

MECANISMOS DE FOCO EN LA ZONA DE CHILE CENTRAL.

Mario Pardo P. y Patricio Acevedo A.

Departamento de Geofísica. Universidad de Chile.
Casilla 2777, Santiago, Chile.

RESUMEN

MECANISMO DE FOCO EN CHILE CENTRAL

Se estudian mecanismos de foco en Chile Central a través de soluciones gráficas de los planos nodales utilizando la proyección equiangular de la red de Wulff. Los datos de primeras llegadas de ondas P son obtenidos de estaciones sismológicas con distancia epicentral mayor que veinte grados.

La zona considerada está comprendida entre las latitudes 33.4° - 34.5° Sur y longitudes 69.9 - 71.0 Oeste, correspondiente a una zona tectónicamente activa que incluye la región metropolitana del país. Es por esto que es importante conocer las características del campo de esfuerzos que está actuando en ella.

Los resultados para sismos superficiales (0 - 20 km de profundidad), señalan un claro lineamiento en la dirección NS para los planos de falla. El campo de esfuerzos asociados corresponde a un proceso de extensión en la dirección suroeste.

En el caso de sismos con profundidad focal entre 70 y 150 km, los resultados concuerdan con los obtenidos por Stauder (1973). Sólo se puede inferir de ellos características muy generales del proceso de subducción que tiene lugar a esas profundidades.

ABSTRACT

FOCAL MECHANISM IN CENTRAL CHILE ZONE

Focal mechanisms in Central Chile are studied using stereographic projection of the nodal planes on an equiangular Wulff net. Data of the first motion P-wave are obtained from seismological stations with epicentral distance greater than twenty degrees.

The zone studied, between latitudes 33.4° - 34.5° S and longitudes 69.9° - 71.0° W, corresponds to an active tectonic zone which includes the metropolitan region of the country; thereby the importance of knowing the characteristics of the acting stress field.

Results for shallow earthquakes (0-20 km depth of focus) indicate a clear lineament in the NS direction for the fault planes. The stress field associated corresponds to an extension process in the South-West direction.

In the case of earthquakes with focal depth between 70 - 150 km, results are similar to those obtained by Stauder (1973). It is only possible to infer very general characteristics of the subduction process at these depths.

1. INTRODUCCION

Se pueden encontrar interrelaciones entre el comportamiento tectónico y movimientos recientes de la corteza terrestre en cualquier zona examinando el campo de esfuerzos del área. Mecanismos de foco, que pueden ser obtenidos desde observaciones de ondas sísmicas (sismogramas), entregan una muy útil información sobre el campo de esfuerzos de la región focal. Ciertamente muchas regiones sísmicas activas de la Tierra han sido examinadas en esta forma. El éxito en tales trabajos depende principalmente de la exactitud de los resultados en los parámetros focales del área en cuestión. Estos parámetros son: rumbo y buzamiento del plano de falla, dirección del vector desplazamiento y ejes de tensión asociados.

Se sabe que para algunas regiones, debido al número y distribución limitada de estaciones sísmicas alrededor del epicentro, puede no ser posible determinar con precisión los parámetros focales. No es extraño en estos casos que diferentes investigadores obtengan soluciones distintas para un mismo sismo.

Cuando una región está sometida a un proceso de deformación, la energía se almacena en las rocas en forma de "deformación elástica". Esto continúa hasta que la deformación acumulada excede la resistencia mecánica de la roca, ocurriendo entonces el fracturamiento (fallamiento). Los lados opuestos de la falla se desplazan o "rebotan" hasta una posición de equilibrio y la energía es liberada principalmente en forma de calor, deformaciones permanentes y de vibraciones propagadas como ondas elásticas. Lo anterior es la base de la teoría del rebote elástico, como modelo de generación de un sismo.

Si un sismo es causado por fallamiento del material, se puede sugerir que la dirección de la fractura debe tener cierta relación con los esfuerzos actuantes dentro de la Tierra y que provocan dicha fractura. Luego, si tenemos la posibilidad de conocer las características de la falla a lo largo de la cual ocurre el desplazamiento, será también posible llegar a obtener el campo de esfuerzos actuante en el momento del fallamiento.

2. ONDAS P Y LA SOLUCION DEL PLANO DE FALLA

Toda determinación de mecanismo de foco se basa fundamentalmente en la conservación del signo de fases sísmicas a lo largo de sus trayectorias. Es decir, el movimiento inicial de la superficie terrestre, debido a la llegada de la onda P es el mismo, en sentido, al provocado en la región focal. La consistencia de los resultados en las soluciones de mecanismos de foco con los estudios teóricos sobre la conservación del signo han sugerido que esta afirmación es razonable desde un punto de vista físico.

Los rayos sísmicos en el interior de la Tierra siguen un camino curvo. Nuestro planeta corresponde a un cuerpo no homogéneo para las ondas sísmicas. Esto provoca que los planos nodales escogidos según un modelo basado en la llegada de las ondas tenga una posición muy diferente a la de los planos verdaderos proyectados en superficie (Fig. 1).

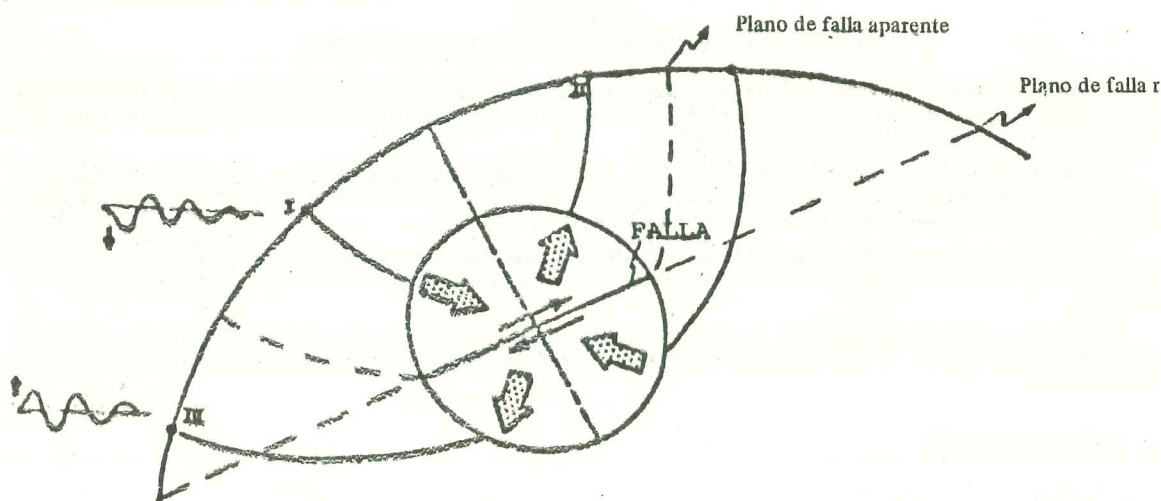


Fig. 1. Proyección del plano de falla real en superficie debido a la curvatura de los rayos sísmicos

Para la solución de este problema se utilizan técnicas de proyección estereográfica, cuyo efecto es transformar los rayos curvos de las ondas sísmicas en trazos rectos. Es decir, transformar la Tierra en un medio homogéneo.

