

P.

MEMORIAS
DE LA
REAL ACADEMIA DE CIENCIAS Y ARTES
DE BARCELONA

TERCERA ÉPOCA

VOL. XIV. NÚM. 12

ESTUDIO DE UN PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR
UN EPICENTRO SÍSMICO EN FUNCIÓN DE LOS VALORES DE P
EN VARIAS ESTACIONES CERCANAS

POR EL ACADÉMICO NUMERARIO

DR. EDUARDO FONTSERÉ

Publicada en febrero de 1919

BARCELONA

SOBS. DE LÓPEZ ROBERT Y C.^a, IMPRESORES, CONDE ASALTO, 63
1919

MEMORIAS

DE LA

REAL ACADEMIA DE CIENCIAS Y ARTES

DE BARCELONA

TERCERA ÉPOCA

VOL. XIV. NÚM. 12

ESTUDIO DE UN PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR
UN EPICENTRO SÍSMICO EN FUNCIÓN DE LOS VALORES DE P
EN VARIAS ESTACIONES CERCANAS

POR EL ACADÉMICO NUMERARIO

DR. EDUARDO FONTSERÉ

Publicada en febrero de 1919

BARCELONA

SOBS. DE LÓPEZ ROBERT Y C.^a, IMPRESORES, CONDE ASALTO, 63

1919

ESTUDIO DE UN PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR
UN EPICENTRO SÍSMICO EN FUNCIÓN DE LOS VALORES DE P
EN VARIAS ESTACIONES CERCANAS

por el académico numerario

DR. EDUARDO FONTSERÉ

Sesión del día 26 de junio de 1916

1. *Condiciones especiales del problema para la red sismológica española.*—El cálculo de un epicentro en función de varios valores de P ha sido objeto de diversas e interesantes soluciones; la que se desarrolla en el presente trabajo tiene por objeto adaptar la resolución a casos análogos al de la red sismológica española, tal como existe en la actualidad. Esta red, heterogénea por lo que al origen de sus estaciones se refiere, constituye, no obstante, un conjunto armónico en cuanto a las relaciones científicas entre todas ellas, habiéndose establecido un intercambio permanente de noticias entre unas y otras. Merced a esa organización espontánea, en la Academia recibimos por telégrafo indicación de la hora del comienzo y de la distancia epicentral de los principales terremotos registrados en Alicante, Almería, Granada, Málaga, San Fernando, Toledo y Tortosa, expidiendo en cambio telegráficamente a todas esas estaciones los datos análogos registrados por nosotros en el Observatorio Fabra. Cada una de las ocho estaciones de la Red cuenta dentro de las veinticuatro horas de ocurrido un temblor con elementos suficientes para el cálculo de la situación del epicentro, y desde luego es posible, con estos elementos a la vista, identificar los registros con las noticias de prensa cuando éstas se publican, y cuando no, determinar las coordenadas geográficas del lugar en que ha ocurrido el fenómeno.

Por lo que respecta a estas operaciones en nuestra estación, y aun diré que en general para toda la red española, preséntanse dos dificultades principales cuando no se quiere aguardar a conocer los datos de los observatorios sísmicos del extranjero. Es la primera la pequeñez de la base de partida, que para terremotos distantes da una incertidumbre muy grande por poco error que lleven las distancias epicentrales deducidas de los sismogramas. La segunda es la circunstancia casual de hallarse casi todos los sismógrafos en una cuerda que va de SW a NE, a excepción de los de Toledo, no muy apartados tampoco de esta dirección por lo que respecta a Barcelona. Un método gráfico cualquiera basado simplemente en las distancias epicentrales teóricas es, por estas razones, de escasa aplicación a nuestro caso, para terremotos que no sean de origen bastante próximo. Este inconveniente es aun mayor por no ser todavía uniforme el procedimiento por el cual en las diversas estaciones se calcula la distancia epicentral, sobre cuyo extremo sería de desear un acuerdo entre todas ellas. En consecuencia, resulta preferible acudir a otros procedimientos.

