

INTER-AMERICAN TROPICAL TUNA COMMISSION COMISION INTERAMERICANA DEL ATUN TROPICAL

Bulletin — Boletín

Vol. 14, No. 3

**ON THE PHYSICAL AND BIOLOGICAL OCEANOGRAPHY
NEAR THE ENTRANCE OF THE GULF OF CALIFORNIA,
OCTOBER 1966 — AUGUST 1967**

**OCEANOGRAFIA FISICA Y BIOLOGICA CERCA A LA
ENTRADA DEL GOLFO DE CALIFORNIA,
OCTUBRE 1966—AGOSTO 1967**

by — por

Merritt R. Stevenson

La Jolla, California

1970

CONTENTS—INDICE	
ENGLISH VERSION—VERSIÓN EN INGLÉS	
	Page
ABSTRACT.....	389
INTRODUCTION.....	389
Observations.....	390
Acknowledgements.....	391
DESCRIPTION OF THE AREA.....	391
Meteorology.....	391
Water characteristics.....	392
Surface circulation.....	393
DISCUSSION.....	393
Surface currents.....	393
Currents at 100 m.....	395
Observed water characteristics.....	396
Surface features.....	397
Vertical distribution of temperature and salinity.....	398
Mixed layer depth, Secchi disc depth, chlorophyll concentration, carbon fixation and solar radiation.....	400
SUMMARY AND CONCLUSIONS.....	404
FIGURES—FIGURAS.....	407
TABLE—TABLA.....	481
 VERSION EN ESPAÑOL—SPANISH VERSION	
	Página
EXTRACTO.....	482
INTRODUCCIÓN.....	482
Observaciones.....	483
Reconocimiento.....	484
DESCRIPCION DEL AREA.....	484
Meteorología.....	484
Características del agua.....	485
Circulación superficial.....	486
DISCUSIÓN.....	487
Corrientes superficiales.....	487
Corrientes a 100 m.....	489
Características observadas del agua.....	489
Características de la superficie.....	490
Distribución vertical de temperatura y salinidad.....	492
Profundidad de la capa mixta, profundidad del disco Secchi, concentración de clorofila, fijación de carbono y radiación solar.....	494
SUMARIO Y CONCLUSIONES.....	498
LITERATURE CITED—BIBLIOGRAFIA CITADA.....	502

**ON THE PHYSICAL AND BIOLOGICAL OCEANOGRAPHY
NEAR THE ENTRANCE OF THE GULF OF CALIFORNIA,
OCTOBER 1966-AUGUST 1967**

by

Merritt R. Stevenson

ABSTRACT

A study of the temporal and spatial distribution of larval tunas and the concomitant oceanic conditions was made in cooperation with the Dirección General de Pesca e Industrias Conexas of Mexico. Field work consisted of eight hydrographic cruises made from October 1966 through August 1967 near the entrance of the Gulf of California.

From January through April, surface currents were southerly at velocities up to 20 cm/sec; currents in June were variable in direction and mostly less than 10 cm/sec; by August the surface current was northerly at 10-15 cm/sec. Surface winds were usually secondary to the distribution of mass as an influence on the surface circulation. Currents at 100 m were generally similar in direction to those at the surface, but the water moved more slowly. Between the surface and 100 m, southbound currents crossed the entrance of the Gulf at velocities of 5-10 cm/sec during January and April, forming frontal boundaries with the California Current water, which often occurred south of the entrance.

From April to August, the median concentration of surface chlorophyll *a* increased from 0.65 to 0.97 mg/m³, while the median productivity increased from 5.6 mgC/m³/day in April to 17.8 mgC/m³/day in June before returning to 2.6 mgC/m³/day in August. Primary productivity was closely correlated with the concentration of surface chlorophyll *a*. Productivity was generally higher in the vicinity of the Gulf than that found for water in the open Pacific. Productivity was highest near Islas Las Tres Marias and second highest near Cabo San Lucas, both locations of local upwelling. The standing crop of phytoplankton was shown to be subjected to progressively heavier grazing pressure in the spring and summer by zooplankton.

INTRODUCTION

The waters off the coast of central Mexico are important to the fishing industries of the United States and Mexico because they support a large population of yellowfin tuna, *Thunnus albacares*. Though adult fish occur here throughout the year, they exhibit a great deal of mobility. Tagging studies (Schaefer, Chatwin, and Broadhead 1961) and data on the distribution of the catches (Calkins and Chatwin 1967) show that the areas in which yellowfin occur in highest abundance appear to change seasonally along the Mexican coast.

The fish move from one oceanic regime to another during these migrations. Since the distribution and movements of the fish are believed to be influenced by the environment, it is necessary to understand the

oceanography of the region before the movements of the fish can be fully understood. Broadhead and Barrett (1964) and Blackburn (1963, 1965) have attempted to relate the distribution and abundance of tunas to various ocean properties such as wind, salinity, and surface temperature; they showed that temperature plays an important role in their distribution.

Though a great deal of work has been accomplished which attempts to relate the distribution of adult yellowfin tuna to physical, chemical and biological features of the ocean, little has been accomplished in relating the larval distribution of this species to such features. Such studies may make it possible to predict anomalous conditions in the ocean and their effect on the magnitude of a particular year class entering the fishery. To predict such fluctuations in year-class strength is essential if management agencies are to assure that maximum benefit is derived from the resources for which they are responsible.

To learn more about the relationship of the early life history of the yellowfin tuna to its environment, the Inter-American Tropical Tuna Commission initiated a 2-year cooperative investigation termed the Mazatlan Project, with the Dirección General de Pesca e Industrias Conexas (DGP) of Mexico in August 1966. The project involved monthly cruises of about 5 days along a triangular track between Mazatlan, Cabo San Lucas, and Islas Las Tres Marias (Figure 1). The facilities for the field work were provided by the DGP at its laboratory in Mazatlan and aboard its research vessels *Yolanda* and *Tuxpan*. In January 1967 the Mazatlan Project was incorporated as a part of EASTROPAC, an international cooperative study of the eastern tropical Pacific Ocean.

This report is concerned primarily with the temporal and spatial distribution of temperature and salinity in the area of investigation. The relations of phytoplankton production and abundance to the physical environment and of the zooplankton abundance to the phytoplankton abundance are examined. An analysis attempting to relate the distribution of the larvae to the environment is made in a separate publication (Klawe, Pella, and Leet, *in press*). A data report containing the details of the eight cruises, together with observations collected during each cruise (Leet and Stevenson 1969), is available.

Observations

The dates for the eight cruises completed during the investigation are:

- 1st Cruise (MZ-1), 15-19 October 1966
- 2nd Cruise (MZ-2), 10-16 November 1966
- 3rd Cruise (MZ-3), 10-14 December 1966
- 4th Cruise (MZ-4), 10-14 January 1967
- 5th Cruise (MZ-5), 16-20 February 1967
- 6th Cruise (MZ-6), 14-18 April 1967
- 7th Cruise (MZ-7), 22-29 June 1967
- 8th Cruise (MZ-8), 23-27 August 1967

During each cruise 15 to 17 stations were occupied within 1 hour of local sunrise, noon, sunset, and midnight. Bathythermograph (BT) casts were made at each station to measure subsurface temperature, and Knudsen-Morrison bottles were used to collect water samples for the determination of salinity. No sub-surface salinity samples were collected on the first three cruises. Limited weather observations were made at each station at the time of each BT cast. Water transparency was determined by Secchi disc readings. A solar radiation recorder was installed atop the laboratory at Mazatlan just prior to the sixth cruise.

Zooplankton samples were collected by making surface and oblique net tows at each station. Samples of young fish were collected at night by dip netting under a floodlight on the last three cruises. Estimates of the phytoplankton concentration at the surface were made by the measurement of the plant pigments, chlorophyll *a* and phaeophytin *a*. Carbon fixation by phytoplankton was measured by the uptake of C¹⁴.

Acknowledgements

Preparation of this report has been greatly facilitated with assistance from the following persons: Mr. Christopher Psaropoulos who assisted with the computer processing of the data, and Messrs. Robert Wagner and George Even, Miss Christine Dall, and Mrs. Judi Shepard who helped in the preparation of the figures. Helpful suggestions were offered by Mr. Gunnar Roden, Dr. Maurice Blackburn, and Mr. Kimball Crocker.

DESCRIPTION OF THE AREA

Meteorology

The region bounded by Mazatlan and Cabo San Lucas in the north and Cabo Corrientes in the south is a warm and relatively humid area. The monthly mean air temperature is 28-30°C in July, and 17-22°C in January. The rainfall decreases from 100 cm/year near Cabo Corrientes to less than 50 cm/year at Topolobampo in the southern part of the gulf; 75-90% of the precipitation is received from May through October (Roden 1964).

West of Baja California the prevailing northerly winds are the driving force of the California Current. Due to seasonal change in the Trade Winds, the predominant winds in the area of investigation blow from the northwest at about 5 m/sec during winter and spring and from the southeast at about 3 m/sec during summer and fall (Hubbs and Roden 1964). These winds are generally responsible for the northwesterly seasonal transport of Eastern Tropical Pacific water into the vicinity of the Gulf. In addition, land and sea breezes near the coast help to move the surface water offshore or onshore.

From June through October strong local storms or gales called *chubascos* may occur and last for several days. Hurricanes also sweep into the area, especially in September.

The predominantly clear skies and the latitudinal position of the area result in large amounts of insolation. The monthly amount of incoming solar radiation for the latitudes 20° and 25° is shown in Figure 2. The energy curves are based on accumulated data for clear skies and are smoothed (Roden 1959). The seasonal rate of evaporation from coastal station estimates is fairly constant and amounts to 200-250 cm/year (Roden 1964).

Water characteristics

The area of the present study is considered to be a transition region in which three main water masses interact to produce a complex local circulation. These water masses, shown in Figure 3, are: 1) cool California Current water of low salinity ($S \leq 34.60\%$), which flows southward along the west coast of Baja California; 2) warm eastern tropical Pacific water of intermediate salinity ($34.65 \leq S \leq 34.85\%$), which flows into the area from the southeast; 3) and warm highly saline ($S \geq 34.90\%$) Gulf of California water (Roden and Groves 1959; Griffiths 1965) which appears intermittently.

In addition to the three water masses described above, Wyrtki (1967) has defined Subtropical Surface and Subtropical Subsurface water in this area. Subtropical surface water is formed by heating and evaporation of California Current surface water. Subtropical Subsurface water is the subsurface portion of the eastern tropical Pacific water referred to by Roden and Groves (1959). It originates at the sea surface south of the equator, sinks while flowing northward, and mixes with the Equatorial Undercurrent water with a consequent decrease in salinity. It then undergoes further horizontal expansion and northward movement to the entrance of the Gulf of California, where it is found at about 200 m with a salinity maximum greater than 34.7% . Griffiths (1968) has included Subtropical Surface and Subtropical Subsurface water in his comprehensive analysis of water masses near the entrance to the Gulf of California.

Frequently the meeting of California Current water with eastern tropical Pacific water or Gulf of California water near the entrance of the Gulf produces abrupt changes in temperature and salinity which are called *fronts*. Temperature and salinity values across a front may change by as much as 4°C and 0.5% in 60 miles, although regions possessing weaker gradients are often denoted as frontal. In this paper, front will refer to a horizontal area in the ocean across which there is an abrupt change in temperature, salinity, or some other property (Cromwell and Reid 1956; Clarke and Laevastu 1967). Frequently the gradients extend vertically also. Such boundaries separate adjacent water masses (Uda 1959; Griffiths 1965), but may also represent the border where a portion of one water mass has upwelled near the coast. Dynamic instabilities frequently occur along fronts where water of greater density overrides water of lesser den-

sity. Such instability may occur in the upper 200 m, and is usually evidenced by inversions in temperature and salinity. The characteristics of the surface fronts near Cabo San Lucas were the basis of a study by Griffiths (1965). At times the fronts in this area may be submerged with little or no change detectable at the surface (Wooster and Jones 1966).

The oceanic boundary for the Gulf of California is delineated by temperature and salinity gradients; it is not confined to the geographic entrance, but may extend from Cabo San Lucas to Cabo Corrientes (Roden and Groves 1959).

Surface circulation

The circulation in the area is dependent primarily upon the movements of the three water masses and the surface winds. The flow of the California Current along the west coast of Baja California from January through June is southerly and parallel to the shore at speeds of about 12 cm/sec; in July and August its direction changes to the northwest and it continues as a weak offshore current (≤ 5 cm/sec) through December (Wyrtki 1965). Detailed features of the surface circulation along the western Baja California coast, as inferred from computations of geostrophic flow, are given by Wyllie (1966). Estimates of the surface geostrophic currents near Cabo San Lucas based on 500- and 1000- decibar surfaces are given by Griffiths (1968) for the period of April-May 1960. The average surface circulation in the area between Mazatlan, Cabo San Lucas and Cabo Corrientes is similar to that along the west coast of Baja California; that is, from November through April the surface water moves in a southerly direction at speeds of 8-10 cm/sec; in May and June the surface drift changes direction, and by August it has a northwesterly set (5-7 cm/sec) that continues through October. The coastal currents, however, may depart considerably from and be in opposition to the direction of the flow farther offshore. Details of the *mean* monthly surface circulation based on ships' drift data have been outlined by Cromwell and Bennett (1959) and Wyrtki (1965).

DISCUSSION

Surface currents

Surface currents (Fig. 4) and those at a depth of 100 m (Fig. 5) were determined from the geostrophic approximation for the last five cruises. These currents are relative since the motion is referred to the 250- decibar surface (approximated by the pressure level at 250 m) and assumes a zero flow at 250 m, the greatest standard reference level for which data were available. A comparison of the 250 m level of no-motion with currents based on the 500 m surface (Roden and Groves 1959), however, suggests that currents at 250 m are probably less than 2 cm/sec. Briefly stated, with

x directed to the east and y to the north, the horizontal pressure gradient is equated with Coriolis acceleration *i.e.*,

$$\begin{aligned}-fv &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ fu &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ g &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}\end{aligned}\quad (1)$$

where u and v are the east-west and north-south current velocities; f is the Coriolis acceleration and varies with the latitude denoted by ϕ ($f = 1.45 \times 10^{-4} \sin \phi$); ρ is the water density; g is the acceleration of gravity; and the remaining terms are the horizontal and vertical pressure gradients. Other accelerations and forces are assumed negligible in this approximation. In practice geostrophic currents are determined from measurements of temperature and salinity at different depths.

One complication that arises in the use of geostrophic currents is that periodic motions *i.e.*, tides, are frequently superimposed on the geostrophic flow. Tides are known to become progressively larger with increased distance into the Gulf from the entrance. Although records of sea level and surface barometric pressure have been examined and their interaction estimated for the lower Gulf, the amount of correction necessary to remove the effects of tidal motion from geostrophic currents is uncertain.

Geostrophic surface currents based on the observed data are in reasonable agreement with the generalized circulation for the area. That is, from January-April surface water flowed in a southerly direction between Cabo San Lucas and Cabo Corrientes at speeds up to 20 cm/sec. A portion of the California Current departed from this general pattern in January, however, when it turned north and entered the entrance to the Gulf. With the approach of June the circulation became progressively more non-uniform. Southeasterly flow was still present near 20°N in June but near Cabo San Lucas an eddy rotated clockwise at speeds as high as 20 cm/sec; near the mainland a northerly coastal current began to form. By August the surface flow had a definite northwest set and moved toward the vicinity of Cabo San Lucas; there water flowed southwesterly across the western side of the Gulf entrance.

Details of average surface currents entering and leaving the Gulf (Wyrski 1965) differ somewhat in their time and location of occurrence from the circulation inferred from the present study. There is only fair agreement between the surface circulation during April and June of the present study and that during May 1960 (Griffiths 1968). The variations may be attributed to year-to-year differences in the surface currents, to the use of different reference pressure levels and to a complicated local circulation.

Surface currents are also produced by an applied wind stress on the sea surface. The frictional stress due to the wind is normally assumed to diminish with depth and become zero at some point referred to as the depth of zero frictional (wind) resistance. These wind-induced currents are referred to as Ekman currents and are assumed to flow 45° to the right of the wind's direction in the northern hemisphere. The wind observations for the eight cruises were converted to stress values by the relation.

$$\tau = 3 \times 10^{-6} W^2, \quad (2)$$

where W is the near-surface wind speed in cm/sec and the constant embodies those factors necessary to convert wind speed to stress units of dynes/cm². The associated surface Ekman currents were then determined from a relationship given by Sverdrup *et al* (1942);

$$v_s = \frac{\sqrt{2\pi\tau}}{\rho f D} \quad (3)$$

where ρ is the water density; f is the Coriolis acceleration as defined above in (1) and D is the maximum depth of frictional resistance, assumed to be 30 m to correspond with the depth of the mixed layer. After the wind stress values for the cruises were determined, the associated Ekman current values were computed. Emphasis was given to locate those observations where the Ekman currents were 10% or more of the magnitude of the geostrophic currents. Only during the June 1967 cruise was the wind strength adequate to produce the specified Ekman currents.

The strongest wind-induced currents during the June 1967 cruise were immediately south of Cabo San Lucas where speeds were estimated to be up to 73 cm/sec (Fig. 6). Farther south an eddy-like Ekman current was evident with speeds of 10-16 cm/sec. The eddy-like features in the wind-driven currents and the geostrophic circulation were due to a storm in the vicinity of stations 9-11. Winds in excess of 20 m/sec (40 kts) were observed but hydrographic observations were not made until storm conditions abated. A comparison of the wind-driven currents and geostrophic currents from this cruise shows that the former were frequently oblique or even in opposition to the latter.

Currents at 100 m

The circulation at 100 m (Fig. 5) from January to April was, for the most part, similar to the surface circulation. During January the subsurface flow near Cabo San Lucas was southeasterly at 10 cm/sec but near 108°W, water crossed into the Gulf, east of 108°W, saline Gulf water flowed out across the entrance at 5-10 cm/sec. By the following month the subsurface flow had reverted to a uniform southeasterly set at 15 cm/sec. The sub-surface circulation from April through June was similar to the respective surface currents but at reduced speeds. Agreement between

the horizontal circulation at 125 m in May 1960 (Griffiths 1968) and the circulation at 100 m in April and June 1967, was rather poor; the discrepancy was due in part to the 25 m difference on the subsurface surfaces selected. Between June and August the currents at 100 m shifted to a northwesterly set. Water from the southeast entered the Gulf entrance on the eastern side and left on the western side.

Observed water characteristics

Since water masses are characterized by specific temperature-salinity (T-S) relationships, comparison of individual T-S curves may provide information about the extent of interaction and mixing of two or more water masses. A T-S envelope based on observations discussed by Griffiths (1965) is shown in Figure 3 for each of the three water masses. Although the temperature and salinity of near-surface water are affected by precipitation, evaporation and solar radiation, local differences caused by these factors frequently may be assumed small for the same locality and time periods, in comparison with those caused by the interaction of the three water masses present in the region. An example of the variations in temperature and salinity noticeable at each station and from station to station are shown for the MZ-4 cruise (Fig. 7).

The T-S curves for the fourth cruise (January) show a definite progression from eastern tropical Pacific water on the eastern side of the Gulf entrance (sta. 1, 2, 3 except for Gulf of California water at the surface of 1 and 2), to Gulf of California water about midway along the entrance (sta. 4), to California Current water near Cabo San Lucas (sta. 6, 7, 8). To the south and near the mainland (sta. 10-16), the T-S relationships imply the presence of water formed by both California Current and eastern tropical Pacific waters. T-S curves for the stations 4 and 6 underwent sizeable salinity displacement near the 300 cl/T (thermosteric anomaly in centiliters/metric ton) density surface and resulted from the proximity of California Current and Gulf of California waters.

A month to month comparison of T-S curves with the reference water-mass envelopes reveals the occurrence of warm salty water in a thin surface layer along the Gulf entrance in January, April and June, indicating Gulf of California water leaves the Gulf intermittently and in limited supply. The same salty water was evident also at some more southerly locations during January and June.

California Current water with a salinity $\leq 34.6\%$ was prevalent near Cabo San Lucas during this investigation and apparently occurs there throughout the year. In the area between Cabo San Lucas and Cabo Corrientes both California Current and eastern tropical Pacific water were found to a greater or lesser extent, depending upon the general circulation at that time. While the California Current influences the water characteristics in the area beyond Cabo San Lucas, most of the interaction occurs

above 100-150 m (based on available T-S curves). Tropical Pacific water is characterized by a salinity maximum of 34.7-34.8‰ and was usually found near 200 m. A detailed analysis of all the available T-S curves from this study will not be presented here.

Surface features

One of the unusual features in the area of investigation is a large annual change in surface temperature that frequently reaches 9°C (Roden and Groves 1959; Wyrtki 1964). The salinity range is considered to be about 0.4‰ and shows little seasonal influence (Roden 1964). Monthly surface charts by Bennett (1966) show a range of 0.5‰ or more. During the period of this investigation the annual range of temperature and salinity was 19.7°C to 29.8°C and 34.14‰ to 35.42‰ respectively (Fig. 8). The mean* temperature observations show a strong seasonal cycle with the lowest value in January. The salinity observations indicate a small semi-annual cycle. Data for rainfall at Mazatlan (Fig. 8), compiled monthly by the World Meteorological Organization (1968), show little if any relationship to the salinity changes in the offshore area. Surface salinities at the nearshore stations, however, drop by 0.4‰ in the July-August period, when most rainfall is received. The rainfall during August can readily account for the observed decrease in salinity. Seasonal changes in the thickness of the mixed layer can also be seen in Figure 8. The thickness of the mixed layer varies annually with an annual mean of 30 m and a range of 5 m to 100 m. The thickness of the mixed layer appears to be inversely related to fluctuations in the mean surface temperature. A comparison of the month-to-month observations of surface temperature, salinity and density may be made from Figure 9 and for thickness of mixed layer from Figure 11.

Sizeable variations in temperature, salinity and density occurred on a month-to-month basis and also within a single cruise period. Although Gulf water appeared infrequently on T-S diagrams, surface outflow across the Gulf entrance apparently took place during most of the cruise periods (see salinity charts, Fig. 9).

From October through December, for example, the average surface circulation between Cabo San Lucas and Cabo Corrientes called for a northwesterly set (Wyrtki 1965). The winds measured aboard the cruise vessel from October through December were so oriented as to produce a surface Ekman current across and out of the Gulf entrance. An outflow of warm, salty surface water present at the eastern end of the Gulf en-

*Weighted mean surface temperatures for each cruise were determined as follows: the areas contained between isotherm intervals were first planimetrically integrated and then multiplied by the mean temperature of the respective interval. The weighted temperatures were summed and then divided by the area contained within the cruise track. The same method was used to determine values for the monthly mean salinity and depth of the mixed layer.

trance in October was progressively advected westward along the entrance and by January was finally located south of Cabo San Lucas; this outflow diminished appreciably in the period of several months. During the same time interval, tropical Pacific water was evident from Cabo Corrientes north to the vicinity of the Gulf entrance. California Current water was present in limited quantity south and west of Cabo San Lucas as denoted by the area enclosed by the 34.6‰ isohaline. During January cold water of intermediate salinity appeared along the Gulf entrance at 109°W, representing modified California Current water that was either advected into the area by surface currents or representing a part of the sub-surface California Current that surfaced (Fig. 9).

From February to April, low surface temperatures reflected the seasonal reduction in insolation. Low salinities were widespread during February indicating a minimal output of Gulf water beyond the Gulf entrance. Precipitation was not responsible for the reduced salinity since there was no rainfall from February through April. The California Current was evident in the general area but the surface layer had been modified by a combination of wind mixing and evaporation. By April incoming Eastern Tropical Pacific water from southeast of Cabo Corrientes had increased the surface salinity in the eastern half of the region by about 0.3‰, California Current water was dominant west of 108°W. A comparison of the temperature and salinity distributions described by Griffiths (1968) with those of the present study shows that temperature and salinity conditions during May 1960 were similar to those made during April and June 1967, except near Cabo San Lucas where the April and June salinities were lower than during May 1960.

The period from June to August can be considered a transitional interval since the surface winds and currents shifted from a southerly flow to a northwesterly set. With the exception of the eddy feature south of Baja California, surface currents were slow in June. A sizeable part of the surface area contained warm water with a salinity $\geq 35.0\text{\textperthousand}$. Most of the increase in salinity from April to June is attributed to evaporation. Water with a salinity $\geq 35.1\text{\textperthousand}$ was limited to a northerly coastal flow where the temperature was 27°C or more. Surface salinities were lower during August than during June due to 40 cm of rain (measured at Mazatlán) during August. In particular, salinities were reduced in an elliptical path from Islas Las Tres Marias to the entrance of the Gulf. Northwesterly surface currents from the vicinity of Cabo Corrientes were responsible for advecting coastal water of lower salinity toward the northwest.

Vertical distribution of temperature and salinity

Two vertical sections are presented for temperature and salinity for each cruise (Fig. 10). The northern section includes those stations that bound the Gulf entrance; the southern section contains those stations whose positions form a line from Cabo San Lucas to the southeasternmost

station near Cabo Corrientes. Only temperature sections are available from the first three cruises.

The vertical temperature sections for the period October-December contain numerous inversions between the surface and 250 m. Inversions as large as 1°C were evident along the southern sections at depths of 100-175 m. Thermal inversions usually result from advective processes in which cool water flows over warm resident water or when warm water flows beneath cool resident water. The position, intensity and extent of area coverage, therefore, can be used to indicate the degree of penetration of one water source into another. During October, for example, an inversion between the 15°C and 16°C isotherms was present in the southern section and spread out horizontally for 96 km (53 mi). The rate of advection in this instance was equal to or greater than the dissipative forces of mixing.

Although thermal inversions greater than 1°C occurred along the southern sections in the last five cruises, the local interactions are best detailed by the two salinity sections (Fig. 10). A southerly subsurface current moving at about 13 cm/sec from the Gulf of California was represented on both sections as a near-surface core of high salinity ($S \geq 34.9\%$). Between the two maximum salinity cores, a distance of 128 km (71 mi), the salinity decreased by 0.2% and spread out horizontally due to mixing processes. To the west a salinity minimum core representing the California Current flowed at about the same speed beneath the saline current leaving the Gulf. The most intense thermal inversions along the southern section occurred below the high and low salinity cores.

The only southbound current from the Gulf readily identified during the February-April period was evident along the eastern side of the entrance. In this period, however, the salinity minimum core of the California Current extended along the entire length of the southern section. The low salinity core was accompanied by a temperature inversion zone during February that extended horizontally for at least 208 km (115 mi). The inversion zone was again located beneath the low salinity core. In April the California Current more effectively penetrated the resident water between Cabo San Lucas and Mazatlan than during any other period of the investigation. The presence of low salinities ($S < 34.0\%$) along the Gulf entrance formed a frontal system that extended from the surface to 150 m depth. The occurrence of submerged fronts near 20°N, 120°W have been described by Wooster and Jones (1966).

During June saline water flowed from the eastern side of the Gulf entrance and remained on the surface as far south as the southern section. A second low-salinity core appeared next to the one remaining along the southern section from April but the salinities of both diminished by about 0.2%. The surface circulation and that at 100 m indicated a clockwise movement to the water as previously noted, with a northerly flow to the east of the eddy. The western core apparently flowed south-

ward while the eastern core moved in a northerly direction. It is uncertain whether the two minima constituted a part of the eddy or if they were part of the subsurface meandering flow. A comparison of appropriate salinity profiles from May 1960 (Griffiths 1968) with those from April and June of the present study reveals that the near-surface flow of the California Current (evidenced by salinity minimum core) was stronger during April and June than during May 1960.

Although the circulation assumed a northerly set during August, water entered the area from the vicinity of Cabo Corrientes in the south and from the west near Cabo San Lucas. To the north, subsurface water from the California Current continued to flow into the region at depths from 10 m to 150 m. The California Current also extended along the Gulf entrance, and at 100 m flowed into the Gulf. Temperature inversions accompanied the low salinity core associated with the California Current; the inversions were again located beneath the low salinity core.

Mixed layer depth, Secchi disc depth, chlorophyll concentration, carbon fixation, and solar radiation

Distributions of mixed layer depths and their relationship to biological productivity are of interest to biologists and oceanographers alike and have been the object of studies by Brandhorst (1958), Cromwell (1958), Forrester (1964), Wyrtki (1964) and others. The studies by Cromwell and Wyrtki are especially useful because monthly and seasonal maps of the mixed layer are included.

Mixed layer depth, as used in this paper, refers to the thickness of the layer of isothermal water near the sea surface. Cromwell (1958) attested to the difficulty of providing an objective definition of this term. Wyrtki (1964) stated that the temperature gradient must be greater than $0.2^{\circ}\text{C}/10\text{m}$ for the thermocline, but did not state the extent of variability allowable for the mixed layer. All determinations of the mixed layer depth for this study were made from BT traces and posed no problem in the majority of cases. Observations from adjacent stations were used as a guide in making decisions for the complicated traces.

Mean values of the mixed layer depth were determined for each cruise (Fig. 8) in the same manner as for the mean surface temperatures. The greatest mean mixed layer depth occurred during January, the smallest during August. An inverse relation is indicated between the mean surface temperatures and mixed layer depths; the deepest and shallowest mixed layer depths corresponded with the coldest and warmest water temperatures. Seasonal warming and cooling of the surface water by solar radiation (Fig. 2) would produce such an inverse relationship.

The depth of the mixed layer was found to vary both geographically and from month to month (Fig. 11). Changes in the mixed layer depth are brought about by the non-uniform action of wind mixing, by lateral

and vertical mixing processes associated with surface or near surface currents and, especially, by the heating effects of insolation. The mixed layer depth is biologically important since it affects the degree of replenishment of plant micronutrients in the depleted upper layers of the ocean by controlling the degree of vertical mixing with nutrient-rich deeper waters.

A trough located roughly along 109°W was a persistent feature throughout the investigation. From October through the following August the trough was positioned between 108° and $109^{\circ}30'\text{W}$ and varied in thickness from 25 m to 75 m, averaging about 45 m. The trough is attributed primarily to local mixing processes along the boundary of the California Current. The lack of temperature inversions within the trough suggests that advection was less important than lateral and vertical mixing. The maximum mixed layer depth observed occurred on the western side of the Gulf entrance during January. The trough was located between the California Current and the outflowing current from the Gulf. Vigorous mixing is assumed in such a location. A frequent shoaling of the mixed layer in the vicinity of Islas Las Tres Marias and Cabo Corrientes was associated with the movement of warm, low salinity water into the immediate area. The depth of the mixed layer in May 1960 (Griffiths 1968) and in April and June 1967, is quite similar.

When the necessary surface wind and current conditions are present, a small mixed layer depth can also be interpreted as implying the presence of upwelling. The ascending motion of water brings the thermocline near the surface with a corresponding decrease in the surface isothermal layer. Upwelling is found to some extent around most islands, the Islas Las Tres Marias being no exception. When surface wind and current conditions are favorable, *i.e.*, southbound in January and February, the mixed layer depth becomes less near the islands than for other locations in the general area. Although cool surface temperatures were not found near the islands, the field operations did not include a detailed sampling plan around the islands and perhaps for this reason the observed surface water temperatures near the islands were not indicative of upwelling. Low salinity surface water associated with the California Current was found to the south of the islands, however, and supports the idea of local upwelling since water of this salinity is found at 30-50 m depth farther west.

Concentrations of phytoplankton productivity and standing crop were estimated from several types of measurements. The Secchi disc was used during each cruise to provide an index of water transparency and, indirectly, to indicate the relative standing crop. Since water transparency is affected by inorganic suspended material introduced by coastal runoff and by the abundance of planktonic forms, the method is best employed away from areas influenced by coastal outfall. All Secchi disc observations during the investigation were made 20 km (11 mi) or more from land in the oceanic environment. The standing crop was estimated from sea

surface chlorophyll α (mg/m^3) and the productivity from uptake of radio-carbon (C^{14} , $\text{mg/m}^3/\text{day}$) during the last three cruises. Biological measurements have been previously published (Leet and Stevenson 1969).

Although limited numbers of biological observations were made for each cruise period, correlation coefficients were determined for the several measurements. For Secchi disc depth and mixed layer depth, the coefficients were 0.84, 0.61, and 0.71 for the months of December, January, and April respectively; and less for the other periods. Significance levels were 5% or larger, due to the small number of observations. A comparison of carbon fixation and plant pigments yield correlation coefficients of 0.96, 0.91 and 0.75 for April, June and August respectively. The June coefficient was significant at 1%, the April coefficient probably significant at 5% and the August coefficient not significant at 5%. For these cruise periods the high productivity was associated with large standing phytoplankton crops. When Secchi disc measurements were matched to either chlorophyll or productivity measurements, negative coefficients as large as 0.81 resulted at the 5% level. As would be expected the transparency of water in those instances was inversely related to the fertility of the water.

Only a few productivity estimates (13) are available from the April, June and August cruises but the highest rates of carbon fixation usually occurred near Islas Las Tres Marias and the second highest rate of fixation near Cabo San Lucas (Table 1). The maximum rates during a single cruise often differed from the smallest rates measured by a factor of 10. From Table 1 it is evident that productivity under incident light conditions was usually less than for those samples incubated under the 50% incoming light level. For the area of the investigation, the median productivity was estimated to be 4.1 and $6.9 \text{ mgC/m}^3/\text{day}$ for the incident light and 50% light level, respectively. If data from the three stations outside the usual cruise track are included, the medians are 3.3 and $6.1 \text{ mgC/m}^3/\text{day}$, respectively suggesting that the productivity is higher near the Gulf entrance than farther offshore. The decrease in the measured productivity at the two light levels is considered to be primarily due to the effect of light inhibition. In a review of the available primary productivity data for the Gulf of California, Zeitzschel (1969) has found that rates within the Gulf are two to three times greater than for surface water at a similar latitude in the Pacific.

Surface chlorophyll α concentration (Fig. 12) underwent a gradual increase from April through August. Median concentrations of the dissolved plant pigment were found to be 0.65, 0.78 and 0.97 mg/m^3 for April, June and August, respectively. The range in the concentration levels decreased, however, suggesting that spatial inhomogeneities associated with local "blooms" had decreased from spring through the summer due perhaps to a gradual dispersion of surface phytoplankton.

Relatively high plankton concentrations were associated with frontal boundaries near Cabo San Lucas and near Islas Las Tres Marias.

The ratio of phaeophytin *a* to chlorophyll *a* (see Fig. 13) is considered to be a measure of the grazing pressure of herbivorous zooplankton in the area (Lorenzen 1967). Lorenzen also suggested that this ratio is a measure of nutrient replenishment and hence, is directly related to the productivity of the phytoplankton. Lorenzen's results were based on values integrated over the euphotic zone whereas the present investigation was limited to surface measurements. During April for example, chlorophyll concentration was 14 times more than phaeophytin. The correlation coefficient was 0.97 and significant at the 0.5% level. By June the chlorophyll was only 4 times greater and by August was reduced to 2.5 times the concentration of phaeophytin. The correlation coefficients were 0.82 and 0.61 at the 0.5% and 1% significance levels, respectively. The reduction in the ratio of chlorophyll to phaeophytin from April through August suggests a phytoplankton population that was gradually subjected to heavier and heavier grazing pressure with the passage from spring to summer.

Zooplankton abundance was estimated from surface and oblique tows. Comparison of the two sets of measurements indicates that values from the oblique tows (representing zooplankton abundance integrated over the upper 75 m of water) are less variable than for surface tows. Changes in the zooplankton abundance from April to August, the period for which chlorophyll measurements are also available, suggest an overall increase in the concentration (Fig. 14). Although detailed contouring of some biological properties is difficult to evaluate, two areas of high relative zooplankton abundance occurred in April and August. One area is south of Cabo San Lucas in a region where fronts often occur; the second area is in the vicinity of Islas Las Tres Marias. The dependence of the zooplankton abundance on the phytoplankton standing crop was also estimated. A comparison of chlorophyll *a*/phaeophytin *a* and zooplankton abundance gave coefficients of 0.17 and -0.67 respectively for April and August. The coefficient for April was not significant at the 5% level but was significant at the 0.5% level for August. The progressively lower ratios of chlorophyll *a*/phaeophytin *a* coupled with the increasing zooplankton abundance noted above, provides strong support for the proposal of increased grazing pressure.

Incident solar radiation was continuously monitored atop the biology station at Mazatlan from April 20 through July 2. After the daily traces were planimetrically integrated, a calibration correction of -5% was applied to each daily value. The daily amount of solar energy received is shown in the upper panel of Figure 2. Clear weather existed for most of the time of record; 88% of the maximum solar energy available was received during this period. The day-to-day uniformity of the input of solar energy is not expected to cause any noticeable difference in the level

of productivity. The length of the trace, however, restricts any quantitative comparison with surface chlorophyll concentration or productivity.

SUMMARY AND CONCLUSIONS

The circulation of the oceanic area between Mazatlan, Cabo San Lucas, and Islas Las Tres Marias is composed of currents resulting from the distribution of temperature and salinity (geostrophic currents) and near-surface currents produced by the frictional effects of the wind on the sea surface (Ekman currents). From January through April the surface geostrophic currents had a southerly set at speeds up to 20 cm/sec. In June the currents were variable and for the most part less than 10 cm/sec. By late summer (August) the surface currents changed and moved in a northerly direction at speeds of 10-15 cm/sec. During the period of the investigation wind currents formed a small part of the total surface circulation, only during June did the magnitude of the wind currents amount to more than 10% of the magnitude of the geostrophic currents. A comparison of the wind currents and geostrophic currents showed that the Ekman currents were frequently oblique or in opposition to the geostrophic currents. Under such conditions contrasting currents can exist in different water layers.

The circulation at 100 m was similar to that of the surface, but slower. Subsurface water exchange occurred across the Gulf entrance on several occasions. During January an appreciable outflow occurred at 5-10 cm/sec along the eastern side of the entrance. In April, water flowed southward from the Gulf at 10 cm/sec and into the central part of the area of study. Water entered the Gulf on the eastern side of its entrance at 5 cm/sec during August and left at about 8 cm/sec on the western side of the entrance. More study is needed along the Gulf entrance, however, to determine the rate and direction of subsurface transport across the entrance.

The effect of the circulation is to bring different types of water into juxtaposition and subsequently allow their interaction. A semi-permanent trough in the mixed layer, located along 109°W, is considered an example of such interaction. Three water sources are found within the immediate vicinity of the investigation: 1) cool California Current water of low salinity ($S \leq 34.60\text{\textperthousand}$) which flows southward along the west coast of Baja California; 2) warm eastern tropical Pacific water of intermediate salinity ($34.65 \leq S \leq 34.85\text{\textperthousand}$) which flows into the area from the southeast; and 3) warm highly saline water ($S \geq 34.90\text{\textperthousand}$) from the Gulf of California. On the basis of T-S curves, Gulf of California water was found to leave the Gulf intermittently at or near the surface and in limited supply. California Current water was consistently found near Cabo San Lucas. Between Cabo San Lucas and Cabo Corrientes both California Current and eastern tropical Pacific waters were found to a greater or lesser extent at about

150 m, depending upon the general circulation at that time. Eastern tropical water was usually found near 200 m depth.