La proyección más usada utiliza el concepto de "esfera focal". La esfera focal, tal como su nombre lo indica, corresponde a una esfera convenientemente pequeña que rodea al foco. Sobre su superficie se pro-

yectan las posiciones de las estaciones sísmicas y los signos de los primeros movimientos asociados con las ondas P que llegan a dichas estaciones (Fig. 2).

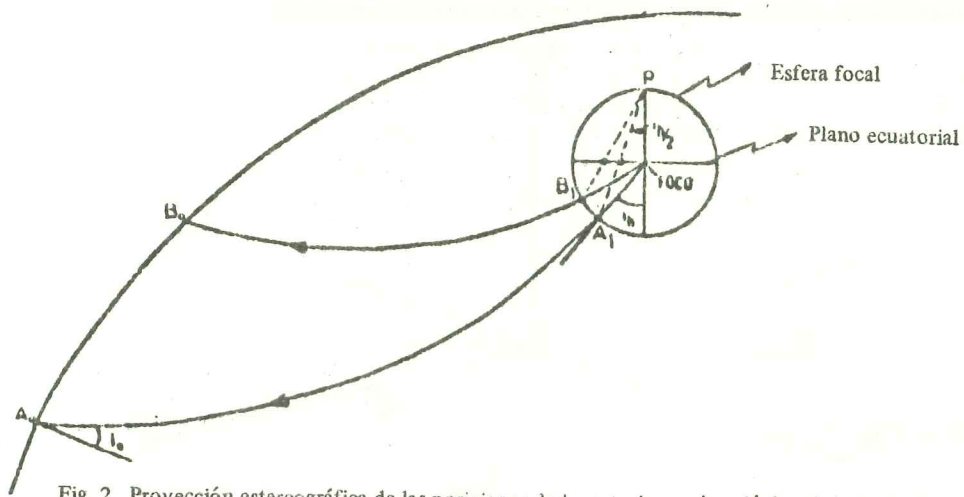


Fig. 2. Proyección estereográfica de las posiciones de las estaciones sísmológicas (A₀, B₀), sobre la semiesfera inferior de la esfera focal (A₁, B₁). P = punto de proyección.

Debido a que la esfera focal puede ser escogida tan pequeña como se desee, la región en su interior será homogénea y podremos suponer rayos sísmicos propagándose en líneas rectas. La proyección de la esfera focal puede construirse sobre una grilla base; en este caso se utilizará la red equiangular de Wulff.

3. LA DIRECCION DE LOS EJES P, T Y B EN UNA FALLA

Teniendo la solución de los planos de falla para un mecanismo de foco, es posible obtener los ejes denominados P, T y B, ejes de máxima presión, máxima tensión y de esfuerzo intermedio, respectivamente. Definiendo los ejes X₁, X₂ y X₃ en la Fig. 3, de modo que el plano de falla sea (X₂, X₃) y el bloque B se mueva en la dirección de X₂, respecto al bloque A.

El eje P de la solución del plano de falla está ubicado en la dirección (1, 1, 0) y el eje T en la dirección (1, -1, 0). El eje nodal es el eje B y está representado por X₃ (Fig. 4).

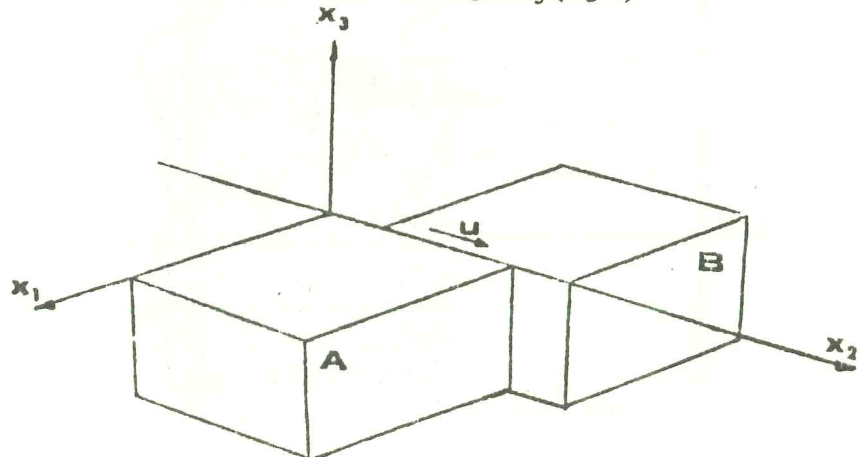


Fig. 3. Deslizamiento de los bloques A y B según el plano de falla (X₂, X₃).

La única suposición introducida es que el vector deslizamiento (\vec{u}) es siempre paralelo al esfuerzo de cizalle que está definido sobre el plano de falla. Esta afirmación es físicamente razonable si la roca originalmente era homogénea, es decir, si no se observa un fallamiento preexistente.

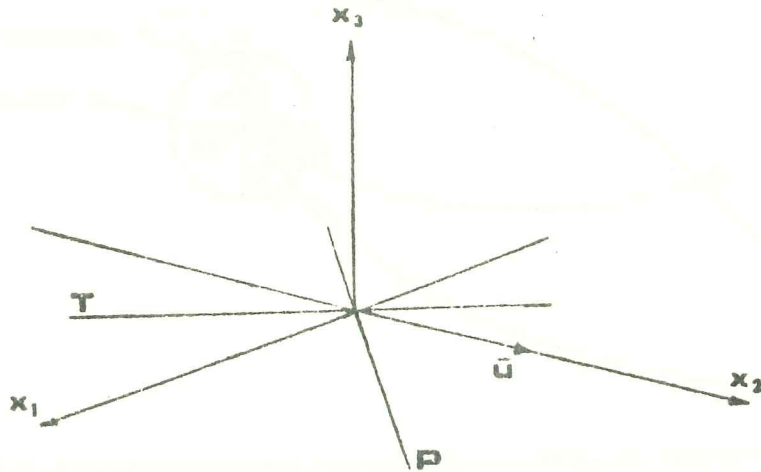


Fig. 4. Eje P de la solución del plano de falla y el eje T de máxima tensión en un sistema de coordenadas (X_1, X_2, X_3). El eje nodal B coincide con X_3 .

