

POSIBLE SISMICIDAD INDUCIDA DEBIDA AL EMBALSE COLBUN

Mario Pardo P. y Alfredo Eisenberg
Departamento de Geofísica, Universidad de Chile.
Casilla 2777, Santiago, Chile.

RESUMEN

Se plantea un método para calcular las tensiones máximas y deformaciones producidas por la carga de grandes embalses, aplicándolo al caso de la represa de Colbún que se construye en el curso del río Maule en Chile Central.

Por las características geotectónicas de la zona de Colbún —volcanismo activo o reciente, presencia de fuentes termales, sismicidad regional moderada y los valores extremos calculados de tensión vertical (4.29 bars), tensión máxima de Cizalle (2.06 bars) y deformación vertical (2.54 cm.), todos a 2 km. de profundidad— es posible esperar cambios en la actividad sísmica y sismos inducidos por el embalse.

Todos los valores calculados disminuyen fuertemente con la profundidad, por lo que se postula un aumento de la sismicidad superficial y posibilidad de sismos inducidos asociados al futuro embalse con magnitudes $m_B \leq 5.0$ y profundidad de foco superficial.

Se recomienda instrumentar el entorno de la represa por la importancia de registrar la actividad sísmica durante la época de llenado del embalse, sobre todo considerando que se encuentra aguas arriba de importantes ciudades de Chile Central.

ABSTRACT

Possible Induced Seismicity due to Colbún Dam.

A method to evaluate maximum stresses and deformation due to the load of large dams is presented including an application to the case of Colbún dam under construction on the Maule river in Central Chile.

Geotectonics characteristics of the Colbún zone —active or recent volcanism, presence of thermal springs, moderate regional seismicity and the maximum values calculated for the vertical stress (4.29 bars), maximum shear stress (2.06 bars) and vertical deformation (2.54 cm.), all at 2 km. depth— indicate that changes in the seismic activity and induced earthquakes due to the reservoir are possible.

Because all the calculated values decay strongly with depth, an increase of the surface focus seismic activity and the possibility of induced earthquakes related to the future dam, with magnitudes $m_B \leq 5.0$ and shallow focus, are postulated.

Instrumentation of the dam zone is recommended in order to watch over the seismic activity during the water loading, especially because it is upstream of important cities of Central Chile.

1. INTRODUCCION

El presente estudio cuantifica la posibilidad de sismicidad inducida por la construcción de grandes represas, aplicándose al caso de la represa de Colbún que se construye en el curso del Río Maule en Chile Central.

Fundamentalmente el embalse de Colbún estará constituido por un muro principal de 118 metros de altura y 560 metros de coronamiento. Obras menores, como dos pretilos y una presa adicional (Machicura), son también parte integrante de este proyecto. El embalse cubrirá un área de 53 km² y contendrá 1.490 millones de m³ de agua.

De acuerdo a las características geotectónicas de la zona —volcanismo activo o reciente, presencia de fuentes termales y sismicidad regional moderada—, es posible esperar cambios en la actividad sísmica y sismos inducidos por el embalse.

Se analiza en detalle el efecto de la carga del tranque a través del cálculo de tensiones verticales, tensiones máximas de cizalle y deformaciones en todo el sector del embalse y su posible asociación con la sismicidad que pueda ser inducida.

Consideraciones sobre la sismicidad tectónica y regional, y sobre los parámetros calculados para este embalse, permiten estimar una probabilidad de sismos inducidos de magnitud m_B no superior a 5.0 con un fuerte aumento de la actividad microsísmica durante los primeros años y épocas de llenado. Se hacen recomendaciones generales sobre el posible registro y control de esta actividad.

2. ALGUNAS CARACTERISTICAS DE LA ACTIVIDAD SISMICA INDUCIDA POR EMBALSES

Es de conocimiento generalizado en la actualidad que el llenado de grandes embalses artificiales puede causar sismicidad inducida; este hecho ha sido comprobado en numerosos embalses en distintas zonas del mundo.

El problema de encontrar una correlación entre la sismicidad de una región y embalses de agua ubicados en la zona ha cobrado real importancia sólo a partir de la década del 60 y hasta la fecha es un problema que no está totalmente resuelto. Esto se debe, en gran parte, a la falta de datos, ya que en la mayoría de los casos de sismos inducidos por embalses el problema ha sido estudiado y se han obtenido buenos datos con posterioridad al evento principal, o luego de observar un notable cambio en la sismicidad regional, desconociéndose en general las condiciones existentes en la zona con anterioridad a la construcción de la represa y al llenado del embalse.

Desde el año 1930 hay evidencia de grandes sismos inducidos con magnitud $m_B < 5.0$ en diferentes regiones del mundo, como se muestra en la Tabla 1.

TABLA 1. CAMBIOS EN LA SISMICIDAD INDUCIDOS POR EMBALSES (SIMPSON, 1976)

Represa	Ubicación	Altura de la represa (m)	Volumen del Embalse (10 ⁶ m ³)	Año de llenado	Año del sismo mayor	Magnitud
Grandes sismos inducidos:						
Koyna	India	103	2708	1964	1967	6.5
Kremasta	Grecia	165	4750	1965	1966	6.3
Hsinfengkiang	China	105	10500	1959	1962	6.1
Oroville	U.S.A.	236	4295	1968	1975	5.9
Kariba	Rodesia	128	160368	1959	1963	5.8
Hoover	U.S.A.	221	36703	1936	1939	5.0
Marathon	Grecia	63	41	1930	1938	5.0

Además de los nombrados en dicha lista, hay evidencia de sismos menores en al menos 30 casos adicionales e, incluso, disminución de la actividad sísmica en algunos de ellos (Simpson 1965). Es interesante notar que en algunos de los casos nombrados anteriormente aparece un aumento de premonitores o sismo principal, habiendo intervalos entre el premonitor y sismo principal desde 6 meses (Kremasta) hasta poco más de 5 años (Koyna).

Este fenómeno se aprecia en la Fig. 1 (a-d), que resume la actividad sísmica luego del llenado de los embalses de Kariba, Kremasta y Koyna (Gupta, Rastogi y Narain, 1972).

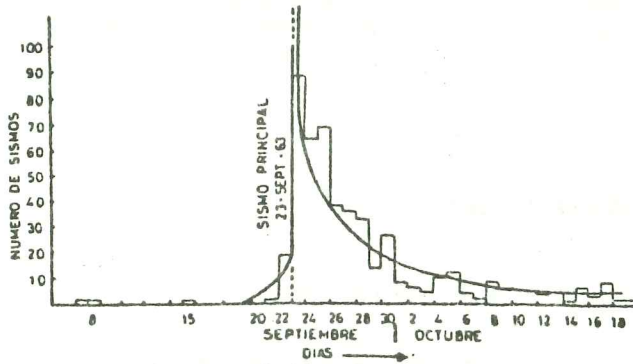


FIG. 1a. MODELO PRECURSORES-REPLICAS SISMO DE KARIBA DEL 23 DE SEPTIEMBRE DE 1963.

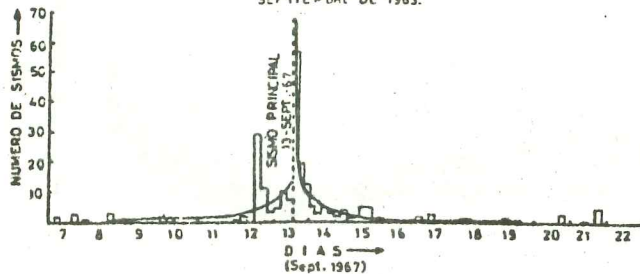


FIG. 1c. MODELO PRECURSORES-REPLICAS SISMO DE KOYNA DEL 13 DE SEPTIEMBRE DE 1967.

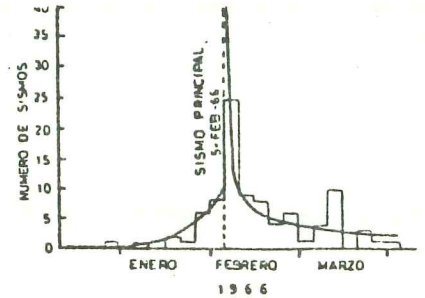


FIG. 1b. MODELO PRECURSORES-REPLICAS SISMO DE KREMASTA DEL 5 DE FEBRERO DE 1966

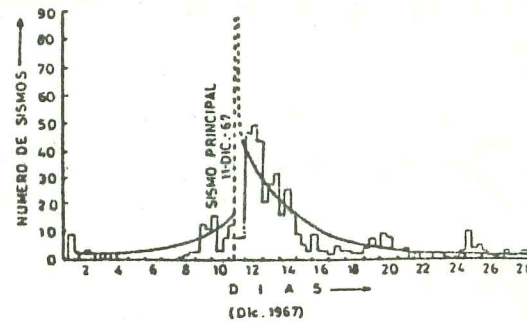


FIG. 1d. MODELO PRECURSORES-REPLICAS SISMO DE KOYNA DEL DICIEMBRE DE 1967

Las intensidades de los sismos inducidos de mayor magnitud decrecen rápidamente con la distancia en muchos casos los pequeños temblores producen ruidos audibles, lo que indica que su profundidad focal es muy pequeña (del orden de pocos kms. como máximo).

Finalmente, cabe notar que la mayoría de los sismos inducidos importantes se han producido directamente bajo los embalses, estando circunscrita la mayor parte de la actividad sísmica asociada en áreas que se extienden hasta 25 km del borde de ellos (Simpson 1976). Las soluciones de mecanismo focal obtenidas para este tipo de sismos inducidos, indican movimientos sólo de los tipos transcurrentes (Strike - Slip) normal.

3. ORIGEN DE LA SISMICIDAD INDUCIDA

A pesar de los numerosos casos en que se han determinado sismos inducidos, aún no está claro el origen de los mismos. Esto se debe, en parte, a que en pocas ocasiones se han podido estudiar en detalle tales sismos tanto antes, durante como después del llenado de un embalse. En general, se han sugerido tres hipótesis fundamentales que podrían actuar concurrentemente:

- Por efecto de una disminución en las tensiones efectivas del medio debido al aumento de la "presión de poros", motivado por el cambio de saturación de agua en el substrato.

- Por posibles efectos de dilución producidos por la acción del agua en zonas fracturadas o de falla.
- Por esfuerzos de corte causados por el peso del embalse en las posibles fallas subyacentes a la presa.

El presente trabajo analiza fundamentalmente el último caso en la zona de Colbún.

Cabe notar que los fenómenos mencionados anteriormente, por sí solos, solamente causarían sismos menores o microtemblores. Para que se originen sismos mayores es necesario que existan en la zona esfuerzos tectónicos regionales previos a la presencia del embalse.

Este último punto explica la asociación de sismicidad inducida a zonas de actividad sísmica moderada, ya que en sectores activos no es necesario el proceso de "disparo" para generar sismos mayores. A la vez, zonas totalmente estables no poseen tensiones acumuladas mayores como para generar un sismo de importancia.

4. ANTECEDENTES DE SISMICIDAD DEL SECTOR ESTUDIADO

La región sísmica considerada está comprendida entre los paralelos 34° a 37° Sur y los meridianos 71° a 72° Oeste. (Fig. 2).

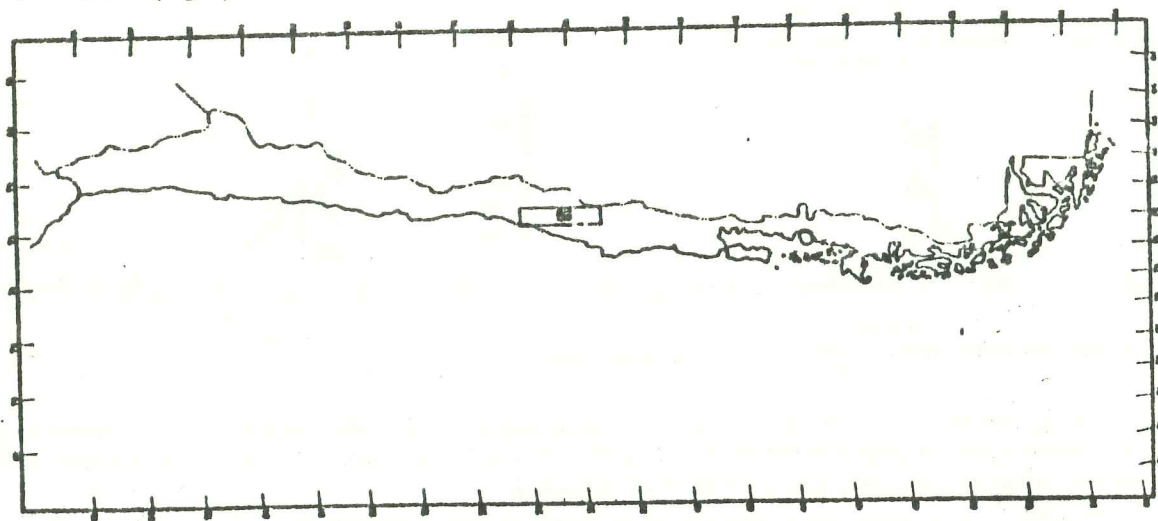


Fig. 2 Mapa ubicación región sísmica considerada para Embalse Colbún.

