



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN
GEOGRAFÍA

La Temperatura Superficial del Mar y la
concentración de Clorofila *a*, a través de
imágenes satelitales, así como su relación con la
producción pesquera en el Golfo de México y
Mar Caribe

T E S I S

Que para obtener el grado de
DOCTOR EN GEOGRAFÍA

Presenta
OLIVIA SALMERÓN GARCÍA

Asesor
DR. RAÚL AGUIRRE GÓMEZ



Distrito Federal, 2012



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

La Temperatura Superficial del Mar y la
Concentración de Clorofila a, a través de
imágenes satelitales; así como, su relación
con la producción pesquera en el Golfo de
México y Mar Caribe

T E S I S

Olivia Salmerón García

15/05/2012

SINODALES

DR. RAÚL AGUIRRE GÓMEZ

DR. DAVID SALAS DE LEÓN

DRA. LILIA SUSANA PADILLA

DR. MARIO ARTURO ORTÍZ

DR. SERGIO CERDEIRA ESTRADA

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA

A ESPERANZA GARCÍA, ANABELL SALMERÓN Y LUIS D. CRUZ, POR SU AMOR Y APOYO EN MUCHOS MOMENTOS DE LA VIDA.

A RODOLFO LARA, DE MANERA MUY ESPECIAL, POR SU AMOR Y PACIENCIA ANTE MIS MÚLTIPLES INQUIETUDES.

A MIS SOBRINOS, CON TODO MI CARIÑO.

AL DR. ARTEMIO GALLEGOS, DR. JORGE ZAVALA, ING. AGUSTÍN FERNÁNDEZ, BIÓL. CARLOS ILLESCAS, DR. RAYMUNDO LECUANDA, DRA. MARTHA REGUERO, MTRO. RANULFO RODRÍGUEZ, DRA. ROSARIO ROMERO, DR. STEVEN CZITROM, DR. JOSÉ BARBERÁN[†], MTRA. ADRIANA MATEOS, MTRO. OSCAR CALDERÓN, ING. ERIK MÁRQUEZ, DR. SERGIO LICEA, POR SU AMISTAD, APOYO Y ASESORÍA EN TODO MOMENTO, Y POR SER QUIENES ME ACOGIERON POR PRIMERA VEZ, DESDE EL SERVICIO SOCIAL HASTA MI INGRESO COMO PERSONAL ACADÉMICO DE ESTA GRAN UNIVERSIDAD.

AL DR. RAÚL AGUIRRE, DR. ROMÁN ÁLVAREZ, DRA. TERE REYNA, DR. JORGE PRADO, MTRA. GABRIELA GÓMEZ, DRA. IRMA ESCAMILLA, LIC. JOSEFINA HERNÁNDEZ, DRA. IRMA TREJO, ALMA LUZ CABRERA, MA. ELENA GÓMEZ, MTRA. GABRIELA CISNEROS, ESTUDIANTES, BECARIOS Y AMIGOS DE AHORA Y SIEMPRE, DEL INSTITUTO DE GEOGRAFÍA Y DEL LABORATORIO DE ANÁLISIS GEOESPACIAL, POR LA GRAN CONVIVENCIA DIARIA.

Contenido

Contenido.....	4
INDICE DE ILUSTRACIONES	7
INDICE DE TABLAS	9
INTRODUCCIÓN	10
IMPORTANCIA DEL TEMA	10
HIPÓTESIS.....	12
OBJETIVOS	12
ESTRUCTURA CAPITULAR.....	13
CAPÍTULO 1	15
1. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS Y CONFORMACIÓN ACTUAL DEL ÁREA DE ESTUDIO	15
1.1. ESTUDIOS REFERENTES A APLICACIONES OCEANOGRÁFICAS	15
1.2. ESTUDIOS A ESCALA GLOBAL	16
1.3. ESTUDIOS A ESCALA NACIONAL.....	20
1.4. DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	21
1.5. PRODUCCIÓN PESQUERA.....	26
1.6. ZONAS DE CAPTURA DE LAS DISTINTAS ESPECIES DE CAMARÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO	26
1.7. ZONAS DE CAPTURA DEL PEZ SIERRA	30
2. MARCO TEÓRICO.....	33
2.1. BASES FÍSICAS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA.....	33
2.1.1. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.....	33
2.1.2. CUERPO NEGRO	34
2.1.3. ENERGÍA SOLAR.....	35
2.2. TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR (TSM).....	39
2.3. CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA A, [CHLA]	41
2.4. SENSORES AVHRR Y SEAWIFS	43
2.4.1. CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR AVHRR.....	46
2.4.2. CALIBRACIÓN AVHRR	48

2.4.3.	CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA AVHRR.....	49
2.4.4.	CARACTERÍSTICAS SENSOR SEAWIFS	51
2.4.5.	CALIBRACIÓN SEAWIFS	53
2.4.6.	CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA SEAWIFS.....	53
2.5.	PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS UTILIZADAS	54
2.5.1.	MERCATOR.....	54
2.5.2.	CILÍNDRICA EQUIDISTANTE SIMPLE (PLATE CARRÉE)	56
2.6.	FUNCIONES EMPÍRICAS ORTOGONALES.....	56
2.7.	DESCOMPOSICIÓN DE VALORES SINGULARES.....	60
3.	METODOLOGÍA	62
3.1.	PROCESAMIENTO DE IMÁGENES	64
3.1.1.	AVHRR.....	64
3.1.2.	SEAWIFS.....	72
3.2.	DATOS DE PRODUCCIÓN PESQUERA EN PESO VIVO	76
4.	RESULTADOS.....	78
4.1.	ANOMALÍAS CLIMATOLÓGICAS DE TSM Y FEO	78
4.2.	REGIONES DE TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR	87
4.2.1.	GOLFO PROFUNDO	88
4.2.2.	ÁREA DE INFLUENCIA DE LA CORRIENTE DEL CARIBE.....	88
4.2.3.	MAR CARIBE.....	88
4.2.4.	PLATAFORMA EXTERNA DE TEXAS-LOUISIANA-ALABAMA	89
4.2.5.	PLATAFORMA DE TEXAS-LOUISIANA-ALABAMA.....	89
4.2.6.	PLATAFORMA DE VERACRUZ	89
4.2.7.	DESCARGA DEL SISTEMA GRIJALVA-USUMACINTA	90
4.2.8.	PLATAFORMA DE CAMPECHE.....	90
4.3.	ANOMALÍAS CLIMATOLÓGICAS DE [CHLA] Y FEO.....	90
4.4.	REGIONES DE CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA A	97
4.4.1.	GOLFO PROFUNDO	98
4.4.2.	PLATAFORMA OESTE EXTERNA DE FLORIDA	98
4.4.3.	PLATAFORMA OESTE INTERNA-INTERMEDIA SUR DE FLORIDA	98
4.4.4.	SUR DE LA BAHÍA APALACHEE.....	99
4.4.5.	PLUMA DEL RÍO MISSISSIPPI EN VERANO.....	99

4.4.6.	ÁREA DE GRAN INFLUENCIA DEL RÍO MISSISSIPPI	99
4.4.7.	ÁREA FUERA DE LA PLATAFORMA SUR DE TEXAS	100
4.4.8.	PLATAFORMA INTERNA DE TEXAS Y TAMAULIPAS	100
4.4.9.	PLATAFORMA INTERNA AL NORTE DE VERACRUZ.....	101
4.4.10.	PLATAFORMA SUR DE VERACRUZ.....	101
4.4.11.	PLATAFORMA DE CAMPECHE Y TABASCO	101
4.4.12.	PLATAFORMA EXTERNA DEL BANCO DE CAMPECHE	101
4.4.13.	ESTE DEL BANCO DE CAMPECHE.....	102
4.4.14.	ÁREA FUERA DE LA PLATAFORMA SUR DE VERACRUZ.....	102
4.5.	PRODUCCIÓN TOTAL MENSUAL EN 2000 Y 2005.....	102
4.6.	PRODUCCIÓN ANUAL EN PESO VIVO DE CAMARÓN DE 1996 AL 2005.....	107
4.6.1.	PRODUCCIÓN MENSUAL DE CAMARÓN DE 2003 AL 2005	108
4.7.	PRODUCCIÓN ANUAL EN PESO VIVO DE SIERRA DE 1996 AL 2005.....	110
4.7.1.	PRODUCCIÓN MENSUAL DE SIERRA DE 2003 AL 2005	111
4.8.	RELACIÓN ENTRE LAS REGIONES Y LA PRODUCCIÓN DE CAMARÓN Y SIERRA	113
CONCLUSIONES		119
REFERENCIAS		123

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Grandes Ecosistemas Marinos (LME). El Golfo de México pertenece al ecosistema 5 mientras que el Mar Caribe, al ecosistema 12. Tomado de: http://www.lme.noaa.gov	18
Ilustración 2. GIWA Subregión2: Golfo de México y subregión3: Mar Caribe. Tomado de:.....	20
Ilustración 3. Área de estudio	22
Ilustración 4. Circulación superficial y descargas fluviales en el Golfo de México y Mar Caribe. LATEX: plataforma de Louisiana-Texas, TAVE: plataforma de Tamaulipas-Veracruz	23
Ilustración 5. Zonas de Captura de camarón	27
Ilustración 6. Zona de captura de Sierra	31
Ilustración 7. Espectro Electromagnético	33
Ilustración 8. Energía solar	37
Ilustración 9. Irradiancia solar	39
Ilustración 10. Firma espectral del agua	40
Ilustración 11. Espectro de la absorción clorofila <i>a</i> y de la clorofila <i>b</i>	42
Ilustración 12. Órbitas satelitales. Fuente: (CCRS).....	44
Ilustración 13. Órbita cuasipolar de los satélites NOAA	44
Ilustración 14. Órbitas NOAA	45
Ilustración 15. Interacción con la atmósfera.....	51
Ilustración 16. La línea punteada corresponde a la firma espectral del agua pura; las líneas sólidas indican la variación de la firma espectral del agua con sustancia amarilla.	54
Ilustración 17. Espacio de transformación.....	58
Ilustración 18. Diagrama conceptual de la metodología utilizada.....	63
Ilustración 19. Diferencia canal 3 y canal 4.....	67
Ilustración 20. Geometría Sol - Tierra - Satélite	69
Ilustración 21. Bandas del sensor SeaWiFS. Fuente:(Aguirre Gómez, 2002).....	75
Ilustración 22. Anomalías climatológicas de TSM.....	79
Ilustración 23. Eigenvectores 1, 2 y 3 de TSM y gráficas de los coeficientes de transformación (amplitud) en cada componente principal.....	82
Ilustración 24. Intervalos de los eigenvectores seleccionados para delimitar las regiones de TSM	86
Ilustración 25. Patrones de TSM	87
Ilustración 26. Regiones de TSM en el Golfo de México y Mar Caribe	88
Ilustración 27. Anomalías climatológicas de [Chla]	91
Ilustración 28. Primeros cuatro Eigenvectores y Componentes principales de [Chla]	94
Ilustración 29. Intervalos de eigenvectores seleccionados para delimitar las regiones de [Chla] ...	95
Ilustración 30. Patrones espaciales de [Chla].....	96
Ilustración 31. Regiones de [Chla] en el Golfo de México y Mar Caribe	97
Ilustración 32. Producción anual de camarón en peso vivo, 1996-2005	108
Ilustración 33. Producción anual de Sierra en peso vivo, 1996-2005.	111

Ilustración 34. Regiones TSM y zonas de captura de Sierra (línea punteada) y Camarón (área gris).
Los números rojos señalan las zonas de producción de camarón..... 117

Ilustración 35. Regiones [Chla] y zonas de captura de Sierra (línea punteada) y Camarón (área gris).
Los números rojos señalan las zonas de producción de camarón..... 117

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Captura de camarón por mes de acuerdo a Castro (1986), Gracia (1991, 1989), Smith (1988), Soto y otros (1982). En gris oscuro camarón adulto y en gris claro juveniles.	30
Tabla 2. Captura de Sierra por mes de acuerdo con Beaumariage (1970), Springer y otros (1958) e INP (2008).....	32
Tabla 3. Resolución espectral y aplicaciones del sensor AVHRR. $1\mu\text{m}=10^{-6}\text{ m}$	47
Tabla 4. Resolución espectral, nivel de saturación y aplicaciones del sensor SeaWiFS.....	52
Tabla 5. Periodos de funcionamiento de los satélites NOAA.....	64
Tabla 6. Valores utilizados en nitpix para el cálculo de las TSM.	71
Tabla 7. Eigenvalores de TSM.....	80
Tabla 8. Eigenvectores de TSM	80
Tabla 9. Eigenvalores de [Chla]	92
Tabla 10. Eigenvectores de [Chla]	92
Tabla 11. Producción total mensual en peso vivo, 2000.....	104
Tabla 12. Producción total mensual en peso vivo, 2005.	106
Tabla 13. Producción mensual de camarón en peso vivo, 2003-2005.	109
Tabla 14. Producción mensual de Sierra en peso vivo, 2003-2005.	112

INTRODUCCIÓN

IMPORTANCIA DEL TEMA

Existen numerosos estudios que involucran las costas de México y la población que habita en ellas; sin embargo, pocos tratan los aspectos marinos, ya sea de zonas costeras o de mar abierto, los cuales influyen de manera importante en la presencia y uso de recursos, en especial los pesqueros. Estos recursos tienen una gran importancia para la población, en primer lugar por su valor alimenticio, y después por el beneficio económico que se obtiene de ellos.

En esta tesis se analiza la dinámica de los parámetros oceanográficos, temperatura superficial del mar (TSM) y concentración de clorofila *a* [Chla], y se relacionan con la producción pesquera de dos recursos económicamente importantes para el Golfo de México y el Mar Caribe: el camarón y el pez Sierra. El camarón en sus distintas especies (*Penaeus duorarum*, *Penaeus aztecus*, *Penaeus setiferus*, *Xiphopenaeus kroyen*, *Farfantepenaeus brasiliensis* y *Sicyonia brevirostris*) ocupa el tercer lugar en cuanto a volumen de captura después de la mojarra y el ostión; sin embargo, su valor económico hace que ésta pesquería sea la más importante en el litoral del golfo, y en menor medida en el Caribe mexicanos (INP, 1999). Por su parte el pez Sierra (*Scomberomorus maculatus*), representa una importante pesca artesanal a lo largo de la costa del golfo y su consumo es muy popular por su bajo precio en el mercado (INP, 1999).

El conocer la distribución de la TSM y de la [Chla] en el tiempo y el espacio, no sólo en las zonas costeras, sino también en las oceánicas, proporciona información importante para el estudio de la producción pesquera debido a que son variables que conforman parte del “ambiente” donde viven los organismos, (Herrera Silvera, 1994), (Platt & Sathyendranath, 1999). La variación de los parámetros ambientales mencionados puede traducirse en un incremento o decremento en la producción, por lo cual deben ser estudiados y considerados

durante la planeación de la explotación y conservación de los recursos marinos en general, y pesqueros en particular. En esta investigación, la identificación de regiones a través del análisis de la dinámica de la TSM y de la [Chla] permite entender, en cierta medida, las fluctuaciones en la producción del camarón y del pez Sierra, sin olvidar que la producción pesquera depende, además, de factores económicos y sociales como las características y estado de las embarcaciones, las temporadas de veda, la problemática de las propias cooperativas pesqueras, la oferta y la demanda. Otro aspecto importante durante el análisis de los datos de producción pesquera, es el proceso de recopilación y creación de las estadísticas de captura, a manera de recorte metodológico. Por la dificultad que representa la información referente a este tema, se consideraron datos oficiales de los anuarios estadísticos provenientes del Instituto Nacional de Pesca; sin embargo, la información que reportan las embarcaciones no siempre es precisa ni reportan el lugar de captura. Es común que la captura se realice frente a las costas de un estado y se reporte en el puerto de otro, como Tamaulipas o Veracruz, por ejemplo, que son los estados con mayor flota e infraestructura pesquera en el Golfo de México.

En este mismo sentido, el uso de datos satelitales ofrece grandes posibilidades para el estudio de la TSM y de la [Chla] por la cobertura espacial y temporal que manejan. Con los sensores AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) y SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor) se tienen dos imágenes de TSM y una de [Chla] por día, respectivamente, y cubren en cada escena toda el área de estudio. Por otra parte, los programas de procesamiento de imágenes permiten manipular grandes volúmenes de información. Para el caso de esta investigación se procesaron datos de TSM y de [Chla] con los programas TeraScan© y Matlab©, respectivamente.

Se propone una regionalización basada en el análisis de componentes principales o funciones empíricas ortogonales (FEO), de las anomalías climatológicas de TSM y de [Chla]. Esta técnica de análisis multitemporal sirve para procesar grandes volúmenes de información y destacar en las primeras componentes obtenidas el

mayor porcentaje de información común a todos los datos, lo cual se conoce como máxima varianza explicada.

HIPÓTESIS

Para acotar y definir los límites de esta investigación se plantea la hipótesis siguiente:

El análisis de las variaciones y distribución de parámetros oceanográficos como la temperatura superficial del mar (TSM) y la concentración de clorofila *a*, [Chla], permite determinar regiones con características específicas que afectan la productividad pesquera y, en algunos casos, los periodos de captura.

OBJETIVOS

La anterior hipótesis se apoya en un objetivo general cuya función principal es: identificar la relación de las variables TSM y [Chla] con el volumen y los periodos de captura de camarón y Sierra en el Golfo de México y Mar Caribe mexicano.

Para lograrlo, se plantean objetivos particulares que, a su vez, son guías que permiten evidenciar si la hipótesis de este trabajo fue comprobada o no. Los objetivos particulares son:

- Caracterizar la distribución espacio-temporal de la TSM y la [Chla], derivada de imágenes satelitales del sensor AVHRR de 1996 - 2008 y SeaWiFS de 1998 – 2008, para determinar regiones en el Golfo de México y Mar Caribe mexicano.
- Relacionar las regiones obtenidas de TSM y [Chla], con los procesos oceanográficos observados en el Golfo de México y Mar Caribe mexicano.
- Identificar la variabilidad de los volúmenes de producción pesquera en peso vivo del pez Sierra y de las distintas especies de camarón, para establecer su relación con las regiones encontradas.

ESTRUCTURA CAPITULAR

La presente investigación se estructura en cuatro capítulos: el primero corresponde a los antecedentes del problema, en el cual se mencionan proyectos y trabajos previos acerca de la regionalización en los océanos a nivel mundial, basada en criterios que van desde la productividad primaria hasta parámetros físicos, químicos, hidrológicos o geomorfológicos, y de cómo México se ha integrado a estos esfuerzos con el fin de propiciar el desarrollo y manejo sustentable de los recursos marinos. Se define el área de estudio y se describen sus principales características oceanográficas, circulación de corrientes, giros, influencia de descargas de ríos, vientos, etc., para vincularlas con las regiones de temperatura superficial del mar (TSM) y de concentración de clorofila *a* [Chl*a*], obtenidas; y así, poder explicar la dinámica en cada una de ellas.

El segundo capítulo hace referencia al marco teórico, que coincide con los ejes teórico y conceptual que se utilizan y que, al mismo tiempo, sustentan a este trabajo. Se definen la TSM; así como, la [Chl*a*]; se explican los conceptos básicos relacionados con la percepción remota y las etapas del procesamiento de imágenes satelitales. Del mismo modo se proporcionan las características de las imágenes AVHRR y SeaWiFS de las cuales se obtienen la TSM y la [Chl*a*], respectivamente. Se explica en qué consiste el análisis de las Funciones Empíricas Ortogonales a partir del cual se delimitan las regiones en el Golfo de México y el Mar Caribe mexicano. Además de la temperatura superficial del mar y la clorofila *a*, la tercer variable involucrada en este estudio es la producción pesquera, específicamente el camarón y sus distintas especies (*Penaeus duorarum*, *P. enaeus a ztecus*, *P. enaeus s etiferus*, *Xiphopenaeus kroyen*, *Farfantepenaeus brasiliensis* y *Sicyonia brevirostris*); así como, del pez Sierra (*Scomberomorus maculatus*). Se definen algunos conceptos relativos a la producción; así como, estadísticas y zonas de captura de las especies mencionadas.

En el tercero se proporciona la metodología aplicada para la obtención de datos para el abordaje analítico, se describe el procesamiento de los datos satelitales AVHRR y SeaWiFS, desde su obtención hasta el cálculo de sus respectivas Funciones Empíricas Ortogonales de las cuales se derivaron ocho regiones de TSM y catorce regiones de [Chla]. El procesamiento y análisis de las imágenes satelitales consideran el Golfo de México en su totalidad, además de la parte correspondiente al Mar Caribe mexicano, el cual quedó incluido en la región 3 de TSM y en la región 1 de [Chla].

En el cuarto capítulo los resultados obtenidos permitieron describir cada una de las regiones encontradas; así como, sus características oceanográficas. Se retoman las características de circulación de las corrientes, descargas fluviales en el golfo y Caribe; estructuras de mesoescala como frentes, giros y surgencias, mencionadas en el primer capítulo.

Del mismo modo se consideran los datos estadísticos de producción de camarón y Sierra para establecer una relación basada en la aplicación de técnicas estadísticas entre la variabilidad de la TSM y [Chla] con los máximos de producción en peso vivo.

CAPÍTULO 1

1. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS Y CONFORMACIÓN ACTUAL DEL ÁREA DE ESTUDIO

Se mencionan estudios que preceden a esta investigación, útiles para el abordaje analítico referentes, en primera instancia, a aquellos que proporcionan los elementos geográficos que permiten el abordaje al estudio de los mares mexicanos y sus recursos. En el mismo sentido, se analizan a escalas global y nacional aquellos estudios que dan pauta para la conformación del área de trabajo.

1.1. ESTUDIOS REFERENTES A APLICACIONES OCEANOGRÁFICAS

Las principales aplicaciones para las que fue creado el sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), son meteorológicas y oceanográficas, específicamente para generar la temperatura superficial del mar (TSM), también se utiliza para obtener índices normalizados de vegetación (NDVI), detección de sedimentos suspendidos en el agua (Aguirre Gómez, 2002), y puntos de calor o incendios.

En un trabajo presentado por Fernández y otros, (1998), sobre la circulación superficial en la plataforma de Tamaulipas y áreas adyacentes en el Golfo de México, los autores utilizaron imágenes satelitales AVHRR para mostrar las características de la circulación a través de la TSM en la plataforma de Tamaulipas, en otoño-invierno de 1996 y 1997. Existen otros estudios que buscan establecer la relación entre temperatura y fenómenos climáticos o pesqueros, tal es el caso del trabajo de Hernández (2002) sobre las anomalías de TSM en aguas cubanas y su relación con eventos El Niño-Oscilación del Sur y su influencia en las pesquerías de langosta.

Por otra parte, el sensor SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor), fue creado para generar información de las propiedades bio-ópticas del océano,

comúnmente conocidas como color del mar. La obtención de la [Chla], una de las principales propiedades bio-ópticas, es de especial importancia por su relación con la productividad primaria y con el balance del dióxido de carbono en la atmósfera, el cual juega un papel relevante en el cambio climático. Antes del lanzamiento del sensor SeaWiFS, se lanzó en 1978 el Coastal Zone Color Scanner (CZCS), el cual estuvo en funcionamiento hasta 1986. Hoepffener y Sturm (1999), realizaron un estudio en aguas del Atlántico Norte frente a las costas de África para calcular la productividad primaria a partir de imágenes de clorofila (concentración de pigmentos) del CZCS mediante la utilización de algoritmos creados para este fin.

Kahru y otros, (1999), realizaron un estudio sobre la [Chla], en la Corriente de California, a partir de imágenes SeaWiFS y compararon los valores de clorofila *a* generados con el algoritmo OC2, que es el utilizado oficialmente por la NASA y el CAL-P6 propuesto por ellos mismos. Los resultados derivados del algoritmo CAL-P6, mostraron una sobreestimación de clorofila *a* en áreas donde es alta la concentración y una subestimación en aquellas áreas de baja concentración. Por supuesto que CAL-P6 es válido solamente para la Corriente de California puesto que los datos *in situ* con los que validaron los algoritmos pertenecen a esta zona.

1.2. ESTUDIOS A ESCALA GLOBAL

Los sensores remotos, proporcionan información sinóptica en tiempo real de parámetros como TSM y [Chla] en el océano. Estas características espacio-temporales son las que enmarcan las grandes ventajas en el uso y aplicación de la percepción remota. Algunos autores como Platt y otros, (1999), justifican el uso de datos satelitales dada su gran cobertura espacial y temporal, a pesar de no ser datos puntuales, como es el caso de las mediciones *in situ*, que tienen la ventaja de una mayor precisión espacial. Con los datos satelitales es posible estudiar el papel de la fotosíntesis en el ciclo del carbono a nivel planetario; así como, la distribución espacial de la [Chla], que está relacionada con la producción autotrófica y la identificación de regiones oceánicas con características ecofisiológicas (comunidades de especies, nutrientes y parámetros físicos)

comunes. Conocer y entender la dinámica oceánica permite delimitar y caracterizar las distintas regiones oceánicas y costeras para el establecimiento de políticas de aprovechamiento y conservación; así como, la posibilidad de establecer estrategias administrativas en el manejo sustentable de los recursos marinos.

Con el fin de caracterizar los mares del mundo se han llevado a cabo programas internacionales como el de Los Grandes Ecosistemas Marinos (The Large Marine Ecosystems) creado en 1984 y el de Evaluación Global de las Aguas Internacionales (Global International Waters Assessment, GIWA), el cual fue creado en 1999 con el apoyo del programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, (United Nations Environment Programme, UNEP). Los Grandes Ecosistemas Marinos (LME) son unidades de evaluación y manejo sustentable de los recursos marinos relativamente grandes, aproximadamente de 200,000 km² o más, adyacentes a los continentes y aguas costeras donde la productividad marina es generalmente mayor que en las áreas oceánicas abiertas. Se crearon en función de su batimetría, hidrografía, productividad y poblaciones dependientes. Comprenden áreas costeras, desde cuencas y estuarios hasta los límites de las plataformas continentales y márgenes de los mayores sistemas de las corrientes oceánicas. Dentro de esta delimitación, El Golfo de México ([Ilustración 1](#)) corresponde a la LME 5 mientras que el Caribe a la LME 12.

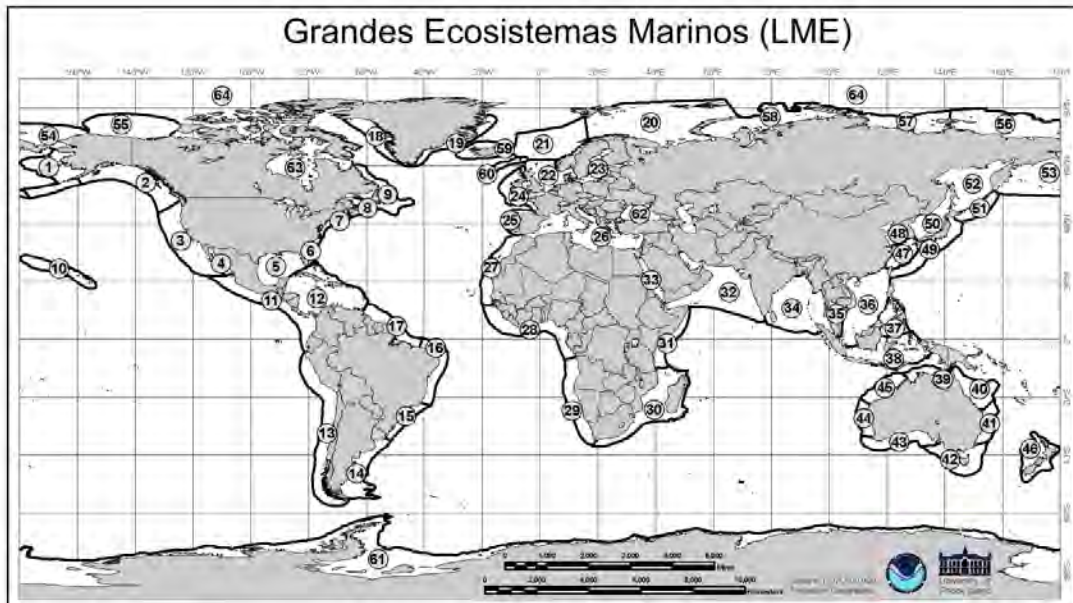


Ilustración 1. Grandes Ecosistemas Marinos (LME). El Golfo de México pertenece al ecosistema 5 mientras que el Mar Caribe, al ecosistema 12. Tomado de: <http://www.lme.noaa.gov>

El Golfo de México (LME 5) es una cuenca semicerrada con una plataforma muy extensa y variada, es fuertemente influenciado por los ríos que descargan en él, principalmente el sistema Mississippi-Atchafalaya que representan dos terceras partes del total de descargas de agua dulce. Es un ecosistema moderadamente productivo ($<300 \text{ gCm}^{-2}/\text{yr}^{-1}$) con condiciones que van desde eutróficas en las costas hasta oligotróficas en el océano profundo. Los procesos que influyen en la productividad primaria son las surgencias en el borde de la Corriente del Lazo; así como, los giros y anillos asociados a ésta. Por su parte la descarga del Mississippi forma la zona con la mayor productividad primaria en el golfo (NOAA, Gulf of Mexico: LME#5).

El Gran Ecosistema Marino Mar Caribe (LME 12) es un mar tropical de 3.3 millones de kilómetros cuadrados, de los cuales 3.89% son áreas protegidas y representan el 7.09% y 1.35% de arrecifes coralinos a nivel mundial y montañas marinas, respectivamente. La mayoría de las islas caribeñas están influenciadas por la Corriente Norecuatorial que entra a través de las Antillas menores. La LME 12 es considerada como Clase II; es decir, un ecosistema de productividad

moderada ($150-300 \text{ gCm}^{-2}\text{yr}^{-1}$). Las áreas de alta productividad incluyen las plumas de los ríos, surgencias y hábitats cercanos a la costa como arrecifes coralinos, manglares y pastos marinos (NOAA, Caribbean Sea: # 12).

El proyecto de Evaluación Global de las Aguas Internacionales (Global International Waters Assessment, GIWA), surgió de la necesidad de comprender de manera integral y más allá de los límites políticos la problemática de las aguas internacionales. Así, la Global Environment Facility (GEF) comisionó a la organización de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, (United Nations Environment Programme, UNEP) a implementar el proyecto de Evaluación Global de las Aguas Internacionales (GIWA), con el fin de desarrollar una estrategia de trabajo para identificar prioridades y establecer acciones para remediar y mitigar los problemas de disponibilidad de agua potable, contaminación, explotación y sobreexplotación de recursos que conciernen a más de una nación o de un cuerpo de agua específico. Este programa determinó 66 regiones geográficas, la mayoría coincidentes con los Grandes Ecosistemas Marinos, cada región comprende una o más cuencas hidrológicas y generalmente una LME. Varias de estas regiones fueron divididas en subsistemas para su evaluación individual. Dentro de la regionalización de GIWA el Golfo de México corresponde a la subregión 2, en la región del Atlántico Norte. Por su parte, el Mar Caribe representa la subregión 3 ([Ilustración 2](#)).



Ilustración 2. GIWA Subregión2: Golfo de México y subregión3: Mar Caribe. Tomado de: <http://www.unep.org/dewa/giwa/areas/giwamap.asp>

La subregión 2 comprende el conjunto de cuencas y subcuencas de Estados Unidos que tienen salida al Golfo de México, representada principalmente por las descargas del río Mississippi y, que tienen como límite occidental las montañas Rocosas, y en el lado oriental a las Montañas Apalaches. En la porción mexicana incluye todas las cuencas al este de la Sierra Madre Oriental en donde las descargas del sistema Grijalva-Usumacinta son las más importantes.

La subregión 3 abarca el Mar Caribe, excepto la isla de Cuba y zonas costeras. También, incluye la parte Norte de las cuencas de los ríos Orinoco, en Venezuela, y el río Magdalena en Colombia.

1.3. ESTUDIOS A ESCALA NACIONAL

Dentro del contexto nacional, uno de los objetivos del Gobierno Federal es promover el desarrollo de las actividades económicas y el manejo sustentable de

los recursos marinos a través del Ordenamiento Ecológico Marino (OEM), para lo cual se debe hacer una caracterización, diagnóstico y regionalización de los mares mexicanos. Con este fin el Instituto Nacional de Ecología (INE), la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) y la Secretaría de Marina (SEMAR) han organizado talleres en donde han participado científicos, para delimitar zonas basados en su experiencia profesional, provenientes de instituciones dedicadas al estudio de los mares desde el punto de vista biológico, físico y químico. Como resultado de estos esfuerzos hay algunas publicaciones sobre ordenamiento ecológico (INE & SEMARNAT, 2006), biodiversidad (CONABIO, CONANP, TNC, & PRONATURA, 2007). En cuanto a la regionalización de los mares mexicanos Lara-Lara et al. (2008), proponen regiones basadas en criterios como su ubicación para definir regiones oceánicas o provincias marinas. Por su parte Yáñez-Arancibia y otros (2004), proponen ecorregiones marinas en nivel I, II y III, derivadas de la participación en los proyectos: Project Mapping Marine and Estuarine Ecological Regions of North America y Project Sub-region 2 Gulf of Mexico, Scaling & Scoping & Detailed Assessment, Global International Waters Assessment, GIWA

1.4. DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

A partir de los anteriores referentes se estableció el área de estudio, ubicada en el Golfo de México y Mar Caribe mexicano. El golfo es una cuenca semicerrada que comunica el Mar Caribe con el océano Atlántico a través del Canal de Yucatán y el Estrecho de Florida. Su superficie es $1.51 \times 10^6 \text{ km}^2$ y su volumen es $2.43 \times 10^6 \text{ km}^3$ (Wiseman & Sturges, 1999). Incluyendo los humedales de México y Estados Unidos su superficie alcanza 1, 942,500 km^2 .

