

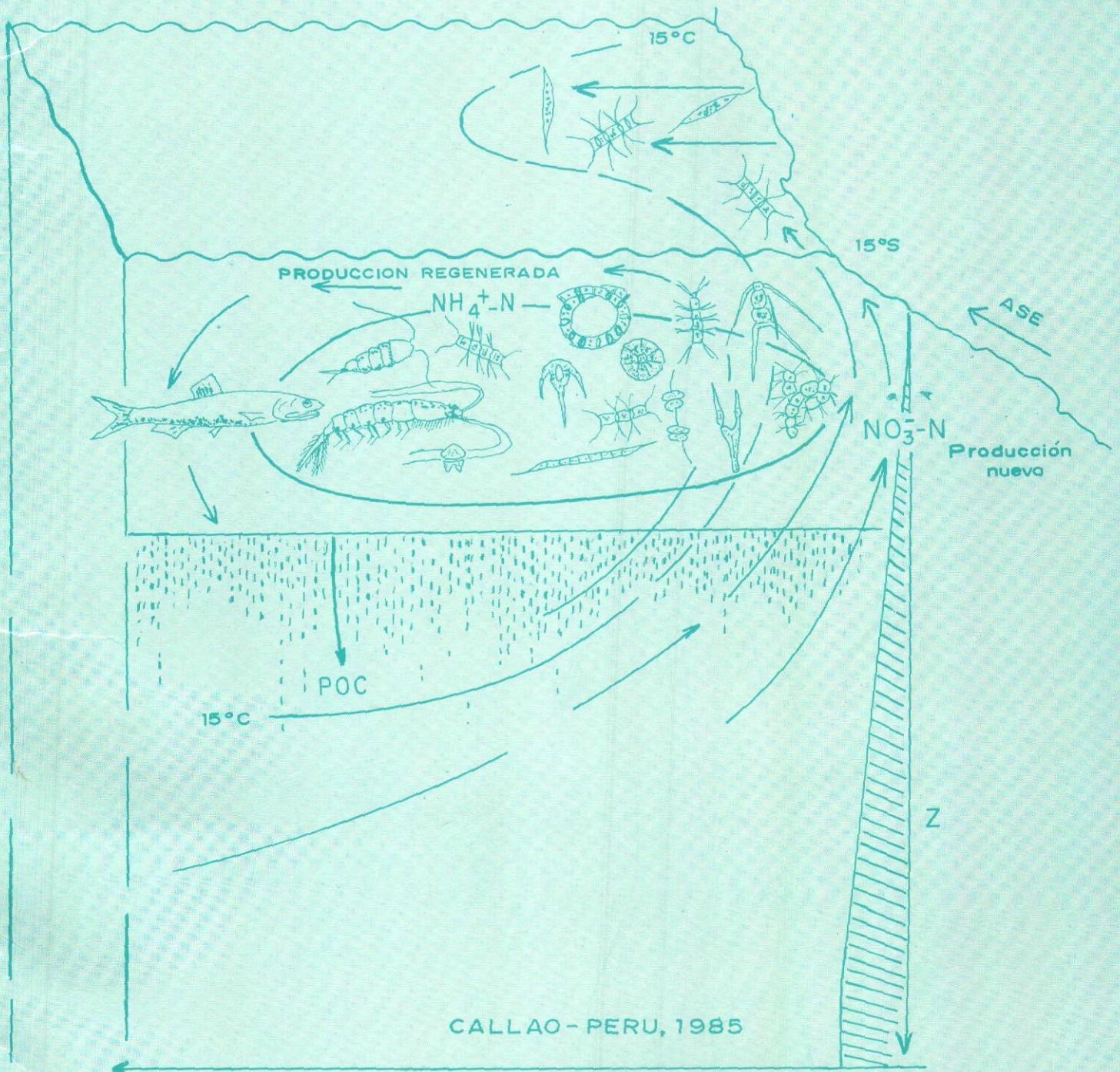
INSTITUTO DEL MAR DEL PERU

OEA



VOLUMEN. 10 Nº 1

Boletín



VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DE CLOROFILA,
PRODUCCION PRIMARIA Y NUTRIENTES FRENTE A
LA COSTA PERUANA

Ruth Calienes, Oscar Guillén, Nelson Lostaunau
Instituto del Mar del Perú
Apartado 22, Callao-Perú

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	5
INTRODUCCION	6
MATERIAL Y METÓDOS	7
RESULTADOS	7
Clorófila "a"	7
Producción primaria	7
Nutrientes	8
Fósforos	8
Nitratos	8
Silicatos	8
Fenómeno El Niño	8
DISCUSION	8
CONCLUSIONES	10
Clorófila y producción primaria	10
Nutrientes	10
RECOMENDACIONES	11
AGRADECIMIENTOS	11
REFERENCIAS	11
FIGURAS	13-44

RESUMEN

La serie de datos sobre clorófila, producción primaria y nutrientes de la costa peruana (4° — 18° S) reunidos por el IMARPE a través de varios años ha permitido establecer los patrones promedio de su distribución en la superficie del mar. El principal objetivo del presente estudio fue la variabilidad a toda escala incluyendo "El Niño". Las fluctuaciones a corto plazo fueron evidentes dentro del periodo 1964-1978 pero no lograron alterar una distribución característica para todo el periodo. La intensidad estacional del afloramiento en el norte y sur (otoño e invierno) estuvo relacionada a la distribución de nutrientes, clorófila y productividad del fitoplancton cuya ocurrencia en "patches" y lenguas reflejó la dinámica que gobierna la región costera de Perú como resultado del flujo de aguas oceánicas hacia la costa y del flujo de aguas afloradas fuera de la costa.

El ciclo estacional de fitoplancton medido en base a su biomasa comienza en primavera cuando el régimen local de luz mejora, las concentraciones de clorófila alcanzan su máximo a mediados de verano y comienzos de otoño decreciendo en invierno; de esta variabilidad en la abundancia resulta una correlación estacional negativa con los nutrientes en verano e invierno. Similar tendencia mostró la distribución de producción primaria cuyas máximas estuvieron relacionadas con las aguas frías a lo largo de la costa.

*La distribución latitudinal de clorófila en la costa peruana durante los años de ocurrencia de El Niño mostró características diferentes del patrón normal especialmente en 1976. Las concentraciones se hallaron muy pegadas a la costa, una excepción fueron las áreas donde dominó el dinoflagelado *Gymnodinium splendens* con una distribución más alejada de la costa. Los años cálidos se caracterizaron por una baja biomasa del fitoplancton en relación a la media de 1966 considerado como un año de condiciones promedio.*

El rango anual de la concentración de nutrientes encontrado a una temperatura dada mostró límites definidos para las diferentes estaciones del año. En respuesta al incremento de la temperatura fuera de la costa (norte y oeste) las variables químicas y biológicas decrecieron.

SUMMARY

Biological and chemical measurements were carried out by IMARPE in the Peruvian coast (4° — 18° S) from 1964 to 1978. In this paper variability is studied using long term observations including "El Niño" interannual events.

Results indicated that seasonal upwelling patterns in the north and south (fall and winter) were associated with the distribution of nutrients, chlorophyll and primary production. Patches of phytoplankton show the prevalent dynamics of the coastal region of Peru as a result of the interaction of the inflow of the open ocean and the outflow of the upwelled water. Seasonal cycle of phytoplankton as measured by biomass begins in spring with an improved local light regime. High chlorophyll concentrations were in summer and fall decreasing in winter. Variability of phytoplankton abundance has a seasonal negative correlation with nutrients in summer and winter. Annual range of nutrients concentration at a given temperature shows definite limits for different seasons of the year.

*During El Niño occurrences the chlorophyll concentration was characterized by a different distribution from normal patterns, especially in 1976. Concentrations were confined in areas right next to the coast and warm species were observed. An exception were the areas where the dinoflagellate *Gymnodinium splendens* dominated on an extended offshore distribution. Warm water years were characterized by a low biomass in relation to the mean of 1966, considered as a year of average conditions.*

VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DE CLOROFILA, PRODUCCION PRIMARIA Y NUTRIENTES FRENTE A LA COSTA PERUANA

Ruth Calienes
Oscar Guillén
Nelson Lostaunau

INTRODUCCION

Los procesos físicos que controlan la circulación, importantes en la productividad de un área, ocurren en diferentes escalas espacio-temporales. En el afloramiento del Perú el principal interés de numerosos estudios ha sido su extensión, su constancia, el suministro de nutrientes, las variaciones del fitoplancton y el grazing o pastoreo del zooplancton. La mayoría de estos procesos han sido estudiados durante algunos días o semanas (Strickland *et al* 1969, Ryther *et al* 1970, Dugdale y MacIsaac, 1971; Beers *et al*, 1971; Harrison *et al*, 1981 y Barber and Smith, 1981). Sin embargo, no obstante los rápidos cambios biológicos y químicos observados en la costa peruana, tal como la variación diaria en especies de fitoplancton en una estación del área de Pisco debido principalmente al transporte advectivo (Blasco y Estrada, 1981), hay otros que ocurren en períodos más largos. Por ejemplo El Niño ocurre con variable intensidad y frecuencia (estacional e interanual). Por lo tanto, la variabilidad de la escala espacio-tiempo en la costa del Perú tiene una gran amplitud (días o años). En este estudio el principal objetivo fue conocer la tendencia general de esa variabilidad a través de datos que incluyen todas las escalas de variaciones sobre un largo período de tiempo.

Un reducido número de datos del área del Perú fueron publicados en un atlas de la distribución de producción primaria y standing stock de fitoplancton en el Pacífico Tropical Oriental por la expedición Eastropac (Love, 1972); Koblentz-Miske *et al* (1970) y El-Sayed (1970) reunieron información sobre producción primaria y patrones de fitoplancton en gran escala para el Pacífico Sur. Sin embargo, en dichas estimaciones muchos de los valores de productividad fueron extrapolados de medidas de superficie. Características generales sobre propiedades físico-químicas de la costa de América del Sur han sido publicadas por Stevenson *et al* (1970). Zuta y Guillén (1970) y Guillén (1980) al describir condiciones oceanográficas de la costa peruana dieron información sobre variaciones anuales de variables físicas, químicas y biológicas. El trabajo más reciente es "El Niño Watch Atlas", (Patzner *et al*, 1978) basado en resultados de los cruceros durante el desarrollo de ese fenómeno en 1975. En el presente estudio se ha usado promedios del periodo 1964-1978 para delinear distribuciones mensuales, estacionales y anuales incluyendo importante información de los proyectos internacionales OEA, CUEA e ICANE.

MATERIAL Y METODOS

Las observaciones se hicieron durante los cruceros bio-oceanográficos periódicos, las operaciones "EUREKA" y "EBCCEN" (Exploraciones sobre el Fenómeno El Niño), así como en cruceros extranjeros a lo largo de la costa del Perú durante el período de 1964 a 1978.

Las muestras de clorófila en los barcos peruanos fueron tomadas inicialmente con botellas Nansen y Van Dorn, y botellas Rossette más recientemente; fueron filtradas con filtros Whatman GF/C, tratados con carbonato de magnesio, y preservadas en un congelador para su análisis en tierra. Los análisis fueron hechos de acuerdo a Strickland y Parsons (1965) y desde 1967 hasta 1978 siguiendo a Lorenzen (1967).

La productividad del fitoplancton fue medida con la técnica *in situ* de carbono 14 con $\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$ de 4 μC de acuerdo con el clásico método descrito por Strickland and Parsons (1972), y con algunas modificaciones dadas por Huntsman (1974) desde 1976. Las muestras fueron colectadas a profundidades correspondientes al 100, 50, 25, 10 y 1% de la luz en superficie. Los análisis de nutrientes fueron hechos de acuerdo a Strickland and Parsons (1965 y 1972).

Los métodos usados en los cruceros extranjeros fueron muy similares, aunque para la medición de la producción primaria los tiempos de incubación fueron diferentes.

La figura 1 muestra la ubicación de los cuadros Marsden de 10° y 1° de latitud y longitud para el área de la costa del Perú de acuerdo al sistema internacional. Los datos fueron agrupados de acuerdo a su posición por cuadrados de 1° para obtener promedios mensuales y estacionales. En la evaluación de la variación latitudinal de clorófila y producción primaria, las observaciones fueron promediadas para una banda de 60 millas de ancho a lo largo de la costa. En los datos de clorófila los valores extremos mayores de 15 $\mu\text{g}/1$ no fueron incluidos debido a su irregular y baja ocurrencia a lo largo de la costa como se ha observado en cruceros de muestreo continuo (mapping) en diferentes estaciones del año. Aunque el principal objetivo fue la evaluación en superficie, la disponibilidad de datos de clorófila y producción primaria para la capa eufótica ha hecho posible presentar algunos ejemplos de variación vertical.

RESULTADOS

Clorófila "a"

De acuerdo a la variación mensual de clorófila (Figs. 2-7), el ciclo estacional del fitoplancton comienza en setiembre cuando ocurren los primeros "patches" de florecimiento cuya distribución se amplía a lo largo de la costa durante los meses de primavera (octubre-diciembre). Las concentraciones de clorófila alcanzan su máximo a mediados de verano y comienzos de otoño, disminuyendo notablemente en invierno (julio). En la superficie el rango dentro de las 300 millas fue de 0.02 a 12.69 $\mu\text{g}/1$. Las concentraciones mayores de 2.0 $\mu\text{g}/1$ se encontraron dentro de las 50 millas a lo largo de la costa, grandemente influenciadas por los procesos locales de circulación; las

medias anual y estacional también reflejan estas características (Figs. 8-10).

La variación de clorófila en la capa eufótica fue similar a la de superficie con excepción de que concentraciones más altas (mayores de 200 mg/m^2), aparecieron en primavera y no en verano u otoño como en superficie. Sin embargo, la diferencia no es significativa y puede ser debida a concentraciones locales pasajeras (Fig. 11 y 12). La distribución vertical de clorófila cerca de la costa es irregular, algunas veces con más de un máximo a profundidades que varían de la superficie o inmediatamente bajo la superficie al fondo de la capa eufótica o debajo de ella (Figs. 13 y 14). Por otro lado, lejos de la costa los valores son bajos y la distribución es homogénea, probablemente debido a la falta de nutrientes y mayor estabilidad de la columna de agua.

La distribución de clorófila en la superficie del mar y capa eufótica en relación a la latitud y a la época del año (Fig. 15 a y b) en una banda costera de 60 millas de ancho tiene como característica la presencia de dos celdas de alta concentración (10-12 $\mu\text{g}/1$), una entre los 13° y 15° S (febrero-abril), y la otra entre los 11° - 12° (setiembre-octubre).

Producción Primaria.— La distribución latitudinal promedio en la superficie del mar en la banda costera (60 millas) tiene similar tendencia que la de la clorófila con las máximas concentraciones a mediados de verano y comienzos de otoño alcanzando valores superiores a 500 $\text{mgC}/\text{m}^3/\text{día}$ en las áreas de 4° a 6° S al norte y entre los 13° y 14° S al sur (Fig. 16). El índice de productividad ($\text{mgC}/\text{mgCl}/\text{día}$) relacionado a un diagrama T-S (Fig. 17) muestra los más altos valores en la superficie del mar dentro del rango de 34.8-35.1‰ de la Corriente Peruana característico de áreas de afloramiento conocidas por su alta productividad. Algunos ejemplos de variación latitudinal de la producción primaria se muestran para áreas seleccionadas en las figuras 18 y 19. Las tasas fotosintéticas en la superficie del mar tuvieron un rango de 0.47 a 645 $\text{mgC}/\text{m}^3/\text{día}$ (Fig. 20 y 21). Los valores mayores de 50 $\text{mgC}/\text{m}^3/\text{día}$ se encontraron dentro de las 50 millas de la costa y los valores menores de 10 $\text{mgC}/\text{m}^3/\text{día}$ se observaron al oeste y norte fuera de la costa, de acuerdo con el incremento de la temperatura media (1928-1969) en la misma dirección.

La producción primaria mostró gran variación vertical estacionalmente y también significativa variación espacial. Se han seleccionado dos áreas representativas: Pimentel-Chimbote al norte, ámbito de una gran pesquería y caracterizada por su amplia plataforma continental y alta producción primaria, y Pisco-San Juan al sur con estrecha plataforma e intenso sistema dinámico debido al constante afloramiento durante el año (Fig. 22). La variabilidad vertical es compleja, las máximas tasas de producción son observadas a diferentes intensidades de luz dentro de la capa eufótica. El índice de productividad varió en las áreas de afloramiento, de mezcla y de aguas subtropicales superficiales sin mostrar relación con la radiación solar como se muestra en la figura 23 a, b y c.

La mayor parte de la producción ocurre sobre los 20m siendo más intensa en la capa de 0-10m. El rango promedio en la capa eufótica fue de 0.01 a 10.5 $\text{gC}/\text{m}^2/$

día y la variación estacional (Fig. 24 y 25) fue similar a la de la superficie. Los máximos valores fueron en San Juan y Paita (más de 9.0 gC/m²/día) en el otoño y en San Juan más de 4.0 gC/m²/día en el verano. También se observaron algunas celdas de alta concentración como en Pimentel (7° S) más allá de las 200 millas. Los promedios de producción total para las 60, 100 y 200 millas fueron 1.40, 1.10 y 0.90 gC/m²/día, equivalente a una producción anual de 510, 440 y 330 gC/m² respectivamente. En las áreas de afloramiento, dentro de las 50 millas, la media de productividad primaria fue mayor de 4 gC/m²/día en verano y otoño.

Desde que la distribución de la abundancia del fitoplancton es controlada por la turbulencia y por la tasa de reproducción, se examinaron estos dos procesos. Hay una correspondencia lineal entre la capa de mezcla y la zona eufótica (Fig. 26 a) y los máximos valores de productividad ocurrieron entre los 15 y 35m (Fig. 26 b). Los cálculos de tasa de crecimiento fueron hechos de acuerdo a Strickland *et al* (1969), basados en la tasa de fotosíntesis y en la concentración total de clorófila en la capa eufótica, los resultados muestran un rango de 0.6-0.8 "doubling time" para las áreas de afloramiento. Similares valores fueron obtenidos por Strickland *et al* (1969) y Beers *et al* (1971).

Nutrientes.— La alta concentración de nutrientes en la costa peruana es en parte debida al transporte de agua de mezcla, pero principalmente a la regeneración de nutrientes en la zona eufótica y al afloramiento de agua profunda rica en nutrientes, "new production", (Dugdale and Goering, 1967). De acuerdo a Eppley and Petersen (1979), la producción nueva es cuantitativamente equivalente a la cantidad de materia orgánica que puede fluir del total de la producción en la zona eufótica hacia el fondo sin alterar el sistema. La producción debida a la regeneración constituye la producción remanente y está basada en el reciclamiento a través de la cadena alimentaria. El reciclamiento de amonio cubriría la mitad del requerimiento diario de nitrógeno del fitoplancton y el nitrato de afloramiento proveería la otra mitad (Dugdale, 1976; Whitley, 1980). La producción nueva depende por lo tanto de la mezcla y de los procesos verticales advectivos asociados con la circulación.

En la distribución horizontal de nutrientes en la superficie del mar las concentraciones estuvieron asociadas con los diferentes tipos de agua envueltos en el régimen de circulación del área, aguas de afloramiento, aguas subtropicales superficiales, aguas ecuatoriales superficiales y aguas tropicales (El Niño).

Fosfatos.— Valores de 1.0 µg-at/1 dominan en una banda angosta a lo largo de la costa en verano, la cual se ensancha en otoño debido al proceso de afloramiento, valores más altos (1.5 µg-at/1) aparecen extendiéndose fuera de la costa. Este efecto se intensifica en invierno cuando se encuentran las más altas concentraciones (2.0 µg-at/1). El cambio estacional del contenido de fosfatos puede seguirse por la evolución de la línea de 1.5 (Fig. 27 y 28). En primavera, la distribución de ésta es continua y muy próxima a la costa, esta situación sigue hasta verano cuando el contenido de fosfatos es reducido a unos cuan-

tos puntos en la costa. El promedio del contenido de fosfatos tuvo un rango de 0.2 a 2.45 µg-at/1.

Nitratos.— La distribución estacional de nitratos (Fig. 29 y 30) tiene las mismas características que las de los fosfatos con máximos valores en invierno (mayores de 20 µg-at/1) y menores en verano (menores de 1.0 µg-at/1) cuando la distribución es más homogénea. Las aguas costeras son delimitadas por valores de 5 µg-at/1.

Silicatos.— Las concentraciones promedio de silicatos muestran los valores más altos (25 µg-at/1) en invierno. La distribución en esta estación tiene variación irregular a lo largo de la costa (Figs. 31 y 32). Como en el caso de fosfatos y nitratos las concentraciones fueron menores en verano (menores de 1.0 µg-at/1) pero a diferencia de la distribución de esas variables, los silicatos tuvieron valores altos en primavera especialmente en el norte (mayores de 15 µg-at/1).

En la superficie del mar la razón promedio de nutrientes P:N:Si fue 1:7.4:7.3 en las áreas de afloramiento. La extrema variabilidad de la producción primaria estaría controlada por el suministro de nitrógeno y silicatos.

Fenómeno El Niño.— Además de los cambios estacionales relativamente regulares de clorófila, producción primaria y nutrientes en la superficie del mar, hay cambios influenciados por variaciones de la temperatura en grandes escalas espaciales y temporales como las anomalías positivas causadas por El Niño. Las anomalías mayores de 2° C son indicativas de la presencia del fenómeno de acuerdo a SCOR-UNESCO. Usando similar criterio Guillén y Calienes (1980) reportaron que las anomalías negativas menores de -2° C tienen también efectos negativos en la producción primaria. En la distribución de anomalías térmicas (Figs. 33) es posible observar por un lado la ocurrencia de El Niño en los años 1957, 1965, 1969, 1972 y 1976 (mayores de +2° C) y por otro lado los años fríos de anomalías negativas (menores de -2° C) 1956, 1962, 1964, 1967-68, 1970-71 y 1974-75, los cuales coincidieron con períodos de altas presiones atmosféricas (Wooster and Guillén, 1974).

La distribución latitudinal de clorófila "a" en la costa peruana durante los años cálidos mostró una baja biomasa del fitoplancton relativa a la media de 1966 considerado como un año de condiciones ambientales promedio. Los patrones de distribución fueron diferentes especialmente durante El Niño de 1976 cuando las concentraciones se hallaron muy pegadas a la costa y la composición de especies cambió. Una excepción fue el dinoflagelado *Gymnodinium splendens* que tuvo una distribución más amplia. Aunque 1968 fue un año frío (verano-otoño) se observó una buena concentración de fitoplancton en nuestras observaciones (Fig. 34).

Comparando los fenómenos de 1965, 1972 y 1976, es evidente que el más intenso fue el de 1972 teniendo varias características en común con el evento de 1965 (Wooster and Guillén, 1974) y con drásticas consecuencias biológicas (Chirinos de Vildoso, 1976).