La información sísmica para la zona se obtuvo de antecedentes dados por el U.S.C.G.S. para los períodos 1967-1970, NOAA para 1970-1971 y del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile para 1968-1977.

Los períodos considerados que hacen confiables y homogéneos los datos son los siguientes (Barrientos, 1980): $T = 10$ años para sismos $m_B > 5.0$ (1968-1977), $T = 5$ años para sismos $4.0 < m_B < 5.0$ (1967-1971).

Los sismos considerados en la estadística se presentan en Tabla 2.

Además, es necesario considerar históricamente el llamado terremoto de Talca de 1928; aunque causó daños mayores en Talca, su epicentro se ha calculado costa afuera a la altura del poblado de Putú. Por esto último estaría fuera del radio de inducción de la represa de Colbún.

de donde, para la zona de Colbún, utilizando la magnitud mínima en nuestra estadística $M_{\min} = 4.0$

$$\bar{m}_B = 4.5$$

$$P_T(m_B) = 1 - \exp(-8128.31 T \exp(-2.19 m_B))$$

La probabilidad de ocurrencia de sismos en la zona se encuentra tabulada para diferentes períodos en la Tabla 3.

TABLA 3

Probabilidad de ocurrencia para sismos con magnitud $m \geq m_B$, en la zona asociada a Colbún

Magnitud m_B	Probabilidad de ocurrencia para sismos $m \geq m_B$			
	T = 1 año	T = 5 años	T = 10 años	T = 50 años
3.5	97.79	100.00	100.00	100.00
4.0	72.06	99.83	100.00	100.00
4.5	34.73	88.15	98.60	100.00
5.0	13.30	51.01	76.00	99.92
5.5	4.66	21.24	37.96	90.81
6.0	1.68	7.68	14.76	55.01

Según estos resultados y tomando en cuenta que históricamente no se tiene registro de sismos con $m_B > 6.0$ en la zona estudiada, siendo notable además la baja densidad de actividad sísmica en relación con otras zonas, Colbún correspondería a una región de actividad sísmica moderada donde, de acuerdo a los antecedentes existentes sobre sismos inducidos, los efectos del embalse proyectado en la sismicidad regional podrían ser de importancia.

5. CALCULO DE TENSIONES Y DEFORMACIONES DEBIDAS AL EMBALSE COLBUN

A fin de estimar la probabilidad de ocurrencia de un sismo inducido debido a un embalse, es necesario calcular la distribución de tensiones y deformaciones en profundidad debido a la carga del lago artificial.

Para tal efecto, se divide el lago en columnas de base cuadrada de longitud a ($a = 1$ km en este caso) y se calcula la fuerza hidrostática en el centro de cada columna. Esta fuerza es $F = \rho g a^2 h$, donde ρ es la densidad del agua, g la gravedad del lugar y h la altura de cada columna o profundidad del lago en ese punto. De esta manera, el efecto gravitacional del lago es reemplazado por un arreglo bidimensional de fuerzas F_i que actúan normalmente en el fondo de éste. Se asume en todos los cálculos que la carga es aplicada sobre un semiespacio elástico, isótropo y homogéneo.

Usando un sistema ortogonal con eje X orientado hacia el Este, Y hacia el Norte y Z como profundidad, la tensión en coordenadas cilíndricas que actúa en el punto $P(x,y,z)$ en el semiespacio, debida a la fuerza F_j , está dada por las componentes (Gough y Gough, 1970 a):

$$\sigma_r = \frac{F_i}{2\pi} \left[\frac{1-Z}{r^2} \left(1 - \frac{Z}{R}\right) - \frac{3r^2 Z}{R^5} \right]$$

$$\sigma_z = \frac{3F_i}{2} \frac{Z^3}{R^5} \quad (1)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{F_i}{2\pi} (1-2\nu) \left[-\frac{1}{r} + \frac{Z}{r^2 R} + \frac{Z}{R^3} \right]$$

$$T_{rz} = \frac{3F_i}{2\pi} \frac{rZ}{R^5}$$

donde:

$$R = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$$

$$r = (x^2 + y^2)^{1/2}$$

$$\theta = \arctg(y/x)$$

$$\nu = \text{coeficiente de Poisson.}$$

La tensión total producida por carga del lago, se obtiene sumando las contribuciones de todas las cargas F_i a cada una de las componentes de tensión. Para simplificar esta operación se utilizan coordenadas cartesianas; transformando coordenadas las relaciones (1) se expresan como:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_{\theta} \sin^2 \theta + \sigma_r \cos^2 \theta \\ \sigma_y &= \sigma_r \sin^2 \theta + \sigma_{\theta} \cos^2 \theta \\ \sigma_z &= \sigma_z \\ T_{xy} &= (\sigma_r - \sigma_{\theta}) \sin \theta \cos \theta \\ T_{xz} &= T_{rz} \cos \theta \\ T_{zy} &= T_{rz} \sin \theta \end{aligned} \quad (2)$$

Conocidas las componentes de tensión, las tensiones principales $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ que actúan en un punto cualquiera $P(x, y, z)$ en el interior del semiespacio se obtienen como los valores propios de la matriz de tensiones, i. e.

$$\begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma & T_{yx} & T_{zx} \\ T_{xy} & \sigma_y - \sigma & T_{zy} \\ T_{xz} & T_{yz} & \sigma_z - \sigma \end{vmatrix} = 0 \quad (3)$$

La matriz de tensiones es simétrica, es decir, $T_{ij} = T_{ji}$.

Las tensiones principales $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ corresponden a la tensión de compresión máxima, intermedia y mínima respectivamente. En función de éstas, la tensión máxima de Cizalle que actúa en el punto $P(x, y, z)$ está dada por:

$$T_{máx} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$$

Los parámetros de interés en este caso son la tensión vertical (σ_z), la tensión máxima de Cizalle ($T_{máx}$) y la deformación vertical (D) dada en forma discreta por:

$$D = \sum_{i=1}^N d_i$$

donde d_i es la deformación producida en el punto $P(x, y, z)$ por la fuerza F_i que, de acuerdo a Gough (1970), cumple con la relación

$$d_i = \frac{F_i}{2\pi E} \left[\frac{(1+\nu)z^2}{R^3} + \frac{2(1-\nu)^2}{R} \right]$$

donde E es el módulo de Young.

Para el caso del embalse Colbún se eligieron ejes coordenados orientados Norte-Sur (eje Y) y Este-Oeste (eje X) con origen en las coordenadas 71.36 Sur y 35.63 Oeste. El lago se dividió en 50 cuadrados de lado 1 km dando origen a 50 fuerzas puntuales actuando en el centro de cada cuadrado. Utilizando estas fuerzas y un arreglo $N_x = 21$ por $N_y = 13$, y haciendo variar la coordenada z desde 2 km hasta 30 km de profundidad, se calcularon en planta (plano xy) los valores de la tensión vertical, tensión máxima de cizalle y deformación vertical; estos valores y las curvas de igual tensión y deformación para cada profundidad considerada se presentan como resultado.

Las deformaciones y tensiones fueron calculadas para 7 profundidades diferentes: 2, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 km, entregándose en las Figuras 4, 5 y 6 las curvas de igual tensión y deformación para las profundidades de 2, 5, 10 y 15 km por ser ellas más relevantes en este estudio.

Además, se obtuvieron dos perfiles, uno Norte-Sur y otro Este-Oeste, que pasan por la zona de máxima anomalía (A-A' y B-B') en la Fig. 3; éstos se muestran en las Figuras 4.5, 4.6, 5.5, 5.6, 6.5 y 6.6.

En todos los cálculos, los valores utilizados para el módulo de Young y coeficiente de Poisson corresponden a los valores promedios esperados para el rango de profundidades considerado:

$$E = 0.85 \text{ Mbars y } \nu = 0.027$$

6. RESULTADOS

6.1. Tensión vertical

De los planos de isotensión vertical mostrados en las Figuras 4.1 a 4.4, se aprecia que este parámetro disminuye apreciablemente en profundidad, observándose dos máximos de 4.29 y 3.57 bars en el plano obtenido a profundidad de 2 km.

Como es de esperar, los valores máximos están asociados a los lugares más profundos del lago y los máximos observados a 2 km de profundidad se confunden en uno solo al considerar profundidades mayores.

Los perfiles A-A' y B-B' para este parámetro (Figuras 4.5 y 4.6) reflejan este decremento de la tensión vertical y su suavizamiento con la profundidad.

6.2. Tensión máxima de cizalle

Este parámetro es uno de los más importantes en la activación de una falla en la zona de estudio; como se verá más adelante, está asociado a la caída de tensión en un sismo y su orden de magnitud hace posible esperar algún efecto de sismicidad inducida.

El máximo de la tensión máxima de cizalle es prácticamente coincidente con el de la tensión vertical en el plano a 2 km de profundidad y corresponde a un valor de 2.06 bars. (Figs. 5.1 a 5.6).

Nuevamente las curvas se suavizan en profundidad aunque este efecto no es evidente en las Figuras 5.1 a 5.4 en las que se ha disminuido el intervalo entre esolíneas.

Cabe notar que las curvas de igual intensidad máxima de cizalle en los perfiles A-A' y B-B' (Figs. 5.5 y 5.6) tienden a cerrarse en superficie, siendo este efecto esperado por las condiciones de borde del problema.

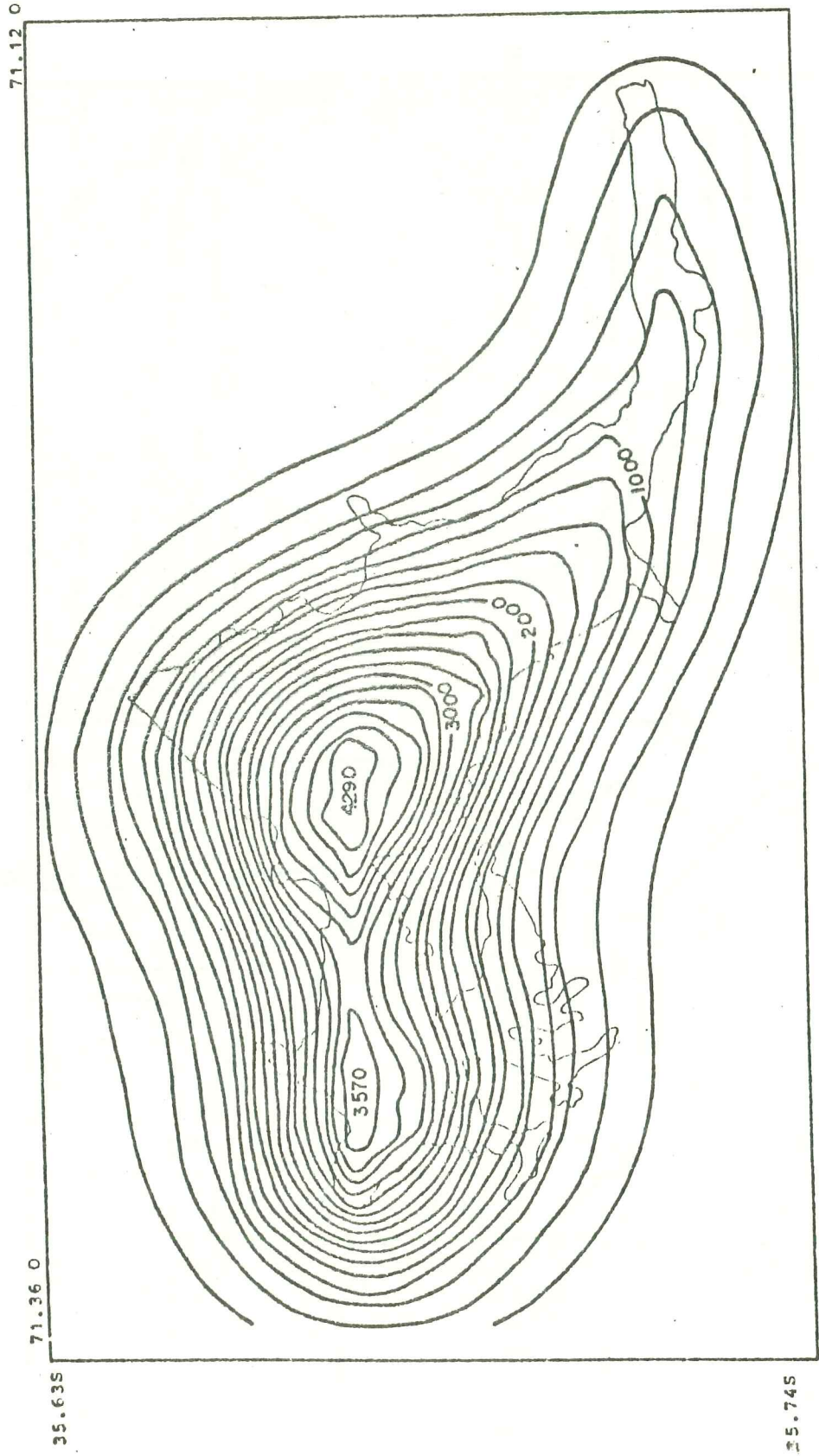


FIG 4.1 ISOTENSION VERTICAL A 2 KM (mbars)

