

DR. HERNANDO TAVERA
C.N.D.G. I.G.P.

INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU

SECTOR EDUCACION

DIRECCION DE SERVICIOS TECNICOS

PELIGRO SISMICO PARA LA REGION CENTRAL DEL PERU

Leandro Rodriguez V.

Jhonny Tavera H.



Lima-Peru

DIC-1987

RESUMEN.

El estudio del Peligro Sismico de una region, implica desarrollar un modelo probabilistico que permita estimar los parametros de aceleracion maxima del suelo y la mayor intensidad sismica esperada en cualquier punto para un periodo de retorno predeterminado. El modelo se obtiene en base a datos de frecuencia y magnitud de los eventos sismicos obtenidos a partir de la sismicidad historica e instrumental, asi como de datos geologicos.

Consideramos la region central del Peru dado el interes politico-social de trasladar la capital a la localidad de Concepcion (Huancayo). En esta area hemos identificado tres fuentes sismicas en funcion de la profundidad del evento sismico. Para esto se ha analizado detalladamente la sismicidad desde el ano 1500 hasta 1986, el intervalo de tiempo comprendido entre 1500 a 1900 es asumido como informacion cualitativa y se ha considerado solamente los hypocentros bien resueltos.

Los resultados se presentan en mapas de maximas aceleraciones e intensidades para periodos de retorno de 50 y 100 anos. Algunas ciudades como Oxapampa, Huancayo y Chincha Alta, presentan valores altos de aceleracion e intensidad, por lo que deben ser consideradas como ciudades de gran Peligro Sismico.

2. - INTRODUCCION.

En países sísmicos como el Perú es indispensable realizar estudios para estimar el Peligro Sísmico como un intento de prevenir y mitigar los daños causados por los terremotos, ya que en el diseño de obras importantes debe considerarse el balance entre el costo de la obra y la seguridad de las construcciones.

El estado del conocimiento en este campo nos muestra que a pesar del incremento de las investigaciones en el análisis del Peligro Sísmico, los modelos probabilísticos presentan ciertas limitaciones, sin embargo, el uso de estos modelos ayuda a tomar decisiones en ingeniería y a la vez estimulan la búsqueda de nuevos caminos que permitan dar a los problemas una solución de manera determinística. La incertidumbre existente en estimar el número, tamaño y ubicación de futuros terremotos hace que el Peligro Sísmico se exprese en términos de periodo de retorno.

La severidad sísmica con la cual podría ser probabilísticamente sacudido un determinado sitio fue descrito por Cornell(1968), modificado y ampliado por Cornell y Vanmarcke (1969) y aplicado en el Perú por Huaco (1980, 1982).

Siguiendo la metodología establecida por los autores antes mencionados, hemos evaluado el Peligro Sísmico para la parte central del Perú (Lat. 9 a 15 S. y Lon. 72 a 78 W., ver fig. 1) utilizando para ello el programa de Mc. Guire(1976). La información sísmica utilizada ha sido obtenida del Catálogo Sísmico actualizado del Instituto Geofísico del Perú (Huaco, 1986) complementado con información en tiempo real (Autoseis) desde 1983 y la información histórica desde 1500. Los eventos ubicados en el área de estudio fueron evaluados considerando sus parámetros focales, con el objeto de obtener una información más representativa.

3. - BASE TEORICA Y METODOLOGIA

La evaluación del Peligro Sísmico en términos de probabilidad que un sitio sea sacudido con una severidad que exceda un valor B, puede ser evaluada utilizando la ecuación de probabilidad total dada por Oliveira (1974) y Mc. Guire(1976), expresado de la manera siguiente :

$$P(B) = \iint P(B/M,R) F_m(M) F_r(R) dr dm \quad (1)$$

donde:

- P = Probabilidad.
- B = Severidad del evento buscado.
- M, R = Variables aleatorias independientes.

$P(B/M,R)$ = Probabilidad condicional de B.
 R = Distancia epicentral.
 M = Magnitud en Mb.

La función $F_m(M)$ es la densidad de probabilidad que se define de acuerdo al número de sismos que tienen una magnitud mayor que Mb o Ms (según sea el caso), en una fuente sísmica. Según Richter (1958), el número de sismos que ocurren en una área y en una unidad de tiempo, puede definirse de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$\text{Log } N_c = a - b m \quad (2)$$

donde:

N_c = Número acumulativo de sismos.
 a y b = Constantes que caracterizan a la fuente "b", esta relacionado con la magnitud del sismo y "a" depende del periodo de observación.

La distribución acumulativa con relación a la fórmula anterior se puede expresar como:

$$F_m(M) = K [1 - \exp(-\beta (m - m_0))] \quad (3)$$

donde:

$m_0 \leq m \leq m_1$
 $\beta = b \ln(10)$
 m_0 = Límite de la magnitud.
 m_1 = Máxima magnitud esperada.
 $K = [1 - \exp(-\beta (m_1 - m_0))]^{-1}$

la correspondiente densidad de probabilidad es:

$$f_m(M) = dF_m(M) / dm = \beta K \exp(-\beta (m - m_0)) \quad (4)$$

la función de probabilidad como función de la distancia $F_r(R)$ depende de la relación espacial entre la fuente y el sitio de observación (geometría de la fuente). Si $F_r(R)$ es una distribución de probabilidad en R, se tiene:

$$F_r(R) = P [R \leq r]$$

y

$$f_r(R) = dF_r(R) / dr \quad (5)$$

por último, la probabilidad condicional $P[B/M,R]$, de que la aceleración B exceda el valor de la aceleración B_0 , depende de la ecuación de movimiento del suelo o de la función de su atenuación. Muchos autores han descrito varias formas de esta ecuación, siendo la más representativa de todas la definida

por:

$$B(M,R) = C1 + C2 + C3 \ln(R + R_0) \quad (6)$$

donde:

$C1, C2, C3, R_0$ = Constantes.
 M = Magnitud del sismo. (Mb. o Ms.)
 R = Distancia epicentral en Km.

empleando la ecuacion antes senalada, la probabilidad condicional $P(B/R, M)$ se puede expresar como:

$$P(B/M, R) = \phi [B - C1 - C2 M - C3 \ln(R + R_0)] / \sigma \quad (7)$$

donde:

ϕ = Complementaria de la distribucion acumulativa normal.
 σ = Desviacion standar de la ecuacion de aceleracion.

