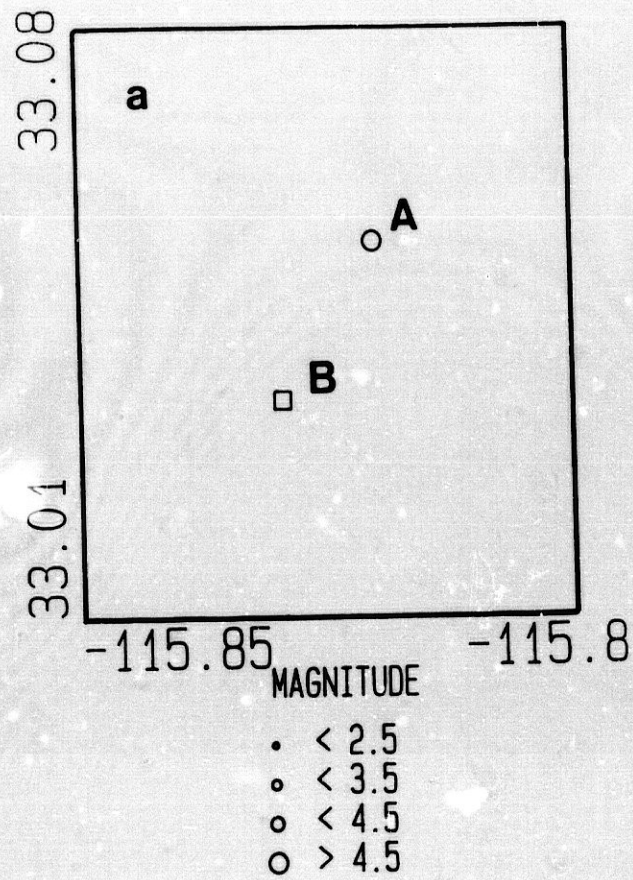


Fig. 7.1 *Distribución epicentral de la secuencia de sismos de Superstition Hills, en California, (1987). Las fallas de Elmore Ranch y de Superstition Hills se activaron con sendos terremotos de magnitud  $M_s = 6.2$  y  $M_s = 6.6$ . En la figura puede verse la distribución de las 421 réplicas que tuvieron lugar a finales del mes de Noviembre y que perfilaron perfectamente las dos fallas mencionadas.*



- < 2.5
- < 3.5
- < 4.5
- > 4.5

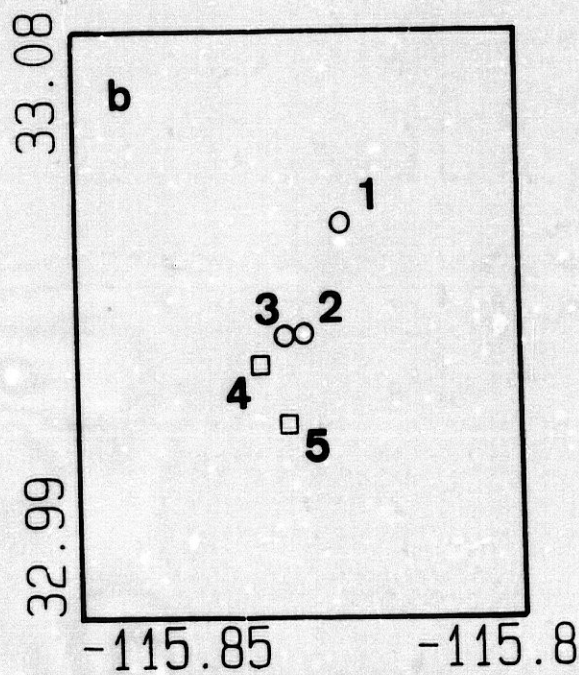


Fig. 7.2 En esta serie de figuras (desde la a hasta la h) se presenta la distribución epicentral de réplicas con distintas magnitudes umbrales; estas son, respectivamente,  $m_u = 6.0, 4.5, 4.0, 3.5, 3.0, 2.8, 2.5$  y  $2.0$ . La serie comenzó en la falla de Elmore Ranch, al NE, con un terremoto de magnitud  $M_s = 6.2$ ; las réplicas que ...

Aplicación de los métodos

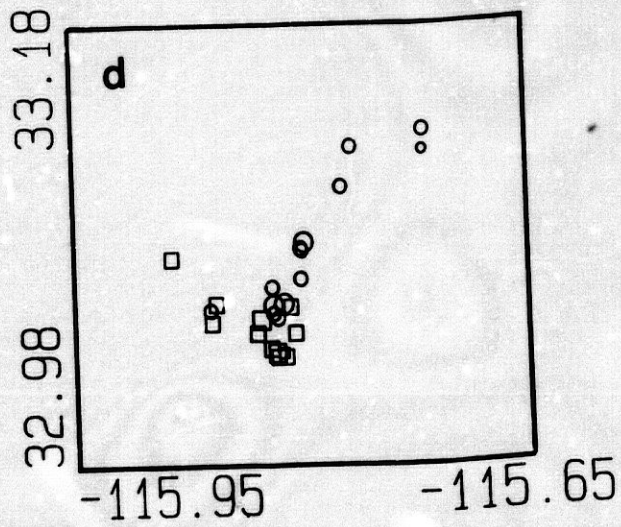
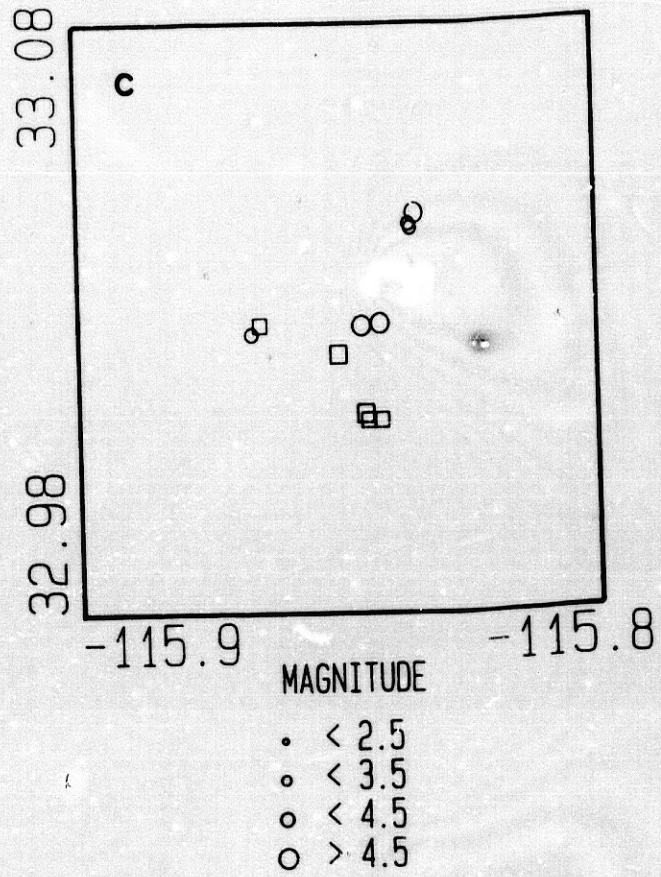


Fig. 7.2 ... siguieron migraron hacia el SW hasta llegar a la falla de Superstition Hills; en la intersección de ambas fracturas tuvo lugar el segundo evento principal, cuya magnitud alcanzó el valor  $M_s = 6.6$ . Para una mejor visualización del proceso se han notado por un cuadrado aquellos sismos que tuvieron lugar tras el ...

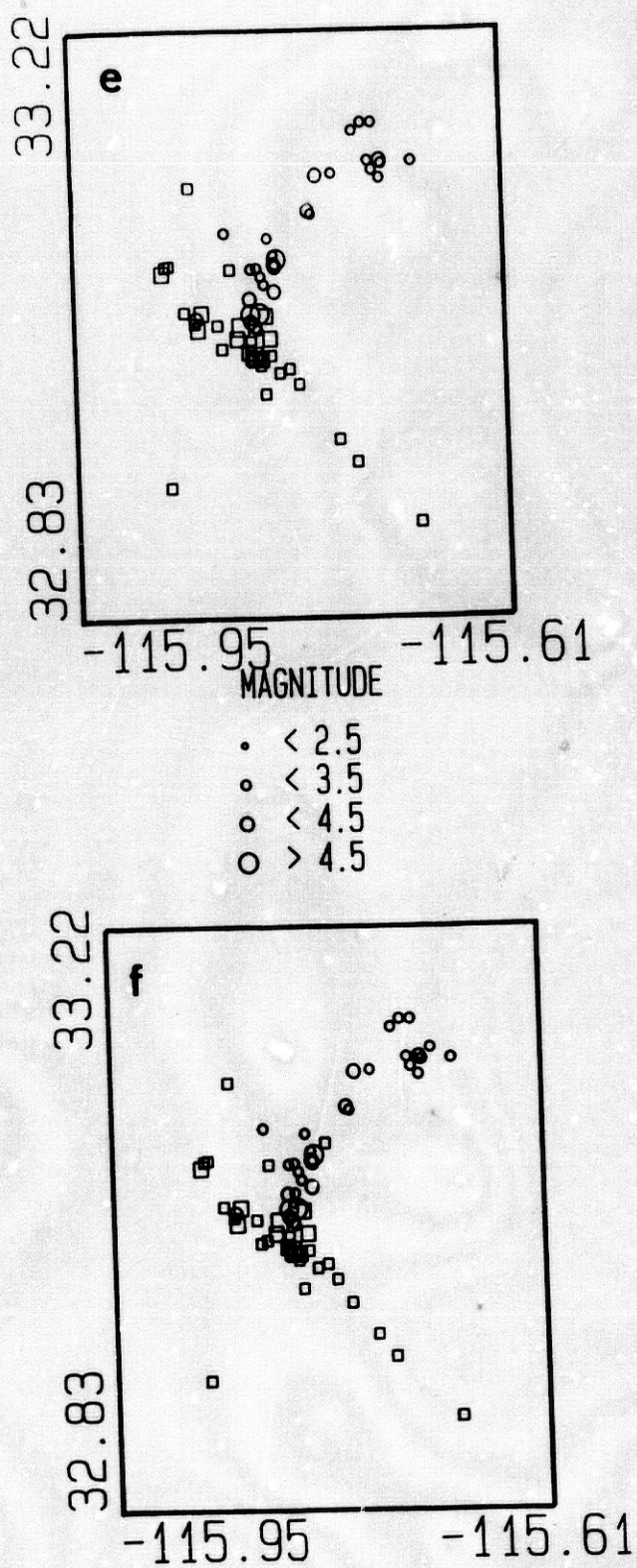


Fig. 7.2 ... segundo evento principal. Obsérvese que la mayoría de los cuadrados tuvieron lugar sobre la falla de Superstition Hills. Es de destacar también la figura 7.2b, en la que se han numerado los sismos según su ocurrencia temporal; esta figura muestra claramente el proceso de ruptura seguido.

Aplicación de los métodos

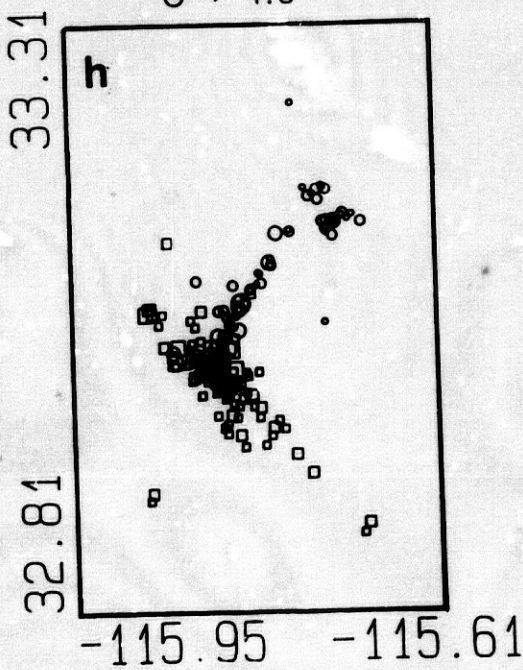
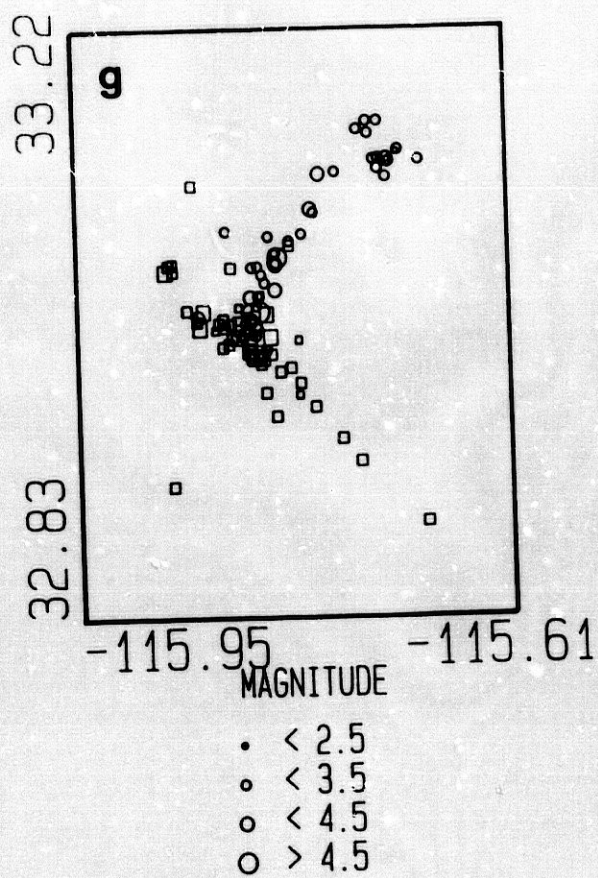


Fig. 7.2 ... continuación.

principales de la serie, el de las 01:53 (el A), y el de las 13:16 (el B). La evolución temporal de la ruptura puede verse en la figura 7.2b en la que sólo se tienen en cuenta a los sismos de magnitud superior a 4.5; las siguientes, 2c, 2d, etc... muestran la distribución de réplicas con distinta magnitud umbral, permitiendo interpretar mejor las características de la fracturación. A partir de la figura 7.2d (que corresponde a los sismos con una magnitud superior a 3.5) y las siguientes, el sistema de fallas queda definido y puede usarse como magnitud umbral,  $m_u$ , valores inferiores a 3.5. En nuestro estudio se ha tomado  $m_u = 2.5$ .

Los errores en la localización de los datos proporcionados por el Seismological Laboratory del California Institute of Technology oscilan entre  $\pm 1$  y  $\pm 2$  km; las dimensiones del paralelepípedo en el que pueden contenerse toda la distribución de eventos son  $40 \times 40 \times 10$  km; esto quiere decir que el error relativo de los datos es aproximadamente 1.75%. Con este valor, y teniendo en cuenta los resultados y las gráficas relativos a la fiabilidad de los métodos obtenidos en el capítulo anterior, podemos afirmar que para este margen de error los resultados que obtengamos son correctos.

## II.2. Aplicación del método ACPE.

La aplicación del método ACPE a los datos de Superstition Hills comienza por la deducción de una distancia característica entre eventos; esta interdistancia nos permitirá la construcción de elipsoides capaces de caracterizar espacialmente la distribución de sismos.

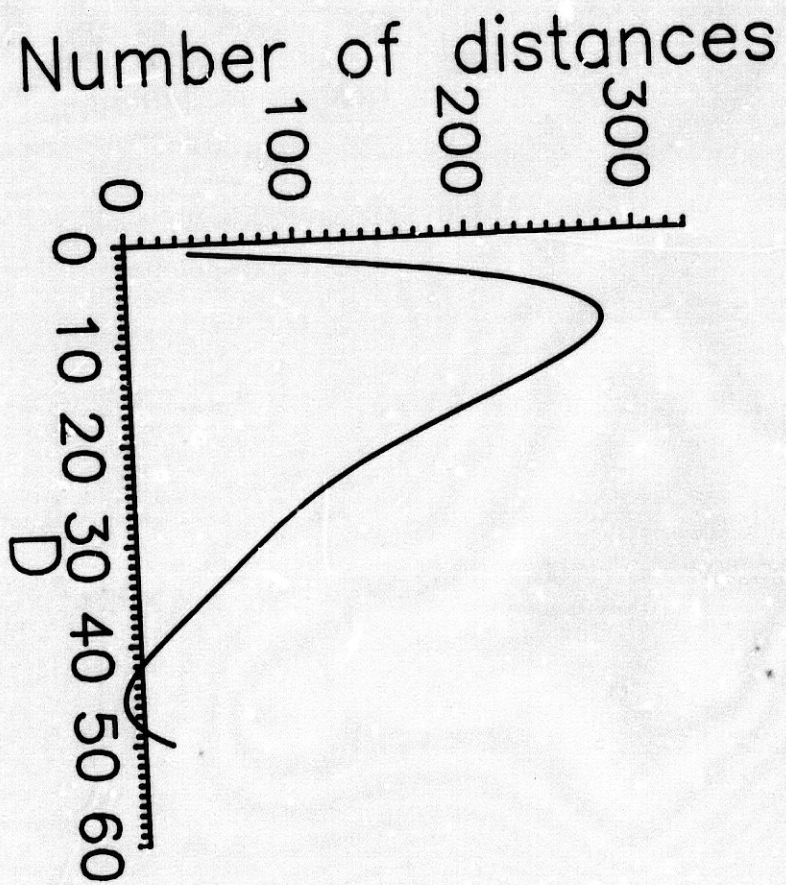
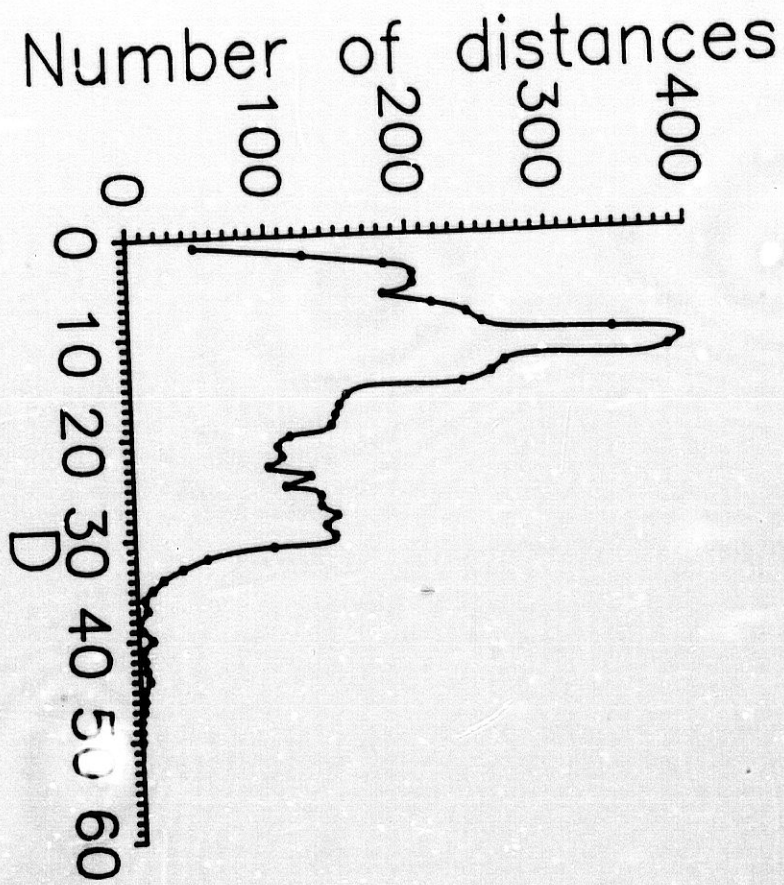
La figura 7.3 muestra una gráfica en la que se ha representado el número de distancias entre eventos frente al valor de la distancia. En las distribuciones sintéticas

### *Aplicación de los métodos*

de sismos, anteriormente estudiadas, habíamos establecido que la interdistancia  $D$  óptima podría venir dada por los valores de  $D$  inmediatamente anteriores al punto de inflexión de la curva. En aquel caso, el comportamiento de la curva era mucho más simple que en este caso real; en la curva de la figura 7.3 no puede establecerse sin ambigüedad este punto de inflexión. Para resolver este problema se hace un ajuste de los datos con lo que se obtiene la curva de la figura 7.4; el punto de inflexión estaría situado en  $D = 20$  km, aproximadamente, y se tomarían valores de  $D$  un poco menores.

La serie de figuras 7.5a...f muestran el valor del parámetro  $F$  frente al acimut y el buzamiento. Como puede observarse, para valores de  $D$  comprendidos entre 20 y 15 km los resultados dan una única solución; esta puede verse en la figura 7.6. El plano obtenido como resultado, N 10-20 W, es el promedio de las dos tendencias; si se analiza la figura 7.1 puede afirmarse que este resultado se debe a que los elipsoides que se forman sobre la falla de Superstition Hills, para una distancia de 15 km o superior, "pesan" más que los de la fractura de Elmore Ranch; esto se debe a que contienen muchos más sismos y por tanto el pesado otorga una mayor importancia a estas ventanas. La característica particular de la gran concentración de eventos en la unión de las dos fallas está dando como resultado que los planos asociados a los sismos próximos a esta intersección sean los que más "pesen". Por ello, se está obteniendo un resultado promediado.

Una forma de solucionar este problema consiste en hacer la distancia  $D$  más pequeña; si se observa la figura 7.1 y se quiere evitar este efecto promedio (tan acusado en este caso por la concentración de eventos en la unión de las dos fallas), habrá de tomarse como distancia  $D$  para la construcción de los elipsoides aquella que permita la formación de subconjuntos que contengan el mismo número de terremotos dentro de la intersección como fuera. La figura 7.3 muestra que la mayoría de los sismos



Figs. 7.3 y 7.4.

En la gráfica de la izquierda se ha representado el número de distancias entre eventos versus el valor de la distancia. Esta gráfica nos informa de qué distancia entre eventos es la que más veces se repite y por tanto, podría elegirse esta como valor para la ventana espacial en la aplicación del método ACEP. A la derecha (fig. 7.4), un ajuste de los puntos que se presentan en la gráfica de la izquierda.



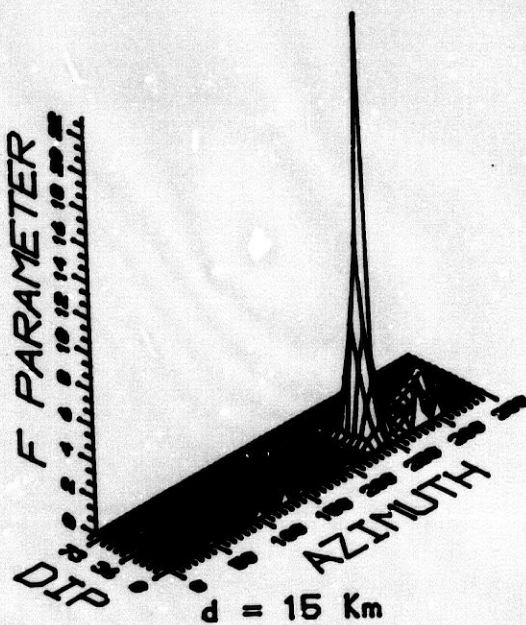
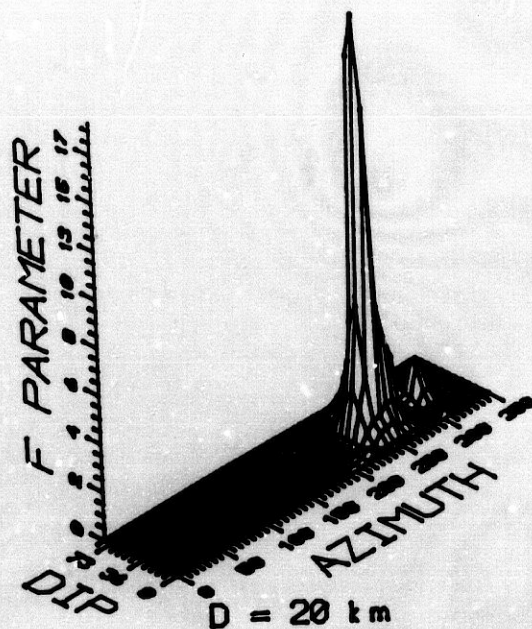


Fig. 7.5. En esta serie de figuras se representa el buzamiento y el acimut de los polos de los planos versus el parámetro F. Mediante estas gráficas podemos encontrar las orientaciones más importantes en la muestra analizada. Las distintas gráficas tridimensionales se han construido para distintos valores de la ventana espacial, comenzando por  $D = 20 \text{ km}$  y finalizando con  $D = 5 \text{ km}$ . Obsérvese que hasta  $D = 15 \text{ km}$  sólo es posible detectar una única tendencia. Para valores más bajos de  $D$  se comienzan a establecer distintas orientaciones, como puede verse por la multitud de picos que van apareciendo. En la serie de Superstition Hills, por sus especiales características, se ha elegido  $D = 5 \text{ km}$ . Para este valor de la ventana espacial existen dos picos que destacan sobre los demás. Estas orientaciones se han proyectado en una figura posterior.

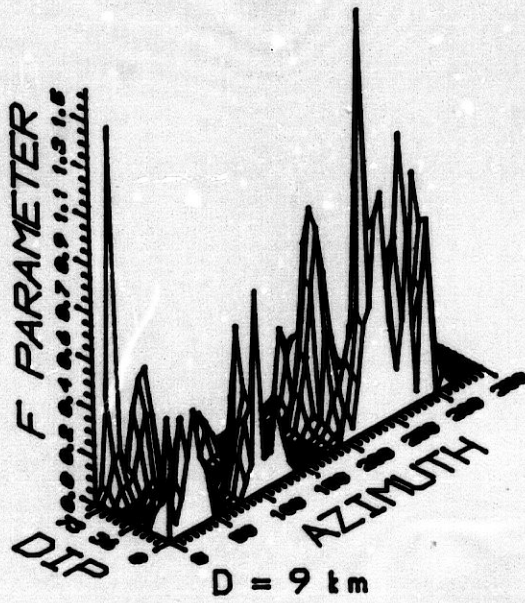
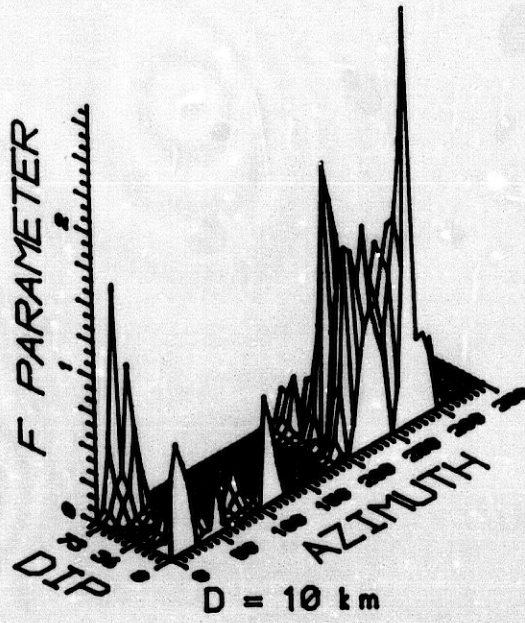


Fig. 7.5 ... continuación.

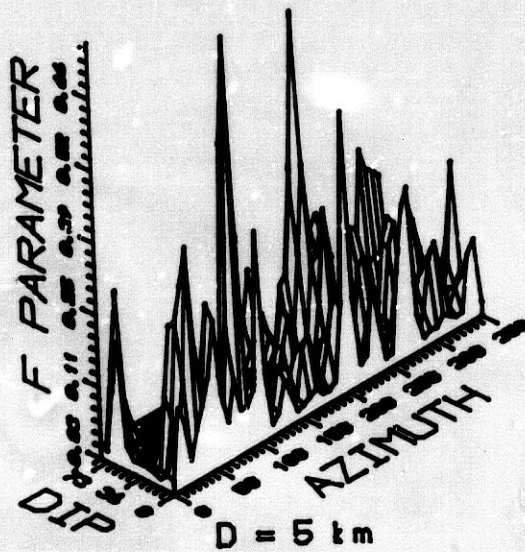
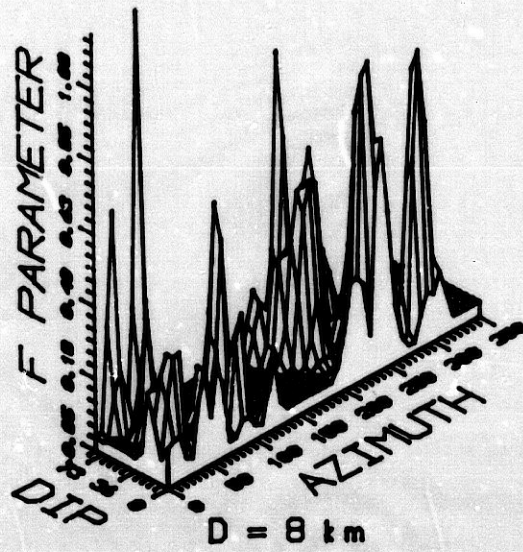
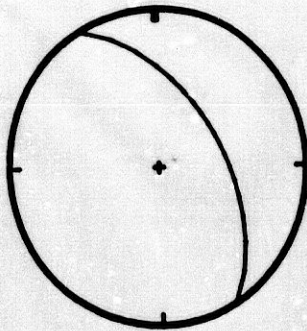
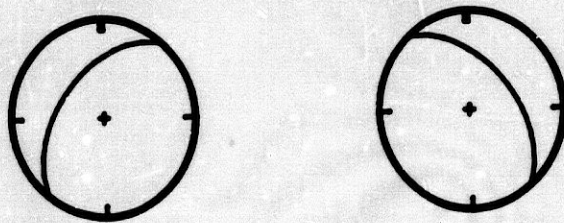


Fig. 7.5 ... continuación.



**Fig. 7.6** *Orientación determinada a partir de ventanas espaciales  $D$  mayores de 15 km. El resultado es el promedio de toda la muestra. Esto se debe a que la mayoría de la actividad sísmica está concentrada en la intersección de las fallas de Superstition Hills y de Elmore Ranch. La solución es tomar  $D$  menores que 9 o 10 km, que es el valor de la interdistancia característica de esta muestra de eventos.*



**Fig. 7.7** *Orientaciones más importantes para un valor de la ventana espacial  $D = 5$  km; con este valor si se consigue caracterizar las dos tendencias existentes en la secuencia de terremotos. Los planos son N 40 E buzando al NW y N 40 W buzando al NE; cada uno de estos planos estaría asociado a una de las fallas activadas en la secuencia de terremotos, la de Elmore Ranch y la de Superstition Hills.*

### *Aplicación de los métodos*

quedarían dentro de una esfera con centro en cualquiera de ellos y radio 10 km. Esto significa que debemos de tomar una interdistancia menor. Si se elige  $D = 5$  km (fig. 7.5f) pueden distinguirse muchos picos, pero hay dos que tienen una mayor importancia relativa que los otros. Los planos correspondientes a estos picos se han dibujado en la figura 7.7. Obsérvese que para estos planos el azimut y buzamiento coinciden de forma aproximada con los que cabía esperar a la vista de la distribución de réplicas.

Por tanto, si se elige como distancia adecuada para esta serie 5 km, podemos concluir que los planos que se determinan son dos: uno N 40 W buzando 65 grados al NE (que correspondería a la falla de Superstition Hills) y otro N 35-40 E buzando 65 grados al NW (correspondiente a la falla de Elmore Ranch).

### **II.3. Aplicación del método ACPT.**

La aplicación de este método comienza con la determinación de la ventana óptima de sismos. Para ello se construye la función  $Q(N, K)$  definida en el capítulo segundo y cuyo comportamiento fue estudiado en el capítulo anterior. La forma de esta función para los sismos de Superstition Hills puede verse en la figura 7.8; el valor de la ventana óptima,  $K$ , se elegirá atendiendo al carácter de la distribución de eventos. Para ello se hace uso de la definición del parámetro  $I$  dado por la ecuación 6.1, y que se determina a partir del cociente entre el mayor y menor autovalor de toda muestra. En este caso, se ha obtenido un valor de  $I = 9.7$ ; esto quiere decir que el carácter de la distribución de sismos es planar suave, así que se tomará como valor óptimo de  $K$  aquel a partir del cual la función  $Q(N, K)$  se hace constante; por tanto,  $K = 35$ .

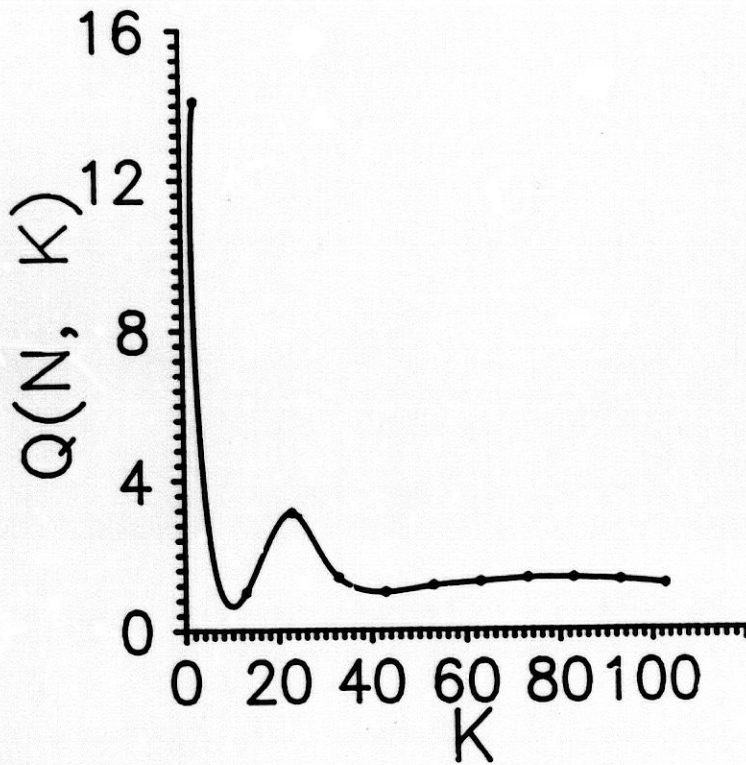
La elección de  $K$  determina la mayor o menor dispersión de los autovectores que se obtengan; en la figura 7.9 se muestran las distintas proyecciones estereográficas de

los autovectores menores (triángulos) y los mayores (cruces) para distintos valores de K. Como se puede apreciar, a menor K la dispersión de autovectores es mayor y viceversa; para  $K = 35$  se tienen algunas agrupaciones nítidas pero siempre queda la posibilidad de formación de planos subsidiarios. Esto no es posible, por ejemplo, para K superiores a 50 eventos, donde ya se promedia toda la muestra.

Para este valor de K ( $K = 35$ ) se ha analizado la evolución temporal del proceso de ruptura. Los planos más relevantes se presentan, secuencialmente, en la tabla 7.1, y se han representado con una proyección de Schmidt en la figura 7.10. Los planos representan el avance de la ruptura; estos están ordenados de izquierda a derecha y de arriba abajo.

La interpretación del proceso de ruptura según estos resultados es la siguiente; en primer lugar, hay una ruptura N 35-45 E que se manifiesta claramente en la proyección número 4 puesto que agrupa a 17 planos sucesivos en el tiempo. Esta tendencia se refleja asimismo en los planos que le preceden (proyecciones 1 y 3). El buzamiento característico es de unos 70 grados hacia el SE. El avance de la fracturación continua con planos de mucha menor relevancia, lo cual indica que pueden deberse a alineaciones propias de una intersección pero que no son significativas. Finalmente, el proceso finaliza con la formación de planos N 30-60 W que buzanan al SW con valores que oscilan en torno a los 45 grados.

Como puede observarse, la reconstrucción del proceso de ruptura ha sido en general correcta, aunque existen discrepancias en cuanto a la obtención del buzamiento. Este parámetro, como ya se ha apuntado en el capítulo anterior va a ser casi siempre más difícil de obtener con precisión.



**Fig. 7.8** En la figura se muestra la curva que representa la función  $Q(N, K)$  para la serie de Superstition Hills (1987); obsérvese que esta función comienza a hacerse constante para valores de  $K$  en torno a 35 o 40 sismos. Por tanto, se tomará este como valor óptimo de la ventana móvil de sismos.