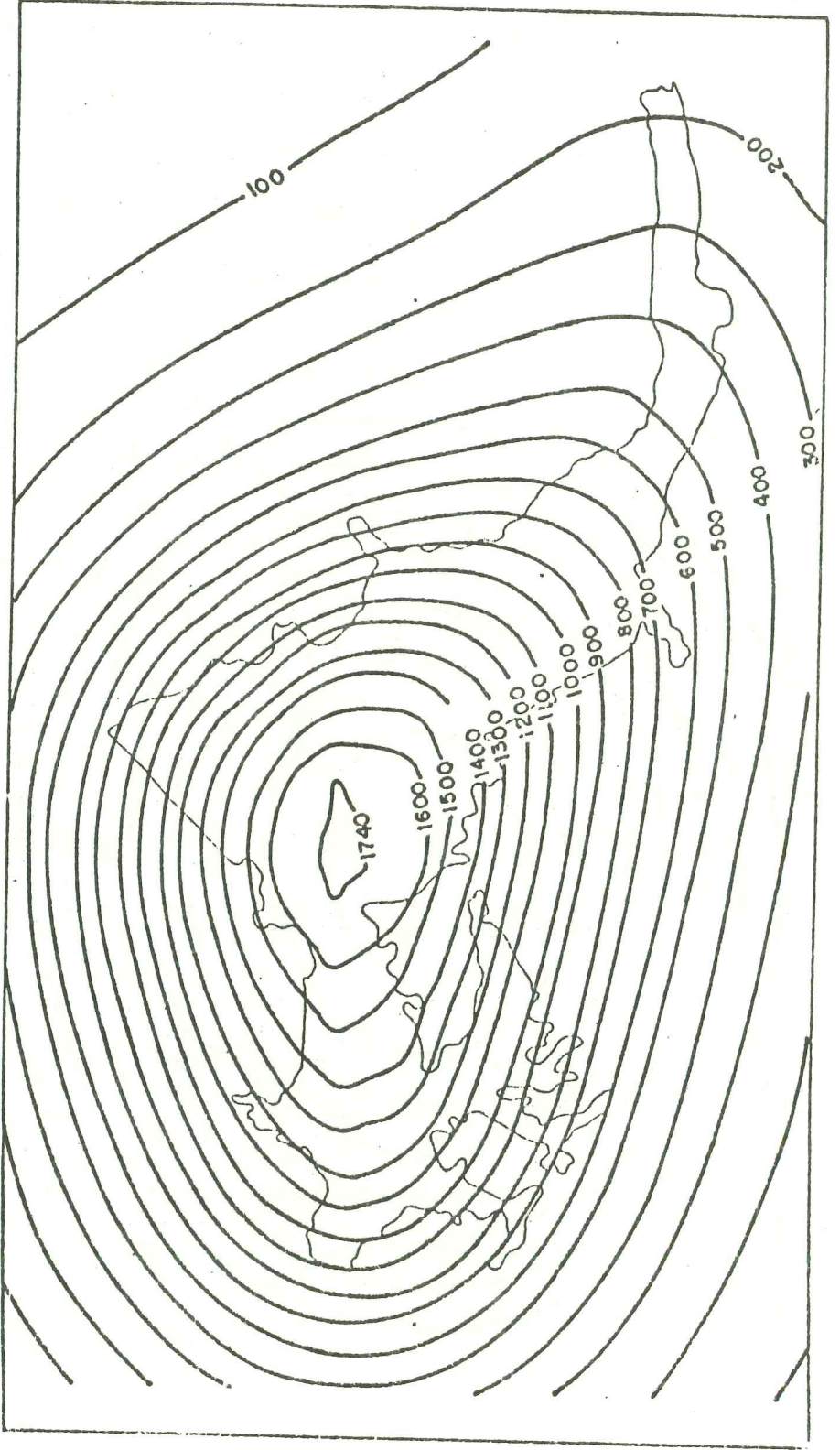


FIG 4.2 ISOTENSION VERTICAL A 5 KM (mbars)

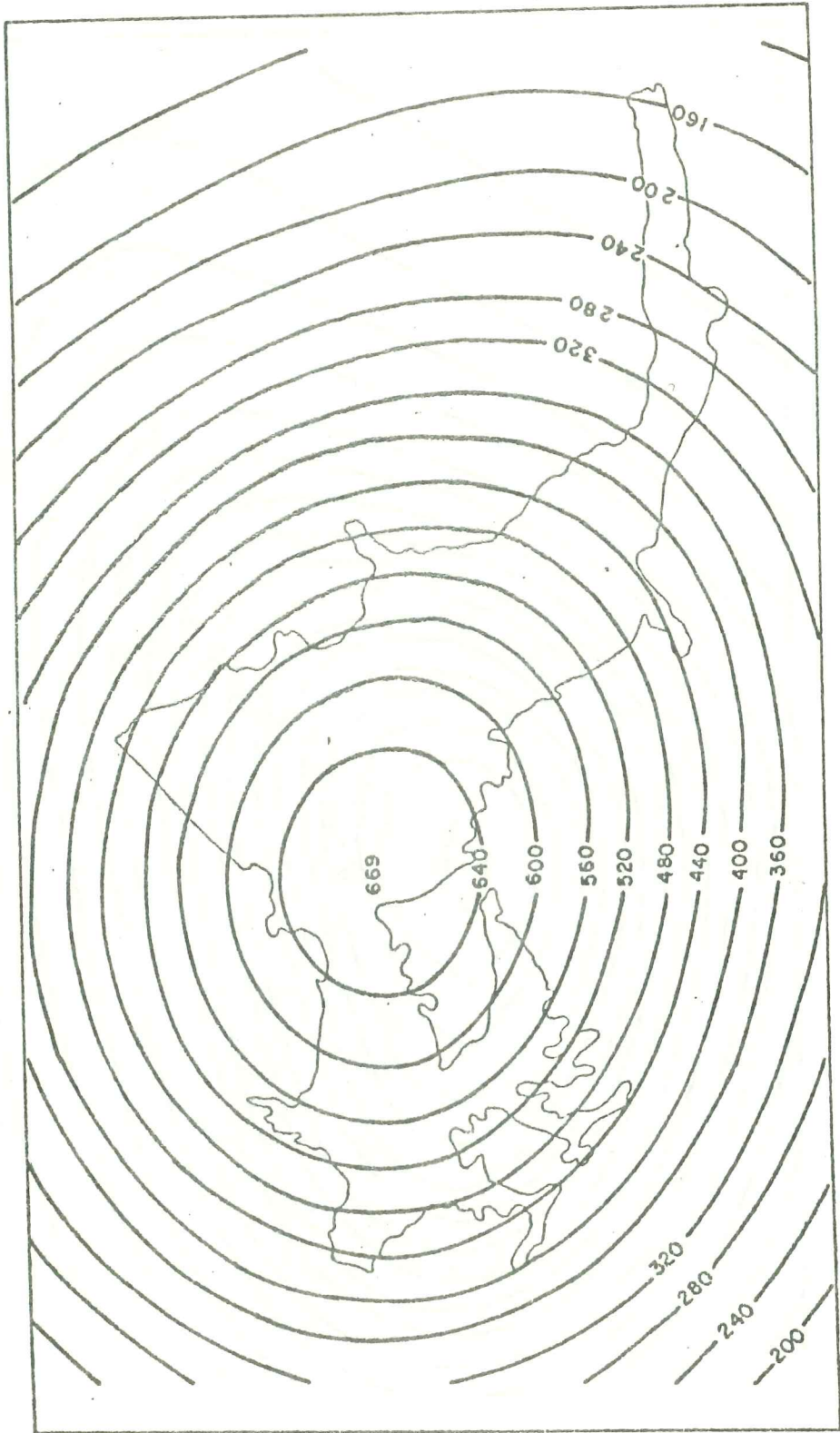


FIG 4.3 ISOTENSION VERTICAL A 10 KM (mbars)

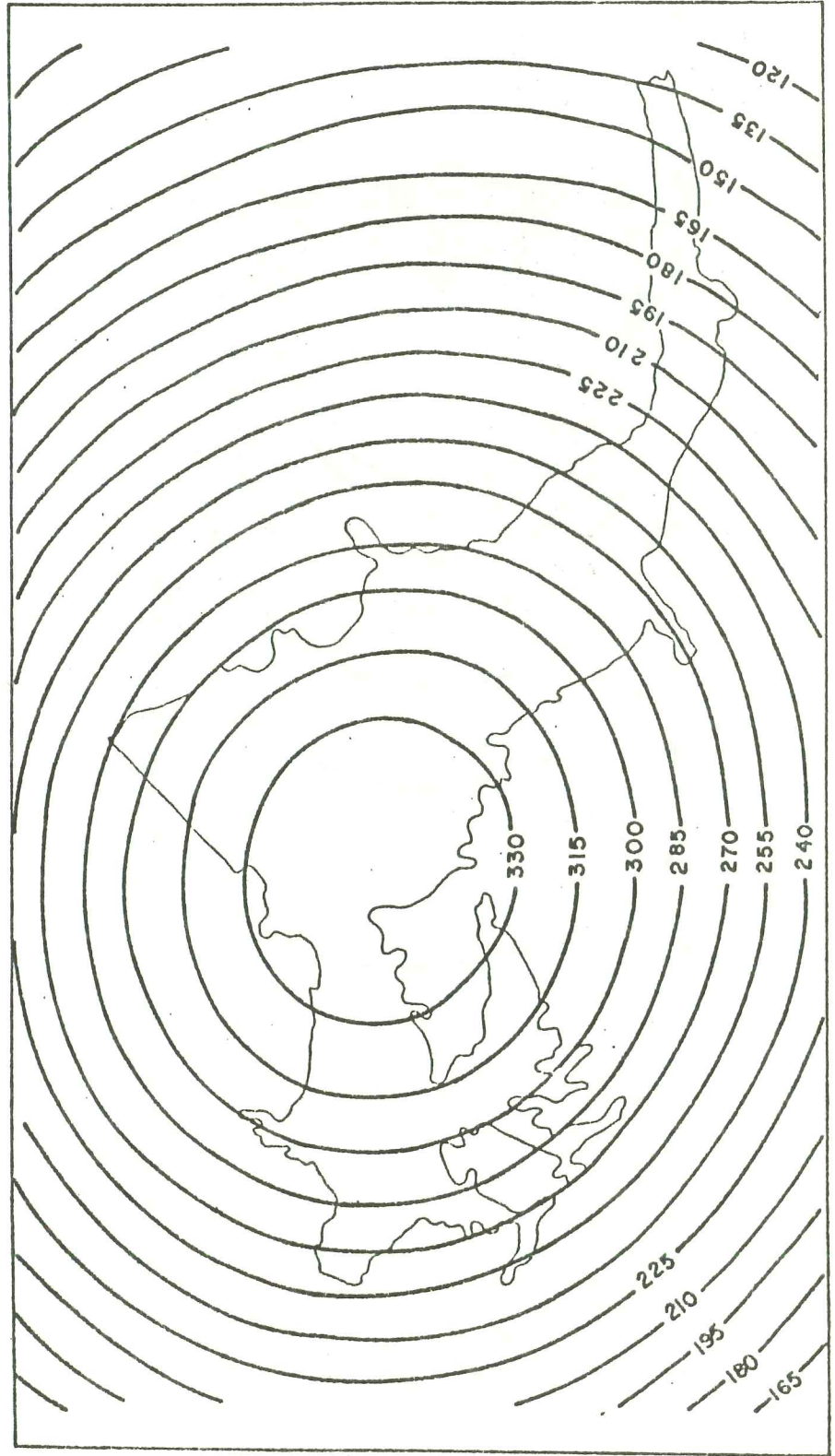


FIG 4.4 ISOTHERM VERTICAL A 15 KM (mbars)