El Mar Caribe mexicano está conformado por la parte occidental del Mar Caribe frente a los estados de Yucatán y Quintana Roo, tiene una superficie de $2.52 \times 10^6 \text{ km}^2$ y un volumen de $6.48 \times 10^6 \text{ km}^3$. La cuenca de Yucatán es una de las cinco cuencas que conforman el Mar Caribe, tiene una profundidad de 5000 m y conecta

a éste con el Golfo de México a través del Canal de Yucatán. Debido a que la profundidad del canal es de 2040 m, solamente bajo condiciones inusuales como grandes ondas de marea internas o flujos compensatorios extremos, aguas de profundidades mayores puede ser intercambiadas entre el Mar Caribe y el Golfo de México (Gallegos, 1996). [Ilustración 3](#).

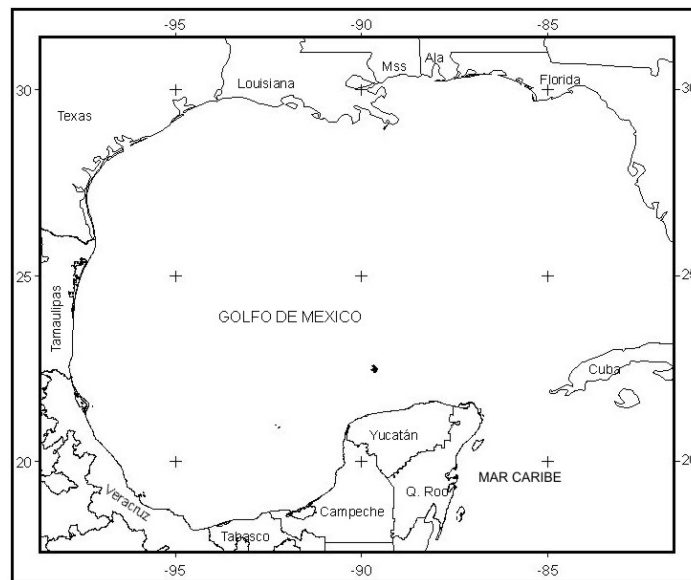


Ilustración 3. Área de estudio

Fuente: elaboración propia de la autora

Los factores principales que intervienen en la dinámica oceánica del golfo y Caribe son los vientos, la temperatura atmosférica, las descargas fluviales y las corrientes oceánicas (Gallegos, 1996) (INE-SEMARNAT, 2004). Durante el invierno el golfo y Caribe mexicanos son afectados por masas de aire frío que dan origen a los “nortes”, los cuales enfrían la capa superficial del océano. En verano predominan los vientos húmedos y tropicales del sureste que incrementan la temperatura superficial. En general, la circulación de los vientos además de provocar variaciones en la temperatura superficial del océano, también ocasiona fenómenos de surgencia y frentes de agua superficial. Las descargas fluviales constituyen un factor importante en las características de las aguas costeras, siendo abril y mayo los meses de mayores descargas provenientes de las costas de Estados Unidos

después de la época de deshielo (rio Mississippi y su afluente Atchafalaya) ([Ilustración 4](#)).

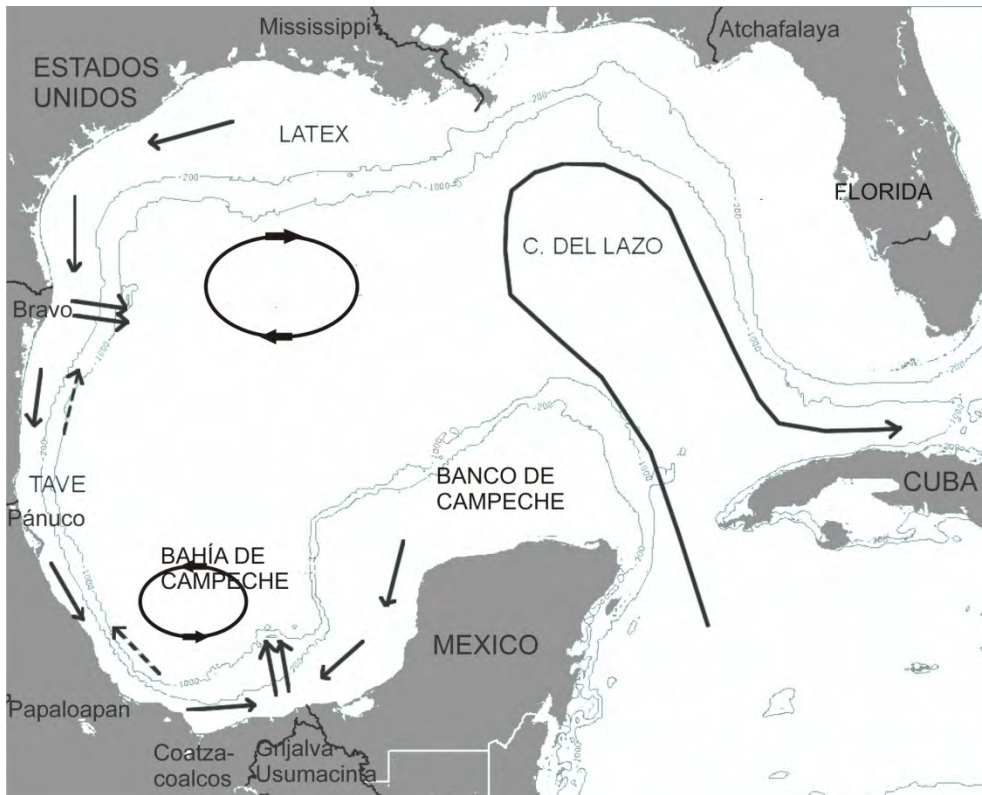


Ilustración 4. Circulación superficial y descargas fluviales en el Golfo de México y Mar Caribe. LATEX: plataforma de Louisiana-Texas, TAVE: plataforma de Tamaulipas-Veracruz

Elaboró Olivia Salmerón García

En septiembre y octubre las descargas provienen de las costas mexicanas después de la época de lluvias. (INE-SEMARNAT, 2004), principalmente el sistema Grijalva-Usumacinta y, los ríos Papaloapan y Coatzacoalcos. En la circulación del golfo se destaca la Corriente de Lazo que une la Corriente de Yucatán con la Corriente de Florida, al alcanzar su límite norte dentro del golfo hace un giro anticiclónico y sale por el Estrecho de Florida. Estos giros se separan de la Corriente del Lazo y se desplazan hacia el oeste hasta alcanzar la plataforma externa de Tamaulipas. En general el golfo profundo presenta en invierno una importante capa de mezcla generada por los frentes fríos que mezclan la capa superior en otoño-invierno, hundiéndola y trayendo a la superficie

aguas subsuperficiales ricas en nutrientes, hacia la zona fótica. En verano, los valores mínimos en junio-agosto obedecen al fenómeno de estratificación producido por vientos débiles y al calentamiento de la capa superior del océano, de tal manera que se observa una capa de mezcla poco profunda (Müller-Karger & Walsh, 1991) (Zavala-Hidalgo, Parés-Sierra, & Ochoa, 2002)

El norte del golfo está fuertemente influenciado por las descargas del Mississippi caracterizadas por ser aguas de baja salinidad. El sistema Texas-Louisiana (LATEX) es un sitio de formación de agua densa en la plataforma media. Durante el invierno, esta agua se hunde y fluye fuera de la plataforma. La plataforma interna está fuertemente estratificada debido a las descargas de agua dulce del Mississippi y Atchafalaya. La plataforma externa tiene una estratificación más débil (Wiseman & Sturges, 1999).

Sobre las plataformas de Tamaulipas y Veracruz (TAVE) la corriente costera invierte su circulación en dos momentos del año, hacia el norte de mayo a agosto y hacia el sur de septiembre a marzo. Así, a lo largo de las costas desde Louisiana hasta Veracruz, se observan vientos del sureste que favorecen surgencias de abril a agosto. Durante estos meses, los valores de [Chla] son bajos, con relación a los que se presentan en otoño e invierno, los cuales son elevados debido a la advección que transporta material biológico proveniente de la corriente costa arriba, de las descargas de los ríos, principalmente el Mississippi, y no por un fenómeno de surgencia. (Zavala-Hidalgo, Gallegos García, Martínez López, Morey, & O'Brien, 2006).

Frente a la bahía de Campeche, en otoño-invierno, se presenta un fenómeno de transporte de agua perpendicular a la costa, causado por la confluencia de las corrientes provenientes de las plataformas de Veracruz y Campeche (Zavala-Hidalgo, Morey, & O'Brien, 2003) (Martínez-López & J, 2009) (Monreal-Gómez, Salas de León, & Velasco Mendoza, 2004). Los frentes fríos, "nortes", mezclan la columna de agua, resuspenden sedimentos, e incorporan aguas del fondo ricas en nutrientes hacia la superficie. Esta región está influenciada por la surgencia de Yucatán (Cochane, 1968) (Cochrane & J.D., 1969) (Ruiz, 1979), la cual ha sido

reportada como más intensa en primavera-verano (Merino, 1997) (Mateos-Jasso, 2009).

El Mar Caribe es un mar marginal del océano Atlántico. Su extensión es de $2.52 \times 10^6 \text{ km}^2$, casi el doble del Golfo de México, y su volumen es $6.48 \times 10^6 \text{ km}^3$, el doble del mar Mediterráneo (Gallegos, 1996). Se caracteriza por su rápida transición de una fase fría en invierno a una fase cálida en primavera. La circulación en la capa superior está dominada por la Corriente del Caribe la cual contribuye al calentamiento desde el trópico hacia latitudes medias del Atlántico Norte. La cuenca de Yucatán tiene en promedio 5000 m de profundidad y une al Mar Caribe con el Golfo de México a través del Canal de Yucatán (Gallegos, 1996). La Corriente del Caribe, corresponde a la masa de agua Subtropical Subsuperficial con alto contenido de calor (24° a 26°C) y de sales (36.7 ups) (Monreal-Gómez, Salas de León, & Velasco Mendoza, 2004), la cual alcanza una velocidad de 3 m s^{-1} , de ahí que sea una de las corrientes más rápidas del mundo (Gallegos, 1996). La parte noroeste del Mar Caribe, frente a la costa de Yucatán, está influenciada por la surgencia del mismo nombre (Cochane, 1968) (Cochrane & J.D., 1969) (Ruiz, 1979), la cual es causada por el desnivel entre el Mar Caribe y el Golfo de México, y ha sido reportada como intensa en primavera-verano (Merino, 1997). Así mismo, durante el verano, se han observado altas concentraciones de clorofila *a*, que se desplazan sobre la costa norte de Yucatán. Una probable explicación es que una vez producida la surgencia, el agua fría y rica en nutrientes que permanece en el fondo, sobre la plataforma, se mueve hacia el oeste y sur del golfo, debido a los vientos Alisios y a la circulación ciclónica, que favorece la presencia de aguas productivas, que alcanzan la superficie (Zavala-Hidalgo, Gallegos García, Martínez López, Morey, & O'Brien, 2006) (Mateos-Jasso, 2009).

1.5. PRODUCCIÓN PESQUERA

Por producción pesquera se entiende el volumen de captura de especies, resultado del ámbito natural y del cultivo. La producción se mide tanto en peso vivo como en peso desembarcado, el primero se refiere al peso total al momento de la captura mientras que el segundo, al valor económico al momento del desembarque. Aquí se tratará la producción pesquera en términos de peso vivo, puesto que el objetivo no es hacer un análisis económico de la producción pesquera sino del volumen de captura, pero solo en el ámbito natural.

1.6. ZONAS DE CAPTURA DE LAS DISTINTAS ESPECIES DE CAMARÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO

El camarón está dividido en diferentes especies que, por su volumen de sus capturas, dan forma a esta pesquería. El camarón Rosado (*Penaeus duorarum*) se encuentra en mayor concentración en la Sonda de Campeche y en la zona occidental de la Península de Florida, E.U.A. El Café (*Penaeus a ztecus*) y el camarón Blanco (*Penaeus s etiferus*) se distribuyen en la costa atlántica de Estados Unidos y el Golfo de México, desde Massachusetts hasta el litoral situado al norte de Yucatán, al igual que el camarón Siete Barbas (*Xiphopenaeus kroyen*). El camarón Rojo (*Farfantepenaeus brasiliensis*) y el Roca (*Sicyonia brevirostris*) se capturan frente a Cabo Catoche y la Isla Contoy, en el Caribe mexicano. Los mayores stocks en México se encuentran en la Laguna de Términos y zonas aledañas. En la etapa larvaria, el camarón hace uso del ambiente pelágico como medio de dispersión. En el ambiente marino, además de centros de concentración geográficamente distintos, se presenta una distribución batimétrica diferencial. Durante la etapa larvaria, la sobrevivencia de los organismos se ve influenciada en mayor grado por el patrón de corrientes, vientos, temperatura del agua y disponibilidad de alimento. La temperatura y la salinidad son factores importantes en sus ciclos de vida. Se necesitan valores bajos de salinidad para el desarrollo de los juveniles, especialmente del camarón blanco, los cuales se encuentran en aguas protegidas (INP, 1999).

La explotación del camarón se lleva a cabo en tres zonas de importancia (Ilustración 5):

- Zona 1: Norte del Golfo de México (Tamaulipas y Veracruz)
- Zona 2: Sonda de Campeche (Tabasco y Campeche)
- Zona 3: Caribe mexicano (Quintana Roo)

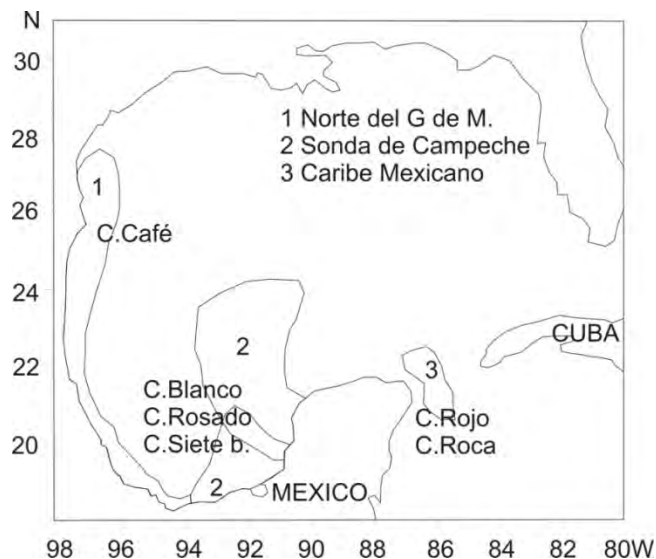


Ilustración 5. Zonas de Captura de camarón

Modificado de:

<http://www.inp.sagarpa.gob.mx/Publicaciones/sustentabilidad/Golfo/camagol.pdf>

En la zona 1, la captura se compone en un 95% de camarón Café (*Penaeus aztecus*); el 5% restante por camarón Blanco (*P. setiferus*) y camarón Rosado (*P. duorarum*), (Castro, 1982). En la Sonda de Campeche, zona 2, el camarón Blanco y el camarón Rosado son los de mayor importancia comercial. Sin embargo, las otras especies también tienen relevancia, por ejemplo la pesquería del camarón Siete Barbas (*Xiphopenaeus kroyen*), que es una actividad importante en la región de Isla del Carmen, Campeche. La pesquería del Caribe mexicano, Zona 3, incluyendo las costas de Quintana Roo, se dirige básicamente a la captura de camarón Rojo (*Farfantepenaeus brasiliensis*) y en segundo lugar camarón Roca (*Sicyonia brevirostris*).

El camarón Café (*Penaeus a ztecus*) puede ser encontrado en altamar durante todo el año con dos periodos de máxima abundancia: de junio a agosto y de octubre a noviembre. La población de camarón juvenil predomina en las capturas de abril a junio. En general de mayo a agosto se extrae alrededor de un 50% de la captura anual (Castro, Arreguín Sánchez, & Chávez, 1986).

El camarón Rosado (*P. du orarum*) se concentra en la Sonda de Campeche a profundidades que van desde 20 hasta 70 m, al este-noreste de la Sonda. Los dos principales periodos de reclutamiento (entrada de organismos jóvenes al área explotada, una vez que han alcanzado la talla comercial) son en abril, el menor, y en octubre y noviembre, el mayor.

El camarón Blanco (*P. setiferus*) presenta dos zonas de captura, la principal en la Sonda de Campeche y la segunda en el noroeste del Golfo de México (Gracia, 1991). Esta especie de camarón peneido presenta mayor relación con la zona costera y dependencia de los esteros, ya que se encuentra principalmente en profundidades no mayores a 15 brazas (27.5 m), en fondos limosos o fangosos y arenosos (Navarrete, Garduño, & Gracia, 1994). El principal periodo de reclutamiento de juveniles a la pesquería se extiende de junio a noviembre (Gracia, 1989).

El camarón Siete Barbas (*Xiphopenaeus kroyen*) madura y se reproduce en mar abierto, mientras que su crecimiento se lleva a cabo en aguas someras. Las mayores capturas se realizan en las costas de Campeche y están fuertemente relacionadas con los vientos del sureste (Smith, 1988), y con las temporadas de veda y reclutamiento, como se explica en el informe técnico de SAGARPA (2005), en donde se señala que el incremento de la abundancia observado hacia octubre se debe en gran parte al inicio del reclutamiento de los animales que nacieron durante la veda.

Los juveniles de camarón Roca (*Sicyonia brevirostris*) se encuentran desde zonas someras a profundas frente a la isla Contoy, pero no dentro de las lagunas de

Quintana Roo o de Yucatán, como es el caso del camarón Rojo (Arreguín Sánchez, 1981).

El camarón Rojo (*Farfantepenaeus brasiliensis*) en su etapa juvenil se encuentra muy cerca de la costa a bajas profundidades y con poca dependencia estuarina (Soto, y otros, 1982). La presencia de juveniles en las áreas costeras de pesca, se detecta desde principios de otoño hasta finales de invierno.

El mes de mayor captura de camarón Rojo es mayo, disminuye un poco en julio y vuelve a incrementarse en agosto, aunque en menor magnitud. En la isla Contoy, el reclutamiento de camarón Rojo parece estar sincronizado con la surgencia de Yucatán (INP, 1999); sin embargo, las variaciones en la captura a lo largo del año no son tan grandes como en el caso del camarón Roca, el cual tiene un marcado incremento a partir de agosto para alcanzar su máximo en noviembre, después desciende abruptamente en diciembre y enero. En los meses de febrero a julio, su captura es menor a 10 toneladas. En la [tabla 1](#), se muestran los meses de captura de las distintas especies de camarón reportados por los autores, anteriormente citados. En general, la captura en el Golfo de México se da en mayor porcentaje en altamar, formada por individuos en su fase preadulta y adulta; mientras que, el resto es captura artesanal basada en juveniles y se realiza en aguas protegidas (lagunas y esteros).

Especie	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Camarón Café (<i>Penaeus aztecus</i>)						■	■	■		■	■	
				■	■	■	■					
Camarón Rosado (<i>P. duorarum</i>)				■						■	■	
Camarón Blanco (<i>P. setiferus</i>)						■	■	■	■	■	■	
Camarón Siete Barbas (<i>Xiphopenaeus kroyen</i>)										■		
Camarón Rojo (<i>Farfantepenaeus brasiliensis</i>)					■		■	■				
	■								■	■	■	■
Camarón Roca (<i>Sicyonia brevirostris</i>)								■	■	■	■	

Tabla 1. Captura de camarón por mes de acuerdo a Castro (1986), Gracia (1991, 1989), Smith (1988), Soto y otros (1982). En gris oscuro camarón adulto y en gris claro juveniles.

Fuente: elaboración propia con base en los autores citados

1.7. ZONAS DE CAPTURA DEL PEZ SIERRA

La disponibilidad de Sierra (*Scomberomorus maculatus*) en el Golfo de México se debe a dos movimientos migratorios que realizan a lo largo del año: de sur a norte, durante primavera-verano, y en sentido inverso, en otoño-invierno (Mendoza N., 1968). La Sierra se distribuye en el oeste del Atlántico desde el sur de Massachusetts hasta la Península de Yucatán. Es una especie pelágica costera que rara vez habita en profundidades mayores a 73m. En invierno es abundante en el sur de Florida, en marzo y abril en el noroeste de Florida (Beaumariage, 1970), y en Texas durante marzo-abril y julio-septiembre (Springer & Pirson, 1958). En cuanto a la temperatura, la isoterma de 20°C en verano es determinante para la distribución y las migraciones anuales (INP)

La captura se realiza en dirección paralela a la costa hasta una profundidad máxima de 46m ([Ilustración 6](#)). En Tamaulipas la zona de captura es en Soto la Marina, San Fernando y Matamoros. En Veracruz se desarrolla entre Chachalacas y Antón Lizardo. En estas localidades se dan condiciones fisiográficas adecuadas para la captura, como extensas y suaves playas, plataforma continental angosta y corrientes rápidas.

En la [tabla 2](#) (<http://www.inp.sagarpa.gob.mx/Publicaciones/sustentabilidad/Golfo/Sierra.pdf>) se muestra la captura por mes de Sierra en un periodo de 5 años en cada uno de los litorales de los Estados del golfo, de tal forma que se puede observar cómo el mes de captura es distinto para cada entidad, pero en general se pueden identificar dos periodos: de enero a abril y de octubre a diciembre.

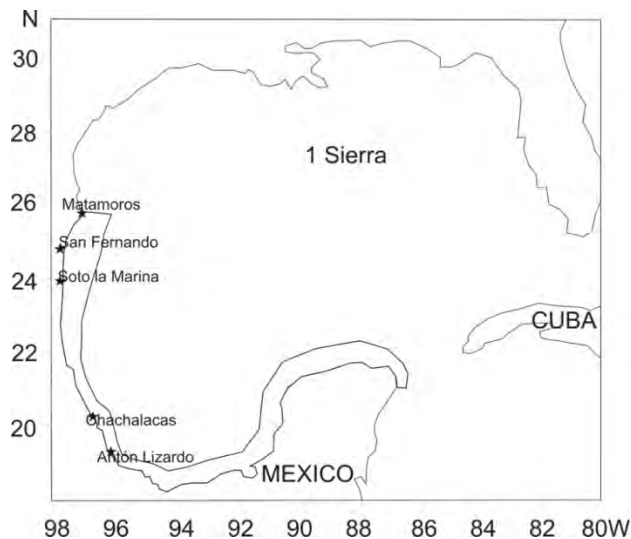


Ilustración 6. Zona de captura de Sierra

Frecuencia de captura de Sierra (1981-1985)												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Tam												
Ver												
Tab												
Cam												
Yuc												
Q.Roo												

Tabla 2. Captura de Sierra por mes de acuerdo con Beaumariage (1970), Springer y otros (1958) e INP (2008). Fuente: elaboración propia con base en

http://www.sefsc.noaa.gov/sedar/download/SEDAR16_RD_05.pdf?id=DOCUMENT

2. MARCO TEÓRICO

El eje teórico y metodológico sobre el que se sustenta esta tesis, además de las nociones generales de las bases físicas de la percepción remota asentadas en este capítulo, exponen las perspectivas cognoscitivas que orientan esta investigación: leyes, tecnología y procesos que se han considerado para el abordaje analítico.

2.1. BASES FÍSICAS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA

2.1.1. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

La mayor parte de energía que recibe la Tierra proviene del Sol, principal fuente de energía, en forma de ondas y partículas (fotones) que conforma el espectro electromagnético. En la [ilustración 7](#) se observa que la irradiación de energía del Sol abarca varias regiones: desde los rayos cósmicos hasta las microondas pasando por la región visible y la región térmica.

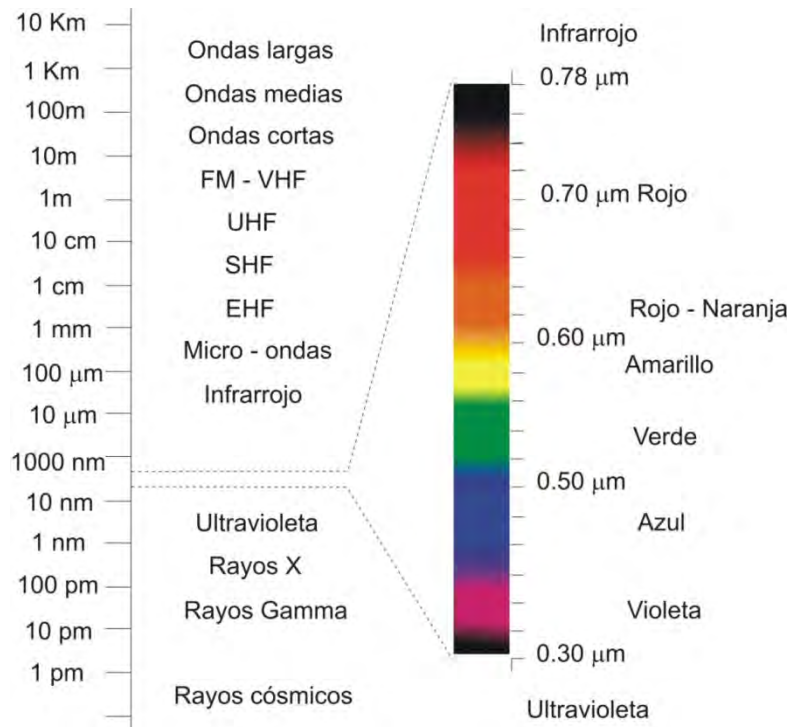


Ilustración 7. Espectro Electromagnético

Modificado de: <http://astronomos.net23.net/teorias/espectroelectromagnetico.html>

2.1.2. CUERPO NEGRO

Para entender la distribución de la energía solar se debe tener claro el concepto de radiación de cuerpo negro. Este es un objeto que no existe en la naturaleza; es decir, es un concepto teórico que varios científicos (e. g. Kirchoff, Boltzmann, Wien y Planck, entre otros) utilizaron para poder estudiar y analizar la radiación solar; así como, establecer leyes que apoyaron la determinación, en particular, de la temperatura del Sol, la intensidad de la energía solar y su distribución en el espectro electromagnético.

El concepto de radiación de cuerpo negro fue introducido por Gustav Kirchhoff en 1862, quien dio a conocer tres leyes de espectroscopia, que llevan su nombre, relacionadas con la emisión continua de un objeto sólido incandescente y la emisión discreta de un gas.

Un cuerpo negro es un absorbedor y un emisor perfecto; es decir, es capaz de absorber toda la energía que recibe, sin reflejar nada, y posteriormente la emite desde su interior. Una forma de representarlo sería a través de una cavidad o caja con paredes a cierta temperatura, por lo tanto emiten radiación al mismo tiempo que absorben la radiación emitida por otros átomos de las propias paredes hasta que la emisión y la absorción están balanceadas (Ley de Kirchoff), de tal forma que la caja adquiere una temperatura constante y uniforme; por lo tanto, la densidad de energía radiada también es uniforme. El sol puede considerarse como un cuerpo negro.

Otro concepto importante es la temperatura de brillo la cual se define como la temperatura aparente de una superficie considerando que su máximo de emisividad es 1.0. Esto equivale a decir que el objeto es un cuerpo negro, consecuentemente la temperatura de brillo representa la temperatura que un cuerpo negro debe tener para producir la radiancia percibida por el sensor proveniente de otro cuerpo. La temperatura de brillo es una medida de la radiación en términos de la temperatura de un cuerpo negro emitiendo una cantidad idéntica de radiación a la misma longitud de onda. Se obtiene aplicando la inversa de la

función de Planck. Es importante aclarar que las temperaturas de brillo no corresponden a la temperatura de la superficie terrestre o de la superficie del océano, sino a las temperaturas través de la atmósfera; es decir, a la temperatura que capta el sensor y que ha sido modificada a su paso por la atmósfera (SeaSpace, 1999).

2.1.3. ENERGÍA SOLAR

En el estudio de la radiación solar destacaron tres científicos, quienes a través de sus teorías establecieron leyes con las cuales se ha determinado el flujo de energía proveniente del Sol, la región del espectro electromagnético en la cual su energía es más intensa y su temperatura. El primero fue Ludwig Boltzmann (1844-1906), el segundo fue Wilhelm Wien (1864-1928), y el tercero fue Max Planck (1858-1947).

Ley de Boltzmann

La Ley de Stefan-Boltzman (1884) establece que la radiación total de un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Con ella calculó; por primera vez, la temperatura del Sol con un valor de 5430°K muy cercana a la temperatura calculada posteriormente de 5777°K.

La constante k de Boltzmann relaciona la temperatura absoluta y la energía en la siguiente expresión:

$$k \approx 1.3806504 \times 10^{-23} \text{ J/°K}$$

Esta Ley permite calcular la intensidad espectral M de un cuerpo negro a una temperatura T dada, esto es, la energía emitida por un cuerpo negro por unidad de área y unidad de tiempo.

$$M = \sigma T^4$$

Donde

$$\sigma = 5.6697 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{K}^{-4}$$

Ley de desplazamiento de Wien

El principal aporte de esta Ley, propuesta en 1894, es el cálculo de los cambios que se presentan en el espectro de un cuerpo negro; es decir, las variaciones en la longitud de onda o frecuencia, con relación a su temperatura. Calcula la longitud de onda (o frecuencia) donde se presenta la máxima radiación (exitancia espectral λ_m) en términos de su temperatura. Esta se define como la distribución de la densidad de flujo radiante (watts/m^2) con respecto a la longitud de onda.

La ley de desplazamiento de Wien se describe a partir de la siguiente fórmula

$$\lambda_m = c_3 T^{-1}$$

Donde

$$C_3 = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m } ^\circ\text{K}$$

Donde:

λ_m longitud de onda en metros

C es una constante

T es la temperatura en grados Kelvin

Esta Ley nos dice que los objetos con mayor temperatura emiten la mayoría de su radiación en longitudes de onda más cortas y viceversa, por ejemplo, estrellas con temperaturas cercanas a 7000 °K, tendrán su máximo en longitudes de onda en la región azul del espectro electromagnético; mientras que, estrellas con temperatura cercana a los 4500 °K emitirán radiación en longitudes de onda en la región roja.

Además en cualquiera de las longitudes de onda el objeto más caliente irradia más energía que el de menor temperatura.

Aplicando la ley de desplazamiento de Wien, es posible medir la longitud de onda λ_{μ} a la cual un cuerpo negro emite con intensidad máxima. Considerando al Sol como un cuerpo negro a temperatura de 5777 °K, su máxima radiancia espectral, o exitancia espectral será en longitudes de onda de 0.47 μm (micrómetros) (Ilustración 8). De la misma manera si se considera otro cuerpo negro a una temperatura de 290 °K, que es la temperatura promedio de la superficie terrestre, el máximo de radiancia espectral ocurre en la parte del infrarrojo térmico en longitudes de onda de 9.7 μm (Mather, 1987). Otros autores manejan que la temperatura de la Tierra es de 280 °K y la exitancia espectral es a 10.3 μm (Rees W. G., 1990).

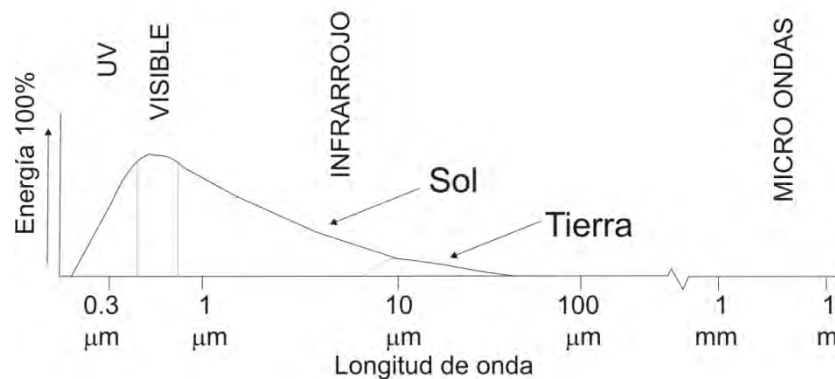


Ilustración 8. Energía solar

Ley de Planck

Por su parte, Max Planck continuó con el estudio de la radiación interna y calculó la radiancia espectral¹ de la energía radiante al interior de un cuerpo negro, estableciendo la constante que lleva su nombre h ($E=h\nu$) y, que relaciona la energía E de los fotones con su frecuencia (ν) con la cual determinó la cantidad de

¹ Radiancia espectral, Densidad de flujo de energía transmitido desde un área pequeña de la superficie terrestre y que es vista a través de un ángulo sólido

energía emitida a cada frecuencia o longitud de onda. Así, descubrió que el máximo de intensidad de la energía emitida está en función de la temperatura del cuerpo negro (Rees W. , 1990). Asimismo, dio a conocer, en 1900, su famosa ley para el cálculo de la distribución de la densidad del flujo radiante por longitud de onda de un cuerpo negro.

$$M_{\lambda} = c_1 \lambda^{-5} [\exp (c_2 / \lambda T) - 1]^{-1}$$

Donde

M_{λ} = exitancia espectral por unida de longitud de onda

$C_1 = 3.742 \times 10^{-16} \text{ W m}^{-2}$

$C_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m }^{\circ}\text{K}$

λ = longitud de onda (m)

T = temperatura $^{\circ}\text{K}$)

Por otro lado, a partir de las mediciones y avances en los estudios de la radiación, se calculó la cantidad promedio de energía solar (irradiancia) que recibe la Tierra por metro cuadrado, a este valor se le conoce como “Constante Solar” y es igual a 1367 Wm^{-2} . En la [ilustración 9](#), se muestra la irradiación solar medida fuera de la atmósfera terrestre y a nivel del mar, las diferencias son debidas a la interacción de la energía con la atmósfera. La línea de irradiancia fuera de la atmósfera muestra un máximo alrededor de $0.5 \mu\text{m}$; es decir, en la región del visible del espectro electromagnético. Por su parte la irradiación directa al nivel del mar también muestra una máximo a partir de la región visible y se extiende aproximadamente hasta el rojo reflejado ($0.7 \mu\text{m}$), en donde se observa una primera disminución en la irradiancia debida a la absorción por vapor de agua contenido en la atmósfera. Cabe mencionar que las regiones del espectro electromagnético donde el vapor de agua y demás gases atmosféricos no absorben la energía, de tal forma que ésta puede llegar hasta la superficie terrestre, se conocen como “ventanas atmosféricas”.

