

MASAS DE AGUA DEL GOLFO DE CALIFORNIA
WATER MASSES OF THE GULF OF CALIFORNIA

Por

By

Saúl Alvarez Borrego

Departamento de Oceanografía

Centro de Investigación Científica y
de Educación Superior de Ensenada, B. C.

Espinoza No. 843

Ensenada, Baja California, México

y

and

Richard A. Schwartzlose

Scripps Institution of Oceanography
University of California at San Diego
La Jolla, California/92037 (USA)

RESUMEN.

La parte del Golfo de California al sur de Islas Angel de la Guarda y Tiburón, tiene básicamente la estructura termohalina del Pacífico Tropical Oriental, con modificación en la superficie por exceso de evaporación. Los datos sugieren que las aguas Superficial del Pacífico Tropical Oriental y Subsuperficial Subtropical invaden solamente la región de la boca del Golfo de California en "invierno" (invierno y principios de primavera; mientras que en "verano" (finales de primavera, verano y otoño) invaden prácticamente toda la parte del Golfo al sur de Isla Angel de la Guarda. Con datos de un crucero de marzo de 1973 se confirma la hipótesis de Sverdrup (1941) sobre el movimiento convectivo en invierno en el extremo norte del Golfo. Agua fría y salina se hunde de la superficie del extremo norte y se desplaza pegada al fondo con una componente hacia el sureste, formando un máximo de salinidad con valores cercanos a 35.5‰ a una profundidad de hasta 150-200m. Esta lengüeta de alta salinidad se detectó con claridad hasta la región cercana a la punta norte de Isla Angel de la Guarda. Debido a este movimiento convectivo, en el norte del Golfo las distribuciones verticales de salinidad, oxígeno y nutrientes presentan mínimos y máximos de invierno y primavera que no presentan en verano y otoño. Además, este movimiento convectivo proporciona en invierno un mecanismo de aereación de las aguas profundas de Cuenca Salsipuedes, adicional al de mezcla por las fuertes corrientes de marea que se presentan todo el año.

WATER MASSES OF THE GULF OF CALIFORNIA

ABSTRACT.

South of Angel de la Guarda and Tiburon islands, the Gulf of California has basically the same thermohaline structure as that of the Eastern Tropical Pacific, with modifications at the surface due to excess evaporation. The data suggest that the surface Eastern Tropical Pacific and the subsurface Subtropical water masses are present only at the mouth of the Gulf during winter and the beginning of spring; whereas at end of spring and during summer and fall they invade all the portion of the Gulf south of Angel de la Guarda island. With data from March 1973, we confirmed Sverdrup's (1941) hypothesis concerning the winter convective water movement at the head of the Gulf. Cold and highly saline water sinks from the surface at the northernmost extreme of the Gulf, and moves southeastward along the bottom. North of Angel de la Guarda island, this water forms a distinct salinity maximum at 150-200 m, with values around 35.5‰. Due to this convective movement, in the northern Gulf vertical distributions of salinity, oxygen and nutrients show minima and maxima during winter and spring which are not present in summer and fall. This convective movement plus tidal mixing aerates the deep waters of Salsipuedes basin.

INTRODUCCION.

Topográficamente, el Golfo de California se divide en una serie de cuencas, cuya profundidad disminuye hacia el norte, separadas por umbrales (Shepard, 1950). Hidrográficamente, el Golfo puede dividirse en dos partes claramente diferenciadas: una al norte del umbral sur de Cuenca Salsipuedes o Canal de Ballenas (Fig. 1), (llamada sucesivamente parte norte), y otra al sur de este umbral (llamada sucesivamente parte sur) (Sverdrup, 1941; Roden, 1964; Gaxiola Castro, Alvarez Borrego y Schwartzlose, 1978). La profundidad máxima de este umbral es aproximadamente 450m. (Rusnak, Fisher y Shepard, 1964). Esta profundidad limita la circulación entre el Canal de Ballenas y la parte sur del Golfo. La profundidad del Canal de Ballenas excede a los 1500m. El resto de la parte norte del Golfo es relativamente somero con excepción de Cuenca Delfín (Fig. 1). Mucho de esta parte está a la profundidad de la plataforma continental (van Andel, 1964). La parte sur del Golfo tiene una comunicación abierta con el Océano Pacífico, con profundidades de hasta más de 3000m en la entrada. Los umbrales entre las cuencas tienen profundidades de más de 1500 m en esta parte del Golfo.

La estructura termohalina de la parte sur del Golfo es básicamente igual a la del Pacífico Ecuatorial, con modificaciones en la superficie debido a la evaporación que en el Golfo excede a la precipitación (Sverdrup, 1941; Roden, 1964). La entrada del Golfo tiene principalmente tres masas de agua en la superficie: agua de la Corriente de California, fría y de baja salinidad ($S^{\circ}/_{\infty} \leq 34.60$), que fluye hacia el sur a lo largo de la costa occidental de Baja California; agua Superficial del Pacífico Tropical Oriental; tibia y de salinidad intermedia ($34.65 \leq S^{\circ}/_{\infty} < 34.85$), que fluye hacia esta área del sureste; y el agua del Golfo de California, tibia y de alta salinidad ($S^{\circ}/_{\infty} > 34.90$), (Roden y Groves, 1959; Griffiths, 1968; Stevenson, 1970). Debido a su alta temperatura, el agua del Golfo de California fluye en la superficie por encima del agua de la Corriente de California y la Superficial del Pacífico Tropical Oriental, que se manifiestan con un mínimo de salinidad subsuperficial muy somero (~ 70 m). Bajo estas tres masas de agua, encontramos sucesivamente con la profundidad: agua Subtropical Subsuperficial, con un máximo de salinidad de cerca de $34.80^{\circ}/_{\infty}$, que se obscurece en el interior del Golfo; agua Intermedia del Antártico, caracterizada por un mínimo profundo de salinidad de cerca de $34.50^{\circ}/_{\infty}$ (Griffiths, 1968); y agua del Fondo del Pacífico, caracterizada por un incremento en salinidad hasta $34.68^{\circ}/_{\infty}$.

El mínimo y el máximo subsuperficiales de salinidad, característicos del agua Superficial del Pacífico Tropical Oriental y del agua Subsuperficial Subtropical, respectivamente, se atenúan hacia el interior del Golfo. Roden (1964) reportó el mínimo subsuperficial de salinidad en la parte oriental de un transecto transversal al Golfo, a la altura de Guaymas, con datos tomados en agosto de 1957. La presencia de este mínimo le sugirió la posibilidad de un flujo de agua hacia el noroeste en la mitad oriental del Golfo, ya que la única fuente de este mínimo es el sureste.

El mínimo profundo de salinidad (agua intermedia del Antártico) se detecta claramente en toda la parte sur del Golfo (Sverdrup, 1941); con los valores aumentando de $34.50^{\circ}/_{\infty}$ en la entrada del Golfo, a $34.54^{\circ}/_{\infty}$ en la Cuenca de Guaymas (Gaxiola Castro, Alvarez Borrego y Schwartzlose, 1978).

La temperatura en la parte sur del Golfo no muestra ninguna estructura especial. Decece monotónicamente con la profundidad como lo hace en el Océano Pacífico adyacente.

En la parte norte del Golfo, las fuertes corrientes de marea provocan una mayor homogeneización de la columna de agua (Roden, 1964; Gaxiola Castro, Alvarez Borrego y Schwartzlose, 1978). La Cuenca Salsipuedes tiene agua que resulta de la mezcla entre la superficie y la

profundidad del umbral (~ 450 m). Esto le da características hidrográficas únicas. Aún en las partes más profundas (~ 1500 m) se tiene una temperatura de cerca de 11°C , y el mínimo profundo de salinidad no se encuentra, como tampoco se encuentra el mínimo de oxígeno (Sverdrup, 1941).