El Peligro Sismico se calcula evaluando la ecuacion (1) en funcion de las ecuaciones (5), (6) y (7). Asi, el Peligro Sismico de un determinado lugar desde un punto de vista probabilistico viene expresado en terminos de aceleracion maxima e intensidad maxima para un determinado periodo de retorno, en funcion a la distancia y tamaño del sismo (magnitud). La metodologia del estudio comprende los siguientes pasos:

- Identificacion de las fuentes sismicas.
- Descripcion y analisis de las características sismicas de cada fuente.
- Determinacion de la ecuacion modelo del suelo en terminos de probabilidad $P(B)$.

La determinacion de las fuentes sismicas se realiza en base a mapas sismicos, cuya informacion es previamente calificada considerando las variaciones en profundidad y tamaño de cada evento. Para este fin, la actividad sismica historica juega un rol cualitativo muy importante mientras que la actividad sismica instrumental nos permitira delinear cada fuente.

La ecuacion de frecuencia dada por Richter definida en la (2), nos permite obtener la recurrencia sismica para una determinada fuente considerando el rango de magnitud de los eventos que integran dicha fuente.

El movimiento del suelo o maximas aceleraciones se determinan usando ecuaciones empiricas de atenuacion como (6), que relacionan la aceleracion, magnitud y la distancia epicentral, por lo tanto la obtencion de esta ecuacion debe realizarse en forma muy cuidadosa. Finalmente, utilizando las ecuaciones (4), (5) y (7) se obtiene la probabilidad total de que una aceleracion sea excedida en un punto dentro de un periodo de tiempo.

4. - SISMICIDAD E IDENTIFICACION DE FUENTES SISMICAS.

Para evaluar el Peligro Sismico de una determinada region es necesario conocer la sismicidad historica e instrumental. La influencia de la sismicidad historica se refleja en la estimacion de la severidad con que se espera que una determinada zona sea sacudida, esta informacion es basicamente la que aparece en Polo(1898,1904), Silgado(1978). Asimismo Huaco(1980) genera una tabla con intensidades para sismos importantes ocurridos en Lima y ademas destaca una caracteristica importante, que estos sismos han tenido areas de destruccion relativamente extensas, siendo percibidas a lo largo de toda la costa, tambien indica que estos movimientos habrian estado asociados a la formacion de fracturas paralelas a la costa, con parametros focales posiblemente semejantes a los sismos actuales (Huaco, 1983). El Catalogo Sismico del Peru, presenta los parametros focales e intensidades para eventos ocurridos entre 1500 a 1982, las magnitudes de algunos de los eventos historicos fueron estimados en base a las ecuaciones desarrolladas por Huaco y Rodriguez (1983).

La actividad sismica en nuestro pais se puede dividir en dos grupos. Un primer grupo abarca los eventos relacionados con la subduccion de la placa oceanica de Nazca, bajo la placa continental Sudamericana. Estos eventos delimitan la zona de Benioff con una ^{en} inclinacion de 30 al sur del pais y de aproximadamente 17 ^{hacia} el norte, hasta los 100 km. de profundidad. A partir de alli esta se horizontaliza bajo el Peru central, mientras que el Peru meridional parece conservar la misma inclinacion hasta 300 a 400 Km. (Stauder, 1975, Barazangi y Isacks, 1976-1979, Snook, 1979 Hasegawa y Sacks, 1981, Boyd, 1983, Deza, 1985, Grange et al, 1984). El segundo grupo menos importante que el precedente, en cuanto a la energia total liberada, lo conforman los eventos denominados "intraplaca" asociados con los esfuerzos tectonicos acumulados en el seno de la litosfera continental andina. Parte de esta sismicidad esta asociada con fallas activas conocidas en superficie como las de Huaytapallana y Cordillera Blanca (Dorbath et al, 1986, Deverchere, et al, 1987).

La calificacion de los eventos sismicos para el primer periodo (1500 a 1900) se realiza desde el punto de vista cualitativo. Para el segundo periodo se analizan diferentes perfiles asi como la calidad del calculo en profundidad para mejorar la visualizacion de la resolucion de los eventos.

Las figuras 2 y 3 presentan la sismicidad del area de estudio para los periodos 1900-1981 y 1982-1986 respectivamente. En estas figuras se observa un incremento en la sismicidad a partir de 1982, debido esencialmente a una mejora en el nivel de deteccion en tiempo real, gracias a la implementacion del sistema Autoseis del I. G. P. (Convenio con la AID y CIW), por lo tanto, para este estudio se consideraran solamente eventos con magnitudes (Mb.) mayores a 2.5.

El analisis de la sismicidad de la region a fin de evaluar su Peligro Sismico, nos ha permitido identificar tres fuentes sismicas, cada una de estas dividida en dos sub-fuentes.

- Fuente Nro.1: esta constituida por eventos superficiales de 0 a 33 Km. de profundidad, con epicentros cercanos a la fosa oceanica Peru-Chile y a la zona cortical andina que comprende fallamientos activos (falla de Huaytapallana) como se ilustra en la fig. 4. En la tabla 1 se presenta los sismos destructores ocurridos en esta fuente. La fig. 5 muestra la curva de frecuencia para la misma, definida por:

$$\text{Log } N_c = 4.054 - 0.624 \text{ Mb.}$$

$$= 1.43$$

- Fuente Nro.2: abarca la actividad sismica que ocurre en la zona de subduccion y en los contrafuertes andinos, con profundidades entre 33 a 70 Km. (fig.6) Los sismos severos ocurridos en esta fuente se presentan en la tabla 2 y en la fig. 7 se muestra su curva de frecuencia sismica definida por:

$$\text{Log } N_c = 4.179 - 0.611 \text{ Mb.}$$

$$= 1.406$$

- Fuente Nro.3: esta constituida por sismos con profundidades entre 70 a 120 Km. y se caracterizan por estar ubicados en el Manto Superior (fig. 8). Los eventos mas importantes ocurridos en esta fuente se encuentran en la tabla 3 y en la fig. 9 se presenta su curva de frecuencia sismica definida por:

$$\text{Log } N_c = 4.537 - 0.676 \text{ Mb}$$

$$= 1.557$$

5. - ACELERACIONES E INTENSIDADES DEL AREA DE ESTUDIO.