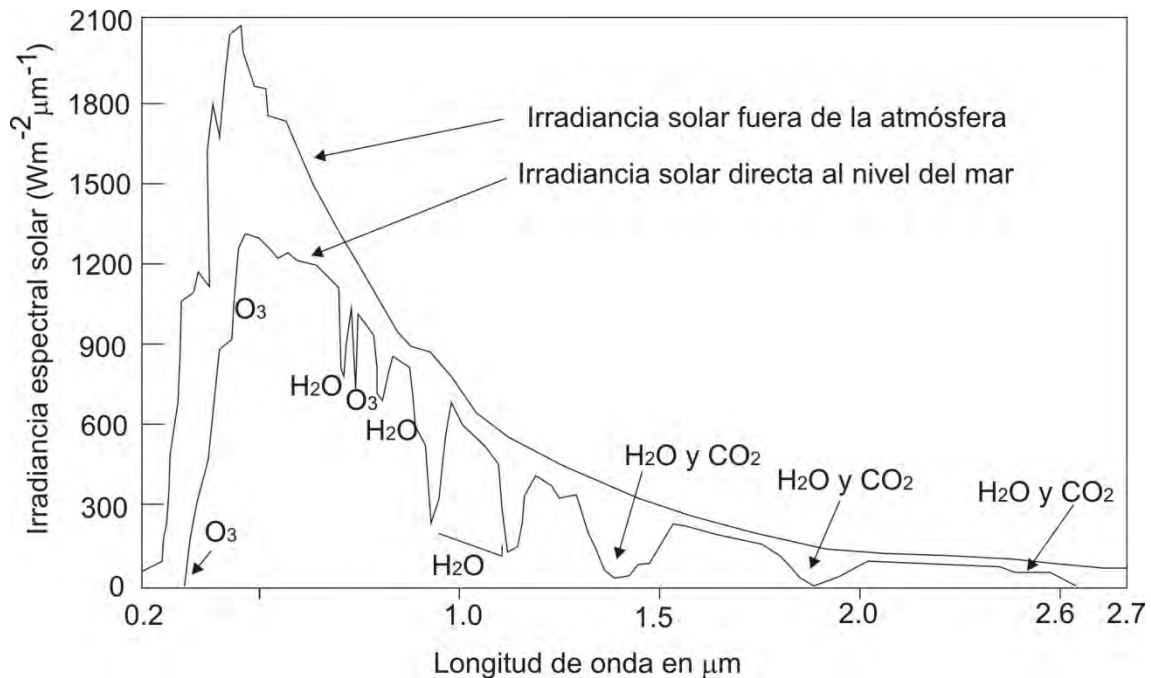


Ilustración 9. Irradiancia solar

Una vez determinada la constante solar fue posible calcular la temperatura del Sol de manera más precisa en 5777°K (Mather, 1987), y la temperatura de la Tierra en 290°K . La importancia de establecer la temperatura del Sol se debe a que permitió concluir que la distribución de la energía emitida en las diferentes regiones del espectro electromagnético depende de la temperatura de la fuente.

2.2. TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR (TSM)

Uno de los parámetros más fácilmente medibles a través de sensores remotos es la temperatura superficial del mar (TSM). En términos físicos, la temperatura del planeta se debe a la capacidad de absorción de la energía solar, por parte de elementos en la superficie terrestre. De la energía absorbida, el agua de los océanos refleja una parte en el visible, principalmente en el azul ($0.4 \mu\text{m}$) y el verde ($0.5 \mu\text{m}$), y emite otra parte en el infrarrojo térmico alrededor de las $10 \mu\text{m}$. Durante este proceso de interacción con la energía, el océano además de reflejar y emitir en las longitudes de onda señaladas, absorbe prácticamente el 100% de

todas aquellas ubicadas desde el infrarrojo cercano 0.8 μm , hasta el infrarrojo térmico 10 μm (Ilustración 10).

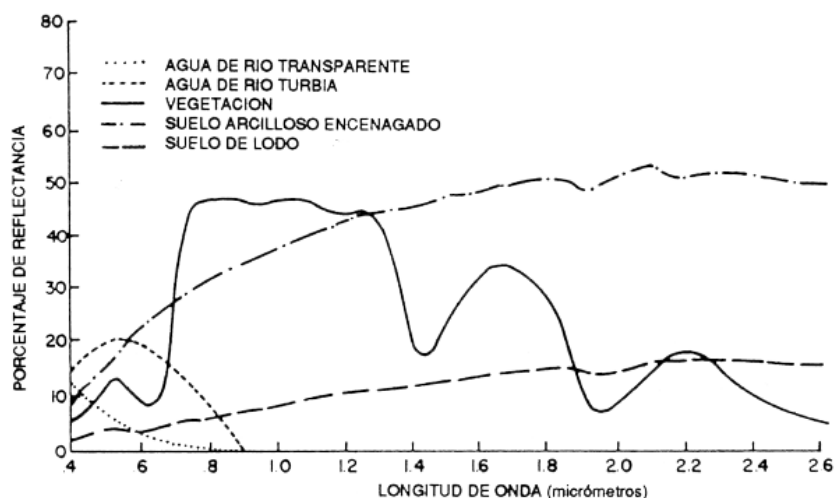


Ilustración 10. Firma espectral del agua

Fuente: <http://www.fao.org/docrep/003/t0446s/T0446S04.htm>

Los sensores infrarrojos captan la energía que emite la superficie del océano; sin embargo, la temperatura que detectan (temperatura de brillo) no es realmente la del océano. En el caso de la superficie oceánica las temperaturas de brillo son más frías por varias razones, la presencia de nubes y de aerosoles; así como, al hecho de que la superficie del océano es considerada como un cuerpo negro con una emisividad igual a 1, lo que implica que su reflectancia sea nula. Esto ocasiona errores que pueden ser hasta de 0.3 °K. En realidad la emisividad del océano es de 0.9926 y 0.9891 para los canales 4 y 5 del sensor Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR (Canaria, 2003), del cual se derivan las imágenes de temperatura superficial que se utilizan en este estudio. La consecuencia de los factores mencionados es una subestimación de la temperatura del mar que puede ser de varios grados centígrados dependiendo de las condiciones atmosféricas.

La TSM está vinculada con áreas biológicamente productivas, hay especies como los salmónidos que están bien adaptados a las fluctuaciones estacionales, mientras que otras prefieren condiciones homotérmicas como las especies

tropicales (FAO, 1992), como el atún de aleta amarilla y blanco, marlín, pez espada y tiburones. Por otra parte, la TSM permite identificar varios fenómenos oceánicos. Por ejemplo, hay zonas donde se presentan surgencias, las cuales son afloramientos de agua relativamente fría y rica en nutrientes (fósforo, nitrógeno y silicatos) (Libes, 1992) que estimulan el crecimiento del fitoplancton. Los altos niveles de variabilidad espacio-temporal de la TSM y los nutrientes, juegan un papel importante en la determinación de las características biológicas de las regiones, por ejemplo las fluctuaciones anuales en la reproducción de especies pesqueras comerciales puede deberse a diferencias en temperatura o nutrientes (Cole & Villacastin, 2000). En frentes térmicos cálidos es probable la presencia del atún, mientras que en las aguas frías es posible la localización del salmón (Herron, Leming, & Li, 1989) y anchovetas en frentes marinos.

2.3. CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA A, [CHLA]

La clorofila *a*, es el pigmento fotosintético universal presente en todo tipo de vegetación y en particular en el fitoplancton. Existen otros pigmentos accesorios tales como la clorofila *b*, el beta caroteno, la clorofila *c*, la fucoxantina, las xantofilas y los carotenoides contenidos en el fitoplancton que son importantes en la transformación química de la luz. El fitoplancton son plantas marinas microscópicas que convierten la luz solar en alimento (carbohidratos y oxígeno) a través de la fotosíntesis. Con el proceso de fotosíntesis se producen azúcares, aminoácidos y ácidos grasos que son el alimento para el fitoplancton. Ahora bien, dado que el fitoplancton es la base de la cadena alimenticia su presencia es un factor determinante en la producción pesquera (Herrera Silvera, 1994). Así mismo, juega un papel importante en la ecología marina ya que cualquier cambio en su distribución y abundancia puede causar impactos significativos en el ecosistema entero. Durante la fotosíntesis el fitoplancton convierte el dióxido de carbono del agua de mar y de la atmósfera en carbono orgánico y libera oxígeno. Esto permite a los océanos absorber el dióxido de carbono excedente en la atmósfera (Hoepffner, Mélin, Dowell, Marra, Saino, & Wilson, 2008). Al disminuir el

fitoplancton, el dióxido de carbono en la atmósfera se incrementa indicando que el fitoplancton juega un parte importante en la regulación de la cantidad del carbono en la atmósfera. De esta forma el fitoplancton no solo es importante desde el punto de vista alimenticio sino también como regulador en el balance del dióxido de carbono en el planeta².

Como se dijo anteriormente, el fitoplancton contiene varios pigmentos accesorios que absorben la energía solar en regiones diferentes del espectro electromagnético a las que absorbe la clorofila *a*, estos pueden ser la clorofila *b* y beta caroteno, también presentes en las algas verdes; la clorofila *c* y fucoxantina que se presentan en las diatomeas causando una coloración café al agua del mar o las biliproteínas en las cianofitas que dan un color azul-verde (Aguirre Gómez, 2002); por su parte los dinoflagelados pueden dar una coloración roja debida a la peridina; las xantofilas dan una coloración amarilla y los carotenoides ocasionan tonos amarillo-anaranjados (González, 2002). En la [ilustración 11](#), se muestra el espectro de absorción de la clorofila *a* y clorofila *b*. La clorofila *a* tiene dos picos de absorción, el primero en los 0.443 μm y el segundo en los 0.670 μm . La clorofila *b* absorbe en el azul, a los 0.447 μm , en el anaranjado y en el rojo, alrededor de los 0.660 μm , lo cual refuerza la coloración verde de las algas verdes o clorofitas, para las cuales la clorofila *b* es un bioindicador.

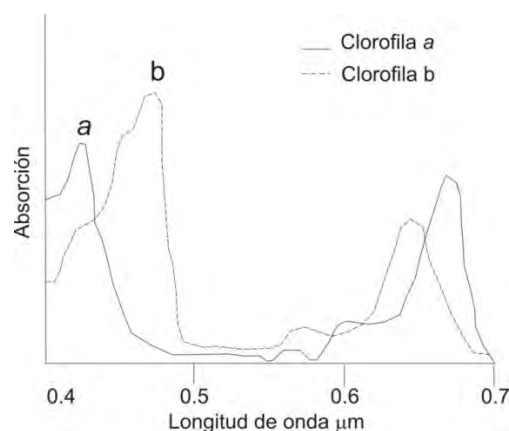


Ilustración 11. Espectro de la absorción clorofila *a* y de la clorofila *b*

Fuente (Hernández Gil, 2002)

² (http://seawifs.gsfc.nasa.gov/SEAWIFS/LIVING_OCEAN/TEACHER4.html)

La concentración y distribución de clorofila *a*, son entonces indicadores de la presencia de fitoplancton y del potencial en la producción primaria (Kratzer, Bowers, & Tett, 2000). Cabe mencionar que la producción primaria se refiere a la cantidad de carbono fijado fotosintéticamente y disponible para el primer nivel heterotrófico, de tal forma que es una medida relevante en los procesos biológicos y el ciclo del carbono (Behrenfeld & Falkowski, 1997). Se trata de la producción de materia orgánica a partir de materia inorgánica por parte de los organismos autótrofos a través de la fotosíntesis y es el punto de partida de la cadena trófica.

La distribución de la biomasa fitoplanctónica y la [Chl*a*] además de otros parámetros relacionados con el campo de luz (penetración, dispersión y coeficiente de absorción) permiten hacer estimaciones de la producción primaria (Marlon R., Roderick E., & Platt, 1985). La clorofila *a* refleja la luz que recibe del sol en la parte verde del espectro visible en longitudes de onda centradas en los 0.510 y 0.555 μm , mientras que presenta una fuerte absorción en la parte roja y azul centrada en las longitudes de 0.670 y 0.443 μm .

2.4. SENSORES AVHRR Y SEAWIFS

Los satélites se pueden clasificar de acuerdo con la trayectoria de su órbita alrededor de la Tierra en geosíncronos y heliosíncronos. Los primeros se caracterizan porque su plano orbital coincide con el plano del ecuador terrestre, mientras que los segundos describen un plano cuasi polar, en cuyo caso pertenecen a la categoría de órbitas inclinadas, aun cuando estén muy cerca de polos, y por último los polares que pasan por encima de los mismos, [ilustración 12](#).

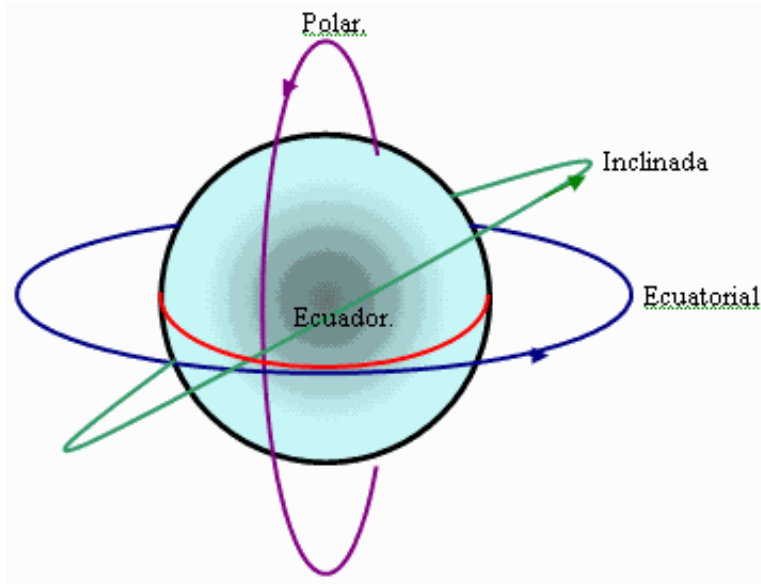


Ilustración 12. Órbitas satelitales. Fuente: (CCRS)

Los satélites heliosíncronos están posicionados entre 800 y 900 km de la superficie terrestre. Su órbita esta inclinada aproximadamente a los 99° con respecto al ecuador de tal manera que el satélite pasa cerca de los polos ([ilustración 13](#)).

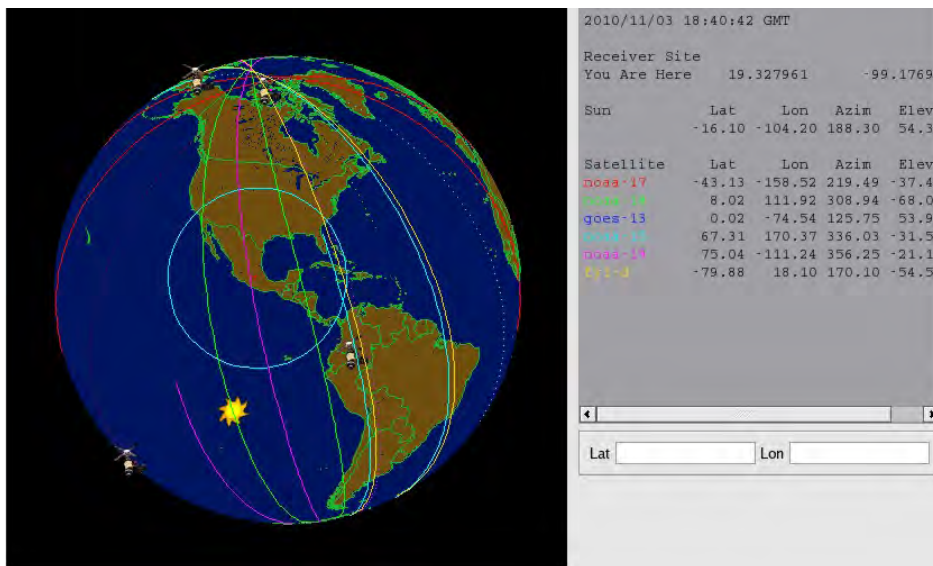


Ilustración 13. Órbita cuasipolar de los satélites NOAA

Fuente: Estación ERISA

La dirección de su trayectoria es de sur a norte durante la mitad de su órbita (paso ascendente) y norte a sur durante la otra mitad (paso descendente). Cada órbita toma aproximadamente 100 minutos, resultando alrededor de 14 órbitas por día. Por ej. NOAA-AVHRR, LANDSAT, SPOT, SeaWiFS, etc.

En cada órbita heliosíncrona sucesiva, el satélite pasa sobre una franja de la Tierra, 26° al oeste de la órbita previa, debido a que la Tierra rota hacia el este bajo la órbita del satélite, [ilustración 14](#).

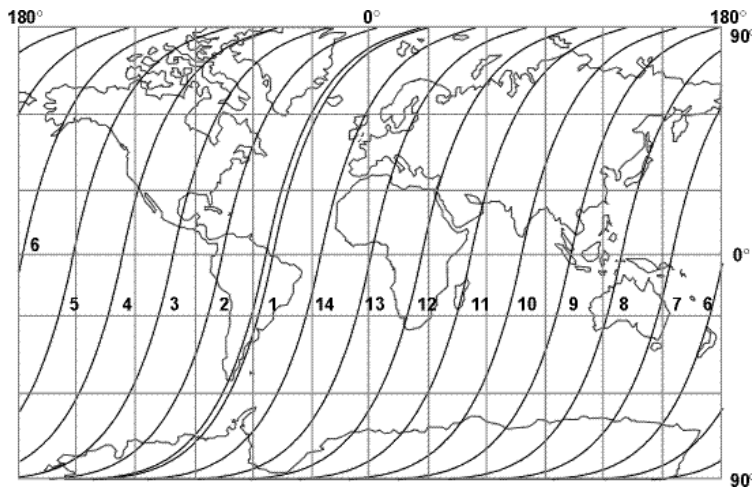


Ilustración 14. Órbitas NOAA

Fuente: Manual de Terascan

Conforme el satélite de órbita polar o cuasi polar viaja alrededor de la Tierra, escanea continuamente la atmósfera y la superficie terrestre debajo de él y retransmite los datos que recibe de regreso a la Tierra.

El tiempo durante el cual el satélite es localizable para un sitio receptor es cuestión de minutos, en latitudes medias es poco más de 15 min. Por otra parte, el número de veces que un satélite es captado desde un sitio sobre la superficie terrestre depende de la latitud, mientras mayor sea la latitud más veces será visto, 2 ó 3 órbitas sucesivas cada 12 h. En el ecuador, el satélite pasa sólo 2 veces, en un

paso ascendente y uno descendente siempre a la misma hora local, de ahí su clasificación como heliosíncrono. En este trabajo se utilizaron datos de los satélites NOAA y Orbview-2.

2.4.1. CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR AVHRR

Las imágenes satelitales del sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) son tomadas a bordo de los satélites NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).

Los satélites NOAA giran alrededor de la Tierra a una distancia que varía entre los 833 y 850 km en una órbita cuasi polar por lo que describen una órbita alrededor de la tierra cada 104.9 minutos. Ofrecen una visión sinóptica del planeta y en particular de los océanos, debido a su amplia cobertura espacial y resolución temporal. Un paso del sensor AVHRR cubre, prácticamente, todo el territorio mexicano dos veces por día, de tal manera que hace posible la generación de mapas a través de los cuales se identifican estructuras tan dinámicas, como las que se presentan en los océanos. Estas estructuras tienen características que son importantes no sólo para las pesquerías; sino también, para estudios de la dinámica oceánica como su localización, dirección y velocidad de desplazamiento además de otros aspectos como su relación con el cambio climático (Butler, 1990)³.

Las características principales del sensor AVHRR se describen a continuación.

Resolución espectral: Se refiere a las cinco bandas o canales que conforman una imagen AVHRR y a su ubicación en el espectro electromagnético; es decir, dado que cada canal muestra la energía recibida por el sensor en un intervalo determinado del espectro. La [tabla 3](#) describe cada uno de los canales AVHRR.

³ <http://www.fao.org/docrep/003/t0355s/t0355s00.htm>

<i>Banda</i>	<i>Resolución espectral</i>	<i>Aplicaciones</i>
1	0.58-0.68 μm (verde-rojo)	Meteorología
2	0.72-1.05 μm (IR cercano)	Meteorología vegetación
3	3.55-3.92 μm (IR medio)	Incendios, meteorología y TSM
4	10.3-11.3 μm (IR térmico)	TSM y Meteorología
5	11.5-12.5 μm (IR térmico)	TSM y Meteorología

Tabla 3. Resolución espectral y aplicaciones del sensor AVHRR. $1\mu\text{m}=10^{-6}\text{ m}$

Resolución espacial: Se refiere a la cobertura del terreno mediante el tamaño del píxel el cual se define como la unidad mínima que puede distinguirse en una imagen. Está determinado por el ángulo de visión instantáneo (IFOV, por sus siglas en inglés) y la altura de la plataforma. En el caso del sensor AVHRR el tamaño del píxel es de 1 km^2 en cobertura local (LAC) al nadir, y 9 km^2 en cobertura global (GAC). Fuera del nadir puede alcanzar hasta 5 km^2 debido a la curvatura terrestre y a la posición del satélite (Kidwell, K, 1991)⁴. El IFOV está definido como el ángulo en radianes o grados sobre el cual el detector es sensible a la radiación proveniente de fuentes externas. El ángulo bajo el cual el sensor AVHRR ve la superficie terrestre es igual a 1.3 mrad . Este dato multiplicado por la altura de su órbita indica el tamaño de los píxeles.

Resolución temporal: Es el tiempo que tarda el sensor en pasar por el mismo punto sobre la superficie terrestre, para el sensor AVHRR es de 12 h , de tal forma que se tienen dos imágenes cada 24 h , una de día y una de noche. Además, tiene la característica de pasar a la misma hora local, por lo que también es un satélite heliosíncrono.

Resolución radiométrica: Es la capacidad de representar la energía captada por el sensor y almacenada en formato digital lo cual significa que la señal recibida es

⁴ http://nsidc.org/data/docs/daac/nsidc0022_avhrr_11b.gd.html#kidwell

dividida en intervalos discretos a los cuales se les asigna un valor numérico en código binario. El sensor AVHRR tiene una resolución de 10 bits (2^{10}); es decir, divide la señal en 1024 niveles de intensidad, de ahí que sea un sensor de muy alta resolución radiométrica.

Para la medición de la temperatura superficial del mar (TSM) el sensor AVHRR usa 3 bandas espectrales: la banda 3 en el infrarrojo medio (3.5-3.9 μ m), banda 4 (10.5-11.5 μ m) y banda 5 (11.5-12.5 μ m) en el infrarrojo térmico, para mediciones nocturnas; mientras que para mediciones diurnas solo se utilizan las bandas 4 y 5, de acuerdo con el algoritmo de McClain (1985). Estas últimas bandas captan la energía emitida por la superficie oceánica en las longitudes de onda de máxima emisión de la superficie terrestre (Rees W. G., 1990).

2.4.2. CALIBRACIÓN AVHRR

El proceso de calibración se puede considerar en dos etapas, la primera antes del lanzamiento del sensor y la segunda aplicada a los datos medidos. La calibración del sensor antes del lanzamiento se hace en una cámara de vacío para minimizar la absorción de la radiación en su trayectoria, entre la fuente y el radiómetro, y simular las condiciones del espacio. El radiómetro apunta secuencialmente hacia un cuerpo negro cálido calibrado en el laboratorio que simula a la Tierra, y a un cuerpo frío a 77 °K que representa el espacio; así como también, a sus propios cuerpos negros internos. Las temperaturas de brillo de los cuerpos negros mencionados, son captadas por los termistores o termómetros de resistencias de platino (PRTs). Las radiancias de cada canal se calculan a partir de las temperaturas de brillo por métodos lineales, y no lineales en el caso de los satélites NOAA 13 y posteriores. Sin embargo, las características del sensor antes del lanzamiento no permanecen constantes a través del paso del tiempo. Una razón es que los ambientes térmicos varían con la posición de la órbita, causando aumentos en la señal. También los componentes envejecen con el tiempo que transcurre entre el pre-lanzamiento y el lanzamiento (varios años), además este proceso de envejecimiento aumenta a partir de los dos años de estar en órbita.

Para aminorar las variaciones debidas al desgaste, los radiómetros han sido diseñados para ver el espacio sideral y uno o más cuerpos negros internos como parte de sus secuencias de barrido en órbita. Esto proporciona datos en la región de las microondas y del infrarrojo para determinar el cociente señal/ruido y la pendiente y el intercepto radiométricos. Desafortunadamente no hay fuentes de calibración a bordo para la región del visible. Por lo cual, se debe usar la calibración hecha durante el pre-lanzamiento por medio de relaciones lineales para los canales 1 y 2, rojo e infrarrojo cercano respectivamente (SeaSpace, 1999).

En el segundo caso, la calibración de los datos obtenidos por los sensores, se lleva a cabo utilizando los coeficientes y métodos descritos en NOAA Polar Orbiter Data User's Guide (NOAA, 2003). A través de los coeficientes de calibración se pueden transformar los datos del AVHRR de los canales 3, 4 y 5 en valores de temperatura de brillo, mientras que los canales 1 y 2 se transforman a porcentaje de albedo.

2.4.3. CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA AVHRR

La corrección atmosférica es una fase del procesamiento que elimina información debida a los efectos de absorción o dispersión por el vapor de agua, los aerosoles y gases presentes en la atmósfera. Del total de energía proveniente del Sol, que recibe el mar, éste refleja una parte en la región del azul ($0.4 \mu\text{m}$) y en el verde ($0.5 \mu\text{m}$), al mismo tiempo que emite energía en longitudes de onda del infrarrojo térmico $10.3 \mu\text{m}$ (Rees W. , 1990). Es necesario el conocimiento de los componentes químicos de la atmósfera como el oxígeno, el dióxido de carbono y el vapor de agua; así como, aerosoles y partículas suspendidas, para la creación de modelos que ayuden a corregir la atenuación sufrida por la energía incidente, en su trayectoria a través de la atmósfera, debido principalmente a dos procesos: absorción y dispersión, [ilustración 15](#). En el fenómeno de absorción los gases y el vapor de agua presentes en la atmósfera capturan la energía, la conservan y eventualmente la irradian en diferentes direcciones y longitudes de onda (IOCCG,

2002). En cuanto al fenómeno de dispersión, se conocen tres casos en los que se presenta:

1) la dispersión Rayleigh, cuando las partículas que interactúan con la energía son más pequeñas que las longitudes de onda incidentes y por lo tanto reflejan las longitudes de onda corta menores a $0.4 \mu\text{m}$

2) dispersión Mie, se presenta cuando el tamaño de las partículas es mayor que aquéllas que intervienen en la dispersión Rayleigh y similar a las longitudes de onda que reciben

3) la dispersión No-selectiva, se presenta cuando el tamaño de las partículas es mayor que las longitudes de onda, se trata de partículas líquidas de agua, polvo o aerosoles. Las gotas de agua de las nubes o niebla reflejan de manera No-selectiva las longitudes de onda del visible, infrarrojo cercano y medio, de tal manera que al combinarse las longitudes de onda del azul, verde, rojo y colores intermedios produce el color blanco. La suma del efecto por absorción y dispersión ocasiona una atenuación en la energía incidente en la superficie de los objetos; así como, en la que recibe el sensor.

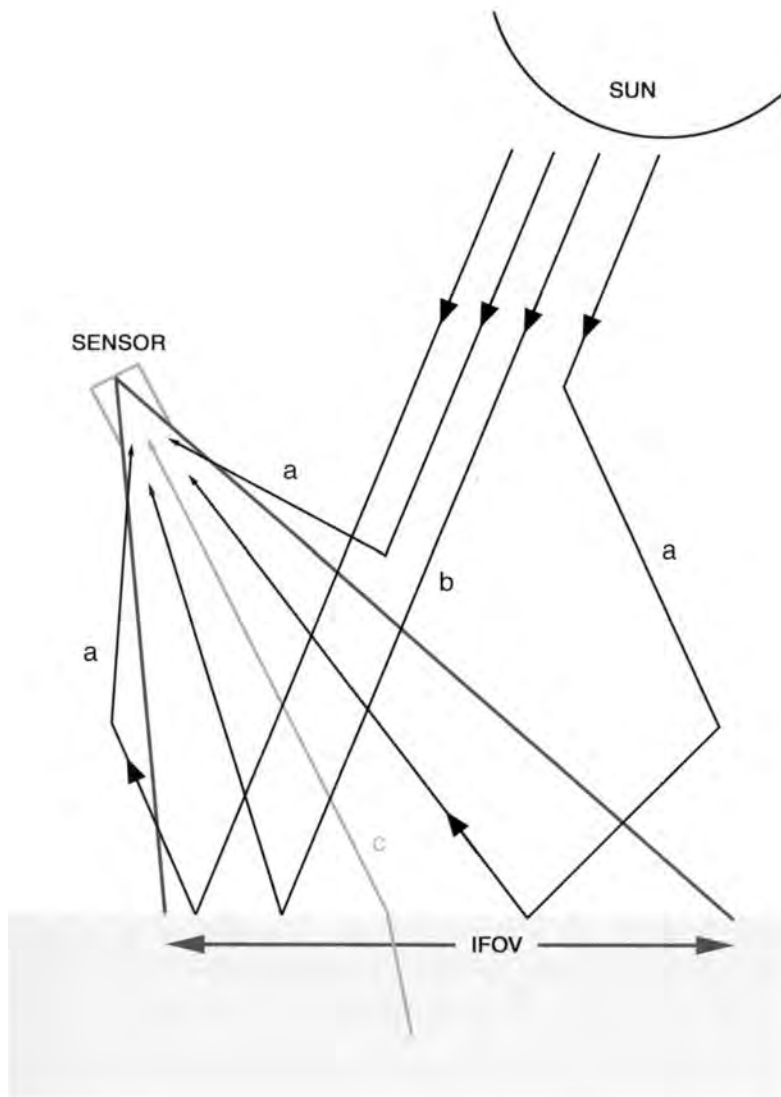


Ilustración 15. Interacción con la atmósfera.

Trayectorias de la luz que llega al sensor. (a) Luz dispersada por la atmósfera.

(b) Reflexión especular directa de la superficie del mar.

(c) Luz emergente del mar, es luz que penetra y posteriormente sale para alcanzar el sensor. Esta es la componente que realmente aporta información sobre los cuerpos de agua. IFOV (campo de visión instantáneo).

Fuente: IOCCG (2000)

2.4.4. CARACTERÍSTICAS SENSOR SEAWIFS

El Sensor SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field of view Sensor) fue puesto en órbita en 1997 abordo del satélite OrbView-2. Describe una órbita polar a 705 km de la superficie terrestre cada 99 minutos aproximadamente, por lo que cubre toda la

Tierra 14 y 15 veces. En la [Tabla 4](#) se describen algunas de las características de estas imágenes; sin embargo, es pertinente aclarar que las imágenes usadas en este trabajo tienen una resolución espacial de 9 km, dado que su cobertura es global y fueron adquiridas del sitio Goddard Distributed Active Archive Center del NASA/Goddard Space Flight Center.

Resolución espectral: Cada imagen se compone de ocho bandas localizadas principalmente en las regiones del visible e Infrarrojo cercano (IRC) del espectro electromagnético, desde el violeta hasta el infrarrojo cercano,

<i>Bandas</i>	<i>Resolución espectral</i>	<i>Aplicaciones</i>
1	0.402-422 μm (violeta-azul)	Absorción de sustancia amarilla
2	0.433-453 μm (azul)	Absorción de clorofila <i>a</i>
3	0.480-0.500 μm (azul-verde)	Absorción de pigmentos no clorofílicos
4	0.500-0.520 μm (verde)	Concentración de clorofila <i>a</i>
5	0.545-0.565 μm (verde-amarillo)	Correlación con fluorescencia
6	0.660-0.680 μm (anaranjado-rojo)	Absorción de clorofila <i>a</i>
7	0.745-0.785 μm (rojo)	Corrección atmosférica
8	0.845-0.885 μm (IR cercano)	Corrección atmosférica

Tabla 4. Resolución espectral, nivel de saturación y aplicaciones del sensor SeaWiFS

Resolución espacial: El píxel o celdas que conforman las imágenes SeaWiFS miden 1.1 km² en cobertura LAC, al nadir, y 9 km² en cobertura GAC. En los extremos de la imagen el área que cubre el píxel es mayor de 1.1 km² y puede llegar hasta 5 km². El IFOV para este sensor mide 1.6 mrad.

Resolución temporal: Para el caso de SeaWiFS es aproximadamente de 12 h, aunque el paso de noche no es de utilidad para las mediciones del color del mar.

Resolución radiométrica: 10 bits al igual que los datos AVHRR

Nivel de saturación: Una de las características de SeaWiFS como sensor del color del océano, es su capacidad para registrar señales de baja intensidad como las provenientes del agua de mar, en consecuencia, tiene un intervalo de saturación bajo, comparado con otros sensores dedicados a estudios terrestres.

2.4.5. CALIBRACIÓN SEAWIFS

Este sensor consiste en un escáner y un módulo electrónico. El escáner contiene los mecanismos de barrido óptico, detectores y preamplificadores. El módulo electrónico contiene los componentes para el manejo de la señal, los comandos y la telemetría; así como, la fuente de poder.