El cuidado con que hoy los sismólogos llevan la cuenta del tiempo, permite conocer en muchos casos con la aproximación de un segundo el momento P en que aparecen las primeras ondas longitudinales. Cuando éstas se registran con seguridad ($i P$), lo cual no siempre ocurre, las diferencias entre los valores de P en diversas estaciones son función de las coordenadas del epicentro, y éstas, a su vez, pueden determinarse dados los valores de P para tres estaciones cualesquiera.

A continuación damos una solución aproximada y otra teóricamente exacta de este último enunciado. De la primera hemos hecho uso con alguna frecuencia, con buen resultado, para una somera orientación. De la solución rigurosa nos hemos limitado por ahora a estudiar la parte geométrica, sin que tengamos datos de experiencia sobre las ventajas e inconvenientes que pueda presentar.

2. *Solución aproximada.*—Si sólo se trata de identificar un sismo lejano registrado en los observatorios con alguno de los referidos en los telegramas de prensa o en otra fuente de información cualquiera, o bien de tener idea aproximada del azimut del epicentro, y recordando que la red española no excede de ocho grados en su máxima dimensión, puede admitirse que la Península es plana y que la velocidad aparente o superficial de las ondas longitudinales es sensiblemente constante. En este caso puede reducirse el problema al enunciado

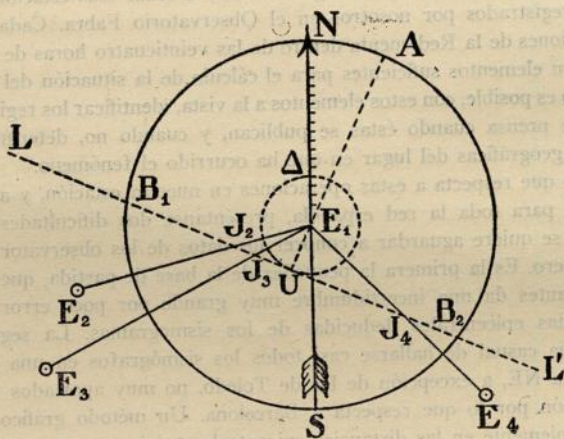


Fig. 1

siguiente: hallar la posición a que llegará la onda primera al cabo de cierto tiempo, por ejemplo 5 segundos, después de haberse registrado el principio P_1 del sismograma en la estación E_1 (fig. 1.^o). Al efecto podrá servir el conjunto de todas las estaciones de la red, del modo siguiente:

Sean, en una gráfica trazada de una vez para todas y a una escala cualquiera, E_1 la estación referida, NS su meridiana, y $E_2, E_3, \dots, E_k \dots$ las otras estaciones para las cuales se conocen los instantes $P_1, P_2, \dots, P_k \dots$ de llegada de la primera fase. Tracemos, en cada una de las rectas $E_1 E_k$, una escala cuyas divisiones disten de E_1 los cocientes de dividir $E_1 E_k$ por $1, 2, 3, \dots, n, \dots$; es claro que la intersección J_k de la recta $E_1 E_k$ con la posición de la primera onda en el instante $P_1 + 5$ s. estará en la división n^a , siendo n el número de segundos transcurridos entre P_1 y P_k . Si P_k fuese menor que P_1 , ocurriría lo mismo en la prolongación de $E_k E_1$ al otro lado de E_1 . Bastará, por consiguiente, tener marcados en la gráfica con los números $1, 2, 3, \dots, n, \dots$ los puntos de división que hemos dicho, para que conocido $n = P_k - P_1$ conozcamos en el acto la referida intersección.

Haciendo lo mismo con todas las estaciones, todos los puntos así determinados se hallarán sensiblemente en una recta LL' , que coincidirá con la primera onda correspondiente a $P_1 + 5$ s. El azimut del epicentro será el de la normal UE_1 , es decir, el ángulo $SE_1 A$.