4. ANALISIS DEL MECANISMO DE FOCO EN CHILE CENTRAL

4.1. Descripción del lugar de estudio y datos disponibles

En el presente trabajo se consideró la zona comprendida entre las latitudes 33.40° y 34.50° Sur y las longitudes 69.90° y 71.00° Oeste. La Fig. 5 muestra el plano de ubicación de la zona en estudio.

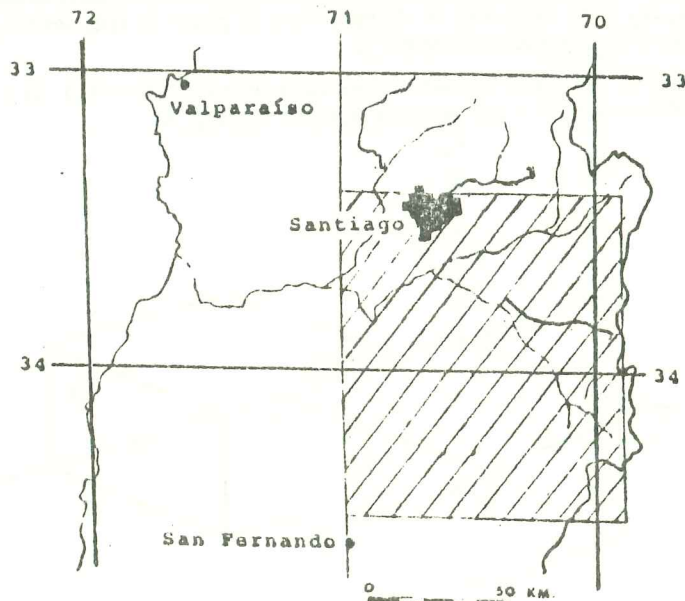


Fig. 5. Zona de estudio considerada en el presente trabajo.

En la Fig. 6 se muestra la distribución espacial de epicentros de los sismos entregados en la Tabla 1. Se muestra también la litología de la zona y las estructuras regionales más importantes.

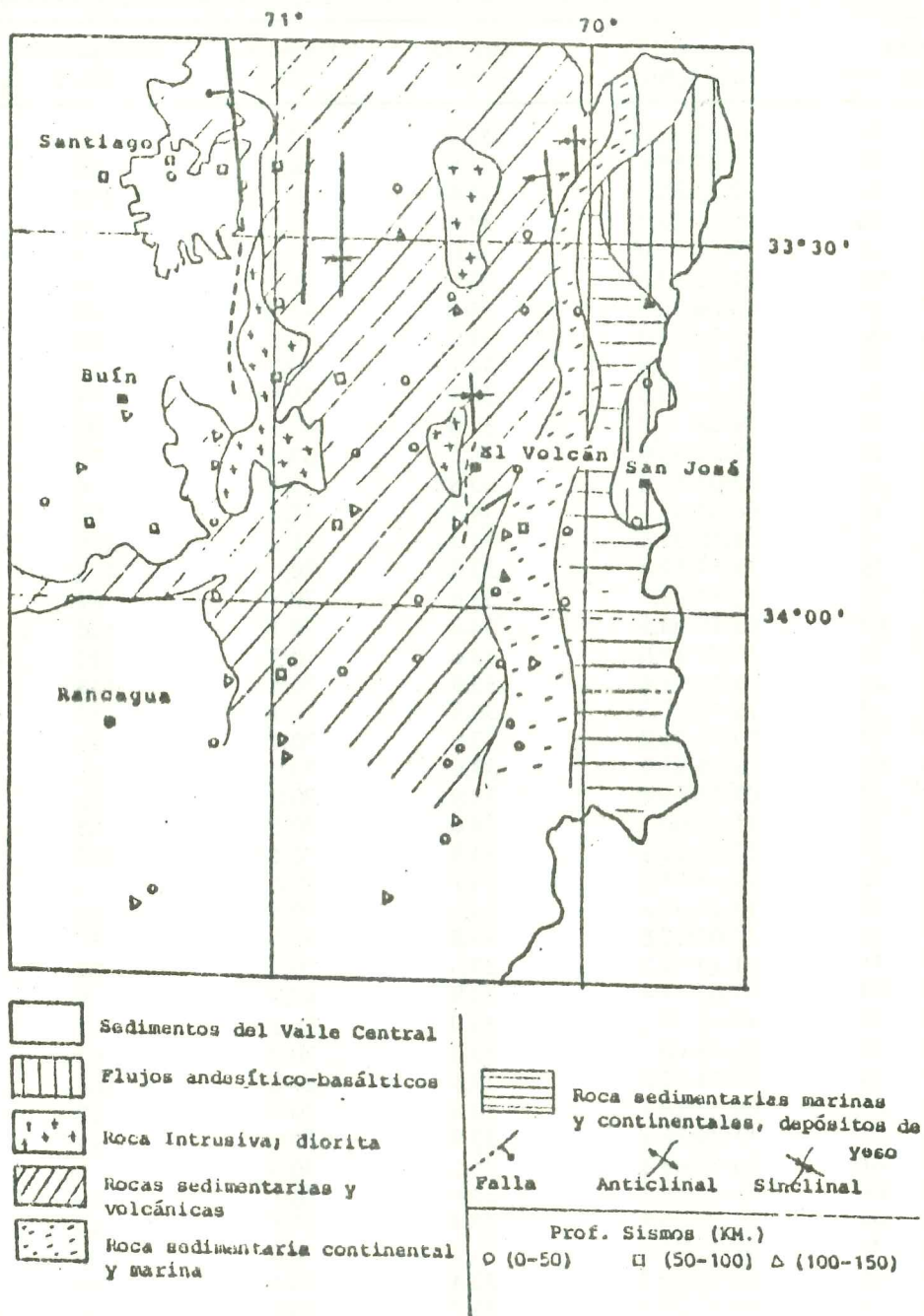


Fig. 6. Litología y estructuras geológicas (González-Ferrán, 1963).