La calibración del sensor en órbita, se hace mediante un calibrador solar de tal forma, que si se requiere, el sistema óptico visualiza un difusor iluminado por el Sol cuando pasa por el polo sur. Además, la plataforma puede ser rotada para que el instrumento vea hacia la Luna llena, la cual es considerada una fuente de calibración estable para fines de monitoreo de largo periodo. (Barnes A., Holmes, Barnes, Wayne, McClain, & Svitek, 1994)

2.4.6. CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA SEAWIFS

Las condiciones atmosféricas varían en el tiempo y el espacio de tal forma que lo óptimo es hacer una corrección atmosférica por cada imagen con datos meteorológicos de la misma fecha y hora de la toma de la imagen; sin embargo, esto puede volverse impráctico por la dificultad que puede representar la obtención de dichos datos meteorológicos y por el tiempo que representa procesar más de una imagen de manera individual, puesto que en muchos casos se procesan series de tiempo. Esta corrección atmosférica individual es recomendable cuando hay aerosoles o eventos extraordinarios, que salen de las condiciones atmosféricas promedio. Por otro lado, existen algoritmos de corrección atmosférica que toman en cuenta las condiciones generales y se aplican a cualquier imagen, estas correcciones son válidas siempre y cuando no

se olvide que están basados en modelos. En el estudio del color del mar las correcciones atmosféricas implican la corrección por el efecto de la dispersión de Rayleigh causada por aerosoles, y el efecto de absorción alrededor de las 0.600 μm debido al ozono estratosférico, el cual varía temporalmente y está estimado para cada día del año de manera precisa (Robinson, 1985). La dispersión Rayleigh se debe al choque de los fotones con las moléculas de aire y aerosoles en las capas altas de la atmósfera, particularmente en la ionósfera, a 50 km sobre la superficie terrestre. Para el cálculo de la dispersión por los aerosoles con partículas más grandes que los tamaños moleculares se aplica corrección Mie, y se requiere del conocimiento de las condiciones de visibilidad meteorológica local como medida de la cantidad de neblina por aerosoles.

En la [ilustración 16](#), se marca con línea punteada la firma espectral del agua pura, mientras que, con líneas sólidas se muestra cómo se incrementa la reflectancia alrededor de las 0.6 μm mientras que disminuye en las 0.4 μm conforme se incrementa el contenido de sustancia amarilla.

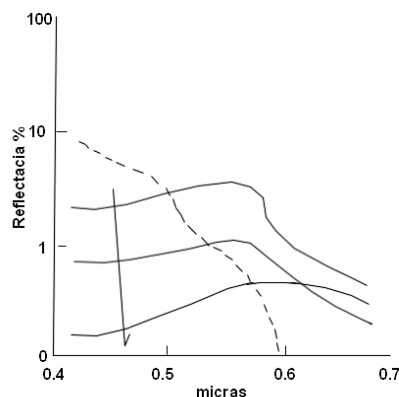


Ilustración 16. La línea punteada corresponde a la firma espectral del agua pura; las líneas sólidas indican la variación de la firma espectral del agua con sustancia amarilla.

Fuente: (Robinson, 1985)

2.5. PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS UTILIZADAS

2.5.1. MERCATOR

Las proyecciones más comúnmente utilizadas para la República Mexicana son la Universal Transversa de Mercator (UTM) y la Cónica Conforme de Lambert, mientras que, en oceanografía se utiliza Normal de Mercator. Esta proyección tiene la propiedad de conservar las formas y de cortar los paralelos y meridianos en ángulos rectos de tal manera que conserva los ángulos reales. El efecto consecuente es aumentar la distancia entre los paralelos conforme se incrementa la latitud, pero mantiene la línea loxodrómica (línea recta) que corta cualquier dirección dada bajo los mismos ángulos que tienen sobre la superficie terrestre lo cual la hace útil para la navegación aérea y marítima (Caire Lomelí, 2002).

En el procesamiento de imágenes es indispensable tener una referencia geográfica, o georreferenciación, a partir de la cual ubicar posiciones con alta precisión. Georreferenciación, implica la corrección geométrica y el ajuste de una imagen a una proyección cartográfica con la finalidad de identificar el lugar a que corresponde dicha imagen. Uno de los mecanismos a través de los cuales se lleva a cabo la georreferenciación es utilizar puntos de control (Rees W. , 1990); es decir, localizar puntos en un mapa e identificarlos en la imagen introduciendo sus coordenadas cartográficas; o bien, a través de una imagen ya corregida que sirva de referencia, o de puntos obtenidos mediante GPS (Sistema de Posicionamiento Global). En tierra es relativamente fácil encontrar puntos de control pero cuando se trata del océano y sobre todo cuando se tiene una imagen en donde no hay línea de costa, la georreferenciación se vuelve más compleja. En tales circunstancias es recomendable hacer uso de los datos de la órbita y geometría del satélite para realizar una rectificación teórica en donde se elimine la distorsión causada por la curvatura de la Tierra y la oblicuidad en el campo de vista del satélite (Robinson, 1985). La precisión de la posición; es decir, de la referencia geográfica, es de suma importancia en estudios oceanográficos, si se quiere hacer un seguimiento de patrones de temperatura superficial o de color del mar, puesto que es nuestra única referencia para extraer información de una serie de imágenes o para ubicar estaciones de muestreo.

La proyección Normal de Mercator o Mercator Simple, se caracteriza por representar en un plano toda la superficie terrestre, exceptuando las zonas polares. El plano se desarrolla sobre un cilindro tangente al ecuador terrestre. Los meridianos se representan como líneas rectas paralelas entre sí, espaciadas de manera uniforme, que se cruzan con los paralelos en ángulos rectos. Por su parte la distancia entre los paralelos no es uniforme, sino que crece hacia las altas latitudes. Es una proyección conforme ya que conserva la forma de los continentes en aquéllas zonas cercanas al ecuador, pero hacia los polos, la separación entre los paralelos se hace mayor lo cual provoca que las áreas sean más grandes que su tamaño real, por lo tanto no es una proyección útil para representar zonas más allá de los 80° de latitud norte y sur. Esta proyección fue ideada por Gerardus Mercator en 1569 y ha sido muy usada en la navegación debido a que permite trazar los rumbos constantes como líneas rectas conocidas como loxodrómicas (Caire Lomelí, 2002).

2.5.2. CILÍNDRICA EQUIDISTANTE SIMPLE (PLATE CARRÉE)

En esta proyección los meridianos y paralelos son líneas rectas espaciadas uniformemente que se cortan en ángulos rectos, con el Ecuador como paralelo de referencia. Es una proyección de las más antiguas, alrededor de 200 a.C., como lo indica la historia de la cartografía con Eratóstenes, Hiparco y Marino de Tiro quien posteriormente utilizó este sistema tomando como paralelo de referencia el Ecuador en el Siglo I de la era cristiana (Raisz, 1985). Actualmente está siendo muy utilizada porque facilita la representación global de la superficie terrestre en aplicaciones informáticas de aquí su utilidad en imágenes de satélite. Sin embargo, no es una proyección conforme y tampoco se debe usar para la navegación.

2.6. FUNCIONES EMPÍRICAS ORTOGONALES

El análisis de las Funciones Empíricas Ortogonales (FEO) es una técnica de análisis multivariado multitemporal que sirve para relacionar variables a través del método de correlación; o bien, de varianza-covarianza con la finalidad de

comprimir grandes cantidades de datos eliminando información redundante, de tal forma que los modos obtenidos muestren la información común a todas las variables, mediante combinaciones lineales. El cálculo de las FEO se puede realizar a partir de una matriz de varianza-covarianza, pero si se tienen intervalos de datos que difieren demasiado entre las bandas de una imagen satelital y se necesita hacer una normalización, se usa la matriz de correlación. En el caso de matrices de datos satelitales en lugar de utilizar las matrices mencionadas como métodos de aproximación, se utiliza el método de Descomposición de Valores Singulares (SVD, en inglés) dado que son matrices donde $m > n$. Normalmente se obtienen tantos modos como variables; sin embargo, sólo se ocupan los primeros, considerando que en conjunto éstos representan un alto porcentaje de la varianza explicada, mayor al 75%, comúnmente con los tres primeros modos es posible alcanzar este porcentaje. Así, el primer modo mostrará la mayor cantidad de información a través de una combinación lineal con el mayor porcentaje de varianza retenida de todas las variables y el último modo mostrará la información menos común (la combinación lineal con la menor varianza).

Debido a que las imágenes procesadas de TSM frecuentemente están correlacionadas, el uso de las FEO produce imágenes no correlacionadas para segregar los componentes ruidosos y, reducir la dimensión de la matriz de datos.

Las Funciones Empíricas Ortogonales calculan funciones ortogonales de una variable multidimensional en donde se asume que cada uno de los patrones ocurre a lo largo de una de las dimensiones de la variable. El resultado contiene la eigenestructura, eigenvalores y eigenvectores de la variable(s) de entrada, la cual representa los principales modos empíricos obtenidos. Éstos son una combinación lineal de las variables originales, y que además serán independientes entre sí.

El objetivo de las Funciones Empíricas Ortogonales es transformar el espacio de representación P en un nuevo espacio, P' , [ilustración 17](#), en el que los datos no están correlacionados (la matriz de covarianza en ese espacio será *diagonal*). En otras palabras, se trata de encontrar un nuevo conjunto de ejes ortogonales en el que la varianza de los datos sea máxima.

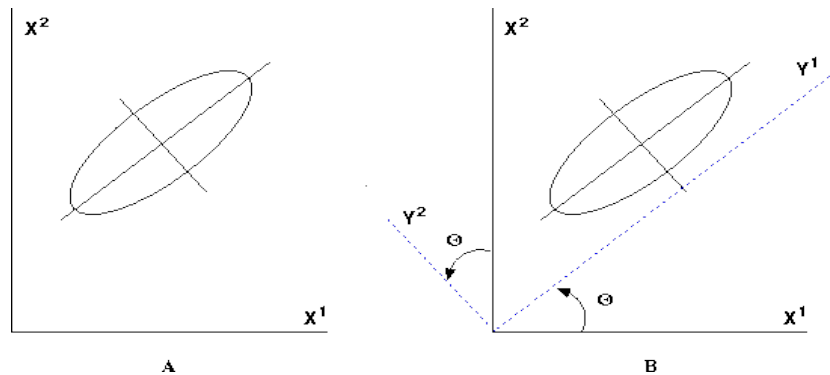


Ilustración 17. Espacio de transformación

http://etsiit.ugr.es/depar/ccia/rf/www/tema5_00-01_www/node11.html

En términos geométricos el problema se reduce a encontrar el ángulo de rotación θ en el espacio P de tal forma que la información pueda ser retenida en el espacio P' transformado. La relación entre los nuevos ejes y los antiguos consiste en una relación lineal. En términos matriciales y considerando espacios multidimensionales, la búsqueda de la transformación lineal W puede escribirse como

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \cdots & W_{1d} \\ W_{21} & W_{22} & \cdots & W_{2d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{d1} & W_{d2} & \cdots & W_{dd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_d \end{bmatrix}$$

La transformación consiste en una rotación de los ejes de P tomando como referencia el origen de las coordenadas. La consecuencia es que si los ejes de P' deben ser ortogonales, la distancia euclidiana entre el origen y los puntos se mantiene inalterada con esta transformación. Por lo tanto la matriz de transformación W debe ser ortogonal de tal forma que

$$W^T W = W W^T = 1$$

El problema puede formularse como un problema de maximización (varianza en P') con restricciones (ortogonalidad de W). La técnica adecuada es la utilización de los llamados *multiplicadores de Lagrange* (Hinchey, 1979) (Kaplan, 1981).

- $(\Sigma_X - \lambda I) W = 0$

Las soluciones a esta ecuación (los valores de λ) se conocen como los eigenvalores de Σ_X . Cuando se sustituyen en la ecuación, se calculan los vectores asociados a cada valor de λ , que se conocen como los eigenvectores de Σ_X

- λ : eigenvalores
- Σ_X : *eigenvectores*

La matriz de covarianza Σ_Y será una matriz diagonal de eigenvalores de Σ_X

Cada eigenvalor λ_1 tiene asociado un eigenvector ϕ_1 que define la dirección de un eje en el espacio transformado, P'

$$\Sigma_Y = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_d \end{bmatrix}$$

Dado que los eigenvalores están ordenados (por el valor de varianza en cada eje de P') y, que cada eigenvalor tiene asociado un eigenvector, podemos establecer un orden entre las variables transformadas de forma que:

Y1:

Es el Primer eje en P' (primer modo).

La dirección de la máxima varianza de los patrones en P está determinada por este eje.

Y2:

Es el Segundo eje en P' (segundo modo).

La dirección de la máxima varianza en P entre todos los ejes ortogonales a Y_1 está determinada por este eje.

A manera de ilustración podemos considerar un ejemplo numérico asociando a cada eigenvalor λ , un valor relativo de importancia, considerando su aportación porcentual a la varianza total.

Sea $\lambda_1=2.67$ y $\lambda_2=0.33$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 3$$

$$\gamma_1 = 2.67/3 = 0.89 \%$$

$$\gamma_2 = 0.33/3 = 0.11 \% \text{ de la varianza explicada (global)}$$

2.7. DESCOMPOSICIÓN DE VALORES SINGULARES

La descomposición de valores singulares (SVD por sus siglas en inglés), es una factorización de una matriz real o compleja.

La factorización de la matriz $M = m \times n$ es de la forma

$$M = USV'$$

El resultado es una matriz M , que tiene la misma dimensión que la matriz original (X); así como, sus matrices unitarias U y V de tal manera que $X = UxSxV'$.

Donde:

U es una matriz $m \times m$

S es una matriz diagonal de elementos no negativos en orden decreciente de $m \times n$

V' es la matriz transpuesta de $V = n \times n$

Los valores diagonales de S corresponden a los valores singulares de M . Las columnas m de U y las columnas n de V corresponden a los vectores singulares izquierdos y vectores singulares derechos de M .

La descomposición de valores singulares y la eigendescomposición están altamente relacionadas, así:

- Los vectores singulares izquierdos (U) de M son los eigenvectores de MM'
- Los vectores singulares derechos (V) de M son los eigenvectores de $M'M$
- Los valores singulares distintos de cero de S son las raíces cuadradas de los eigenvalores distintos de cero de $M'M$ o MM'

Una de las aplicaciones de los SVD es su función como matriz de aproximación para el cálculo de las Funciones Empíricas Ortogonales. El resultado contiene la eigenestructura de dos variables la cuales representan los principales modos empíricos de covariabilidad que son ortogonales. En la extracción de dichos modos de covariabilidad, SVD maximiza el cuadrado de la covarianza en cada modo. (SeaSpace, 1999)

La Descomposición Singular de Valores se aplica cuando en la matriz de datos $m \times n$, $m > n$. Esto ocurre cuando hay más datos de una variable que variables, tal es el caso de las imágenes satelitales de TSM y [Chla], donde se tiene una gran cantidad de datos de cada variable (m) y solo 12 variables en (n) que corresponden a 12 meses climatológicos. Al aplicar la descomposición singular de los valores, la matriz original se reduce a una matriz (M), en donde las columnas representan el tiempo (12 meses) y los renglones (12) los datos de TSM o [Chla].

3. METODOLOGÍA

Este apartado describe la metodología y estrategias propuestas que se siguieron para el establecimiento de regiones en el Golfo de México y Mar Caribe mexicano, a partir de la variabilidad espacio-temporal de la TSM en el periodo comprendido entre 1996 y 2008; así como, de [Chla] en el periodo 1998 a 2008, desde la obtención de las imágenes hasta el cálculo de los Funciones Empíricas Ortogonales (FEO), [ilustración 18](#). Las FEO son un tipo de análisis multivariado, y será la técnica a emplear para la identificación de las regiones, mientras que la definición de los límites de éstas se hará con base en los procesos oceanográficos conocidos en el área de estudio; así como, bajo el criterio de “no sobreposición” de las áreas identificadas. La metodología se puede resumir en 5 etapas, la última incluye el análisis de la relación entre el comportamiento de los parámetros mencionados con la producción pesquera del pez Sierra y del camarón.

Etapas.

- Procesamiento de imágenes AVHRR. Obtención de promedios y anomalías mensuales climatológicas de la temperatura superficial del mar; así como, de las Funciones Empíricas Ortogonales a partir de imágenes AVHRR con 1.1 km de resolución espacial al nadir, tomadas del archivo de imágenes del Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México, del periodo 1996-2008 utilizando el sistema TeraScan©.

- Procesamiento de imágenes SeaWiFS. Obtención de promedios y anomalías mensuales climatológicas de [Chla]; así como, de los Funciones Empíricas Ortogonales, derivadas de imágenes SeaWiFS a 9 km de resolución espacial, tomadas del sitio (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/REPROCESSING/SeaWiFS/R5>), del periodo 1998-2008 utilizando el programa Matlab©.

- Definición de regiones en el Golfo de México y Mar Caribe mexicano a través del resultado del análisis de Funciones Empíricas Ortogonales de la TSM y [Chla]
- Caracterización del Golfo de México y Mar Caribe mexicano, mediante las regiones encontradas y su relación con los procesos oceanográficos en el área de estudio.
- Análisis de la distribución espacio-temporal de la TSM y [Chla] con la producción pesquera del camarón y el pez Sierra, obtenidos de los anuarios de pesca de SAGARPA/CONAPESCA (INP, 1999).

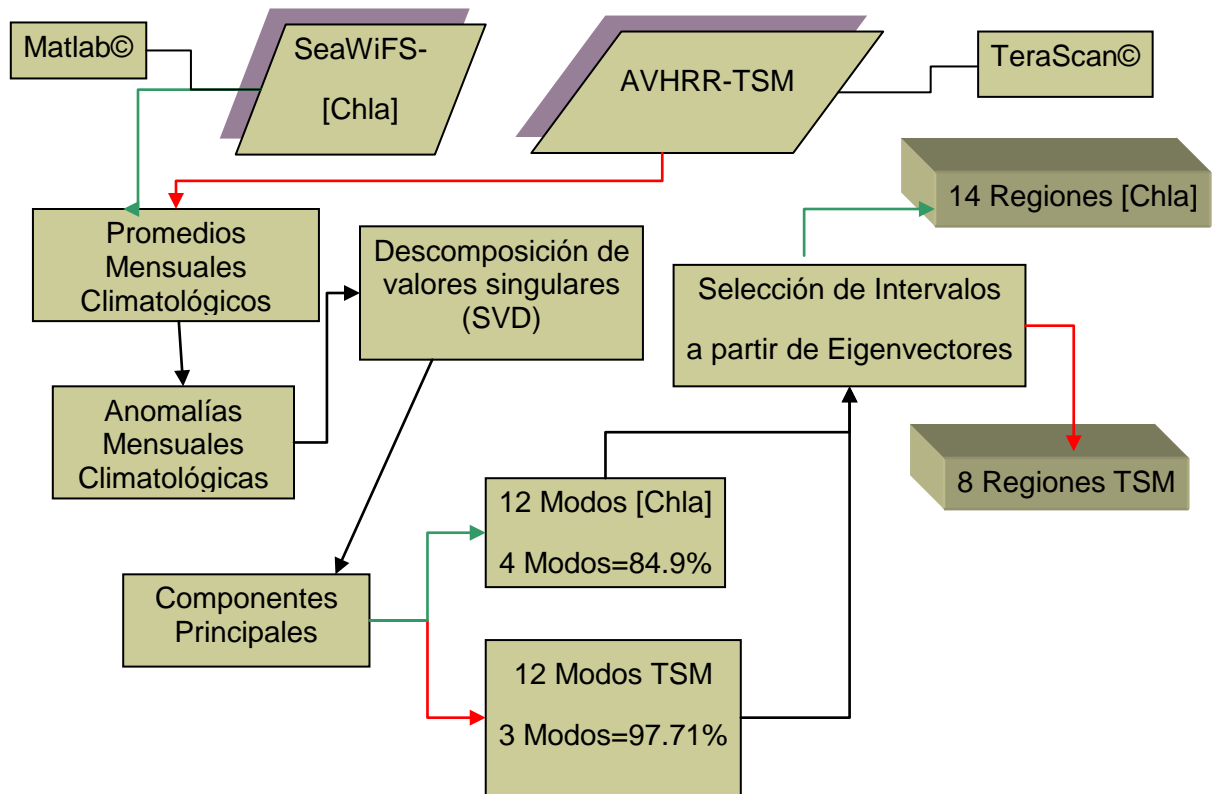


Ilustración 18. Diagrama conceptual de la metodología utilizada

3.1. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

3.1.1. AVHRR

3.1.1.1. RECEPCIÓN DE DATOS

En Enero de 1996 fue instalada la estación receptora de imágenes de satélite (ERISA), en el Instituto de Geografía en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), con el propósito de recibir, estudiar y distribuir la información obtenida de los satélites conocidos como meteorológicos. Uno de los productos que se obtienen sistemáticamente es la TSM. A continuación se hace una descripción de procesamiento que se lleva a cabo para su obtención; así mismo, en la [tabla 5](#) se muestra el periodo de funcionamiento de los satélites NOAA, algunos no han sido dados de baja aunque ya presentan fallas como el NOAA-15. Actualmente en ERISA se reciben los NOAA-15, 16, 18 y 19.

Satélite	Lanzamiento	De baja
NOAA-12	Mayo 1991	Agosto 2007
NOAA-14	Diciembre 1994	Mayo 2007
NOAA-15	Mayo 1998	
NOAA-16	Septiembre 2000	
NOAA-17	Junio 2002	
NOAA-18	Mayo 2005	
NOAA-19	Febrero 2009	

Tabla 5. Periodos de funcionamiento de los satélites NOAA

La primera etapa consiste en la recepción y almacenamiento de las imágenes en formato crudo (raw), e importarlas del formato de telemetría High Resolution Picture Transmission (HRPT) a formato Terascan. En esta etapa intervienen varios procesos que permiten importar las imágenes en formato "TeraScan": Terascan Data Format (TDF) de 10 bits de resolución radiométrica, lo cual implica determinar el número de líneas y columnas; así como, el cálculo de su ubicación geográfica utilizando los elementos orbitales del satélite. Al mismo tiempo se extraen datos auxiliares (coeficientes) que sirven para la calibración de los datos AVHRR, esto es, la conversión de los datos crudos a porcentaje de albedo para el caso de los canales 1 y 2; así como, a la temperatura de brillo equivalente a un

cuerpo negro en grados Celsius para los canales 3, 4 y 5. En esta etapa también se hace un remuestreo espacial de la imagen y se selecciona el área de interés; es decir, se extrae solamente el área correspondiente al Golfo de México y Mar Caribe mexicano.

3.1.1.2. CALIBRACIÓN RADIOMÉTRICA

La calibración del sensor es relevante dentro del procesamiento de las imágenes. Es una tarea que se realiza antes y después de su lanzamiento al espacio, una vez en órbita y en funcionamiento es posible calibrarlo continuamente mediante una lámpara de temperatura de brillo conocida, como el Sol, para el caso de sensores de longitudes de onda localizadas en la parte visible del espectro, y de un cuerpo negro de temperatura también conocida en el caso de sensores de longitudes de onda en el infrarrojo térmico.

El sensor recibe información de la superficie terrestre, marina y de la atmósfera, como una variación de voltaje. Posteriormente la transmite a una estación receptora en donde se convierte a un valor digital; sin embargo, al hacer dicha conversión se pierde información debido a que la señal recibida, que originalmente es una variable continua, se transforma en una variable discreta en código binario. Durante esta conversión se pierde detalle en la resolución radiométrica, lo cual significa perder parte de los datos captados por el sensor dado que implica la agrupación de los mismos, comúnmente en 256 clases cuando se utilizan 8 bits (2^8 bits), o 1024 clases cuando se usan 10 bits (2^{10} bits), como es el caso de los datos AVHRR. Al mismo tiempo, la calibración radiométrica de los datos obtenidos de la superficie terrestre, implica su transformación a porcentaje de albedo para los canales 1 y 2; así como, a temperatura de brillo en grados Celsius para los canales 3, 4 y 5, para lo cual se utilizan coeficientes específicos para cada sensor AVHRR que se derivan de la calibración antes de su lanzamiento, estos coeficientes se obtienen del sitio web de la NOAA, los cuales se actualizan en forma periódica.

3.1.1.3. CORRECCIÓN GEOMÉTRICA

Un aspecto importante a considerar para el análisis multitemporal es que todas las imágenes deben tener el mismo tamaño y formato de variable. Particularmente en este estudio, la selección del área y el formato se definen desde la etapa de ingesta en el programa utilizado (TeraScan), donde además de confirmar el número de canales AVHRR a utilizar y calibrar radiométricamente los datos, se determina el área de interés y por ende el tamaño de la matriz, en términos de líneas y columnas. El siguiente paso es corregir geoméricamente la imagen a través del método de navegación, el cual consiste en ajustar la imagen a una línea de costa. Los archivos de costa que incluye el sistema TeraScan son generalmente extraídos de la Carta Digital Mundial (Digital Chart of the World, DCW) o de la Base de datos mundial II (World Database II, WDB2) de la Agencia de Inteligencia Central (Central Intelligence Agency, CIA).

La WDB2, está a una escala de 1:3000000 en general; sin embargo, parte de Europa, América Central, sureste de Asia y Medio Oriente fueron digitalizadas a 1:1000000, mientras que el noreste de la antigua URSS y Antártica a 1:4000000 (CIA, 1972)

La Carta Digital Mundial (DCW) es un mapa base vector escala 1:1000000. La base fue diseñada para aplicaciones de navegación y apoyo militar (DMA, 1992)

TeraScan, por omisión, utiliza la línea de costa WDB2. Después de ajustar la línea de costa con la imagen se puede hacer el remuestreo espacial de los pixeles; es decir, moverlos a su posición geográficamente correcta, cambiando su valor digital, y definir una proyección cartográfica, en este caso la proyección Normal de Mercator.

3.1.1.4. CÁLCULO DE TSM

La determinación de la TSM en el sistema TeraScan utiliza los algoritmos creados por McClain et al., (1985), para imágenes de día y el de Bernstein (1982) para los pasos nocturnos, en el que además de los canales 4 y 5 se utiliza el canal 3. El algoritmo de McClain et al., (1985) aprovecha las diferencias del efecto atmosférico en la ventana infrarroja térmica, bandas 4 y 5, mientras que el algoritmo de Bernstein (1982) utiliza la diferencia entre las bandas 3 y 4 para distinguir superficies nubosas de aquéllas libres de nubes, [ilustración 19](#), basándose en la diferencia de la emisividad entre la superficie oceánica y las nubes. Para la banda 4, la emisividad entre ambos objetos es muy cercana a la unidad, mientras que en la banda 3, la emisividad del mar es cercana a la unidad y la emisividad de las nubes es menor, alrededor de 0.75. Como resultado, la diferencia banda 3 y banda 4 será negativa para superficies nubosas. En la superficie del océano, la diferencia (banda3 – banda4) está relacionada con el total del vapor de agua atmosférico a través del cual la señal viaja hacia el sensor. En condiciones muy húmedas, la diferencia entre la banda 3 y banda 4 es significativamente positiva, alrededor de 2; en condiciones de humedad moderada es ligeramente positiva, alrededor de 1. En condiciones de poca humedad la diferencia será ligeramente negativa, -0.5; y para condiciones atmosféricas muy secas, la diferencia puede alcanzar un valor de -1.0. (SeaSpace Corporation, 2009).

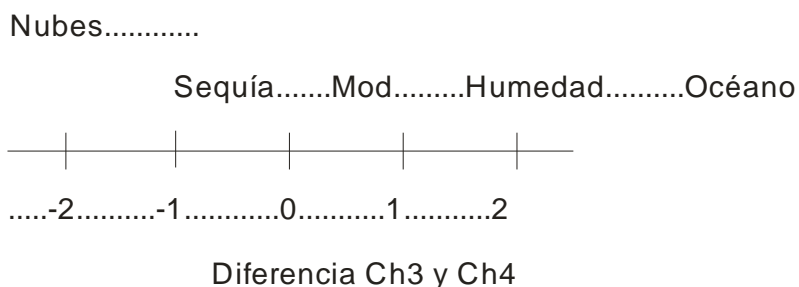


Ilustración 19. Diferencia canal 3 y canal 4

Las temperaturas diarias en grados Celsius se obtienen al aplicar el algoritmo Multicanal de temperatura superficial del mar (mc o mcsst) (McClain, Pichel, & Walton, 1985) y el algoritmo (bz) (Bernstein, 1982). Posteriormente se calculan los promedios mensuales. La ejecución de dichos algoritmos requiere de coeficientes predeterminados para cada sensor (nitpix.coef), los cuales pueden obtenerse de la página de SeaSpace (<http://www.seaspace.com>). Nitpix.coef es un archivo de texto en el cual también se describen los algoritmos de ventana dividida: mc, doble ventana: bz y, triple ventana: tw; para calcular la TSM a partir de sensores AVHRR. Las imágenes de temperatura usadas en esta tesis se procesaron con el método mcsst, puesto que sólo se utilizaron pasos diurnos. Sin embargo, se han hecho modificaciones de manera empírica, por investigadores del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, para adecuarlos a las temperaturas de los mares de México.

Algoritmos para el cálculo de la TSM

Ventana dividida, mcsst (McClain, Pichel, & Walton, 1985)

$$TSM = A(T_4) + B(T_4 - T_5) + C(T_4 - T_5)(\text{SEC}(sza) - 1) + D(\text{SEC}(sza) - 1) + E$$

Donde:

E: constante para transformar el resultado de grados Kelvin a grados Centígrados en cuyo caso se especifica: E(C).

T3, T4 y T5: temperaturas de brillo de los canales 3, 4 y 5.

A, B, C, y D: coeficientes que contiene el archivo nitpix.coef y que varían en función del satélite NOAA de que se trate.

(sza) se refiere al ángulo cenital satelital, aquél que se forma entre la normal a un punto y el vector de vista del satélite (Ilustración 20).

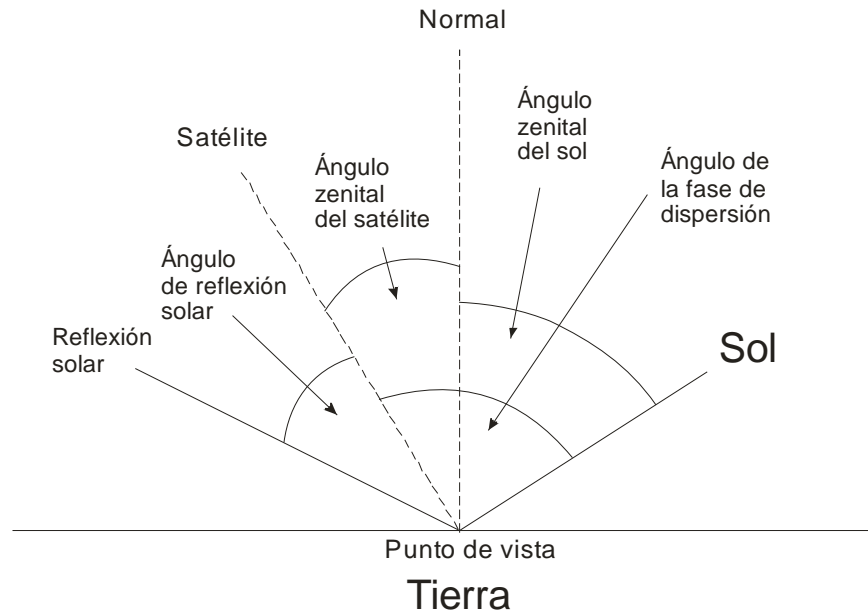


Ilustración 20. Geometría Sol - Tierra - Satélite

Este algoritmo se conocen como de ventana dividida (Split window) porque utiliza dos canales que pertenecen a la misma ventana de transmisión atmosférica, en los cuales la emisividad captada varía debido a la interacción, absorción y emisión, de la energía con la atmósfera, especialmente el vapor de agua, de tal forma que se tienen dos mediciones simultáneas para estimar el grado de atenuación de la señal recibida por el sensor, debida al efecto atmosférico (Kahru, Nagarani, & Kirankumar, 2001).

TeraScan aplica el algoritmo correspondiente a través del comando nitpix con valores por omisión ([Tabla 6](#)) que se relacionan con los parámetros que a continuación se describen (SeaSpace, 1999):

- *cos_sat_zen*. El coseno del ángulo cenital del satélite
- *ch4_delta*. El máximo valor ($ch4 - \text{píxel central } ch4$, en una ventana de 3x3) que se puede alcanzar, de manera tal que si la diferencia excede el valor máximo especificado por el usuario, o el valor por omisión (0.3), se considera nube. Las unidades de este parámetro son las mismas unidades de temperatura que las de entrada.

- *ch2_max*. El máximo valor que puede alcanzar el pixel central de cada ventana de 3x3 en el canal 2, en pasos diurnos. Si el pixel excede el valor máximo especificado por el usuario, se considera nube. El valor por omisión es 3.0.
- *ch2_delta*. El máximo valor (valor ch2 – valor del centro en el ch2, en una ventana de 3x3) que se puede alcanzar, de tal manera que si el valor de la diferencia excede el valor máximo especificado por el usuario, se considera nube. El valor por omisión es 0.25.
- *ch3_minus_ch4*. Se calcula el promedio de la diferencia entre el ch3 y el ch4 en cada ventana de 3x3. Si éste es menor que el especificado por el usuario, se considera nube. Solo se usa en pasos nocturnos. El valor por omisión es 0.0.
- *temp_type*. El tipo de variable, byte (8 bits) o short (16 bits).
- *base_temp*. La temperatura base para escalar los valores reales de temperatura a 8 o 16 bits. Por ejemplo, si *temp_base*=10 y *temp_step*=0.1. entonces 10.2 es almacenado como 1, 10.2 es almacenado como 2,...y 35.5 es almacenado como 255. El valor no válido es almacenado como 0 y no es mapeado como 10.0.
- *temp_step*. Es el incremento de temperatura para valores escalados de 8 o 16 bits.
- *min_sun_reflect*. El ángulo de reflexión solar permisible en grados. Los pixeles por debajo de este ángulo serán considerados contaminados por el reflejo especular del sol (sun glint). El valor por omisión es 0 grados, el cual esencialmente niega la prueba. Un valor alrededor de 50 será un valor para hacer pruebas.
- *min_ch4_temp*. La mínima temperatura de brillo permisible en el ch4. Si la temperatura de brillo es menor que el mínimo permisible, se clasifica como nube alta y no se considera para los cálculos de temperatura.
- *daytime*. El ángulo de elevación del sol durante el día. Si este ángulo de elevación del sol en el centro de los datos (imagen) es menor que el ángulo de elevación del sol durante el día, se considera un paso nocturno.