La velocidad de propagación de la onda, a la escala adoptada, será $\frac{1}{5} E_1 U$, y dará idea aproximada de la distancia epicentral. Trazada con lápiz sobre la gráfica la onda $L L'$, y llevando ya la gráfica un círculo graduado $S A N$, se podrá determinar el azimut mediante una escuadra, o por la semisuma de B_1 y B_2 . En cuanto a la distancia epicentral, se la tendrá *grosso modo* mediante una escala de distancias trazada en función de las velocidades aparentes de propagación; esta escala puede constituir uno de los catetos de la escuadra, o estar trazada en uno de los radios, tal como $E_1 N$, a cuyo efecto puede servir la tabla n.º 2 que damos más adelante.

Como se comprende, el método sólo es aplicable a sismos de epicentro algo lejano. Dista de ser exacto; pero es inmediato y da en el acto una primera aproximación, suficiente muchas veces para la identificación a que antes nos hemos referido. Además, el azimut resulta bastante preciso, lo cual es de gran interés cuando por el estudio del sismograma se conoce ya la distancia epicentral.

3. *Solución exacta.*—Ya sea a partir de varios valores de P , como hemos supuesto en la solución anterior, ya partiendo de la combinación de dichos valores de P con el de la distancia epicentral para una de las estaciones, el problema es susceptible de soluciones gráficas, teóricamente rigurosas, algunas de las cuales han sido empleadas en la práctica (*). La que desarrollamos a continuación se funda, en principio, en suponer trazadas sobre un mapa, para las estaciones A y B , por ejemplo, los lugares geométricos de puntos del globo para los cuales $P_A - P_B = 1^s$, $P_A - P_B = 2^s$, etc., y lo mismo para las

(*) Véanse especialmente los trabajos del Dr. Zeissig sobre el particular.

estaciones A y C ; bastaría entonces determinar la intersección de una curva del primer grupo con otra del segundo para tener el punto buscado. Mas estando sujetas a revisión las tablas sismológicas actuales y conociéndose, además, con bastante aproximación, por regla general, la distancia epicentral para alguna de las estaciones, parece preferible y más práctico reducir la diferencia de P a diferencia de distancias epicentrales por medio de las tablas, y referir el caso al de determinación gráfica de un punto sobre la esfera, conocidas las diferencias de sus distancias esféricas a otros tres puntos fijos. De este modo, pueden substituirse los lugares geométricos a que antes me he referido, por otros definidos por la condición de que la diferencia de distancias esféricas a dos puntos fijos en la esfera, sea una cantidad constante. Sobre el plano, este problema conduciría para cada pareja de estaciones al trazado de una familia de hipérbolas confocales.

4. *Curvas esféricas definidas por la condición de ser constante la diferencia de distancias esféricas de sus puntos a dos puntos fijos sobre la esfera.*— Sean M y N los puntos fijos, cuya distancia angular mutua llamaremos c . Por el centro O de la esfera, cuyo radio tomaremos como unidad, y en el plano OMN , tracemos dos ejes coordenados rectangulares Ox , Oz , de los cuales el de las z

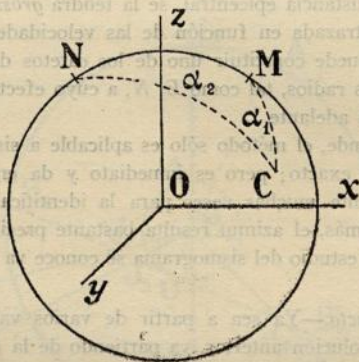


Fig. 2

equidiste de M y N , y completemos el sistema de referencia con otro eje Oy perpendicular al citado plano, de la manera ordinaria (fig. 2). Llamando a

$$(1) \quad \text{sen } \frac{1}{2} c = e \quad \text{y} \quad \text{cos } \frac{1}{2} c = f$$

las cordenadas de M serán $(e, 0, f)$ y las de $N(-e, 0, f)$. Además, $e^2 + f^2 = 1$.