In addition to variations in surface properties due to different water sources, large seasonal changes also occurred. During the period of this investigation the mean surface temperature was 25.1°C with a range of 19.7°C to 24.8°C; the lowest mean temperature occurred during January and the highest during August. The mean mixed layer depth was 30 m, with a range of 5 m to 100 m; it was deepest in January and shallowest in August. The fluctuations in both these properties are attributed to seasonal changes in insolation and wind mixing of the near-surface water. The mean salinity was 34.76‰, with a range of 34.14‰ to 35.42‰. A small semi-annual cycle of salinity is apparent. Changes in salinity are attributed to seasonal differences in evaporation and precipitation. While precipitation was not shown to noticeably reduce offshore salinities, nearshore surface values were reduced by an average of 0.4‰ during the season of heaviest rainfall. Some seasonal variability in salinity is also attributed to advective movements of the three water masses in the area.

Vertical sections of temperature and salinity located between Mazatlan and Cabo San Lucas (northern section) and from Cabo San Lucas to Islas Las Tres Marias (southern section) revealed many details about the advective and mixing processes in the area. Thermal inversions occurred along both sections during each cruise period, but were more frequent, intense, and of greater horizontal extent along the southern section. Inversions of 1°C or more were measured on several occasions along the southern section. Inversions were infrequent below 150 m, and rarely found as deep as 250 m. Thermal inversions were common in the vicinity of the subsurface salinity cores of the California Current and Gulf of California waters, where they were most frequently located beneath both high and low salinity cores. The locations of the temperature inversions were apparently related to the interactions of the California Current and Gulf of California waters, or in their absence, the resident eastern tropical Pacific water. These inversions are attributed to advection of one kind of water (mostly California Current) into another.

Variations in the salinity profiles indicated the presence of California Current water and also of intermittent excursions of outflowing Gulf of California water. Warm salty water at the surface often extended for short distances across the entrance but these thin surface plumes were readily dissipated by various mixing processes. In January, however, a strong current flowed from the Gulf at the surface, and was still evident along the southern section at a depth of 50 m. The isohalines associated with the core underwent spreading due to advection and lateral mixing and reduced the core salinity by 0.2‰ in a distance of 128 km (71 mi). The California Current as delineated by the salinity minimum core was present during January, February, April, June and August, months for which salinity data were available. The salinity values within the core were

usually lower along the southern section than along the northern, implying that the flow along the Gulf entrance was less intense than from Cabo San Lucas to Cabo Corrientes. An exception occurred during April when a portion of the California Current changed direction and swung into the Gulf of California.

Abrupt temperature and salinity gradients or fronts often formed at the sea surface and upon occasion beneath the surface. In April, for example, a submerged salinity front was found between the low salinity core of the California Current and the near-surface outflow from the Gulf. The front was most intense at 50 m depth where the horizontal gradient was 1.1‰ in 48 km (27 mi). It is expected that within the frontal boundary the relative rate of advection was greater than the dissipative effects of lateral and vertical mixing. The interaction of the outflow of Gulf water with the California Current offers an opportunity to study rates of mixing and advection in the frontal boundaries. Such additional studies may, in turn, yield information about spatial changes in the concentration of larval fishes due to natural dispersion.

Although limited numbers of biological measurements were made, several inferences can be drawn from the data. Median productivity for the months of April, June and August was 5.6, 17.8 and 2.6 mgC/m³/day, respectively. Productivity at those stations located offshore from the vicinity of the Gulf were one-third or less than the productivity measured near the entrance to the Gulf. Median productivity averaged for the three months was 5.5 mgC/m³/day. Median concentrations of surface chlorophyll *a* for April, June and August increased progressively, *i.e.*, 0.65, 0.78 and 0.97 mg/m³. The following relationships are suggested from correlation coefficients:

- 1) Less turbid water corresponded with greater mixed layer depth ($r=0.72$). The significance levels, however, were $\geq 5\%$ due to the few available observations.
- 2) High productivity was associated with high standing crops ($0.96 \geq r \geq 0.75$) although the correspondence became progressively less from April (significant at the 1% level) through August (not significant at the 5% level).
- 3) The water turbidity was directly related to the fertility (chlorophyll measurements) of the water ($r=0.81$ at about the 5% significance level).
- 4) The productivity was highest near Islas Las Tres Marias and second highest near Cabo San Lucas. The most productive locations were often 10 times as productive as the less fertile ones.
- 5) From April through August the chlorophyll *a*/phaeophytin *a* ratio changed from 14:1 to 4:1 to 2.5:1 suggesting that the phytoplankton population was gradually subjected to heavier and heavier grazing pressure through spring and summer. This conclusion is supported by the fact that low chlorophyll *a*/phaeophytin *a* ratios were associated with large zooplankton concentrations in summer ($r=0.67$; significant at the 0.5% level).

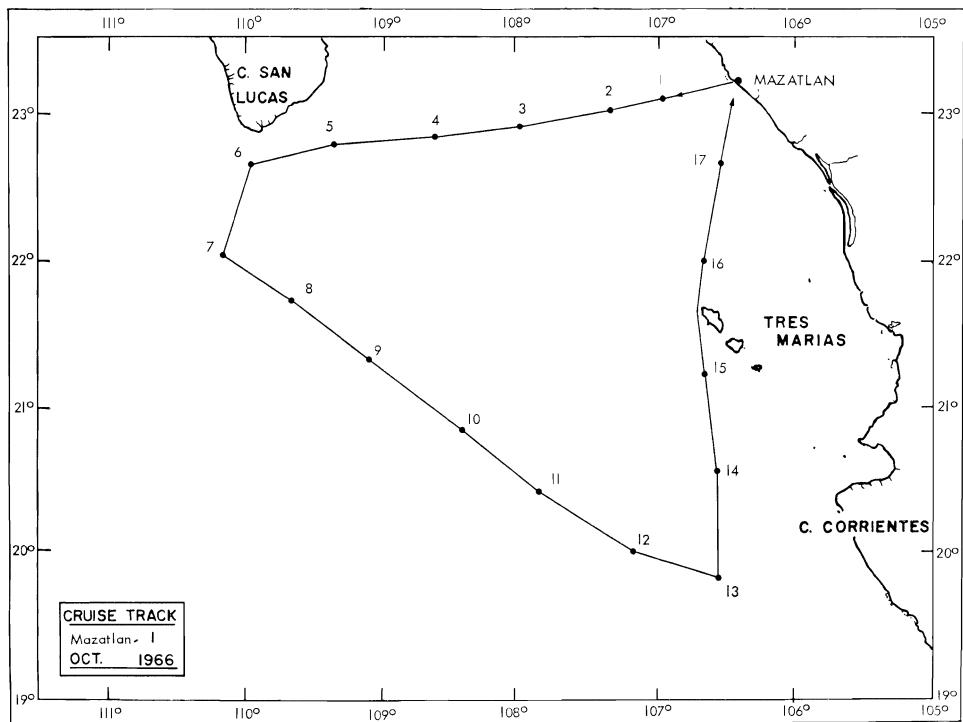


FIGURE 1A

FIGURES 1A to 1H. Cruise tracks and station locations for the eight cruises.

FIGURAS 1A a 1H. Rumbo de los cruceros y localidades de las estaciones de los ocho cruceros.

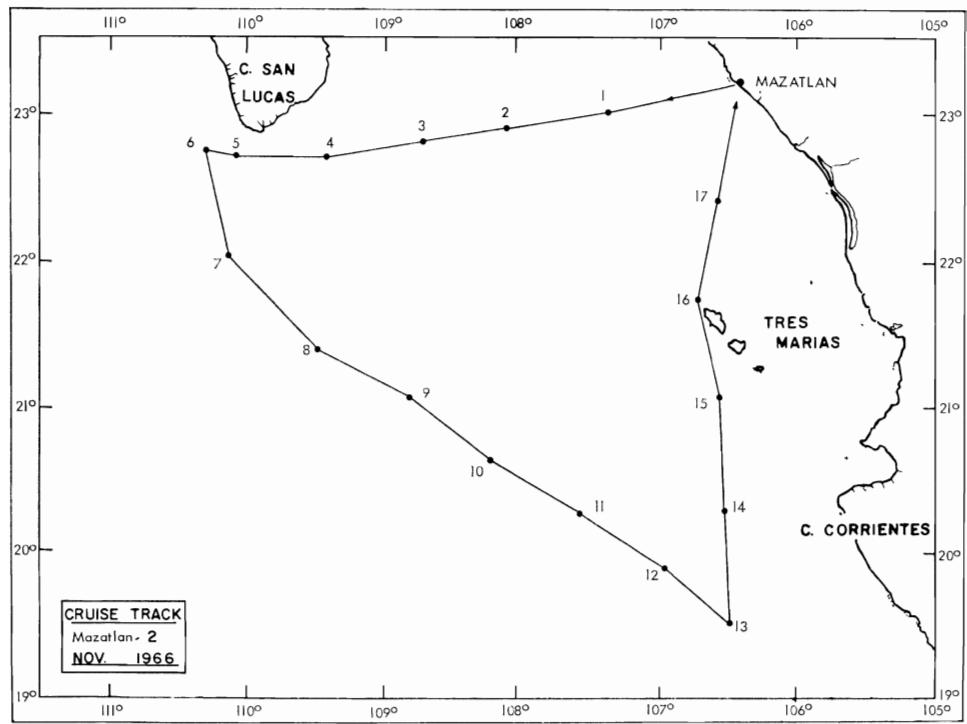


FIGURE 1B

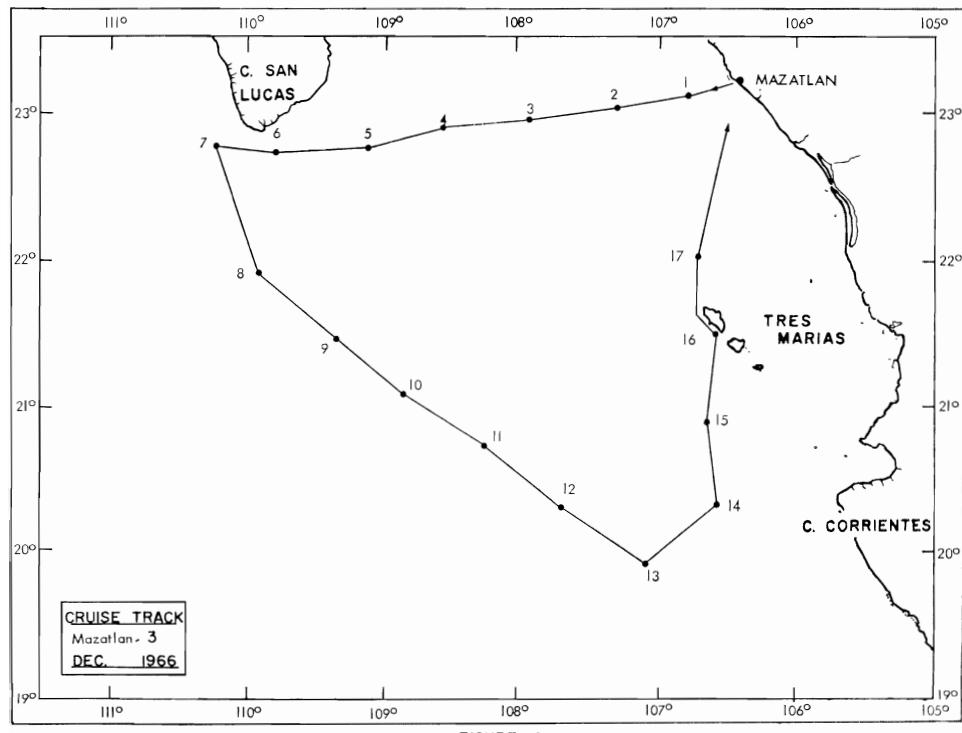


FIGURE 1C

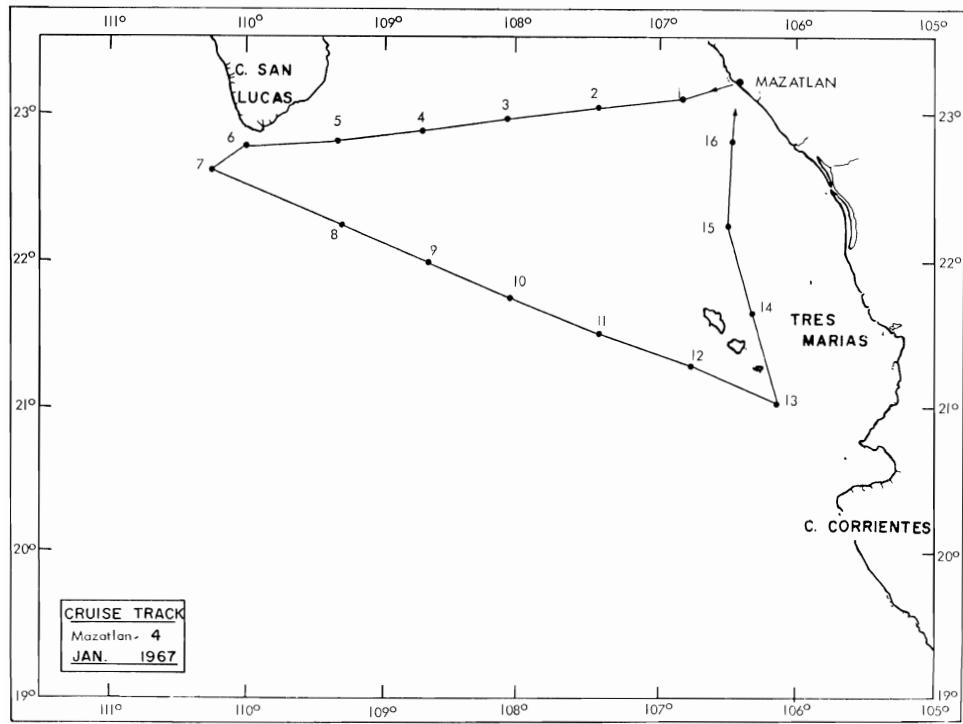


FIGURE 1D

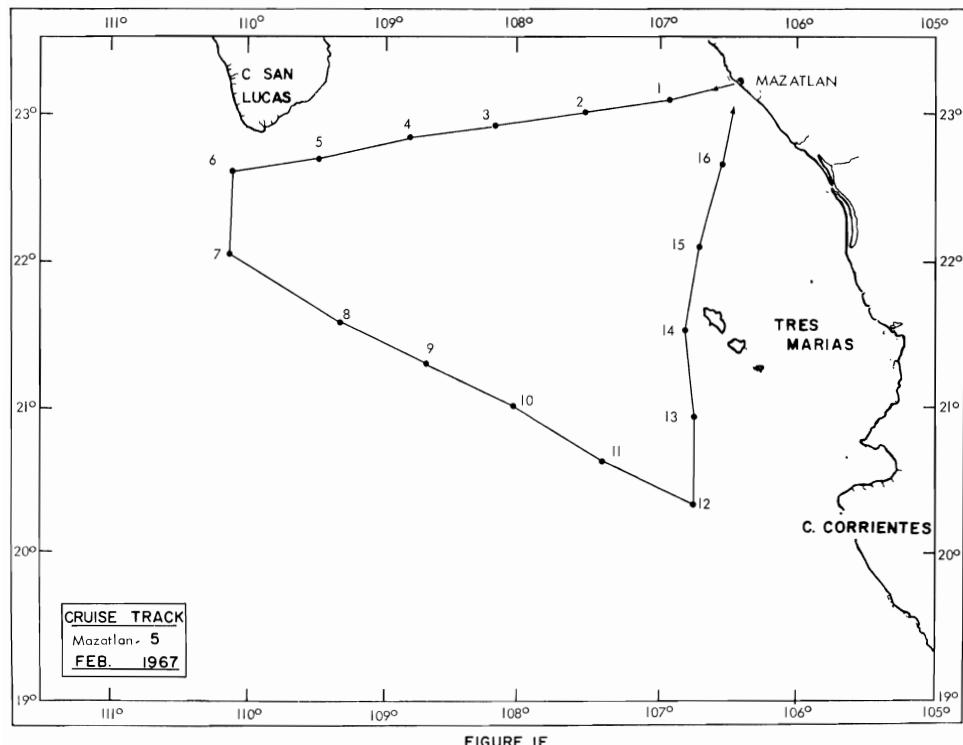


FIGURE 1E

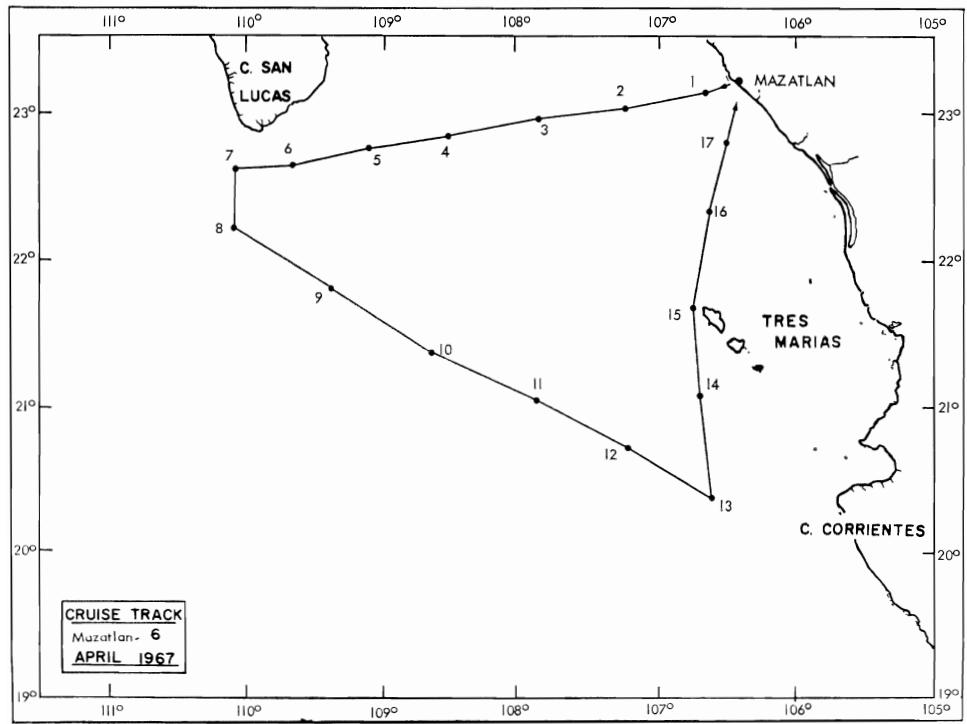


FIGURE 1F

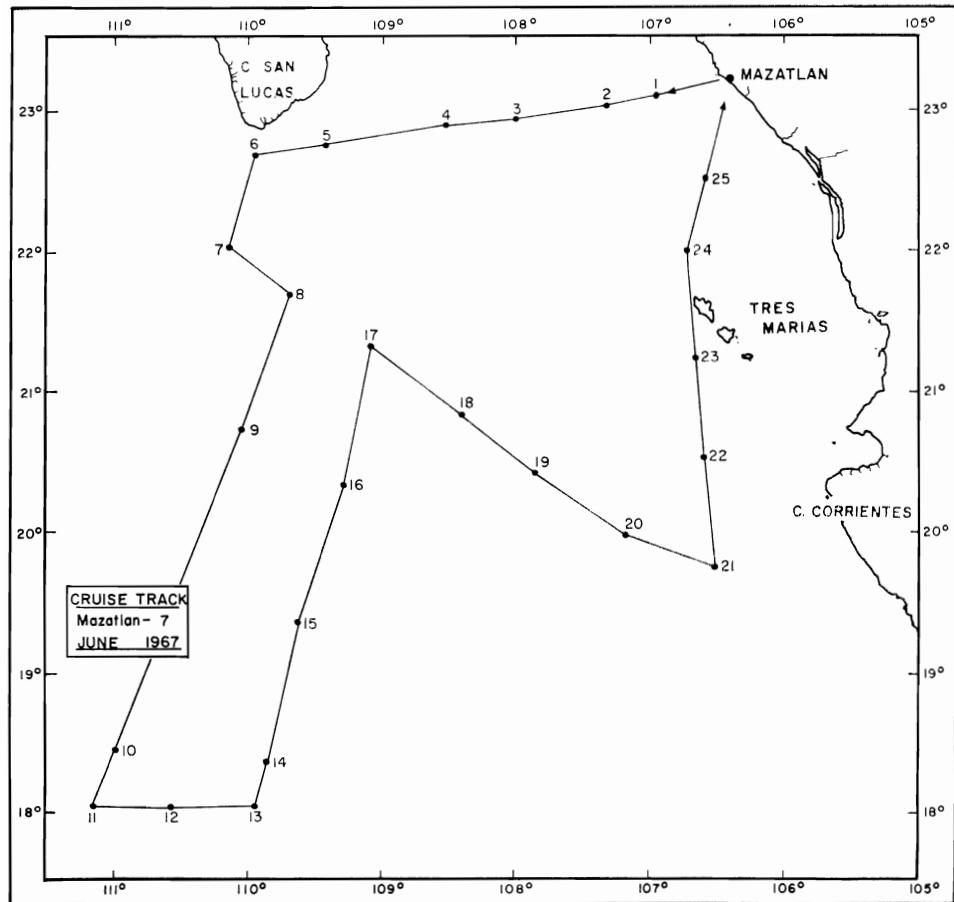


FIGURE 1G

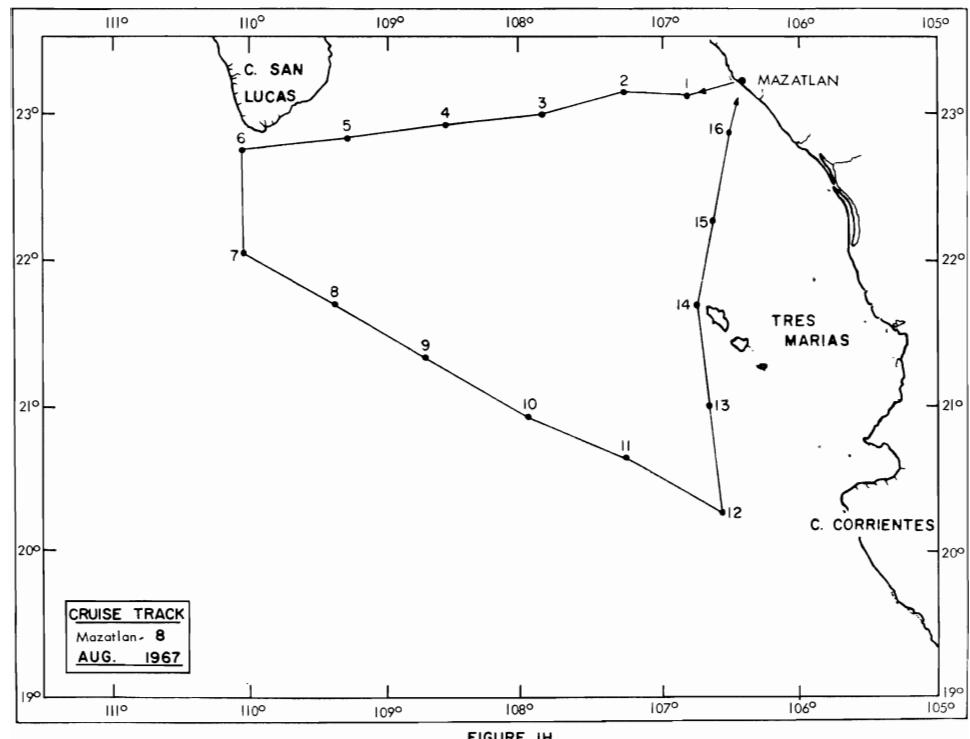


FIGURE IH

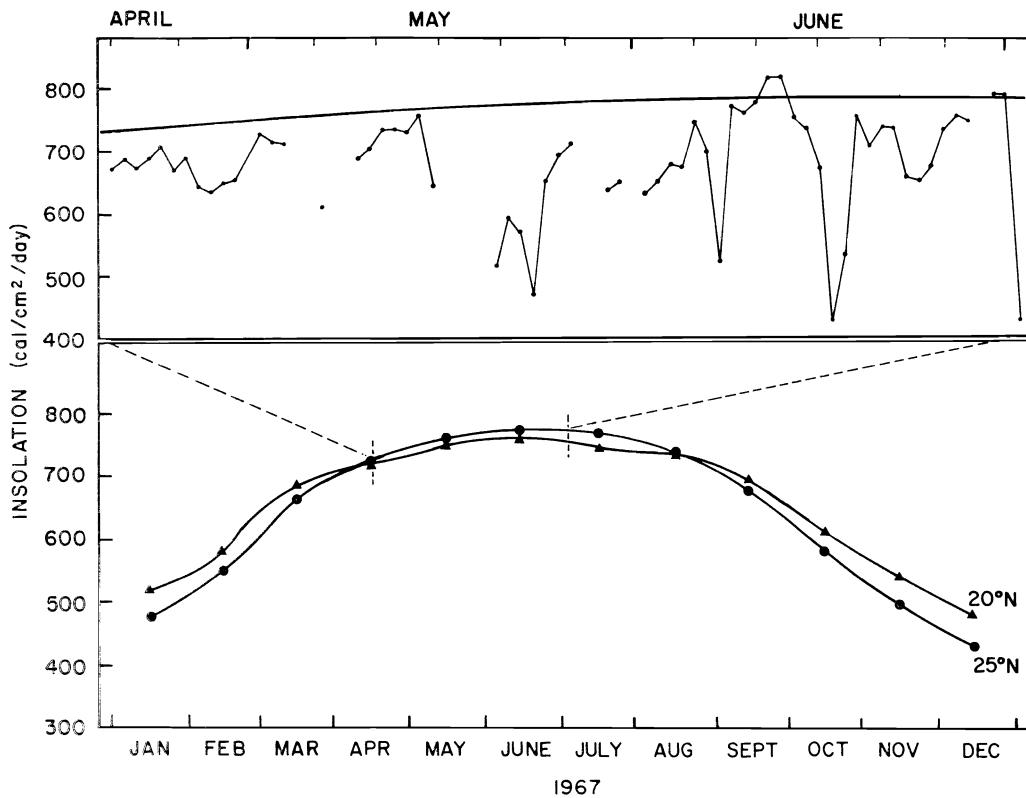


FIGURE 2. Maximum insolation with a clear sky ($\text{gm cal cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$). Data for the two curves were taken from Roden (1959). The area of the investigation lies between the 20° and 25°N radiation curves. The upper panel shows the daily observations made at Mazatlán (about $23^\circ 15'\text{N}$); the smooth curve represents maximum incoming radiation for clear sky conditions.

FIGURA 2. Insolación máxima con cielo despejado ($\text{gm cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$). Los datos para las dos curvas fueron obtenidos según Roden (1959). El área de investigación está ubicada entre las curvas de radiación de 20° y 25°N . El panel superior indica las observaciones diarias realizadas en Mazatlán (a unos $23^\circ 15'\text{N}$); la curva suave representa la radiación máxima entrante de las condiciones de un cielo despejado.

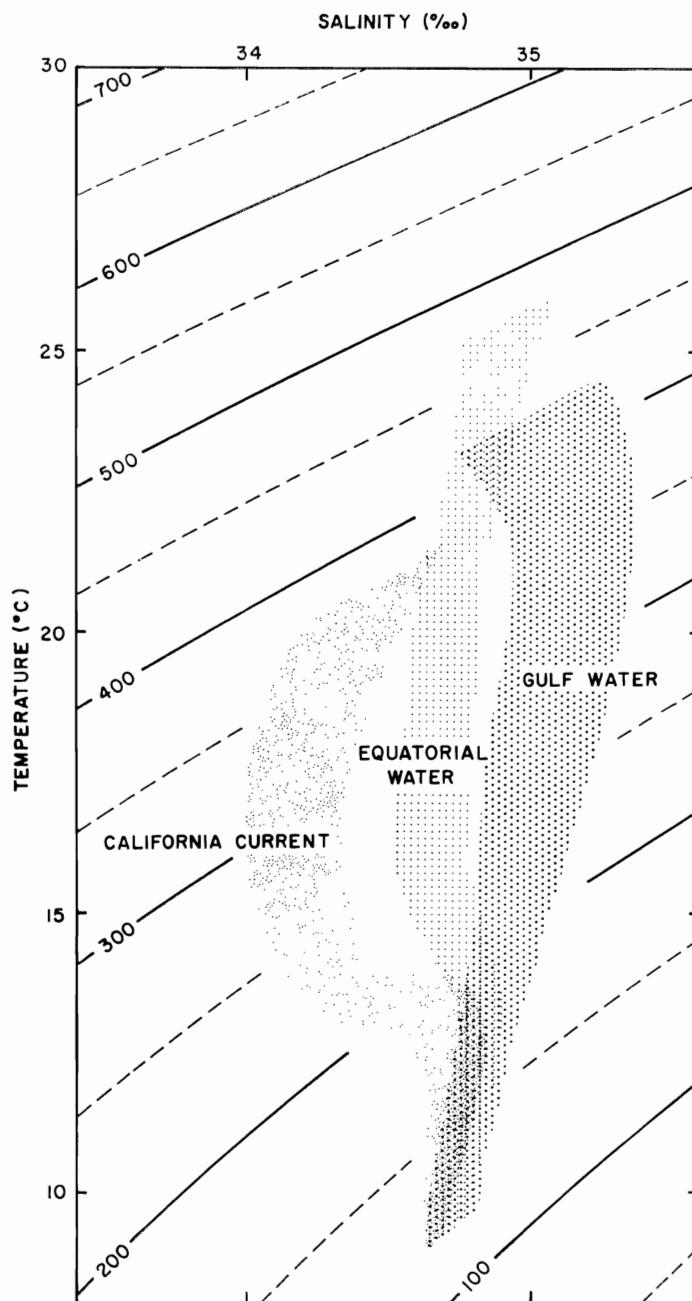


FIGURE 3. T-S envelopes based on observations in Griffiths (1965). A central tendency was determined for each water mass by inspection of the station T-S curves and a smoothed envelope constructed about each group of curves. The numbered curves represent isopycnal surfaces. Numbers shown are for thermosteric anomaly (centiliters/ton).

FIGURA 3. Cubiertas T-S basadas en observaciones descritas por Griffiths (1965). Se determinó una tendencia central para cada masa de agua mediante la inspección de las curvas T-S en la estación y por la construcción de una cubierta suavizada encima de cada grupo de curvas. Las curvas numeradas representan superficies isopicnales. Los números que se presentan son para la anomalía termostérica (centilitros/tonelada).

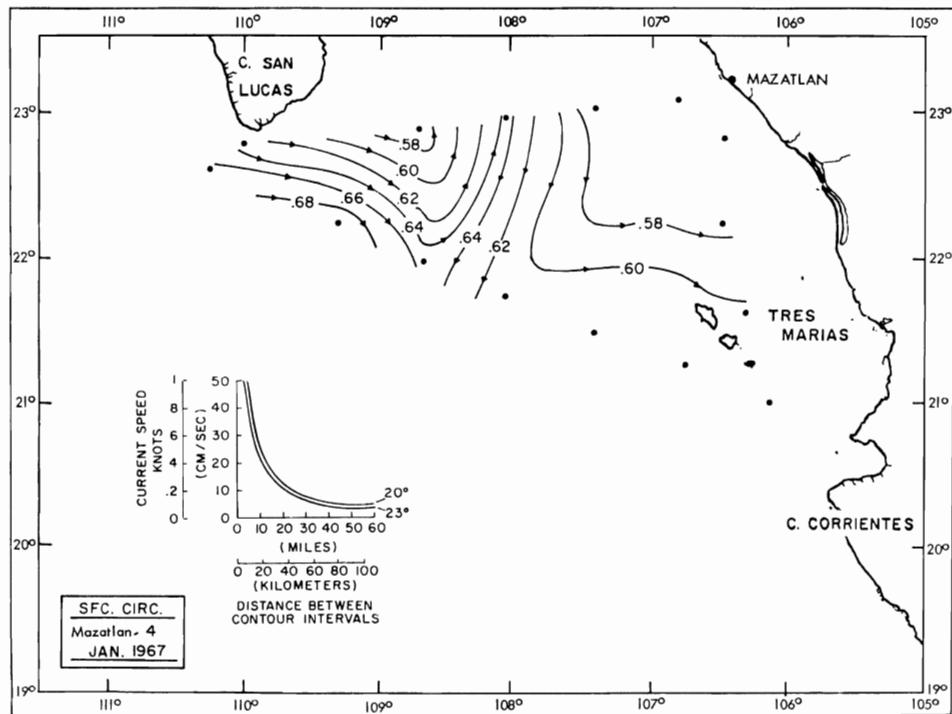


FIGURE 4A

FIGURES 4A to 4E. Surface geostrophic circulation referenced to the 250 db surface, for five cruises. Speed at a location is determined by measuring the separation between nearby adjacent contour lines and comparing the distance to a nomogram curve at the correct latitude.

FIGURAS 4A a 4E. Circulación superficial geostrófica atribuida a la superficie de 250 db. La velocidad en una localidad se determina al medir la separación entre las líneas de contorno adyacentes y comparando la distancia de una curva nomograma en la latitud correcta.