DISCUSION

Aunque las propiedades biológicas y químicas en la superficie del mar son generalmente diferentes a las de las

aguas subsuperficiales, el sistema de afloramiento, principal característica de la Corriente Peruana, es esencialmente tridimensional (Walsh *et al.*, 1971; Brink *et al.*, 1978, 1980, 1981; Smith, 1981). La consecuencia derivada de este concepto es que las fluctuaciones horizontales y verticales están íntimamente relacionadas, y, por lo tanto, las propiedades de superficie pueden ser vistas como indicadores significativos de los procesos que ocurren a través de la columna de agua.

La intensa y amplia información de condiciones oceanográficas reunida por diversos estudios de investigación interdisciplinaria de afloramiento costero (pequeña, media y macro escala) ha mostrado dos importantes aspectos. Uno es que el afloramiento y su sistema biológico considerado como una respuesta (meso-escala) del océano a la fuerza del viento (macro escala) tiene el mismo patrón en algunos años (Barber and Smith, 1981). El otro aspecto está relacionado al hecho de que los resultados de algunos estudios de corto tiempo pueden reflejar características de largo tiempo. Walsh *et al.* (1971) reportaron que en el área de Pisco la pluma de agua aflorada fuera de la costa se repitió en la distribución de nutrientes y clorófila. Del mismo modo (Beers *et al.*, 1971) propusieron tentativamente un ciclo de producción biológica que comenzaría con la más alta producción primaria a mediados de verano. Estos autores basaron sus criterios solamente en datos de máxima intensidad en el transporte de nutrientes (invierno), alimento de anchoveta (fitoplancton y zooplancton) y abundancia de anchoveta (primavera y verano). Sin embargo, las conclusiones son muy similares con las obtenidas en este estudio que abarca datos de un largo período.

Las lenguas horizontales de nutrientes reveladas en este estudio parecen asociadas con los eddies ciclónicos y anticiclónicos que corresponden a la dinámica de la región costera del Perú, tal como la describen Zuta *et al.* (1978). De acuerdo a la temperatura media (1928-1969), los mayores cambios ocurren de verano a invierno (Zuta y Urquiza, 1972). Esta característica es el resultado de la interacción del flujo de aguas oceánicas hacia la costa y del flujo de aguas afloradas fuera de la costa como respuesta directa a la fuerza del viento. Aunque la temperatura no provee una predicción de nutrientes en el tiempo (Zentara and Kamykowski, 1977), el rango anual de la concentración de nutrientes encontrado a una temperatura dada mostró límites definidos para las diferentes estaciones del año. El calentamiento ocurre de octubre a febrero y el período de enfriamiento para la banda costera dura generalmente seis a siete meses pero en algunos casos ocho meses como en el área de Chimbote (Guillén y Calienes 1981) ó cinco como en Paita (Zuta *et al.* 1978).

En toda el área de estudio (4° - 18° S) la distribución de valores de 1.0 µg/l de clorófila limitando las aguas costeras en la superficie del mar mostró un patrón consistente con la distribución estacional de isotermas de baja temperatura (14° - 21° C). La ubicación del área de afloramiento entre los 14° y 16° S (Pisco-Atico), la cual ocurre la mayor parte del año aunque con mayor intensidad en junio y agosto, así como las otras áreas que se presentan al norte entre 4° - 6° S y 7° - 9° S en mayo y setiembre

(Zuta *et al.*, 1978), se reflejaron muy bien en la distribución de clorófila.

La capa del máximo de clorófila en estudios de otras regiones ha sido relacionada a diferentes procesos como la concentración de detritus de clorófila, el incremento de la tasa clorófila/carbón en el fitoplancton sin acumulación de células, la advección horizontal de poblaciones de plancton, y a la producción *in situ*. En la costa peruana se han realizado muy pocos estudios sobre este aspecto. Lorenzen (1967) encontró una gran variabilidad horizontal (3-10 mg/m³) a diferentes profundidades relacionadas con las plumas de aguas afloradas en Perú. Venrick *et al.* (1973) mostraron que es posible seguir continuamente el máximo de clorófila en la subsuperficie asociado a la termoclina desde Alaska hasta Nueva Zelandia y desde el Perú hasta Nueva Zelandia. El pastoreo de zooplancton es también importante en la distribución del máximo en la subsuperficie en la costa peruana. Herman and Sameoto (1981) reportaron algunos resultados concernientes a perfiles de clorófila y distribución de cuatro especies de copépodos en el área de Chimbote (9° S), los cuales originaron un abrupto máximo de clorófila en la subsuperficie como consecuencia del pastoreo en la capa superior, aparentemente a la profundidad a la cual la clorófila tuvo su máximo inicial.

La tendencia general ha sido considerar esta capa de máximo de clorófila como un fenómeno esporádico. Un mejor conocimiento e interpretación de la misma es necesario dada su importancia ecológica como capa rica en alimento para el zooplancton herbívoro y las larvas de peces.

El ciclo estacional de fitoplancton en términos de producción primaria se iniciaría en primavera cuando el régimen local de luz mejora. La correlación estacional negativa entre nutrientes y la clorófila y producción primaria (verano e invierno) evidencia la importancia de la radiación solar en el fitoplancton. El desarrollo del fitoplancton se incrementaría a su máximo en verano y parte de otoño durante el período de claros días. La fijación del carbono mostró similar tendencia que la distribución de clorófila. Comparando los valores de productividad con estudios anteriores (Guillen *et al.* 1969, 1971; Barber and Smith 1981; Harrison *et al.* 1981) se encontraron valores dentro del rango hallado en este estudio (0.05-10.5 gC/m²/día), con excepción de las tasas fotosintéticas mayores de 12 gC/m²/día reportados por Harrison and Platt (1981) para el área de Chimbote (9° S). Considerando que las máximas tasas de producción se encontraron a diferentes intensidades de luz, se puede señalar como uno de los factores físicos que puede causar esta variabilidad biológica el hundimiento de la capa de mezcla. De acuerdo a Barber and Smith (1981) la estratificación sobre la plataforma en el área de intenso afloramiento (14° - 16° S) es constante en la capa de 0-30m indicando que la profundidad de mezcla no limitaría la producción primaria en condiciones normales. Sin embargo, en períodos anómalos como El Niño 1982 el fitoplancton estuvo sujeto a regímenes alterados de luz debido a que la profundidad de la capa de mezcla fue grandemente incrementada (Barber *et al.* 1983). Según nuestros datos la profundidad

de la capa de mezcla y de la capa eufótica fueron proporcionales.

Otra explicación para el máximo de producción a diferentes profundidades es la adaptación del fitoplancton a las condiciones de luz dominantes que experimentan las células por cambios en su eficiencia fotosintética, máxima tasa de producción y sensibilidad a las intensidades de luz de inhibición después que han sufrido hundimiento en la columna de agua (Harrison *et al* 1981). También se puede considerar el efecto de los nutrientes. Guillén *et al* (1981) reportaron una razón promedio de nutrientes P:N:Si igual a 1:7.4:7.3 lo cual implica que tanto silicatos como nitratos podrían limitar la fotosíntesis. Harrison *et al* (1981) señalaron a los nitratos como los limitantes pero Ryther *et al* (1970) y Dugdale (1972) mostraron la importancia de los silicatos como limitantes de la producción primaria. Aparentemente ambos nutrientes pueden tener el mismo efecto pero es necesario conocer la razón óptima entre nutrientes para el fitoplancton de la región.

En resumen, consideramos que hay dos factores que podrían afectar los resultados de este estudio. Uno es el hecho de que aunque los muestreos en las áreas a lo largo de la costa fueron hechos en cruceros periódicos, en algunos casos los datos fueron más numerosos en ciertos períodos del año. Esto ocurre especialmente en las áreas de afloramiento de Chimbote, y San Juan las cuales han sido estudiadas intensamente en los últimos años. El segundo factor está relacionado a la inclusión de datos correspondientes a los años de ocurrencia de El Niño. El reverso de la circulación altera los patrones regulares, sin embargo, como se enfatizó al comienzo, este fenómeno representa una escala de variación dentro del sistema de la región. Pocklington (1981) opina que El Niño debería tal vez ser visto no como una incursión de un tipo de agua anormal sino como el restablecimiento de las condiciones de agua de superficie que esperaríamos normalmente a esta latitud. Es el intensivo y sostenido afloramiento del Perú, no su cese o discontinuidad, lo que en un sentido global constituye la anomalía.

A pesar de estas posibles limitaciones, los mapas presentados aquí muestran bien la ubicación de las áreas de gran producción y su variabilidad geográfica, así como en el tiempo y son importantes para comparar la producción primaria de esta parte del Pacífico Sur con la de otros océanos.

Los resultados de este estudio concuerdan con los de otros parciales anteriores (Zuta y Guillén, 1970; Guillén y Rondán 1973, Guillén *et al*, 1977).

CONCLUSIONES

La distribución de clorófila, producción primaria y nutrientes obtenida en muestreos que van de 1964 a 1978, mostró consistente correlación con las características hidrográficas del sistema de circulación de la costa peruana: Afloramiento y presencia de Aguas Subtropicales Superficiales, Aguas Ecuatoriales Superficiales y, en una escala variable (estacional y anual), con el fenómeno El Niño.

Se da un sumario de las características observadas:

Clorófila y Producción Primaria

— Las máximas áreas de producción estuvieron asociadas con las aguas frías a lo largo de la costa (4° - 18° S). La intensidad estacional del afloramiento al norte y al sur (otoño e invierno) estuvo reflejada en la distribución de nutrientes, clorófila y producción primaria. En respuesta al incremento de la temperatura fuera de la costa hacia el norte y el oeste, los nutrientes y la producción decrecieron.

— El ciclo estacional de fitoplancton medido en base a biomasa, clorófila, y a productividad se inicia en primavera y tiene el máximo a mediados de verano y comienzos de otoño.

— La distribución de nutrientes tiene una correlación estacional negativa con la clorófila y producción primaria en verano e invierno.

— Las concentraciones de clorófila en la superficie del mar fluctuaron entre 0.02 y 12.45 $\mu\text{g}/\text{l}$ y de 0.80 a 285 mg/m^2 en la capa eufótica.

— El rango de tasas fotosintéticas en superficie fue de 0.47 a 645 $\text{mgC}/\text{m}^3/\text{día}$ y en la capa eufótica los valores de producción variaron entre 0.05 a 10.5 $\text{gC}/\text{m}^2/\text{día}$, con una media mayor de 4 $\text{gC}/\text{m}^2/\text{día}$ en las áreas de afloramiento y dentro de las 50 millas (verano, otoño).

— El promedio de producción total para 60, 100 y 200 millas fuera de la costa fue: 1.40, 1.10 y 0.90 $\text{gC}/\text{m}^2/\text{día}$ respectivamente. Estos valores son equivalentes a una producción anual de 510, 440 y 330 gC/m^2 .

— La profundidad de la capa eufótica varió entre 15 y 75m, con las menores profundidades cerca de la costa en verano y otoño.

— La relación entre la radiación solar y productividad no mostró correlación. Los valores más altos de producción se encontraron a diferentes profundidades dentro de la capa eufótica pero siempre por encima de 35m. Siendo los factores que determina esta variabilidad aún desconocidos.

— El promedio de las tasas de crecimiento para las áreas de afloramiento fue 0.6 a 0.8 doubling/day.

— La distribución latitudinal de clorófila durante los años de ocurrencia de El Niño fue diferente al patrón normal y con baja biomasa en relación a la media de 1966 considerado como un año promedio de condiciones ambientales.

Nutrientes

— La variación de nutrientes a lo largo de la costa estuvo relacionada al flujo fuera de la costa de aguas afloradas y al flujo interno de aguas oceánicas.

— Las concentraciones de fosfatos en el nivel superficial tuvieron un rango de 0.3 a 3.2 $\mu\text{g-at}/\text{l}$. Los máximos valores dominaron en invierno y los mínimos en verano. Las aguas costeras estuvieron limitadas por valores de 1.0 $\mu\text{g-at}/\text{l}$.

— La distribución de nitratos fue similar a la de fosfatos. Valores entre 5.0 y 21.0 $\mu\text{g-at}/\text{l}$ fueron característicos de aguas costeras influenciadas por el afloramiento. El rango general fue de 0.5-2.10 $\mu\text{g-at}/\text{l}$.

— El contenido de silicatos estuvo comprendido entre valores de 0.0 a 25.0 $\mu\text{g-at}/1$, con los máximos en invierno y primavera.

— En la superficie del mar la tasa promedio de nutrientes P:N:Si fue de 1:7.4:7.3 en las áreas de afloramiento.

RECOMENDACIONES

En este estudio se han visualizado problemas más específicos que deberían estudiarse separadamente para comprender mejor la producción primaria del fitoplancton.

— Distribución vertical de nutrientes.

— Origen y duración del máximo subsuperficial de clorófila y su relación con la estructura térmica.

— Factores que influyen en la máxima productividad a diferentes profundidades de la capa eufótica; hundimiento de células y su adaptación a las condiciones dominantes de luz.

— Determinación de la tasa óptima de nutrientes para el fitoplancton y su comparación y relación con la tasa original dada por Redfield (1963).

— Estudiar la forma en que El Niño afecta la productividad del fitoplancton (estabilidad, mezcla, luz, nutrientes).

AGRADECIMIENTO

Este trabajo ha sido financiado por la Organización de los Estados Americanos (OEA), a través del Proyecto Multinacional de Ciencias del Mar, y dentro del Proyecto OEA-IMARPE "Estudio de la Preservación del Ambiente Marino y Producción Primaria". Expresamos nuestro agradecimiento al personal asistente del Área de Nutrientes y Productividad, Srs. Víctor Sarmiento, Jaime Méndez, Carlos Robles y Roberto Valdez, por su colaboración en los trabajos de laboratorio y en el procesamiento de datos.

REFERENCIAS

- Barber, R. and R. Smith. 1981. Coastal Upwelling Ecosystems. In *Analysis of Marine Ecosystems*. A. Longhurst (Ed.). Academic Press, New York, pp. 31-68.
- Barber, R., S. Zuta, J. Kogelschatz and F. Chavez. 1983. Temperature and nutrient conditions in the eastern equatorial Pacific, Oct. 1982. *Tropical Ocean-Atmosphere Newsletter* No. 16, 15-17.
- Beers, J., M. Stevenson, R. Eppley and E. Brooks. 1971. Plankton populations and upwelling off the coast of Peru, June 1969. *Fish. Bull.* Vol. 69, 4.
- Blasco, D. and M. Estrada. 1981. Short time variability of phytoplankton populations in upwelling regions —the example of Northwest Africa. In *Coastal Upwelling*. F. Richards (Ed.). Coastal and Estuarine Sciences 1, American Geophysical Union, Mass. pp. 339-347.
- Brink, K., J. Allen and R. Smith. 1978. A study of low frequency fluctuations near the Peru coast. *Journal of Physical Oceanography*, 8: 1025-1041.
- Brink, K., K. Halpern and R. Smith. 1980. Circulation in the Peruvian upwelling system near 15° S. *Journal of Geophysical Research*, 85: 4036-4048.
- Brink, K., B. Jones, J. Van Leer, C. Mooers, D. Stuart, N. Stevenson, R. Dougdale and G. Heburn. 1981. Physical and Biological Structure and Variability in an upwelling center off Peru near 15° S during March, 1977. In *Coastal Upwelling*, F. Richards (Ed.), Coastal and Estuarine Sciences 1, American Geophysical Union, Mas. pp. 393-405.
- Calienes, R. y O. Guillén. 1981. Masas de agua y producción primaria en el Perú. *Bol. Inst. Mar Perú*. Vol. Extraordinario ICANE, pp: 155-163.
- Chirinos de Vildoso, A. 1976. Aspectos biológicos del fenómeno El Niño 1972-73. Parte I: Distribución de la Fauna. *FAO Informes de Pesca* No. 185: 62-79.
- Dugdale, R. and J. Goering. 1967. Uptake of new and regenerated forms of nitrogen in primary productivity. *Limnol. Oceanogr.* 12, 196-206.
- Dugdale, R. and J. MacIsaac. 1971. A computation model for the uptake of nitrate in the Peru upwelling region. In *Inv. Pesq.* 35: 299-308.
- Dugdale, R. 1972. Chemical oceanography and primary production in upwelling regions. *Geoforum* 11: 47-61.
- Dugdale, R. 1976. Nutrient cycles. In *The Ecology of the Seas*, D. Cushing and J. Walsh (Eds.). W.B. Saunders Company, Philadelphia, pp. 141-172.
- Eppley, R. and B. Petersen. 1979. Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean. *Nature*, 282: 667-680.
- El-Sayed, S. 1970. Phytoplankton Production of the South Pacific and The Pacific Sector of The Antarctic. In *Scientific Exploration of the South Pacific*, W. Wooster (Ed.), National Academy of Sciences, Was. D.C., pp. 194-210.
- Guillén, O., 1973. Carbon-Chlorophyll Relationships in Peruvian Coastal Waters. In *Oceanography of the South Pacific 1972*, comp. R. Fraser, New Zealand National Commission for UNESCO, Wellington 1973, pp. 373-385.
- Guillén, O. and R. Rondán. 1973. Distribution of Chlorophyll "a" in the Peru Coastal Current. In *Oceanography of the South Pacific*, 1972. R. Fraser (Ed.). New Zealand National Commission for UNESCO, Wellington 1973, pp. 387-395.
- Guillén, O., R. Calienes y R. de Rondán. 1977. Medio Ambiente y Producción Primaria frente al Área Pimentel — Chimbote. *Bol. Inst. Mar Perú* 3: 107-159.
- Guillén, O. 1980. The Peru Current System 1: Physical Aspects. Proceeding of the Workshop on the phenomenon known as "El Niño" Guayaquil, Ecuador 1974. Published by UNESCO, pp. 185-216.
- Guillén, O. and R. Calienes. 1980. Biological Productivity and El Niño. In *Resource Management and Environmental Uncertainty*, M. Glantz (Ed.), John Wiley and Sons, Inc., pp. 255-282.
- Guillén, O., R. Calienes. 1981. Productividad y Afloramiento frente a las Aguas Costeras Peruanas. *Bol. Ins. Mar Perú* Volumen Extraordinario ICANE, pp. 130-143.
- Harrison, G. and T. Platt. 1981. Primary production and nutrient fluxes off the northern coast of Peru: A summary. *Bol. Inst. Mar-Peru* Vol. Extraordinario ICANE, pp. 15-21.
- Harrison, W., T. Platt, R. Calienes and N. Ochoa. 1981. Upwelling, Primary Production and Phytoplankton. In *Coastal Upwelling*, F. Richard (Ed.), Coastal and Stuarine Sciences 1, American Geophysical Union, Was. pp. 303-311.
- Herman, A. and D. Sameoto. 1981. Copepod distributions on the Peru shelf at 9°S during November, 1977. *Bol. Inst. Mar Peru* Vol. Extraordinario ICANE, pp. 228-233.
- Huntsman, S. 1974. An evaluation of optimal conditions for determination of primary production. *CUEA Newsletter* Vol. 3, No. 1.
- Koblentz-Mishke, O., V. Volkovinsky and J. Kabanova. 1970. Plankton Primary Production of the World Ocean. In *Scientific Exploration of the South Pacific*, W. Wooster (Ed.), National Academy of Sciences Was. D.C. pp. 183-193.

- Lorenzen, C.. 1967. Determination of Chlorophyll and Phaeopigments: Spectrophotometric equations, *Limnol. Oceanogr* Vol. 12, 2: 343-346.
- Love, Cuthbert. 1972. Eastropac Atlas, Biological and Nutrient Chemistry Data, United States Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Vol. 6 Circular 330.
- Patzert, W. 1978. El Niño Watch Atlas of Physical, Chemical and Biological Oceanographic and Meteorological Data. W. Patzer (Ed.). Scrips Institution of Oceanography. Series No. 78-7.
- Pocklington, R. 1981. Organic Matter in upwelling off Northern Peru, November 1977. *Bol. Inst. Mar Peru*, Volumen extraordinario ICANE, pp. 7-14.
- Ryther, J., D. Menzel, E. Hulburt, C. Lorenzen and Corwin. 1970. Production and Utilization of Organic Matter in the Peru Coastal Current, Contribution No. 2402, Woods Hole Oceanographic Institution.
- Smith, R. 1981. A comparison of the Structure and Variability of the Flow Field in Three Coastal Upwelling Regions: Oregon, Northwest Africa, and Peru. In Coastal Upwelling, F. Richards (Ed.) Coastal and Estuarine Sciences 1, America Geophysical Union, Mass. pp 107-118.
- Stevenson, M., O. Guillén y J. Santoro. 1970. Atlas de las Aguas Costaneras del Océano Pacífico en la América del Sur. University of California Press. Los Angeles.
- Strickland, J. and T. Parsons. 1965. Manual of Sea Water Analysis. *Bull. Fish. Res. Bd. Canada* No. 125, 3-203 pp.
- Strickland, R., R. Eppley y B. de Mendiola. 1969. Poblaciones de fitoplancton, nutrientes y fotosíntesis en aguas costeras peruanas. *Bol. Inst. Mar Perú* Vol. 2, 1: 4-45.
- Strickland, J. and T. Parsons. 1972. A practical handbook of Sea Waters Analysis. *Bull. Fish. Res. Bd. Canada* No. 167, 311 pp.
- Whitledge, T. 1980. The role of nutrient recycling in upwelling ecosystem. In Productivity of Upwelling Ecosystems, R. Barber and R. Vinogradov (Eds.). Elsevier, Amsterdam.
- Venrick, R., J. McGowan and W. Mantyla. 1973. Deep maxima of photosynthetic chlorophyll in the Pacific Ocean. *Fish. Bul.* Vol. 71, No. 1.
- Walsh, J., J. Kelly, R. Dugdale and B. Frost. 1971. Gross features of the Peruvian upwelling system with special reference to possible diel variation. *Inv. Pesq.* 35: 25-42.
- Wooster, W. and O. Guillén. 1974. Characteristics of El Niño en 1972. *J. Mar. Res.* 32 (3): 387-404.
- Zentera, S. and D. Kamykowski. 1977. Latitudinal relationships among temperature and select plant nutrients along the west coast of North and South America. *J. Mar. Res.* 35, 321-337.
- Zuta S. y O. Guillén. 1970. Oceanografía de las aguas costeras del Perú. *Bol. Inst. Mar Perú* Vol. 2 (5): 161-323.
- Zuta, S. y W. Urquizo. 1972. Temperatura promedio de la superficie del mar frente a la costa peruana, período 1928-1969. *Bol. Inst. Mar Perú* Vol. 2 (8): 459-520.
- Zuta, S., T. Rivera and A. Bustamante. 1978. Hydrologic aspects of the main upwelling areas of Peru, In Upwelling Ecosystems, R. Boje and M. Tomczak (Eds.), Springer-Verlag, Berlin pp. 235-257.

