

**CARACTERISTICAS ESTRUCTURALES DE LA REGION
COMPRENDIDA ENTRE PUNTA BANDA Y PUNTA SANTO TOMAS,
BAJA CALIFORNIA, MEXICO**

**STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF THE REGION BETWEEN
PUNTA BANDA AND PUNTA SANTO TOMAS,
BAJA CALIFORNIA, MEXICO**

Ramón Moldrano Salgado¹
Víctor Wong Ortega²

¹ Secretaría de Marina
Dirección de Oceanografía Naval
Estación de Investigación Oceanográfica de Ensenada
Vicente Guerrero 133 Altos, Fracc. Bahía
22880 Ensenada, Baja California, México

² Centro de Investigación Científica y
de Educación Superior de Ensenada
Apartado Postal 2732
22830 Ensenada, Baja California, México

Ciencias Marinas (1991), Vol. 17, No. 1, pp. 79-97.

RESUMEN

Los perfiles sísmicos de reflexión continua que se tienen de la porción interior del Borde Continental de California, comprendida entre Punta Banda y Punta Santo Tomás, B.C., muestran una serie de cuencas y altos topográficos con orientación similar a los sistemas de fallas emplazados en la región continental. Del análisis de estos perfiles se ha podido determinar la expresión marina de la zona de falla de Bahía Soledad, la que afecta principalmente a los depósitos sedimentarios de la depresión Ensenada. Además, se encontraron evidencias de procesos extensionales, tales como estructuras de flujo inverso (negative flower structure) asociados al trazo principal de la falla San Isidro. Esto último nos hace suponer que el área de estudio está controlada por los procesos tectónicos causados por los sistemas de fallas de rumbo emplazados en la zona y que en términos generales son consistentes con un modelo de fallamiento lateral derecho característico de una región sujeta a esfuerzos tensionales.

ABSTRACT

The continuous reflection seismic profiles that are available of the onshore California continental borderland, between Punta Banda and Punta Santo Tomás, B.C., show a series of basins and topographical heights with a similar direction as the fault systems located in the continental region. From the analysis of these profiles, it has been possible to determine the marine expression of the Bahía Soledad fault zone, which mainly affects the sedimentary deposits of the Ensenada basin. Furthermore, evidence was found of extensional processes, such as negative flower structures associated to the main line of the San Isidro fault. From this, we infer that the study area is controlled by tectonic processes caused by the strike-slip fault systems located in the area and that are generally consistent with a right-lateral fault model characteristic of a region subjected to tensional stress.

INTRODUCCION

Estudios geofísicos recientes llevados a cabo en la porción interior del borde continental del sur de California y norte de Baja California han constatado la actividad tectónica de esta región. Esta última tuvo su inicio durante la era Mesozoica con los movimientos de subducción de la placa Farallón bajo la placa de Norteamérica (Atwater, 1970). Una vez extinta la placa Farallón, se da inicio a los procesos de fallamiento de rumbo, principalmente en sentido lateral derecho, proceso que se lleva a efecto aun en la actualidad. Esto último, impuesto por el régimen tectónico del sistema de falla San Andrés-Golfo de California (Fig. 1).

Los primeros estudios geológicos llevados a cabo en la región peninsular (Allen *et al.*, 1960), sugieren que las principales fallas geológicas podrían tener continuación en la región del borde continental y ser tectónicamente activas. Es por esto que para entender el comportamiento estructural del borde continental, tanto interior como exterior, se hayan realizado recientemente varios estudios geofísicos. Estudios realizados en la península de Punta Banda, principalmente en el sitio de Punta Banda, y en la bahía de Todos Santos (Pou, 1982; Gutiérrez y Suárez, 1988), así como en las islas de Todos Santos (Pou, 1982), han sugerido que esta región ha estado sujeta a esfuerzos tensionales semejantes a los descritos en el trabajo de Wilcox *et al.* (1973). Por otro lado, los mecanismos focales de los epicentros localizados en el sistema de falla San Clemente-San Isidro (Wong, 1985), muestran un lineamiento consistente con el modelo de fallamiento de rumbo en sentido lateral derecho, característico de una región sujeta a esfuerzos tensionales.

OBJETIVO

El propósito de este estudio es identificar las principales estructuras geológicas del área próxima a Punta Santo Tomás, B.C., y su relación con los sistemas de falla Agua Blanca-Santo Tomás y San Clemente-San Isidro.

AREA DE ESTUDIO

El área de estudio está ubicada en la porción interior del Borde Continental de Baja California, limitada al norte por la península

INTRODUCTION

Recent geophysical studies of the onshore continental borderland of southern California and northern Baja California have verified this region's tectonic activity. This activity began during the Mesozoic era with the subduction movements of the Farallón plate beneath the plate of North America (Atwater, 1970). Once the Farallón plate was subducted, right-lateral strike-slip faulting began. This process is still proceeding, due to the tectonic regime of the San Andreas-Gulf of California fault system (Fig. 1).

The first geological studies conducted in the peninsular region (Allen *et al.*, 1960), suggest that the main geological faults could continue into the region of the continental borderland and be tectonically active. Hence, in order to understand the structural behaviour of the onshore as well as offshore continental borderland, several geophysical studies have recently been carried out. Studies conducted in the peninsula of Punta Banda, mainly at Punta Banda, and in Todos Santos Bay (Pou, 1982; Gutiérrez and Suárez, 1988), as well as on Todos Santos Islands (Pou, 1982), have suggested that this region has been subjected to similar tensional stresses as those described by Wilcox *et al.* (1973). On the other hand, the focal mechanisms of the epicentres located along the San Clemente-San Isidro fault system (Wong, 1985), indicate an alignment consistent with the right-lateral strike-slip fault model, characteristic of a region subjected to tensional stress.

OBJECTIVE

The purpose of this study is to identify the main geological structures of the area close to Punta Santo Tomás, B.C., and its relation with the Agua Blanca-Santo Tomás and San Clemente-San Isidro fault systems.

STUDY AREA

The study area is located in the onshore continental borderland of Baja California, between Punta Banda to the north (31°45') and Punta China to the south (south of Ensenada 31°10'). The eastern limit is the coast line and the western limit is determined by the San Clemente-San Isidro fault system (Fig. 2).

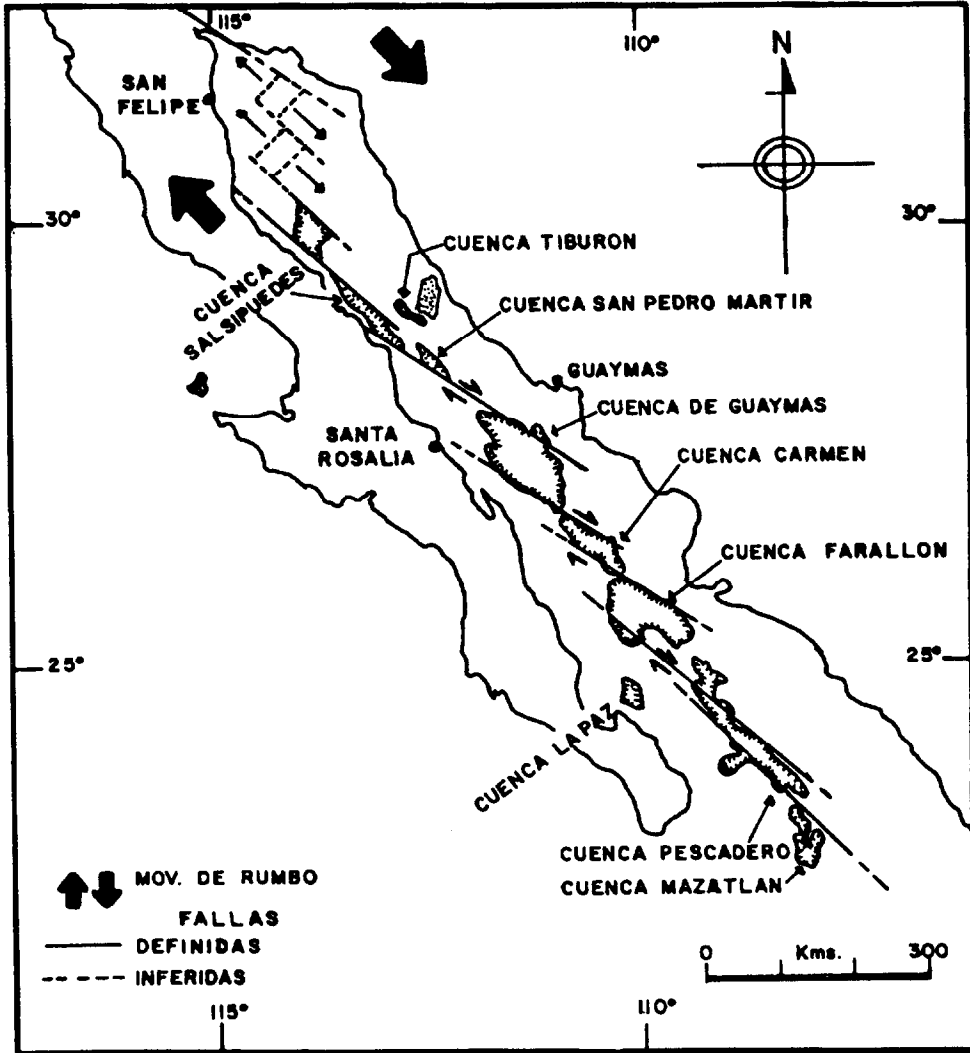


Figura 1. Tectónica de la Baja California (Suárez *et al.*, 1989).
Figure 1. Tectonics of Baja California (Suárez *et al.*, 1989).