TABLA 1

Resumen de sismos determinados por el ISC, ocurridos entre los años 1949 y 1982 (mayo)

Año	Fecha		Hora (GMT) Hr.Min.Seg.	Latitud °S	Longitud °W	Profundidad Km	Magnitud	
	Mes	Día					mb	Ms
49	07	31	04:13:48.0	33.8	70.5	10		
51	06	18	13:35:58.0	33.8	70.5	10		
55	11	04	22:44:05.0	34.4	70.1	100		6.7
58	03	08	20:16:26.0	33.9	70.4	96		
58	08	28	09:36:04.0	34.0	70.1	15		6.0
58	09	04	21:51:09.8	33.9	70.2	10		6.9
63	07	29	10:36:26.4	34.1	70.4	33	4.8	5.5
63	10	06	17:15:34.0	33.9	70.2	102	5.1	5.8
64	06	22	05:32:12.8	34.1	70.7	33	4.1	
64	06	22	08:22:00.8	33.9	70.6	33	4.3	
66	01	15	19:28:56.2	33.6	70.1	33	5.0	
66	01	15	19:29:36.0	33.5	69.8	50	5.5	6.2
66	02	03	02:05:54.8	33.8	70.1	6	4.8	
66	03	12	08:01:47.5	34.3	71.8	90	4.3	
66	03	12	08:10:35.4	34.2	71.2	118	3.7	
67	03	16	18:57:52.9	33.8	70.6	103	4.2	
67	09	26	11:11:23.7	33.6	70.5	84	5.8	5.6
70	04	09	05:19:06.5	34.0	70.1	120	5.2	5.7
72	05	13	10:29:14.6	33.6	70.2	112	4.5	
72	06	21	20:42:51.8	33.9	70.4	138	4.9	
72	09	10	18:40:18.2	33.9	70.1	110	4.8	
72	09	23	00:51:21.2	33.8	70.4	31	4.1	
72	10	02	20:35:45.9	33.9	70.8	81	5.5	6.2
73	02	12	00:31:05.4	33.9	70.0	16	4.3	
73	04	23	15:25:00.2	34.0	70.6	85	5.2	5.7
74	12	21	17:02:22.1	33.9	70.1	122	4.0	
75	02	23	11:48:05.0	34.2	70.6	4	4.5	
75	07	25	13:10:25.6	34.1	70.5	16	3.8	
75	09	14	12:03:12.6	33.8	70.5	37	5.2	
76	03	31	01:13:57.2	33.6	70.3	33		
76	07	04	09:02:51.4	33.9	69.9	9		
76	07	20	10:33:28.2	34.0	70.1	4		
76	07	24	10:55:00.7	33.4	70.7	92		
76	07	28	20:31:22.0	33.6	69.8	166		
76	08	05	09:52:16.1	33.8	70.3	12		
76	08	24	11:29:36.1	33.9	70.9	49		
77	01	01	00:49:43.4	34.1	70.3	5		
77	04	04	15:30:28.2	33.4	70.7	92		
77	04	04	15:30:30.5	33.4	70.8	70		
77	04	26	02:47:29.5	33.4	70.6	50		
77	07	16	00:23:00.7	33.4	70.5	69		
77	05	31	00:42:37.4	33.7	70.3	10		4.6
77	08	01	13:30:07.2	33.5	70.1	2		
77	08	13	13:21:27.4	33.9	70.8	90		
77	08	26	01:33:17.7	34.2	70.5	118		
77	08	26	01:33:09.4	34.4	70.3	180		
77	10	11	02:18:08.0	33.7	69.8	26		
77	10	24	16:06:56.6	33.1	70.2	102		

Año	Fecha		Hora (GMT) Hr.Min.Seg.	Latitud oS	Longitud oW	Profundidad Km	Magnitud	
	Mes	Día					mb	Ms
77	10	24	18:31:10.3	34.0	70.3	1		
78	01	20	04:42:52.0	34.3	70.6	150	5.7	
78	01	25	10:50:48.2	34.1	70.5	95	4.8	
78	01	27	10:42:56.3	33.8	70.6	135		
78	06	18	16:12:11.0	34.5	70.8	105		
78	06	28	21:24:30.5	33.9	70.7	131		
78	07	05	16:22:03.5	33.8	70.9	120		
78	07	31	17:02:38.4	34.4	70.7	140		
78	06	28	18:21:08.5	33.7	70.5	80		
78	10	11	01:21:59.7	34.3	70.2	10	5.1	
79	05	15	21:15:57.1	33.7	70.8	108		
79	07	25	03:35:16.0	34.4	70.7	33		
79	09	29	20:52:26.9	34.2	70.2	8		
79	09	29	21:04:41.4	34.2	70.2	4		
79	09	30	11:13:32.4	34.2	70.1	8		
79	10	12	19:37:59.1	34.1	70.2	10		
80	03	14	17:13:17.1	33.5	70.4	102		
81	01	01	10:09:03.9	33.9	70.6	88		
81	07	28	07:17:01.9	34.2	70.1	10	4.5	
81	08	19	22:21:00.9	33.7	70.4	93		
81	08	21	01:15:09.1	34.1	70.3	124	4.9	
81	12	14	03:54:21.5	33.5	70.6	8		
82	04	26	01:24:38.6	33.8	70.1	25		

Utilizando la dirección del primer movimiento para ondas P ha sido posible estudiar el mecanismo de foco sólo para diez eventos sísmicos. Los datos de estos sismos se muestran en la Tabla 2.

TABLA 2

Nº	Fecha			Hora (GMT) Hr.Min.Seg.	Latitud oS	Longitud oW	Profundidad Km
	Año	Mes	Día				
1	49	07	31	04:13:48.0	33.8	70.5	10
2	51	06	18	13:35:58.0	33.8	70.5	10
3	58	08	28	09:36:04.0	34.0	70.1	15
4	58	09	04	21:51:09.8	33.9	70.0	10
5	67	09	26	11:11:23.7	33.5	70.5	84
6	72	09	10	18:40:18.2	33.9	70.3	110
7	73	04	23	15:25:00.2	33.9	70.7	87
8	78	01	20	04:42:52.0	34.3	70.4	150
9	78	10	11	01:21:59.7	34.3	70.2	10
10	81	08	21	01:15:09.1	34.1	70.3	124

4.2. Presentación de resultados

Las soluciones gráficas de los mecanismos de foco para los sismos de la Tabla 2 se obtuvieron utilizando la red de Wulff y se muestran en las Figs. 7 (1-10). Los círculos (O) y cruces (+) indican primeros movimientos de dilatación y compresión, respectivamente.