En lo que fué la boca del Río Colorado y en la zona adyacente del Golfo, las salinidades superficiales son cerca de $36.5^{\circ}/\infty$ en invierno y más de $38.5^{\circ}/\infty$ en verano, manteniendo en general el mismo gradiente con los valores aumentando hacia el noroeste. Las temperaturas superficiales varían de alrededor de 10°C en invierno a cerca de 32°C en verano (Alvarez Borrego y Galindo Bect, 1974; Alvarez Borrego, Flores Baez y Galindo Bect, 1975).

Basado en el alto contenido de oxígeno de las aguas profundas de Cuenca Salsipuedes, Sverdrup (1941) propuso la hipótesis de que en invierno el agua superficial del extremo norte se hundiría debido al enfriamiento y evaporación excesivos, moviéndose luego al sur para llenar las partes profundas de las Cuencas Wagner, Delfín y Salsipuedes. Roden (1964) exploró la posibilidad de este tipo de movimiento convectivo. Con los datos que el tenía, indicó que la media de las temperaturas mínimas era 13°C , con una salinidad de más de $35.5^{\circ}/\infty$ en las aguas superficiales cercanas a la costa. Para estos valores la densidad en la superficie es 1.02680 g/cm³. La misma densidad (in situ) se encuentra a una profundidad de cerca de 100 m. Por lo tanto, Roden (1964) concluyó que la convección ocurre solamente hasta cerca de 100 m cerca de la costa, siendo insignificante lejos de la costa ya que ahí la temperatura superficial no baja mucho más de 15°C . Alvarez Borrego, Flores Báez y Galindo Bect (1975) reportaron temperaturas mínimas superficiales de 8.2°C a 12.2°C , de diciembre a febrero, en el extremo norte del Golfo, donde las profundidades son menores a 20 m. Estas temperaturas producen agua más pesada que 1.02680 , que puede hundirse a mayor profundidad que 100 m. Sin embargo, para alcanzar estas profundidades, debe ser movida hacia el sur unida al fondo. Alvarez Borrego, Rivera, Gaxiola Castro, Acosta Ruiz y Schwartzlose (1978) reportaron un mínimo de salinidad a ~ 100 m, para abril de 1974, en el centro de la parte norte del Golfo, e indicaron que ésto sugería la presencia cerca del fondo de agua más fría y salina, cuyo origen era la superficie del extremo norte del Golfo.

Las gráficas construídas por Sverdrup (1941) y Granados Gallegos (1974) indican que las condiciones hidrográficas en la Cuenca Tiburón (Fig. 1) son muy similares a las de Cuenca Salsipuedes, con los mismos valores de salinidad, temperatura y oxígeno para las mismas profundidades. Pero las profundidades máximas del fondo de Cuenca Tiburón

son solamente cerca de 550 m, y tiene una comunicación más abierta con el sur del Golfo que la Cuenca Salsipuedes.

El propósito del presente trabajo es el confirmar la hipótesis de Sverdrup (1941) sobre el movimiento convectivo de invierno en la parte norte del Golfo, mediante datos tomados en marzo de 1973 en un crucero del "Alexander Agassiz" de la Institución Scripps de Oceanografía, y discutir brevemente sobre las implicaciones de este movimiento en la distribución vertical de propiedades del agua en la misma parte norte. Otro de los objetivos de este trabajo es describir la extensión geográfica de las masas subsuperficiales en el Golfo, mediante datos de un par de cruces del mismo barco en abril y octubre de 1974 y del crucero del "Stranger" de la misma Institución Scripps, efectuado en junio de 1957. Los diagramas T-S son la herramienta principal para estos propósitos.

INTRODUCTION.

Topographically, the Gulf of California is divided into a series of basins and trenches, deepening to the south, separated from each other by transverse ridges (Shepard, 1950). Hydrographically, the Gulf may be divided into two clearly differentiated parts: one to the north of the southern sill of Salsipuedes basin (Fig. 1) (the northern part), and the other to the south of the sill (the southern part) (Sverdrup, 1941; Roden, 1964; Gaxiola-Castro, et al., 1978). Maximum depth of this sill is approximately 450 m (Rusnak, et al., 1964), thus, it limits the deeper circulation between Salsipuedes basin (also called Ballenas channel) and the southern part of the Gulf. Maximum depths of Ballenas channel exceed 1500 m. The rest of the northern part is relatively shallow, with exception of Delfin basin (Fig. 1). Much of this portion is at shelf depth (van Andel, 1964). The southern part of the Gulf is open to the Pacific, with depths greater than 3000 m at the entrance. The Gulf's southern basins sills have depths of more than 1500 m.

The thermohaline structure of the southern part of the Gulf is basically the same as that of the equatorial Pacific, with modifications at the surface due to evaporation exceeding precipitation (Sverdrup, 1941; Roden, 1964). The entrance to the Gulf has mainly three kinds of water at and near the surface: cold California Current water of low salinity ($S^{\circ}/_{\infty} \leq 34.60$), that flows southward along the west coast of Baja California; warm eastern tropical Pacific water of intermediate salinity ($34.65 \leq S^{\circ}/_{\infty} \leq 34.85$), that flows into the area from the southeast; and warm highly saline ($S^{\circ}/_{\infty} \geq 34.90$) Gulf of California water (Roden and Groves, 1959; Griffiths, 1968; Stevenson, 1970). Due to its high temperature,

the Gulf of California water flows at the surface above the California Current and Eastern Tropical Pacific waters, and can be identified by a very shallow salinity minimum (~ 70 m). Under these three water masses, we find successively with depth: subtropical subsurface water, with a salinity maximum of about 34.80‰ , that is obscured in the Gulf; Antarctic Intermediate water, characterized by a deep salinity minimum of about 34.50‰ (Griffiths, 1968); and Pacific Bottom water characterized by an increase in salinity below the Intermediate water, up to about 34.68‰ .

The subsurface salinity minimum and maximum, respectively characteristic of the surface Eastern Tropical Pacific and the subsurface subtropical water masses, are attenuated towards the interior of the Gulf. Roden (1964) reported the subsurface salinity minimum at the eastern part of a cross section off Guaymas, with data from August, 1957. He indicated that the presence of this minimum suggested the possibility of a northwestward water flux in the eastern side of the Gulf, because the only source of this minimum is the southeast.

The deep salinity minimum (Antarctic Intermediate water) is clearly detected in all the southern part of the Gulf (Sverdrup, 1941); with salinity values increasing from 34.50‰ at the entrance to the Gulf, to 34.54‰ at the Guaymas basin (Gaxiola-Castro, et al., 1978).

In the southern portion of the Gulf, temperature does not show any special structure. It decreases monotonically with depth as in the open Pacific.

In the northern Gulf, strong tidal mixing causes a greater homogenization of the water column (Roden, 1964; Gaxiola-Castro, et al., 1978). Water structure in Salsipuedes basin below the sill results primarily from the mixing with water above the sill (~ 450 m). Because of this, Salsipuedes basin has unique hydrographic characteristics. Even at maximum depths (~ 1500 m) the temperature is near 11°C , the deep salinity minimum and the oxygen minimum are not present (Sverdrup, 1941).

At the Colorado river mouth and the adjacent northernmost portion of the Gulf, surface salinities are near 36.5‰ in winter, and can be more than 38.5‰ during summer. Surface temperatures are around 10°C in winter and are as high as 32°C during summer (Alvarez-Borrego and Galindo-Bect, 1974; Alvarez-Borrego, et al., 1975).

