

19 AGO 2013



INSTITUTO DE GEOFISICA
BIBLIOTECA

GEOFISICA

INTERNACIONAL

REVISTA DE LA UNION GEOFISICA MEXICANA, AUSPICIADA POR EL INSTITUTO DE GEOFISICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Vol 11

México, D. F., 1 de Octubre de 1971

Núm. 4

PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE TEMBLORES SUCESIVOS DE MAGNITUD EN LA CIUDAD DE MEXICO

SERGIO G. FERRAES*

RESUMEN

Para estudiar aspectos de la sismicidad de la Región Central de México, la relación entre el número N de temblores ocurridos y su magnitud, así como su interpretación en conexión con la estructura del Manto Superior, se usaron datos de aproximadamente 250 temblores de magnitud 3.5 o más y de profundidades focales menores de unos 70 Km ocurridos en la Ciudad de México.

Para investigar la relación entre la magnitud y la frecuencia usamos la ecuación de Gutenberg y Richter. La forma particular que toma esta fórmula para describir la sismicidad del área central de México, es aproximadamente,

$$\log_{10} N(M) = 4.54 - 0.55 M$$

Desarrollamos, enseguida, un procedimiento para calcular la probabilidad de que un temblor sucesivo de magnitud específica m_j , ocurra después de que un temblor de magnitud dada M_i ha ocurrido en la región. La distribución de las "probabilidades de transición" de temblores sucesivos indica evidencia de una tendencia sistemática en la ocurrencia de temblores sucesivos en la Región Central de México.

* Instituto de Geofísica, U.N.A.M.

ABSTRACT

Nearly 250 successive earthquakes felt in Mexico City, comprising magnitudes which ranged from 3.5 or greater and focal depth smaller than about 70 Km, have been used to study aspects of the seismicity of the Central Region of Mexico, the relation between the N number of earthquakes, and their magnitude, as well as their interpretation in connection with the Upper Mantle structure.

The relation between the magnitude and the frequency is investigated using the Gutenberg-Richter equation. The particular form that this formula takes to describe the seismicity of the Central Region of Mexico, is approximately.

$$\log_{10} N(M) = 4.54 - 0.55 M$$

Next, a procedure is developed for estimating the probability that a successive earthquake of specific magnitude m_j will occur after an earthquake of given magnitude M_i has already occurred. The distribution of "probabilities of transition" of successive earthquakes indicates evidence of a systematic tendency in the occurrence of successive earthquakes in the Central Region of Mexico.

INTRODUCCION

Gutenberg y Richter (1954) han establecido una relación analítica entre la magnitud de los temblores y su frecuencia de ocurrencia. Sin embargo, para estudios de predicción de temblores cualquier relación analítica entre la frecuencia y la magnitud de los temblores no nos proporciona información específica sobre la posible magnitud de un futuro temblor. Para ello, es necesario conocer los parámetros de la distribución observada de frecuencias de temblores de magnitud M para el área sísmica seleccionada para estudio.

Este artículo tiene por objeto investigar dos problemas fundamentales:

- 1) La forma específica de la fórmula de Gutenberg-Richter para la serie de temblores sucesivos sentidos en la Ciudad de México y su interpretación física en relación con la estructura del Manto Superior.
- 2) El problema de medir y predecir la probabilidad de que un temblor sucesivo de magnitud m_j ocurra, suponiendo que un temblor de magnitud dada M_i ha ocurrido en la ciudad de México.

Investigaciones de esta clase permiten un estudio de la sismicidad de la región, en el espacio y en el tiempo y por lo tanto pueden contribuir al problema de la predicción de temblores.

DISTRIBUCION OBSERVADA DE LA FRECUENCIA DE MAGNITUDES

Los datos usados en este estudio fueron tomados del *Boletín* del United States Coast and Geodetic Survey (U.S.C.G.S.). Estos datos fueron complementados con los "Boletines del Servicio Sismológico Mexicano", que usa métodos de medida y proceso de datos sísmicos establecidos por el U.S.C.G.S.