de Punta Banda ($31^{\circ}45'$), al sur por Punta China (sur de Ensenada, $31^{\circ}10'$). El límite oriental lo constituye la línea de costa y el límite occidental lo determina el sistema de falla San Clemente-San Isidro (Fig. 2).

METODO

Los perfiles sísmicos de reflexión continua que se analizaron se obtuvieron del estudio geofísico realizado en el verano de

METHOD

The continuous reflection seismic profiles analysed during this work were obtained from a geophysical study carried out in summer 1979 in the California continental borderland (Fig. 3). The technique used to obtain the seismic profiles in the sea is described by Wong (1980).

In this study, the most important geological aspects are described and only a

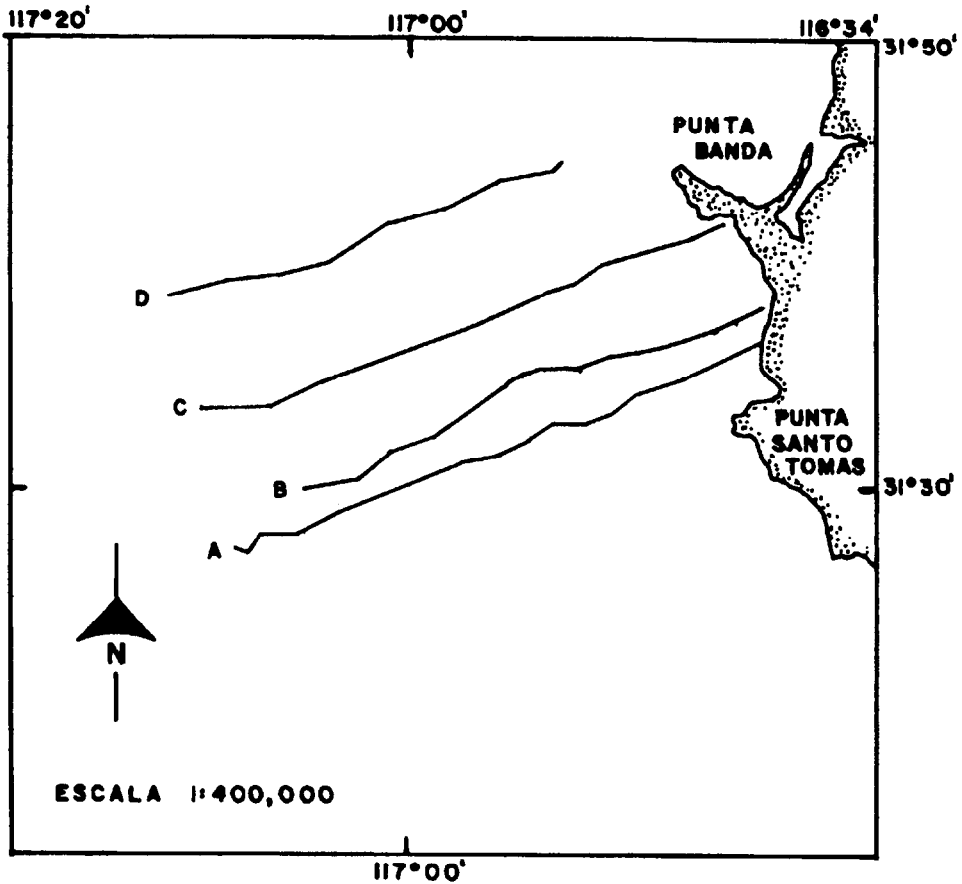


Figura 2. Transectos del área de estudio.
Figure 2. Transects of the study area.

1979 en el Borde Continental de California (Fig. 3). La técnica utilizada para la obtención de los perfiles sísmicos en el mar, está descrita en el trabajo de Wong (1980).

En este trabajo se describen los aspectos geológicos más importantes y tan solo se presenta una descripción cualitativa de las características estructurales y geológicas de la región. La información batimétrica del área de estudio (Fig. 4), se tomó del trabajo de Krause (1965).

Las pendientes, altos topográficos, así como cualquier otro rasgo geomorfológico que se registra en un perfil sísmico, presentan una exageración vertical debido a la diferencia entre las escalas de registro. El eje horizontal representa la distancia cubierta en un intervalo de tiempo y depende de la velocidad del

qualitative description of the structural and geological characteristics of the region is presented. The bathymetric information on the study area (Fig. 4) was taken from Krause (1965).

Slopes, topographical heights, as well as any other geomorphological feature recorded in a seismic profile, present vertical exaggeration due to differences in the recording scales. The horizontal axis represents the distance travelled in a time interval and depends on the speed of the ship and the characteristics of the plotter used during the seismic recording. The vertical axis represents the time that an acoustic wave takes to travel from the seismic source to the hydrophone, passing through the bottom and subbottom reflectors (Geyer, 1983).

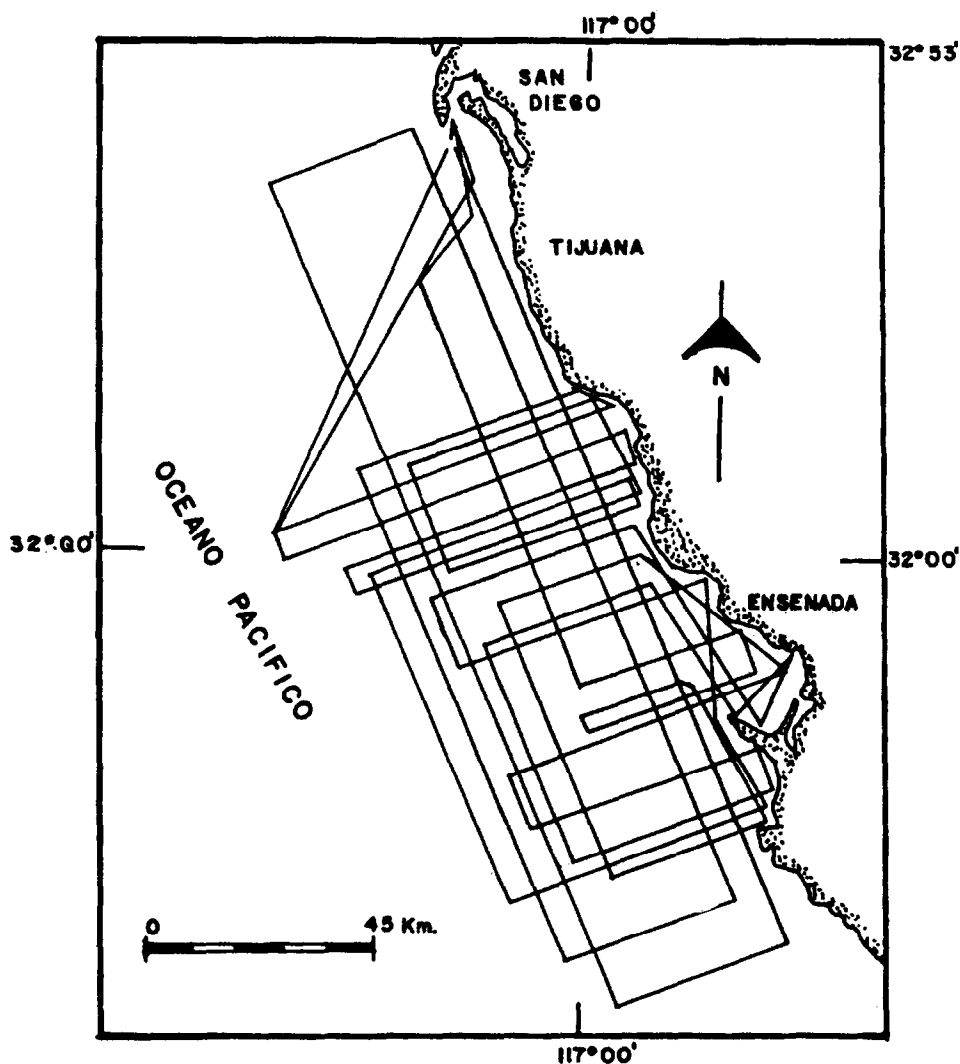


Figura 3. Transecto del crucero oceanográfico de 1979. (Tomado de Wong, 1980.)
Figure 3. Transect of the 1979 oceanographic cruise. (Taken from Wong, 1980.)

barco y las características del graficador empleado durante el registro sísmico. El eje vertical representa el tiempo que tarda una onda acústica en viajar de la fuente sísmica al hidrófono, pasando a través de los reflectores del fondo y subfondo (Geyer, 1983).