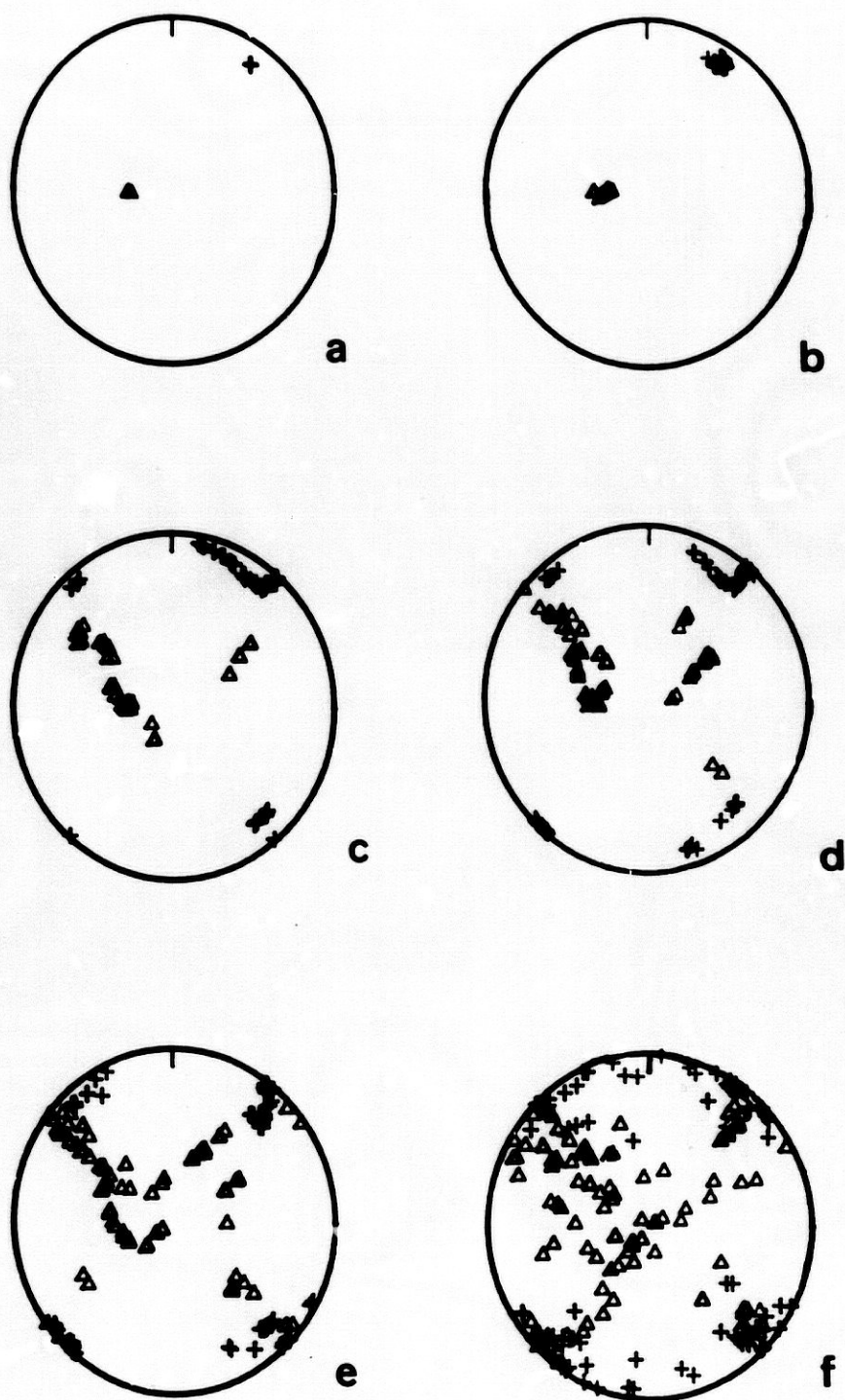


Fig. 7.9 Proyecciones para distintos valores de la ventana móvil de sismos,  $K$ , de los autovectores menores (triángulos) y los mayores (cruces). La proyección (a) corresponde a  $K = 100$ , la (b) para  $K = 50$ , la (c) para  $K = 40$ , la (d) para  $K = 35$ , la (e) para  $K = 20$  y la (f) para  $K = 5$  sismos. Obsérvese que a medida que  $K$  disminuye, la dispersión de los autovalores aumenta. En el caso de los terremotos de Superstition Hills y con la ayuda de la función  $Q(N, K)$  se ha elegido  $K = 35$ .



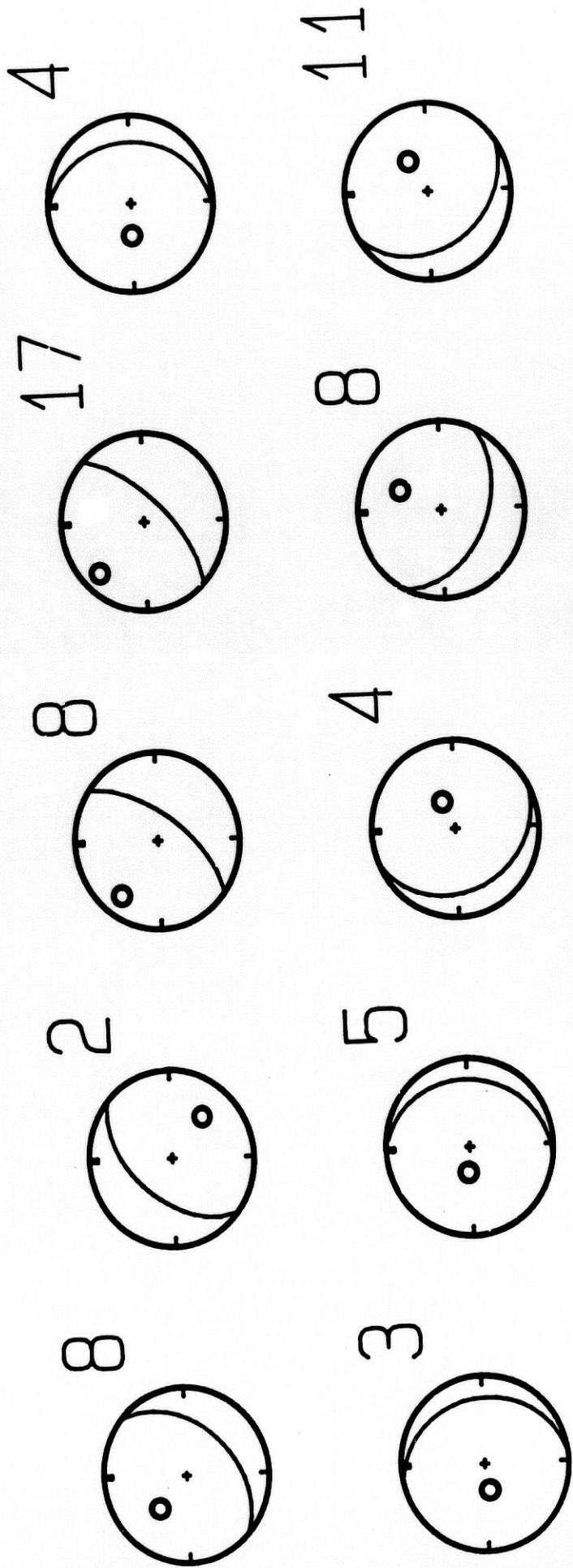
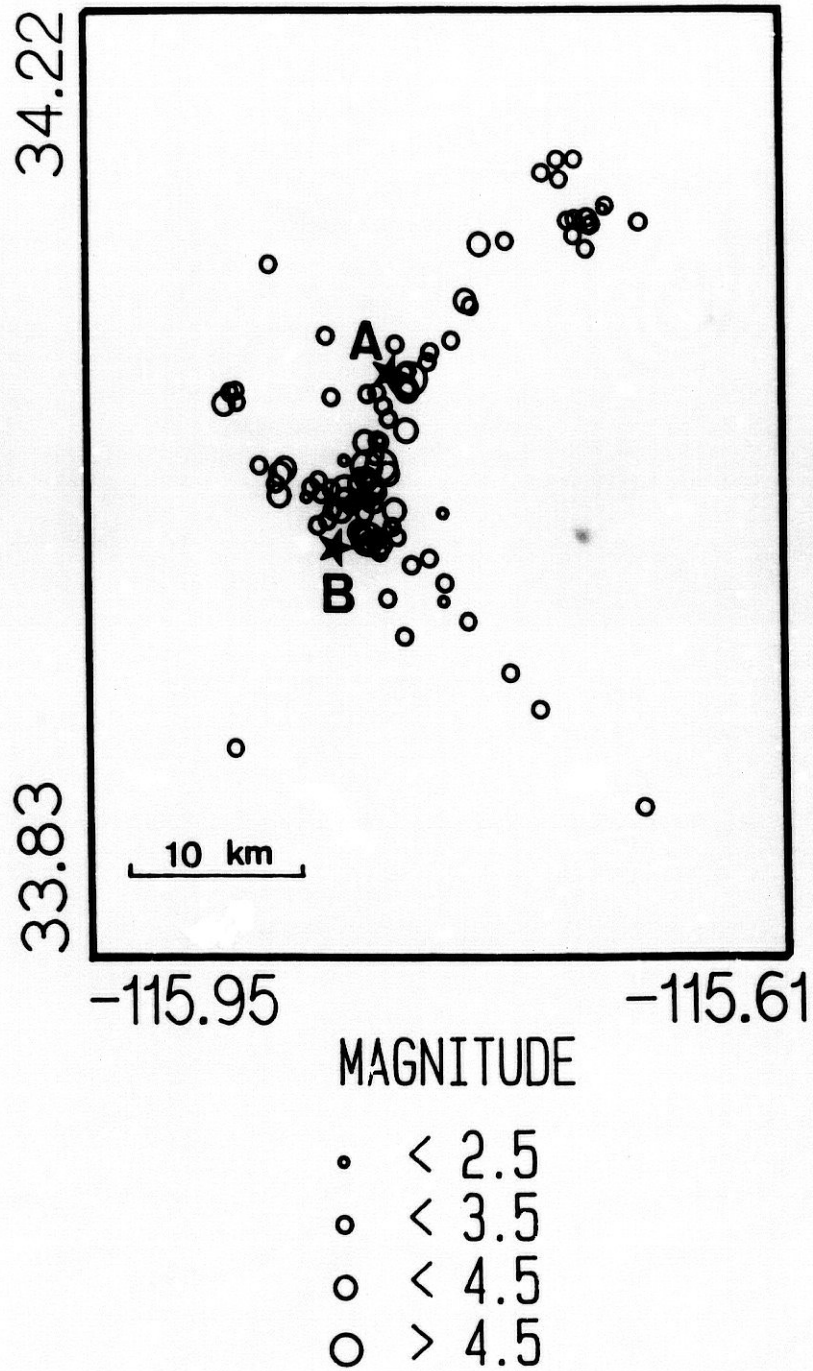


Fig. 7.10 Evolución temporal del proceso de ruptura modelado a partir del análisis ACPT. Las proyecciones son secuenciales en el tiempo y están ordenadas de izquierda a derecha y de la fila superior a la inferior. El número de la esquina superior derecha que acompaña a cada proyección indica con cuántos planos individuales se ha construido; por tanto, informa de la importancia relativa del elipsoide en cuestión. La interpretación de esta figura es la siguiente: la ruptura comienza con planos N 45 E buzando 75 grados al SE (planos 1, 3 y 4), continúa con alineaciones menos relevantes (planos 5 al 8) y finaliza con una tendencia N 30-60 W buzando al SW (planos 9 y 10).



**Fig. 7.11** *Los principales elipsoides encontrados mediante el método ACPT tienen una localización espacial y unas dimensiones que pueden determinarse. Los planos 4 y 10 de la figura 7.10 se han situado sobre la distribución de réplicas en esta figura (notados por estrellas). Las dimensiones de estos elipsoides son para el elipsoide A de 10 km para el semieje mayor y de 3 km para el semieje menor; para elipsoide B las dimensiones son de 8 y 3 km.*

Aplicación de los métodos

Nombre	Buz	Azm	NV	Long	Lat	Prof
Hill11	48	313	8	-115.758	33.108	9.5
Hill12	39	130	2	-115.757	33.102	9.7
Hill13	24	307	8	-115.757	33.098	9.8
Hill14	21	315	17	-115.792	33.066	7.6
Hill15	60	271	4	-115.808	33.025	6.2
Hill16	65	262	3	-115.811	33.015	5.5
Hill17	66	276	5	-115.816	33.009	4.8
Hill18	62	65	4	-115.834	32.999	3.5
Hill19	45	26	8	-115.838	32.993	3.5
Hill110	56	58	11	-115.840	32.999	3.4

*Tabla VII-1. Datos de los planos encontrados para caracterizar la evolución espacio-temporal de la ruptura en la secuencia de terremotos de Superstition Hills. La columna NV indica el número de planos individuales sucesivos temporalmente con los que se ha construido el plano promedio en cuestión. El resto de las columnas son el buzamiento y acimut del polo del plano y la localización espacial (longitud, latitud y profundidad) del elipsoide considerado.*

Td	Buz	Azm	MaxC
1	17	122	53
2	87	142	3
3	42	207	22
4	2	212	32
5	32	212	25
6	32	217	19
7	42	217	30
8	22	222	14
9	27	222	20
10	17	227	17
11	22	227	48
12	27	227	20
13	37	227	21
14	52	227	27
15	82	227	13
16	32	232	27
17	42	257	15
18	7	307	28
19	17	307	22
20	27	307	18
21	17	322	31

*Tabla VII-2. Con el método MTP se han determinado 21 tendencias predominantes para la secuencia de terremotos de Superstition Hills. En la tabla se presenta el buzamiento y el acimut asociado a cada tendencia así como la máxima contribución de un sismo a la formación de dicha tendencia (columna MaxC).*

Los planos 4 y 10, que aglutinan el mayor número de elipsoides individuales, son los que caracterizan la ocurrencia temporal de la fracturación. La localización espacial de estos elipsoides puede verse en la figura 7.11. Las dimensiones del primer elipsoide, deducida de los autovalores obtenidos, es aproximadamente de unos 10 km de largo por unos 3 km de espesor, mientras que el segundo tiene una longitud de unos 8 km y un espesor de 3 km. Es notable también la variación de profundidad de ambos elipsoides (Tabla 7.1) y, en general, la de todos los obtenidos (Tabla 7.1), que sugiere que la ruptura avanzó espacialmente hacia la superficie. Esto explicaría por qué el buzamiento de los últimos elipsoides es menos acusado de lo que cabía esperar, ya que nos hace sospechar que cuando los sismos son superficiales, los elipsoides tienen que ajustarse de tal forma que el buzamiento se hace más pequeño, es decir, estarían siendo afectados, en alguna proporción, de un efecto de forma (Lutz, 1986).

#### II.4. Aplicación del método MTP.

Lo primero que ha de hacerse para aplicar este método es corregir del efecto de forma; como ya se ha dicho esto puede hacerse utilizando conjuntos de sismos aleatorios en la misma región en donde han ocurrido los eventos con la única condición de que presenten una misma distribución en longitud, latitud y profundidad que la muestra real. Las distribuciones aleatorias deben de ser, no obstante, estadísticamente diferentes de la real; para comprobarlo se aplica un test chi-cuadrado y se ha obtenido que  $\chi^2$  asegura esta diferencia con un nivel de confianza del 99 %.

Las simulaciones de datos y los datos reales se utilizan entonces para encontrar las orientaciones preferidas corregidas del efecto de forma. Estas orientaciones son las que verifican la ecuación 4-15 y para el caso de Superstition Hills son las que se presentan en la tabla 7.2; una mejor visualización se tiene en la figura 7.12. Con esta

### *Aplicación de los métodos*

serie de terremotos existen 21 tendencias significativas de las cuales destacan la 1 y la 11. Otras orientaciones preferidas son la 4, la 7 y la 21.

La figura 7.13 muestra las orientaciones más importantes encontradas con el MTP. Obsérvese que las orientaciones 1 y 11 coinciden con las que cabría esperar a la vista de la distribución de sismos. La tendencia 4 y la 21 son redundantes aunque difieren ligeramente en los valores de buzamiento; la tendencia número 7 es redundante en el acimut con la 11 y la 4, pero se aparta ligeramente en el valor del buzamiento. Las tendencias dominantes, la 1 y la 11, serán utilizadas para detectar el Límite de Sismos ( $L_s$ ) e identificar los terremotos de cada uno de los planos hallados.

La figura 7.14 muestra la gráfica de contribución de cada sismo a la formación del plano (el 1 o el 11); como puede apreciarse, en este caso ambas contribuciones son muy similares no siendo posible separar una de la otra; esto indica que deben tomarse las dos, es decir, que ambas son igualmente relevantes.

La figura 7.15 y la 7.16 muestran los sismos asociados a cada una de las orientaciones encontradas anteriormente. A la vista de estos mapas de localización hipocentral queda claro que la tendencia 11 está asociada a la falla de Superstition Hills y la 1 a la de Elmore Ranch.

### **II.5. Discusión.**

La aplicación de los tres métodos a la serie de terremotos de Superstition Hills confirma la existencia de dos tendencias: una N 30-40 E y otra N 45 W. La primera de ellas está asociada a la falla de Elmore Ranch y la segunda a la de Superstition Hills. Los acimutes concuerdan de forma clara en los tres métodos aplicados mientras que los

# Detección de tendencias

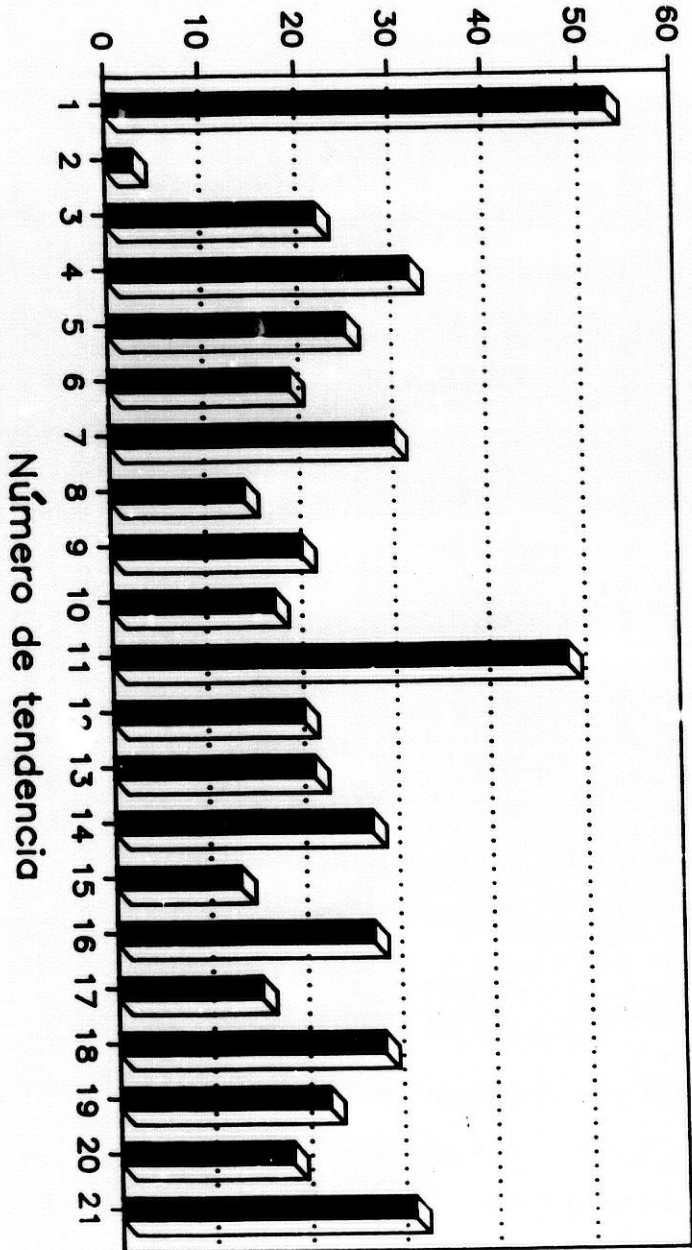
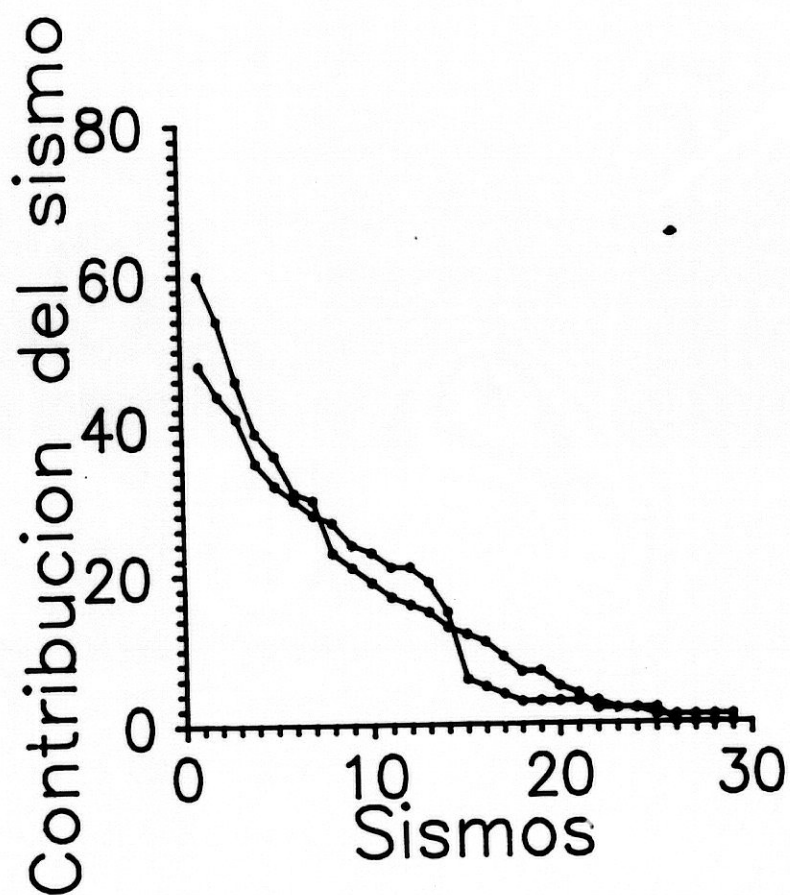
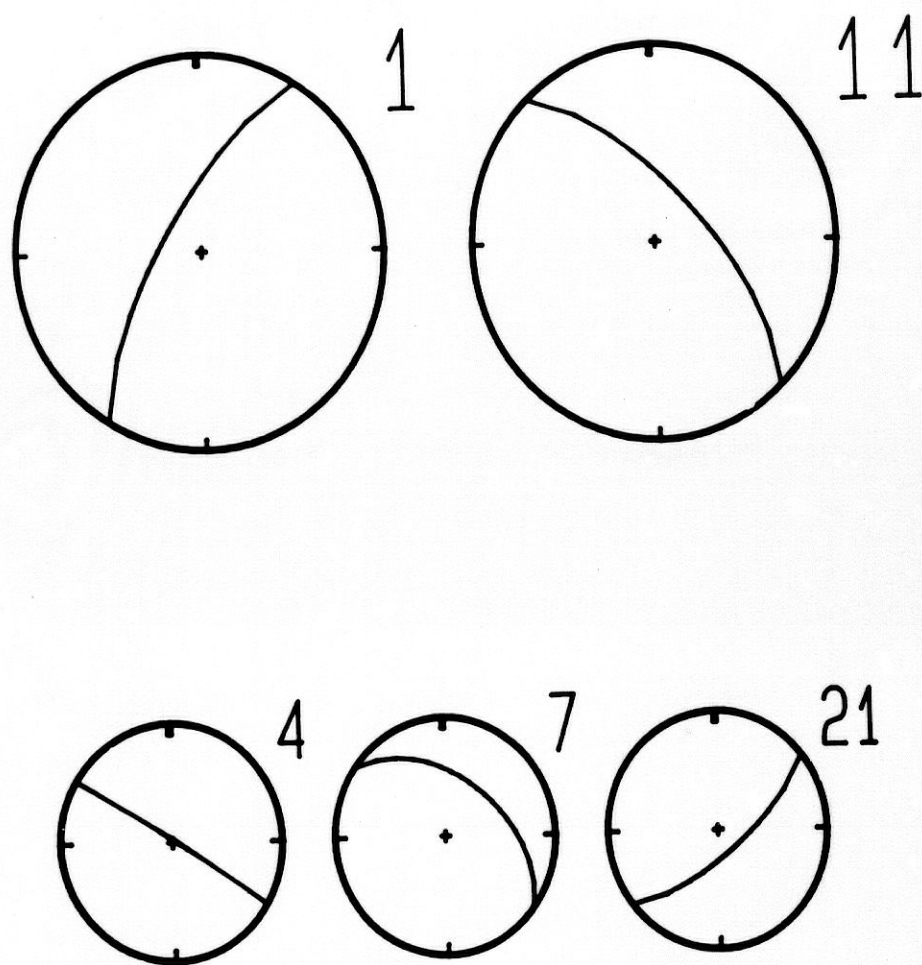


Fig. 7.12

Para una mejor visualización de las tendencias más significativas se construye el siguiente histograma. Para cada tendencia se determina cuantas veces contribuye cada sismo a la formación del plano característico de dicha tendencia; estos datos se ordenan de mayor a menor y se toma el primero (es decir, el sismo que más veces ha contribuido a la formación de esa tendencia) como indicativo de la misma. El histograma de la figura representa el número de veces que ha contribuido dicho sismo a la formación del plano frente a la tendencia considerada. Como puede verse, el primer sismo de la tendencia número 1 ha formado parte de una tendencia más destacada y por tanto la tendencia más significativa.



**Fig. 7.13** *En esta figura se representan los planos característicos de las tendencias más importantes detectadas en la serie de Superstition Hills. El número que acompaña a cada proyección es el número de tendencia. Las dos proyecciones superiores son las más significativas, mientras que las inferiores son menos importantes. No obstante, éstas son en gran medida redundantes con las primeras.*



**Fig. 7.14** Las tendencias 1 y 11 encontradas con el método MTP para la serie de terremotos de Superstition Hills son las más significativas. Por ello, se ha intentado establecer el Límite de Sismos ( $L_s$ ) para ambas pero el resultado se presentan en esta gráfica. Como puede verse, las dos tendencias son igualmente relevantes, por lo que se tomarán todos los sismos de ambas para la localización espacial de la falla.



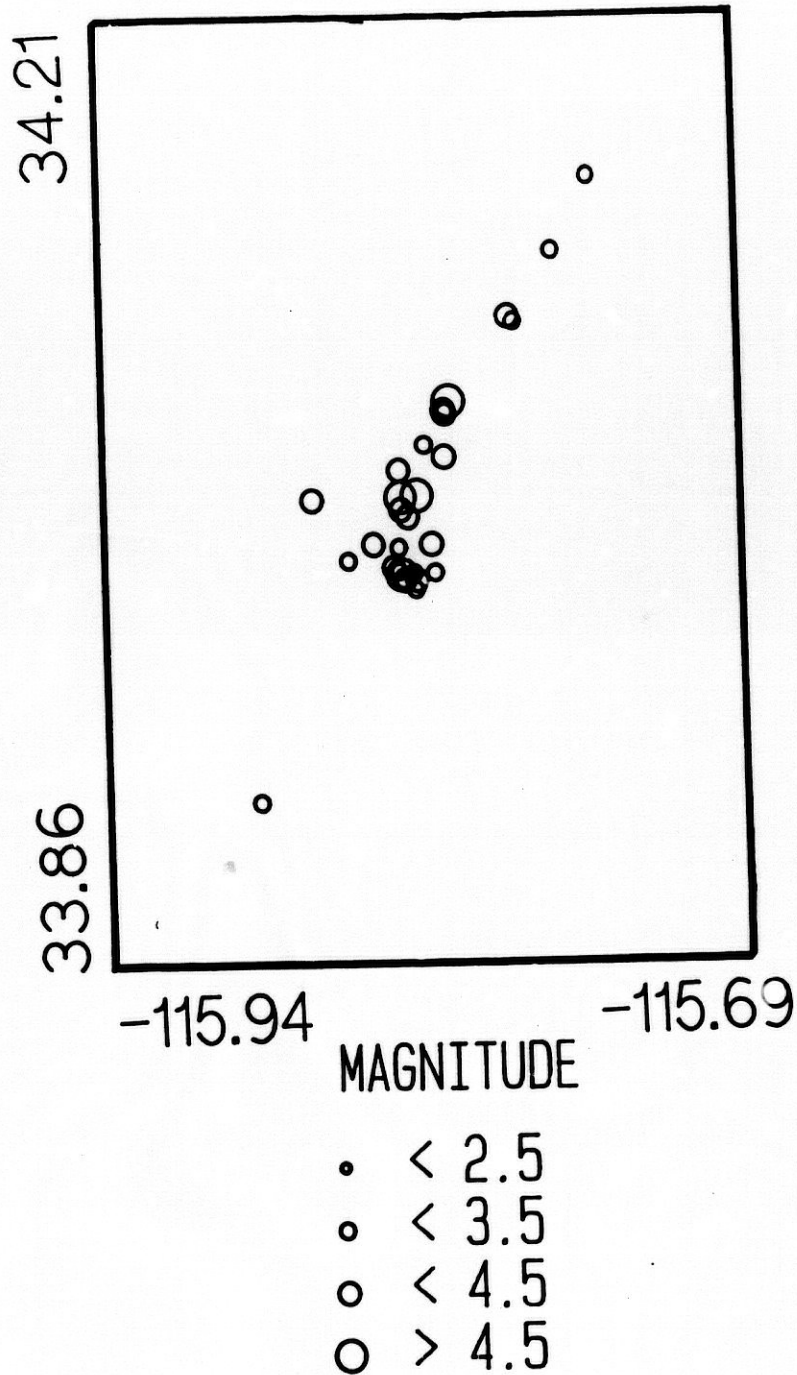


Fig. 7.15 Sismos asociados a la tendencia número 1 encontrados con el MTP. Estos sismos son los asociados a la falla de Elmore Ranch.

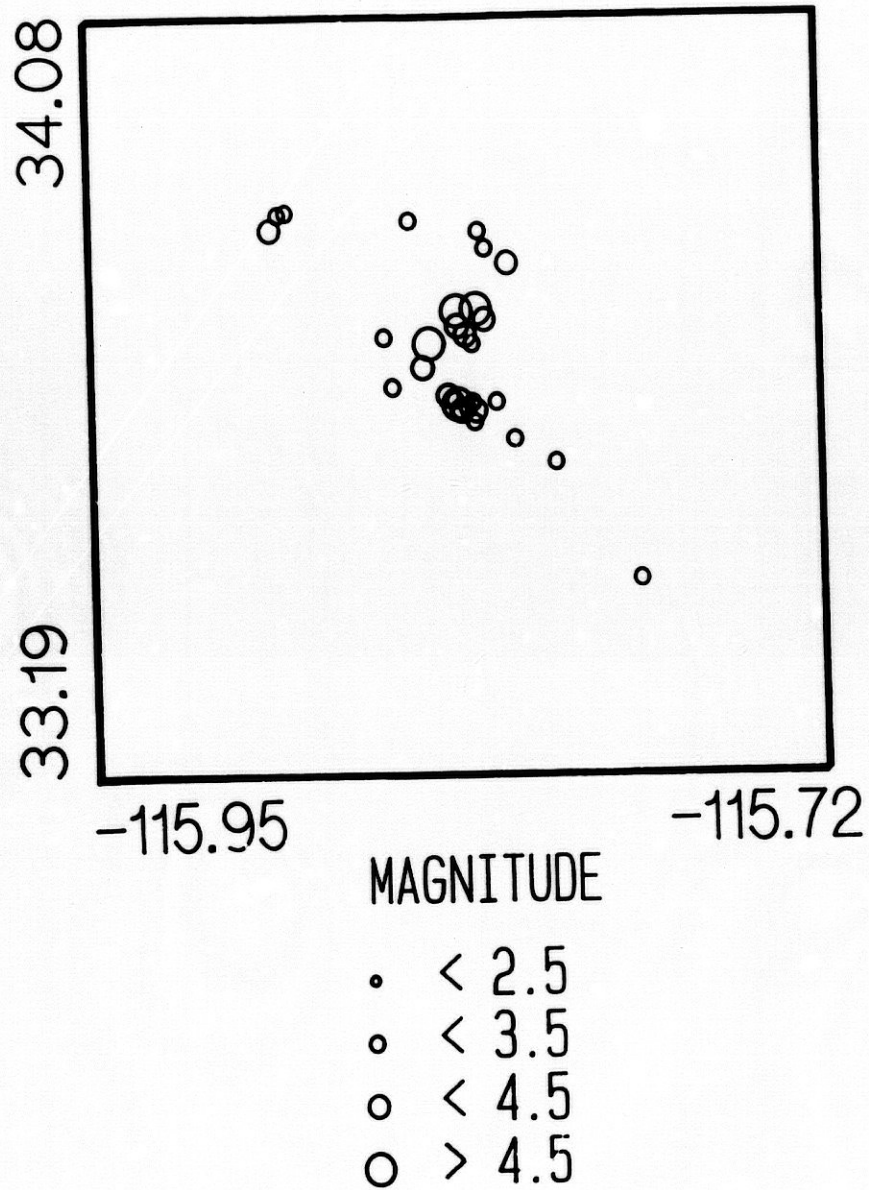


Fig. 7.16 *Sismos asociados a la tendencia número 11 encontrados con el MTP. Estos sismos son los asociados a la falla de Superstition Hills.*

### *Aplicación de los métodos*

buzamientos difieren ligeramente al aplicar una u otra técnica. Los tests y análisis de errores analizados en el capítulo anterior demostraron que la mayor fiabilidad en la obtención del buzamiento era la del método MTP; en este caso los buzamientos obtenidos han sido muy verticales: en ambos casos 73 grados.

El estudio de la evolución temporal de la fractura ha sido bastante claro, encontrando una primera orientación que se ajusta óptimamente a la falla de Elmore Ranch y pasando después a desarrollarse en una dirección que corresponde a la falla de Superstition Hills. El análisis de esta evolución revela además la localización espacial y las dimensiones de los distintos elipsoides, pudiéndose comprobar así que la fractura parece tender hacia la superficie.

La serie de terremotos de Superstition Hills es una secuencia muy bien estudiada, con una buena localización hipocentral de los sismos que la constituyen y con una evolución en el tiempo muy bien definida que perfila dos fallas cruzadas; esta secuencia ha permitido probar la capacidad del método para detectar orientaciones y sobre todo, su habilidad para informarnos de la evolución en el tiempo.

### **III. LOS TERREMOTOS DE LOJA (1985) EN GRANADA.**

#### **III.1. Descripción de la serie sísmica.**

Durante todo el año 1985 se produjo una alta actividad sísmica de microterremotos en diversos segmentos de la parte occidental de la Depresión de Granada. Esta actividad está relacionada con sistemas de fallas de dirección N40-55W, afectando a áreas de la región de la Axarquía de Málaga, Oeste de Sierra Gorda y la región de Montilla en Córdoba (Vidal, 1986).

El sector de Sierra Loja tuvo su actividad más relevante durante el mes de Febrero de 1985 con el enjambre sísmico de Loja. La máxima magnitud de los sismos del enjambre fue de 3.9, e intensidad VI en la escala MSK. Los mayores sismos de la serie definieron un alineamiento en la dirección anteriormente indicada y su mecanismo conjunto confirmó dicho acimut (Vidal, 1986).

Los sistemas de fallas que cortan el macizo montañoso de Sierra Gorda y Sierra de Loja son de dirección N120-150E, N20-30E y N70-90E. El sistema N120-150E limita los bordes suroccidental y noroccidental con fracturas ya cartografiadas de más de 20 km de longitud (Vidal, 1986). Una fractura de esta dirección es la que sigue el principal lineamiento de actividad sísmica registrada en el enjambre de Loja, cortando el macizo y limitando en su contacto suroriental con la Cuenca de Granada (de Miguel et al, 1986).

Efectuando una estadística de acimutes de las direcciones formadas entre eventos consecutivos (de Miguel et al, 1986) se observa un máximo para la dirección del lineamiento principal anteriormente indicado, así como máximos secundarios para las direcciones de los otros lineamientos. Si separamos los sismos de mayor magnitud del enjambre observamos que se alinean según el sistema principal de fallas, por lo cual es de suponer que éste es el que esencialmente ha funcionado, produciendo una reordenación de los esfuerzos locales en la zona que han desencadenado actividad secundaria en los otros sistemas de fracturas.