Based on the high oxygen content of Salsipuedes basin deep water, Sverdrup (1941) proposed the hypothesis of a winter convective movement by which surface water at the north end of the Gulf would sink due to excessive cooling and evaporation. This denser water would then move to the south, at the bottom, to fill the deep parts of Wagner, Delfin and Salsipuedes basins. Roden (1964) explored the

possibility of this convective movement. With the data he had, he indicated that the mean minimum temperature in coastal regions is about 13°C, and the salinities are generally in excess of 35.5‰. The resulting density (in situ) is found at a depth of about 100 m, thus, Roden (1964) concluded that convective overturn due to winter cooling can be expected to reach roughly 100 m near the coast. In the offshore regions of the Gulf, surface temperatures do not drop much below 15°C, and the salinities average about 35.4‰. With these conditions Roden (1964) concluded that convection is insignificant. Alvarez-Borrego, et al. (1975) reported surface temperature minima within the range of 8.25-12.21°C for December through February, at the northernmost part of the Gulf and salinities much higher than 35.5‰, thus, producing water of sufficient density to sink well below 100 m. But since this very northern region is for the most part shallower than 100 m, horizontal advection would have to bring this water southward, at the bottom, to move to deeper areas. Alvarez-Borrego, et al. (1978) reported a salinity minimum at 100 m in the central northern Gulf, with data from April, 1974. They indicated that this minimum suggested the presence of a cooler and more saline water near the bottom whose origin must have been at the surface in the northernmost part of the Gulf.

The purpose of the present work is to confirm Sverdrup's (1941) hypothesis on the winter convective movement at the northern Gulf, using data taken during the March 1973 cruise of the Scripps Institution of Oceanography R/V "Alexander Agassiz", and to discuss briefly about the implications of this movement on the vertical distribution of water properties in the northern Gulf. Another objective of this work is to describe the geographic distribution of the Gulf's subsurface water masses, using data from a couple of cruises of the same ship in 1974, one in April and the other in October, and data from a cruise of the Scripps R/V "Stranger", in June 1957. T-S diagrams are the main tool for these purposes.

RESULTADOS Y DISCUSIONES.

El agua que invade el norte del Golfo de California básicamente tiene valores de salinidad que disminuyen con la profundidad. Esta es la situación que prevalece gran parte del año, al final de primavera y durante verano y otoño. Sin embargo, en invierno se produce en efecto un movimiento de convección, mediante el cual el agua superficial más fría y salina del extremo norte se hunde y es acarreada cercana al fondo con una componente de advección hacia el sur. Los datos de salinidad de marzo de

1973 muestran claramente este fenómeno (Fig. 1). Desgraciadamente no se cuenta con datos de diciembre a febrero, para estudiar con más detalle este fenómeno. La lengüeta de altos valores de salinidad, con cerca de 35.5‰ en el núcleo, alcanzó en ese crucero profundidades cercanas a 150 m, y se detectó claramente hasta la estación 60, cercana a la punta norte de isla Angel de la Guarda. Las distribuciones verticales de $T^{\circ}\text{C}$ y σ_t también muestran este fenómeno de convección, pero solamente con claridad en las cuatro estaciones más al norte. La distribución vertical de densidad en la estación 79 muestra un hundimiento de las isogramas que se correlaciona con las isothermas. Es posible que ésto sea un artefacto producido por la no simultaneidad de los datos, en una zona como Cuenca Tiburón que es muy afectada por los procesos de mezcal debido a las fuertes corrientes de marea. La estación 69 se tomó 10 horas antes que la 79 y ésta 18 horas antes que la 88. El efecto de la turbulencia por las corrientes de marea en las cuencas del norte del Golfo requiere de estudio más detallado.

Este movimiento de convección en invierno tiene un efecto fuerte en la distribución vertical de las diversas propiedades físicas y químicas del agua del norte del Golfo y no se sabe todavía el efecto que pueda tener en la parte sur del Golfo. Las distribuciones verticales de salinidad, oxígeno y nutrientes presentan mínimos y máximos subsuperficiales en invierno y primavera, que no se presentan en verano y otoño (Fig. 2). En octubre de 1974 el oxígeno y la salinidad disminuyeron con la profundidad y los nutrientes aumentaron con la misma, todos en una forma monotónica, en el norte del Golfo. Mientras que en abril del mismo año, la presencia de la masa de agua cerca del fondo, proveniente de la superficie en el extremo norte del Golfo, causó valores relativamente altos de salinidad y oxígeno y relativamente bajos de nutrientes a $\sim 200\text{m}$. A esta profundidad las diferencias entre abril y octubre fueron: de oxígeno $\sim 2\text{ml/l}$, de salinidad $\sim 0.4\text{‰}$, de fosfato $\sim 0.8\mu\text{M}$, de nitrato $\sim 8\mu\text{M}$, y de silicato $\sim 13\mu\text{M}$. (Fig. 2). Esto debe resultar en valores relativamente altos de pH y bajos de bióxido de carbono total inorgánico a esta profundidad, en invierno.

Alvarez-Borrego, Rivera, Gaxiola-Castro, Acosta-Ruiz y Schwartzlose (1978) reportaron valores más altos de salinidad y oxígeno, y más bajos de nutrientes, en abril que en octubre de 1974, para las aguas profundas del Canal de Ballenas (1000 a 1500m.). La diferencia de oxígeno fué 0.45ml/l a 1200m. Eso puede deberse a que la masa de agua que se hunde en el extremo norte del Golfo en invierno es acarreada hasta Cuenca Salsipuedes a profundidades alrededor de 200m, y luego por efecto de mezcla una