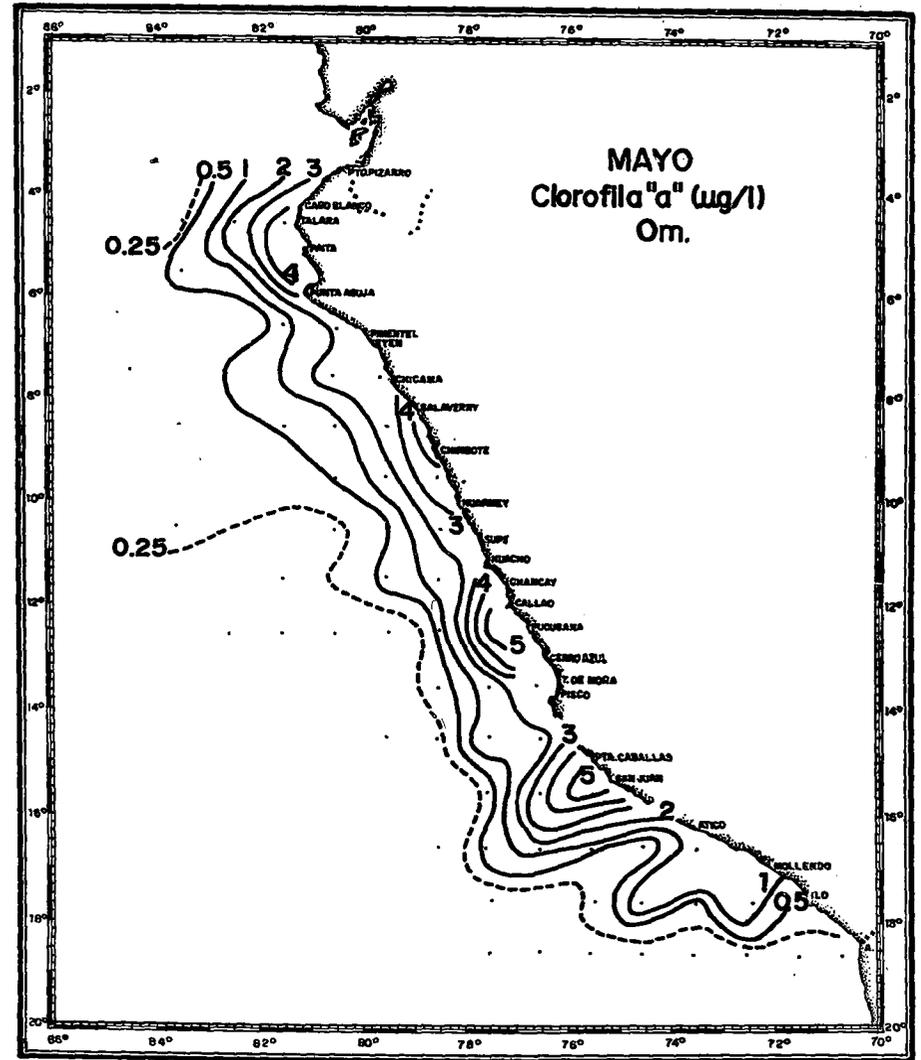
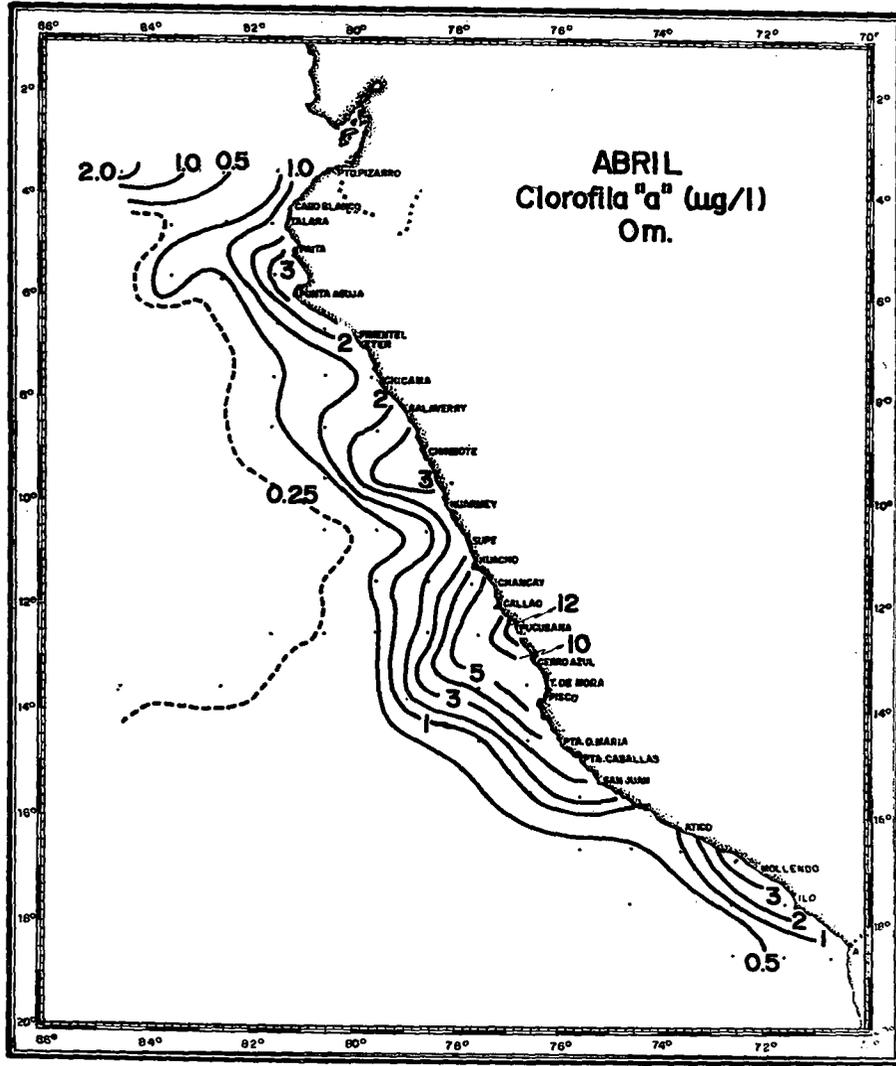


Fig. 3 Variación mensual de clorófila a) abril, b) mayo.

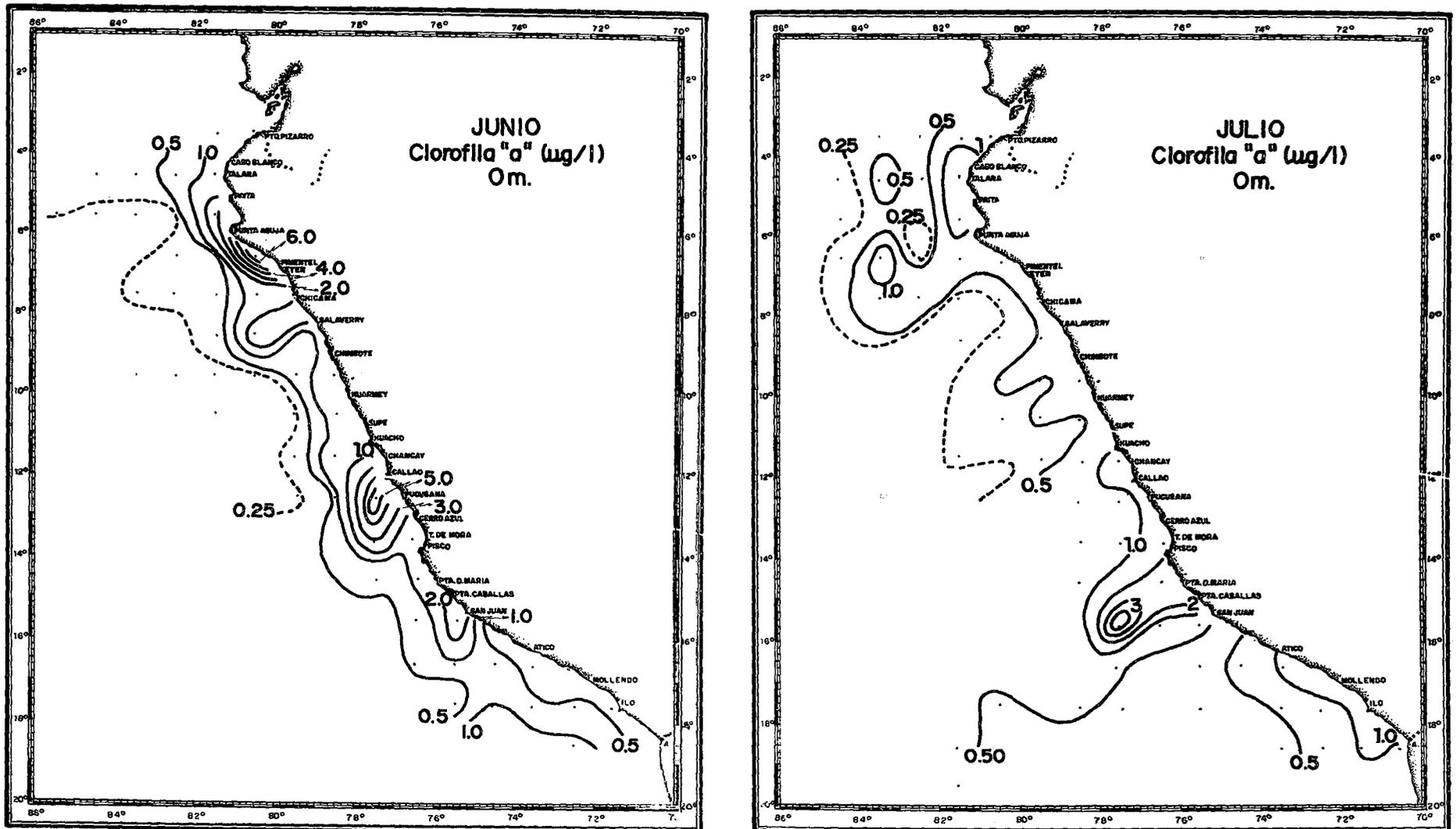


Fig. 4 Variación mensual de clorófila a) junio, b) julio.

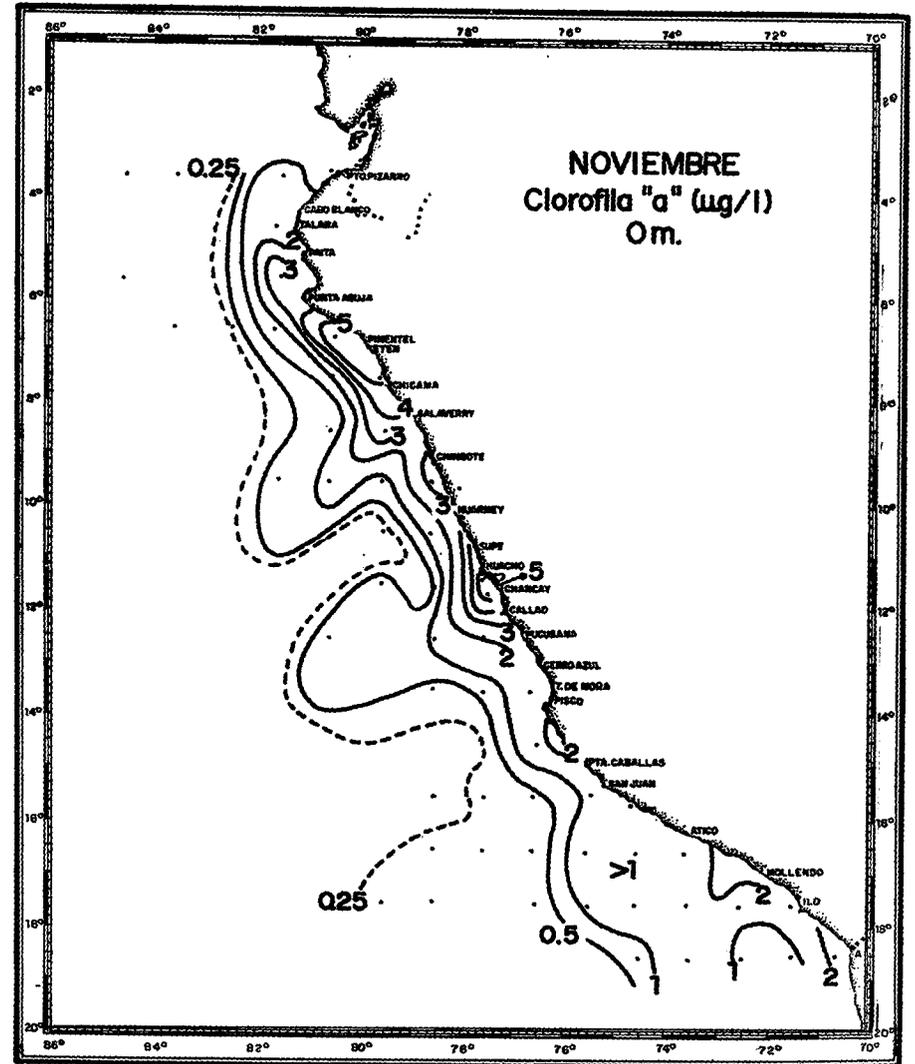
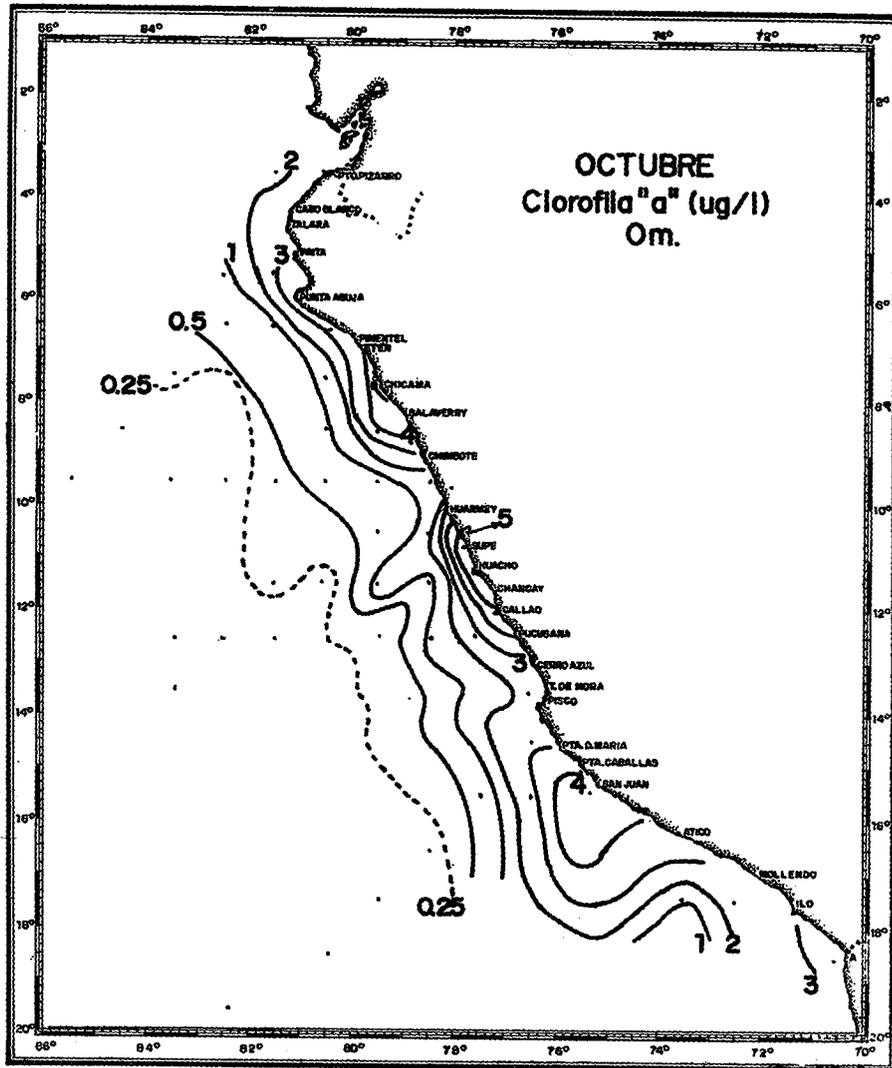


Fig. 6 Variación mensual de clorófila a) octubre, b) noviembre.

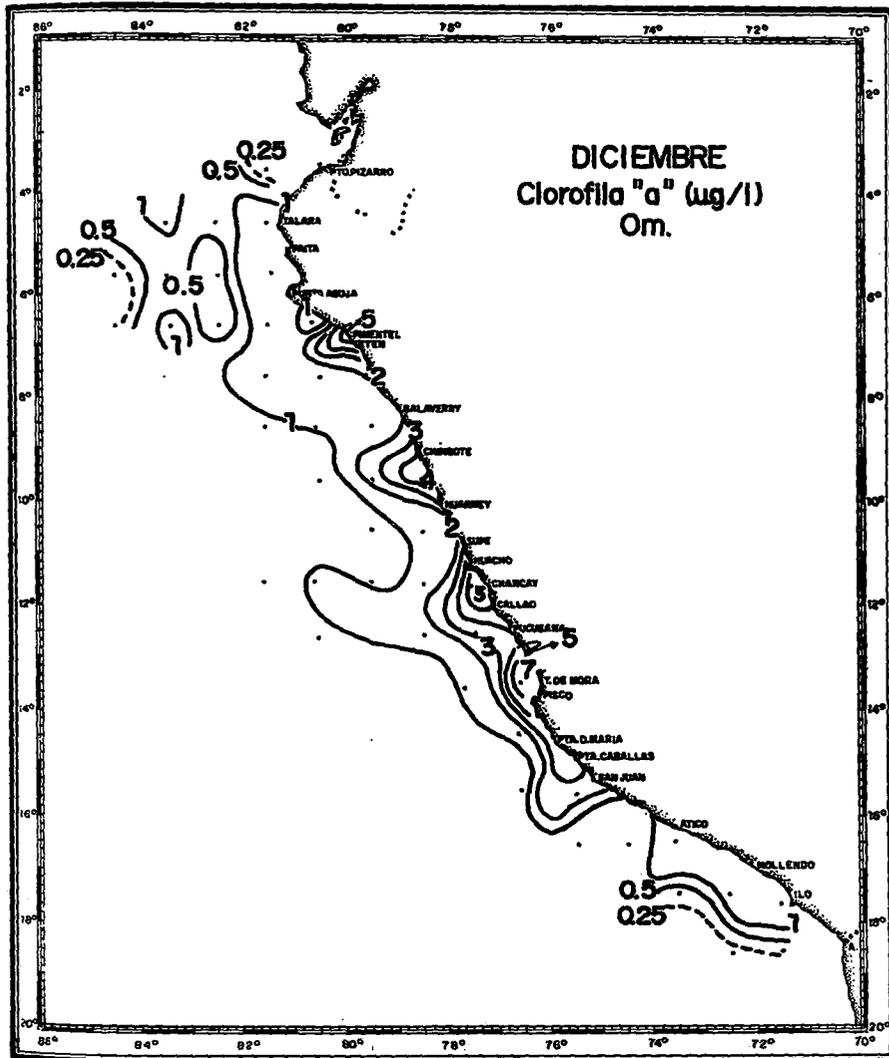


Fig. 7 Variación mensual de clorófila a) diciembre.

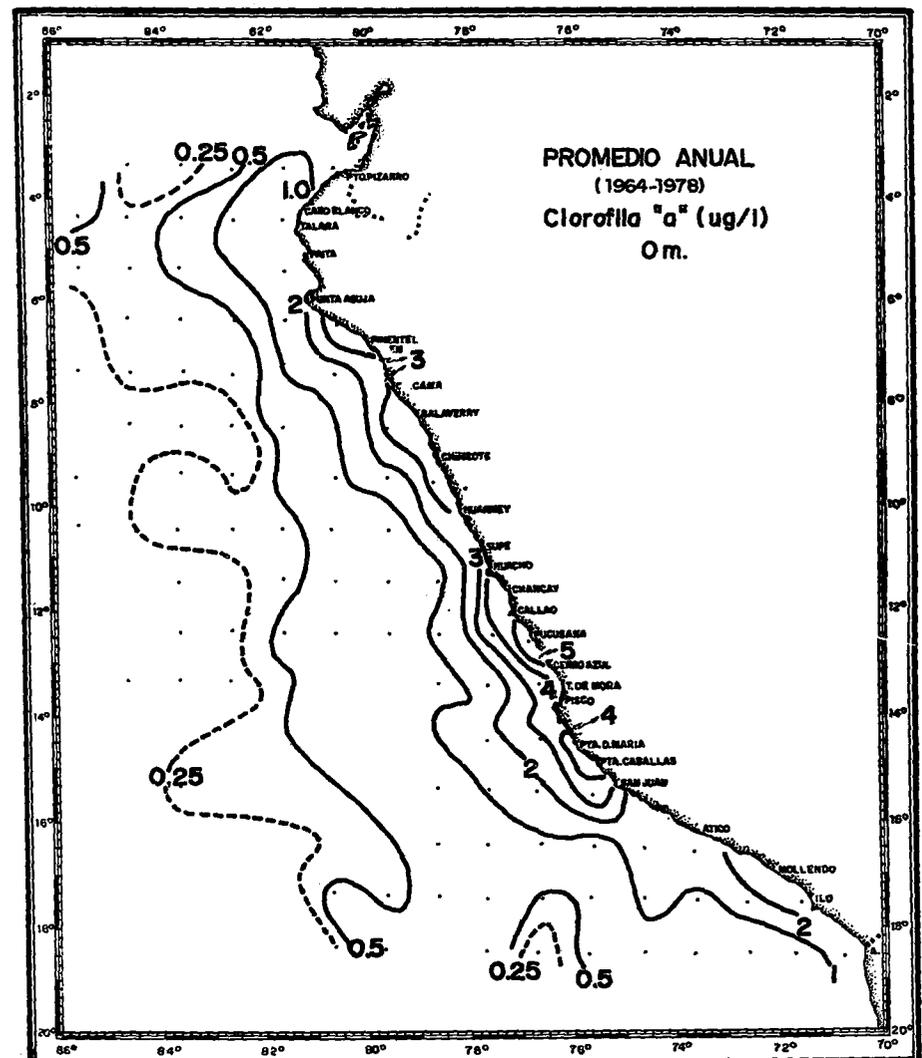


Fig. 8 Media anual de clorófila (1964-1978).