La exageración vertical (2x, 3x, ..., etc.), es en algunas ocasiones de hasta veinte veces la escala horizontal (Dobrin, 1976). Es por este motivo que el trazo de una falla y su desplazamiento aparente no debe considerarse

The vertical exaggeration (2x, 3x, ..., etc.) is sometimes up to twenty times that of the horizontal scale (Dobrin, 1976). It is for this reason that a fault line and its apparent displacement should not be considered the actual fault plane but rather the place where the structure is affected by it, since the presence of a fault is indicated by the rupture that it causes in the sediments and by the marked lithological changes that it generates.

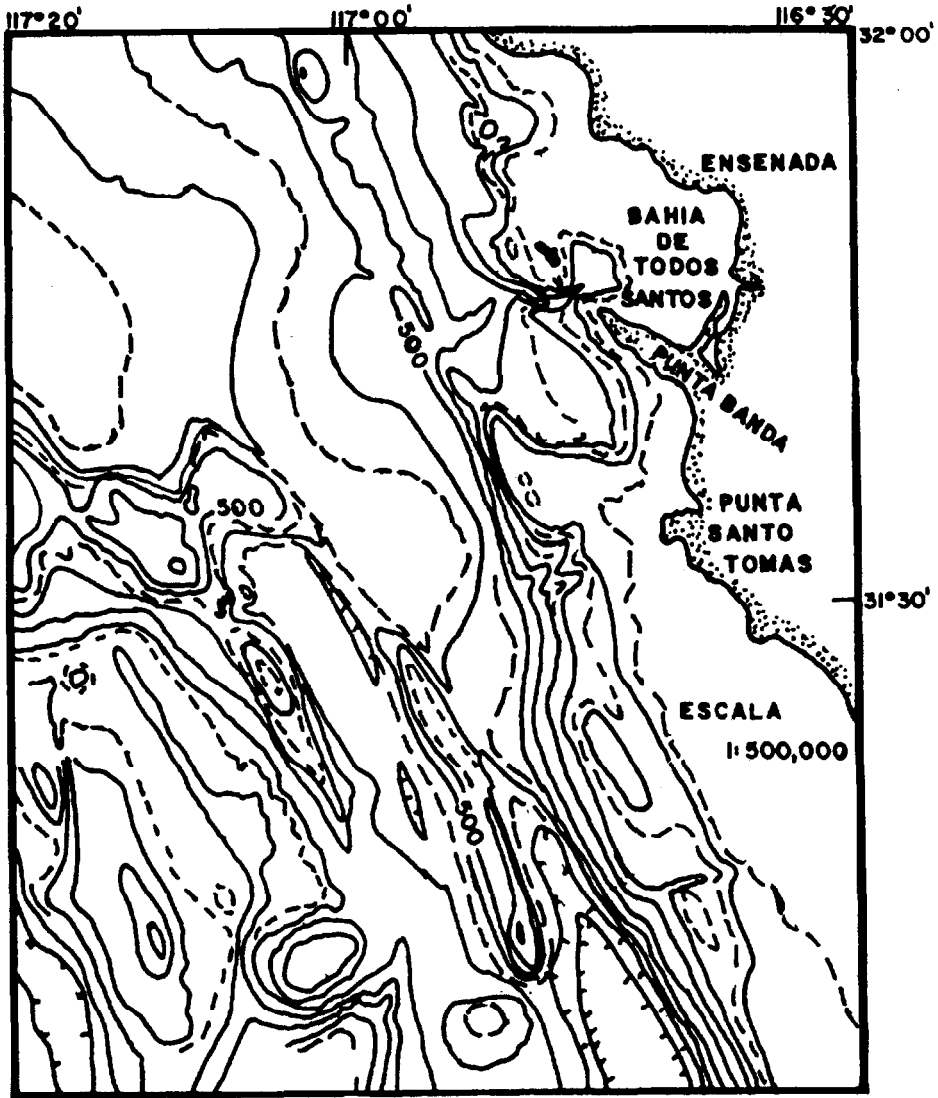


Figura 4. Batimetría del área (intervalo de contorno 100 brazas). (Tomado de Krause, 1965.)
Figure 4. Bathymetry of the area (range of contour 100 fathoms). (Taken from Krause, 1965.)

como el actual plano de falla, sino más bien, el lugar donde la estructura es afectada por ésta, ya que la presencia de una falla está señalada por la ruptura que causa en los sedimentos y por los marcados cambios litológicos que genera.

ANÁLISIS DE LOS DATOS

En los perfiles cercanos a la costa se observa una región de aguas poco profundas

ANALYSIS OF THE DATA

A region of shallow waters has been observed in nearshore profiles (Figs. 5-7), and in this study it has been defined as the Santo Tomás platform. The Bahía Soledad fault line can clearly be seen in this region (Figs. 5-7). Unfortunately, sufficient information on this area that would allow a precise description of the direction of the displacement of the fault

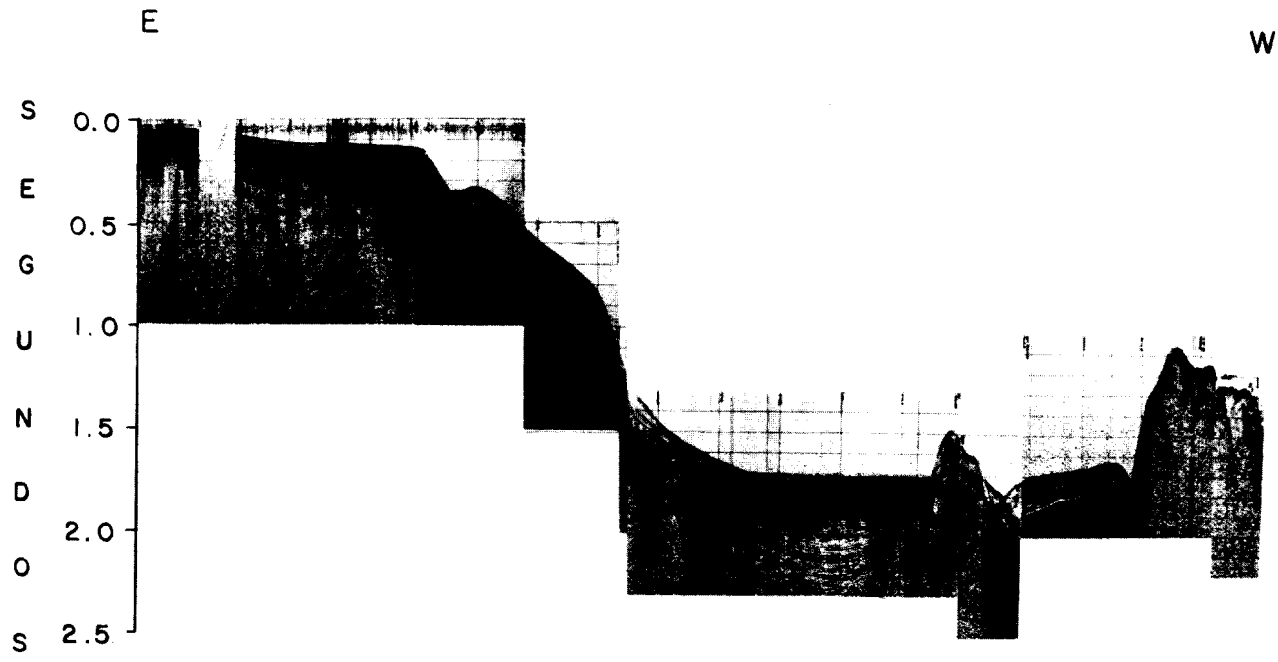
(Figs. 5-7), y se ha definido en este trabajo como plataforma Santo Tomás. En esta región se observa con claridad el trazo de la falla Bahía Soledad (Figs. 5-7). Desafortunadamente, no se tiene suficiente información en esta zona para describir con precisión la dirección de desplazamiento de la falla. Sin embargo, Wong (1980) ha reportado un desplazamiento lateral derecho para el trazo sur de la falla Agua Blanca, observación que se basa en la modificación de los contornos batimétricos de la zona, y estimó un movimiento lateral derecho del cañón submarino de Punta Banda del orden de los 4 km. Asimismo, ha sugerido que la región que contiene a Punta Banda y a las islas de Todos Santos se comporta estructuralmente como un elevado horst, cuyos flancos están controlados por los trazos de la falla Agua Blanca. En la Figura 6, en la zona próxima a la costa, se observa el cañón submarino de Bahía Soledad, así como la cuenca de Bahía Soledad, la cual muestra en sus estratos más profundos algunos plegamientos. Las capas más superficiales no presentan esta deformación (Fig. 8).