Muchos autores como Schnabel y Seed(1973), Triñac y Brady(1975), han tratado a nivel mundial el problema de las aceleraciones considerando este parametro en funcion de la magnitud del sismo y de su distancia epicentral. En la presente evaluacion se emplea la ecuacion obtenida por Huaco(1982), la misma que puede ser empleada para fuentes con sismos superficiales y profundos.

$$A = (\exp(10.8 + 0.18\text{Mb})) (R - R_0)$$

En las figuras 10 y 11 se presenta la distribución de las máximas aceleraciones en Gals, obtenidos para periodos de retorno de 50 y 100 años. Se puede observar que las regiones que soportarían máximas aceleraciones para periodos de 50 años son: Chíncha Alta (450 gals), Oxapampa (440 gals) Huancayo-Concepción (420 gals) y Lima (390 gals). Las aceleraciones máximas para periodos de retorno de 100 años son encontrados en las regiones de Chíncha Alta (500 gals), Huaytapallana (480 gals), Oxapampa (490 gals), Satipo, Concepción, Huancayo (470 gals) y Lima (450 gals).

Se observa también que la distribución de aceleraciones en la parte oriental del país coincide con el mostrado por Vargas (1982), pero en la parte central y occidental se observan diferencias considerables y aun zonas de vacío, estas zonas son mostradas con mucho detalle en el presente trabajo. La diferencia en los valores hallados es razonable dado que se utilizaron distintas curvas de atenuación, así como diferente densidad de información sísmica.

Después de Richter (1958), varios autores han deducido ecuaciones de equivalencia entre las aceleraciones del suelo y la intensidad de un evento. En el presente trabajo para la evaluación del Peligro Sísmico hemos considerado la ecuación de atenuación obtenida por Huaco (1980). Las máximas intensidades esperadas para periodos de retorno de 50 años son presentados en la fig. 12 y sobresale la región de Chíncha Alta con grado XI (MSK). Las máximas intensidades para periodos de retorno de 100 años (fig. 13) se presentan en las regiones de Chíncha Alta y Oxapampa con grado XI (MSK), en este modelo la región que comprende Concepción, Huancayo, Huaytapallana y Lima, soportarían una intensidad de grado X (MSK).

CONCLUSIONES.

El proceso de subducción y el sistema de fallamiento paralelo a la costa y el de la zona cortical del Perú central, son fundamentales para el delineamiento de las fuentes sísmicas, las que a su vez coinciden con las máximas aceleraciones e intensidades observadas.

Considerando la historia sísmica del área de estudio, en donde se observa la ocurrencia de sismos de gran magnitud y con una gran área de destrucción, concluimos que los resultados obtenidos, desde el punto de vista probabilístico son razonables y adecuados para los periodos de retorno estimados.

La dispersión y perturbación que frecuentemente se observa en estudios de este tipo, debido a eventos sísmicos con error en su cálculo (profundidad y ubicación), la mala utilización de magnitudes Mb. o Ms., etc., han sido reducidos al mínimo mediante un riguroso proceso de calificación de la información

utilizada, lo cual da un alto valor de confiabilidad a los resultados obtenidos.

Un estimacion precisa de curvas de atenuacion representativas para determinadas regiones, solicita la necesidad de instalar una red densa de acelerografos en el pais.

Para efectos de diseno, recomendamos tomar en cuenta riesgos de 100 a mas anos.

El auge de areas urbanas, el incremento de nucleos poblacionales y la mayor densidad de poblacion, son un gran incentivo a realizar estudios de este tipo para areas consideradas de interes. Esta actividad la viene desarrollando el Instituto Geofisico del Peru.

AGRADECIMIENTOS.

Al Dr. Manuel Chang, director de la Direccion de Servicios Tecnicos, por el apoyo brindado dando facilidades de horario y flexibilidad de funciones.

Al Dr. Jose Machare, por las opiniones recibidas y por la revision del manuscrito.

TABLA 1. Sismos destructores ocurridos en la fuente 1.

DIA/MES/ANO	HORA ORIGEN	LATITUD-S	LONGITUD-W	PROF. Mb.	Ms.
24 05 40	16 33 57.0	10.500	77.000		8.4
10 11 46	17 42 53.0	08.500	77.500		7.2
28 05 48	05 36 16.0	13.000	76.500	60	7.0
24 12 59	12 50 35.0	13.500	74.500		6.2
17 10 66	21 41 55.9	10.920	78.790	21	6.3 7.1
24 07 69	02 59 21.0	11.850	75.130		5.9
01 10 69	05 05 43.2	11.880	75.130	4	6.4
03 10 74	14 21 29.1	12.300	77.800	13	6.6 7.7

TABLA 2. Sismos destructores ocurridos en la fuente 2.

DIA/MES/ANO	HORA ORIGEN	LATITUD-S	LONGITUD-W	PROF. Mb.	Ms.
21 06 37	15 13 04.0	08.500	80.000	60	6.7
30 09 46	00 59 04.0	13.000	76.000	70	7.0
21 07 55	11 45 40.0	15.000	74.000	100	6.7
18 04 62	19 14 37.2	10.000	79.000	39	7.0
15 11 62	23 25 17.7	08.700	79.800	45	6.0
07 06 66	00 59 45.7	14.000	75.800	48	6.5
28 09 68	13 53 35.3	13.160	76.380	70	6.0
31 05 70	20 23 27.3	09.180	78.820	43	6.6 7.8

