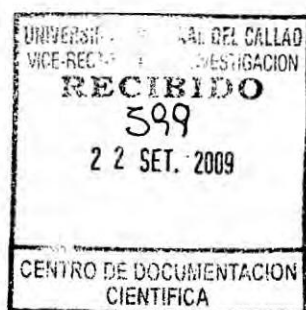




OCT. 2009

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA – ENERGÍA
INSTITUTO DE INVESTIGACION FIME



**“VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DEL FRENTE
DE AFLORAMIENTO Y FILAMENTOS ASOCIADOS Y SU
INFLUENCIA CON EL PROCESO BIOGEOQUIMICO EN
LA ZONA DE CHIMBOTE”**

AUTOR: Dr. JOSE HUGO TEZEN CAMPOS

(01 Octubre del 2007-30 Septiembre del 2009)

Resolución Rectoral N° 1120-07-R (22.10.07)

CALLAO - PERU

INDICE

	PAG
I. RESUMEN	1
II. INTRODUCCIÓN	3
III. MARCO TEORICO	5
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	33
V. RESULTADOS.	114
VI. DISCUSIÓN.	117
VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	120
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	122
BIBLIOGRAFÍA ESPECIALIZADA	123
APÉNDICE.	

I. RESUMEN

La investigación parte de la observación de las imágenes satelitales (temperatura superficial del mar y clorofila) referidas al frente costero de nuestro país, las mismas que revelan la presencia de celdas de afloramiento o frentes térmicos, que hacen un espacio prodigioso no solamente por su ubicación que ostenta sino principalmente por lo que significa para el desarrollo económico y social de nuestra nación. Investigaciones realizadas sobre este tema, en otras realidades (Chile, California, etc), hacen notar que estas zonas son altamente productivas y muestran una riqueza ictiológica importante. En el caso de nuestro país, por las características presentadas en ciertas zonas del mar de Grau, hace que las mismas se presenten como las más productivas del océano mundial con especies marinas que no existen en otras zonas. Esa fuerte abundancia de recursos ictiológicos se debe principalmente a las condiciones ambientales favorables (viento, temperatura superficial del mar, sistema de corrientes marinas) que han permitido desarrollar ecosistemas que favorecen la productividad de nutrientes en nuestro litoral. El propósito de la presente investigación fue determinar la variabilidad espacial y temporal de las características del frente de afloramiento y de los filamentos asociados y su influencia con el proceso biogeoquímico en la zona de Chimbote.

Palabras clave: Afloramiento, clorofila, imágenes satelitales, temperatura superficial del mar.



ABSTRACT

The present investigation, leaves from the observation of the satellite images (skin temperature of the sea, chlorophyll) referred the coastal front of our country, the same ones that reveal the presence of cells of outcrop, which they not only make a prodigious space by his geopolitical location that shows but mainly reason why it means for the economic and social development of our nation. Studies made on this subject to make notice that these highly productive zones show a unique etiological wealth in the world that does of the most productive coasts of the Peru of the world-wide ocean. That strong abundance of resources must to the favorable environmental conditions mainly (wind, skin temperature of the sea, system of sea currents) that have allowed to developing ecosystems that favor the productivity of nutrients in our coast. It is intention of the present study to determine the space and temporary variability of the characteristics of the front of upwelling and filaments associated in the zone of Chimbote.

Key word: Upwelling, chlorophyll, satellite images, skin temperature of the sea.

GIS

II. INTRODUCCION

En la zona costera del Perú, sobrepuesto a las celdas de afloramiento y al sistema de corrientes de grande escala, la actividad de meso y submesoescala (frentes, meandros, remolinos, filamentos) presente a lo largo de nuestra costa peruana, permite un intercambio eficiente de masa y nutrientes entre la zona costera y el océano abierto. En esta variabilidad se observan ciertas particularidades prominentes en la zona de Chimbote, entre las que destacan la presencia de filamentos que se visualizan nítidamente en las imágenes satelitales de temperatura superficial del mar y clorofila. Se sospecha que estos filamentos están asociados a diferentes procesos biogeoquímicos de producción primaria convirtiéndose entonces de primera importancia para el manejo ictiológico y pesquero en el Perú.

Las aguas que se encuentran a lo largo de la costa del Perú son aguas frías. El proceso principal que explica la baja temperatura es el afloramiento debido al régimen de viento.

Las más antiguas explicaciones del fenómeno recurren a la teoría de una corriente de origen polar, teoría adelantada en 1811 por Humboldt, el primer científico que midió la temperatura del agua. Poco tiempo después, en 1837, Bougainville hizo notar que la corriente fría debería calentarse en el curso de un recorrido tan largo. Sin embargo, la solución de que el agua fría procediese del afloramiento no fue planteada hasta 1844 por De Tessan.



Un argumento sencillo a favor de la influencia principal del afloramiento sobre el enfriamiento del agua, lo obtiene al examinar la distribución de las temperaturas en la superficie. Ya Humboldt descubrió que las temperaturas en las corrientes del Perú aumentaban a medida que ésta se alejaba de la costa.

En este sentido, en la investigación se plantea como **problema general** de investigación el siguiente:

¿Es posible determinar la variabilidad espacial y temporal del frente de afloramiento y de los filamentos asociados a través de información satelital de temperatura superficial del mar (TSM) y de Clorofila (Chl-A), y su influencia con el proceso biogeoquímico, en la zona de Chimbote?

Interrogante que motivó la siguiente **hipótesis de trabajo**:

La variabilidad espacial y temporal del frente de afloramiento y de los filamentos asociados se determina a través de información satelital de temperatura superficial del mar (TSM) y de Clorifila (Chl-A), y permite conocer su influencia con el proceso biogeoquímico, en la zona de Chimbote.

El objetivo principal es:

Determinar la variabilidad espacial y temporal del frente de afloramiento y de los filamentos asociados a través de información satelital de temperatura superficial del mar (TSM) y de Clorifila (Chl-A), y conocer su influencia con el proceso biogeoquímico, en la zona de Chimbote.

GIS

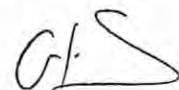
III. MARCO TEORICO

3.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION.

En la revisión y análisis de las fuentes relacionadas a la variabilidad espacial y temporal de los frentes de afloramiento y filamentos asociados, destacaron por su asociatividad con el tema de interés las siguientes:

El conocimiento de la distribución espacio-temporal del campo de temperatura de la superficie del mar (TSM) en toda la Tierra es de significativa importancia para la comunidad científica. Esta información es particularmente útil en la localización de frentes térmicos, las corrientes de los océanos, y el intercambio de energía térmica entre el océano y la atmósfera ¹.

En la investigación realizada en el área de Chile Central, frente a la costa de Concepción (Chile), en enero 1985, analizaron 28 imágenes satelitales secuenciales de temperatura superficial del mar (TSM). Los centros de surgencia observados se localizaron en torno a puntos de la línea costera (punta Lavapié, Lebu y Tirúa; y con menor intensidad en Arauco, punta Hualpén, fondo de saco de la bahía de Concepción, punta Lobería y punta Negume). Se plantea la propuesta de subdividir el área de surgencia de acuerdo a la posición de los frentes, la batimetría del área y a las diferentes distribuciones de las aguas afloradas².



En otro estudio comparativo de la variabilidad de fitoplancton entre Perú y California se analizaron imágenes satelitales a nivel estacional e interanual de la variabilidad de las concentraciones de pigmentación del fitoplancton en sistemas similares³.

En base de imágenes Infra Rojas basadas en los satélites y de datos oceanográficos se investigaron sistemas de filamentos en las regiones de afloramiento africanas del noroeste y del sudoeste. En la distribución espacial de filamentos analizada se encontró que la variabilidad estacional de los filamentos depende de la intensidad del afloramiento a lo largo de la costa durante el año. Fue demostrado que los filamentos de afloramiento desempeñan un papel importante en intercambio del agua entre la zona costera y el océano abierto⁴.

La variabilidad espacial y temporal del frente subpolar (SPF) en el mar de Japón, se basó en los mapas semi mensuales del gradiente de temperatura superficial del mar (TSM) en el período 1990-1995. Los análisis demostraron que el SPF experimenta estructuras estacionales distintas, así como variaciones fuertes, año tras año, en términos de fuerza frontal y posición. La variabilidad de alta frecuencia del SPF se atribuye principalmente a los remolinos de mesoescala en la región frontal. La orientación del SPF no es zonal a lo largo de 40° N sino con tendencias del sudoeste al noreste durante el invierno, y del noroeste al sureste en verano. Esas orientaciones son principalmente explicadas por el régimen del viento⁵.

El conocimiento de vórtices coherentes en el Pacífico sureste a lo largo de las costas peruanas, y hechos sobre la frecuencia de ocurrencia, longevidad y estructura típica de los remolinos de mesoescala, con un censo objetivo de vórtices observados, se estudiaron con casi 15 años de medidas altimétricas basadas en los satélites relativamente de alta resolución, presentándose una nueva metodología para la identificación de los remolinos. Luego, se investigó las características principales de los vórtices de Perú usando más de 20000 remolinos del mesoescala identificados con el nuevo método. Los vórtices detectados tienen en promedio un radio de 80 kilómetros, formados cerca de la costa y luego se propagan mar adentro. No observaron diferencia significativa entre los remolinos ciclónicos y anticiclónicos, a excepción de los remolinos duraderos que sobreviven por lo menos 6 meses. Finalmente, un estudio de las variaciones temporales de las características del remolino se realiza en las escalas estacional e interanual en la región "costera" favorable a la formación de las estructuras energéticas de mesoescala. Estas variaciones temporales se asocian probablemente a la intensificación del frente térmico de afloramiento que genera inestabilidades baroclinicas⁶.

3.2 BASES TEORICAS

ASPECTOS DINAMICOS DEL AFLORAMIENTO

Las consideraciones hechas sobre el afloramiento lo ligan al sistema de vientos que actúa sobre la superficie en la que se aprecian los efectos del movimiento vertical.



Esta relación, sin embargo, puede ir acompañada de otras circunstancias que influyen asimismo en el afloramiento; especialmente la distribución de vientos sobre un área más extensa que la de los vientos locales actuantes sobre el área de afloramiento; en particular, las condiciones en latitudes bajas (inferiores a los 20° de latitud) correspondientes a la costa peruana son afectadas por las que existen cerca del Ecuador, cuya influencia se extiende sobre todo el océano oriental tropical (Yoshida, 1967).

Las conclusiones extraídas por Yoshida de su modelo teórico son consecuencias de un modelo idealizado, por simplificado, de la naturaleza; sin embargo concuerda con muchos resultados de las observaciones como es la explicación de la concentración del afloramiento costero y del afloramiento ecuatorial en fajas muy estrechas y su relación con corrientes submarinas (como la corriente submarina Perú – Chile y la Corriente de Cromwell).

Las conclusiones refieren a factores que producen la formación de afloramiento además de los vientos locales, e incluso en ausencia de estos, son la distribución en gran escala de la acción tangencial del viento sobre la superficie del mar, los efectos termohalinos que alteran la distribución de la densidad en la superficie (un ejemplo sería la intensificación del contraste de densidades, en ausencia de vientos intensos, que parece efectiva para desatar el fenómeno El Niño). La topografía costera y la presencia de ondas internas de muy baja frecuencia, que viajan a lo largo de la costa, transmitiendo la energía del afloramiento de un lugar a otro (figura 1).

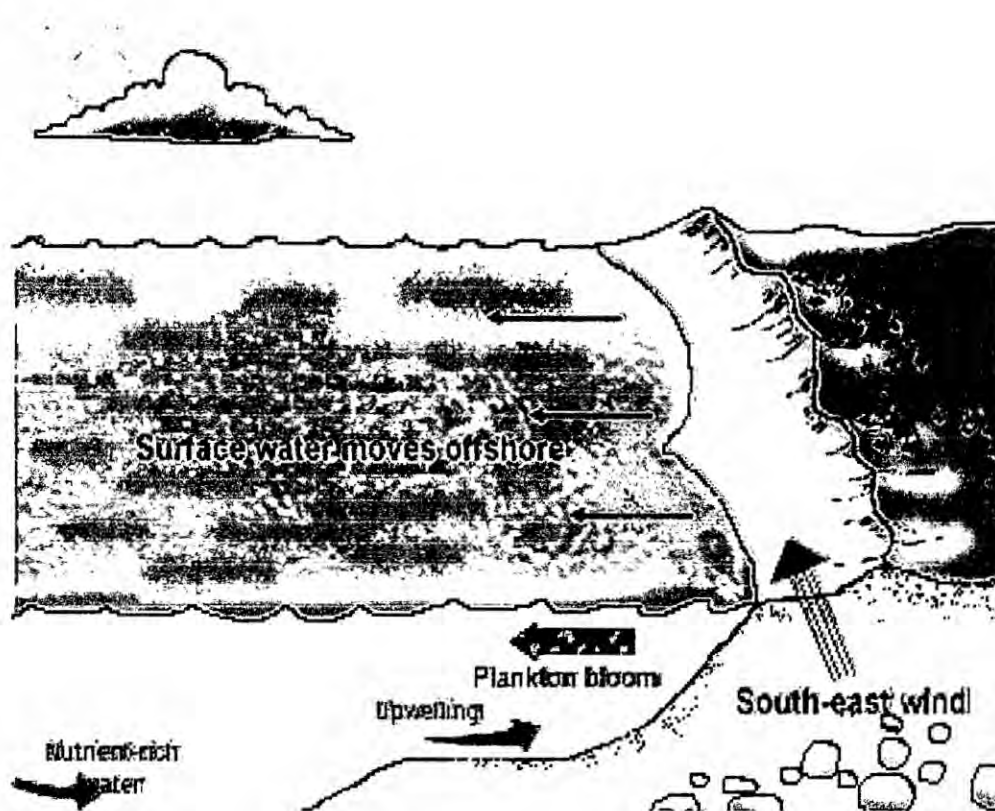


Figura 1. Dinámica del afloramiento debido al régimen de vientos

RELACION ENTRE AFLORAMIENTO Y PRODUCTIVIDAD DE LA VIDA MARINA

No es fácil precisar una correlación numérica entre el afloramiento y la productividad en un área marina determinada. Sin embargo, junto con esta cierta indeterminación en los valores cuantitativos, no existe duda acerca de la influencia del afloramiento para aumentar la productividad de una región marina. En principio, se entiende que los vegetales, requiriendo nitratos y fosfatos para su desenvolvimiento, deben consumir estas sales nutrientes de la capa superficial, donde se harán

Q.S.

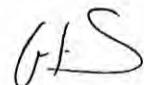
relativamente escasas, si no hay un proceso de renovación. El afloramiento lleva a la capa superficial aguas más ricas en sales minerales consumidas en la capa superficial y, por tanto, es una ayuda para que la fotosíntesis pueda continuar.

Es notable, en el Océano Pacífico, la vinculación del área de afloramiento frente a la costa peruana con el afloramiento presente justamente a lo largo del ecuador geográfico. El área de afloramiento peruano tiene una longitud media de unas 850 millas y una anchura de aproximadamente 30 millas, totalizando un área aproximada de 25 250 millas cuadradas [Zuta y Guillén, 1970]¹.

También está asociado a la productividad de la vida marina el color del agua de mar, esta incluye todos los colores que surgen de las propiedades ópticas del agua de mar y de las sustancias disueltas y suspendidas en ella. El color puede variar en una ancha gama y puede asumir cualquier matiz desde un amarillo verdoso hasta un azul oscuro. El color se puede determinar por comparación de colores estándar (Escala Forel – Ule) o por espectrofotometría.

La mayor parte de la superficie del mar es azul, particularmente las regiones dentro de los trópicos y subtropicos. El color verde es predominante en áreas costeras y mares poco profundos. Generalmente en áreas de afloramiento el color es verdoso o verde petróleo.

Hay varias teorías para explicar el color del mar. Entre ellas se tiene la teoría de absorción (Bunsen), la teoría de la difracción (Sonet), la teoría de la



dispersión molecular y absorción selectiva (Ramanathan), la teoría de la solución (Wittstein y Spring), la teoría del color y curva espectral (Young – Helmboltz), entre otras¹.

Así también, en la figura 2 (Ramón Mujica M: Wyrki, 1964)¹ se observa las temperaturas para el mes de enero, promediadas de los datos de varios años, permitiendo comprobar el descubrimiento de Humboldt. Tal es así que frente a Chimbote y frente a San Juan, se encuentran sendas áreas con temperaturas inferiores a los 19 °C, mientras que mar adentro llegan a los 24 °C. Esto indica, en primer lugar, que, en los meses de enero, debe existir afloramiento intenso en las dos áreas indicadas. En segundo lugar aparece un hecho poco favorable para la teoría de una corriente de origen polar: para encontrar esas temperaturas inferiores a los 19 °C más al sur se necesita llegar a la latitud de 26 °S, es decir, mucho más al sur de Antofagasta, casi a la altura de Caldera, esto explica que la influencia de la corriente para el enfriamiento del agua, es secundaria comparada con la del afloramiento.

GIS

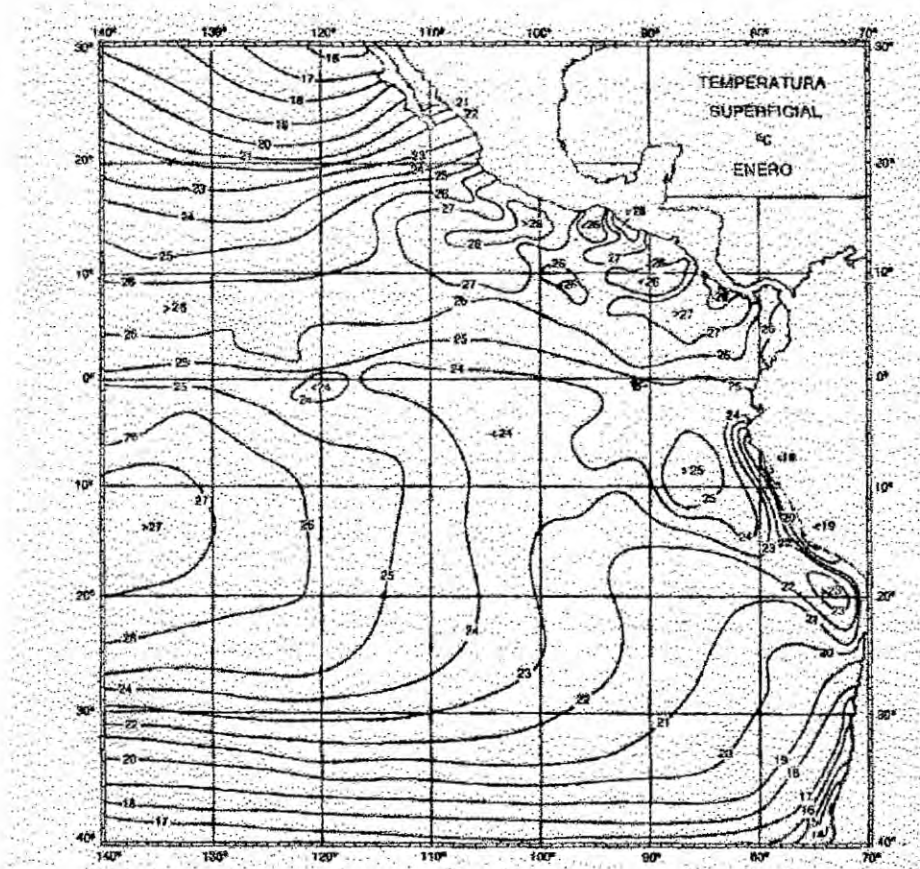


Figura 2. Distribución media de la temperatura de la superficie del mar, en enero
(Ramón Mujica M: Wyrki, 1964)

CICLO DE VIDA EN EL MAR

Otro elemento de análisis es el ciclo de vida en el mar: en el que cada eslabón de la cadena utiliza como alimento el eslabón anterior y sirve a su vez, para nutrir al siguiente.

En el mar, existen microorganismos que fabrican compuestos orgánicos (carbohidratos) a partir a compuestos químicos más la energía solar. La

GIS

mayor parte de la fotosíntesis la realiza un sinnúmero de plantas minúsculas que no son visibles a primera vista. Son microscópicas y sus movimientos son de menor magnitud que los del agua que las arrastra, por lo que se las considera errantes, como lo indica el nombre de plancton que se da en estas pequeñísimas plantas. Constituyen el plancton vegetal o fitoplancton¹.

Para que prospere la formación de fitoplancton, se necesita la luz solar, el agua, el anhídrido carbónico o dióxido de carbono, algunas sales nutrientes (como los fosfatos o nitratos), y ciertas condiciones del ambiente (temperatura, salinidad). Los organismos más abundantes del fitoplancton, las diatomeas, se reproducen con tal velocidad que un solo individuo podría generar en treinta días hasta cien millones de descendientes. Estas especies generalmente tienden a hundirse, en consecuencia, es de esperar que sean estadísticamente más abundantes en aguas ascendentes. La distribución de diatomeas probablemente es a menudo un reflejo del régimen turbulento-convectivo del agua (Isaacs, 1969). El plancton animal, o zooplancton, necesita alimentarse de fitoplancton. Los peces y otros animales marinos se alimentan del plancton o de peces más pequeños, y así se va estableciendo la cadena biológica marina. Cuando más tarde, plantas y animales mueren, sus desechos se hunden y se descomponen. En último término, estos residuos sufren un segundo proceso de descomposición producido por bacterias, las cuales liberan nuevamente los

G.S

fosfatos, nitratos y otros, pudiendo ser nuevamente utilizados por el fitoplancton para elaborar nueva materia orgánica, cerrándose de esta forma el ciclo de la vida en el mar.

Es de concebir que abundara la actividad biológica, y la pesca, en aquellos lugares donde exista elevación de aguas ricas en minerales que lleguen hasta la superficie.

La acción del viento paralelo a la costa, es el factor preponderante que causa el fenómeno del afloramiento, como sucede frente a nuestras costas, dando como resultado gran producción de fitoplancton en las cercanías de las áreas de afloramiento (figura 10). Al límite entre las aguas costeras relativamente frías, y las aguas oceánicas más cálidas, se encuentran frentes térmicos muy marcados donde la temperatura cambia de varios grados en algunos kilómetros (gradientes térmicos muy grandes)⁷.

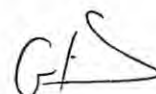
Un fenómeno local que se asocia con la presencia de frentes térmicos es la concentración de peces a lo largo de estos límites, que se pueden localizar por bruscos cambios de temperaturas y por diferencias en el color de las aguas. La circulación vertical asociada a estas circunstancias concentra a menudo organismos planctónicos, lo que produce la concentración de peces que se nutren de plancton y de los de presa que se alimentan de los anteriores [Schaefer, 1965]. La desestabilización dinámica del frente de afloramiento genera estructuras de mesoescala (meandros,



filamentos, remolinos) que juegan un papel muy importante para el intercambio de propiedades entre las regiones costeras y mar afuera. Recientemente se ha establecido que la región de Chimbote es una zona propicia para la generación de remolinos de mesoescala [Chaigneau et al., 2007]. Esa área esta también caracterizada por la presencia de filamentos. Muy recientemente, la imagería satelital ha revelado que el afloramiento está muy lejos de ser uniforme y más bien revela estructuras parecidas a filamentos de longitudes muy variables que se desplazan hacia mar afuera en toda la extensión de esta actividad de mesoescala [Flament *et al.*, 1985; Haynes *et al.*, 1993]. Se conoce poco acerca de la extensión de los frentes de afloramiento, de su relación con otros fenómenos oceanográficos tales como: filamentos, remolinos de su orientación con la batimetría del área y de su variabilidad espacial y temporal.

TEMPERATURA DEL AGUA DEL MAR

A medida que la radiación solar entra en el océano, su energía es absorbida y almacenada por la capa superficial, produciendo en general un aumento de su temperatura. Parte de esta energía se invierte en la evaporación de cierta cantidad de agua del mar, que incrementa así su salinidad, pero por el momento centraremos nuestra atención en la fracción de radiación incidente que calienta el agua.



El calentamiento de una sustancia conduce a su expansión y por tanto a un descenso en su densidad (masa por unidad de volumen); inversamente, su enfriamiento provoca un aumento de densidad. En el caso del agua del mar, los cambios en densidad producidos por calentamientos o enfriamientos estacionales constituyen uno de los procesos de generación de corrientes oceánicas. La variación de la cantidad de sales disueltas en el agua también influye en su densidad. Finalmente, la reducción del volumen debido al aumento de la presión con la profundidad es el tercer factor que determina la densidad de cualquier cuerpo de agua. De las tres, temperatura, salinidad y presión, la primera es la más importante en el conjunto de los océanos.

Respecto de la salinidad, un cambio de una parte de sal en mil partes de agua (1 o/oo) tiene más efecto que un cambio en temperatura de 1°C. Por ejemplo, la diferencia de densidad producida por un cambio en salinidad del 1o/oo es 0.8 kg m⁻³; y la diferencia de densidad producida por un cambio de temperatura de 1 °C es, en el caso más favorable (a temperaturas elevadas) de sólo 0,35 kg m⁻³. Cuando consideramos las aguas superficiales de los océanos en su conjunto, sin embargo, vemos que la temperatura es el factor más importante, porque sus variaciones (entre -2 y 35 °C) son mucho mayores que las de la salinidad (entre 33 y 37 o/oo). El límite inferior de temperatura está marcado por la formación de hielo, que en el agua de mar es inferior al del agua pura (efecto crioscópico). El límite



superior depende de la radiación y el intercambio de energía con la atmósfera.

Un cambio en la presión de 1 dbar (decibar) ocasiona, por su parte, un cambio en la densidad de $0,04 \text{ kg m}^{-3}$. Dado que, al contrario que la salinidad o la temperatura, las variaciones horizontales de presión en el conjunto de los océanos son muy pequeñas, típicamente de 5 dbar, el efecto que provoca en la densidad es del orden de apenas $0,2 \text{ kg m}^{-3}$.

TEMPERATURAS SUPERFICIALES

La distribución de las temperaturas superficiales en los principales océanos se muestra en la Fig. 3. Nótese que las isotermas, líneas que unen puntos de igual temperatura, tienen una distribución prácticamente zonal (siguiendo los paralelos), pero tienden a curvarse hacia el ecuador en la parte oriental de los océanos y hacia el polo en la parte occidental. Esto se debe al sentido general de la circulación, que transporta agua cálida desde el ecuador hacia los polos en la parte oeste y agua más fría de las regiones subárticas por la parte este hacia el ecuador. Por tanto, las corrientes costeras influyen fuertemente en el clima local, haciendo que un día dado haya diferencias de temperatura entre zonas costeras con latitud similar pero asomadas a márgenes opuestas de un océano o continente. El factor regulador más importante es la temperatura superficial del agua en cada región, que controla tanto la temperatura como la humedad del aire. Los movimientos superficiales son forzantes a analizar.

largo de todo el año y que por ello se denomina termoclina permanente. Dependiendo de las condiciones meteorológicas y de la época del año pueden aparecer, generalmente próximas a la superficie, otras termoclinas denominadas

estacionales, comúnmente con un mayor gradiente. Por último en profundidad existe una capa de temperatura más uniforme y relativamente baja, la zona de aguas profundas (véase la Fig.4).

Puesto que la densidad está vinculada a la temperatura, es de esperar que haya aguas menos densas en superficie que en profundidad, y que en la termoclina o en sus proximidades exista un acusado gradiente de densidad (a éste le llamaremos picnoclina). Este fuerte gradiente de densidad asociado a la termoclina actúa como una barrera que dificulta los movimientos verticales. Por el contrario, en las capas en las que la densidad no sufre grandes variaciones estos movimientos se ven favorecidos, (por ejemplo en la capa de mezcla).

En las regiones polares, sin embargo, las capas superficiales son mucho más frías, de modo que existe una variación térmica entre capas superficiales y profundas mucho menor que en otras latitudes. En estos casos se produce una circulación vertical en gran escala, con hundimiento de las aguas superficiales y formación de masas de agua de características definidas que renuevan las aguas profundas de los grandes océanos del planeta.