La frontera estructural de la plataforma Santo Tomás la determina el escarpe de la cordillera Soledad, el cual se supone es producto de la componente vertical de movimiento de rumbo de la falla Bahía Soledad. En la parte central del área de estudio se ha identificado una estructura del tipo graben, la que se ha llamado depresión Ensenada (Figs. 5, 6, 7, 8). El posible origen de esta estructura puede ser el resultado de la acción del campo de esfuerzos tensionales en dirección este-oeste. Los depósitos sedimentarios de la depresión Ensenada muestran evidencias de ser afectados por el trazo principal de la falla San Isidro. Esta deformación es caracterizada por estructuras que están asociadas a zonas de fallamiento divergente. Tales estructuras se conocen como estructuras de flujo inverso (negative flower structure). Harding *et al.* (1983) las definen como estructuras someras de forma sinclinal y son generadas por el desplazamiento hacia abajo de una falla de rumbo que tiene predominantemente separación normal (Figs. 7, 8). Aunado a las estructuras que muestran movimiento extensional, en algunas otras zonas se observa movimiento convergente; esto último es asociado principalmente a la componente compresiva del movimiento horizontal de la misma falla. Otra característica importante es la

is unavailable. However, based on the modification of the bathymetric contours of the area, Wong (1980) reported a right-lateral displacement for the southern line of Agua Blanca fault and estimated a right-lateral movement of the Punta Banda submarine canyon of the order of 4 km. Furthermore, this author suggested that the region containing Punta Banda and Todos Santos Islands structurally behaves as a horst, whose sides are bounded by the lines of the Agua Blanca fault. The submarine canyon of Bahía Soledad as well as the basin of Bahía Soledad, which shows some folds in its deepest strata, can be seen in the nearshore area in Figure 6. The most superficial layers do not present this deformation (Fig. 8).

The structural border of the Santo Tomás platform is defined by the escarpment of the Soledad Cordillera, which is assumed to be a result of the vertical component of the strike-slip movement of Bahía Soledad fault. A graben structure has been identified in the central part of the study area. This has been called Ensenada basin (Figs. 5, 6, 7, 8). The origin of this structure may be the result of the action of the tensional stress field in an east-west direction. The sedimentary deposits of the Ensenada basin show evidence of being affected by the main line of the San Isidro fault. This deformation is characterized by structures that are associated to divergent fault areas. These structures are known as negative flower structures. Harding *et al.* (1983) define them as synclinal shallow structures and they are generated by downward displacements of a strike-slip fault that mostly has a normal separation (Figs. 7, 8). As well as the structures that show extensional movement, in some other areas convergent movement is observed. This is mainly associated to the compressive component of the horizontal movement of the same fault. Another important characteristic is the vertical component of the San Isidro fault system, which controls the shape of the escarpment that limits the oceanic mountain range on the western side (Figs. 6, 7, 8).

With all the previous information, a structural map of the region was elaborated. In it, structures that are characteristic of extensional processes are observed (Fig. 9), mainly caused by the strike-slip fault systems that cross this region, producing alternate areas of extension and compression (Fig. 10).



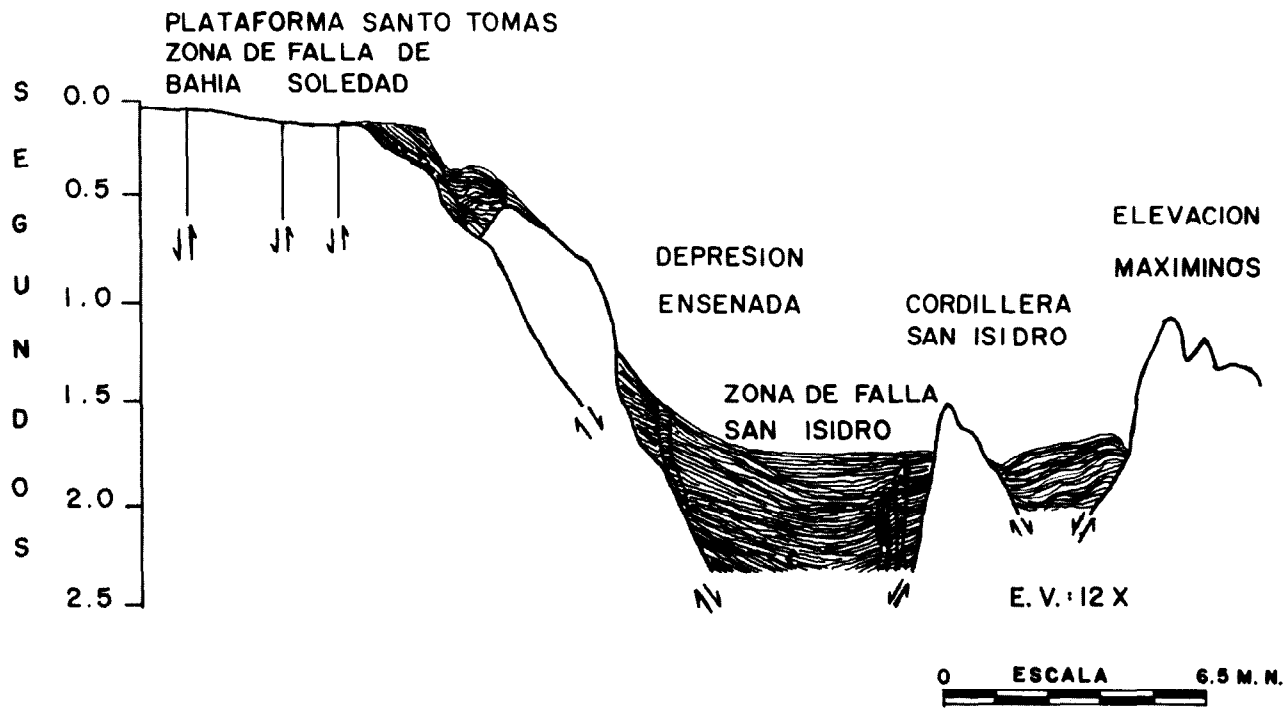


Figura 5. Línea A.
Figure 5. Line A.