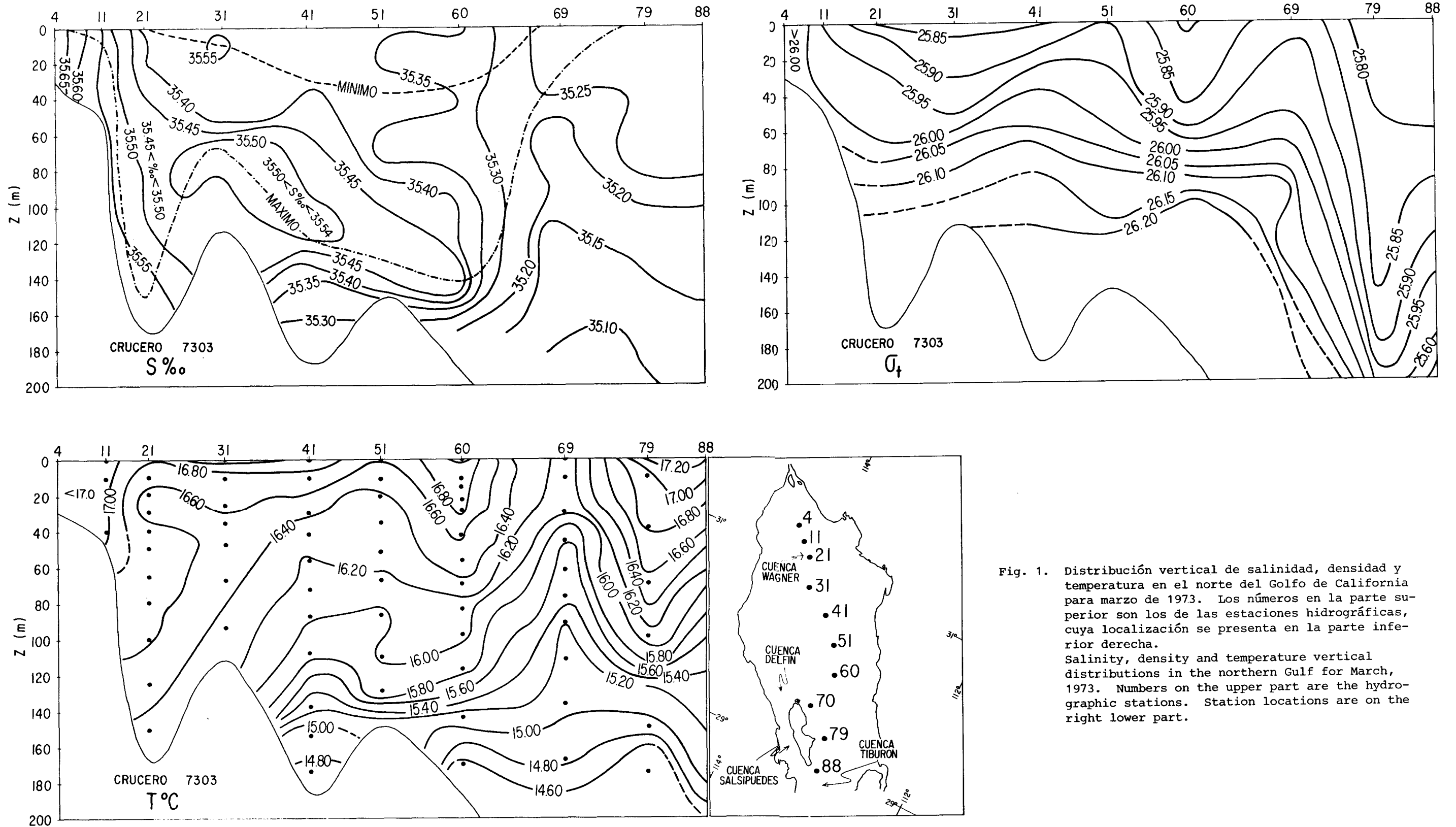


Fig. 1. Distribución vertical de salinidad, densidad y temperatura en el norte del Golfo de California para marzo de 1973. Los números en la parte superior son los de las estaciones hidrográficas, cuya localización se presenta en la parte inferior derecha. Salinity, density and temperature vertical distributions in the northern Gulf for March, 1973. Numbers on the upper part are the hydrographic stations. Station locations are on the right lower part.

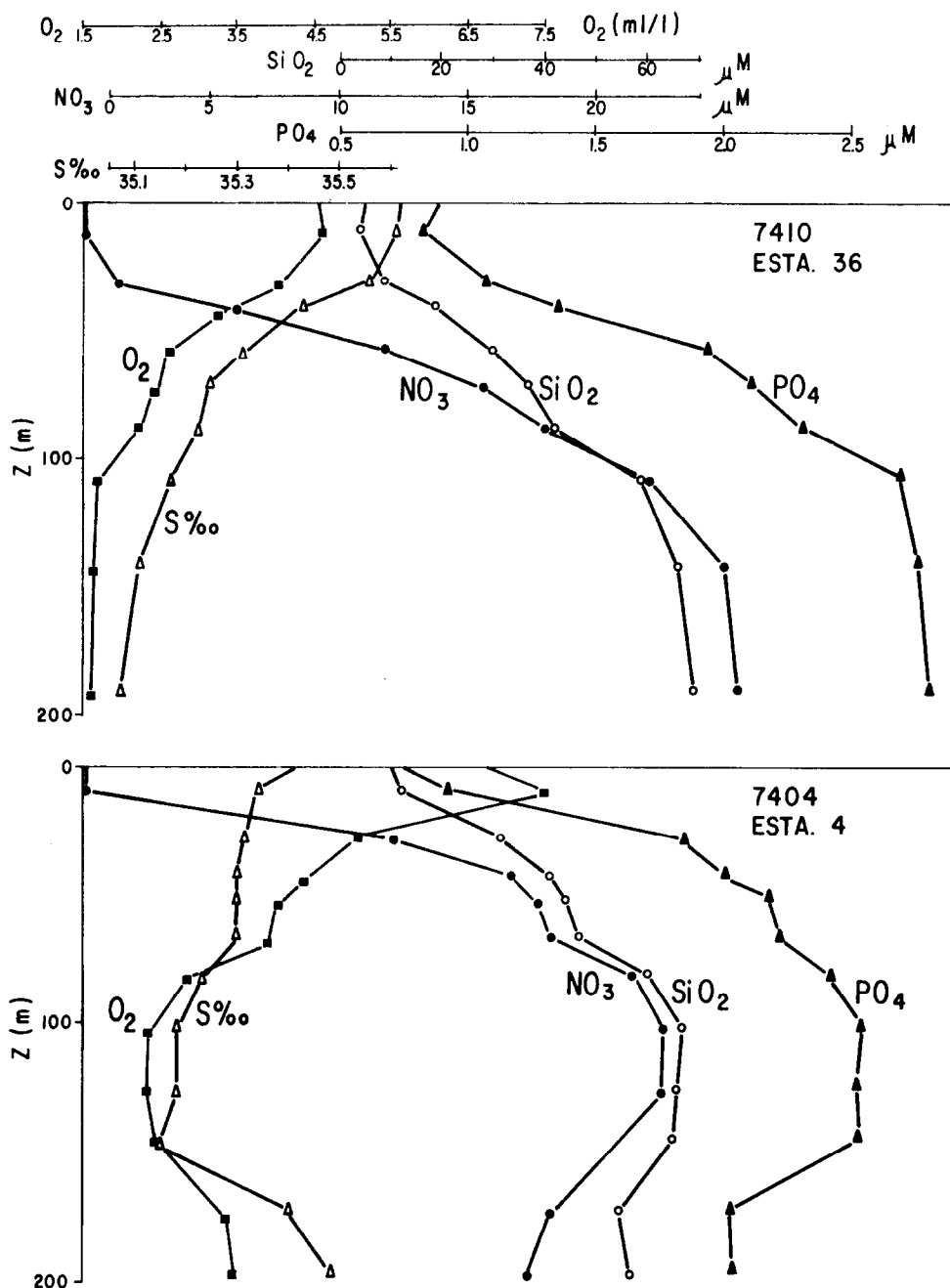


Fig. 2. Distribución vertical de salinidad, oxígeno, fosfato, nitrato y silicato, en la estación 36 del crucero de octubre de 1974 (Diagrama superior) y en la estación 4 del crucero de abril de 1974. Para localización de las estaciones ver Fig. 3. Salinity, oxygen, phosphate, nitrate and silicate vertical distributions at station 36 of the October 1974 cruise (upper diagram), and at station 4 of the April 1974 cruise. For station locations see figure 3.

porción de ella alcanza las partes más profundas de la cuenca. Por lo tanto, adicional al efecto de mezcla por las fuertes corrientes de marea, el movimiento convectivo de invierno proporciona un mecanismo de aereación de la parte profunda de Cuenca Salsipuedes.

Los diagramas T-S de las estaciones 30, 36 y 41 del crucero de octubre de 1974 (Fig. 3), y los de las estaciones 26 y 29 del crucero de junio de 1957 (Fig. 4), muestran las condiciones de "verano", con la salinidad disminuyendo con la profundidad en el norte del Golfo. Los diagramas T-S de las estaciones 4 y 5 del crucero de abril de 1974, y los de las estaciones 21, 31 y 40 del crucero de marzo de 1973, muestran las condiciones de "invierno". En marzo de 1973 el movimiento convectivo se mostró mucho más fuerte que en abril de 1974. Esto indica que en abril se estaba relajando el evento de convección. El período y la intensidad de la convección debe variar de año a año con las condiciones atmosféricas, de las cuales depende directamente.