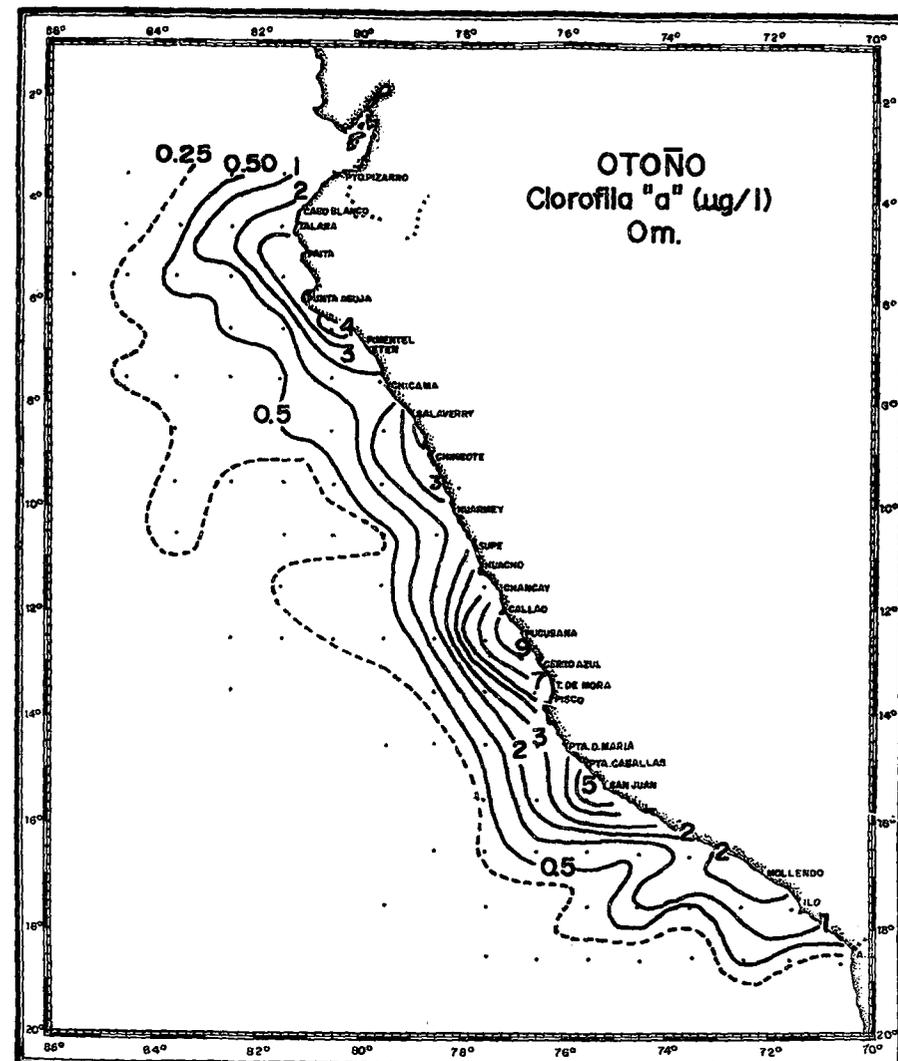
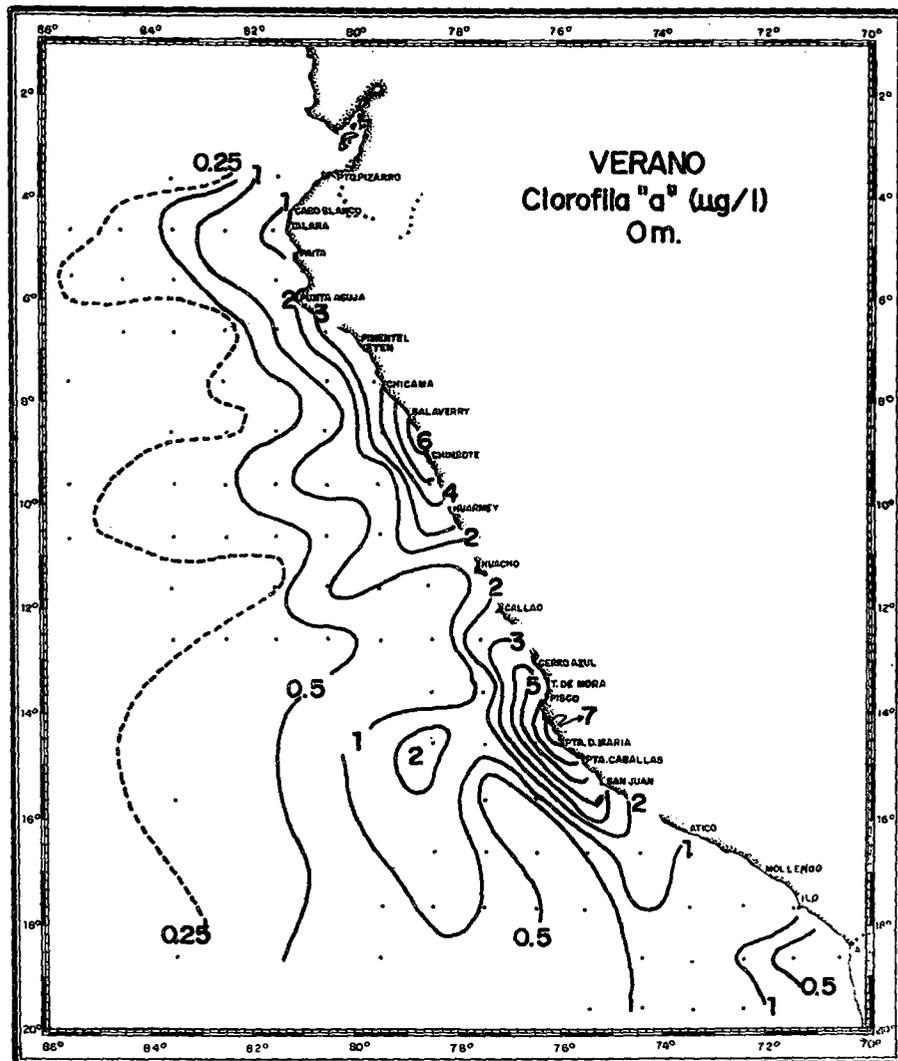


Fig. 9 Variación estacional de clorófila en la superficie del mar a) verano, b) otoño.

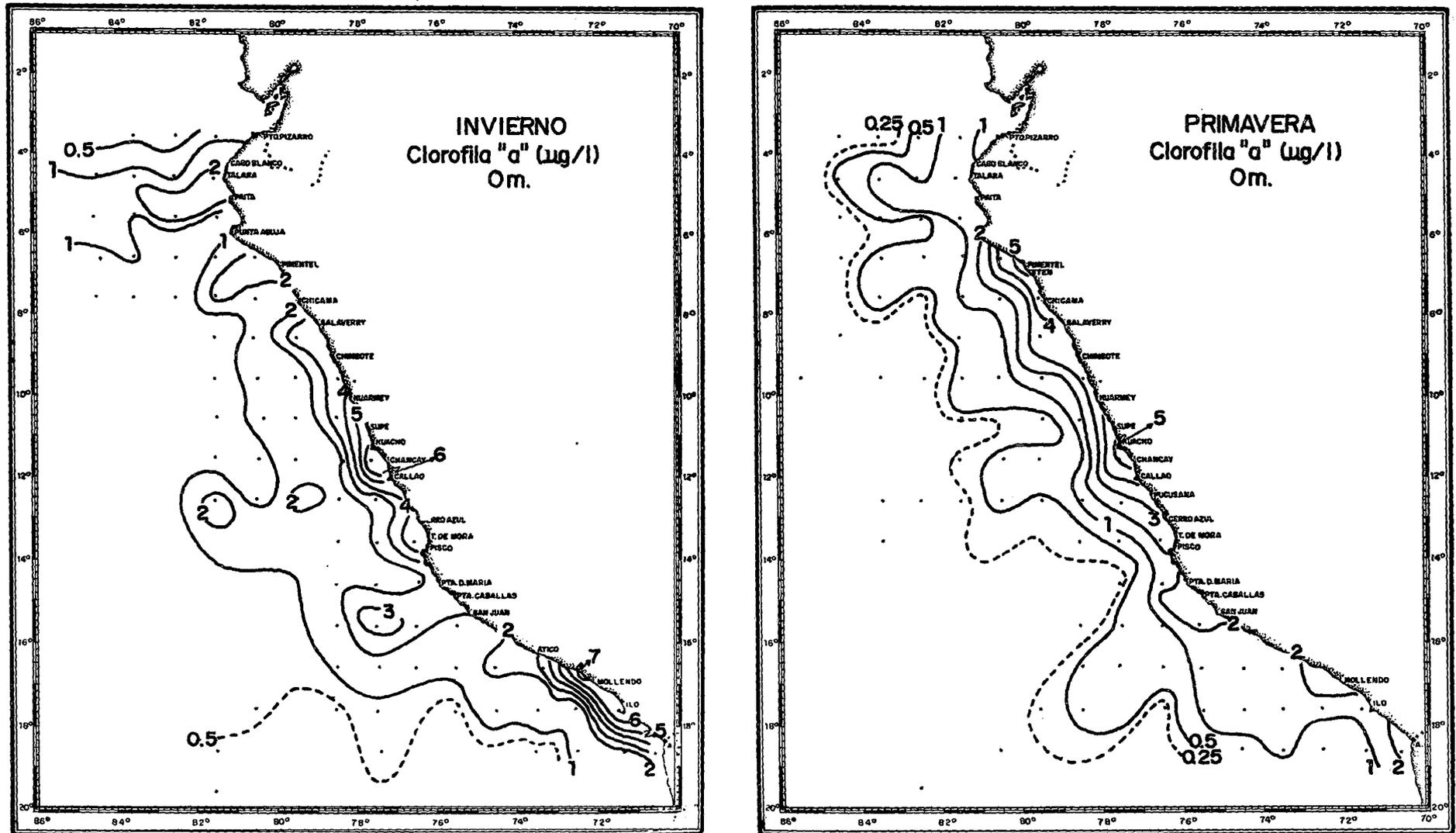


Fig. 10 Variación estacional de clorófila en la superficie del mar a) invierno, b) primavera.

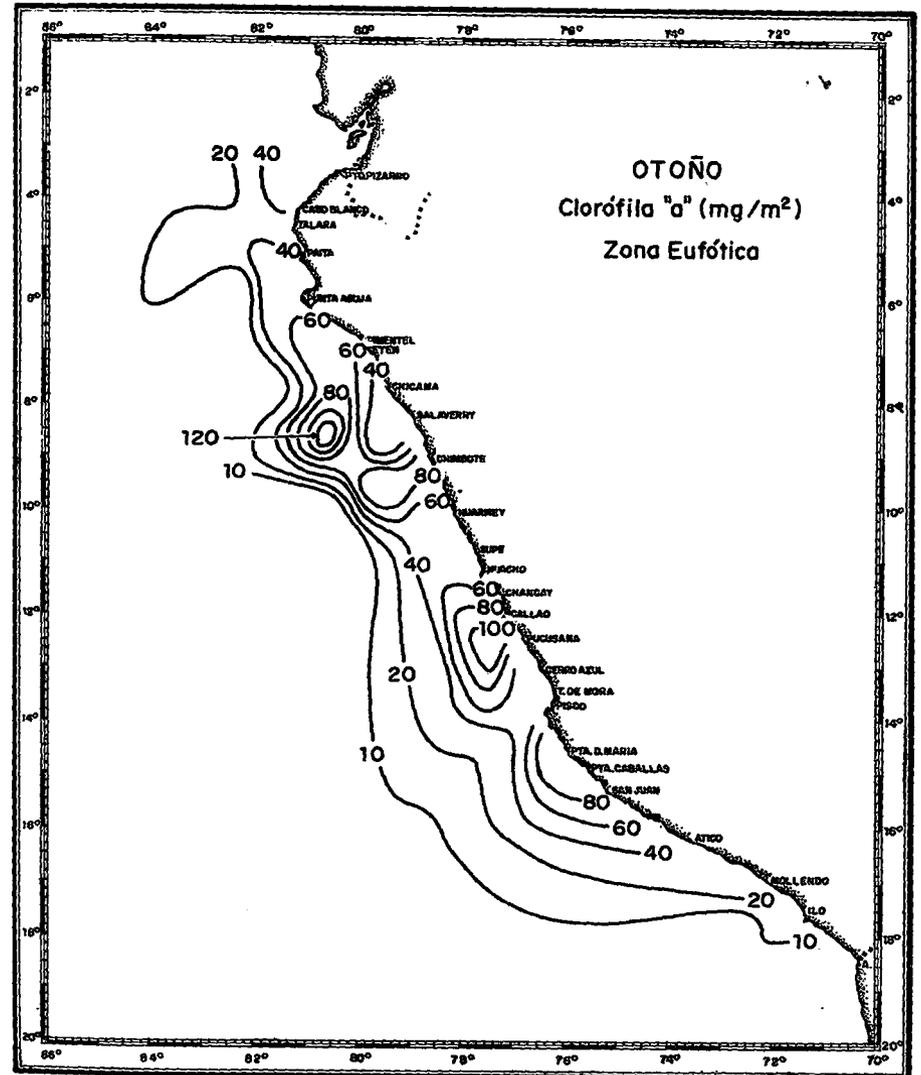
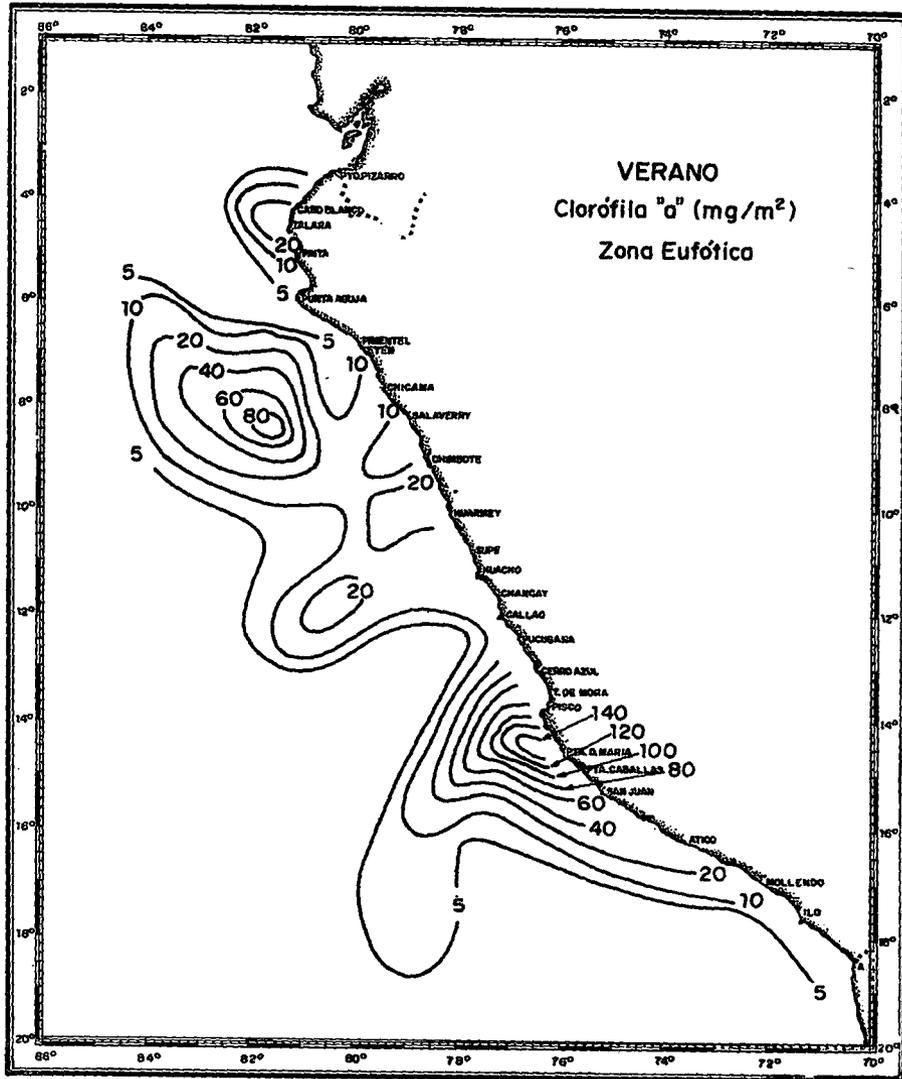


Fig. 11 Variación estacional de clorófila en la zona eufótica a) verano, b) otoño.

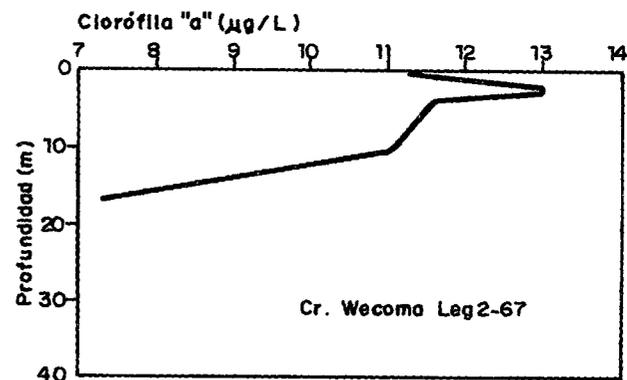
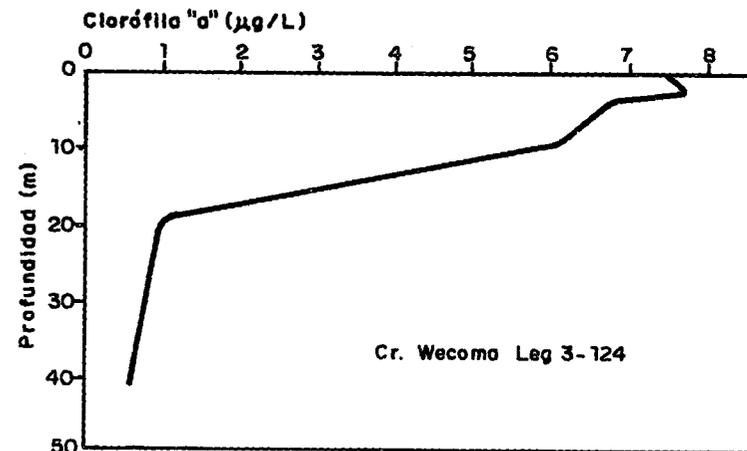
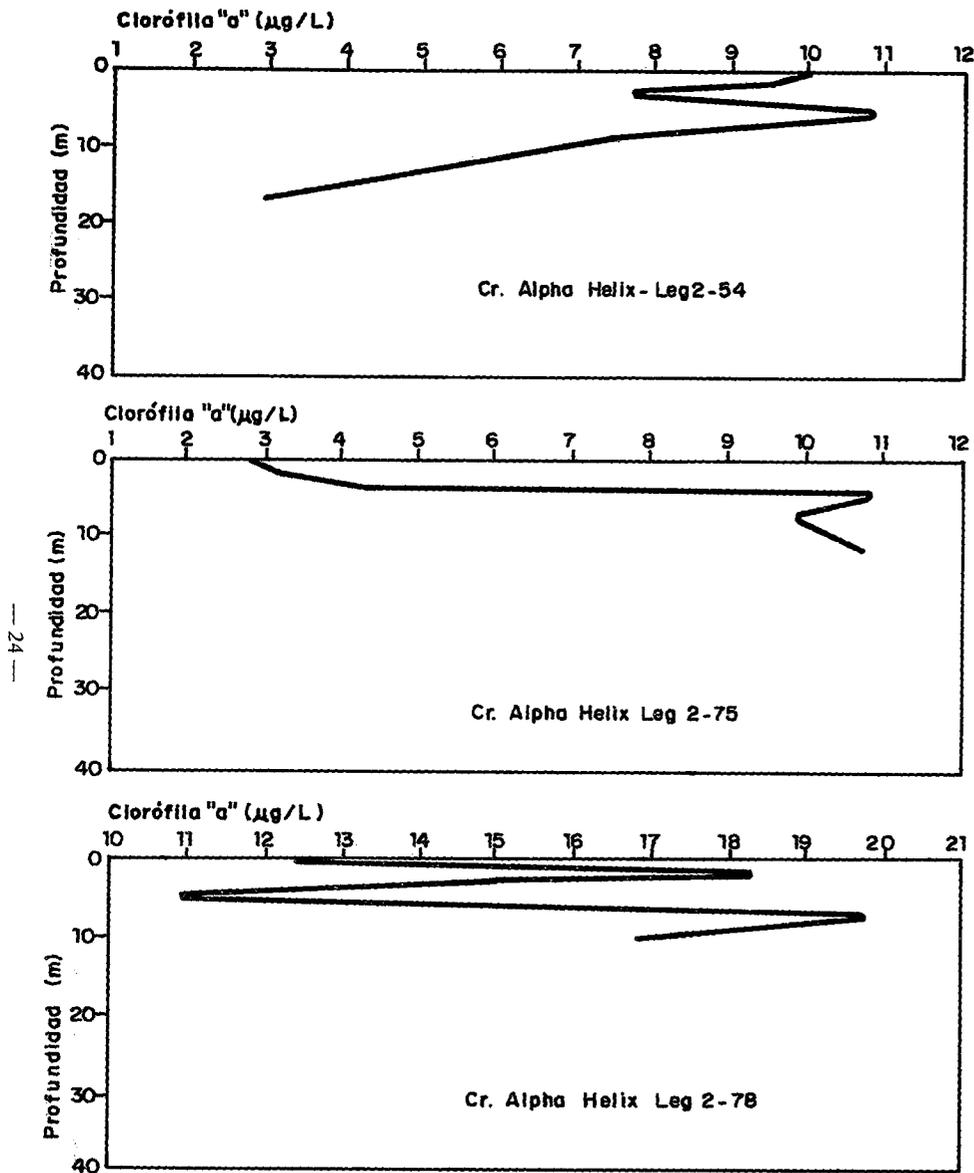


Fig. 13 Variación vertical de clorófila en el área de afloramiento de Pisco.

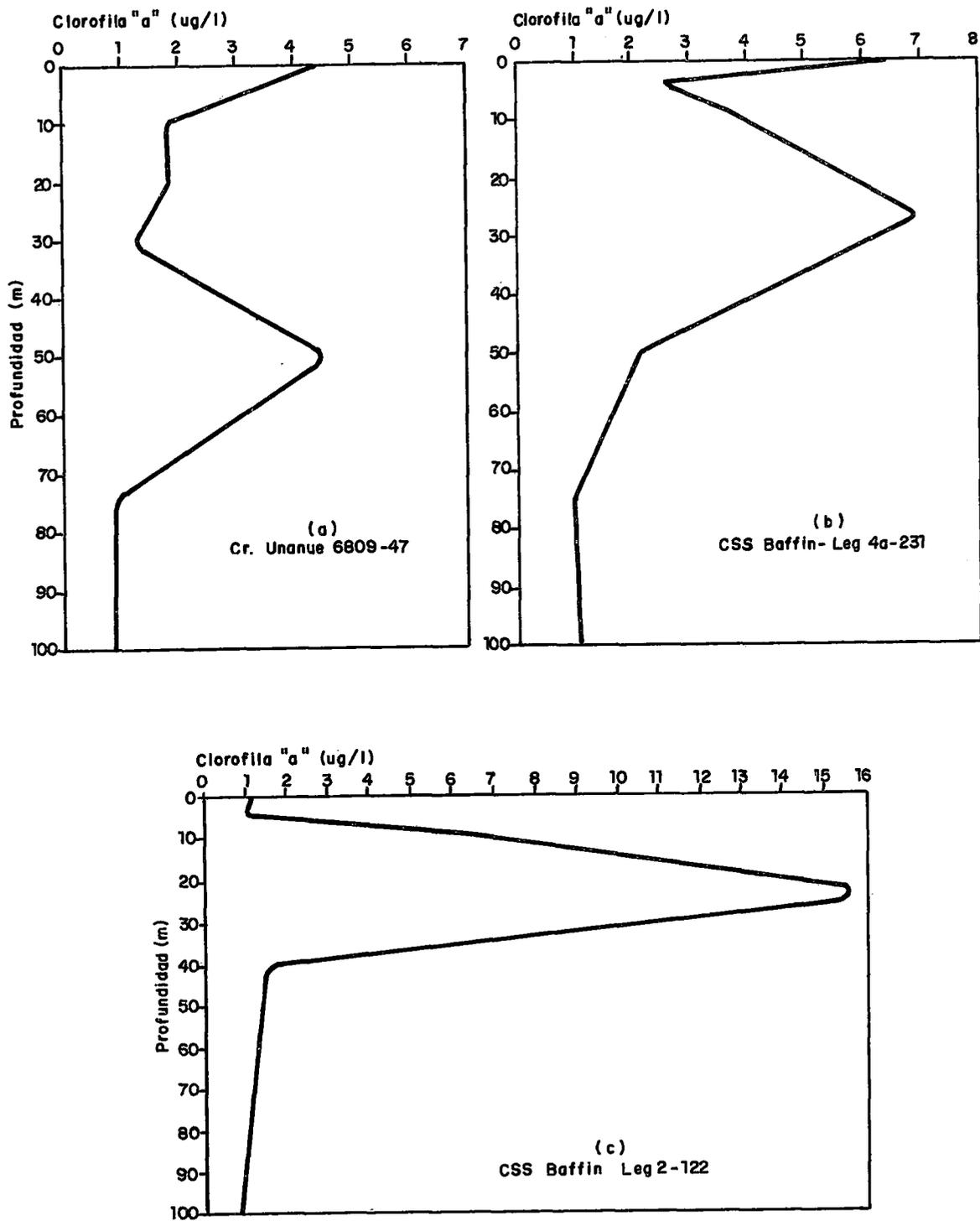


Fig. 14 Variación vertical de clorófila en áreas seleccionadas a) San Juan, b) Huarmey, c) Chimbote.