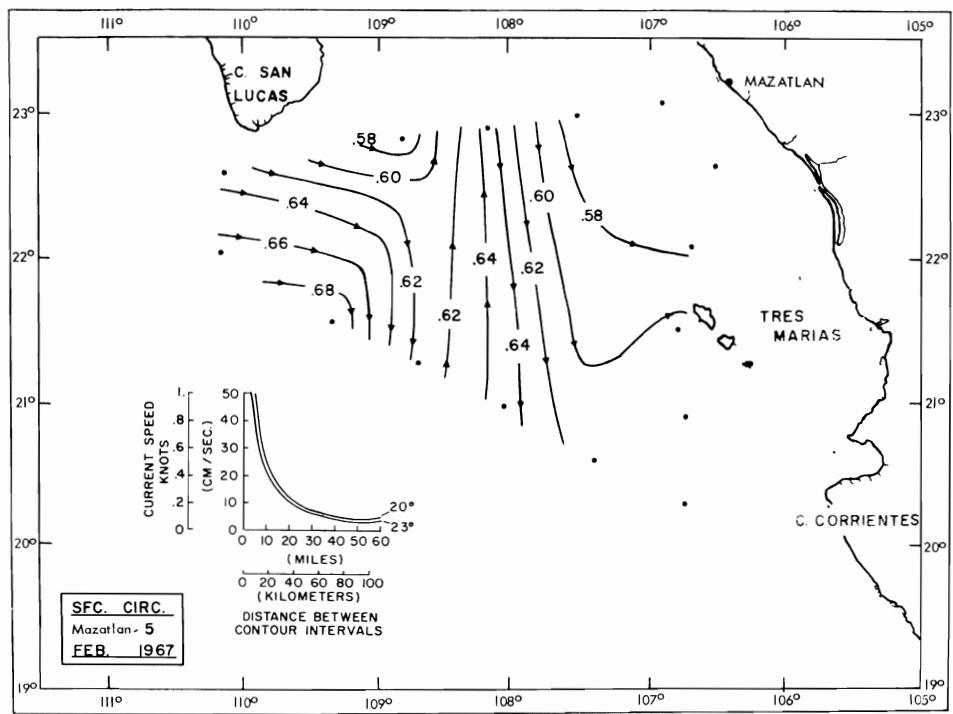


FIGURE 4B

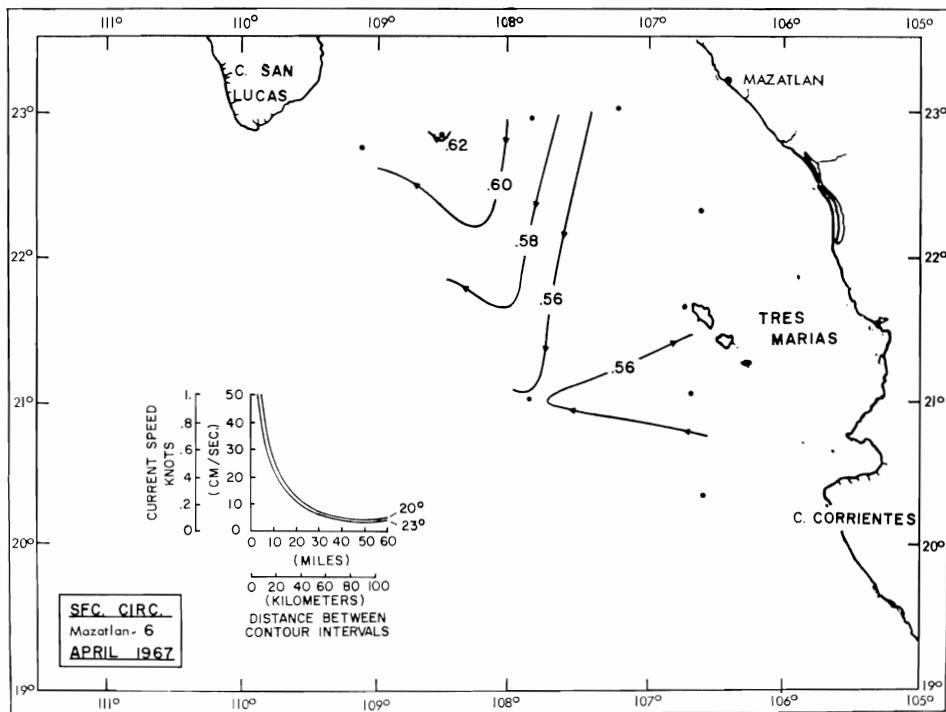


FIGURE 4C

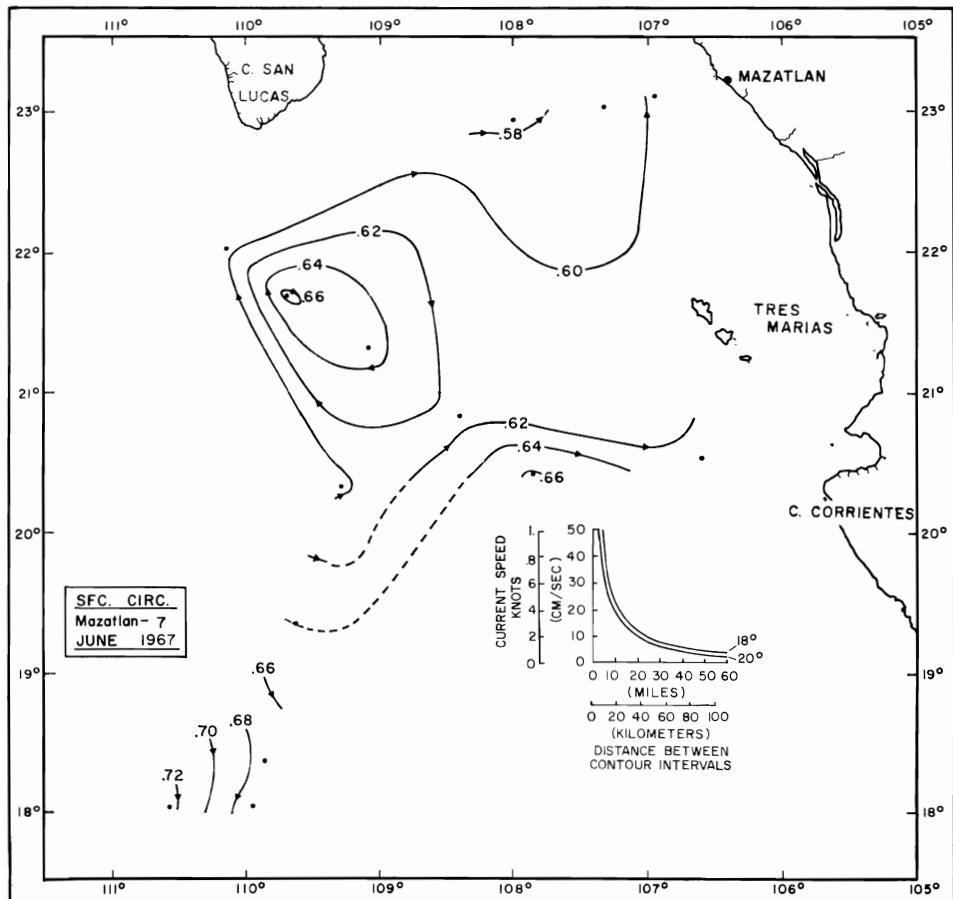


FIGURE 4D

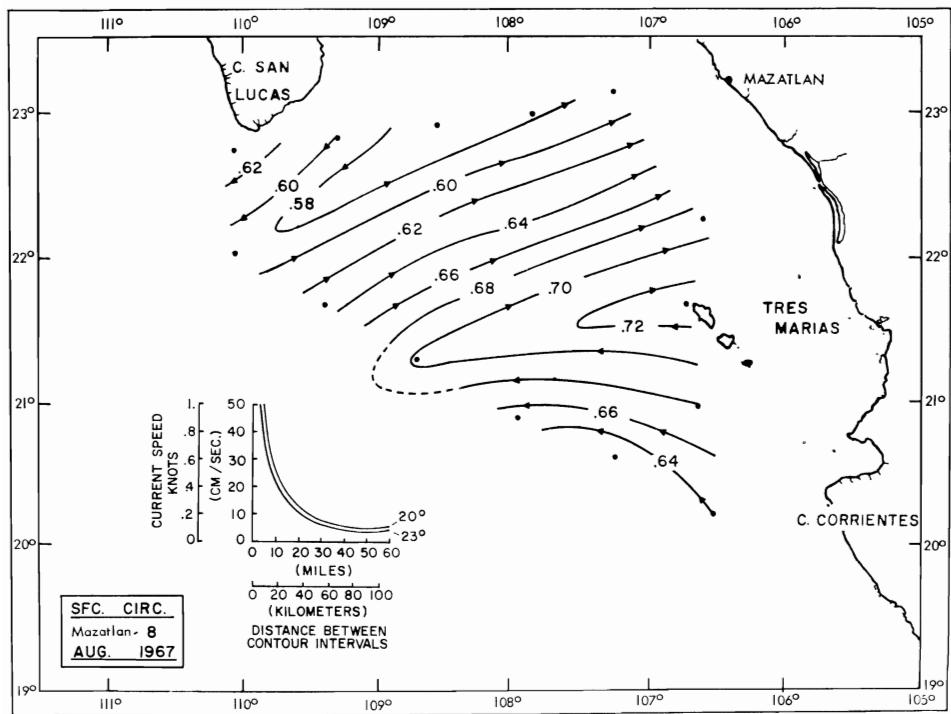


FIGURE 4E

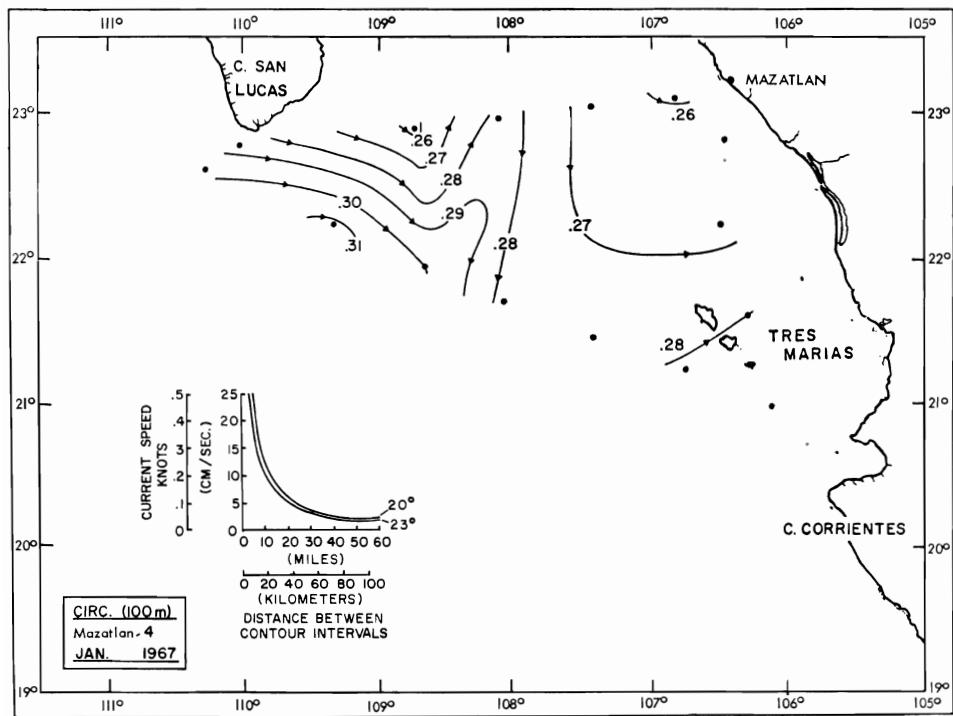


FIGURE 5A

FIGURES 5A to 5E. Geostrophic circulation at 100 m referenced to the 250 db surface, for five cruises. Speed at a location is determined by measuring the separation between nearby adjacent contour lines and comparing the distance to a nomogram curve at the correct latitude.

FIGURAS 5A a 5E. Circulación geostrófica a 100 m atribuida a la superficie de 250 db. La velocidad en una localidad se determina al medir la separación entre las líneas de contorno adyacentes y comparando la distancia de una curva nomograma en la latitud correcta.

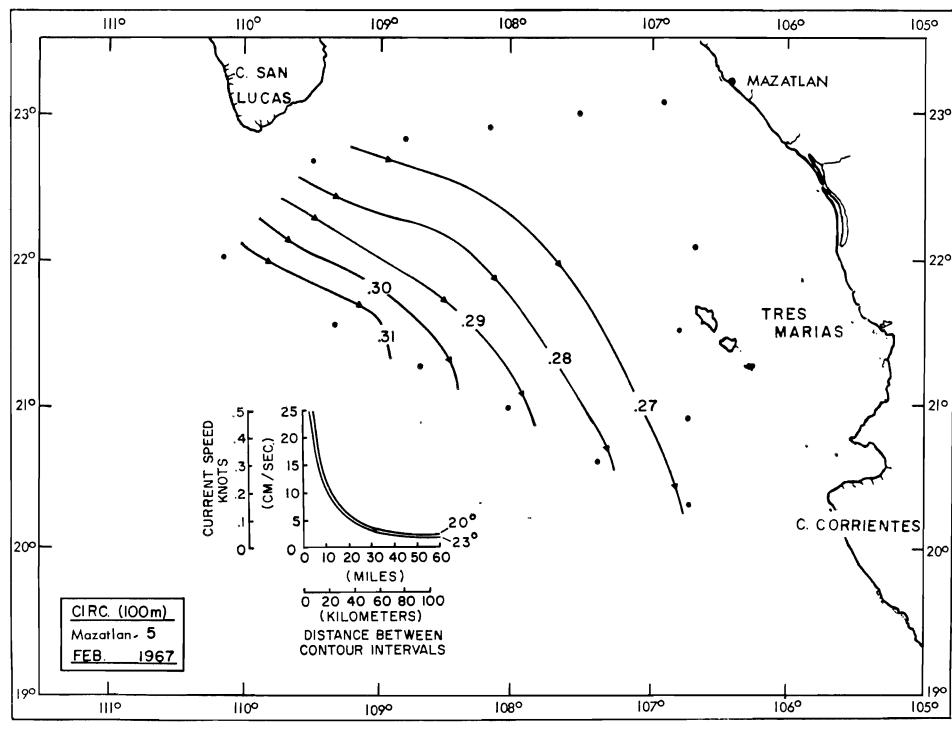


FIGURE 5B

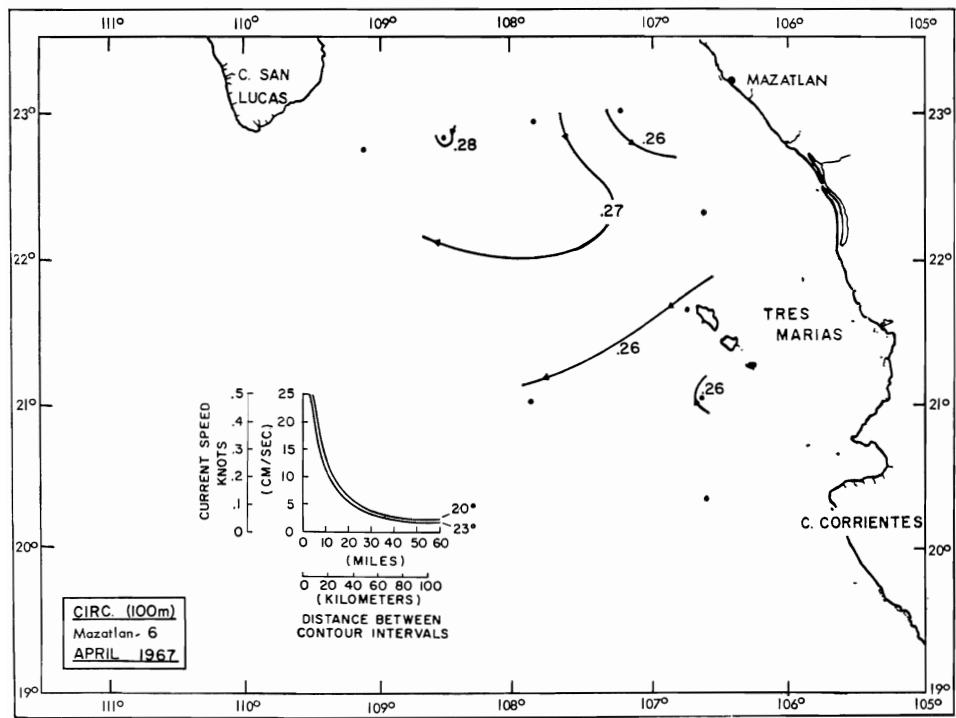


FIGURE 5C

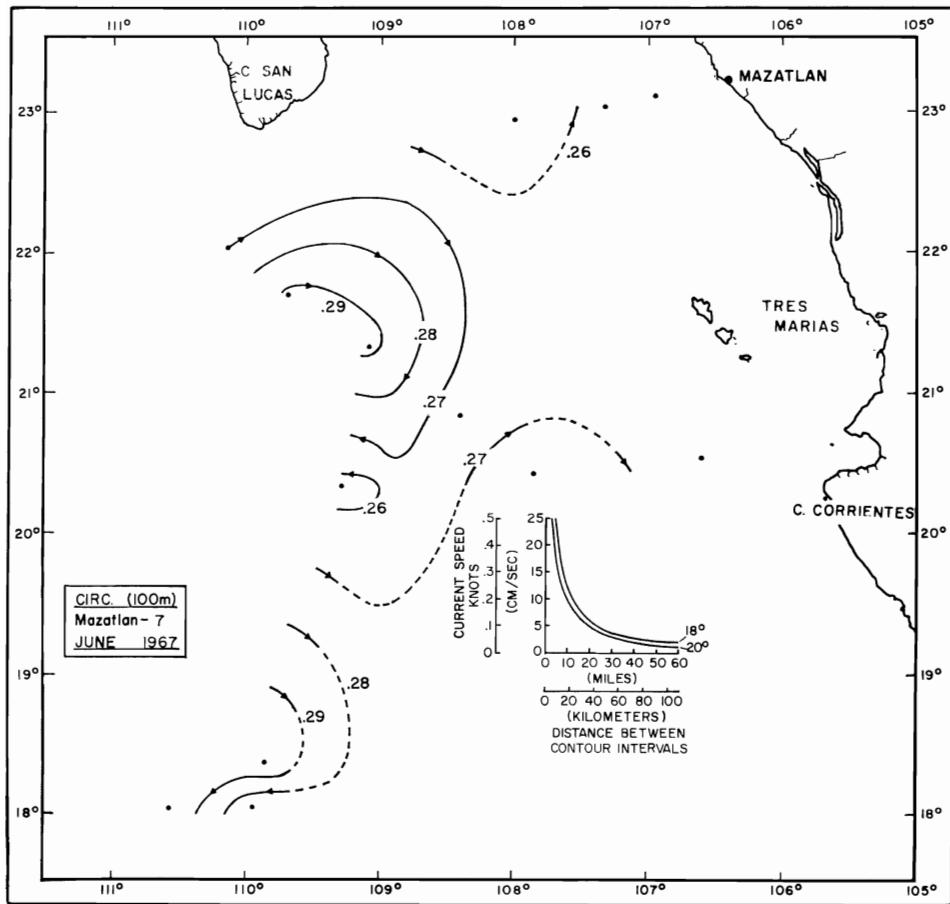


FIGURE 5D

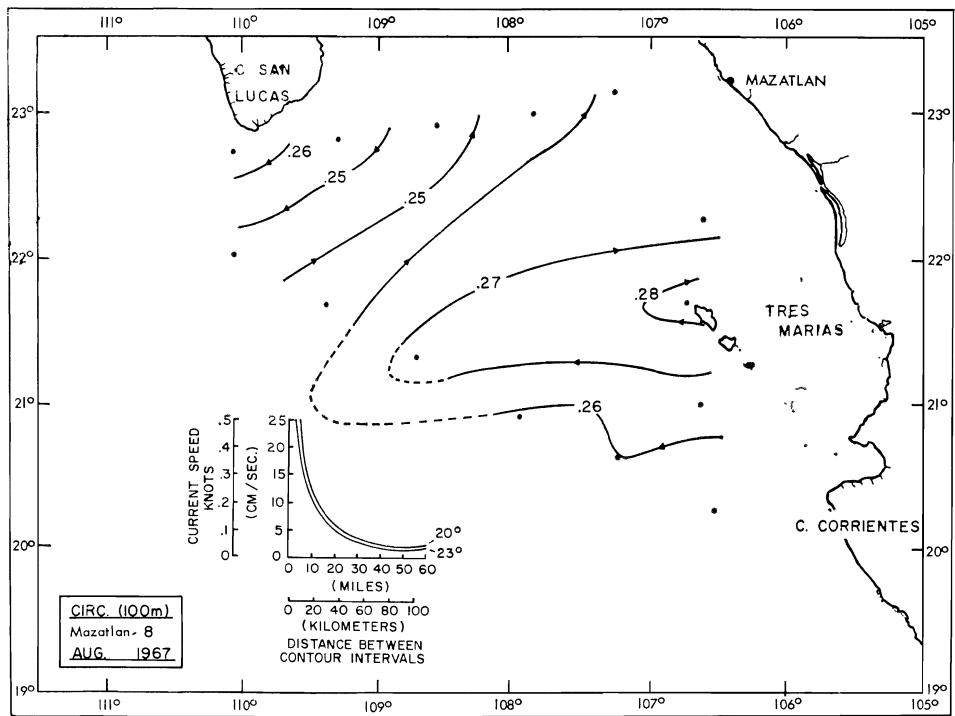


FIGURE 5E

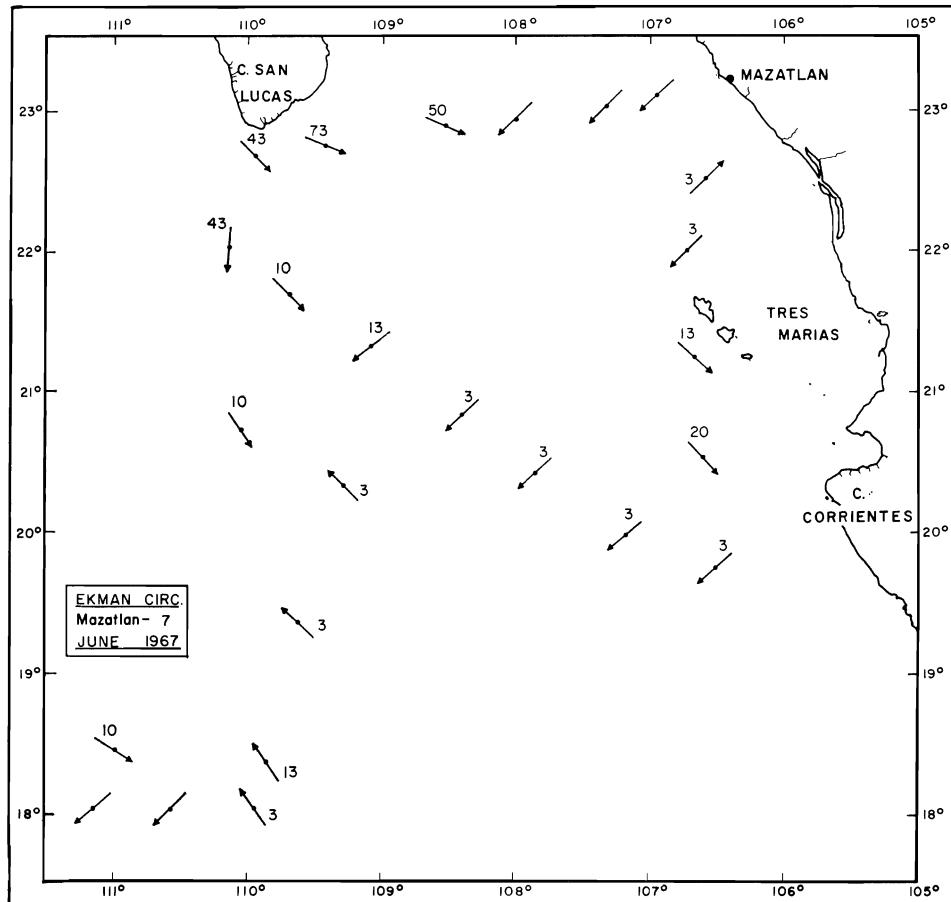


FIGURE 6. Ekman surface currents during the June 1967 cruise. Surface current direction was obtained by rotating wind vector clockwise 45° . Speed in cm/sec is given beside each current arrow for which the wind speed was observed. Unnumbered arrows represent observed wind directions without speeds. Surface layer thickness is assumed to be 30 m.

FIGURA 6. Corrientes superficiales de Ekman durante el crucero de junio 1967. La dirección de la corriente superficial se obtuvo al girar el vector del viento 45° en dirección a las manecillas del reloj. La velocidad en cm/seg se indica al lado de cada flecha de corriente para la que observó la velocidad del viento. Las flechas que no están numeradas representan las direcciones observadas del viento sin velocidades. Se supone que el espesor de la capa superficial sea 30 m.

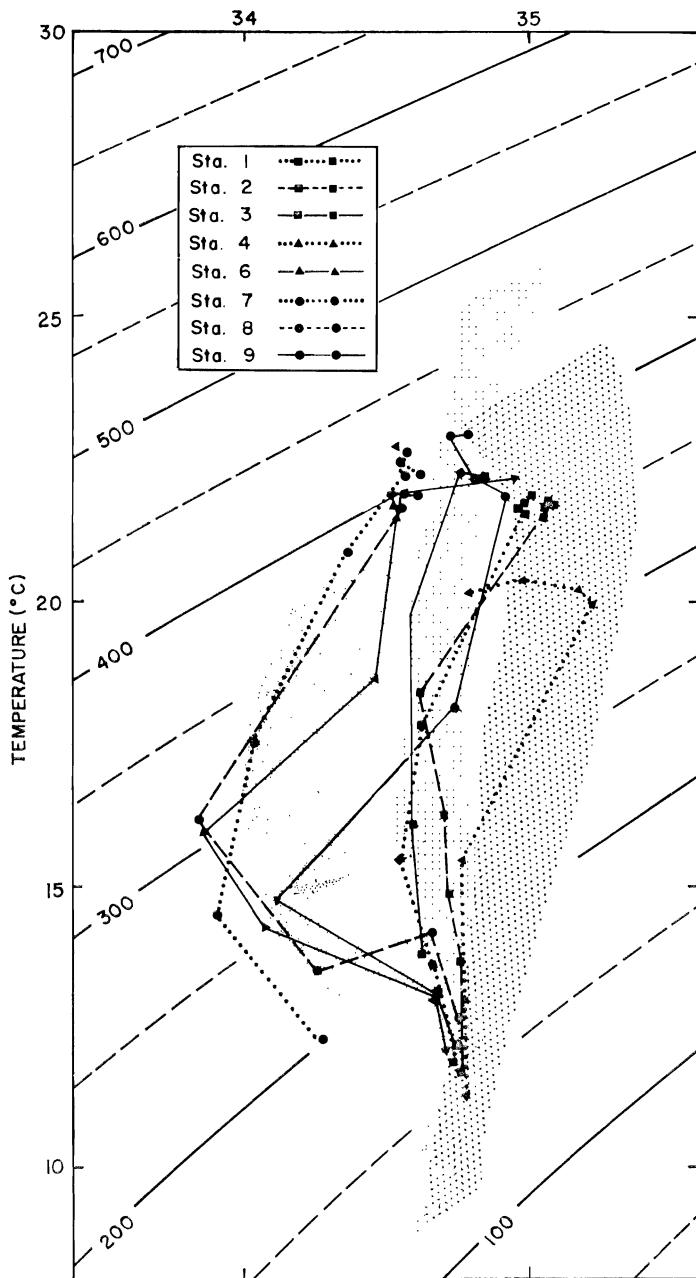
STEVENSON
SALINITY (‰)

FIGURE 7A

FIGURES 7A to 7B. T-S curves from the January 1967 cruise (MZ-4). The influence of the three general water masses (Roden and Groves 1959; Griffiths 1965) may be seen from a comparison with the T-S envelopes shown in Figure 7A (stations 1-9), and in Figure 7B (stations 10-16) on the adjoining page.

FIGURAS 7A y 7B. Las curvas T-S del crucero de enero 1967 crucero (MZ-4). La influencia de las tres masas generales de agua (Roden y Groves 1959; Griffiths 1965) pueden verse según una comparación con las cubiertas T-S presentadas en la Figura 7A (estaciones 1-9), y en la Figura 7B (estaciones 10-16) en la página siguiente.

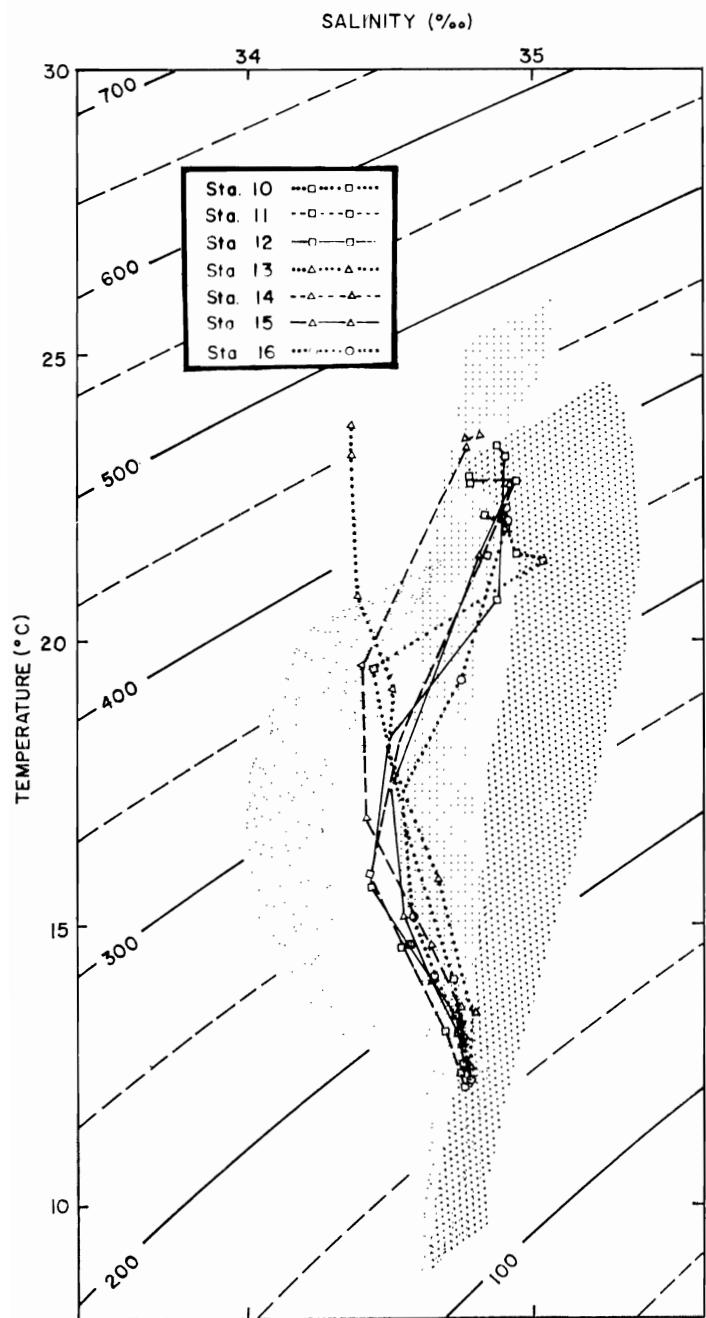


FIGURE 7B

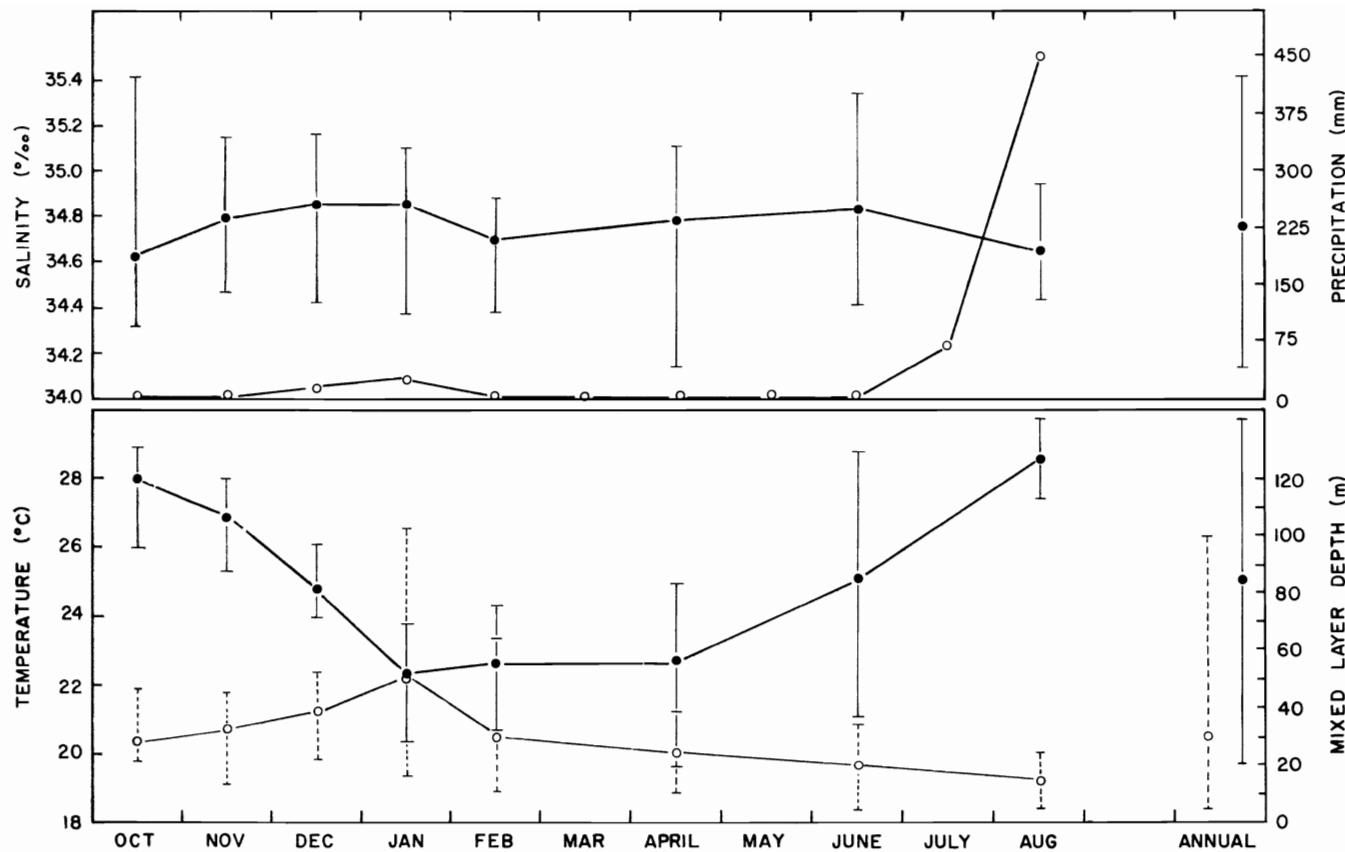


FIGURE 8. Weighted mean monthly surface temperature and salinity, mixed layer depth (MLD) and surface precipitation at Mazatlán for the period of eight cruises. The range about each weighted mean value is indicated by a vertical line; annual conditions are shown on the right side of the charts.

FIGURA 8. Los valores de la media mensual ponderada de la temperatura superficial y salinidad, profundidad de la capa mixta (MLD) y la precipitación superficial en Mazatlán se indican para el período de los ocho cruceros. El alcance respecto a cada valor medio ponderado se indica por una línea vertical; las condiciones anuales se presentan al lado derecho de los diagramas.

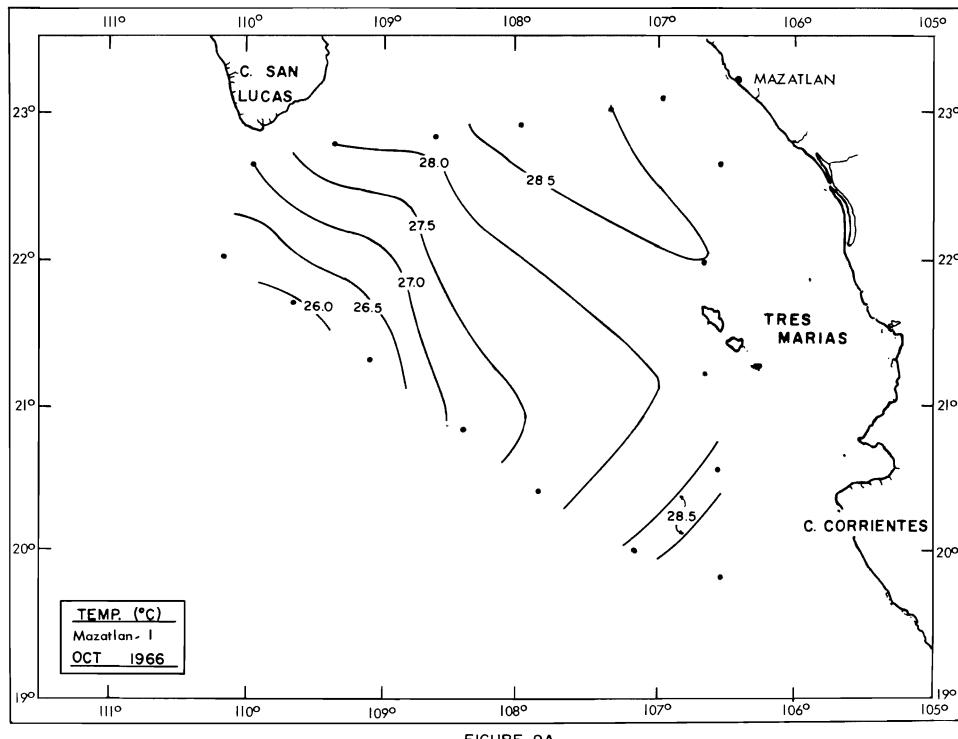


FIGURE 9A

FIGURES 9A to 9H. Surface temperature ($^{\circ}\text{C}$) in contour intervals of 0.5° .

FIGURES 9I to 9P. Surface salinity (‰) in contour intervals of 0.1‰ .

FIGURES 9Q to 9X. Surface density (sigma-t) in intervals of 0.1 sigma-t units.

FIGURAS 9A a 9H. Temperatura superficial ($^{\circ}\text{C}$) en intervalos de contorno de 0.5° .

FIGURAS 9I a 9P. Salinidad superficial (‰) en intervalos de contorno de 0.1‰ .

FIGURAS 9Q a 9X. Densidad superficial (sigma-t) en intervalos de unidades de 0.1 sigma-t.