En las figuras 7.16a-g puede verse un mapa epicentral de la actividad sísmica; obsérvese (fig. 7.16a,b, c) que para magnitudes umbrales altas ( $m_s \geq 2.8$ ) la tendencia

Aplicación de los métodos

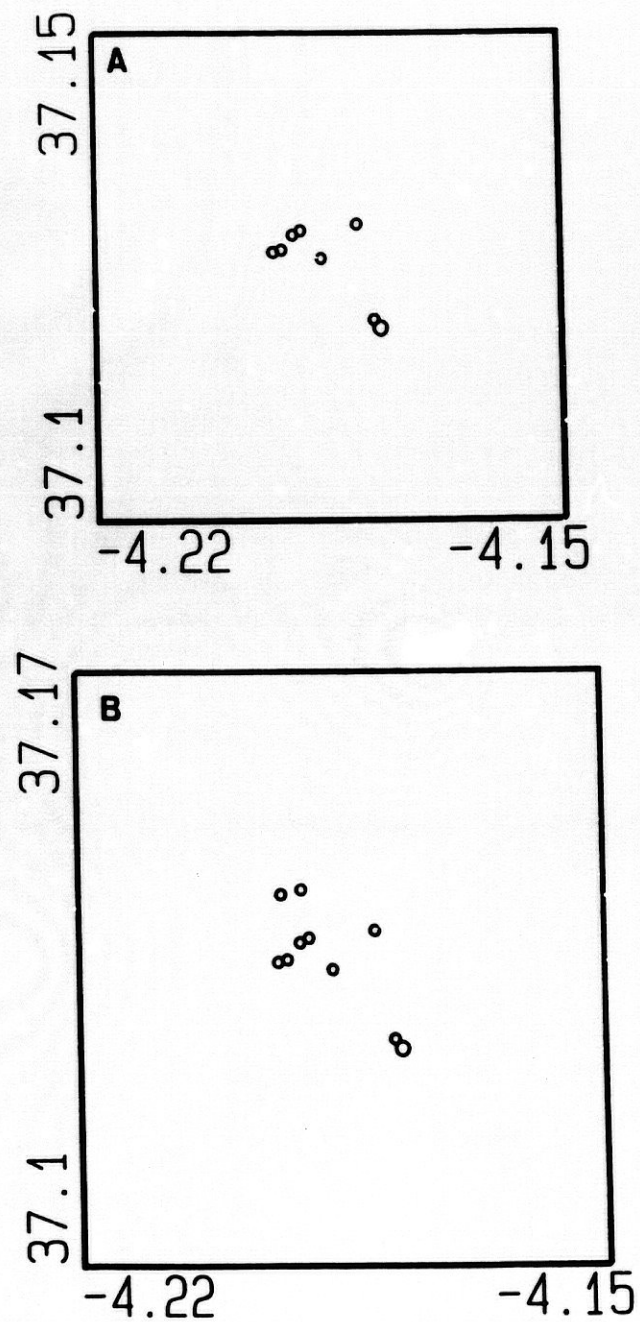


Fig. 7.16 En esta serie de figuras (desde la a hasta la g) se presentan la distribución epicentral de réplicas con distintas magnitudes umbrales para el enjambre de Loja; estas son, respectivamente,  $m_s = 3.5, 3, 2.8, 2.5, 2.3, 2.1, 2.0, 1.5$ . La tendencia que aparece de forma más clara, sobre todo en las figuras a, b y c es la N 45-60 W.

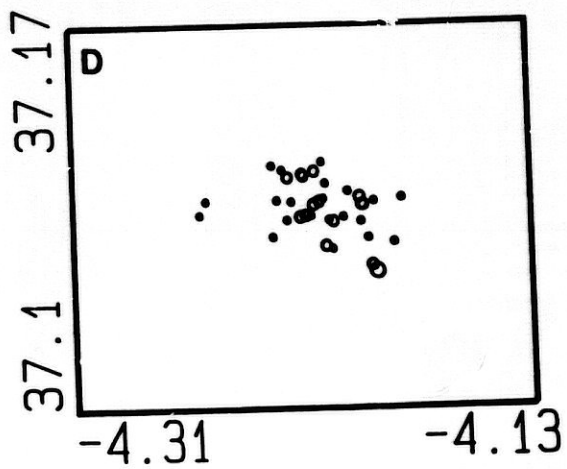
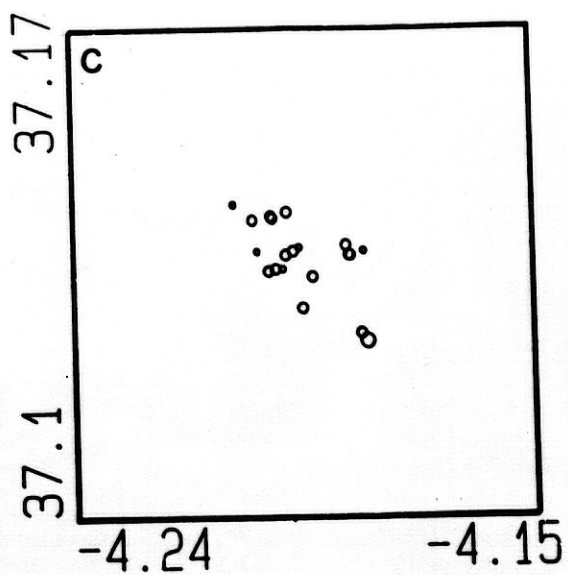


Fig. 7.16 ... continuación.

Aplicación de los métodos

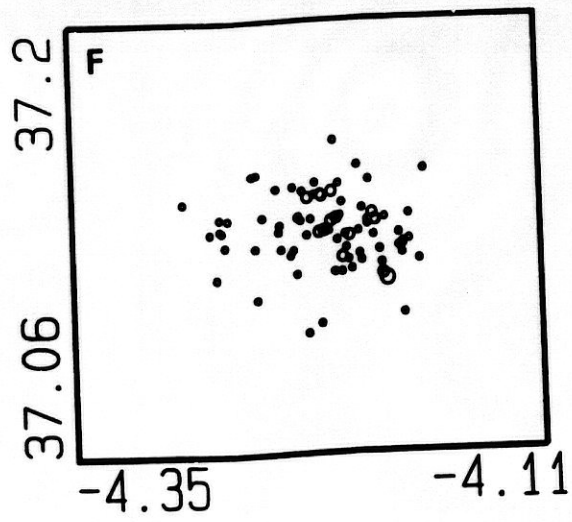
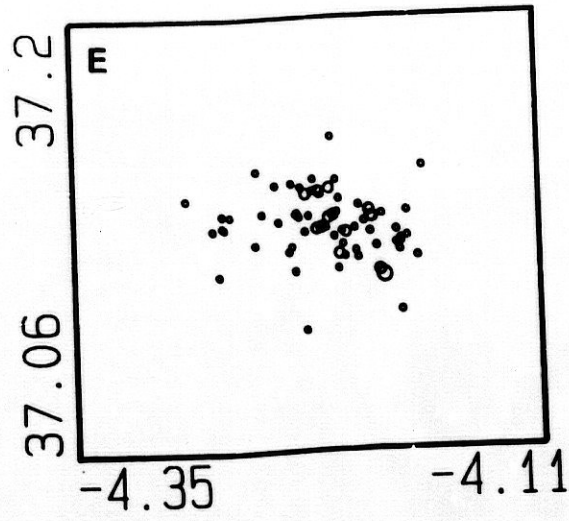


Fig. 7.16 ... continuación.

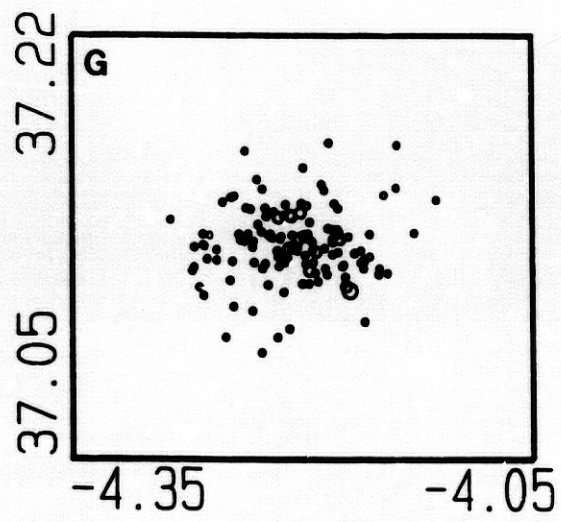


Fig. 7.16 ... continuación.



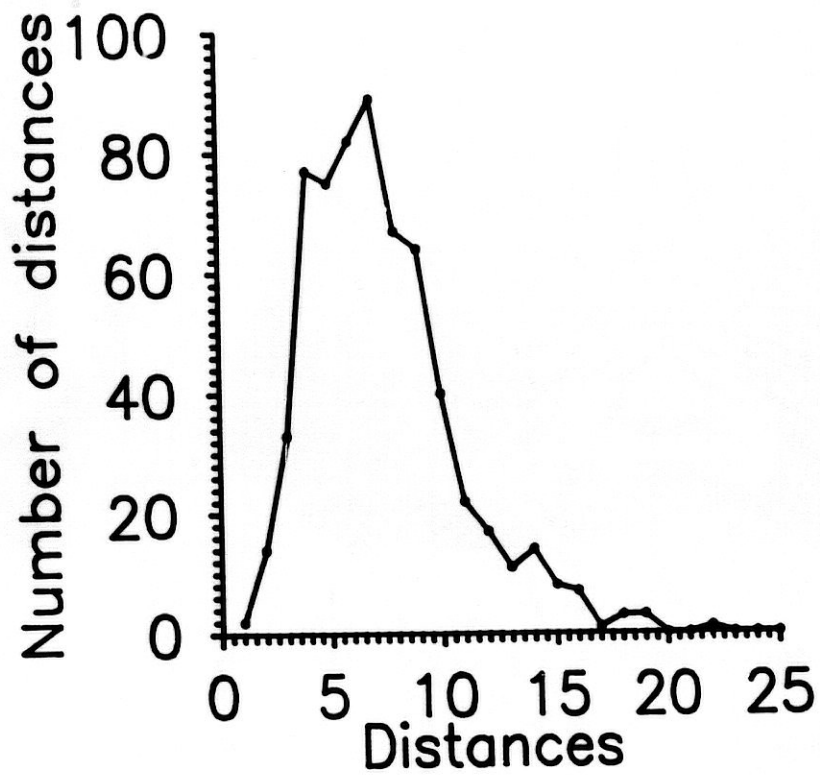
### *Aplicación de los métodos*

del lineamiento de sismos predominante es N 45 W, y a medida que la magnitud umbral se hace menor, aquella tiende a hacerse E-W. Esto se debe a la dispersión en las localizaciones de los sismos menores; toda esta microactividad puede enmascarar la tendencia principal en la falla que ocasiona los mayores sismos, pero a la vez informa de otras fracturas subsidiarias que se han ocasionado como consecuencia del nuevo estado de esfuerzos de la zona. Por ello es necesario elegir adecuadamente la magnitud umbral. En nuestro caso hemos tomado  $m_u = 2.0$  (fig. 7.16e), con lo cual el número de sismos analizados se eleva a 80.

El análisis de errores efectuado a las localizaciones del enjambre de Loja arroja los siguientes resultados. La media en los errores epicentrales son de 1.57 km para la longitud y de 1.41 km para la latitud. La media de error en la profundidad es de 11.58 km, muy superior al error en la longitud y la latitud. Teniendo en cuenta que el paralelepípedo que engloba toda la serie tiene de dimensiones 20 x 15 x 10 km, quiere decir que el error relativo a la máxima longitud del mismo se sitúa en torno al 5 % para la latitud y la longitud y alrededor del 40 % para la profundidad. Este error elevado en la estimación de la profundidad se debe a la gran concentración temporal en la ocurrencia de los sismos, lo cual hizo que la lectura de las fases en las bandas fuese muy difícil (los datos del IAGPDS para el año 85 eran aún analógicos). No obstante, el error en la localización epicentral ( $\approx 5 \%$ ) queda dentro de los márgenes de error aceptables tanto para el acimut (hasta el 10%) y no aceptables para el buzamiento (3 o 4 %) tal y como se ha visto en el capítulo anterior.

### **III.2. Aplicación del método ACPE.**

El análisis del número de distancias entre eventos frente al valor numérico de la distancia se ha representado en la figura 7.17. Como puede verse, el establecimiento



**Figs. 7.17.** *En la gráfica se ha representado el número de distancias entre eventos versus el valor de la distancia. Esta gráfica nos informa de qué distancia entre eventos es la que más veces se repite y por tanto, podría elegirse esta como valor para la ventana espacial en la aplicación del método ACPE. En nuestro caso se ha tomado  $D = 8$  km.*

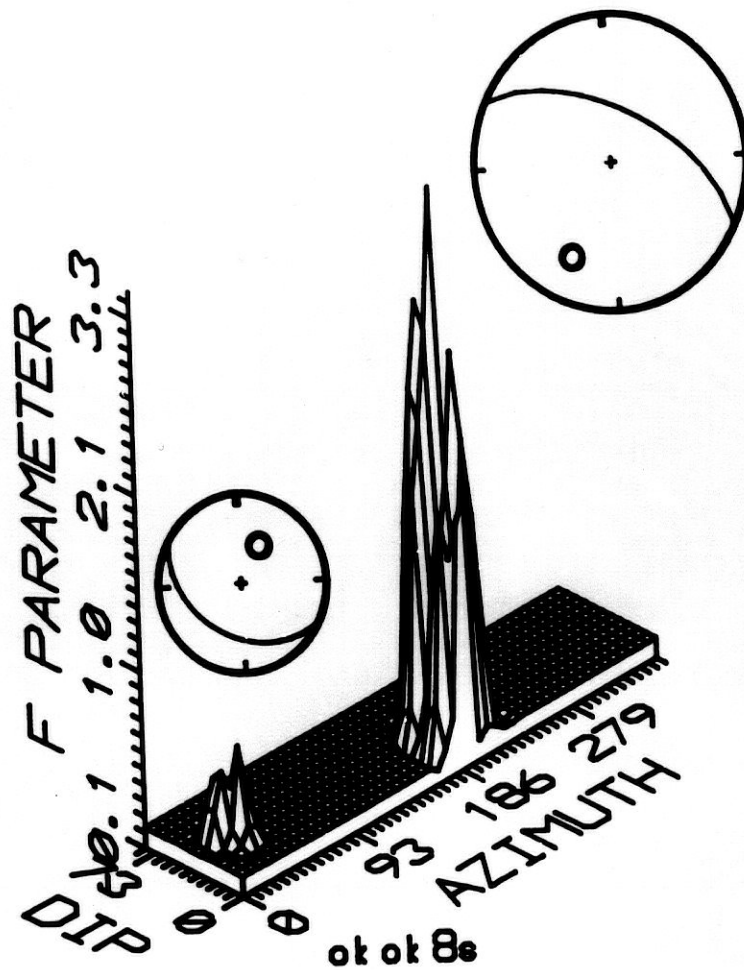


Fig. 7.18. En esta figura se representa el buzamiento y el acimut del polo del plano asociado al elipsoide versus el parámetro F. Mediante estas gráficas podemos encontrar las orientaciones más importantes en la muestra analizada. El pico más pronunciado se encuentra en 207.8 grados de acimut y 30 de buzamiento; el pico secundario se sitúa en 30 grados de acimut y 50 de buzamiento. Sobre estos picos la proyección de Schmidt correspondiente.

de una ventana espacial superior a 10 o 12 km supondría que casi todos los sismos del enjambre quedarían englobados dentro del elipsoide local de ruptura. Este valor de la distancia coincide, aproximadamente, con el punto de inflexión de la curva que se ajusta a la gráfica 7.17; siguiendo el criterio establecido con ayuda de las distribuciones sintéticas de sismos, tomaremos un valor para D sensiblemente inferior. Para el análisis mediante el método ACPE se ha elegido  $D = 8$  km.

La figura 7.18 muestra el resultado de aplicar ACPE al enjambre de Loja con un valor de la ventana espacial de 8 km. Como puede apreciarse aparece un pico bastante pronunciado del parámetro F para 207 grados en acimut y 25 grados en buzamiento; esta es la tendencia principal encontrada que corresponde a un plano N 60 W buzando al NE. Este plano se ha representado junto al pico de la figura tridimensional en una proyección de Schmidt (fig. 7.18). Junto a esta tendencia predominante aparece una pequeña orientación que se ha proyectado también. Corresponde a un plano N 60 W buzando en esta ocasión al SW. Ambos planos coinciden con los planos nodales del mecanismo focal conjunto de la serie (Vidal, 1986; de Miguel et al, 1986).

### III.3. Aplicación del método ACPT.

La obtención de la ventana óptima de sismos se obtiene a partir de la función  $Q(N, K)$ ; para el caso del enjambre de Loja esta función se ha representado en la figura 7.19. La función se hace aproximadamente constante para valores superiores a los 25 sismos, así que se ha elegido  $K = 25$ .

La figura 7.20 muestra la secuencia de los planos más significativos obtenidos tras aplicar el ACPT al conjunto de eventos del enjambre de Loja. Como puede verse

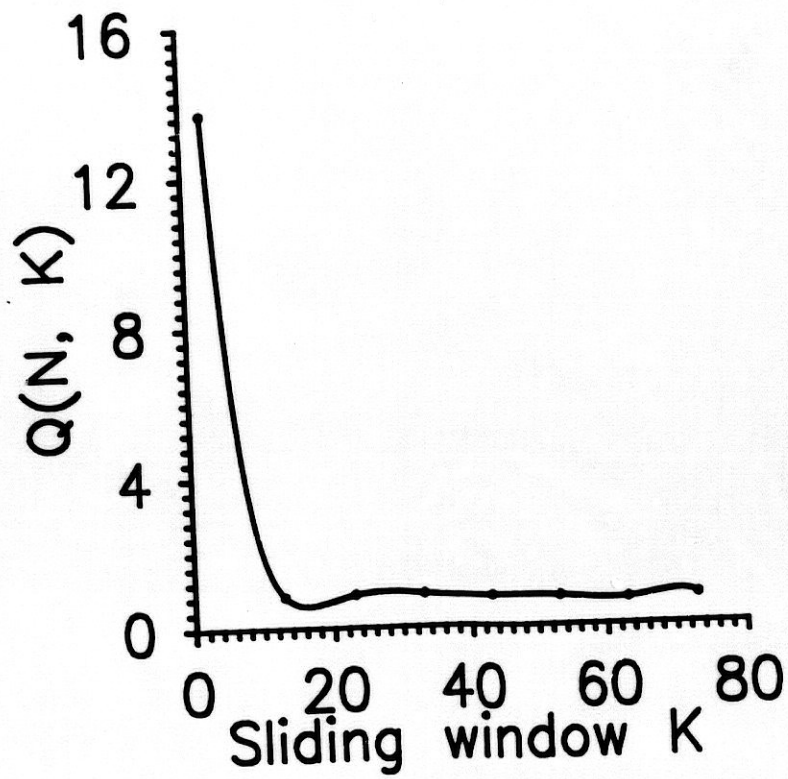
#### *Aplicación de los métodos*

la interpretación del proceso de fractura con estos datos sólo indica una ruptura E-W que presenta algunas oscilaciones en el buzamiento. Esta tendencia estaría de acuerdo con uno de los lineamientos (el N 70-90 E) anteriormente descritos. Al final del proceso (planos quinto y sexto de la figura 7.20) parece que tiene lugar una ruptura secundaria cuyo plano más destacado sería N 30-60 E. La tendencia encontrada mayoritariamente por el método ACPT (primer plano) indica que los sismos menores estarían asociados a fallas EW. En la tabla VII-3 se dan los datos de estas tendencias así como su localización espacial.

Si se repite el proceso con una magnitud umbral mayor ( $m_u = 2.3$ ) el resultado puede verse en la figura 7.21. Como puede apreciarse, la tendencia encontrada ahora es N 60 W, más acorde con las fallas presentes en la zona; la evolución de la ruptura para este orden de magnitud es homogénea, no encontrando variaciones significativas en los planos encontrados. Los datos y la localización de este análisis están en la tabla VII-4.

#### **III.4. Aplicación del método MTP.**

La corrección del efecto de forma comienza por construir las simulaciones (Fehler et al, 1986), es decir, los conjuntos de datos aleatorios en la misma región cumpliendo la propiedad de que su distribución en longitud, latitud y profundidad es idéntica a la de los datos reales. Esta distribución se muestra en las figuras 7.22a, b y c. Las simulaciones deben de ser, no obstante, estadísticamente diferentes de la muestra real; para comprobar esto se ha usado la distribución chi-cuadrado, obteniendo un valor de  $\chi^2$  de 1210, lo cual nos asegura que las muestras aleatorias y los sismos reales son estadísticamente diferentes con un nivel de confianza del 99%.



**Fig. 7.19** En la figura se muestra la curva que representa la función  $Q(N, K)$  para el enjambre de Loja; obsérvese que esta función comienza a hacerse constante para valores de  $K$  en torno a 20 o 25 sismos. Se tomará este último como valor óptimo de la ventana móvil de sismos.

Aplicación de los métodos

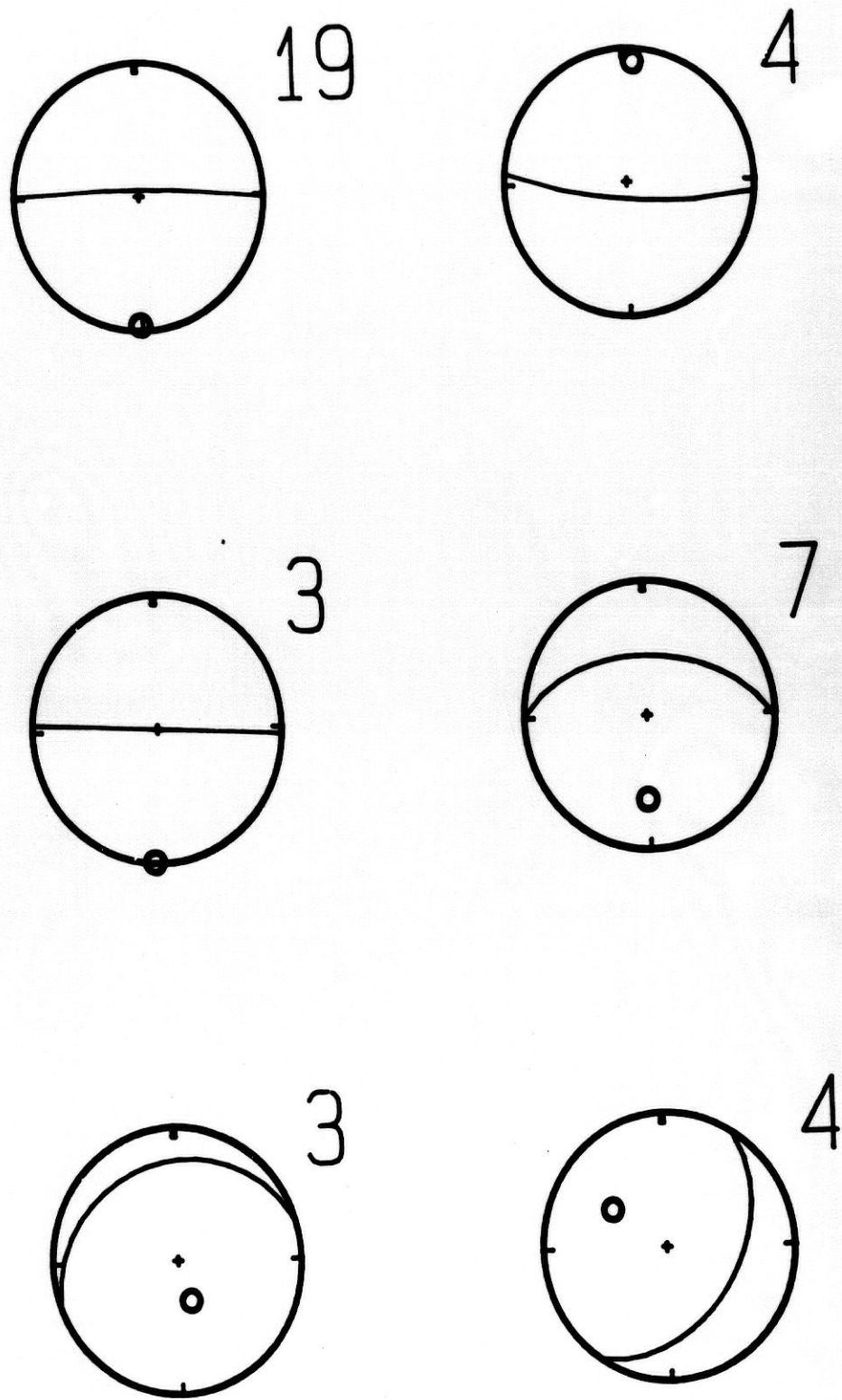


Fig. 7.20 Evolución temporal del proceso de ruptura en el enjambre de Loja modelado a partir del análisis ACPT con una magnitud umbral de 2.0. Las proyecciones son secuenciales en el tiempo y están ordenadas de izquierda a derecha y de la fila superior a la inferior. El número de la esquina superior derecha que acompaña a cada proyección indica con cuántos planos individuales se ha construido; por tanto, informa de la importancia relativa del elipsoide en cuestión.

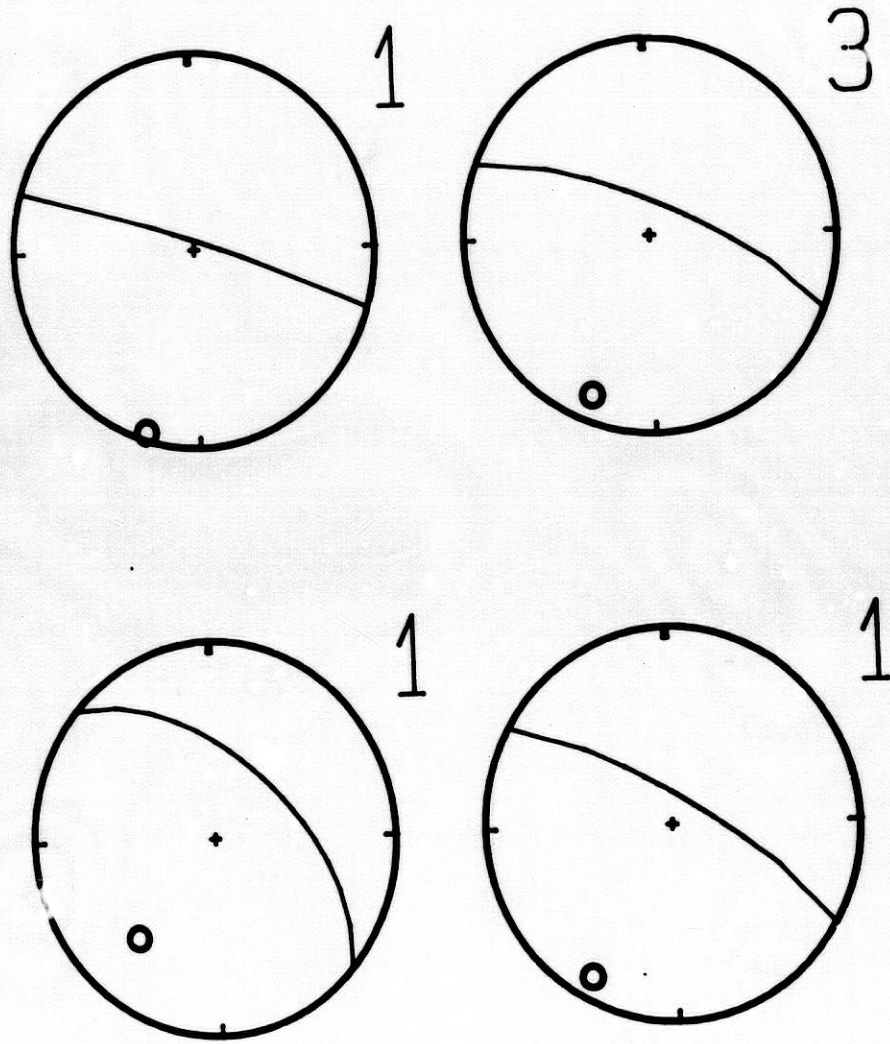


Fig. 7.21 Evolución temporal del proceso de ruptura en el enjambre de Loja modelado a partir del análisis ACPT con una magnitud umbral de 2.3. La evolución es muy uniforme para esta nivel de relajación de energía sísmica; los planos apenas si oscilan en el acimut (N 60 W) y presentan ligeras variaciones en el buzamiento.



Aplicación de los métodos

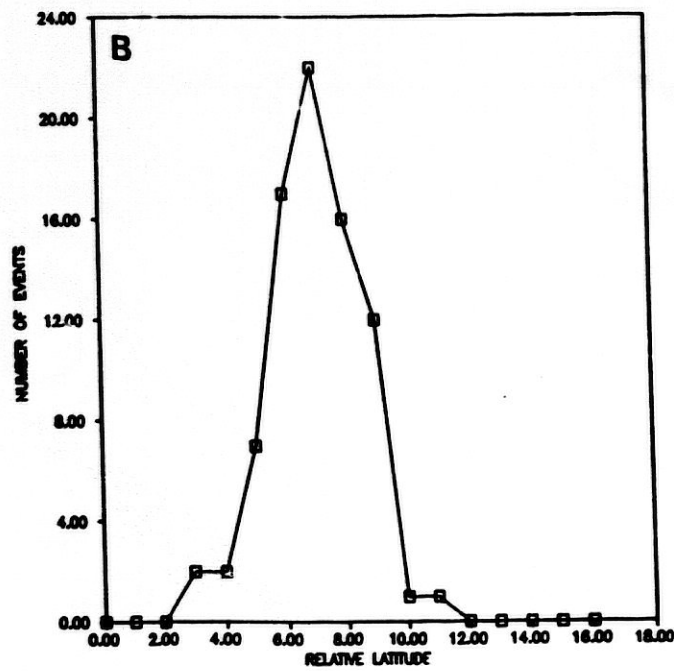
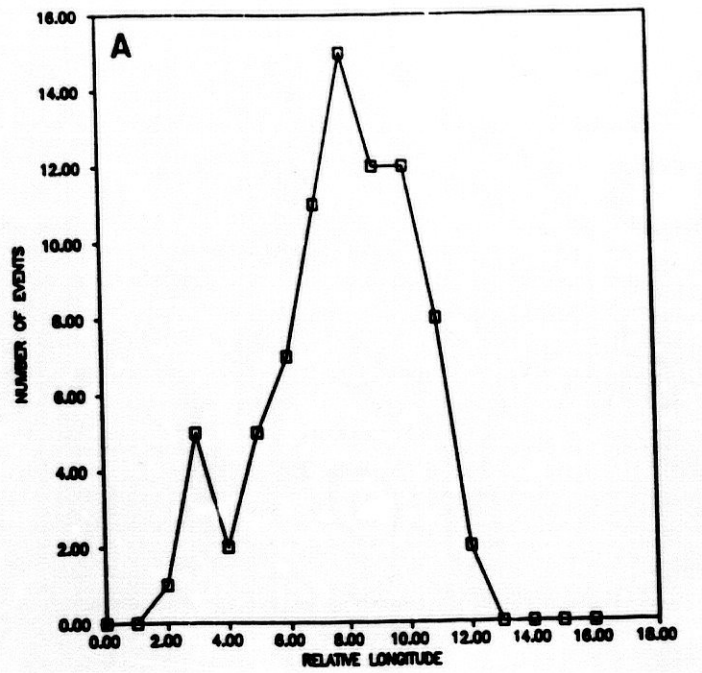


Fig. 7.22 (a) Distribución en longitud de los sismos que constituyen el enjambre de Loja. Con la ayuda de esta gráfica se construyen las simulaciones (Fehler et al, 1986); éstas son conjuntos de sismos que nos permitirán corregir a la muestra analizada del efecto de forma (Lutz, 1986). (b) Lo mismo pero para la latitud. (c) Lo mismo para la profundidad.

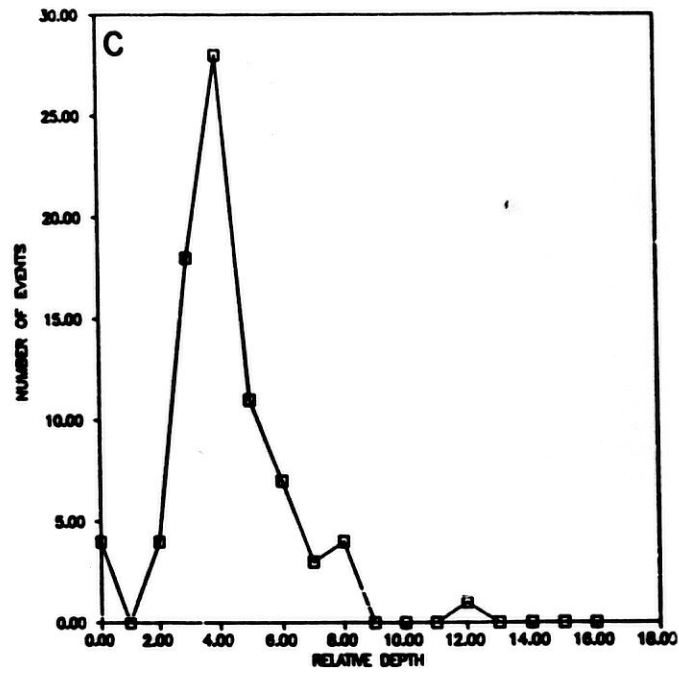
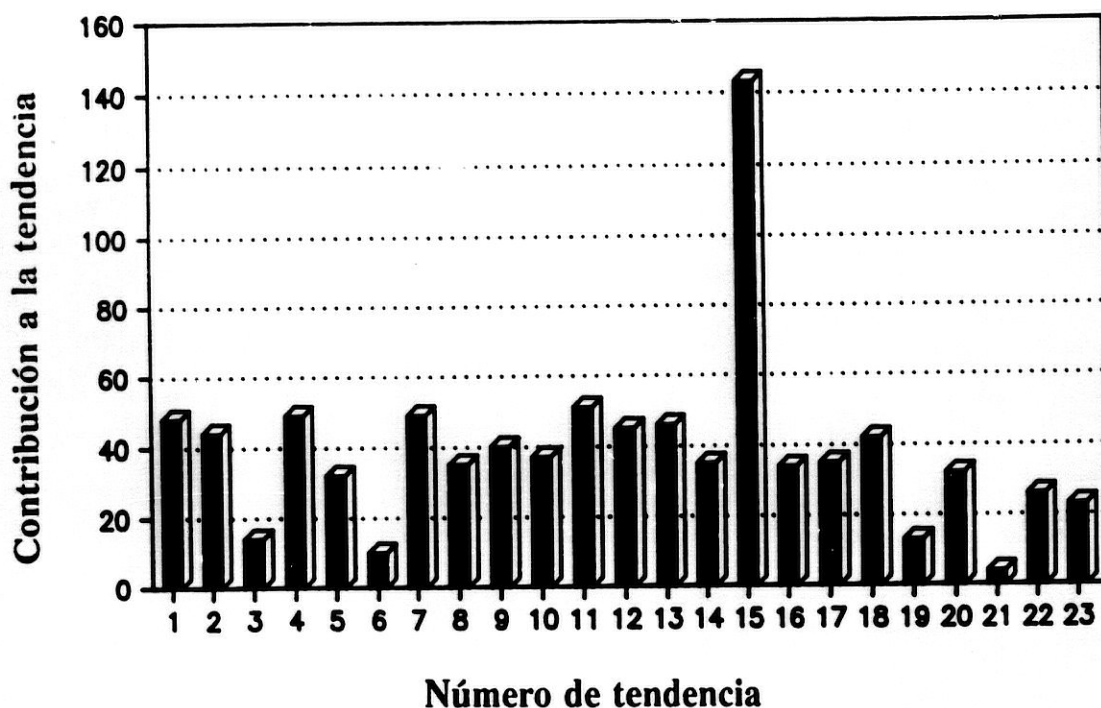
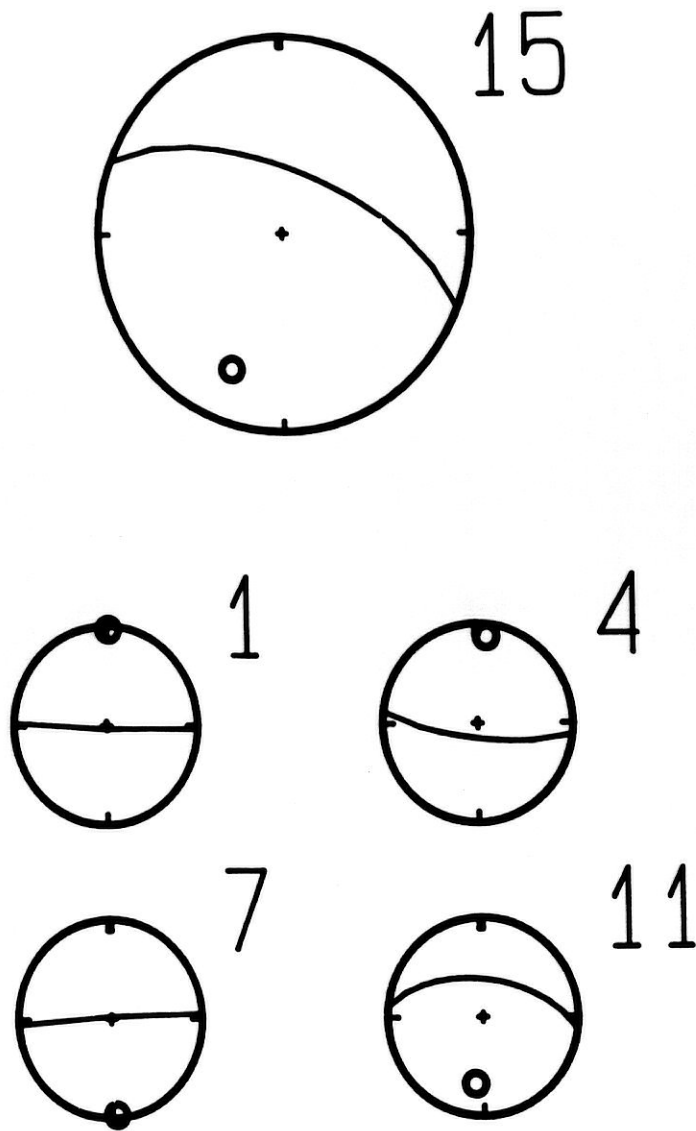


Fig. 7.22 ... continuación.