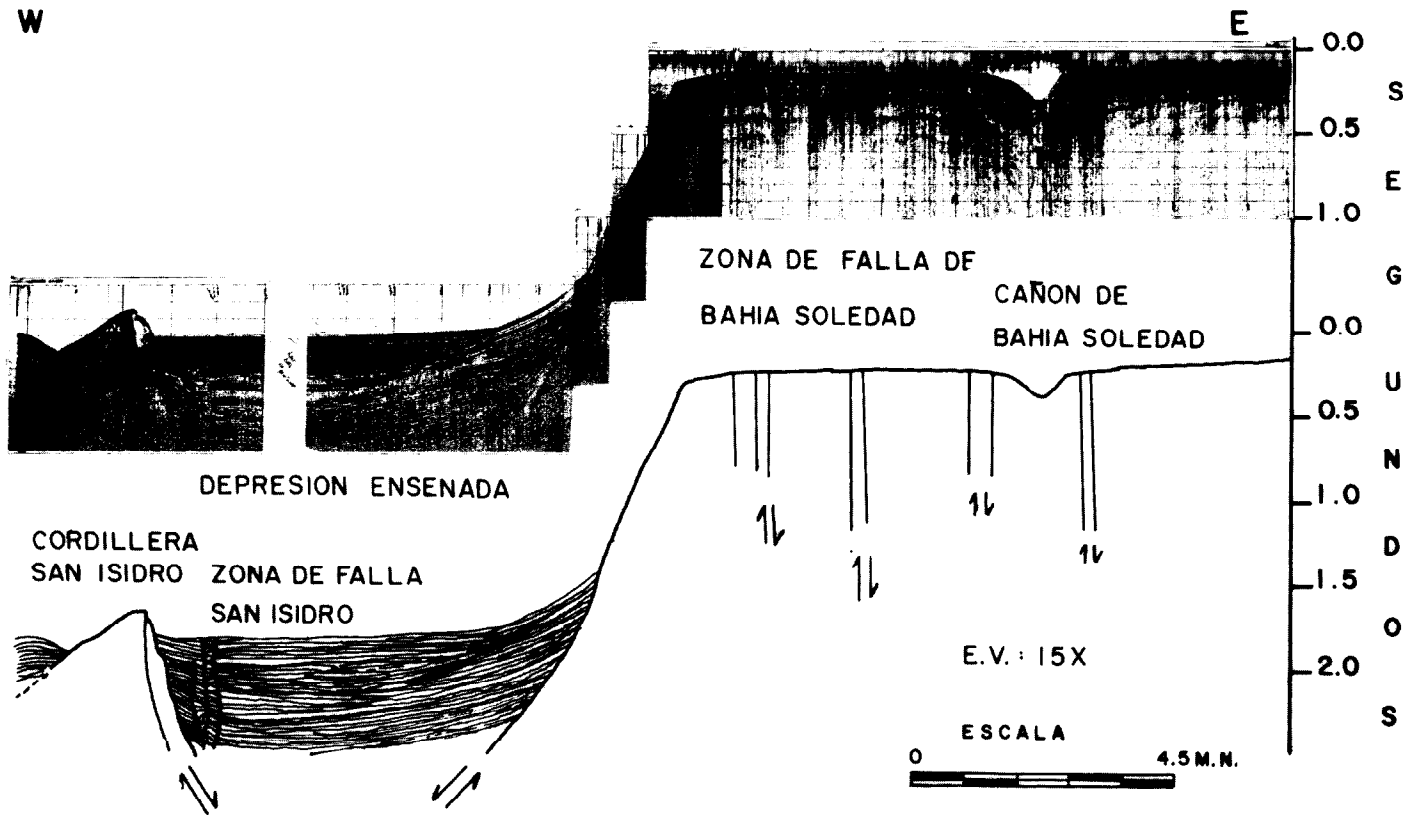


Figura 6. Línea B.
Figure 6. Line B.

componente vertical del sistema de falla San Isidro, la cual controla la forma del escarpe que limita a la cordillera oceánica por el lado oeste (Figs. 6, 7, 8).

Con toda la información anterior, se elaboró un mapa estructural de la región. En éste se observan estructuras que son características de procesos extensionales (Fig. 9), causadas principalmente por los sistemas de falla de rumbo que atraviesan esta región, produciendo zonas alternadas de dilatación y de compresión (Fig. 10). Esto último se debe posiblemente a los cambios en la dirección o alineamiento de estos sistemas de falla (Reading, 1980). Otro aspecto importante que se observa es que, aun cuando el movimiento es predominantemente horizontal, en algunos sectores de la traza de la falla el movimiento a escala local puede ser de deslizamiento vertical, como lo muestran los escarpes que limitan la depresión Ensenada.

DISCUSION Y CONCLUSION

El análisis de los perfiles sísmicos nos ha permitido encontrar que la región está sujeta a un fallamiento de rumbo de tipo extensional evidenciado principalmente por el graben que da forma a la depresión Ensenada, donde se observa que el campo de esfuerzos es tensional en dirección este-oeste. Otra característica del fallamiento de rumbo extensional o divergente, lo constituye la presencia de estructuras de flujo inverso, las cuales de acuerdo a Harding *et al.* (1983), se definen como estructuras someras de forma sinclinal. Estas son generadas por un desplazamiento hacia abajo en una falla de rumbo, teniendo predominantemente una separación normal. Este tipo de estructuras fueron observadas en la depresión Ensenada, asociadas únicamente al trazo principal de la falla San Isidro. Aunado a las estructuras que denotan un movimiento extensional, en algunos casos se observa un movimiento convergente, asociado fundamentalmente al trazo principal de la falla San Isidro. Esto último es evidenciado por el plegamiento de los estratos que originalmente fueron depositados de manera horizontal. Tal situación puede ocurrir de manera local en este tipo de fallamiento, donde algunos estratos presentan una oposición a la convergencia durante el deslizamiento horizontal.

Otra característica importante encontrada en el área de estudio es la componente

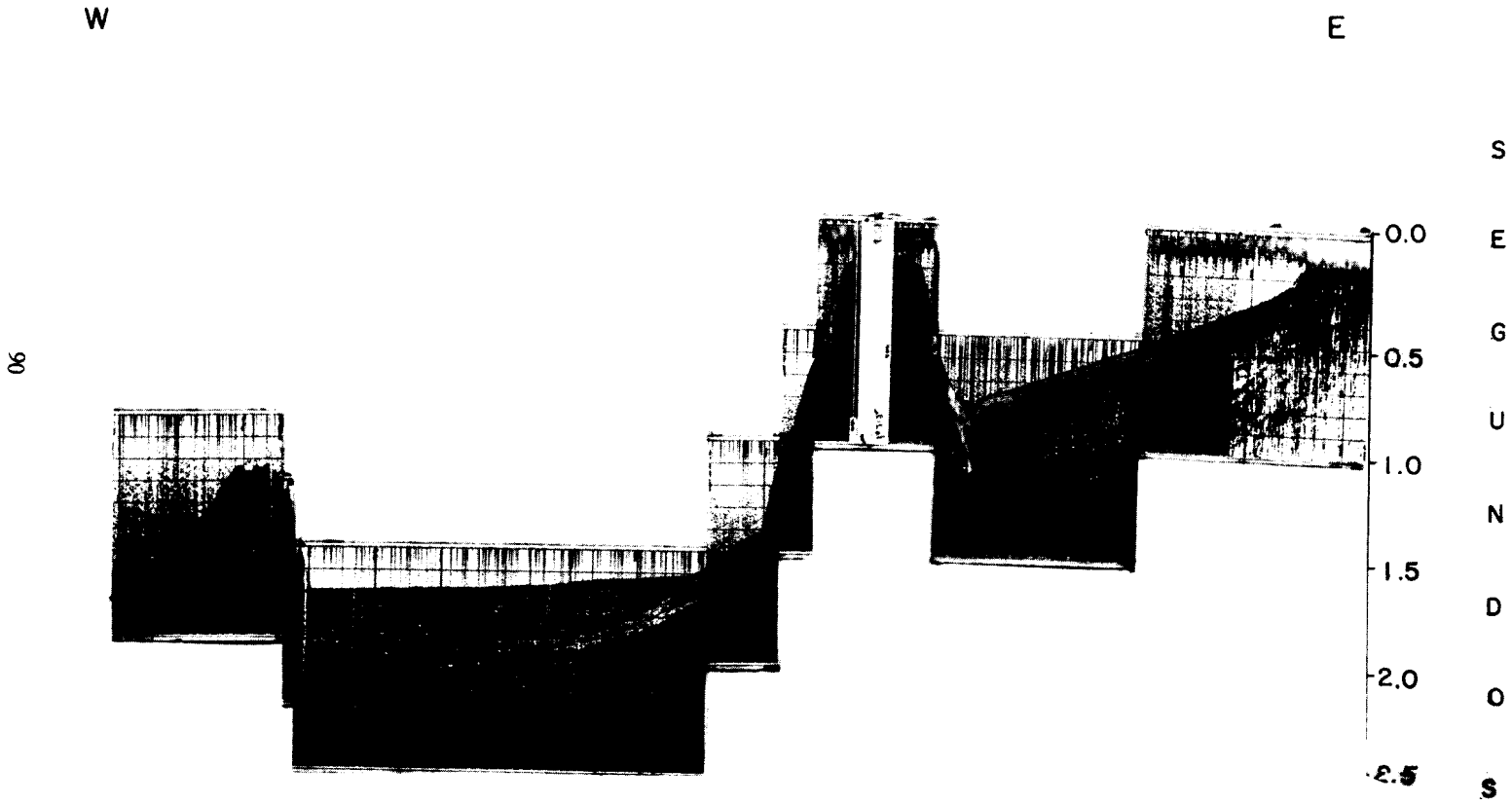
This is probably due to the changes in direction or alignment of these fault systems (Reading, 1980). Another important aspect that is observed is that, even when the movement is primarily horizontal, in some sectors of the fault trace the movement, on a local scale, can be of vertical slipping, as shown by the escarpments that limit the Ensenada basin.