G/S

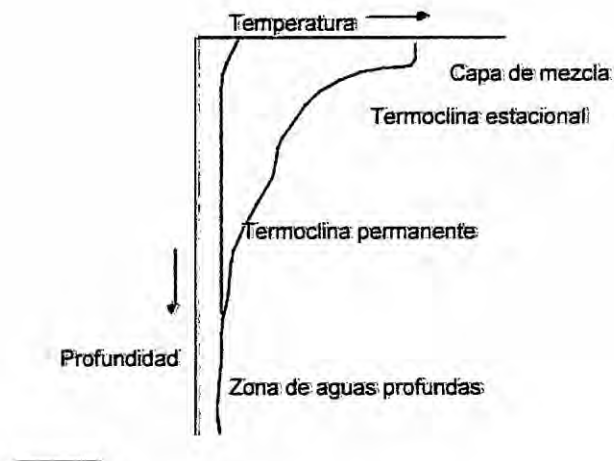


Figura 4. La curva de color rojo muestra un perfil clásico de temperatura durante la época de verano de una zona templada, incluyendo una capa superficial de temperatura similar (capa de mezcla), una zona de gradiente (acusado, la termoclina estacional, menos acusado, termoclina permanente) y una región con escasa variación de temperatura (aguas profundas). La curva dibujada en azul es un perfil clásico de temperatura en las zonas polares, con temperaturas muy bajas y uniformes en toda la columna de agua, y una termoclina de gradiente muy pequeño cercana a la superficie.

AFLORAMIENTO COSTERO

Un fenómeno que influye en las temperaturas superficiales de las aguas costeras, especialmente en la parte oriental de las cuencas oceánicas, es el afloramiento, o elevación de aguas más frías desde niveles más profundos. El afloramiento está asociado casi siempre a un desplazamiento de las aguas superficiales, debido al viento o a otras causas, y cuyo lugar es ocupado por aguas más profundas⁸.

El desplazamiento de las aguas superficiales por acción del viento se produce de un modo bastante poco intuitivo. En la última década del siglo

GDS

pasado, el científico y explorador noruego Fridtjof Nansen realizó una expedición por el Mar Ártico, observando que los movimientos de los témpanos de hielo forzados por el viento no eran paralelos al mismo, sino que se producían con un ángulo de entre 20° y 40° a la derecha.

Ekman estudió este problema teóricamente, asumiendo ciertas simplificaciones. Consideró un viento de velocidad constante soplando sobre un océano de profundidad y extensión ilimitada; el océano no tenía variaciones en densidad y su superficie se mantenía horizontal, de modo que la variación de presión en esta coordenada es nula. De acuerdo con este esquema, el océano puede imaginarse como una superposición de capas de agua, cada una de las cuales es empujada por fricción por la superior (por el viento, en el caso de la capa superficial), y a su vez empuja a la inferior por la misma causa. Además, puesto que están en movimiento, cada capa sufre la acción de la aceleración de Coriolis que desvía todo móvil: hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el sur. La resolución de las ecuaciones del movimiento en estas circunstancias muestra que la situación de equilibrio entre las aceleraciones presentes (fricción y Coriolis), para el conjunto infinito de capas de este modelo de océano, corresponde a una velocidad de las capas exponencialmente decreciente con la profundidad. Además, Ekman encontró que la dirección de la corriente en la capa superficial es de 45° con respecto a la del viento, desviándose progresivamente en la misma dirección conforme

aumenta la profundidad (véase la Fig. 5). Los vectores de la corriente forman así una estructura en espiral que se conoce como espiral de Ekman. Teóricamente la espiral de Ekman se desarrolla hasta una profundidad infinita, pero en la práctica Ekman propuso que su "espesor" o "capa de Ekman" se definiese como la profundidad a la cual la dirección de la corriente es opuesta a la corriente superficial.

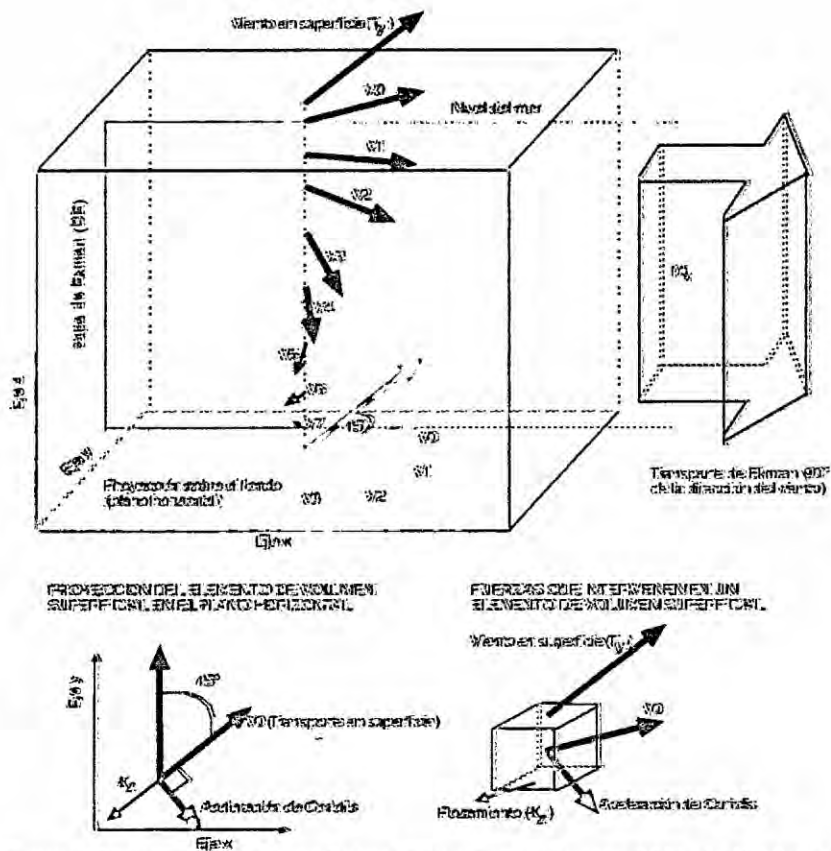


Figura 5. Un cuerpo de agua puede imaginarse como una superposición de láminas (0-7); la superior (0) impulsada por la tensión del viento (T_y) y cada una empujando a la inmediatamente inferior por rozamiento (K_z). La capa superior, de velocidad V_0 , ya está girada 45° a la derecha (izquierda) del viento en el hemisferio norte (sur). Las capas inferiores se van moviendo cada vez con menor velocidad y están dirigidas en movimiento espiral cada vez más hacia la derecha (izquierda)- hasta que la velocidad llega a ser insignificante. Si bien la dirección de los movimientos varía en cada capa, el transporte de agua promedio o "neto" (M_x) de toda la capa impulsada por el viento (también llamada "capa de Ekman", D_E), se dirige 90° a la derecha (izquierda) de la fuerza del viento imperante. Se indican las fuerzas que intervienen en un elemento de volumen superficial y su proyección en el plano horizontal (xy).

ALS

Como consecuencia de esta espiral, el caudal neto de agua en la capa de Ekman (transporte de Ekman, M_x) se dirige a 90 grados hacia la derecha de la dirección del viento en el hemisferio norte y 90 grados hacia la izquierda de la dirección del viento en el hemisferio sur.

Esto significa que, por ejemplo, en las costas ibéricas atlánticas los vientos del norte

desviarán las aguas superficiales hacia su derecha, esto es, hacia el océano. Esta agua es $DE = \sin \{ 7.6 U_{10} \}$ reemplazada por otra más fría y rica en nutrientes⁹ de profundidades entre 200 y 300 metros, dando lugar a un fenómeno denominado afloramiento. Este tiene una singular importancia en las costas ibéricas atlánticas (donde es el factor clave de la productividad de la Rías Gallegas), y también en las occidentales del África sahariana. Otras regiones del mundo donde tiene efectos notables son las costas del Perú, de gran riqueza pesquera gracias a este fenómeno, y las de California.

Aunque el transporte de Ekman se utiliza para cuantificar la intensidad del fenómeno, el afloramiento puede también detectarse experimentalmente con medidas de temperatura, porque eleva aguas frías cerca de la costa, curvándose hacia arriba las isotermas en las proximidades de la misma. Los principales tipos de afloramiento se ilustran en la Fig. 6. Nótese que el afloramiento puede ser causado no sólo por vientos, sino también por el arrastre de agua debido a corrientes costeras al pasar éstas por delante de obstáculos o promontorios, y finalmente por diferencias de densidad. El

proceso contrario se llama hundimiento y se observa igualmente en las medidas de temperatura por el descenso, o deformación hacia abajo de las isothermas en las cercanías de la costa.

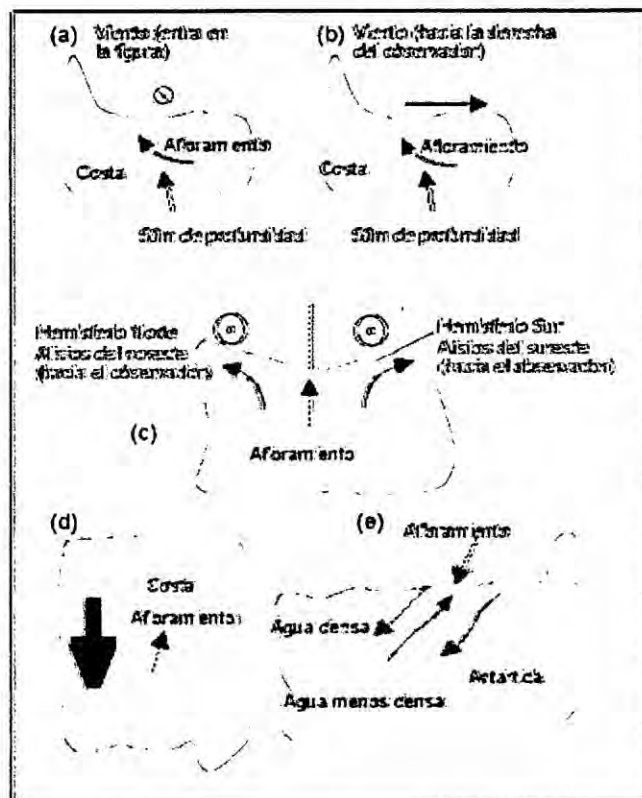


Figura 6. Diagramas de varios tipos de afloramiento. (a) Afloramiento por transporte de Ekman, o por efecto de Coriolis. En el hemisferio norte el transporte neto de agua es 90 grados hacia la derecha de la dirección del viento, y en el sur es 90 grados hacia la izquierda (b) Afloramiento debido al viento. Los vientos dirigidos hacia el mar arrastrarán el agua superficial lejos de la costa, siendo esta agua reemplazada por otra aflorada. La diferencia entre este tipo de afloramiento y el anterior es de escala: en éste el viento sopla durante menos tiempo y/o sobre un área más pequeña, por lo que la acción de Coriolis no llega a ser relevante. (c) Afloramiento ecuatorial en océano abierto por efecto de Coriolis. El viento provoca una divergencia cerca del ecuador que transporta agua hacia la derecha al norte del ecuador y hacia la izquierda al sur del mismo, provocando un afloramiento justo en el ecuador. (d) Afloramiento por obstrucción. Una corriente que se mueva por delante de promontorios, construcciones u otros obstáculos arrastrará agua lejos de éstos, dando lugar al afloramiento. (e) Afloramiento provocado por densidad. En el transcurso de la circulación termohalina, el agua más densa se hunde y reemplaza agua menos densa, que aflora. Un ejemplo se da en las inmediaciones del continente Antártico, donde (1) sería Agua Intermedia Antártica, (2) Agua de Fondo Antártica, y la que aflora en la Antártida sería Agua de procedencia noratlántica. Nótese las variaciones de presión en la superficie libre del mar, que producen variaciones en el campo de presión.

ALS

MEDIDA DE LAS TEMPERATURAS OCEÁNICAS

Un instrumento históricamente importante para la medida de temperaturas oceánicas a profundidades variables es el batitermógrafo (BT). Con este aparato era posible obtener un perfil de temperatura después de determinar ésta en la superficie del agua con la ayuda de un termómetro. El BT permitía determinar la estructura térmica del océano en estaciones seleccionadas, comprobando la posibilidad de movimientos verticales tales como el afloramiento. El elemento sensible del aparato es un tubo metálico lleno de líquido, cuya dilatación hace variar la curvatura de una porción terminal, semejante a un tubo de manómetro; la temperatura se registra sobre una pequeña placa de vidrio ahumado movida por un émbolo accionado por la presión del agua. De esta forma se puede obtener la representación gráfica de la variación de la temperatura en función de la profundidad.

El batitermógrafo ha sido hoy en día sustituido por el denominado XBT. Este se basa en una idea similar, pero los datos de temperatura, en lugar de registrarse en el instrumento, se envían por cable o radio a la plataforma de investigación, sea ésta un barco o un avión. El XBT se construye de tal forma que se conoce su velocidad de caída en el agua, con lo que se calcula la profundidad mediante el tiempo transcurrido y no es preciso encarecer el instrumento utilizando sensores de presión. Normalmente estos instrumentos no se recuperan, y permiten una mejor visión sinóptica de la estructura térmica de la región de estudio (Figura 7).



Figura 7. XBT clásico, mostrando la sonda de temperatura y el anillo de liberación. El operador tira de este anillo inmediatamente antes de lanzar el XBT al mar.

Otro instrumento utilizado habitualmente es el termómetro reversible oceánico (TRO), o termómetro de inversión. Está diseñado para medir la temperatura en aguas a una profundidad seleccionada. Se disponen en parejas en la botella oceanográfica y una vez que ésta ha descendido a la profundidad deseada son invertidos por la acción de un objeto (el denominado mensajero) que baja por el cable de sujeción. Al golpear el mensajero la botella, la carcasa que contiene los termómetros ve liberado su extremo superior y gira 180 grados, y quedando cortada la columna de mercurio en una angostura del tubo. Este proceso produce igualmente la liberación de otro mensajero que actuará sobre la botella inmediatamente inferior. Estos termómetros están calibrados y diseñados para que en el momento del giro el mercurio atrapado en la columna sea proporcional a la temperatura, a la profundidad a la que se produzca la

GA

inversión (Fig. 8). Uno de los TRO de la Fig. 8 está encerrado en un depósito de vidrio, para evitar que actúe sobre él la presión debida a la profundidad; el otro no está protegido. Como la presión actúa sobre el depósito del termómetro no protegido, fluye más mercurio de éste cuando se produce la inmersión. De esta manera se puede conocer la profundidad exacta a la cual se midió la temperatura. Estos termómetros están contruidos para que, como norma general, la lectura del termómetro no protegido sea aproximadamente 1°C mayor que la del termómetro protegido por cada 100 metros de columna de agua.

Los TRO, tanto protegidos como si no, han de llevar un termómetro auxiliar para conocer la temperatura en el momento de hacer la lectura del termómetro principal: ésta, ya en superficie, será en general distinta de la que tenía sumergido en el momento de la inversión, y hay que hacer una corrección que tenga en cuenta el cambio de volumen experimentado por la parte desprendida de la columna de mercurio al subir a la superficie.

Los TRO están siendo progresivamente sustituidos por termómetros eléctricos. Estos se basan en el coeficiente térmico de una resistencia bobinada o, actualmente, de una simple perla de semiconductor especial (termistores). La medida se hace por equilibrado de puente de resistencias. Se prestan a determinaciones de temperatura a distancia, por medio de cable, con registro simultáneo. Su forma habitual de uso consiste en disponer una ristra o cadena de termistores fondeada con una boya, y provistos de una unidad de lectura y registro automáticos que se activa a intervalos de tiempo preseleccionados. Se

af S

puede obtener así el registro, en un sitio concreto, de la evolución temporal de la temperatura en función de la profundidad.

Por último, desde hace ya casi treinta años, tras el lanzamiento de los satélites Nimbus de la agencia estatal estadounidense NOAA, se utiliza la detección remota desde el espacio para la medida de la temperatura superficial de los océanos. Esta medida se basa en la detección de la radiación infrarroja que el océano, como todo cuerpo o sustancia, emite a temperaturas ordinarias⁷. La radiación recibida es representativa sólo de una delgada capa superficial, y su transformación en temperatura depende de modelos relativamente sofisticados de la emisión de radiación térmica por el océano y de su interacción posterior con la atmósfera, antes de ser detectada. Por ello, los valores numéricos concretos obtenidos de este modo deben contrastarse con más cuidado que los obtenidos de un termómetro bien calibrado. No obstante, la teledetección es única en su capacidad de proporcionar una visión casi simultánea de las temperaturas de regiones muy extensas del planeta, lo que ha permitido conocer los procesos involucrados con un detalle y una resolución temporal inimaginables con técnicas in situ.

G/S

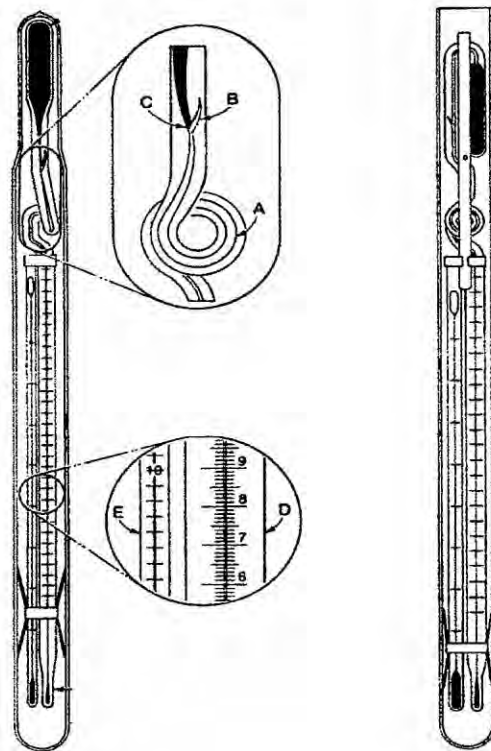


Figura 8. Termómetros reversibles, protegido y desprotegido, mostrados en posición invertida.

Antes de ser invertidos, el termómetro principal dispone de un depósito de mercurio grande en su parte inferior, que puede desplazarse por el capilar hasta otro bulbo más pequeño en la parte superior. El capilar se bifurca en el apéndice B y da una vuelta de 360 grados en A. En posición no invertida el mercurio llena el depósito y parte del capilar; al invertirse, la columna de mercurio se corta en C, desciende hasta el bulbo, ahora en la parte inferior, llenándolo y subiendo por el capilar graduado (escala principal D). Junto a la escala principal hay un termómetro secundario, E, que mide la temperatura ambiente. Como el volumen de mercurio desprendido en el termómetro principal ha cambiado ligeramente desde el momento de la inversión hasta el de su lectura (varía en función de la temperatura), es necesario corregir este pequeño efecto, utilizando la diferencia de temperatura entre el termómetro principal y el auxiliar.

G/S

EL AFLORAMIENTO PERUANO

En el Perú, se han desarrollado proyectos internacionales y, también se ha realizado un considerable número de publicaciones sobre el ecosistema de afloramiento y la producción primaria frente al Perú, lo cierto es que aún no se han hecho investigaciones relacionadas con los filamentos de afloramiento, figura 9.

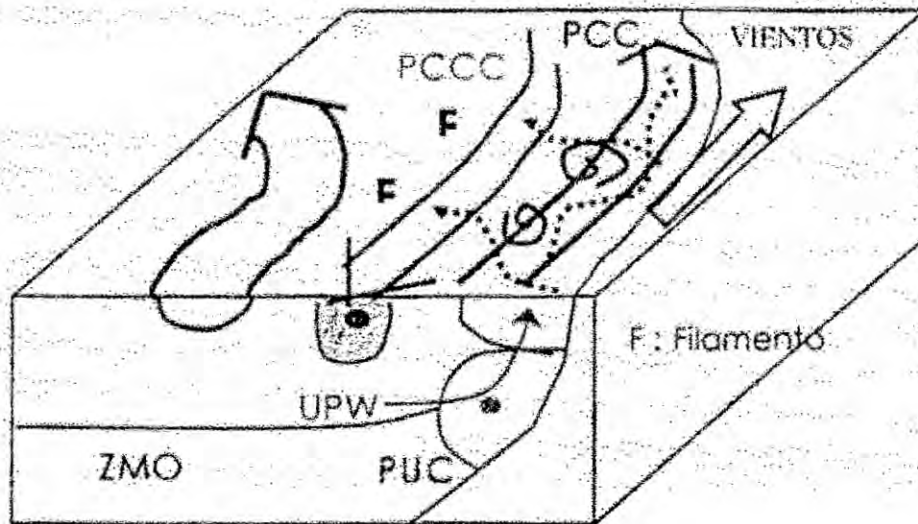


Figura 9. Esquema de un filamento en el afloramiento peruano

Así mismo, los mayores proyectos para el estudio de la Productividad Marina y el afloramiento se realizaron en la década del 70, específicamente en 1971 se desarrolló el proyecto "Productividad de las Aguas Costeras"¹⁰ con auspicio de la OEA entre 7°S y 9°S. El segundo mayor experimento multidisciplinario de campo, Joint-II, se realizó entre 1976 y 1977 y evaluó el

ATS

área frente a San Juan (15°S) en el marco del proyecto Coastal Upwelling Ecosystem Analysis (CUEA).

Actualmente se conoce que la costa peruana (4° - 18°S) presenta el afloramiento más intenso del sistema de Corrientes de Humboldt, así como la mayor viabilidad interanual ENSO. La dinámica del afloramiento de Perú – Chile¹¹ está asociada al sistema de corrientes de Humboldt, que consiste en 4 corrientes principales. En la capa superficial, la corriente Costera Perú – Chile (CCP) orientada hacia el norte; y la Contracorriente Perú – Chile (CCPC) orientada hacia el sur a profundidades entre 100 y 300 metros. A mayores profundidades, la Corriente Submarina Perú – Chile (CSPC) se orienta hacia el sur. En el océano abierto, la corriente de Humboldt, también llamada Corriente Peruana (CP) está más asociada a la circulación oceánica de gran escala¹².

Las aguas de afloramiento son transportadas desde profundidades someras (usualmente 50 – 100 metros)¹³, con concentraciones bajas de oxígeno y contenido alto de nutrientes (Chávez & Barber y otros, 1991)¹⁴. Los principales centros de afloramiento están localizados a 4-6°S, 7-9°S, 11-13°S (Zuta & Guillén, 1970)¹⁵. El afloramiento es alimentado por tres fuentes diferentes: las aguas relativamente oxigenadas de la Extensión Sur de la corriente de Cromwell que aflora al norte de los 6°S, las aguas deficientes de oxígeno de la CSPCH que es la principal fuente de afloramiento al norte de los 12°S y algunas veces más al sur, y finalmente las aguas sub



antárticas mezcladas con las aguas ecuatoriales sub superficiales que alimentan el afloramiento al sur de los 14°S. El afloramiento frente al Perú es más intenso en el invierno de acuerdo con el comportamiento del viento frente a la costa (Bakun, 1987)¹⁶, alcanzando $3 \times 10^{12} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ con velocidades de ascenso de $5 - 30 \times 10^{-5} \text{ cm s}^{-1}$ (Strub, Tarazona & Arntz, 2001)¹⁷.

Los ecosistemas de afloramiento son caracterizados por una alta producción primaria ($>5 \text{ mg m}^{-3}$ de Chl-a en la superficie según Calienes et al., 1985)¹⁸, debido al suministro sostenible de nutrientes por advección vertical. Estos ecosistemas son también un medio muy dispersivo donde los nutrientes, el fitoplancton, zooplancton y larvas pueden ser fácilmente removidas de las áreas costeras (Marchesiello et al., 2004)¹⁹.

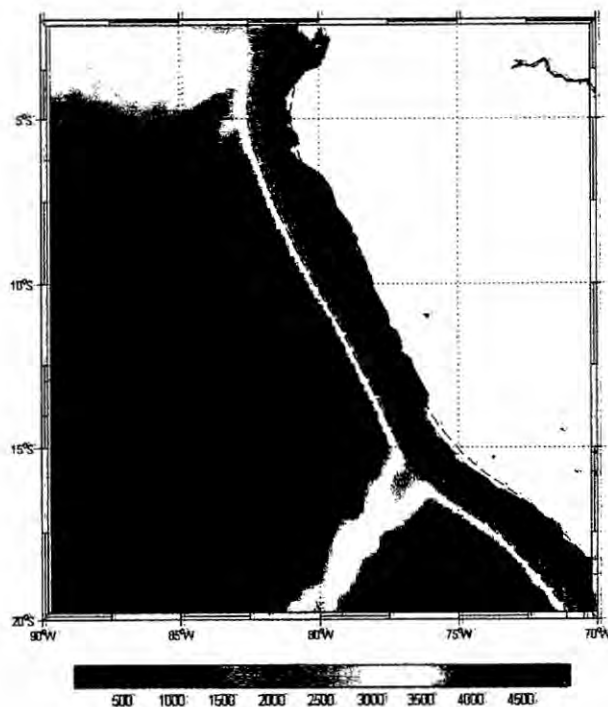


Figura 10. Perfil Costero del Perú

GLS

IV. MATERIALES Y METODOS

MATERIALES

Los materiales requeridos y utilizados, indispensablemente, para llevar a cabo la investigación fueron los datos satelitales de:

1. Temperatura Superficial del Mar a una resolución espacial de 4 km y a una resolución temporal de 1 mes en el periodo comprendido entre 1985-2004, datos dispuestos en:

http://podaac.jpl.nasa.gov/cgi-bin/dcatalog/fam_summary.pl?sst+pfsst

<http://podaac.jpl.nasa.gov/products/product216.html>

Los datos satelitales de la temperatura superficial del mar (TSM), sirven para evaluar las condiciones oceanográficas en grandes áreas del océano.

La serie de satélites heliosincrónicos NOAA, con órbita polar a una altura de 850 Km, diseñados para estudios meteorológicos, llevan a bordo el AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), sensor que permite detectar la distribución de las temperaturas superficiales del mar con una precisión de 0,1 °C [UNESCO, 1988]. La resolución espacial de este instrumento es de 1,1 Km, y cada barrido cubre un área de 2.900x1,1 Km aproximadamente [Fonseca y Farías, 1987].

Estos datos son presentados en forma de matrices de 182x91. A continuación se presenta estos materiales:



Tabla 1. Datos Satelitales de TSM de la NOAA

YEAR 1985	YEAR 1986	YEAR 1987
Sst_198501	Sst_198601	Sst_198701
Sst_198502	Sst_198602	Sst_198702
Sst_198503	Sst_198603	Sst_198703
Sst_198504	Sst_198604	Sst_198704
Sst_198505	Sst_198605	Sst_198705
Sst_198506	Sst_198606	Sst_198706
Sst_198507	Sst_198607	Sst_198707
Sst_198508	Sst_198608	Sst_198708
Sst_198509	Sst_198609	Sst_198709
Sst_198510	Sst_198610	Sst_198710
Sst_198511	Sst_198611	Sst_198711
Sst_198512	Sst_198612	Sst_198712

Datos Satelitales de TSM de la NOAA

YEAR 1988	YEAR 1989	YEAR 1990
sst_198801	sst_198901	sst_199001
sst_198802	sst_198902	sst_199002
sst_198803	sst_198903	sst_199003
sst_198804	sst_198904	sst_199004
sst_198805	sst_198905	sst_199005
sst_198806	sst_198906	sst_199006
sst_198807	sst_198907	sst_199007
sst_198808	sst_198908	sst_199008
sst_198809	sst_198909	sst_199009
sst_198810	sst_198910	sst_199010
sst_198811	sst_198911	sst_199011
sst_198812	sst_198912	sst_199012

AS

Datos Satelitales de TSM de la NOAA

YEAR 1991	YEAR 1992	YEAR 1993
sst_199101	sst_199201	sst_199301
sst_199102	sst_199202	sst_199302
sst_199103	sst_199203	sst_199303
sst_199104	sst_199204	sst_199304
sst_199105	sst_199205	sst_199305
sst_199106	sst_199206	sst_199306
sst_199107	sst_199207	sst_199307
sst_199108	sst_199208	sst_199308
sst_199109	sst_199209	sst_199309
sst_199110	sst_199210	sst_199310
sst_199111	sst_199211	sst_199311
sst_199112	sst_199212	sst_199312

Datos Satelitales de TSM de la NOAA

YEAR 1994	YEAR 1995	YEAR 1996
Sst_199401	Sst_199501	Sst_199601
Sst_199402	Sst_199502	Sst_199602
Sst_199403	Sst_199503	Sst_199603
Sst_199404	Sst_199504	Sst_199604
Sst_199405	Sst_199505	Sst_199605
Sst_199406	Sst_199506	Sst_199606
Sst_199407	Sst_199507	Sst_199607
Sst_199408	Sst_199508	Sst_199608
Sst_199409	Sst_199509	Sst_199609
Sst_199410	Sst_199510	Sst_199610
Sst_199411	Sst_199511	Sst_199611
Sst_199412	Sst_199512	Sst_199612

Datos Satelitales de TSM de la NOAA

YEAR 1997	YEAR 1998	YEAR 1999
sst_199701	sst_199801	sst_199901
sst_199702	sst_199802	sst_199902
sst_199703	sst_199803	sst_199903
sst_199704	sst_199804	sst_199904
sst_199705	sst_199805	sst_199905
sst_199706	sst_199806	sst_199906
sst_199707	sst_199807	sst_199907
sst_199708	sst_199808	sst_199908
sst_199709	sst_199809	sst_199909
sst_199710	sst_199810	sst_199910
sst_199711	sst_199811	sst_199911
sst_199712	sst_199812	sst_199912

Datos Satelitales de TSM de la NOAA

YEAR 2000	YEAR 2001	YEAR 2002
sst_200001	sst_200101	sst_200201
sst_200002	sst_200102	sst_200202
sst_200003	sst_200103	sst_200203
sst_200004	sst_200104	sst_200204
sst_200005	sst_200105	sst_200205
sst_200006	sst_200106	sst_200206
sst_200007	sst_200107	sst_200207
sst_200008	sst_200108	sst_200208
sst_200009	sst_200109	sst_200209
sst_200010	sst_200110	sst_200210
sst_200011	sst_200111	sst_200211
sst_200012	sst_200112	sst_200212

AS

Datos Satelitales de TSM de la NOAA

YEAR 2003	YEAR 2004
Sst_200301	sst_200401
Sst_200302	sst_200402
Sst_200303	sst_200403
Sst_200304	sst_200404
Sst_200305	sst_200405
Sst_200306	sst_200406
Sst_200307	sst_200407
Sst_200308	sst_200408
Sst_200309	sst_200409
Sst_200310	sst_200410
Sst_200311	sst_200411
Sst_200312	sst_200412

2. Clorofila (Chl-a)

Los datos son proporcionados por Provided by the SeaWifs Project,
NASA/Goddard Space Flight Center

Periodo: setiembre 1997 al 2004

Resolución espacial: 9 km.