	Valores por omisión	Valores adoptados empíricamente	
tsm_método	mc	mc	bz
cos_sat_zen	0.6	0.4	0.4
ch4_delta	0.3	0.5	1
ch2_max	3	5	2
ch2_delta	0.25	3	0.25
ch3_minus_ch4	0	0	1.5
Temp_type	short	short	short
min_sun_reflect	50	0	0
min_ch4_temp	0	0	0
daytime		Find	6

Tabla 6. Valores utilizados en nitpix para el cálculo de las TSM.

3.1.1.5. CÁLCULO DE ANOMALÍAS

A partir de las temperaturas diarias se calcularon los promedios mensuales desde 1996 al 2008; así como, la media climatológica mensual ($X_{Men Clim}$); es decir, el promedio mensual a lo largo del periodo de estudio con lo que se reducen los datos a 12 imágenes de TSM climatológicas, y un promedio anual climatológico ($X_{Anual Clim}$). Por último se calcularon las anomalías climatológicas tomando como referencia el promedio anual climatológico

Cálculo de anomalías Climatológicas:

$$Anom Clim = X_{Men Clim} - \bar{X}_{Anual Clim}$$

La generación de los promedios y de las anomalías climatológicas de TSM implica una reducción de la información, de tal forma que de un total aproximado de 8760 imágenes diarias, durante 12 años, provenientes de 2 sensores AVHRR, se obtuvieron 144 mensuales, 12 promedios climatológicos y 12 anomalías

climatológicas. Los promedios muestran la tendencia central, mientras que las anomalías destacan la variabilidad mensual con respecto al promedio anual, con lo cual se tiene una idea más completa de la dinámica de la TSM debido a que se resaltan las señales que no pertenecen al patrón general.

3.1.1.6. CÁLCULO DE FUNCIONES EMPÍRICAS ORTOGONALES DE TSM

El cálculo de las Funciones Empíricas Ortogonales, se realizó a partir de las matrices de anomalías climatológicas a través del método de Descomposición de Valores Singulares. Las anomalías permiten resaltar todas aquellas señales que no están dentro del patrón promedio de las temperaturas para evidenciar los fenómenos o estructuras de escala local, que responden a fenómenos estacionales.

Una vez que se han calculado las FEO es posible visualizar, en una imagen, la transformación realizada mediante la sumatoria del producto de cada coeficiente de amplitud (transformación) y el eigenvalor correspondiente en cada modo. Las unidades de escala gráfica están dadas en grados centígrados en un intervalo similar a la variación observada en las anomalías originales.

La tabla de eigenvectores muestra los coeficientes que se aplicaron para cada transformación; así como, la relación de cada uno de estos con cada modo; es decir, con cada mes del año.

Con base al análisis de las FEO, haciendo un análisis similar a la transformación canónica de componentes, se hizo la delimitación de las regiones a través de la selección de intervalos de eigenvectores (coeficientes de amplitud) que coincidieran con los límites de las plataformas y con los procesos oceanográficos.

3.1.2. SEAWIFS

Las imágenes mensuales de [Chl_a], nivel L3 derivadas del sensor SeaWiFS, con resolución espacial de 9 km equivalente a 0.088 grados de latitud y longitud, se obtuvieron del sitio Goddard Distributed Active Archive Center del NASA/Goddard Space Flight Center

(<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/REPROCESSING/SeaWiFS/R5>). El periodo de datos comprende de 1998 a 2008. Cada imagen es una matriz bidimensional en proyección cilíndrica simple de cobertura global. Las imágenes nivel L3 pueden ser variables compuestas/mapeadas a una escala de espacio/tiempo uniforme e implica que ya pasaron diferentes niveles de procesamiento: L1A, L1B y L2.

El nivel L1A son datos de radiancias, no procesados, que conservan su resolución original además de información adicional sobre los coeficientes de calibración radiométrica, geométrica y parámetros de georreferencia, (efemérides de la plataforma), que han sido calculados y agregados a la imagen pero no han sido aplicados.

El nivel L1B corresponde a los datos nivel L1A, a los cuales ya se les ha aplicado la calibración radiométrica.

El nivel L2 consiste en variables geofísicas derivadas del nivel L1B a la misma resolución que estos últimos.

Cada producto “binned” (compuesto) nivel L3 consiste en la acumulación de datos L2, para un sensor y resolución específica, correspondiente a un periodo (días, 8 días, mes, etc.) en una representación global, con una malla equiareal o “bins”.

Cada Compuesto (Standard Mapped Image, SMI) son representaciones de datos usualmente escalados a 16 bits, en una matriz de dos dimensiones en proyección Global Cilíndrica simple, también conocida como equidistante. La resolución espacial en el Ecuador, originalmente fue de 9.2 Km; sin embargo, también se usan otras resoluciones.

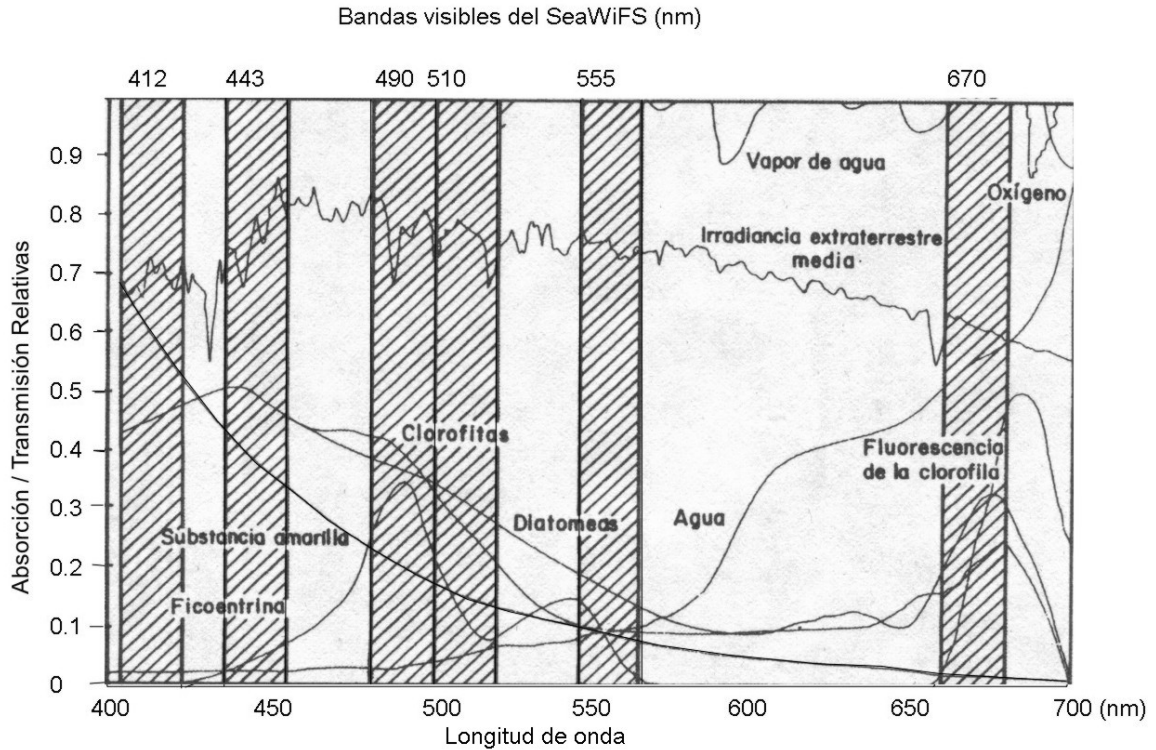
3.1.2.1. OBTENCIÓN DE DATOS

Debido a que las imágenes de [Chla], obtenidas del sitio Goddard Distributed Active Archive Center fueron promedios mensuales L3, no fue necesario hacer el procesamiento desde el inicio; es decir, desde ingresar los datos crudos, calcular las concentraciones de [Chla] diarias y posteriormente las mensuales. Solamente se hizo el recorte del área de interés; es decir, del Golfo de México y Mar Caribe

comprendido entre las coordenadas extremas de 18°N, 80°W y 31°N, 98°W. Posteriormente se calcularon los promedios mensuales climatológicos; así como, sus correspondientes anomalías mediante un programa personal desarrollado en lenguaje Matlab©. Por último, a pesar de que las unidades de los datos L3 son mg/m^3 , Matlab© los despliega como niveles digitales que van desde 0 hasta 255 por lo cual fue necesario usar una escala logarítmica para mejorar la visualización de los mismos de acuerdo con Zavala-Hidalgo et al. (2006) y Martínez-López et al. (2009).

3.1.2.2. CÁLCULO DE CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA A

El sensor remoto SeaWiFS fue diseñado específicamente para aplicaciones marinas, seis de sus bandas son capaces de captar el color del océano en la región del visible y dos más se utilizan para calibraciones atmosféricas en el infrarrojo cercano ([Ilustración 21](#)). La banda 2 y 6 (0.443 y 0.670 μm) están ubicadas en la parte de absorción de la clorofila *a*, la banda 3 (0.490 μm) representa la absorción de los pigmentos no clorofílicos (carotenoides), mientras que las bandas 4 y 5 (0.510 y 0.550 μm) corresponden a longitudes de onda en donde la clorofila *a* refleja más la energía luminosa, por tanto es una herramienta de gran valor para el estudio del color de océano y particularmente de este pigmento.



El algoritmo que utiliza la NASA (National Aeronautics and Space Agency) para calcular la [Chla], a partir de los datos obtenidos con el sensor SeaWiFS es de la forma:

$$[Chla] = -0.040 + 10^{(0.341 - 3.001x + 2.81x^2 - 2.041x^3)}$$

Donde $x =$ cociente de las bandas azul (3) y verde (5): L_w490 / L_w555

Comúnmente la clorofila *a* es considerada como un indicador con el cual se puede inferir la productividad biológica y, en consecuencia, la producción pesquera, debido a que es uno de los parámetros que afectan la distribución y abundancia de los recursos pesqueros (Butler, 1990). Concentraciones de clorofila *a* superiores a 0.2 mg/m^3 indican la existencia de suficiente vida planctónica para sustentar una pesquería comercial viable (Gower, 1972). En el Pacífico Oriental Ecuatorial durante el otoño-invierno se han observado concentraciones de este

pigmento mayores a 1 mg/m³, lo cual crea un hábitat productivo (Feldman, 1986 en (Butler, 1990)

3.1.2.3. CÁLCULO DE ANOMALÍAS

Las anomalías climatológicas de [Chla] se obtuvieron a partir de la diferencia entre el promedio mensual climatológico y el promedio climatológico anual.

$$Anom\ Clim = X_{Men\ Clim} - \bar{X}_{Anual\ Clim}$$

3.1.2.4. CÁLCULO DE FUNCIONES EMPÍRICAS ORTOGONALES DE [CHLA]

Los Funciones Empíricas Ortogonales se calcularon a partir de las anomalías climatológicas. El método de aproximación para obtener los eigenvalores y eigenvectores fue el de Descomposición de Valores Singulares.

Los patrones espaciales y temporales (eigenvectores y eigenvalores – Componentes Principales) se obtuvieron siguiendo la metodología de Wilks (2006). Los patrones espaciales, en cada eigenvector, se recuperan al multiplicar cada eigenvector con su eigenvalor asociado, mientras que su evolución a lo largo del tiempo (componente principal), en este caso 12 meses, se representa graficando el valor de cada eigenvector con respecto a cada una de los modos obtenidos.

Por último se analizaron las Funciones Empíricas Ortogonales de [Chla] considerando intervalos de valores en los cuatro primeros modos obtenidos de tal manera que se fueran delimitando zonas que se identificaran en los mapas de la anomalías climatológicas.

3.2. DATOS DE PRODUCCIÓN PESQUERA EN PESO VIVO

Se utilizaron datos oficiales de la Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación – Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca (SAGARPA – CONAPESCA).

Se analizó la producción total mensual en peso vivo del 2000 y 2005, en el Golfo de México y Mar Caribe mexicano para identificar los estados y los meses con mayor producción total (todas las especies) con el fin de tener una referencia mensual del comportamiento de esta producción en el área de estudio.

El análisis de la producción de camarón y Sierra se realizó con datos históricos de producción anual por estados del Golfo de México, 1996 al 2005, para detectar la variabilidad espacial y temporal de la producción en peso vivo de cada una de estas especies.

Por último se analizó la producción mensual por estado de 2003 a 2005, de camarón y Sierra, con lo que se identificaron los estados y los meses en que la **PRODUCCIÓN ES MAYOR PARA VINCULARLA CON LAS REGIONES DE TSM Y [CHLA]** encontradas.

4. RESULTADOS

4.1. ANOMALÍAS CLIMATOLÓGICAS DE TSM Y FEO

Identificar la variabilidad de los volúmenes de producción pesquera en peso vivo del pez Sierra y de las distintas especies de camarón en el Golfo de México y Mar Caribe para establecer su relación con las regiones encontradas, es el propósito central de esta investigación, para lo cual se requirió de un proceso metodológico que ya fue planteado y cuyos resultados se presentan a continuación.

En las anomalías climatológicas de TSM se aprecia que los meses con temperaturas arriba de la media se presentan de mayo a noviembre, [ilustración 22](#). Además la zona con mayor variación es el norte del golfo pues en los meses de invierno-primavera presenta anomalías de temperatura negativas, alrededor de -10°C , mientras que en los meses de verano, anomalías positivas cercanas a $+8^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, dada la alta correlación existente en estos periodos, es necesario rescatar la información más relevante con el fin de mostrar en una o hasta tres imágenes (variables independientes) los patrones de distribución espacial más representativos mediante la combinación lineal de las imágenes, lo cual permite retener el mayor porcentaje de información común, así los primeros modos resultantes contendrán al menos el 75% de información. Una de las técnicas que permite alcanzar este objetivo son las Funciones Empíricas Ortogonales (FEO). En este estudio, para destacar la variabilidad estacional o costero de la TSM, se calcularon las FEO a partir de las anomalías climatológicas, resultando 12 modos, puesto que se utilizaron 12 imágenes de entrada; sin embargo, los tres primeros modos fueron suficientes para explicar el 97.71% de la varianza. Adelante se describen los mapas de eigenvectores de los tres primeros modos; es decir, los coeficientes de transformación representados espacialmente; así como, sus correspondientes componentes principales mediante los cuales se representa la variación temporal de dichos coeficientes.

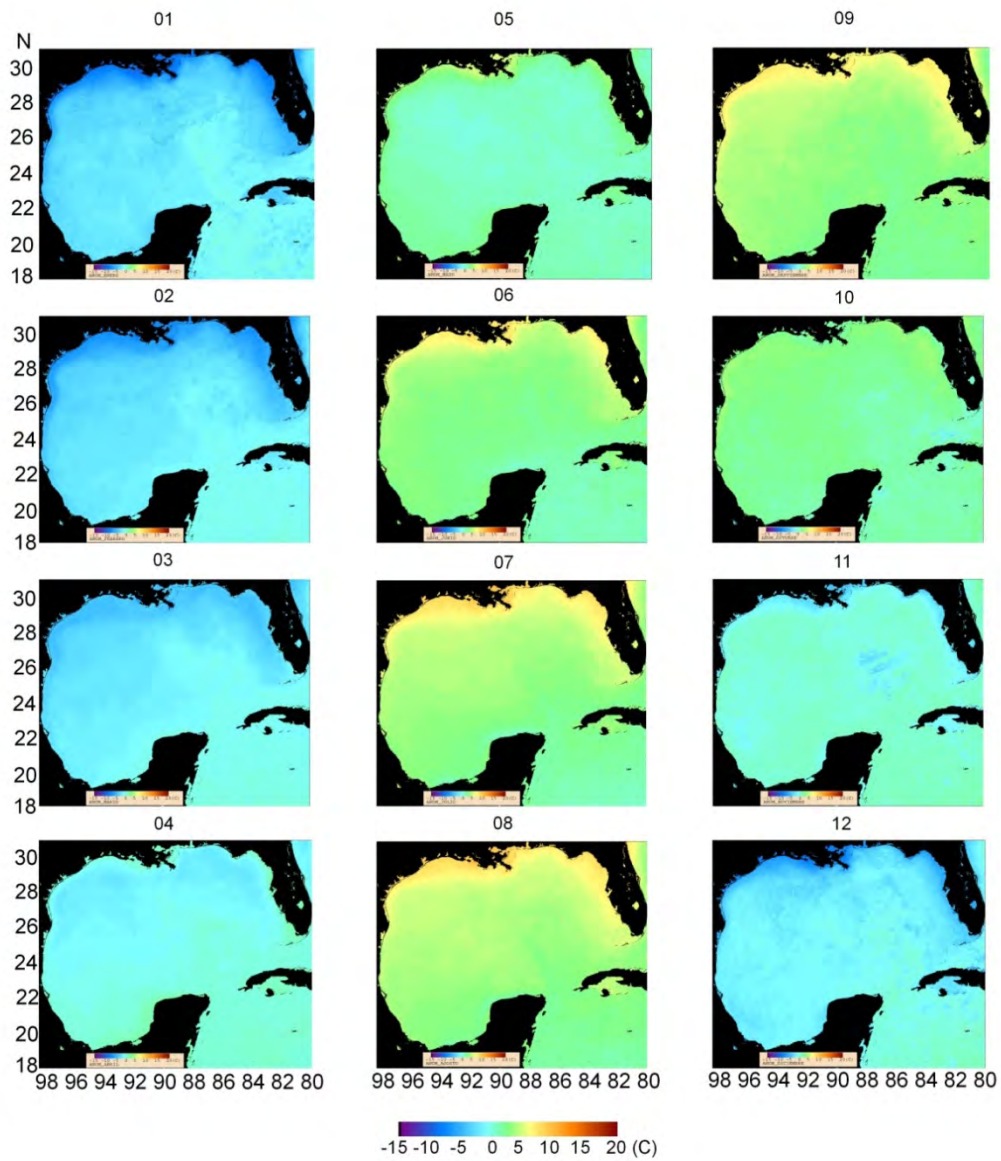


Ilustración 22. Anomalías climatológicas de TSM

A continuación se muestra la eigenestructura de los 12 modos obtenidos; es decir, los eigenvalores ([Tabla 7](#)) y varianza; así como, los eigenvectores ([Tabla 8](#)), con sus correspondientes coeficientes de expansión (transformación). Eigenestructura:

Modo	Eigenvalor	%Varianza explicada	%Varianza acumulada
1	4.94	94.96	94.96
2	0.10	2.03	96.99
3	0.04	0.72	97.72
4	0.02	0.49	98.20
5	0.02	0.41	98.62
6	0.02	0.37	98.98
7	0.02	0.33	99.32
8	0.01	0.25	99.56
9	0.01	0.19	99.75
10	0.01	0.15	99.90
11	0.00	0.09	100.00
12	0.0	0.0	100.00

Tabla 7. Eigenvalores de TSM

Modos (mes)	Eigenvectores											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-0.48	<u>1.67</u>	-0.63	0.35	-0.16	0.10	-0.22	0.11	0.48	2.05	1.71	0.00
2	<u>1.37</u>	-0.27	0.96	1.25	0.12	1.08	-0.42	1.07	1.93	-0.58	0.13	0.00
3	-0.96	<u>-1.29</u>	-0.46	-0.12	-2.66	0.81	0.57	0.32	-0.04	0.00	0.03	0.00
4	<u>-1.39</u>	-0.90	<u>1.52</u>	-0.39	0.65	-1.95	0.46	0.72	0.75	0.52	-0.11	0.00
5	<u>-1.32</u>	0.21	0.57	0.90	0.59	0.44	-0.32	-0.97	-0.90	-1.90	1.44	0.00
6	1.26	-0.11	<u>1.42</u>	-0.36	0.00	0.42	-0.08	0.86	-2.39	0.79	0.11	0.00
7	0.92	0.56	0.74	-2.07	-0.30	0.19	0.66	-1.89	0.87	-0.31	0.13	0.00
8	<u>-1.03</u>	1.02	0.32	0.64	0.20	0.84	-0.52	-0.69	-0.09	0.55	-2.57	0.00
9	0.20	<u>1.67</u>	<u>-1.03</u>	-0.69	-0.33	-0.96	0.31	1.66	-0.19	-1.58	-0.50	0.00
10	-0.28	<u>-1.14</u>	<u>-1.54</u>	-0.86	1.96	1.30	0.85	0.46	-0.01	0.23	-0.02	0.00
11	0.50	-0.99	-0.99	-0.43	-0.06	-0.92	-2.74	-0.49	-0.03	0.02	-0.05	0.00
12	<u>1.20</u>	-0.43	-0.89	1.77	-0.01	-1.34	1.45	-1.14	-0.36	0.19	-0.30	0.00

Tabla 8. Eigenvectores de TSM

En el eigenvector 1 y componente principal 1, que aparece en la serie que se presenta en la [ilustración 23](#), los eigenvectores con más peso fueron febrero, abril, mayo, agosto y diciembre ([Tabla 8](#)), lo cual refleja la variabilidad en los meses de invierno y verano con valores positivos, mientras que en fase negativa, se observa el comportamiento de las TSM en primavera, por lo tanto este eigenvector retiene prácticamente la dinámica a lo largo del año, excepto en otoño. Es decir, se muestra el calentamiento gradual de sur a norte hasta alcanzar el máximo en verano; así como, el enfriamiento de norte a sur en invierno.

En el eigenvector 2 y componente principal 2, se destacan en tono amarillo-verde las plataformas internas de Florida, Louisiana y Mississippi además de la plataforma interna del Banco de Campeche; es decir, resalta la dinámica de estas zonas en los meses de diciembre y agosto-septiembre principalmente, con valores positivos; así como, los meses de primavera con eigenvectores negativos. En general tanto los valores en fase positiva como negativa reflejan la señal de las descargas en primavera por el efecto del deshielo en la desembocadura del río Mississippi y en verano por el aporte de las lluvias en la bahía de Campeche.

El eigenvector 3 y componente principal 3, representa solamente el 0.72% de la varianza explicada ([tabla 7](#)); sin embargo, muestra claramente como la zona costera de Tamaulipas y Veracruz; así como, el norte de Yucatán y la desembocadura del Grijalva-Usumacinta se separan de resto del golfo, principalmente de la zona profunda. De esta forma lo que se observa es el comportamiento de las TSM en la zona costera debido al cambio estacional en la circulación costera del Golfo de México.

El análisis de los eigenvectores muestra un patrón que varía espacialmente de norte a sur acorde con el cambio gradual de las temperaturas superficiales del mar a lo largo del año, observado también, en las anomalías mensuales climatológicas. Es decir, hay un calentamiento gradual de sur a norte en primavera-verano y enfriamiento de norte a sur en otoño-invierno. En el eigenvector 1, los valores más

elevados indican las zonas donde la variación en las anomalías puede alcanzar hasta los 6°C (tonos amarillos), mientras que los valores más bajos muestran las zonas con anomalías mínimas a lo largo del año (tonos azules). En el eigenvector 2, las zonas con mayor variabilidad, alrededor de 2 °C (tonos amarillos), corresponden a las plataformas internas. Por último en el eigenvector 3, se diferencia la zona costera (tonos rojos) con valores de -0.5 °C.

Eigenvector 1

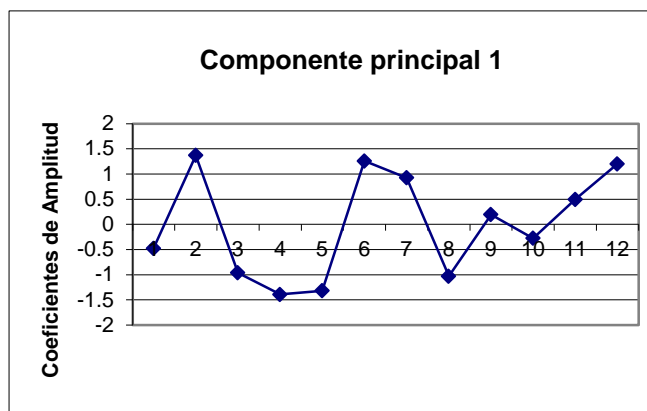
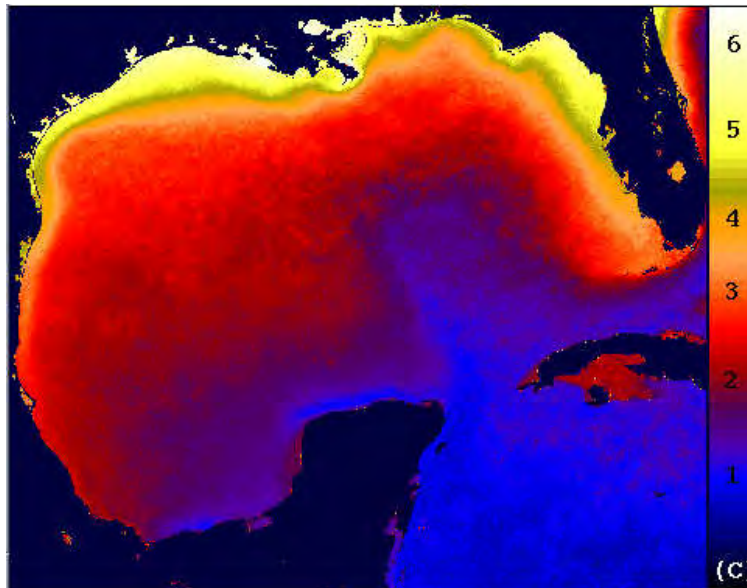
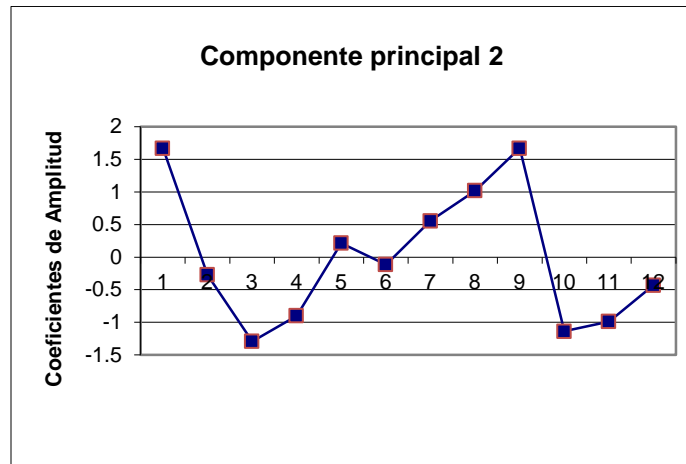
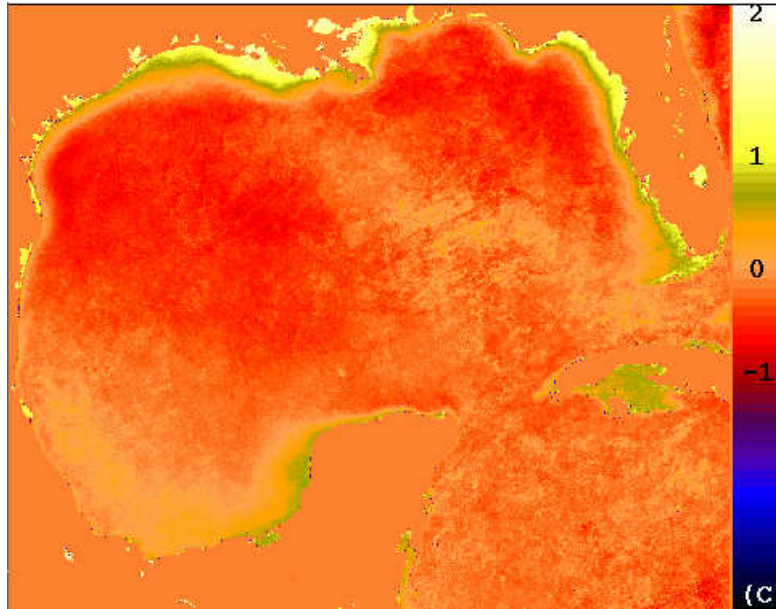


Ilustración 23. Eigenvectores 1, 2 y 3 de TSM y gráficas de los coeficientes de transformación (amplitud) en cada componente principal

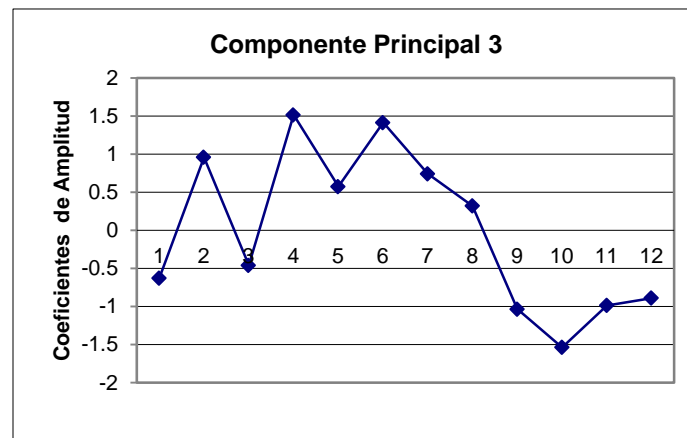
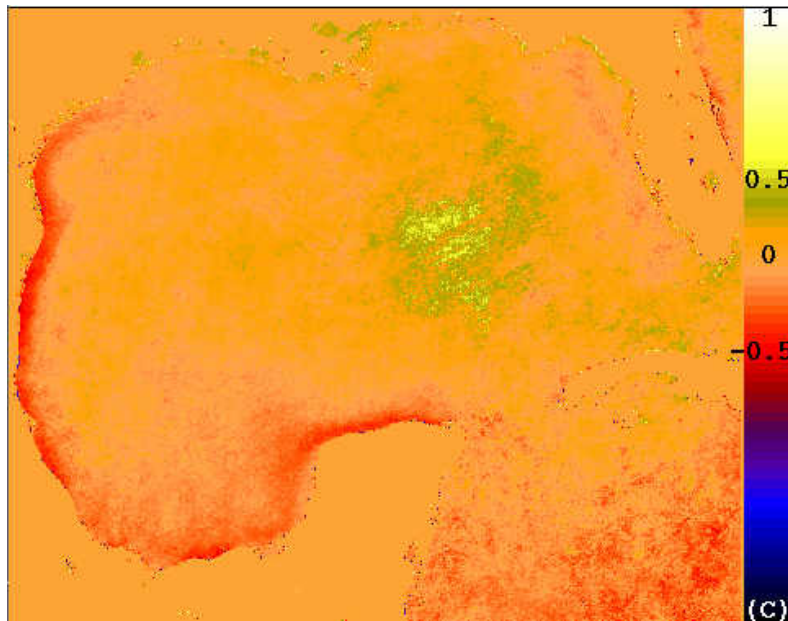
Continúa ilustración 23

Eigenvector 2



Continúa ilustración 23

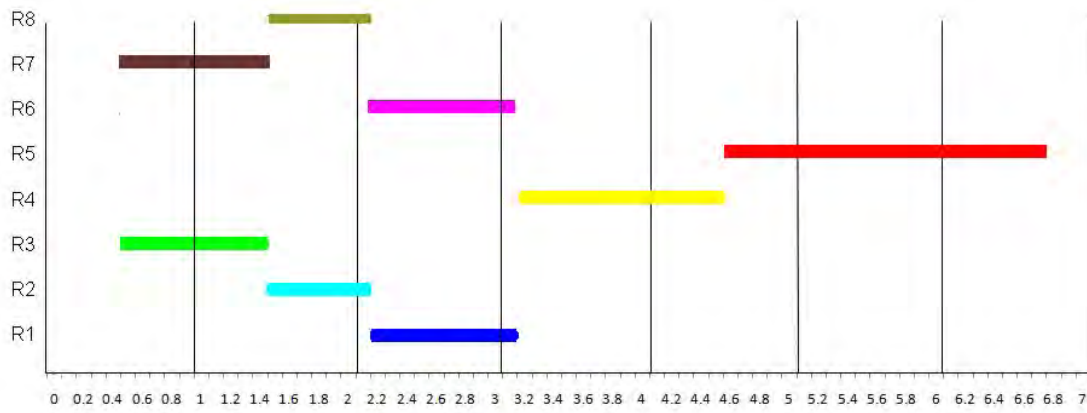
Eigenvector 3



En los eigenvectores (representación espacial de los coeficientes de transformación) arriba descritos, se definen la mayor parte de las regiones encontradas a partir de la TSM; sin embargo, para delimitarlas se seleccionaron intervalos de eigenvectores ([Ilustración 24](#)) que correspondieron con cada una de las clases obtenidas con las FEO; así como, con las diferentes zonas observadas

en las anomalías y los procesos oceanográficos conocidos, evitando la sobreposición entre ellas. La conjugación de estos criterios representan la parte subjetiva en la delimitación de las regiones; sin embargo, su objetivo fue que éstas correspondieran con la dinámica oceanográfica del golfo y Mar Caribe mexicanos. Este es un método similar al Análisis de Componentes Canónicos el cual es una técnica para maximizar la separabilidad entre clases una vez obtenidas las FEO, (Rees W. , 1990). En la ilustración 25, se muestran los intervalos con los cuales se delimitaron las regiones en los eigenvectores 1 y 2. Con el eigenvector 3 solo se definió la región de la plataforma de Tamaulipas y Veracruz. En la [ilustración 25](#), se resaltan los patrones de TSM encontrados con la selección de intervalos; es decir, las zonas que estadísticamente tuvieron el mismo comportamiento y que se utilizaron para delinear las regiones.