Para este estudio hemos elegido la serie de temblores sentidos en la Ciudad de México durante los años 1928-1966, que tienen magnitud 3.5 o mayor. Estos temblores son una serie de temblores normales (profundidad focal más pequeña que casi 70 Km). La región sísmica particular en estudio se extiende aproximadamente de la latitud 16° N hasta los 19° N y desde la longitud 96° W hasta los 105° W. Esta área fue seleccionada tomando en consideración la localización geográfica de los epicentros de los temblores sentidos en la Ciudad de México. En la Tabla I, se da la distribución observada de la frecuencia de los temblores *versus* la magnitud M.

TABLA I

DISTRIBUCION PRELIMINAR OBSERVADA DE FRECUENCIAS-MAGNITUD DEL NUMERO DE TEMBLORES N *VERSUS* MAGNITUD M, PARA EL INTERVALO DE CLASE $\Delta M = 0.4$, EN LA REGION CENTRAL DE MEXICO.

Magnitud Clase-Intervalo	Magnitud Punto Medio	Frecuencia
3.6 - 4.0	3.8	22
4.1 - 4.5	4.3	28
4.6 - 5.0	4.8	45
5.1 - 5.5	5.3	51
5.6 - 6.0	5.8	33
6.1 - 6.5	6.3	30
6.6 - 7.0	6.8	13
7.1 - 7.5	7.3	12
7.6 - 8.0	7.8	6

En la Tabla I, la serie de 240 temblores ocurridos entre los años 1928 y 1966, son agrupados en intervalos unitarios de magnitud $\Delta M = 0.4$. Furumoto (1966) usa intervalos de magnitud $\Delta M = 0.5$ y ha hecho hincapié en que la dispersión se reduce usando dichos intervalos.

APLICACION DE LA ECUACION DE GUTENBERG-RICHTER

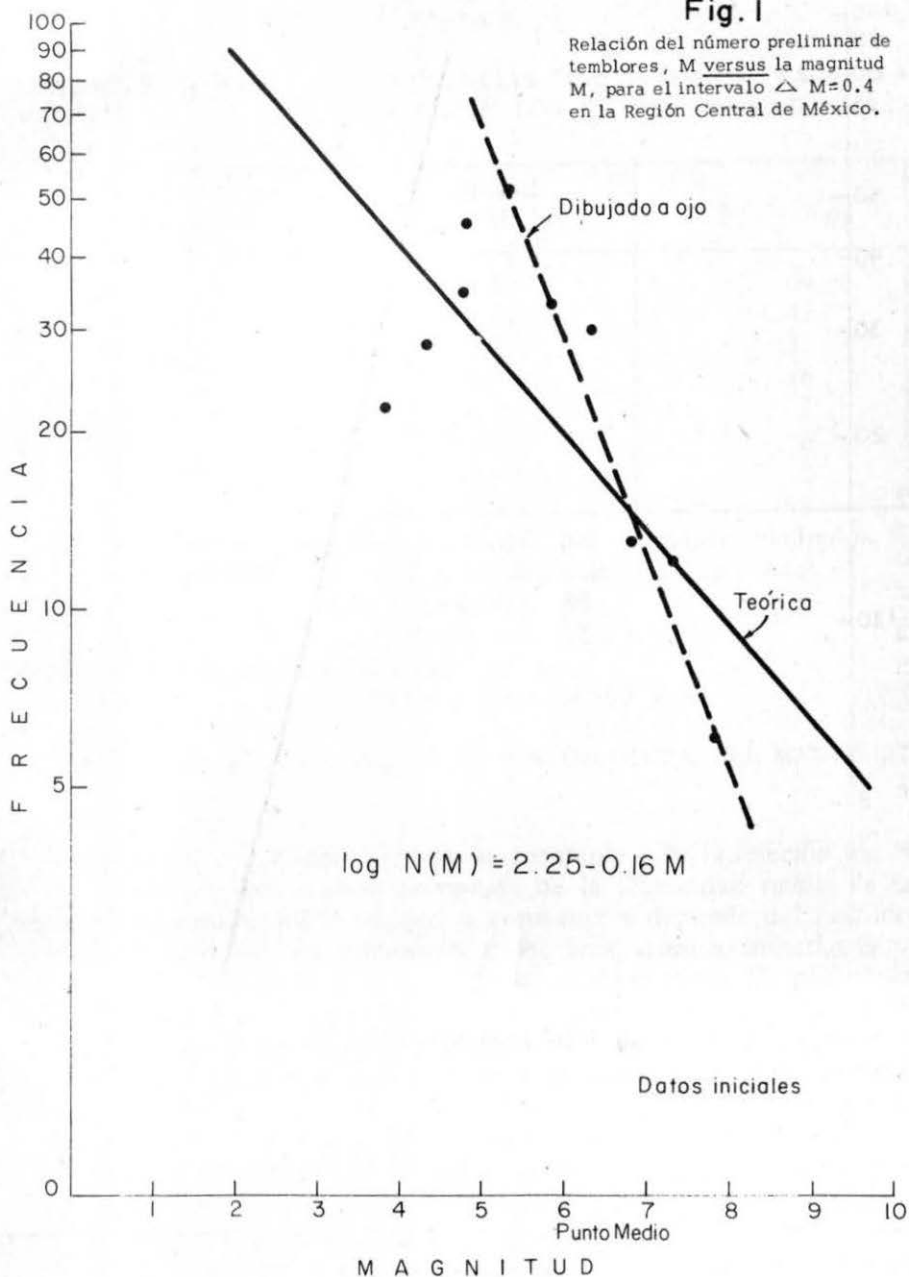
Supondremos que la fórmula de Gutenberg-Richter puede ser aplicable a la Región Central de México y por lo tanto, trataremos de ajustar una ecuación de la forma $\log N = a - b M$ a los datos sísmicos frecuencia N *versus* magnitud M . Para esto es necesario discutir el tema de la uniformidad y la omisión de datos sobre todo para temblores de pequeña magnitud. La Fig. 1 muestra un diagrama semi-logarítmico del número de temblores N *versus* la magnitud M .