Los datos están disponibles en la página web:

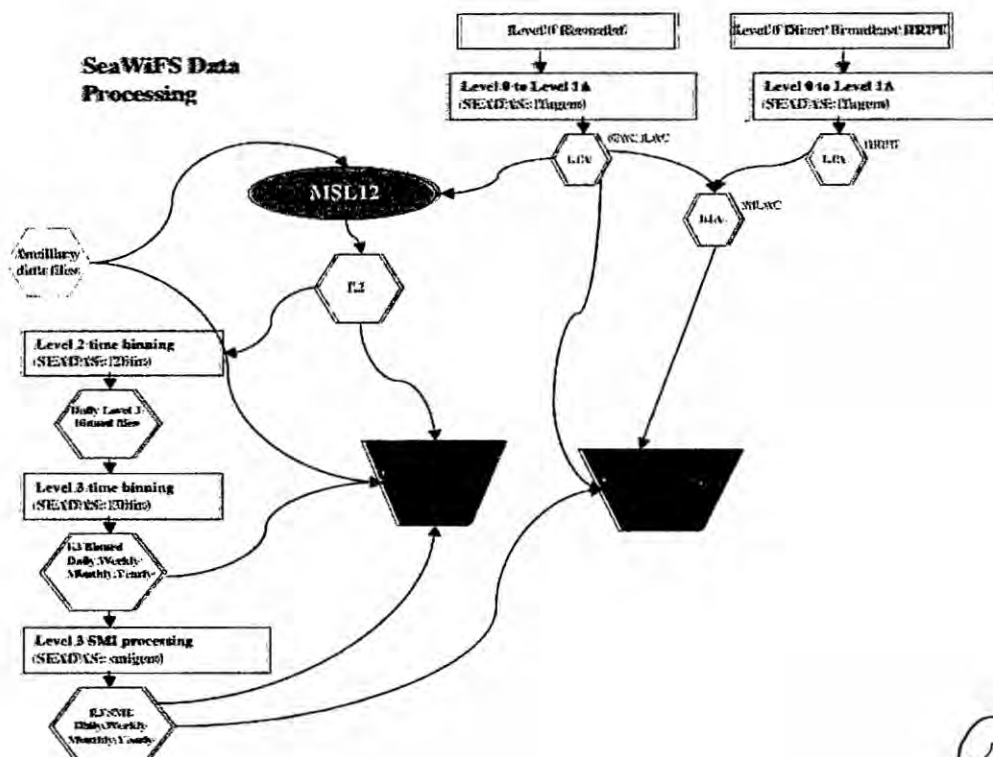
<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>

Datos presentados en forma de matrices de 182x91.

PROCESAMIENTO Y DISTRIBUCION DE SEAWIFS DATA

El grupo de procesamiento de la biología oceánica (OBPG) es responsable de la producción y distribución de información de la biología del océano de productos SeaWiFS (Sea Viewing Wide Field of View Sensor). Esta documentación provee los detalles acerca del proceso de flujo de SeaWiFS data. La Figura 6 muestra el procesamiento de información de SeaWiFS data con el OBPG que empieza con el nivel 0 y termina en el nivel 3 mostrando el mapeo de la data que es desarrollada y descargada de la web Ocean Color y archivada en FTP.

Figura 11. Processing flow from Level-0 through Level-3.



Los datos de clorofila se presentación en la tabla N° 2.

Tabla N° 2: Datos de Clorofila de SeaWifs

1997	1998	1999
clorofila1997337-1997344	clorofila1998001-1998008	clorofila1999001-1999008
clorofila1997345-1997352	clorofila1998009-1998016	clorofila1999009-1999016
clorofila1997353-1997360	clorofila1998017-1998024	clorofila1999017-1999024
clorofila1997361-1997365	clorofila1998025-1998032	clorofila1999025-1999032
	clorofila1998033-1998040	clorofila1999033-1999040
	clorofila1998041-1998048	clorofila1999041-1999048
	clorofila1998049-1998056	clorofila1999049-1999056
	clorofila1998057-1998064	clorofila1999057-1999064
	clorofila1998065-1998072	clorofila1999065-1999072
	clorofila1998073-1998080	clorofila1999073-1999080
	clorofila1998081-1998088	clorofila1999081-1999088
	clorofila1998089-1998096	clorofila1999089-1999096
	clorofila1998097-1998104	clorofila1999097-1999104
	clorofila1998105-1998112	clorofila1999105-1999112
	clorofila1998113-1998120	clorofila1999113-1999120
	clorofila1998121-1998128	clorofila1999121-1999128
	clorofila1998129-1998136	clorofila1999129-1999136
	clorofila1998137-1998144	clorofila1999137-1999144
	clorofila1998145-1998152	clorofila1999145-1999152
	clorofila1998153-1998160	clorofila1999153-1999160
	clorofila1998161-1998168	clorofila1999161-1999168
	clorofila1998169-1998176	clorofila1999169-1999176
	clorofila1998177-1998184	clorofila1999177-1999184
	clorofila1998185-1998192	clorofila1999185-1999192
	clorofila1998193-1998200	clorofila1999193-1999200
	clorofila1998201-1998208	clorofila1999201-1999208
	clorofila1998209-1998216	clorofila1999209-1999216
	clorofila1998217-1998224	clorofila1999217-1999224
	clorofila1998225-1998232	clorofila1999225-1999232
	clorofila1998233-1998240	clorofila1999233-1999240
	clorofila1998241-1998248	clorofila1999241-1999248
	clorofila1998249-1998256	clorofila1999249-1999256
	clorofila1998257-1998264	clorofila1999257-1999264
	clorofila1998265-1998272	clorofila1999265-1999272
	clorofila1998273-1998280	clorofila1999273-1999280
	clorofila1998281-1998288	clorofila1999281-1999288
	clorofila1998289-1998296	clorofila1999289-1999296
	clorofila1998297-1998304	clorofila1999297-1999304
	clorofila1998305-1998312	clorofila1999305-1999312

AS

	clorofila1998313-1998320	clorofila1999313-1999320
	clorofila1998321-1998328	clorofila1999321-1999328
	clorofila1998329-1998336	clorofila1999329-1999336
	clorofila1998337-1998344	clorofila1999337-1999344
	clorofila1998345-1998352	clorofila1999345-1999352
	clorofila1998353-1998360	clorofila1999353-1999360
	clorofila1998361-1998365	clorofila1999361-1999365

Datos de Clorofila de SeaWifs

2000	2001	2002
clorofila2000001-2000008	clorofila2001001-2001008	clorofila2002001-2002008
clorofila2000009-2000016	clorofila2001009-2001016	clorofila2002009-2002016
clorofila2000017-2000024	clorofila2001017-2001024	clorofila2002017-2002024
clorofila2000025-2000032	clorofila2001025-2001032	clorofila2002025-2002032
clorofila2000033-2000040	clorofila2001033-2001040	clorofila2002033-2002040
clorofila2000041-2000048	clorofila2001041-2001048	clorofila2002041-2002048
clorofila2000049-2000056	clorofila2001049-2001056	clorofila2002049-2002056
clorofila2000057-2000064	clorofila2001057-2001064	clorofila2002057-2002064
clorofila2000065-2000072	clorofila2001065-2001072	clorofila2002065-2002072
clorofila2000073-2000080	clorofila2001073-2001080	clorofila2002073-2002080
clorofila2000081-2000088	clorofila2001081-2001088	clorofila2002081-2002088
clorofila2000089-2000096	clorofila2001089-2001096	clorofila2002089-2002096
clorofila2000097-2000104	clorofila2001097-2001104	clorofila2002097-2002104
clorofila2000105-2000112	clorofila2001105-2001112	clorofila2002105-2002112
clorofila2000113-2000120	clorofila2001113-2001120	clorofila2002113-2002120
clorofila2000121-2000128	clorofila2001121-2001128	clorofila2002121-2002128
clorofila2000129-2000136	clorofila2001129-2001136	clorofila2002129-2002136
clorofila2000137-2000144	clorofila2001137-2001144	clorofila2002137-2002144
clorofila2000145-2000152	clorofila2001145-2001152	clorofila2002145-2002152
clorofila2000153-2000160	clorofila2001153-2001160	clorofila2002153-2002160
clorofila2000161-2000168	clorofila2001161-2001168	clorofila2002161-2002168
clorofila2000169-2000176	clorofila2001169-2001176	clorofila2002169-2002176
clorofila2000177-2000184	clorofila2001177-2001184	clorofila2002177-2002184
clorofila2000185-2000192	clorofila2001185-2001192	clorofila2002185-2002192
clorofila2000193-2000200	clorofila2001193-2001200	clorofila2002193-2002200
clorofila2000201-2000208	clorofila2001201-2001208	clorofila2002201-2002208
clorofila2000209-2000216	clorofila2001209-2001216	clorofila2002209-2002216
clorofila2000217-2000224	clorofila2001217-2001224	clorofila2002217-2002224
clorofila2000225-2000232	clorofila2001225-2001232	clorofila2002225-2002232
clorofila2000233-2000240	clorofila2001233-2001240	clorofila2002233-2002240
clorofila2000241-2000248	clorofila2001233-2001240	clorofila2002241-2002248
clorofila2000249-2000256	clorofila2001249-2001256	clorofila2002249-2002256
clorofila2000257-2000264	clorofila2001257-2001264	clorofila2002257-2002264

GIS

clorofila2000265-2000272	clorofila2001265-2001272	clorofila2002265-2002272
clorofila2000273-2000280	clorofila2001273-2001280	clorofila2002273-2002280
clorofila2000281-2000288	clorofila2001281-2001288	clorofila2002281-2002288
clorofila2000289-2000296	clorofila2001289-2001296	clorofila2002289-2002296
clorofila2000297-2000304	clorofila2001297-2001304	clorofila2002297-2002304
clorofila2000305-2000312	clorofila2001305-2001312	clorofila2002305-2002312
clorofila2000313-2000320	clorofila2001313-2001320	clorofila2002313-2002320
clorofila2000321-2000328	clorofila2001321-2001328	clorofila2002321-2002328
clorofila2000329-2000336	clorofila2001329-2001336	clorofila2002329-2002336
clorofila2000337-2000344	clorofila2001337-2001344	clorofila2002337-2002344
clorofila2000345-2000352	clorofila2001345-2001352	clorofila2002345-2002352
clorofila2000353-2000360	clorofila2001353-2001360	clorofila2002353-2002360
clorofila2000361-2000366	clorofila2001361-2001365	clorofila2002361-2002365

Datos de Clorofila de SeaWifs

2003	2004	2005
clorofila2003001-2003008	clorofila2004001-2004008	clorofila2005001-2005008
clorofila2003009-2003016	clorofila2004009-2004016	clorofila2005009-2005016
clorofila2003017-2003024	clorofila2004017-2004024	clorofila2005017-2005024
clorofila2003025-2003032	clorofila2004025-2004032	clorofila2005025-2005032
clorofila2003033-2003040	clorofila2004033-2004040	clorofila2005033-2005040
clorofila2003041-2003048	clorofila2004041-2004048	clorofila2005041-2005048
clorofila2003049-2003056	clorofila2004049-2004056	clorofila2005049-2005056
clorofila2003057-2003064	clorofila2004057-2004064	clorofila2005057-2005064
clorofila2003065-2003072	clorofila2004065-2004072	clorofila2005065-2005072
clorofila2003073-2003080	clorofila2004073-2004080	clorofila2005073-2005080
clorofila2003081-2003088	clorofila2004081-2004088	clorofila2005081-2005088
clorofila2003089-2003096	clorofila2004089-2004096	clorofila2005089-2005096
clorofila2003097-2003104	clorofila2004097-2004104	clorofila2005097-2005104
clorofila2003105-2003112	clorofila2004105-2004112	clorofila2005105-2005112
clorofila2003113-2003120	clorofila2004113-2004120	clorofila2005113-2005120
clorofila2003121-2003128	clorofila2004121-2004128	clorofila2005121-2005128
clorofila2003129-2003136	clorofila2004129-2004136	clorofila2005129-2005136
clorofila2003137-2003144	clorofila2004137-2004144	clorofila2005137-2005144
clorofila2003145-2003152	clorofila2004145-2004152	clorofila2005145-2005152
clorofila2003153-2003160	clorofila2004153-2004160	clorofila2005153-2005160
clorofila2003161-2003168	clorofila2004161-2004168	clorofila2005161-2005168
clorofila2003169-2003176	clorofila2004169-2004176	clorofila2005169-2005176
clorofila2003177-2003184	clorofila2004177-2004184	clorofila2005177-2005184
clorofila2003185-2003192	clorofila2004185-2004192	clorofila2005185-2005192
clorofila2003193-2003200	clorofila2004193-2004200	clorofila2005193-2005200
clorofila2003201-2003208	clorofila2004201-2004208	clorofila2005201-2005208
clorofila2003209-2003216	clorofila2004209-2004216	clorofila2005209-2005216

clorofila2003217-2003224	clorofila2004217-2004224	clorofila2005217-2005224
clorofila2003225-2003232	clorofila2004225-2004232	clorofila2005225-2005232
clorofila2003233-2003240	clorofila2004233-2004240	clorofila2005233-2005240
clorofila2003241-2003248	clorofila2004241-2004248	clorofila2005241-2005248
clorofila2003249-2003256	clorofila2004249-2004256	clorofila2005249-2005256
clorofila2003257-2003264	clorofila2004257-2004264	clorofila2005257-2005264
clorofila2003265-2003272	clorofila2004265-2004272	clorofila2005265-2005272
clorofila2003273-2003280	clorofila2004273-2004280	clorofila2005273-2005280
clorofila2003281-2003288	clorofila2004281-2004288	clorofila2005281-2005288
clorofila2003289-2003296	clorofila2004289-2004296	clorofila2005289-2005296
clorofila2003297-2003304	clorofila2004297-2004304	clorofila2005297-2005304
clorofila2003305-2003312	clorofila2004305-2004312	clorofila2005305-2005312
clorofila2003313-2003320	clorofila2004313-2004320	clorofila2005313-2005320
clorofila2003321-2003328	clorofila2004321-2004328	clorofila2005321-2005328
clorofila2003329-2003336	clorofila2004329-2004336	clorofila2005329-2005336
clorofila2003337-2003344	clorofila2004329-2004336	clorofila2005337-2005344
clorofila2003345-2003352	clorofila2004337-2004344	clorofila2005345-2005352
clorofila2003353-2003360	clorofila2004345-2004352	clorofila2005353-2005360
clorofila2003361-2003365	clorofila2004353-2004360	clorofila2005361-2005365
	clorofila2004361-2004366	

Datos de Clorofila de SeaWifs

2006	2007
clorofila2006001-2006008	clorofila2007001-2007008
clorofila2006009-2006016	clorofila2007009-2007016
clorofila2006017-2006024	clorofila2007017-2007024
clorofila2006025-2006032	clorofila2007025-2007032
clorofila2006033-2006040	clorofila2007033-2007040
clorofila2006041-2006048	clorofila2007041-2007048
clorofila2006049-2006056	clorofila2007049-2007056
clorofila2006057-2006064	clorofila2007057-2007064
clorofila2006065-2006072	clorofila2007065-2007072
clorofila2006073-2006080	clorofila2007073-2007080
clorofila2006081-2006088	clorofila2007081-2007088
clorofila2006089-2006096	clorofila2007089-2007096
clorofila2006097-2006104	
clorofila2006105-2006112	
clorofila2006113-2006120	
clorofila2006121-2006128	
clorofila2006129-2006136	
clorofila2006137-2006144	
clorofila2006145-2006152	
clorofila2006153-2006160	

GIS

clorofila2006161-2006168	
clorofila2006169-2006176	
clorofila2006177-2006184	
clorofila2006185-2006192	
clorofila2006193-2006200	
clorofila2006201-2006208	
clorofila2006209-2006216	
clorofila2006217-2006224	
clorofila2006225-2006232	
clorofila2006233-2006240	
clorofila2006241-2006248	
clorofila2006249-2006256	
clorofila2006257-2006264	
clorofila2006265-2006272	
clorofila2006273-2006280	
clorofila2006281-2006288	
clorofila2006289-2006296	
clorofila2006297-2006304	
clorofila2006305-2006312	
clorofila2006313-2006320	
clorofila2006321-2006328	
clorofila2006329-2006336	
clorofila2006337-2006344	
clorofila2006345-2006352	
clorofila2006353-2006360	
clorofila2006361-2006365	

3. Herramientas disponibles del software MatLab:

MATLAB es el nombre abreviado de "MATriz LABoratory". Es un programa para realizar cálculos numéricos con vectores y matrices, y por tanto se puede trabajar también con números escalares (tanto reales como complejos), con cadenas de caracteres y con otras estructuras de información más complejas.

Matlab es un lenguaje de alto rendimiento para cálculos técnicos, es al mismo tiempo un entorno y un lenguaje de programación. Uno de sus



puntos fuertes es que permite construir nuestras propias herramientas reutilizables. Podemos crear fácilmente nuestras propias funciones y programas especiales (conocidos como M-archivos) en código Matlab, los podemos agrupar en Toolbox (también llamadas librerías) que son una colección especializada de M-archivos para trabajar en clases particulares de problemas.

Matlab, a parte del cálculo matricial y álgebra lineal, también puede manejar polinomios, funciones, ecuaciones diferenciales ordinarias, gráficos, etc.

En la presente investigación se ha utilizado Matlab para crear programas propios y especiales, que agrupados han formado un toolbox denominado LOOKING THE WORLD FROM THE SKY, capaces de decodificar los datos de temperatura superficial del mar y de clorofila y convertirlos en informaciones bajo la forma de imágenes, de modo que a través de la observación se pueda analizar la información que cada imagen muestra y partir de ella inferior juicios valorativos de los fenómenos a investigar.

4. Requerimientos del sistema para utilizar el compilador de MATLAB:
 - Unidad CD-ROM para la instalación.
 - TCP/IP requerido en todas las plataformas cuando se utilice un gestor de licencias.



- Adobe Acrobat Reader 3.0 o superior para visualizar e imprimir la documentación de FEMLAB en formato pdf.

El espacio en el disco duro requerido para la instalación varía dependiendo del tamaño de la partición y la instalación opcional de los ficheros de ayuda en-línea. El instalador de FEMLAB informará de los requisitos de espacio en el disco duro para su partición particular.

Recomendaciones generales del sistema:

Para el modelado de grandes modelos 3D, se recomienda una cantidad mínima de 512 MB de memoria. Algunos modelos en las librerías de modelos requieren hasta 1 GB.

Licencias en red flotante

Las licencias en red flotante son soportadas en redes heterogéneas de ordenadores Windows, Linux, UNIX y Mac OS X. Tanto el gestor de licencias como la aplicación FEMLAB pueden correr tanto en Windows, Linux, UNIX o Mac OS X y un ordenador puede correr ambos.

Requisitos del sistema para Microsoft Windows.

Requerimientos del sistema:

* Windows NT 4.0 (Service Pack 5, 6, 6a), Windows 2000, Windows XP o

Windows 98

* Pentium II o posterior.



* OpenGL 1.1 de Microsoft o un acelerador que soporte OpenGL 1.1, o DirectX versión

8.0 o posterior. La tarjeta gráfica debería tener al menos 16 MB de memoria.

* Al menos 256 MB de memoria RAM.

Requerimientos opcionales: MATLAB

La interfaz de FEMLAB con MATLAB requiere MATLAB 6.5, MATLAB 6.5.1, 7.0 o 7.0.1

METODOS

TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

La investigación está clasificada como aplicada o tecnológica correspondiendo al nivel explicativo – evaluativo y correlacional. Para el análisis se emplea el método histórico - observacional, el mismo que permite tener una visión sobre la variabilidad espaciotemporal del frente de afloramiento y de los filamentos asociados y de clorofila-a a partir de imágenes satelitales tomadas de la NOAA (sensor AVHRR) y del Proyecto SeaWiifs, NASA/Goddard Centro de Vuelo Espacial.



ABORDAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

El abordamiento de la investigación, globalmente, se realiza sobre el área que corresponde al Perú que se extiende entre la latitud 4°S hasta 20°S de la costa y longitud 70°W y 90°W , como se muestra en la fig.10.

AREA ESPECÍFICA DE ESTUDIO

El área específica de la investigación se extiende entre la latitud 7°S hasta 11°S de la costa y longitud 85°W , que corresponde a la zona de Chimbote como se observa en la Fig. 12, tipificándolo como un estudio zonal.

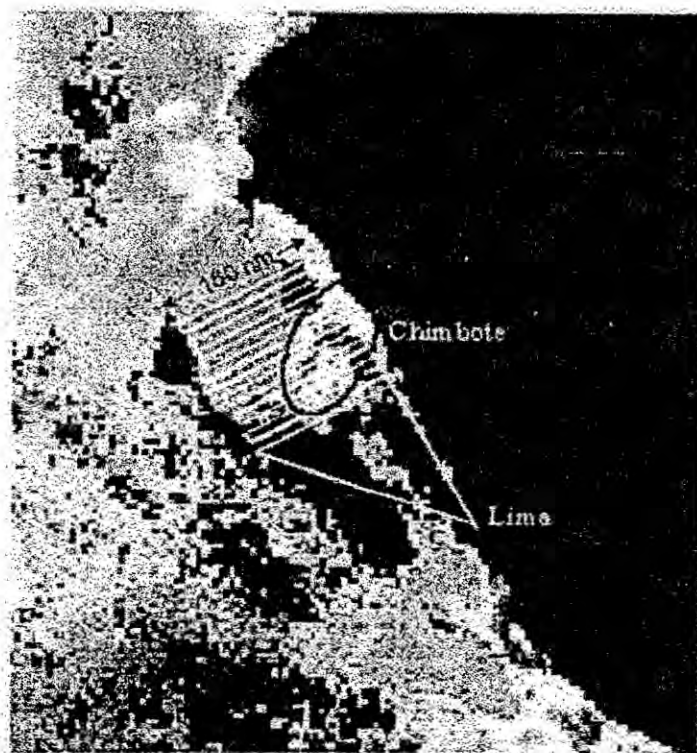


Figura 12. Área de estudio (Chimbote)

G.L.S

Chimbote es uno de los principales puertos pesqueros del Perú. A partir de la década de 1950, comienza a desarrollarse en este distrito la industria pesquera peruana, especializada en la producción de harina de pescado. Han pasado más de cincuenta años y la primacía de Chimbote sigue vigente, a pesar del surgimiento de otros puertos a lo largo del litoral peruano.

En el Perú, la pesca industrial es una importante actividad en la economía nacional, basada principalmente en la producción de harina de pescado, actividad que se desarrolla a partir de la segunda mitad del siglo XX y desde entonces se ha constituido en la segunda industria exportadora del país, después de la minería.

Debido a la riqueza ictiológica del mar frente a las costas de Chimbote, este puerto se convirtió desde muy temprano en el centro de la industria pesquera nacional. En esta zona se realiza el mayor desembarque pesquero y se concentra la mayor parte de las plantas harineras y de las plantas elaboradoras de conservas del país.

METODOLOGIA

La metodología empleada, en cada caso, para la contrastación de la hipótesis y por consiguiente el lograr los objetivos propuestos, se detallan a continuación:

- a) Propuesta metodológica para caracterizar los patrones espaciotemporales de la variabilidad del frente de afloramiento y de los filamentos asociados desde el año 1985 al 2004:



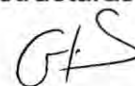
Obtención y análisis de 240 imágenes satelitales, mensualmente secuenciales de enero a diciembre, de temperatura superficial del mar (TSM) tomadas de la NOAA (sensor AVHRR) y, proporcionadas por el Centro de Investigaciones y Modelaje Biológico y Pesquero del Instituto del Mar del Perú (IMARPE), correspondientes al período de estudio comprendido.

La utilidad de las imágenes se ve afectada debido a la presencia de nubes en el área de barrido por lo que es necesario hacer un filtrado o limpieza de dichas imágenes a fin de que los datos obtenidos permitan proveer información precisa y confiable para documentar convenientemente el frente de afloramiento y los filamentos asociados.

Caracterizar las estructuras de mesoescala: frente de afloramiento y los filamentos asociados, a partir de su ubicación respectiva de posición y tamaño.

- Se hace un análisis de las imágenes satelitales asociadas promediando estacionalmente cada una de ellas de acuerdo a los meses del año y durante el período de estudio, a fin de conocer con mayor precisión la variabilidad y características de las estructuras del frente de afloramiento y de los filamentos asociados.

Aplicando el criterio de identificación automática basado en los valores extremos de los gradientes horizontales de la temperatura superficial del mar se determinará la evolución y características de estas estructuras,



especialmente la evolución de los filamentos permitiendo su documentación en lo que respecta a tamaño, período de vida, modulación de su actividad (dependiendo de la estación), ubicación preferente y extensión de los filamentos.

- El análisis mensual de las imágenes de temperatura superficial del mar (TSM) tomadas de la NOAA (sensor AVHRR) en forma de matrices, cuya resolución es de 4 Km. serán convertidas, mediante programación, a imágenes para ser empleadas en el seguimiento y evolución del frente de afloramiento y de los filamentos asociados, previo filtrado (limpieza) de las mismas.

b) Propuesta metodológica para caracterizar la influencia de los filamentos con el proceso biogeoquímico del transporte de la clorofila-a en la zona de afloramiento.

Se analizarán 448 imágenes satelitales tomadas del Proyecto SeaWiFS, NASA/Goddard Centro de Vuelo Espacial, secuenciales a escala estacional e interanual de clorofila-a (Chl-a) correspondientes a los meses de enero a diciembre de cada año, en intervalos semanales y durante el período de estudio comprendido entre diciembre de 1997 a marzo de 2007.



- Caracterizar la evolución de los filamentos y su influencia con el proceso biogeoquímico (clorofila-a) entre la zona de afloramiento y el océano abierto.

La correspondencia entre las imágenes satelitales de la temperatura superficial del mar (TSM) y la clorofila-a (Chl-a) permitirán determinar la relación entre la evolución de los filamentos y su influencia con producción biogeoquímica (clorofila).

Como los filamentos son características advectivas horizontales muy intensas, la clorofila-a desde el lado interno del filamento deberá ser transportada a zonas oceánicas menos productivas. Para analizar este proceso de exportación se analizará la variabilidad temporal de los filamentos.

- Las imágenes satelitales tomadas del Proyecto SeaWiFS, NASA/Goddard Centro de Vuelo Espacial, a una resolución de 9 Km., serán empleadas para seguir la evolución del frente de afloramiento y de los filamentos asociados y su relación con la clorofila-a contenida y transportada.