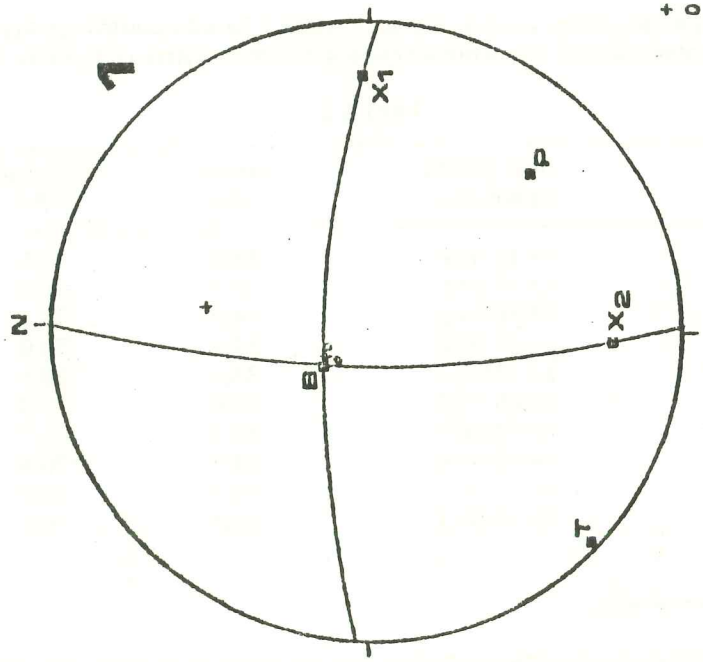
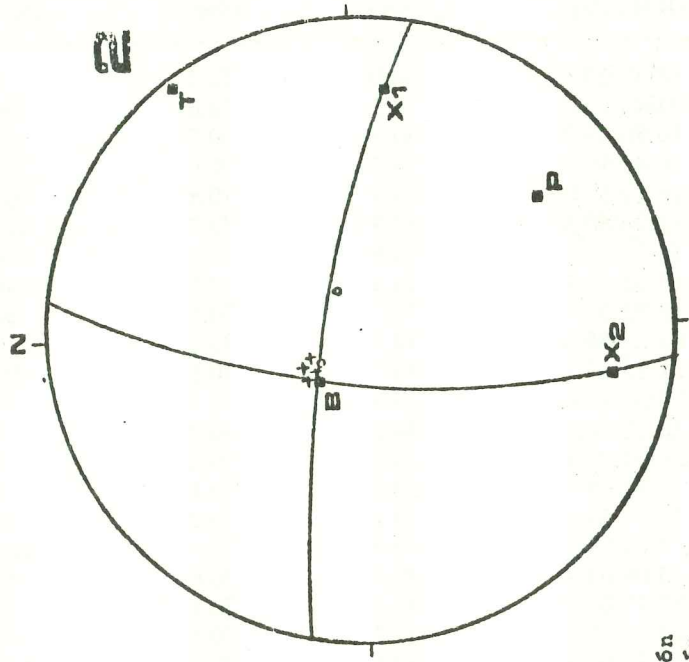


Fig. 7
+ Compresión
0 Dilatación

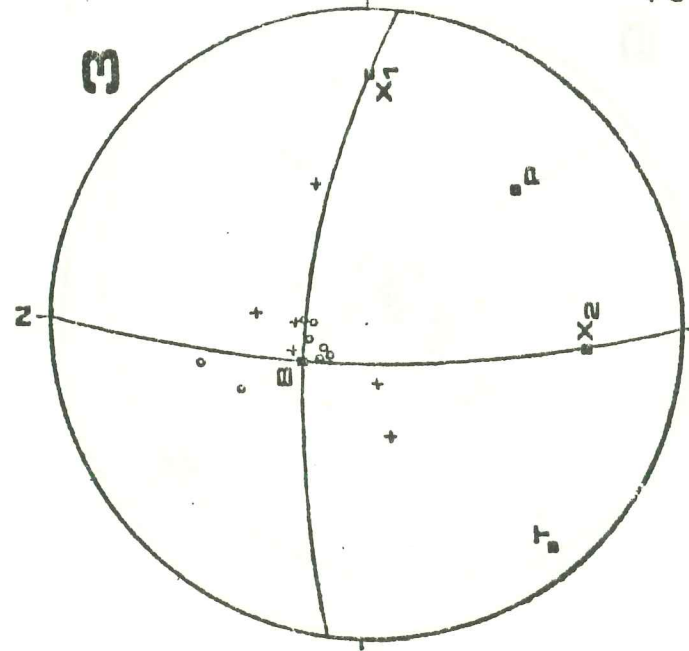
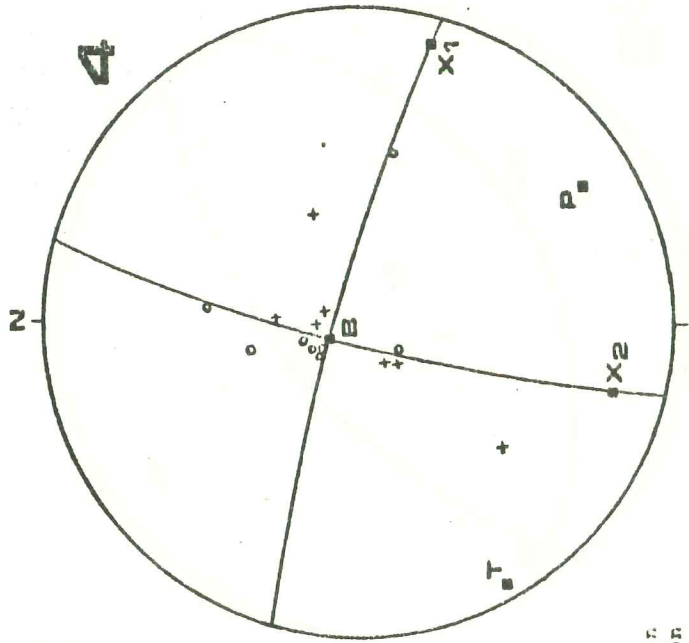