Con excepción de las partes muy someras del extremo norte, las temperaturas mínimas superficiales siempre se registran en el Canal de Ballenas, y en general alrededor de Isla Angel de la Guarda (Figs 3 y 4) (Robinson, 1973). Los diagramas T-S del Canal de Ballenas o Cuenca Salsipuedes (estaciones 8 y 10 de abril de 1974; 44, 53, 54 y 68 de octubre de 1974; 66, 76 y 85 de marzo de 1973 y 36 y 40 de junio de 1957) solamente distinguen con claridad el agua superficial y la del fondo, que como se dijo anteriormente es producto de la mezcla del agua de los primeros 450 m. En ambos cruceros de 1974, estos diagramas son casi lineales, aunque presentan ligeras curvaturas indicando mezcla de más de dos masas de agua. Los de marzo de 1973 presentan una curvatura subsuperficial (50 a 120 m) hacia valores mayores de salinidad que posiblemente indiquen la presencia en el canal del agua de invierno del extremo norte. En los diagramas de 1957 hay irregularidades apoyadas por un solo dato en cada caso, por lo cual es difícil concluir algo en base a ello. Además, en este crucero todavía se analizaba la salinidad vía clorinidad por titulación, con una menor confiabilidad y precisión. Sin embargo, en la estación 36 se detectó un máximo de salinidad a 189 m que puede estar correlacionado con el máximo de la estación 47 a la misma profundidad. De ser esto real, indicaría la presencia del agua Subsuperficial Subtropical en el Canal de Ballenas en Junio de 1957.

Los diagramas T-S de la parte sur del Golfo muestran claramente la presencia del mínimo y el máximo subsuperficial en la boca del mismo (Fig. 3 y 4). En el caso de

los cruceros de 1974 (Fig. 3) se puede apreciar una diferencia en la penetración de estos extremos subsuperficiales hacia el interior del Golfo. En el crucero de abril estos extremos casi se han perdido por completo a la altura de una línea entre La Paz y Topolobampo (estación 18). En la estación 16 el diagrama T-S es casi lineal entre la superficie y el mínimo profundo de salinidad. Mientras que en el crucero de octubre los diagramas T-S siguen presentando ondulaciones, que son remanentes del mínimo y máximo subsuperficiales, hasta más al norte de Guaymas (estación 12). Esto sugiere que las aguas Superficial del Pacífico Tropical Oriental y Subsuperficial Subtropical invaden solamente la región de la boca del Golfo de California en "invierno" (invierno y principios de primavera); mientras que en "verano" (finales de primavera, verano y otoño) invaden prácticamente toda la parte del Golfo al sur de las Islas Angel de la Guarda y Tiburón. Los datos de junio de 1957 también indican la invasión de toda la parte sur del Golfo por estas masas de agua, con el mínimo y máximo subsuperficiales claramente distinguibles hasta las inmediaciones de Isla Tiburón (estación 47, Fig. 4) y como ya se mencionó anteriormente, posiblemente hasta el Canal de Ballenas. Con los datos disponibles no es posible hacer conclusiones sobre cambios de año a año. Sin embargo, es interesante hacer notar que 1957 fue un año con un evento fuerte de "El Niño" y 1974 fue un año con condiciones de "Anti El Niño" (Quinn, Zopf, Short y Kuo Yang, 1978). Esto podría tener relación con una invasión de las masas de agua Superficial del Pacífico Tropical Oriental y Subsuperficial Subtropical más fuerte del Golfo en "verano" de 1957 que en "verano" de 1974, como los datos parecen indicar. Aunque otra explicación, por el momento más aceptable, es que en junio la invasión de estas masas de agua sea más fuerte que en octubre. Queda esto por analizarse a la luz de datos más apropiados.

RESULTS AND DISCUSSIONS.

The waters that invade the northern Gulf basically have salinity values that decrease with depth. This is the situation that prevails most of the year, at the end of spring and during summer and fall. However, during winter there is indeed a convective movement by which colder and more saline surface water sinks at the northernmost extreme of the Gulf and moves along the bottom with a southeastward component. Salinity data from March, 1973 clearly show this phenomenon (Fig. 1). The salinity maximum has values around 35.5‰ and reached depths near 150 m in this cruise. It was clearly detected down to station 60, near the northern end of

WATER MASSES OF THE GULF OF CALIFORNIA

Angel de la Guarda island. $T^{\circ}\text{C}$ and σ_t vertical distributions also show this convection phenomenon, but with clarity only at the four northernmost stations. The density vertical distribution shows almost vertical isograms at station 79 which correlate well with the isotherms. This may be the result of non synoptic data taken in a region very much affected by strong tidal mixing. Station 69 was occupied 10 hours before 79; and the latter was occupied 18 hours before 88. The effects of turbulence by tidal currents in the basins of the northern Gulf requires more detailed studies.

The winter convective overturn has a strong effect on the vertical distribution of the different physical and chemical water properties in the northern Gulf and we do not know yet the effect in the southern Gulf. Salinity, oxygen and nutrients vertical distributions show subsurface minima and maxima during winter and spring, which are not present during summer and fall (Fig. 2). In October, 1974, oxygen and salinity decreased monotonically with depth, and nutrients increased with depth, in the northern Gulf. Whereas in April of the same year, the presence near the bottom of a water mass whose origin was the surface at the northernmost extreme of the Gulf, caused relatively high salinity and oxygen values and relatively low nutrient values at ~ 200 m. At this depth, differences between April and October were: ~ 2 ml/l for oxygen; $\sim 0.4\text{‰}$ for salinity; $\sim 0.8\mu\text{M}$ for phosphate; $\sim 8\mu\text{M}$ for nitrate; and $\sim 13\mu\text{M}$ for silicate (Fig. 2). This should result in relatively high pH and low total inorganic carbon dioxide values at this depth, in winter.

Alvarez-Borrego, et al. (1978) reported higher salinity and oxygen values and lower nutrient values, for April than for October 1974, for the Ballenas channel deep waters (1000 to 1500 m). The oxygen difference was 0.45 ml/l at 1200 m. This may be due to the winter water mass coming from the northernmost Gulf to Salsipuedes basin, at depths around 200 m, and then a portion of it reaching the greatest depths of the basin by the strong tidal mixing. Therefore, the winter convective overturn is an aeration mechanism for the deep waters of Salsipuedes basin, additional to tidal mixing.

T-S diagrams of stations 30, 36 and 41 of the October 1974 cruise (Fig. 3), and those of stations 26 and 29 of the June 1957 cruise (Fig. 4), show the "summer" conditions, with salinity decreasing with depth in the northern Gulf. T-S diagrams of stations 4 and 5 of the April 1974 cruise, and those of stations 21, 31 and 40 of the March 1973 cruise, show the