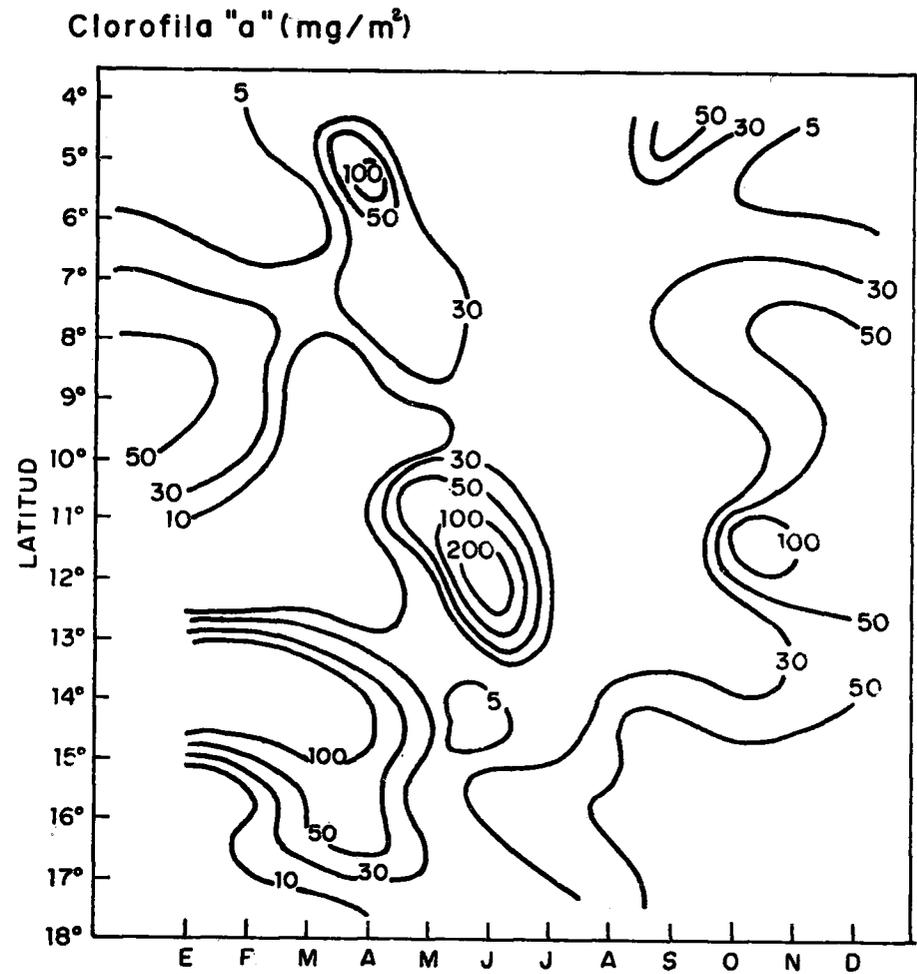
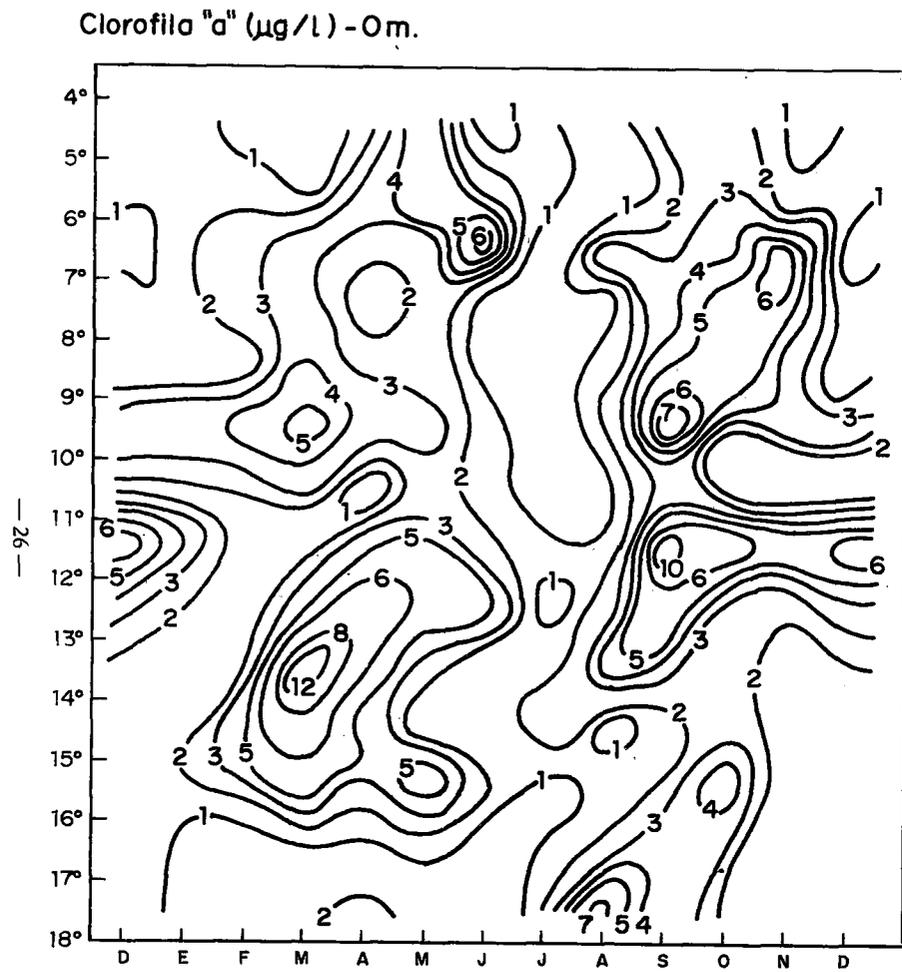


Fig. 15 Variación latitudinal de clorófila en una banda de 60 millas (4°-18° S), a) superficie, b) capa eufótica.

Producción primaria (mgC/m³/d)

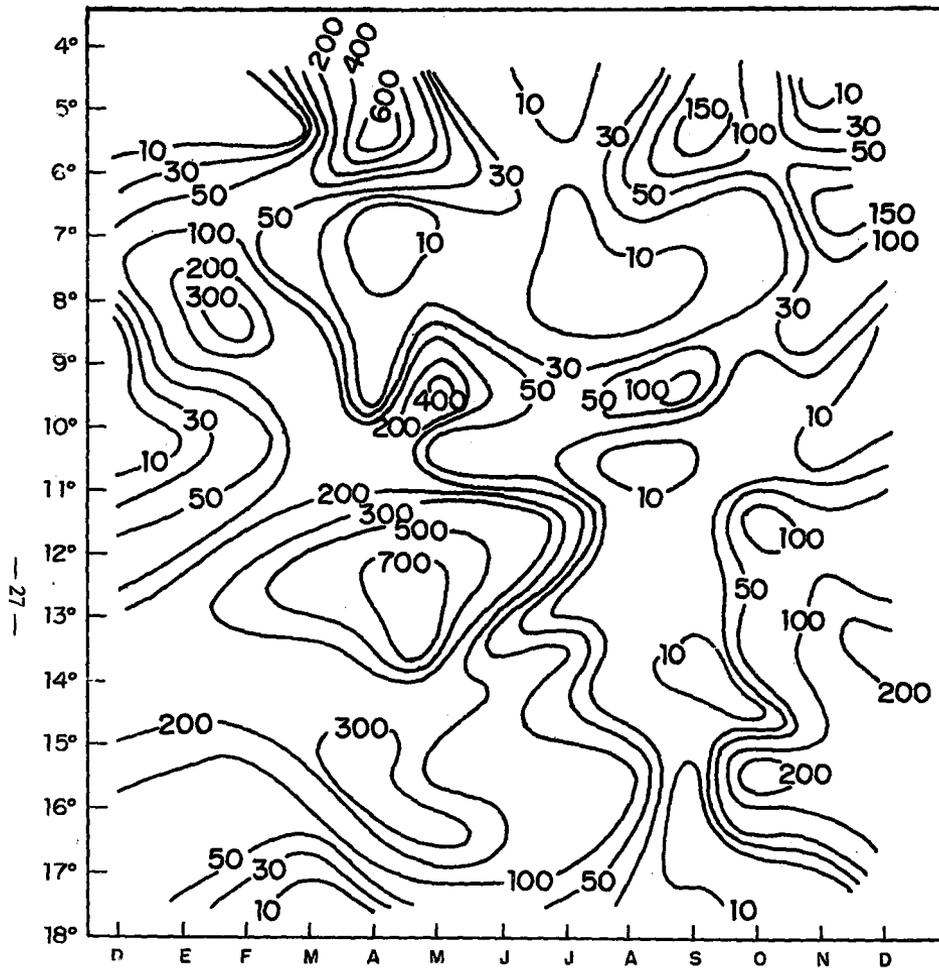


Fig. 16 Variación latitudinal en superficie de la producción primaria en una banda de 60 millas (4°-18° S).

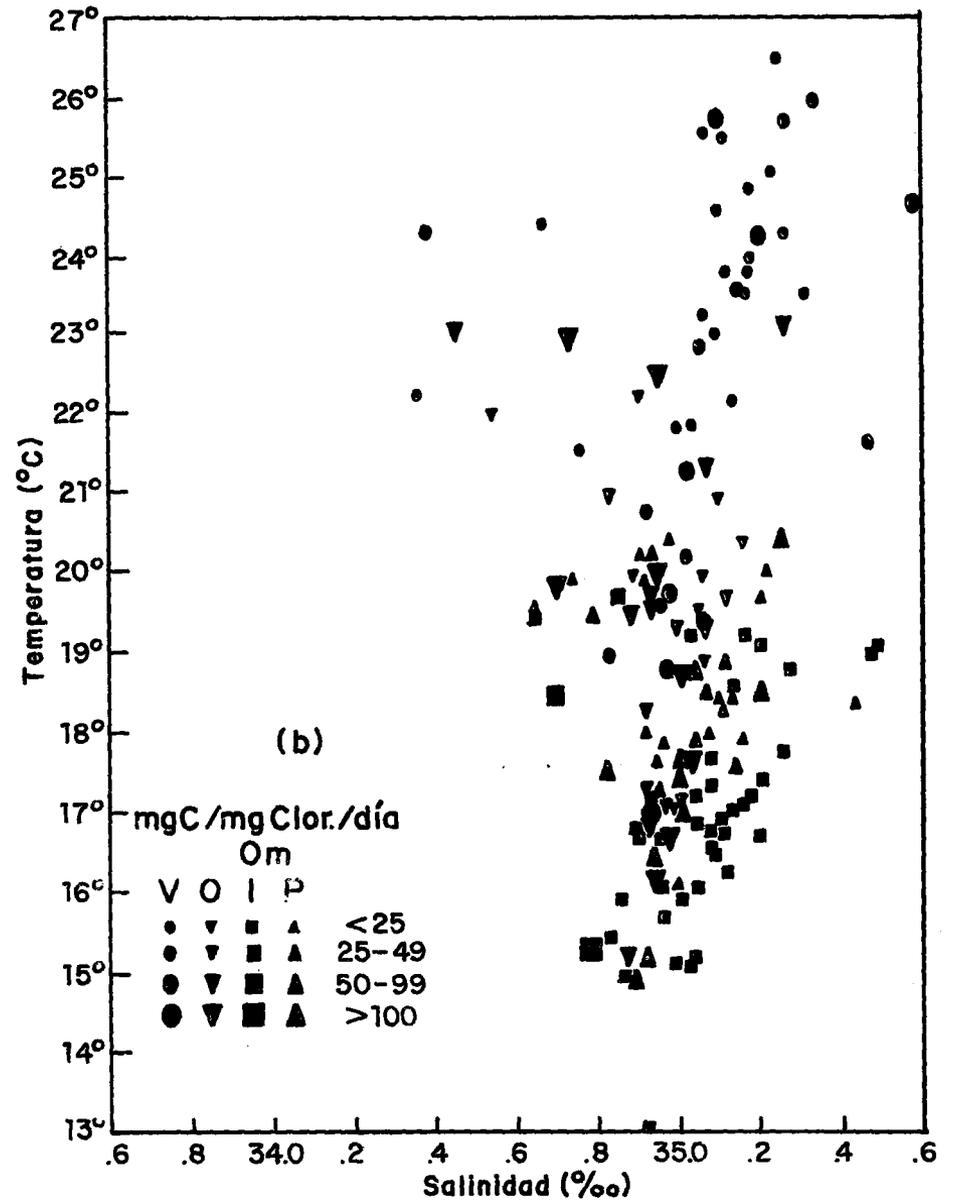


Fig. 17 Índice de productividad en la superficie del mar en relación a la temperatura y salinidad.

Producción primaria (mgC/m³/d)
Pta. Aguja - Huarmey

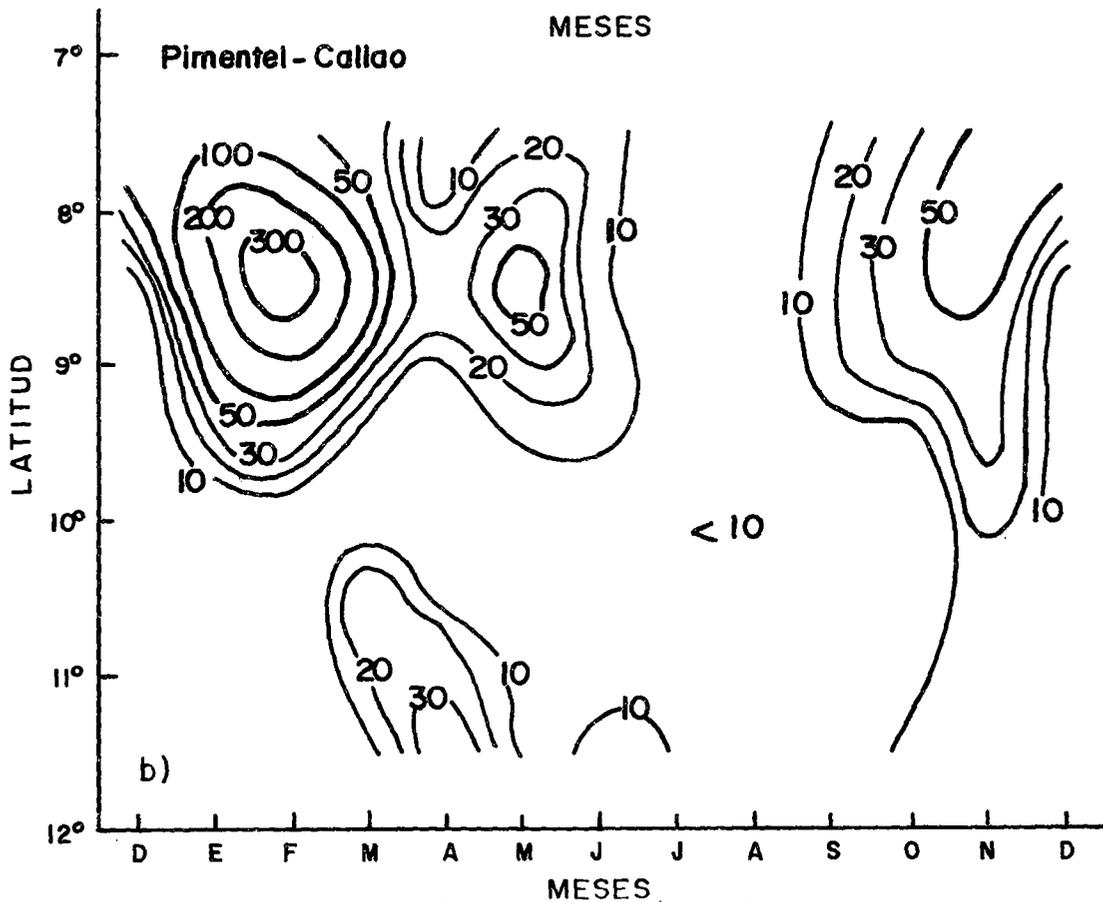
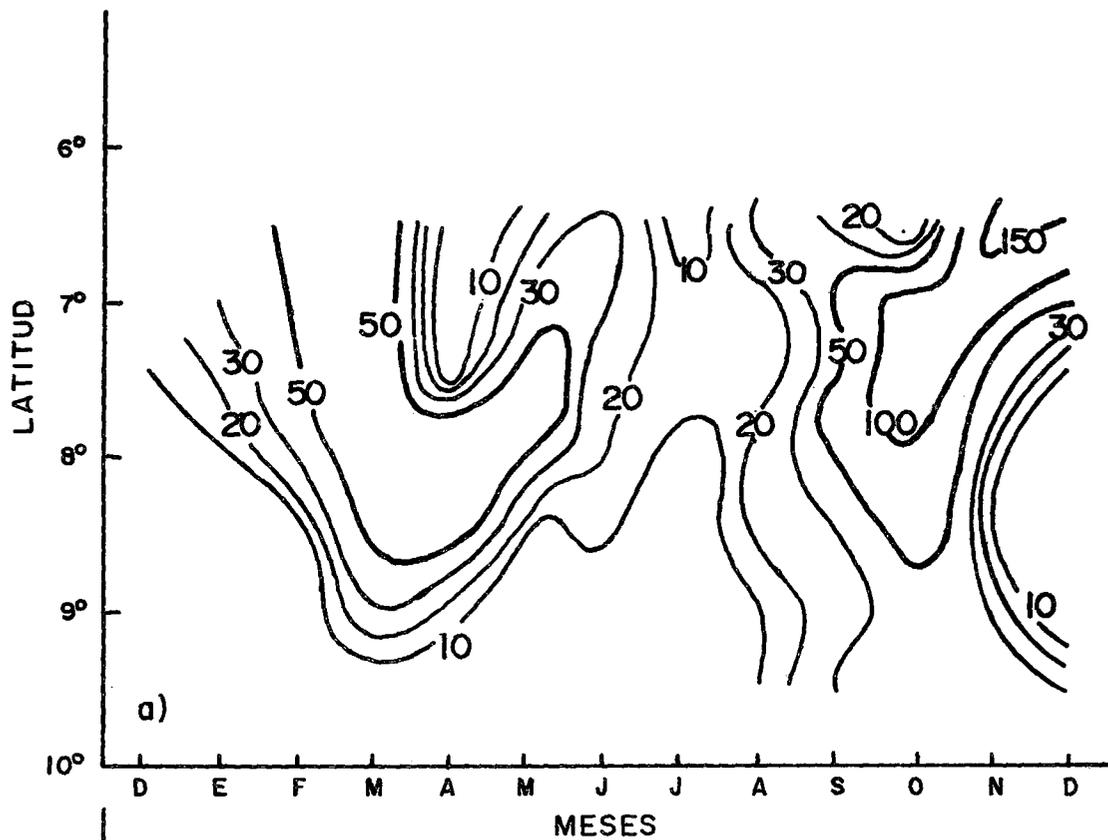


Fig. 18 Variación latitudinal de productividad en la superficie del mar en áreas seleccionadas a) Punta Aguja-Huarmey, b) Pimentel-Callao.

Producción primaria (mgC/m³/d)

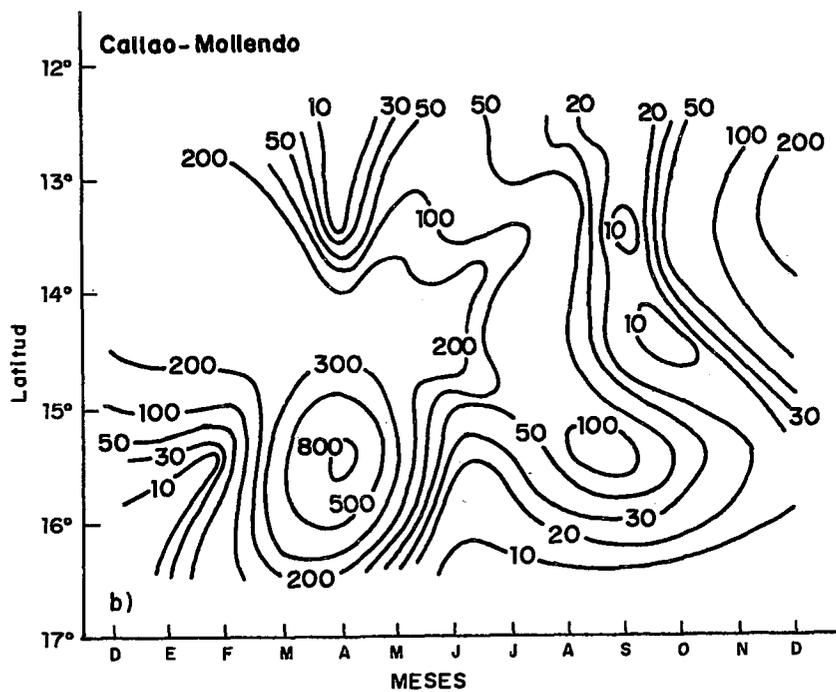
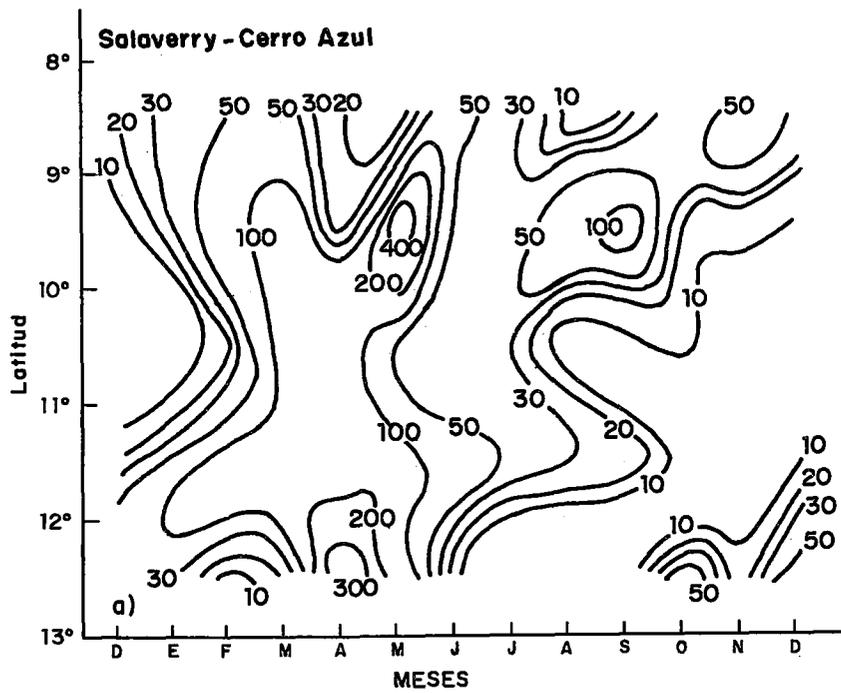


Fig. 19 Variación latitudinal de productividad en la superficie del mar en áreas seleccionadas a) Salaverry-Cerro Azul, b) Callao-Mollendo.