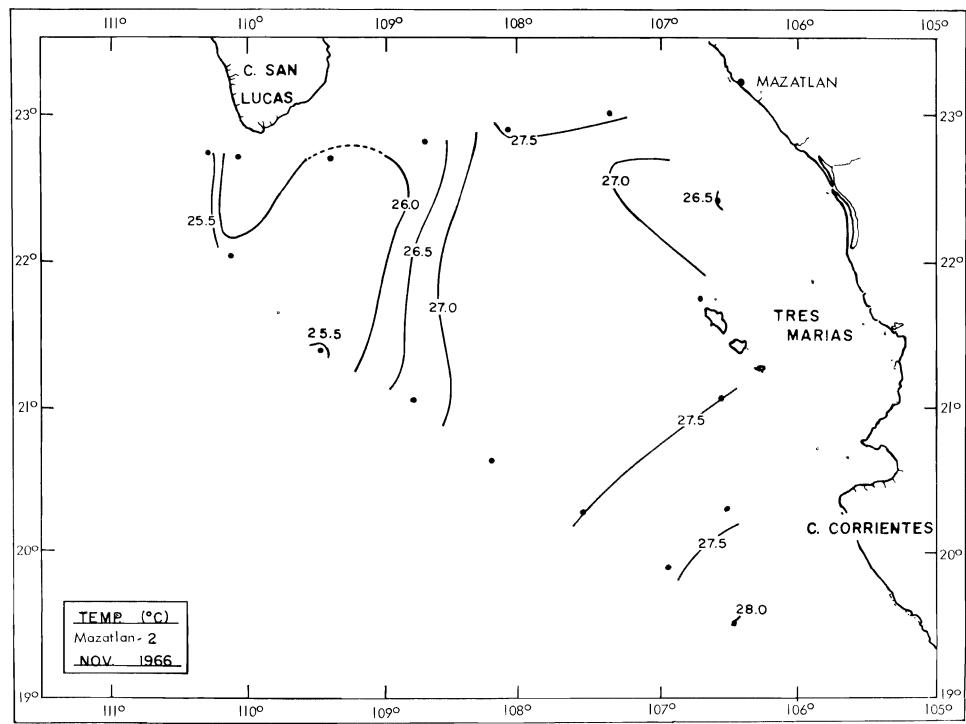


FIGURE 9B

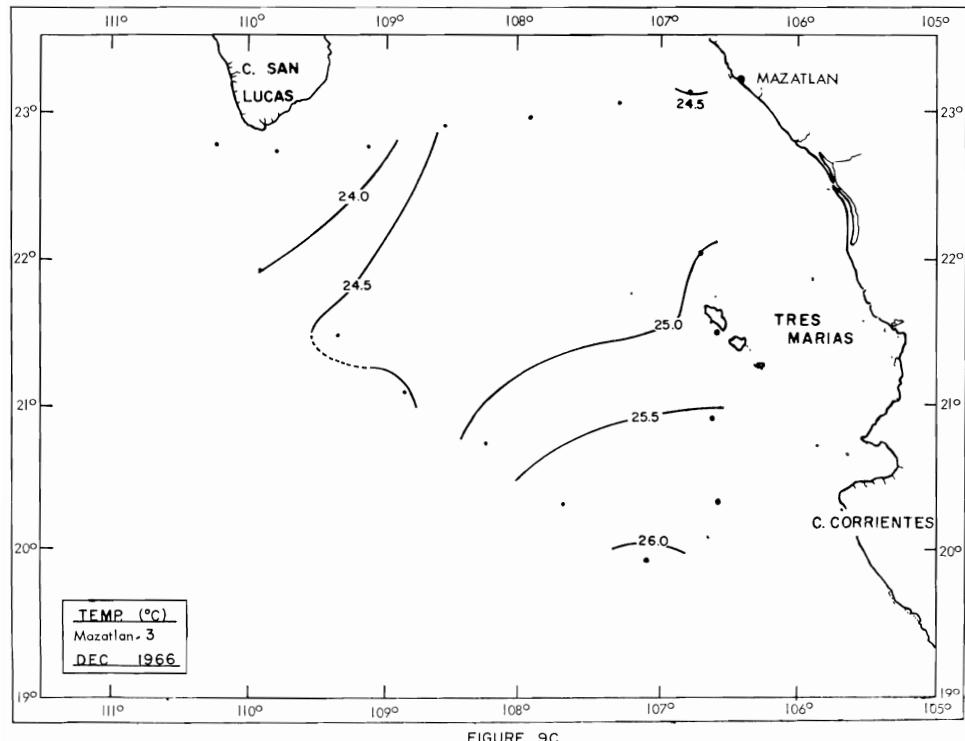


FIGURE 9C

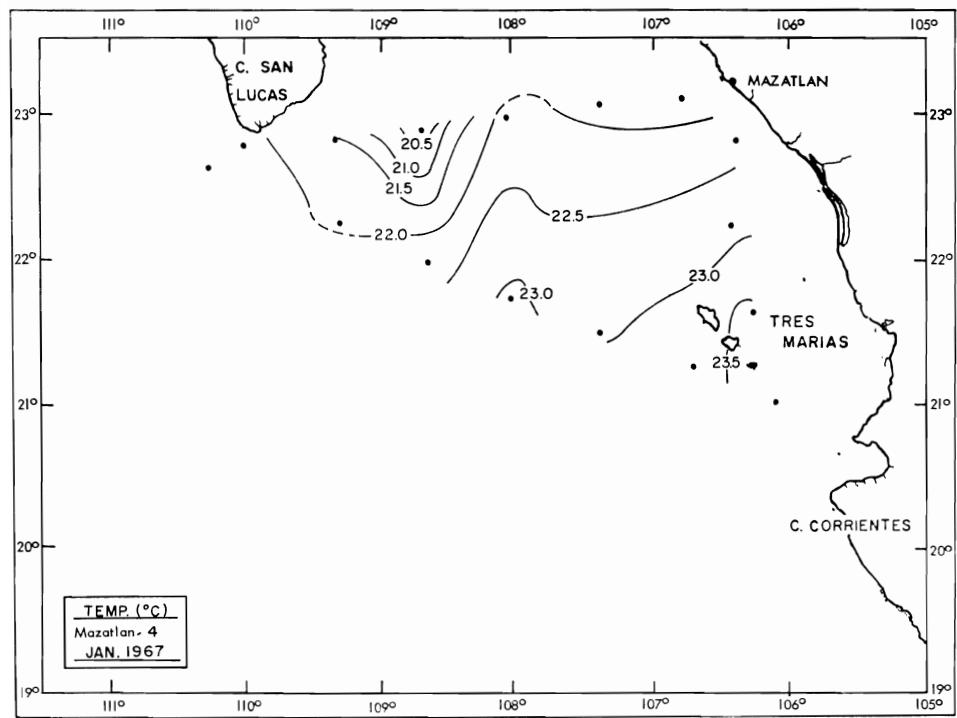


FIGURE 9D

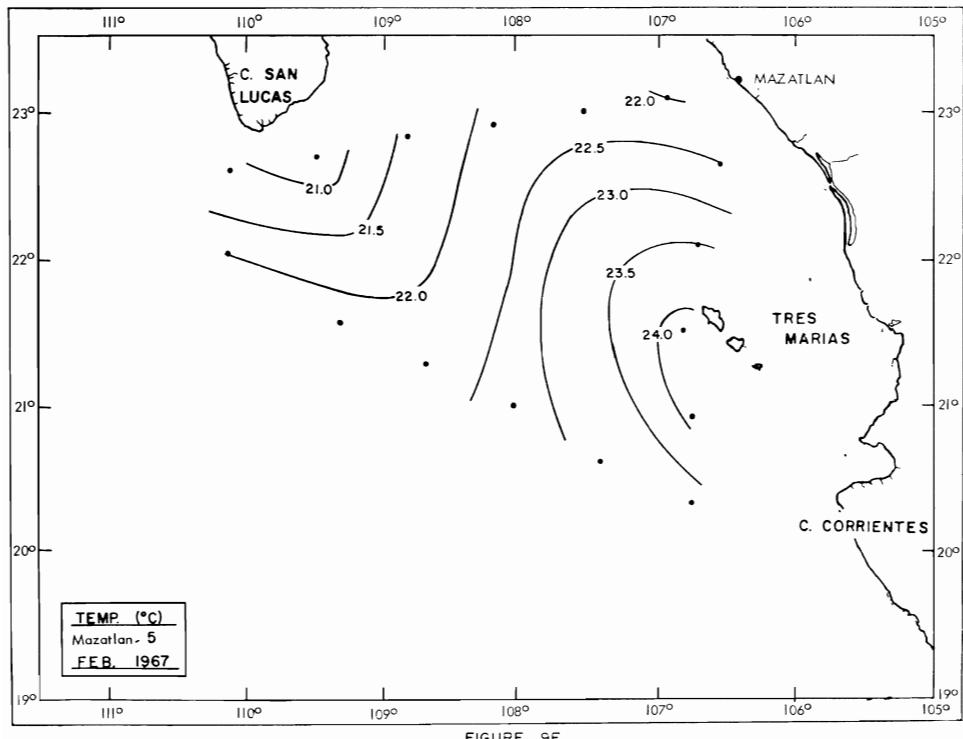


FIGURE 9E

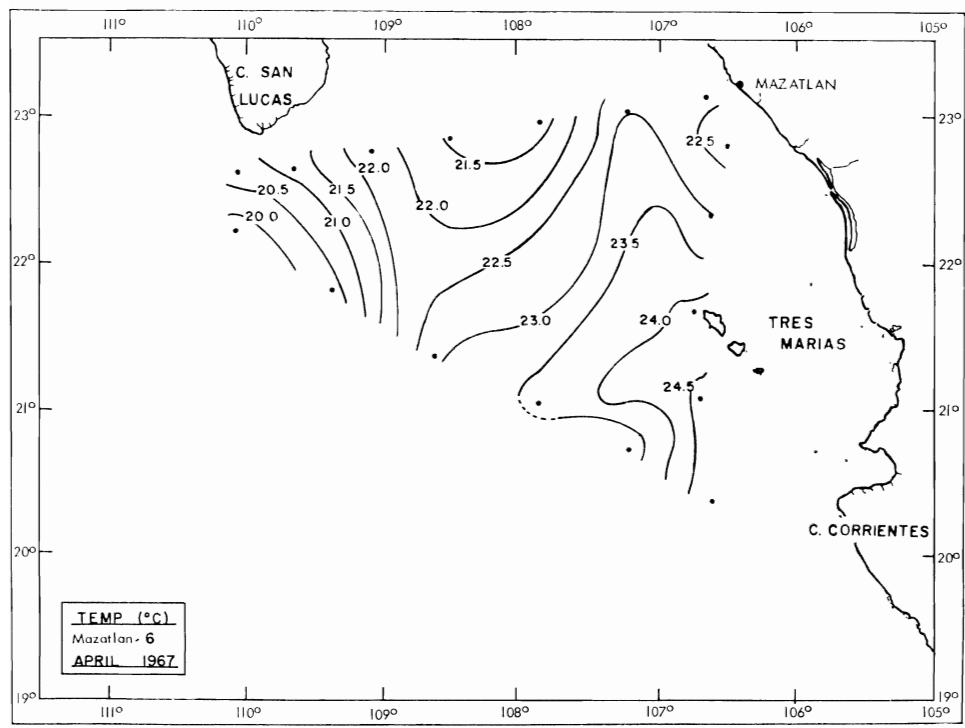


FIGURE 9F

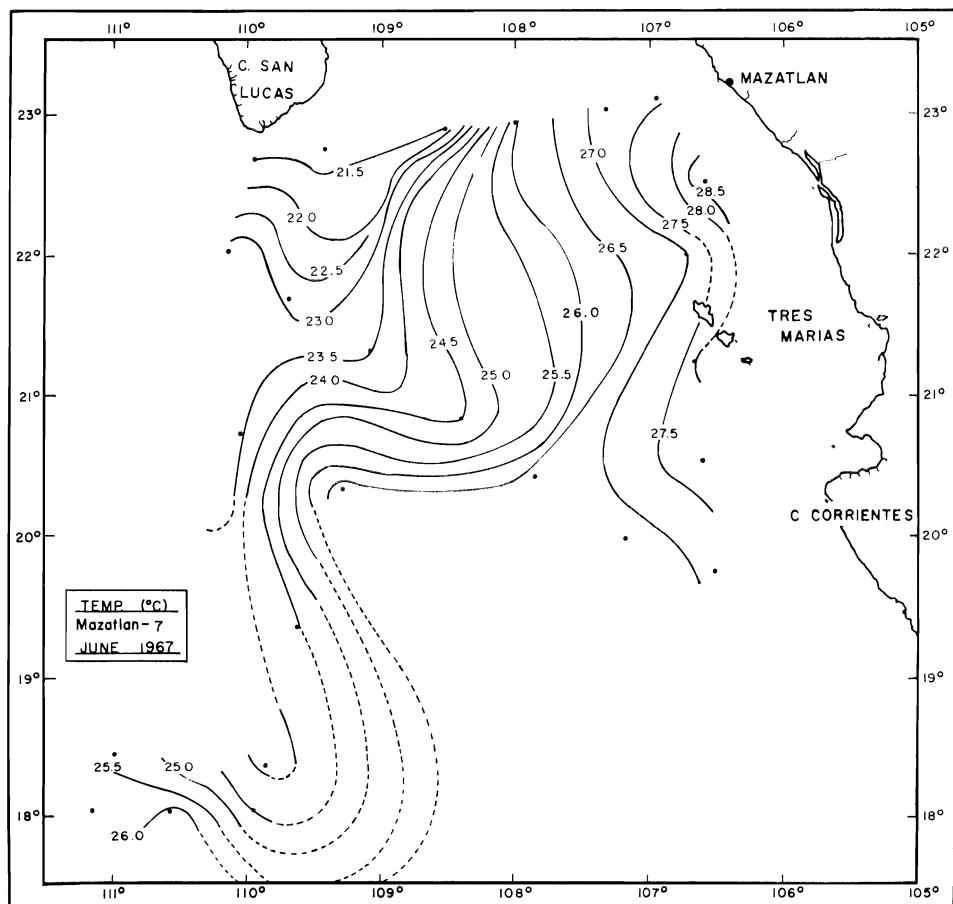


FIGURE 9G

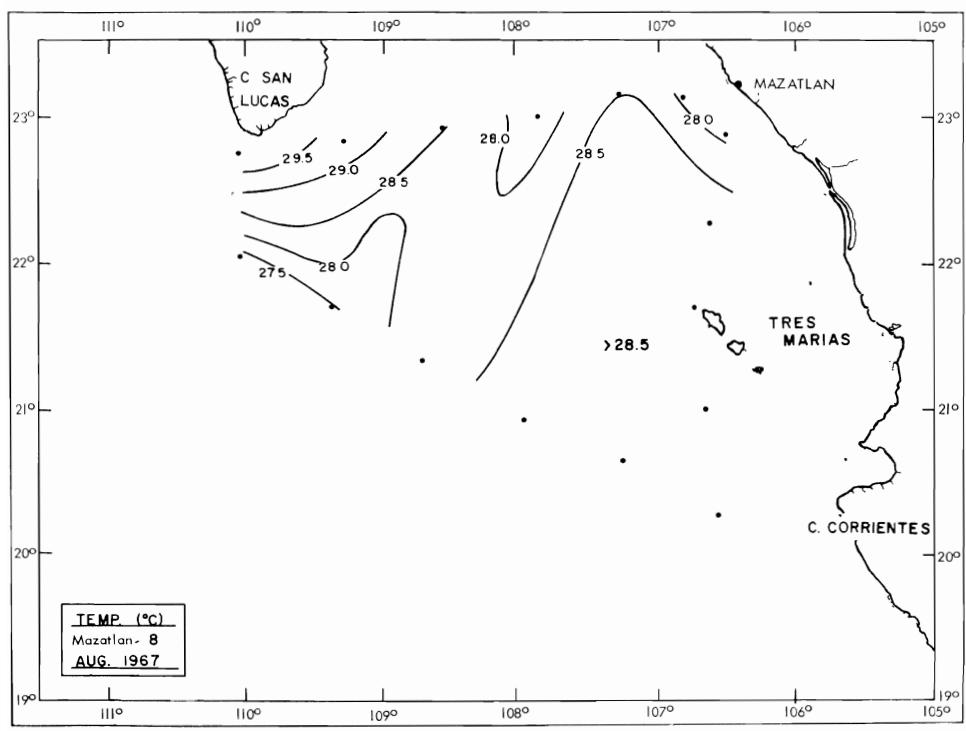


FIGURE 9H

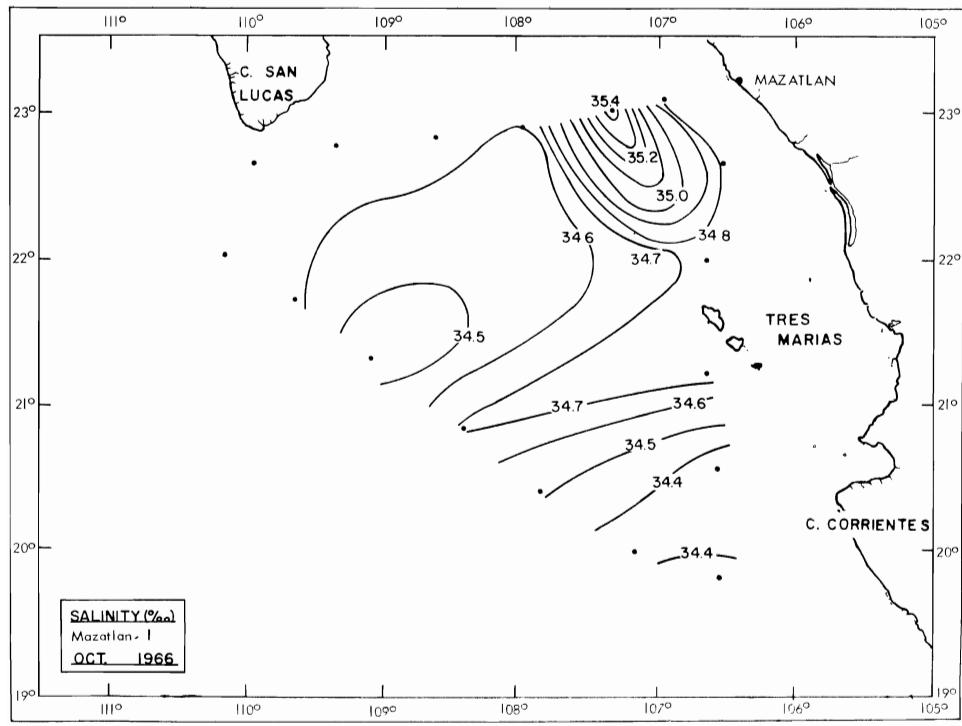


FIGURE 9I

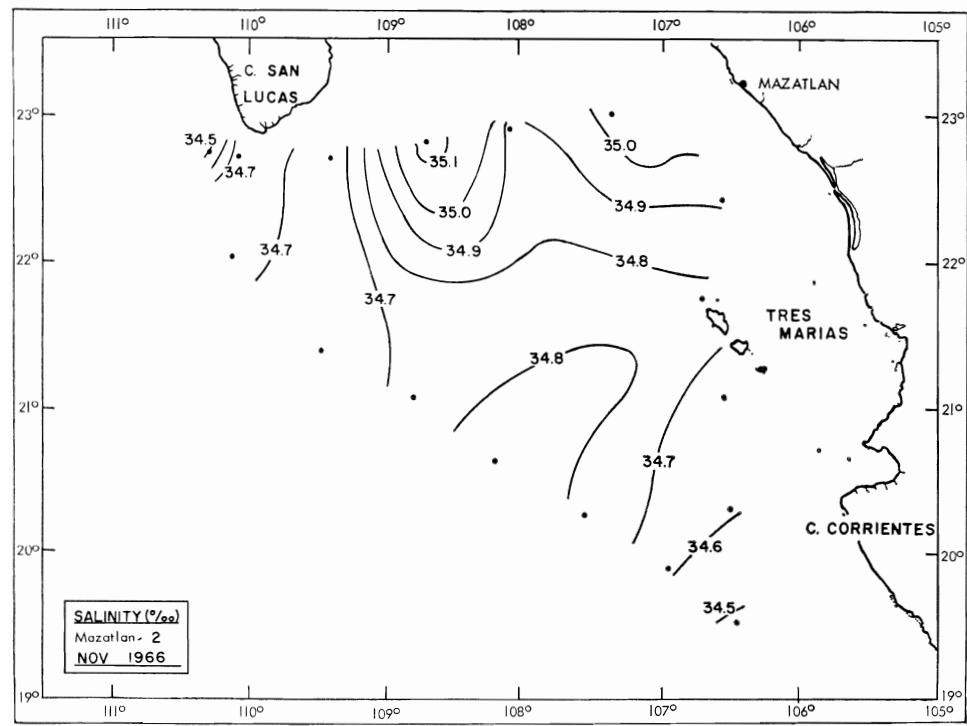


FIGURE 9J

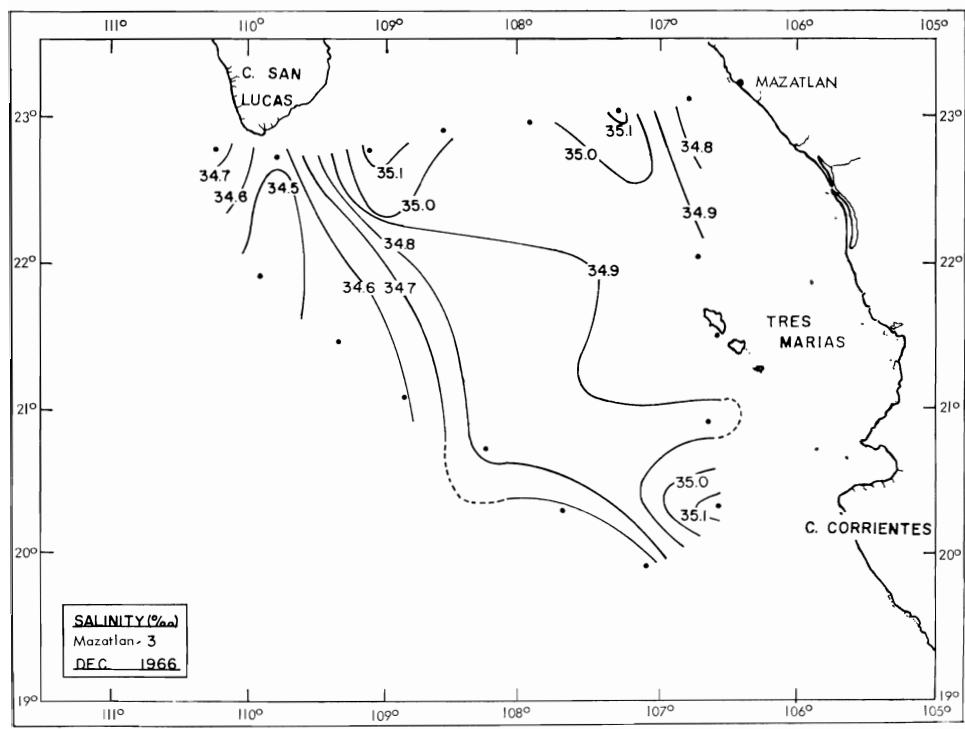


FIGURE 9K

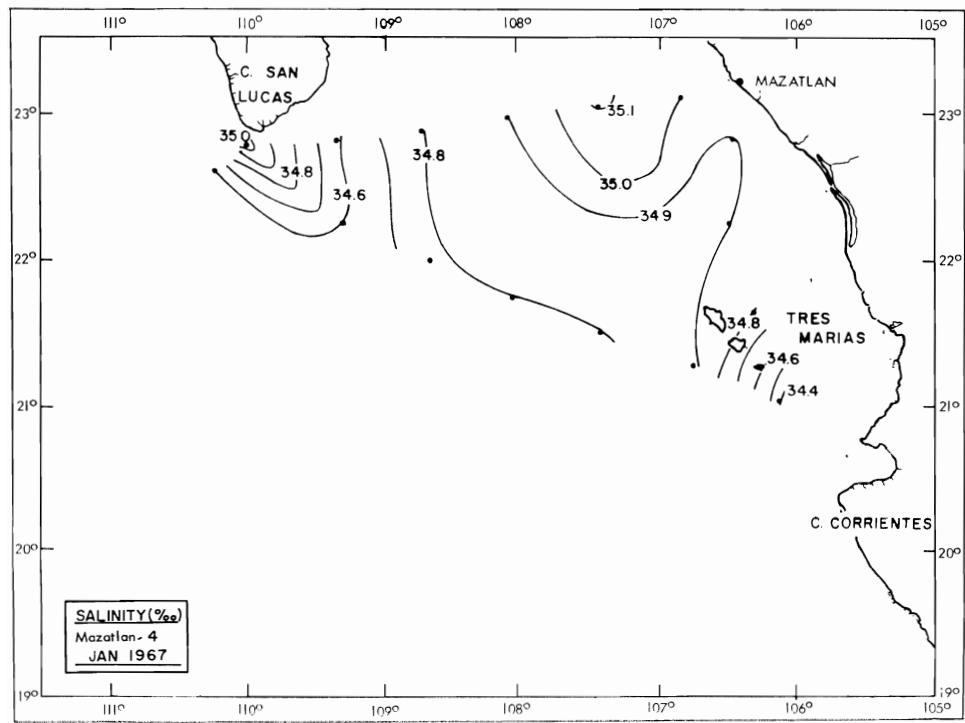


FIGURE 9L

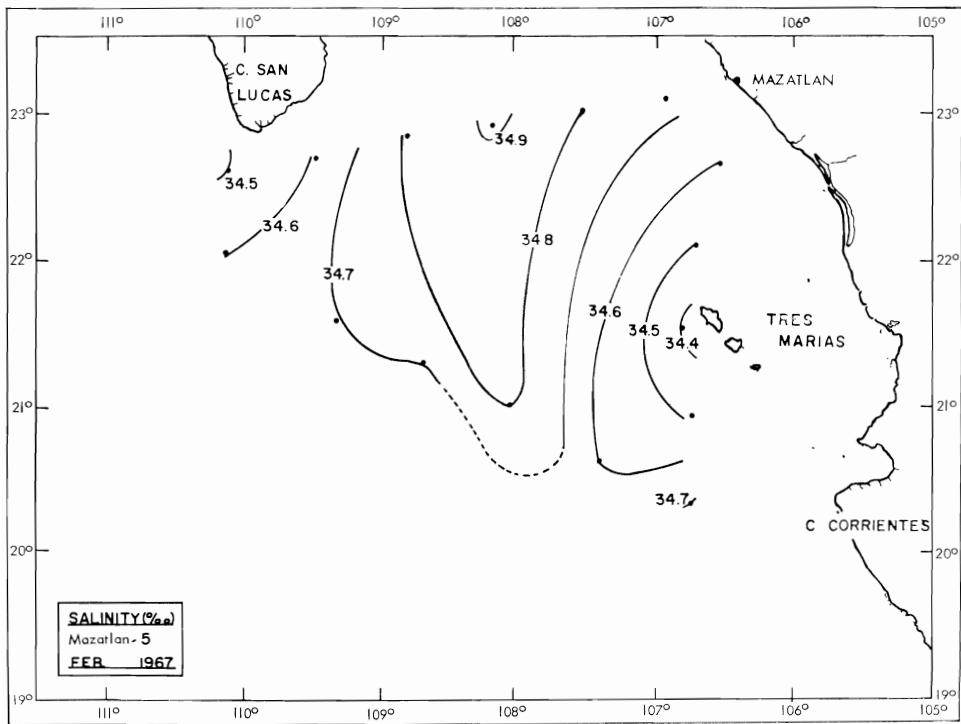


FIGURE 9M

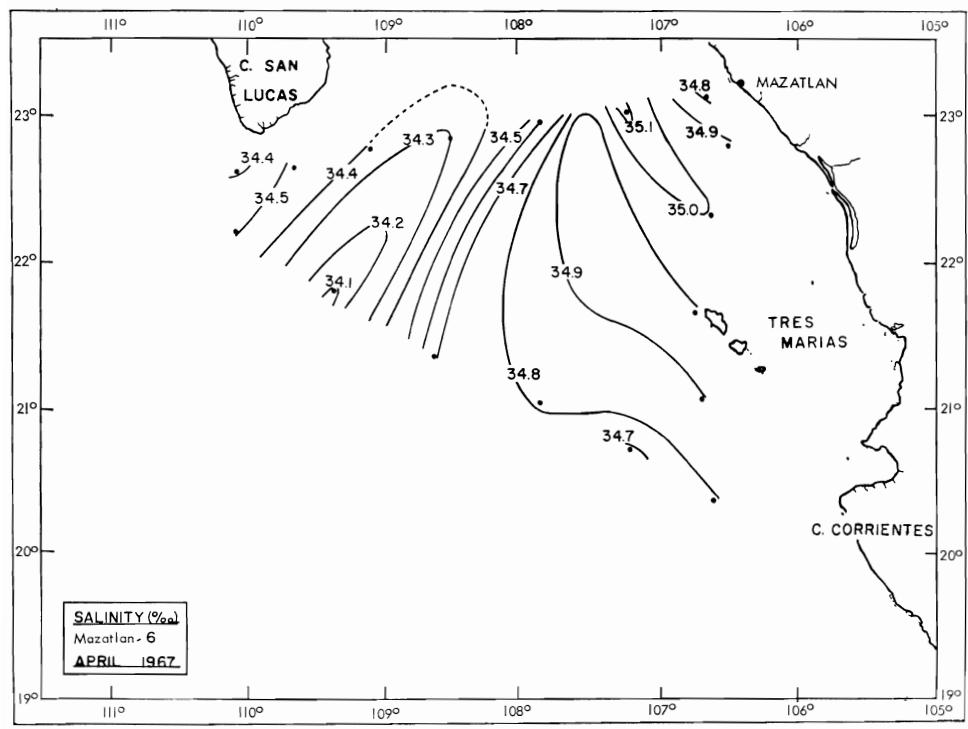


FIGURE 9N

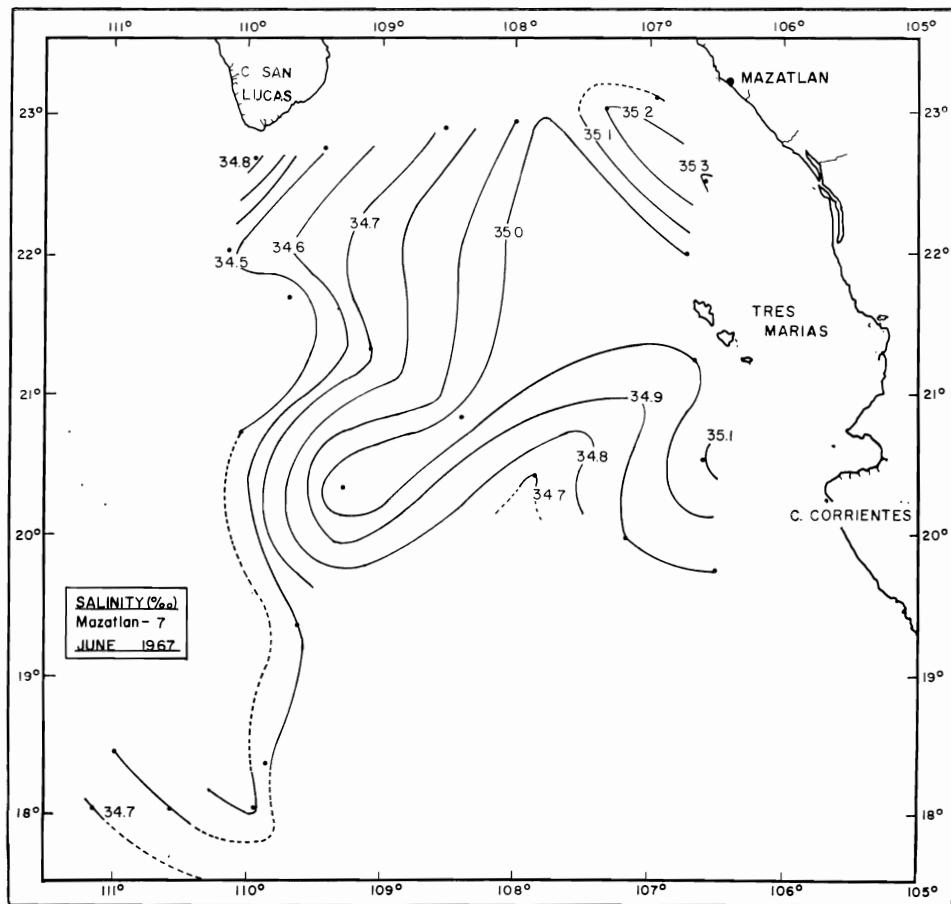


FIGURE 90

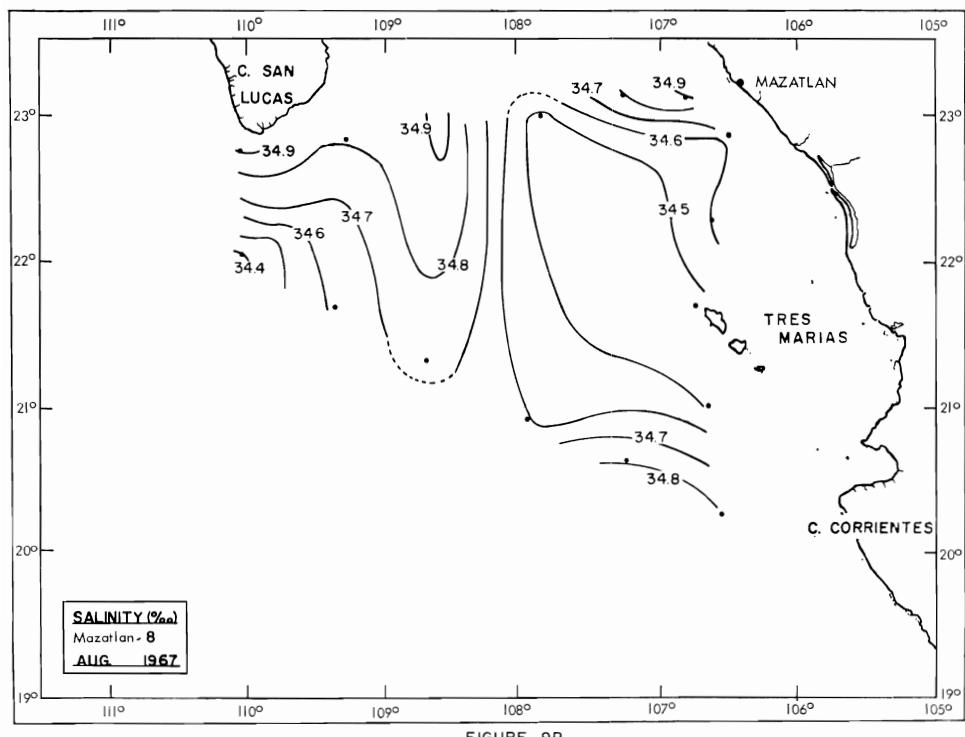


FIGURE 9P

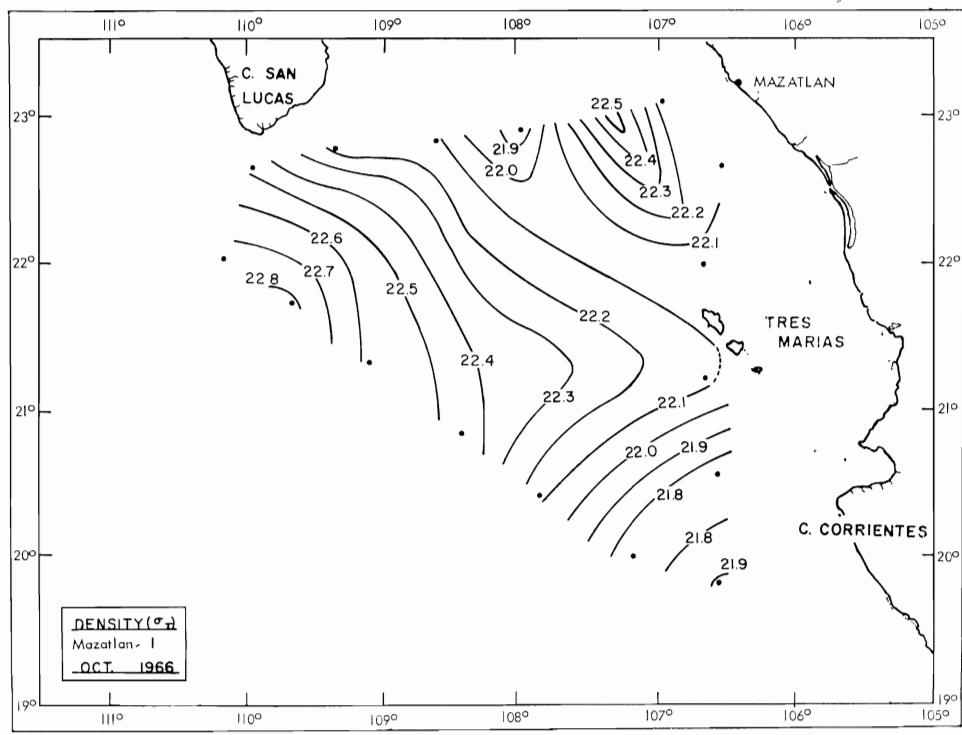
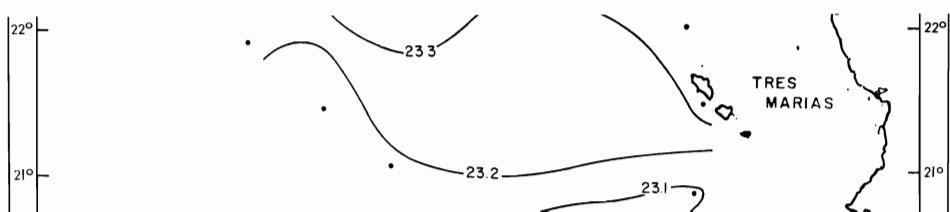
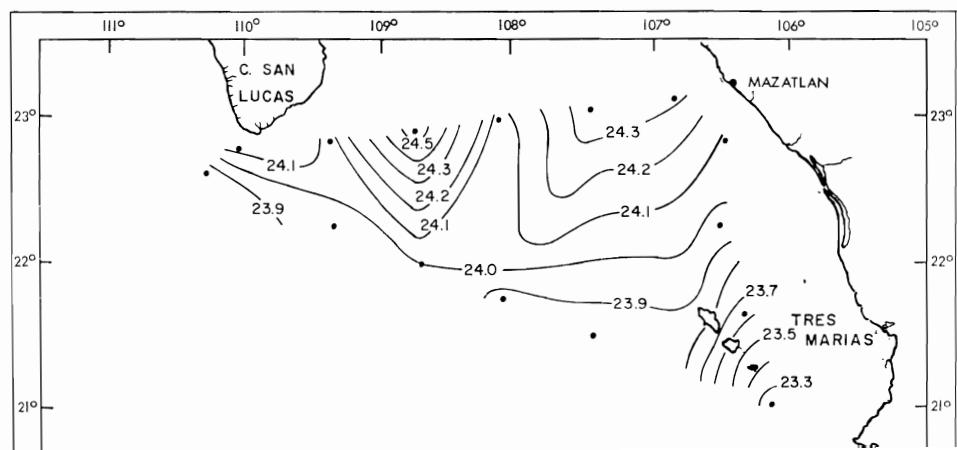
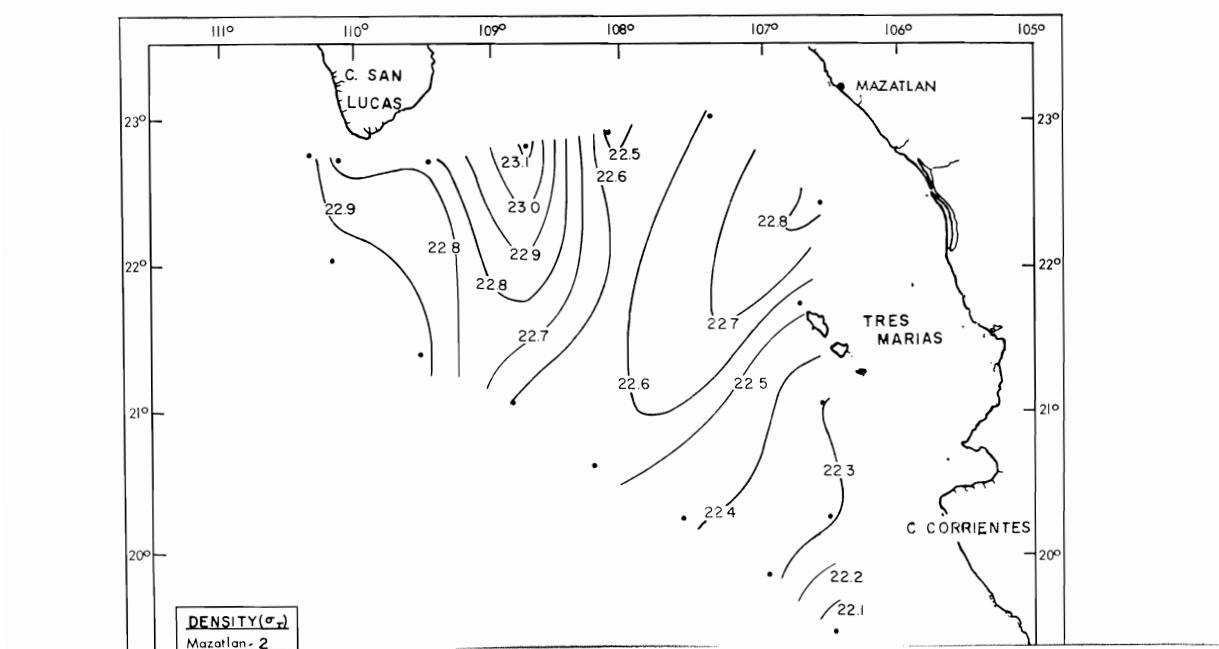