Intervalos para el eigenvector 1



Intervalos para el eigenvector 2

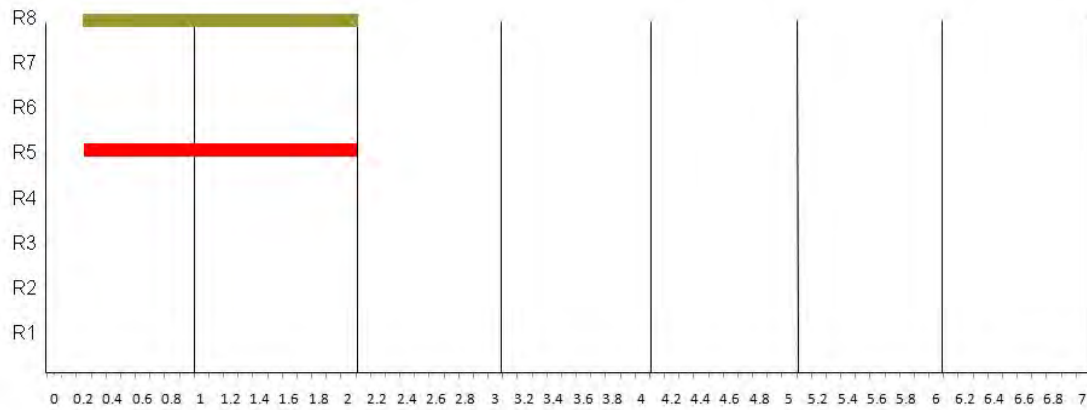


Ilustración 24. Intervalos de los eigenvectores seleccionados para delimitar las regiones de TSM

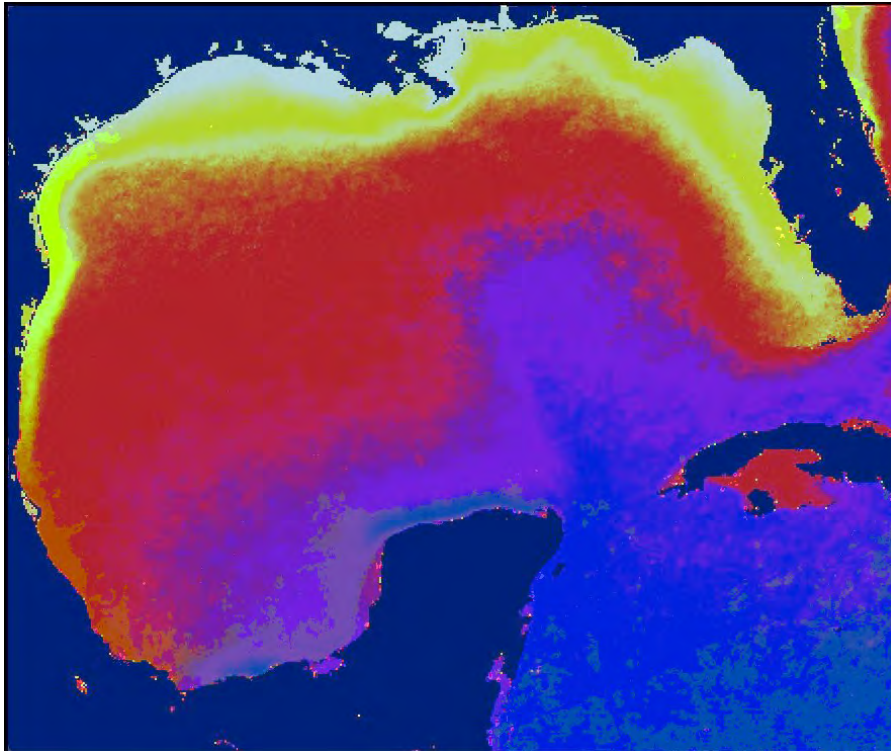


Ilustración 25. Patrones de TSM

4.2. REGIONES DE TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR

Se obtuvieron 8 regiones a partir de los dos primeros eigenvectores ([Ilustración 26](#)) los cuales representaron el 97.7% de la varianza explicada. El eigenvector 1 refleja una respuesta de la TSM al calentamiento latitudinal a lo largo del año, mientras que el eigenvector 2 sugiere un mayor efecto de procesos oceánicos y atmosféricos asociados a la zona costera.

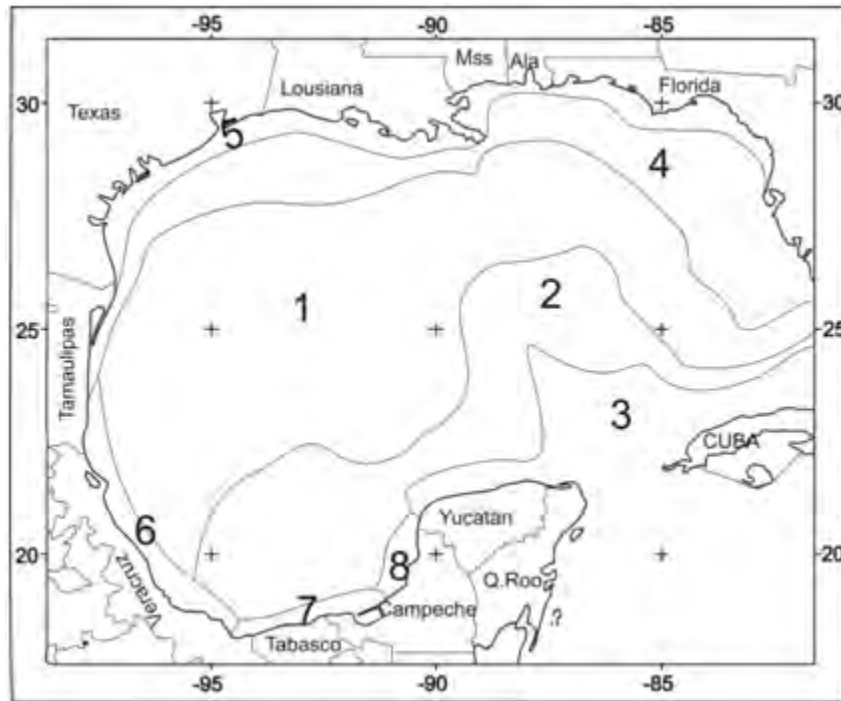


Ilustración 26. Regiones de TSM en el Golfo de México y Mar Caribe

4.2.1. GOLFO PROFUNDO

Región 1, corresponde al golfo profundo y representa una zona de transición entre las aguas cálidas del Caribe que penetran por el Estrecho de Yucatán y aquellas debidas al calentamiento en verano, y las aguas frías del norte del golfo.

4.2.2. ÁREA DE INFLUENCIA DE LA CORRIENTE DEL CARIBE

Región 2, define el área de influencia de la Corriente del Caribe, Agua Subtropical Subsuperficial con alto contenido de calor (24° a 26°C) y de sales (36.7 ups) (Monreal-Gómez, Salas de León, & Velasco Mendoza, 2004) (Aguirre Gómez, 2002), que penetra hacia el Golfo de México a través del Estrecho de Yucatán y baña la Plataforma de Yucatán; así como, la Bahía de Campeche.

4.2.3. MAR CARIBE

Región 3, corresponde a una parte de la Corriente del Caribe que fluye hacia el este sobre la plataforma interna de Yucatán (Molinari & Morrison, 1988). Es una

región extensa de aguas relativamente más cálidas que aquéllas en el Golfo de México e incluye el área de surgencia de Yucatán. Esta región se observa en las anomalías de junio y julio. En el eigenvector 1 de TSM se delimita claramente la Corriente del Lazo y el frente que se forma a partir de Cayo Catoche y que coincide con el límite de la plataforma continental frente a Yucatán (Pérez de los Reyes, y otros, 1996) (Molinari & Morrison, 1988). En verano en este frente se produce un fuerte incremento en las concentraciones de plancton.

4.2.4. PLATAFORMA EXTERNA DE TEXAS-LOUISIANA-ALABAMA

Región 4, Plataforma externa de Texas-Louisiana-Alabama. Es una región altamente influenciada por la descarga del Mississippi; así como, de los procesos costeros que se observan más allá de la boca de este río. Sin embargo, la dinámica de la TSM en esta región parece obedecer a los cambios graduales de temperatura a lo largo del año más que a procesos costeros; así como, a la circulación costera que ocasiona que el agua llegue hasta las costas de Veracruz, con temperaturas frías en invierno. En verano el calentamiento superficial de sur a norte refleja anomalías positivas.

4.2.5. PLATAFORMA DE TEXAS-LOUISIANA-ALABAMA

Región 5, Plataforma interna de Texas-Louisiana-Alabama. Está muy influenciada por la descarga del río Mississippi y por la circulación costera, la cual se dirige hacia el sur alcanzando las costas de Veracruz en invierno.

4.2.6. PLATAFORMA DE VERACRUZ

Región 6, es la zona de transición costera por donde pasan hacia el norte las aguas cálidas provenientes del sur del golfo, en primavera y verano, mientras que a partir de septiembre la circulación se invierte, al igual que la temperatura, puesto que se observan aguas frías provenientes de las costas de Estados Unidos, región 5, durante los meses de invierno. Esta región está mayormente asociada a procesos estacionales de circulación costera del viento y de la superficie del mar.

Presenta el mismo patrón que la región 1, una vez que se ha establecido claramente la circulación hacia el norte o hacia el sur.

4.2.7. DESCARGA DEL SISTEMA GRIJALVA-USUMACINTA

Región 7, se ubica en la zona de descarga del sistema Grijalva-Usumacinta y por lo tanto es un área totalmente influenciada por las aguas provenientes de los ríos mencionados. Las anomalías del mes de julio definen bien esta región con valores negativos.

4.2.8. PLATAFORMA DE CAMPECHE

Región 8, a pesar de la dificultad para distinguir esta región en las imágenes de anomalías, en el mes de abril y mayo, se aprecian tonalidades verdosas (entre 0° y 5°C). Estas anomalías positivas se pueden explicar por el calentamiento superficial del golfo ocasionado por la radiación solar que comienza en la primavera y alcanza su máximo en septiembre. En el eigenvector 2 se destaca esta región con anomalías positivas, mayores a 0.25.

4.3. ANOMALÍAS CLIMATOLÓGICAS DE [CHL_a] Y FEO

Al igual que con las TSM, para el cálculo de las FEO a partir de la [Chl_a], se utilizaron las anomalías climatológicas ([Ilustración 27](#)), en ellas se observa la variabilidad en la [Chl_a] tanto en el golfo profundo como en las zonas costeras al destacar las señales diferentes del comportamiento promedio, por ejemplo, la desembocadura del río Mississippi en época de secas y en época de lluvias, el transporte perpendicular a la costa frente a Texas en mayo y, la variabilidad a lo largo de las costas de Tamaulipas y Veracruz que se relaciona con el cambio en la circulación costera durante el año.

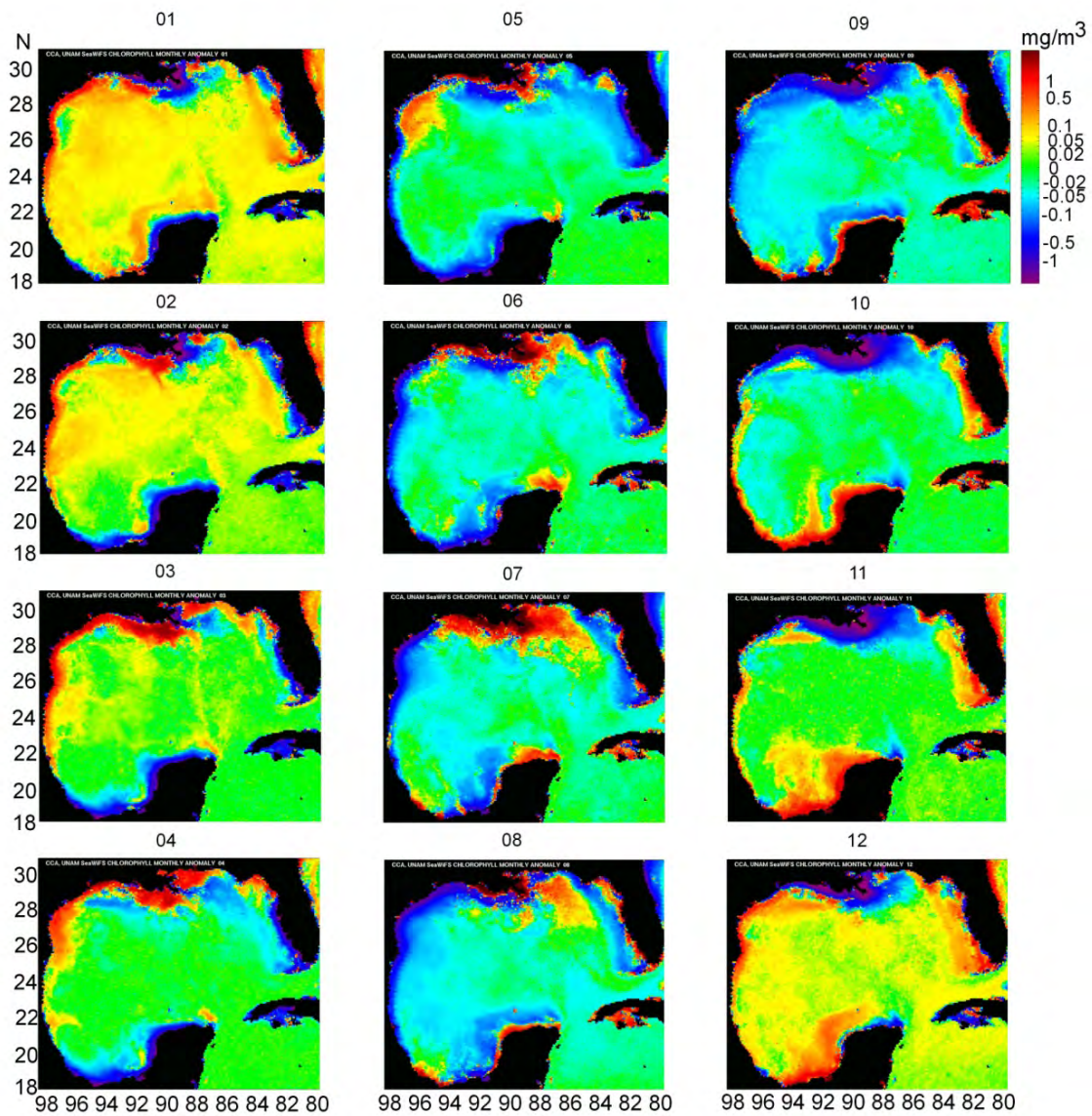


Ilustración 27. Anomalías climatológicas de [Chla]

Por último, se muestra en las [tablas 9](#) y [10](#) los eigenvalores, la varianza y los eigenvectores de [Chla].

Modos	Eigenvalor	% de Varianza	Varianza acumulada
1	1.64	46.87	46.9
2	0.92	26.46	73.3
3	0.22	6.37	79.3
4	0.19	5.52	84.8
5	0.15	3.97	89.19
6	0.10	2.96	92.19
7	0.08	2.28	94.46
8	0.07	1.91	96.36
9	0.06	1.59	97.94
10	0.04	1.08	99.02
11	0.03	0.99	100
12	0.0	0.99	100

Tabla 9. Eigenvalores de [Chla]

Modos (mes)	Eigenvectores											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.25	-0.14	0.02	-0.15	0.11	0.17	0.12	0.18	0.12	0.78	-0.37	0.28
2	0.23	-0.29	-0.03	-0.2	0.13	0.21	0.31	0.17	0.37	-0.6	-0.25	0.28
3	0.11	-0.39	-0.23	-0.19	0.09	0.22	0.08	-0.34	-0.67	-0.03	0.2	0.28
4	-0.06	-0.31	-0.47	0.13	0	-0.4	-0.52	-0.18	0.3	0	-0.09	0.28
5	-0.12	-0.28	0.12	0.4	-0.28	-0.46	0.52	0.22	-0.09	0.07	0.18	0.28
6	-0.36	-0.16	0.34	0.27	-0.41	0.57	-0.29	-0.01	0.08	-0.02	-0.06	0.28
7	-0.54	0.08	0.37	-0.58	0.2	-0.3	-0.02	-0.08	0.01	0	-0.03	0.28
8	-0.37	0.35	-0.32	0.39	0.58	0.22	0.13	0.11	-0.01	0	0.05	0.28
9	0	0.49	-0.46	-0.32	-0.57	0.06	0.08	0.23	-0.07	-0.04	0.02	0.28
10	0.26	0.38	0.18	0.16	-0.09	-0.08	0.2	-0.76	0.21	0.02	0	0.28
11	0.33	0.25	0.29	0.2	0.11	-0.22	-0.31	0.23	-0.43	-0.2	-0.4	0.28
12	0.32	0.06	0.2	-0.08	0.15	0.04	-0.23	0.24	0.2	0.07	0.77	0.28

Tabla 10. Eigenvectores de [Chla]

Para la regionalización solamente se consideraron los primeros cuatro eigenvectores cuya suma representó el 84.9% de la varianza explicada. El

eigenvector 1 ([Ilustración 28](#)) delinea varias de las regiones encontradas a partir de la [Chla], con valores alrededor de -0.5 mg/m^3 (tonos violeta-azul), como la desembocadura del río Mississippi, río Papaloapan, surgencia de Yucatán y el sur de la bahía Apalachee, que corresponden a las condiciones de verano. Con valores alrededor de 0.5 mg/m^3 , se muestra la plataforma externa de Florida, la de Tamaulipas y Veracruz; así como, la bahía de Florida en condiciones de invierno. Por su parte, la zona oceánica del Golfo de México y el Caribe se definen por sus valores cercanos a 0.05 mg/m^3 (tonos amarillos).

El eigenvector 2 refleja las condiciones de primavera desde la desembocadura del Mississippi hacia Tamaulipas; así como, la parte externa de la surgencia de Yucatán, con valores alrededor de -0.5 mg/m^3 , en primavera. Por su parte, la plataforma interna de Florida y las costas de Yucatán hasta Veracruz se muestran con valores cercanos 0.5 mg/m^3 en condiciones de verano.

El eigenvector 3 refleja condiciones estacionales y hace una mayor diferenciación en las zonas costeras, por ejemplo, entre el sur y norte de la plataforma de Florida, la desembocadura del Mississippi, la plataforma interna y externa de Texas; así como, el transporte perpendicular a la costa de Tabasco y la plataforma de Campeche y Yucatán.

Por último el eigenvector 4, destaca la zona frente a Texas, con valores alrededor de 0.05 mg/m^3 , en mayo, mientras que se sigue marcando la plataforma de Yucatán y Campeche para otoño-invierno.

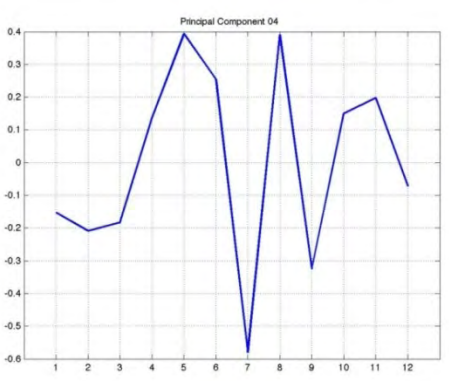
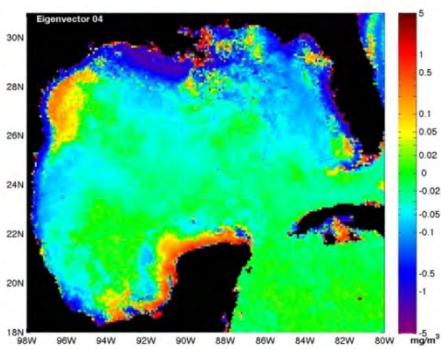
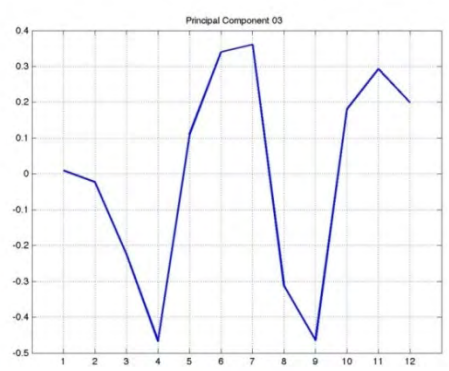
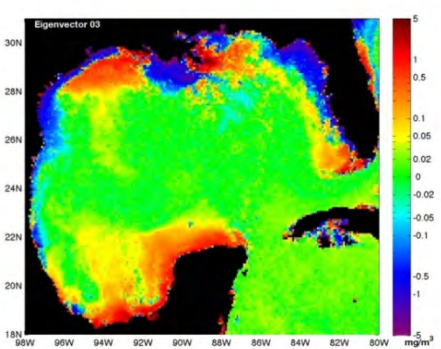
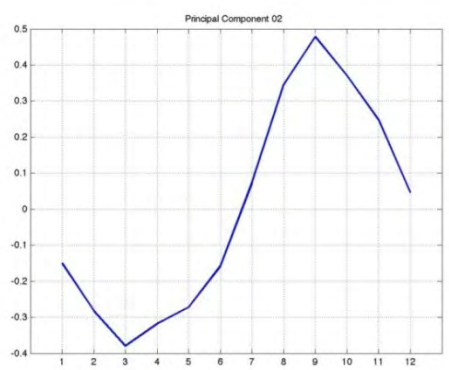
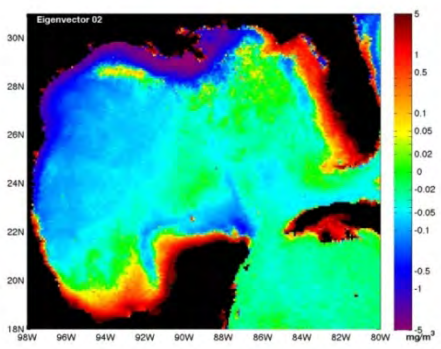
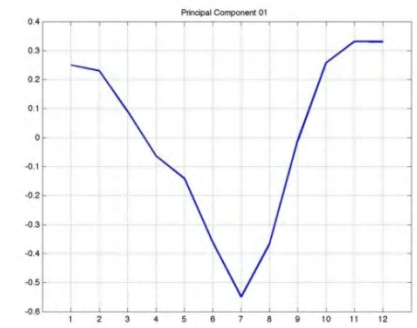
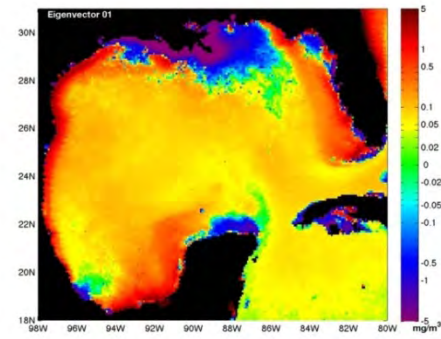


Ilustración 28. Primeros cuatro Eigenectores y Componentes principales de [Chl a]

El primero y segundo componente principal reflejan un ciclo anual con un máximo y un mínimo, aunque el ciclo se observa desfasado entre cada componente. En el primer modo los valores positivos están relacionados con las anomalías en los meses de invierno, tonos rojos, y los valores negativos con las anomalías en los meses de verano. De tal forma que las zonas con tonos rojos corresponden a las regiones con anomalías positivas de [Chla] en invierno, mientras que aquéllas con tonos azules a las regiones con anomalías negativas en verano. En el Tercer modo se distinguen las plataformas interna y externa de Louisiana-Texas (LATEX); así como, la plataforma norte de Florida. En el cuarto modo se resalta una región en la plataforma externa de Texas.

De la misma forma como se procedió a delimitar las regiones con la TSM, siguiendo el criterio de la no sobreposición entre las regiones y que se correspondieran con los procesos oceanográficos y costeros, se procedió a la selección de intervalos a partir de los eigenvectores como se muestra en la [ilustración 29](#). Así, con 9 intervalos de valores se determinaron los patrones dominantes que tuvieron un comportamiento estadístico similar a lo largo del año y que se relacionan con determinados procesos oceanográficos.

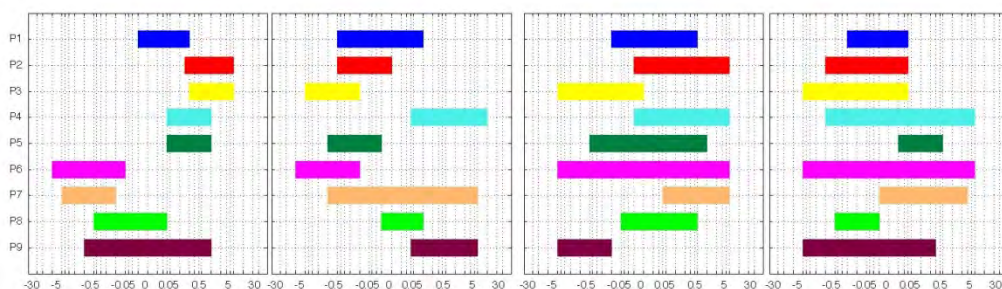


Ilustración 29. Intervalos de eigenvectores seleccionados para delimitar las regiones de [Chla]

Se trata de un análisis subjetivo de los patrones espaciales y de las anomalías, de tal forma que las regiones identificadas en las imágenes de los eigenvectores también se observan en las imágenes de anomalías. Sin embargo, en ocasiones

dichos patrones [ilustración 30](#) son separados espacialmente por procesos oceanográficos, de tal manera que, en lugar de tener una región por cada patrón espacial dominante, puede haber dos o más regiones, tal es el caso del patrón2 (P2) que comprende las regiones de las plataformas oeste del Banco de Campeche y de Florida. Estas dos regiones tienen un comportamiento estadístico similar, pero están separadas espacialmente. En total se obtuvieron 14 regiones.

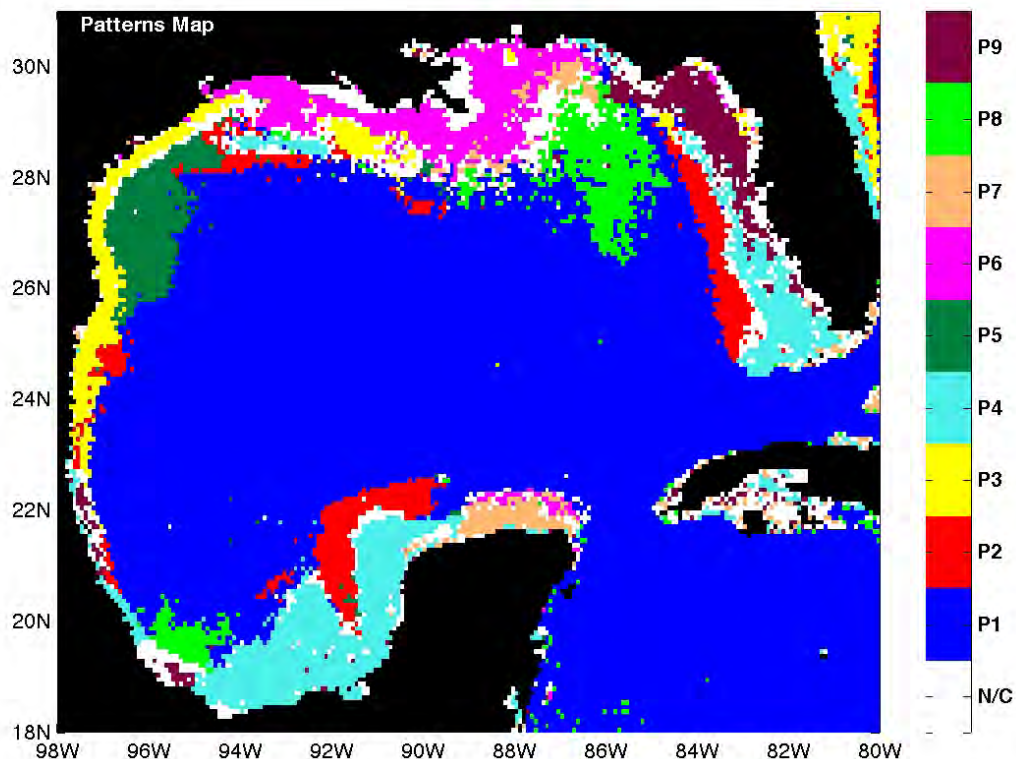


Ilustración 30. Patrones espaciales de [Chla]

El Patrón 1 (P1) corresponde al golfo profundo, P2 está presente en las plataformas externas al oeste del Banco de Campeche y de Florida; el P3 incluye la plataforma interna frente a los estados de Texas y Tamaulipas; el P4 a la parte sur de la plataforma interna de la costa oeste de Florida, la plataforma interna del Banco de Campeche y una región fuera de la plataforma en la bahía de Campeche; P5 es observado fuera de la plataforma del sur de Texas; P6 incluye la

zona fuertemente influenciada por la río Mississippi; P7 está presente en una pequeña zona en la plataforma interna del Banco de Campeche; P8 se observa en la zona de influencia del río Mississippi que forma una pluma fuera de la plataforma en verano y P9 corresponde a la plataforma interna al norte de la costa oeste de Florida.

4.4. REGIONES DE CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA A

A partir de las cuatro primeras Funciones Empíricas Ortogonales, las cuales representaron el 84.9% de la varianza explicada, se obtuvieron 9 patrones dominantes y 14 regiones ([Ilustración 31](#)). La mayor corresponde al golfo profundo y las 13 regiones restantes se localizan sobre la plataforma continental y obedecen más a procesos estacionales.

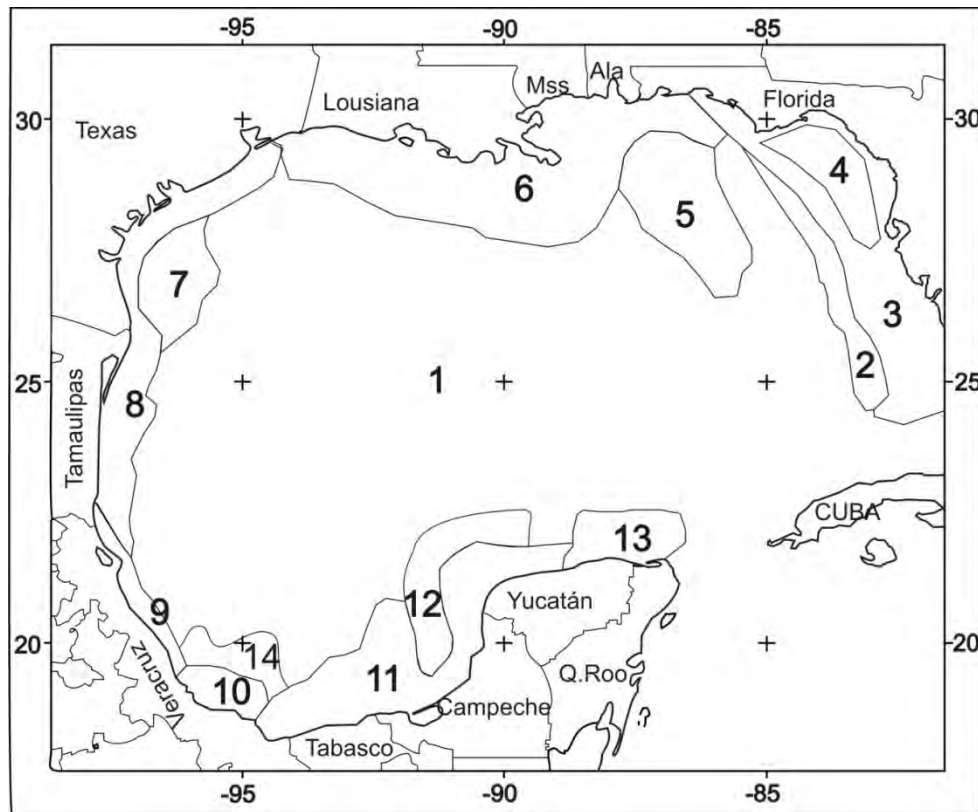


Ilustración 31. Regiones de [Chla] en el Golfo de México y Mar Caribe

4.4.1. GOLFO PROFUNDO

Región 1, está localizada en la zona profunda del Golfo de México y talud continental. El eigenvector 1 muestra valores máximos en invierno y mínimos en verano. En invierno, debido a la presencia de una importante capa de mezcla generada por los frentes fríos, se mezcla la capa superior, en otoño-invierno, hundiéndola y trayendo a la superficie agua subsuperficial rica en nutrientes, hacia la zona fótica. En verano, los valores mínimos en junio-agosto obedecen al fenómeno de estratificación producido por vientos débiles y al calentamiento de la capa superior del océano, de tal manera que se observa una capa de mezcla poco profunda (Müller-Karger & Walsh, 1991) (Zavala-Hidalgo, Parés-Sierra, & Ochoa, 2002).

4.4.2. PLATAFORMA OESTE EXTERNA DE FLORIDA

Región 2, plataforma oeste externa de Florida. En esta región las anomalías de clorofila *a*, son elevadas en noviembre y febrero, mientras que tiene valores bajos entre mayo y septiembre. Los frentes fríos de otoño-invierno asociados con vientos fuertes, fríos y secos producen un enfriamiento en la superficie por el efecto de mezcla; así como, movimientos de convección que resuspenden material del fondo con alto contenido de nutrientes, lo cual favorece la presencia de fitoplancton. Vale la pena hacer notar que la plataforma externa tiene un comportamiento diferente a la plataforma interna. (Weisberg & Muller-Karger, 2001).

4.4.3. PLATAFORMA OESTE INTERNA-INTERMEDIA SUR DE FLORIDA

Región 3, plataforma oeste interna-intermedia de Florida. En el eigenvector 3 se destaca esta región; sin embargo, su explicación y análisis se hace a partir de las imágenes de anomalías. Esta región muestra anomalías elevadas principalmente de septiembre a diciembre y anomalías negativas de febrero a junio. Los valores altos están asociados con descargas desde la Bahía de Tampa hasta el sur de Florida. Es importante mencionar que las descargas de los ríos tienen dos máximos, uno en abril para aquéllos situados al noroeste de Florida, y otro en

otoño-invierno por los ríos del centro de Florida asociados con la precipitación en verano (Couch, Hopkins, & Hardy, 1996) (Kelly, 1994) (Morey, Dukhovskoy, & Bourassa, 2009). Por otra parte, las condiciones de surgencia que se presentan en invierno, no parecen ser la causa de la separación en dos regiones, interna norte y sur, debido a que la surgencia costera repunta en invierno asociada a vientos del norte, mientras que en primavera y verano se observan condiciones de hundimiento (Weisberg, He, Liu, & Virmani, 2005).