## DETECCION DE TENDENCIAS



**Fig. 7.23** *Para una mejor visualización de las tendencias más significativas encontradas con el MTP se construye el siguiente histograma. Para cada tendencia se determina cuantas veces contribuye cada sismo a la formación del plano característico de dicha tendencia; estos datos se ordenan de mayor a menor y se toma el primero (es decir, el sismo que más veces ha contribuido a la formación de esa tendencia) como indicativo de la misma. El histograma de la figura representa el número de veces que ha contribuido dicho sismo a la formación del plano frente a la tendencia considerada. Como puede verse, el primer sismo de la tendencia número 15 ha formado parte de una terna para la formación del plano característico de la tendencia más de 140 veces. Es la barra más destacada y por tanto la tendencia más significativa.*



**Fig. 7.24** *En esta figura se representan los planos característicos de las tendencias más importantes detectadas en el enjambre de Loja con el MTP. El número que acompaña a cada proyección es el número de tendencia. La proyección superior es la más significativa, mientras que las inferiores son menos importantes.*

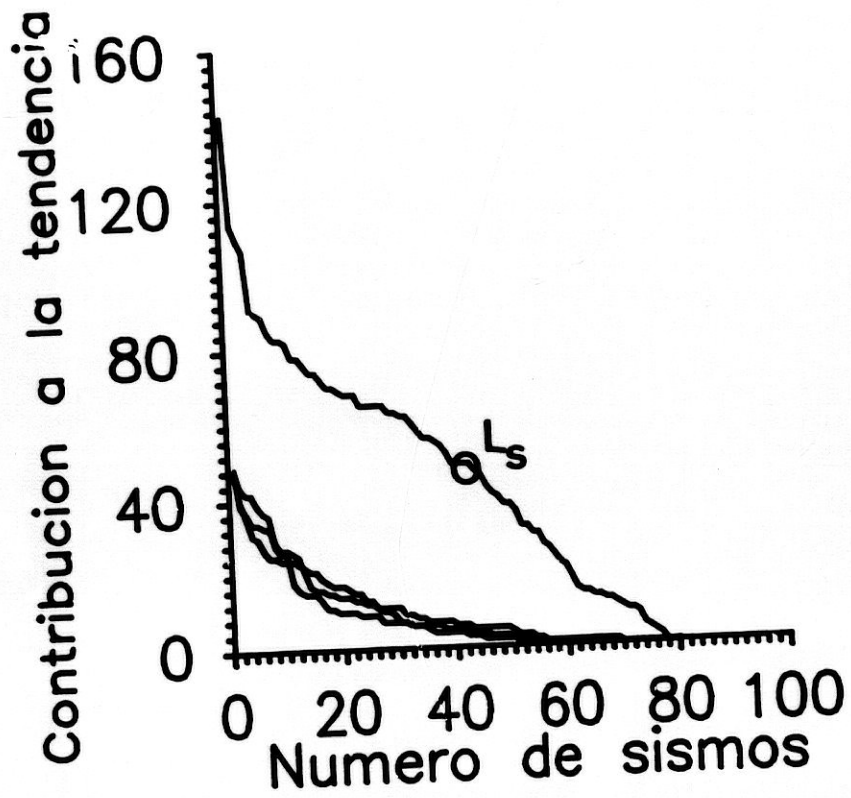


Fig. 7.25 Las tendencias más significativas encontradas con el método MTP para el enjambre de terremotos de Loja se utilizan para establecer el Límite de Sismos ( $L_s$ ). Obsérvese como la tendencia más importante (la número 15) destaca sobre las demás. El Límite de Sismos vale en este caso 45.

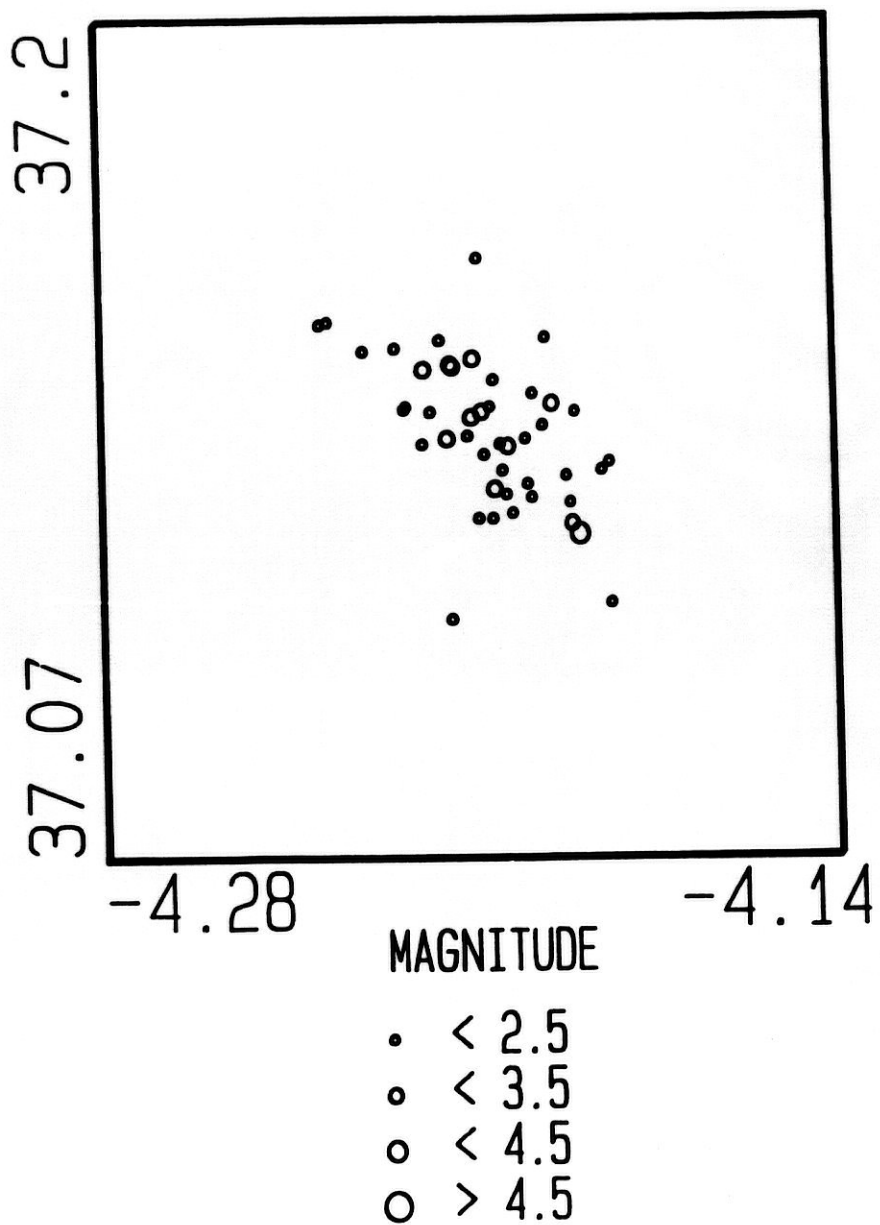


Fig. 7.26 Sismos asociados a la tendencia número 15 encontrados con el MTP para el enjambre de Loja.

Aplicación de los métodos

N	NV	Azm	Buz	Lon	Lat	Prof
1	19	181	4	-4.205	37.138	10.3
2	4	5	10	-4.220	37.143	10.3
3	3	183	0	-4.234	37.149	9.5
4	7	181	37	-4.226	37.143	9.0
5	3	162	64	-4.227	37.139	9.4
6	4	304	47	-4.226	37.140	9.9

*Tabla VII-3. Datos de los planos encontrados para caracterizar la evolución espacio-temporal de la ruptura en la secuencia de terremotos de Loja con una magnitud umbral de 2.0. La columna NV indica el número de planos individuales sucesivos temporalmente con los que se ha construido el plano promedio en cuestión. El resto de las columnas son el buzamiento y acimut del polo del plano y la localización espacial (longitud, latitud y profundidad) del elipsoide considerado.*

N	NV	Azm	Buz	Lon	Lat	Pro
1	1	198	4	-4.197	37.145	9.1
2	3	203	14	-4.200	37.145	10.0
3	1	222	34	-4.200	37.139	9.9
4	1	211	12	-4.203	37.141	9.5

*Tabla VII-4. Datos de los planos encontrados para caracterizar la evolución espacio-temporal de la ruptura en la secuencia de terremotos de Loja con una magnitud umbral de 2.3. Para una explicación véase tabla VII-3.*

0	Azm	Buz
1	2	2
2	2	7
3	2	82
4	7	12
5	32	57
6	142	87
7	177	2
8	182	2
9	182	42
10	182	62
11	187	32
12	187	32
13	187	42
14	187	52
15	202	27
16	217	27
17	227	2
18	227	7
19	227	27
20	232	22
21	262	87
22	292	77
23	352	82

*Tabla VII-5. Con el método MTP se han determinado 23 tendencias predominantes para la secuencia de terremotos de Loja. En la tabla se presenta el buzamiento y el azimut asociado a cada tendencia.*



### *Aplicación de los métodos*

Las orientaciones preferidas una vez corregidas del efecto de forma son 23 (tabla VII-5). El histograma de la figura 7.23 muestra que tendencia es la más significativa; en este caso corresponde a la tendencia 15; otras tendencias significativas pero menos importantes son la 1, la 4, la 7 y la 11. Como puede verse (fig. 7.24) la tendencia más notable es un plano N 60 W que buza al NE. Coincide pues con los resultados obtenidos mediante el ACPE y el ACPT (este último, en el caso de elección de la magnitud umbral superior a 2.3). Las tendencias menores corresponderían a los planos que se han encontrado en la evolución del ACPT con sismos de magnitud pequeña ( $m_s = 2.0$ ).

La figura 7.25 muestra que el Límite de Sismos para la tendencia dominante del enjambre de Loja es de 45. Estos 45 eventos se han representado en la figura 7.26, que muestra claramente la orientación de los eventos. Las tendencias que le siguen, anteriormente mencionadas, tienen una importancia similar entre ellas (fig. 7.25), por lo que no es posible elegir un Límite de Sismos para ellas.

### **III.5. Discusión**

La aplicación de los métodos ACPE y MTP confirma la existencia de una tendencia dominante N 60 W con buzamiento al NE que destaca notablemente sobre las demás. La aplicación del método ACPT con magnitudes umbrales superiores a 2.3 revela esta misma orientación de manera clara; si los umbrales de magnitud se hacen inferiores se pone de manifiesto una mayor tendencia a las fracturas EW y una tendencia N 40 E con buzamiento al SE menos relevante que las anteriores. Los resultados encontrados están de acuerdo con al menos dos de las alineaciones presentes en la zona (Vidal, 1986) y con el mecanismo conjunto de los sismos de mayor magnitud (de Miguel, 1986).

La aplicación del ACPT ha puesto de manifiesto la influencia decisiva que tiene la elección del parámetro energético  $m_0$  sobre los resultados finales; asimismo confirma que los sismos de mayor magnitud son los que definen las orientaciones principales de fallamiento en la zona, mientras que los eventos más pequeños perfilan otras fracturas menos destacadas como es el caso de la N 40 E.

#### IV. LA SERIE DE TERREMOTOS DE ANTEQUERA (MALAGA) DE 1989.

##### IV. Descripción de la serie sísmica.

En Junio de 1989, entre los días 7 y 9, se produjeron 158 microterremotos y terremotos comprendidos entre los 4.4 y 4.8 grados de Longitud Oeste y los 36.9 y 37.3 grados de Latitud Norte y con magnitud no superior a 3.4. Esta zona está situada en la comarca de Antequera (Málaga) y muchos de los sismos fueron sentidos por la población de los núcleos colindantes a la zona epicentral.

La serie ha sido estudiada con los datos aportados por más de 30 estaciones fijas y portátiles pertenecientes a la Red Sísmica de Andalucía (Alguacil, 1986; Alguacil et al 1990), el Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, el Instituto Geográfico Nacional y el Real Observatorio de la Marina en San Fernando. La mayoría de los datos son digitales y por tanto es posible llevar a cabo una buena localización con mayor garantía que en el caso del enjambre de Loja.

La localización de los terremotos y microterremotos con la ayuda de programas iterativos puede estar afectada de errores en la determinación de la profundidad; esto se debe a la dependencia existente entre la hora origen y la profundidad (Lomnitz,

### *Aplicación de los métodos*

1980) y también a la dependencia de este parámetro con el modelo de tierra estratificado. Este último es un efecto muy acusado en nuestra región donde existen fuertes gradientes laterales y una zona como es el mar de Alborán con presencia de manto anómalo (Hartzfeld et al, 1978; Banda, 1988). Para estudios de sismicidad en los que se necesita la mayor precisión posible en la determinación de hipocentros está indicada la utilización de métodos alternativos que confirmen o varíen las profundidades obtenidas. En nuestro trabajo se ha optado por aplicar métodos derivados de Wadati (Wadati, 1933) desarrollados por Ibañez (1987) e Ibañez et al (1987).

De los 158 sismos sólo 16 superan la magnitud 3. El mayor de ellos, de magnitud 3.4, ocurrió aproximadamente a las tres horas del comienzo de la serie. En los restantes se destacan 27 sismos con magnitud mayor o igual a 2.8 y 59 con una magnitud mayor o igual a 2.5.

La distribución epicentral de la serie sísmica teniendo en cuenta distintas magnitudes umbrales puede verse en las figuras 7.27. En estas figuras se observa la importancia del establecimiento de la magnitud umbral. Es bien conocido que cuando con una red de alta densidad de estaciones se estudia la actividad de réplicas de un terremoto, se detectan un gran número de microterremotos; estos se distribuyen espacialmente ensanchando ostentosamente el sistema principal de fracturas activado por el terremoto mayor y perfilado por las réplicas de mayor magnitud, poniendo de manifiesto toda una red de fracturas más pequeñas envueltas en el volumen de relajación de deformación. Por consiguiente, para detectar los sistemas de fracturas más relevantes hay que estudiar la distribución espacial de los sismos que han ocurrido con una magnitud superior a cierta magnitud umbral (Vidal, 1986). Esto permitirá distinguir las fracturas mayores (ligadas a los sismos mayores) de las mucho más pequeñas (ligadas a microterremotos); aquí se ha elegido una magnitud umbral de 2.5 (fig. 7.27b).

Se ha efectuado una estadística de errores en los datos con el fin de detectar los sismos peor localizados y también para poder realizar un análisis posterior del margen de error en los resultados. En las figuras 7.28a-c se han representado los errores absolutos en longitud, latitud y profundidad. Con estos datos se ha obtenido que la media de error tanto en longitud como en latitud es de  $\pm 1$  km, mientras que en profundidad llega a ser de  $\pm 3$  km. Esto significa que los errores relativos a la máxima dimensión del paralelepípedo que contiene a todos los sismos es del 2 % para la longitud y la latitud y del 6 % para la profundidad.

En la serie de estudio, como ya se ha explicado, el error epicentral relativo no supera el 2%, mientras que el error medio en profundidad es del 6 %. Por tanto, puede concluirse que en este estudio los errores en los datos no van a influir de manera notable en los resultados.

#### IV. Aplicación del método ACPE.

En la figura 7.29 puede verse un histograma de distancias para los sismos de la serie con magnitud umbral 2.5, un total de 59 sismos para los que existen más de 1700 interdistancias, observándose que la gran mayoría de estas son inferiores a los 20 km. Por ello, se tomará este valor para D. En las figuras 7.30a-f se ha representado el acimut y buzamiento de los polos de los planos inferidos a partir de los elipsoides frente a F. A medida que la distancia D decrece, la abundancia de planos se manifiesta en el aumento espectacular del número de picos que aparecen y la disminución de los valores de F. La figura 7.30c muestra el resultado obtenido con  $D = 20$  km. En ella los picos están perfectamente definidos respecto a valores de D mayores, mientras que para D menores de 20 comienza a disgregarse los picos en otros secundarios. Los tres picos bien definidos de la figura 7.30c corresponden a los planos representados en la fig. 7.31.

Aplicación de los métodos

N	NV	Azm	Buz	Lon	Lat	Pro
1	1	153	5	-4.626	37.156	18.2
2	3	155	8	-4.620	37.156	17.1
3	8	167	4	-4.618	37.154	16.6
4	2	342	0	-4.615	37.160	16.0
5	2	161	2	-4.608	37.162	15.7
6	1	347	1	-4.607	37.166	16.0
7	1	156	15	-4.608	37.168	16.7
8	1	343	0	-4.606	37.171	17.5
9	4	256	3	-4.606	37.178	17.8
10	6	294	65	-4.617	37.181	17.5
11	1	346	8	-4.622	37.178	18.4
12	4	173	8	-4.625	37.176	18.8
13	5	196	8	-4.612	37.168	19.1
14	1	186	7	-4.605	37.160	18.2

*Tabla VII-6. Datos de los planos encontrados en el proceso de ruptura de la Serie de Antequera por el método ACPT. El acimut y el buzamiento son los del polo del plano. La columna NV indica con cuantos planos individuales se ha construido el plano en cuestión; finalmente, las columnas de la longitud, latitud y profundidad corresponde a la localización espacial del centro del elipsoide que se trate.*

NT	Buz	Azm
1	7	22
2	52	37
3	32	52
4	57	67
5	42	87
6	62	87
7	72	87
8	52	102
9	62	102
10	37	132
11	77	137
12	62	142
13	37	152
14	17	167
15	27	177
16	22	202
17	82	267
18	12	277
19	7	327
20	7	347

*Tabla VII-7. Con el método MTP se han determinado 20 tendencias predominantes para la secuencia de terremotos de Antequera. En la tabla se presenta el buzamiento y el azimut asociado a cada tendencia.*

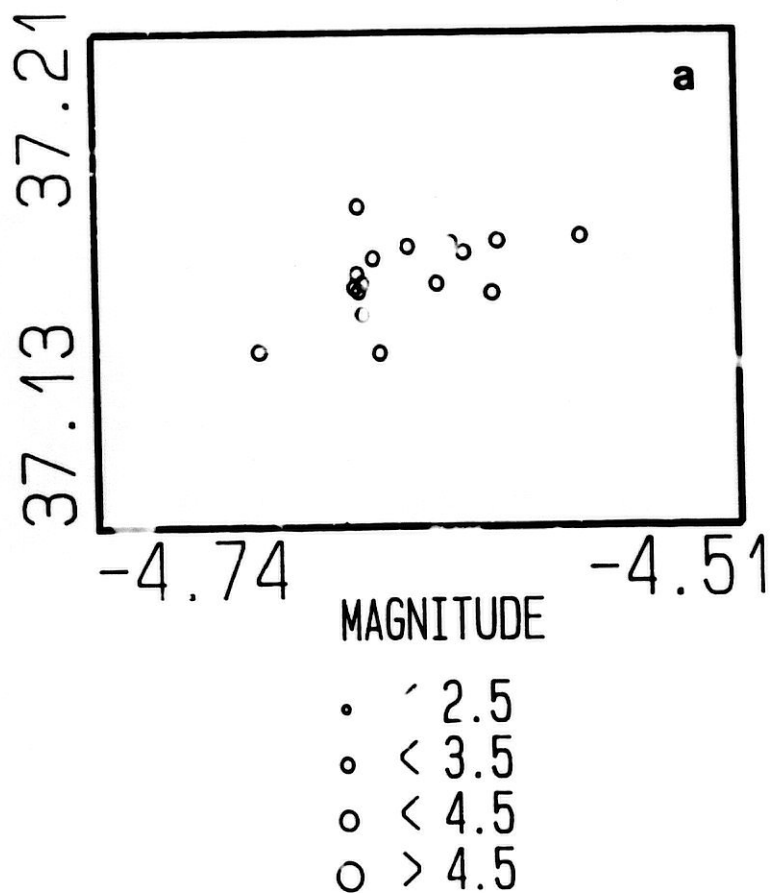


Fig 7.27 Mapas mostrando la localización epicentral de los eventos. En la figura a la magnitud umbral,  $m_u$ , es 3, en la b,  $m_u$  vale 2.8 y en c su valor es 2.5. En esta última se observa la presencia de de dos o tres tendencias: N 70-80 E, N 70-80 W y N 10-20 W.

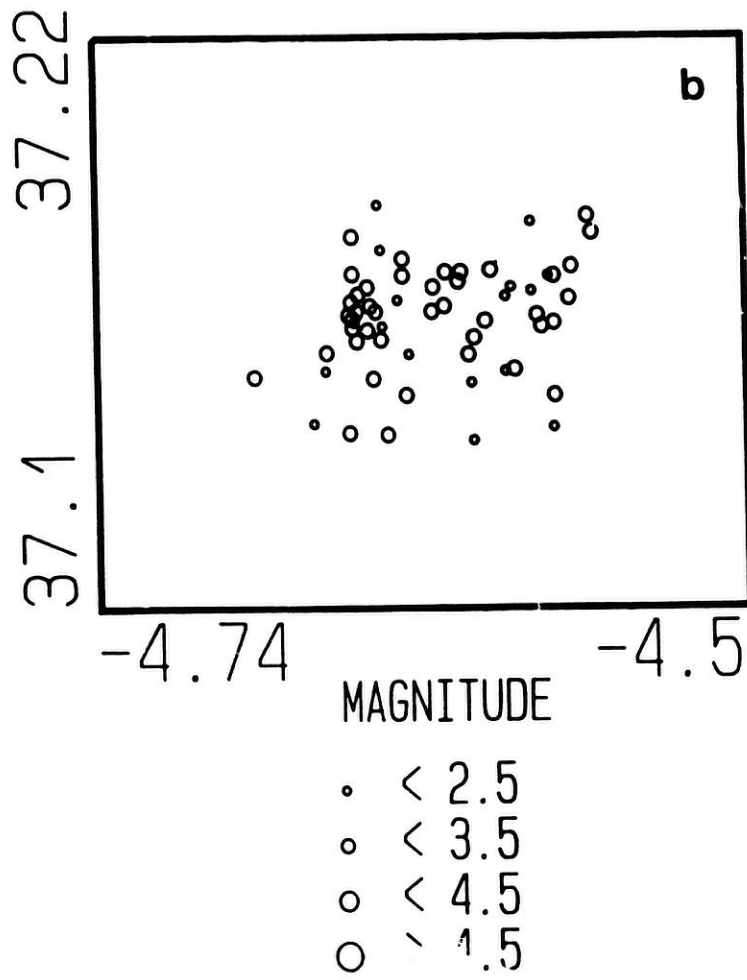


Fig. 7.27 ... continuación



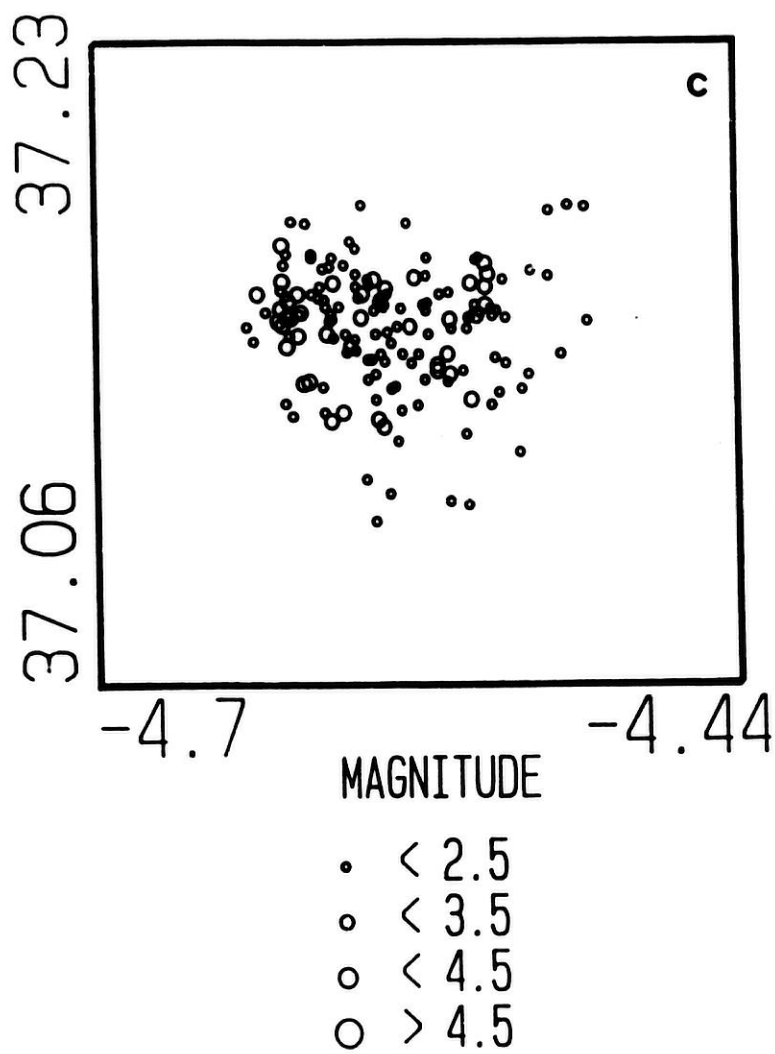


Fig. 7.27 ... continuación

Obsérvese que el mayor F está asociado al plano de la figura 7.31c. Se trata de un plano N 70 E con un buzamiento al Oeste muy pronunciado ( $85^\circ$ ).

#### IV. Aplicación del método ACPT.

La aplicación de este método requiere un valor óptimo para la ventana móvil de sismos. La figura 7.32 muestra los valores que toma la función  $Q(N, K)$  a partir de la cual, tal y como se ha visto anteriormente, puede elegirse como valor óptimo  $K = 20$ .

Las figuras 7.33a-f muestra los resultados de aplicar ACPT con distintos valores de K. Los triángulos son los autovectores asociados a los autovalores menores y las cruces son los autovectores asociados a los autovalores mayores. Obsérvese que a medida que disminuimos K la dispersión de vectores propios aumenta gradualmente. Con  $K = 20$  se tienen agrupaciones de cruces y triángulos que no son tan densas como con K mayores. Esto significa que tendremos información no sólo de las tendencias dominantes presentes en la zona sísmicamente activa, sino además, de otras menos importantes pero que también han actuado en el proceso de relajación.

Las direcciones más destacadas de los planos inferidos a partir de los elipsoides locales de ruptura están situados en torno a la vertical y con direcciones N 70-90 E, es decir, cercanos a ser E-W.

La evolución temporal del proceso de fractura puede verse en las figuras 7.34a-d. El número superior derecho que acompaña a cada proyección indica con cuantos elipsoides consecutivos ha sido construido. La ruptura parece comenzar con planos en torno a N 70 E, muy verticales, siendo el más significativo el N 77 E (en el sentido que agrupa un número superior de ventanas consecutivas, y por tanto, más sismos). El

### *Aplicación de los métodos*

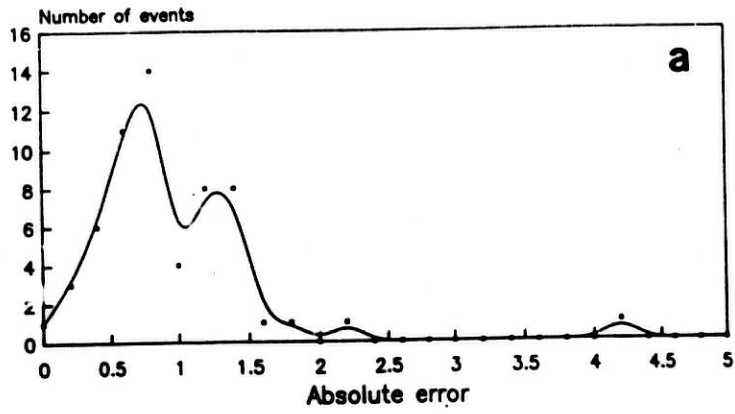
avance continúa con planos de las mismas características hasta el elipsoide número 9, que agrupa 4 ventanas y que es distinto de los anteriores; presenta un buzamiento muy pronunciado pero el acimut es prácticamente N-S. El desarrollo de la fractura continúa volviendo al tipo de planos original. Los sismos asociados a cada etapa de este proceso pueden verse en las figuras 7.35 a-d.

Las características de los materiales que se deforman varían con la profundidad sucediendo que las fracturas superficiales adquieren otro aspecto a medida que aumenta la profundidad. Por ello, se ha llevado a cabo una pequeña estadística que nos informa acerca de la distribución de profundidades (fig.7.36). La gran mayoría de los sismos están comprendidos entre los 10 y 30 km y la presencia de sismos fuera de este rango de profundidad puede ser un efecto que acentúe la verticalidad de los planos obtenidos. Se ha realizado un nuevo análisis con los sismos comprendidos entre las profundidades señaladas con el fin de comprobar esta posible influencia. Puede apreciarse que el buzamiento se hace menos pronunciado mientras que el acimut permanece invariable (fig. 7.37 y 7.38). Es significativa también la desaparición de la tendencia N-S que antes podía verse claramente, lo cual indica, probablemente, que esté asociada a un sistema de fracturas más superficial, ya que los sismos por debajo de 30 km son muy poco numerosos.

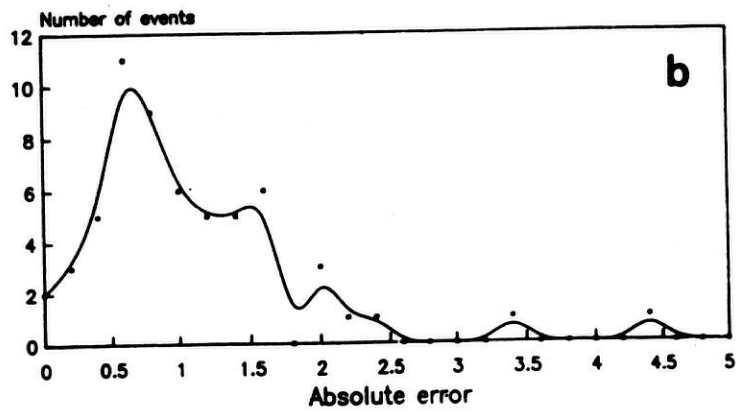
#### **IV.4. Aplicación del método MTP.**

El primer paso en la aplicación del método consiste en la construcción de las simulaciones que nos permitan corregir del efecto de forma a la muestra real de sismos. Para estas simulaciones se ha calculado el estadístico  $\chi^2$  y se ha obtenido un valor de 3560; quiero esto decir que las simulaciones son distintas de la muestra real con un nivel de confianza del 99%.

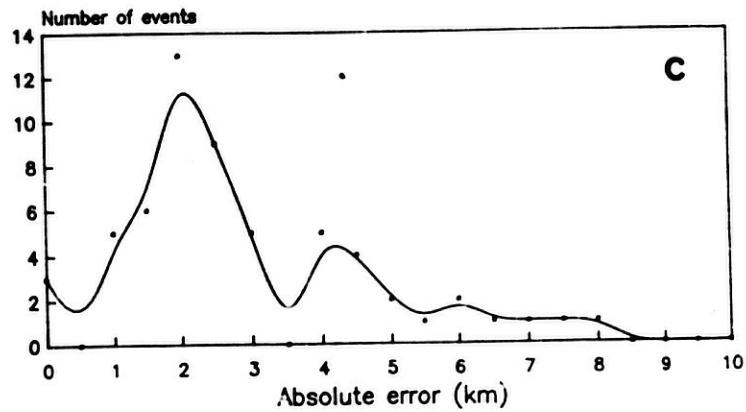
### Error Analysis Longitude



### Latitude



### Depth



**Fig 7.28** Estadística de errores para la (a) la longitud, (b) la latitud y (c) la profundidad. A partir de estos datos se ha obtenido un valor medio del error relativo en torno al 2 % para la longitud y la latitud, mientras que en profundidad alcanza el 6 %.