FIGURE 9Q





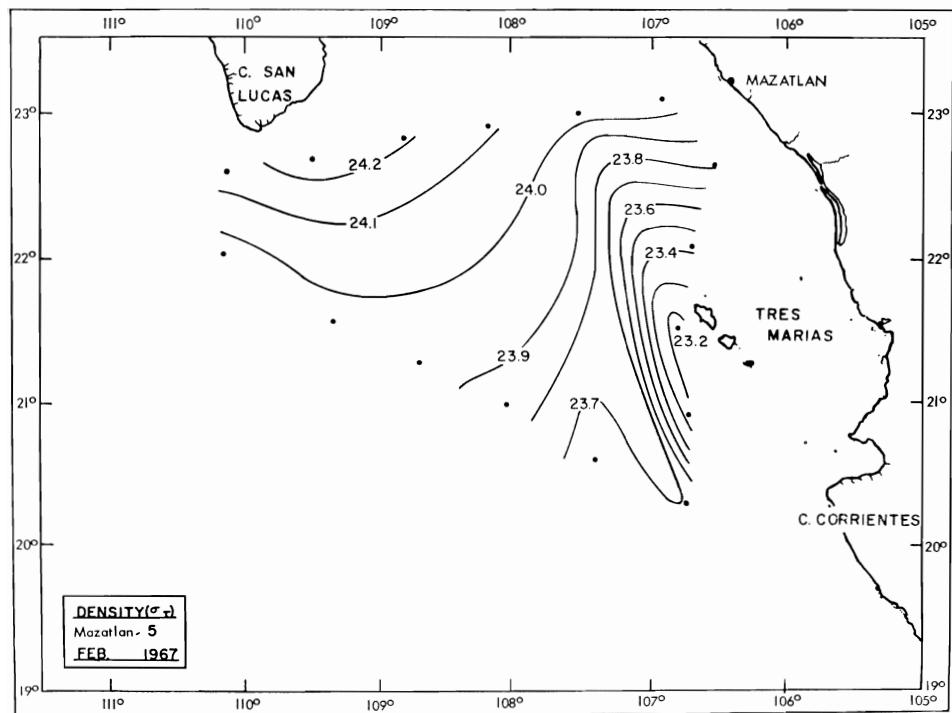


FIGURE 9U

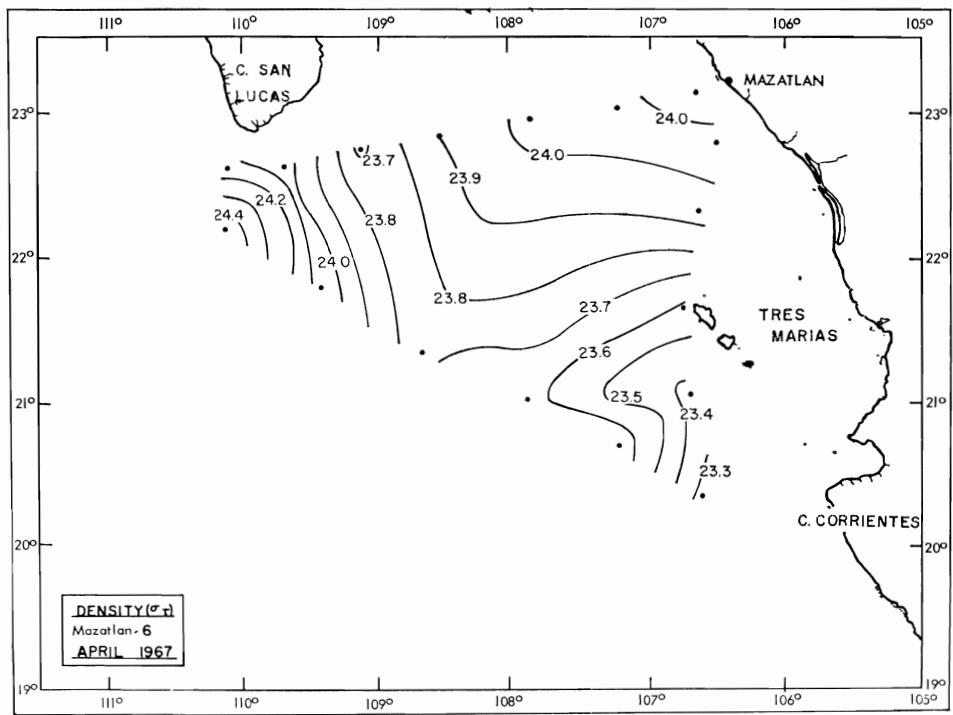


FIGURE 9V

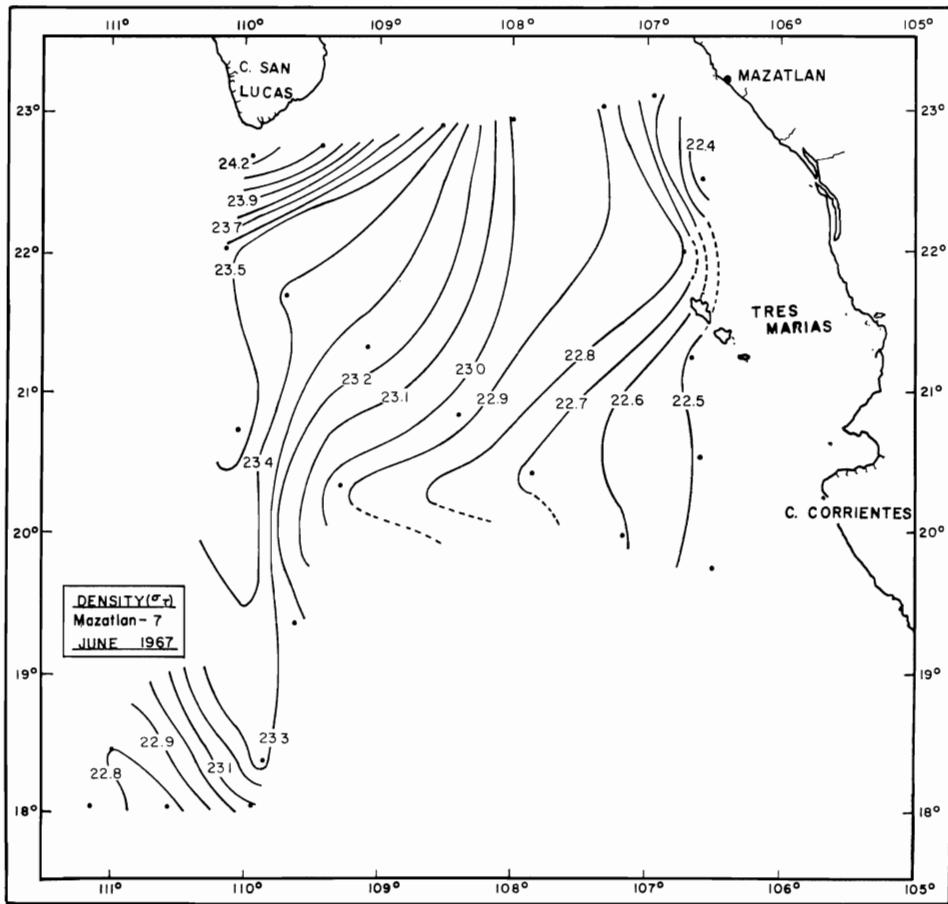


FIGURE 9W

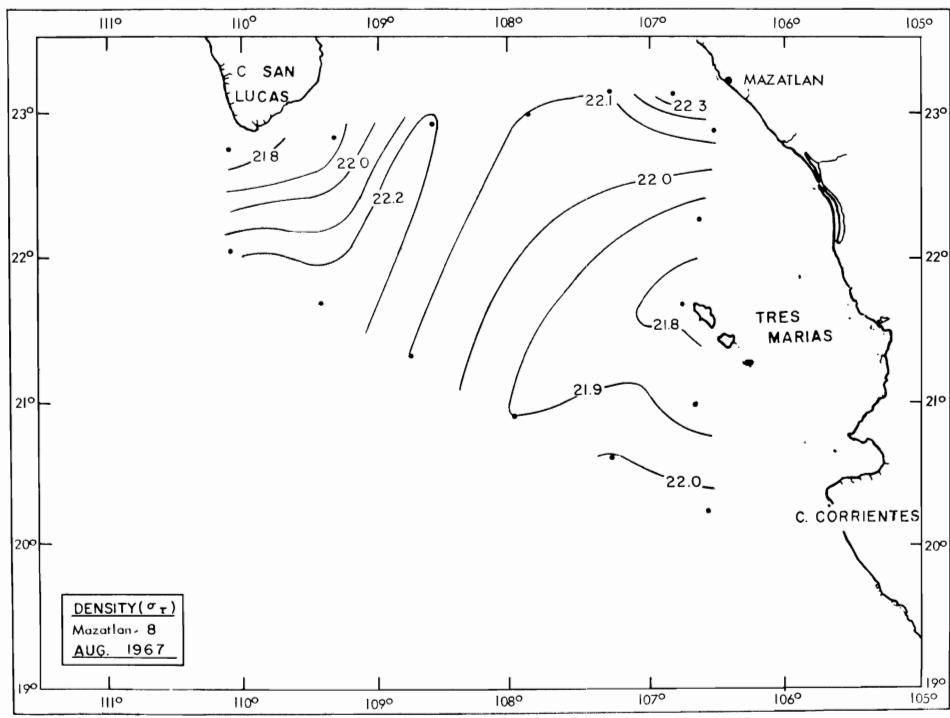


FIGURE 9X

MZ-1 OCT. 1966

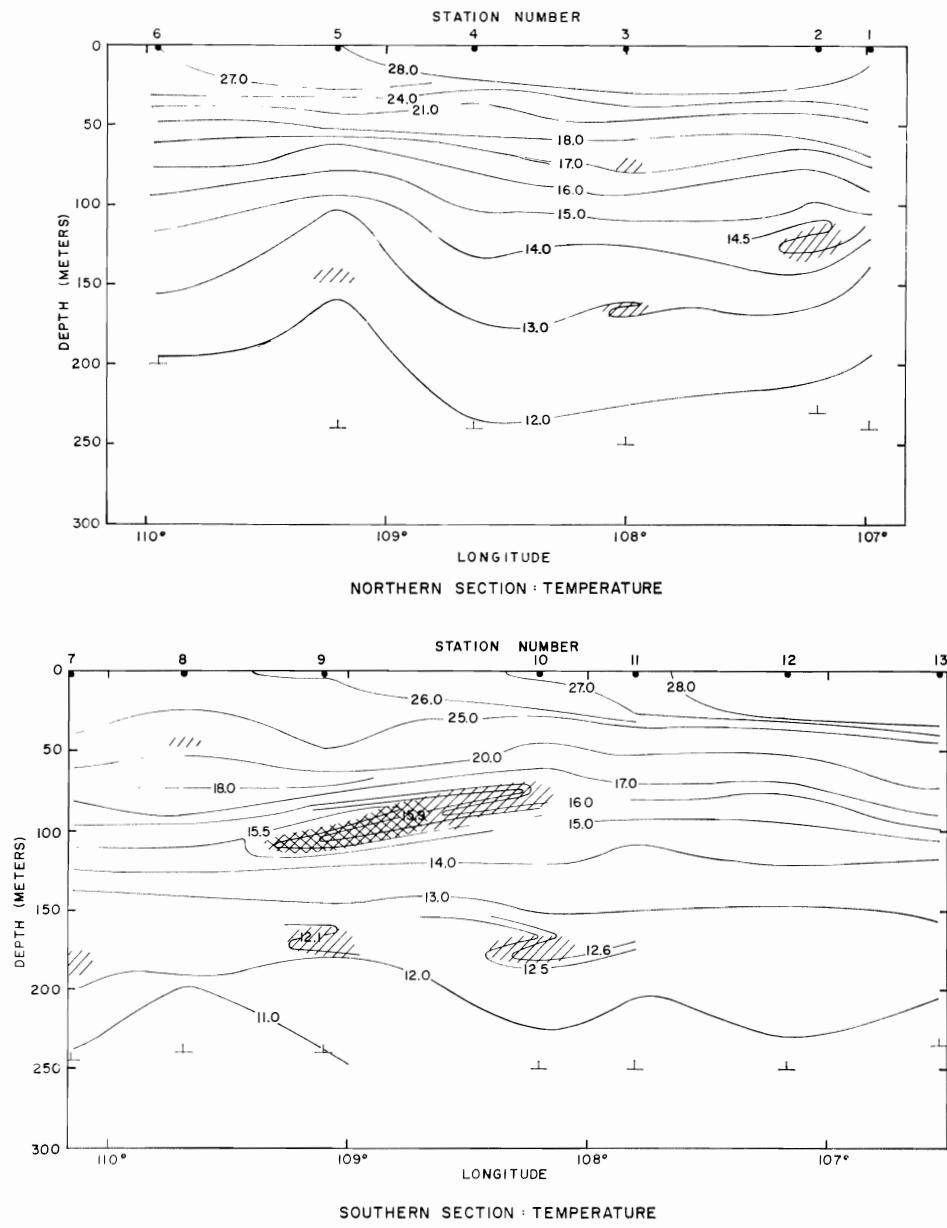


FIGURE 10 A

FIGURES 10A to 10H. Vertical profiles of temperature ($^{\circ}\text{C}$) for eight cruises. The northern profiles extend from Mazatlán to Cape San Lucas; the southern profiles extend diagonally from the vicinity of Cape San Lucas to the South of Islas Tres Marias. The magnitude of temperature inversions are indicated by intensity of shading: light $\leq 0.2^{\circ}\text{C}$, medium $0.2\text{--}1.0^{\circ}\text{C}$, and dark $>1.0^{\circ}\text{C}$.

FIGURES 10I to 10M. Vertical profiles of salinity (‰) for five cruises in the same areas described in Figures 10A to 10H.

FIGURAS 10A a 10H. Perfiles verticales de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para ocho cruceros. Los perfiles septentrionales se extienden desde Mazatlán hasta el Cabo San Lucas; los perfiles meridionales corren diagonalmente desde la vecindad de Cabo San Lucas hacia el sur de las Islas Tres Marias. La magnitud de las inversiones de temperatura se indica según la intensidad de la sombra: clara $\leq 0.2^{\circ}\text{C}$, mediana $0.2\text{--}1.0^{\circ}\text{C}$ y obscura $>1.0^{\circ}\text{C}$.

FIGURAS 10I a 10M. Perfiles verticales de salinidad (‰) correspondientes a cinco cruceros en las mismas áreas descritas en las Figuras 10A a 10H.

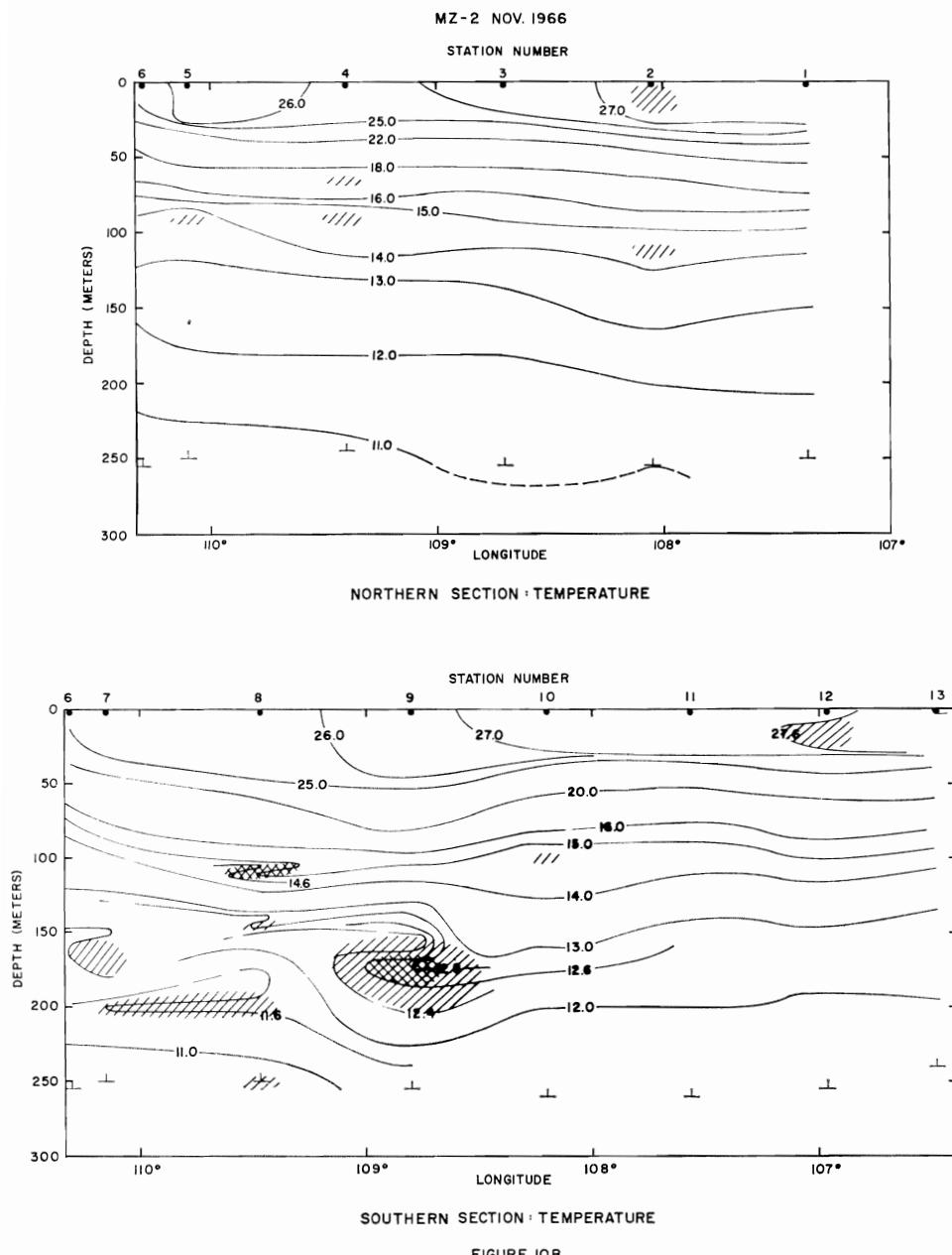


FIGURE IOB

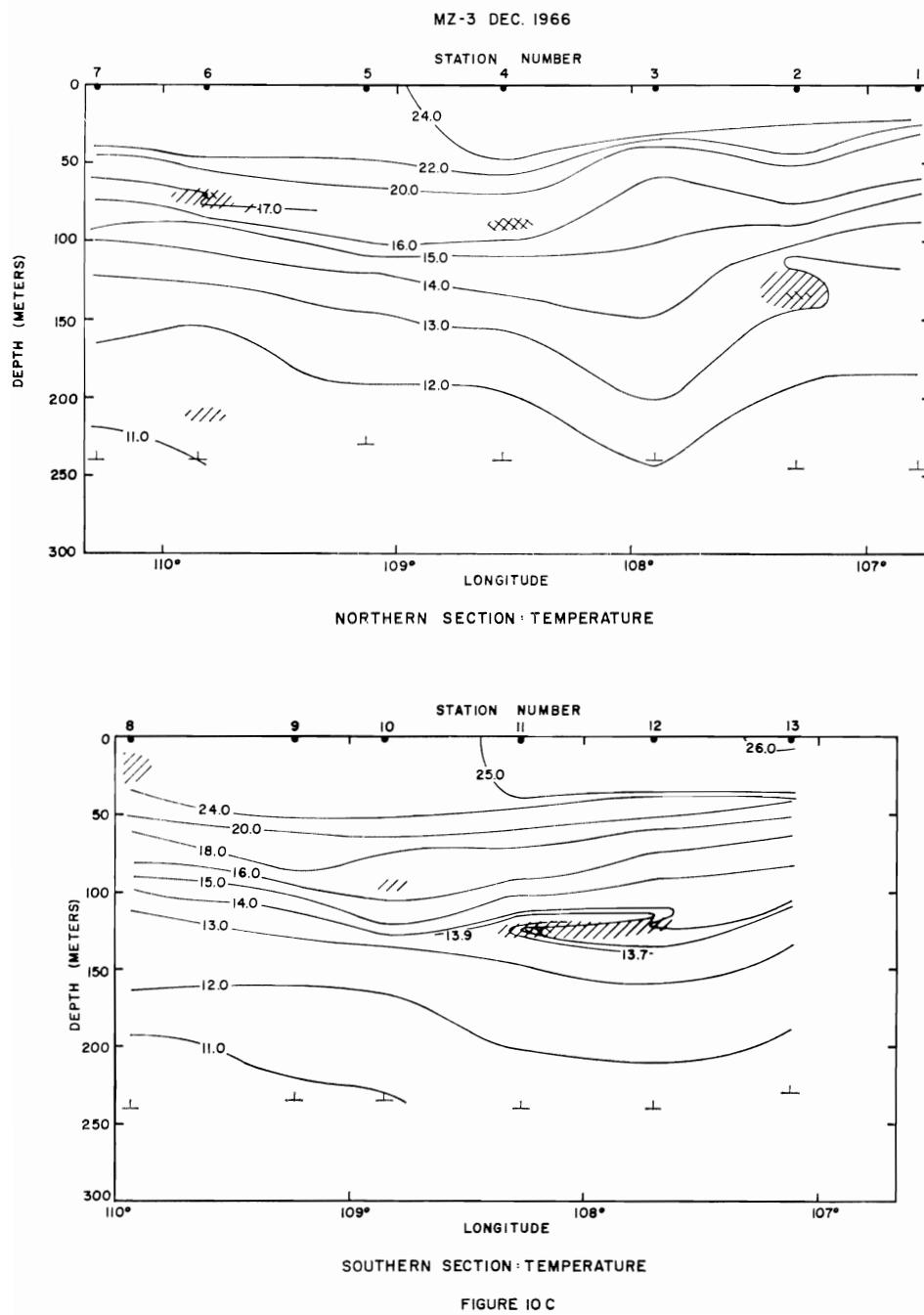


FIGURE 10 C

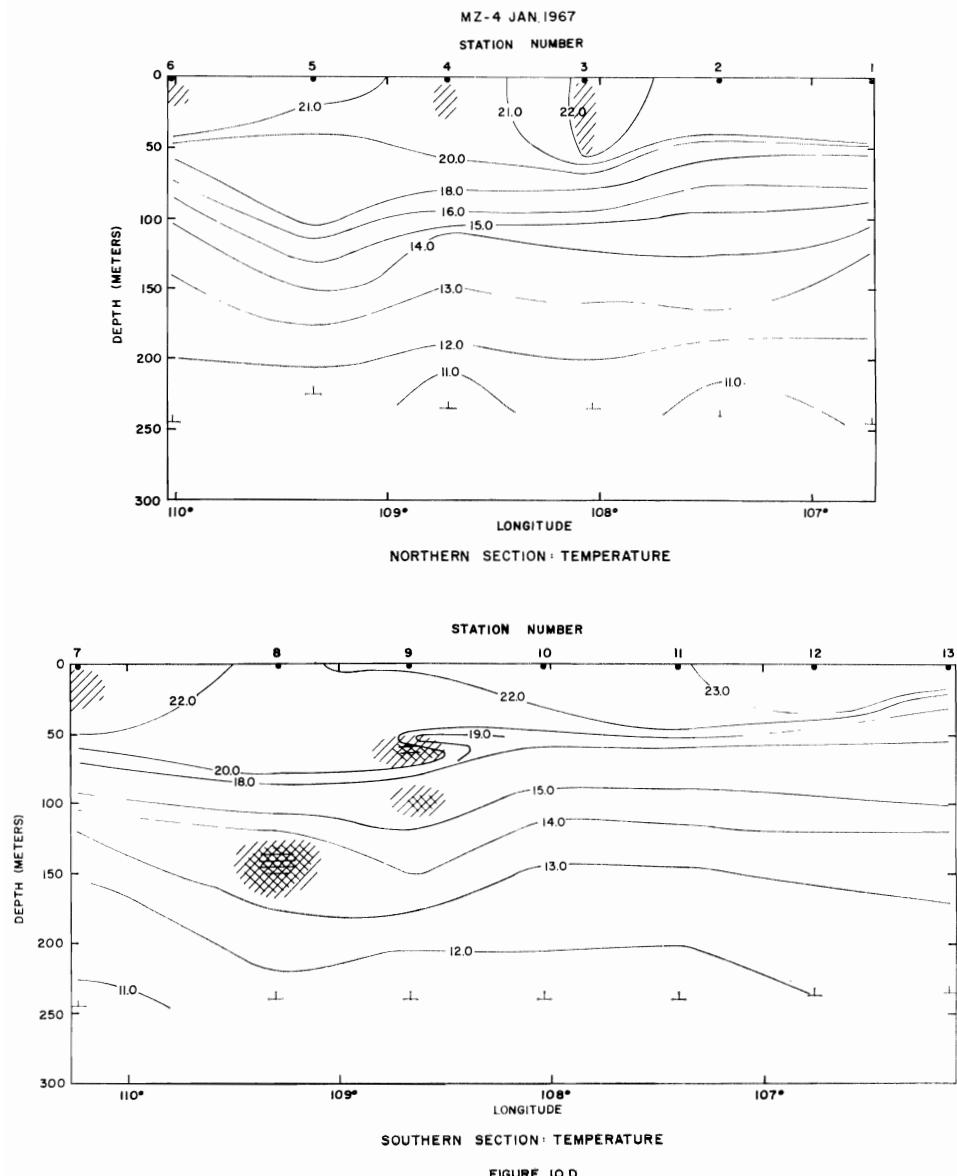


FIGURE 10 D

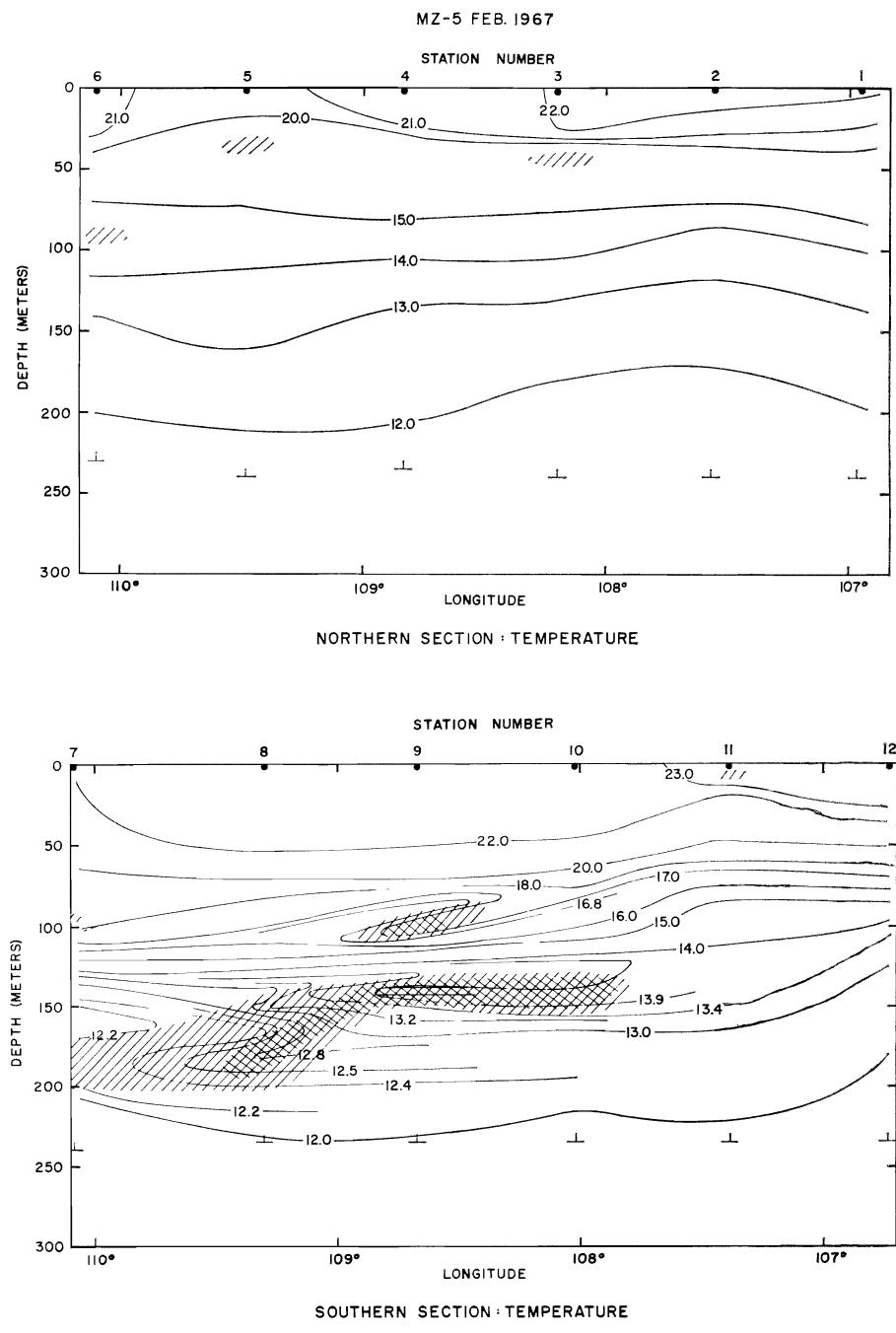


FIGURE 10 E

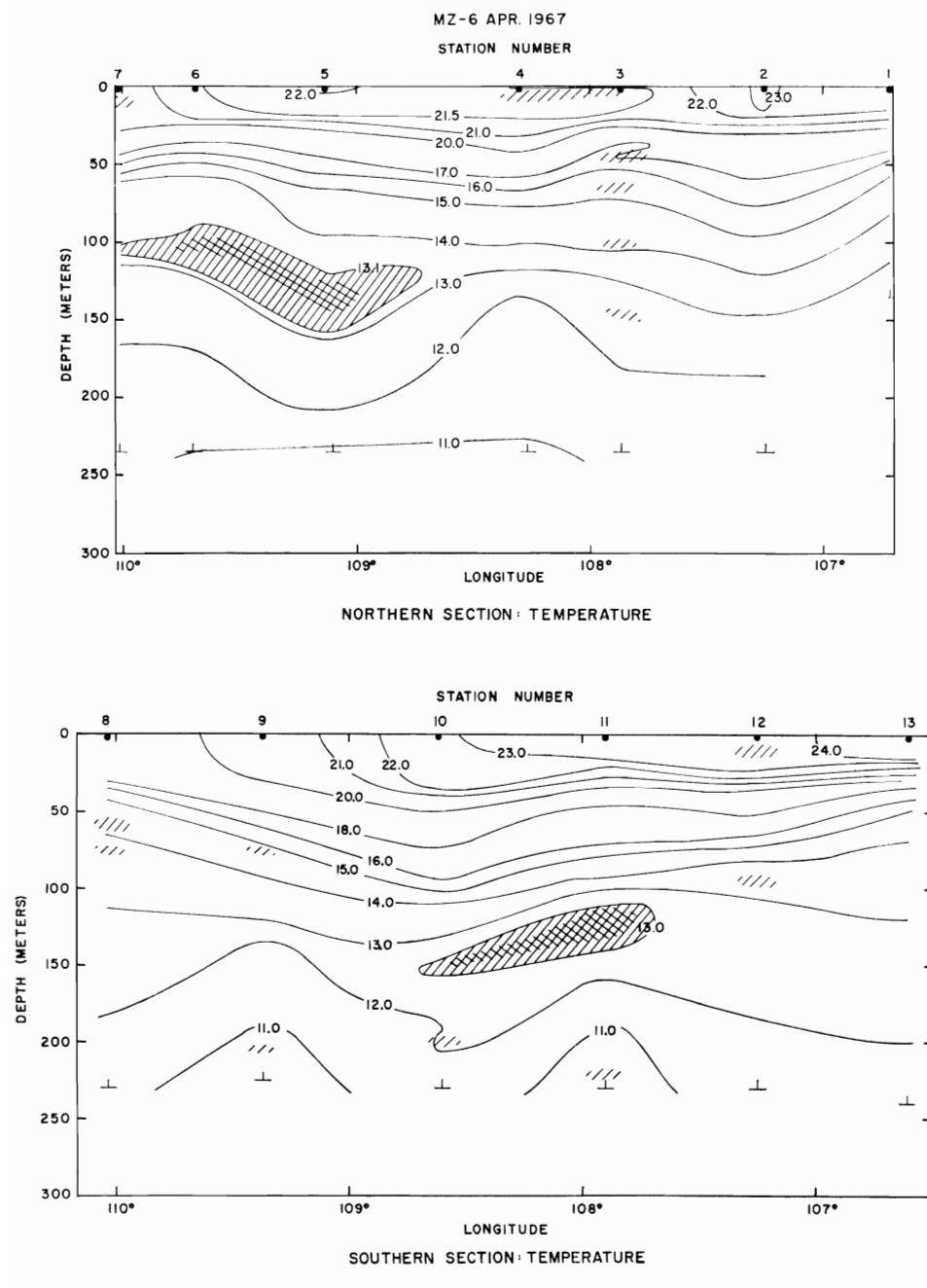


FIGURE 10F

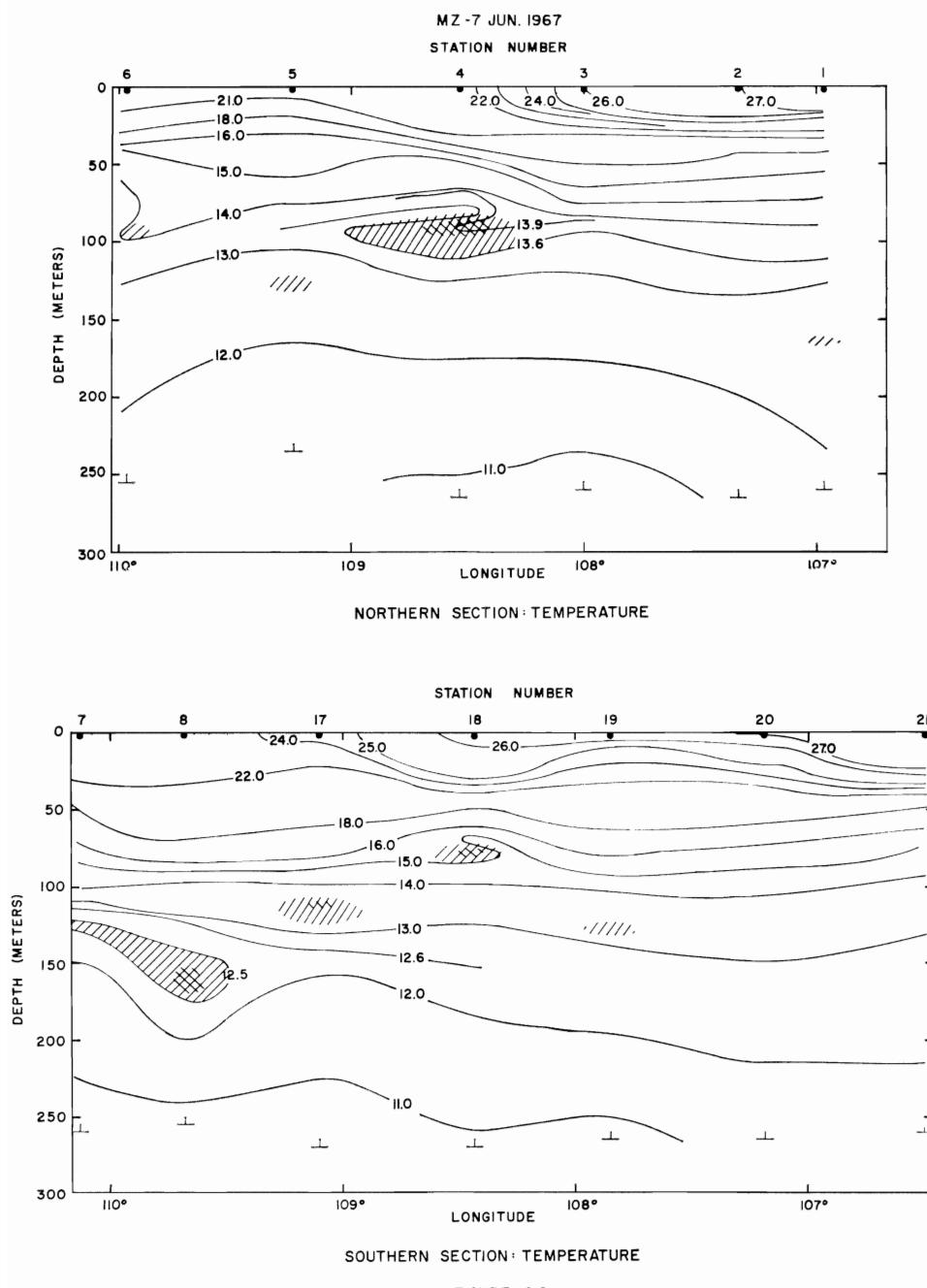


FIGURE 10 G

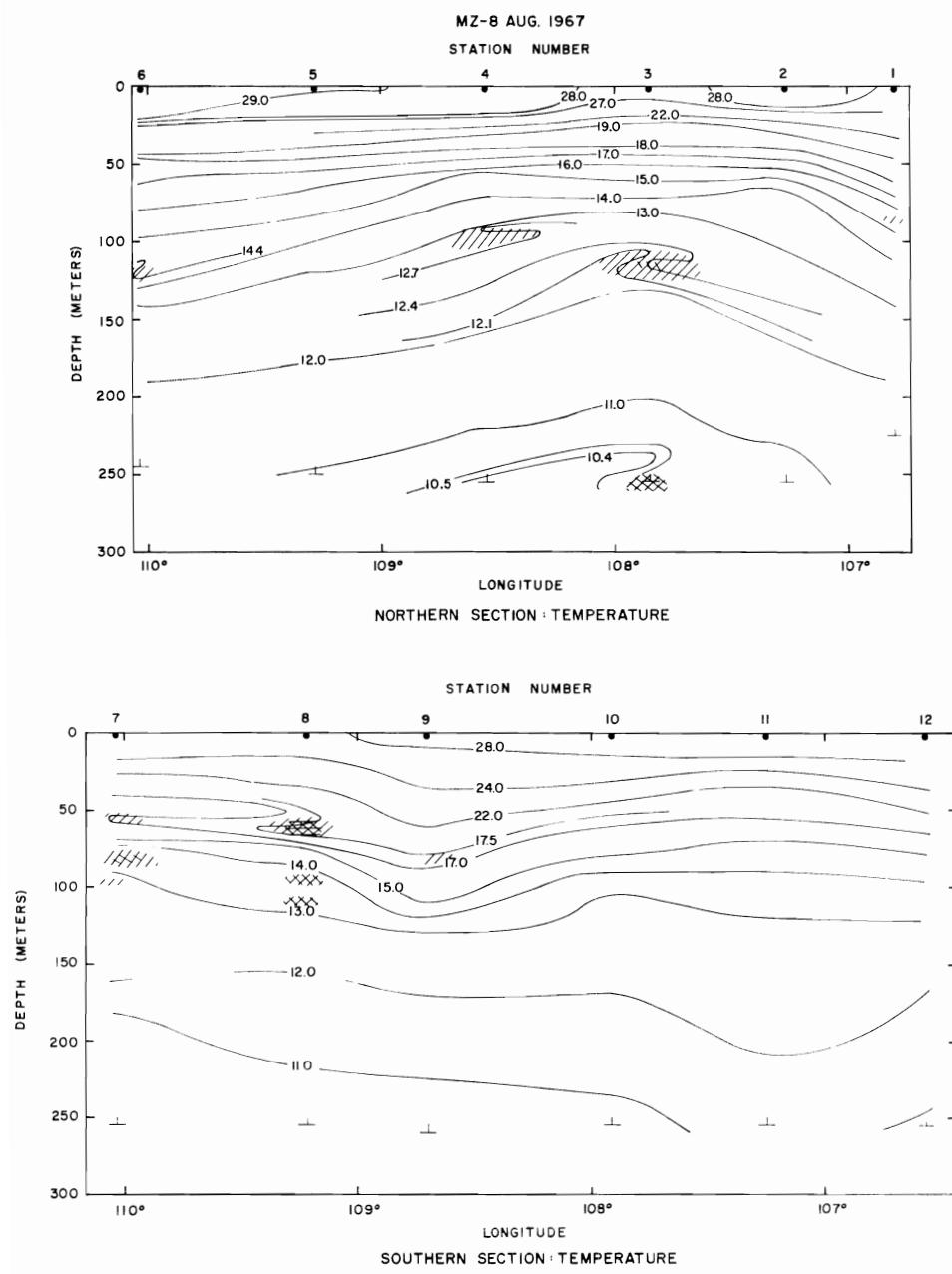
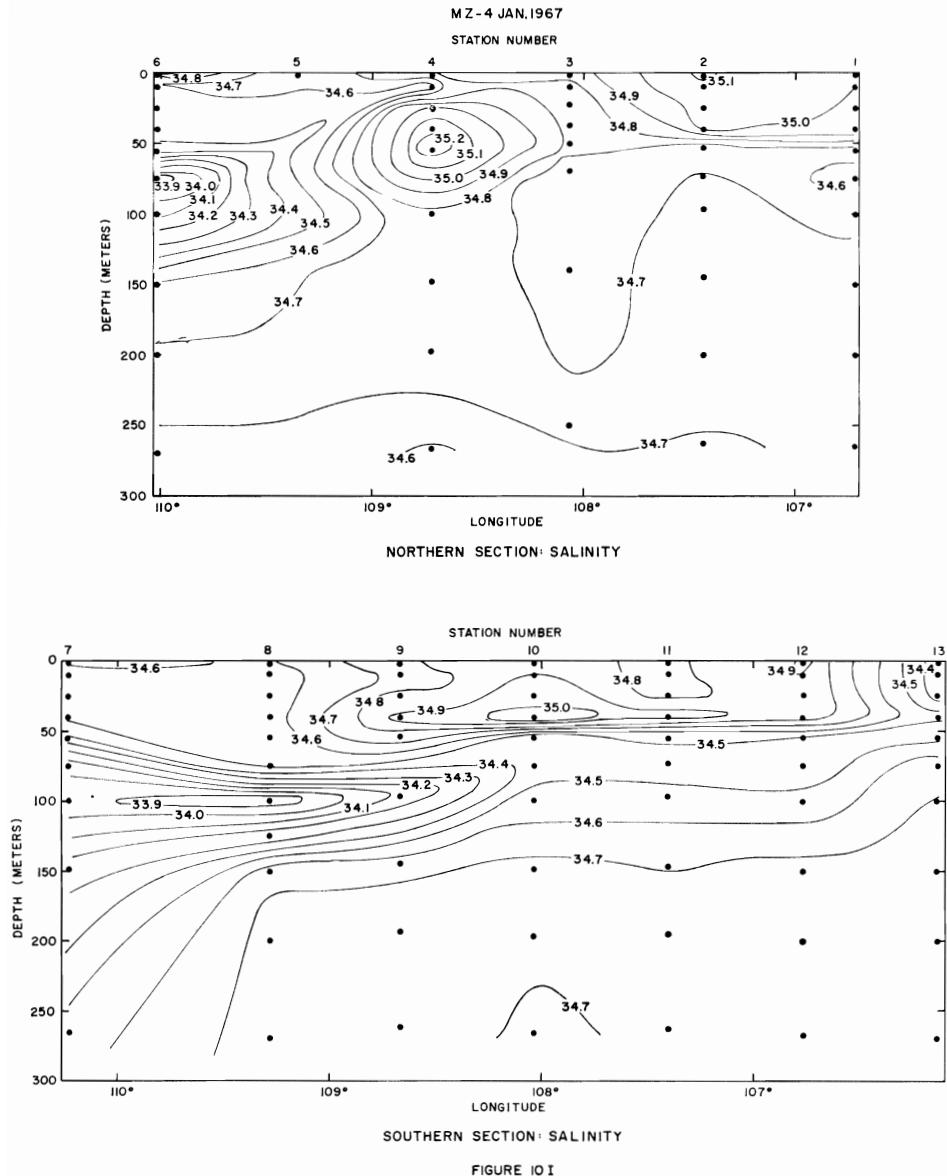