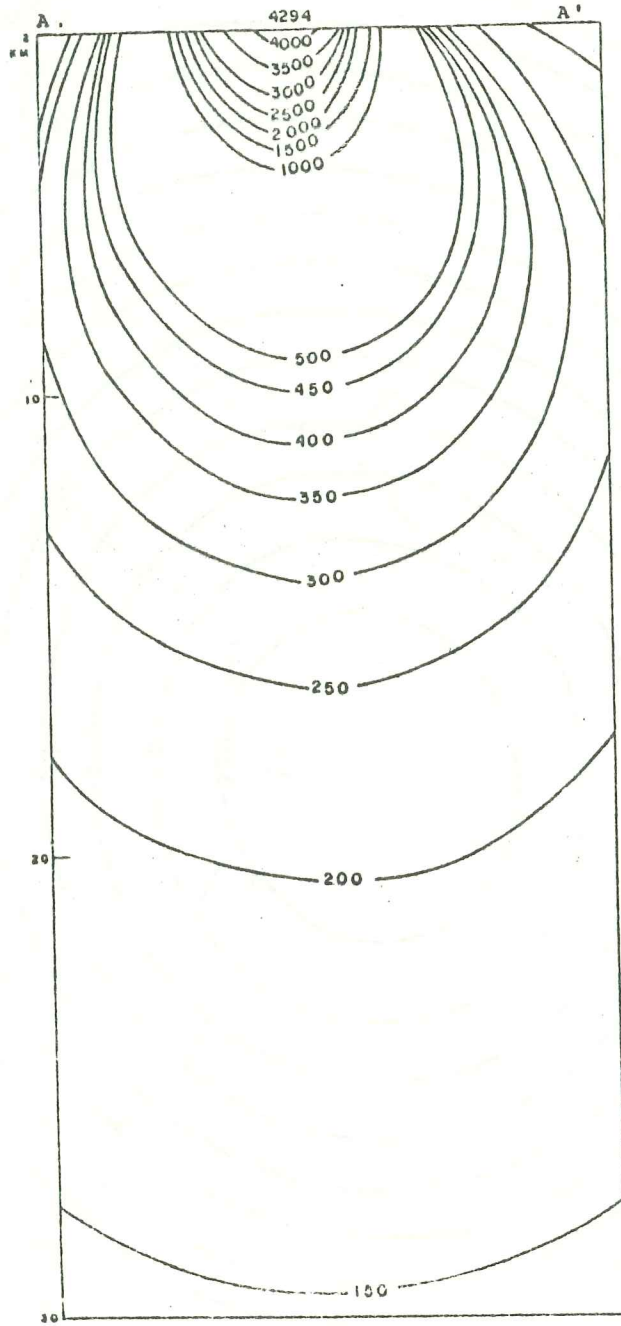


FIG 45 PERFIL DE ISOTENSION VERTICAL H-S (mbars)

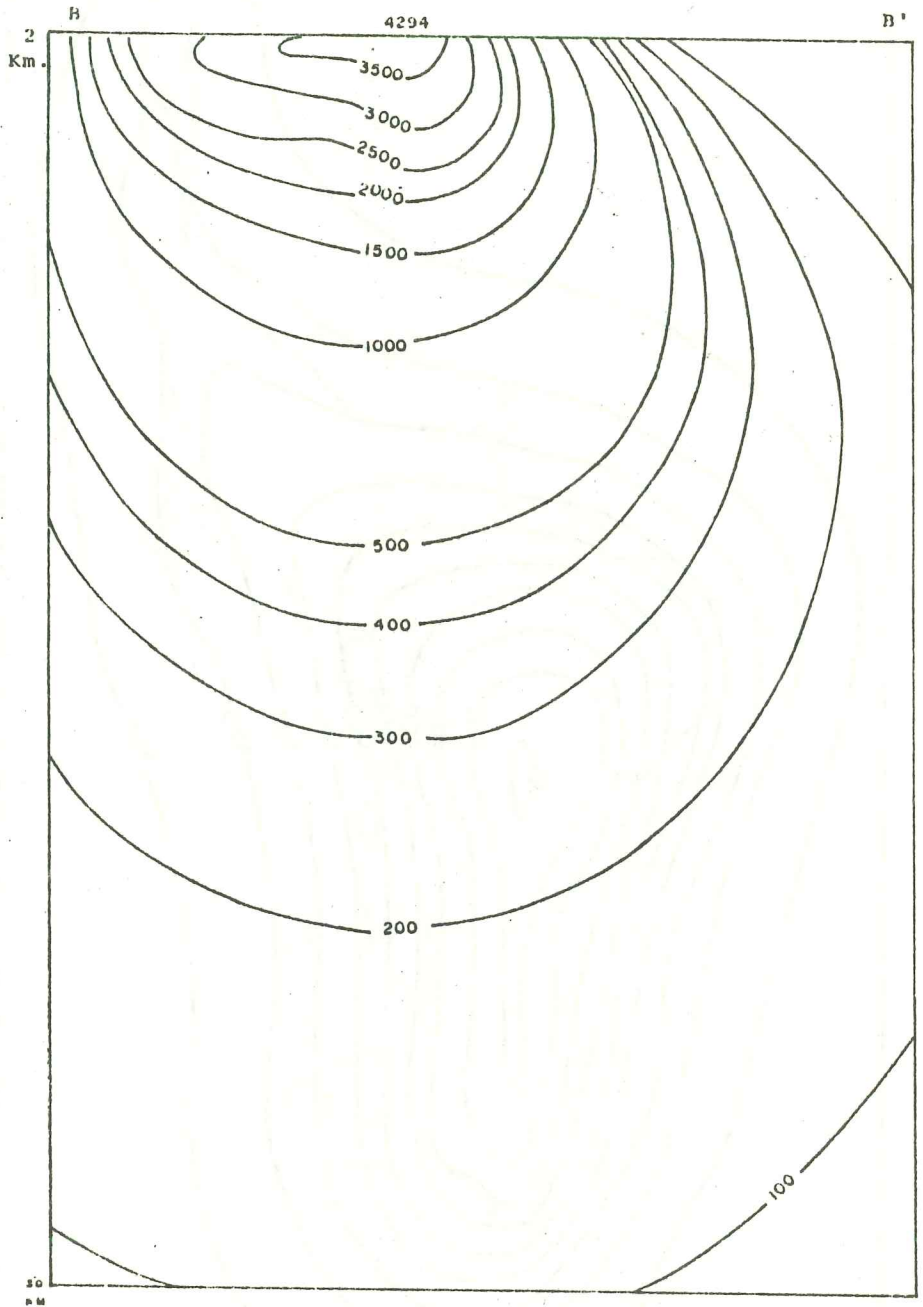


FIG 4.0 PERFIL DE ISOTENSION VERTICAL E-W (mbars)

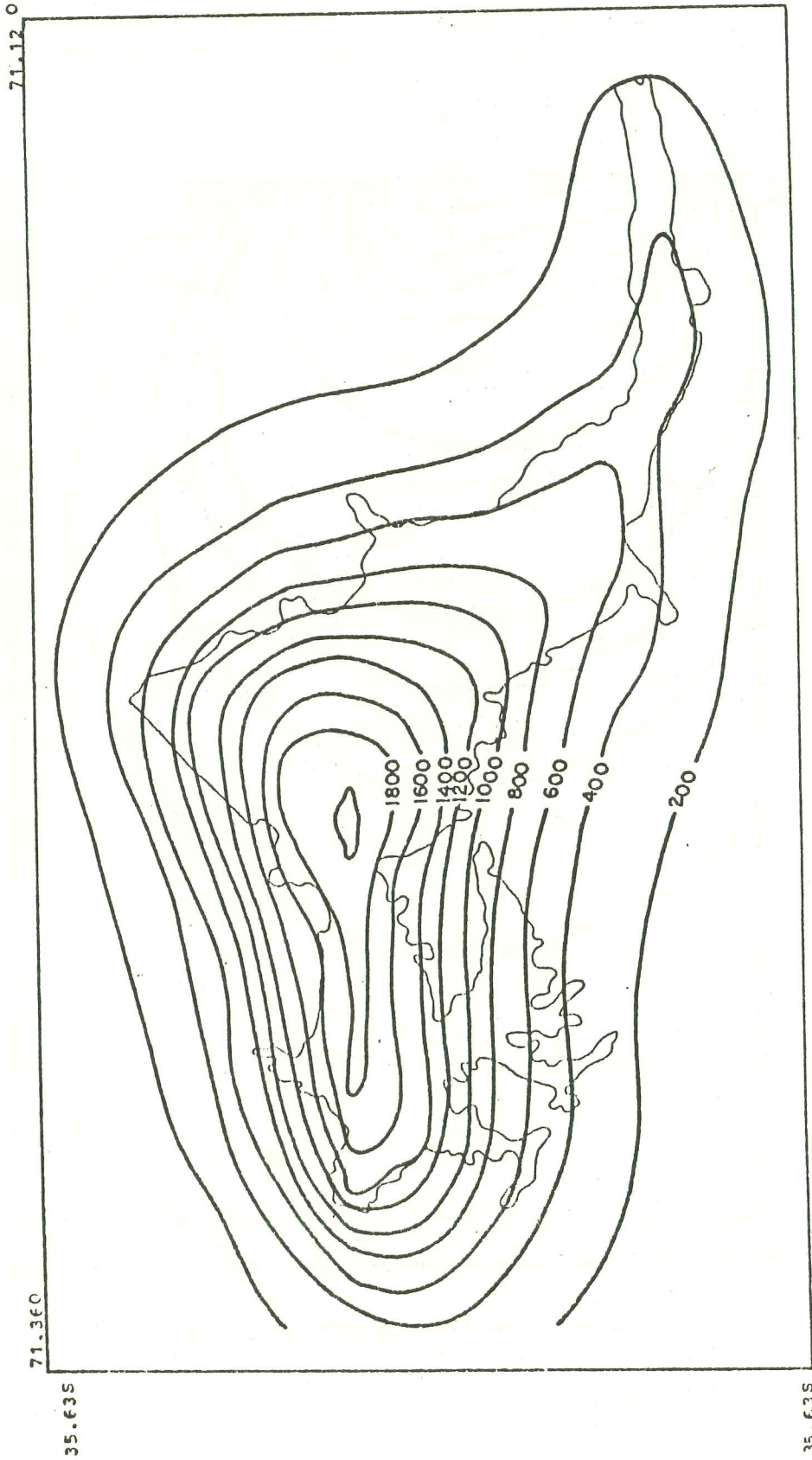


FIG 5.1 ISOTENSION MAXIMA DE CIZALLE A 2 KM (mbars)