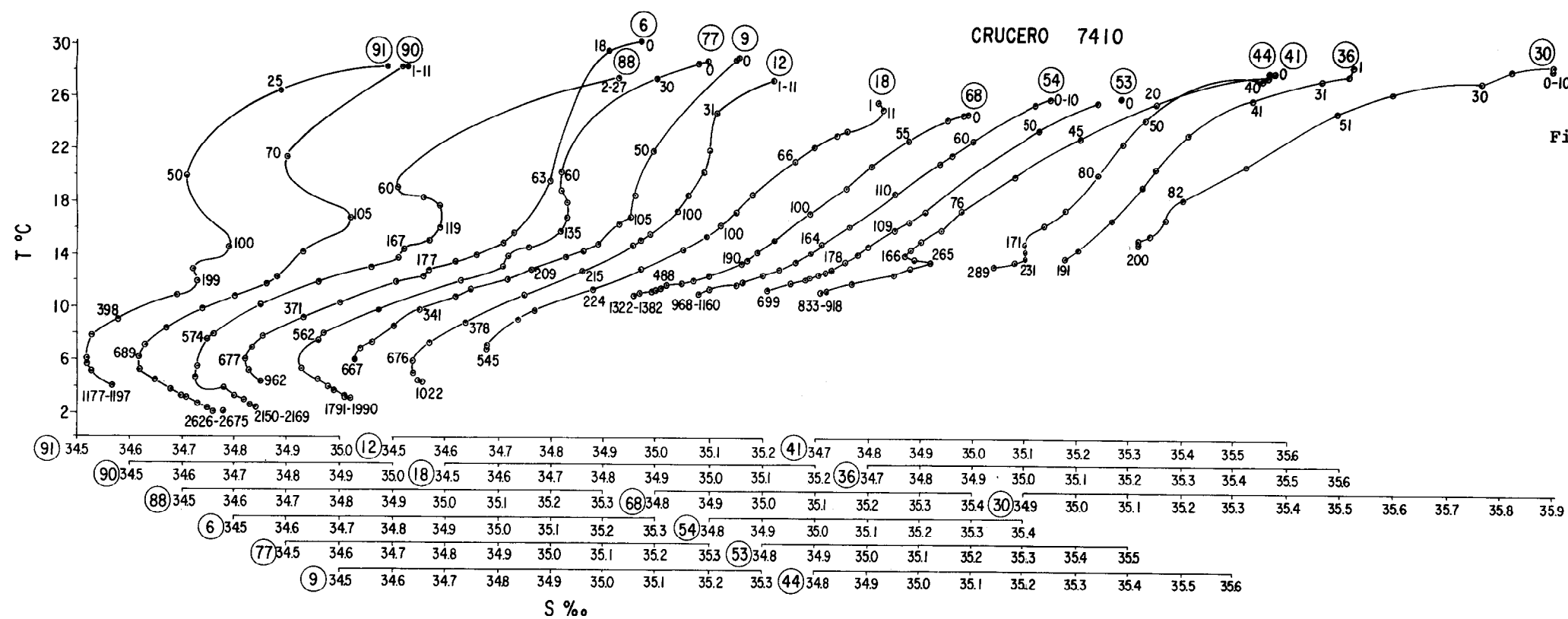
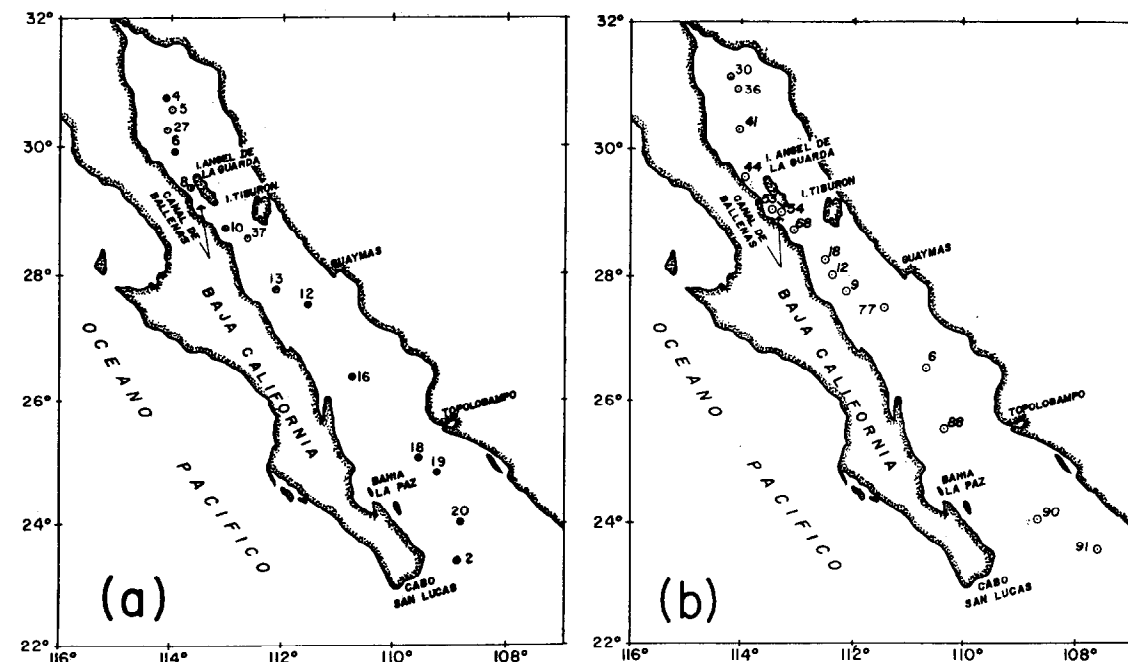
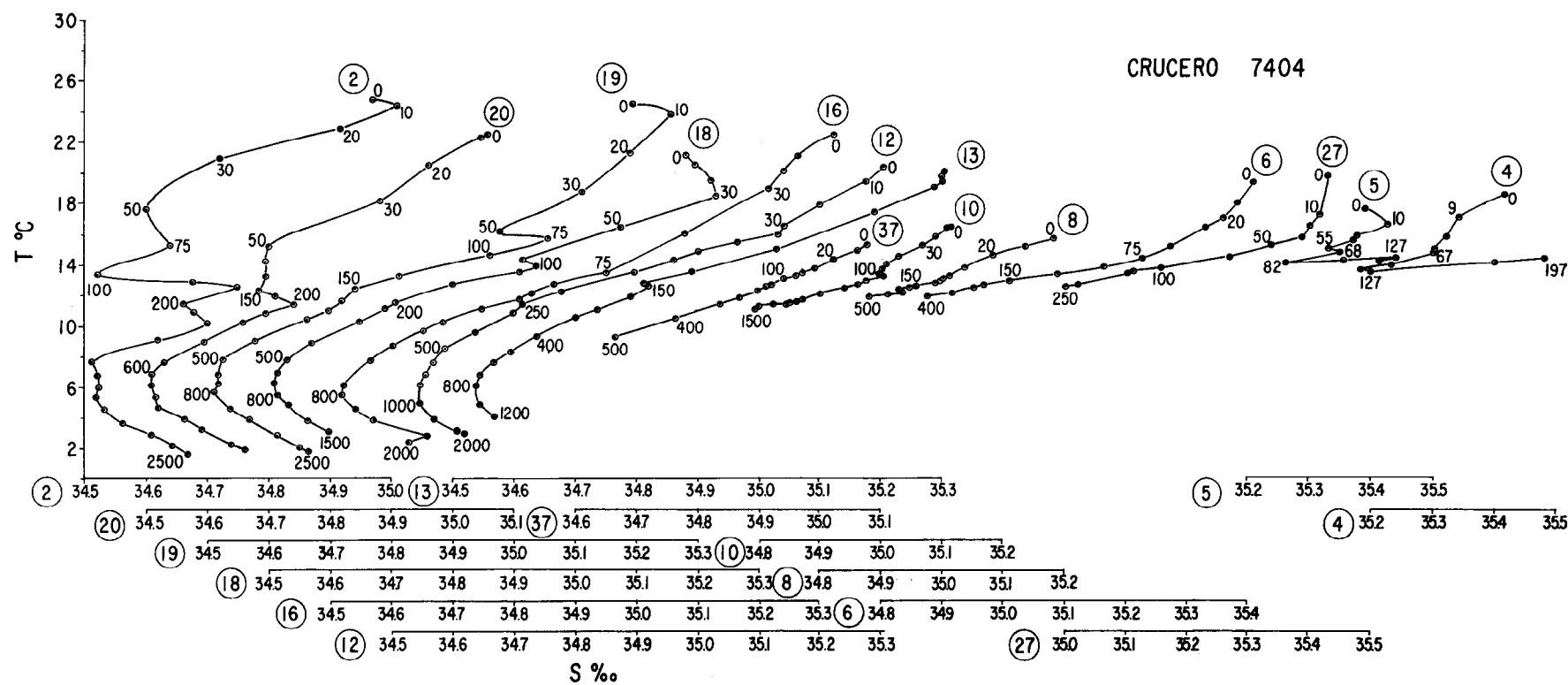