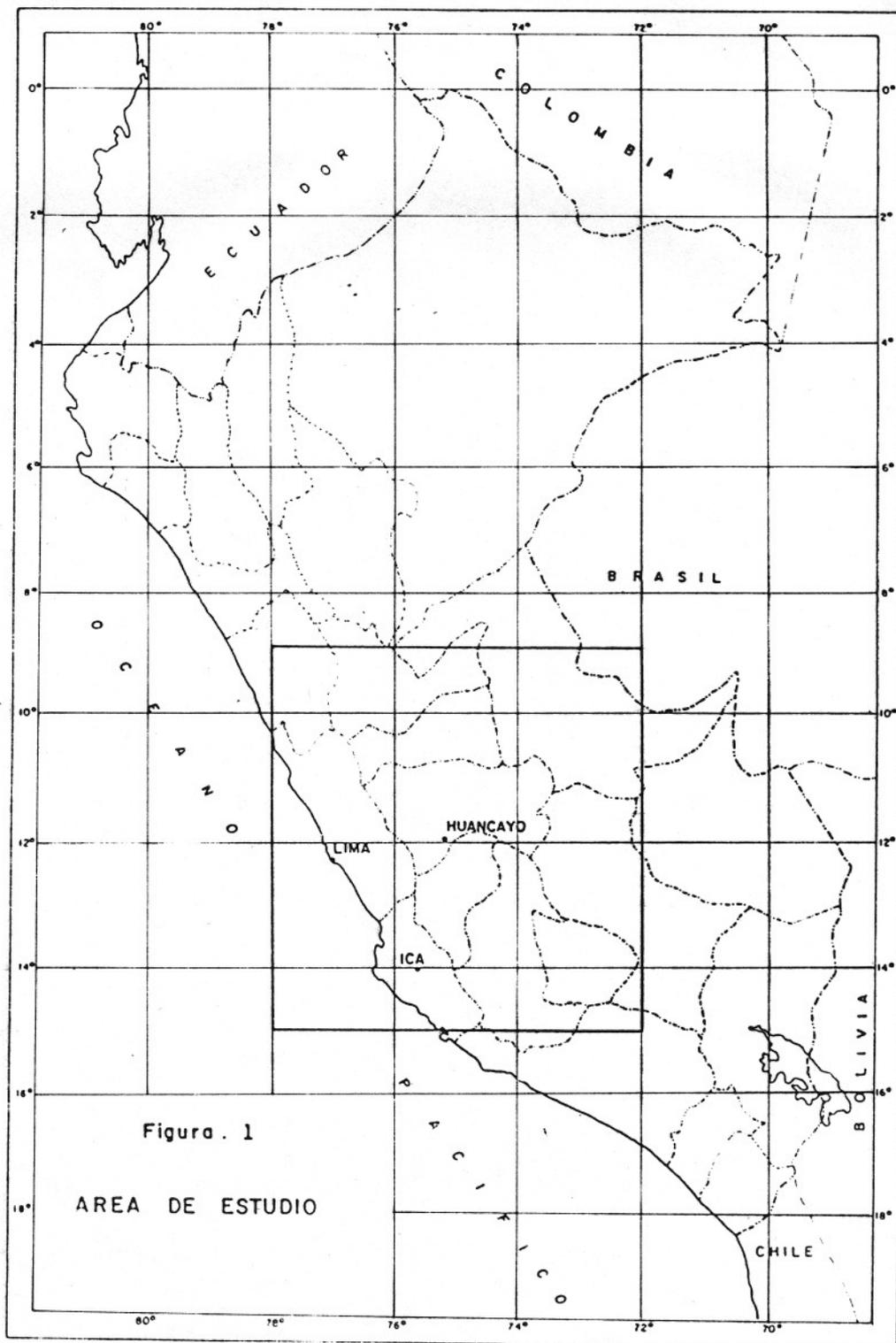
TABLA 3. Sismos destructores ocurridos en la fuente 3.

DIA/MES/ANO	HORA ORIGEN	LATITUD-S	LONGITUD-W	PROF. Mb.	Ms.
20 01 32	02 30 50.0	12.000	77.500	100	6.7
09 12 32	08 34 55.0	15.000	75.000	75	6.5
06 08 33	02 54 52.0	11.000	75.500	100	6.5
25 04 39	12 53 37.0	12.500	75.500	150	6.2
21 08 45	16 29 37.0	15.000	75.000	120	6.7
01 11 47	14 58 53.0	10.500	75.000	100	7.3
10 12 50	02 50 42.0	14.250	75.750	80	7.0
18 02 57	23 49 52.0	11.500	78.000	100	6.6
15 01 60	09 30 24.0	15.000	75.000	150	7.0
17 09 63	05 54 34.0	10.600	78.200	61	
24 09 63	16 30 17.9	10.750	78.240	75	6.7

BIBLIOGRAFIA.

- Barazangi, M., Isacks, B., 1976. Spatial distribution of earthquakes and Subduction of the Nazca Plate beneath South America, *Geology*, vol. 4, pp. 686-692.
- Barazangi, M., Isacks, B., 1979. Subduction of the Nazca Plate beneath Peru: Evidence from spatial distribution of earthquakes., *Geophys. Jour. of the R.A.S.*, vol. 57, pp. 537-555.
- Boyd, M., 1983. High Resolution determination of the Benioff zone geometry beneath southern Peru., Thesis of Ms.Sc., Virginia Polytechnic Inst. and S Univ. p. 115.
- Cornell, C., 1968. Engineering Risk Analysis. *Bull. Seis Soc.*, vol. 58, pp. 1583-1606.
- Cornell, C., Vanmarcke, F., 1969. The major influences on seismic Risk., 4th. World. Conference Earthquake Engineering., Santiago, Chile.
- Deverchere, J., Dorbath, C., Dorbath, L., Ocola, L., Tavera, J., 1987. Microsismicidad de la Cordillera Blanca en Ancash, Peru, IV Congreso Peruano de Geología, Lima, Peru.
- Deza, E., 1985. Identificación de una posible estructura en bloques en el sur del Peru., Symp. "Seismic and Volcanic Hazard and Risk in South America", edc. CERESIS, vol. 14, pp. 221-245, Lima, Peru.
- Dorbath, C., Dorbath, L., Cisternas, A., Deverchere, J., Diament, M., Ocola, L., Morales, M., 1986. On crustal seismicity of the amazonian foothill of the central peruvian Andes, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 13 n. 10, pp. 1023-1026.
- Grange, F., Cunningham, P., Gagnepain, J., Hatzfeld, D., Molnar, P., Ocola, L., Rodriguez, A., Roecker, S., Stock, W., Suarez, G., 1984. The configuration of the seismic zone and the downgoing slab in Southern Peru., *Geophys. Res. Lett.*, vol. 11., pp. 38-41.
- Hasegawa, A., Sacks, S., 1981. Subduction of the Nazca Plate beneath Peru as determined from seismic observation, *Jour. Geophys. Res.*, vol. 86, pp. 4971-4980.
- Hattori, S., 1979. Seismic Risk Maps in the World (Maximum Acceleration and Maximum Particle Velocity) (II) Balkan, Middle East, Southeast Asia, Central America, South America and Others. *Bull. Inter. Inst. of Seismology.*, vol. 17, pp. 33-96.