## Distances Bar Diagram Antequera Series

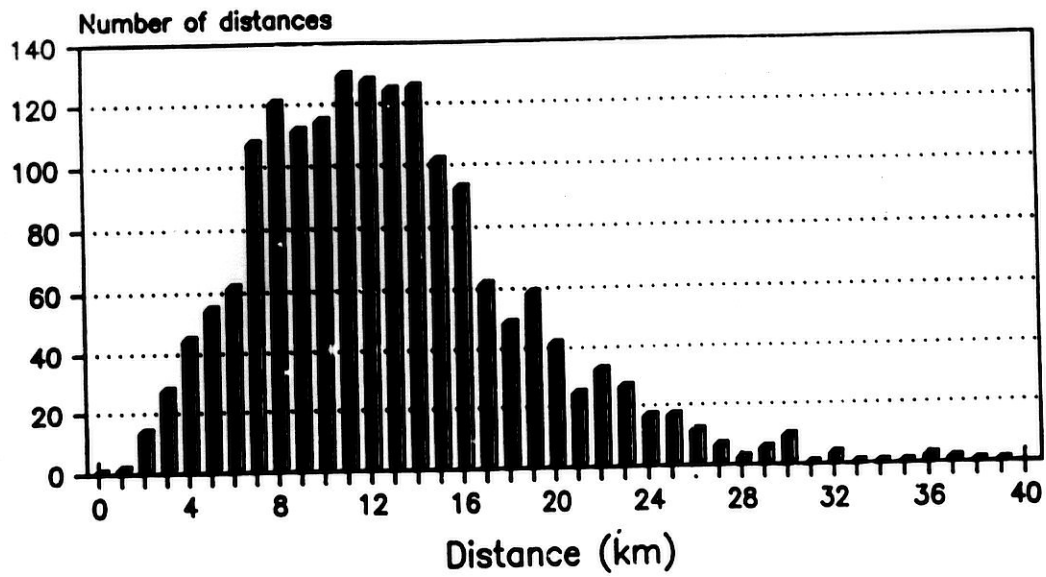
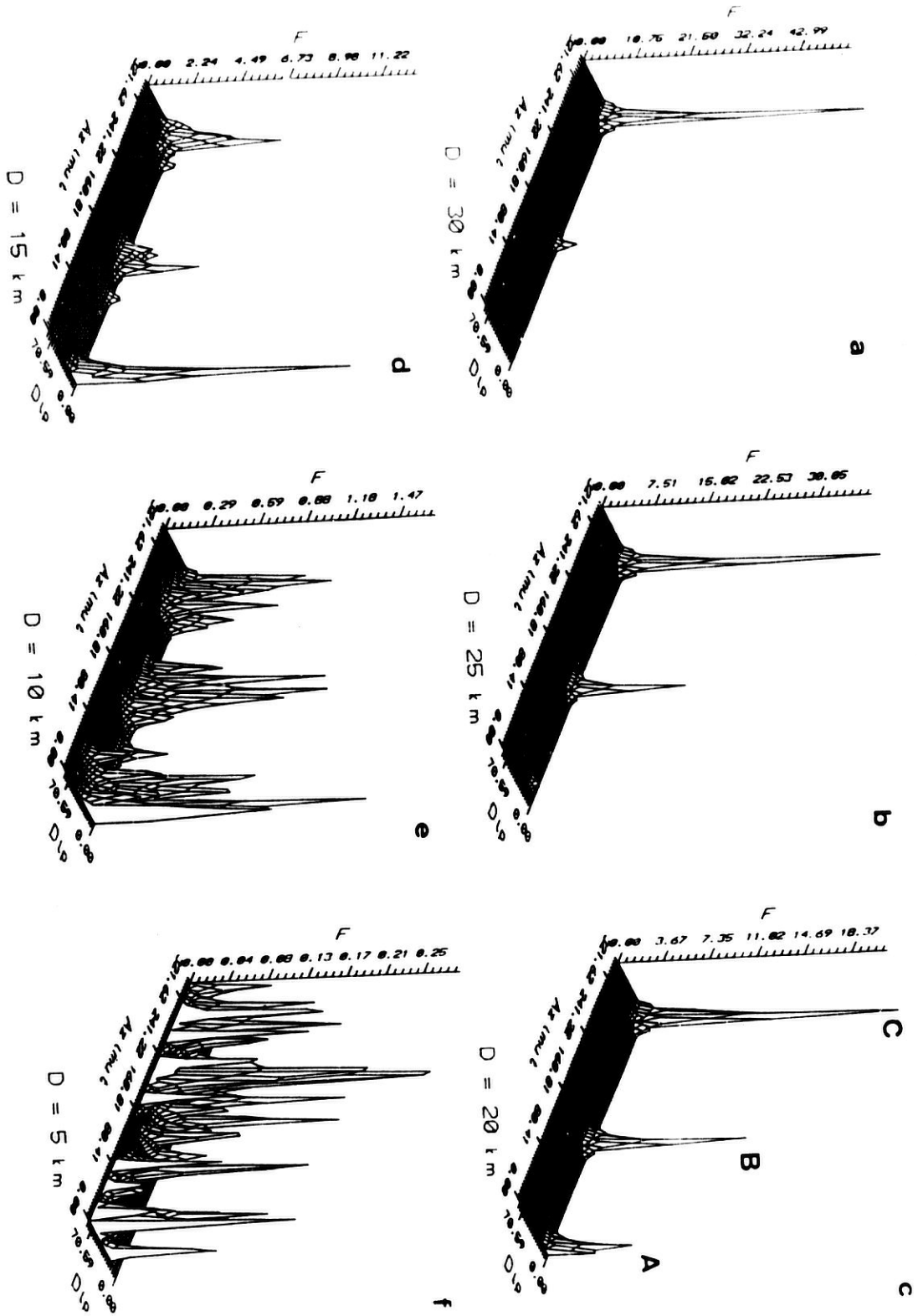
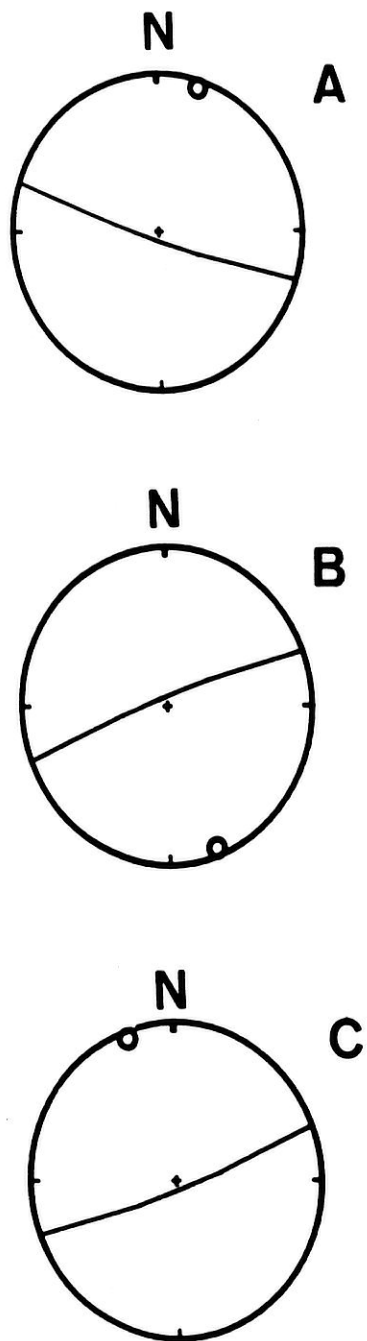


Fig 7.29 *Diagrama de distancias para la serie de Antequera. En el se representa el parámetro distancia entre eventos frente al número de interdistancias que realmente se encuentran en la serie entre los distintos sismos. Puede apreciarse que la mayoría de las interdistancias se encuentran hasta los 20 km, por lo que este es el valor óptimo para D.*

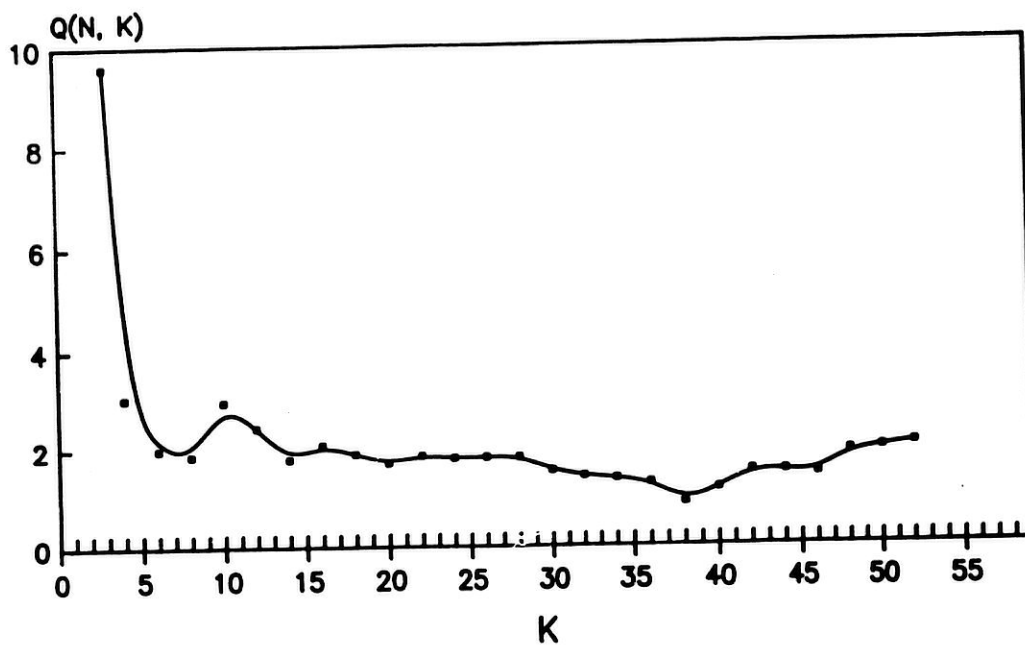


Aplicación de los métodos



**Fig 7.31** *En esta figura pueden verse los planos A, B y C que se indicaban en el diagrama de la figura 7c. Se trata de una proyección equiareal del hemisferio inferior. La tendencia principal N 70-80 E es la que se presenta en la proyección C.*

## Q function



**Fig 7.32** *La función  $Q(N,K)$  es un indicador de la longitud óptima de la ventana móvil de sismos,  $K$ . En la figura se representa en abscisa los distintos valores de  $K$  y en ordenadas los valores que toma  $Q(N,K)$ . El valor de  $K$  óptimo corresponde a aquel a partir del cual  $Q(N,K)$  se hace constante. En este trabajo se ha optado por  $K = 20$ .*



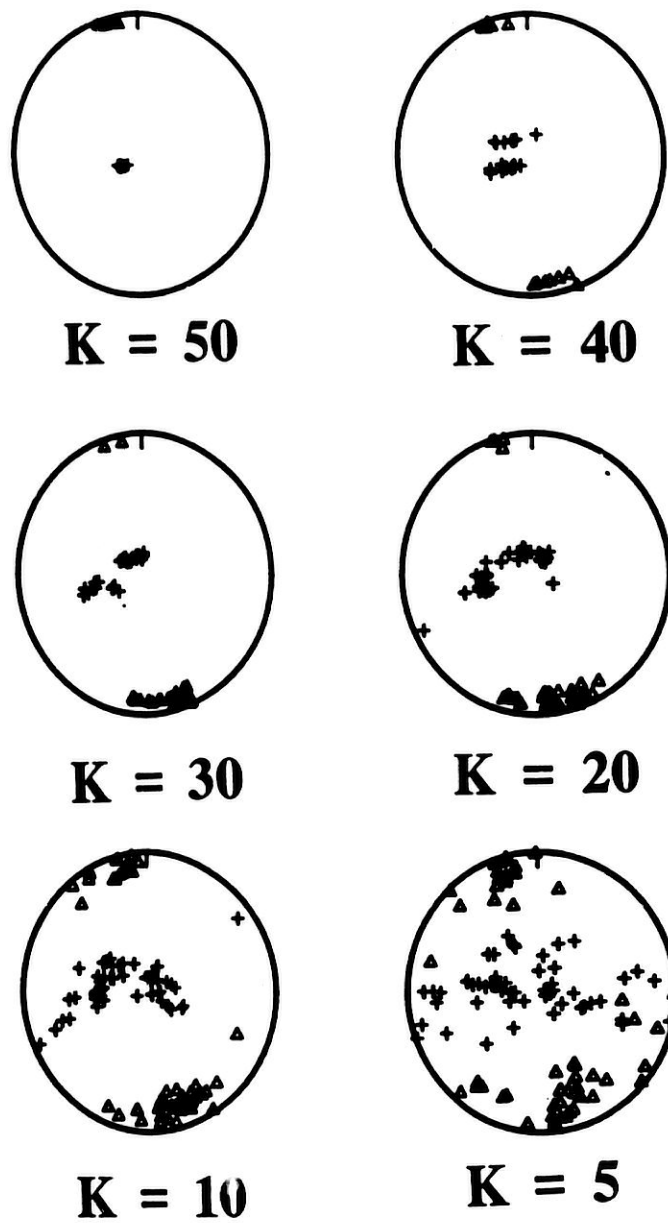


Fig 7.33 Distintas proyecciones de Schmidt para diversos valores de  $K$ . Como puede verse, a medida que  $K$  disminuye el número y dispersión de los polos de los planos que se forman, correspondientes a los Elipsoides Locales de Ruptura (ELR), aumenta considerablemente. El valor que se considera óptimo en este trabajo es  $K = 20$ .

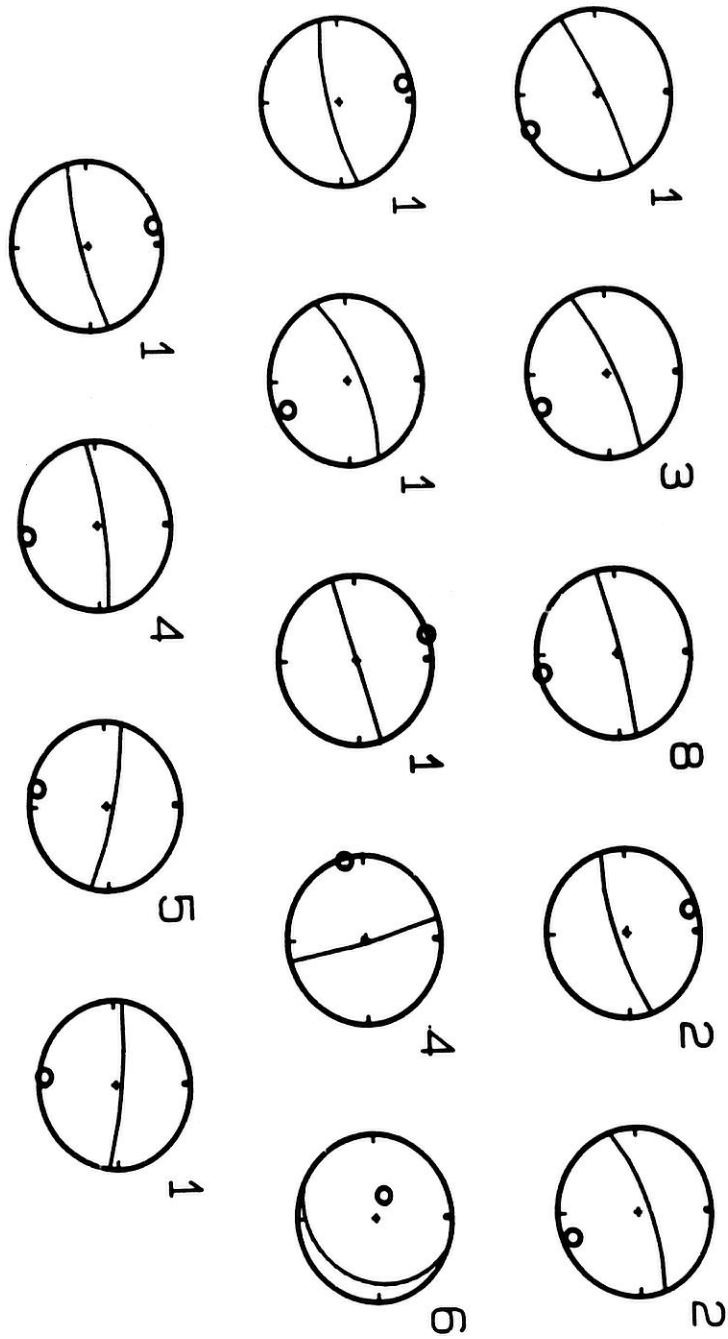


Fig. 7.34

*Evolución temporal del proceso de fractura. Cada plano representado es un plano medio contruido con el número de ELR indicado en la esquina superior derecha. Las proyecciones corresponden a intervalos de tiempo sucesivos. La importancia de cada una de ellas viene dada por el número ELR necesarios para su construcción. Caben destacar los planos número 3, 9, 10 y 13.*

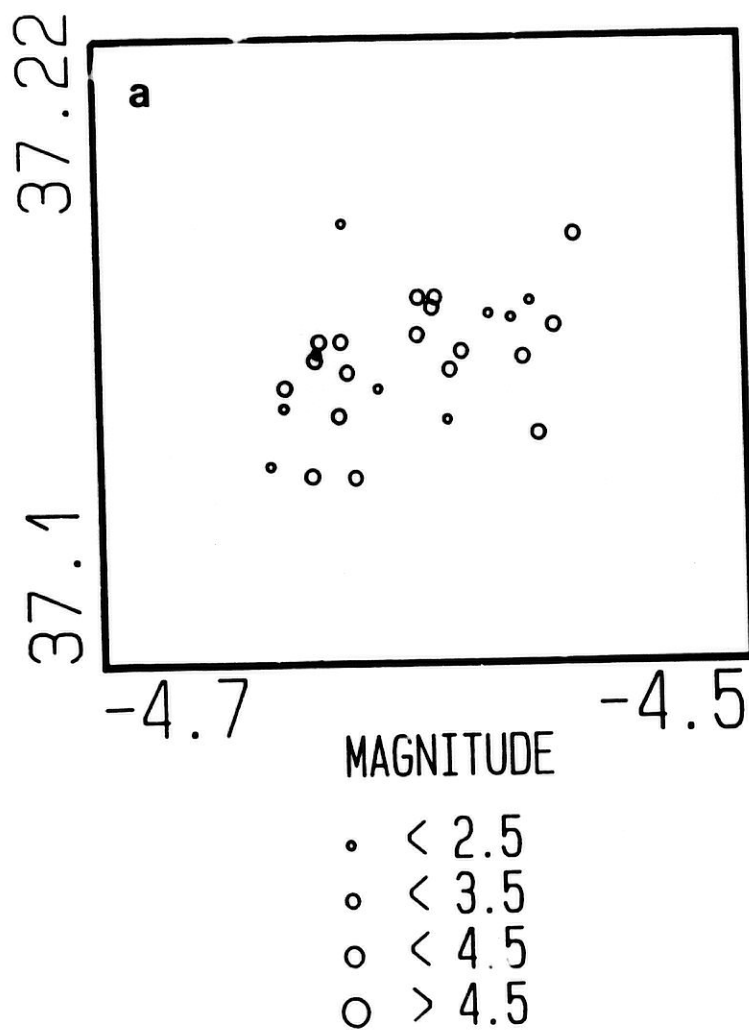


Fig 7.35 En cada figura (a), (b), (c) y (d) se han dibujado los eventos asociados a los planos más destacados encontrados anteriormente. Obsérvese que la serie parece comenzar con planos N 70-80 E y a medida que el tiempo avanza tiende a planos N-S para acabar con planos N 70-80 W.

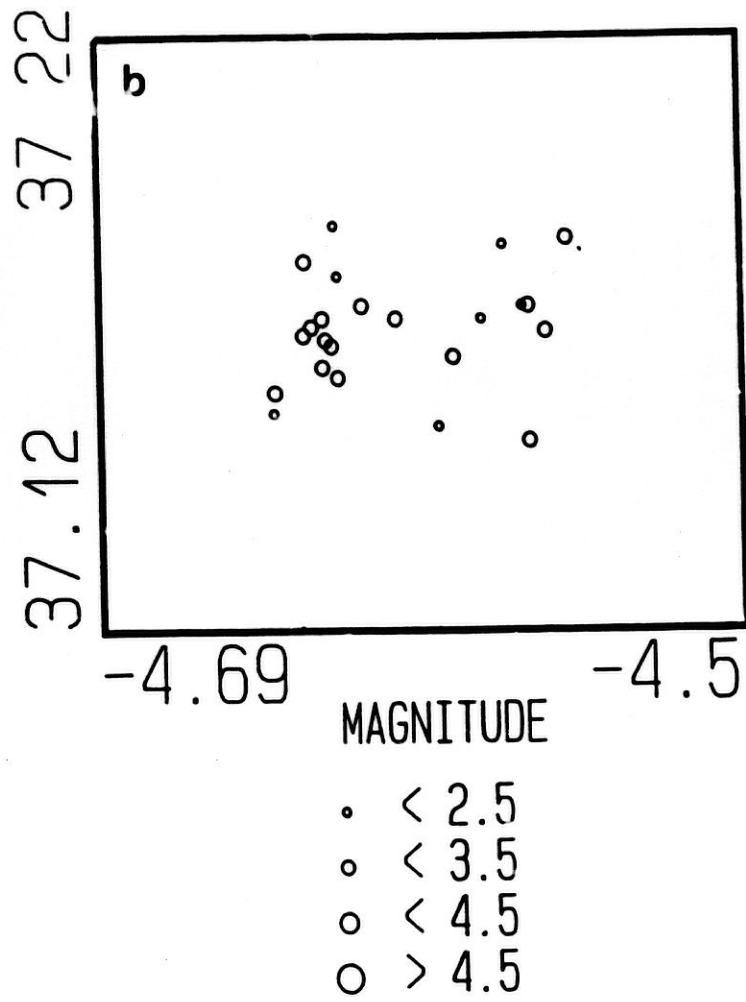


Fig. 7.35 ... continuación.

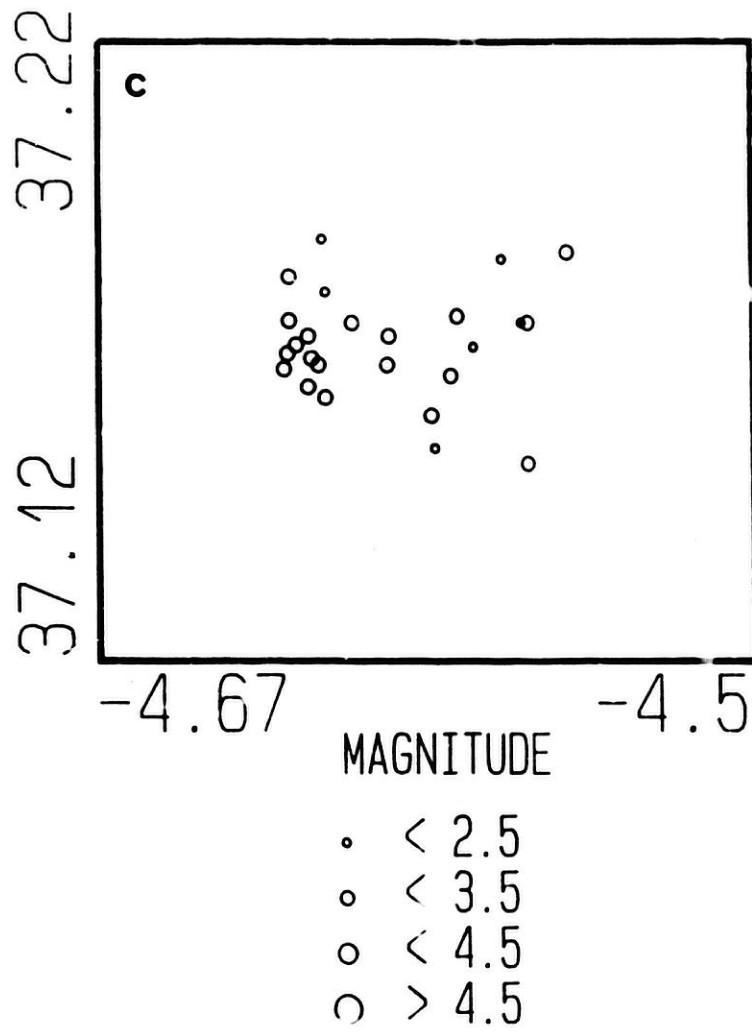


Fig. 7.35 ... continuación.

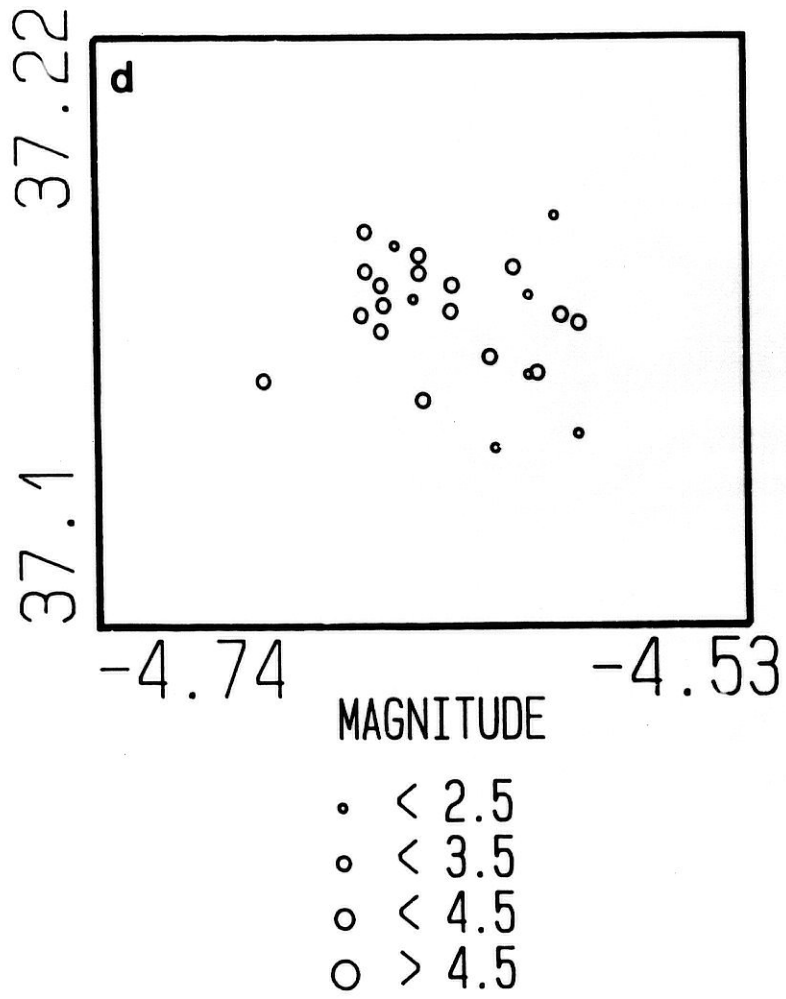


Fig. 7.35 ... continuación.

### *Aplicación de los métodos*

Las orientaciones preferidas detectadas con el MTP, una vez que se ha efectuado la corrección del efecto de forma han sido 20 (tabla VII-5). Para determinar cuáles son las más significativas se construye el histograma de la figura 7.39 que nos informa acerca de la importancia relativa de las tendencias; en este histograma se representan las contribuciones individuales de los sismos a la formación de un determinado plano característico. Como puede apreciarse la tendencia número 20 ( $Buz = 7$  y  $Azm = 347$ ) es la más importante y la siguen la 16, la 19, la 14 y la 2 (fig. 7.40). Debe tenerse en cuenta que en este caso no se ha obtenido una tendencia que destaque notablemente sobre las demás, aunque las que se han mencionado son muy parecidas entre si; esto se pondrá de manifiesto al intentar establecer el Límite de Sismos ( $L_s$ ). Obsérvese además que las orientaciones que hemos determinado mediante ACPT vuelven a encontrarse.

En la figura 7.41a se han representado la contribución de cada sismo de cada una de las tendencias frente al sismo en cuestión para determinar el  $L_s$ . Como puede apreciarse no es posible separar unas tendencias de las otras; por ello se han representado las dos más relevantes aparte (fig. 7.41b y c) y se tomarán todos los sismos que contribuyen a su formación: en el primer caso 32 y en el segundo 26. Estos sismos se representan en la figura 7.42a y b. Puede verse que los alineamientos de los sismos encontrados se ajustan bastante bien a las tendencias representadas por los planos 20 y 16.

#### **IV.5. Discusión**

El método ACPE proporciona como plano promedio de fractura más importante el que se presenta en la figura 7.31c. Este es el plano que obtendríamos con el método ACPT si se tomara como valor para la ventana móvil  $K = 50$  sismos, lo cual puede apreciarse claramente en la figura 7.33a. Este hecho indica que la aplicación de ambos

métodos de análisis coinciden en señalar la misma tendencia dominante en la fracturación de la zona de estudio. En este sentido, como ya se ha observado anteriormente, los métodos ACPE y ACPT son complementarios y puede usarse conjuntamente.

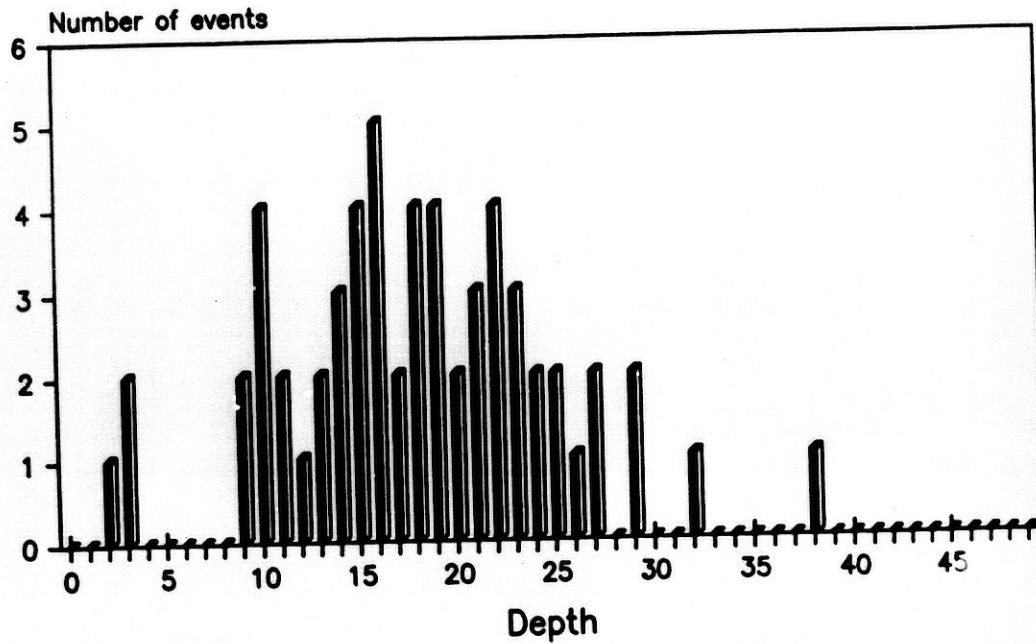
Si se desea estimar además otras orientaciones menos relevantes pero que también existen en la zona, el método ACPT es más sensible en este aspecto permitiendo encontrar más planos que el método ACPE. Esto se demuestra en el hecho los planos secundarios que aparecen en la figura 7.31 (el a y el b) también han sido encontrados (junto a otros) por medio de la aplicación del ACPT (fig. 7.34).

Aunque estos resultados son importantes, lo más relevante se encuentra en el análisis de la evolución temporal del proceso de fractura. La figura 7.34 muestra los planos promedio que se han conseguido uniendo elipsoides consecutivos que presenten características similares según el criterio anteriormente adoptado. Como se ha señalado los más significativos son el 3, construido con 8 elipsoides, el 10 con 6, y el 13 con 5. El plano número 9, construido con 4 elipsoides puede también ser destacado por apartarse de la tendencia más o menos generalizada que se aprecia en el resto de las proyecciones. En las figuras 7.35a-d se presentan los sismos asociados a cada uno de los elipsoides cuyos planos son los anteriormente mencionados (3, 10, 6 y 13). Esta presentación permite visualizar en cuatro instantes de tiempo cual era la situación de actividad sísmica en la zona.

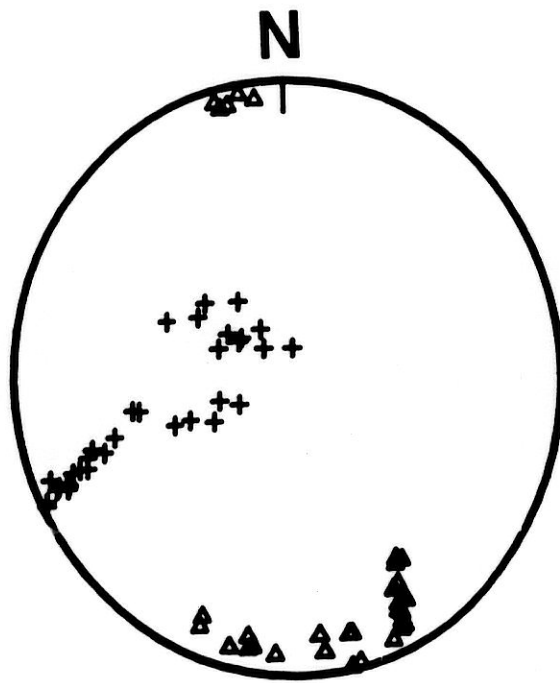
La figura 7.35a presenta el primer estadio de la ruptura. La tendencia más importante encontrada es un plano N 70 E. Esta orientación comprende a 8 elipsoides que suponen un total de 28 sismos. El avance de los sismos a lo largo de este plano se mantuvo aproximadamente durante las seis primeras horas de la serie. A partir de este



## Depth Bar Diagram



**Fig. 7.36** *Histograma de profundidad para la serie de Antequera. Con ayuda de este diagrama podemos ver en qué rango de profundidad se encuentran la mayoría de los eventos; en este caso, entre los 10 y 30 km. Si se repite el estudio anterior con los sismos dentro de este rango de profundidad pueden detectarse posibles influencias de terremotos más profundos que 30 km y más superficiales que 10 km.*



*Fig 7.37* Distribución de polos de los planos asociados a distintos ELR usando sólo los sismos comprendidos entre 10 y 30 km.

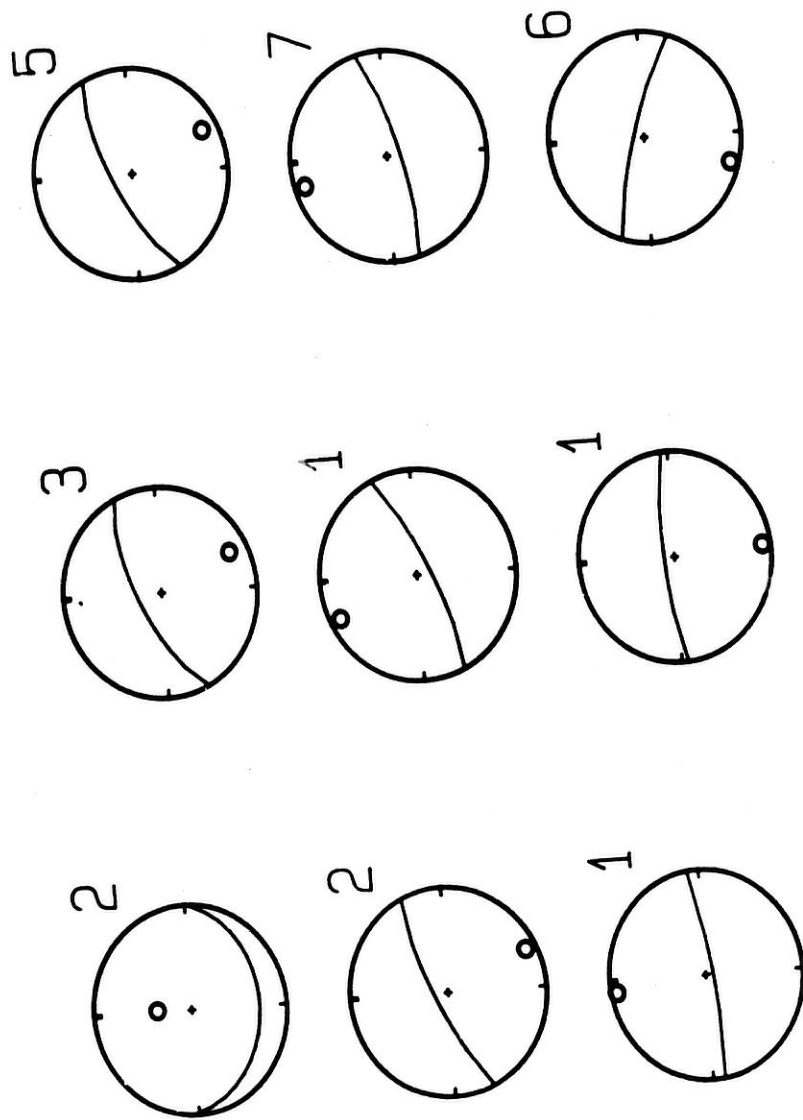
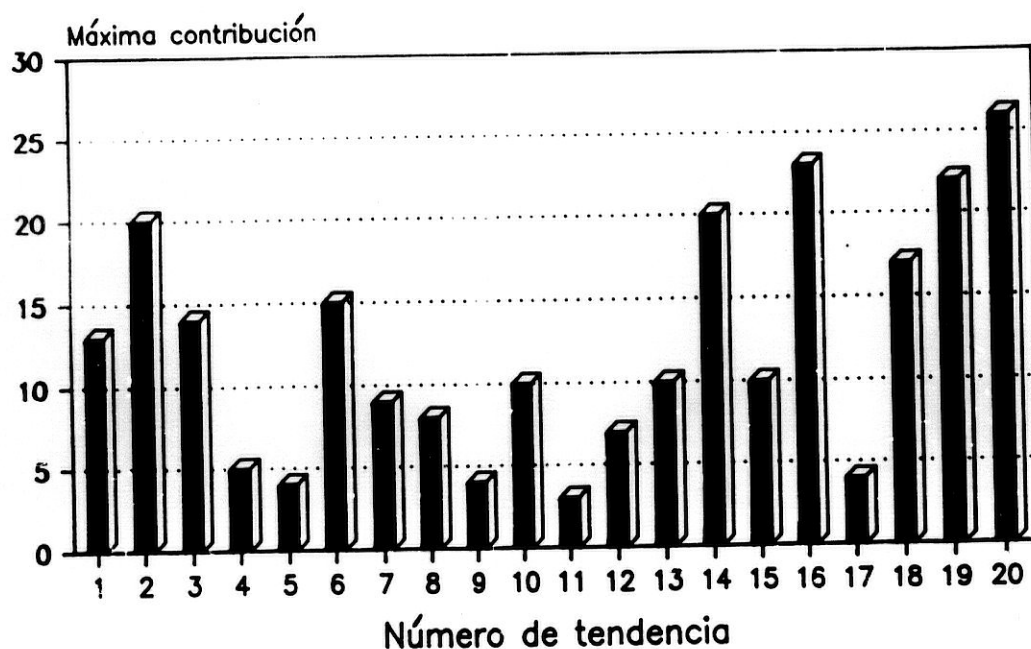


Fig 7.38 La evolución temporal del proceso de fracturación realizada sólo con los sismos comprendidos entre 10 y 30 km. Se observa que la tendencia N-S desaparece por lo que se concluye que debe estar ligada a terremotos mas superficiales.

## Detección de tendencias



**Fig. 7.39** *Histograma para la detección de tendencias mediante el MTP en el caso de la serie de Antequera. Con la ayuda de este histograma (véase fig. 7.23 para una explicación) pueden determinarse las tendencias más significativas de las detectadas por el método MTP. Para la serie de Antequera éstas son la 20, la 16, la 19, la 14 y la 2. Los parámetros de cada una de ellas pueden verse en la tabla VII-6.*

Aplicación de los métodos

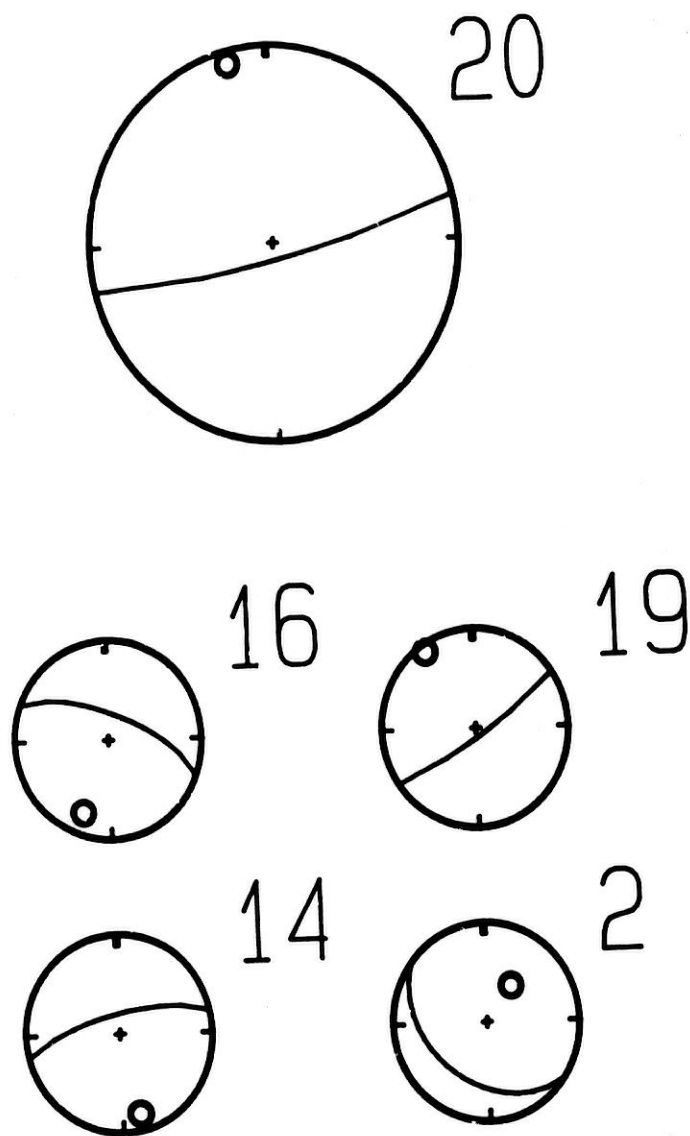


Fig. 7.40 Tendencias más notables encontradas con el MTP en el caso de la serie de Antequera. El plano más importante es un N 80 E buzando al SE; con una orientación similar (N 60 E y N 80 E) aparecen los planos de las tendencias número 19 y 14, aunque con ligeros cambios en el buzamiento. Las otras tendencias son la 16 y la 2 que son semejantes en acimut (N 45-65 W) aunque difieren en el buzamiento.