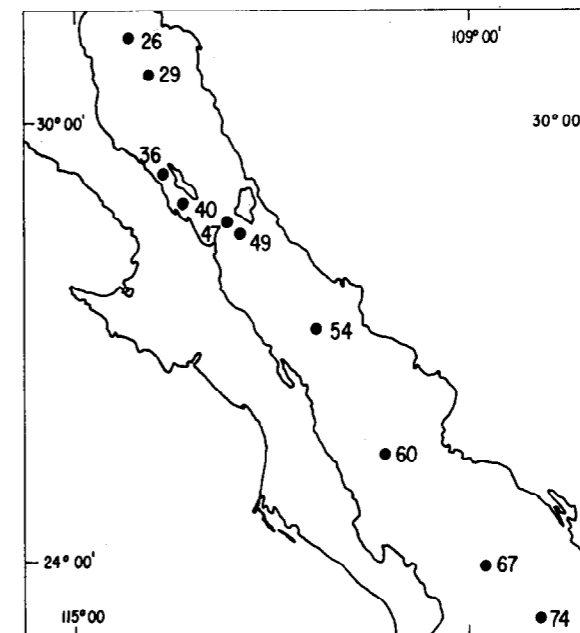
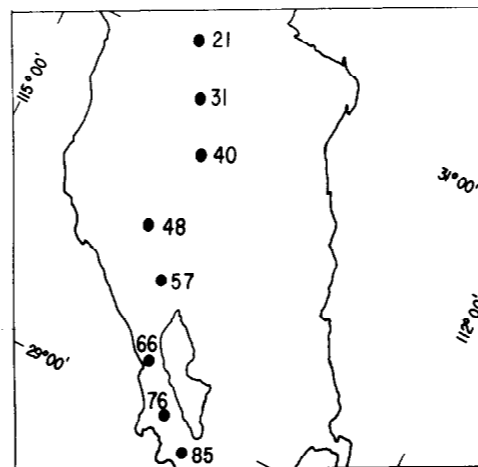
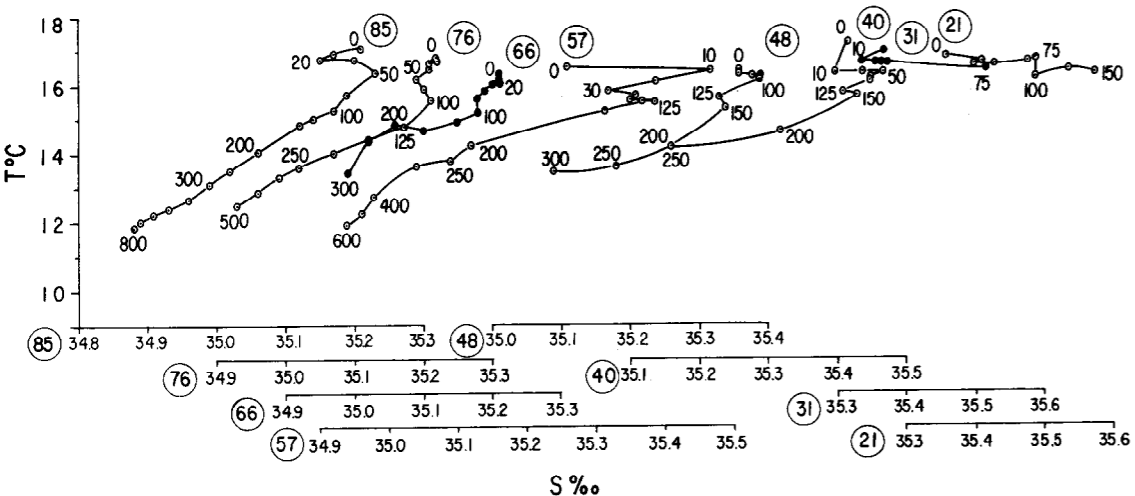
Fig. 3. Diagramas T-S para estaciones hidrográficas ocupadas en el Golfo de California en abril de 1974 (parte superior) y octubre de 1974 (parte inferior). Los números encerrados en círculos son las estaciones cuyas localizaciones se muestran en los mapas de la derecha. Los números en los diagramas T-S son las profundidades en metros, de esos puntos. La escala de la salinidad está corrida hacia la derecha en cada caso (generalmente una décima de parte por mil) para evitar las aglomeración de los diagramas. T-S diagrams for the April 1974 cruise (upper diagram), and the October 1974 cruise (lower diagram). Encircled numbers are the stations. Their locations are in the maps on the right. Numbers by the T-S diagrams are depths in meters. The salinity scale is moved to the right in each case (generally 0.1‰) to avoid agglomeration of diagrams.

"winter" conditions. Convective overturn was stronger in March 1973 than in April 1974. This indicates that the convection was relaxing in April. The period and intensity of the convective overturn might vary from year to year depending on the atmospheric conditions.

With exception of the shallow northernmost Gulf, minimum surface temperatures are always found at Ballenas channel, and in general around Angel de la Guarda island (Figs. 3 and 4) (Robinson, 1973). The T-S diagrams of Ballenas channel (stations 8 and 10 of April 1974; 44, 53, 54 and 68 of October 1974; 66, 76 and 85 of March 1973; and 36 and 40 of June 1957) only distinguish with clarity the surface and bottom waters. As it was mentioned above, the bottom water results from mixing with water in the top 450 m. In both cruises of 1974, T-S diagrams are almost linear; although they show slight curvatures indicating mixing between more than two water masses. T-S diagrams from March 1973 show a subsurface curvature (50 to 120 m) towards greater salinity values. This possibly indicates the presence of the winter water in Ballenas channel. T-S diagrams of 1957 have irregularities supported only by one datum in each case, therefore it is difficult to give conclusions based on them. We have to take into consideration that salinity was determined by chlorinity titrations at that time, with less precision and reliability. However, a salinity maximum at 189 m, detected at station 36, could be correlated with the maximum at station 47, at the same depth. If this is real, it would indicate the presence of subsurface subtropical water in Ballenas channel in June 1957.

T-S diagrams of the southern Gulf clearly show the subsurface salinity minimum and maximum at the entrance region (Figs. 3 and 4). In the case of the 1974 cruises (Fig. 3) we can appreciate a difference in the penetration of these subsurface extrema towards the interior of the Gulf. In the April cruise these extrema have almost totally disappeared off La Paz and Topolobampo (station 18). At station 16 the T-S diagram is almost linear between the surface and the deep salinity minimum. Whereas, in the October cruise the T-S diagrams show curvatures, remnants of the extrema, further north than off Guaymas (station 12). This suggests that the surface Eastern Tropical Pacific and subsurface subtropical waters invade only the entrance region of the Gulf during "winter" (winter and beginning of spring); while they invade practically all the Gulf south of Angel de la Guarda and Tiburon islands during "summer" (end of spring, summer and fall). Data from June 1957 also indicate that these