Fig. 7

+ Compresión
o Dilatación

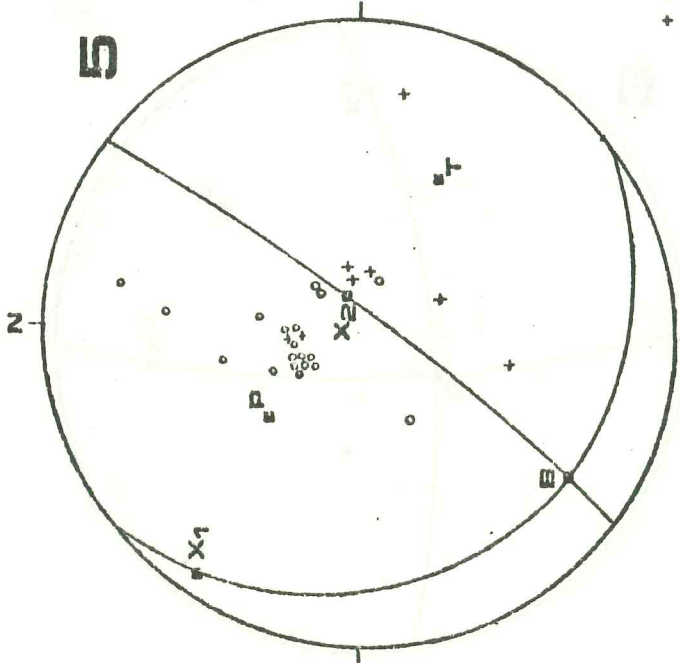
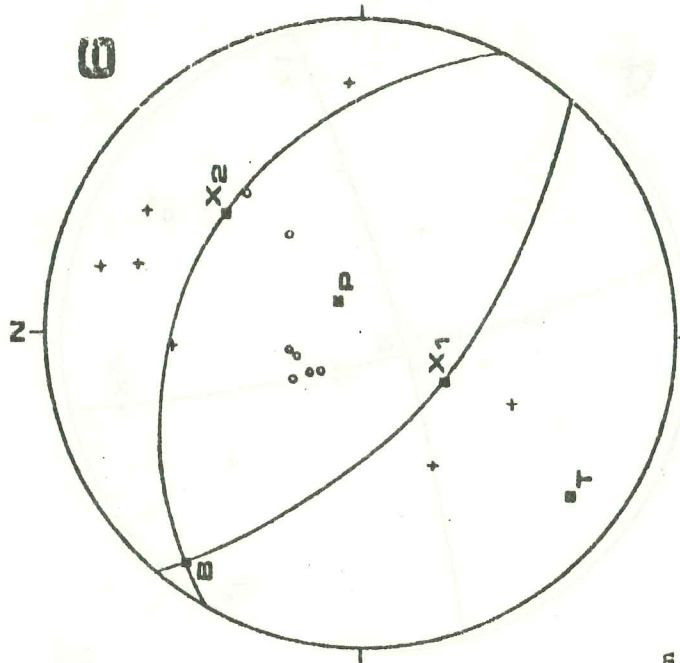