- Huaco, D., 1980. Analisis de los parametros que intervienen en la evaluacion del Peligro Sismico., Instituto Geofisico del Peru., Lima, Peru, pp.65.
- Huaco, D., 1982. Peligro Sismico para la zona de la Hidroelectrica de Machupichu., Instituto Geofisico del Peru., Lima, Peru, pp.40.
- Huaco, D., 1983. Peligro Sismico para la zona del transvase del Mantaro., Instituto Geofisico del Peru, Lima, Peru, pp.70.
- Huaco, D., 1986. Catalogo Sismico del Peru(1500-1982). Instituto Geofisico del Peru., Lima, Peru, pp.56.
- Huaco, D., Rodriguez, L., 1983. Atenuacion de la Intensidad y la Aceleracion en el Peru. Instituto Geofisico del Peru., Lima, Peru, pp.46.
- Mc. Guire, R., 1976. Fortran computer program for seismic risk analysis USGS, Open file Report 76-77.
- Oliveira, C., 1974. Seismic risk analysis earthquake engineering Univ. of California, Berkeley-California.
- Polo, J., 1898. Sinopsis de temblores y volcanes del Peru, Soc. Geogr. Peru., Ano VIII-tomo XVI.
- Polo, J., 1904. Sinopsis de temblores en el Peru., Soc. Geogr. Peru., Ano XIV-tomo XVI.
- Richter, Ch., 1958. Elementary Seismology., W.H. Freeman and Company., San Fco., London, pp.768.
- Silgado, E., 1978. Historia de los sismos mas notables en el Peru (1513-1974), Boletin 3, Inst. Geol. Min., Serie C., pp.1-130, Lima, Peru.
- Snake, J., Sacks, I., James, D., 1979. Subduction beneath South America: evidence from converted phases, Geophys. Jour. of the R. A. S., vol. 59, pp. 259-265.
- Schnabel, P., Seed, H., 1973. Aceleration in rocks for earthquakes in the western United States., Bull. Seis. Soc. Am., vol. 64, pp. 121-129.
- Stauder, W., 1975. Subduction of the Nazca Plate under Peru as evidence by focal mechanic and by seismicity., Jour. Geophys. Res., vol. 80, pp. 1053-1064.
- Trifunac, M., Brady, A., 1975. On the correlation of seismic intensity scale the risk of recorder strong ground motion., Bull. Seis. Soc. Am., vol. 65.
- Vargas, J., 1982. Zonificacion sismica del Peru. Depart. Ing., Pontificia Univ. Catolica, Lima, Peru, pp.1-35.