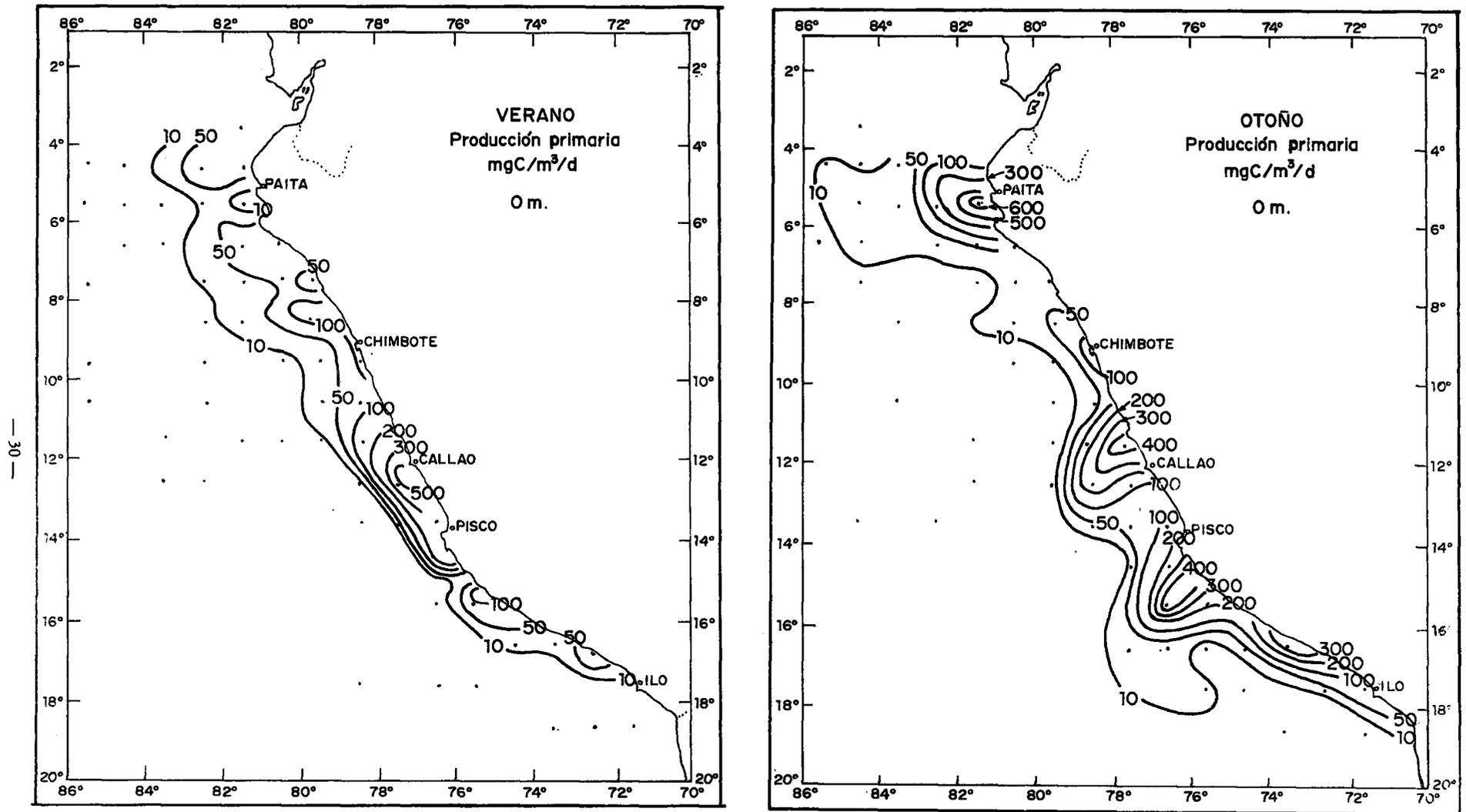


Fig. 20 Distribución estacional de la producción primaria en la superficie del mar a) verano, b) otoño.

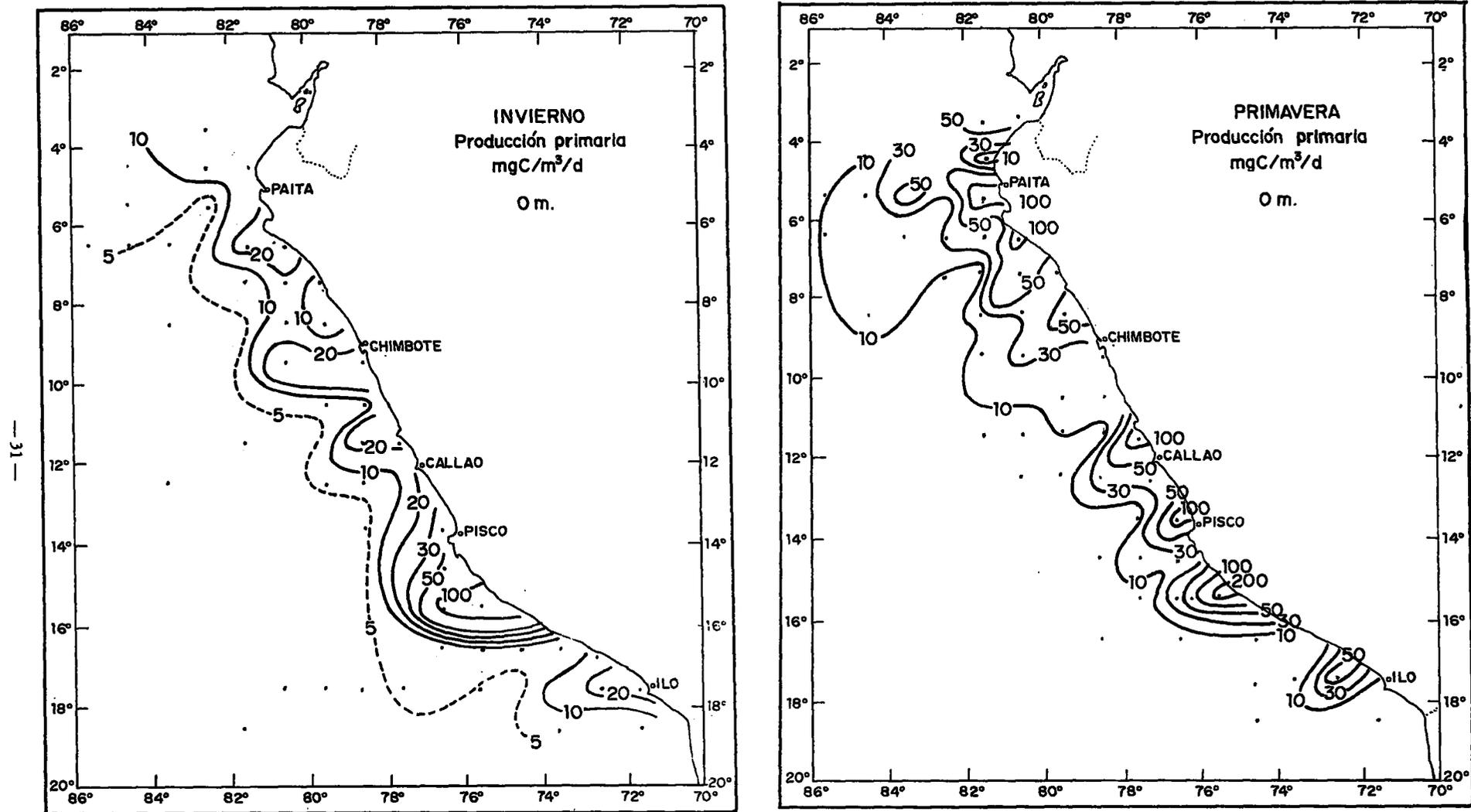


Fig. 21 Distribución estacional de la producción primaria en la superficie del mar a) invierno, b) primavera.

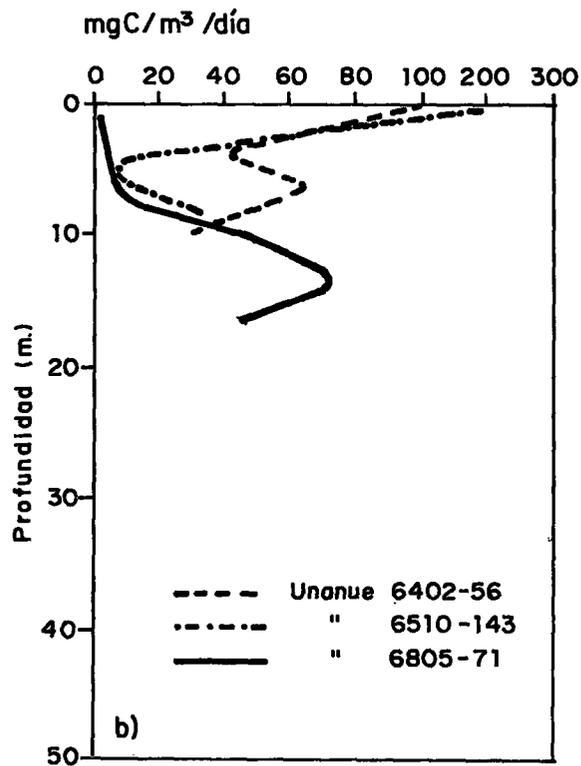
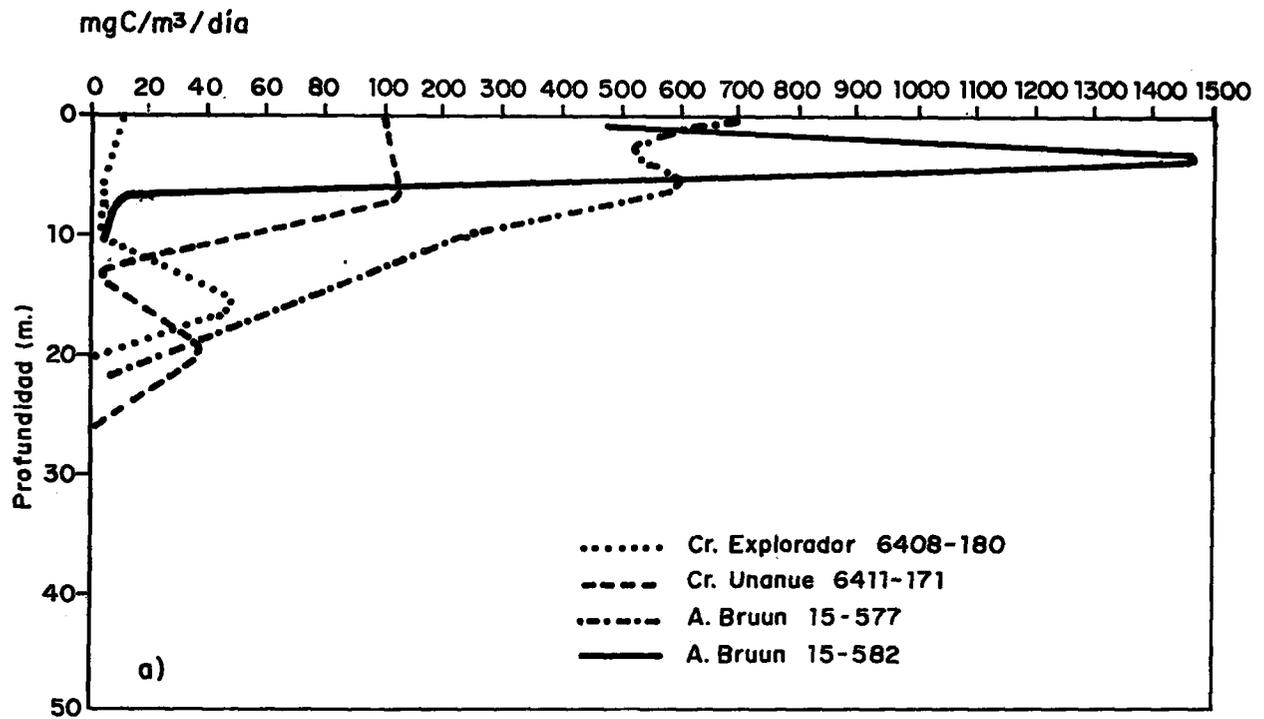


Fig. 22 Variación vertical de la producción primaria, a) Pimentel (7° S) b) Pisco (14° S).

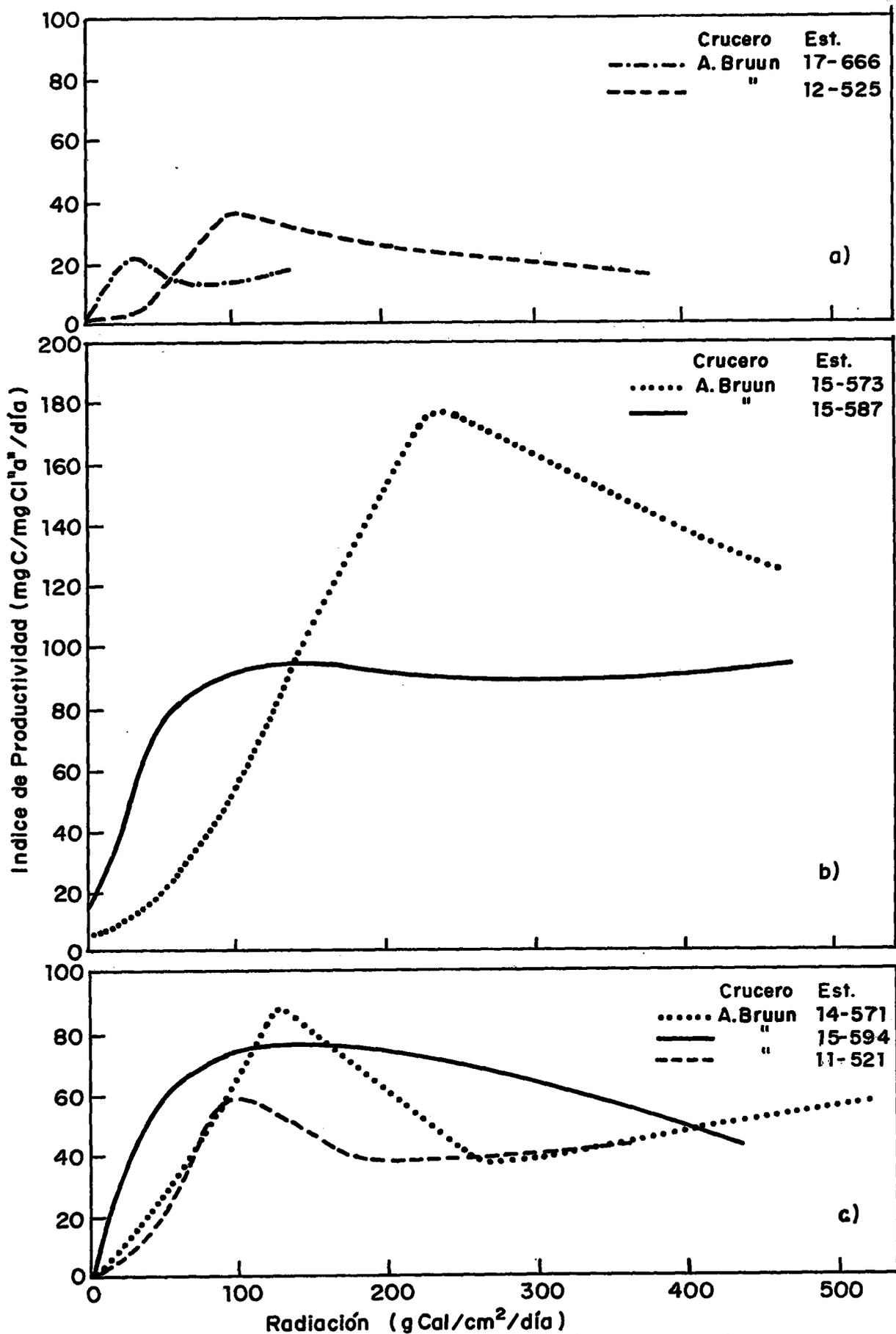


Fig. 23 Relación de índices de productividad y la radiación a) aguas subtropicales superficiales, b) afloramiento, c) aguas de mezcla.

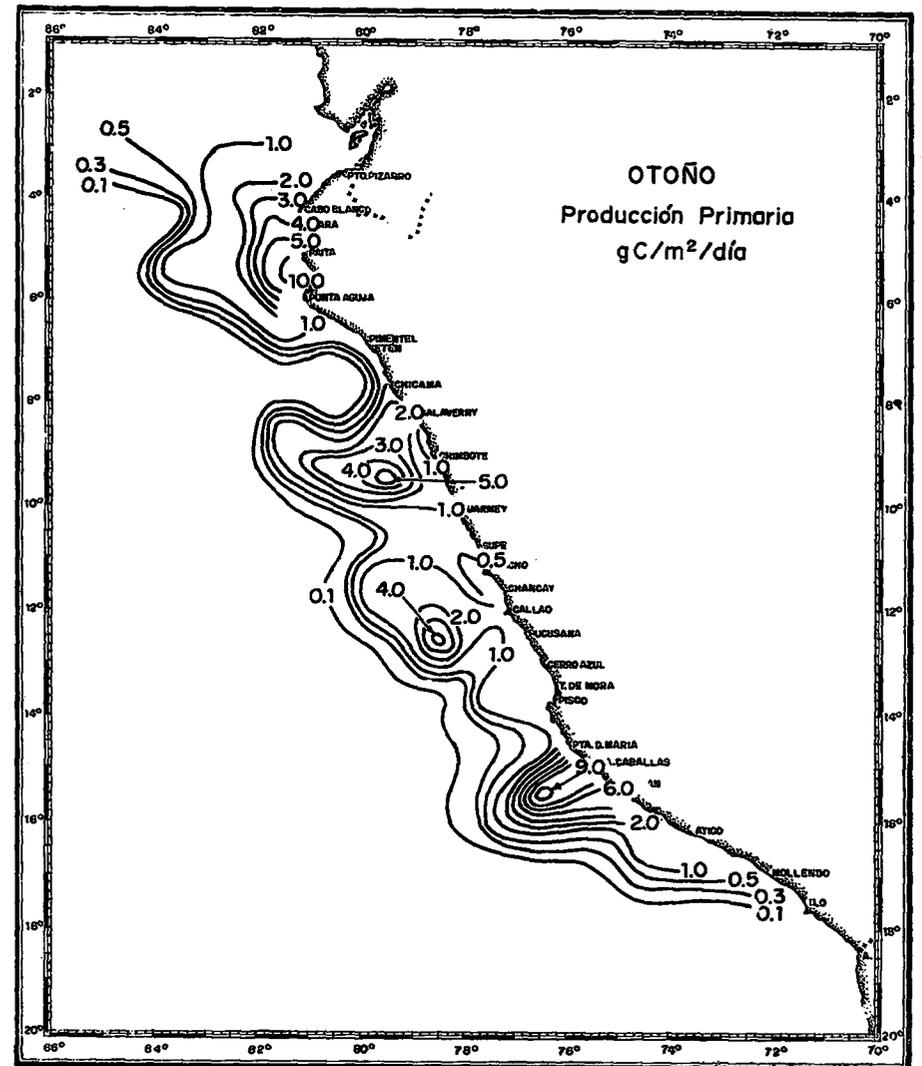
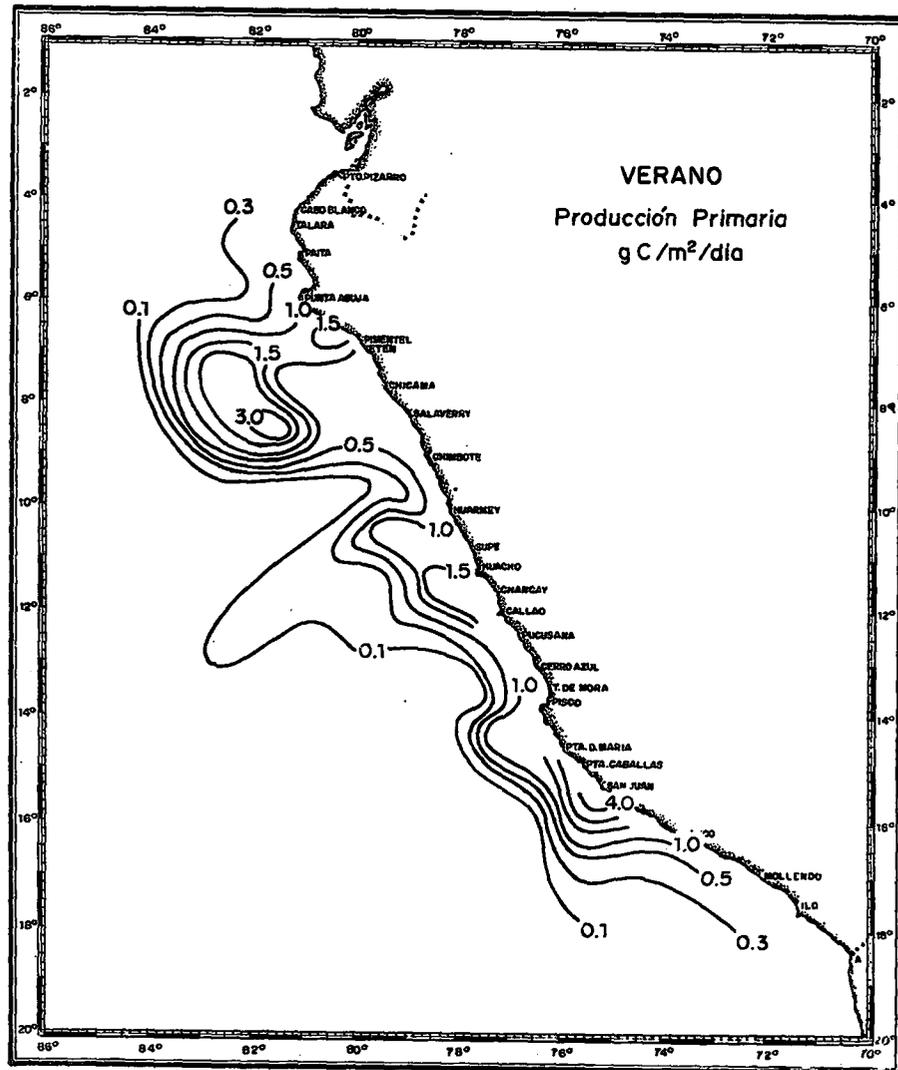


Fig. 24 Distribución estacional de productividad en la zona eufótica a) verano, b) otoño.