Nótese que la distribución observada no es lineal, pues tiene una deflexión de la curva en las magnitudes pequeñas. Este hecho es porque nuestra lista de temblores es incompleta, especialmente para pequeñas magnitudes y en los datos de los primeros años. El número de temblores N para $M = 4.8$ se desvía de la línea calculada en el extremo izquierdo del diagrama. Nótese también, que si una línea es dibujada aproximadamente a ojo, los datos se desvían mucho más de esta nueva línea. Esta desviación se puede explicar debido a la lista incompleta de temblores de magnitud pequeña durante un gran número de los primeros años. Por lo tanto, debemos limitar nuestros cálculos a las magnitudes comprendidas desde 4.8 y mayores donde los datos son razonablemente completos y el diagrama semi-logarítmico de los datos sísmicos es aproximadamente una función lineal decreciente. Por lo tanto, el procedimiento correcto es considerar un espacio de tiempo más corto, por ejemplo, desde 1941 hasta 1966 y además, limitar nuestros cálculos a sismos de magnitudes de 4.8 y mayores.

La Tabla II da los datos de la distribución de frecuencia de 169 temblores sentidos en la Ciudad de México en el intervalo de tiempo 1941-1966 y dentro del rango de magnitud desde 4.8 y mayores. La Fig. 2 muestra el diagrama semi-logarítmico final del número de temblores N *versus* la magnitud.

Fig. 1

Relación del número preliminar de temblores, M versus la magnitud M , para el intervalo $\Delta M=0.4$ en la Región Central de México.