DISCUSSION AND CONCLUSION

The analysis of the seismic profiles has allowed us to know that the region is subject to extensional strike-slip faulting, mainly made evident by the graben which gives shape to the Ensenada basin, where it is observed that the stress field is tensional in an east-west direction. Another characteristic of extensional or divergent strike-slip faulting is the presence of negative flower structures. According to Harding *et al.* (1983), they are defined as synclinal shallow structures. These are generated by a downward displacement in a strike-slip fault, mainly having a normal separation. These types of structures were observed in the Ensenada basin, associated only to the main line of the San Isidro fault. As well as the structures that denote an extensional movement, in some cases a convergent movement is observed, fundamentally associated to the main line of the San Isidro fault. This is made evident by the folding of the strata that were originally deposited in a horizontal way. This situation can occur in a local way in this type of fault, where some strata present an opposition to the convergence during the horizontal displacement.

Another important characteristic found in the study area is the vertical component of displacement of the San Isidro fault system. This is shown by the escarpment that limits the San Isidro Cordillera on the eastern side, as well as by the recent activity in this area, made evident by the perturbations observed in the sedimentary deposits of the Ensenada basin, and by the seismic activity reported (Wong, 1985).

In conclusion, the tectonic activity of this fault zone is made evident on observing the perturbations in the recent deposits of the Ensenada basin (Fig. 9). Another indication of this activity (Fig. 11), is the alignment of the seismicity with the San Clemente-San Isidro and the Agua Blanca-Santo Tomás systems.



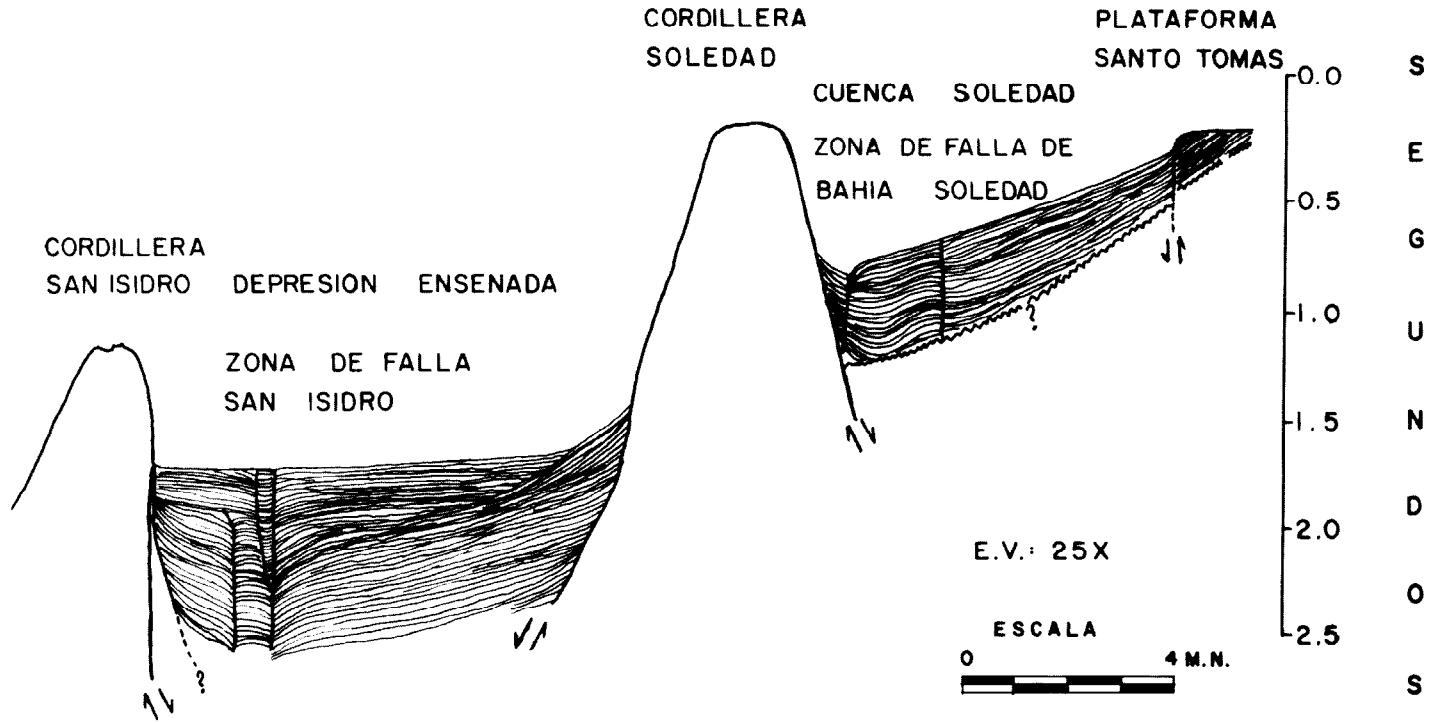
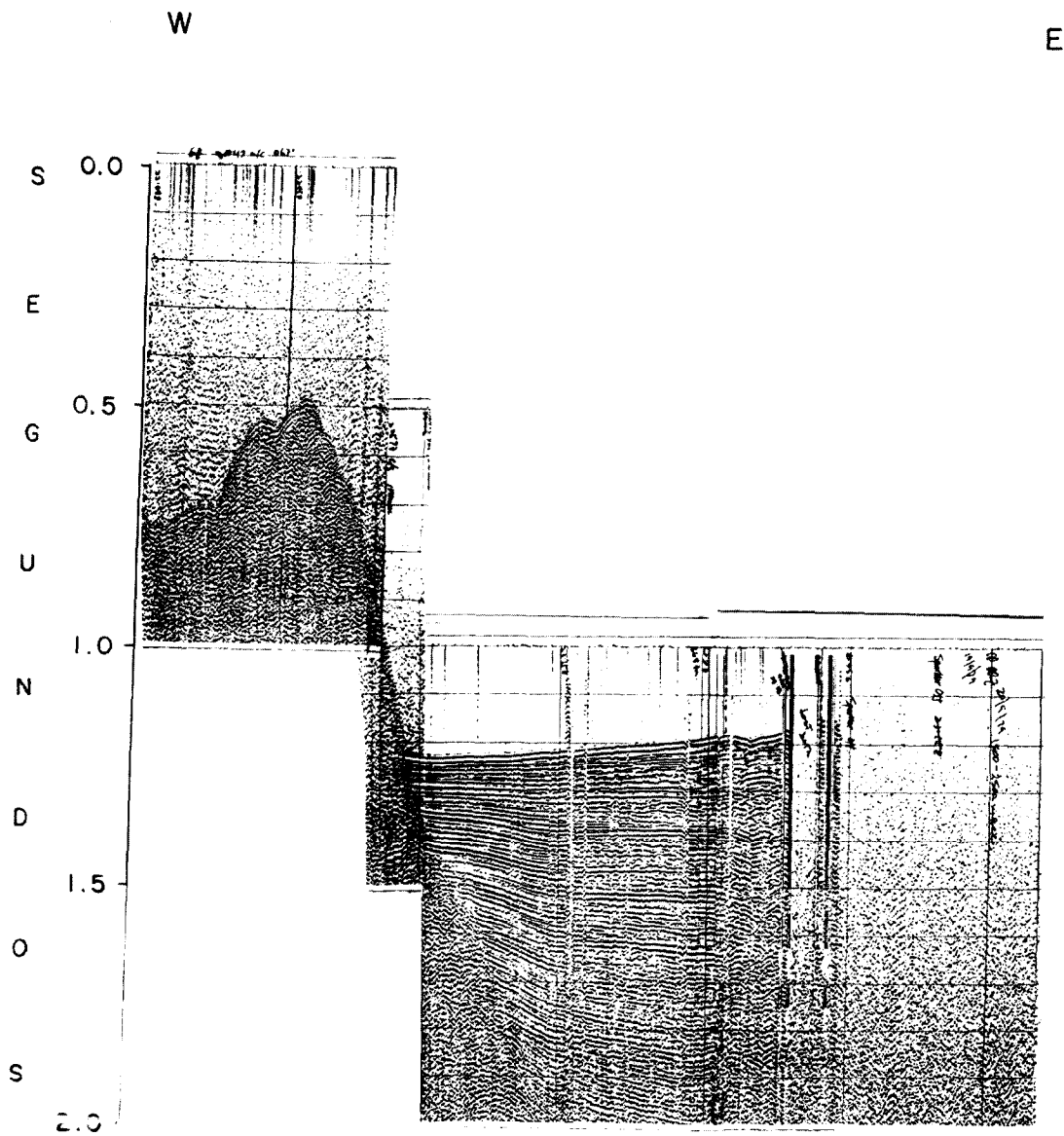


Figura 7. Línea C.
Figure 7. Line C.