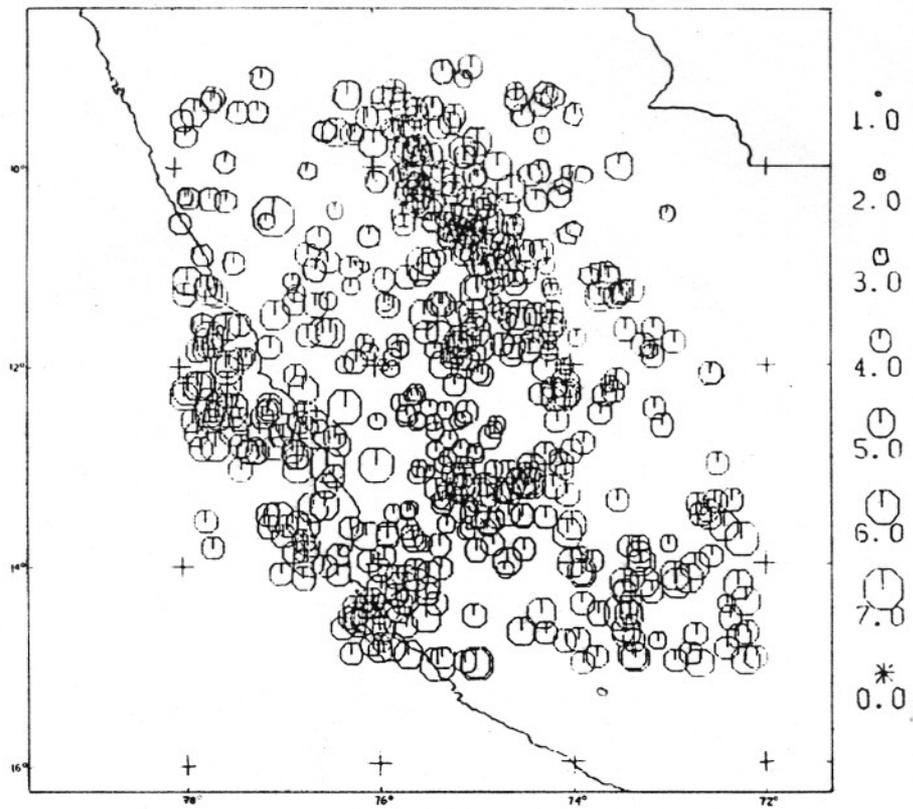


FIGURA 2 - SISMICIDAD DEL AREA DE ESTUDIO
PARA EL PERIODO 1900 - 1991

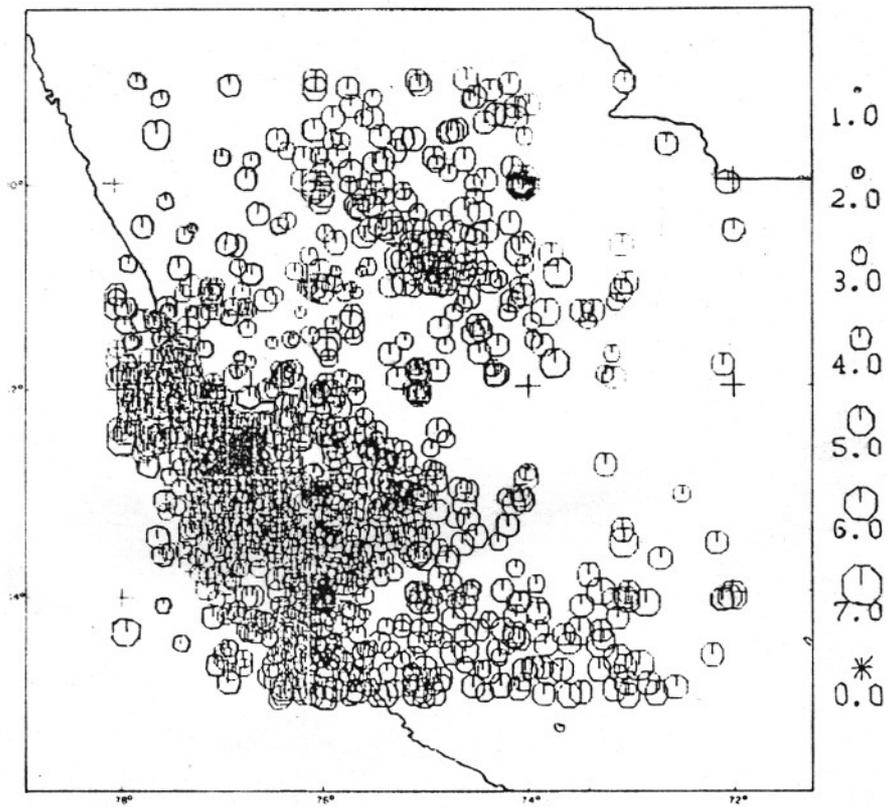


FIGURA 3 - SISMICIDAD DEL AREA DE ESTUDIO
PARA EL PERIODO 1982 - 1986

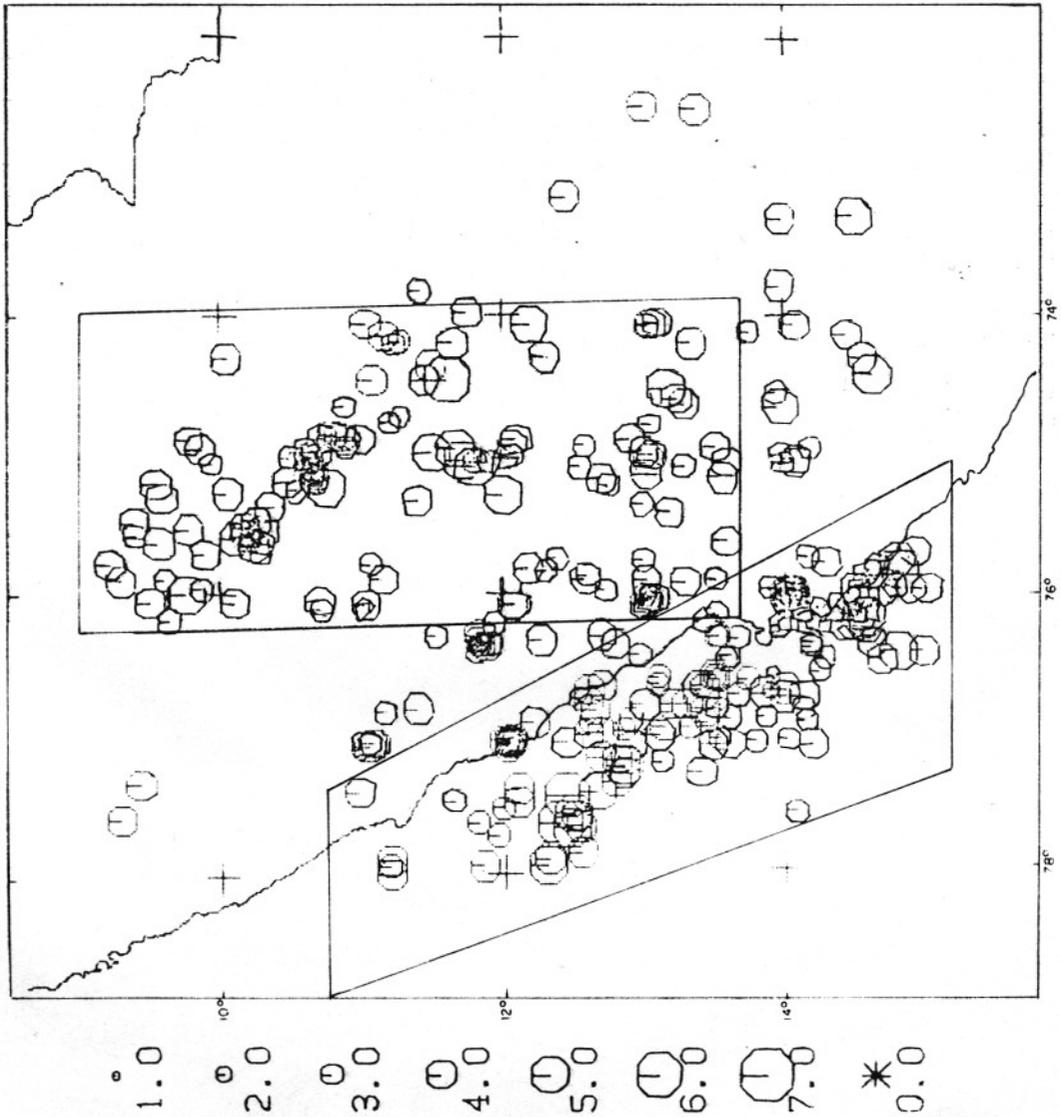


FIGURA 4.- FUENTE 1

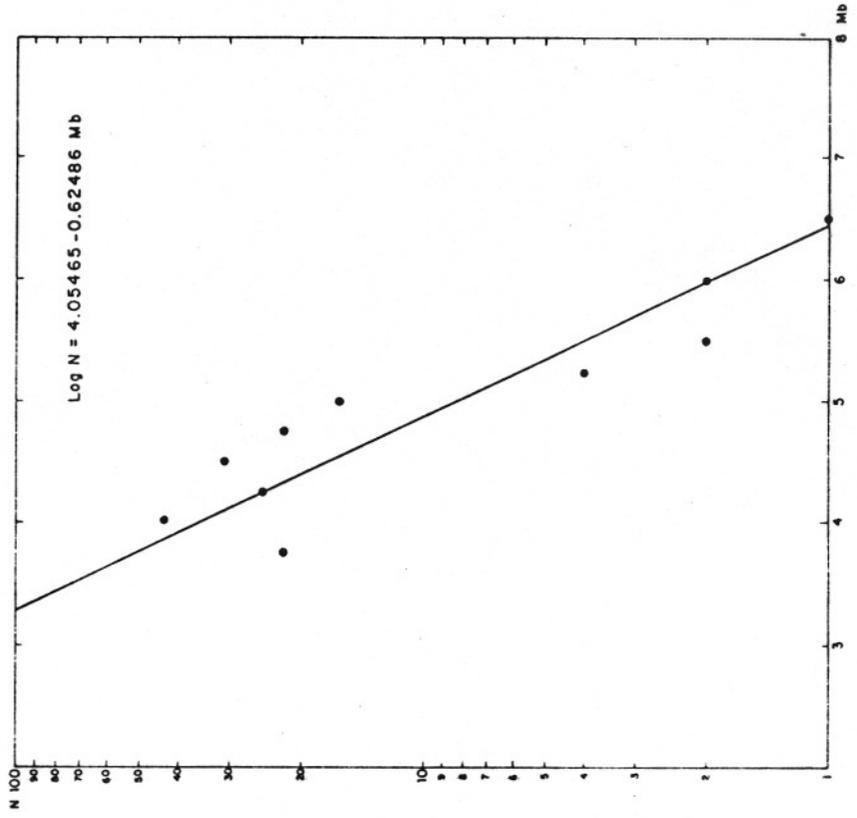


Figura 5.- Frecuencia Sismica para la fuente 1.