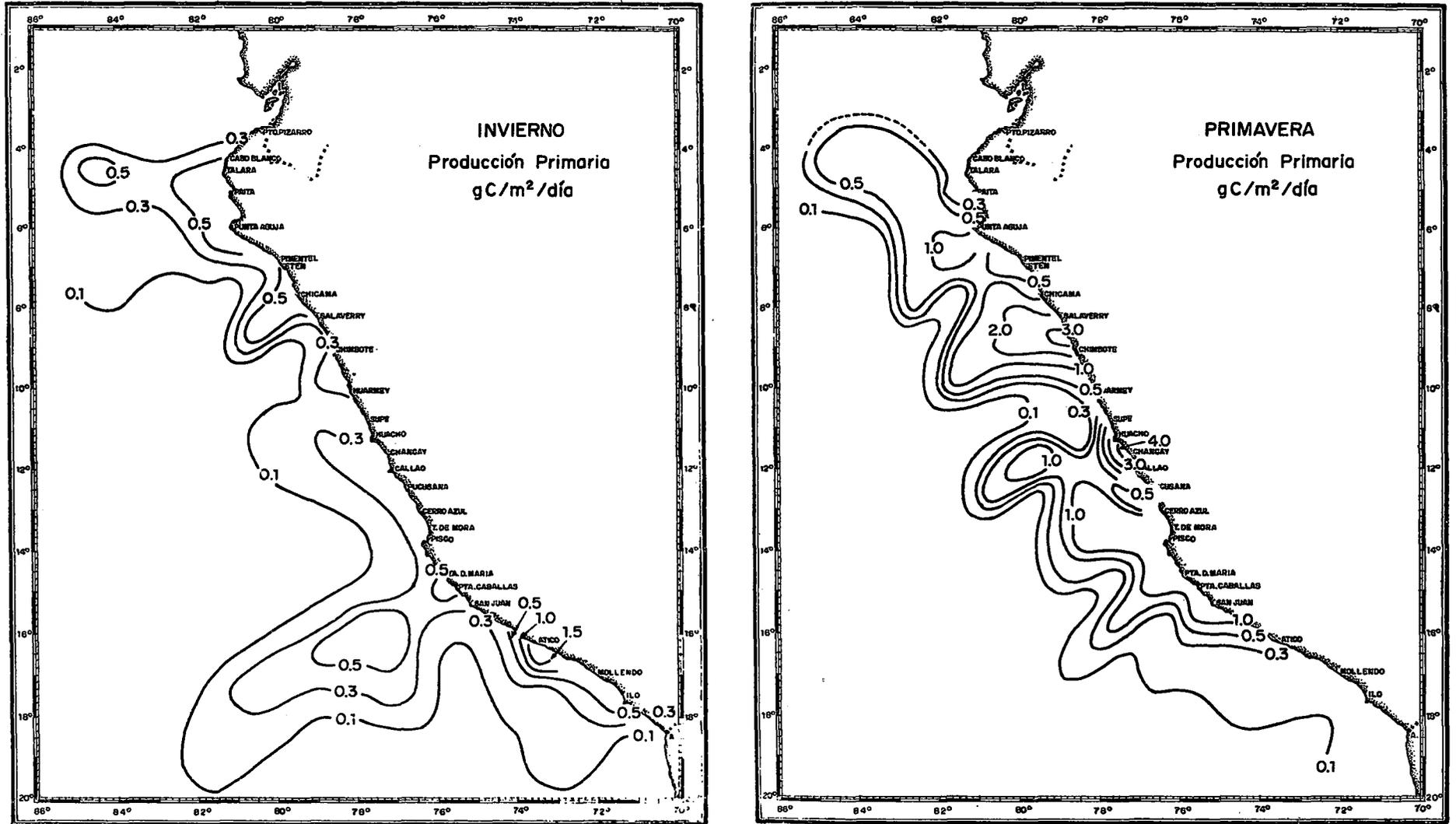


Fig. 25 Distribución estacional de productividad en la zona eufótica a) invierno, b) primavera.

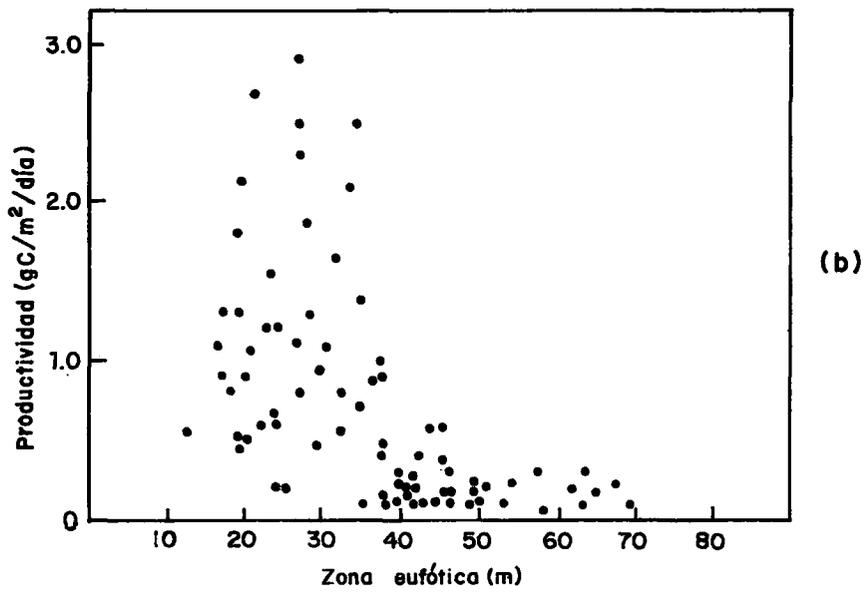
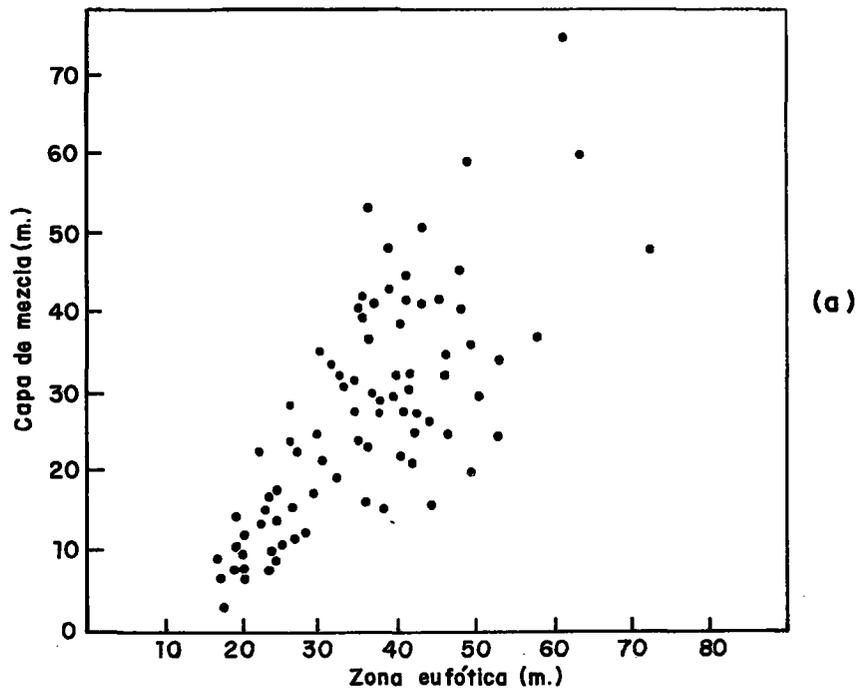


Fig. 26 Relación entre productividad, capa de mezcla y zona eufótica a) profundidad de la capa de mezcla y de la zona eufótica, b) producción total y zona eufótica.

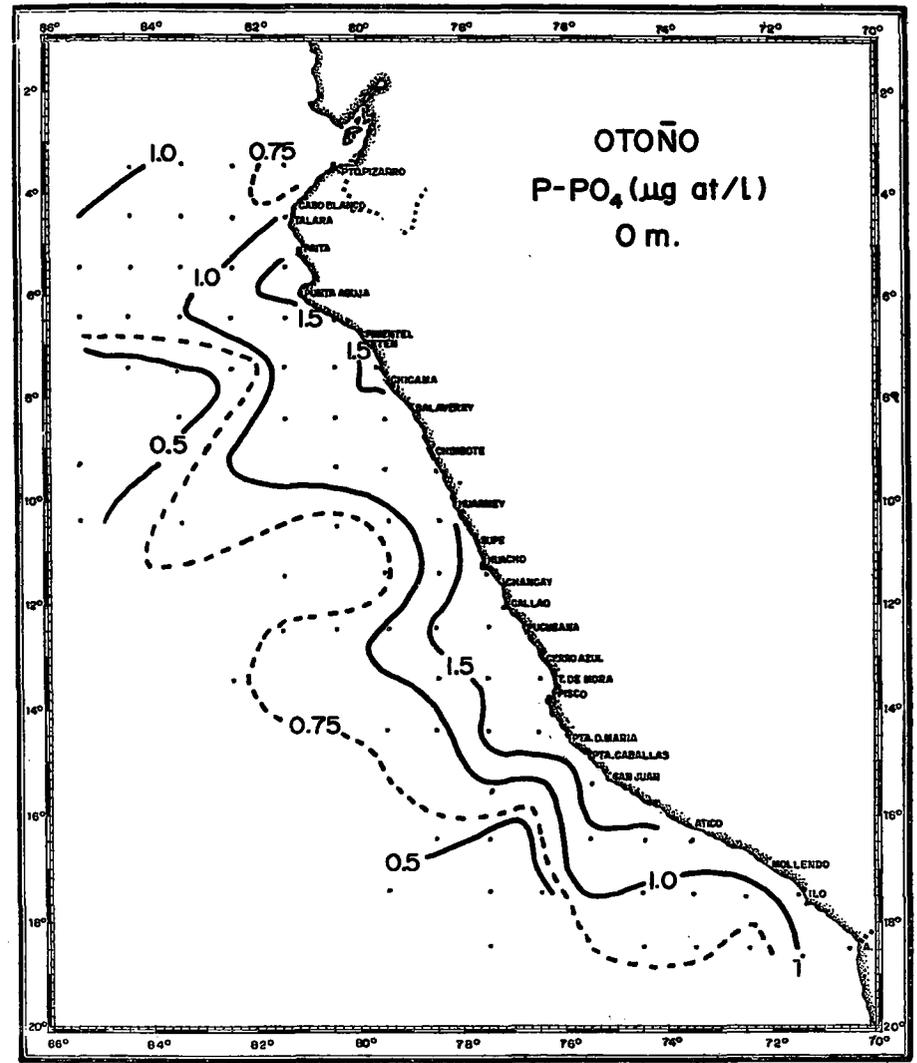
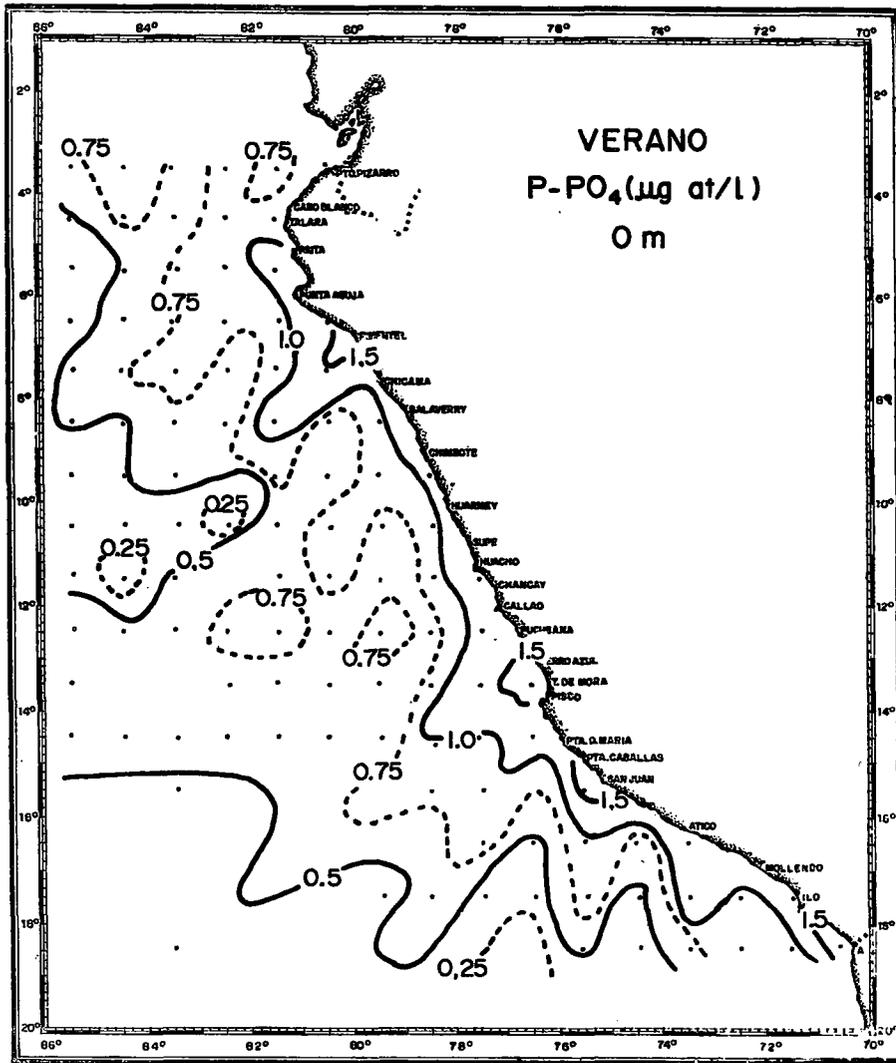


Fig. 27 Distribución estacional de fosfatos en la superficie del mar a) verano, b) otoño.

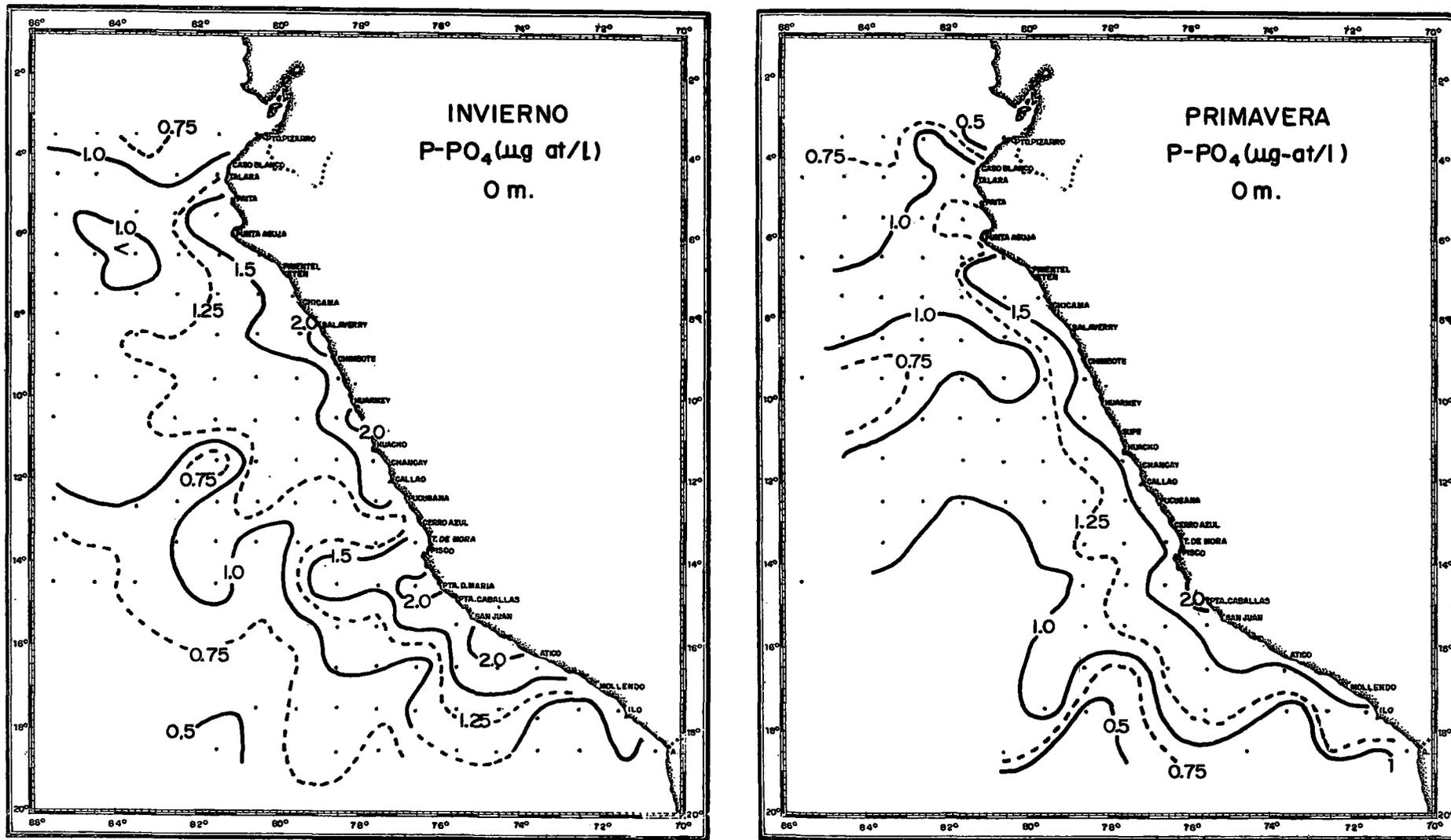


Fig. 28 Distribución estacional de fosfatos en la superficie del mar a) invierno, b) primavera.

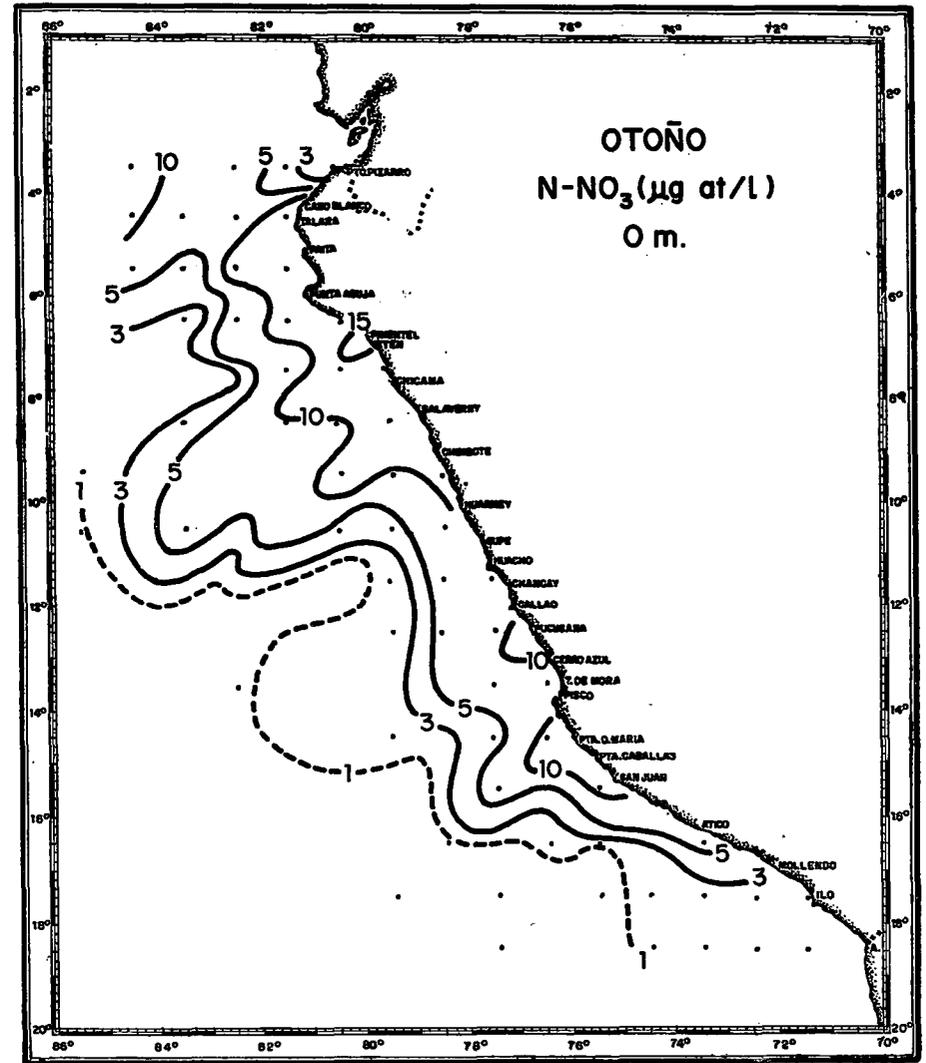
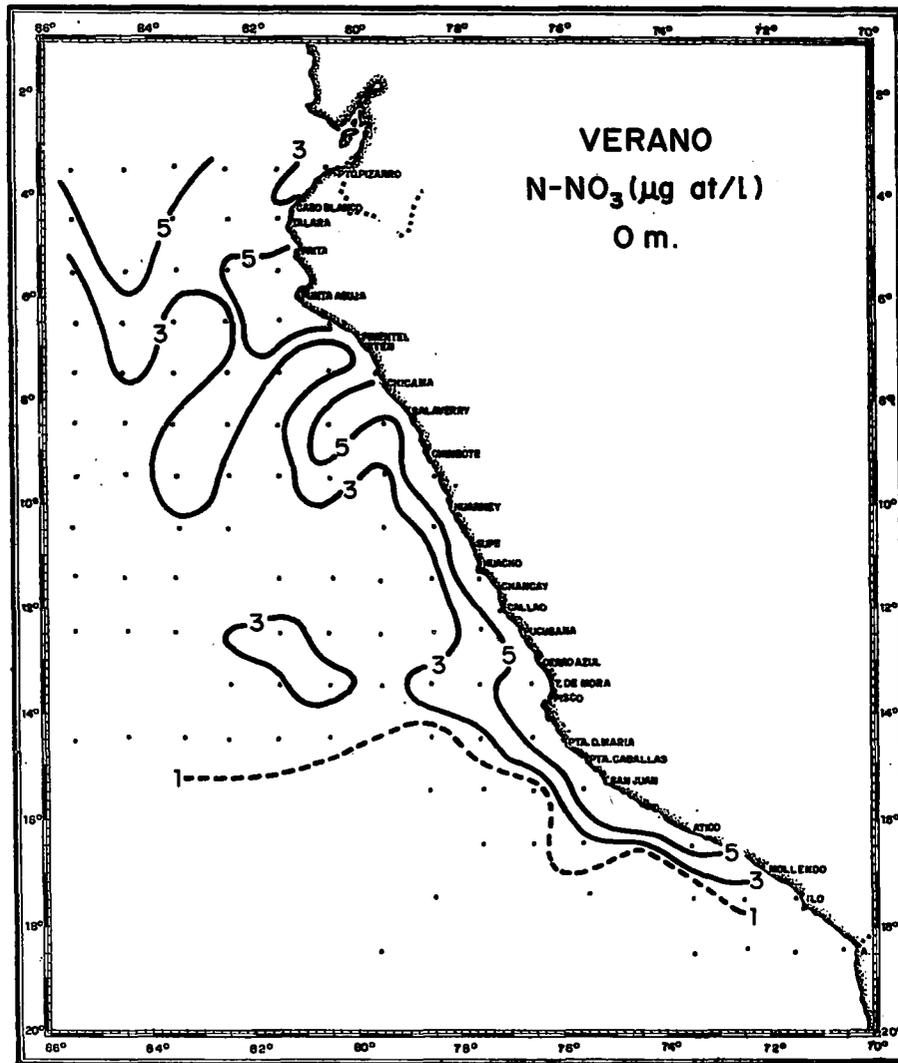


Fig. 29 Distribución estacional de nitrato en la superficie del mar a) verano, b) otoño.