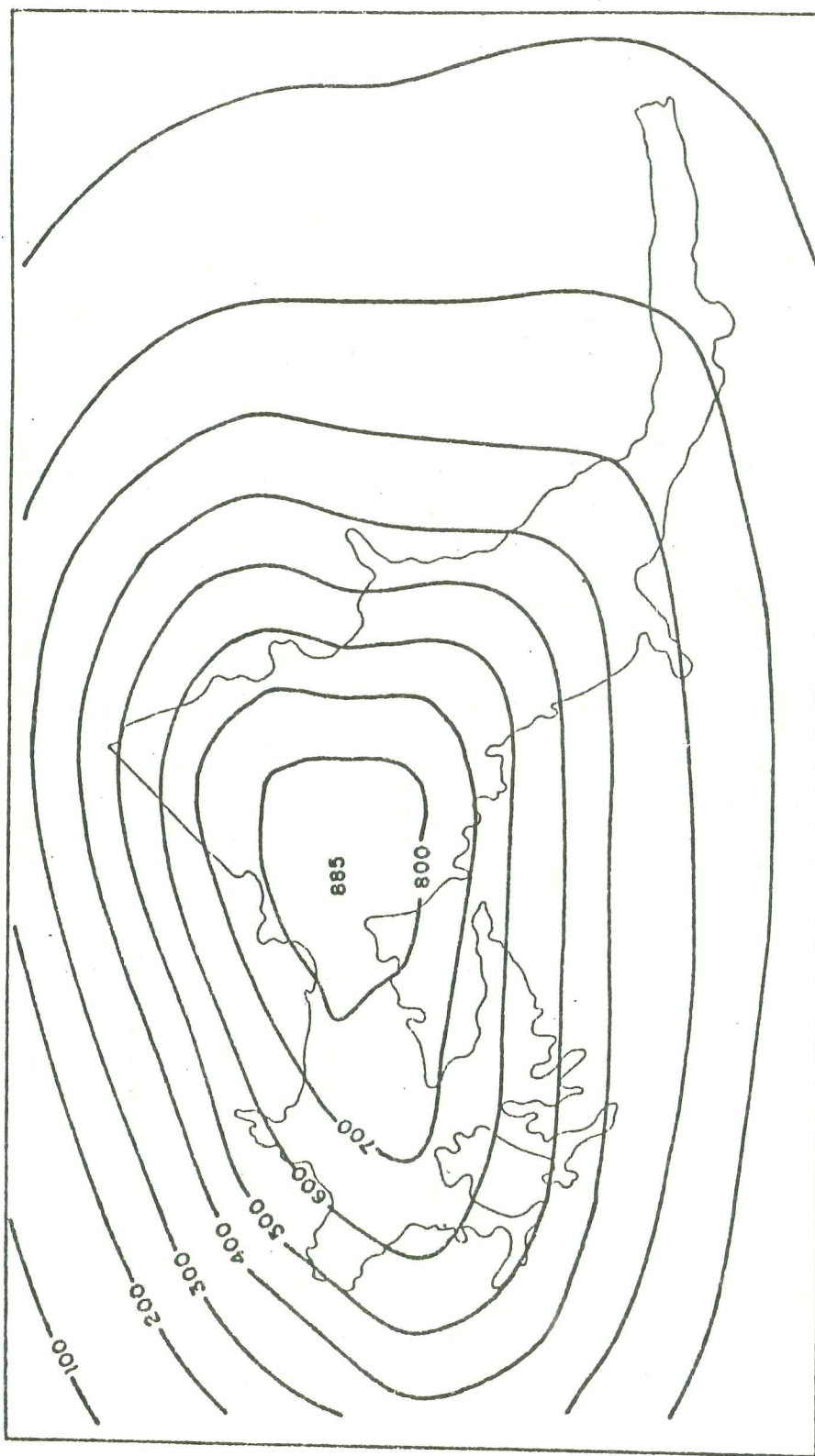


FIG 5.2 ISOTENSION MAXIMA DE CIZALLE A 5 KM (mbars)

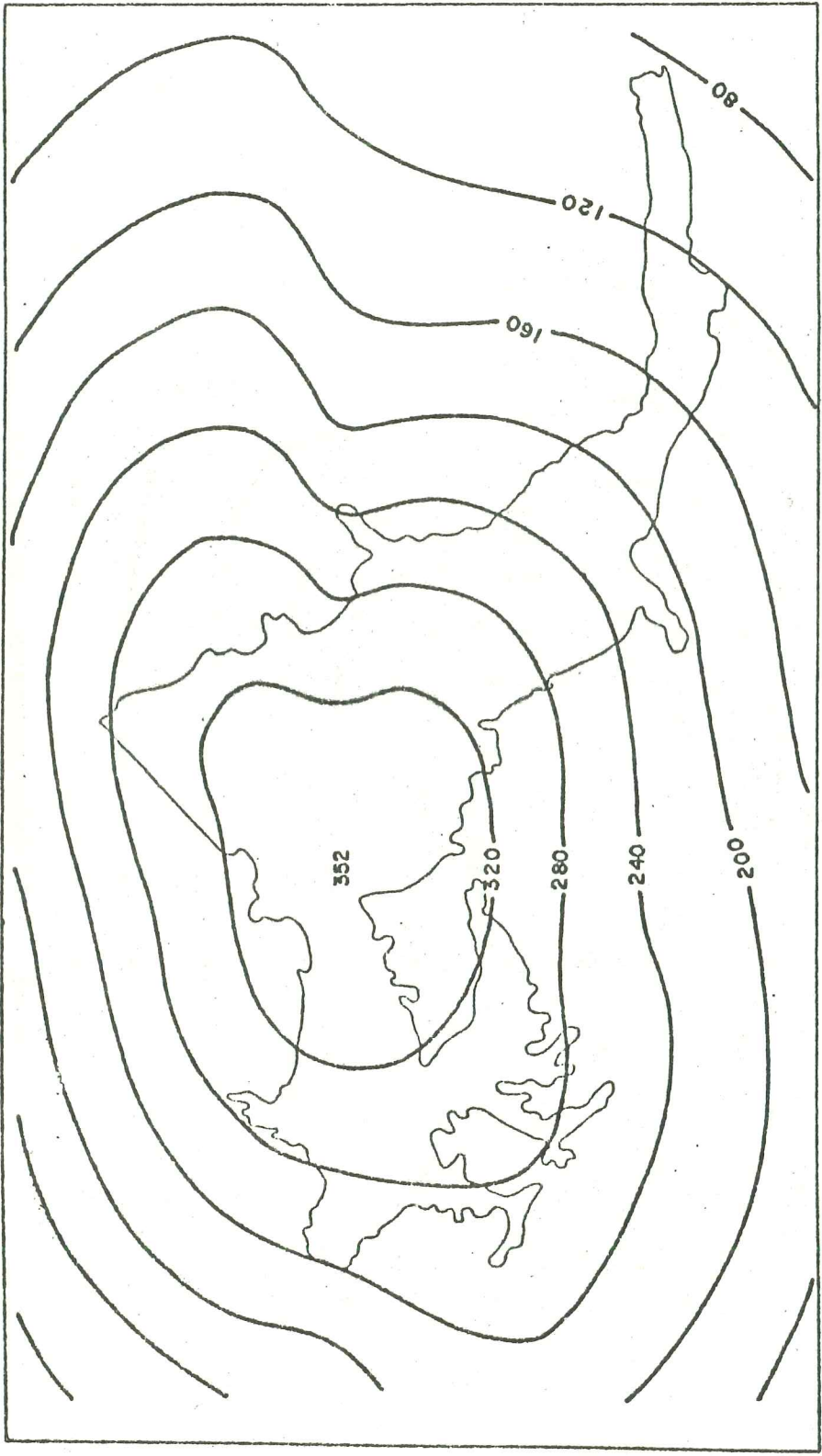


FIG 5.3 ISOTENSION MAXIMA DE CIZALLE A 10 KM (mbars)

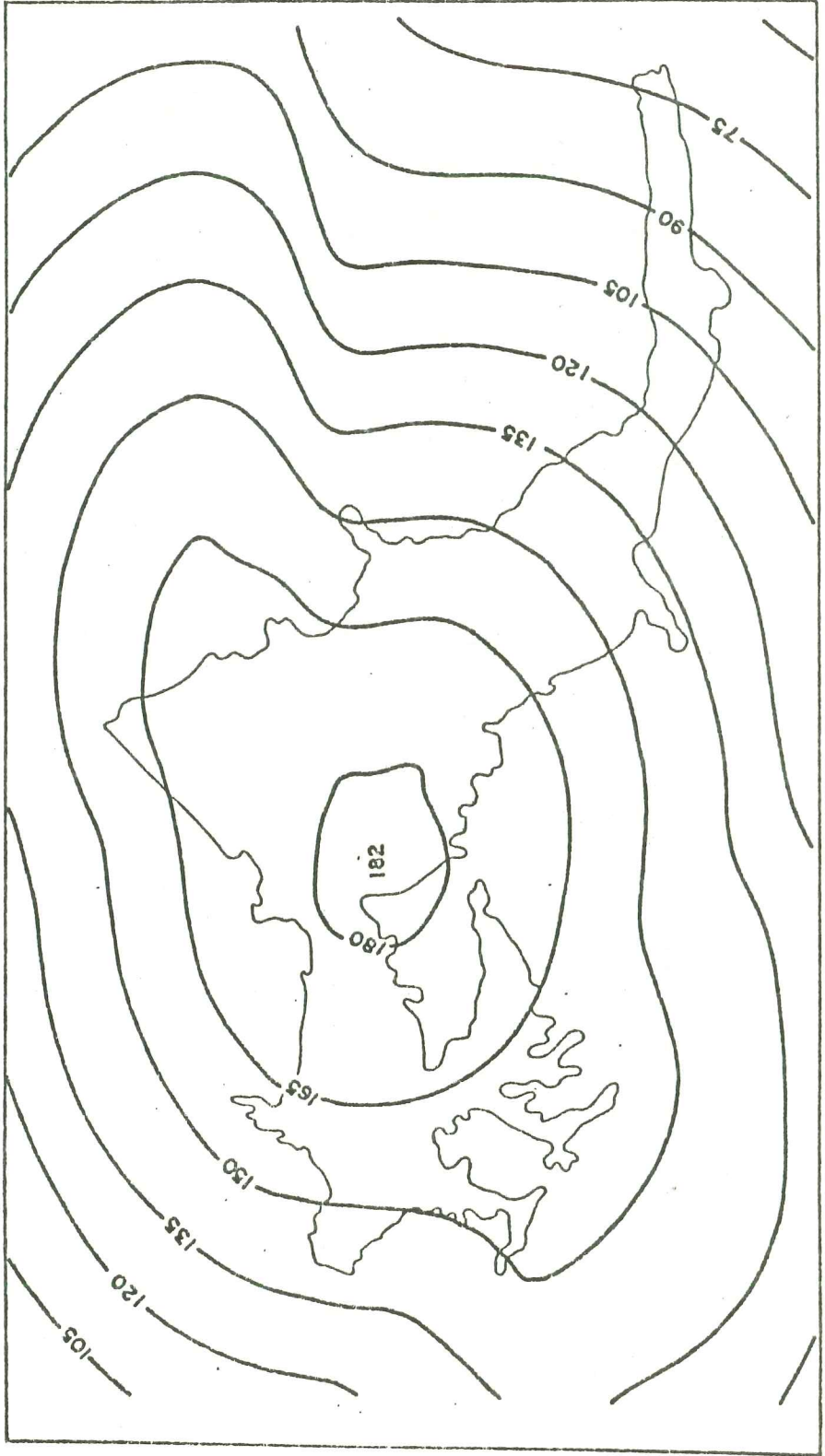


FIG 5.4 ISOTENSION MAXIMA DE CIZALLE A 15 KM (mbars)