- 7 -

Sea ahora $C(x, y, z)$ un punto de la esfera cuyas distancias esféricas a M y N son α_1 y α_2 . Las mismas distancias sobre las cuerdas respectivas serán:

$$(2) \quad \delta_1 = \sqrt{2} \sqrt{1 - (ex + fz)} = 2 \operatorname{sen} \frac{1}{2} \alpha_1;$$

$$\delta_2 = \sqrt{2} \sqrt{1 + (ex - fz)} = 2 \operatorname{sen} \frac{1}{2} \alpha_2$$

Una línea cualquiera de las propuestas tendrá por ecuación

$$(3) \quad \operatorname{sen} \frac{1}{2} (\alpha_2 - \alpha_1) = \pm k$$

en que el valor absoluto de k caracteriza a cada curva dentro de la familia y está comprendido entre 0 y $\frac{1}{2} c$ para la parte de ésta que aquí interesa.

De las ecuaciones (2) y (3) se obtiene, hechas las transformaciones y reducciones necesarias,

$$(4) \quad \frac{x^2}{k^2} + \frac{z^2}{1-k^2} = 1$$

Esta ecuación, juntamente con la de la esfera

$$(5) \quad x^2 + y^2 + z^2 = 1$$

define en el espacio las curvas propuestas. Por consiguiente, los lugares geométricos buscados son intersecciones de la esfera con unos cilindros de base elíptica perpendiculares al plano OMN y dados por las ecuaciones (4). Las elipses de base están envueltas, como es fácil ver, por una línea de cuarto orden.

Restableciendo en las ecuaciones (4) los valores de k, e y f , se tiene:

$$(6) \quad \frac{x^2}{\left[\frac{\operatorname{sen} \frac{1}{2} (\alpha_2 - \alpha_1)}{\operatorname{sen} \frac{1}{2} c} \right]^2} + \frac{z^2}{\left[\frac{\cos \frac{1}{2} (\alpha_2 - \alpha_1)}{\cos \frac{1}{2} c} \right]^2} = 1$$

Los semiejes de las elipses de base de los cilindros mencionados son:

$$a = \frac{\operatorname{sen} \frac{1}{2} (\alpha_2 - \alpha_1)}{\operatorname{sen} \frac{1}{2} c}; \quad b = \frac{\cos \frac{1}{2} (\alpha_2 - \alpha_1)}{\cos \frac{1}{2} c}$$

o sea:

$$(10) \quad \operatorname{sen} A = \frac{f}{e} \frac{\operatorname{sen} \frac{1}{2}(\alpha_2 - \alpha_1) \operatorname{sen} \left[\frac{1}{2}(\alpha_2 - \alpha_1) \mp \Delta \right] - \frac{e^2}{f^2} \cos \frac{1}{2}(\alpha_2 - \alpha_1) \cos \left[\frac{1}{2}(\alpha_2 - \alpha_1) \mp \Delta \right]}{\operatorname{sen} \Delta}$$

Siendo $e < f$, o sea $\frac{1}{2} e < 45^\circ$, puede ponerse:

$$(11) \quad \operatorname{sen} \frac{1}{2}(\alpha_2 - \alpha_1) = p \operatorname{sen} \varphi; \quad -\frac{e^2}{f^2} \cos \frac{1}{2}(\alpha_2 - \alpha_1) = p \cos \varphi;$$

en que p y φ serán constantes para cada valor de $(\alpha_2 - \alpha_1)$ y de c . De las (11) se deduce:

$$(12) \quad \operatorname{tg} \varphi = -\frac{\operatorname{tg} \frac{1}{2}(\alpha_2 - \alpha_1)}{\operatorname{tg}^2 \frac{1}{2} c}; \quad p = \frac{\operatorname{sen} \frac{1}{2}(\alpha_2 - \alpha_1)}{\operatorname{sen} \varphi};$$

y si además escribimos

$$(13) \quad Q_1 = \frac{p}{\operatorname{tg} \frac{1}{2} c}; \quad Q_2 = \frac{1}{2}(\alpha_2 - \alpha_1) - \varphi$$

la ecuación (10) se convierte en

$$(14) \quad \operatorname{sen} A = Q_1 \frac{\cos(Q_2 \mp \Delta)}{\operatorname{sen} \Delta}$$

en que para cada curva definida por $\alpha_2 - \alpha_1 = \text{constante}$ se tiene $Q_1 = \text{constante}$ y $Q_2 = \text{constante}$. Bastará, pues, determinar para cada una de las curvas encontradas en el párrafo 5 los valores de Q_1 y Q_2 , para hallar fácilmente los sucesivos puntos (A, Δ) en que va cortando a las diversas líneas isodiastemáticas.