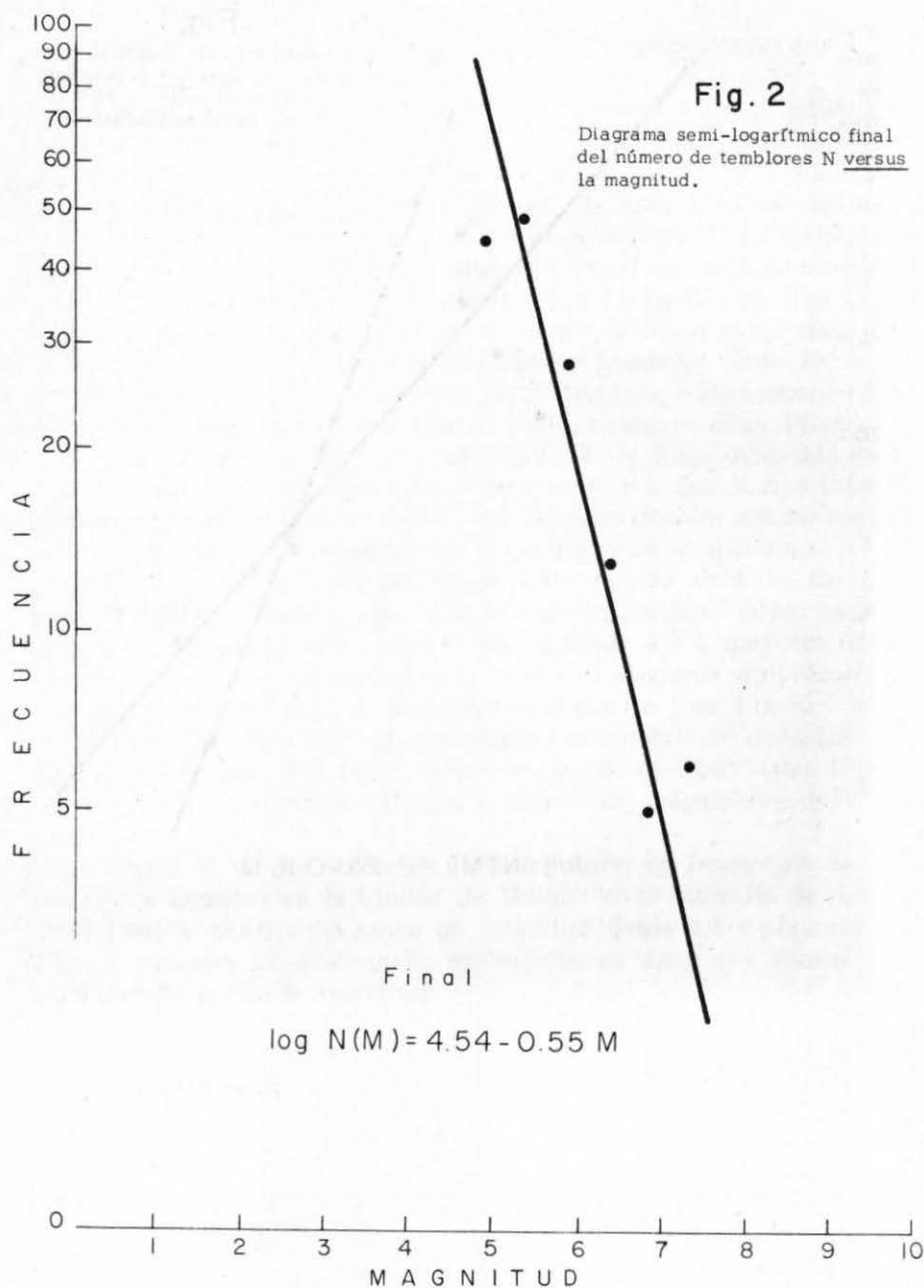


TABLA II

DISTRIBUCION FINAL DE FRECUENCIAS OBSERVADAS *VERSUS* LA MAGNITUD PARA EL CASO EN QUE LOS DATOS SON RAZONABLEMENTE COMPLETOS

Magnitud Clase-Intervalo	Magnitud Punto Medio	Frecuencia
4.6 - 5.0	4.8	64
5.1 - 5.5	5.3	47
5.6 - 6.0	5.8	31
6.1 - 6.5	6.3	16
6.6 - 7.0	6.8	5
7.1 - 7.5	7.3	6
7.6 - 8.0	7.8	0

Los parámetros obtenidos al ajustar por mínimos cuadrados la fórmula $\log_{10} N(M) = a - b M$, a los datos de la Tabla II son:

$$\begin{aligned} b &= + 0.553 \pm 0.068 \\ a &= + 4.536 \pm 0.432 \end{aligned} \quad (1)$$

y la ecuación de la línea recta calculada es

$$\log_{10} N(M) = 4.536 - 0.553 M \quad (2)$$

INTERPRETACION DE COEFICIENTES Y ESTRUCTURA DEL MANTO SUPERIOR

De acuerdo con Karnik (1964), la constante a de la relación $\log N = a - b M$ es una medida apropiada de la sismicidad media de la región en estudio, supuesto que la constante a depende del período de observación de las dimensiones del área sísmica investigada y sobre todo del nivel de la actividad sísmica de la época. Respecto a la constante sísmica b se sostienen dos hipótesis: una dice que b es constante en una región y otra sostiene un cambio de la constante b en el tiempo. En este trabajo trataremos de dar una interpretación un poco diferente de las constantes a y b , utilizando para este fin la comparación con otros valores obtenidos en el Continente Americano.