Fig. 7

+ Compresión
O Dilatación

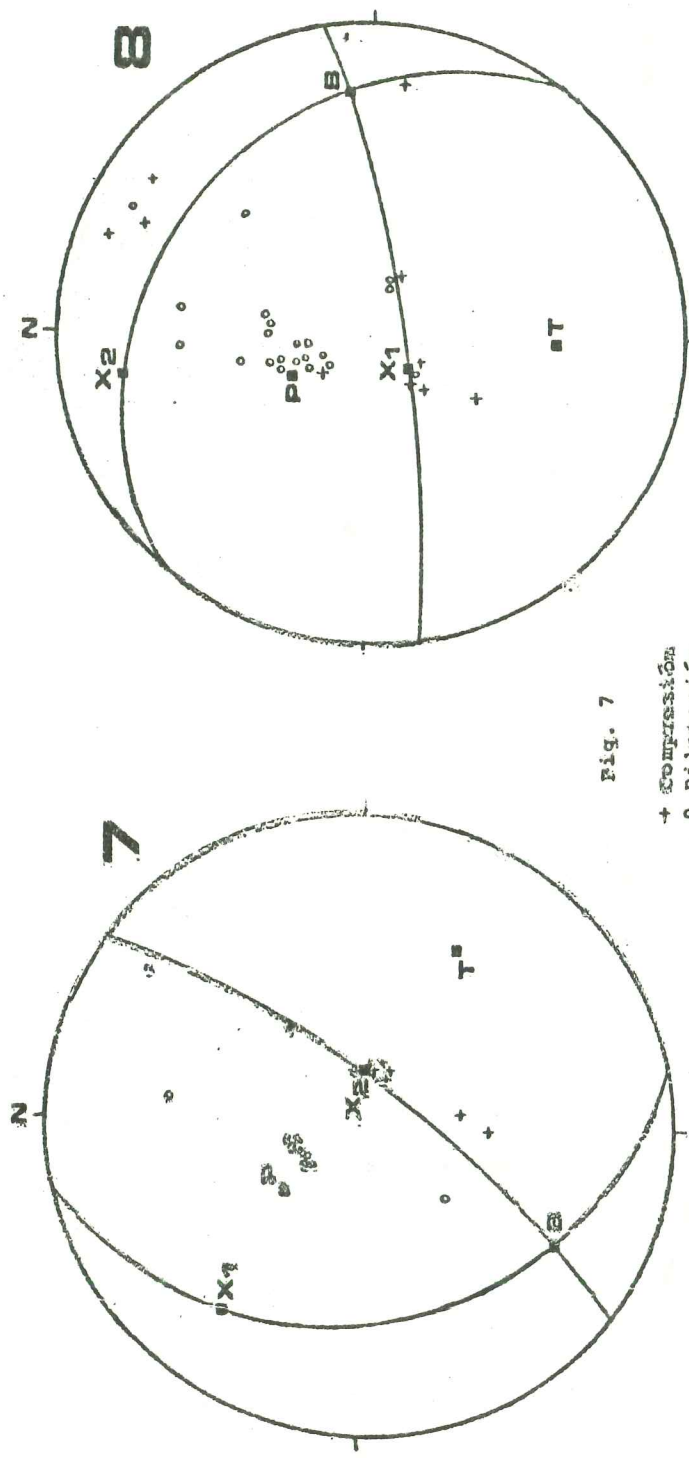


Fig. 7

+ Compresión
o Dilatación

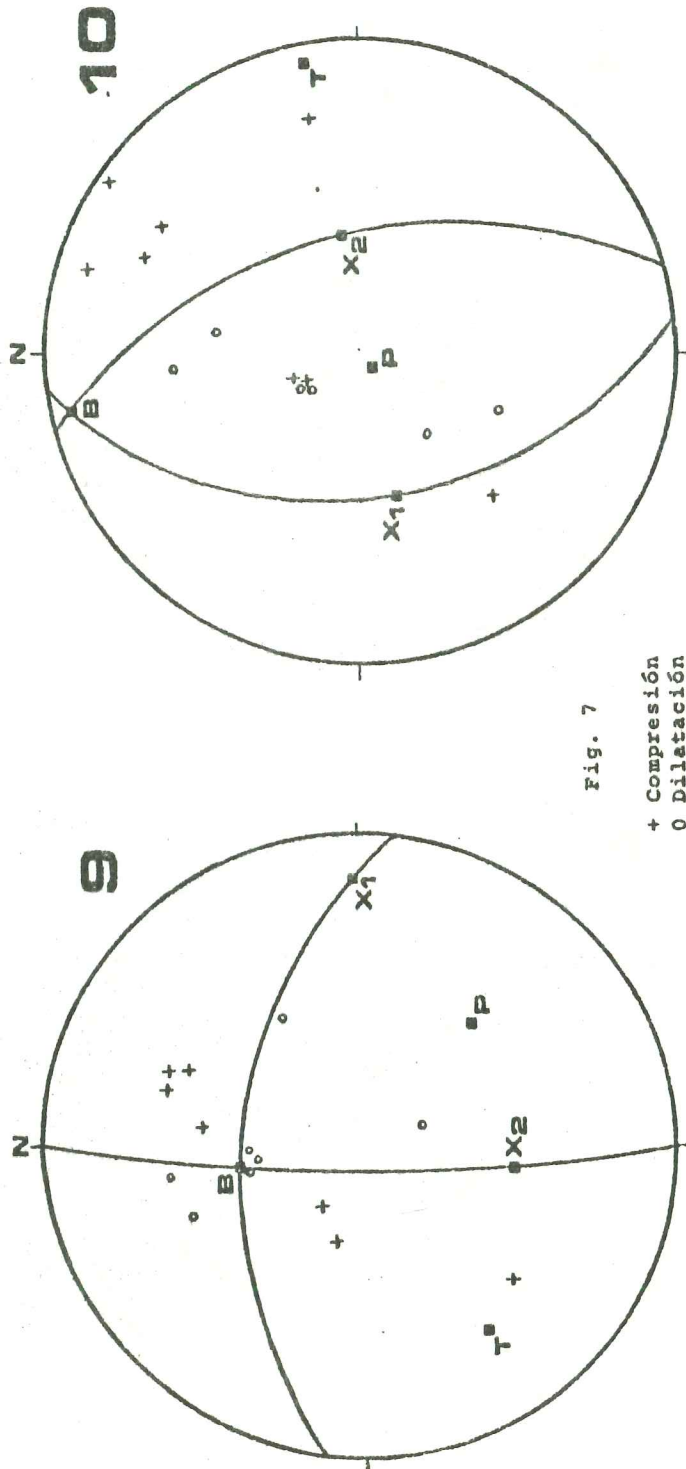


Fig. 7

+ Compresión
o Dilatación

Los resultados de los parámetros de foco se exponen en la Tabla 3, donde las columnas correspondientes a planos nodales indican el rumbo y manteo del plano de falla y auxiliar. Las otras columnas dan información sobre el rumbo y buzamiento de los ejes P, T y B.

TABLA 3
Parámetros de Foco

Nº	Año	Mes	Día	Planos Nodales (°NE)				Ejes					
				Falla		Auxiliar		P		T		B	
				Rum.	Man.	Rum.	Man.	Rum.	Buz.	Rum.	Buz.	Rum.	Buz.
1	49	07	31	178	76	92	75	136	20	223	2	318	70
2	51	06	18	7	71	102	76	144	20	55	2	310	67
3	58	08	28	0	75	96	70	137	25	229	5	327	63
4	58	09	04	14	78	106	82	148	10	240	3	331	78
5	67	09	26	36	82	140	12	314	47	117	32	214	14
6	72	09	10	118	31	122	58	56	76	218	10	306	5
7	73	04	23	35	72	167	28	316	55	118	25	210	19
8	78	01	20	130	20	80	78	333	60	182	30	84	15
9	78	10	11	0	80	98	50	133	35	235	20	350	48
10	81	08	21	164	50	173	40	228	82	79	4	348	4

Rum. : Rumbo
Man. : Manteo
Buz. : Buzamiento

5. CONCLUSIONES

La distribución de sismos en la zona estudiada indica la presencia de un proceso de deformación sobre un gran volumen tanto de la corteza como del manto superior. En el caso de la corteza no se tiene relación directa con la presencia de fallas visibles en superficie.

El carácter de la sismicidad en términos de la profundidad, distribución y magnitud es marcadamente aleatorio. Sólo es posible indicar dos franjas de actividad sísmica importantes en profundidad: una superficial, en los primeros 20 km de profundidad, y otra en los 100 km de profundidad, pero de menor frecuencia que la primera (Fig. 8).

NUMERO DE SISMOS
(1949 - 1982)

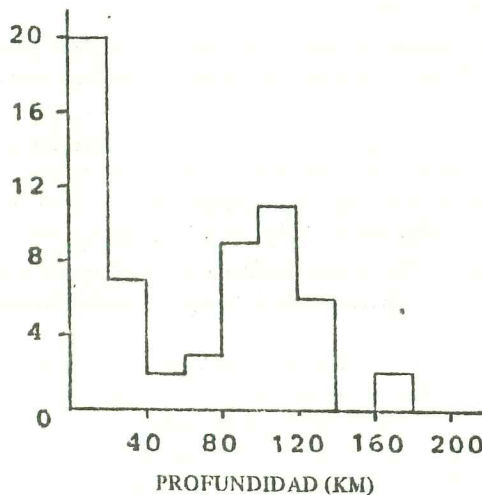


Fig. 8. Distribución de la frecuencia sísmica en profundidad.