GS

ORIGEN DE LOS DATOS

Los datos satelitales, fueron proporcionados por el Centro de Investigaciones y Modelaje Biológico y Pesquero del Instituto del Mar del Perú (IMARPE) y se han extraído de las fuentes siguientes:

1. Data information of SST

The Pathfinder Version 5.0 (V5) data set is a 20-year sea surface temperature (SST) record based on NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) observations and an improved Pathfinder algorithm developed by the NOAA National Oceanographic Data Center (NODC) and the University of Miami Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science (RSMAS), ver tabla 1.

Version 5.0 data are available from 1985 to the 2004

Spacial resolution: 4 km

2. Data information of CHL

Provided by the SeaWifs Project, NASA/Goddard Space Flight Center

Periodo: set 1997 to mar 2007, ver tabla 2.

Spacial resolution: 9 km.

En forma similar a la información de la temperatura superficial del mar, la de clorofila-a es proporcionada por el Centro de Investigaciones y Modelaje Biológico y Pesquero del Instituto del Mar del Perú en forma de matrices de 182x91.

DISEÑO DE SOFTWARE

Para el tratamiento de los datos proporcionados por IMARPE que permitirán la contrastación de la hipótesis y presentar una solución al problema de investigación planteado y, como consecuencia lograr los objetivos propuestos, se han diseñado un conjunto de programas informáticos en MatLab al que se le ha denominado "Looking the world from the Sky Program" el mismo que, a partir de información satelital de imágenes codificadas inicia el trabajo transformando la información de cada imagen que se encuentra como matriz, para luego ser ordenada secuencialmente, de manera que se pueda trabajar automáticamente la información deseada dentro del periodo de estudio establecido. Esto hace posible la observación de toda la información que se tiene dentro del periodo de investigación con el propósito de verificar, en primer lugar, la calidad que presenta dicha información en cuanto nitidez y claridad de manera que sea útil para los propósitos deseados o en caso contrario seleccionar la información que resulta poco confiable a fin de ser trabajada, es decir, someterla a un proceso de filtrado o limpieza y de esta manera evitar arribar a conclusiones sesgadas. Es común encontrar en la información satelital imágenes cubiertas con nubosidad captada por el satélite en el momento de barrido global que realiza por el océano mundial, entonces se hace imprescindible filtrar esta información que distorsiona las imágenes por lo que el programa procede al filtrado correspondiente estableciendo criterios para realizar dicha operación, estos criterios están




en función al tiempo disponible y forma de trabajo del investigador, uno de ellos es sacar o eliminar los puntos (píxeles), uno por uno, donde se observa información incorrecta, otro criterio es hacer otro programa que automáticamente elimina información que esta por fuera de los límites de temperatura de la zona de estudio, en la presente investigación se ha optado por el segundo criterio, pero también se ha trabajado con el primer criterio a fin de comparar tiempos de trabajo. Seguidamente, se determinan los gradientes térmicos los que permiten observar las temperaturas en la zona de estudio, así mismo posibilitan eliminar alguna información remanente que distorsionan las imágenes de ser el caso. Determinados los gradientes se procede a realizar las interpolaciones para obtener los promedios, adoptando el mejor criterio, que permita recuperar información con los datos que se tienen en la zona de análisis. Para el presente trabajo se aplicó el criterio de análisis de objetivo (OA)¹³ que consiste en hacer el grillado en la zona respectiva cuyo modelo matemático discretizado es el siguiente:

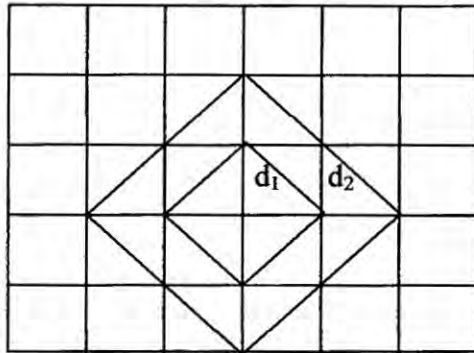
$$D_i = \frac{\sum_{j=1}^n D_j * e^{d_i}}{n} \dots(1)$$

Donde:

$$d_i = 0.7d_1 + 0.3d_2 \dots(2)$$



Como se observa en el esquema siguiente:



Llegado este momento entonces se tiene la información completamente filtrada y en condiciones de hacer un análisis sobre la calidad de las imágenes satelitales y, automáticamente mediante una corrida de programa determina el porcentaje de nubes e información distorsionadora que se ha eliminado durante todo el periodo de estudio, es decir desde 1985 hasta el 2004 en el caso de TSM, y desde diciembre 1997 a marzo 2007 en el caso de clorofila; mediante una serie de tiempos, quedando la información en condiciones de ubicar favorables que permitieron la ubicación del frente de afloramiento y los filamentos asociados y poderlos caracterizar en forma detallada y completa. El mismo procedimiento, pero con otros programas diseñados se trabajó los datos satelitales referida a las imágenes de clorofila-a (Chl-a), que permitió determinar la influencia de estas estructuras de mesoescala con el proceso biogeoquímico en la zona de estudio.

Pl. >

DESARROLLO DEL MODELO

ESQUEMATIZACION Y TOPOLOGÍA DEL MODELO

Caracterizar el filamento consistió en determinar su ubicación, longitud, desplazamiento, temporalidad y productividad.

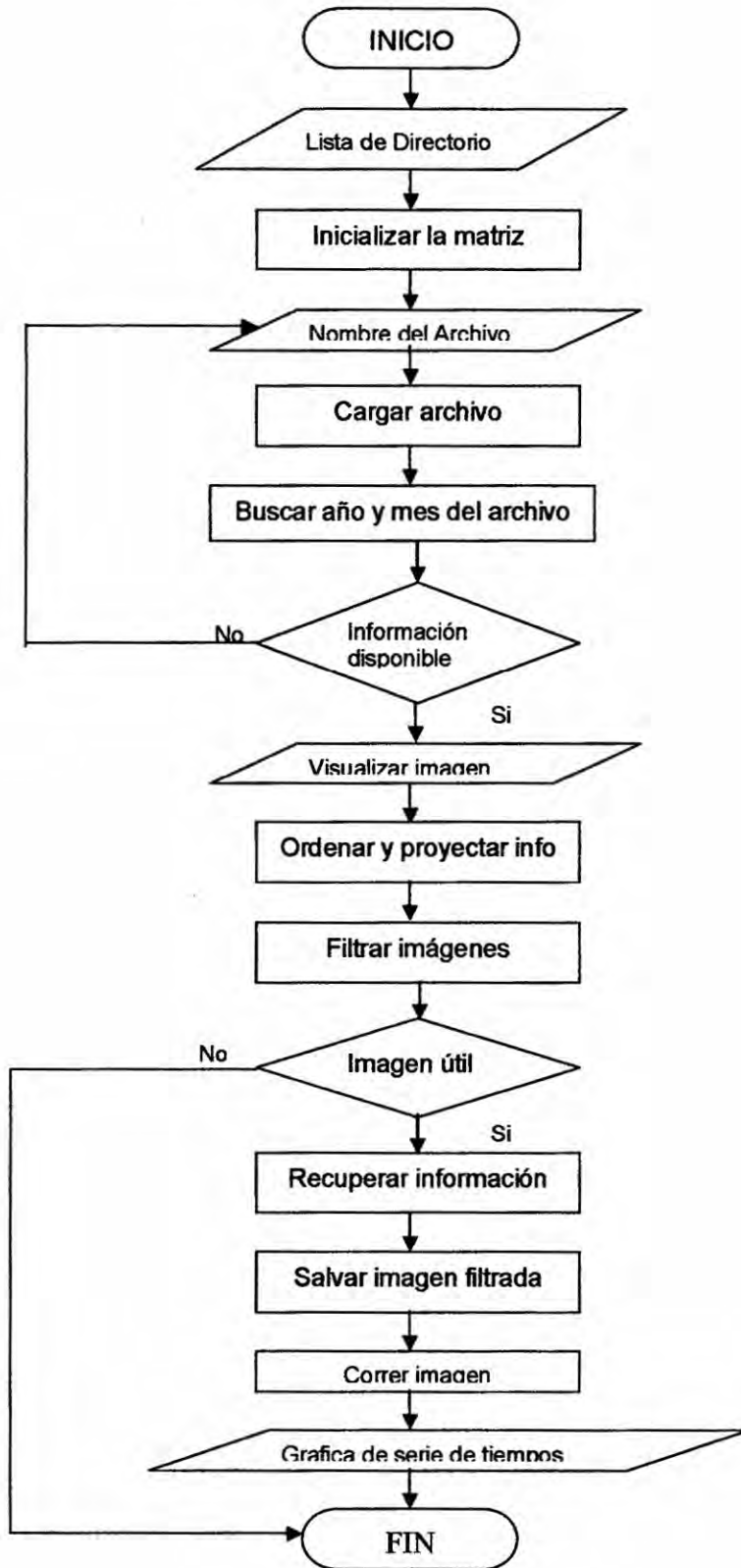
En consecuencia, el trabajo de investigación se orientó a observar en las imágenes satelitales filtradas para la ubicación de los filamentos y su influencia con la producción primaria (clorofila – a), entonces se trabajó un modelo computacional para realizar dicho trabajo para lo cual se tendrían como datos iniciales los proporcionados por el IMARPE relacionados con TSM y Chl-a.

Por lo tanto, se diseñaron programas computacionales en MatLab que permiten trabajar los datos histórica satelital, con la finalidad de determinar los gradientes térmicos e identificar las estructuras de mesoescala como son los filamentos.

La topología que describe la configuración del proceso para desarrollar el **LOOKING THE WORLD FROM THE SKY PROGRAM** es el diagrama de procesos adjunto:



DIAGRAMA DE PROCESOS

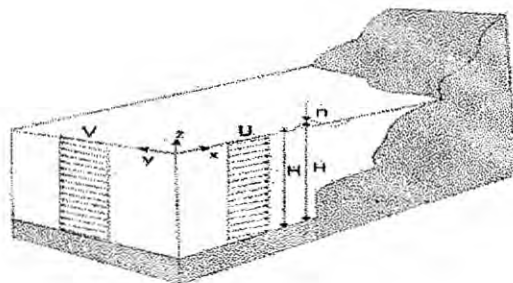


G/S

SISTEMA DE COORDENADAS

El sistema de referencia que encierra la zona de estudio es el sistema cartesiano, el mismo que tiene como coordenadas la longitud (eje X) y la latitud (eje Y); coordenadas que delimitan el área de investigación que se extiende desde los 77 °W hasta los 84°W de longitud y desde los 7°S hasta los 11°S de latitud.

Fig. 10: Sistema de Referencia



ECUACIONES GOBERNANTES

El estudio comprende todas las etapas especificadas en el diagrama de procesos que inicia con la disponibilidad de información satelital de TSM y Chl-a la misma que fue procesada, debido a que esta información proporcionada por el IMARPE se encontraba en forma de matrices se necesitaba, previamente, leerlas como datos y luego visualizarlas como imágenes. Lograr el propósito significó, necesariamente, disponer de un programa computacional que presente la información ordenada de manera que pueda facilitar su

AS

observación, interpretación y posterior manipulación. El algoritmo se basó en la ecuación que determina el gradiente total, siendo esta:

$$gradT_{-}dx_{(i,j)} = \frac{(sst_{(i+1,j)} - sst_{(i-1,j)})}{sw_{-}dist(Y_{(j)}Y_{(j)}), (X_{(i+1)}X_{(i-1)})} \dots Km; \dots (3)$$

$$gradT_{-}dy_{(i,j)} = \frac{(sst_{(i,j+1)} - sst_{(i,j-1)})}{sw_{-}dist(Y_{(j+1)}Y_{(j-1)}), (X_{(i)}X_{(i)})} \dots Km, \dots (4)$$

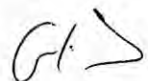
$$gradT = \sqrt{(gradT_{-}dx)^2 + (gradT_{-}dy)^2} \dots (5)$$

METODO NUMERICO UTILIZADO

A fin de dar solución al tratamiento de los datos satelitales y tener imágenes de calidad, es decir, imágenes filtradas se ha hecho uso de derivadas de primer orden, empleando el método numérico de diferencias finitas para la solución correspondiente.

DIFERENCIA FINITA

Una **diferencia finita** es una expresión matemática de la forma $f(x + b) - f(x + a)$. Si una diferencia finita se divide por $b - a$ se obtiene una expresión similar al cociente diferencial, que difiere en que se emplean cantidades finitas



en lugar de infinitesimales. La aproximación de las derivadas por diferencias finitas desempeña un papel central en los métodos de diferencias finitas del análisis numérico para la resolución de ecuación diferencial.

DIFERENCIA ANTERIOR, POSTERIOR Y CENTRAL

Sólo se consideran normalmente tres formas: la anterior, la posterior y la central.

Una **diferencia anterior** es una expresión de la forma

$$\Delta[f](x) = f(x + h) - f(x).$$

Dependiendo de la aplicación, el espaciado h se mantiene constante o se toma el límite $h \rightarrow 0$.

Una **diferencia posterior** se obtiene de la anterior reemplazando h por $-h$:

$$\nabla[f](x) = f(x) - f(x - h).$$

Finalmente, la **diferencia central** es la media de las diferencias anteriores y posteriores. Viene dada por

$$\delta[f](x) = \frac{f(x + h) - f(x - h)}{2}.$$

Gf.S

RELACION CON LAS DERIVADAS

La derivación de la función f en un punto x está definida por el límite

$$f'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h}.$$

Si h tiene un valor fijado no nulo, en lugar de aproximarse a cero, el término de la derecha es:

$$\frac{f(x+h) - f(x)}{h} = \frac{\Delta[f](x)}{h}.$$

Por lo tanto, la diferencia anterior dividida por h aproxima a la derivada cuando h es pequeño. El error de esta aproximación puede derivarse del teorema de Taylor. Asumiendo que f es continuamente diferenciable, el error es:

$$\frac{\Delta[f](x)}{h} - f'(x) = O(h) \quad (h \rightarrow 0).$$

La misma fórmula es válida en la diferencia posterior:

$$\frac{\nabla[f](x)}{h} - f'(x) = O(h).$$

Sin embargo, la diferencia central lleva a una aproximación más ajustada. Su error es proporcional al cuadrado del espaciado (si f es dos veces continuamente diferenciable).

$$\frac{\delta[f](x)}{h} - f'(x) = O(h^2).$$



CÁLCULO DE DIFERENCIAS FINITAS

La diferencia anterior puede considerarse un operador diferencial que hace corresponder la función f con Δf . El teorema de Taylor puede expresarse por la fórmula

$$\Delta = hD + \frac{1}{2}h^2D^2 + \frac{1}{3!}h^3D^3 + \dots = e^{hD} - 1,$$

Donde D denota el operador derivada, que hace corresponder f con su derivada f' . Formalmente, invirtiendo la exponencial

$$hD = \log(1 + \Delta) = \Delta - \frac{1}{2}\Delta^2 + \frac{1}{3}\Delta^3 + \dots.$$

Esta fórmula sigue siendo válida en el sentido de que ambos operadores dan el mismo resultado cuando se aplican a un polinomio. Incluso para funciones analíticas, las series de la derecha no convergen con seguridad, sino que puede tratarse de una serie asintótica. Sin embargo, pueden emplearse para obtener aproximaciones más aproximadas de la derivada. Por ejemplo, Los dos primeros términos de la serie llevan a:

$$f'(x) \approx \frac{\Delta[f](x) - \frac{1}{2}\Delta^2[f](x)}{h} = -\frac{f(x+2h) - 4f(x+h) + 3f(x)}{2h}.$$

El error de la aproximación es del orden de h^2 .

Las fórmulas análogas para los operadores posterior y central son

$$hD = -\log(1 - \nabla) \quad \text{and} \quad hD = \operatorname{arcsinh}(\delta).$$



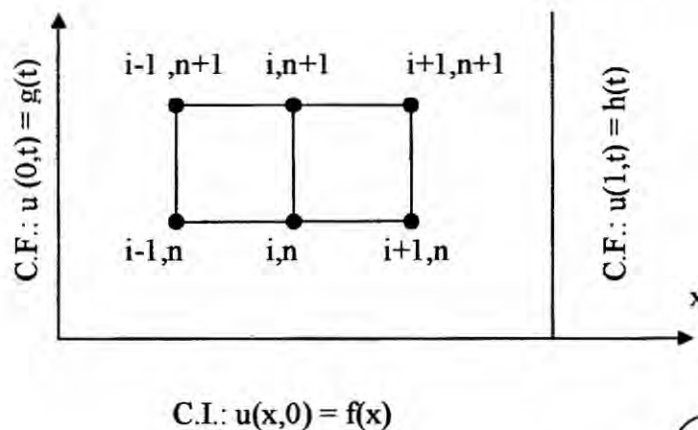
MÉTODOS DE DIFERENCIAS FINITAS

Otro aspecto importante es que las diferencias finitas aproximan cocientes diferenciales a medida que h se acerca a cero. Así que se pueden usar diferencias finitas para aproximar derivadas. Esta técnica se emplea a menudo en análisis numérico, especialmente en ecuaciones diferenciales numéricas ordinarias y ecuaciones en derivadas parciales. Los métodos resultantes reciben el nombre de **métodos de diferencias finitas**.

En el método de Crank – Nicolson, se obtiene a partir de aproximaciones de diferencia central para u_t y u_{xx} alrededor del punto $(x_p, t_n + \Delta t/2)$. La aproximación para u_{xx} se obtiene promediando valores u en los niveles del tiempo t_n y t_{n+1} . Las aproximaciones básicas son

$$(u_t)_{i,p} \cong (u_{i,n+1} - u_{i,n}) / \Delta t; p = n + 1/2$$

Esquemáticamente el método para un problema prototipo es:



Gr. >

ALGORITMO RESULTANTE

Como el primer objetivo fue obtener imágenes filtradas (limpias), para lograrlo se han depurado los datos que distorsionan la información en las imágenes así como también la nubosidad y una vez logrado se procedió a determinar los gradientes, eliminar nubes, realizar las interpolaciones, etc., para lo cual en cada proceso se han diseñado programas que realicen dichas operaciones. El algoritmo general resultante para lograr el objetivo, se presenta a continuación:

INICIO

Lista de directorio en el que se encuentra las matrices originales de TSM y Chl-a e inicializar la matriz.

Nombre del archivo que se desea leer

Cargar Archivo

Buscar año y mes del archivo

Si la información está disponible

Visualiza imagen

Ordenar y proyectar información en región de estudio: Gráfica el campo de TSM en la región, pone grilla, pone barra de color, pone grilla externa, nombra ejes X e Y, pone titulo

Filtrar imágenes eliminando datos malos mediante criterios de gradientes

Si la imagen es útil



Recuperar información mediante interpolación por método de análisis de objetivo

Salvar imágenes filtradas y guardarlas en archivo

Correr mediante serie de tiempos imágenes filtradas

Muestra grafica de serie de tiempos

Fin de Si

En caso contrario

Regresar a proceso: Nombre del archivo que se desea leer

Fin de Si

FIN

CONDICIONES INICIALES Y CONDICIONES DE FRONTERA

Condiciones Iniciales

Para iniciar la solución al problema planteado, cual es la ubicación tanto del frente de afloramiento como de los filamentos asociados y su posterior caracterización acerca de su evolución espacial y temporal; para luego determinar su influencia con el proceso biogeoquímico (clorofila-a), en la zona de Chimbote; se requieren los valores iniciales referidos a porcentaje de nubes, para lo cual es necesario realizar interpolaciones en 3D utilizando los datos más cercanos que se disponen en la zona en la que se necesita recuperar información perdida por el hecho mismo del filtrado de las imágenes.

Estos datos son obtenidos directamente del proceso de filtrado y de los gradientes en forma automática.



El uso sucesivo de los nuevos valores calculados como condiciones iniciales hacen posible que el proceso de cómputo disipe el error y permita converger a la obtención de imágenes filtradas de mayor calidad.

Condiciones de Frontera

Para la solución al problema antes descrito es necesario especificar las condiciones de frontera que posibiliten determinar las estructuras de mesoescala como son los filamentos y evaluar su variabilidad tanto en el espacio como en tiempo durante el corrimiento del programa a través de los gradientes térmicos que hacen posible la ubicación del frente de afloramiento, convirtiéndose éste en las condiciones de frontera que para presente caso serán fronteras móviles debido al movimiento que experimenta en el tiempo dando lugar a la formación de filamentos.

LISTADO DEL PROGRAMA

LOOKING THE WORLD FROM THE SKY PROGRAM, es un programa que contiene un conjunto de sub programas que han sido diseñados para leer y visualizar los archivos de la TSM y Chl-a que están en forma de matriz, nombra archivos que se desean leer, cargar archivos, buscar años y meses con nombre de archivo, lee y visualiza imágenes como graficas, calcula la TSM y elimina datos malos, filtrar nubes, determina gradientes térmicos, hace interpolaciones, guarda imágenes filtradas, determina porcentaje de nubes mediante serie de tiempos, etc. Los resultados obtenidos son las imágenes filtradas de la TSM y



66

CHI-a mensual y anual de todo el período de estudio. Estos programas se presentan a continuación:

Programa matrices.m

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% Creación de una matriz conteniendo todas las TSM  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
clear all  
close all  
cd SST  
list = dir('./SST/'); % pedir la lista del directorio donde haya las matrices  
originales  
SST = NaN*ones(182,91,240); % inicializar la matriz  
  
for i=4:length(list);  
    name = ['./SST/' list(i).name]; % nombre del archivo que queremos  
leer  
    load(name) %carga el archivo  
    SST(:,:,i-3) = sst';
```

```

    yr(i-3)=str2num(name(12:15)); % busca el año en el nombre del
archivo
    mn(i-3)=str2num(name(16:17)); % busca el mes en el nombre del
archivo
end
X = LON(1,:);
Y = LAT(:,1);

save ../matrices/SST SST X Y yr mn % salvar la matriz en un archivo
save 'D:\DATOS\matrices' SST X Y yr mn % salvar la matriz en un archivo

%%%%%%%%%%
% EMPEZAR AHI
%%%%%%%%%%

clear

close all

%load ../matrices/SST
load D:\DATOS\matrices

for i=1:240
    sst(:,i)=SST(:,i);
figure

```

```

pcolor(X,Y,sst')
shading flat
pause
clf
end

tsm(:, :) = SST(120,22,:);
figure
plot(tsm, '-.')
tsm_media = nanmean(tsm);
hold on
line([0 240],[tsm_media tsm_media])
tsm_std = nanstd(tsm);
line([0 240],[tsm_media+3*tsm_std tsm_media+3*tsm_std])
line([0 240],[tsm_media-3*tsm_std tsm_media-3*tsm_std])
line([0 240],[tsm_media-2*tsm_std tsm_media-2*tsm_std])
line([0 240],[tsm_media+2*tsm_std tsm_media+2*tsm_std])

```

2. Programa load_imagen.m

```

close all
t=0;
fid=fopen('listfile_sst.txt');

```

GIS

```

while 1
%for i=1:5
    t=t+1;
% for i=1:20
    tline = fgetl(fid);
    if ~ischar(tline), break, end

    disp(['Procesando imagen ',tline,' ...'])
    load(tline)
X = LON(1,:);
Y = LAT(:,1);
sst = sst';

clear L*

% figure(1)
% pcolor(X,Y,sst')
% shading flat
% caxis([16 28])
% colorbar
% hold off
%contour(X,Y,sst',[16:1:23],'k')
%

```



```

% %m_proj('mercator','lon',[-85 -75],'lat',[-11 -7]) % PROYECCION en la
region de estudio

% figure

% pcolor(X,Y,sst)% m_pcolor(X,Y,sst) % grafica el campo de TSM en
la region

% shading flat % saca la grilla

% caxis([16 24]) % para cambiar la escala de color

% colorbar % para poner la raya de color

% %m_coast('patch',[.6 .6 .6]) % pone la costa peruana

% %m_grid('box','fancy') % pone la grilla externa

% xlabel('Longitude') %añade el nombre al axis X

% ylabel('Latitude') %añade el nombre al axis Y

% title('Temperatura Superficial') %añade un titulo

```

3. Programa figure_sst.m

```

clear all

close all

load D:\DATOS\SST\sst_198501

%m_pcolor

```

GS

```

X = LON(1,:);
Y = LAT(:,1);
sst = sst';

clear L*

figure
pcolor(X,Y,sst')
shading flat
caxis([16 28])
colorbar
hold on
contour(X,Y,sst',[16:1:23],'k')

%m_proj('mercator','lon',[-85 -75],'lat',[-11 -7]) % PROYECCION en la
region de estudio

figure
pcolor(X,Y,sst')% m_pcolor(X,Y,sst') % grafica el campo de TSM en la
region

shading flat % saca la grilla

caxis([16 24]) % para cambiar la escala de color

colorbar % para poner la raya de color

%m_coast('patch',[.6 .6 .6]) % pone la costa peruana

```

GIS

```

%m_grid('box','fancy') % pone la grilla externa
xlabel('Longitude') %añade el nombre al axis X
ylabel('Latitude') %añade el nombre al axis Y
title('Temperatura Superficial') %añade un titulo

```

4. Programa EliminateBadValues.m

```

function [TSM] = EliminateBadValues(X,Y,SST,N1,N2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%

% ESA FUNCION PERMITE ELIMINAR DATOS MALOS "A LA MANO"

%

% Inputs: X,Y = la grilla

%      SST = el campo de datos que queremos limpiar

%      N1,N2 = los índices de tiempo con los cuales queremos trabajar

%

% Outputs: TSM = campo de datos igual a SST, conteniendo los datos
limpios

%      entre los tiempos N1 y N2

%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%

```

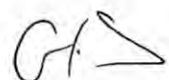


```

TSM = SST;

for i=N1:N2
    figure
    pcolor(X,Y,squeeze(TSM(:,:,i)))
    shading flat
    c = caxis;
    Xclic = -80;
    while Xclic<-77.5
        [Xclic,Yclic,Button] = ginput(1);
        if Button == 1
            indlon = nearestpoint(Xclic,X,'previous');
            indlat = nearestpoint(Yclic,Y,'next');
            TSM(indlon,indlat,i) = NaN;
            pcolor(X,Y,squeeze(TSM(:,:,i)))
            shading flat
            caxis(c);
            title(num2str(i))
        elseif Button == 3
            TSM(indlon,indlat,i) = SST(indlon,indlat,i);
            pcolor(X,Y,squeeze(TSM(:,:,i)))
            shading flat
            caxis(c);

```



```

        title(num2str(i))
    end
end
close
end

```

5. Programa nearestpoint.m

```

function [IND, D] = nearestpoint(x,y,m) ;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
% NEARESTPOINT - find the nearest value in another vector
%
% IND = NEARESTPOINT(X,Y) finds the value in Y which is the closest
to
% each value in X, so that  $\text{abs}(X_i - Y_k) \Rightarrow \text{abs}(X_i - Y_j)$  when k is not equal
to j.
% IND contains the indices of each of these points.
% Example:
% NEARESTPOINT([1 4 12],[0 3]) -> [1 2 2]
%
% [IND,D] = ... also returns the absolute distances in D,
% that is  $D == \text{abs}(X - Y(\text{IND}))$ 

```

GIS

```

%
% NEARESTPOINT(X, Y, M) specifies the operation mode M:
% 'nearest' : default, same as above
% 'previous': find the points in Y that are closest, but precedes a point in
X
%         NEARESTPOINT([0 4 3 12],[0 3],'previous') -> [NaN 2 1 2]
% 'next'   : find the points in Y that are closest, but follow a point in X
%         NEARESTPOINT([1 4 3 12],[0 3],'next') -> [2 NaN 2 NaN]
%
% If there is no previous or next point in Y for a point X(i), IND(i)
% will be NaN.
%
% X and Y may be unsorted.
%
% This function is quite fast, and especially suited for large arrays with
% time data. For instance, X and Y may be the times of two separate
events,
% like simple and complex spike data of a neurophysiological study.
% Nearestpoint('test') will run a test to show it's effective ness for
% large data sets
% Created      : august 2004
% Author       : Jos van der Geest
% Email        : matlab@jasen.nl

```

```
% Modifications :  
  
% aug 25, 2004 - corrected to work with unsorted input values  
  
% nov 02, 2005 -  
  
% apr 28, 2006 - fixed problem with previous points  
  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
  
%%
```

```
if nargin==1 & strcmp(x,'test'),
```

```
    testnearestpoint ;
```

```
    return
```

```
end
```

```
error(nargchk(2,3,nargin)) ;
```

```
if nargin==2,
```

```
    m = 'nearest' ;
```

```
else
```

```
    if ~ischar(m),
```

```
        error('Mode argument should be a string (either "nearest",
```

```
"previous", or "next")') ;
```

```
    end
```

```
end
```



```

if ~isa(x,'double') | ~isa(y,'double'),
    error('X and Y should be double matrices') ;
end

% sort the input vectors
sz = size(x) ;
[x, xi] = sort(x(:)) ;
[dum, xi] = sort(xi) ; % for rearranging the output back to X
nx = numel(x) ;
cx = zeros(nx,1) ;
qx = isnan(x) ; % for replacing NaNs with NaNs later on

[y,yi] = sort(y(:)) ;
ny = length(y) ;
cy = ones(ny,1) ;

xy = [x ; y] ;

[xy, xyi] = sort(xy) ;
cxy = [cx ; cy] ;
cxy = cxy(xyi) ; % cxy(i) = 0 -> xy(i) belongs to X, = 1 -> xy(i) belongs to Y
ii = cumsum(cxy) ;

```

af


```
ii = ii(cxy==0).'; % ii should be a row vector
```

```
% reduce overhead
```

```
clear cxy xy xyi ;
```

```
switch lower(m),
```

```
case {'nearest','near','absolute'}
```

```
    % the indices of the nearest point
```

```
    ii = [ii ; ii+1] ;
```

```
    ii(ii==0) = 1 ;
```

```
    ii(ii>ny) = ny ;
```

```
    yy = y(ii) ;
```

```
    dy = abs(repmat(x.',2,1) - yy) ;
```

```
    [dum, ai] = min(dy) ;
```

```
    IND = ii(sub2ind(size(ii),ai,1:nx)) ;
```

```
case {'previous','prev','before'}
```

```
    % the indices of the previous points
```

```
    ii(ii < 1) = NaN ;
```

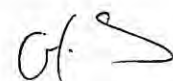
```
    IND = ii ;
```

```
case {'next','after'}
```

```
    % the indices of the next points
```

```
    ii = ii + 1 ;
```

```
    ii(ii>ny) = NaN ;
```



```

        IND = ii ;
    otherwise
        error(sprintf('Unknown method "%s"',m)) ;
    end

IND(qx) = NaN ; % put NaNs back in
% IND = IND(:) ; % solves a problem for x = 1-by-n and y = 1-by-1

if nargout==2,
    % also return distance if requested;
    D = repmat(NaN,1,nx) ;
    q = ~isnan(IND) ;
    D(q) = abs(x(q) - y(IND(q))) ;
    D = reshape(D(xi),sz) ;
end

% reshape and sort to match input X
IND = reshape(IND(xi),sz) ;

% because Y was sorted, we have to unsort the indices
q = ~isnan(IND) ;
IND(q) = yi(IND(q)) ;

```

GIS

```

% END OF FUNCTION

function testnearestpoint
disp('TEST for nearestpoint, please wait ... ');

M = 13 ;
tim = repmat(NaN,M,3) ;
tim(8:M,1) = 2.^[8:M].';
figure('Name','NearestPointTest','doublebuffer','on') ;
h = plot(tim(:,1),tim(:,2),'bo-',tim(:,1),tim(:,3),'rs-') ;
xlabel('N') ;
ylabel('Time (seconds)') ;
title('Test for Nearestpoint function ... please wait ...') ;
set(gca,'xlim',[0 max(tim(:,1))+10]) ;
for j=8:M,
    N = 2.^j ;
    A = rand(N,1) ; B = rand(N,1) ;
    tic ;
    D1 = zeros(N,1) ;
    I1 = zeros(N,1) ;
    for i=1:N,
        [D1(i), I1(i)] = min(abs(A(i)-B)) ;
    end
    tim(j,2) = toc ;

```

G.S.