4.4.4. SUR DE LA BAHÍA APALACHEE

Región 4, sur de la bahía Apalachee. Se destaca en el eigenvector 3; así como, en las anomalías de enero y febrero donde se observa con valores negativos, mientras que, en septiembre y en mayo muestra valores positivos. Este comportamiento está influenciado por los ríos que descargan en la bahía Apalachicola (Morey, Dukhovskoy, & Bourassa, 2009). Es notorio que la zona estrecha, cercana a la línea de costa tiene un comportamiento diferente y no está clasificado aquí debido a su tamaño relativamente pequeño.

4.4.5. PLUMA DEL RÍO MISSISSIPPI EN VERANO

Región 5, pluma del río Mississippi de verano. Está asociada con el flujo hacia el sureste del río del Mississippi, de julio a agosto, causado por la componente este del viento con desplazamientos fuera de la costa de aguas rivereñas ricas en nutrientes (Gilbes, Tomas, Walsh, & Müller-Karger, 1996) (Morey, Schroeder, O'brien, & Zavala-Hidalgo, 2003a) (Morey, O'brien, Walcraft, & Zavala-Hidalgo, 2003b) (Morey, Zavala-Hidalgo, & O'Brien, 2005).

4.4.6. ÁREA DE GRAN INFLUENCIA DEL RÍO MISSISSIPPI

Región 6, área de gran influencia de los ríos Mississippi-Atchafalaya. Incluye la plataforma interna y media, el delta del río y la plataforma de los estados Mississippi y Mobile. En las anomalías muestra valores máximos de clorofila *a*, en primavera, cuando el río Mississippi tiene descargas máximas debidas al deshielo,

y valores mínimos de septiembre a diciembre cuando la descarga es mínima. (Morey, O'brien, Walcraft, & Zavala-Hidalgo, 2003b).

4.4.7. ÁREA FUERA DE LA PLATAFORMA SUR DE TEXAS

Región 7, área fuera de la plataforma sur de Texas. Tiene un patrón que no se observa en ningún otro sitio del Golfo de México, en la ilustración 30, corresponde al patrón 5 y también se observa claramente en el eigenvector 4. En las anomalías se destaca en el mes de mayo, donde muestra valores máximos causados por la convergencia de corrientes que circulan en sentido opuesto a las manecillas del reloj, provenientes de la plataforma Louisiana-Texas (LATEX), y de aquellas provenientes del estado de Tamaulipas, en sentido de las manecillas del reloj. Esta convergencia favorece el transporte fuera de la costa en esta región (Zavala-Hidalgo, Morey, & O'Brien, 2003), (Martínez-López & J, 2009).

4.4.8. PLATAFORMA INTERNA DE TEXAS Y TAMAULIPAS

Región 8, plataforma interna de Texas y Tamaulipas. Tiene influencia de los ríos de Texas, así como del Mississippi y Atchafalaya, y está confinada a la plataforma interna, la cual presenta dinámicas diferentes a aquellas de la plataforma externa (Cochrane & Kelly, 1986)(Nowlin, Jochens, Howard, DiMarco, & Schroeder, 2000) (Walker, 2005). La circulación en la plataforma interna de LATEX y la plataforma interna de Tamaulipas están sincronizadas la mayor parte del año, siendo en sentido contrario a las manecillas del reloj en otoño-invierno; sin embargo, en primavera-verano la corriente se invierte en la plataforma de Tamaulipas mientras que en la plataforma LATEX lo hace en un periodo más corto, principalmente en julio (Zavala-Hidalgo, Morey, & O'Brien, 2003). A pesar de esta diferencia, las dos regiones muestran un comportamiento estadístico similar basado en la variación anual de [Chla].

4.4.9. PLATAFORMA INTERNA AL NORTE DE VERACRUZ

Región 9. Cubre la plataforma norte de Veracruz con anomalías positivas de septiembre a marzo, sugiriendo que tiene una importante influencia de los frentes fríos que afectan la región en este periodo.

4.4.10. PLATAFORMA SUR DE VERACRUZ

Región 10, plataforma sur de Veracruz. Esta pequeña región frente al centro-sur de Veracruz, localizada entre las regiones 9 y 11, muestra valores altos de anomalías entre julio y noviembre debido a una fuerte influencia de las descargas de los ríos, en particular el Papaloapan y el Coatzacoalcos. A pesar de tener un comportamiento similar a la región 4, es posible que responda a diferentes procesos.

4.4.11. PLATAFORMA DE CAMPECHE Y TABASCO

Región 11, plataforma de Campeche y Tabasco, cubre la plataforma frente a estos estados e incluye una parte de aguas profundas de la bahía de Campeche asociadas con el transporte perpendicular causado por la confluencia de corrientes provenientes de las plataformas de Veracruz y Campeche en otoño-invierno (Zavala-Hidalgo, Morey, & O'Brien, 2003) (Martínez-López & J, 2009). Esta región tiene el mismo patrón estadístico que la región 3.

4.4.12. PLATAFORMA EXTERNA DEL BANCO DE CAMPECHE

Región 12, plataforma externa del Banco de Campeche. Está claramente desacoplada de la plataforma interna. Tiene el mismo patrón que la plataforma externa de la costa oeste de Florida. Ambas regiones responden a frentes fríos los cuales mezclan la columna de agua, resuspenden sedimentos e incorporan aguas del fondo ricas en nutrientes hacia la superficie (Ruoying & Weisberg, 2002). La región tiene un máximo de [Chla] en diciembre-enero y un mínimo en agosto-septiembre cuando la estratificación alcanza su máximo.

4.4.13. ESTE DEL BANCO DE CAMPECHE

Región 13, este del banco de Campeche. Tiene un comportamiento complejo con máximos de [Chla] que alcanzan el noreste de la península de Yucatán a principios de primavera, y más tarde el norte de la península en julio. Esta región está influenciada por la surgencia de Yucatán (Cochane, 1968) (Cochrane & J.D., 1969) (Ruiz, 1979), la cual ha sido reportada como más intensa en primavera-verano (Merino, 1997) (Mateos-Jasso, 2009). La surgencia de Yucatán se describe como una surgencia causada por el desnivel entre el Mar Caribe y el Golfo de México a lo largo del borde este de la plataforma del banco de Campeche.

4.4.14. ÁREA FUERA DE LA PLATAFORMA SUR DE VERACRUZ

Región 14, fuera de la plataforma de Veracruz. Se observa con anomalías positivas de julio a septiembre y tiene una mayor extensión que en los meses de noviembre y diciembre en donde se presenta con anomalías negativas. En el eigenvector 1 se muestra con valores negativos. Esta región tiene influencia de los ríos de Veracruz, principalmente del Papaloapan cuya pluma va más allá de la plataforma durante el verano. A pesar de su pequeña escala, su comportamiento es similar a la región 5, con transporte fuera de la plataforma en julio y agosto.

4.5. PRODUCCIÓN TOTAL MENSUAL EN 2000 Y 2005

El análisis de la TSM y de la [Chla] se realizó por meses, por lo tanto el análisis y comparación de la producción pesquera en peso vivo también se hizo mensual y por entidad federativa. Como referencia del comportamiento de la producción total (todas las especies) se consideraron los años 2000 y 2005, para tener un primer acercamiento con el volumen de captura en el Golfo de México y el Mar Caribe mexicano, con el fin de detectar los meses y los estados con mayor producción.

En la [tabla 11](#) se muestra la producción mensual total en peso vivo para el año 2000; es decir, todas las especies, en donde se identifican los meses de mayor captura por entidad federativa (Las celdas sombreadas representan capturas por

encima del promedio para cada estado). En particular se analizarán los datos correspondientes a Yucatán por concentrar sus mayores capturas en los meses de verano-otoño y Veracruz por ser el que tiene las capturas más elevadas.

Yucatán reporta capturas por encima de su promedio en los meses de agosto a noviembre. En estos meses, las regiones 11 y 13 de [Chla], muestran anomalías positivas causadas por diferentes procesos oceanográficos. Las anomalías positivas de la región 11 se explican por el fenómeno de convergencia principalmente en noviembre y diciembre frente a las costas de Tabasco; sin embargo, en agosto y septiembre (Mateos-Jasso, 2009) las anomalías positivas se observan muy cercanas a las costas de Campeche; en la región 13, los elevados valores de [Chla] ocasionadas por los vientos del sur y sureste predominan en esta época del año. En cuanto a las regiones de TSM encontradas en la Plataforma de Yucatán, se tienen las regiones 3 y 8, bañadas por la Corriente del Caribe que penetra al Golfo de México y se dirige hacia el este sobre la Plataforma interna de Yucatán. Esta corriente se caracteriza por tener temperaturas elevadas, entre 25°C y 28.5°C y con salinidad de 36.0 ups en el canal de Yucatán (Gallegos, 1996).

El estado de Veracruz reporta la mayor captura total mensual, con 120,946 toneladas en el 2000, de hecho su producción es alta y con pocas variaciones a lo largo del año, como se puede ver en la [tabla 11](#), en donde la producción fluctúa entre 9,248 y 10,943 toneladas en febrero y octubre respectivamente. Por su parte, las regiones de [Chla] que se localizan sobre la plataforma de Veracruz son la 9 y 10, mientras que la región de TSM es la número 6. La región 9 presenta anomalías positivas de [Chla] en octubre, el mes en el que las corrientes provenientes del norte alcanzan la zona sur de Veracruz provocando el fenómeno de convergencia en el sur del Golfo de México. En cambio en marzo las anomalías son negativas. La región 10 muestra anomalías positivas en julio que se explican por la descarga de los ríos Jamapa y Papaloapan, mientras que a finales de noviembre y diciembre reflejan anomalías negativas. En cuanto a la región 6 de temperatura, es una zona de transición con anomalías positivas de mayo a

octubre y negativas de noviembre a abril. En general la producción pesquera de Veracruz es similar a lo largo del año y no refleja dependencia alguna con la presencia de anomalías positivas o negativas de [Chla]; sin embargo, en la tabla 4 se pueden distinguir dos periodos de producción ligeramente más elevada, marzo-abril y octubre-noviembre que corresponden a los meses en los cuales cambia el sentido de la circulación en las corrientes costeras en esta parte del golfo. En marzo-abril la circulación es hacia el norte mientras que en octubre-noviembre es hacia el sur, región 6 de TSM.

VOLUMEN DE LA PRODUCCIÓN MENSUAL EN PESO VIVO, SEGÚN ENTIDAD FEDERATIVA, 2000. TONELADAS							
	TOTAL/ Mes	TAMAULIPAS	VERACRUZ	TABASCO	CAMPECHE	YUCATAN	QUINTANA ROO
TOTAL/ Entidad		44,960	120,946	64,384	52,805	40,686	4,239
ENE	27,405	3,591	9,950	5,930	4,985	2,626	323
FEB	26,501	2,433	9,248	7,199	4,695	2,515	411
MAR	29,825	3,699	10,247	7,385	5,401	2,716	377
ABR	26,406	4,290	10,364	6,273	3,086	2,004	389
MAY	26,224	4,357	9,972	6,157	3,319	2,076	343
JUN	22,520	2,023	9,656	5,133	3,267	2,147	294
JUL	25,265	2,713	10,000	5,041	4,372	2,737	402
AGO	31,284	4,882	10,573	5,893	4,510	5,124	302
SEP	28,231	3,333	10,036	3,673	4,756	6,105	328
OCT	27,306	3,358	10,943	2,448	4,747	5,489	321
NOV	32,835	7,390	10,706	4,329	5,307	4,742	361
DIC	24,216	2,891	9,251	4,924	4,359	2,403	388
Fuente: SAGARPA/CONAPESCA, 2000. Anuario estadístico de pesca. Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca. CUADRO 1.2.10							

Tabla 11. Producción total mensual en peso vivo, 2000. En gris se marcan los meses con mayor producción para la mayoría de los estados: enero-mayo y agosto-noviembre, excepto Quintana Roo

Las capturas en el año 2000 quedaron divididas en dos periodos enero-mayo y agosto-noviembre. Junio y julio dividen estos dos periodos con capturas por debajo del promedio anual. Quintana Roo es el único estado con una captura relativamente importante en julio con una producción de 402 ton en este mes.

Para el 2005 la producción total por entidades refleja que todos los estados disminuyeron su producción, excepto Tamaulipas, que aumentó de 44,960 toneladas en el año 2000 a 56,988 toneladas. Los estados de Yucatán y Veracruz tienen varios meses, no contiguos, con una producción por arriba del promedio, de tal manera que no se aprecian periodos marcados de mayor o menor producción que pudieran estar relacionados con los fenómenos descritos anteriormente, ([Tabla 11](#)). Las celdas sombreadas representan captura por encima del promedio para cada estado.

Un hecho que resalta tanto en la producción mensual del año 2000 como en el 2005, es que todas las entidades reportan una producción por abajo del promedio anual en el mes de junio.

Hasta aquí se ha hecho un análisis del comportamiento de la producción total mensual en peso vivo; es decir, de todas las especies para el año 2000 y 2005, como un ejemplo de cómo pueden relacionarse las regiones de [Chla] y TSM del Golfo de México y Mar Caribe mexicano, con la pesca. Así mismo, en la tabla 11 se observa que no hay temporadas de pesca bien definidas puesto que para el año 2000, todas las entidades tienen una producción total por arriba de su promedio anual en varios meses, de tal forma que prácticamente todo el año el Golfo de México y Mar Caribe mexicano, tienen buena producción en la zona costera, excepto el mes de junio que presenta la producción más baja para todas las entidades, 22,520 toneladas. De cualquier forma, si se tuvieran que especificar meses con mayor producción, éstos serían agosto y noviembre, bajo el criterio de que en cinco de las seis entidades del golfo y noroccidente del Caribe su producción está por encima de la media en esos meses. Para el 2005, noviembre fue el mes con producción por arriba de la media en 5 entidades, [tabla12](#).

VOLUMEN DE LA PRODUCCIÓN MENSUAL EN PESO VIVO, SEGÚN ENTIDAD FEDERATIVA, 2005. TONELADAS							
	TOTAL/ Mes	TAMAULIPAS	VERACRUZ	TABASCO	CAMPECHE	YUCATAN	QUINTANA ROO
TOTAL/ Entidad		56,988	95,033	47,307	45,532	23,685	3,569
ENE	22,969	4,096	8,088	4,732	3,935	1,832	285
FEB	21,911	3,286	7,018	5,053	4,087	2,052	414
MAR	23,556	4,501	8,546	5,360	3,942	957	250
ABR	21,619	4,512	7,830	3,843	3,430	1,679	325
MAY	24,310	6,272	8,105	3,671	3,997	1,979	286
JUN	18,759	3,177	7,794	2,228	3,483	1,898	180
JUL	17,670	3,212	8,089	2,037	2,495	1,538	298
AGO	23,838	6,128	7,871	2,653	3,674	3,194	317
SEP	24,165	6,844	7,943	2,811	3,675	2,536	355
OCT	23,015	5,048	8,191	4,396	3,193	1,910	276
NOV	24,795	5,561	8,239	4,644	4,030	2,061	260
DIC	25,508	4,350	7,319	5,877	5,589	2,050	323
Fuente: SAGARPA/CONAPESCA, 2005. Anuario estadístico de pesca. Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca. CUADRO 1.2.10							

Tabla 12. Producción total mensual en peso vivo, 2005. En gris meses con mayor producción (por encima del promedio anual)

De los dos años revisados se puede concluir que 2000 fue el más productivo, cabe hacer notar que fue un año en el cuál se presentó el fenómeno de la Niña, como un antecedente de los posibles impactos de estos fenómenos en la producción pesquera. Los meses con mayor producción fueron agosto y noviembre para 2000 y noviembre para el 2005, los cuales corresponden al periodo en que el Golfo de México y Mar Caribe alcanzan sus temperaturas superficiales más elevadas, mientras tanto en las anomalías, agosto refleja las anomalías climatológicas positivas más elevadas, siendo el mes más cálido del año, [ilustración 22](#). Por su

parte las [Chla], se van incrementando de agosto a noviembre a lo largo de la costa como se observa en las anomalías climatológicas, [ilustración 27](#).

4.6. PRODUCCIÓN ANUAL EN PESO VIVO DE CAMARÓN DE 1996 AL 2005

Del análisis de la producción anual de camarón a través de los datos históricos (1996-2005), reportados por SAGARPA (SAGARPA-CONAPESCA, 2004) (SAGARPA-CONAPESCA, 2005) destaca el estado de Tamaulipas como el mayor productor de camarón en el golfo, seguido por el estado de Campeche ([ilustración 32](#)). Tamaulipas produjo entre 10,907 toneladas en 1996 y 20,062 en 2005, en peso vivo; en cambio el valor máximo y mínimo de producción para Campeche fue 6,857 en 1996 y 2,730 toneladas en 2005. Le sigue Veracruz con alrededor de 2,000 toneladas, en los demás estados la producción fue inferior a 2,000 toneladas. La ilustración también muestra los años más productivos para cada entidad federativa, así 1996 fue el más productivo para Campeche, Tabasco y Quintana Roo, el 2000 para Veracruz, el 2005 para Tamaulipas y el 2004 para Yucatán.

En general Veracruz, Tabasco, Yucatán y Quintana Roo tuvieron una producción pesquera alrededor de 2,000 ton sin variaciones importantes entre 1996 y 2005. Campeche tuvo una producción mayor, pero con tendencia a la baja. Tamaulipas destaca por su volumen de producción con una tendencia a la alza, además tiene variaciones a lo largo del tiempo con repunte en 1998, 2003 y 2005.

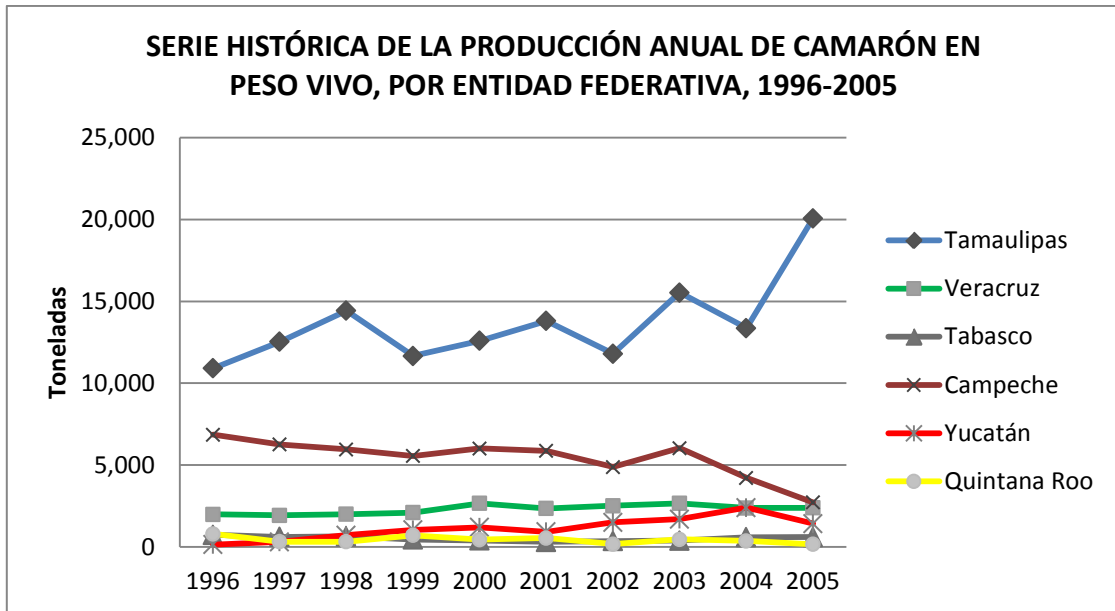


Ilustración 32. Producción anual de camarón en peso vivo, 1996-2005

4.6.1. PRODUCCIÓN MENSUAL DE CAMARÓN DE 2003 AL 2005

En cuanto a la producción mensual de camarón, en la [tabla 13](#) se muestra el volumen de captura mensual para los años 2003 a 2005, en negritas se resalta el mes con mayor captura para cada año. En general se observan dos periodos importantes de captura, enero a mayo y agosto a diciembre.

VOLUMEN DE LA PRODUCCIÓN DE CAMARÓN MENSUAL EN PESO VIVO, SEGÚN ENTIDAD FEDERATIVA (TONELADAS)														
	AÑO	TOTAL	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TAMAULIPAS	2003	15530	492	653	1267	1401	2076	135	747	2836	1982	1368	1222	1348
	2004	13,366	657	568	795	1,466	1,503	217	538	999	2283	2,053	1,162	1,127
	2005	20062	518	768	1333	1723	3573	73	440	2770	3782	1942	1669	1473
VERACRUZ	2003	2664	91	154	332	284	400	90	183	325	259	222	177	147
	2004	2,381	88	107	205	234	289	50	127	235	349	332	184	182
	2005	2389	107	141	235	301	218	67	217	320	314	204	138	127
TABASCO	2003	393	27	62	80	17	48	5	4	0	5	8	66	71
	2004	598	47	85	60	109	36	29	21	28	25	35	36	87
	2005	608	74	88	96	89	20	18	11	3	23	15	72	98
CAMPECHE	2003	6040	460	863	827	453	130	0	181	350	333	625	806	1010
	2004	4,222	790	569	496	292	258	96	49	25	257	355	613	422
	2005	2730	315	322	244	315	71	*	1	18	259	412	325	448
YUCATÁN	2003	1,704	94	61	67	83	1	220	132	273	72	203	290	206
	2004	2,401	0	101	405	68	271	151	200	211	75	355	181	384
	2005	1430	79	202	187	75	124	192	122	119	5	150	144	31
Q. ROO	2003	467	21	12	13	8	46	2	3	1	111	131	56	64
	2004	368	7	21	19	6	11	1	2	1	12	192	53	44
	2005	165	13	19	27	13	6	3	3	2	16	44	17	2

Fuente: SAGARPA/CONAPESCA, 2003, 2004 y 2005. Anuario estadístico de pesca. Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca.

Tabla 13. Producción mensual de camarón en peso vivo, 2003-2005. En gris se resaltan los meses de mayor captura por año.

Al comparar los periodos de captura de camarón que manejan distintos autores: Castro (1986), Gracia (1991, 1989), Smith (1988), Soto y otros (1982), en “Pesquerías del golfo y Caribe” (INP, 1999) ([Tabla 1](#)), con los periodos que se observan en los anuarios estadísticos de SAGARPA ([Tabla 13](#)), se observa que las capturas de las distintas especies reportadas por los autores citados, se dan principalmente en los meses de verano y otoño; es decir, desde mayo hasta noviembre, excepto en el caso de camarón rojo que es de septiembre a enero. Sin embargo, en los anuarios estadísticos de 2003 a 2005, en los meses de junio y

julio la producción es baja con relación al promedio anual de esos años, de tal forma que parece haber dos periodos de captura, el primero de enero a mayo y el segundo de agosto a diciembre.

4.7. PRODUCCIÓN ANUAL EN PESO VIVO DE SIERRA DE 1996 AL 2005

La mayor producción de pez Sierra para 1996 ([Ilustración 33](#)) se presentó en las entidades federativas de Campeche (4,403 ton) y Veracruz (3,452 ton). En el caso de Campeche, además de la elevada producción que tuvo en 1996, los años 1998, 1999 y 2003, tienen máximos de producción, alrededor de 2800 ton, y dos mínimos en 1997 y 2001. Yucatán en 1996 reportó 251 toneladas; Veracruz muestra una tendencia hacia la baja, de tal suerte que la producción mínima es de 1,623 ton en 2005. La producción mínima y máxima del resto de los estados es la siguiente: Tabasco 816 ton en 2000 y 2,150 ton en 1996; Tamaulipas 503 ton en 1997 y 1,082 ton en 2002; Yucatán y Quintana Roo produjeron menos de 100 toneladas. En cuanto a los años más productivos por entidad federativa se tiene que 1996 fue el más productivo para todos los estados excepto Tamaulipas ya que su mayor producción fue en 2002.

En general, en la [ilustración 33](#) se puede observar que Campeche y Tabasco tienen dos periodos con volúmenes de captura elevados, uno entre 1998-1999 y el otro en el 2003. Tamaulipas tiene una tendencia a la alza con ligeros máximos en 1999-2002 y en 2004; Veracruz baja su producción de 1996 al 2005 mientras que Yucatán y Quintana Roo muestran una producción baja y constante a lo largo del periodo.

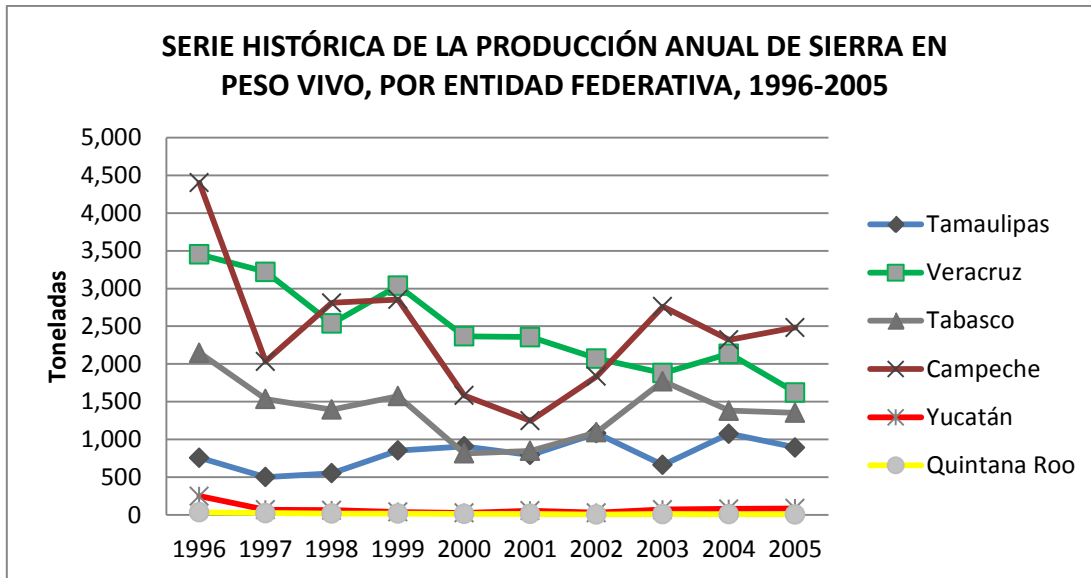


Ilustración 33. Producción anual de Sierra en peso vivo, 1996-2005.

4.7.1. PRODUCCIÓN MENSUAL DE SIERRA DE 2003 AL 2005

Los meses de captura reportados para el pez Sierra por varios autores en “La pesquería de Sierra en el golfo” (INP, 1999) y por SAGARPA-CONAPESCA para los años 2003 a 2005, son consistentes, de hecho la zona de captura abarca los litorales de los seis estados del Golfo de México aunque se prefieren las zonas frente a las localidades de Soto la Marina, San Fernando y Matamoros en Tamaulipas, y entre Chachalacas y Antón Lizardo en Veracruz. En cuanto a los meses de captura, éstos se dividen en dos periodos ([Tabla 14](#)) de enero a abril y de octubre a diciembre de acuerdo con diversos autores, y de enero a marzo y de septiembre a diciembre según lo reportado en los anuarios de 2003 a 2005, ambos periodos se relacionan con el cambio en la circulación costera que en primavera es de sur a norte y a finales de otoño es de norte a sur (INP, 1999).

VOLUMEN DE LA PRODUCCIÓN DE SIERRA MENSUAL EN PESO VIVO, SEGÚN ENTIDAD FEDERATIVA (TONELADAS)														
	AÑO	TOTAL	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TAMAULIPAS	2003	663	0	3	62	27	4	1	4	1	188	322	44	8
	2004	1,076	9	18	50	9	6	1	5	17	415	390	119	36
	2,005	894	104	27	59	2	52	48	17	40	150	305	74	16
VERACRUZ	2003	1,880	140	84	203	226	114	145	74	106	118	250	256	164
	2004	2,136	138	154	284	258	175	101	49	101	100	427	223	125
	2005	1623	136	109	197	137	120	77	55	89	75	306	192	129
TABASCO	2003	1772	44	80	528	96	169	180	114	148	78	158	96	80
	2004	1381	83	74	332	175	143	97	140	66	25	74	103	69
	2005	1355	85	106	466	105	83	62	60	51	33	68	113	124
CAMPECHE	2003	2762	512	413	139	61	91	101	123	256	105	75	204	681
	2004	2,320	532	358	265	97	37	67	41	16	11	69	423	404
	2,005	2484	380	517	199	41	60	47	80	59	14	10	348	729
YUCATÁN	2003	71	5	12	8	1	0	1	1	8	12	2	5	16
	2004	80	23	15	2	12	7	5	1	0	0	0	2	12
	2005	86	23	17	2	2	1	5	3	1	1	0	7	26
Q. ROO	2003	12	1	1	1	1	0	0	2	0	0	0	1	3
	2004	10	2	4	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1
	2005	8	3	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: SAGARPA/CONAPESCA, 2003, 2004 y 2005. Anuario estadístico de pesca. Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca.

Tabla 14. Producción mensual de Sierra en peso vivo, 2003-2005. En gris se resaltan los meses con mayor producción.

En resumen, el mayor volumen de producción anual de camarón entre 1996 y 2005 lo tuvo el estado de Tamaulipas seguido del estado de Campeche mientras que los estados con mayor producción anual de pez Sierra fueron Campeche, seguido de Veracruz. Estos datos deben considerarse con cautela ya que no necesariamente cada entidad reporta la captura realizada en “sus límites” estatales; es decir, las embarcaciones realizan sus actividades en cualquier parte del Golfo de México o Mar Caribe, independientemente de los estados a los que

pertenecen. De igual manera los incrementos en el volumen de captura no necesariamente se deben a condiciones ambientales favorables, sino también a incrementos en el esfuerzo pesquero.

4.8. RELACIÓN ENTRE LAS REGIONES Y LA PRODUCCIÓN DE CAMARÓN Y SIERRA

Camarón

Teóricamente las zonas con altas concentraciones de [Chla], tienen una mayor producción pesquera debido a que están vinculadas a una mayor concentración de fitoplancton y nutrientes, y por tanto a la base de la cadena alimenticia. Partiendo de esta premisa y de las imágenes de anomalías de [Chla], los meses con concentraciones positivas en la mayor parte del Golfo de México van desde diciembre hasta abril, cubriendo la región del golfo profundo; es decir, toda la región¹; así como, las costas de Tamaulipas. En cuanto a la temperatura superficial del mar, se presentan anomalías negativas para esos meses, por lo tanto se confirma la relación entre altas concentraciones de [Chla] y bajas temperaturas. Sin embargo, no es posible establecer que las condiciones de TSM y [Chla] que se presentan en los meses mencionados influyan directamente en la producción del camarón ya que de acuerdo con los autores citados ([Tabla 1](#)) las mayores capturas se dan de mayo a noviembre; es decir, en condiciones de bajas concentraciones de [Chla] y anomalías positivas de temperatura.

Por su parte, SAGARPA reporta para Tamaulipas volúmenes mayores de producción entre agosto y septiembre ([Tabla 13](#)), cuando las anomalías de TSM son positivas y las anomalías de [Chla] son negativas, por lo que se esperaba que la producción fuera menor dadas las bajas concentraciones de nutrientes. Las características de las regiones 4 y 6 de TSM ([Ilustración 34](#)); así como, las 8 regiones de [Chla] ([Ilustración 35](#)), que se localizan en la zona 1 de producción camaronera en la plataforma de Tamaulipas, son las siguientes: la región 8 de [Chla] presenta anomalías positivas de diciembre a marzo y negativas de TSM; es decir, condiciones teóricamente favorables para la producción pesquera; sin

embargo, Tamaulipas tiene su mayor producción en los meses de agosto-septiembre (verano), como ya se mencionó anteriormente. Por cual parece que los cambios de temperatura tienen un mayor impacto, como el que se presenta cuando la dirección de la corriente costera de Louisiana y Texas (LATEX), se dirige hacia el sur en septiembre (región 6 de TSM) favoreciendo el desove de camarón blanco. La TSM define dos regiones en la zona de LATEX: la plataforma interna, región 5; y la plataforma externa, región 4, ambas influenciadas por las descargas frías del río Mississippi que llegan hasta las costas de Tamaulipas en invierno, pero en agosto y septiembre son aguas relativamente cálidas que se observan en las imágenes de anomalías como positivas. Cabe señalar que septiembre es el mes más cálido para el Golfo de México y el Caribe. La Región 6 de TSM que abarca la parte sur de Tamaulipas y el estado de Veracruz es una zona de transición con aguas cálidas en primavera y verano. Esta región está mayormente asociada a procesos estacionales de circulación costera del viento y de la superficie del mar.

Campeche (zona de captura 2) observa mayores volúmenes de producción en diciembre y enero, [tabla 13](#). Las regiones de [Chla] que les corresponden son la 11 y 12 de [Chla]; así como, la 7 y 8 de TSM, aunque también la zona de Laguna de Términos (región 7), es muy importante en la producción de camarón Siete Barbas. Por su parte la región 11 presenta anomalías positivas de [Chla] de octubre a diciembre y negativas de TSM; es decir, condiciones favorables para la pesca en los meses de otoño lo cual coincide con la alta productividad que reporta Campeche. Cabe mencionar que, en la zona de captura frente a Campeche, no solo la [Chla] o la TSM influyen en la producción, sino también la propia dinámica de las corrientes costeras que convergen en la plataforma de Campeche y Tabasco generando un transporte perpendicular a la costa, el cual provoca resuspensión y transportes de nutrientes, sedimentos y materia orgánica mar adentro.