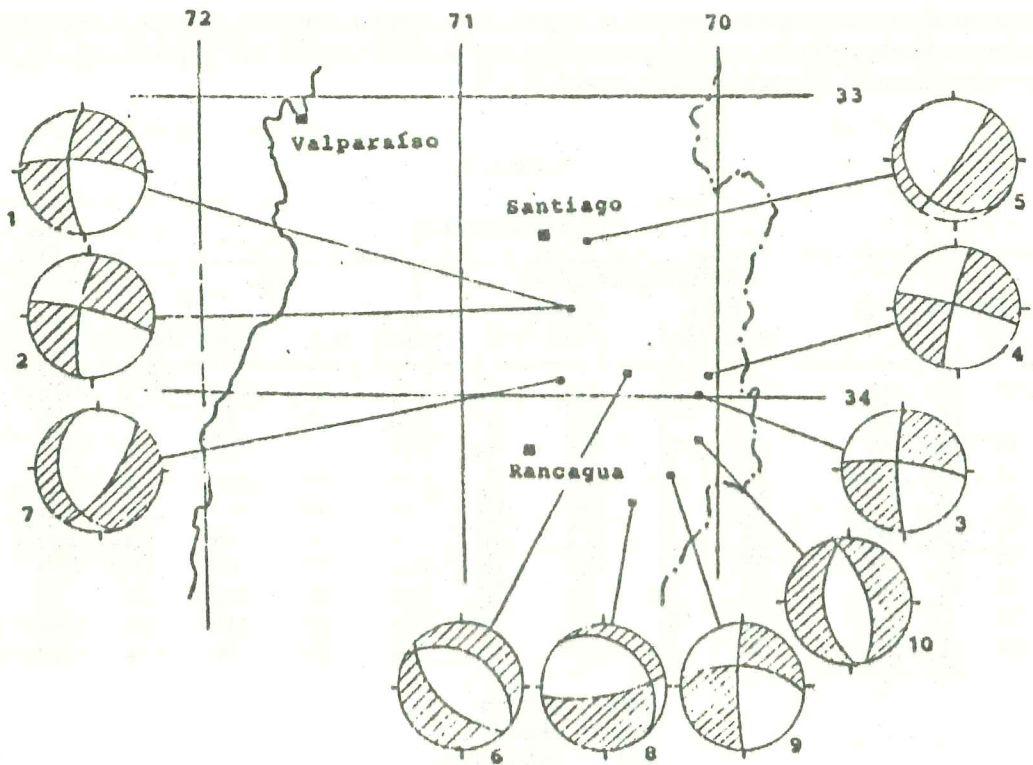


Fig. 9. Resultados gráficos para los mecanismos de foco obtenidos.
Las zonas achuradas corresponden a primeros movimientos de tipo compresional.

5.1. Sismicidad superficial

Es útil examinar la historia tectónica de la región para poder obtener algún conocimiento del campo de esfuerzos actuante y de esta forma lograr una comparación o posible relación, si las hay, entre los mecanismos de foco obtenidos y la tectónica regional.

Es claro que una verificación directa de los resultados es solamente posible en aquellos casos donde se pueda comparar los resultados de las soluciones de los planos de falla con observaciones geológicas en superficie.

El cuadro tectónico general de la zona en cuestión fue analizado por González-Ferrán (1963). De este estudio se desprende que hay indicios que dan testimonio de una intensa deformación, capaz de generar un fuerte desplazamiento unido al desarrollo de fracturas, fallas y sistemas de diaclasas. Es posible distinguir dos tipos de tectonismo: uno orogénico, de intenso plegamiento, y otro, posterior, de bloques.

En general, las diversas unidades litológicas presentan un rumbo aproximadamente Norte-Sur y buzamientos muy variados. Esto nos sugiere que el plano nodal correspondiente al de falla debe tener un rumbo cercano a la dirección Norte-Sur.

El mecanismo de foco obtenido por E. Piderit (1959) para el sismo del 4 de septiembre de 1958, según el método de las distancias extendidas (Stauder, 1962), dio como resultado un plano de falla con rumbo N 12° E y manteo 79° O. Lomnitz (1961) entrega como solución para el mismo sismo un rumbo N 13° E y manteo 77° O. Estos resultados concuerdan aproximadamente con el obtenido en el presente trabajo N 14° E para el rumbo y 78° O para el manteo del plano de falla.

Los mecanismos de foco de los sismos 1, 2, 3, 4 y 9 de la Tabla 2 indican la existencia de un cuadro de deformación tectónica que implica movimientos con una tendencia Norte-Sur y cercanamente horizontales que conformarían un sistema de fallas de rumbo.

El campo de esfuerzo asociado sugiere que la región sufre una deformación en respuesta a una extensión activa en la dirección Sur-Este.

Es bueno remarcar la similitud de los parámetros focales de los eventos 3, 4 y 9 (Fig. 9). Los mecanismos de foco de los sismos 1 y 2 aceptan, también, otras soluciones; además su ubicación y profundidad es poco segura.

5.2. Sismicidad a 100 km de profundidad

En este caso se obtuvieron los mecanismos de foco para los sismos 5, 6, 7, 8 y 10 en la Tabla 2.

Examinando la Fig. 7, podemos dividir estos sismos en dos grupos:

- a) Sismos 5 y 7, con una profundidad focal de 85 km aproximadamente. El plano de falla corresponde a una falla normal con rumbo NE y manteo aproximado de 75° .

En este caso los hipocentros están por sobre la zona de Benioff para esta latitud (Stauder, 1973), pero por bajo la corteza.

En estas fallas normales el lado o bloque Sur-Este está bajando respecto al lado Nor-Este. El movimiento en este caso puede representar una falla de tipo "bisagra", relacionada en cierta medida con el movimiento cercanamente horizontal de la placa en esta zona.

- b) Sismos 6, 8 y 10, con profundidad focal entre 110 y 150 km. Los resultados aquí obtenidos son semejantes a los anteriores. Tenemos fallamiento normal, pero en este caso con rumbos N 45° O y manteos entre 20° y 58° .

Podemos considerar que estos focos están relacionados directamente con la zona de Benioff (Stauder, 1973), representando la placa oceánica que desciende.

En realidad, los cinco sismos aquí analizados conforman un muy pequeño número de eventos necesarios para inferir conclusiones específicas respecto a las características de la zona de subducción. Pero la diferencia de los mecanismos de foco al variar su profundidad, puede indicar también una diferencia en las características de la subducción.

Referencias

- GONZALEZ-FERRAN, O. (1963). Observaciones Geológicas en el Valle de Río Volcán. Sociedad Geológica de Chile. Publicación N° 3, pp. 1-12.
- LOMNITZ, C. (1961). Los Terremotos del 4 de Septiembre de 1958 en el Cajón del Maipo. Anales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Vol. 18, pp. 279-306. Publicación N° 3, Depto. de Geología y Geofísica.
- PIDERIT, E. (1959). Estudio de los Sismos del Cajón del Maipo el año 1958. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Fac. de Ciencias Físicas y Matemáticas, U. de Chile, 125 pp.
- STAUDER, W. (1962). The Focal Mechanism of Earthquakes. *Advances in Geophysics* 9, pp. 1-76.
- STAUDER, W. (1973). Mechanism and Spatial Distribution of Chilean Earthquakes with Relation to Subduction of the Oceanic Plate. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 78, pp. 5033-5061.