La única otra determinación del valor de la constante b hecha para México y América Central es la calculada por Gutenberg y Richter (1954). Estos autores obtuvieron $b = 0.9$, utilizando 52 temblores dentro del rango de magnitud de 6 a 8. El valor calculado en este

artículo ($b = 0.553$) está basado en 169 temblores dentro del rango de magnitud 4.6 – 8.0 y describe la sismicidad regional particular de la Región Central de México.

Es interesante notar que el valor de b , calculado por Gutenberg y Richter para América del Sur es $b = 0.45$ y fue obtenido usando 34 temblores dentro del rango de magnitud 6 a 8; este valor y el valor obtenido en este estudio ($b = 0.55$) están aproximadamente de acuerdo. Esto nos sugiere que la ocurrencia de temblores sucesivos en México y en América del Sur se realiza en tal forma que es producido por un mecanismo semejante.

Supongamos, ahora, que la magnitud es una medida apropiada de la energía gastada para pasar a un nuevo estado de equilibrio físico. Por lo tanto, si los valores de las constantes a y b son casi los mismos para diferentes regiones sísmicas activas, este resultado indicará que la liberación energética del material terrestre en cada región particular sucede bajo condiciones físicas semejantes. Esto significa que la energía es liberada en la parte Central de México y en América del Sur bajo condiciones semejantes en la corteza y en el Manto Superior de la Tierra.

PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE TEMBLORES SUCESIVOS

La predicción del valor instantáneo de la magnitud del siguiente temblor sucesivo es un problema no resuelto actualmente en Sismología. Sin embargo, veremos que es posible predecir la probabilidad de encontrar el valor de la magnitud de un temblor dado dentro de cierto rango.

Para determinar la probabilidad de ocurrencia de un cierto temblor de magnitud M , usaremos la distribución observada de frecuencias *versus* magnitud de temblores que estudiamos en la sección previa. Nosotros estamos, en general, interesados en la distribución de temblores en cada intervalo de clase de amplitud $\Delta M = 0.4$. Para ilustrar nuestras ideas consideremos, por ejemplo, el intervalo de magnitud que se encuentra entre 5.1 y 5.5 (escala de Richter). Para este intervalo tenemos 51 temblores. Es importante notar que para cada uno de estos 51 temblores tenemos un temblor sucesivo cuya magnitud puede estar dentro del rango de 3.6 a 8.0 (escala de Richter).

Por lo tanto, podemos reclasificar estos 51 temblores en un número conveniente de clase intervalos de magnitud $\Delta m = (m_0 -$

m_1), $(m_1 - m_2) \dots$. Obteniendo en esta forma una distribución de temblores sucesivos que pueden ocurrir después que ocurra un temblor de magnitud en el intervalo 5.1 - 5.5, con magnitud media $\bar{M}_i = 5.3$ (escala de Richter). En la Tabla III se muestra la distribución de frecuencias de temblores sucesivos que pueden ocurrir dado que un temblor de magnitud media $\bar{M}_i = 5.3$ haya ocurrido.

TABLA III

DISTRIBUCION OBSERVADA DE FRECUENCIAS DE TEMBLORES SUCESIVOS QUE PUEDEN OCURRIR DADO QUE UN TEMBLOR DE MAGNITUD ESPECIFICA $M = 5.3$ HA OCURRIDO.

Magnitud Punto-Medio									
\bar{m}_j	3.8	4.3	4.8	5.3	5.8	6.3	6.8	7.3	7.8
Frecuencia	1	6	14	12	10	4	1	0	1

Este proceso generará una distribución de frecuencias un tanto distinta para la ocurrencia de temblores sucesivos que puedan tener magnitudes medias \bar{m}_j , dado que un temblor de magnitud media \bar{M}_i ha ocurrido.