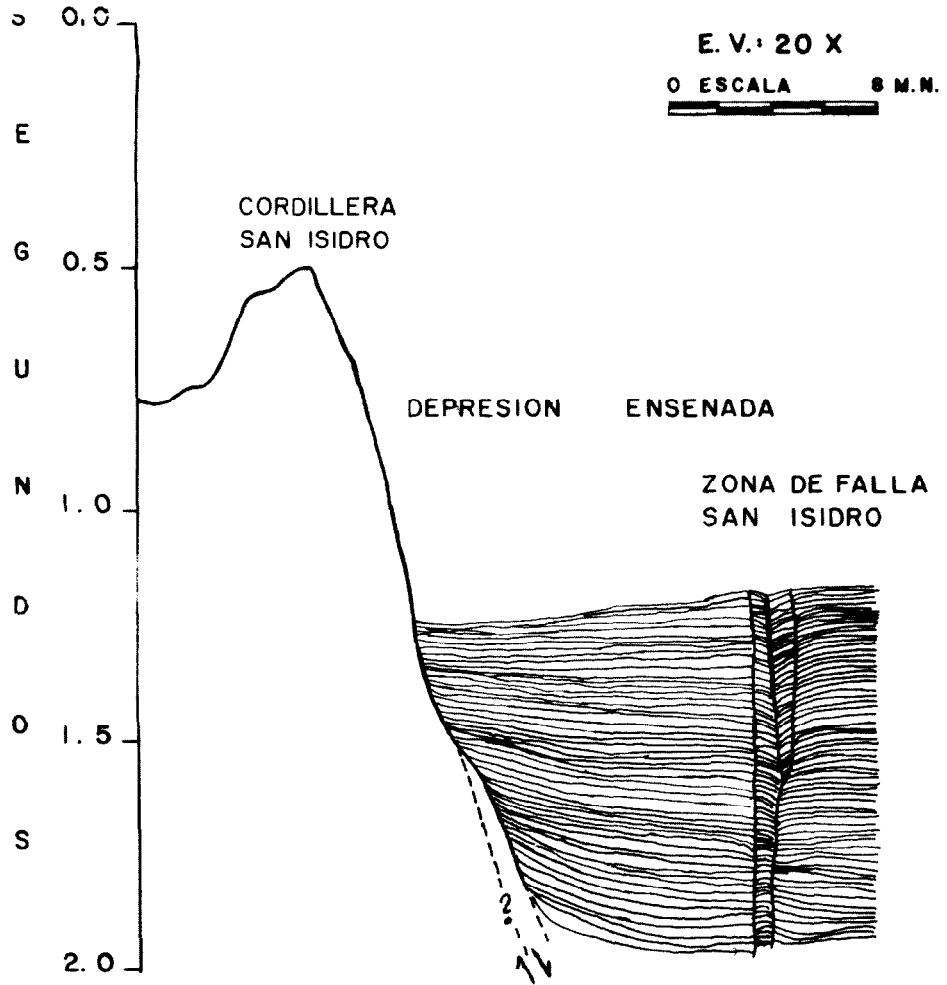


Figura 8. Línea D.
Figure 8. Line D.

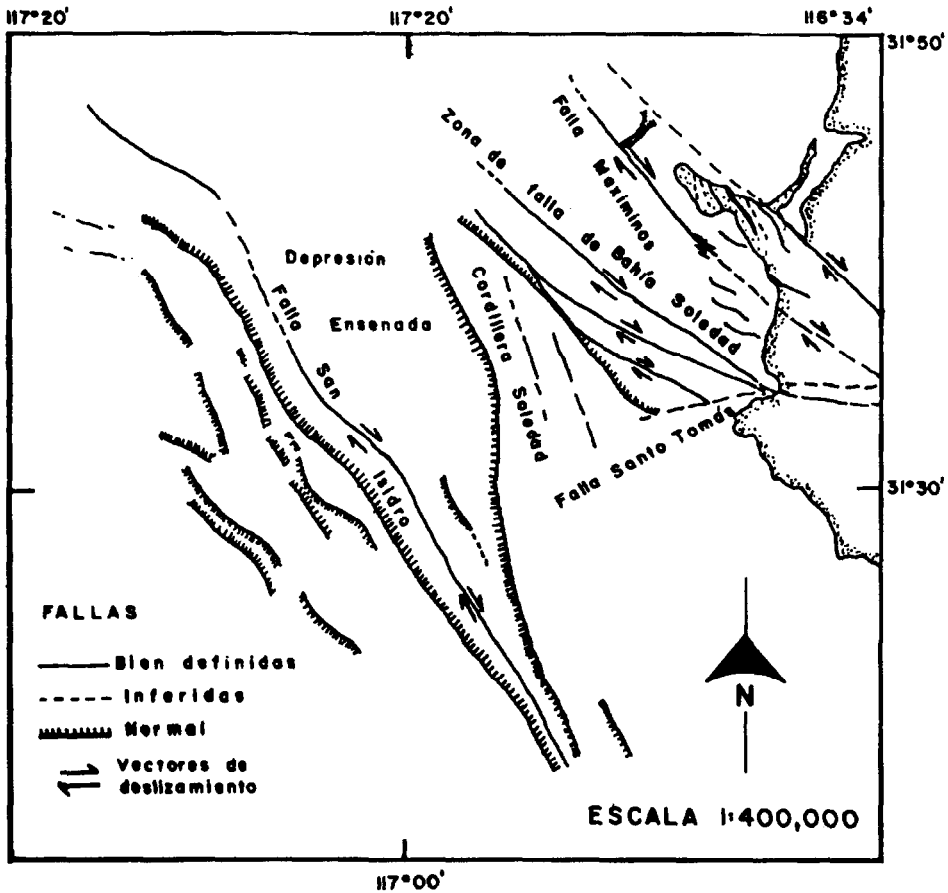


Figura 9. Mapa estructural del área.
Figure 9. Structural map of the area.

vertical de deslizamiento del sistema de falla San Isidro, como lo muestra el escarpe que limita a la cordillera San Isidro por el lado este. Así como la actividad de esta zona en el reciente, evidente por las perturbaciones observadas en los depósitos sedimentarios de la depresión Ensenada y por la actividad sísmica reportada (Wong, 1985).

En conclusión, la actividad tectónica de esta zona de falla se evidencia al observar las perturbaciones en los depósitos recientes de la depresión Ensenada (Fig. 9). Otra muestra de esta actividad (Fig. 11), es el alineamiento de la sismicidad con los sistemas

The focal mechanisms calculated for some earthquakes, are consistent with the extensional right-lateral faulting observed in the region

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank all those who in some way made this work possible: the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología and the Secretaría de Programación y Presupuesto for economic support; the Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C., and