FIGURE 10 H



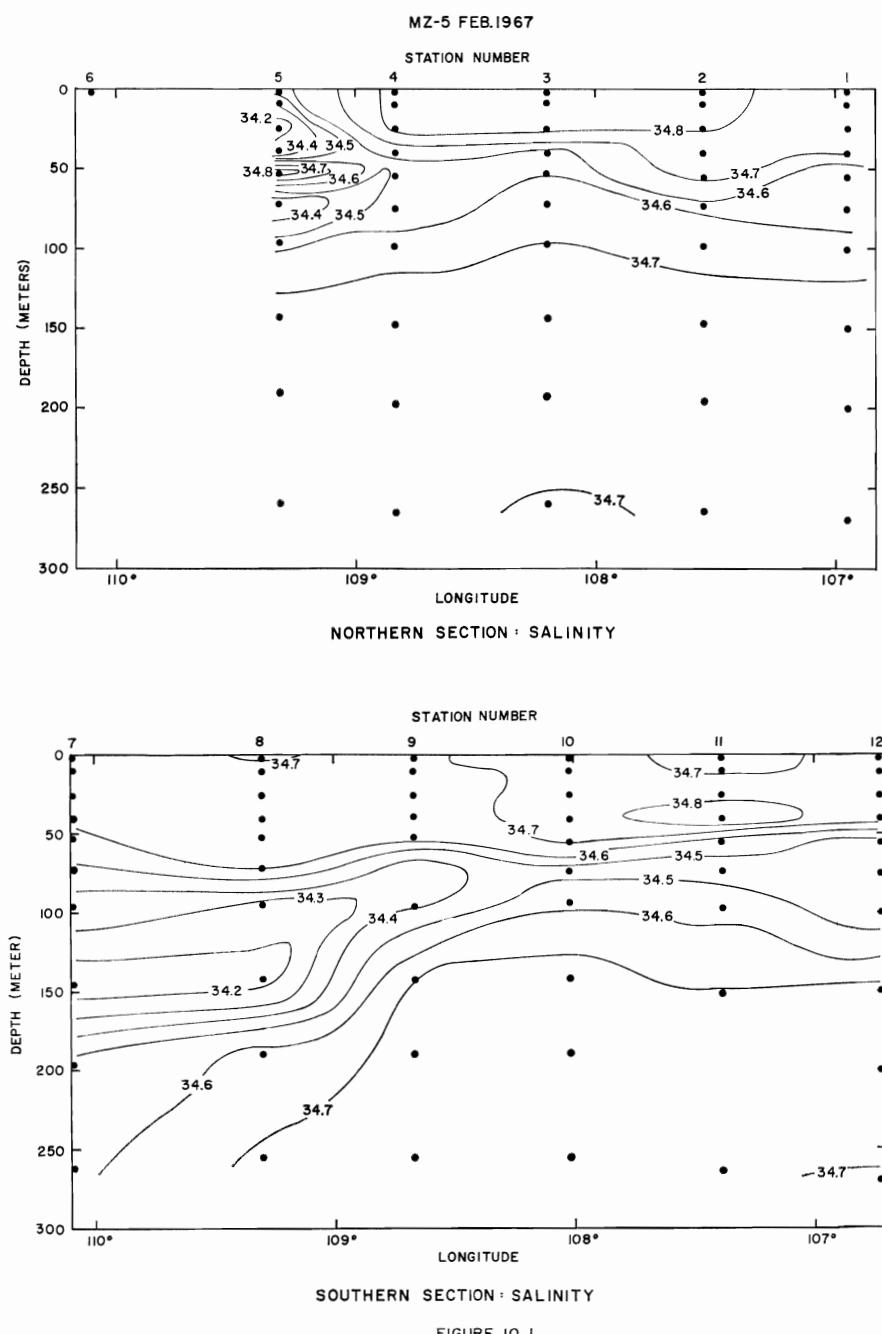


FIGURE IO J

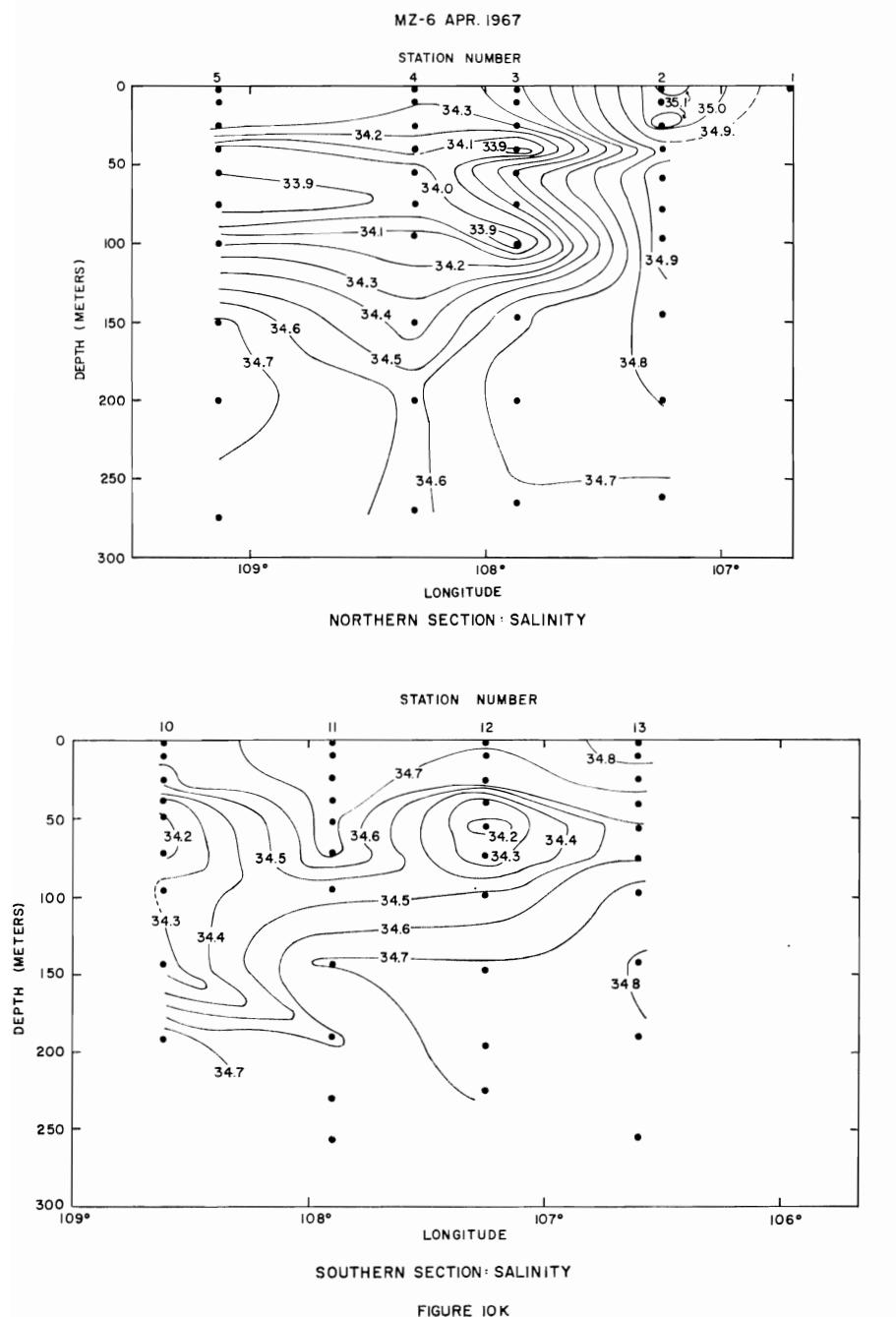


FIGURE 10K

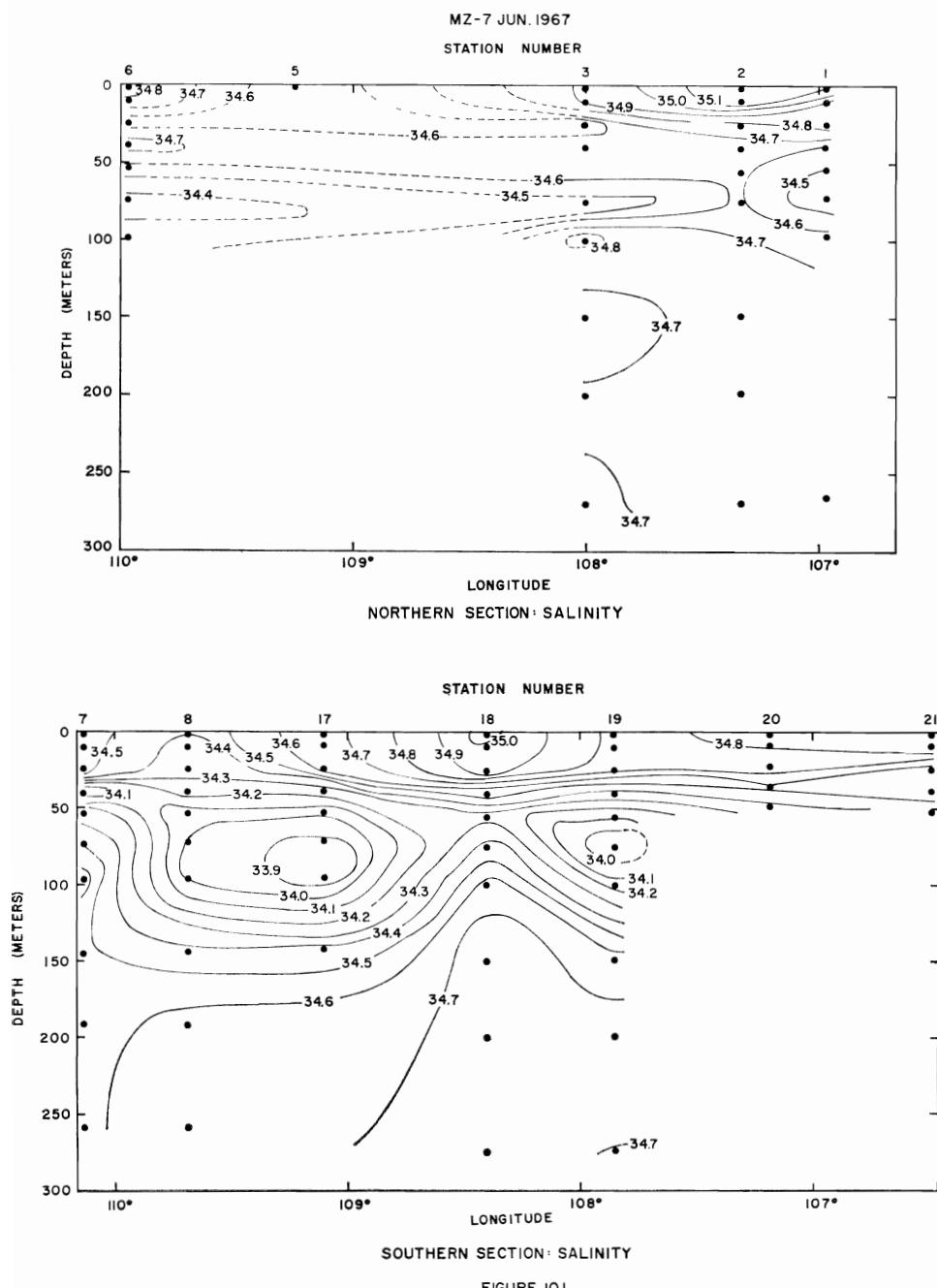
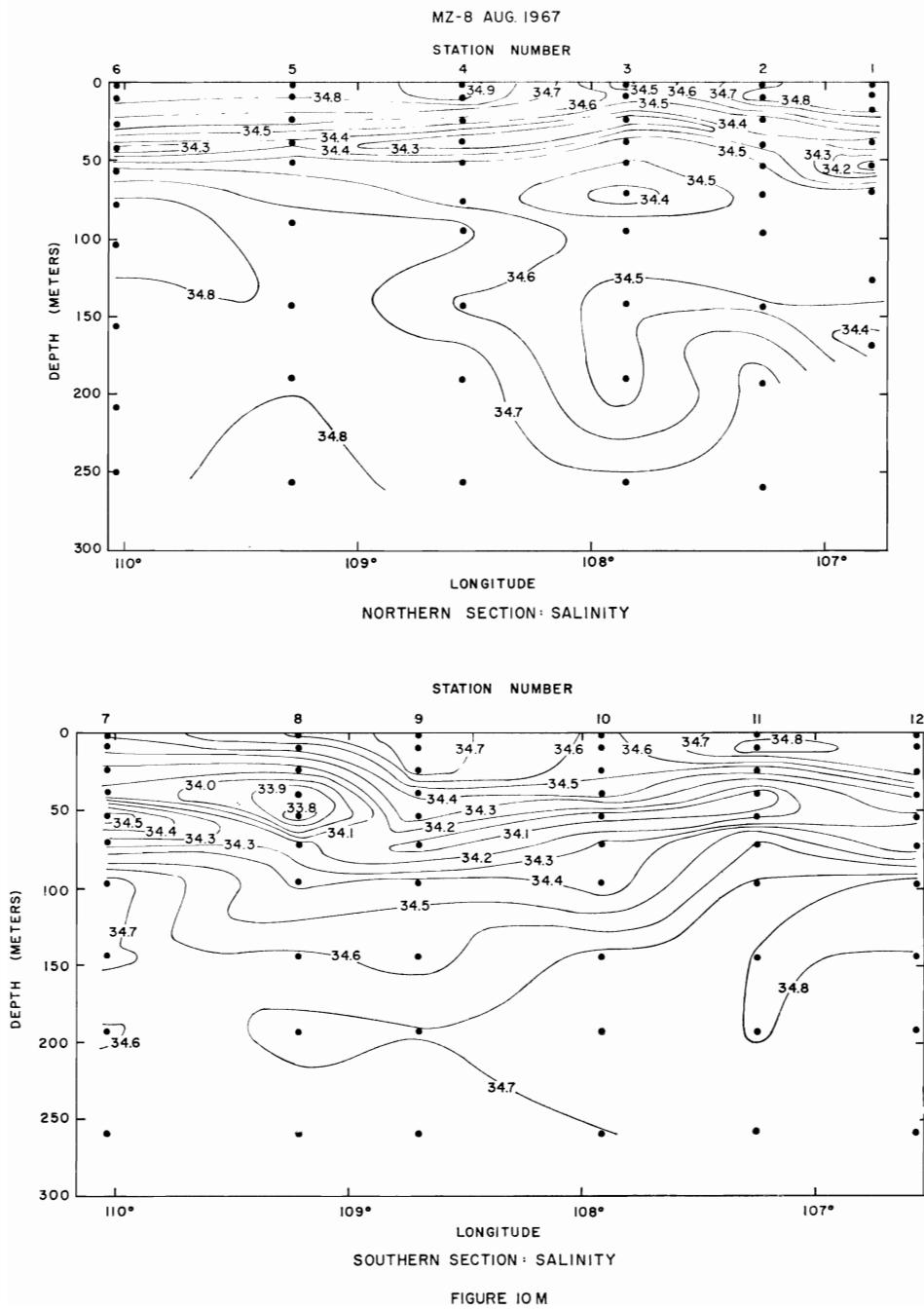


FIGURE 10L



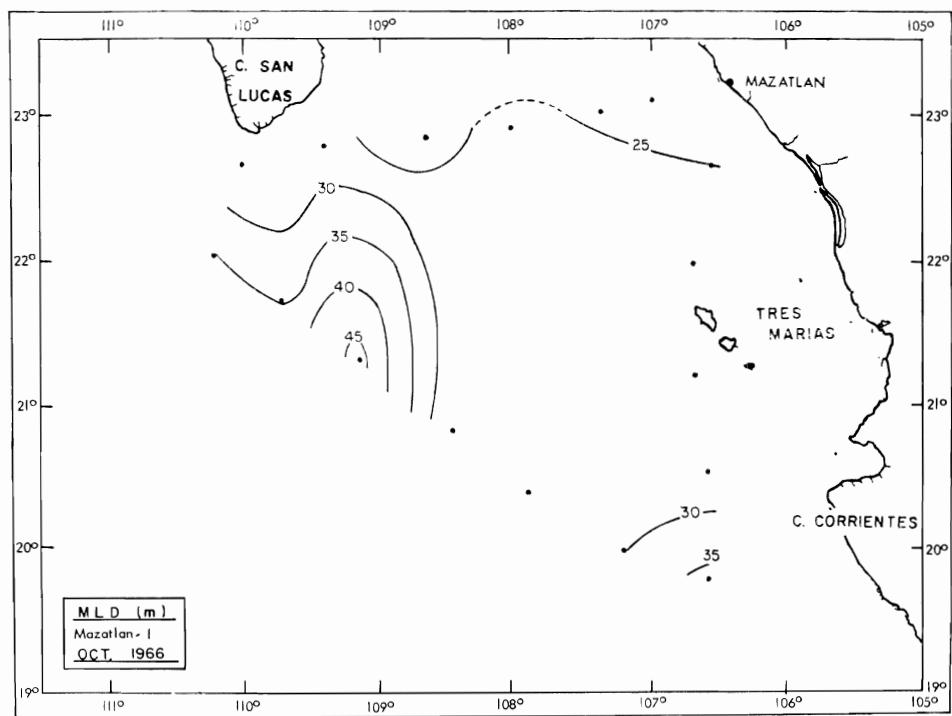


FIGURE II A

FIGURES 11A to 11H. Mixed layer depth (MLD; depth of the surface isothermal layer) for eight cruises. Contour interval: 5m.

FIGURAS 11A a 11H. Profundidad de la capa mixta (MLD; profundidad de la capa isotermal superficial). Intervalo de contorno: 5 m.

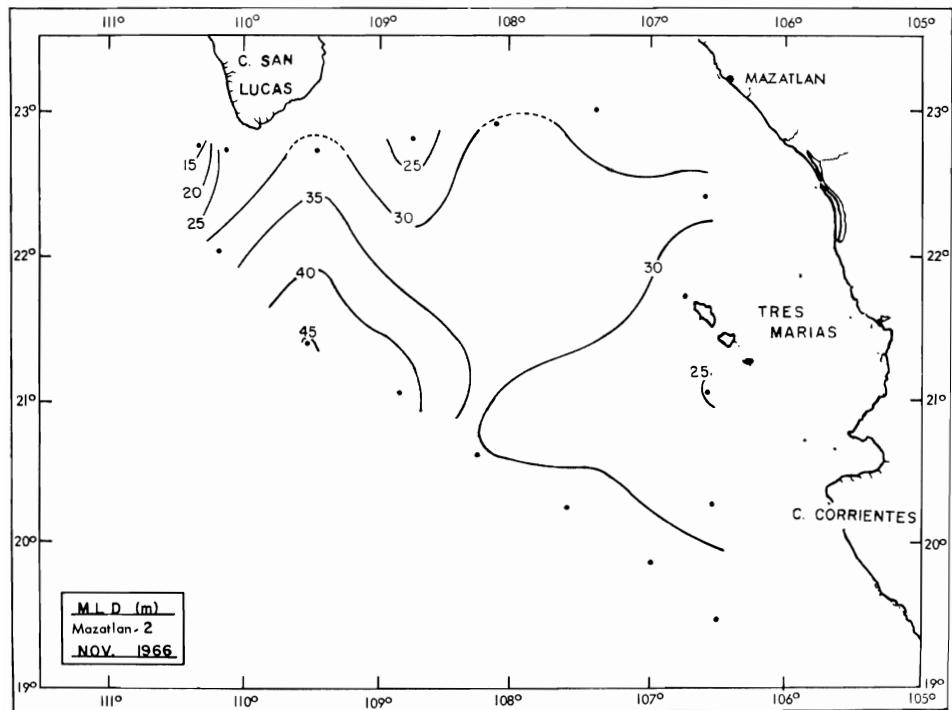


FIGURE II B

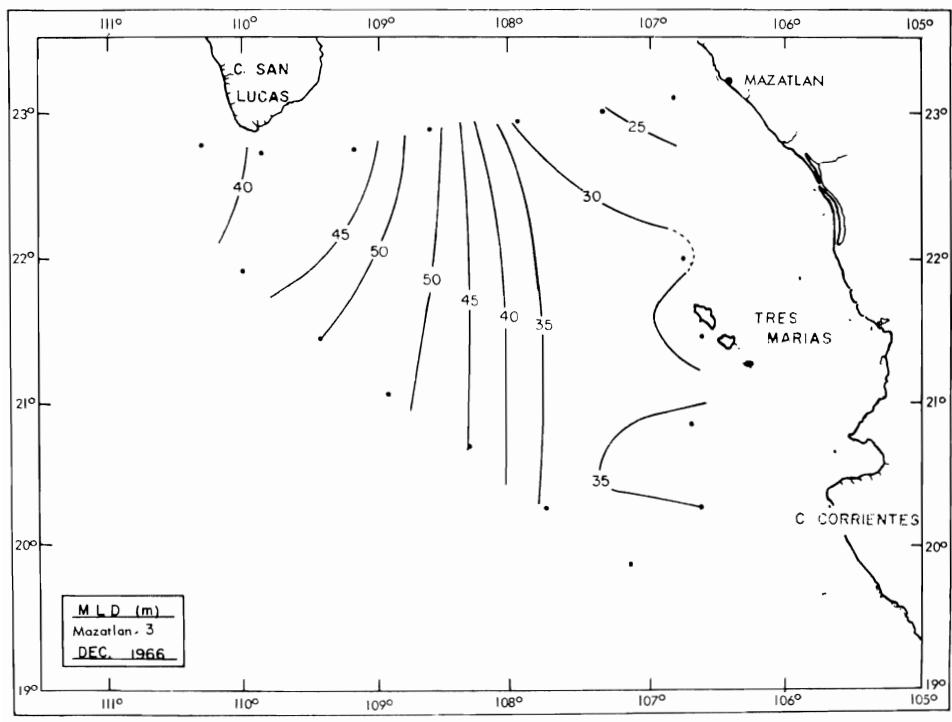


FIGURE II C

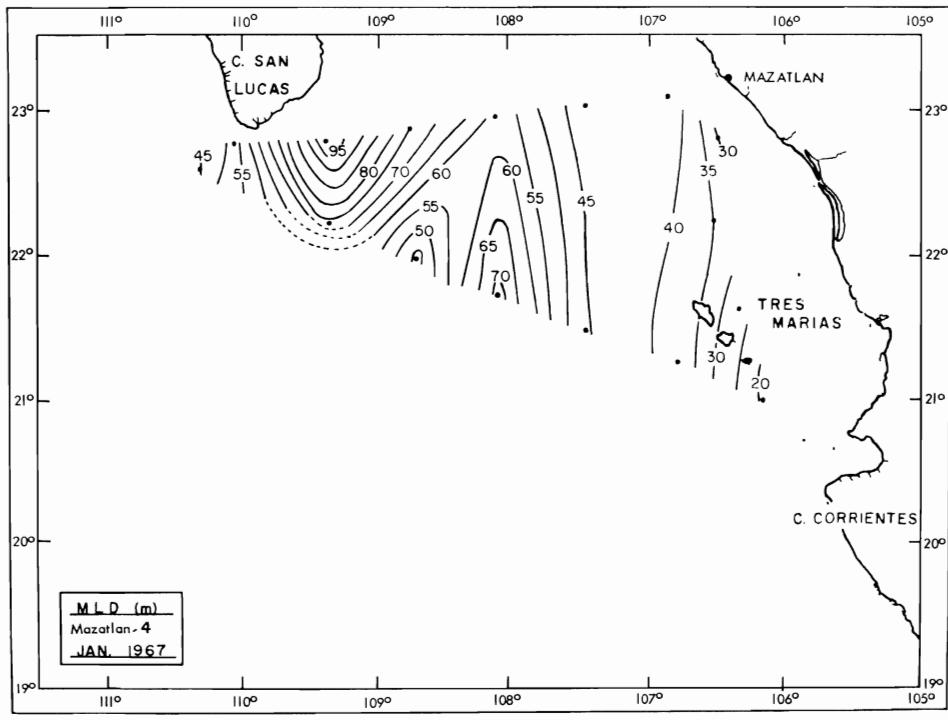


FIGURE IID

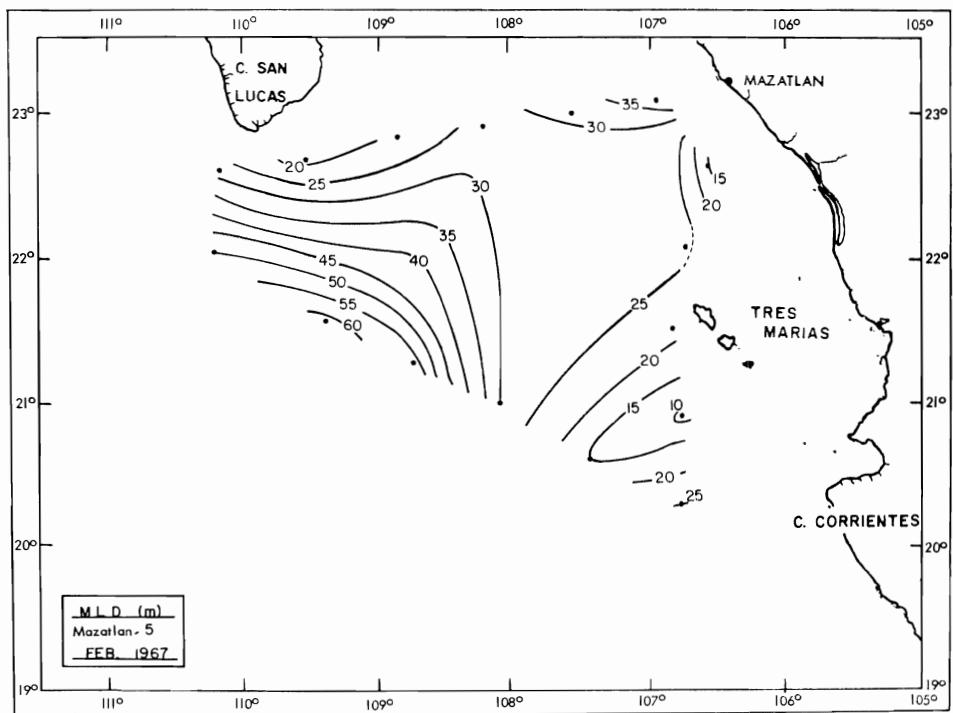


FIGURE II E

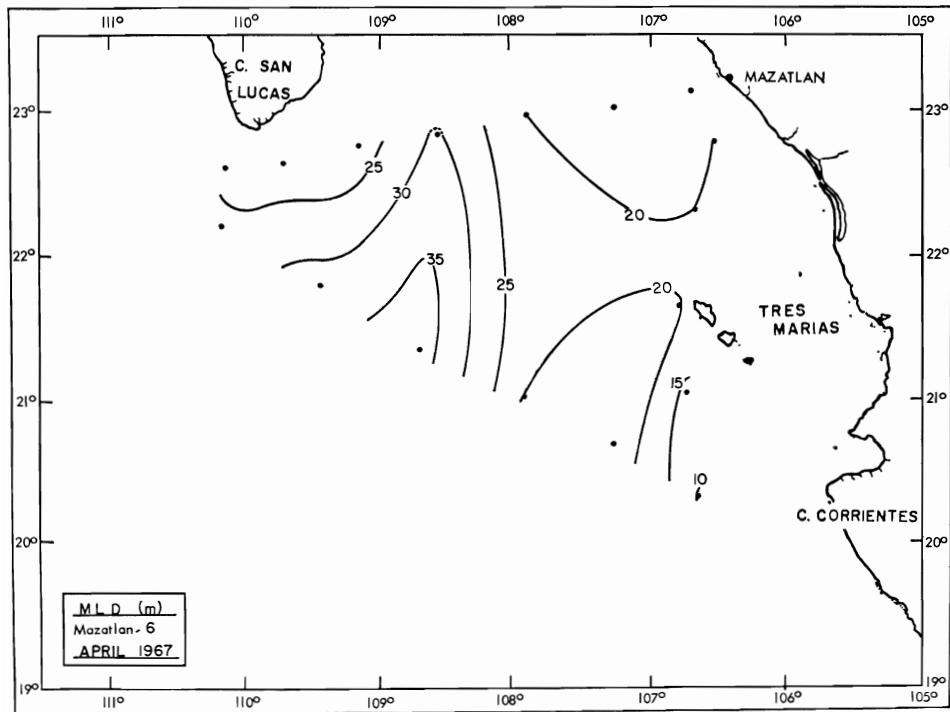


FIGURE II F

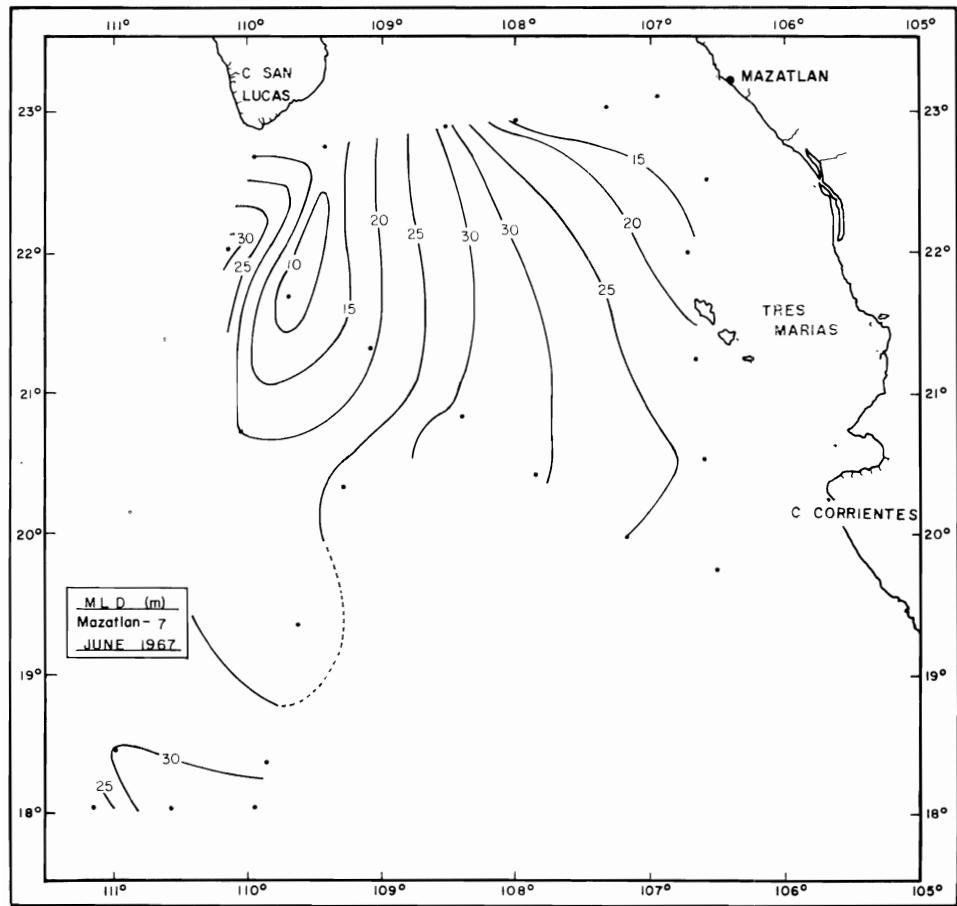


FIGURE II G

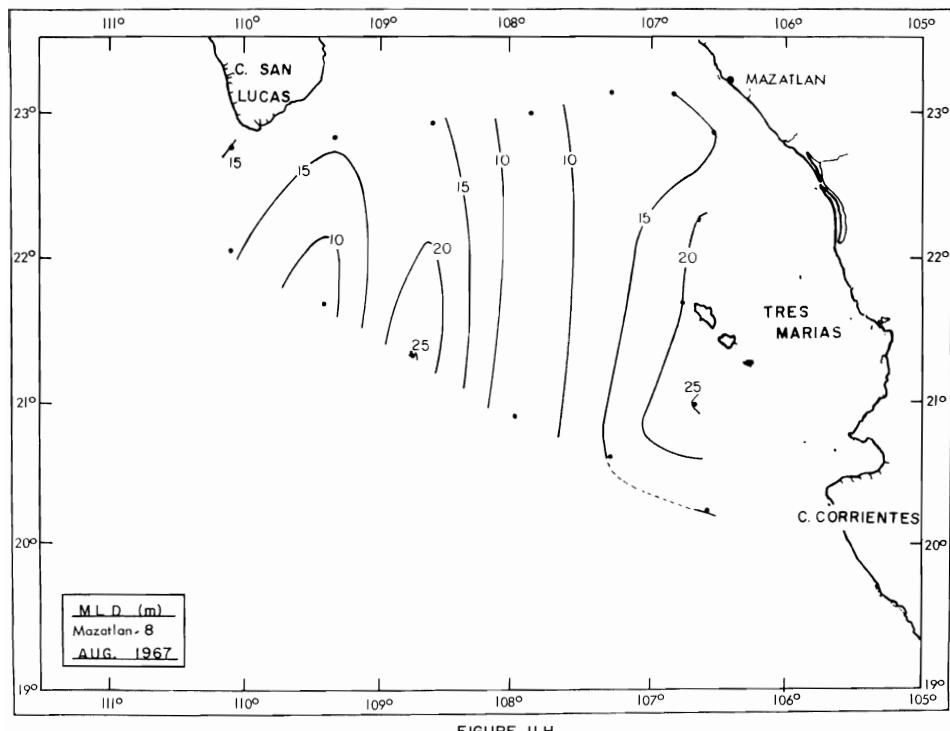


FIGURE II H

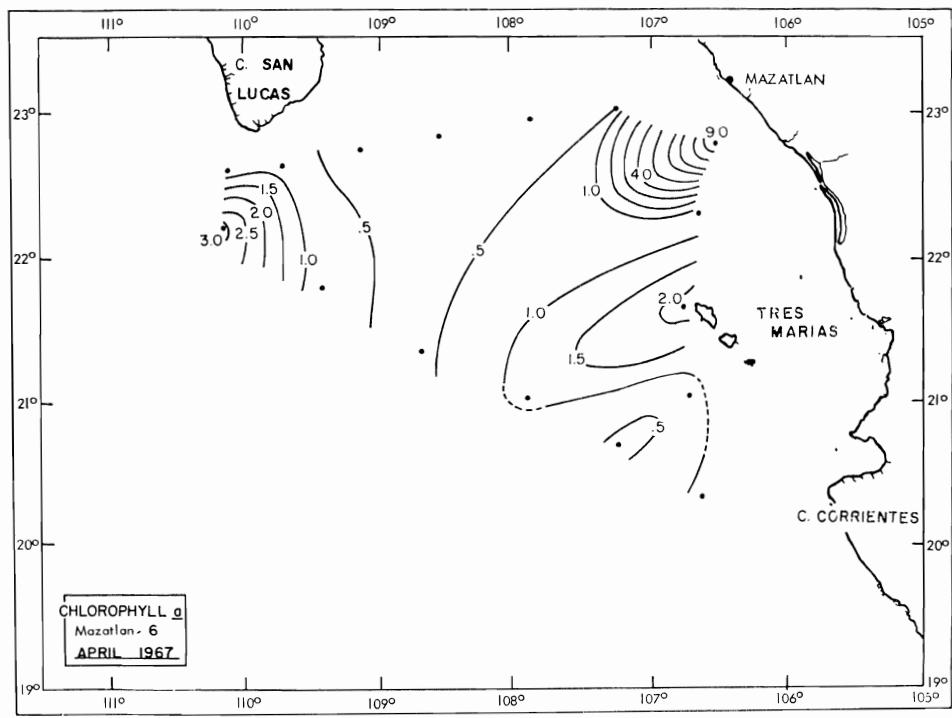


FIGURE 12A

FIGURES 12A to 12C. Surface chlorophyll *a* (mg/m^3), for three cruises. Contour intervals: $0.5 \text{ mg}/\text{m}^3$.