En general, entenderemos por "probabilidad de transición" de un temblor sucesivo de magnitud media \bar{m}_j la razón matemática del número de temblores sucesivos ocurridos con éxito, llamado r_i , al número total de posibles temblores de magnitud media \bar{M}_i que llamaremos R , en símbolos

$$P(\bar{m}_j, \bar{M}_i) = \frac{r_i}{R} \quad (3)$$

Es importante notar que en nuestro estudio estamos suponiendo que la frecuencia relativa se aproxima a la probabilidad verdadera (Rietz 1927).

Las "probabilidades de transición" de temblores sucesivos pueden representarse en forma más eficiente por medio de una "tabla de contingencia" de distribuciones de frecuencia. En estas tablas las "probabilidades de transición" son localizadas en los varios rectángulos con referencia a las magnitudes medias de los intervalos de clase.

En esta forma, las "probabilidades de transición" de un temblor sucesivo de magnitud media \bar{m}_j son establecidas en la Tabla IV para cada temblor dado de magnitud media \bar{M}_i .

TABLA IV

"PROBABILIDADES DE TRANSICION" OBSERVADAS DE TEMBLORES SUCESIVOS EN LA REGION CENTRAL DE MEXICO.

$\bar{M}_i \backslash \bar{m}_j$	3.8	4.3	4.8	5.3	5.8	6.3	6.8	7.3	7.8
3.8	0.48	0.19	0.24	0.05	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00
4.3	0.27	0.23	0.27	0.04	0.12	0.04	0.00	0.04	0.00
4.8	0.06	0.14	0.22	0.33	0.14	0.06	0.04	0.00	0.00
5.3	0.02	0.12	0.29	0.24	0.20	0.08	0.02	0.00	0.02
5.8	0.00	0.03	0.12	0.41	0.18	0.12	0.12	0.03	0.00
6.3	0.03	0.03	0.12	0.19	0.06	0.31	0.09	0.06	0.09
6.8	0.00	0.08	0.15	0.15	0.31	0.08	0.15	0.00	0.08
7.3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.33	0.11	0.33	0.11
7.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.33	0.00	0.50	0.00

Si la magnitud de un temblor dado es independiente de la magnitud del temblor anterior, las "probabilidades de transición" marginales deben conformarse a la distribución de Gutenberg y Richter. Esto es aproximadamente cierto para valores pequeños de \bar{M}_i , pero no lo es para valores grandes. Por ejemplo, después de un temblor de magnitud 6.8 el valor más probable para el sismo siguiente es $\bar{m}_j = 5.8$. Si $\bar{M}_i = 7.8$ se tiene una magnitud modal de 7.3.

En conclusión, después de un temblor grande se producen sismos más grandes de lo que corresponde esperar de la distribución de Gutenberg y Richter. Este efecto puede atribuirse a la ocurrencia de réplicas o sea, temblores sucesivos más pequeños que dependen estadísticamente del temblor principal. El resultado de la Tabla IV parece indicar que la magnitud media aumenta después de ocurrir un sismo importante.

Como es frecuente que los temblores de pequeña magnitud no sean registrados, inmediatamente de ocurrido un sismo grande, el efecto arriba mencionado puede deberse a una falta de datos. En todo caso, sería necesario efectuar una investigación más prolija para confirmar o desechar la conclusión a que hemos llegado.

BIBLIOGRAFIA

- FERRAES, S.G. 1967. Test of Poisson Process for Earthquakes in Mexico City, *Jour. Geophys Research*, 72 (14): 3741 – 3742.
- GUTENBERG, B. and C.F. RICHTER, 1954. *Seismicity of the Earth*, (2nd. ed.) Princeton University Press, Princeton, N.J.
- KARNIK, V. 1964. Magnitude-Frequency Relation and Seismic Activity in Different Regions of the European Area, *Bull Intern. Inst. Seism. Earthq. Eng.* 1: 9-32.
- RIETZ, H.L. 1927. *Mathematical Statistics. Carus-Mathematical Monograph No. 3*, Open Court Pub. Co., Chicago, Ill.