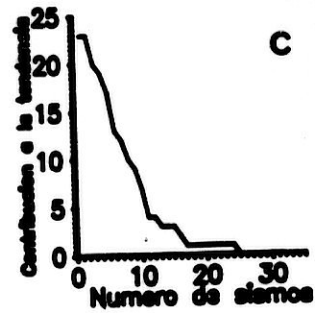
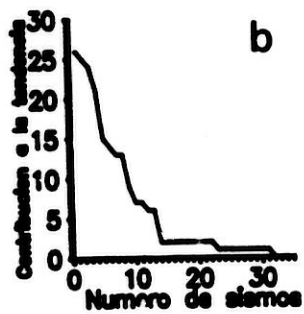
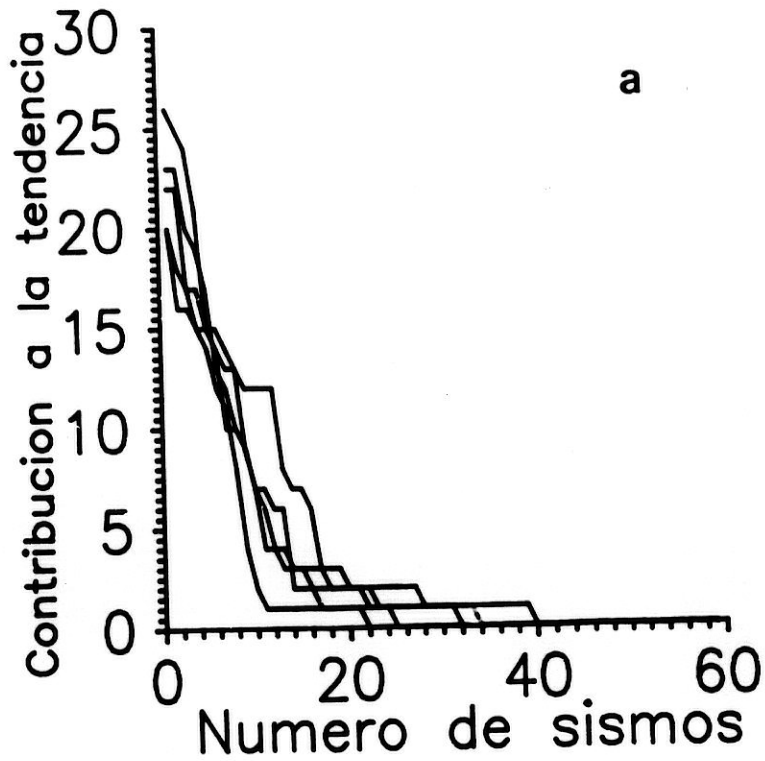


Fig. 7.41 (a) Distintas gráficas de las contribuciones de los sismos a la formación de las tendencias principales de la serie de Antequera. Como puede apreciarse no es posible establecer un Límite de Sismos para ninguna de ellas, por lo que se escogen todos los sismos que contribuyen a las tendencias más importantes, la número 20 y 16 (tabla VII-6). Por ello, se han tomado los 32 sismos que constituyen la tendencia número 20 (gráfica b) y los 25 de la 16 (gráfica c).

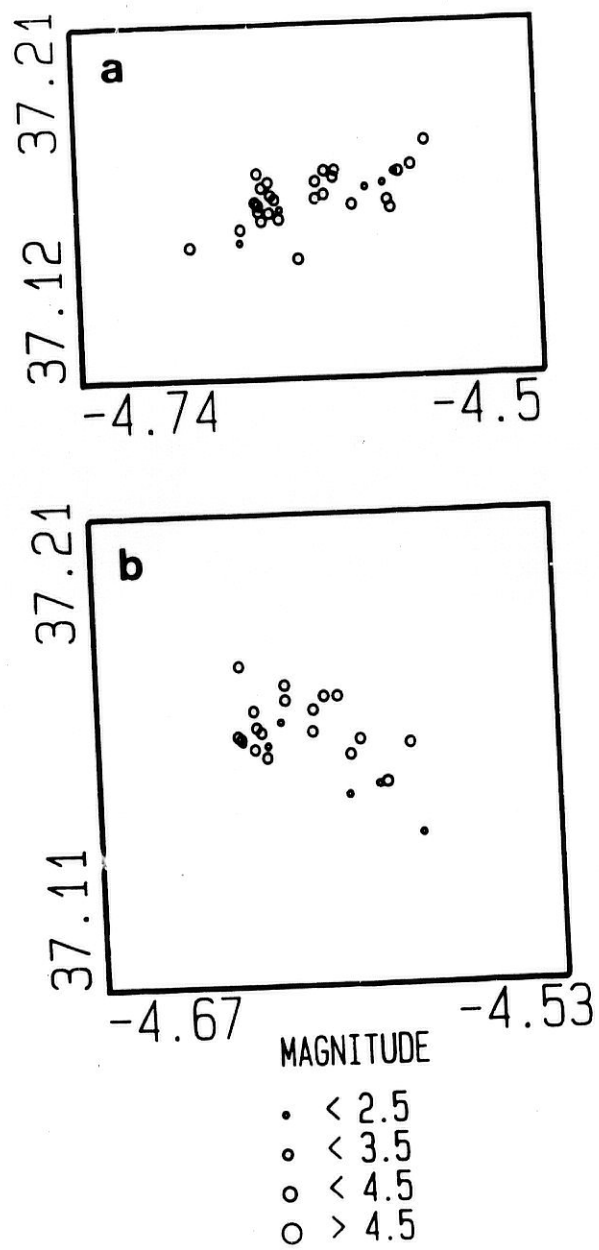


Fig. 7.42 (a) Sismos asociados a la tendencia número 20 de la serie de Antequera por el método MTP. (b) id para la tendencia número 16.

momento la migración de eventos tuvo lugar en esta misma dirección y la que se presenta en el noveno plano de la figura 7.34, esto es, aproximadamente N-S. En el mapa epicentral correspondiente (fig. 7.35b) puede apreciarse que los sismos parecen ahora distribuirse en dos alineaciones que forman una "V". En la figura 7.35c se aprecia la consolidación de este nuevo frente de avance a la vez que continúa el original. La última orientación destacada, figura 7.35d, agrupa a 25 sismos y aparece, aproximadamente, a las 16 horas del inicio de la serie. Este último estadio del proceso parece finalizar con planos que tienden a situarse nuevamente en orientaciones parecidas a las que originaron el proceso, aunque puede apreciarse en la construcción de este plano la influencia que tienen los sismos de la segunda fractura.

La situación espacial del centro de los elipsoides más destacados indica que fueron trasladándose de manera sensible a latitudes más septentrionales, siendo despreciable la variación en longitud. En cuanto a la profundidad, se ha encontrado que los primeros elipsoides eran más superficiales que los últimos, apreciándose variaciones de unos 3 km (Tabla VII-6).

El método MTP confirma las tendencias encontradas con el ACPE y el ACPT. Como hemos visto ambas tendencias conforman una forma de "V" muy abierta. La aplicación conjunta de los tres métodos permite modelar de forma clara el proceso de ruptura en los materiales que ocasionaron la serie.



*Conclusiones*

**CAPITULO OCTAVO**

**CONCLUSIONES**

## CONCLUSIONES

En esta Tesis Doctoral se ha mostrado que los sistemas de fallas sísmicamente activos están constituidos por múltiples planos de fracturas, que forman tanto superficies de falla, unas siguiendo unas direcciones predominantes que se corresponden con los sistemas de fallas principales, y otros menos importantes formando superficies de fallamiento subsidiarias íntimamente ligadas a las primeras y cuya fracturación está fuertemente condicionada por el comportamiento de las primeras, que el proceso de fallamiento de ambos sistemas evolucionan en el tiempo que dura la serie o enjambre sísmico adaptándose a la redistribución local de esfuerzos. El propósito fundamental de esta Tesis ha sido desarrollar métodos que permitan la caracterización de los sistemas de fallas activadas por terremotos a partir de la distribución hipocentral de eventos, y su ocurrencia en el tiempo y aplicar estos métodos tanto a modelos teóricos como a series sísmicas reales.

Para ello:

- se ha estudiado la relación existente entre los fenómenos de fracturación en la parte frágil de la Litosfera y la distribución de terremotos y microterremotos en torno a la ruptura. De este estudio se ha concluido que los modelos actuales de fracturación abandonan su planteamiento planar y proponen estructuras más complejas al incluir asperezas, barreras y heterogeneidades diversas. En ocasiones esta complejidad se ha traducido en nuevas formulaciones teóricas como es el caso de la geometría fractal.

- se ha puesto de manifiesto que la generación de una falla simple va asociada a la creación de cracks ténsiles que juegan un papel decisivo en la generación de fallas subsidiarias y de una sismicidad característica fuera de la falla principal. Con este

### *Conclusiones*

estudio se concluye que la distribución de sismos en una región está asociada no sólo a un plano principal de fractura, sino también a otras zonas, siendo necesario el estudio de la morfología del sistema de fallas desde el punto de vista de su consideración como una red de fracturas interconectas entre sí, con distintas tendencias que pueden evolucionar temporalmente.

- se han mostrado análisis pormenorizados y en detalle de distintas series sísmicas en el mundo y corroborando la existencia de planos de fractura principal y otras secundarias de menor relevancia que se han activado o se han creado como consecuencia del reajuste de esfuerzos en la zona tras el evento mayor.

Como conclusiones metodológicas se destacan:

\* La presentación de dos métodos para el análisis de la morfología de un sistema de fallas activo: el Método de las Componentes Principales (ACP) y el Método de los Tres Puntos (MTP). Ambos métodos analizan espacio-temporalmente la sismicidad de una serie de terremotos.

El ACP se ha desarrollado desde dos puntos de vista, el espacial y el espacio-temporal. El método espacial ACPE es completamente original en esta Tesis y permite encontrar las tendencias principales y las subsidiarias de un sistema de fallas activado por una serie sísmica. El método espacio-temporal ACPT permite estudiar además como evoluciona en el tiempo la ruptura, permitiendo un modelado del posible comportamiento tectónico de la zona. Ambos métodos incorporan en su análisis propiedades de dependencia espacial, temporal y también energética, lo que además de la potencia matemática del método añade propiedades físicas del proceso.

El Método de los Tres Puntos (MTP) igual que el ACPE, averigua las tendencias principales y las subsidiarias. Se ha presentado en esta Tesis una nueva forma de aplicación del MTP para permitir determinar los sismos que constituyen una tendencia, lo que ha hecho posible clasificar la actividad sísmica atendiendo a las fallas que la generan.

La implementación en computador de los métodos que se proponen para el análisis morfológico de un sistema de fallas sísmicamente activo se ha llevado a cabo mediante la realización de una serie de programas de ordenador que ejecutan los cálculos necesarios. Los programas que se han desarrollado han sido implementados en un PC, permitiendo su adaptación a cualquier modelo compatible o a ordenadores más potentes para el caso de muestras de sismos grandes.

\* En la realización de los programas para el análisis completo mediante ACPE y ACPT se ha aplicado un algoritmo de diagonalización basado en el método de rotaciones de Jacobi. Estos programas denominados ACPESP y ACPTEM respectivamente y han sido desarrollados junto con un conjunto de rutinas de representación gráfica de resultados utilizando proyecciones equiareales y representaciones tridimensionales.

Para la aplicación práctica del Método de los tres Puntos y debido a la gran cantidad de resultados parciales que hay que analizar se han desarrollado varios subprogramas que se ejecutan encadenadamente para su aplicación con computadores tipo PC. La incorporación de una distancia mínima y una distancia máxima en la formación de ternas de eventos definitorias de planos ha sido una nueva aportación de este trabajo.

### Conclusiones

\* La utilización de los métodos ACP y MTP con estos programas es prácticamente rutinaria y al aplicarlos a una serie sísmica, es posible reconocer de forma inmediata las tendencias dominantes en el fenómeno de fracturación y como va evolucionando la ruptura. Esto permite además obtener información acerca del mecanismo focal de un terremoto a partir de la distribución espacial de las réplicas, muy importante sobre todo en sismos ocurridos fuera de la red de estaciones de registro.

\* Se ha efectuado una comprobación de la capacidad de los métodos ACPE, ACPT y MTP construyendo muestras sintéticas de sismos que a la vez proporcionarán información acerca de la importancia de los distintos parámetros que intervienen en el análisis.

\* Se ha desarrollado una forma original de evaluación de la propagación de los errores que han concluido con la construcción de unas "curvas de calibración de errores" que nos ayudan a determinar la fiabilidad de los datos obtenidos. Este estudio ha permitido establecer un amplio margen de error para los acimutes encontrados tras la aplicación del método y un margen suficiente para los buzamientos en el caso de las series estudiadas.

Se han aplicado los tres métodos aquí presentados a dos series sísmicas y un enjambre: la secuencia de terremotos de Superstition Hills (1987) en California, la serie de Loja (1985) en la depresión de Granada y la serie de Antequera (1989) en la provincia de Málaga. Las conclusiones prácticas son:

\* Los resultados de la aplicación de los métodos a la serie de Superstition Hills ha revelado la existencia de dos tendencias principales que fueron consecutivas en el tiempo: una N 30-40 E y otra N 45 W. Estas dos tendencias están asociadas a las fallas

de Elmore Ranch y a la de Superstition Hills. Los buzamientos obtenidos han sido muy verticales: en ambos casos 73 grados.

\* Los resultados de la aplicación de los métodos al enjambre de Loja revela la existencia de una tendencia dominante N 60 W con buzamiento al NE. El análisis de esta serie ha puesto de manifiesto de forma clara la gran importancia que tiene la elección de la magnitud umbral, es decir, de un parámetro energético que determine las dimensiones y orientación de las fallas principales.

\* Los resultados de la aplicación de los métodos a la serie de Antequera revela la presencia de dos tendencias dominantes: una N 70 E que evolucionó a N 60 W teniendo la distribución final de sismos aspecto de "V". Este hecho sugiere la presencia de una barrera geométrica que obligaría a que la ruptura cambiara de dirección.

*Apéndices*

**APENDICES**

A.M. Posadas

**APENDICE A: MATRICES DEFINIDAS POSITIVAS**



Apéndices

APENDICE A: MATRICES DEFINIDAS POSITIVAS.

En este apéndice se van a dar las demostraciones de los resultados teóricos 1, 2 y 3 enunciados en el tercer capítulo.

**Resultado teórico 1.** Si  $A$  es una matriz definida positiva entonces no es singular, esto es, su determinante es distinto de cero.

*Demostración.* En efecto; en otro caso, la ecuación:

$$(A-1) \quad A x = 0$$

tendría una solución no trivial y para ésta sería  $\epsilon(x) = 0$ . *Qued erat demonstrandum.*

**Resultado teórico 2.** Sea  $A \in M_n(\mathbb{R})$  simétrica (por tanto, sus valores propios son todos reales). Entonces la forma cuadrática asociada a  $A$  es definida positiva si y sólo si dichos valores propios son positivos.

*Demostración.*

Como la matriz  $A$  tiene todos sus valores propios positivos, entonces existe una matriz ortogonal de coeficientes reales tal que (Romero, 1986):

$$(A-2) \quad P^t A P = D = (\lambda_i), \quad i = 1, 2, \dots, n$$

siendo:

$$(A-3) \quad \lambda_i \in \mathbb{R} \quad \forall i \in 1, 2, \dots, n$$

Dos resultados se van a obtener a partir de la ortogonalidad de la matriz  $P$ . En primer lugar, por ser  $P$  ortogonal:

$$(A-4) \quad P P' = I$$

con lo cual, multiplicando (A-2) a la izquierda por  $P$  se tiene:

$$(A-5) \quad A P = P D$$

Si ahora se multiplica a la derecha por  $P'$ , se obtiene:

$$(A-6) \quad A = P D P'$$

Utilizaremos este resultado posteriormente.

En segundo lugar, la ortogonalidad de la matriz  $P$  refleja un cambio de base entre bases ortogonales; por tanto, establece una biyección entre los elementos del espacio  $\mathbb{R}^n$  referidos a una y otra base. Para cualquier vector  $x$  de  $\mathbb{R}^n$  existirá un  $y$  del mismo espacio tal que:

$$(A-7) \quad x = P y, \quad \forall x \in \mathbb{R}^n$$

es decir, que:

$$(A-8) \quad x' = y' P'$$

Probemos a continuación que si la matriz  $A$  es definida positiva entonces sus

### Apéndices

autovalores son todos positivos. En efecto; si  $A$  es definida positiva, para cualquier  $x$  de  $\mathbf{R}^n$  se tiene que:

$$(A-9) \quad x' A x \geq 0$$

y teniendo en cuenta (A-7) y (A-8):

$$(A-10) \quad y' P' A P y \geq 0$$

Sustituyendo en (A-10) la expresión (A-6) se llega a:

$$(A-11) \quad y' D y \geq 0$$

es decir:

$$(A-12) \quad \lambda_1 y_1^2 + \lambda_2 y_2^2 + \dots + \lambda_n y_n^2 \geq 0$$

Como esto es para cualquier  $x$  de  $\mathbf{R}^n$  tomése aquel para el cual el  $y$  correspondiente valga:

$$(A-13) \quad y' = (1, 0, \dots, 0)$$

en cuyo caso, sustituyendo en (A-12), obtendríamos que el primer autovalor es positivo. Si el proceso se repite con los  $y$  apropiados probaríamos que todos los autovalores son mayores o iguales que cero.

La implicación contraria es trivial. *Qued erat demonstrandum.*

**Resultado teórico 3.** Sea la matriz  $A$  simétrica definida positiva de orden  $N$  y  $B$  una matriz real de orden  $p \times N$  con  $p \leq N$ . Entonces la matriz  $\tau(A)$  dada por:

$$(A-14) \quad \tau(A) = B A B'$$

es definida positiva si el rango de  $B$  vale  $p$  o es semidefinida positiva si el rango de  $B$  es menor estrictamente que  $p$ .

*Demostración.* En el primer caso ( $\text{rango}(B) = p$ ) la matriz  $B A B'$  es definida positiva de orden  $p$ . En efecto;  $B A B'$  es simétrica de orden  $p$  (Romero, 1986). Sea  $y \in \mathbb{R}^p$  un vector no nulo y sea  $x = B'y \in M_{N \times 1}(\mathbb{R})$ . Como  $\text{rango}(B') = \text{rango}(B) = p$  se tendrá que  $x$  no es el vector  $0$ . Para probarlo basta considerar la aplicación lineal:

$$(A-15) \quad f : \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}^N$$

cuya matriz asociada respecto a las bases ordenadas usuales de  $\mathbb{R}^p$  y  $\mathbb{R}^N$  es  $B'$  y tener en cuenta que (Kahn, 1970):

$$(A-16) \quad \dim(\text{Ker } f) + \text{rango } f = p$$

Esto prueba que  $y' B A B' y > 0$  para cualquier vector  $y \in \mathbb{R}^p - \{0\}$  y en consecuencia que  $B A B'$  es una matriz definida positiva.

En el segundo caso ( $\text{rango}(B) < p$ ) existirán vectores  $y \in \mathbb{R}^p$  no nulos tales que  $B'y = 0$ ; así, en este caso sólo podrá asegurarse que  $B A B'$  es semidefinida positiva.  
*Qued erat demonstrandum.*

**APENDICE B: METODOS DE DIAGONALIZACION DE MATRICES**

## APENDICE B: METODOS DE DIAGONALIZACION DE MATRICES

La aplicación del método ACP en cualquiera de sus variantes (ACPE o ACPT) conlleva la diagonalización de muchas matrices de dispersión. Para elegir el algoritmo adecuado que realice esta labor se ha procedido a una revisión bibliográfica de los algoritmos más comunes. En este apéndice se da un breve repaso a dicha revisión que de manera condensada puede verse en el capítulo 5 en la figura 5.1.

Gastinel (1975) realiza la siguiente clasificación de los métodos:

- *Métodos que determinan de forma directa la ecuación característica.* Se trata de los métodos que utilizan directamente el teorema de Cayley-Hamilton (Wilkinson, 1965), el método de Le Verrier (1840), el método de Le Verrier transformado (1949) (también denominado de Faddeev-Frame o de Souriau), el método de Samuelson (1942) y el método de la partición (p.e. en Gastinel, 1975).

- *Métodos para obtener el polinomio característico por transformación de la matriz.* Para matrices no necesariamente simétricas los métodos son los de transformación mediante matrices de polinomio minimal de segundo grado (Gastinel, 1975), que a su vez se divide en reducciones a la forma de Frobenius (Wilkinson, 1965), como por ejemplo, el método de Danilevskii (1937) y reducciones a una forma tridiagonal (Wilkinson, 1965), como por ejemplo, el método de Householder (1964), y el método de Lanczos (1950). Para matrices simétricas, el método particular es el de Givens (1954).

- *Métodos de cálculo de valores y vectores propios por iteraciones.* Los métodos que se encuentran en este apartado son el de la potencia (Wilkinson, 1965; Wilkinson & Reinsch, 1971; Mason, 1986) y método de deflación (Wilkinson, 1965; Wilkinson &

## Apéndices

Reinsch, 1971; Mason, 1986).

- *Métodos para matrices hermíticas*. Para este tipo especial de matrices los métodos de Jacobi (1846) y el de Ritz (1958) o Francis (1961) son los apropiados.

Los métodos clásicos de diagonalización de matrices y que más ampliamente utilizados han sido son el de Krilov (1931), el de Danilevskii (1937), el de Samuelson (1942), el método del escalador (Morris & Head, 1944), el de Le Verrier (1840; Faddeev & Sominskii, 1949) y el de interpolación (Wilkinson, 1965; Wilkinson & Reinsch, 1971; Faddeeva, 1973).

El método de Danilevskii requiere el menor número de operaciones para efectuar el proceso completo de cálculo. Este método asegura un grado de precisión relativamente alto para los coeficientes buscados, que se determinan todos simultáneamente, y que por tanto tienen la misma precisión aproximadamente. La existencia de raíces múltiples de la ecuación característica no constituye un obstáculo para el empleo de este método (Wilkinson, 1965).

El método de Krilov requiere un volumen de cálculo algo mayor que el de Danilevskii. Sin embargo, se puede recomendar este método gracias a su simplicidad y a la compacidad del proceso de cálculo. Su principal inconveniente está en que no puede usarse si existen raíces múltiples de la ecuación característica, permitiendo sólo la determinación de los coeficientes del polinomio mínimo (Faddeeva, 1973).

El método de Samuelson difiere poco, en lo referente a su idea, del de Krylov. Su gran ventaja es la uniformidad completa de las operaciones, lo que puede hacerle muy útil en una implementación informática (Faddeeva, 1973).

*A.M. Posadas*

El método del escalador resuelve el problema de forma más general, ya que no sólo encuentra los autovalores, sino que también determina los autovectores. Requiere un número de operaciones distintas en cada aplicación por lo que su eficiencia depende del caso tratado. Es un método que hace posible una precisión significativa y garantiza la exactitud de los resultados (Gastinel, 1975).

El método de Le Verrier y el de la interpolación, no pueden competir con los anteriores, ya que el número de operaciones a efectuar en estos dos métodos es sustancialmente mayor. La ventaja del método de la interpolación es su generalidad (Wilkinson, 1975).

En la actualidad, el uso del ordenador ha hecho que proliferen abundantes variaciones de estos y otros métodos de forma que los resultados no pueden clasificarse de manera clara en ninguno de los apartados propuestos por Gastinel.

Otros métodos más elaborados y refinados son los algoritmos QR y LR. El primero de ellos, desarrollado por Rutishauser (1958), da una reducción de una matriz general a una matriz triangular mediante transformaciones no unitarias (Wilkinson, 1965). Este último autor opina que este método es el avance más significativo desde que comenzó el uso de los ordenadores. El algoritmo QR, desarrollado por Francis (1961), es muy semejante al algoritmo LR, pero está basado en el uso de transformaciones unitarias.



*Apéndices*

**APENDICE C: AUTOVECTORES A LA IZQUIERDA Y A LA DERECHA**

**APENDICE C: AUTOVECTORES POR LA IZQUIERDA Y POR LA DERECHA.**

En este apéndice se demostrarán los resultados teóricos que se propusieron y usaron en el capítulo quinto.

**Resultado teórico 1.** Los autovalores por la derecha y por la izquierda de una matriz son los mismos; además, dado un autovalor, su autovector asociado por la derecha es el transpuesto del asociado por la izquierda de la matriz transpuesta.

*Demostración.* Sea  $x$  un autovector por la izquierda de la matriz  $A$ . Entonces:

$$(C-1) \quad x A = \lambda x$$

Tomando transpuestas en esta expresión:

$$(C-2) \quad (x A)' = (\lambda x)' \quad \rightarrow \quad A' x = \lambda x$$

es decir, que cada autovector por la izquierda es el transpuesto de un autovector por la derecha de la matriz  $A'$ . Los autovalores por la izquierda y por la derecha son los mismos. *Qued erat demonstrandum.*

**Resultado teórico 2.** Para una matriz simétrica los autovectores por la derecha y por la izquierda son transpuestos unos de otros.

*Demostración.* Si la matriz  $A$  es simétrica entonces:

$$(C-3) \quad A' = A$$

### Apéndices

con lo cual, mediante un razonamiento análogo al usado en el resultado primero:

$$(C-4) \quad \mathbf{x} A = \lambda \mathbf{x} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{x} A' = \lambda \mathbf{x} \quad \Rightarrow \quad (\mathbf{x} A')' = \lambda \mathbf{x}' \quad \Rightarrow \quad A \mathbf{x}' = \lambda \mathbf{x}'$$

*Qued erat demonstrandum.*

**Resultado teórico 3.** La matriz cuyas filas son los autovectores por la izquierda es la matriz inversa de la matriz cuyas columnas son los autovectores por la derecha.

*Demostración.* Se notará  $X_D$  la matriz cuyas columnas son los autovectores por la derecha de la matriz  $A$ , y se notará  $X_I$  la matriz cuyas filas son los autovectores por la izquierda. Puede escribirse entonces:

$$(C-5) \quad A X_D = X_D \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_N)$$

$$(C-6) \quad X_I A = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_N) X_I$$

Multiplicando a la izquierda la primera de estas ecuaciones por la matriz  $X_I$ , la segunda a la derecha por  $X_D$  y restando tenemos:

$$(C-7) \quad (X_I X_D) \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_N) = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_N) (X_I X_D)$$

Esto significa que  $X_I X_D$  conmuta con una matriz diagonal, la de los autovalores (Romero, 1986). Pero como las únicas matrices que conmutan con una matriz diagonal de elementos distintos son aquellas que a su vez son diagonales (Wilkinson, 1965). Así, si los autovalores son no degenerados, cada autovector por la izquierda es ortogonal a todos los autovectores por la derecha, excepto su autovector correspondiente, y viceversa. Puede normalizarse consiguiendo además que sean ortonormales.

A.M. Posadas

Si algunos autovalores están degenerados puede afirmarse también que los autovectores por la derecha y por la izquierda son ortogonales u ortonormales (Stoer et al, 1980). La demostración de esta afirmación está basada en el hecho de que los autovectores correspondientes a un autovalor degenerado son linealmente dependientes entre si.

Por tanto, en cualquier caso puede asegurarse que la matriz cuyas filas son los autovectores por la izquierda es la matriz inversa de la matriz cuyas columnas son los autovectores por la izquierda:

$$(C-8) \quad X_l = X_D^{-1}$$

$$(C-9) \quad X_D = X_l^{-1}$$

*Qued erat demonstrandum.*

Apéndices

**APENDICE D: TRANSFORMACIONES DE SEMEJANZA**

APENDICE D: TRANSFORMACIONES DE SEMEJANZA

Las transformaciones de semejanza juegan un papel fundamental en los procesos iterativos para la diagonalización de matrices. En este apéndice se van a definir tales transformaciones y se enunciarán algunas de las propiedades que las hacen tan útiles.

**Matrices semejantes.** Una matriz B es semejante a otra A si existe una matriz C no singular tal que:

$$(D-1) \quad B = C^{-1} A C$$

diciéndose entonces que la matriz B se obtiene de A por una transformación de semejanza y que esta viene representada por C.

**Propiedades.** Algunas de las propiedades de las transformaciones de semejanza son las siguientes. Las dos primeras son evidentes (Faddeeva, 1973) y a partir de ellas se demuestra la tercera.

**Propiedad 1.**

$$C^{-1} A_1 C + C^{-1} A_2 C + \dots + C^{-1} A_n C = C^{-1} (A_1 + A_2 + \dots + A_n) C$$

**Propiedad 2.**

$$C^{-1} A_1 C C^{-1} A_2 C \dots C^{-1} A_n C = C^{-1} (A_1 A_2 \dots A_n) C$$

**Propiedad 3.**

$$f(C^{-1} A C) = C^{-1} f(A) C, \text{ siendo } f(\lambda) \text{ un polinomio.}$$

### Apéndices

La cuarta propiedad se intuye de la tercera y es la más interesante desde el punto de vista de los procesos de diagonalización.

#### *Propiedad 4.*

Sean A y B dos matrices semejantes. Entonces tienen el mismo polinomio característico.

#### *Demostración.*

Si A y B son semejantes existe una matriz no singular C tal que:

$$(D-2) \quad B = C^{-1} A C$$

Por otra parte, la ecuación secular para B se expresa como:

$$(D-3) \quad \det(B - \lambda I) = 0$$

Haciendo uso de (D-2) se tiene que:

$$(D-4) \quad \det(C^{-1} A C - \lambda I) = 0$$

que puede expresarse como:

$$(D-5) \quad \det(C^{-1} A C - \lambda C^{-1} I C) = 0$$

con lo que, usando la primera propiedad:

$$(D-6) \quad \det(C^{-1} (A - \lambda I) C) = 0$$

A.M. Posadas

Finalmente, teniendo en cuenta las propiedades de los determinantes:

$$(D-7) \quad \det C^{-1} \det(A - \lambda I) \det C = 0$$

es decir:

$$(D-8) \quad \det(A - \lambda I) = 0$$

*Qued erat demonstrandum.*



*Apéndices*

**APENDICE E: LOS PROGRAMAS ACPESP Y ACPTM**

## APENDICE E: LOS PROGRAMAS ACPEP Y ACPTM

En este apéndice se dan los listados de los programas principales ACPEP y ACPTM. Se comenzará por describir las variables y subrutinas más importantes.

### *Variables.*

- N1: es el número total de sismos en el archivo.
- K1: es la anchura de la ventana de terremotos.
- NN1: es el valor temporal del número total de sismos que se utiliza para que el programa calcule el valor óptimo de la ventana móvil.
- KK1: es el valor temporal de la ventana móvil cuando es el programa quien calcula esta.
- E1: es el valor de la precisión en el cálculo de los autovalores y autovectores.
- M1: es el máximo número de iteraciones que realiza la subrutina correspondiente en el cálculo de los autovalores y autovectores.
- VMY1(j,P): es la coordenada "j" del mayor autovector "p".
- VMN1(j,P): es la coordenada "j" del menor autovector "p".
- AMY1(P): es el mayor autovalor "p".
- AMN1(P): es el menor autovalor "p".

### *Subrutinas.*

- Abre.archivo: abre el archivo seleccionado y cuenta los terremotos que contiene.
- Selec.mag.prof.: selecciona los sismos por magnitud y profundidad. Crea un archivo con ellos.
- Cambia.form.arch: carga una archivo creado por el programa "Sismos" (R.S.A.)

### Apéndices

y le da el formato adecuado.

- Cambia.coordenadas:** pasa de coordenadas geográficas a rectangulares en aproximación de Tierra plana.
- Nuevas.coordenadas:** toma como origen de coordenadas el centroide del conjunto de sismos.
- Calculo.centroide:** calcula el centroide del conjunto de sismos. El origen de coordenadas inicial se toma en el punto de coordenadas 4.5W, 36.5N.
- Ventana.movil:** busca la ventana óptima o propone su elección.
- Scater y Scater0:** se encargan de formar la matriz de dispersión, D.
- Valpropios:** calcula los valores propios y vectores propios en una aproximación peor, pero mas rápida, con el fin de visualizar la ventana óptima de sismos.
- Jacobi:** se encarga de calcular el mayor y menor autovector así como sus correspondientes autovalores.
- Presentación:** da una tabla con los resultados de los autovectores, autovalores y centroide.
- Proyección:** es la responsable del análisis espacial de sismicidad.
- Tiempo:** es la responsable del análisis temporal de sismicidad.
- Optima:** nos da una tabla y construye un fichero para la elección de la ventana móvil óptima.
- Cruz:** dibuja una cruz con las sentencias de "graphix2".
- Triángulo:** dibuja un triángulo con las sentencias de "graphix2".
- Proyección0:** calcula el plano perpendicular al mínimo vector propio.
- Nodal:** dibuja el recuadro y círculos correspondientes a la proyección en el hemisferio inferior.

A.M. Posadas

Redonda: proyecta los polos y planos calculados.