CRUCERO 7303



CRUCERO 5706

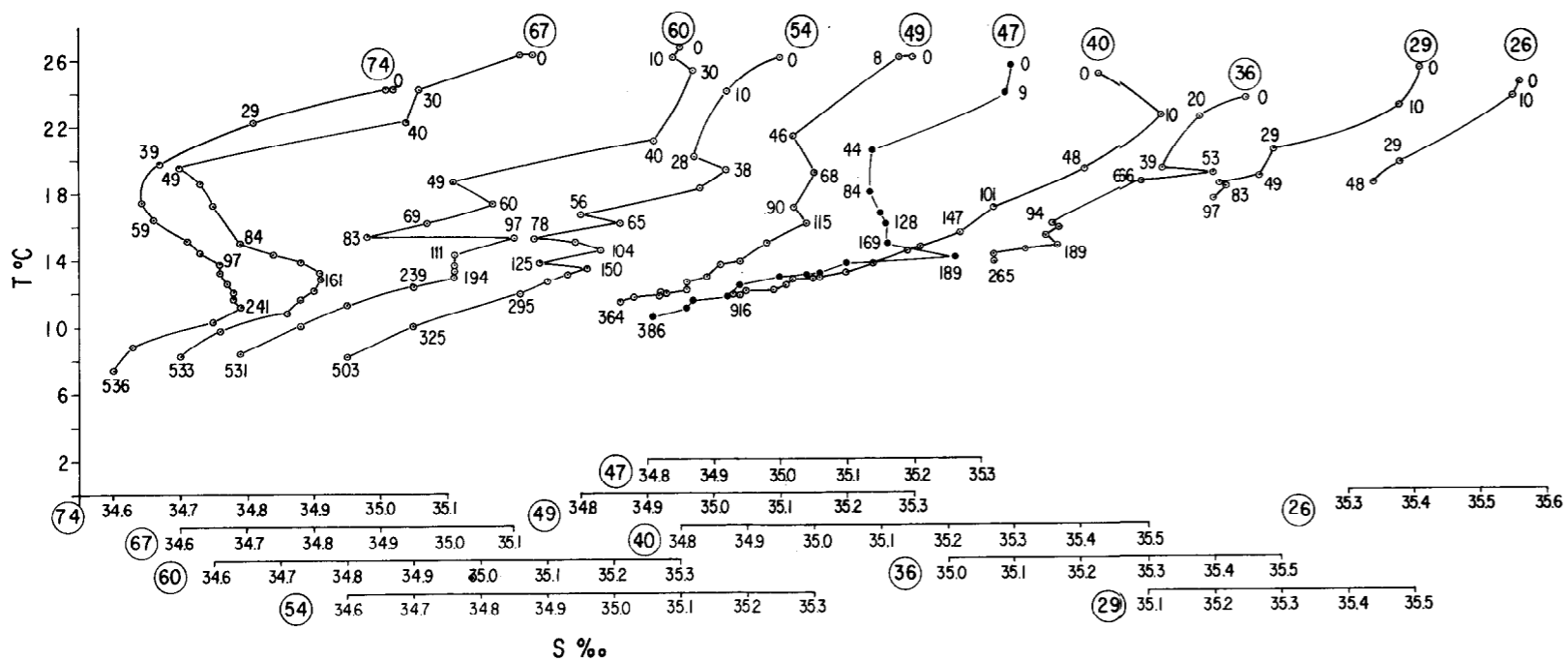


Fig. 4. Diagramas T-S para estaciones hidrográficas ocupadas en el Golfo de California en marzo de 1973 (parte superior) y en junio de 1957 (parte inferior). Los números encerrados en círculos son las estaciones cuyas localizaciones se muestran en los mapas de la derecha. Los números en los diagramas T-S son las profundidades en metros, de esos puntos. La escala de la salinidad está corrida hacia la derecha en cada caso (generalmente una décima de parte por mil) para evitar la aglomeración de los diagramas. T-S diagrams for the March 1973 cruise (upper diagram), and the June 1957 cruise (lower diagram). Encircled numbers are the stations. Their locations are in the maps on the right. Numbers by the T-S diagrams are depths in meters. The salinity scale is moved to the right in each case (generally 0.1‰) to avoid agglomeration of diagrams.

WATER MASSES OF THE GULF OF CALIFORNIA

water masses invade all of the southern Gulf. The subsurface salinity minimum and maximum are clearly distinguishable up to around Tiburon island in these latter data (station 47, Fig. 4). And, as it was mentioned above, possibly these water masses also invaded Ballenas channel in June 1957.

With available data it is not possible to make conclusions on changes from year to year. Nevertheless, it is interesting to note that 1957 was a year with a strong "El Niño" event, while 1974 was a year with "Anti El Niño" conditions (Quinn, et al., 1978). This could have a relation with the stronger invasion of the Eastern Tropical Pacific and subsurface subtropical water masses into the Gulf during "summer" of 1957 than during "summer" of 1974, as the data seem to indicate. Although, an alternative explanation, more acceptable for the moment, is that in June the penetration of the water masses is stronger than in October, when it is relaxing. More appropriate data are needed.

RECONOCIMIENTOS.

Agradecemos a Gemma Rodríguez Macouzet y Manuel de Jesús Acosta Ruíz su colaboración en la elaboración de las gráficas.

ACKNOWLEDGMENTS.

We thank Gemma Rodríguez-Macouzet and Manuel de Jesús Acosta-Ruíz for drafting the figures.

BIBLIOGRAFIA.

- ALVAREZ BORREGO, S. y L. A. Galindo Bect. 1974. Hidrología del Alto Golfo de California - I. Condiciones durante otoño. Ciencias Marinas (Mex), Vol.1, Núm. 1:46-64.
- ALVAREZ BORREGO, S., B.P. Flores Baez y L.A. Galindo Bect. 1975. Hidrología del Alto Golfo de California - II. Condiciones durante invierno, primavera y verano. Ciencias Marinas (Mex), Vol. 2, Núm. 1:21-36.
- ALVAREZ BORREGO, S., J.A. Rivera, G. Gaxiola Castro, M.J. Acosta Ruíz y R.A. Schwartzlose. 1978. Nutrientes en el Golfo de California. Ciencias Marinas (Mex), Vol. 5, Núm. 2:53-71.
- GAXIOLA CASTRO, G., S. Alvarez Borrego y R.A. Schwartzlose. 1978. Sistema del Bióxido de Carbono en el Golfo de California. Ciencias Marinas (Mex), Vol. 5, Núm. 2:25-40.

- GRANADOS GALLEGOS, M.L. 1974. Distribución de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto en el Golfo de California, en noviembre de 1972. Tesis de Licenciatura. Escuela Superior de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B. C. 56 pp.
- QUINN, W.H., D.O. Zopf, K.S. Short and R.T.W. Kuo Yang, 1978. Historical trends and statistics of the southern oscillation, El Niño, and Indonesian droughts. Fishery Bulletin. Vol. 76, Num.3:663-678.
- ROBINSON, M.K., 1973. Atlas of monthly mean sea surface and subsurface temperatures in the Gulf of California, Mexico. San Diego Society of Natural History. Memoir 5. 97 pp.
- RODEN, G.I., 1964. Oceanographic aspects of the Gulf of California. In: van Andel, Tj. H. and G.G. Shor, Jr. (editors). Marine Geology of the Gulf of California: A symposium. Amer. Assoc. Petroleum Geologists. Memoir 3:30-58.
- RODEN, G.I. and G.W. Groves, 1959. Recent oceanographic investigations in the Gulf of California. Marine Res. Jour. Vol. 18, Num. 1:10-35.
- RUSNAK, G.A., R.L. Fisher and F.P. Shepard, 1964. Bathymetry and faults of Gulf of California. In: van Andel, Tj. H. and G.G. Shor, Jr. (editors). Marine Geology of the Gulf of California: A symposium. Amer. Assoc. Petroleum Geologists. Memoir 3:59-75.
- SHEPARD, F.P., 1950. Submarine topography of the Gulf of California, pt. 3 of the 1940 E.W. Scripps cruises to the Gulf of California. Geol. Soc. Amer. Mem. 43, 32 pp.
- STEVENSON, M.R., 1970. On the physical and biological oceanography near the entrance to the Gulf of California, October 1966 - August 1967. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm. Bull. 4, Num. 3:389-504.
- SVERDRUP, H.U., 1941. The Gulf of California: preliminary discussion on the cruise of the E.W. Scripps in February and March 1939. 6th Pacific Sci. Cong. Proc. Vol. 3:161-166.
- VAN ANDEL, Tj. H., 1964. Recent marine sediments of the Gulf of California. In: van Andel, Tj. H. and G. G. Shor, Jr. (editors). Marine Geology of the Gulf of California: A Symposium. Amer. Assoc. Petroleum Geologists. Memoir 3:216-310.