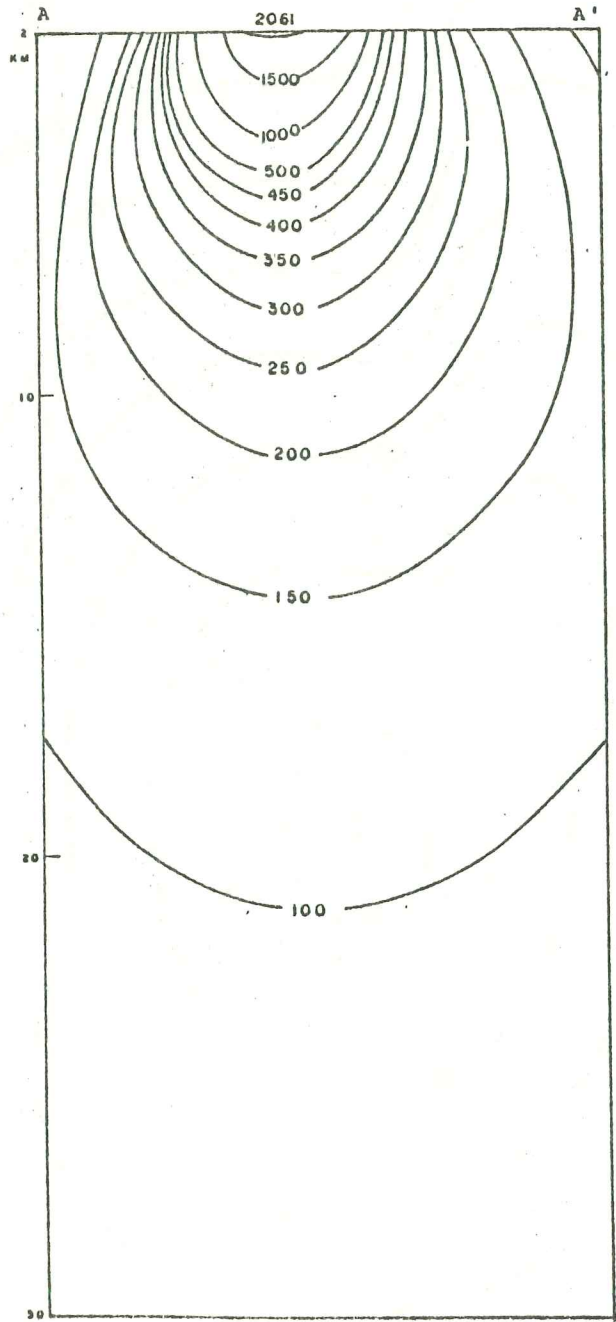


FIG 55 PLNFIL DE ISOTENSION MAXIMA DE CIZALLE N-S (mbars)

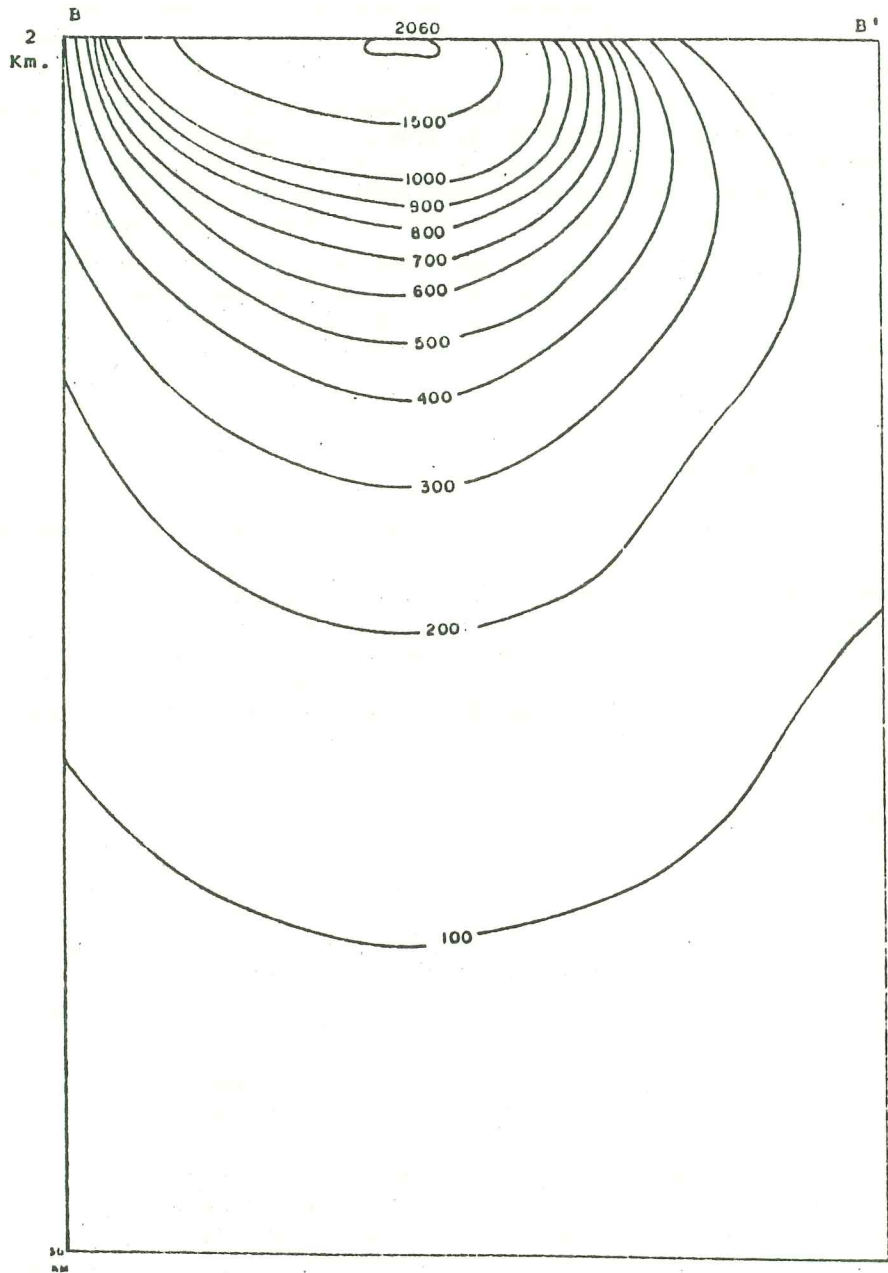


FIG 5.6 PERFIL DE ISOTENSION MAXIMA DE CIZALLE E-W (mbars)

6.3. Deformación vertical

El resultado de la deformación vertical generada por el llenado del embalse aparece en las isóneas de las Figuras 6.1 a 6.6 donde la deformación está expresada en milímetros. Cerca de la superficie este parámetro se ve influido por la forma del lago artificial, no así en profundidad donde las curvas se suavizan rápidamente.

La deformación vertical calculada en este estudio corresponde a energía potencial gravitacional almacenada elásticamente en las rocas. Esta energía de baja densidad por unidad de volumen no debiera por sí sola originar sismos inducidos mayores. Es posible que esté asociada a microtemblores en casos de llenado y vaciado rápido de la presa. En este caso el mecanismo estaría asociado a algún efecto que evite la deformación instantánea elástica del medio y se generen cambios bruscos en las deformaciones de éste.

Cabe considerar, además, que el método diseñado puede usarse para estimar las deformaciones a nivel regional causadas por el embalse. En este caso habría que considerar también el efecto gravitacional debido al movimiento de material de las zonas de empréstito y el efecto del peso de la presa propiamente tal. Estas deformaciones pueden influir en levantamientos topográficos de precisión y en algunas obras civiles delicadas en el contorno a la presa.

6.4. Decaimiento en profundidad

La figura 7 entrega el decaimiento en profundidad de la tensión vertical, tensión máxima de cizalle y deformación vertical.

Estos valores fueron tomados en los puntos de máximo valor a la profundidad de 2 km. Si se pudiera estimar la tensión mínima para "disparar" un sismo inducido; se podría poner una cota máxima a la sismicidad inducida. En todo caso se aprecia un decaimiento importante de las tensiones en profundidad. Debido a que la sismicidad natural es más bien de profundidad intermedia en la zona (Tabla 2), la profundidad de los sismos que se puedan observar dará una idea de si se trata de fenómenos naturales o inducidos.

7. DISCUSION DE LOS RESULTADOS

Antecedentes geológicos de las regiones asociadas con sismicidad inducida por embalses, indican en la generalidad de los casos una historia volcánica, consecuencia de lo cual se observan fuentes termales en los alrededores y presencia de rocas susceptibles de ser alteradas por acción del agua.

Es condición necesaria, además, la existencia de fallas superficiales activas o posibles de activarse subyacentes a la presa.

En el caso de Colbún, la geología está asociada con volcanismo y se tienen a pocos kilómetros del embalse las fuentes termales de Paninávinda y Quinamávinda. Algunas fallas superficiales están mapeadas en Figura 3.

En lo que concierne a la sismicidad de la zona de Colbún, históricamente los sismos no exceden la magnitud $m_B = 6.0$ con profundidades de foco entre los 33 y 100 km (Tabla 2). El embalse se encuentra en una zona de actividad sísmica moderada, lo que indicaría que el alto grado de tensión y deformación regional a que se encuentran sometidas las rocas no es suficiente para generar gran cantidad de sismos y magnitudes altas.

Los valores máximos calculados para Colbún, 4.29 bars para tensión vertical, 2.06 bars para tensión máxima de cizalle y 2.54 cm para deformación vertical, resultan ser comparables con los obtenidos para el caso del embalse Kariba (Gough y Gough, 1970 a, b): tensión vertical 6.68 bars, tensión máxima de cizalle 2.12 bars y deformación vertical 23.5 cm. En ese caso el sismo principal inducido asociado tuvo magnitud $m_B = 5.8$. Cabe notar que la cantidad de agua almacenada en Kariba es de $160 \times 10^9 \text{ cm}^3$ en comparación con $1.49 \times 10^9 \text{ m}^3$ proyectados en Colbún.

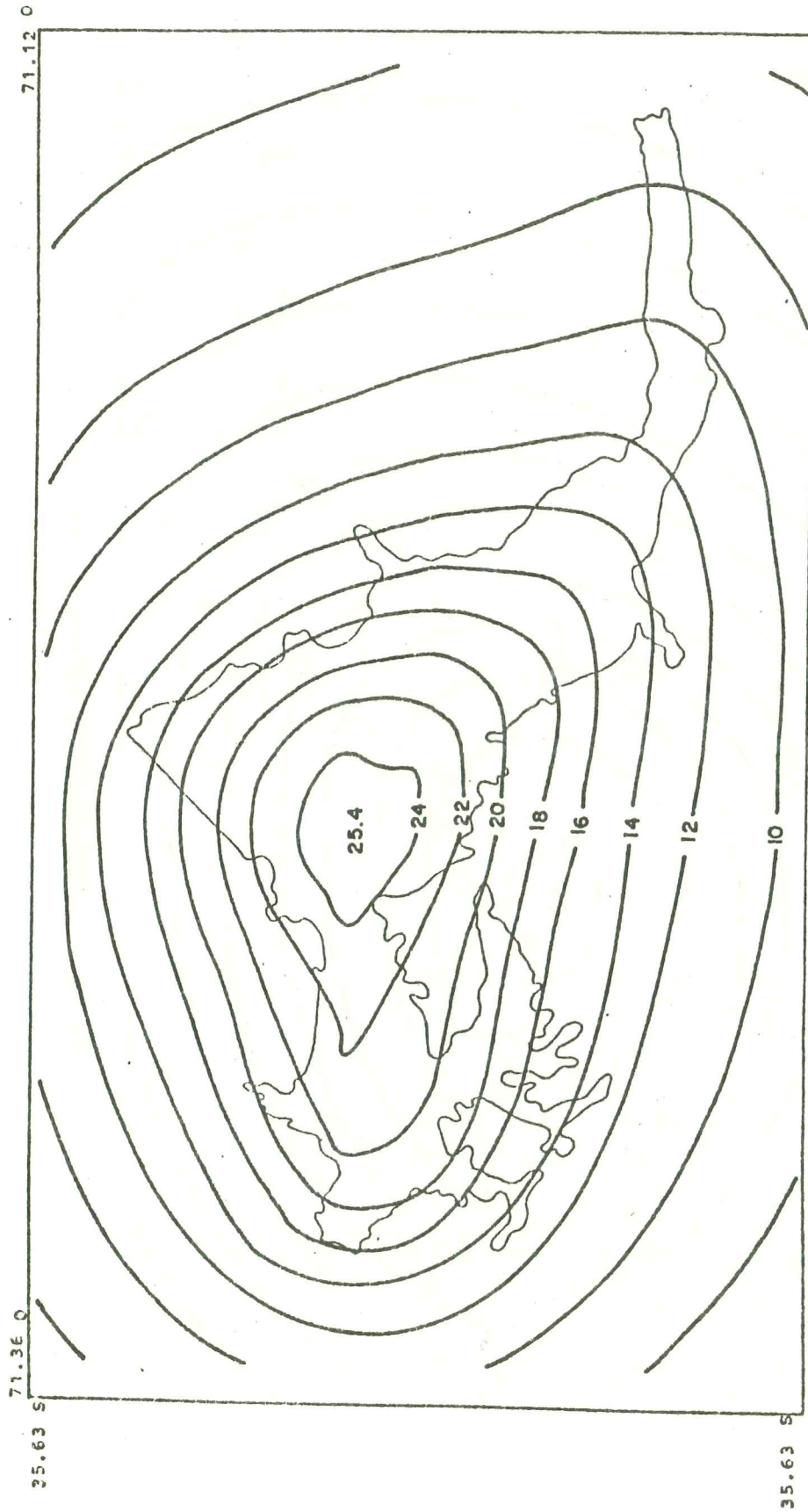


FIG 6.1 ISODEFORMACION VERTICAL A 2 KM (mm)