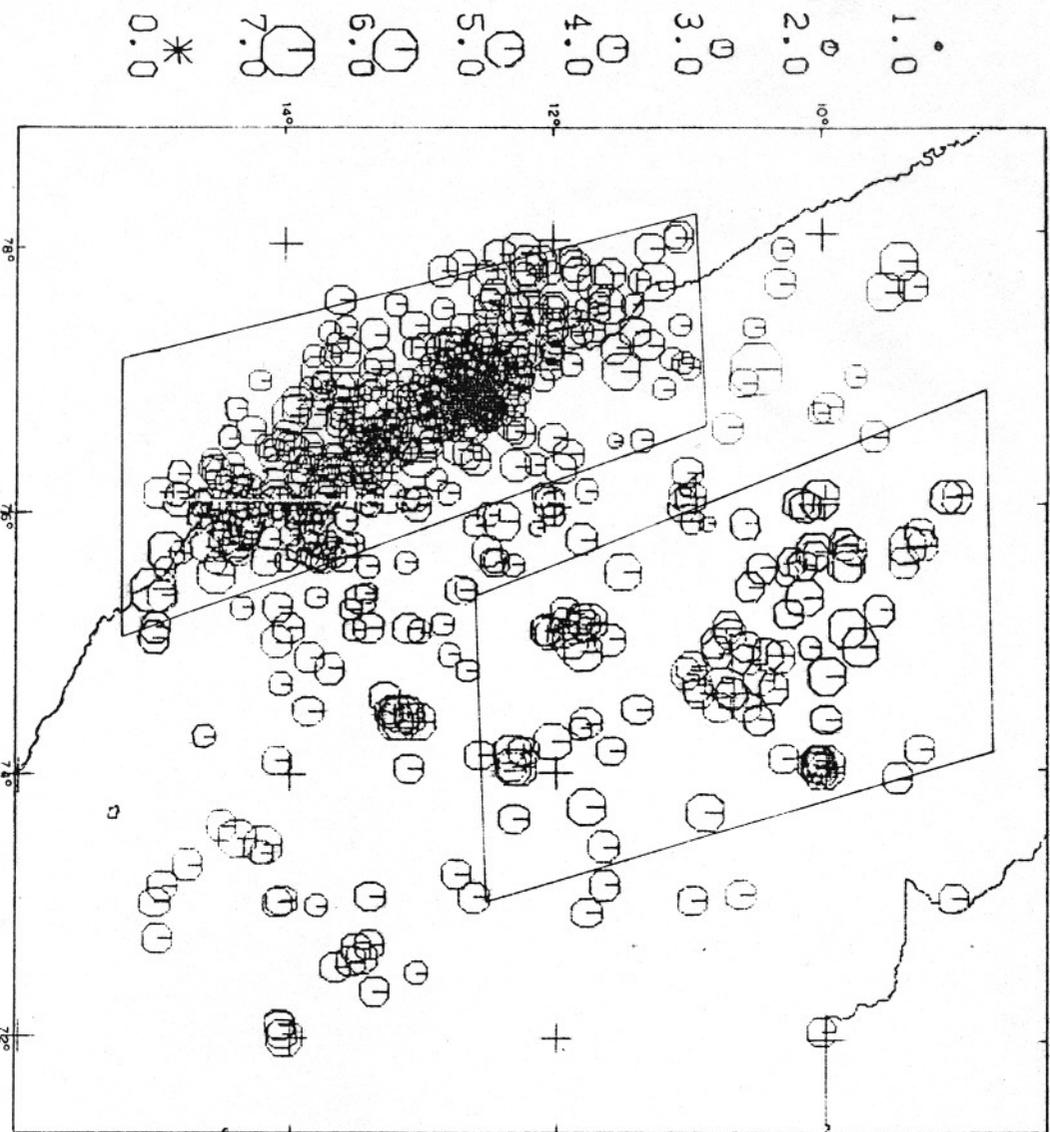


FIGURA 6 - FUENTE 2

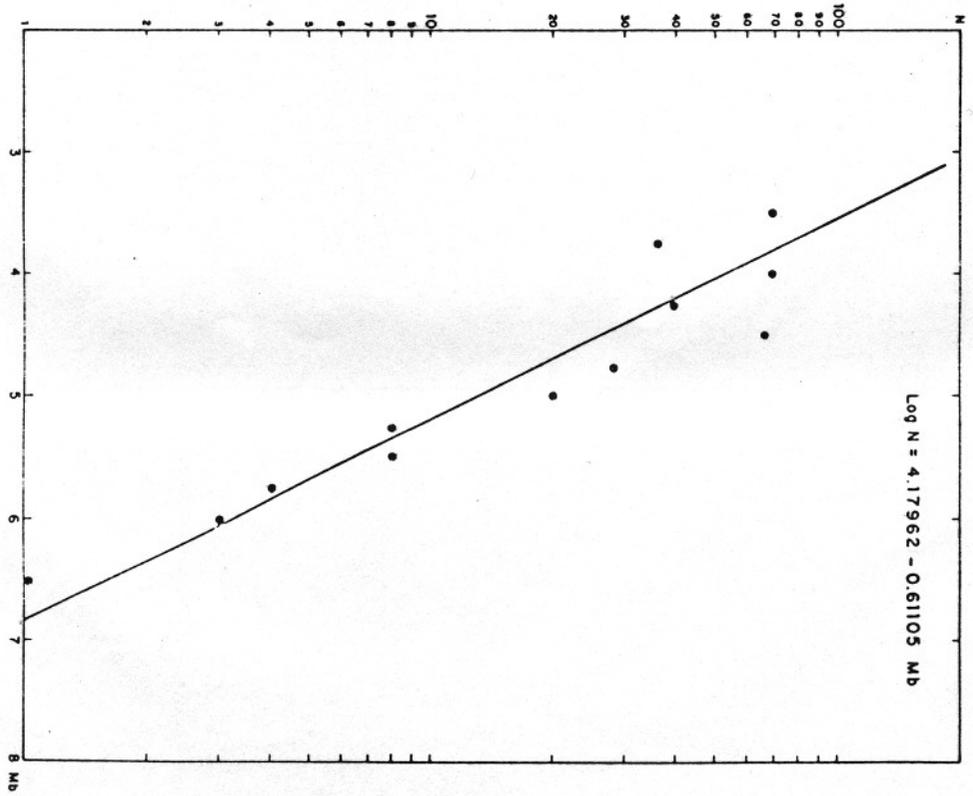


Figura 7.- Frecuencia Sismica para la fuente 2