6. *Resolución práctica del problema.*—Determinada, en la estación M , la distancia epicentral en grados de círculo máximo, y en el supuesto de prescindir de la determinación análoga en la estación N , la diferencia de distancias puede deducirse inmediatamente del valor $P_2 - P_1$ por medio de las tablas sísmicas corrientes. En la tabla n.º 1 que se acompaña, la primera y la segunda columnas son las adoptadas por el Comité sismológico de la *British Association* y dan en segundos los valores del tiempo $P - O$ que media entre el instante O de ocurrir el terremoto y el de llegada de los primeras ondas a la estación cuya distancia epicentral, medida en grados, es Δ . La columna tercera comprende las diferencias n entre los tiempos tabulados en la segunda columna, y la columna cuarta los valores de $\frac{1}{n}$, o sea la velocidad aparente de propagación de las ondas primeras, en grados por segundo; la ligera discontinuidad que se nota en los va-

Tabla n.º 1. Valores de P — O, y velocidades aparentes de las primeras ondas

Δ grados	P-O segundos	Dif. "	$1/\pi$ grados por segundo	Δ grados	P O segundos	Dif. "	$1/\pi$ grados por segundo	Δ grados	P-O segundos	Dif. "	$1/\pi$ grados por segundo	Δ grados	P-O segundos	Dif. "	$1/\pi$ grados por segundo
1	15			39	466			77	721			115	920		
2	31	16	0,063	40	475	9	0,111	78	727	6	0,167	116	925	5	0,200
3	47	16	0,063	41	483	8	0,125	79	733	6	0,167	117	929	4	0,250
4	62	15	0,067	42	491	8	0,125	80	739	6	0,167	118	934	5	0,200
5	77	15	0,067	43	498	7	0,143	81	745	6	0,167	119	938	4	0,250
6	92	15	0,067	43	498	8	0,125	82	750	5	0,200	120	942	4	0,250
7	106	14	0,071	44	506	7	0,143	83	756	6	0,167	121	947	5	0,200
8	121	15	0,067	45	513	7	0,143	84	762	6	0,167	122	952	5	0,200
9	136	15	0,067	46	520	7	0,143	85	768	6	0,167	123	957	5	0,200
10	150	14	0,071	47	527	7	0,143	86	773	5	0,200	124	961	4	0,250
11	164	14	0,071	48	531	6	0,167	87	778	6	0,167	125	966	5	0,200
12	179	15	0,067	49	540	7	0,143	88	779	6	0,167	126	970	4	0,250
13	193	14	0,071	50	547	6	0,167	89	785	5	0,200	127	974	4	0,250
14	206	13	0,077	51	553	7	0,143	90	790	6	0,167	128	978	4	0,250
15	219	13	0,077	52	560	6	0,167	91	796	5	0,200	129	983	5	0,200
16	232	13	0,077	53	566	7	0,143	92	801	6	0,167	130	988	5	0,200
17	245	13	0,077	54	573	6	0,167	93	807	5	0,200	131	992	4	0,250
18	257	12	0,084	55	579	7	0,143	94	812	6	0,167	132	996	4	0,250
19	269	12	0,084	56	586	6	0,167	95	818	5	0,200	133	1001	5	0,200
20	281	12	0,084	57	592	6	0,167	96	823	6	0,167	134	1005	4	0,250
21	293	12	0,084	58	599	7	0,143	97	829	5	0,200	135	1009	4	0,250
22	305	12	0,084	59	605	6	0,167	98	834	5	0,200	136	1014	5	0,200
23	317	12	0,084	60	612	7	0,143	99	840	6	0,167	137	1018	4	0,250
24	328	11	0,091	61	619	6	0,167	100	845	6	0,167	138	1023	5	0,200
25	338	10	0,100	62	625	7	0,143	101	851	4	0,250	139	1027	4	0,250
26	348	10	0,100	63	632	6	0,167	102	855	5	0,200	140	1031	4	0,250
27	358	10	0,100	64	638	7	0,143	103	860	5	0,200	141	1035	4	0,250
28	368	10	0,100	65	645	6	0,167	104	865	5	0,200	142	1039	4	0,250
29	378	10	0,100	66	651	7	0,143	105	870	4	0,250	143	1043	4	0,250
30	388	10	0,100	67	658	6	0,167	106	874	5	0,200	144	1047	4	0,250
31	398	10	0,100	68	664	7	0,143	107	879	5	0,200	145	1051	4	0,250
32	407	9	0,111	69	671	6	0,167	108	884	4	0,250	146	1055	4	0,250
33	416	9	0,111	70	677	6	0,167	109	888	5	0,200	147	1059	4	0,250
34	425	9	0,111	71	683	7	0,143	110	893	4	0,250	148	1063	4	0,250
35	433	8	0,125	72	690	6	0,167	111	897	5	0,200	149	1067	4	0,250
36	442	9	0,111	73	696	6	0,167	112	902	5	0,200	150	1071	4	0,250
37	450	8	0,125	74	702	7	0,143	113	907	4	0,250				
38	458	8	0,125	75	709	6	0,167	114	911	5	0,200				
		8	0,125	76	715	6	0,167			4	0,250				