FIGURAS 12A a 12C. Clorofila superficial *a* (mg/m^3), de tres cruceros. Intervalos de contorno: $0.5 \text{ mg}/\text{m}^3$.

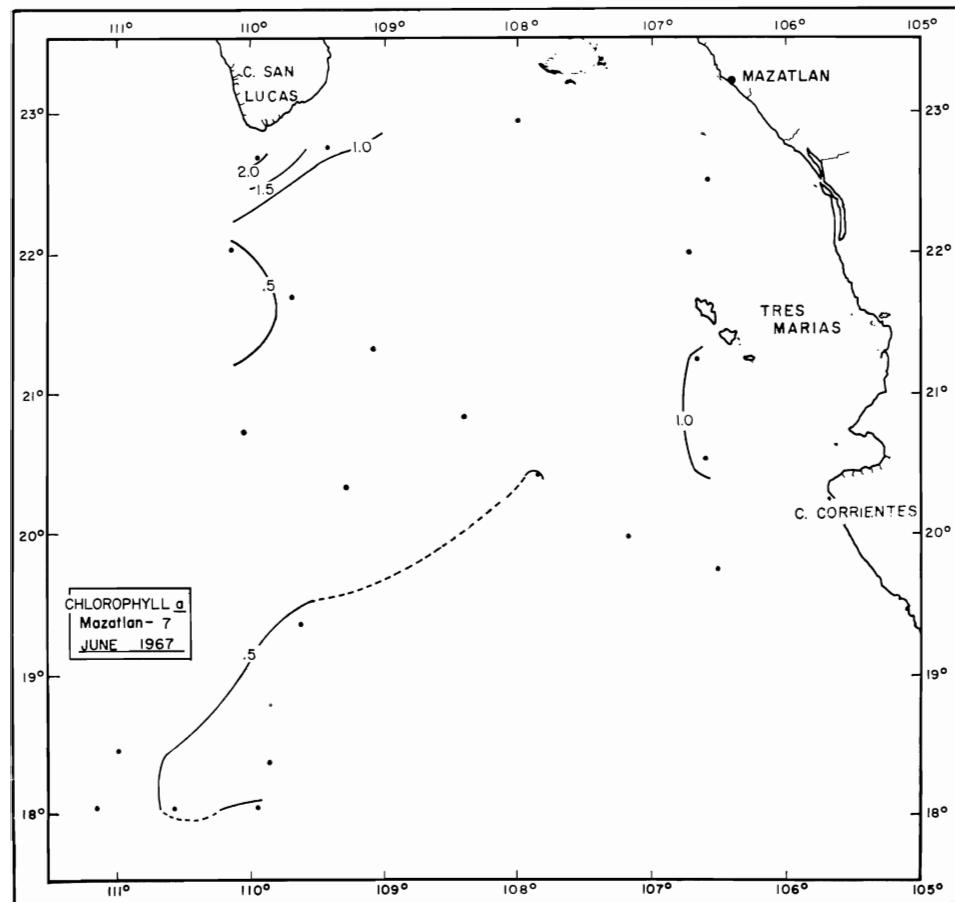


FIGURE 12B

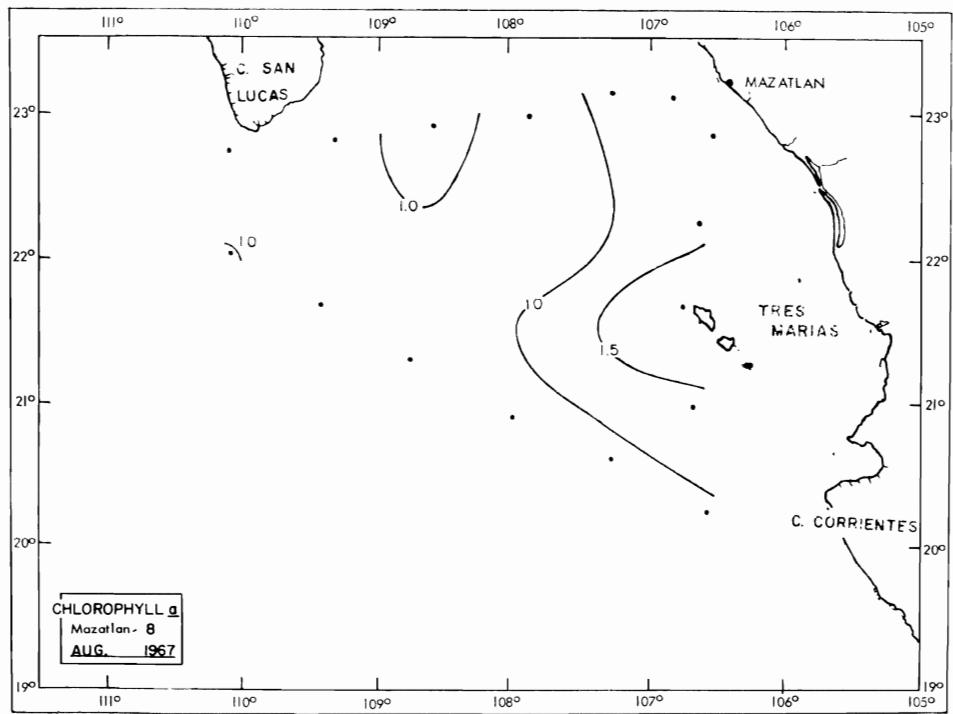


FIGURE 12C

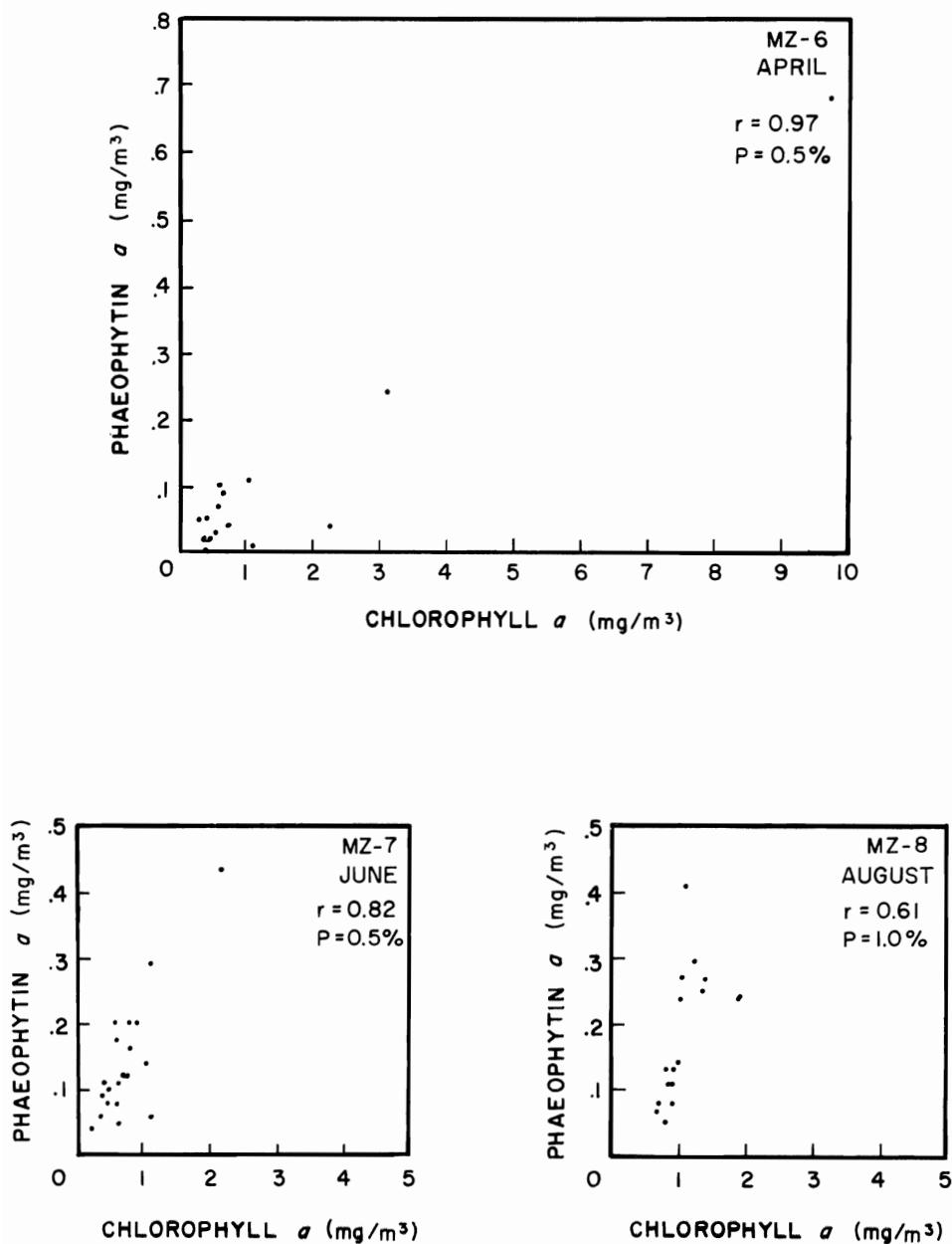


FIGURE 13. Surface chlorophyll α vs phaeophytin α (mg/m 3), cruises 6-8.

FIGURA 13. Clorofila α superficial vs faeofitina α (mg/m 3), cruceros 6-8.

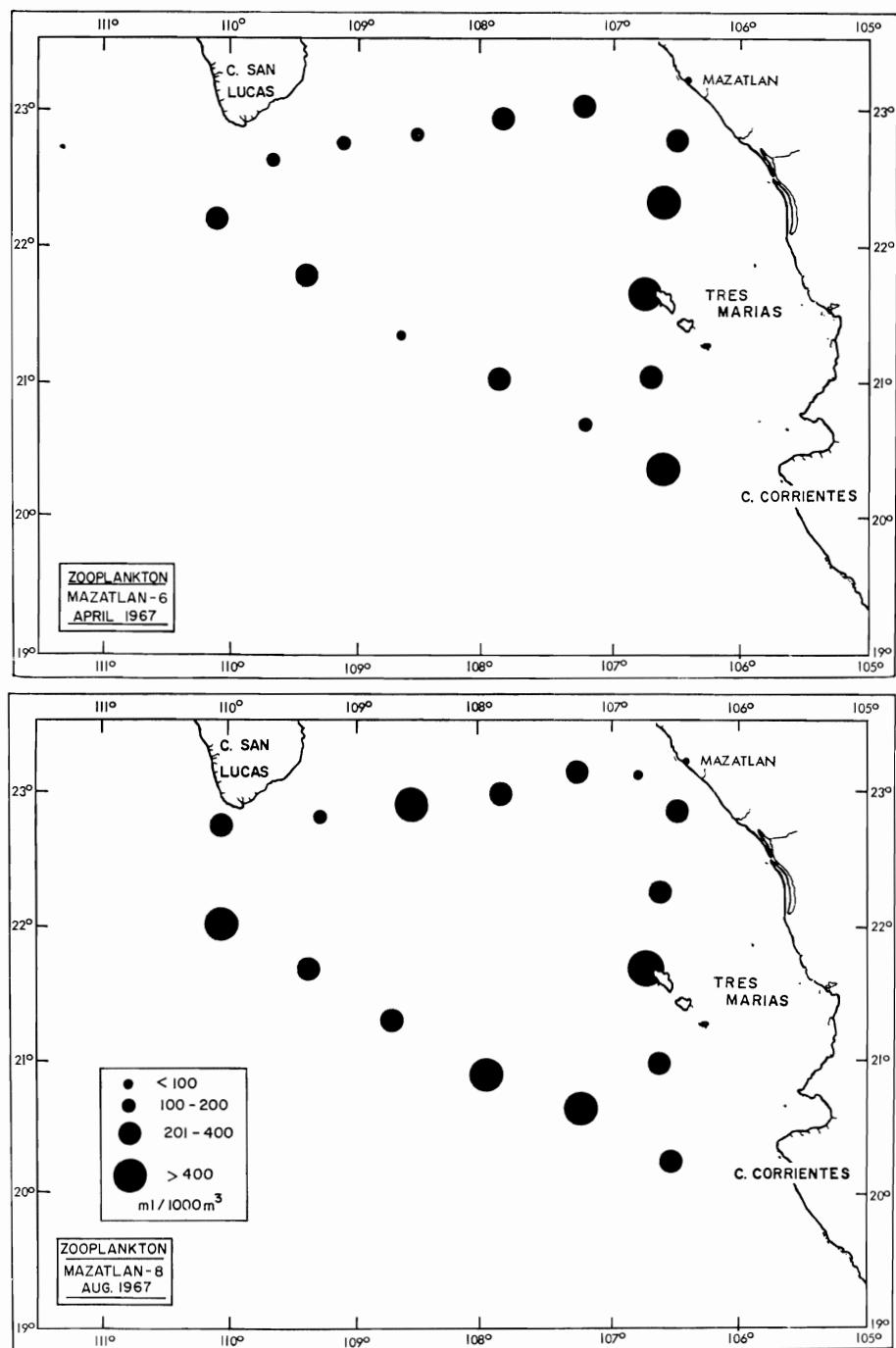


FIGURE 14. Zooplankton abundance ($\text{ml}/10^3\text{m}^3$) for two cruises. Organisms represented are ≤ 30 mm in length. Net tows were made from about 75 m to the surface.

FIGURA 14. Abundancia de zooplancton ($\text{ml}/10^3\text{m}^3$) correspondiente a dos cruceros. Los organismos representados tienen ≤ 30 mm de longitud. Los arrastres de la red se realizaron a unos 75 m de la superficie.

TABLE 1. Productivity estimated from the uptake of radiocarbon (C^{14}). Refer to Figure 1 for the location of stations. Rates of carbon fixation (in $mgC/m^3/day$) are for surface water samples incubated under both incident light and light reduced to 50% of the incoming intensity. The reader is referred to the Data Report for more details of the method and procedure used (Leet and Stevenson, 1969). Station numbers followed by an asterisk (*) were part of the cruise but were located outside of area normally surveyed.

TABLA 1. Productividad estimada de la absorción de radiocarbono (C^{14}). Refiérase a la Figura 1 para la localidad de las estaciones. Las tasas de la fijación de carbono (en $mgC/m^3/día$) son para las muestras superficiales del agua incubada tanto bajo la luz incidente como de la intensidad entrante de luz reducida al 50%. El lector puede referirse al Informe de Datos si desea más detalles sobre el método y procedimiento usados (Leet y Stevenson, 1969). Los números de estaciones que tienen un asterisco (*) formaban parte del crucero pero estaban localizadas fuera del área normal de reconocimiento.

	Station number Número de estaciones	Light level Nivel de luz	
		100%	50%
April (MZ-6)	5	3.4	6.1
	10	4.7	6.4
	14	8.0	12.1
June (MZ-7)	5	44.7	33.5
	9*	2.6	3.9
	12*	3.3	4.0
	15*	3.2	3.2
	18	10.0	7.3
	21	17.5	18.1
August (MZ-8)	1	0.9	1.7
	5	0.6	5.6
	9	0.0	3.4
	13	2.6	13.2

OCEANOGRAFIA FISICA Y BIOLOGICA CERCA A LA ENTRADA DEL GOLFO DE CALIFORNIA, OCTUBRE 1966 — AGOSTO 1967

por

Merritt Stevenson

EXTRACTO

Un estudio de la distribución temporal y espacial de las larvas de atún y de las condiciones oceánicas concomitantes fue realizado en cooperación con la Dirección General de Pesca e Industrias Conexas de México. El trabajo experimental consistió en ocho cruceros hidrográficos realizados desde octubre 1966 hasta agosto 1967, cerca a la entrada del Golfo de California.

De enero a abril, las corrientes superficiales fueron meridionales alcanzando velocidades hasta de 20 cm/seg; las corrientes en junio fueron variables en dirección y la mayoría con una velocidad de menos de 10 cm/seg; en agosto la corriente superficial fue septentrional a 10-15 cm/seg. Los vientos superficiales fueron por lo común secundarios a la distribución de la masa, como una influencia de la circulación superficial. Las corrientes a 100 m fueron generalmente similares en dirección a las de la superficie, pero el agua se movió más lentamente. Entre la superficie y los 100 m, las corrientes que se dirigen hacia el sur cruzaron la entrada del Golfo a velocidades de 5-10 cm/seg durante enero y abril formando límites frontales con el agua de la Corriente de California, que apareció a menudo al sur de la entrada.

De abril a agosto, la concentración media de la clorofila *a* superficial aumentó de 0.65 a 0.97 mg/m³, mientras que la productividad mediana aumentó de 5.6 mgC/m³/día en abril hasta 17.8 mgC/m³/día en junio antes de regresar a 2.6 mgC/m³/día en agosto. La productividad primaria se correlacionó estrechamente con la concentración de clorofila *a* superficial. La productividad fue generalmente más alta en la vecindad del Golfo que aquella encontrada en el agua de alta mar del Pacífico. La productividad fue más alta cerca a las Islas Tres Marias, y el segundo máximo fue cerca al Cabo San Lucas, ambas localidades de afloramiento local. Se indicó que la reserva permanente de fitoplancton estaba sujeta por el zooplancton a una fuerte presión progresiva de apacentamiento en la primavera y el verano.

INTRODUCCION

Las aguas frente a México central son importantes para las industrias pesqueras de los Estados Unidos y México, debido a que sostienen una gran población de atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*). Aunque aparecen peces adultos en estas aguas a través de todo el año, éstos exhiben mucho desplazamiento. Los estudios de marcación (Schaefer, Chatwin y Broadhead 1961) y los datos de la distribución de captura (Calkins y Chatwin 1967) indican que las áreas en que el atún aleta amarilla aparece en más abundancia parecen movilizarse estacionalmente a lo largo de la costa mexicana.

Durante el período de estas migraciones los peces pasan de un régimen oceánico a otro. Como se cree que la distribución y los movimientos de los peces están influenciados por el ambiente, es necesario conocer la oceanografía de la región antes de poder comprender a cabalidad los movimientos de los peces. Broadhead y Barrett (1964) y Blackburn (1963, 1965) han intentado relacionar la distribución y abundancia de los túnidos con varias propiedades oceánicas como el viento, la salinidad y la temperatura super-

ficial; indicaron que la temperatura juega un importante papel en su distribución.

Aunque se ha realizado una gran cantidad de trabajo con el fin de relacionar la distribución del atún aleta amarilla adulto con las características físicas, químicas y biológicas del océano, se ha logrado muy poco al intentar relacionar tales características con la distribución de las larvas de esta especie. Dichos estudios puede que permitan pronosticar las condiciones anómalas del océano y su efecto en la magnitud de una clase anual particular que entre en la pesquería. El pronóstico de tales fluctuaciones en la fuerza de la clase anual, es esencial, si las oficinas administrativas han de asegurar un beneficio máximo del recurso que están intentando administrar.

Para obtener un conocimiento más avanzado de los primeros estadios del ciclo vital de estos atunes aleta amarilla en el ambiente en que viven, la Comisión Interamericana del Atún Tropical inició en agosto de 1966 una investigación de 2 años en cooperación con la Dirección General de Pesca e Industrias Conexas (DGP) de México. El proyecto exigía cruceros mensuales de unos 5 días de duración que habían de realizarse a lo largo de una ruta triangular entre Mazatlán, Cabo San Lucas y las Islas Tres Marias (Figura 1). La DGP suministró espacio en el laboratorio biológico de la estación de Mazatlán y a bordo de los barcos de investigación *Yolanda* y *Tuxpan* para los trabajos experimentales. En enero 1967, el Proyecto Mazatlán fue incorporado como parte de EASTROPAC, un estudio internacional colaborativo del Océano Pacífico oriental tropical.

Este informe se refiere principalmente a la distribución temporal y espacial de la temperatura y de la salinidad en el área de investigación. Se examinan las relaciones de la concentración de la producción y abundancia del fitoplancton respecto al ambiente físico y, la abundancia del zooplancton respecto a la abundancia del fitoplancton. En otra publicación se hará un análisis con el fin de tratar de relacionar la distribución de las larvas con el ambiente (Klawe, Pella y Leet, *en prensa*). Se puede obtener un informe de datos en los que se incluyen detalles de los ocho cruceros, junto con observaciones obtenidas durante cada crucero, (Leet y Stevenson 1969).

Observaciones

Las fechas correspondientes a los ocho cruceros terminados durante la investigación son:

- 1° crucero (MZ-1), 15-19 octubre 1966;
- 2° crucero (MZ-2), 10-16 noviembre 1966;
- 3° crucero (MZ-3), 10-14 diciembre 1966;
- 4° crucero (MZ-4), 10-14 enero 1967;
- 5° crucero (MZ-5), 16-20 febrero 1967;
- 6° crucero (MZ-6), 14-18 abril 1967;
- 7° crucero (MZ-7), 22-29 junio 1967;
- 8° crucero (MZ-8), 23-27 agosto 1967.

Durante cada crucero se ocuparon de 15 a 17 estaciones durante el lapso de una hora (hora local), al amanecer, al mediodía, al anochecer y a la medianoche. Los lanzamientos batítermográficos (BT) se realizaron en cada estación para medir la temperatura subsuperficial, y se usaron botellas Knudsen-Morrison para obtener muestras de agua para determinar la salinidad. No se colectaron muestras de salinidad en los tres primeros cruceros. Se hicieron observaciones limitadas meteorológicas en cada estación, en el momento del lanzamiento BT. La transparencia del agua fue determinada mediante lecturas del disco Secchi. Se instaló un registro de radiación solar encima de la estación de biología en Mazatlán, justamente antes del sexto crucero.

Las muestras de zooplancton fueron obtenidas mediante arrastres oblicuos y superficiales de la red en cada estación. Las muestras de peces jóvenes fueron colectadas por la noche mediante carcales, usando reflectores, en los tres últimos cruceros. Se hicieron estimaciones de la concentración de fitoplancton en la superficie por medio de la medición de los pigmentos de las plantas, clorofila *a* y faeofitina *a*. Se midió la fijación de carbono por fitoplancton mediante la absorción de C¹⁴.

Reconocimiento

La preparación de este informe ha sido facilitada en gran manera gracias a la ayuda de las siguientes personas: Sr. Christopher Psaropoulos quien ayudó en el procesamiento de los datos por computador; Sres. Robert Wagner y George Even, Srita. Christine Dall y Sra. Judi Shepard quienes ayudaron en la preparación de las figuras. Se recibieron consejos útiles del Sr. Gunnar Roden, Dr. Maurice Blackburn y del Sr. Kimball Crocker.

DESCRIPCION DEL AREA

Meteorología

La región limitada por Mazatlán y el Cabo San Lucas, en el norte, y Cabo Corrientes en el sur, es una área cálida y relativamente húmeda. La media mensual de la temperatura del aire es 28-30°C en julio, y 17-22°C en enero. La pluviosidad disminuye de 100 cm/año cerca a Cabo Corrientes a menos de 50 cm/año en Topolobampo en la parte meridional del Golfo; de mayo a octubre se recibe de 75 a 90% de la precipitación (Roden 1964).

Al oeste de Baja California los vientos nórdicos prevalecientes forman la fuerza impulsora de la Corriente de California. Debido al cambio estacional de los vientos alisios, los vientos predominantes, en el área de investigación, soplan del noroeste aproximadamente a 5 m/seg durante el invierno y la primavera y del sudeste a unos 3 m/seg durante el verano y el otoño (Hubbs y Roden 1964). Estos vientos son generalmente responsables por

el transporte estacional noroeste del agua del Pacífico oriental tropical en la vecindad del Golfo. Además, las brisas del litoral y del mar cerca a la costa ayudan a mover la superficie del mar hacia tierra o mar adentro.

De junio a octubre pueden aparecer fuertes tormentas locales o tempestades llamadas chubascos y duran varios días. Los huracanes afectan también el área, especialmente en el mes de setiembre.

El cielo predominantemente despejado y la posición latitudinal del área resulta en grandes cantidades de insolación. En la Figura 2, se indica la cantidad mensual de radiación solar recibida, correspondiente a las latitudes de 20° y 25° . Las curvas de energía para cielos despejados, están basadas en datos acumulados y se suavizan (Roden 1959). La tasa estacional de evaporación según las estimaciones de la estación costanera, se considera bastante constante y puede sumar de 200 a 250 cm/año (Roden 1964).

Características del agua

El área actual de estudio ha sido considerada como una región de transición en la que interaccionan tres masas principales de agua para producir una circulación local compleja. Estas masas de agua indicadas en la Figura 3 son: 1) el agua fría de la Corriente de California de baja salinidad ($S \leq 34.60\%$); 2) el agua cálida del Pacífico oriental tropical de salinidad intermedia ($34.65 \leq S \leq 34.85\%$); 3) y el agua cálida, altamente salina ($S \geq 34.90\%$) del Golfo de California (Roden y Groves 1959; Griffiths 1965) que aparece intermitentemente.

Además de las tres masas de agua descritas anteriormente, Wyrtki (1967) ha definido en esta área el agua superficial subtropical y el agua subsuperficial subtropical. El agua superficial subtropical está formada por el calentamiento y evaporación del agua superficial de la Corriente de California. El agua subsuperficial subtropical es la porción subsuperficial del agua del Pacífico oriental tropical referida por Roden y Groves (1959). Se origina en la superficie del mar al sur del ecuador, se hunde mientras corre hacia el norte y se mezcla con el agua de la subcorriente ecuatorial con una pérdida consecuente de salinidad. Luego se encuentra sometida a una expansión más horizontal y a un movimiento hacia el norte hasta alcanzar la entrada del Golfo de California, en donde se encuentra a unos 200 m de profundidad con un máximo de salinidad superior a 34.7 %. Griffiths (1968) ha incluido el agua de la superficie subtropical y el agua subsuperficial subtropical en su amplio análisis de las masas de agua cerca a la entrada del Golfo de California.

Frecuentemente el encuentro del agua de la Corriente de California con el agua del Pacífico oriental tropical o el agua del Golfo de California cerca a la entrada del Golfo, produce cambios bruscos de temperatura y salinidad los cuales se denominan *frentes*. Los valores de temperatura y salinidad a través de un frente pueden cambiar tanto como 4°C y 0.5% en

60 millas, a pesar de que algunas regiones que poseen gradientes débiles son a menudo llamadas frentes. En este estudio, un frente se refiere a una área horizontal en el océano a través de la cual existe un cambio brusco de temperatura, salinidad o cualquiera otra propiedad (Cromwell y Reid 1956; Clarke y Laevastu 1967). Los gradientes se extienden también frecuentemente en dirección vertical. Tales límites separan masas de agua adyacentes (Uda 1959; Griffiths 1965), pero pueden también representar la frontera donde una porción de una masa de agua ha aflorado cerca a la costa. Las inestabilidades dinámicas aparecen frecuentemente a lo largo de los frentes en los que el agua de mayor densidad se superpone al agua de menor densidad. Tal inestabilidad puede ocurrir en los 200 m superiores y es generalmente evidente según las inversiones de temperatura y salinidad. Las características de los frentes superficiales cerca al Cabo San Lucas fueron la base de un estudio de Griffiths (1965). De vez en cuando los frentes en esta área pueden estar sumergidos descubriendose en la superficie un cambio muy pequeño o ninguno (Wooster y Jones 1966).

El límite oceánico para el Golfo de California delineado por los gradientes de temperatura y salinidad, no está confinado a la entrada geográfica, pero puede extenderse desde el Cabo San Lucas hasta el Cabo Corrientes (Roden y Groves 1959).

Circulación superficial

La circulación en el área depende primariamente en el movimiento de las tres masas de agua y de los vientos superficiales. El flujo de la Corriente de California a lo largo de la costa oeste de Baja California desde enero hasta junio es meridional y paralelo a la costa con una velocidad aproximada de 12 cm/seg; en julio y agosto su dirección cambia hacia el noroeste y continúa hasta diciembre como una corriente débil, mar afuera ≤ 5 cm/seg (Wyrtki 1965). Las características detalladas de la circulación superficial a lo largo de la costa occidental de Baja California según se deducen de los cálculos del flujo geostrófico, son provistas por Wyllie (1966). Las estimaciones de las corrientes geostróficas superficiales cerca al Cabo San Lucas basadas en superficies de 500 y 1000 decibares son provistas por Griffiths (1968). El promedio de la circulación superficial en el área entre Mazatlán, Cabo San Lucas y Cabo Corrientes es similar a aquél a lo largo de la costa occidental de Baja California; es decir desde noviembre hasta abril el agua superficial se desplaza en dirección meridional a velocidades de 8-10 cm/seg; en mayo y junio la corriente superficial cambia de dirección y en agosto tiene un rumbo noroeste (5-7 cm/seg) que continúa hasta octubre. Sin embargo, las corrientes costaneras pueden alejarse considerablemente y estar en oposición a la dirección del flujo que se encuentra más lejos mar afuera. Los detalles de la media mensual de la circulación superficial basados en datos de la deriva de los barcos, han sido reseñados por Cromwell y Bennett (1959) y Wyrtki (1965).

DISCUSION

Corrientes superficiales

Las corrientes superficiales (Fig. 4) y aquellas a 100 m de profundidad (Fig. 5) fueron determinadas según el enfoque geostrófico de los últimos cinco cruceros. Estas corrientes son relativas ya que el movimiento se refiere a la superficie de 250 decibares (aproximada por el nivel de presión a 250 m de profundidad) y se supone un flujo de cero a 250 m, el nivel standard de referencia más grande para el que se tienen datos. Una comparación del nivel sin movimiento de 250 m con corrientes basadas a los 500 m de la superficie (Roden y Groves 1959), sugiere sin embargo, que las corrientes a 250 m tienen probablemente una velocidad de menos de 2 cm/seg. Abreviando el proceso con x dirigida hacia el este e y hacia el norte, el gradiente horizontal de presión se escribe en una ecuación con la aceleración de Coriolis ej.,:

$$\begin{aligned} -fv &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ fu &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ g &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned} \quad (1)$$

donde u y v son velocidades de las corrientes este-oeste y norte-sur; f es la aceleración de Coriolis y varía con la latitud indicada por ϕ ($f = 1.45 \times 10^{-4}$ sin ϕ); ρ es la densidad del agua; y los términos restantes son los gradientes horizontales de presión. Se supone que otras aceleraciones y fuerzas sean insignificantes en este enfoque.

Una complicación que se presenta al usar las corrientes geostróficas es que los movimientos periódicos, *i.e.*, las mareas, están frecuentemente superimpuestas en el flujo geostrófico. Se sabe que la marea viene a ser progresivamente mayor con el aumento de la distancia de la entrada del golfo al interior del mismo. Aunque se han examinado los registros del nivel del mar y de la presión barométrica superficial, y se ha estimado su interacción respecto a la parte más baja del golfo, no se sabe con seguridad qué cantidad de corrección sea necesaria para remover los efectos del movimiento de la marea de las corrientes geostróficas.

Las corrientes geostróficas superficiales basadas en datos observados, están razonablemente de acuerdo con la circulación generalizada del área. Es decir, de enero a abril el agua superficial fluyó en dirección meridional entre Cabo San Lucas y Cabo Corrientes a velocidades hasta de 20 cm/seg. Sin embargo, una porción de la Corriente de California se alejó de esta pauta general en enero, cuando volteó al norte y penetró la entrada del Golfo. Con el enfoque de junio la circulación se volvió progresivamente menos uniforme. El flujo sudoriental estaba aún presente cerca a los 20°N en junio, pero cerca al Cabo San Lucas giraba un remolino en sentido a las agujas del reloj a velocidades tan grandes como de 20 cm/seg; cerca

al litoral se empezó a formar una corriente costanera septentrional. En agosto la corriente superficial tenía un rumbo definido noroeste y se desplazó hacia la vecindad del Cabo San Lucas; esta agua corrió hacia el sudoeste a través del costado occidental de la entrada del golfo.

Los detalles del promedio de las corrientes superficiales que entran y abandonan el golfo (Wyrtki 1965) difieren algún tanto en tiempo y localidad de ocurrencia de la circulación mencionada en este estudio. Solo existe un acuerdo regular entre la circulación superficial de este estudio, durante abril y junio, y aquella durante mayo de 1960 (Griffiths 1968). Las variaciones pueden atribuirse a las diferencias de año a año de las corrientes superficiales, al empleo de diferentes referencias de los niveles de presión y a una circulación local complicada.

Las corrientes superficiales son producidas también por la fuerza del viento aplicada a la superficie del mar. Se supone normalmente, que la fuerza friccional debida al viento disminuye con la profundidad y llega a ser cero en algún punto al que se refiere como profundidad de resistencia friccional (viento) cero. Estas corrientes producidas por el viento se denominan corrientes de Ekman y se supone que fluyen 45° hacia la derecha de la dirección del viento en el hemisferio septentrional. Las observaciones del viento de los 8 cruceros fueron convertidas a valores de fuerza mediante la relación

$$\tau = 3 \times 10^{-6} W^2 \quad (2)$$

donde W es la velocidad del viento cerca a la superficie en cm/seg y la constante incorpora esos factores necesarios para convertir la velocidad del viento a unidades de fuerza de dinas/cm². La asociación superficial de las corrientes Ekman fueron entonces determinadas según una relación provista por Sverdrup *et al.* 1942.:

$$v_s = \frac{\sqrt{2\pi\tau}}{\rho f D} \quad (3)$$

donde ρ es la densidad del agua; f es la aceleración de Coriolis conforme se definió en (1), y D es la profundidad máxima de la resistencia friccional, que se supone sea de 30 m para que corresponda con la profundidad de la capa mixta. Después de que los valores de la fuerza del viento para los cruceros fueron determinados, se computaron los valores asociados de la corriente de Ekman. Se ha dado énfasis para localizar aquellas observaciones en las que la corriente del viento fue 10% o superior a la magnitud de las corrientes geostróficas. Solamente durante el crucero de junio 1967, fue la fuerza del viento adecuada para producir las corrientes estipuladas del viento.

Las corrientes más fuertes de viento producidas durante el crucero de junio 1967, estuvieron localizadas directamente al sur del Cabo San Lucas donde se estimaron que las velocidades eran hasta de 73 cm/seg (Fig. 6).

Más lejos al sur fue evidente una corriente de viento parecida a un remolino con velocidades de 10-16 cm/seg. Las características parecidas a remolinos en las corrientes conducidas por el viento y la circulación geostrófica fueron debidas a una tormenta localizada en la vecindad de las estaciones 9-11. Se observaron vientos en exceso de 20 m/seg (40 nudos), pero no se realizaron observaciones hidrográficas hasta que amainó la tormenta. Una comparación de las corrientes conducidas por el viento y de las corrientes geostróficas, en este crucero, muestran que las primeras eran frecuentemente oblicuas o aún opuestas a éstas últimas.

Corrientes a 100 m

La circulación a 100 m (Fig. 5) de enero a abril fue, en su mayor parte, similar a la circulación superficial. El flujo subsuperficial cerca al Cabo San Lucas fue sudeste a 10 cm/seg, pero cerca a los 108°W el agua cruzó el Golfo; al este de los 108°W el agua salina del Golfo salió a través de la entrada a 5-10 cm/seg. Al mes siguiente el flujo subsuperficial había regresado a un curso sudeste uniforme a 15 cm/seg. La circulación subsuperficial de abril hasta junio fue similar a las corrientes superficiales respectivas, pero a velocidades menores. El acuerdo entre la circulación horizontal de 125 m en mayo 1960 (Griffiths 1968) y la circulación de 100 m en abril y junio 1967, fue más bien pobre; la divergencia se debe, en parte, a los 25 m de diferencia de las superficies subsuperficiales elegidas. Entre junio y agosto las corrientes a 100 m cambiaron a un rumbo noroeste. La entrada del Golfo recibió agua proveniente del sudeste en la parte oriental y abandonó el Golfo por la parte occidental.

Características observadas del agua

Ya que las masas de agua se encuentran caracterizadas por relaciones específicas temperatura-salinidad (T-S), la comparación de las curvas individuales T-S pueden proveer información acerca del grado de interacción y mezcla de dos o más masas de agua. Una cubierta T-S basada en observaciones discutidas por Griffiths (1965) se presenta en la Figura 3 para cada una de las tres masas de agua. Aunque la temperatura y salinidad del agua cercana a la superficie están afectadas por precipitación, evaporación y radiación solar, las diferencias locales causadas por estos factores pueden frecuentemente suponerse pequeñas para la misma localidad y períodos de tiempo, en comparación con aquellas causadas por la interacción de las tres masas de agua presente en la región. Se presenta un ejemplo de las variaciones en temperatura y salinidad perceptibles en cada estación y de estación a estación respecto al crucero MZ-4 (Fig. 7).

Las curvas T-S del cuarto crucero (enero) indican una progresión definida del agua del Pacífico oriental tropical en el costado oriental de la entrada al Golfo (estaciones 1, 2, 3 excepto por el agua del Golfo de California en la superficie de 1 y 2), hacia el agua del Golfo de California

aproximadamente a un punto equidistante a lo largo de la entrada (est. 4), hasta el agua de la Corriente de California cerca a Cabo San Lucas (estaciones 6, 7, 8). Hacia el sur y cerca al litoral (Ests. 10-16), la relación T-S implica agua formada tanto por el agua de la Corriente de California como por el agua del Pacífico oriental tropical. Las curvas T-S de las estaciones 4 y 6 sufrieron desplazamientos algo grandes de salinidad cerca a la superficie de densidad de 300 cl/t (anomalía termos-térica en centilitros/tonelada métrica), siendo el resultado de la proximidad de las aguas de la Corriente de California y del Golfo.