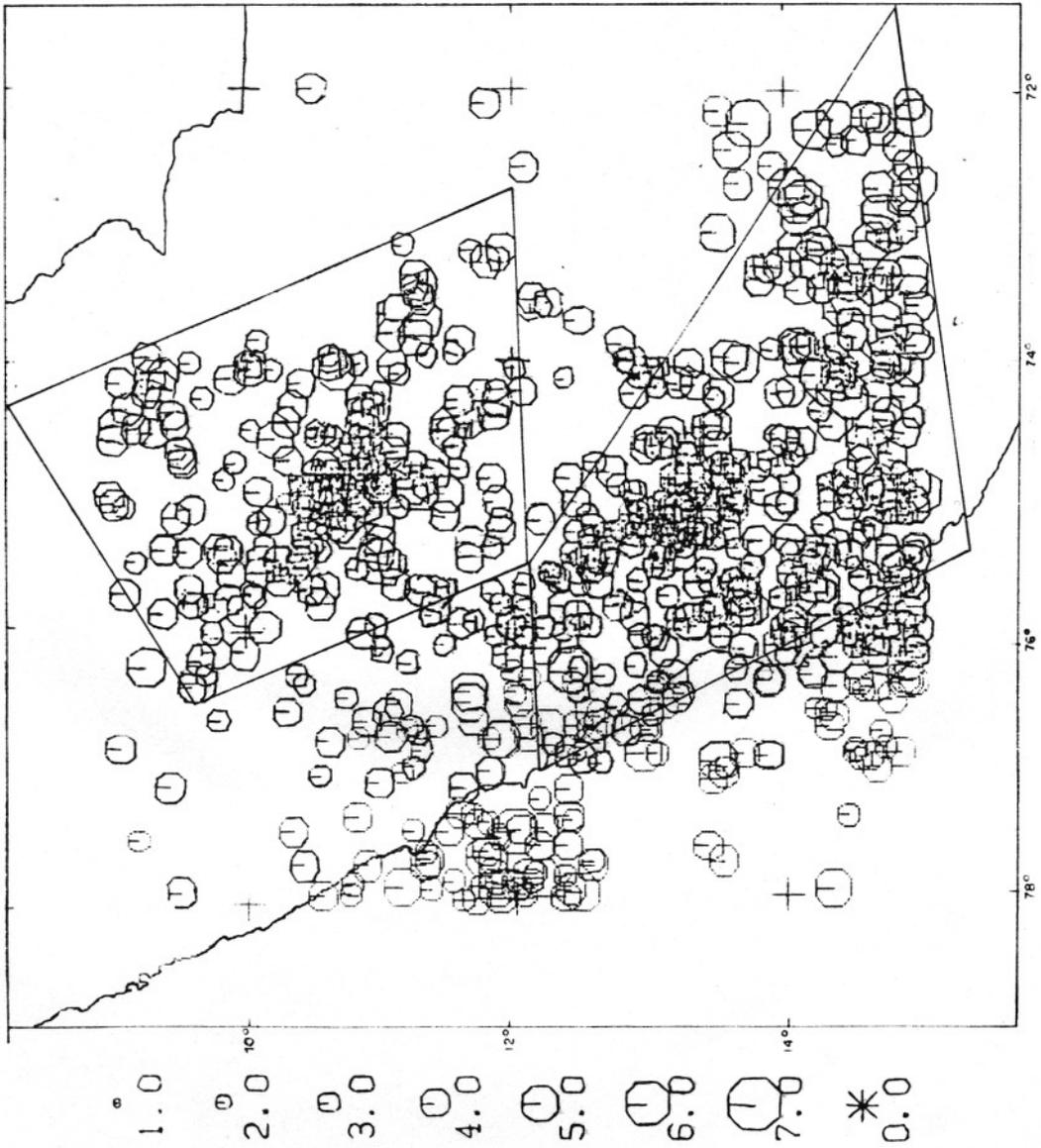


FIGURA 8.- FUENTE 3

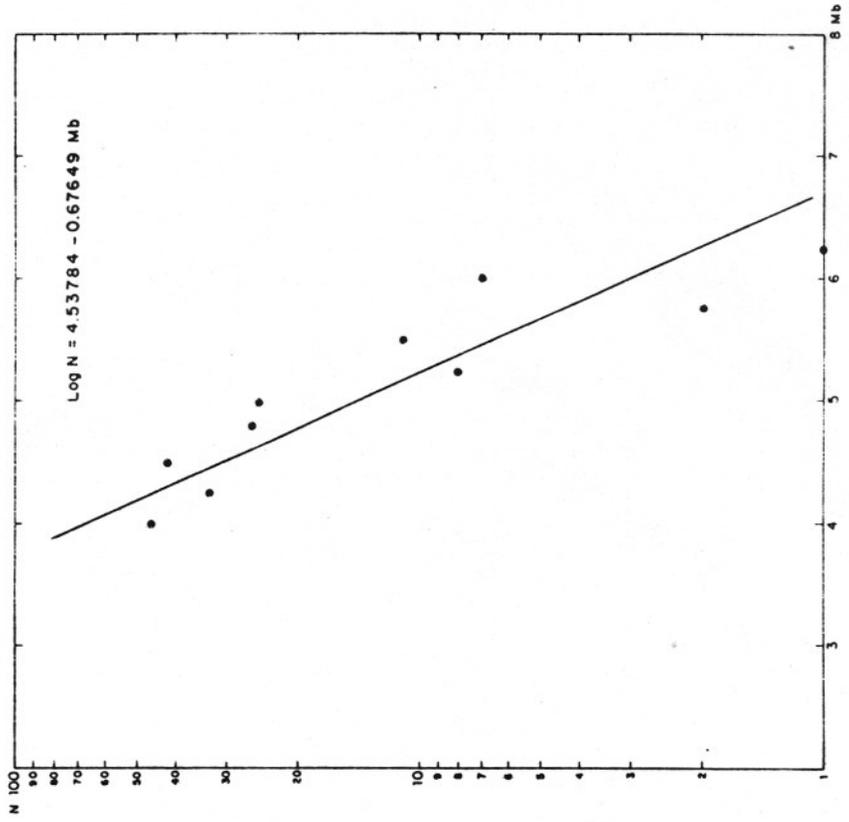


Figura 9.- Frecuencia Sismica para la fuente 3