FIG 6.2 ISODEFORMACION VERTICAL A 5 KM (mm)

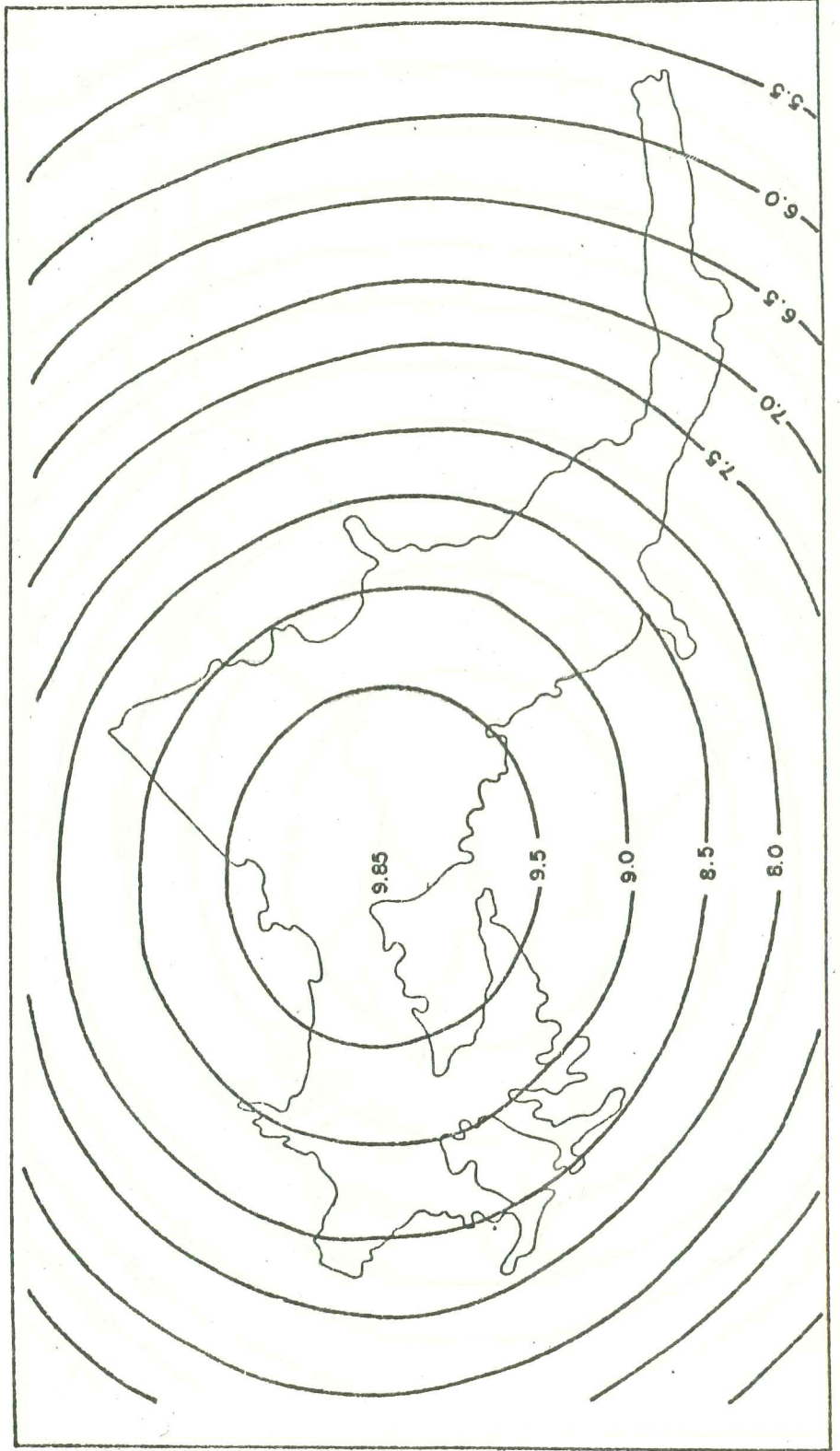


FIG 6.3 ISODEFORMACION VERTICAL A 10 KM (mm)

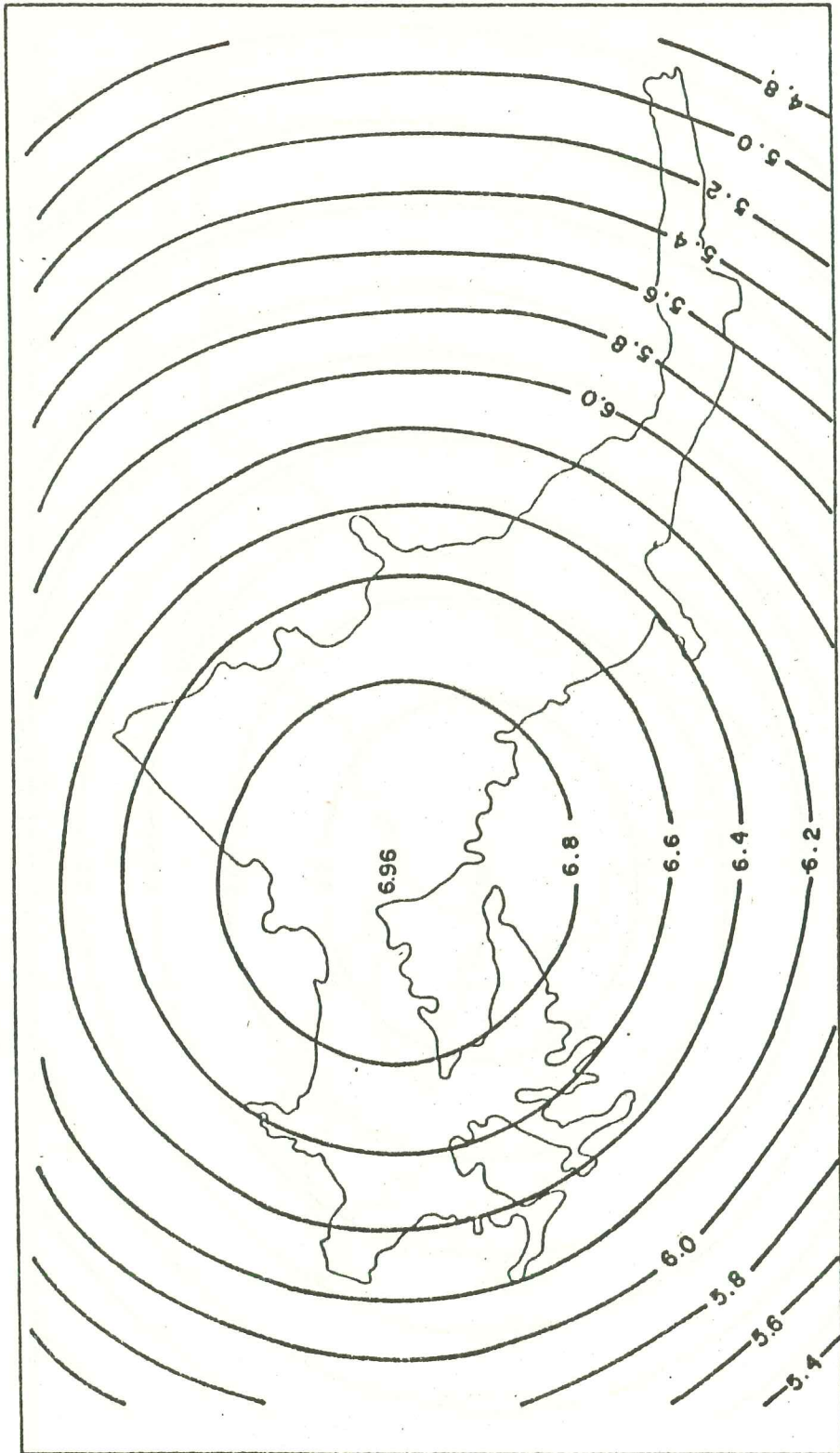


FIG 6.4 ISODEFORMACION VERTICAL A 15 KM (mm)

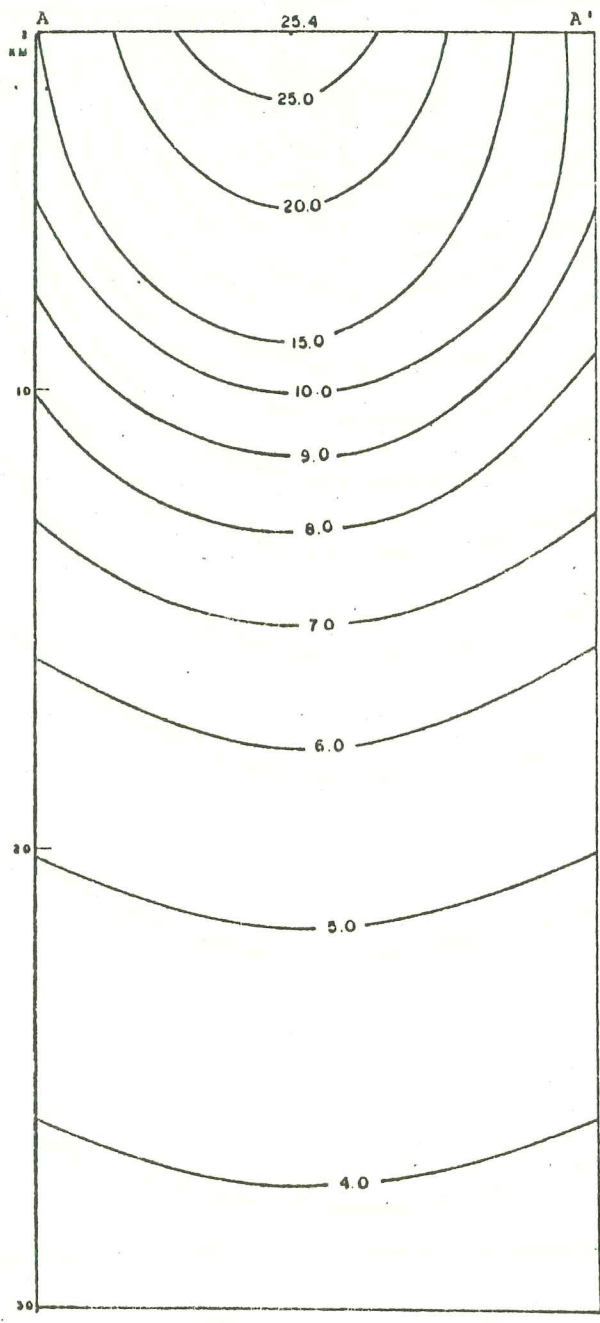


FIG 65 PERFIL DE ISUDEFORMACION VERTICAL N-S (mm)