Una comparación de un mes a otro de las curvas T-S con la referencia de las cubiertas de las masas de agua, revela la ocurrencia de agua cálida salina en una capa delgada superficial a lo largo de la entrada del Golfo en enero, abril y junio, indicando que el agua del Golfo de California abandona el Golfo intermitentemente y en cantidad limitada. La misma agua salobre fue evidente también en otras localidades más meridionales durante enero y junio.

El agua de la Corriente de California con una salinidad $\leq 34.6\%$ prevaleció cerca al Cabo San Lucas durante esta investigación y aparentemente puede encontrarse allí durante todo el año. En el área entre el Cabo San Lucas y Cabo Corrientes tanto la Corriente de California como el agua del Pacífico oriental tropical se encontraron en mayor o menor grado, dependientes de la circulación general en ese tiempo. Mientras la Corriente de California influye en las características del agua en el área más allá de Cabo San Lucas, la mayor parte de la interacción ocurre encima de los 100-150 m (basado en las curvas disponibles de T-S). El agua del Pacífico tropical se caracteriza por un máximo de salinidad de 34.7-34.8% y se encontró comúnmente cerca a los 200 m. No se presentará aquí un análisis detallado de todas las curvas utilizables de T-S de este estudio.

Características de la superficie

Una de las características raras en el área de investigación, es un gran cambio anual de la temperatura superficial que frecuentemente alcanza 9°C (Roden y Groves, 1959; Wyrtki, 1964). La fluctuación de la salinidad se considera que es de unos 0.4% y presenta poca influencia estacional (Roden 1964). Las cartas mensuales de superficie por Bennett (1966), indican una fluctuación de 0.5% o más. Durante el período de esta investigación la fluctuación anual de temperatura y salinidad fue de 19.7°C a 29.8°C y de 34.14% a 35.42%, respectivamente (Fig. 8). Las observaciones de la media* de temperatura indican un fuerte ciclo esta-

*Las temperaturas ponderadas de la media superficial para cada crucero fueron determinadas en la forma siguiente: las áreas contenidas entre intervalos de isoterma fueron integradas primero planimétricamente y luego multiplicadas por la media de temperatura del intervalo respectivo. Las temperaturas ponderadas fueron sumadas y luego divididas por el área contenida dentro del rumbo del crucero. Se utilizó el mismo método para determinar los valores de la media de la salinidad mensual y de la profundidad de la capa mixta.

cional con el valor más bajo en enero. Las observaciones de salinidad indican un pequeño ciclo semianual. Los datos de la pluviosidad en Mazatlán (Fig. 8), compilados mensualmente por la Organización Mundial de Meteorología (World Meteorological Organization) (1968), presenta una relación nula o muy pequeña respecto a los cambios en salinidad para el área de la costa. Las salinidades superficiales en las estaciones cercanas a la costa, sin embargo, descendieron 0.4‰ en el período julio-agosto cuando se recibe más pluviosidad. La lluvia durante agosto puede fácilmente ser la causa de la reducción observada en la salinidad. Los cambios estacionales en el espesor de la capa mixta pueden observarse también en la Figura 8. El espesor de la capa mixta varía anualmente con una media anual de 30 m y un límite de distribución de 5 m a 100 m. El espesor de la capa mixta parece estar inversamente relacionado a las fluctuaciones de la media de la temperatura superficial. Una comparación de las observaciones de un mes a otro de la temperatura superficial, salinidad y densidad para los cruceros puede obtenerse según la Figura 9 y para el espesor o capa mixta según la Figura 11.

Ocurrieron en base de mes-a-mes variaciones más bien grandes en temperatura, salinidad y densidad, y también durante el período individual de un crucero. Aunque el agua del Golfo no aparece con frecuencia en los diagramas T-S, el derrame superficial a través de la entrada del Golfo tuvo aparentemente lugar durante la mayoría de los períodos de los cruceros (véase los diagramas de salinidad, Fig. 9).

De octubre a diciembre, por ejemplo, el promedio de la circulación superficial entre Cabo San Lucas y Cabo Corrientes originó un rumbo noroeste (Wyrtki 1965). Los vientos medidos de octubre hasta diciembre a bordo del barco del crucero estaban orientados de tal manera que produjeron una corriente Ekman superficial a través y fuera de la entrada del Golfo. Un derrame de agua superficial, cálida salina, presente en el extremo oriental de la entrada del Golfo en octubre, tuvo una advección progresiva hacia el oeste a lo largo de la entrada y en enero se localizó finalmente al sur de Cabo San Lucas; este derrame disminuyó apreciablemente durante el período de varios meses. Durante el mismo intervalo de tiempo fue evidente el agua del Pacífico tropical, desde Cabo Corrientes al norte, hasta la vecindad de la entrada al Golfo. El agua de la Corriente de California estuvo presente en cantidad limitada al sur y al oeste de Cabo San Lucas como lo señala el área circundada por la isohalina de 34.6‰. Durante enero apareció agua fría de salinidad intermedia a lo largo de la entrada del Golfo a los 109°W representando el agua modificada de la Corriente de California que había sido ya sea advectada dentro del área por las corrientes superficiales o representaba una parte de la Corriente Subsuperficial de California que emergió a la superficie (Fig. 9).

Desde febrero a abril las temperaturas bajas superficiales reflejaron la reducción estacional de insolación. Las salinidades bajas se encontraban

ampliamente distribuidas durante febrero e indicaban una mínima producción del agua del Golfo, más allá de la entrada del Golfo. La precipitación no fue responsable por la reducción de la salinidad ya que no había habido lluvia desde febrero hasta abril. La Corriente de California fue evidente en el área general pero la capa superficial había sido modificada mediante una combinación de la mezcla del viento y la evaporación. En abril el agua entrante del Pacífico oriental tropical proveniente del sudeste de Cabo Corrientes había aumentado la salinidad superficial en unos 0.3‰ en la mitad oriental de la región; el agua de la Corriente de California dominó al oeste de los 108°W. Una comparación de las distribuciones de temperatura y salinidad descritas por Griffiths (1968) con las de este estudio, indican que las condiciones de temperatura y salinidad durante mayo 1960, fueron similares a las realizadas durante abril y junio 1967, excepto cerca a Cabo San Lucas en donde las salinidades durante abril y junio fueron menores que en mayo de 1960.

Se puede considerar el período de junio a agosto como un intervalo de transición ya que los vientos superficiales y las corrientes cambiaron de un rumbo meridional a uno noroeste. Con excepción de la característica de remolino al sur de Baja California, las corrientes superficiales fueron lentas en junio. Una gran parte del área superficial contenía agua cálida con una salinidad de $\geq 35.0\text{\%}$. La mayor parte del aumento en salinidad de abril a junio se atribuye a los procesos de evaporación de la región. El agua con salinidad de $\geq 35.1\text{\%}$ estuvo limitada a un flujo septentrional costanero en donde la temperatura fue de 27°C o más. Las salinidades superficiales fueron menores en agosto que en junio debido a que cayeron 40 cm de lluvia (medida en Mazatlán) durante agosto. Las salinidades fueron reducidas especialmente en una trayectoria elíptica desde las Islas Tres Marias hasta la entrada del Golfo. Las corrientes superficiales noroestes de la vecindad de Cabo Corrientes fueron responsables por la advección hacia el noroeste del agua costanera menos salobre.

Distribución vertical de temperatura y salinidad

Se presentan dos secciones verticales para la temperatura y salinidad de cada crucero (véase Figura 10). La sección norte incluye aquellas estaciones que limitan la entrada del Golfo; la sección sur contiene aquellas estaciones cuyas posiciones forman una línea desde el Cabo San Lucas hasta la estación más sudeste cerca al Cabo Corrientes. Solo se dispone de secciones de temperatura de los tres primeros cruceros.

Las secciones verticales de temperatura para el período octubre-diciembre contienen numerosas inversiones entre la superficie y los 250 m. Inversiones tan grandes como 1°C fueron evidentes a lo largo de las secciones meridionales a profundidades de 100-175 m. Las inversiones termales resultaron comúnmente de los procesos advecivos en los que el agua fría fluye sobre el agua cálida permanente, o cuando el agua cálida

fluye por debajo del agua fría permanente. La posición, intensidad y grado de abarcamiento de las áreas, pueden utilizarse por lo tanto para indicar el grado de penetración de una fuente de agua dentro de la otra. Durante octubre, por ejemplo, una inversión entre las isothermas de 15°C y 16°C estuvo presente en la sección meridional y se esparció horizontalmente 96 km (53 millas). La tasa de advección en este caso fue igual o mayor que las fuerzas disipadoras de la mezcla.

Aunque las inversiones termales superiores a 1°C ocurrieron en los últimos cinco cruceros a lo largo de las secciones meridionales, las interacciones locales se encuentran mejor detalladas por las dos secciones de salinidad (Fig. 10). Una corriente subsuperficial meridional que se mueve del Golfo de California aproximadamente a 13 cm/seg, fue representada en ambas secciones como un núcleo cercano a la superficie de alta salinidad ($S \geq 34.9\%$). Entre los dos núcleos de máxima salinidad, una distancia de 128 km (71 millas), la salinidad disminuyó en 0.2% y se esparció horizontalmente debido a los procesos de mezcla. Hacia el oeste un núcleo de salinidad mínima representando la Corriente de California corrió aproximadamente a la misma velocidad bajo la corriente salina que abandonaba el Golfo. Las inversiones termales más intensas a lo largo de la sección meridional aparecieron debajo de los núcleos altos y bajos de salinidad.

La única corriente que se dirige desde el Golfo hacia el sur fácilmente identificada durante el período febrero-abril, fue evidente a lo largo del costado oriental de la entrada. Sin embargo, en este período, el núcleo mínimo de salinidad de la Corriente de California se extendió a lo largo de toda la longitud de la sección meridional. El núcleo de baja salinidad durante febrero, estuvo acompañado por una zona de inversión climática que se extendió horizontalmente por lo menos 208 km (115 millas). La zona de inversión fue localizada nuevamente debajo del núcleo de baja salinidad. En abril, la Corriente de California penetró más efectivamente el agua permanente entre Cabo San Lucas y Mazatlán que durante cualquier otro período de investigación. La presencia de bajas salinidades ($S < 34.0\%$) a lo largo de la entrada del Golfo formó un sistema frontal que se extendió desde la superficie hasta los 150 m de profundidad. La ocurrencia de los frentes sumergidos cerca a los 20°N, 120°W ha sido descrita por Wooster y Jones (1966).

Durante junio el agua salina fluyó desde el costado oriental de la entrada del Golfo y permaneció en la superficie tan lejos al sur como la sección meridional. Un segundo núcleo de baja salinidad apareció junto al que permaneció a lo largo de la sección meridional desde abril, pero las salinidades de ambos se redujeron aproximadamente en 0.2%. La circulación superficial y aquella a los 100 m indicaron un movimiento del agua en dirección a las manecillas del reloj como se mencionó anteriormente, con un flujo septentrional hacia el este del remolino. El núcleo occidental fluyó aparentemente hacia el sur mientras el núcleo oriental se

desplazó en dirección norte. No se conoce si los dos mínimos constituyen una parte del remolino o si formaban parte del flujo subsuperficial tortuoso. Una comparación de los perfiles apropiados de salinidad de mayo 1960 (Griffiths 1968) con aquellos de abril y junio de este estudio revelan que el flujo cercano a la superficie de la Corriente de California (evidenciado por el núcleo de mínima salinidad) fue más fuerte durante abril y junio que durante mayo de 1960.

Aunque la circulación asumió un rumbo septentrional durante agosto el área recibió agua de la vecindad de Cabo Corrientes en el sur y del oeste cerca al Cabo San Lucas. Hacia el norte el agua subsuperficial de la Corriente de California continuó fluyendo dentro de la región a profundidades de 10 m a 150 m. La Corriente de California se extendió también a lo largo de la entrada del Golfo y a los 100 m fluyó dentro del Golfo. Las inversiones de temperatura acompañaron al núcleo de baja salinidad asociado con la Corriente de California; las inversiones fueron nuevamente localizadas debajo del núcleo de baja salinidad.

Profundidad de la capa mixta, profundidad del disco Secchi, concentración de clorofila, fijación de carbono y radiación solar

Las distribuciones de las profundidades de la capa mixta y su relación respecto a la productividad biológica son de interés tanto para los biólogos como para los oceanógrafos y han sido el objeto de estudio por Brandhorst (1958), Cromwell (1958), Forrester (1964), Wyrtki (1964) y otros. Los estudios de Cromwell y Wyrtki son especialmente útiles porque incluyen mapas mensuales y estacionales de la capa mixta.

La profundidad de la capa mixta, como se usa en este estudio, se refiere a la capa de agua isotermal cerca a la superficie del mar, Cromwell (1958) declaró lo difícil que era proveer una definición objetiva de este término. Wyrtki (1964) declaró que el gradiente de temperatura debe ser mayor que $0.2^{\circ}\text{C}/10\text{ m}$ para la termoclina, pero no expresó el grado de variabilidad permisible para la capa mixta. Todas las determinaciones de la profundidad de la capa mixta para este estudio fueron realizadas según trazos BT y en la mayoría de los casos no se presentó problema. Las observaciones de estaciones adyacentes fueron empleadas como guía para hacer las decisiones de los trazos complicados.

La media de los valores de la profundidad de la capa mixta fue determinada para cada crucero (véase Figura 8) de la misma manera que para la media de temperatura superficial. La profundidad media mayor de la capa mixta ocurrió durante enero, la más pequeña durante agosto. Se indica una relación inversa entre la media superficial de las temperaturas y las profundidades de la capa mixta; las capas mixtas de profundidades más hondas y más someras corresponden a las temperaturas más frías y más calientes del agua. El calentamiento y enfriamiento estacional de la

superficie del agua mediante la radiación solar (Fig. 2) producirá tal relación inversa.

La profundidad de la capa mixta se encontró que variaba tanto geográficamente como de mes a mes (Fig. 11). Los cambios en el espesor de la capa mixta provienen de la acción no uniforme de la mezcla del viento, mediante procesos de mezcla laterales y verticales asociados con corrientes superficiales o casi superficiales y especialmente, mediante los efectos del calentamiento de la insolación. La profundidad de la capa mixta es biológicamente importante ya que afecta el grado de reabastecimiento de los micronutrientes vegetales en las capas superiores empobrecidas del océano, al controlar el grado de la mezcla vertical con aguas más profundas ricas en nutrientes.

Un canal encontrado aproximadamente a lo largo de los 109°W fue una característica persistente durante la investigación. Desde octubre hasta el próximo agosto el canal fue localizado variadamente entre los 108° y $109^{\circ}30'\text{W}$ y varió en espesor de 25 m a 75 m, con un promedio de aproximadamente 45 m. El canal se atribuye principalmente a los procesos locales de mezcla a lo largo del límite de la Corriente de California. La falta de inversiones climáticas dentro del canal sugieren que la advección fue menos importante que la mezcla lateral y vertical. El máximo espesor observado de una capa mixta ocurrió en el costado occidental a la entrada del Golfo durante enero. El canal fue localizado entre la Corriente de California y el derrame de la Corriente del Golfo. Se supone que existe una mezcla vigorosa en dicha localidad. Una disminución frecuente de profundidad de la capa mixta en la vecindad de las Islas Tres Marías y Cabo Corrientes estuvo asociada con el movimiento de agua cálida de baja salinidad en el área inmediata. La profundidad de la capa mixta en mayo 1960 (Griffiths 1968) y en abril y junio 1967, es bastante similar.

Cuando las condiciones necesarias del viento superficial y de las corrientes están presentes, puede interpretarse también una pequeña capa mixta de profundidad como indicación de la presencia de afloramiento. El movimiento ascendente del agua conduce la termoclina cerca a la superficie con la disminución correspondiente de la capa isotermal en la superficie. El afloramiento se encuentra en cierto grado en las cercanías de la mayor parte de las islas, no siendo excepción las Islas Tres Marías. Cuando las condiciones del viento superficial y de las corrientes son favorables, es decir, hacia el sur, en enero y febrero, la profundidad de la capa mixta viene a ser inferior cerca a las islas que en otras localidades del área general. Aunque no se encontraron temperaturas frías superficiales cerca a las islas, las operaciones experimentales no incluyeron un plan detallado de muestreo alrededor de éstas, y tal vez, por esta razón las temperaturas superficiales del agua que fueron observadas cerca a las islas no fueron indicadoras de afloramiento. Sin embargo, se encontró al sur de las islas agua superficial de baja salinidad asociada con la Co-

rriente de California, y ésto apoya la idea del afloramiento local ya que se encuentra agua con esta salinidad a 30-50 m de profundidad más lejos hacia el oeste.

Las concentraciones de la productividad de fitoplancton y de las existencias fueron estimadas según varios tipos de mediciones. Se empleó el disco Secchi durante cada crucero para proveer un índice de la transparencia del agua e indirectamente para indicar la concentración relativa de las existencias. Como la transparencia del agua se encuentra afectada tanto por el material inorgánico suspendido introducido por el desagüe costanero y por la abundancia de las formas planctónicas, es mejor emplear el método lejos de las áreas influenciadas por el derrame costanero. Todas las observaciones del disco Secchi realizadas durante la investigación fueron localizadas 20 km (11 millas) o más del litoral en el ambiente oceánico. La reserva permanente fue estimada según la clorofila *a* superficial (mg/m³) y la productividad según la absorción de radiocarbono (C^{14} , mg/m³/día). Las mediciones biológicas han sido publicadas anteriormente (Leet y Stevenson 1969).

Aunque se realizó un número limitado de observaciones biológicas para cada período de los cruceros, los coeficientes de correlación fueron determinados para varias de las mediciones. Para la profundidad del disco Secchi y para la profundidad de la capa mixta, los coeficientes fueron: 0.84, 0.61 y 0.71 para los meses de diciembre, enero y abril respectivamente; e inferiores para los otros períodos. Los niveles de significación fueron 5% o superiores, debido a la pequeña cantidad de observaciones. Una comparación de la fijación de carbono y de los pigmentos de las plantas reveló coeficientes de correlación de 0.96, 0.91 y 0.75 para abril, junio y agosto respectivamente. El coeficiente de junio fue significante al 1%, el coeficiente de abril significante probablemente al 5% y el coeficiente de agosto no significante al 5%. Para los períodos de estos cruceros la alta productividad estuvo asociada con grandes reservas permanentes de fitoplancton. Cuando las mediciones del disco Secchi se emparejaron ya sea a las mediciones de la clorofila o de la productividad, resultaron coeficientes negativos tan grandes como 0.81 al nivel del 5%. Como era de esperarse la transparencia del agua en esos casos estuvo inversamente relacionada a la fertilidad del agua.

Solo se dispone de unas pocas (13) estimaciones de productividad de los cruceros de abril, junio y agosto, pero las tasas más altas de la fijación de carbono ocurrieron comúnmente cerca a las Islas Tres Marias y la segunda tasa más alta de la fijación de carbono fue cerca al Cabo San Lucas (Tabla 1). Las tasas más altas durante un crucero individual se diferenciaron frecuentemente de las tasas más pequeñas evaluadas por un factor de 10. Según la Tabla 1, es evidente que la productividad bajo condiciones de luz incidente fue por lo general inferior a aquellas muestras incubadas bajo el nivel del 50% de luz entrante. Para el área de investi-

gación, se estimó la productividad mediana en 4.1 y 6.9 mgC/m³/día correspondiente a la luz incidente y al nivel del 50% de la luz, respectivamente. Si los datos de las tres estaciones ubicadas fuera del derrotero usual del crucero, se incluyen, las medianas serían 3.3 y 6.1 mgC/m³/día respectivamente, sugiriendo que la productividad es más alta cerca a la entrada del Golfo que más lejos mar afuera. La reducción de la productividad medida a los dos niveles de luz se considera que se deba primeramente al efecto de la inhibición de luz. En un examen de los datos de la productividad primaria disponibles para el Golfo de California, Zeitzschel (1969) encontró que las tasas dentro del Golfo eran dos y tres veces superiores a las del agua superficial a una misma latitud en el Pacífico.

La concentración de clorofila *a* superficial (Fig. 12) sufrió un aumento gradual de abril a agosto. Las concentraciones medianas del pigmento disuelto de las plantas se encontró que eran 0.65, 0.78 y 0.97 mg/m³ para abril, junio y agosto, respectivamente. Sin embargo, la fluctuación de los niveles de concentración disminuyó, sugiriendo que las inhomogeneidades espaciales asociadas con el "florecimiento" local había disminuido desde la primavera hasta el verano debido tal vez, a una dispersión gradual del fitoplancton superficial. Las concentraciones relativamente altas de plancton fueron asociadas con los límites frontales cerca al Cabo San Lucas y cerca de las Islas Tres Marías.

La proporción del faeofitin *a* respecto a la clorofila *a* (véase Fig. 13) se considera como una medida de la presión del apacentamiento del zooplancton herbívoro en el área (Lorenzen 1967). Lorenzen sugirió también que la proporción faeofitin/clorofila es una medida del reabastecimiento de los nutrientes, así que, se relaciona directamente a la productividad del fitoplancton. Los resultados de Lorenzen se basaron en valores integrados de la zona eufótica, mientras que esta investigación se limitó a mediciones superficiales. Durante abril, por ejemplo, la concentración de clorofila fue 14 veces más que la de faeofitin. El coeficiente de correlación fue 0.97 y significante al nivel de 0.5%. En junio la clorofila fue únicamente 4 veces mayor y en agosto fue reducida a 2.5 veces la concentración de faeofitin. Los coeficientes de correlación fueron 0.82 y 0.61 a los niveles significativos de 0.5% y 1%, respectivamente. La reducción de la proporción de clorofila respecto al faeofitin de abril a agosto sugiere una población de fitoplancton que se encontraba gradualmente sujeta a una presión de apacentamiento más y más fuerte durante el lapso de la primavera al verano.

La abundancia del zooplancton fue estimada según los arrastres superficiales y oblicuos. La comparación de las dos series de medidas indican que los valores de los arrastres oblicuos (que representan la abundancia del zooplancton integrada en los 75 m superiores del agua) son menos variables que los arrastres superficiales. Los cambios en la abundancia del zooplancton de abril a agosto, el período para el cual se dispone también

de mediciones de clorofila, sugiere un aumento total en la concentración (Fig. 14). Aunque es difícil evaluar detalladamente el contorno de algunas propiedades biológicas, aparecieron en abril y agosto dos áreas de una abundancia relativamente alta de zooplancton. Una área está situada al sur de Cabo San Lucas en una región donde frecuentemente ocurren frentes; la segunda área se encuentra en las vecindades de las Islas Tres Marías. Se estimó también la dependencia de la abundancia del zooplancton en las reservas permantes de fitoplancton. Una comparación de la abundancia de la clorofila *a*, faeofitin *a* y del zooplancton, ofreció coeficientes de 0.17 y -0.67 respectivamente para abril y agosto. El coeficiente de abril no fue significante al nivel del 5% pero fue significante al nivel de 0.5% en agosto. Las proporciones progresivamente inferiores de clorofila *a*, faeofitin *a* junto con el aumento en la abundancia del zooplancton observada anteriormente, proveen un fuerte apoyo respecto a la declaración del aumento en la presión del apacentamiento.

La radiación solar incidente estuvo continuamente registrada encima de la estación biológica de Mazatlán desde el 20 de abril hasta el 2 de julio. Después de que se integraron planimétricamente los trazos diarios, fue necesario aplicar una corrección de calibración del -5% a cada valor diario. La cantidad diaria, recibida, de energía solar se presenta en la parte superior de la Figura 2. La mayor parte del tiempo registrado estuvo despejado; el 88% de la energía solar máxima disponible fue recibida durante este período. La uniformidad día a día recibida por la energía solar no se espera que cause ninguna diferencia perceptible en el nivel de la productividad. La longitud del trazo, sin embargo, limita cualquier comparación cuantitativa con la concentración de clorofila o la productividad.

SUMARIO Y CONCLUSIONES

La circulación del área oceánica entre Mazatlán, Cabo San Lucas y las Islas Tres Marías está compuesta de corrientes resultantes de la distribución de temperatura y salinidad (corrientes geostróficas) y de las corrientes cercanas a la superficie producidas por los efectos friccionales del viento sobre la superficie del mar (corrientes de Ekman). De enero a abril las corrientes superficiales geostróficas tuvieron un rumbo meridional a velocidades hasta de 20 cm/seg. En junio las corrientes fueron variables y la mayor parte inferiores a 10 cm/seg. A finales del verano (agosto) las corrientes de superficie cambiaron y se desplazaron en dirección septentrional a velocidades de 10-15 cm/seg. Durante el período de investigación las corrientes del viento formaron una pequeña parte de la circulación superficial total. Unicamente durante junio la magnitud de las corrientes del viento formaron más del 10% de las corrientes

geostróficas. Una comparación de las corrientes del viento y de las corrientes geostróficas indican que las corrientes de Ekman eran frecuentemente oblicuas o estaban en oposición a las corrientes geostróficas. Bajo tales condiciones pueden existir corrientes de contraste en diferentes capas de agua.

La circulación a 100 m fue similar a aquella de la superficie pero más lenta. El cambio del agua subsuperficial ocurrió a través de la entrada del Golfo en diversas ocasiones. Durante enero ocurrió un derrame apreciable a 5-10 cm/seg a lo largo del costado oriental de la entrada. En abril, el agua proveniente del Golfo fluyó a 10 cm/seg hacia el sur y dentro de la parte central del área de estudio. La entrada del Golfo recibió agua por el costado oriental a 5 cm/seg durante agosto, abandonando a unos 8 cm/seg la entrada del Golfo por el costado occidental. Sin embargo, se necesita estudiar más la entrada a lo largo del Golfo para determinar la velocidad y dirección del transporte subsuperficial a través de la entrada.

El efecto de la circulación es traer diferentes tipos de agua en yuxtaposición y subsecuentemente permitir su interacción. Un canal semi-permanente en la capa mixta, localizado a lo largo de los 109°W, se considera como un ejemplo de tal interacción. Se encuentran tres fuentes de agua dentro de la vecindad inmediata de investigación: 1) el agua fría de la Corriente de California de baja salinidad ($S \leq 34.60\%$) que fluye hacia el sur a lo largo de la costa occidental de Baja California; 2) el agua cálida del Pacífico oriental tropical de salinidad intermedia ($34.65 \leq S \leq 34.85\%$) que fluye del sudeste dentro del área; y 3) el agua cálida altamente salina ($S \geq 34.90\%$) proveniente del Golfo de California. Basados en las curvas T-S, se encontró que el agua del Golfo de California abandona el Golfo intermitentemente en la superficie o cerca a ella en cantidad limitada. El agua de la Corriente de California se encontró consistentemente cerca al Cabo San Lucas. Entre Cabo San Lucas y Cabo Corrientes, sobre los 150 m de profundidad, se encontró tanto las aguas de la Corriente de California como las del Pacífico oriental tropical en mayor o menor grado, según la circulación general prevaleciente en esa época. El agua del Pacífico oriental tropical se encontró comúnmente cerca a los 200 m de profundidad.

Además de las variaciones de las propiedades superficiales causadas por las diferentes fuentes de agua, ocurrieron también grandes cambios estacionales. Durante el período de esta investigación la media de la temperatura superficial fue 25.1°C con un límite de distribución de 19.7°C a 24.8°C; la media de temperatura más baja ocurrió durante enero y la más alta en agosto. La media de profundidad de la capa mixta fue de 30 m con un límite de distribución de 5 m a 100 m; fue más profunda en enero y más somera en agosto. Las fluctuaciones de estas dos propiedades se atribuyen a los cambios estacionales de insolación y a la mezcla producida por el viento del agua cercana a la superficie. La media de salinidad

fue de 34.76‰, con un límite de distribución de 34.14‰ a 35.42‰. Los cambios de la salinidad se atribuyen a las diferencias estacionales en la evaporación y precipitación. Mientras la precipitación no demostró una reducción notoria de las salinidades mar afuera, los valores superficiales cercanos a la costa fueron reducidos en un promedio de 0.4‰ durante la estación de lluvias más fuertes. Alguna variabilidad estacional de la salinidad se atribuye también a los movimientos advectivos en el área de las tres masas de agua.

Las secciones verticales de temperatura y salinidad localizadas entre Mazatlán y Cabo San Lucas (sección del norte) y desde Cabo San Lucas hasta las Islas Tres Marias (sección del sur) revelaron en el área muchos detalles acerca de los procesos advectivos y de mezcla. Las inversiones termales ocurrieron a lo largo de ambas secciones durante cada período de los cruceros pero fueron más frecuentes, intensos y de un alcance horizontal mayor a lo largo de la sección meridional. Las inversiones no fueron frecuentes bajo los 150 m y muy rara vez se encontraron a profundidades de 250 m. Las inversiones termales fueron comunes en la vecindad de los núcleos subsuperficiales de salinidad en aguas de la Corriente de California y del Golfo de California, en donde se localizaban con más frecuencia tanto bajo los núcleos de alta como de baja salinidad. Las localidades de las inversiones de temperatura estuvieron aparentemente relacionadas a las interacciones de las aguas de la Corriente de California y del Golfo de California, o en su ausencia, el agua permanente del Pacífico oriental tropical. Se atribuyen estas inversiones a la advección de una clase de agua (en su mayor parte a la Corriente de California) dentro de otra.

Las variaciones en los perfiles de salinidad indican la presencia de agua de la Corriente de California y también de excursiones intermitentes del derrame de agua del Golfo de California. El agua cálida salobre de la superficie se extiende a menudo a distancias cortas a través de la entrada pero estas delgadas plumas superficiales se desvanecían rápidamente debido a varios procesos de mezcla. Sin embargo, en enero, una fuerte corriente proveniente del Golfo fluyó en la superficie y seguía siendo evidente a lo largo de la sección meridional a una profundidad de 50 m. Las isohalinas asociadas con el núcleo se esparcieron debido a la advección y a la mezcla lateral y se redujo el núcleo de salinidad por 0.2‰ a una distancia de 128 km (71 millas). La Corriente de California según está delineada por el núcleo de mínima salinidad se encontró presente durante enero, febrero, abril, junio y agosto, meses para los cuales se disponía de datos. Los valores de salinidad dentro del núcleo fueron frecuentemente más bajos a lo largo de la sección meridional que a lo largo de la del norte y se sobreentiende que el flujo a lo largo de la entrada del Golfo fue menos intenso que el del Cabo San Lucas al Cabo Corrientes. Ocurrió una excepción durante abril cuando una porción de la Corriente de California cambió de dirección y regresó al Golfo de California.

Los gradientes o frentes abruptos de temperatura y salinidad se forman frecuentemente en la superficie del mar y ocasionalmente bajo la superficie. En abril por ejemplo, se encontró un frente sumergido de salinidad entre el núcleo de baja salinidad de la Corriente de California y el derrame cercano a la superficie proveniente del golfo. El frente fue más intenso a los 50 m de profundidad donde el gradiente horizontal fue 1.1‰ en 48 km (27 millas). Se espera que dentro de los límites frontales la tasa relativa de advección sea mayor que los efectos de desintegración de la mezcla lateral y vertical. La interacción de derrame del agua del golfo con la Corriente de California ofrece una oportunidad para estudiar las tasas de mezcla y advección en los límites frontales. Dichos estudios pueden, a su vez, proveer información acerca de los cambios espaciales en la concentración de los peces larvales, debido a la dispersión natural.

Aunque se realizó un número limitado de evaluaciones biológicas, se pueden sacar varias deducciones según los datos. La productividad mediana en los meses de abril, junio y agosto fue 5.6, 17.8 y 2.6 mgC/m³/día, respectivamente. La productividad de aquellas estaciones localizadas mar afuera alejadas de la vecindad del golfo, fueron un tercio o menos que la productividad medida cerca a la entrada del golfo. El promedio de la productividad mediana para los 3 meses fue de 5.5 mgC/m³/día. Las concentraciones medianas de la clorofila *a* superficial para abril, junio y agosto aumentaron progresivamente, *i.e.*, 0.67, 0.78 y 0.97 mg/m³. Se sugieren las siguientes relaciones según los coeficientes de correlación.

- 1) El agua menos turbia corresponde a la mayor profundidad de la capa mixta ($r=0.72$). Sin embargo, los niveles de significación fueron $\geq 5\%$ debido a las pocas observaciones disponibles.
- 2) Se asoció la alta productividad con las reservas permanentes ($0.96 \geq r \geq 0.75$) aunque esta asociación disminuyó progresivamente de abril (significativa al nivel del 1%) a agosto (no significativa al nivel del 5%).
- 3) La turbiedad del agua se relacionó directamente a la fertilidad (mediciones de clorofila) del agua ($r=0.81$ aproximadamente al nivel significativo del 5%).
- 4) La productividad tuvo su ápice cerca a las Islas Tres Marias y segundo cerca al Cabo San Lucas. Las localidades más productivas fueron frecuentemente 10 veces más productivas que las menos fértiles.
- 5) De abril a agosto la proporción clorofila *a*/faeofitin *a* cambió de 14:1 a 4.1:1, lo cual sugiere que la población de fitoplanton estuvo gradualmente sujeta a una presión de apacentamiento más y más pesada durante la primavera y el verano. Esta conclusión está apoyada por el hecho de que las proporciones bajas de clorofila *a*/faeofitin *a*, se asociaron en el verano con las grandes concentraciones de zooplancton ($r=0.67$; significativo al nivel de 0.5%).

LITERATURE CITED — BIBLIOGRAFIA CITADA

- Bennett, E. B. 1966. Monthly charts of surface salinity in the eastern tropical Pacific Ocean [in English and Spanish]. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm., *11*(1):1-44.
- Blackburn, M. 1966. Distribution and abundance of tuna related to wind and ocean conditions in the Gulf of Tehuantepec, Mexico [French and Spanish abstracts]. In: Rosa, H., Jr. (Ed.). Proceedings of the World Scientific Meeting on the Biology of Tunas and Related Species, FAO, Fish. Rep., *3*(6):1557-1582.
- _____. 1965. Oceanography and the ecology of tunas. In: Barnes, Harold (Ed.). Oceanography and Marine Biology—An Annual Review, *3*:299-322, George Allen & Unwin, London.
- Brandhorst, W. 1958. Thermocline topography, zooplankton standing crop, and mechanisms of fertilization in the eastern Tropical Pacific. J. Cons. Int. Explor. Mer, *24*(1):16-31.
- Broadhead, G. C. and I. Barrett. 1964. Some factors affecting the distribution and apparent abundance of yellowfin and skipjack tuna in the eastern Pacific Ocean [in English and Spanish]. Inter-Amer. Tuna Comm., *8*(8):417-473.
- Calkins, T. P. and B. M. Chatwin. 1967. Geographical distribution of yellowfin tuna and skipjack catches in the eastern Pacific Ocean, by quarters of the year, 1963-1966 [in English and Spanish]. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm., Bull., *12*(6):433-508.
- Clarke, L. C. and T. Laevastu. 1967. Numerical methods for synoptic computation of oceanic fronts and water type boundaries. Int. J. Oceanol. Limnol., *1*(1):28-45.
- Cromwell, T. 1958. Thermocline topography, horizontal currents and "ridging" in the eastern tropical Pacific [in English and Spanish]. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm., Bull., *3*(3):133-164.
- _____. and E. B. Bennett. 1959. Surface drift charts for the eastern tropical Pacific Ocean [in English and Spanish]. *Ibid.*, *3*(5):215-237.
- _____. and J. L. Reid Jr. 1956. A study of oceanic fronts. Tellus *8*(1): 94-101.
- Forrester, W. D. 1964. Thermocline structure in the equatorial Pacific. J. Mar. Res. *22*(2):142-151.
- Griffiths, R. C. 1965. A study of the ocean fronts off Cape San Lucas. Spec. Scient. Rep—Fish., U.S. Fish Wild. Serv., (499) :54 pp.

- _____. 1968. Physical, chemical and biological oceanography of the entrance to the Gulf of California, spring of 1960. Spec. Scient. Rep. —Fish., U.S. Fish Wildl. Serv., (573) :47 pp.
- Hubbs, C. L., and G. I. Roden. 1964. Oceanography and marine life along the Pacific coast of Middle America. In: Wauchope, Robert (Gen. Ed.). Handbook of Middle American Indians. Vol. 1, Natural Environment and Early Cultures. Edited by West, R. C., :143-186, University of Texas Press, Austin.
- Klawe, W. L., J. J. Pella and W. S. Leet. 1970. The distribution, abundance and ecology of larval tunas from the entrance to the Gulf of California [in English and Spanish]. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm. Bull., 14(4) (*in press*).
- Leet, W. and M. Stevenson. 1969. Oceanographic observations from the Mazatlan Project: October 1966-August 1967 [in English and Spanish]. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm., Data Report No. 3:249 p.
- Lorenzen, C. J. 1967. Vertical distribution of chlorophyll and phaeopigments: Baja California. Deep-Sea Research, 14(6):735-745.
- Roden, G. I. 1959. On the heat and salt balance of the California Current region. J. Mar. Res. 18(1):36-61.
- _____ and G. W. Groves. 1959. Recent oceanographic investigations in the Gulf of California. J. Mar. Res. 18(1):10-35.
- _____. 1964. Oceanographic aspects of Gulf of California. In: van Andel, T. H., and G. G. Shor Jr. (Ed.). Marine Geology of the Gulf of California. Amer. Assoc. Petroleum Geologists, Memoir 3:30-58.
- Schaefer, M. B., B. M. Chatwin, and G. C. Broadhead. 1961. Tagging and recovery of tropical tunas, 1955-1959 [in English and Spanish]. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm., Bull., 5(5):341-455.
- Sverdrup, H. U., M. W. Johnson and R. H. Fleming. 1942. The oceans, their physics, chemistry, and general biology. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1087. p.
- Uda, M. 1959. Oceanographic seminars. MS Rep. Oceanogr. Limnol., Fish. Res. Bd. Canada. (51):110 pp.
- Wooster, W. S., and J. H. Jones. 1966. Frontal studies with in-situ salinometer. Abstract (469-SIb) in: Vinogradov, A. P. (Ed.). Second International Oceanographic Congress, :398. Nauka, Moscow.
- Wyllie, J. G. 1966. Geostrophic flow of the California Current at the surface and at 200 meters, California Coop. Ocean. Fish. Invest., Atlas (4):288 pp.

- Wyrki, K. 1964. The thermal structure of the eastern Pacific Ocean [German and French summaries]. Dt. Hydrog, Ergänzungsheft, A(8°), (6):84 pp.
- _____. 1965. Surface currents of the eastern tropical Pacific Ocean [in English and Spanish]. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm., Bull., 9(5):269-304.
- _____. 1967. Circulation and water masses in the eastern equatorial Pacific Ocean. Int. J. Oceanol. Limnol., 1(2):117-147.
- Zeitzschel, B. 1969. Primary productivity in the Gulf of California. Mar. Biol. Int. J. Life in Oceans and Coastal Waters. Vol.3(3):201-207.