```

    pause(0.1);
    tic;
    [I2,D2] = nearestpoint(A,B);
    tim(j,3) = toc;
    % isequal(I1,I2)
    set(h(1),'Ydata',tim(:,2));
    set(h(2),'Ydata',tim(:,3));
    drawnow;
end
title('Test for Nearestpoint function');
legend('Traditional for-loop','Nearestpoint',2);

```

6. Programa Proceso_Limpieza_Imagenes.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%
% PROGRAMA PARA LIMPIAR LAS IMAGENES DE TEMPERATURA
% SATELITAL
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%

% borrar la memoria de matlab y cerrar las figuras abiertas
clear
close all

```

Handwritten signature

```

% Lectura de los datos
load 'D:\DATOS\BuenasImagenes.mat'
SST=TSM; clear TSM

% Numero de las imágenes donde quiere empezar y terminar la limpieza
!
% A MODIFICAR CADA VEZ....

start = 1;
stop = 10;

% Esto no se Toca !!
TSM = EliminateBadValues(X,Y,SST,start,stop);
save BuenasImagenes TSM X Y yr mn stop


```

7. Programa sw_dist.m

```

function d=sw_dist(y,x,s)
d=sqrt((y(1)-y(2))^2+(x(1)-x(2))^2);

```



8. Programa test.m

```
clear all
cd SST
list = dir,
load coordenadas
for i=4:length(list)
    name = getfield(list(i),'name')
    load(name)
    sst(sst<15)=NaN;
    eval(['save -v6 ' name 'sst LAT LON']);
end

pcolor(lon,lat,CHL)
```

9. Programa test_elinateBadValues.m

```
clear
close all
load 'D:\DATOS\BuenasImagenes.mat'
```

```
N1 = 1;
N2 = 10;
```

Gf →

```

TSM = EliminateBadValues(X,Y,SST,N1,N2);

stop = 3;

save BuenasImagenes TSM X Y yr mn stop

% Calcular los gradientes

gradT_dx = NaN*sst; % inicializar una matriz
for i=2:length(X)-1
    for j=1:length(Y)
        gradT_dx(i,j) = (sst(i+1,j)-sst(i-1,j))./sw_dist([Y(j) Y(j)], [X(i+1) X(i-1)],'km');
    end
end

gradT_dy = NaN*sst; % inicializar una matriz
for i=1:length(X)
    for j=2:length(Y)-1
        gradT_dy(i,j) = (sst(i,j+1)-sst(i,j-1))./sw_dist([Y(j+1) Y(j-1)], [X(i) X(i)], 'km');
    end
end

gradT = sqrt(gradT_dx.^2 + gradT_dy.^2);

```

et S

```
ind_nub=find(gradT>70);
ind_nubT=find(isnan(tsm));

tsm=sst;
tsm(ind_nub)=nan;
gradT2=gradT;
gradT2(ind_nub)=nan;
nubT(t)=100*(length(ind_nubT)-3480)/16562;

nub(t)=length(ind_nub);

figure(2)
subplot(221)
surf(X,Y,gradT')
view(2)
caxis([0 70])
colorbar
shading interp
title(tline)

subplot(222)
surf(X,Y,gradT2')
view(2)
```

ct. S


```
caxis([0 70])
```

```
colorbar
```

```
shading interp
```

```
subplot(223)
```

```
surf(X,Y,sst')
```

```
view(2)
```

```
caxis([15 30])
```

```
colorbar
```

```
shading interp
```

```
title(tline)
```

```
subplot(224)
```

```
surf(X,Y,tsm')
```

```
view(2)
```

```
caxis([15 30])
```

```
colorbar
```

```
shading interp
```

```
pause(0.01)
```

```
%
```

```
% figure(3)
```

```
% surf(X,Y,tsm')
```

G.S.

```

% view(2)

%

% ind = find(abs(gradT(:))>=0.2);

% SST =sst;

% SST(ind) = NaN;

%

% gradT_dx(ind) = NaN;

%

% % interpolacion

% %interp2

% %griddata

%

% ind = find(isfinite(SST)==1);

% [x,y] = meshgrid(X,Y);

% x = x';y=y';

%

% SST2 = griddata(x(ind),y(ind),SST(ind),x,y);

tiempo=linspace(1985,2005,length(nub))

nn=nubT - 100*3480/16562;

n2=100*nub./(0.01*nn*16562);

```



```

figure
subplot (211)
plot(tiempo,nn)
% plot(tiempo,nubT)
axis([1985 2005 0 100])
xlabel('Tiempo (year)')
ylabel('Nubes en área de estudio (%)')

fclose(fid);

```

11. Programa BuenasImágenes.mat

```

clc;close all
t=0;
fid=fopen('listfile_temp.txt');
while 1
%for i=1:10
    t=t+1;
    tline = fgetl(fid);
    if ~ischar(tline), break, end

    disp(['Procesando imagen ',tline,' ...'])
    load(tline)

```

Gr. S

```

    sst=tsm';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% % calcular los gradientes
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
gradT_dx = NaN*sst; % inicializar una matriz
for i=2:length(X)-1
    for j=1:length(Y)
        gradT_dx(i,j) = (sst(i+1,j)-sst(i-1,j))./sw_dist([Y(j) Y(j)], [X(i+1) X(i-1)], 'km');
    end
end

gradT_dy = NaN*sst; % inicializar una matriz

for i=1:length(X)
    for j=2:length(Y)-1
gradT_dy(i,j) = (sst(i,j+1)-sst(i,j-1))./sw_dist([Y(j+1) Y(j-1)], [X(i) X(i)], 'km');
    end
end

gradT = sqrt(gradT_dx.^2 + gradT_dy.^2);

figure(1)

```

Handwritten signature or mark

```
subplot(211)
surf(X,Y,gradT')
view(2)
caxis([0 40])
colorbar
shading interp
title(tline)
```

```
subplot(212)
surf(X,Y,tsm)
view(2)
caxis([15 30])
colorbar
shading interp
pause(0.1)
end
```

12. Programa para calcular el ciclo estacional

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% CALCULAR EL CICLO ESTACIONAL
% %%%%%%%%%%%%%
%
```



```

% clear

% close all

% %load ../matrices/SST

% load D:\DATOS\matrices

%

% SST_mensual = NaN*ones(length(X),length(Y),12);

% std_SST_mensual = NaN*ones(length(X),length(Y),12);

% for i=1:12 % para cada mes

%   ind = find(mn==i);

%   clear tsm

%   tsm = SST(:,:,ind);

%   SST_mensual(:,:,i) = nanmean(tsm,3);

%   std_SST_mensual(:,:,i) = nanstd(tsm,3);

% end

%

% figure

% for i=1:12

%   subplot(4,3,i)

%   clear tsm

%   tsm(:,:,i) = SST_mensual(:,:,i);

%   pcolor(X,Y,tsm')

%   shading flat

%   hold on

```

G.S

```

% %contour(X,Y,f',[15:0.25:25],'k')
% caxis([15 25])
% colorbar
% end
%
%
%
% sst = SST_mensual(:, :, 10);
% % calcular los gradientes
%
% gradT_dx = NaN*sst; % inicializar una matriz
% for i=2:length(X)-1
%   for j=1:length(Y)
%     gradT_dx(i,j) = (sst(i+1,j)-sst(i-1,j))./sw_dist([Y(j) Y(j)], [X(i+1) X(i-
1)], 'km');
%   end
% end
%
% gradT_dy = NaN*sst; % inicializar una matriz
% for i=1:length(X)
%   for j=2:length(Y)-1
%     gradT_dy(i,j) = (sst(i,j+1)-sst(i,j-1))./sw_dist([Y(j+1) Y(j-1)], [X(i)
X(i)], 'km');
%   end

```

G/S