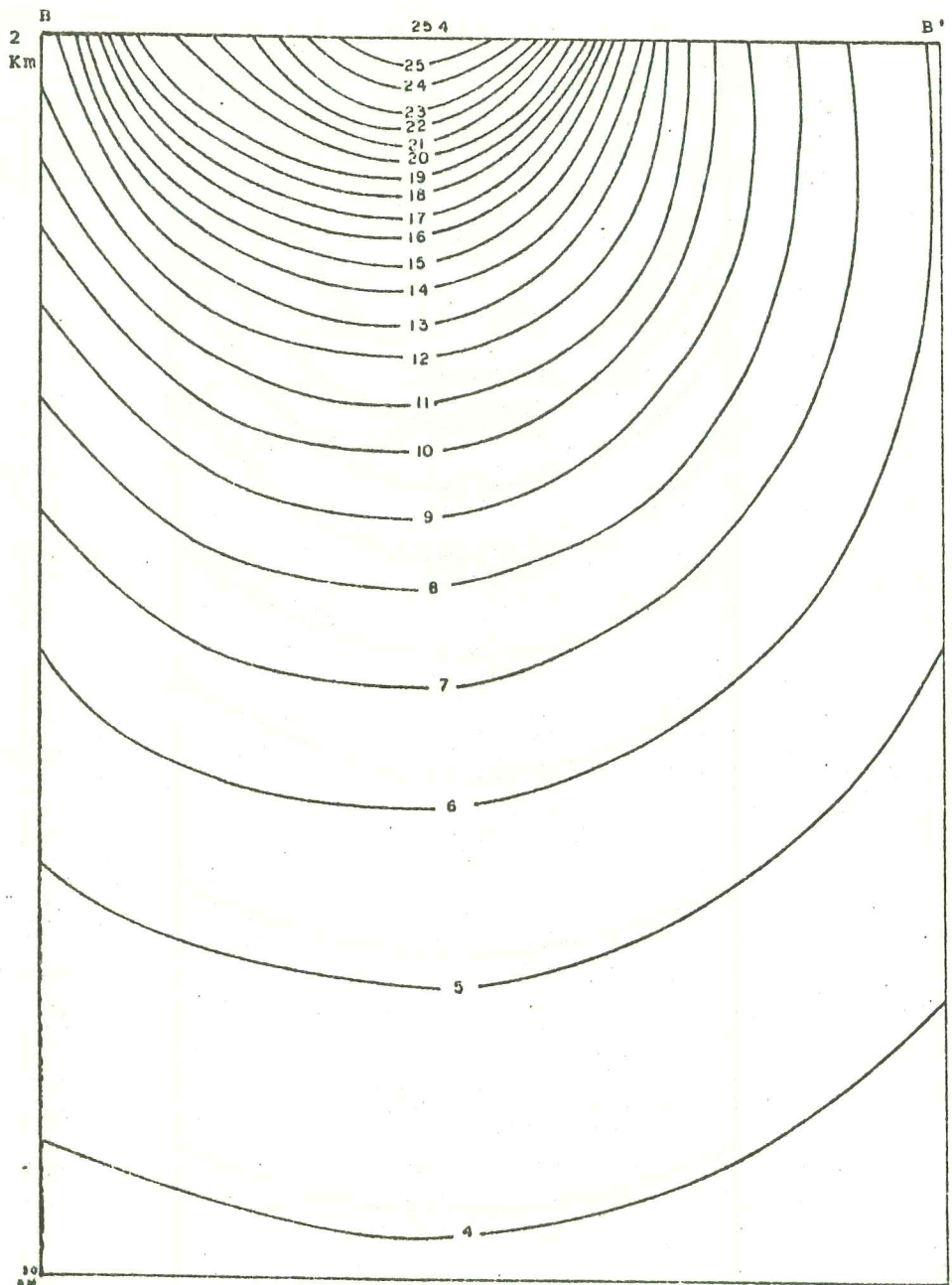


FIG 66 PERFIL DE ISODEFORMACION VERTICAL E-W (mm)

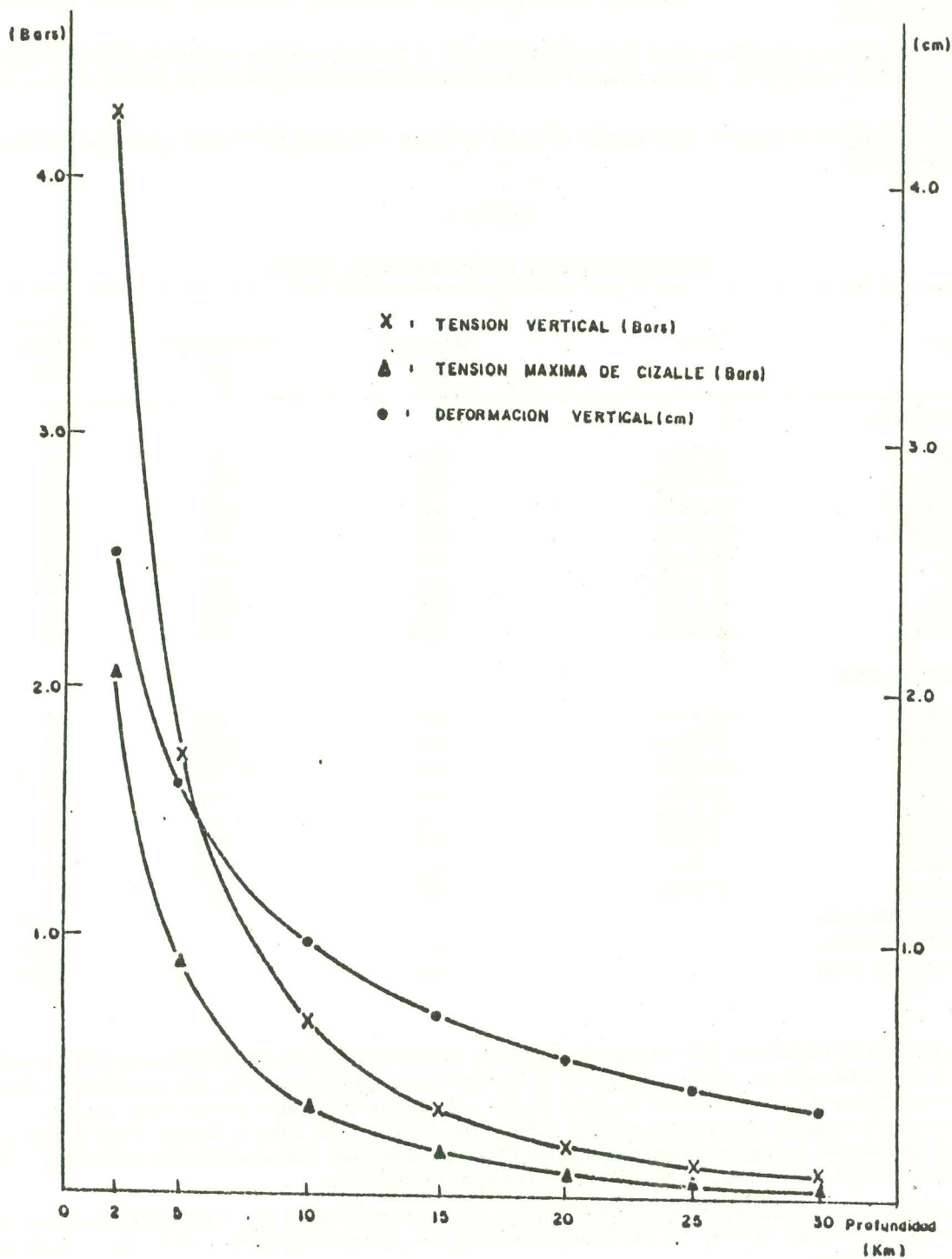


FIG 7 DECAIMIENTO EN PROFUNDIDAD DE TENSION VERTICAL
 TENSION MAXIMA DE CIZALLE Y DEFORMACION VERTICAL

Gough y Gough (1970, b), concluyen también que una tensión de cizalle de 1 ó 2 bars debida a la carga del lago Kariba activó las fracturas y fallas inicialmente sometidas a tensiones preexistentes de varias decenas de bars.

De acuerdo a lo planteado en (6.2), y suponiendo que el grado de tensión regional en Colbún es alto, resulta válido comparar los valores de caída de tensión para diferentes sismos con la tensión máxima de cizalle.

En la Tabla 4 se presenta información referente a sismos con caída de tensión menor que 10 bars, (Pardo, 1978).

TABLA 4
Sismos con caída de tensión menor que 10 bars

Sismo	Fecha	Magnitud m_B	Profundidad Km	Caída de Tensión Bars
Sud América				
Chile	27/7/66	6.1	35	8.0
Argentina	09/12/64	6.2	580	7.0
Argentina	08/12/62	6.6	620	7.0
Argentina	09/9/67	6.1	578	4.0
Perú	28/11/64	5.6	655	3.0
Perú	28/11/64	5.6	626	2.0
Bolivia	20/8/65	6.3	128	2.0
Argentina	20/12/66	5.85	589	2.0
California, USA.				
Parkfield	02/7/66	3.6	6.3	2.0
Parkfield	27/10/66	4.0	10.7	1.5
Imperial	04/3/66	3.6	< 3.0	1.1
Parkfield	19/8/66	3.4	6.6	0.7
Parkfield	02/7/66	3.2	6.7	0.6
Parkfield	24/7/67	3.8	7.0	0.2
Parkfield	12/8/67	4.2	2.0	0.1
Parkfield	29/6/66	4.9	5.1	0.1
Borrego Mountain	—	1.5	—	0.053
Borrego Mountain	—	2.7	—	0.038
Borrego Mountain	—	1.6	—	0.008

Tomando el máximo de 2.06 bars calculado para la tensión máxima de cizalle debida al embalse Colbún y asumiendo que la tensión preexistente en la zona es cercana a la necesaria, pero no suficiente, para provocar sismos o movimientos en las fallas locales, este incremento podría activar sismos dado que es mayor que la caída de tensión para muchos de los eventos dados en la Tabla 4. Debido a que la profundidad de foco de los posibles sismos inducidos debe ser superficial, sólo es válida una correlación con aquellos eventos superficiales con caída de tensión menor que 2.06 bars.

La magnitud máxima de los sismos que cumplen con estos requisitos es $m_B = 4.9$, correspondientes al sismo del 29 de junio de 1966 en Parkfield (California), con profundidad de foco de 5.1 km y caída de tensión de 0.1 bars.

Por lo tanto, es factible suponer la posibilidad de ocurrencia de sismos inducidos por el embalse Colbún de magnitud máxima del orden de $m_B = 5.0$ y una gran cantidad de sismos inducidos de menor magnitud.

8. CONCLUSIONES

Se ha estudiado la sismicidad de la zona, de la futura central de Colbún y la posibilidad de sismicidad inducida en ella.

Se ha analizado en detalle el efecto del peso del embalse en el valor de las tensiones verticales, tensiones máximas de cizalle y deformaciones verticales en su entorno. Los valores de estos parámetros son de 4.25 bars y 2.06 bars para la tensión vertical y tensión máxima de cizalle, respectivamente.

Se calculó una deformación máxima de 2.54 cm en el sector correspondiente a la profundidad máxima del embalse.

Todos los valores calculados disminuyen fuertemente en profundidad, por lo que su efecto debiera asociarse a sismos inducidos superficiales.

Al comparar las características geológicas y de tamaño de esta presa con otras en el mundo, se concluye que podría generar sismicidad inducida al ser llenada.

Se aprecia, además, que si bien las tensiones máximas de cizalle predichas son bajas, existen numerosos sismos superficiales con bajas caídas de tensión.

Se recomienda instrumentar el entorno de la presa a fin de poder estudiar este fenómeno en Chile sobre todo en vista del ambicioso plan de nuevas presas que se piensan construir en el país antes del año 2.000.

Se estima que será importante registrar la actividad sísmica durante la época del llenado de la presa más aún si se considera su localización aguas arriba de importantes ciudades de Chile central.

Referencias

- BARRIENTOS, S. (1980). "Regionalización Sísmica de Chile". Tesis, Magister en Geofísica, U. de Chile.
- GOUGH, D. y GOUGH, W. (1970a). "Stress and Deflection in the Lithosphere near Lake Kariba-I". *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 21, 65-68.
- GOUGH, D. y GOUGH, W. (1979b). "Load-Induced Earthquakes at Lake Kariba-II". *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 21, 79-101.
- GUPTA, H., RASTOGI, B. y NARAIN, H. (1972). "Common Features of the Reservoir-Associated Seismic Activities". *Bull. Seism. Soc. Am.* 62, 481-492.
- LOMNITZ, C. (1974). "Global Tectonics and Earthquake Risk". *Developments in Geotectonics* N° 5.
- OLIVEIRA, C. (1974). "Seismic Risk Analysis". *Earthquakes Eng. Research Center, Report* N° 74-1.
- PARDO, M. (1978). "Estudio de Predicción y Sismicidad Inducida en Zona de Colbún y Panimávida". Tesis, Magister en Geofísica, U. de Chile.
- SIMPSON, W. (1976). "Seismicity Changes Associated with Reservoir Loading". *Eng. Geology* 10.