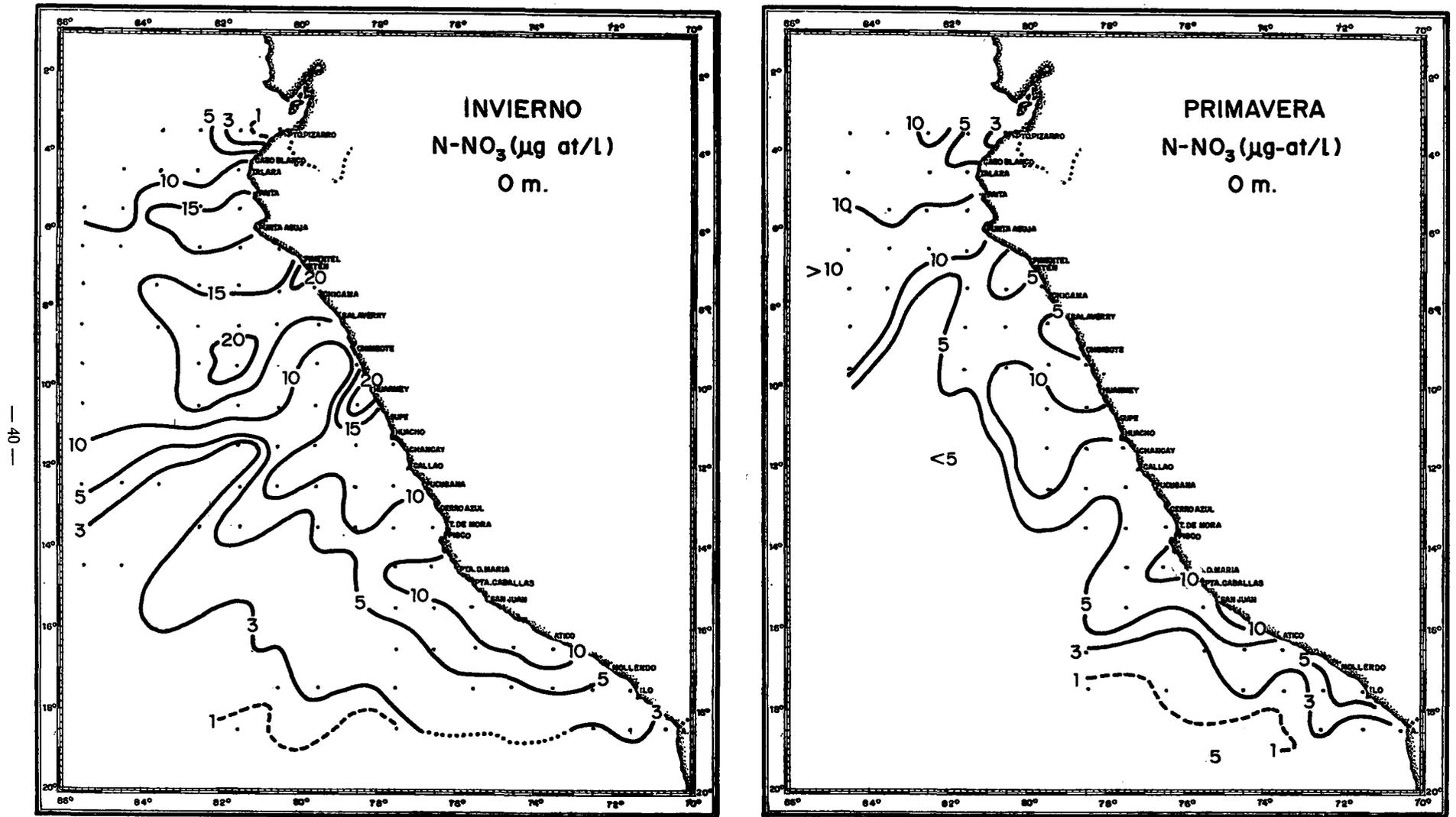


Fig. 30 Distribución estacional de nitrato en la superficie del mar a) invierno, b) primavera.

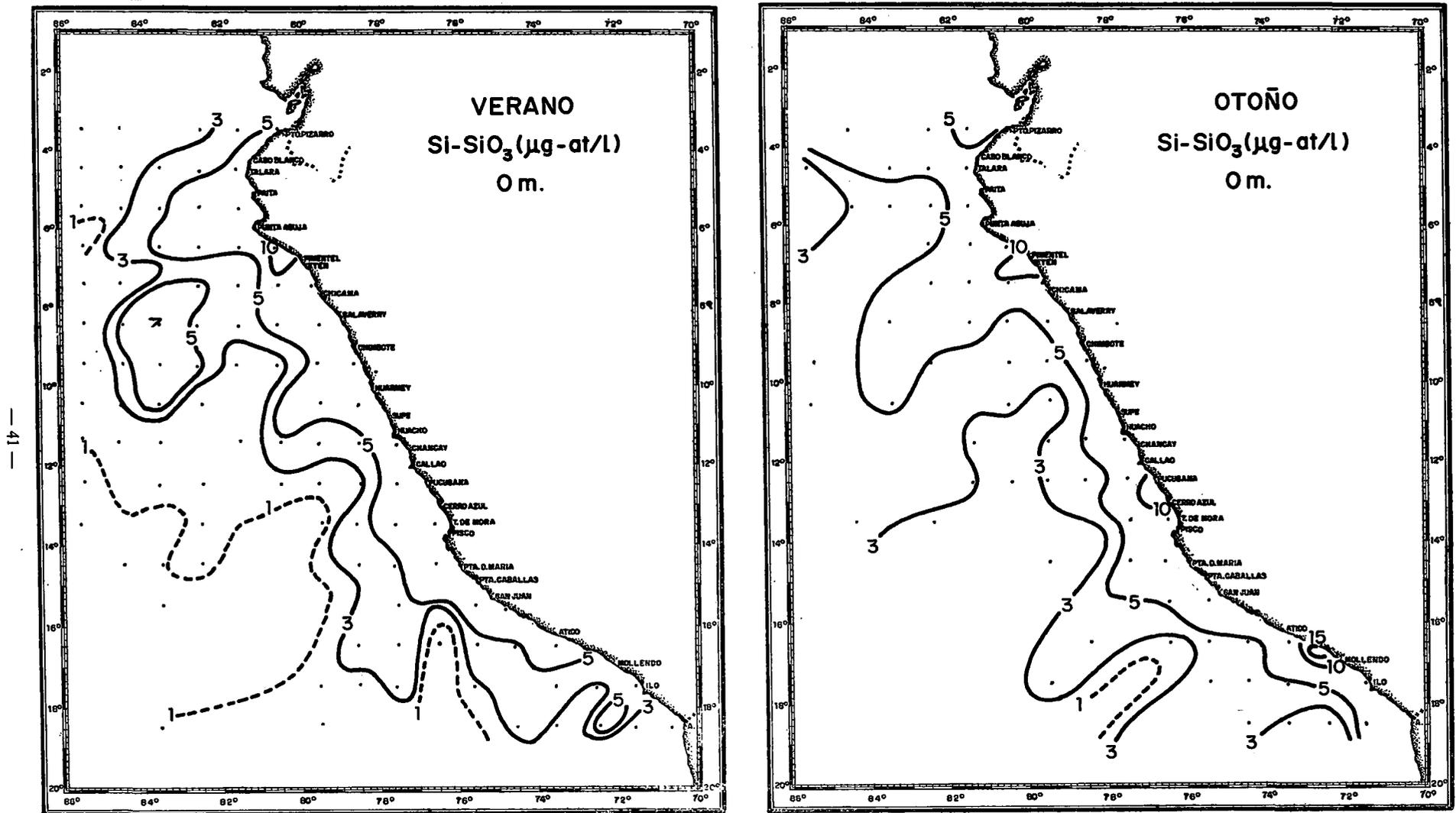


Fig. 31 Distribución estacional de silicatos en la superficie del mar a) verano, b) otoño.

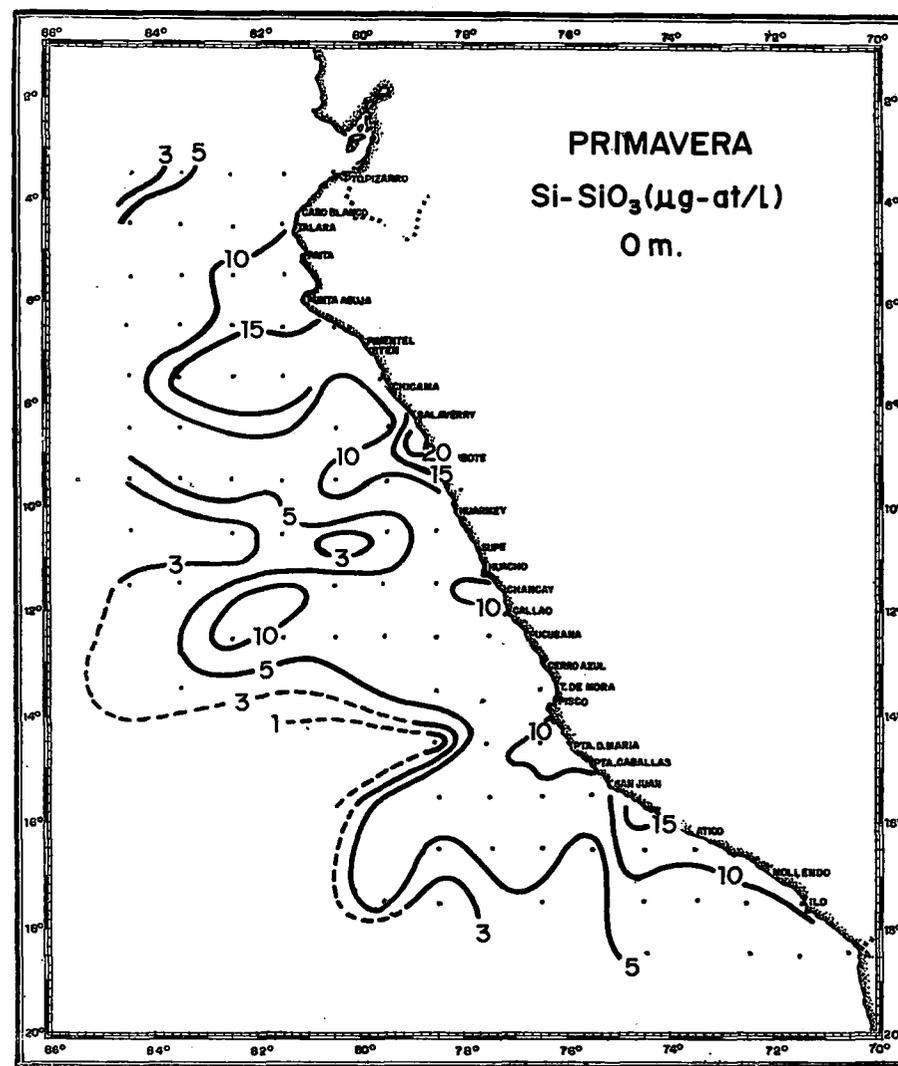
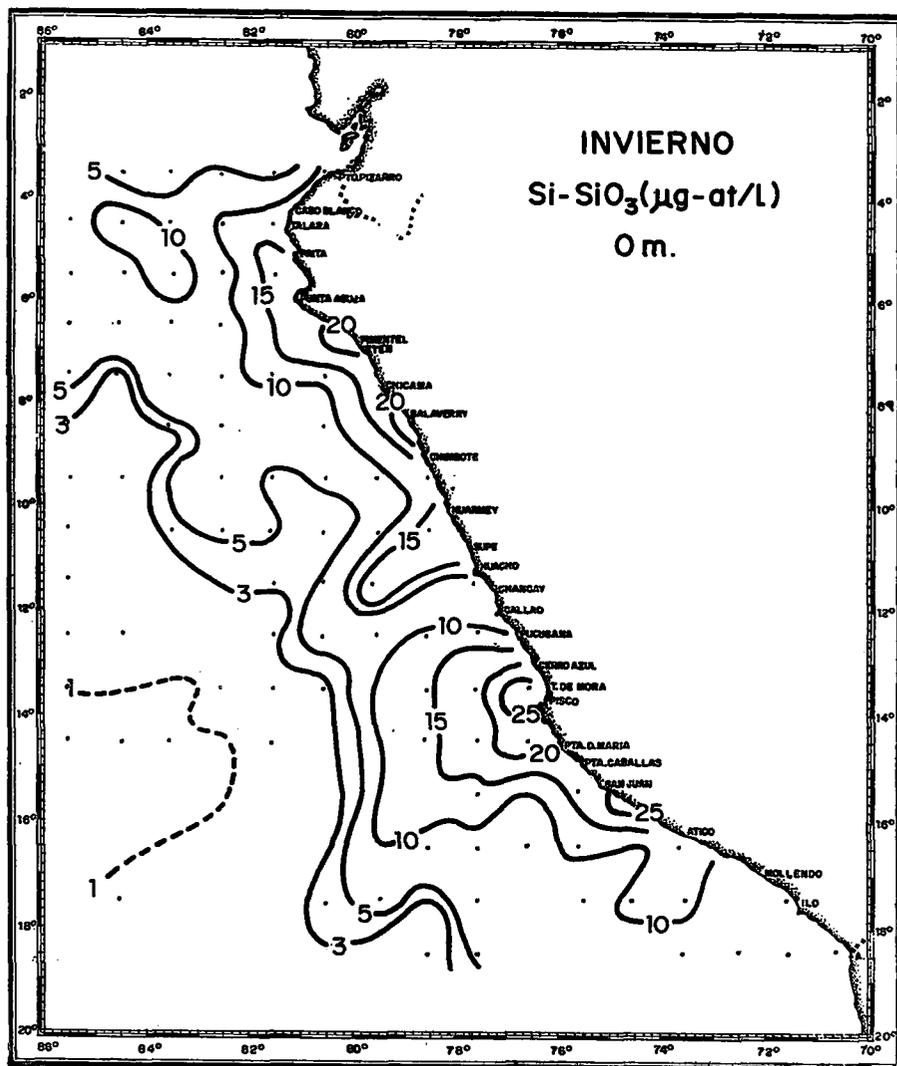


Fig. 32 Distribución estacional de silicatos en la superficie del mar a) invierno, b) primavera.

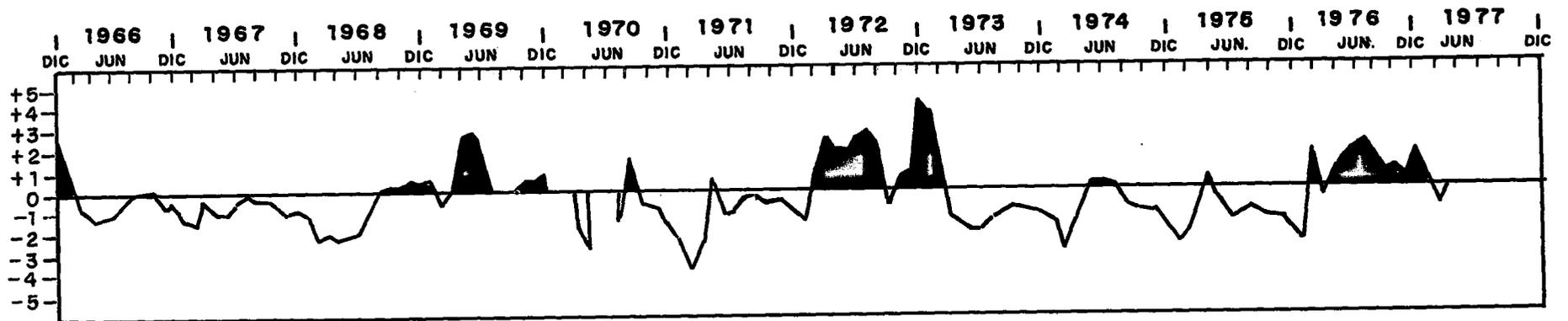
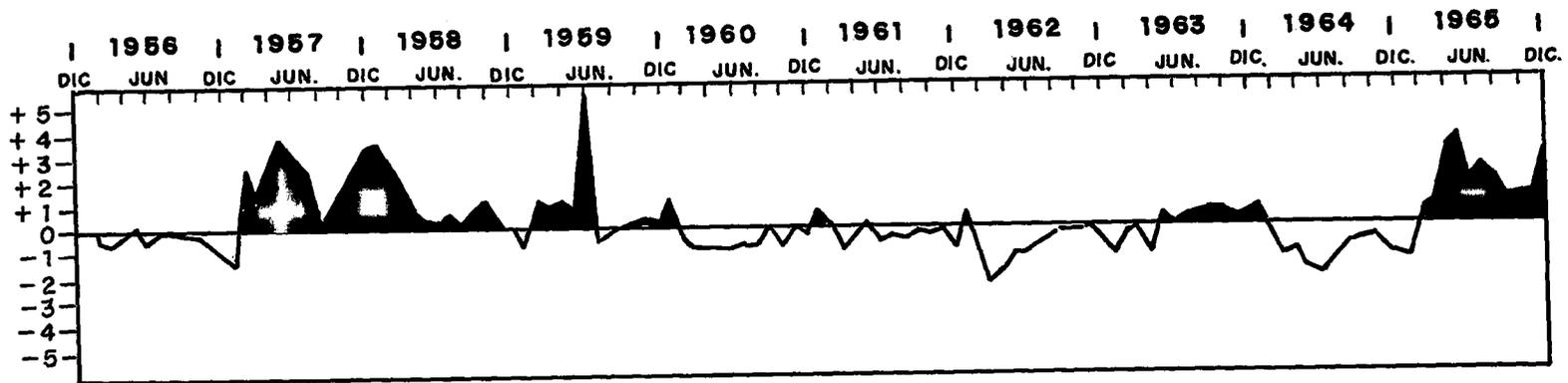


Fig. 33 Variación anual de temperatura en la superficie del mar en una estación fija (07°45S-79°30W).

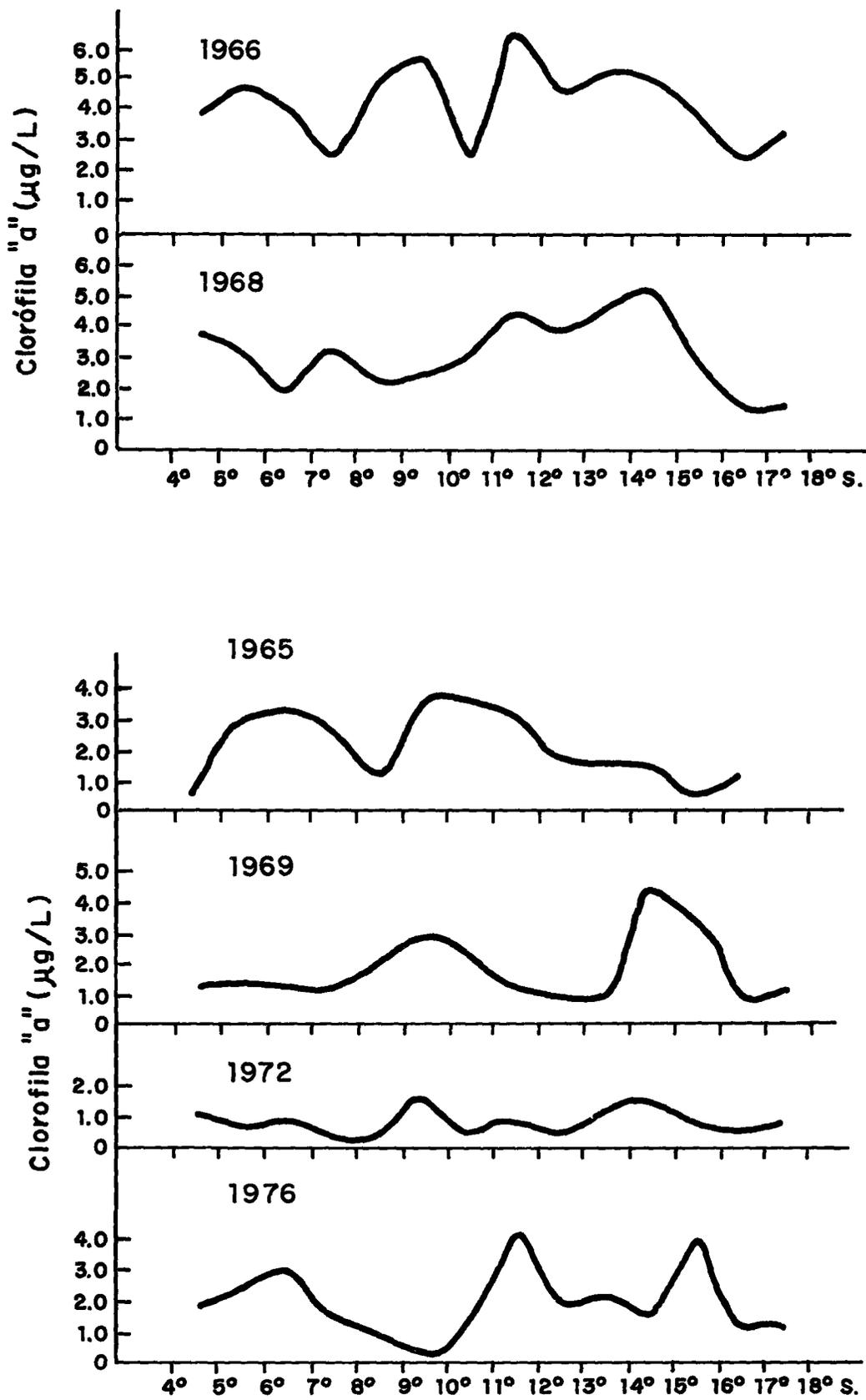


Fig. 34 Variación latitudinal de clorófila en condiciones ambientales promedios (1966) y en años de ocurrencia de "El Niño" (1965-1969-1972 y 1976).