```
% end
```

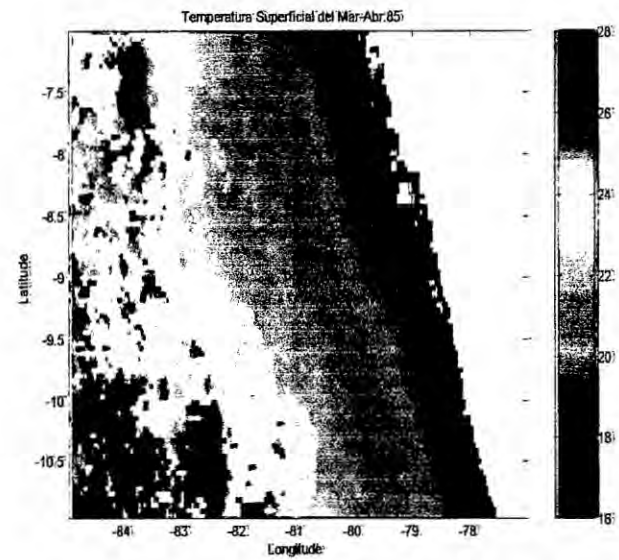
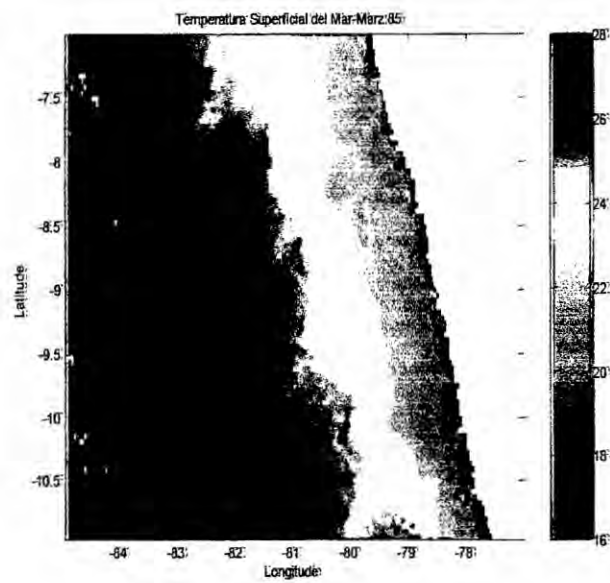
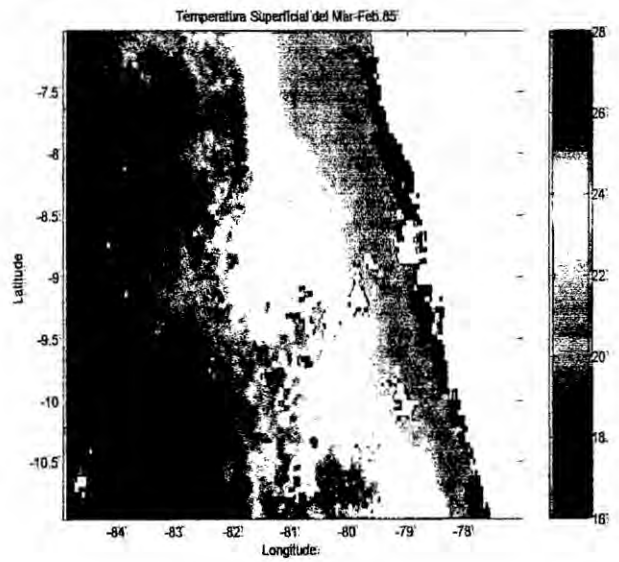
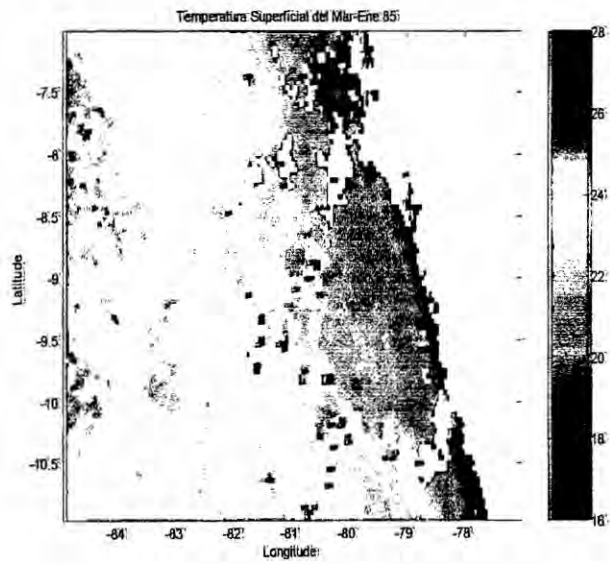
```
% gradT = sqrt(gradT_dx.^2 + gradT_dy.^2);
```

PRUEBAS REALIZADAS CON LOOKING THE WORLD FROM THE SKY PROGRAM

El resultado obtenido por la aplicación y corrida del software **LOOKING THE WORLD FROM THE SKY PROGRAM** es el que se presenta a continuación:

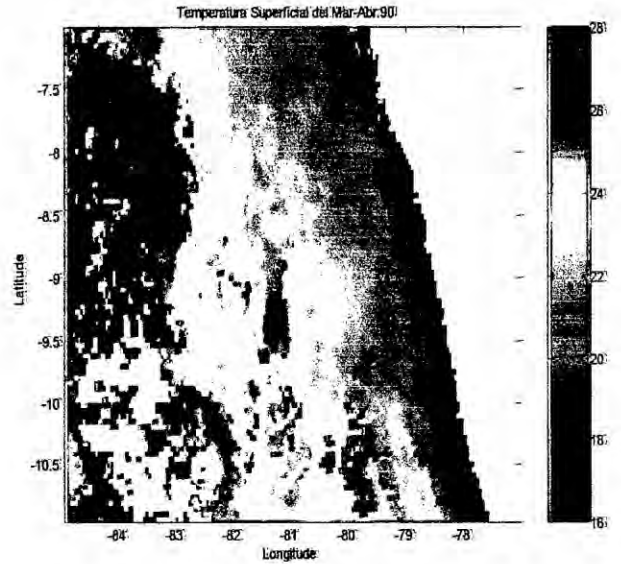
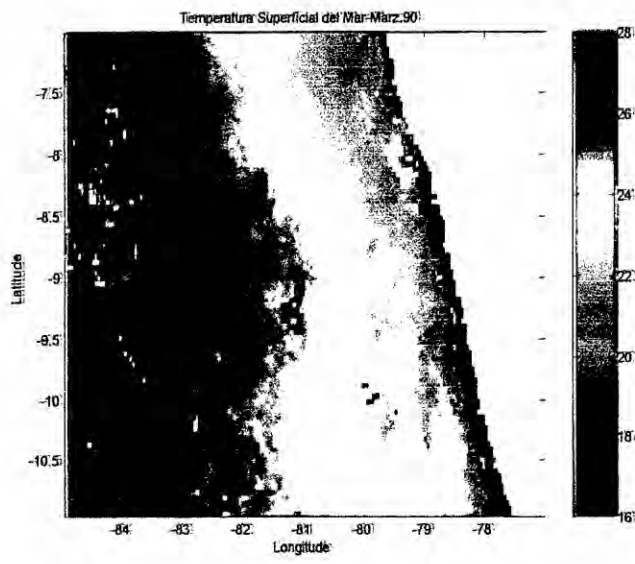
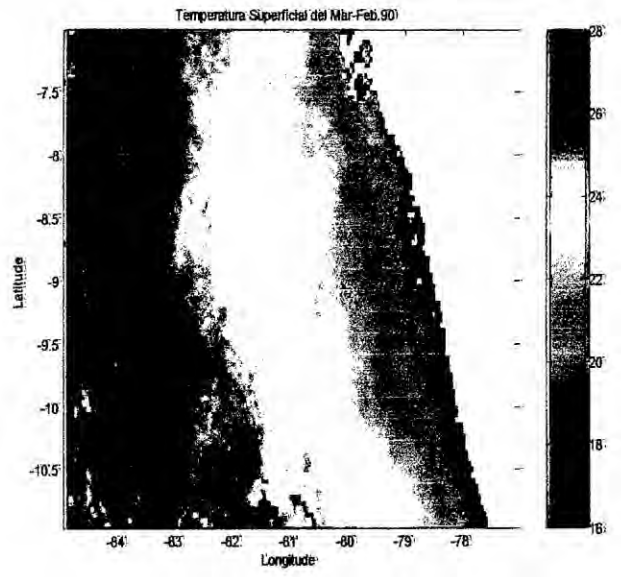
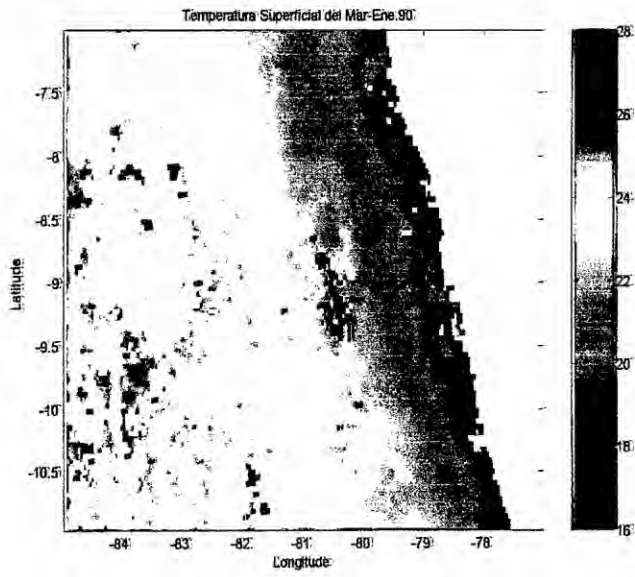


IMÁGENES SATELITALES ORIGINALES DE TSM 1985



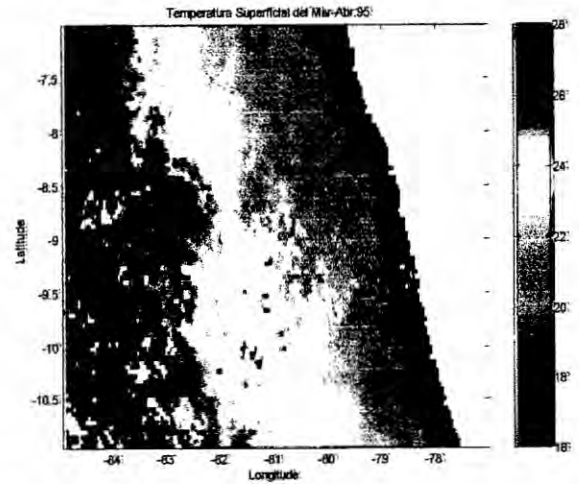
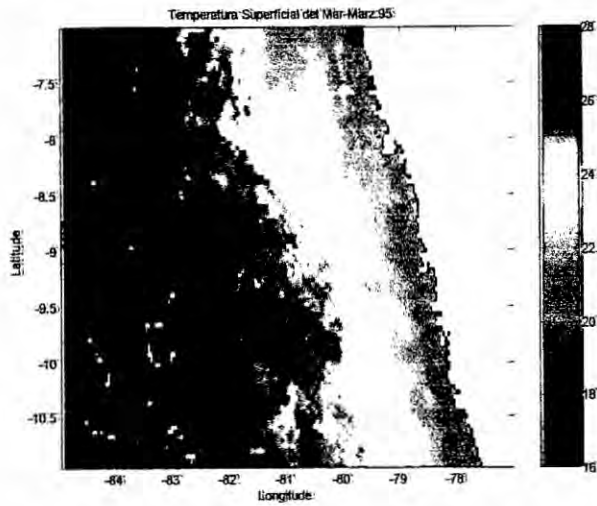
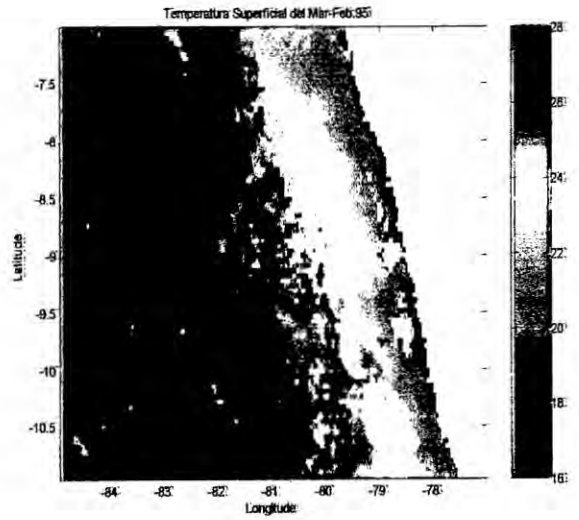
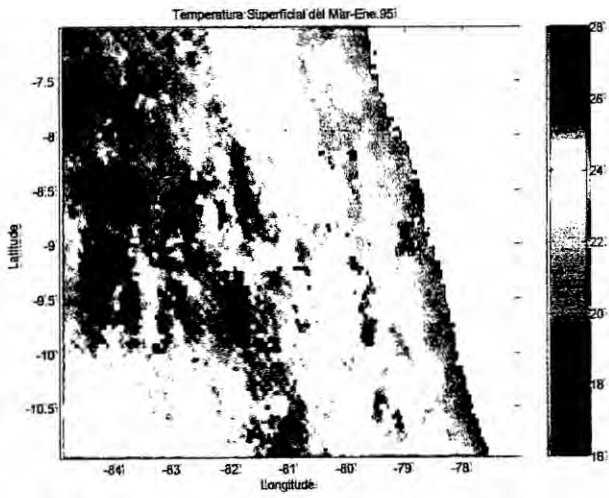
GIS

IMÁGENES SATELITALES ORIGINALES DE TSM 1990



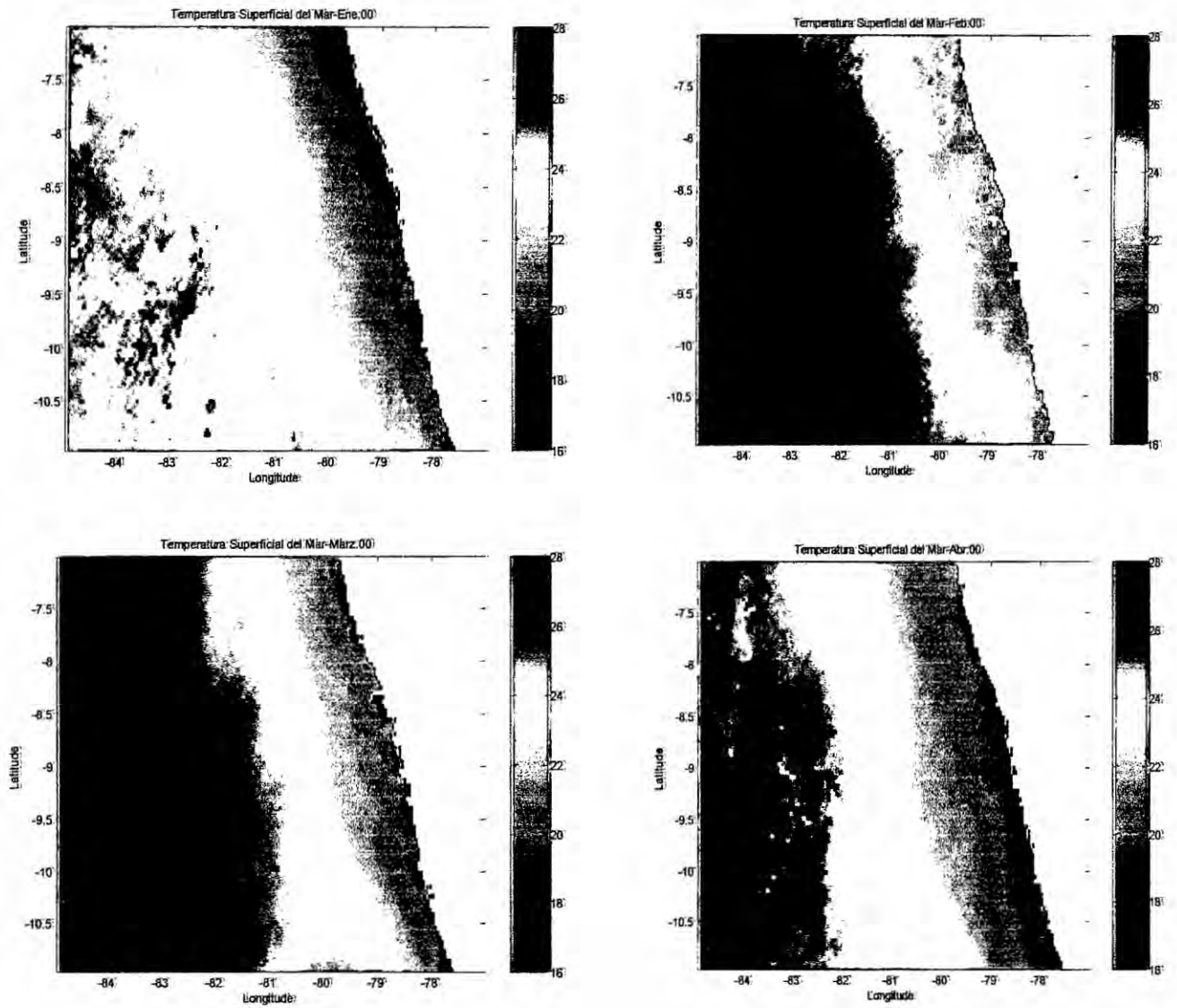
CS

IMÁGENES SATELITALES ORIGINALES DE TSM 1995



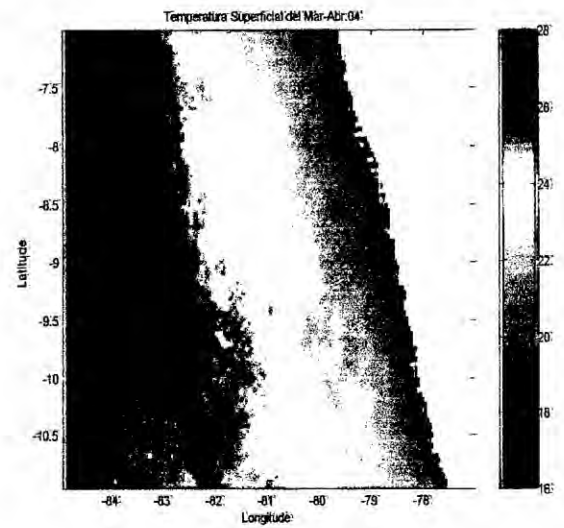
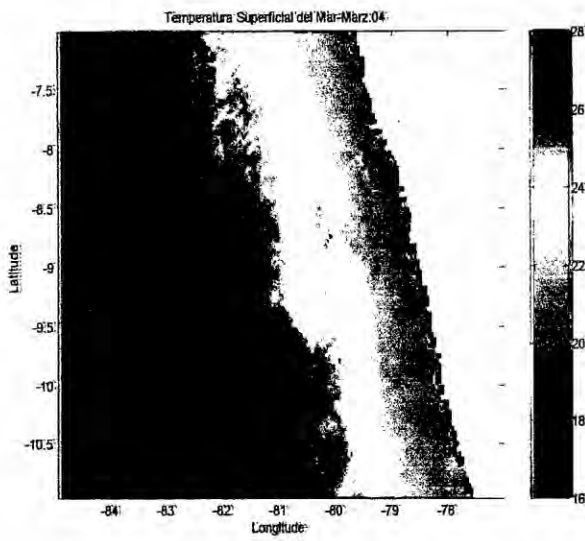
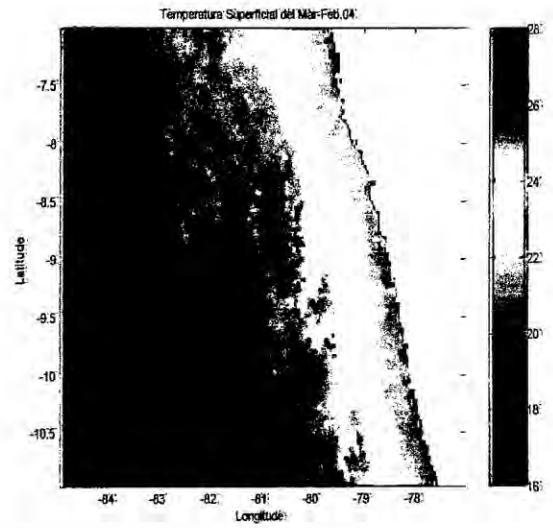
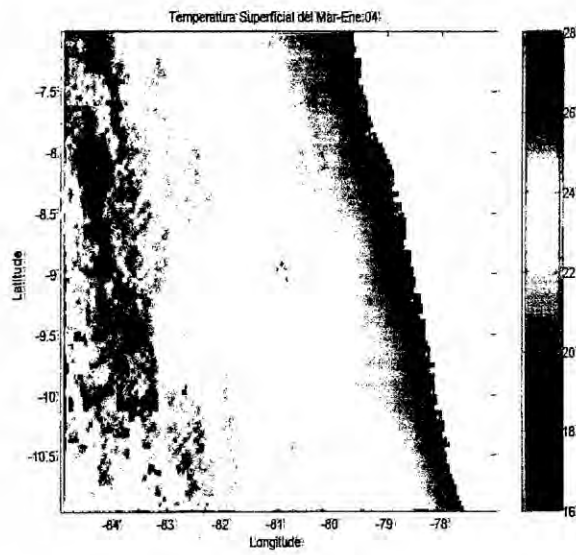
OPS

IMÁGENES SATELITALES ORIGINALES DE TSM 2000



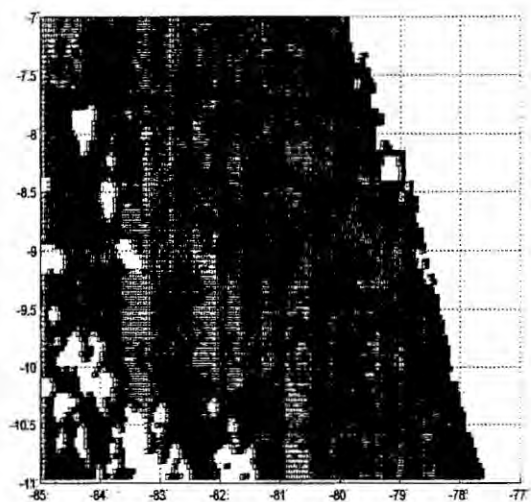
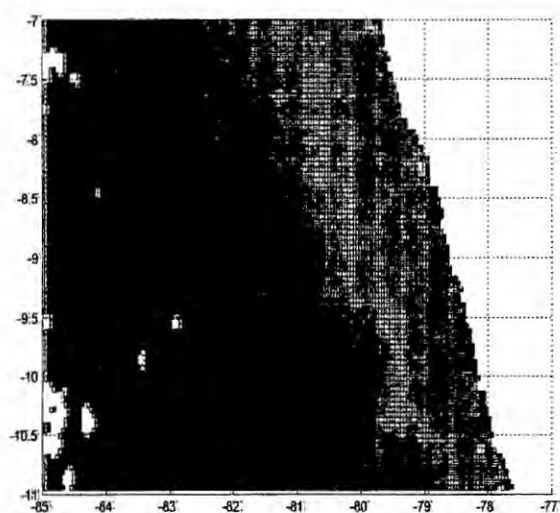
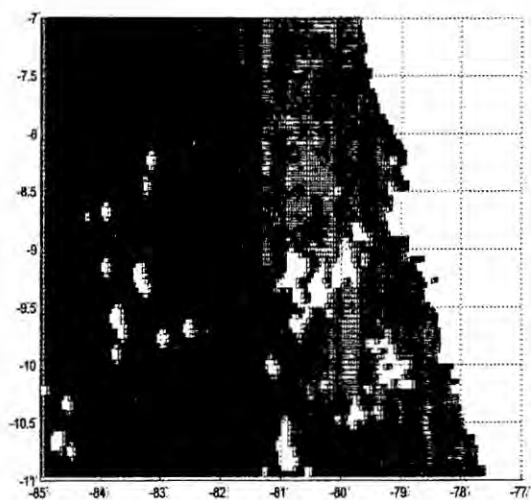
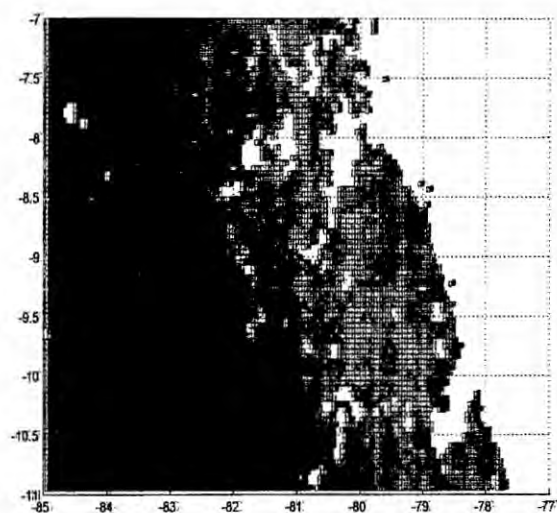
GIS

IMÁGENES SATELITALES ORIGINALES DE TSM 2004



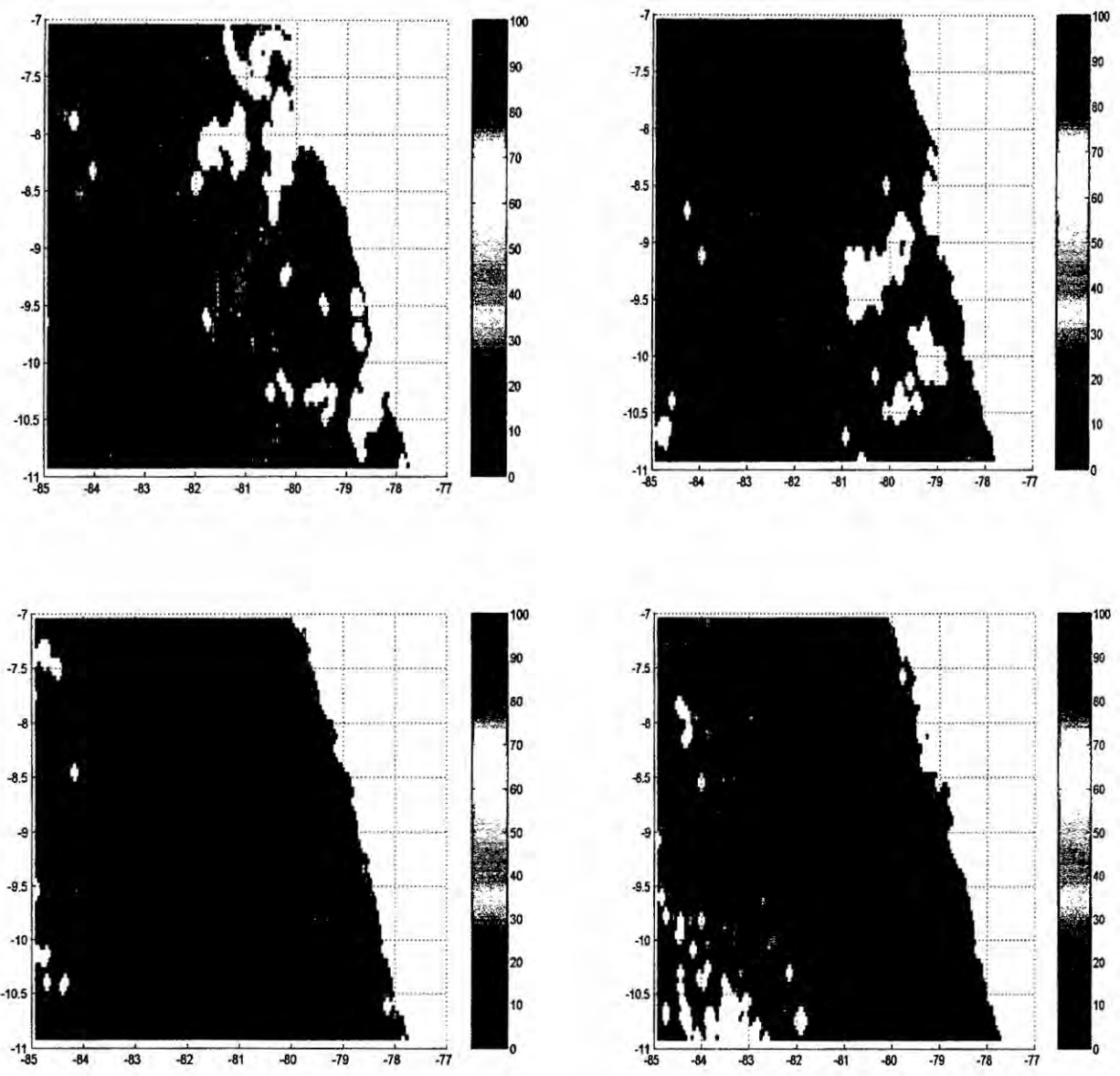
G.I.S

LIMPIEZA DE IMÁGENES SATELITALES DE TSM ENERO - ABRIL 1985



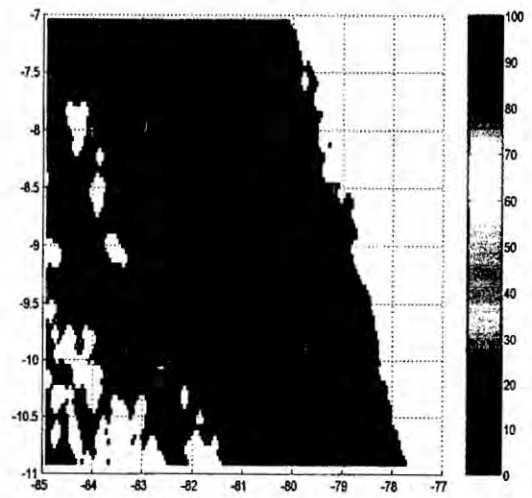
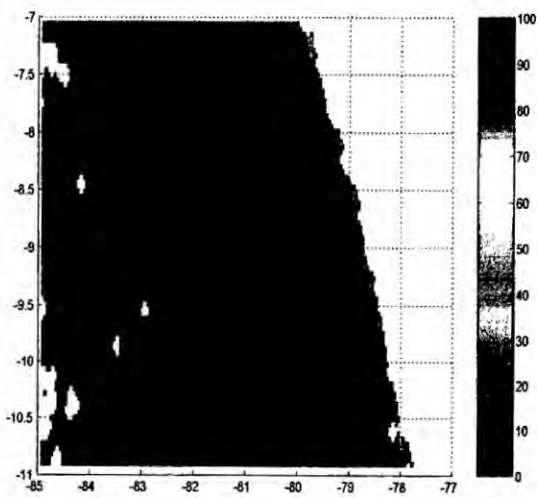
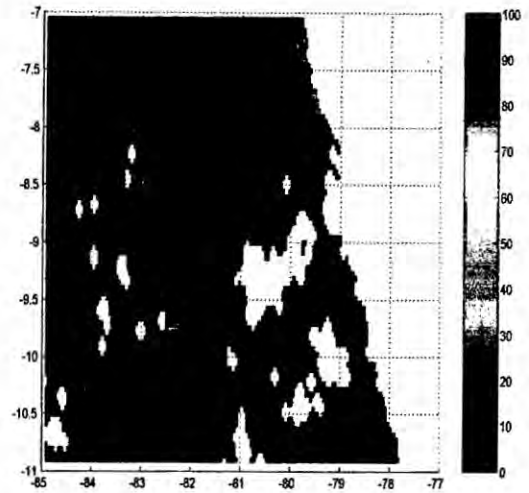
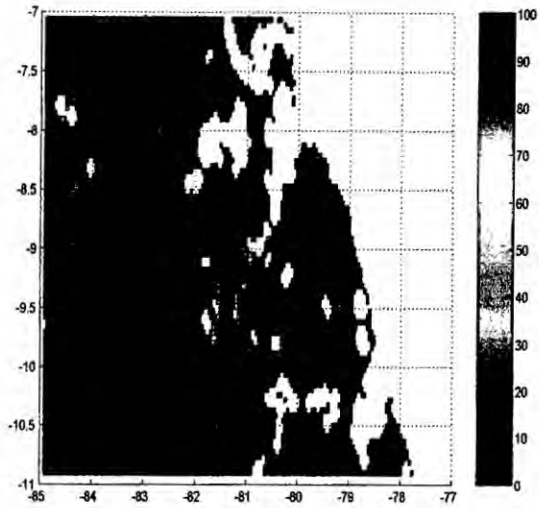
CS

GRADIENTES DE TEMPERATURA DE TSM DE ENERO – ABRIL 1985



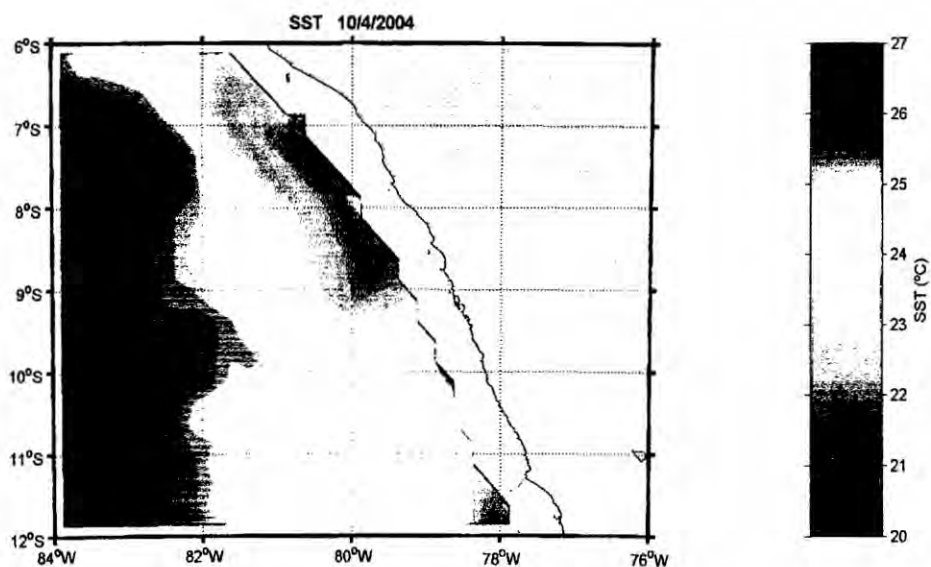
CHS

ELIMINACION DE GRADIENTES TERMICOS REMANENTES ENERO-ABRIL 1985

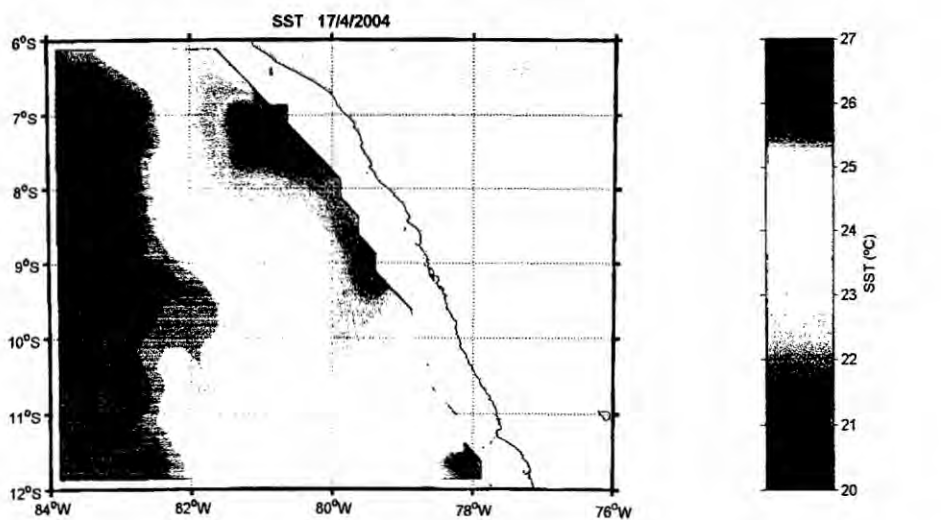


OT S

IMÁGENES SATELITALES DE TSM SIN FILTRAR ABRIL 2004

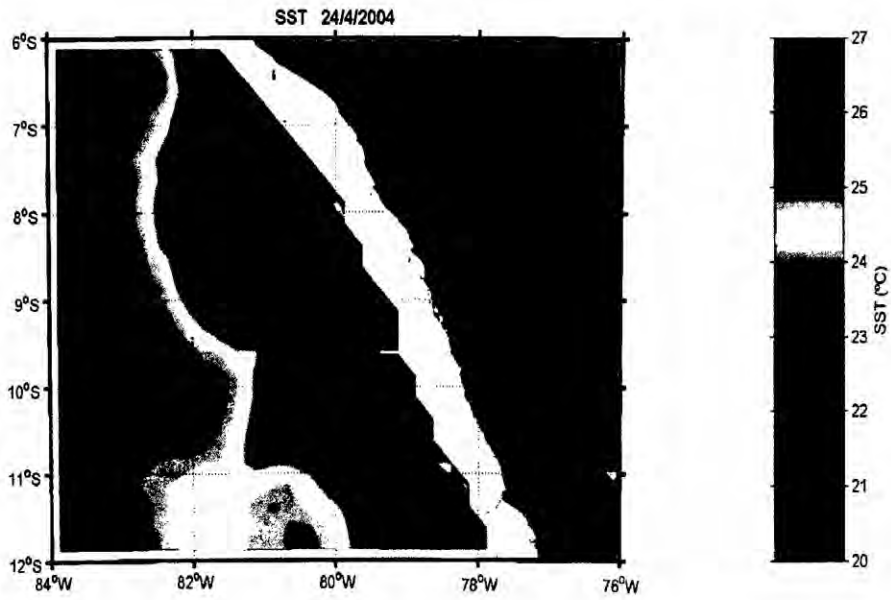


IMÁGENES SATELITALES DE TSM SIN FILTRAR ABRIL 2004

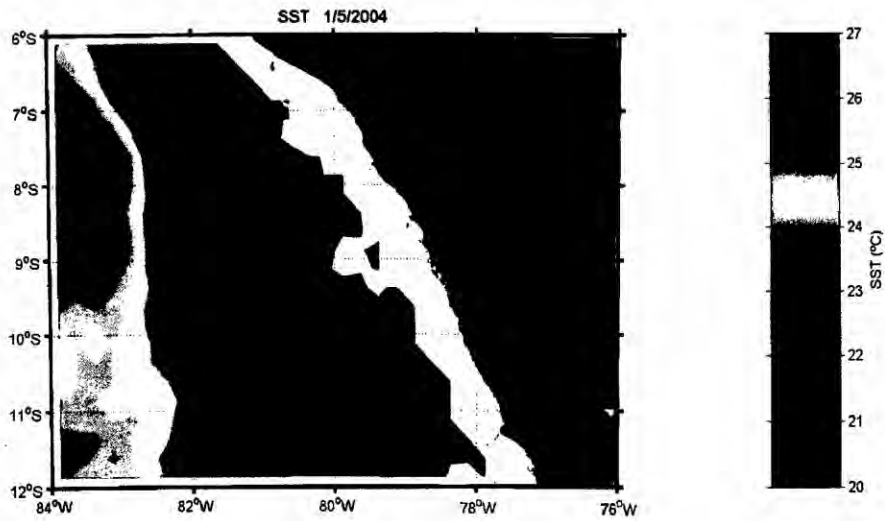


CD

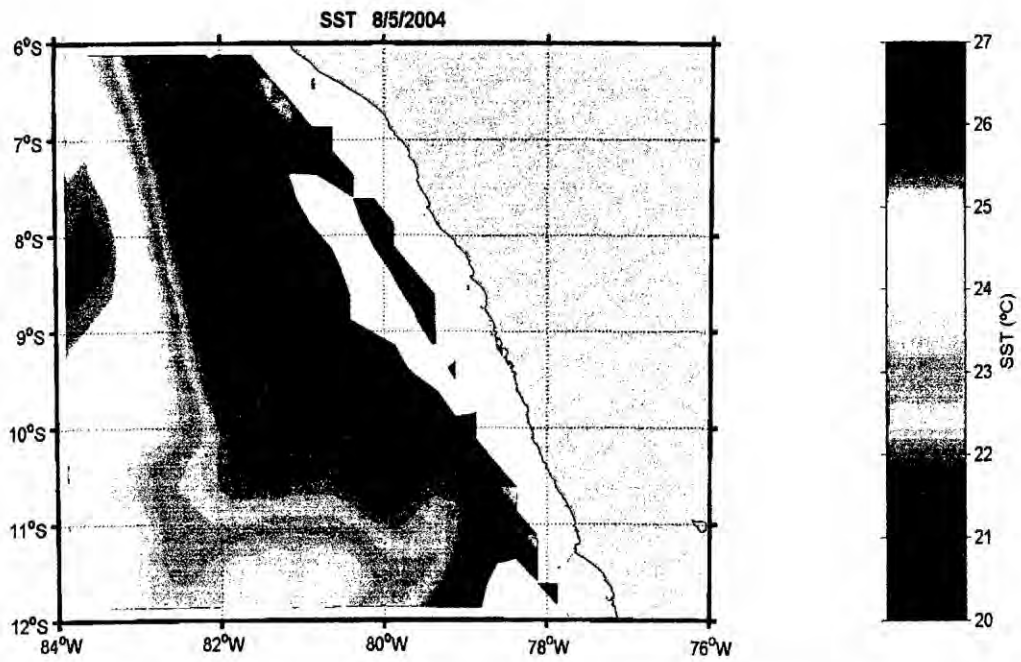
IMÁGENES SATELITALES DE TSM SIN FILTRAR ABRIL 2004



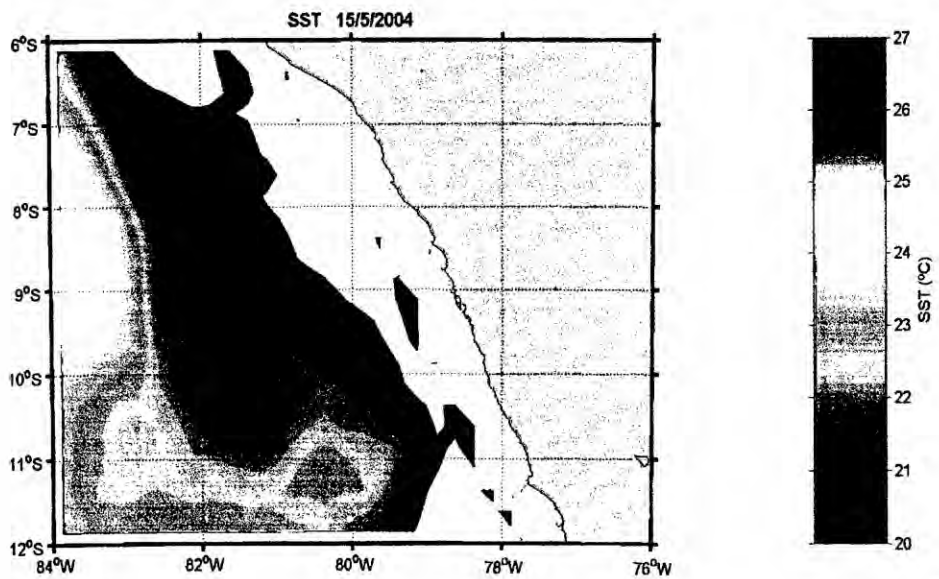
IMÁGENES SATELITALES DE TSM SIN FILTRAR MAYO 2004



IMÁGENES SATELITALES DE TSM SIN FILTRAR MAYO 2004

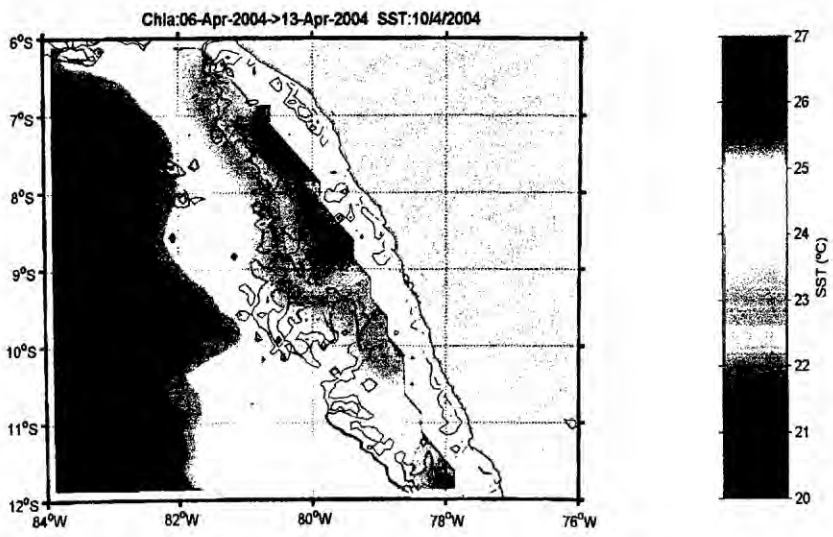


IMÁGENES SATELITALES DE TSM SIN FILTRAR MAYO 2004

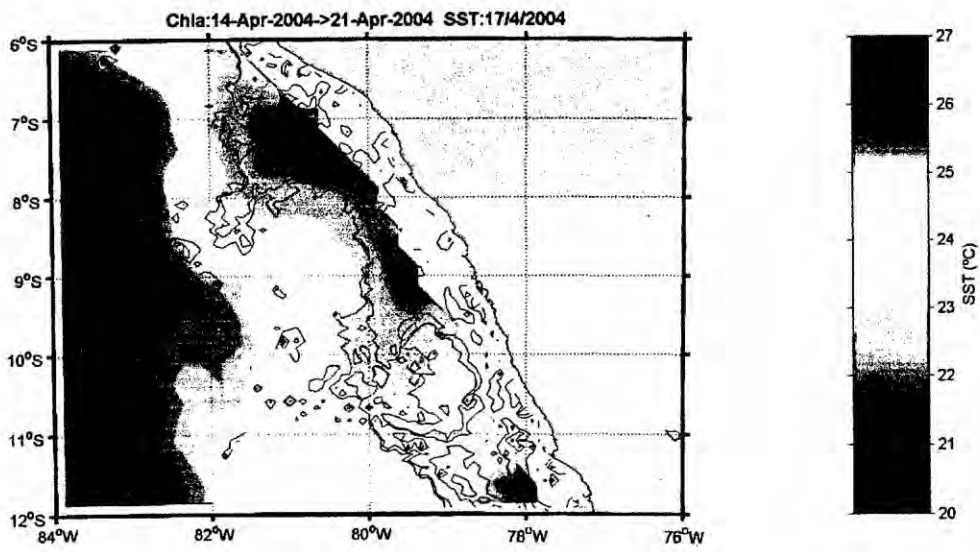


GT

IMÁGENES SATELITALES DE CLOROFILA-a SIN FILTRAR ABRIL 2004

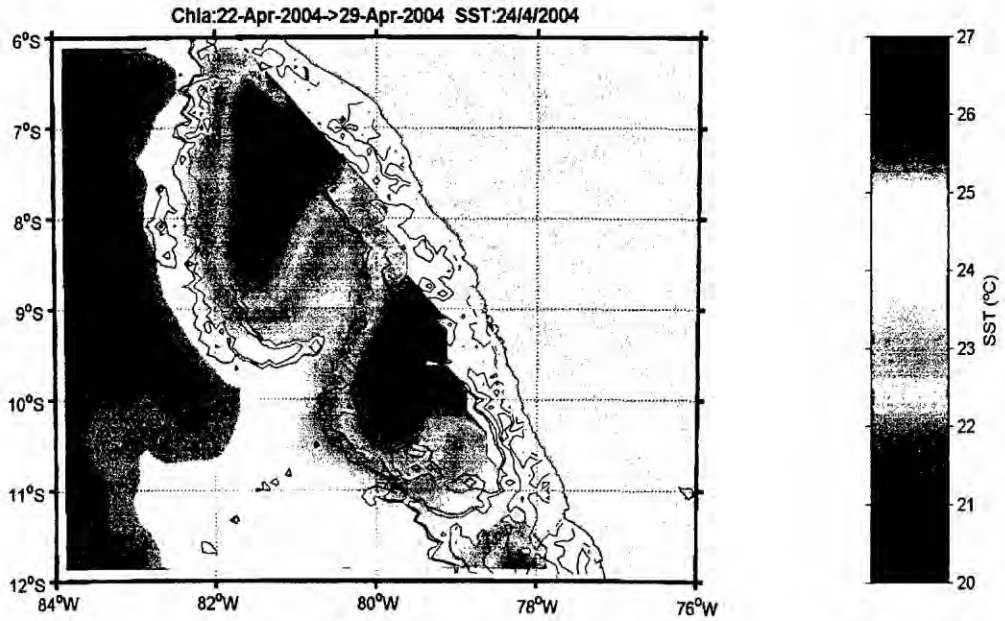


IMÁGENES SATELITALES DE CLOROFILA-a SIN FILTRAR ABRIL 2004

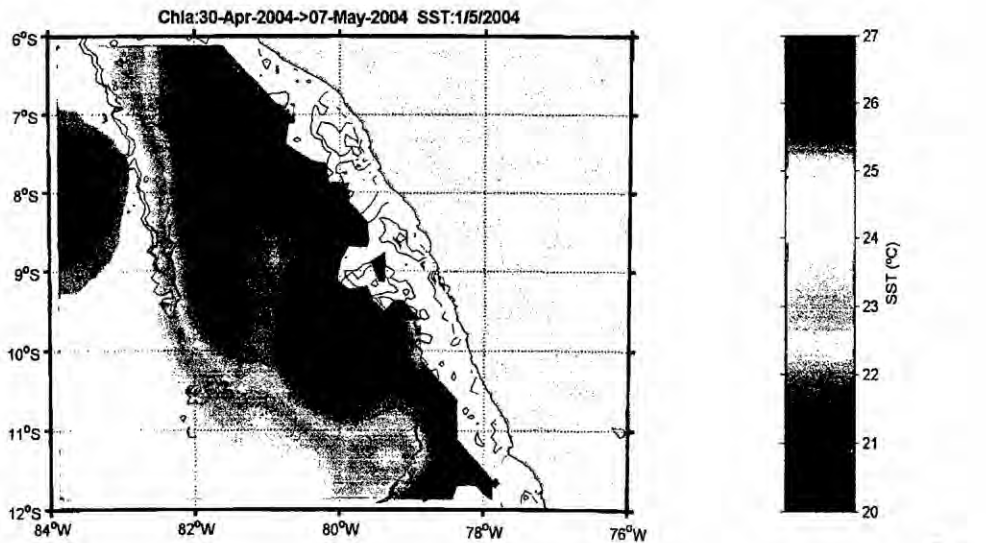


OK

IMÁGENES SATELITALES DE CLOROFILA-a SIN FILTRAR ABRIL 2004

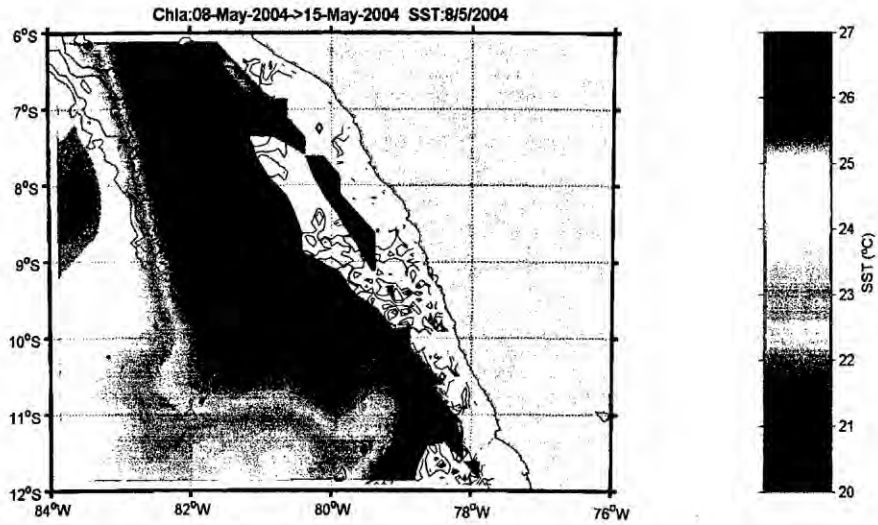


IMÁGENES SATELITALES DE CLOROFILA-a SIN FILTRAR MAYO 2004

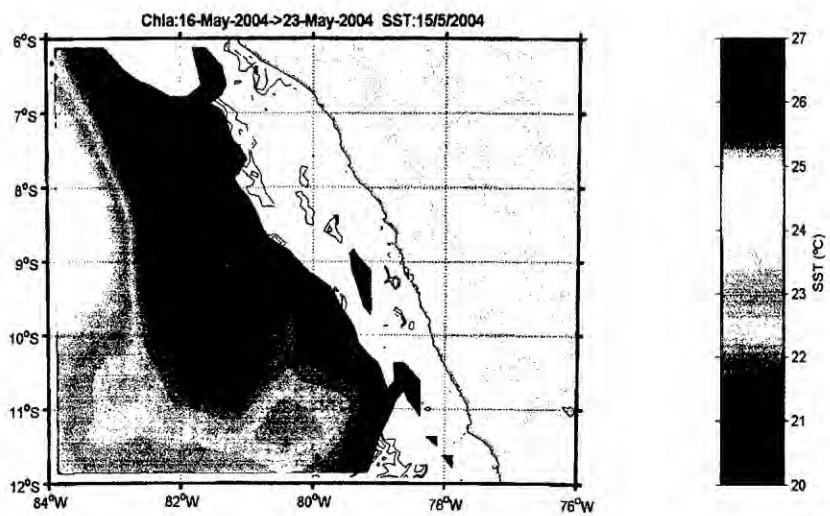


Handwritten signature

IMÁGENES SATELITALES DE CLOROFILA-a SIN FILTRAR ABRIL 2004

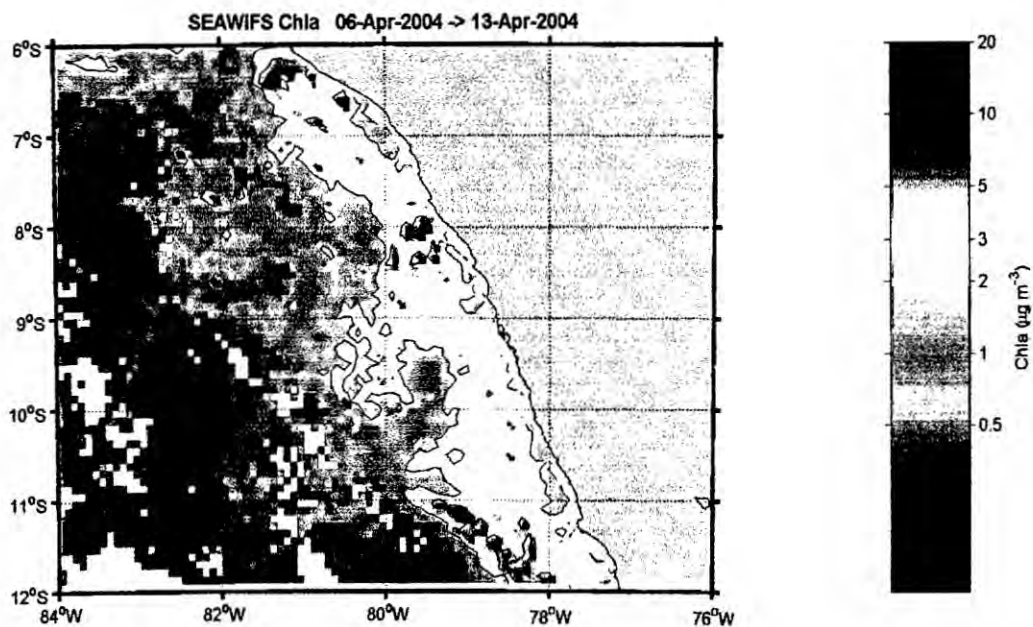


IMÁGENES SATELITALES DE CLOROFILA-a SIN FILTRAR MAYO 2004

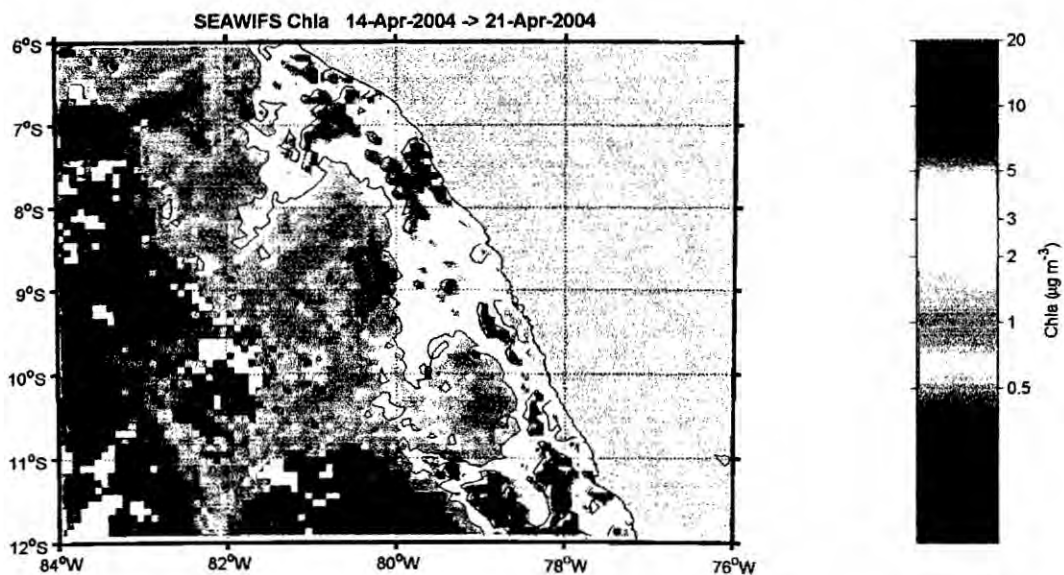


GHS

IMÁGENES SATELITALES DE CLOROFILA-a SIN FILTRAR ABRIL 2004

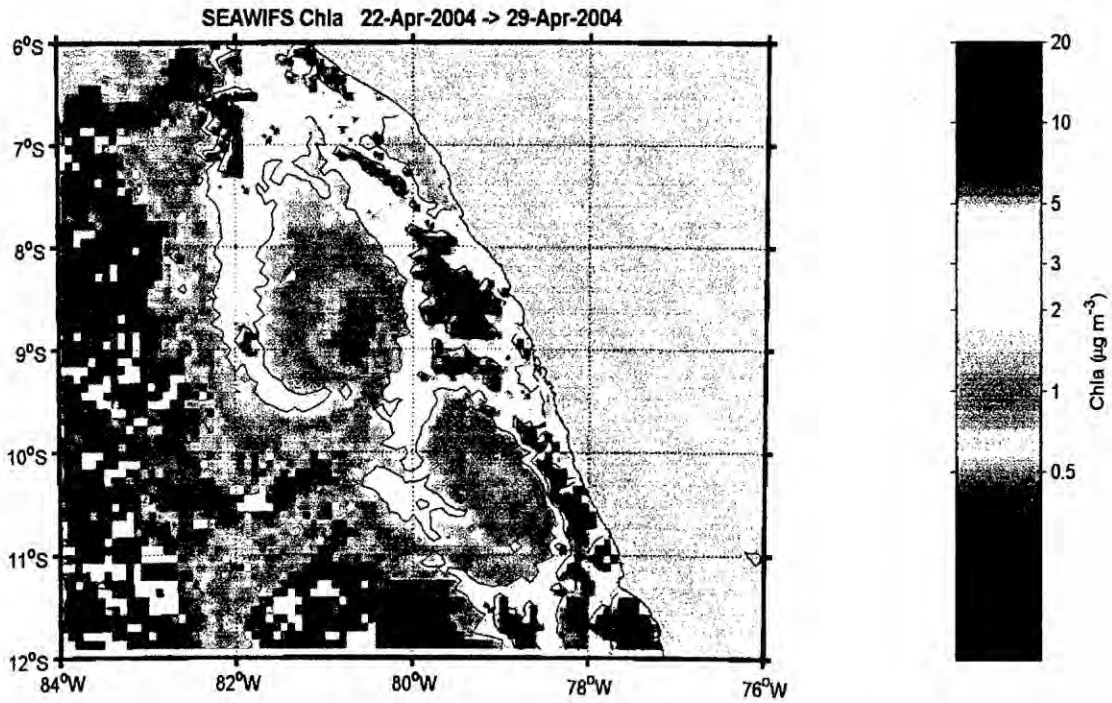


IMÁGENES SATELITALES DE CLOROFILA-a SIN FILTRAR ABRIL 2004

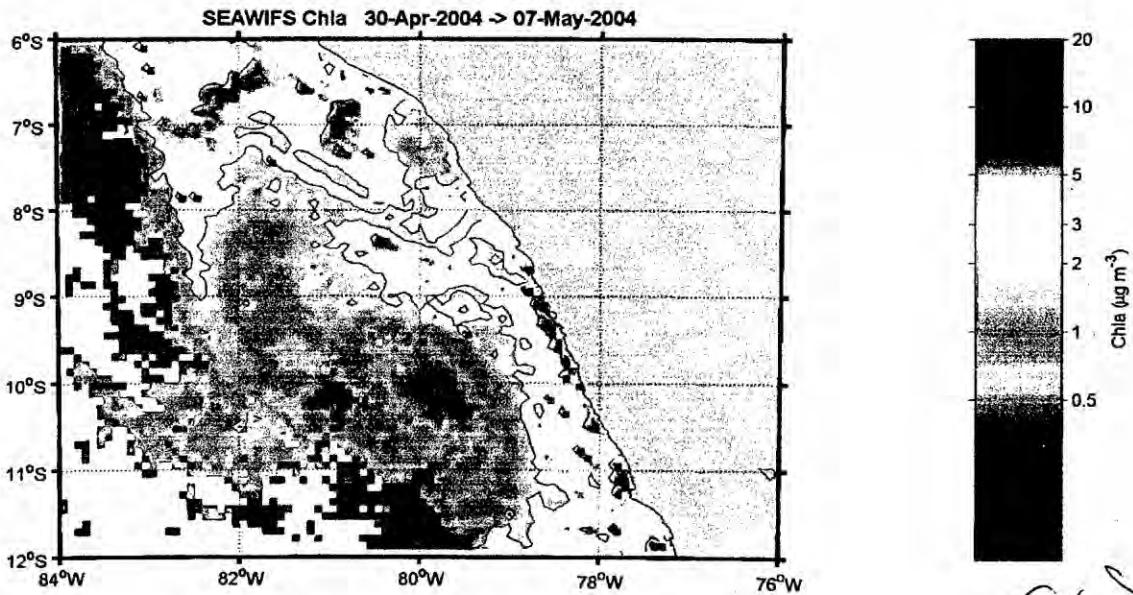


GIS

IMÁGENES SATELITALES DE CLOROFILA-a SIN FILTRAR ABRIL 2004

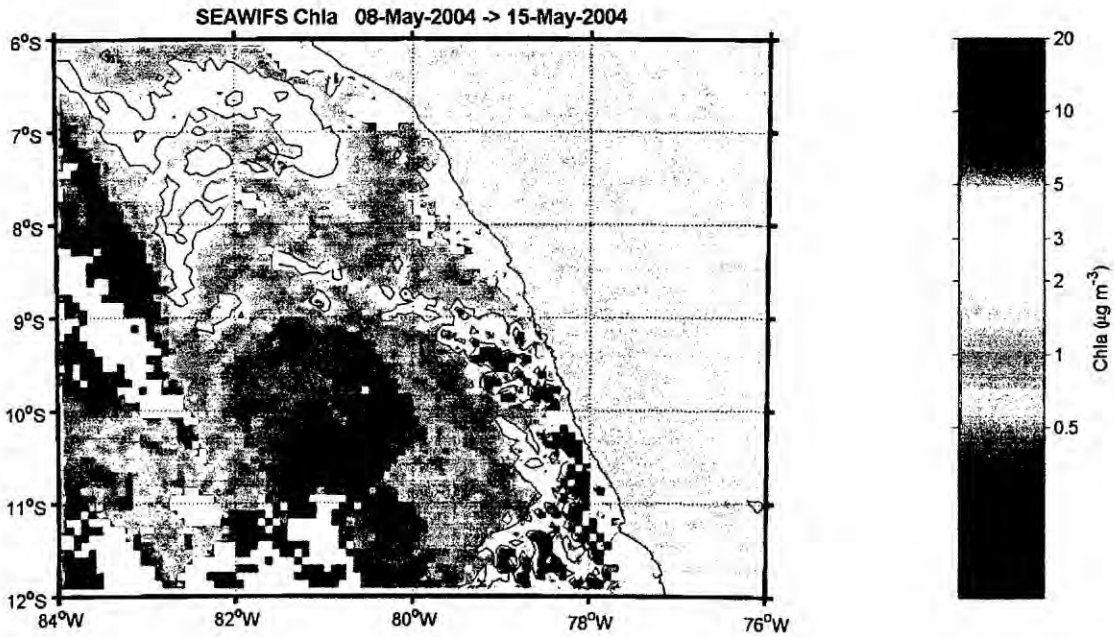


IMÁGENES SATELITALES DE CLOROFILA-a SIN FILTRAR MAYO 2004

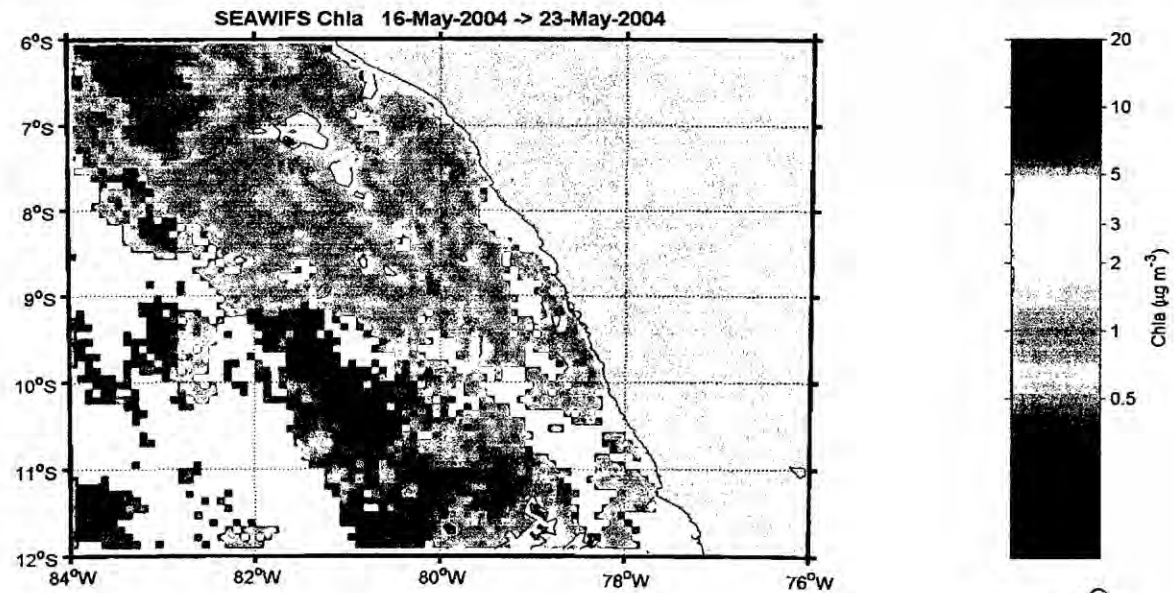


G.S

IMÁGENES SATELITALES DE CLOROFILA-a SIN FILTRAR MAYO 2004

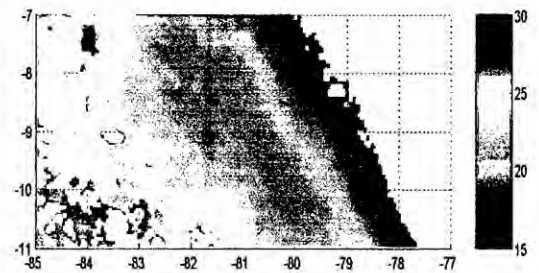
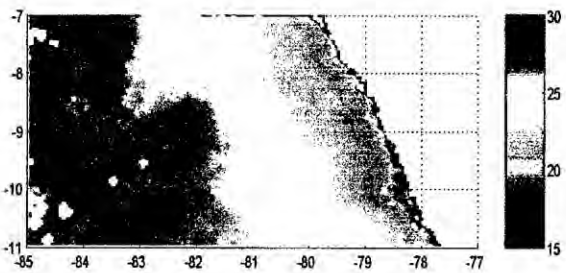
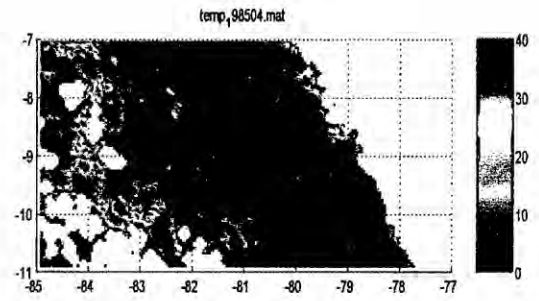
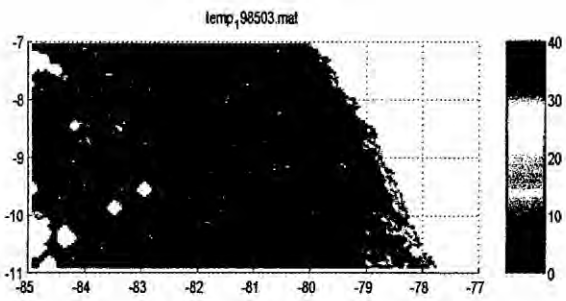
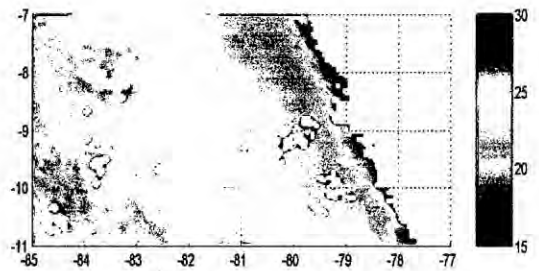
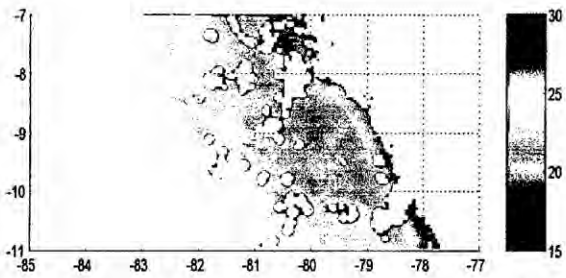
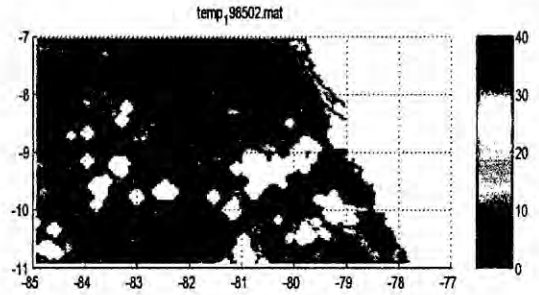
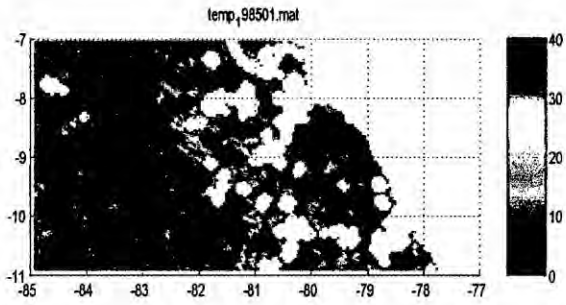


IMÁGENES SATELITALES DE CLOROFILA-a SIN FILTRAR MAYO 2004



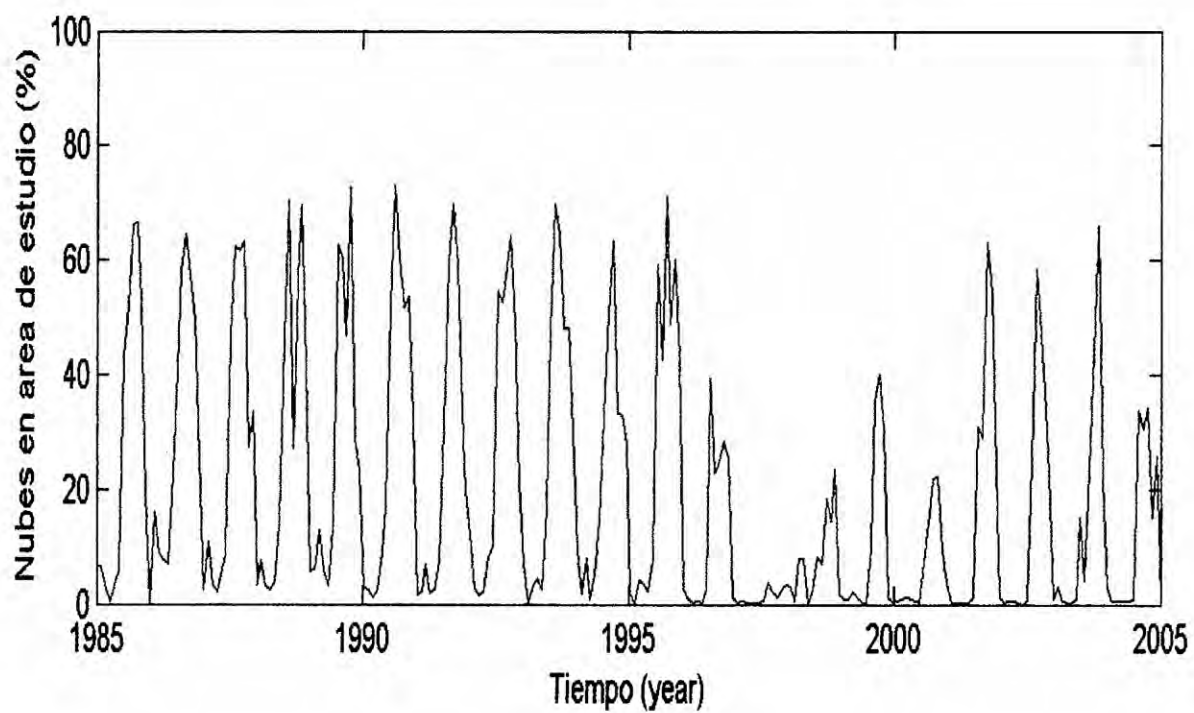
GIS

PROCESO DE INTERPOLACION PARA RECUPERAR INFORMACION 1985



G.L.S

SERIE DE TIEMPO DE IMÁGENES FILTRADAS: 1985 - 2004



GIS

V. RESULTADOS

En principio, se han obtenido las imágenes a nivel global (mundial) de la temperatura superficial del mar y de clorofila, las mismas que fueron procesadas con el programa LOOKING THE WORLD FROM THE SKY, desarrollado en MatLab lo que permitió extraer las imágenes de TSM que correspondían a la zona de estudio, procesándose en total de 240 imágenes captadas por el satélite, promediadas mensualmente desde el año 1985 hasta el 2004. De igual manera se procedió con las imágenes de clorofila promediadas semanalmente con un horizonte temporal de 9 años y 4 meses totalizando 448 imágenes procesadas, entre diciembre de 1997 y marzo de 2007.

El resultado obtenido de la observación de estas imágenes es que presentaron partes en las que no se pudo observar con nitidez el objeto de estudio, es decir, el frente de afloramiento, los filamentos, así como la clorofila asociados a éstos, de igual forma sucedió con las imágenes de clorofila; situación presentada debido a la presencia de nubosidades en el momento que el satélite está registrando las toma.

En consecuencia, se tuvo que desarrollar un programa de cómputo, siendo este, otro resultado obtenido, para poder realizar el filtrado o limpieza respectiva en cada una de las imágenes tanto de la temperatura superficial del mar como de clorofila. Obtenido este resultado, se tuvo que optar por un criterio de evaluación de las imágenes. Esto significó adoptar el criterio de evaluación automatizado, que permitió realizar el filtrado en forma automática a partir del



desarrollo de otro programa de computo que una vez obtenido y probado se procedió a realizar el filtrado con la finalidad de tener una mejor nitidez de las imágenes y poder observar con mayor claridad los fenómenos de mesoescala motivo de análisis. El resultado arribado de correr el programa son las imágenes originales presentadas anteriormente.