lores de n y $\frac{1}{n}$ depende naturalmente del orden de aproximación de P y no ofrece inconveniente práctico, habiéndose conservado para facilitar mejor la interpolación. No obstante, para facilitar la aplicación numérica, hemos condensado los valores de la tabla n.º 1 en la n.º 2, tomando al efecto, para el cálculo, grupos de números alrededor de cada argumento tabulado. En esta forma la serie de velocidades se presta mejor a la formación de la escala indicada en la figura 1.ª No creemos que el método se preste a mayor exactitud que la que puede obtenerse con esta pequeña sucesión de valores; pero si se quisiera, podría acudir a la serie, más detallada, de los intervalos $P-O$ que figura en las tablas del Dr. Klotz, cuyos argumentos se siguen de 20 en 20 kilómetros.

Con la tabla así dispuesta, se puede determinar inmediatamente, dados el valor de Δ_1 (que para esto puede tomarse en grados enteros) y el de $P_2 - P_1$, el de $\alpha_2 - \alpha_1$.

Tabla n.º 2. Velocidades aparentes de propagación de las primeras ondas

Distancia epicentral en grados	Velocidad aparente		Distancia epicentral en grados	Velocidad aparente		Distancia epicentral en grados	Velocidad aparente	
	grados p. s.	kilómetros p. s.		grados p. s.	kilómetros p. s.		grados p. s.	kilómetros p. s.
0	0,063	7,00	45	0,138	15,34	90	0,182	20,2
5	0,067	7,44	50	0,153	17,00	95	0,182	20,2
10	0,070	7,78	55	0,153	17,00	100	0,196	21,8
15	0,077	8,56	60	0,153	17,00	110	0,217	24,1
20	0,084	9,31	65	0,154	17,13	120	0,220	24,4
25	0,098	10,89	70	0,156	17,38	130	0,225	25,0
30	0,103	11,43	75	0,161	17,87	140	0,241	26,8
35	0,118	13,13	80	0,170	17,86	150	0,250	27,8
40	0,121	13,42	85	0,175	19,42			

No hay para qué decir que en ningún caso la determinación de un epicentro a partir de una base pequeña puede llegar a la precisión que se obtiene con grandes bases. El método que acabamos de exponer, por consiguiente, sólo podría ser subsidiario del estereográfico aplicado a una base más extensa y aún podríamos decir del fundado en los rumbos y distancias en una sola estación, método este último que constituye un ideal al cual por hoy no podemos aspirar en el Observatorio Fabra, mientras en material y en personal no contemos con mayores recursos.