*Listado del programa Principal ACPESP.*

```
*****  
*   PROGRAMA ACPESP   *  
*****
```

(C) A. Miguel Posadas Chinchilla. 1990.

```
DECLARE SUB cabeza ()  
DECLARE SUB abre.archivo (nombre$, numero.sismos!, AAX1!(), AAX2!(), AAX3!())  
DECLARE SUB cambia.coordenadas (lo!(), la!(), x!(), y!(), n!)  
DECLARE SUB calculo.centroide (n!, CX1!(), CX2!(), CX3!(), CXM!, CYM!, CZM!)  
DECLARE SUB nuevas.coordenadas (ncx1!(), ncx2!(), ncx3!(), ncxm!, ncym!, nczm!, n!,  
x!(), y!(), z!())  
DECLARE SUB busca.ventana (y!(), p0!, n1!, e!(), k!(), ventana!)  
DECLARE SUB scater (x!(), D!(), k!(), p0!, xm!())  
DECLARE SUB jacobi (a!(), amy!, amn!, vmy!(), vmn!())  
DECLARE SUB selec.vect (amy6!(), amn6!(), vmy6!(), vmn6!(), vmy7!(), vmn7!(), w1!,  
w2!)  
DECLARE SUB doble.prec (v8!(), x#(), y#(), z#(), dpw!)  
DECLARE SUB param.proy (x#(), y#(), z#(), op#(), az#(), inc#(), ppw!)  
DECLARE SUB clasifica (a#(), b#(), wc!, factor, k(), chaz(), chbu(), celda())  
DECLARE SUB clasibuz (bu#(), i!, j!, celda!(), factor, k(), chbu())  
DECLARE SUB resultados (k!(), az#(), bu#(), xm!(), chaz(), chbu(), w!, xm, ym, zm)  
DECLARE SUB cuadrículas (celda!())  
DECLARE SUB pasa.surfer (celda())  
DECLARE SUB pasa.perspective (celda!())
```

REM \$DYNAMIC

**Bloque de presentación**

MENU:

```
CALL cabeza: LOCATE 1, 36: PRINT "M E N U"  
LOCATE 10, 20: PRINT " I :   I nicializa el archivo "  
LOCATE 12, 20: PRINT " M :   M odifica el archivo "  
LOCATE 14, 20: PRINT " C :   C ambia el archivo a formato ACP "  
LOCATE 16, 20: PRINT " S :   S elección de magnitud y profundidad "  
LOCATE 18, 20: PRINT " A :   A plicación "  
LOCATE 20, 20: PRINT " F :   F in de aplicación "
```

### Apéndices

```
a$ = INPUT$(1)
if a$="i" or a$="I" then call creacion(X1$,Y1$,Z1$,M1$,A1$,-
ME1$,D1$,H1$,MI1$,S1$,NOMBRES1$,LARGO1%)
if a$="m" or a$="M" then call modifica(I1%,X1$,Y1$,Z1$,M1$,A1-
$,ME1$,D1$,H1$,MI1$,S1$,NOMBRES1$,LARGO1%)
if a$="c" or a$="C" then call cambia.form.arch
if a$="s" or a$="S" then call selec.mag.prof
IF a$ = "a" OR a$ = "A" THEN GOTO aplicacion
IF a$ = "f" OR a$ = "F" THEN CLS : END
GOTO MENU
```

aplicacion:

#### Bloque de preparación de datos

```
DIM x(3, 300), y(3, 300), x1(300), x2(300), x3(300), lo1(300), la1(300)
DIM ax1(300), ax2(300), ax3(300), c(20, 20)
DIM vmy1(3, 300), vmn1(3, 300), amy1(300), amn1(300), xm1(3, 300), vmy10(300),
vmn10(300)
DIM e(3, 300), k(300), chaz(300), chbu(300), celda(50, 50)
DIM vmy3(3, 300), xp#(300), yp#(300), zp#(300)
DIM opp#(300), azp#(300), vmn3(3, 300), inc#(300)
```

```
CALL cabeza: LOCATE 1, 30: PRINT "PREPARACION DE DATOS"
CALL abre.archivo(nombre.archivo$, n1, lo1(), la1(), ax3())
CALL cambia.coordenadas(lo1(), la1(), ax1(), ax2(), n1)
CALL calculo.centroide(n1, ax1(), ax2(), ax3(), xm, ym, zm)
CALL nuevas.coordenadas(ax1(), ax2(), ax3(), xm, ym, zm, n1, x1(), x2(), x3())
LOCATE 19, 18: PRINT "    Datos preparados"
```

```
FOR r = 1 TO n1
    y(1, r) = x1(r)
    y(2, r) = x2(r)
    y(3, r) = x3(r)
NEXT r
```

```
LOCATE 22, 35: INPUT "    Ventana espacial = ", ventana
```

**Bloque de diagonalización**

```
CALL cabeza: LOCATE 1, 34: PRINT "DIAGONALIZACION"; ""
LOCATE 18, 28: PRINT " "
LOCATE 19, 28: PRINT " VENTANA NUMERO "
LOCATE 20, 28: PRINT " "
```

```
FOR p = 1 TO n1
  LOCATE 19, 47: PRINT p
  CALL busca.ventana(y(), p, n1, e(), k(), ventana)
  CALL scater(e(), c(), k(), p, xm1())
  CALL jacobi(c(), amy10, amn10, vmy10(), vmn10())
  amy1(p) = amy10
  amn1(p) = amn10
  FOR j = 1 TO 3
    vmy1(j, p) = vmy10(j)
    vmn1(j, p) = vmn10(j)
  NEXT j
NEXT p
SOUND 523, 4: SOUND 1000, 6: SOUND 150, 2
```

**Bloque de resultados**

```
factor = 1 / n1
CALL selec.vect(amy1(), amn1(), vmy1(), vmn1(), vmy3(), vmn3(), n1, w)
CALL doble.prec(vmn3(), xp#(), yp#(), zp#(), w)
CALL param.proy(xp#(), yp#(), zp#(), opp#(), azp#(), inc#(), w)
CALL clasifica(azp#(), inc#(), w, factor, k(), chaz(), chbu(), celda())
CALL resultados(k(), azp#(), inc#(), xm1(), chaz(), chbu(), w, xm, ym, zm)
CALL cuadrículas(celda())
CALL pasa.surfer(celda())
CALL pasa.perspective(celda())
```

**Fin de la aplicación**

```
CLOSE
GOTO MENU
END
```

*Listado del programa principal ACPTEM.*

```
*****  
* PROGRAMA ACPTEM *  
*****
```

(C) A. Miguel Posadas Chinchilla. 1989

rem \$dynamic

**Bloque de presentación**

menu:

```
call cabeza:locate 1, 36 :print "M E N U"  
locate 10, 20:print " I :   I nicializa el archivo "  
locate 12, 20:print " M :   M odifica el archivo "  
locate 14, 20:print " C :   C ambia el archivo a formato ACP"  
locate 16, 20:print " S :   S elección de magnitud y profundidad"  
locate 18, 20:print " A :   A plicación"  
locate 20, 20:print " F :   F in de aplicación"
```

```
a$=input$(1)  
if a$="i" or a$="I" then call creacion(X1$,Y1$,Z1$,M1$,A1$,-  
ME1$,D1$,H1$,MI1$,S1$,NOMBRES1$,LARGO1%)  
if a$="m" or a$="M" then call modifica(I1%,X1$,Y1$,Z1$,M1$,-  
A1$,ME1$,D1$,H1$,MI1$,S1$,NOMBRES1$,LARGO1%)  
if a$="c" or a$="C" then call cambia.form.arch  
if a$="s" or a$="S" then call selec.mag.prof  
if a$="a" or a$="A" then goto aplicacion  
if a$="f" or a$="F" then cls:end  
goto menu
```

aplicacion:

**Bloque de preparación de datos**

```
dim X(3,300), Y(3,300), X1(300), X2(300), X3(300), LO1(300), LA1(300)
dim AX1(300), AX2(300), AX3(300), C(20, 20)
d   i   m           V   M   Y   1   (   3   ,   3   -
00),VMN1(3,300),AMY1(300),AMN1(300),XM1(3,300),VMY10(300),VMN10(300)

call cabeza:locate 1, 30:print"PREPARACION DE DATOS"
call abre.archivo(nombre.archivo$, N1, LO1(), LA1(), AX3(), pronos$)
call cambia.coordenadas(LO1(), LA1(), AX1(), AX2(), N1)
call calculo.centroide(N1, AX1(), AX2(), AX3(), XM, YM, ZM)
call nuevas.coordenadas(AX1(), AX2(), AX3(), XM, YM, ZM, N1, X1(), X2(), X3())
locate 20, 18:print"    Datos preparados"
for i = 1 to 5000:next i:beep
```

**Bloque de elección de ventana**

```
for R=1 to N1
  Y(1,R) = X1(R)
  Y(2,R) = X2(R)
  Y(3,R) = X3(R)
next R
call ventana.movil(Y(), K1, pronos$)
```

**Bloque de diagonalización**

```
call cabeza:locate 1, 34:print"DIAGONALIZACION""
locate 18, 28:print" [ VENTANA NUMERO ] ""
locate 19, 28:print" [ VENTANA NUMERO ] ""
locate 20, 28:print" [ VENTANA NUMERO ] ""

for P=1 to N1-K1+1
  locate 19,47:print P
  call SCATER (Y(), C(), K1, P, XM1())
  call jacobi(C(), AMY10, AMN10, VMY10(), VMN10())
  AMY1(P)=AMY10
  AMN1(P)=AMN10
```



### Apéndices

```
for j=1 to 3
  VMY1(j,P)=VMY10(j)
  VMN1(j,P)=VMN10(j)
next j
next P
sound 523,4:sound 1000,6:sound 150,2
```

### Bloque de resultados

```
mini:
call cabeza:locate 1, 20 :print "    MENU DE RESULTADOS"
locate 10, 20:print "1 --^P Presentación de resultados por "
locate 11, 20:print "    impresora y vuelta al minimenú. "
locate 13, 20:print "2 --^P Análisis del esquema espacial "
locate 14, 20:print "    de sismicidad. "
locate 16, 20:print "3 --^P Análisis del esquema espacio- "
locate 17, 20:print "    temporal de sismicidad. "
locate 19, 20:print "4 --^P Fin del análisis. "
```

```
clx$=input$(1)
if clx$="1" then call presentacion
(k1,N1,VMY1(),VMN1(),AMY1(),AMN1(),XM1())
if CLX$="2" then call sism.espacial (k1,N1,VMY1(),VMN1(),AMY1(),AMN1())
if CLX$="3" then call sism.esp.tem (n1,k1,VMY1(),VMN1(), amy1(), amn1(),
xm1(), xn, ym, zm)
if CLX$="4" then goto final
if CLX$<>"1" or CLX$<>"2" or CLX$<>"3" or CLX$<>"4" then goto MINI
final:
```

### Fin de la aplicación

```
close
goto MENU
end
```

**A.M. Posadas**

**APENDICE F: EL METODO DE LA BURBUJA**

## APENDICE F: EL METODO DE LA BURBUJA.

La ordenación o clasificación de datos consiste en la disposición de los mismos de acuerdo con algún valor o característica. Cuando los datos a ordenar se encuentran almacenados en soportes de almacenamiento (cintas, discos, ...) la ordenación se denomina externa. Por el contrario, si los datos están ordenados en arrays de un determinado programa, la ordenación se denomina interna.

Los métodos de ordenación suelen clasificarse en (Joyanes, 1990):

- directos: método de la burbuja, método de selección, método de inserción, etc.
- avanzados: método shell, método de ordenación rápida, etc.

En el caso de listas pequeñas y moderadas, los algoritmos directos se muestran muy eficaces ya que su codificación no es excesivamente compleja. Sin embargo, en arrays grandes estas ordenaciones directas pueden ser muy ineficaces y se necesitarán métodos de ordenación avanzados.

En el caso que nos ocupa las listas de datos son pequeñas, por lo que se ha implementado el algoritmo más sencillo y eficaz: el método de la burbuja. Este método es uno de los más populares debido a su simplicidad. Se basa en la ordenación por cambio, y su nombre proviene de la semejanza con las burbujas en un depósito de agua donde cada burbuja busca su propio nivel.

Los pasos a efectuar en el caso de ordenación creciente (en el caso de ordenación decreciente sólo habría que cambiar el orden de las comparaciones) son los siguientes:

**A.M. Posadas**

1.- Comparar el primer elemento con el segundo, intercambiándolos si están desordenados; luego se compara el segundo con el tercero, intercambiándose si fuera necesario, hasta llegar al último elemento. De este modo, en la última posición de la lista ha quedado el mayor elemento.

2.- Se repite el paso anterior, pero ahora sólo en los  $n-1$  primeros elementos de la lista. Con esta operación se lleva el segundo elemento mayor de la lista a la posición  $n-1$ .

3.- Se repite el paso 1 ahora con  $n-2$  elementos. El proceso continúa hasta que se han efectuado  $n-1$  pasadas o no hubo cambios en alguna de ellas.

*Referencias*

**REFERENCIAS**

**BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS**

- ABE, K; KANAMORI, H.;** (1979); "Temporal variation of the activity of intermediate and deep focus earthquakes". *Jour. Geophys. Research* 8, 3589-35-95.
- AGTERBERG, F.F.;** (1974); "Geomathematics". Elsevier Scientific Publishing Company.
- AKI, K.;** (1967); "Scaling law of seismic spectrum". *J. Geophys. Research*, 72, 1217-1231.
- AKI, K.;** (1968); "Seismic displacements near a fault". *J. Geophys. Research*, 73, 5359-5375.
- AKI, K.;** (1978); "A quantitative model of stress in a seismic region as a basis for earthquake prediction", in *Proceedings of Conference III: fault mechanics and its relation to earthquake prediction*, Open File Rep. 78-380, pp 7-13. U.S. Geological Survey, Menlo Park.
- AKI, K.;** (1979); "Characterization of barriers on an earthquake fault", *J. geophys. Res.* 84, 6140-6148.
- AKI, K.;** (1981); "A probabilistic syntesis of precursory phenomena", in *Earthquake Prediction* (Simpson, d.w. & Richards, P. eds.), AGU, Washintong D.C., pp 556-574.
- AKI, K.;** (1984); "Asperities, barriers, characteristic earthquakes and strong motion prediction". *J. Geophys. Res.*, 89, No B7, 5867-5872.
- ALGUACIL, G.;** (1986): "Los intrumentos de una Red Sísmica Telemétrica para Microterremotos. La Red Sísmica de la Universidad de Granada". Tesis Doctoral. 232 pp. Universidad de Granada.
- ALGUACIL, G; J.M. GUIRAO; F. GOMEZ; F. VIDAL; F. DE MIGUEL;** (1990); "Red Sísmica de Andalucía (RSA): A digital PC-based seismic network". *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Sismologie*, 1, 19-27. Luxembourg.
- ALLEGRE, C.J.; J.L. LE MOUEL; A. PROVOST;** (1982); "Scaling rules in rock fracture and possible implications for earthquake prediction", *Nature*, 297, 47-49.
- ALLEN, C.R.; M. WYSS; J.N. BRUNE; A. GRANZ; R. WALLACE;** (1982); "Displacements on the Imperial, Superstition Hills and San Andreas faults triggered by the Borrego Mountain earthquake", in *The Borrego Mountain Earthquake*, U.S.Geol.Surv. Profess. Paper 787, 87-104.
- ANDERSON, J.G.;** (1976); "Motions near a shallow rupturing fault: evaluation of the effects due to a free surface". *Geophys. J.* 16, 575-593.

### Referencias

- ANDERSON, J.G.; P.G. RICHARDS;** (1975); "Comparison of strong ground motion from several dislocation models". *Geophys. J.*, 42, 347-373.
- ANDERSON, T.W.;** (1958); "An introduction to multivariate data analysis". John Wiley & Sons. New York.
- ANDERSON, T.W.;** (1984); "An introduction to multivariate data analysis". John Wiley & Sons. 2<sup>a</sup> Ed.
- ANDREWS, D.J.;** (1978); "Coupling of energy between tectonic processes and earthquake". *J. Geophys. Res.*, 83, 2239-2254.
- ANDREWS, D.J.;** (1980); "A stochastic fault model. Static case". *J. Geophys. Res.*, 85, 3867-3877.
- ANDREWS, D.J.;** (1981); "A stochastic fault model, 2. Time dependence case". *J. Geophys. Res.*, 86, 10821-10834.
- ANDREWS, D.J.;** (1985a); "Dynamic plane-strain shear rupture with a slip-weakening friction law calculated by a boundary integral method". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 75, 1-21.
- ANDREWS, D.J.;** (1985b); "Dynamic mixed-mode shear crack calculation by a boundary integral method with a generalized friction law". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 75, 346-367.
- ANDREWS, D.J.;** (1989); "Mechanics of fault junctions". *J. Geophys. Res.*, Vol 94, No B7, 9389-9397.
- ANG, D.D.; M.L.WILLIAMS;** (1959); "The dynamic stress field due to a extensional dislocation" Midwestern Conference on Solid Mechanisms, 4<sup>th</sup>, The University of Texas, Austin, Texas.
- APOSTOL, T.W.;** (1983); "Análisis Matemático". Ed. Reverté.
- ARCHULETA, R.; S.DAY;** (1980); "Dynamic rupture in a layered medium: the 1966 Parkfield earthquake". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 70, 671-689.
- ARCHULETA, R.; G.A. FRAZIER;** (1978); "Three dimensional numerical simulations of dynamic faulting in a half-space". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 68, 573-598.
- ARCHULETA, R.J.; E. CRANSWICK; C. MUELLER; P. SPUDICH;** (1982); "Source parameters of the 1980 Mammoth Lakes, California, earthquake sequence". *J. Geophys. Res.*, 87, 4595-4607.
- ATKINSON, B.K.;** (1987); "Fracture mechanics of the rock". Academic Press.
- AVILES, C.A.; C.H.SCHOLZ;** (1985); "Fractal analysis of characteristic fault segments of the San Andreas Fault System". (Abstract). *EOS, Trans. Am. Geophys. Union* 66, 314.

- AVILES, C.A.; C.H.SCHOLZ; J. BOATWRIGHT; (1987); "Fractal analysis applied to characteristic segments of the San Andreas fault", J. Geophys. Res., 92, 331-334.
- AYDIN, A.; (1977); "Faulting in sandstone", Ph. D. Thesis. 246 pp. Univ. Stanford.
- BAKUN, W.H.; R.M. STEWART; C.G. BUFE; S.M. MARKS; (1980); "Implication of seismicity for failure of a section of the San Andreas fault". Bull. Seism. Soc. Am., 70, 185-201.
- BAKUN, W.H.; T.V. McEVILLY; (1984); "Recurrence models and Parkfield, California, earthquakes". J. Geophys. Res., 89, 3051-3058.
- BANDA, E.; (1988); "Crustal parameters in the Iberian Peninsula". Phys. Earth Planet. Inter. 51, 222-225.
- BATH, M.; (1968); "Mathematical aspects of Seismology". 415 pp. Elsevier Publ. Co. New York.
- BATH, M.; (1981); "Earthquake recurrence of a particular type". Pure and Appl. Geophys., 119, 1063-1076.
- BEKKER, P.; P. BESSE; J. LEEUW; J.F. MARTIN; J.L. RIJCKEVORSEL; (1988); "Component and correspondence analysis. Dimension reduction by functional approximation". Eds. J.L.Rijckevorsel and J.L.; Leeuw. John Wiley & Sons. Chichester. 147 pp.
- BELLMAN, R.; (1965); "Introducción al análisis matricial". Ed. Reverté, S.A. 362 pp.
- BEN-MENAHEN, A.; (1961); "Radiation pattern of seismic surface waves from finite moving sources". Bull. Seism. Soc. Am., 51, 3, 401-435.
- BENNETT, J.G.; (1936); "Broken Coal". J. Inst. Fuel, 10, 22-39.
- BENNINGTON, R; BLANDET, M; DOUGLASS, K; HARLOW, W.; MOTIWALLA, S.; SIMO, J. C.; (1982); "Programas para la ciencia y la ingeniería". Osborne/McGraw-Hill.
- BERNARD, P.; A. ZOLLO; (1989); "The Irpinia (Italy) 1980 earthquake: detailed analysis of a complex normal faulting". J. Geophys. Res., 94, 1631-1647.
- BERRY, M.; S.V.LEWIS; (1980); "On the Weierstrass-Mandelbrot fractal function". Proc. R. Soc. Lond., A, 370, 459-484.
- BILHAM, R.; G. KING; (1989); "The morphology of strike-slip faults: examples from the San Andreas fault, California". J. Geophys. Res., 94, 10204-10216.
- BISQUERRA, R.; (1989); "Análisis Multivariable". P.P.U.



### Referencias

- BOATWRIGTH, J.;** (1982); "A dynamic model for the far field acceleration". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 72, 1049-1068.
- BOATWRIGTH, J.;** (1985); "Characteristics of the aftershocks sequence of the Borah Peak, Idaho, earthquake determined from digital recordings of the events". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 75, 1265-1284.
- BOATWRIGTH, J.; D.M. BOORE;** (1975); "A simplification in the calculation of motions near a propagating dislocation". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 65, 133-138.
- BOLLINGER, G.A.; LANGER, C.J.;** (1986); "A note on the geometric configuration of seismogenic zones". *Earthquakes Notes. Vol 57, No. 2. Eastern Section. Seismological Society of America.*
- BONILLA, M.G.;** (1979); "Historic faulting map patterns, relation to subsurface faulting, and relation to pre-existing faults", in *Proceedings of Conference VIII: analysis of actual fault zones in bedrock. Open File Rep. 79-1239, 36-65. U.S. Geological Survey, Menlo Park. Calif.*
- BONILLA, M.G.; R.K. MARK; J.J. LIENKAEMPER;** (1984); "Statistical relations among earthquake magnitude, surface length, and surface fault displacement". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 74, 2379-2411.
- BOORE, D.M.; K. AKI; T. TODD;** (1971); "A two-dimensional moving dislocation model for a strike slip fault". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 61, 133-138.
- BOORE, D.M.; M.D. ZOBACK;** (1974); "Near-field motions from kinematic models of propagating faults". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 64, 321-342.
- BOORE, D.M.; W.B. JOYNER;** (1978); "The influence of rupture incoherence on seismic activity". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 68, 283-300.
- BOUCHON, M.;** (1976); "A dynamic crack model for the San Fernando earthquake". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 68, 1555-1576.
- BOUCHON, M.;** (1979a); "Discrete wave number representation of elastic wave fields in a three space dimensions". *J. Geophys. Res.* 84, 3609-3614.
- BOUCHON, M.;** (1979b); "Predictability of ground displacement and velocity near an earthquake fault: an example: the Parkfield earthquake of 1966". *J. Geophys. Res.* 84, 6149-6156.
- BOUCHON, M.; K. AKI;** (1977); "Discrete wave number representation of seismic source wave fields". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 67, 259-277.
- BOUSQUET, J.C.; H. PHILIP;** (1981); "Les caractéristiques de la neotectonique en Méditerranée Occidentale". F.C. Wezel, editor, *Sedimentary basins of Mediterranean margins*, C.N.R. Italian Project of Oceanography, Tecnoprint, Bologna, Italy, 389-405.

- BRACE, W.F.; J.D. BYERLEE;** (1966); "Stick-slip as a mechanism of earthquakes". *Science*, 153, 990-992.
- BROWN, R.D.;** (1970); "Map showing recently active breaks along the San Andreas fault between the Northern Gabilan Range and Cholame Valley". Calif., U.S. Geol. Surv. Misc. Geol. Inv. Map, 1-575.
- BRUNE, J.N.;** (1970); "Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes". *J. Geophys. Research.*, 75, 4997-5009.
- BUDDING, K.E.; R.V. SHARP;** (1988); "Surface faulting associated with the Elmore Desert Ranch and Superstition Hills, California, earthquake of 24 November 1987 (abstract)". *Seism. Res. Letters* 59, 49.
- BULAND, R.;** (1976); "The mechanics of locating earthquakes". *B.S.S.A.* 66, no 1, 173-187.
- BURRIDGE, R.; J.R. WILLIS;** (1969); The self-similar problem of the expanding elliptical crack in an anisotropic solid". *Proc. Cam. Phil. Soc.* 66, 443-468.
- BYERLEE, J.D.;** (1970); "The mechanism of stick-slip". *Tectonophysics*, 9, 475-486.
- CARVER, D.; RICHINS, W.D.; LANGHER, C.J.;** (1983); "Details of the aftershock process following the 30 September 1977 Uinta, Utah, earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73, 2, 435-448.
- CARRIVEAU, A.R.;** (1973); "Ground motion due to strike-slip faulting". Ph. D. Thesis. Dept. Mechanics and structures, University of California, Los Angeles, California.
- CHATTERJEE, A.K.; KNOPOFF, L.;** (1990); "Crack breakout dynamics". *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol 80, No. 6, 1571-1579.
- CHERNIKOV, A.; SAGDEEV, R., ZASLAVSKY, G.M.;** (1988); "Chaos: how regular can it be ?". *Physics today*. November 1988.
- CHINNERY, M.A.;** (1963); "The stress changes that accompany strike-slip faulting". *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol 53, No 5, 921-932.
- CHINNERY, M.A.;** (1968); "Theoretical faults models", in A symposium on processes in the focal region, Dominion Observatory, Ottawa.
- CIPAR, J.;** (1981); "Broadband time domain modeling of earthquakes from Friuli, Italy,". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 71, 1215-1231.
- CISTERNAS, A; J. DOREL; R. GAULON;** (1982) ; "Models of the complex source of the El Asnam earthquake". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 72, 2245.

### Referencias

- CLARKE, K.C.;** (1986); "Computation of the fractal dimension of topographic surfaces using the triangular prism surface area method". *Computers & Geosciences*, 12, 5, 713-722.
- COOLEY, W.W.; LOHNES, P.P.;** (1971); "Multivariate data analysis". John Wiley & Sons, Inc. New York.
- COPPERSMITH, K.J.; D.P. SCHWARTZ;** (1984); "Introduction to special section on fault behavior and the earthquake generation processes". *J. Geophys. Res.*, 7, 5669-5672.
- COX, D.R.; LEWIS, P.A.W.;** (1968); "The statistical analysis of series of events". Methuen & CO Ltd.
- CRONE, A.J.; MACHETTE, M.N.; M.G. BONILLA; J.J. LIENKAEMPER; K.L. PIERCE; W.E. SCOTT; R.C. BUCKNAM;** (1987); "Surface faulting accompanying the Borah Peak earthquake and segmentation of the Lost River fault, Central Idaho". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 77, 739-770.
- CROSSON, R.S.; M. MARTINI; R. SCARPA; S.C. KEY;** (1986); "The southern Italy earthquake of 23 November 1980: an unusual pattern of faulting". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 76, 381-394.
- CRUTCHFIELD, J.P.; DOYNE, J.; PACKARD, N.H.; SHAW, R.S.;** (1987); "Caos". *Investigación y ciencia*. No. 125.
- CUADRAS, C.M.;** (1981); "Métodos de análisis multivariante". Eunibar. Barcelona. 643 pp.
- DANILEVSKII, A.M.;** (1937); "The numerical solution of the secular equation". *Matem. sbornik*, 44, 2, 169-171.
- DAS, S.; AKI, K.;** (1977); "A numerical study of two dimensional spontaneous rupture propagation". *Geophys. J.R. astr. Soc.*, 50, 643-668.
- DAS, S.;** (1980); "A numerical method for determination of source time functions for general three-dimensional rupture propagation". *Geophys. J.R. Astron. Soc.*, 62, 591-604
- DAS, S.;** (1981); "Three-dimensional rupture propagation and implications for the earthquake source mechanism". *Geophys. J.R. Astron. Soc.*, 67, 375-393.
- DAY, S.M.;** (1982a); "Three-dimensional finite differences simulation of fault dynamics: rectangular faults with fixed rupture velocity". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 72, 705-727.
- DAY, S.M.;** (1982b); "Three-dimensional simulation of a spontaneous rupture: the effect of nonuniform prestress". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 72, 1881-1902.
- DAS, S.; B.V.KOSTROV.;** (1983); "Breaking a single asperity: rupture processes and seismic radiation". *J. Geophys. Res.*, 88, 4277-4288.

- DE MIGUEL, F.; (1979); "Sismicidad temporal de terremotos de la Península Ibérica y áreas tectónicas adyacentes". Tesis. Universidad de Granada.
- DE MIGUEL, F.; F. VIDAL; G. ALGUACIL; (1986); "El sistema de fallas activo del borde occidental de la Cuenca de Granada". *Trobades científiques de la Mediterraniá Xarxes sísmiques: instrumentacio y aplicacio a la sismotectonica*. Mahon 3, 5. Septiembre 1986.
- DE NATALE, G., GRESTA, S.; PATANE, D.; ZOLLO, A.; (1985); "Statistical analysis of earthquake activity at Etna Volcano (March, 1981 Eruption)". *Pageoph*. Vol 123.
- DEL PEZZO, E.; G. IANNACCONE, M. MARTINI; R. SCARPA; (1983); "The 23 November 1980 southern Italy earthquake". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73, 187-200.
- DESCHAMPS, A.; KING, G.C.P.; (1984); "Aftershocks of the Campania-Lucania, Italy, earthquake of 23 November 1980". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 74, 6, 2483-2517.
- DESCHAMPS, A.; Y. GAUDEMER; A. CISTERNAS; (1982); "The El Asnam, Algeria, earthquake of 10 October 1980: multiple source mechanism determined from long period records". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 72, 1111-1128.
- DEWEY, J.W.; (1972); "Seismicity and tectonics of Western Venezuela". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 62, 1711-1751.
- DEWEY, J.W.; (1976); "Seismicity of northern Anatolia". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 66, 843-868.
- DIETERICH, J.H.; (1979a); "Modelling of rock friction I. Experimental results and constitutive equations". *J. Geophys. Res.* 84, 2161-2168.
- DIETERICH, J.H.; (1979b); "Modelling of rock friction II. Simulation of preseismic slip". *J. Geophys. Res.* 84, 2169-2175.
- DIETZ, L.D.; W.L. ELLSVORTH; (1990); "The October 17, 1989, Loma Prieta, California, Earthquake and its aftershocks: geometry of the sequence from high-resolution locations". *Geophys. Res. Lett.*, 17, 1417-1420.
- DOHNANYI, J.S.; (1969); "Collisional model of asteroids and their debris". *Geophys. Res.*, 74, 2531-2554.
- DONNISON, J.R.; R.A. SUGDEN; (1984); "The distribution of asteroid diameters". *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 210, 673-682.
- DRAPER, N.; SMITH, H; (1966); "Applied regression analysis". John Wiley & Sons, Inc. New York.
- DRAVINSKI, M.; M.D. TRIFUNAC; (1980); "Response of layer to strike-slip vertical fault". *J. Engrg. Mech. Div. ASCE* 106, 609-621.

### Referencias

- DUGDALE, D.S.; RUIZ, C; (1973); "Elasticidad para técnicos". Editorial Reverté.
- EATON, J.P.; O'NEILL, M.E.; MURDOCK, J.N. (1970); "Aftershocks of the 1966 Parkfield-Coalinga, California, earthquake: a detailed study". Bull. Seism. Soc. Am., 60, 4, 1151-1197.
- EBBERHART-PHILLIPS, D.; (1989); "Active faulting and deformation of the Coalinga anticline as interpreted from three-dimensional velocity structure and seismicity". J. Geophys. Res., 94, 15565-15586.
- EBBLIN, C.; (1980); "Fault-plane solutions and hipocentral distribution of some 1977 Friuli aftershocks". Geophys. J. Roy. Astr. Soc., 62, 97-112.
- EBBLIN, C; MICHELINI, A; (1986); "A principal parameters analysis of the aftershock sequences applied to the 1977 Friuli, Italy, sequence". Ann. Geophys. 4, B, 4, 473-480.
- ENEVA, M; PAVLIS, G.L.; (1988); "Application of pair analysis statistics to aftershocks of the 1984 Morgan Hill, California, earthquake". J. Geophys. Res. 93, 9113-9125.
- EVINSON, F.F.; (1963); "Earthquakes and faults". Bull. Seism. Soc. Am., Vol 53, No 5, 873-891.
- FADDEEV, F.F.; I.S. SOMINSKII; (1949); "Sbornik zadach po vyssei algebr". Moscow.
- FADDEEVA, N.V.; (1973); "Métodos de calculo de Algebra Lineal". Ed. Paraninfo. 2<sup>a</sup> Ed.
- FEHLER, M.; (1990); "Identifying the plane of slip for a plane solution from clustering of locations of nearby earthquakes". Geophysical Research Letters, Vol 17, No 7, pp 969-972.
- FEHLER, M.; HOUSE, L.; KAIEDA, H.; (1987); "Determining planes along which earthquakes occur: method and application to earthquakes accompanying hydraulic fracturing". J. Geophys. Res., 92, B9, 9407-9414.
- FEHLER, M.; JOHNSON, P.; (1989); "Determination of fault planes at Coalinga, California, by analysis of patterns in aftershock locations". J. Geophys. Res., Vol 94, No B6, 7496-7506.
- FILONENKO-BORODICH, M; (1965); "Theory of elasticity". Dover Publications, Inc.
- FLURY, B.; H. RIEDWYL; (1990); "Multivariate statistics. A practical approach". Chapman & Hall. London. 295 pp.
- FORSYTH, D.W.; (1983); "Seismicity, focal mechanisms and tectonics". Reviews of Geophysics and Space Physics, Vol 61, n° 6, 1281-1291, Julio 1983.
- FRANCIS, J.G.F.; (1961); "The QR transformation, part I". Computer J. 4, 265-271.

- FRANCIS, J.G.F.; (1962); "The QR transformation, part II". *Computer J.* 4, 332-345.
- FRISCH, R.; (1929); "Correlation and scatter in statistical variables". *Nordic. Statist. J.*, 8, 36-102.
- FUJIWARA, A.; G. KAMIMOTO; A. TSUKAMOTO; (1977); "Destruction of basaltic bodies by high-velocity impact". *Icarus*, 31, 277-288.
- FUKAO, Y.; FURUMOTO, M.; (1985); "Hierarchy in earthquake size distribution". *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 37, 149-168.
- GAGNEPAIN-BEYNEIX, J.; H. HAESSLER; T. MODIANO; (1982); "The Pyrenean earthquake of February 29, 1980: an example of complex faulting". *Tectonophysics*, 85, 273-290.
- GARCIA MERAYO, F.; (1986); *Programación en Fortran 77* Ed. Paraninfo.
- GARIEL, J.C.; ARCHULETA, R.J.; BOUCHON, M.; (1990); "Rupture process of an earthquake with kilometric size fault inferred from the modeling of near source records". *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol 80, No 4, 870-888.
- GASTINEL, N.; (1975); "Análisis numérico lineal". Ed. Reverté.
- GAY, N.C.; W.D. ORTLEPP; (1979); "Anatomy of a mining-induced fault zone". *Geol. Soc. Am. Bull.*, 90, 47-58.
- GEDNEY, L.; ESTES, S.; BISWAS, N.; (1980); "Earthquake migration in the Fairbanks, Alaska seismic zone". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 70, 1, 223-241.
- GERALD, C.F.; (1982); "Análisis numérico". Fondo educativo interamericano, S.A.
- GIBCO, C.Z, S.J.; (1986); "Physics of fracturing and seismic energy release: a review". *Pure and Appl. Geoph.*, 124, 613-658.
- GITTINS, R.; (1969); "The application of ordination techniques. Ecological aspects of the mineral nutritions of plants", in *British Ecol. Soc. Symp.*, 9, (I.H.Rorison, ed., 37-66). Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- GIVENS, J.W.; (1954); Numerical computation of the characteristic values of a real symmetric matrix". Oak Ridge National Laboratory 1574.
- GLEICK, J.; (1988); "Caos. La creación de una ciencia". Seix-Barral. 358 pp. Barcelona.
- GOLDEN SOFTWARE, Inc.; (1988); "Surfer". PO Box 281, Golden. Colorado 80402.
- GONZALEZ-RUIZ, J.R.; K. McNALLY; (1988); "Stress accumulation and release since 1882 in Ometepec, Guerrero, Mexico: implications for failure mechanisms and risk assessments of a seismic gap". *J. Geophys. Res.*, 93, 6297-6317.

### Referencias

- GOWER, J.C.;** (1966); "Some distances properties of latent root and vector methods used in multivariate analysis". *Biometrika*, 53, 325-338.
- GRIFFITH, A.A.;** (1920); "The phenomena of rupture and flow in solids". *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, A221, 163-198.
- GUIRAO, J.M.;** (1983); "Guía de uso del programa MEC.3". Observatorio Universitario de Cartuja. Report /5.1983. Universidad de Granada.
- GUIRAO, J.M.; VIDAL, F.;** (1983); "Un método para el cálculo del dominio de soluciones válidas del mecanismo focal de terremotos". V Asamb. Nal. de Geof. y Geod. Madrid, 1983.
- GUIRAO, J.M.; VIDAL, F.;** (1984); "Determinación de mecanismos focales con microcomputador". *Rev. de Geof.*, 40, 309-314.
- GUSEV, A.A.;** (1983); "Descriptive statistical model of earthquake source radiation and its application to an estimation of short period strong motion". *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 74, 787-808.
- GUTENBERG, B.; RICHTER, C.F.;** (1954); "Seismicity of the Earth and associated phenomena". Princeton University Press. Princeton.
- HAHN, G.I.; SHAPIRO, S.S.;** (1967); "Statistical models in engineering". John Wiley & Sons.
- HAMANO, Y.;** (1974); "Dependence of rupture time history on the heterogeneous distribution of stress and strength on the fault plane (Abstract)". *EOS, Trans. Am. Geophys. Union* 55, 352.
- HANKS, T.C.;** (1979); "Seismic Widths at active crustal fault zones". U.S. Geol. Surv. Open-File Rept. 79-1239, 215-234.
- "HANDBOOK OF APPLIED MATHEMATICS. Selected results and methods."** (1974); Editado por C.E. Pearson. Von Nostrand Reinhold Company. New York.
- HARTMANN, G.S.;** (1969); "Terrestrial, lunar, and interplanetary rock fragmentation". *Icarus*, 10, 201-213.
- HARTZELL, S.H.; G.A. FRAZIER; J.N. BRUNE;** (1978); "Earthquake modeling in a homogeneous half-space". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 68, 301-316.
- HASKELL, N.;** (1964); "Total energy and energy spectral density of elastic wave radiation from propagating faults." *Bull. Seism. Soc. Am.*, 54, 1811-1841.
- HASKELL, N.;** (1966); "Total energy and energy spectral density of elastic wave radiation from propagating faults. Part. II. A statistical source model". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 56, 124-140.

- HASKELL, N.;** (1969); "Elastic displacements in the near field of a propagating fault." *Bull. Seism. Soc. Am.*, 59, 865-908.
- HASKELL, N.; K.C. THOMPSON;** (1972); "Elastodynamics near field of a finite propagating tensile fault". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 62, 657-697.
- HATZFELD, D; BOLOIX, M.;** (1987); "Resultados preliminares de los perfiles sísmicos profundos del Mar de Alborán". Reunión sobre la dinámica de las Cordilleras Béticas y Mar de Alborán. Universidad de Granada. pp 19-24.
- HAWKINS, G.S.;** (1960); "Asteroidal fragments", *Astrophys. J.*, 65, 318-322.
- HEYLLER, B.;** (1971); "The fragmentation of asteroids". *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 154, 279-291.
- HIRATA, T.;** (1987); "Omori's power law aftershock sequences of microfracturing in rock fracture experiments". *J. Geophys. Res.*, 92, 6215-6221.
- HIRATA, T.;** (1989); "Fractal dimension of faults systems in Japan: fractal structure in rock fracture geoemetry at various scales". *Pure and Appl. Geophys.*, 131, 157-170.
- HIRATA, T.;** (1989); "A correlation between the b value and the fractal dimension or earthquakes". *J. Geophys. Res.*, 94, 7507-7514.
- HIRATA, T.; t. SATOH; K. ITO;** (1987); "Fractal structure of spatial distribution of microfracturing in rock". *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 90, 369-374.
- HOBBS, B.; MEANS, W.; WILLIANS, P.;** (1981); "Geología estructural". Ediciones Omega.
- HODSON, F.R.;** (1969); "Searching for structure within multivariate archaeological data". *World Archaeology*, 1, 1,90-107.
- HORNER, R.B.; WETMILLER, R.J.; LAMONTAGNE, M.; PLOUFFE, M.;** (1990); "A fault model for the Nahanni earthquakes from aftershocks studies". *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol 80. No 6. 1553-1570.
- HOUSEHOLDER, A.S.;** (1964); "The theory of matrices in numerical analysis". Blaisdell. New York.
- HOTELLING, H.;** (1933); "Analysis of a complex of statistical variables into principal components". *J. Ed. Psych.*, 24, 417-441, 498-520.
- HOUSE, L.;** (1987); "Locating microearthquakes induced by hidraulic fracturing in cristalline rock". *Geophys. Res. Lett.*, in press.
- HUANG, J.; TURCOTTE, D.L.;** (1990); "Are earthquake an example of deterministic chaos ?". *Geophys. Research. Letters*, Vol 17, No 3, pp 223-226.