Dado, que estas imágenes filtradas perdieron información por el proceso mismo aplicado se tuvo que recuperar lo que era recuperable, aplicando la técnica del gradientes de temperatura, para lo cual se desarrollo otro programa que realice este trabajo y luego de correr el programa se obtuvo un nuevo resultado de imágenes (ver imágenes con gradientes de temperatura), que al ser observadas mostraban gradientes térmicos remanentes que debían ser eliminados, lo que se procedió a eliminarlos a partir del desarrollo y corrida de un nuevo programa desarrollado (ver imágenes con eliminación de gradientes térmicos remanentes).

Luego, las imágenes fueron sometidas a una recuperación de información final, lo que se logra con otro programa computacional desarrollado considerando la técnica de interpolación (ver imágenes resultantes del proceso de interpolación para recuperar información.

seguidamente, se hizo una corrida, con otro programa desarrollado, de todas las imágenes trabajadas (filtradas) aplicándose la técnica de serie de tiempo lo que permitió determinar que el promedio en porcentaje de nubes sobre el área de estudio, en el periodo comprendido de análisis de información es de 60 %, también se observa que entre los año 1996 y 2000 el porcentaje de



nubes es prácticamente cero, esto explica la presencia del fenómeno El Niño en nuestro país con consecuencias muy severas en todo nivel y de todo orden (ver grafica de serie de tiempos).

Por último, las imágenes que muestran importante información, imágenes sin filtrar (imágenes limpias) son aquellas en las que el porcentaje de nubosidad es bajísimo o casi nulo y son las imágenes en las que se observan, con nitidez, los fenómenos de mesoescala en estudio, cuya evolución toma un tiempo de aproximadamente entre 4 y 6 meses (ver imágenes sin filtrar), desde su aparición en la zona costera de Chimbote (77° C longitud) hasta su desaparición mar abierto a 80° C de longitud (ver imágenes limpias). También en estas imágenes se observa la relación con el proceso biogeoquímico (formación de clorofila) que se encuentra alrededor del filamento dando la apariencia de una capa que lo recubre, desapareciendo cuando desaparecen los filamentos, lo que permite concluir su relación directa con estos fenómenos de mesoescala.

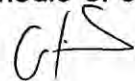
GLS

VI. DISCUSIÓN

Para el tratamiento de los datos proporcionados por el Instituto del Mar Peruano (IMARPE), resulto indispensable disponer de un programa informático que permitiera decodificar los datos y transformarlos en información, es decir, imágenes en las que se analizarían cada una de ellas a fin de investigar los fenómenos marinos en el frente costero de Chimbote. Es así como producto del trabajo de programación se llegó a obtener el LOOKING THE WORLD FROM THE SKY PROGRAM formado por un conjunto de sub rutinas con trabajos específicos que se realizaron con cada una de ellas, en el tratamiento de los datos hasta lograr el objetivo que consistió en convertir datos codificados en imágenes con información reveladora y útil para llevar adelante la investigación planteada.

Obtenidas las imágenes satelitales tanto de temperatura superficial del mar (TSM) como de clorofila (Chl-a), se determinó que éstas en un 62 % mostraban distorsiones en la información debido a que aparecían coloraciones en zonas que no correspondían por lo que se decidió hacer un filtrado (limpieza) a fin de recuperar cierta información, de manera que se tuvieran imágenes buenas por encima del 50 % del total. Objetivo obtenido con la aplicación de otros sub programas elaborados en MATLAB.

Así mismo, se analizaron las imágenes filtradas para determinar el porcentaje de nubes existentes, para lo cual se hizo uso de una técnica estadística de serie de tiempo, lo que se logra desarrollando otro sub programa que permitió realizar el trabajo llegándose a determinar que en promedio el 60



% de imágenes presentaban nubosidad, por lo que era factible hacer una limpieza y recuperar cierta información y convertirlas en imágenes útiles para los propósitos de la investigación. Es de importancia remarcar que en los resultados obtenidos se determinó un periodo comprendido entre 1996 y 1998 con porcentajes de nubosidad mínimos o casi nulos, lo que explica la presencia del fenómeno El Niño, con problemas de toda índole y muy fuertes para nuestro país.

De los resultados arribados en el tratamiento de las imágenes satelitales filtradas y también de las no filtradas, de la TSM y de Clorofila (escala de colores), se puede observar que muestran la presencia de frentes de afloramiento o frentes térmicos en la zona de Chimbote, debido a las diferencias de temperatura superficial del mar entre la zona costera y mar abierto, motivadas por los vientos como forzante principal que provoca estas surgencias en aguas marinas, y cuya desestabilización genera estructuras de mesoescala, entre los que están los filamentos, los que van cambiando en forma, tamaño, etc., a medida que el frente de afloramiento se desplaza mar abierto hasta desaparecer en el paso del tiempo.

Por otro lado, se nota también en las imágenes satelitales de distribución de clorofila (proceso biogeoquímico), la presencia de esta materia orgánica que se encuentra en el contorno de los filamentos, formando una especie de capa que lo envuelve, adhiriéndose a estos durante el desplazamiento del frente afloramiento, lo que revela la influencia con este proceso biogeoquímico.

En general varias imágenes analizadas presentan concentraciones significativas de aguas con temperaturas más frías, de acuerdo a la barra de colores, en las cercanías del borde de la plataforma continental, donde se aprecia la presencia marcada de frentes de afloramiento y la aparición de filamentos asociados al proceso biogeoquímico o clorofila adherida.

ATS

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. Los datos proporcionados por el Instituto del Mar Peruano hubiesen resultados ineficaces para el logro del propósito determinado si es que no se desarrollaba el programa informático que sea capaz de convertir los códigos encriptados de cada una de las imágenes, tanto de la temperatura superficial del mar como las imágenes de clorofila.
2. La teledetección de imágenes, captadas desde satélites a través de radiómetros avanzados de altísima resolución que llevan instalados, con áreas de barrido de 31,000 Km² y con precisión de 0.1 °C es una herramienta eficaz que hace posible investigaciones de fenómenos de grande escala, mesoescala y sub mesoescala, a costos relativamente bajos comparados con investigaciones in situ que llevarían un tiempo largo de investigadores embarcados y utilizando instrumentos que permitan monitorear las zonas marinas motivos de investigación.