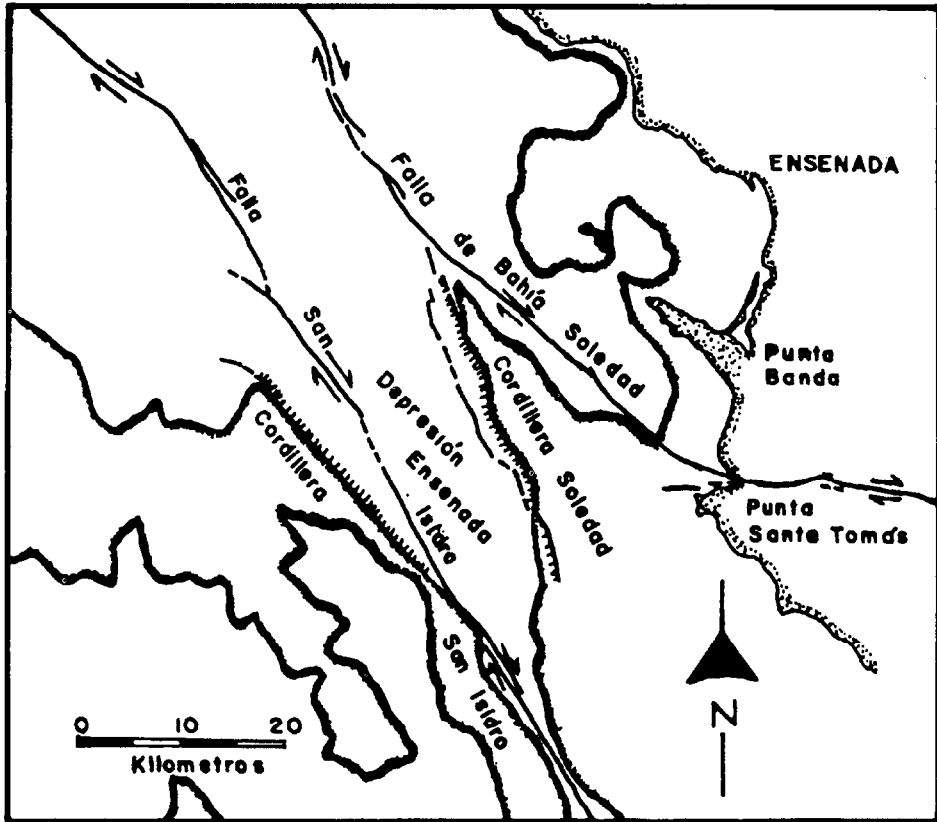


Figura 10. Geometría de las fallas. (Tomado de Legg, 1987.)
Figure 10. Geometry of the faults. (Taken from Legg, 1987.)

San Clemente-San Isidro y Agua Blanca-Santo Tomás. Los mecanismos focales calculados para algunos sismos, son consistentes con el fallamiento de rumbo lateral derecho extensional observado en la región.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su más sincero agradecimiento a todas las personas que de alguna manera ayudaron a llevar a cabo el presente trabajo. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, a la Secretaría de Programación y Presupuesto por el apoyo económico proporcionado a esta investiga-

the Secretaría de Marina for the facilities provided; the editor of this journal for the help given and the anonymous referees for their comments and suggestions.

English translation by Christine Harris.

ción; al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, a la Secretaría de Marina por las facilidades prestadas durante el desarrollo del proyecto; al editor de esta revista por todo el apoyo brindado y a los revisores anónimos por sus comentarios y sugerencias.

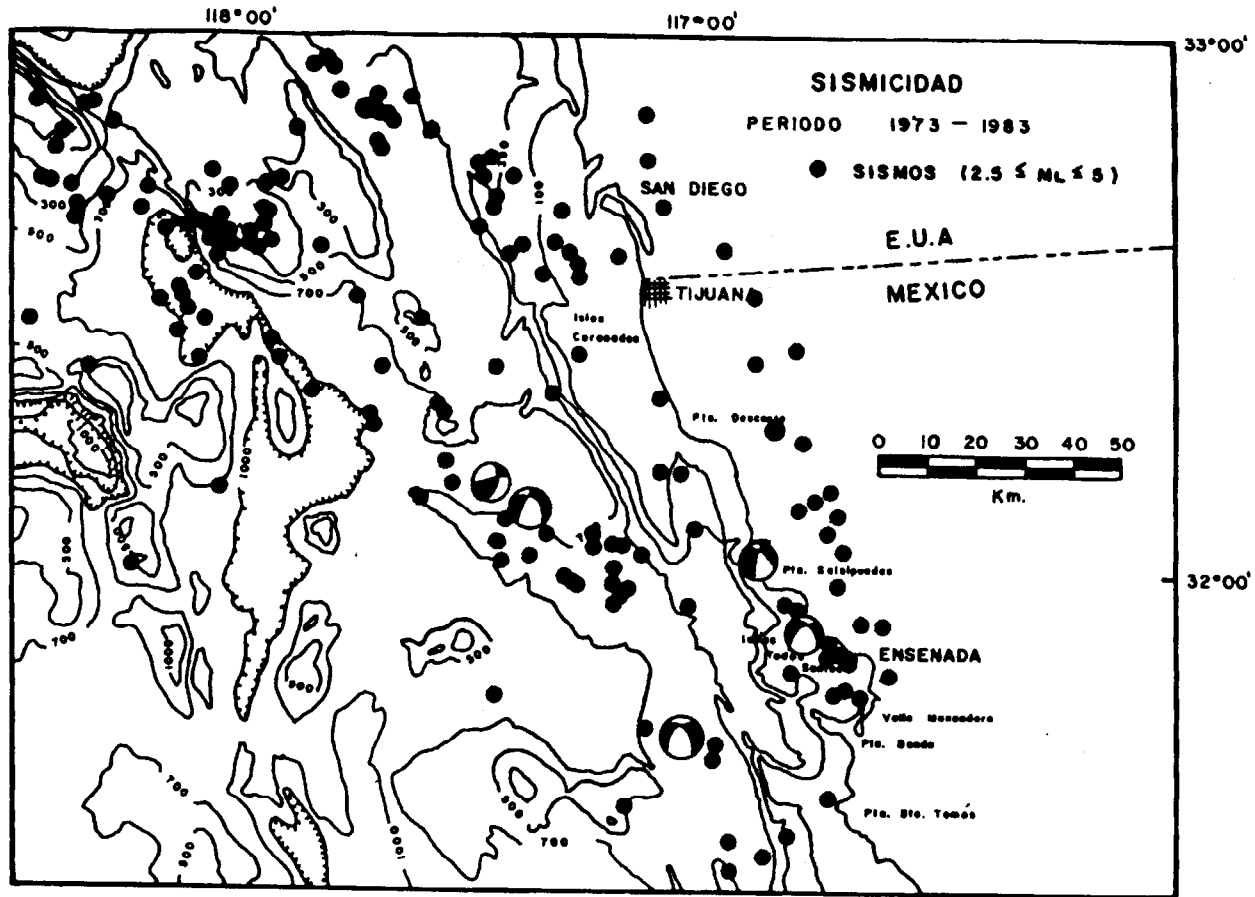


Figura 11. Sismicidad de la zona (Wong, 1985).
 Figure 11. Seismicity of the area (Wong, 1985).

LITERATURA CITADA

- Allen, C.R., Silver, L.T. and Stehli, F.G. (1960). The Agua Blanca Fault - A major transverse structure of northern Baja California, Mexico. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 71: 457-482.
- Atwater, T. (1970). Implications of plate tectonics for the Cenozoic tectonic evolution of western North America. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 81: 3513-3536.
- Dobrin, M.R. (1976). *Introduction to Geophysical Prospecting*. 3rd. ed. McGraw-Hill Book Co., New York, 660 pp.
- Geyer, R.A. (1983). *Handbook of Geophysical Exploration at the Sea*. C.R.C. Press Inc. Florida.
- Gutiérrez, C.A. y Suárez, F. (1988). Reconstrucción tectónica de la falla de Agua Blanca en la Bahía de Todos Santos, Baja California, México. *Ciencias Marinas*, 14(2): 15-28.
- Harding, T.P., Gregory, R.F. and Stehens, L.H. (1983). Convergent wrench fault and negative flower structure Adaman Sea, Oklahoma. In: A.W. Bally (ed.), *Seismic Expression of Structural Styles: A Picture and Work Atlas*. V. 3.
- Krause, D.C. (1965). Tectonics, bathymetry and geomagnetism of the southern continental borderland west of Baja California, Mexico. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 76: 617-650.
- Legg, M.R. (1987). Lake Quaternary Band Submarine Canyon and Fan Offshore Northern Baja California. AAPG, Reunión Anual, junio 7-10, 1987, Los Angeles, California.
- Pou, S. (1982). Estudio de la tectónica de la Islas de Todos Santos. B.C., México Tesis de Licenciatura, ESCM, UABC no publicada.
- Reading, H.S. (1980). Characteristics and recognition of strike slip fault systems In: *Ass. Sed., Publicación Especial No 4*, pp. 7-26.
- Suárez, F., Armijo, R., Morgan, G., Bodin, P. and Gastil, G. (1989). Neotectonics of northern Baja California. In: *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*. American Association of Petroleum Geologists Memoir (in press).
- Wilcox, R.E., Harding, T.P. and Seely, D.R. (1973). Basic wrench tectonics. *Bull. Amer. Geol. Petroleum Ass.*, 57(1): 74-76.
- Wong, V.M. (1980). Implicaciones tectónicas de la falla de Agua Blanca en la Bahía de Todos Santos, B.C., México. Tesis de Maestría, CICESE, no publicada.
- Wong, V.M. (1985). Características extensionales de la región interior del Borde Continental del sur de California y norte de Baja California. *Unión Geofísica Mexicana, A.C. Memoria de la Reunión Anual, Oaxaca, Oax.*, 226 pp.