### Referencias

- IBAÑEZ, J.M.;** (1987); "Cálculo de profundidades focales de microterremotos en las Béticas Centrales con un método independiente del modelo de velocidades". Memoria de Licenciatura. Universidad de Granada.
- IBAÑEZ, J.M.; DE MIGUEL, F.; VIDAL, F.;** (1987); "Método para la estimación de la profundidad focal de sismos locales. Aplicación a los terremotos registrados por la Red Sísmica de la Universidad de Granada". Report. 1.1987. Observatorio Universitario de Cartuja. Universidad de Granada.
- ISRAEL, M.; R.L.KOVACH;** (1977); "Near field motions from a propagating strike-slip fault in a elastic half-space". Bull. Seism. Soc. Am., 67, 977-994.
- JAEGER, J.C.;** (1974); "Elasticity, fracture and flow with engineering and geological applications". Methuen's monographs on physical subjects". Methuen & CO LTD and Science paperbacks.
- JAEGER, J.C.; N.G. COOK;** (1969); "Fundamentals of Rock Mechanics", 513, Methuen, London.
- JACOBI, C.G.J.;** (1846); "Über ein leichtes Verfahren die in der Theorie der Sacularstorungen vorkommenden Gleichungen numerisch aufzulösen". Crelle's J., 30, 51-94.
- JEFFERS, J.N.R.;** (1967); "Two case studies in the application of principal component analysis". Appl. Stat., 16, 904-912.
- JOLLIFFE, I.T.;** (1986); "Principal components analysis". Springer-Verlag. New York. 271 pp.
- JONHSTON, J.;** (1982); "Econometric methods". 2<sup>a</sup> Ed. International Student Edition. McGraw-Hill.
- JOYANES, L.;** (1984); "Programación en Basic para microcomputadoras". Ed. Anaya.
- JOYANES, L.;** (1990); "Programación en QuickBASIC 4.0/4.5". Ed. McGraw-Hill. Madrid. 607 pp.
- KAHN, P.J.;** (1970); "Introducción al álgebra lineal". Ed. Castillo. Madrid.
- KAGAN, Y.Y.;** (1981); "Spatial distribution of earthquakes: the four-point moment function". Geophys. J.R. Astr. Soc., 67, 697-717.
- KAGAN, Y.Y.;** (1982); "Stochastic model of earthquake fault geometry". Geophys. J.R. Astr. Soc., 71, 659-691.
- KAGAN, Y.Y.;** (1990); "Random stress and earthquake statistics: spatial dependence". Geophys. J. int. 102, 573-583.

- KAGAN, Y.; KNOPOFF, L.; (1978); "Statistical study of the occurrence of shallow earthquakes". Geophys. J.R. astr. Soc., 55, 67-86.
- KAGAN, Y.; KNOPOFF, L.; (1980); "Spatial distribution of earthquake: the two-point correlation function". Geophys. J.R. astr. Soc., 62, 303-320.
- KAGAN, Y.Y.; KNOPOFF, L.; (1987); "Random stress and earthquake statistics: time dependence. Geophys. J. R. astr. Soc. , 88, 723-731.
- KANAMORI, H.; (1977); "The energy release in great earthquakes". J. Geophys. Res., 82, 2981-2987.
- KANAMORI, H.; (1981); "The nature of seismic patterns before large earthquakes". M. Ewing Ser. 4, Am. Geophys. Union.
- KANAMORI, H.; D.L. ANDERSON; (1975); "Theoretical basis of some empirical relations in Seismology". Bull. Seism. Soc. Am., 65, 1073-1096.
- KANAMORI, H.; G.S. STEWART; (1978); "Seismological aspects of the Guatemala earthquake of February 4, 1976". J. Geophys. Res., 83, 3427-3434.
- KANAMORI, H.; K.C. McNALLY; (1982); "Variable rupture mode of the subduction zone along the Ecuador-Colombias coast". Bull. Seism. Soc. Am, 72, 1241-1253.
- KASAHARA, K.; (1981); "Earthquakes mechanics". Cambridge Earth Science Series. Cambridge University Press.
- KAWASAKI, I.; (1975); "On the dynamical process of the Parkfield earthquake of June 28, 1966". J. Phys. Earth. 23, 127-144.
- KENDALL, M.G.; (1959); "The geographical distribution of crop productivity in England". J. Roy. Statist. Soc., 102, 21.
- KING, G.; (1983); "The accommodation of large strains in the upper lithosphere of the Earth and other solids by self-similar fault systems: the geometrical origin of b-value". Pure Appl. Geophys., 121, 761-815.
- KING, G.; (1985); "The geometry of the initiation and termination of earthquake rupture and the evolution of morphology and geological structures". 5 Maurice Ewing Symposium on earthquake source mechanics, 19-23, 1985, Arden House, Harriman, New York.
- KING, G.; YIELDING, G.; (1984); "The evolution of a thrust fault system: processes of rupture initiation, propagation and termination in the 1980 El Asnam (Algeria) earthquake". Geophys. J.R. astr. Soc. , 77, 915-933.
- KITTL, P.; DIAZ, G.; (1987); "Earthquake risk and fracture statistics". Physics of the Earth and Planetary Interiors. 49, 222-224.

### Referencias

- KNOPOFF, L.; GILBERT, F.;** (1959); "Radiation from a strike-slip fault". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 49, 163-178.
- KNOPOFF, L.; KAGAN, Y.Y.; KNOPOFF, R.;** (1982); *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol. 72. nO 5. 1663-1676.
- KOSTROV, B.V.;** (1964); "Self-similar problem of propagation of shear cracks". *J. Appl. Math.* 28, 1077-1087.
- KOSTROV, B.V.;** (1966); "Unsteady propagation of longitudinal shear cracks. *J. Appl. Math. Mech.* 30, 1241-1248.
- KOSTROV, B.V.; S. DAS;** (1982); "Idealized models of fault behavior prior to a dynamic rupture". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 72, 679.
- KOSTROV, B.V.; S. DAS;** (1988); *Principles of earthquake source mechanics.* Cambridge monographs on Mechanics an applied mathematics. 286 pp. Cambridge University Press. Cambridge.
- KOYAMA, J.; SHIMADA, N.;** (1985); "Physical basis of earthquake magnitude: an extreme value of seismic amplitudes from incoherent fracture of random fault patches". *Physics of the Earth and Planetary Interiors.* 40, 301-308.
- KRILOV, A.N.;** (1931); "Uber die numerische auflosung einer gleichung, durch die in technischen Fragen die frequenz kleiner Schwingungen bestimmt ist". *Izvestiia akad. nauk SSSR, Otdel matem. i estest. nauk, ser. 7., 4,* 491-539.
- LAHR, K.M.; LAHR, J.C.; LINDH, A.G.; BUFE, C.G.; LESTER, F.W.;** (1976); "The August 1975 Oroville earthquakes". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 66, 4, 1085-1099.
- LANGE, M.A.; T.J. AHRENS; M.B. BOSLOUGH;** (1984); "Impact cratering and spall failure of gabbro". *Icarus,* 58, 383-395.
- LANCZOS, C.;** (1950); "An iteration method for the solution of eigenvalue problem of differential and integral operators". *J. Res. nat. Bur. Stand.*, 45, 255-282.
- LASS, H.;** (1987); "Elements of pure and applied mathematics". McGraw - Hill.
- LAWSON, C.L.; HANSON, R.J.;** (1974); "Solving least squares problems". Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.
- LAZO, M.A.;** (1980); "Spatial distribution of earthquakes in Central and Northern Peru using relative travel-time anomalies". Doctoral dissertation. Boston College. University Microfilms International.
- LEBART, L.; MORINEAU, A. WARNICK, K.;** (1984); "Multivariate descriptive statistical analysis. Correspondence analysis and related techniques for large matrices". John Wiley & Sons. New York. 233 pp.

- LEFEVRE, J.; (1976); "Introduction aux analyses statistiques multidimensionnelles". 2<sup>a</sup> Ed. Mason. Paris.
- LEVERRIER, U.J.J.; (1840); "Sur les variations seculaire des elements des orbites pour les sept planetes principales". J. de Math., 1, 5, 230.
- LEVY, N.A.; A.K. MAL; (1976); "Calculation of ground motion in the three dimensional model of the 1966 Parkfield earthquake". Bull. Seism. Soc. Am., 66, 405-423.
- LOMNITZ-ADLER, J.; (1983); "A statistical model of the earthquake process". Bull. Seism. Soc. Am. Vol 73. No. 3. 853-862.
- LOMNITZ-ADLER, J.; (1985a); "The statistical dynamics of the earthquake process" Bull. Seism. Soc. Am. 75, 441-454.
- LOMNITZ-ADLER, J.; (1985b); "On the magnitude frequency relation of asperity models" Tectonophys. 120, 133-140.
- LOMNITZ-ADLER, J.; (1985c); "Asperity models and characteristic earthquakes". Geophys. J.R. astr. Soc., 83, 435-450.
- LOMNITZ-ADLER, J.; (1988); "The theoretical seismicity of asperity models: an application to the coast of Oaxaca". Geophys. Journal. , 95, 491-501.
- LOMNITZ-ADLER, J.; LOMNITZ, C.; (1979); "A modified form of the Gutenberg-Richter magnitude-frequency relation". Bull. Seism. Soc. Am. Vol 69. No. 4. 1209-1214.
- LLEO MORILLA, A.; (1983); "Tensores cartesianos y sus aplicaciones". Editorial Alhambra.
- LUCO, E.; J.G.ANDERSON; (1983); "Steady-state response of an elastic half-space to a moving dislocation of finite width". Bull. Seism. Soc. Am., 73, 1-22.
- LUTZ, T.; (1986); "An analysis of the orientations of large-scale crustal structures: a statistical approach based on areal distributions of point like features". J. Geophys. Res., 91, 421-434.
- MADARIAGA, R.; (1976); "Dynamics of a expanding circular faults". Bull. Seism. Soc. Am., 66, 639-666.
- MADARIAGA, R.; (1977); "High frequency radiation from crack (stress drop) models of earthquake faulting". Geophys. J.R. Astr. Soc., 51, 625-666.
- MADARIAGA, R.; (1978); "The dynamic field of Haskell's rectangular dislocation fault model". Bull. Seism. Soc. Am., 68, 869-887.
- MADARIAGA, R.; (1979); "On the relation between seismic moment and drop in the presence of stress and strength heterogeneity". J. Geophys. Res., 84, 2243.

### Referencias

- MADARIAGA, R.;** (1983); "Earthquake source theory: a review". Earthquakes: observation, theory and interpretation". Proceedings of the International School of Physics Enrico Fermi. H. Kanamori & E. Boschi, Editores. North-Holland Publishing Co. Amsterdam.
- MADARIAGA, R.;** (1985); "Dinámica de la fuente sísmica". Mecanismos de terremotos y tectónica. A.Udias, D.Muñoz, E. Buforn, Editores. Universidad Complutense de Madrid.
- MADARIAGA, R.;** (1988); "Seismic source: theory". The encyclopedia of solid earth geophysics". Ed.D.E. James.
- MADARIAGA, R.;** (1989); "Propagación de ondas sísmicas en campo cercano". Movimientos fuertes del suelo y riesgo de terremotos". A.Udias, D.Muñoz. Editores. Universidad Complutense de Madrid.
- MAGISTRALE, H.; L. JONES; h. KANAMORI;** (1989); "The Superstition Hills, California, earthquakes of 24 November 1987". Bull. Seism. Soc. Am., 79, 239-251.
- MAIN, I.; BURTON, P.W.;** (1983); "Physical links between crustal deformation, seismic moment and seismic hazard for regions of varying seismicity", Preprint, Institute of Geological Sciences, Edinburgh.
- MAIN, I.; BURTON, P.W.;** (1984); "Information theory and the earthquake frequency-magnitude distribution". Bull. Seism. Soc. Am. Vol 74. No. 4. 1409-1426.
- MAIN, I.; BURTON, P.W.;** (1986); "Long-term earthquake recurrence constrained by tectonic seismic moment release rates". Bull. Seism. Soc. Am., 76, 297-304.
- MAKI, T.;** (1984); "An interactive determination of earthquakes mechanisms". Bulletin of the earthquake research institute. University of Tokyo. Vol 59. Part 2.
- MAKROPOULOS, K.C.; BURTON, P.W.;** (1984); "Greek tectonics and seismicity". Tectonophysics, 106, 205-304.
- MAL, A.K.;** (1972); "Rayleigh waves from a moving thrust fault". Bull. Seism. Soc. Am., 62, 751-762.
- MAL, A.K.; A.R. CARRIVEAU;** (1973); "Earthquake ground motion near the source". Proc. 5th World Conference on Earthquake Engng., Rome, Italy.
- MALLO, F.;** (1985); "Análisis de componentes principales y técnicas factoriales relacionadas". Universidad de Leon. Servicio de publicaciones. ISBN. 84-600-4120-4. León. 523 pp.
- MANDELBROT, B.B.;** (1967); "How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension", Science 156, 636-638.

- MANDELBROT, B.B.;** (1977); "The fractal geometry of nature". W.H. Freeman and Company. New York.
- MANDELBROT, B.;** (1987); "Los objetos fractales. Forma, azar y dimensión". 3ª Ed. Tusquets Editores, S.A.
- MANSON, J.C.;** (1986); "Métodos matriciales. Teoría, práctica y aplicaciones en Basic". Temas Universitarios con microordenador. Ed. Anaya Multimedia.
- MARTEL, S.J.; D.D. POLLARD;** (1989); "Mechanics of slip and fracture along small faults and simple strike-slip fault zones in granite rock". *J. Geophys. Res.*, 94, 9417-9428.
- MATHIS, J.S.;** (1979); "The size distribution of interstellar particles, II, Polarization". *Astrophys. J.*, 232, 747-753.
- MCCROSKY, R.E.;** (1968); "Distribution of large meteoric bodies", Spec. Rep. 280, Smithsonian Astrophys. Observ., Washington, D.C..
- MCGARR, A.;** (1981); "Analysis of peak ground motion in terms of a model of inhomogeneous faulting". *J. Geophys. Res.*, 86, 3901-3912
- MCGARR, A.;** (1985); "Some observations indicating complications in the nature of earthquake scaling". preprint, 5 Maurice Ewing Symposium on Earthquake Source Mechanics, 19-23 May 1985, Arden House, Harriman, New York.
- MCGARR, A.; S.M.SPOTISSWODE; N.C.GAY; W.D. ORTLEPP;** (1979); "Observations relevant to seismic driving stress, stress drop and efficiency". *J. Geophys. Res.*, 84, 6140
- MCGILL, S.; C.R. ALLEN; K.W.HUDNUT; D.C. JOHNSON; W.F. MILLER; K.E. SIEH;** (1989); "Slip on the Superstition Hills fault and on nearby faults associated with the 24 November 1987 Elmore Ranch and Superstition Hills earthquakes, Southern California". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 79, 362-375.
- McKENZIE, D.P.;** (1972); "Active tectonics of the Mediterranean regions". *Geophys. J.*, 30, 109-121.
- McNALLY, K.;** (1989); "Earthquakes and Seismicity". The encyclopedia of solid earth geophysics". Ed.D.E. James.
- MENDOZA, C.; S.H.HARTZELL;** (1988); "Aftershock patterns and main shock faulting". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 78, 1438-1449.
- MICHAEL, A.J.;** (1989); "Spatial patterns of aftershocks of shallow focus earthquakes in California and implications for deep focus earthquakes". *J. Geophys. Res.*, 94, 5615-5626.
- MICHELINI, A; BOLT, B.A.;** (1986); "Application of the principal parameters method to the Coalinga, California, aftershock sequence". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 76, 2, 409-420.

### Referencias

- MICROSOFT CORPORATION;** (1986); "Microsoft QuickBasic".
- MIKUMO, T.; MIYATAKE, T.;** (1979); "Earthquake sequences on the frictional fault mode with non uniform strengths and relaxation times". *Geophys. J.R. astr. Soc.*, 59, 497-522.
- MITRA, M.;** (1966); "Surface displacement produced by an underground fracture". *Geophysics* 31, 204-213.
- MIYATAKE, T.;** (1980); "Numerical simulations of earthquake source processes by a three dimensional crack model, I. Rupture process". *J. Phys. Earth*, 28, 565-598.
- MOLE, R.H.;** (1986); "Calculo numérico. Teoría, problemas y aplicaciones en Basic". *Temas Universitarios con microordenador*. Ed. Anaya Multimedia.
- MORRIS, J.; J.W. HEAD;** (1944); "The scalar process for the solution of lagrangian frequency equations". *Philos. Mag.* 35, 7, 735-759.
- MORRISON, D.F.;** (1984); "Multivariate statistical methods". 2<sup>o</sup> Ed. Mc Graw Hill. London. 415 pp.
- MURTAGH, F.; HECK, A.;** (1987); "Multivariate data analysis. Astrophysics and space science library". D. Reidel Publishing Company.
- NIAZY, A.;** (1973); "Elastic displacements caused by a propagating crack in a infinite medium: an exact solution". *Bull. Seism. Soc. Am.* 63, 357-379.
- NIAZY, A.;** (1975); "An exact solution for a finite, two-dimensional moving dislocation in an elastic half-space with application to the San Fernando earthquake of 1971". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 65, 1797-1826.
- NISHIGAMI, K.;** (1987); "Clustering structure and fracture process of microearthquake sequences". *J. Phys. Earth*, 35, 425-448.
- OKUBO, P.G.; K. AKI;** (1983); "Fractal geometry of the San Andreas fault system". (Abstract) *EOS, Trans. Am. Geophys. Union* 64, 766.
- OKUBO, P.G.; DIETERICH, J.;** (1984); "Effects of physical fault properties on frictional instabilities produced on simulated faults". *J. Geophys. Res.*, Vol 89, No 87, pp 5817-5827.
- OKUBO, P.G.; K. AKI;** (1985); "Fractal geometry of the San Andreas fault system". *J. Geophys. Res.*, 92, 345-355.
- OMORI, F.;** (1894); "On the aftershocks of earthquakes". *Tokyo Univ. Coll. Sci. Imp. Jour.* 7, 111-200.
- OPPENHEIMER, D.H.;** (1990); "Aftershock slip behavior of the 1989 Loma Prieta Earthquake". *Geophys. Res. Lett.*, 17, 1199-1202.

- OUCHI, T.; UEKAWA, T.;** (1986); "Statistical analysis of the spatial distribution of earthquakes-variation of the spatial distribution of earthquakes before and after large earthquakes". *Phys. Earth. Planet. Int.*, 44, pp 211-225.
- OUYED, M.; M. MEGHRAOUI; A. CISTERNAS; A. DESCHAMPS; J. DOREL; J. FRECHET; R. GAULON; H. PHILIP;** (1981); "Seismotectonics of the El Asnam earthquake", *Nature*, 292, 26-31.
- OSTLE, B.;** (1970); "Estadística aplicada". Ed. Limusa-Wiley. S.A. México.
- OTSUKA, M.;** (1965); "Earthquake magnitude and surface fault formation". *Zisin, J. Seismol. Soc. Japan*, 18, 1-8.
- PAGE, R.;** (1968); "Aftershocks and microaftershocks of the Great Alaska Earthquake of 1964". *Bull. Seism. Soc. Am.* 58, 1131-1168.
- PAPAGEORGIOU, A.S.; AKI, K.;** (1983); "A specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion. I. Description of the model". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73, 3, 693-722.
- PAPAGEORGIOU, A.S.; AKI, K.;** (1983); "A specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion. II. Applications of the model". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73, 3, 953-978.
- PEARSON, K.;** (1901); "On lines and planes of closest fit to systems of points and space". *Philos. Mag. Ser.*, 6, 2, 559-572.
- PLOTNIKOVA, L.M.; KARNAUCHOVA, O.V.;** (1986); "Statistical analysis and mathematical model of induced seismicity in the region of the large Charvak reservoir". *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 44, 160-168.
- PRESS, W.H.; FLANNERG, B.P.; TENKOLSKY, S.A.; VETTERLING, W.T.;** (1989); "Numerical recipes. The art of scientific computing. Fortran version". Cambridge University Press.
- POSADAS, A.M.;**(1989); "Microsismicidad espacio-temporal. El método de las Componentes Principales". Memoria de Iniciación a la Investigación. Universidad de Granada.
- POSADAS, A.; LOPEZ, A.; VIDAL, F.;** (1989); "El Método de las Componentes Principales. Aplicación al análisis de Sismicidad". Report interno del Observatorio Universitario de Cartuja. ISSN 0212-730X. Servicio de publicaciones de la Universidad de Granada.
- POSADAS, A.; F. VIDAL; F. DE MIGUEL; G. ALGUACIL; J. PEÑA; J.MORALES; J. M. IBAÑEZ; M.D. ROMACHO;** (1991) ;"Caracterización de sistemas de fracturas sísmicamente activas y su evolución temporal mediante el programa ACP". Instrumentación y proceso de datos en Ciencias de la Tierra. Serie Casa de los Volcanes I. Lanzarote, Spain.



### Referencias

- POSADAS, A.M.; F. VIDAL; F. DE MIGUEL; G. ALGUACIL; J. PEÑA; J.M. IBÁÑEZ; J. MORALES;** (1991); "Spatial-temporal analysis of a seismic series using the Principal Components Method. The Antequera Series (Spain), 1989. Submitted to J. Geophys. Res.
- QIDONG, D.; Z. PEIZHEN;** (1984); "Research on the geometry of shear fracture zones". J. Geophys. Res., 89, 5699-5710.
- RAO, C.R.;** (1964); "The use and interpretation of principal component analysis in applied research". Sankhya, Ser., A 26, 329-338.
- RIAL, J.A.;** (1978); "The Caracas, Venezuela, earthquake of July 1967 a multiple source event". J. Geophys. Res., 83, 5405-5414.
- RICHARDS, P.G.;** (1973); "The dynamic field of a growing plane elliptical shear crack". Int. J. Solid Struct. 9, 843-861.
- RICHARDS, P.G.;** (1976); "Dynamic motions near an earthquake fault: a three-dimensional solution". Bull. Seism. Soc. Am. 66, 1-32.
- RICHINS, W.D.; J.C. PECHMANN; R.B. SMITH; C.J. LANGER; S.K. GOTER; J.E. ZOLLWEG J.J. KING;** (1987); "The 1983 Borah Peak, Idaho, earthquake and its aftershocks". Bull. Seism. Soc. Am., 77, 694-723.
- RICHTER, C.F.;** (1958); "Elementary seismology". W.H. Freeman, S. Francisco. California.
- ROMERO, A.;** (1986); "Algebra lineal y geometría". Universidad de Granada.
- RUCKDESCHEL, F.R.;** (1981); "Basic Scientific Subroutines". BYTE/McGraw-Hill.
- RUDAJEV, V.; R. TEISSEYRE; J. KOZAK; J. SILENY;** (1986); "Possible mechanism of Rockbursts in Coal Mines". Pure and Appl. Geophys., 124, 841-855.
- RUDNICKI, J.W.; H. KANAMORI;** (1981); "Effects of fault interaction on moment stress drop and strain energy release". Journ. Geophys. Research, 386, 1785-1793.
- RUINA, A.L.;** (1983); "Slip instability and state variable friction laws". J. Geophys. Res. 88, 10359-10370.
- RUNDLE, J.B.;** (1988a); "A physical model for earthquakes 1. Fluctuations and interactions". J. Geophys. Res., 93, 6237-6254.
- RUNDLE, J.B.;** (1988b); "A physical model for earthquakes 2. Application to Southern California". J. Geophys. Res., 93, 6255-6274.
- RUNDLE, J.B.;** (1989a); "A physical model for earthquakes 3. Thermodynamical approach and its relation to nonclassical theories of nucleation". J. Geophys. Res., 94, 2839-2855.

- RUNDLE, J.B.; (1989b); "Derivation of the complete Gutenberg-Richter magnitude-frequency relation using the principle of scale invariance". *J. Geophys. Res.*, 94, 12337-12342.
- RUNDLE, J.B.; KANAMORI, H.; (1987); "Application of an inhomogeneous stress (Patch) model to complex subduction zone earthquakes: a discrete interaction matrix approach". *J. Geophys. Res.*, 92, 2606-2616.
- RUNDLE, J.B.; KANAMORI, H.; McNAULY, K.C.; (1984); "An inhomogeneous fault model for gaps, asperities, barriers and seismic migration". *J. Geophys. Res.*, 89, 10219-10231.
- RUFF, L.J.; (1984); "Tomographic imaging of the earthquake fracture process". *Geophys. Res. Letters*, 11, 629-632.
- RUTISHAUSER, H.; (1958); "Solution of eigenvalue problem with the LR transformation". *Appl. Math. Ser. nat. Bur. Stand.* 49, 47-81.
- SAMUELSON, P.; (1942); "A method of determining explicitly the coefficients of the characteristic equation". *Ann. Math. Stat.*, 20, 3, 448-451.
- SANZ DE GALDEANO, C.; (1983); "Los accidentes y fracturas principales de las Cordilleras Béticas". *Estudios geol.*, 38, 393-165.
- SATO, R.; (1975); "Fast computation of theoretical seismograms for a infinite medium. Part. I. Rectangular fault". *J. Geophys. Earth.* 23, 323-331.
- SAVAGE, J.C.; (1965); "The effect of rupture velocity upon seismic first motions". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 55, 263-275.
- SAVAGE, M.K.; R.P. MEYER; (1985); "Aftershocks of an  $M = 4.2$  earthquake in Hawaii and comparison with long-term studies of the same volume". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 75, 759-777.
- SCHWARTZ, D.P.; COPPERSMITH, K.J.; (1984); "Fault behavior and characteristic earthquakes: examples from the Wasatch and San Andreas fault zones". *J. Geophys. Res.*, 89, 5681-5698.
- SCHAFER, J.; (1973); "Strong ground motion from dip-slip faulting". M.S. Thesis, Dept of Mechanics and structures, University of California, Los Angeles, California.
- SCHOLZ, C.H.; (1968); "The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes". *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol 58. No. 1. 399-415.
- SCHOLZ, C.H.; (1982); "Scaling laws for large earthquakes: consequences for physical models". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 72, 1-14.

### Referencias

- SCHOLZ, C.H.; C.A. AVILES; (1985); "The fractal geometry of faults and faulting". (Preprint), 5 Maurice Ewing Symposium on Earthquake Source Mechanics, 19-23 May 1985, Arden House, Harriman, New York.
- SCHOLZ, C.H.; C.A. AVILES; (1986); "The fractal geometry of faults and faulting", S. Das, J. Boatwright & C.H. Sholtz. Editors, Maurice Ewing 6, Am. Geophys. Union Mon. 37, 147-155.
- SCHOUTENS, J.E.; (1979); "Empirical analysis of nuclear and high explosive cratering and ejecta". Nuclear Geoplosics Sourcebook, 55, 2, 4, Rep. DNA 65 01H-4-2, Def. Nucl. Agency, Bethesda, Md..
- SEGALL, P.; D.D. POLLARD; (1980); "Mechanics of discontinuous faults". J. Geophys. Res., 85, 4337-4350.
- SEGALL, P.; D.D. POLLARD; (1983); "Nucleation and growth of strike-slip faults in granite". J. Geophys. Res., 88, 555-568.
- SHAPIRO, R.; F. WARD; (1966), "The time-space spectrum of the geostrophic meridional kinetic energy". J. Meteorol., 17, 621-626.
- SHIMAZAKI, K.; (1985); "Small and large earthquakes: the effects of the thickness of seismogenic layer and the free surface". (Preprint), 5 Maurice Ewing Symposium on Earthquake Source Mechanics, 19-23 May 1985, Arden House, Harriman, New York.
- SIBSON, R.H.; (1986a); "Brecciation processes in fault zones: inferences from earthquake rupturing". Pure and Appl. Geoph., 124, 159-175.
- SIBSON, R.H.; (1986b); "Rupture interaction with faults jogs", in Earthquake source mechanics, S. Das, J. Boatwright & C.H. Sholtz Editors, Maurice Ewing 6, Am. Geophys. Union Mon. 37, 157-168.
- SIBSON, R.H.; (1990); "Rupture nucleation on unfavorably oriented faults". Bull. Seism. Soc. Am. Vol 80. No. 6. 1580-1604.
- SILENY, J.; A.R. RITSEMA, I. CSIKOS; J. KOZAK; (1986); "Do some shallow earthquakes have a tensile source component?". Pure and Appl. Geophys., 124, 825-840.
- SINGH, S.K.; HAVSKOV, J.; (1980); "On moment-magnitude scale". Bull. Seism. Soc. Am. Vol 70. No 1. 379-383.
- SINGH, S. K.; RODRIGUEZ, M.; ESTEVA, L.; (1983); "Statistics of small earthquakes and frequency of occurrence of large earthquakes along the Mexican Subduction Zone". Bull. Seism. Soc. Am., 73, 1779-1796.
- SMALLEY, R.; D. TURCOTTE; D. AND . SOLLA; (1985); "A renormalization group approach to the stick-slip behavior of faults". J. Geophys. Res. 90, 1894-1900.

- SMALLEY, R.; J.L. CHATELAIN; D.L. TURCOTTE; R. PREVOT; (1987); "A fractal approach to the clustering of earthquakes: applications to the seismicity of New Hebrides", Bull. Seism. Soc. Am., 77, 1368-1381.
- SMITH, R.B.; W.D. RICHINS; D.I. DOSER; J.C. PECHMANN; C. LANGER; (1984); "The 1983 M<sub>s</sub> 7.3 Borah Peak, Idaho, earthquake. A model for active crustal extension". Geol. Soc. Am. Abstracts with Prog., 16, 661.
- SPICAK, A.; (1988); "Laboratory investigation into off-fault seismic activity". Bull. Seism. Soc. Am., 78, 1232-1242.
- SPICAK, A.; T. LOCAJICEK; L. WANIEK; (1986); "Seismic regime of a single fault model". Pure and Appl. Geophys., 124, 793-810.
- SPICAK, A.; T. LOCAJICEK; (1986); "Fault interaction and seismicity: laboratory investigation and its seismotectonic interpretation". Pure and Appl. Geophys., 124, 857-874.
- SPIEGEL, M.R.; (1961); "Estadística". Serie de compendios Schaum. McGraw-Hill.
- STOER, J; BURLIRSCH, R.; (1980); "Introduction to numerical analysis". New York: Springer-Verlag.
- THOMPSON, K.C.; HASKELL, N.A.; (1972); Elastodynamics near field of a finite transverse shear fault". J. Geophys. Res. 77, 2574-2582.
- TREDWAY, J.A.; D.W. STEEPLES; R.D. MILLER; (1988); "Shallow seismic study of a fault scarp near Borah Peak, Idaho". J. Geophys. Res., 93, 6325-6337.
- TRIFUNAC, M.D.; (1974); "A three dimensional dislocation model for the San Fernando, California, earthquake of February 9, 1971". Bull. Seism. Soc. Am., 64, 149-172.
- TRIFUNAC, M.D.; F.E. UDWALDIA; (1974); "Parkfield, California, earthquake of June 1966: a three dimensional moving dislocation". Bull. Seism. Soc. Am., 64, 511-533.
- TURCOTTE, D.L.; (1986a); "Fractals and fragmentation", J. Geophys. Res., 91, 1921-1926.
- TURCOTTE, D.L.; (1986b); "A fractal model for crustal deformation", Tectonophys., 132, 261-269.
- TURCOTTE, D.L.; (1989); "Fractals in Geology and Geophysics". Pure and Appl. Geophys., 131, 171-196.
- UDIAS, A.; BAUMANN, D.; (1969); "A computer program for focal mechanism determination combining P and S wave data". Bull. Seism. Soc. Am., 59, 2, 503-519.

### Referencias

- UDIAS, A.; RICE, J.;** (1975); "Statistical analysis of microearthquake activity near the San Andreas Geophysical Observatory, Hollister, California". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 65, 809-827.
- UTSU, T.;** (1969); "Aftershocks and earthquake statistics: some parameters which characterize an aftershock sequence and their interrelations". *Hokkaido Univ. Fac. Sci. Jour. Ser. VII (Geophysics)* 3, 129-195.
- UTSU, T.;** (1969); "Aftershocks and earthquake statistics (II). Further investigation of aftershocks and other earthquake sequences based on a new clasification of earthquake sequences". *Hokkaido Univ. Fac. Sci. Jour. Ser. VII (Geophysics)* 3, 197-266.
- UTSU, T.; A. SEKI;** (1955); "A relation between the area of aftershock region and the energy of main shock". *Zisin, J. Seismol. Soc. Japan*, 7, 233-240.
- VEDDER, J.G.; R.E. WALLACE;** (1970); "Map showing recently active faults breaks along the San Andreas and related faults between Cholame Valley and Tejon Pass, California. *Geol. Misc. Invest. Map 1-574. U.S. Geol. Surv., Reston, Va.*
- VIRIEUX, J.; R. MADARIAGA;** (1982); "Dynamic faulting studied by a finite difference method". *Bull. Seism. soc. Am.*, 72, 345.
- VIDAL, F.;** (1986); "Sismotectónica de la Región Béticas-Mar de Alboran". Tesis. Universidad de Granada.
- VIDAL, F.; DE MIGUEL, F.;** (1983); "Some seismological features from an analysis of recent seismic activity in the Granada Depression (Southern Spain)". XVIII General Assembly of the E.S.C., Leeds 1982. Vol II, 280-286. Postdam 1983.
- VIDAL, F.; DE MIGUEL, F.; SANZ DE GALDEANO, C.;** (1984); "Neotectónica y sismicidad de la depresión de Granada". *Energía Nuclear*, n 149-150. 267-275.
- VIDAL, F.; ALGUACIL, G.; GUIRAO, J.M.;** (1986); "Algunos aspectos de la localización hipocentral de sismos próximos". *Trobades científicas de la Mediterranea. Xarxes Sísmicas. Mao, Septiembre 1986.*
- VOLKSTORF, J.E.;** (1983); "Graphics programming on the IBM Personal Computer". A Spectrum Book. Prentice-Hall, Inc; Englewood Cliffs.
- WADATI, K.;** (1933); "On the travel-time of earthquake wave, Part II. *Geophys. Mag.* 7, pp 101-111.
- WALLACE, T.C.; HELMBERGER, D.V.; EBEL, J.E.;** (1981); "A broadband study of the 13 August 1978 Santa Barbara earthquake". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 71, 1701-1718.
- WALD, D.J.; D.V. HELMBERGER; S.H. HARTZELL;** (1989); "Rupture process on the 1987 Superstition Hills earthquake from the inversion of strong motion data". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 79, 1079-1098.

- WANG, C.; SUN, Y.; (1990); "Oriented microfractures in Cajon Pass Drill Cores: Stress Field Near the San Andreas Fault". *Journal of Geophys. Research.* Vol 90, No. B7, 11135-11142.
- WARD, G.N.; (1955); "Linearized theory of steady high-speed flow". Cambridge monographs on mechanics and applied mathematics". Cambridge University Press.
- WASHLSTROM, R.; (1976); "A computer program for localization of regional seismic events". Seismological Instituto, Box 517. S-751 20 Uppsala, Sweden.
- WESNOUSK<Y, S.G.; SCHOLZ, C.H.; SHIMAZAKI, K.; MATSUDA, T.; (1983); "Earthquake frequency distribution and the mechanics of faulting". *Journal of Geophys. Res.* Vol 88. No. B11. 9331-9340.
- WESTAWAY, R.; J. JACKSON; (1987); "The earthquake of 1980 November 23 in Campania-Basilicata (southern Italy)". *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 90, 375-443.
- WILKINSON, J.H.; (1965); "The algebraic eigenvalue problem". Oxford University Press. Oxford. 661 pp.
- WILKINSON, J.H.; C. REINSCH; (1971); "Handbook for automatic computation". Springer-Verlag. New York. 440 pp.
- WILLIAMS, P.L.; H.W. MAGISTRALE; (1989); "Slip along the Superstition Hills fault associated with the 24 November 1987 Superstition Hills, California, earthquake". *Bull. Seism. Soc. Am.* 79, 390-410.
- WONNACOTT, R.J.; WONNACOTT, T.H.; (1970); "Econometrics". John Wiley & Sons, Inc.
- YAMASHITA, T.; KNOPOFF, L.; (1989); "A model for foreshock occurrence". *Geophys. Journal.*, 96, 389-399.

***Finis Coronat Opus***