3. Después del tratamiento y recuperación de información en imágenes distorsionadas, se han detectado frentes de afloramiento que aparecen en el frente costero de Chimbote y se desplazan mar afuera, formándose estructuras de mesoescala (filamentos) desapareciendo en el paso del tiempo, lo que revela la presencia de afloramientos o surgencias de grandes masas de agua que emergen desde las profundidades hacia la superficie llevando gran cantidad de compuestos biogeoquímicos que requieren de luz solar para que se produzca el proceso de fotosíntesis y

GJ

dar origen a la clorofila que seguirá la cadena biológica y tener finalmente producción de plancton (fitoplancton o zooplancton), es decir gran cantidad de producción primaria, lo que origina la presencia de abundantes producción ictiológica, haciendo una zona altamente productiva de pescado en determinados espacios temporales del año (mayo – octubre).

4. Las imágenes muestran que alrededor de los filamentos existe masa amarillenta dando la apariencia de una capa que lo envuelve y que viaja conjuntamente en el desplazamiento, conocida con el nombre de clorofila, lo que muestra la influencia o asociatividad de estos fenómenos de mesoescala con este compuesto biogeoquímico.

RECOMENDACIONES

1. La teledetección es una técnica avanzada y moderna para determinar estructuras particulares que forman grandes masas de agua de mar con características especiales, pero existen otras técnicas en las que el investigador actúa directamente mediante instrumentos para monitorear y detectar estas estructuras, lo que demanda costos muy elevados que sería muy difícil conseguirlos por investigadores individuales, lo que va en desmedro del desarrollo de un país.
2. A fin de posibilitar la investigación de nivel se debería apoyar económicamente las investigaciones que se deriven de la presente investigación.

1. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[2] BARBER. R.T, SMITH R.I. 1981. **Coastal upwelling ecosystems**. Edit. Pergamon Press, New York. 31-43.

[3] BOWMAN M, ESAIAS W. 1978. **Oceanic fronts in coastal proceses**. Springer - Verlag, Berlin – Heidelberg. Pp. 116.

[4] UNESCO. 1988. **Las mediciones del mar por satélite: Posibilidades que ofrecen y problemas que plantean**. Documento Técnico. Ciencias del Mar N° 46. p. 106.

[5] LUTJEHARMS, J., MEEUWIS, J.M. 1987. **The extent and variability of South-East Atlantic upwelling**. South African Journal of Marine Science. 5: 51-62.

[6] CHAIGNEAU A. 2007. **Mesoscale activity off Perú - Comparison of two eddy identification algorithms and spatio – temporal vortex property variations**. Progress in Oceanography. Submitted. 5-10.

[7] Rojas A.J, Eche LLenque J. 2006. **La Temperatura de la Superficie del Mar Peruano a Partir de Imágenes AVHRR/ NOAA 2000 - 2003**. Revista de Investigación de Física UNMSM. 9, 3-9

[8] Cáceres M., Arcos D. 1991. **Variabilidad en la Estructura Espacio-Temporal de un Área de Surgencia Frente a la Costa de Concepción, Chile**. Revista de Investigación Pesquera. Chile, 36, 45-57.

[9] Thomas, A.C; Huang, F. 1994. **Comparision of the Seasonal and Interannual Variability of Phytoplankton Pigment Concentrations in**

the Peru and California Current Systems. Journal of Geophysical Research. 99 C4, 3-9.

[10] Kostianoy A.G.; Zatsepin A.G. 1995. The West African Coastal Upwelling Filaments and Cross-frontal Water Exchange Conditioned by Them. Journal of Marine Systems, vol 7, 349 – 359.

[11] Park K; Ullman D; Kyung K. 2007. Spatial and Temporal Variability of Satellite-observed Subpolar Front in the East/Japan Sea. Science Direct, Deep – Sea Research, Part I; 453 - 470.

[12] SANCHEZ G., R. CALIENES & S. ZUTA, 2000. The 1997-98 El Niño and its effects on the coastal marine ecosystem off Peru. CALCOFI Rep. 41: 62-86.

[13] SANTANDER H., S. CARRASCO & G. LUYO. 1981. El Zooplancton del área norte del Perú. Vol. Extraordinario ICANE.

2. BIBLIOGRAFÍA ESPECIALIZADA

[1] . RAMÓN MUJICA M. Oceanografía del Mar Peruano. Lima Perú, Instituto de Estudios Histórico – Marítimos del Perú, Edit. Ausonia, cuarta edición. 1981. 292-302.

[14] CHAVEZ F.P., R.T. BARBER y otros. 1991. Horizontal Transport and the Distribution of Nutrients in the Coastal Transition Zone off Northern California: Effects on Primary Production, Phytoplankton

AS

Biomass and Species Compositions. Copyright by the American Geophysical Union. California.

[15] ZUTA S. & O. GUILLÉN. 1970. **Oceanografía de las Aguas Costeras del Perú.** Dpto. de Oceanografía IMARPE, PERU – Callao, pp. 140-215.

[16] BAKUN., 1987. **El afloramiento en el mar peruano.** Dpto. de Oceanografía IMARPE, PERU – Callao, pp. 40-85.

[17] STRUB, TARAZONA & ARNTZ. 2001. **Estudios de fenómenos de mesoescala.** Copyright by the American Geophysical Union. California.

[18] CALIENES, J. 1985. **Los ecosistemas de afloramiento.** Revista de Investigación Pesquera V5, pp. 70 – 95.

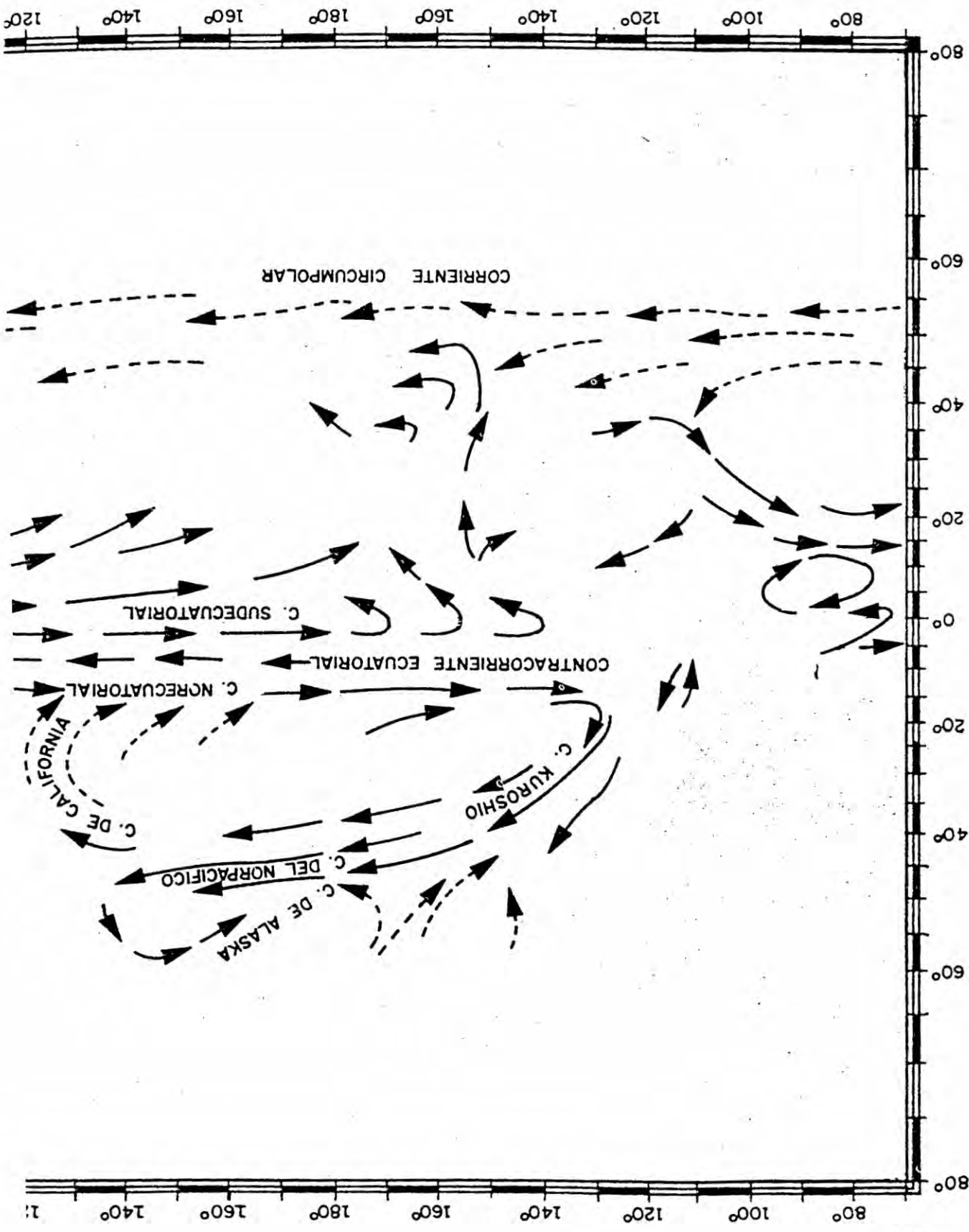
[19] MARCHESIELLO, W. 2004. **Advección vertical y el proceso de nutrientes.** Journal of Geophysical Research, C7, pp. 12 – 22.

GIS

APENDICE

APENDICE

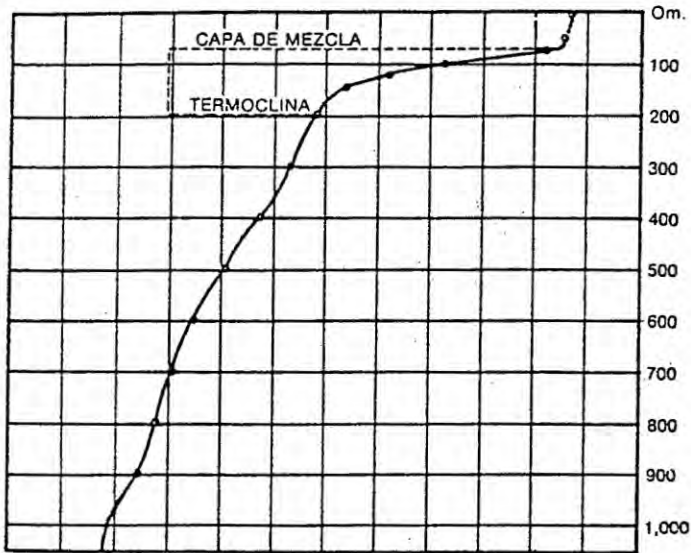
PLS



G.F.S.

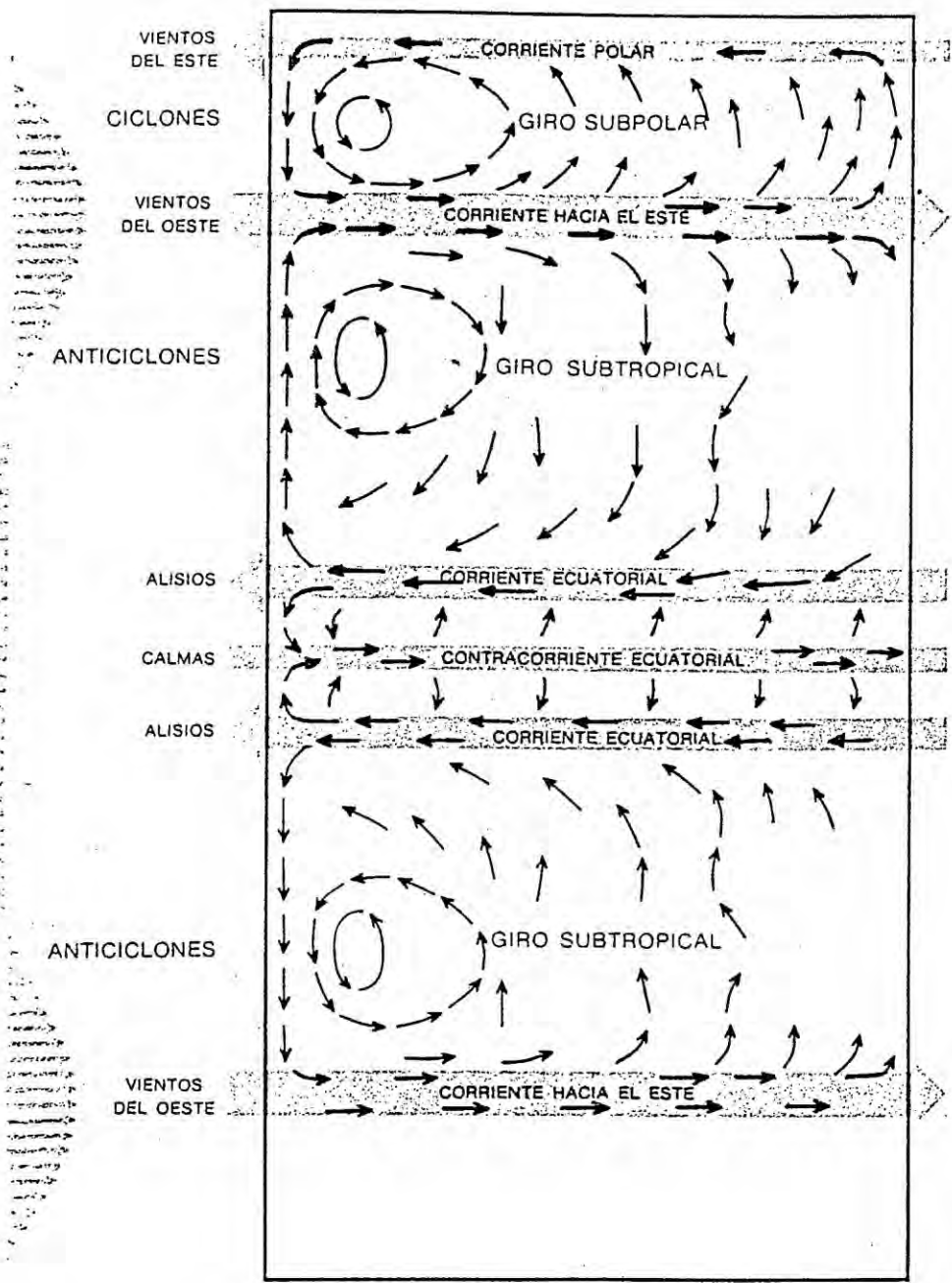


P.S



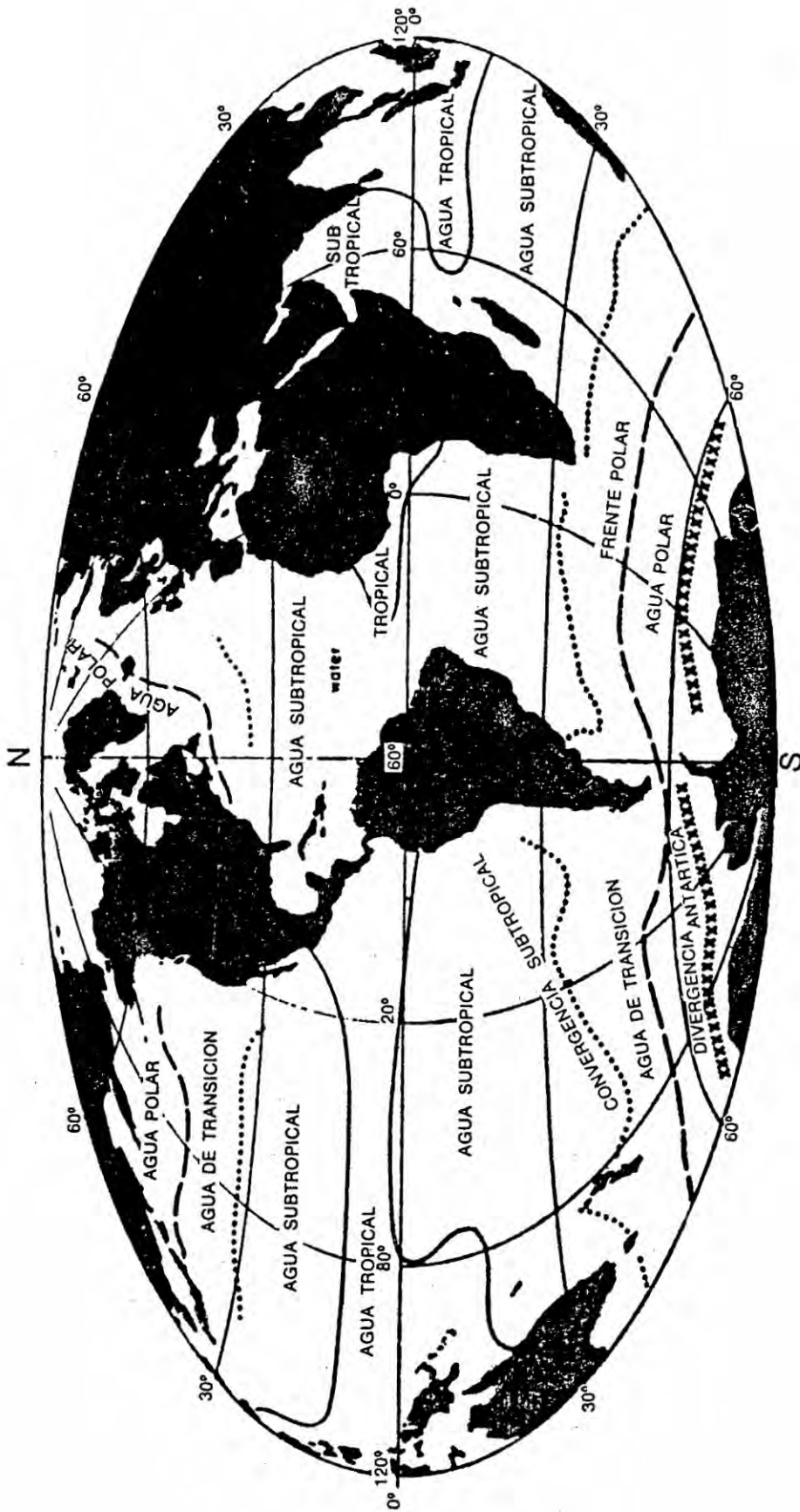
Variación de la temperatura del mar con la profundidad, indicando la capa superficial de mezcla y la termoclina de variación brusca de temperatura.

P/S



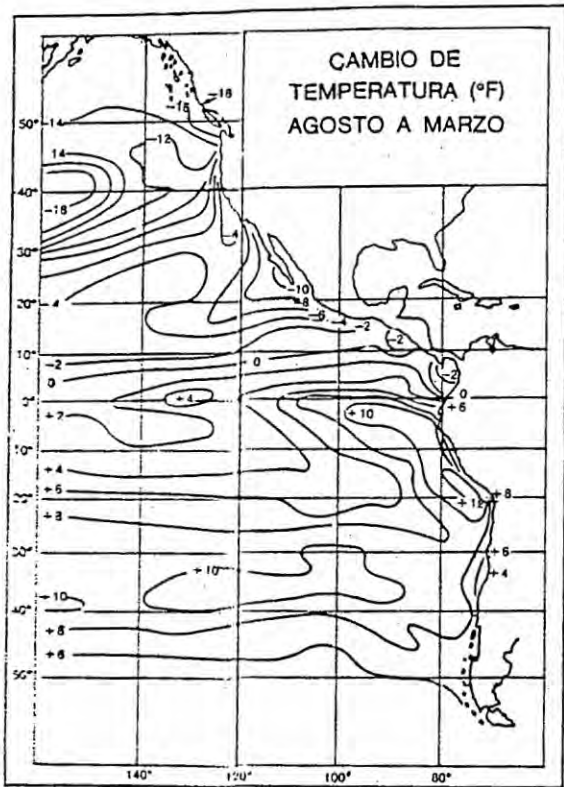
Océano idealizado, de forma rectangular y sometido exclusivamente a fuerzas horizontales producidas por el viento, como se muestra con las flechas anchas y grises. Las flechas negras representan la circulación. Las velocidades relativas aproximadas de los vientos superficiales se indican a la izquierda (Munk, 1955).

P.S



PLS

Distribución de las principales masas de agua en la superficie del mar y de los límites entre dichas masas de agua (Wyrski, 1968).



Variación de la temperatura media del mar (en °F) de agosto a marzo (marzo menos agosto) (Bjerknes, 1961).

[Handwritten signature]