La zona de captura del Caribe mexicano frente a la Isla Contoy y Quintana Roo en donde la producción es principalmente de camarón rojo y camarón roca, se ubica

la región 1 de [Chla] que abarca todo el golfo profundo y el Caribe. Esta región colinda con la región 13 de [Chla] lo cual indica la presencia de un frente entre aguas con diferentes concentraciones de [Chla], localizado justamente frente a la isla Contoy. Por su parte la región 3 de TSM cubre el área del Caribe y una parte del golfo que corresponde a la entrada de la Corriente del Lazo y la plataforma interna de la península de Yucatán; sin embargo, en el análisis de los componentes principales, en el eigenvector1, también se aprecia la zona del frente hidrológico reportado por Pérez y otros (1996), en donde hay un incremento de plancton en verano. En cuanto a los meses de captura, diversos autores señalan mayo, julio y agosto para el camarón rojo, lo cual coincide con el afloramiento de plancton encontrado por Pérez y otros (1996), mientras que el camarón roca se captura de agosto a noviembre ([Tabla 1](#)). Por su parte en los anuarios de SAGARPA los meses de mayor captura para esta especie; es decir, en Yucatán y Quintana Roo son febrero, marzo y octubre ([Tabla 13](#)).

Sierra

La relación [Chla] – TSM y producción de Sierra es más clara que en el caso del camarón, puesto que hay coincidencia en los meses de captura que reportan los autores citados: Beaumariage (1970), Springer y otros (1958) e INP (2008), ([Tabla 2](#)) y SAGARPA. Para los primeros, los meses de captura son de enero a abril y de octubre a diciembre, mientras que para SAGARPA son de enero a marzo y de septiembre a diciembre según lo reportado en los anuarios de 2003 a 2005 ([Tabla 14](#)). La zona de captura es prácticamente sobre la plataforma continental hasta una profundidad cercana a los 50m y varía a lo largo del año de acuerdo con la dinámica de las corrientes y de la temperatura superficial del mar, debido a que el pez Sierra sigue la isoterma de 20°C (INP). Así, durante primavera-verano se desplaza de sur a norte y en sentido inverso en otoño-invierno, siguiendo la dirección de la corriente costera. Las regiones de [Chla] que comprenden la zona de captura son la 8, 9, 10, 11 y 13, mientras que las regiones 8, 9 y 10 pertenecen a la plataforma de Tamaulipas y Veracruz, las cuales presentan anomalías positivas de enero a abril y de octubre a diciembre. Por su parte, las regiones 11 y

13 localizadas frente a Tabasco y la península de Yucatán tienen anomalías positivas solamente de octubre a diciembre. De esta manera, las mayores capturas coinciden con las mayores concentraciones de [Chla]. En cuanto a la relación con las regiones de TSM 6, 7 y 8 las mayores capturas coinciden con los meses en los cuales la TSM comienza a descender debido al enfriamiento superficial del mar y al cambio en la dirección de la corriente costera, que en septiembre-octubre se invierte hacia el sur advectando aguas frías provenientes del norte del golfo, básicamente región 6 y 7. A su vez al irse desplazando hacia el sur van generando frentes térmicos que provocan surgencias y un incremento en la [Chla] (Fernández Eguiarte, Zavala Hidalgo, & Romero, 1998). Por su parte la región 8 esta sincronizada con el ciclo anual de calentamiento y enfriamiento del golfo; sin embargo, en abril y mayo presenta anomalías positivas alrededor de 0.5 °C con respecto al Golfo de México, en donde predomina el valor de -0.5°C.

En la región 11 de [Chla] y región 7 de TSM, frente a las costas de Tabasco, la mayor producción se da en marzo cuando la temperatura está por arriba de los 20°C y las anomalías de [Chla] son negativas. De hecho es un mes de transición en el que la corriente fría que se desplaza hacia el sur por la plataforma de Tamaulipas y Veracruz, alcanza su límite más sur del Golfo de México para luego invertir su dirección hacia el Norte, de tal forma que la TSM comienza a incrementarse de Sur a Norte. Esto sugiere que la migración del pez Sierra hacia el sur está más influenciada por los cambios en la temperatura que en el incremento de [Chla] y por lo tanto de fitoplancton. Por último la temporada de captura importante de Campeche, Yucatán y Quintana Roo, se da en diciembre-enero cuando las anomalías de TSM son ligeramente positivas y las de [Chla] son negativas, una vez más el pez Sierra se localiza en zonas donde la temperatura es alrededor de 23°C con lo cual parece que prefiere temperaturas por encima de los 20°C que reporta el Instituto Nacional de la Pesca(INP).

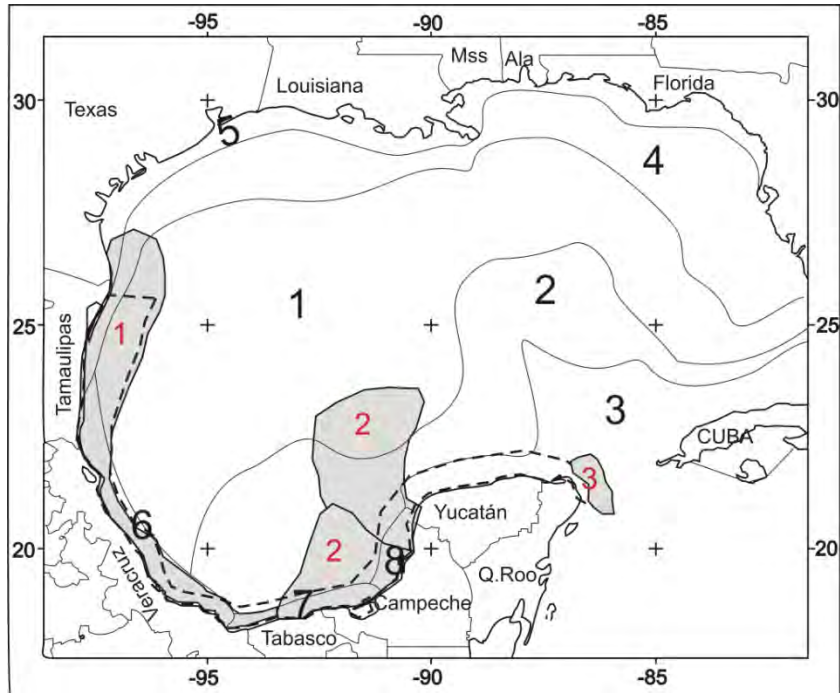


Ilustración 34. Regiones TSM y zonas de captura de Sierra (línea punteada) y Camarón (área gris). Los números rojos señalan las zonas de producción de camarón.

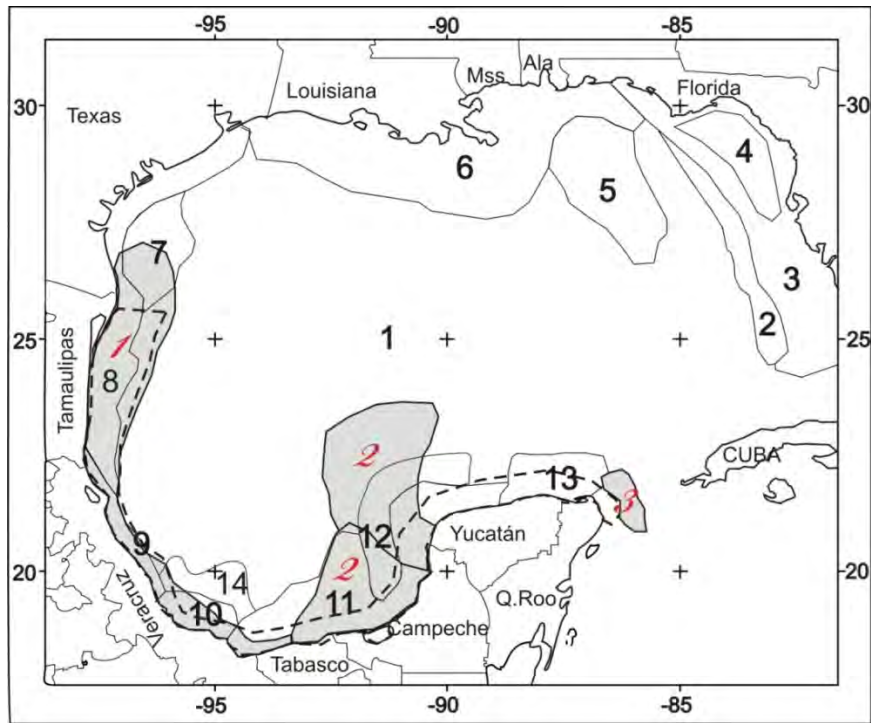


Ilustración 35. Regiones [Chla] y zonas de captura de Sierra (línea punteada) y Camarón (área gris). Los números rojos señalan las zonas de producción de camarón.

CONCLUSIONES

El análisis climatológico de la temperatura superficial del mar (TSM); así como, de la concentración de clorofila *a*, [Chla], a partir de datos satelitales, permitió hacer una regionalización del Golfo de México y la parte noroeste del Mar Caribe, identificando zonas con características similares de TSM por un lado y de [Chla], por otro.

Se definieron 8 regiones de TSM a partir del Análisis de Funciones Empíricas Ortogonales. Los tres primeros modos representaron el 97.71% de la varianza explicada. El eigenvector 1 refleja la respuesta de la TSM al calentamiento latitudinal a lo largo del año, mientras que el eigenvector 2 sugiere un mayor efecto de procesos oceánicos y atmosféricos asociados a la zona costera. Las regiones encontradas fueron: región 1, golfo profundo; región 2, área de influencia de la Corriente del Caribe; región 3, Mar Caribe; región 4, plataforma externa de Texas-Louisiana-Alabama; región 5, plataforma interna de Texas-Louisiana-Alabama; región 6, plataforma de Veracruz; región 7, descarga del sistema Grijalva-Usumacinta y región 8, plataforma de Campeche.

A partir del análisis de los cuatro primeros modos de [Chla], que representaron el 84.9% de la varianza explicada, se obtuvieron 14 regiones. Región 1, golfo profundo; región 2, plataforma oeste externa de Florida; región 3, plataforma oeste interna-intermedia del sur de Florida; región 4, sur de la bahía Apalachee; región 5, pluma del río Mississippi en verano; región 6, área de gran influencia del río Mississippi; región 7, área fuera de la plataforma sur de Texas; región 8, plataforma interna Texas y Tamaulipas; región 9, plataforma norte de Veracruz; región 10, plataforma sur de Veracruz; región 11, plataforma de Campeche y Tabasco; región 12, plataforma externa del banco de Campeche; región 13, sureste del banco de Campeche y región 14, área fuera de la plataforma sur de Veracruz.

A escala global, tanto en la regionalización obtenida en el proyecto de los grandes ecosistemas marinos (LME), como en el proyecto de evaluación global de las

aguas internacionales (GIWA), el Golfo de México y Mar Caribe mexicano pertenecen a regiones distintas. En las regiones de TSM obtenidas en este estudio, el Caribe se separa del Golfo de México, quedando delimitado por la región 3, la cual se aprecia claramente en el eigenvector 1, con valores correspondientes a anomalías de 1°C e inferiores, con respecto al promedio climatológico. Para el caso de las regiones de [Chla], el Mar Caribe mexicano forma la región 1, junto con la parte oceánica del Golfo de México, lo cual se puede observar prácticamente en los cuatro eigenvectores obtenidos.

A escala nacional, los trabajos citados, muestran mayor detalle en las regiones que ellos mismos establecen; sin embargo, a pesar de que algunas de ellas se localizan en zonas que podrían coincidir con las aquí propuestas, como la plataforma de Tamaulipas y Veracruz (TAVE) o bien, la plataforma de Yucatán, definitivamente sus límites son distintos como resultado de las variables y criterios tomados en cuenta para su definición. Aquí se consideraron dos variables por separado, TSM y [Chla], mientras que, en los trabajos citados, se conjuntaron más de dos variables a la vez.

En cuanto a la relación de las regiones de TSM y [Chla] con la producción total pesquera en el Golfo de México y Mar Caribe mexicano, en el año 2000, el estado con mayor producción fue Veracruz que corresponde a la región 6 de TSM y región 9 de [Chla]. La producción se dividió en dos periodos, enero-mayo y agosto-noviembre. En el 2005, el estado con mayor captura también fue Veracruz aunque para este año los dos periodos están menos definidos, puesto que el único mes con capturas por debajo del promedio anual fue junio, de hecho para todos los estados. Por otra parte, el año 2000 tuvo una mayor producción que el 2005, y algo característico de ese año es que se presentó el fenómeno de la Niña entre 1999 y 2000. No se puede concluir en este trabajo, dado que no fue el objeto de estudio, si el volumen de captura relativamente mayor en el 2000 se debió al efecto de La Niña, puesto que para poder determinar su influencia se deben considerar más datos de producción en años de La niña.

El mayor volumen de producción anual de camarón entre 1996 y 2005 lo tuvo el estado de Tamaulipas, región 6 y 4 de TSM, y 8 de [Chla], seguido del estado de Campeche, región 8 de TSM y 11 de [Chla].

La producción mensual de camarón en Tamaulipas, de 2003 a 2005 se dio en agosto y septiembre; es decir, en verano cuando las anomalías de TSM son positivas y las anomalías de [Chla] son negativas. Es probable que el periodo de captura esté determinado por los cambios de temperatura, más que por la temperatura en sí, ya que las [Chla] son relativamente bajas y se tiene reportado que, en el caso del camarón blanco, el desove se asocia a los cambios de temperatura.

Por su parte, Campeche tiene mayores producciones de camarón entre diciembre y enero, en los cuales se presentan anomalías positivas de [Chla] de octubre a diciembre y negativas de TSM; es decir, condiciones favorables para la pesca en los meses de invierno lo cual coincide con la alta productividad que reporta Campeche, aunque es probable que este periodo de captura también esté relacionado con el máximo periodo de reclutamiento.

Por último cabe señalar que no hay coincidencia entre los periodos de captura de camarón reportados en fuentes distintas a los anuarios estadísticos de pesca y estos últimos. Autores diversos señalan como periodos de captura desde mayo hasta noviembre, excepto en el caso de camarón rojo que es de septiembre a enero, mientras que, como ya se mencionó anteriormente SAGARPA maneja de enero a mayo y de agosto a diciembre.

Los estados con mayor producción anual de Sierra de 1996 a 2005 fueron Campeche seguido de Veracruz. Los meses con mayor producción son enero a marzo y de septiembre a diciembre, de acuerdo con SAGARPA, y de enero a abril y de octubre a diciembre según otras fuentes; es decir, hay básicamente dos periodos uno en invierno y otro en otoño. De esta manera, las mayores capturas coinciden con las mayores concentraciones de [Chla]; así como, con los meses en

los cuales cambia la dirección de la corriente costera en la plataforma Tamaulipas-Veracruz, cuando la TSM está alrededor de los 23°C.

Por último cabe resaltar que este trabajo es un referente en estudios de regionalización orientados al uso de recursos pesqueros, si bien solo se utilizaron dos recursos, marca la pauta para estudios más profundos. El análisis de las variaciones y distribución de parámetros físicos; así como, de la captura de recursos es una primera aproximación a la representación espacial de la producción pesquera con algunos factores que la determinan.

REFERENCIAS

(INE-SEMARNAT), I. N. (2004). *Diagnóstico ambiental del Golfo de México* (Vol. I). México D.F.: INE-SEMARNAT.

Aguirre Gómez, R. (2002). *Los mares mexicanos a través de la percepción remota. Temas Selectos de Geografía de México III. Métodos y Técnicas para el estudio del Territorio*. México: Plaza y Valdés.

Aguirre Gómez, R. (2002). Primary production in the southern Gulf of Mexico estimated from solar stimulated natural fluorescence. *Hidrobiológica* , 12 (1), 21-28.

Arreguín Sánchez, F. (1981). Diagnóstico de la pesquería de camarón de roca (*Sicyonia brevirostris*, Stimpson 1817) de Contoy, Q. Roo, México. *Ciencia Pesquera* , 1 (2), 1-85.

Barnes A., R., Holmes, A. W., Barnes, W. L., Wayne, E. E., McClain, C. R., & Svitek, T. (1994). SeaWiFS Prelaunch Radiometric Calibration and Spectral Characterization. (N. GSFC, Ed.) *SeaWiFS Technical Report Series. NASA Technical Memorandum 104566* , Vol. 23.

Beaumariage, D. S. (1970). Current status of biological investigations of Florida's mackerel fisheries. *Proc. Gulf Caribb. Fish. Inst. 22nd Annual Meeting. 1969*, (págs. 79-86).

Behrenfeld, M. J., & Falkowski, P. G. (1997). A Consumer's guide to phytoplankton primary productivity models. *Limnology and Oceanography* , 42 (7), 1479 - 1491.

Bernstein, R. L. (1982). Sea Surface Temperature estimation using the NOAA 6 satellite AVHRR. *Journal of Geophysical Research* , 87C, 1761- 1778.

Butler. (1990). *Aplicación de la tecnología de percepción remota a las pesquerías marinas: manual introductorio. Documento Técnico de Pesca 295*. FAO.

Caire Lomelí, J. (2002). *Cartografía básica*. México, D.F.: Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.

Canaria, U. d. (2003). http://bdigital.ulpgc.es-digital-texto-pdf-210471_0004.pdf. Recuperado el 18 de Diciembre de 2009, de http://bdigital.ulpgc.es-digital-texto-pdf-210471_0004.pdf

Castro, R. G. (1982). *Análisis biológico pesquero del camarón café *Peneaeus aztecus* en las costas de Tamaulipas, México*. CRIP Tampico. Instituto Nacional de Pesca.

Castro, R. G., Arreguín Sánchez, F., & Chávez, E. (1986). *Análisis regional del recurso camarón en aguas del NO de México (Tamaulipas y Veracruz, México)*. CRIP Tampico. Instituto Nacional de Pesca.

CCRS. (s.f.). *Canada Centre for Remote Sensing, Remote Sensing Tutorial*. Recuperado el 2011, de <http://rst.gsfc.nasa.gov/Front/overview.html>

CIA. (1972). *World Data bank 2*. Washington, D.C. USA: Central Intelligence Agency.

Cochane, J. (1968). Currents and waters of the eastern Gulf of Mexico and western Caribbean, of the western tropical Atlantic Ocean, and of the eastern tropical Pacific Ocean. *Dep. Oceanogr. Meteorol.* , 19-28.

Cochrane, & J.D. (1969). Bull Jpn Soc Fish Oceanogr No 8(Prof. Uda's Commemorative Papers). 123-128.

Cochrane, J., & Kelly, F. (1986). Low-frequency circulation on the Texas-Louisiana continental shelf. *J. Geophys. Res.* , 91, 10645-10659.

Cole, J., & Villacastin, C. (2000). Sea surface variability in the northern Benguela upwelling system, and implications for fisheries research. *Int. J. Remote Sensing* , 21 (8), 1597-1617.

CONABIO, CONANP, TNC, & PRONATURA. (2007). *Análisis de vacíos y omisiones en conservación de la biodiversidad marina de México: océanos, costas e islas*. México D.F.: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, The Nature Conservancy, Pronatura, A.C.

Couch, C., Hopkins, E., & Hardy, S. (1996). *Influences of environmental settings on aquatic ecosystems in the Apalachicola-Chattahoochee-Flint River Basin*. U.S. Geological Survey.

De la Lanza Espino, G. (2001). *Características físico-químicas de los mares mexicanos. Temas Selectos de Geografía de México I. Textos monográficos 9. Las costas y los mares de México*. México, D.F.: Plaza y Valdes.

DMA, D. M. (1992). *Digital Chart of the World*. Fairfax, Virginia: Defense Mapping Agency.

Duthit Somoza, R., Kampel, M., & Buss Souza, R. (21-26 de Abril de 2007). <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.14.18.27.01/doc/4699-4706.pdf>. Recuperado el 9 de Marzo de 2009, de <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.14.18.27.01/doc/4699-4706.pdf>

FAO. (1992). *Fisheries Technical Paper*. Obtenido de <http://www.fao.org/DOCREP/003/T0446S/T0446S00.HTM>

Fernández - Eguiarte, A., Gallegos - García, A., & Zavala - Hidalgo, J. (1992). *Carta de Oceanografía Física 2. Aspectos Regionales de los mares mexicanos.* . México, D.F.: Instituto de Geografía, UNAM.

Fernández Eguiarte, A., Zavala Hidalgo, J., & Romero, C. R. (1998). *Circulación de invierno en la plataforma de Tamaulipas y áreas adyacentes. Memorias. IX Reunión SELPER*. Zacatecas, México.

- Gallegos, A. (1996). Descriptive physical oceanography of the Caribbean Sea. *American Geophysical Union* , 51, 36-55.
- Gilbes, F., Tomas, C., Walsh, J., & Müller-Karger, F. (1996). An episodic chlorophyll plume on the West Florida Shelf. *Cont. Shelf Res.* , 16, 1201-1207.
- González, C. (2002). *Pigmentos fotosintéticos*. Recuperado el 16 de marzo de 2009, de <http://www.botanica.cnba.uba.ar/Trabprac/Tp6/Pigmentos.htm>
- Gower, J. F. (1972). A survey of the uses of remote sensing from aircraft and satellite in oceanography and hydrography. *Pac.Mar.Sci.Rep.Inst.Ocean.Sci.* , 72-3.
- Gracia, G. A. (1989). *Ecología y pesquería del camarón blanco Peneaeus setiferus (Linnaeus 1767)*. Tesis doctoral. Fac. de Ciencias, UNAM.
- Gracia, G. A. (1991). Spawning stock recruitment relationships of the white shrimp in the southwestern Gulf of México. *Trans. Am. Fish Soc.* , 120, 519-527.
- Hernández Gil, R. (8 de julio de 2002). <http://forest.ula.ve/~rebenhg>. Recuperado el diciembre de 2010
- Hernández, B. (2002). El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y los frentes fríos que arriban a la región occidental cubana. *Investigaciones Marinas, Valparaíso* , 30 (2), 3-19.
- Herrera Silvera, J. A. (1994). Correlaciones de parámetros hidrobiológicos de la Laguna de Celestúm, Yucatán. *Anuario Instituto Ciencias del Mar y Limnología* , 21 (1-2), 43-53.
- Herron, R. C., Leming, T., & Li, J. (1989). Satellite detected fronts and butterflyfish aggregations in the northeastern Gulf of México. *Continental Shelf Research* , 9 (6), 569-588.
- Hinchey, F. A. (1979). *Vectores y Tensores*. México: Limusa.
- Hoepffener, N., & Sturm, B. (1999). Depth-integrated primary production in the eastern tropical and subtropical North Atlantic basin from ocean colour imagery. *Int. Remote Sensing* , 20 (7), 1435-1456.
- Hoepffner, N., Mélin, F., Dowell, M., Marra, J., Saino, T., & Wilson, C. (2008). Biogeochemical Cycles. En IOCCG, *Why Ocean Colour? The Societal Benefits of Ocean-Colour Technology* (pág. 141).
- INE, & SEMARNAT. (2006). *Ordenamiento ecológico marino. Visión temática de la regionalización* (Primera ed.). (A. Córdova y Vázquez, F. Rosete Verges, G. Enríquez Hernández, & B. Fernández de la Torre, Edits.) México, D.F.
- INE-SEMARNAT. (2004). *Diagnóstico ambiental del Golfo de México* (Vol. I). México, D.F.: INE-SEMARNAT.

- INP. (1999). Recuperado el 2008, de http://www.sefsc.noaa.gov/sedar/download/SEDAR16_RD_05.pdf
- INP. (1999). Recuperado el 2009, de www.inp.sagarpa.gob.mx/Publicaciones/sustentabilidad/Golfo
- IOCCG. (2002). Remote sensing of ocean colour in Coastal, and other optically-complex waters. (S. Sathyendranath, Ed.) *Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group* (3).
- Kahru, M., & Mitchell, B. (1999). Empirical chlorophyll algorithm and preliminary SeaWiFS validation for the California Current. *Int. Remote Sensing*, 20 (17), 3423-3429.
- Kahru, M., Nagarani, C. M., & Kirankumar, A. S. (2001). Split-window and multi-angle methods of sea surface temperature determination: an analysis. *Int. J. Remote Sensing*, 22 (16), 3237-3251.
- Kaplan, W. (1981). *Cálculo avanzado*. CECSA.
- Kelly, M. (1994). *Florida river flow patterns and the Atlantic Multidecadal Oscillation*. Ecologic Evaluation Section, Southwest Florida Water Management District, West Palm Beach.
- Kidwell, K. (1991). *NOAA polar orbiter data user's guide*. NOAA/NESDIS/NCDC/SDSD, Washington, D.C.
- Kratzer, S., Bowers, D., & Tett, P. (2000). Seasonal changes in colour ratios and optically active constituents in the optical Case-2 waters of Menai Strait, North Wales. *Int. J. Remote Sensing*, 21 (11), 2225-2246.
- Lara-Lara, J. R., Arenas Fuentes, V., Bazán Guzmán, C., Díaz Castañeda, V., Escobar Briones, E., García Abad, M. d., y otros. (2008). Los ecosistemas marinos. En CONABIO, *Capital natural de México, vol I: Conocimiento actual de la biodiversidad* (págs. 135-159).
- Libes, S. M. (1992). *An Introduction to Marine Biogeochemistry*. New York: Wiley.
- Marlon R., L., Roderick E., W., & Platt, T. (1985). Absorption and photosynthetic action spectra for natural phytoplankton population: Implications for production in the open ocean. *Limnol. Oceanogr.*, 30 (4), 794-806.
- Martínez-López, B., & J, Z.-H. (2009). Seasonal and interannual variability of cross-shelf transports of chlorophyll in the Gulf of Mexico. *J. Mar Systems*, 77, 1-20.
- Mateos-Jasso, A. (2009). *Estudio sobre la estacionalidad de la surgencia de Yucatán*. Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mather, P. M. (1987). *Computer Processing of Remotely-Sensed images an introduction*. John Wiley & Sons.

- McClain, E., Pichel, W., & Walton, C. (1985). Comparative Performance of AVHRR-Based Multichannel Sea Surface Temperatures. *Journal of Geophysical Research*, *90*, 11587-11601.
- Mendoza N., A. (1968). Consideraciones sobre la biología pesquera de la Sierra (*Scomberomorus maculatus*. Mitchell), en el Estado de Veracruz. *Bios.*, *1* (2), 11-22.
- Merino, M. (1997). Upwelling on the Yucatan shelf hydrographic evidence. *Journal of Marine Systems* (13), 101-121.
- Molinari, R. L., & Morrison, J. (1988). The separation of the Yucatan Current from the Campeche bank and the intrusion of the Loop Current into the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*, *93* (C9), 10645-10654.
- Monreal-Gómez, A., Salas de León, D. A., & Velasco Mendoza, H. (2004). La hidrodinámica del Golfo de México. En M. Caso, I. Pisanty, & E. Ezcurra (Edits.), *Diagnóstico ambiental del Golfo de México* (Vol. 1, pág. 626). INE-SEMARNAT.
- Morey, S., Dukhovskoy, D., & Bourassa, M. (2009). Connectivity of the Apalachicola River flow variability and the physical and bio-optical oceanic properties of the northern West Florida Shelf. *Cont. Shelf Res.*
- Morey, S., O'Brien, J., Walcraft, A., & Zavala-Hidalgo, J. (2003b). Export pathways for river discharge fresh water in the northern Gulf of Mexico. *J. Geophys. Res.*, *108* (3303).
- Morey, S., Schroeder, W., O'Brien, J., & Zavala-Hidalgo, J. (2003a). The annual cycle of riverine influence in the eastern Gulf of Mexico basin. *Geophys. Res. Letters*, *30* (1867).
- Morey, S., Zavala-Hidalgo, J., & O'Brien, J. (2005). The seasonal variability of continental shelf circulation in the northern and western Gulf of Mexico from high-resolution numerical model. En W. Sturges, & A. Lugo-Fernández (Edits.), *New developments in the circulation of the Gulf of Mexico*. (Vol. Geophysical Monograph Series 161).
- Müller-Karger, & Walsh, J. J. (1991). On the seasonal phytoplankton concentration and sea surface temperature cycles of the Gulf of Mexico as determined by satellites. *Journal of Geophysical Research*, *96* (C7), 12645-12665.
- Navarrete, A., Garduño, H., & Gracia, A. (1994). La pesquería de camarón en altamar, Golfo de México y Caribe Mexicano. XXX Aniversario del INP. *Series Pesquerías Relevantes: Crustáceos*.
- NOAA. (s.f.). *Caribbean Sea: # 12*. Recuperado el 5 de julio de 2011, de <http://www.lme.noaa.gov>
- NOAA. (s.f.). *Gulf of Mexico: LME#5*. Recuperado el 5 de julio de 2011, de <http://www.lme.noaa.gov>
- NOAA. (2003). *NOAA Polar Orbiter Data User's Guide Section 3.3*. Recuperado el 8 de Diciembre de 2009, de <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/podug/html/c3/sec3-3.htm>

- Nowlin, W., Jochens, A., Howard, M., DiMarco, S., & Schroeder, W. (2000). Hydrographic properties and infrared circulation over the northeast shelves of the Gulf of Mexico during spring to midsummer of 1998. *Gulf of Mexico Science*, 18, 40-54.
- Pérez de los Reyes, R., Victoria del Río, I., Signoret Poillon, M., Gallegos García, A., Penié Rodríguez, I., Gil Varona, C., y otros. (1996). Reporte de un frente hidrológico al NE de la península de Yucatán. *Bol. Soc. Meteorol. Cuba*, 2 (1).
- Platt, T., & Sathyendranath, S. (1999). Spatial structure of pelagic ecosystem processes in the global ocean. (S. N. York, Ed.) *Ecosystems*, 2 (5), 384-394.
- Raisz, E. (1985). *Cartografía general*. Barcelona, España.
- Rees, W. G. (1990). *Physical Principles of Remote Sensing*. Cambridge University Press.
- Rees, W. (1990). *Physical principles of remote sensing. Topics in Remote Sensing I*. Cambridge, Great Britain: University press.
- Robinson, I. (1985). *Satellite Oceanography. An introduction for oceanographers and remote-sensing scientists*. Ellis Horwood Press, distribuidores: John Wiley.
- Ruiz, R. (1979). *Upwelling north of the Yucatán Península*. Tesis, Texas A&M University.
- Ruoying, H., & Weisberg, R. H. (2002). West Florida shelf circulation and temperature budget for the 1999 spring transition. *Continental Shelf Research*, 22, 719-748.
- SAGARPA-CONAPESCA. (2005). *Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca*. México, D.F.: Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca.
- SAGARPA-CONAPESCA. (2004). *Anuario estadístico de pesca 2004*. SAGARPA-CONAPESCA.
- SAGARPA-INE. (2005). *FUNDAMENTO TÉCNICO PARA EL ESTABLECIMIENTO DE VEDAS A LA PESCA DE CAMARÓN EN EL GOLFO DE MÉXICO Y MAR CARIBE (2005)*. Técnico.
- Santana H., H. (1997). *Relación del éxito de la pesca palangrera con la temperatura superficial y la profundidad en el Pacífico Mexicano*. Tesis. México: Fac. de Ciencias, UNAM.
- Schanda, E. (1986). *Physical Fundamentals of Remote Sensing*. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokio.
- SeaSpace Corporation. (2009). *SeaSpace*. Recuperado el 13 de marzo de 2009, de <http://www.seaspace.com/technical/html/man7/nitpix.html>
- SeaSpace. (1999). *Terascan Reference Manual*.
- SEMARNAT. (1996). *Pesquerías relevantes de México, 1962-1992 (Vol. Tomo 1)*. INE-SEMARNAT.

- Signoret, M., Bulit, C., & Pérez, R. (1998). Patrones de distribución de clorofila-a, y producción primaria en aguas del Golfo de México y Mar Caribe. *Hidrobiología* , 8 (2), 81-88.
- Smith, M. K. (1988). Grado de conocimiento del recurso camarón del Golfo de México. En SEPESCA-INP, *Los recursos pesqueros del país* (págs. 399-419). México D.F.: SEPESCA-INP.
- Soto, L. A., Barba, E., & Sánchez, A. J. (1996). Vinculación de la investigación marina con los sectores productivos pesqueros mediante el monitoreo de la zona costera de México. *Revista Geo-UNAM* , 3 (1), 15-20.
- Soto, L., Rodríguez de la Cruz, M. C., Rodríguez, R., Gracia, A., Soto, F., Arreguín Sánchez, F., y otros. (1982). Análisis del conocimiento científico-tecnológico nacional de las pesquerías de camarón en el Golfo de México. *Reunión Nacional sobre la investigación científico-pesquera*. Cocoyoc, Morelos. México.
- Springer, V. G., & Pirson, J. (1958). Fluctuations in the relative abundance of sport fishes as indicated by catch at Port Arkansas, Texas, 1952-1965. *Inst. Mar. Sci. Pub.* , 5, 169-185.
- Walker, N. (2005). Wind and eddy-related shelf/slope circulation processes and coastal upwelling in the northwestern Gulf of Mexico. En W. Sturges, & Lugo-Fernandez (Edits.), *Geophysical Monograph* (Vol. 161, págs. 295-314).
- Weisberg, R., & Muller-Karger, F. (2001). West Florida shelf response to local wind forcing: April 1998. *Journal Geophysical Research* , 106 (31), 239-262.
- Weisberg, R., He, R., Liu, Y., & Virmani, J. (2005). West Florida shelf circulation on synoptic, seasonal and inter-annual time scales, in circulation in the Gulf of Mexico: Observations and models. (W. Sturges, & Lugo-Fernández, Edits.) *Geophysical Monograph Series 161* , 325-347.
- Wilks, D. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* (2a. edición ed.). Academic Press.
- Wiseman, W. J., & Sturges, W. (1999). Physical oceanography of the Gulf of Mexico: Processes that regulate its biology. En H. Kumpf, K. Seidinger, & K. Sherman, *The Gulf of Mexico Large Marine Ecosystem. Assessment, sustainability and management* (pág. 704).
- Yáñez-Arancibia, A., & Day, J. W. (2004). Environmental sub-regions in the Gulf of Mexico coastal zone: the ecosystem approach as an integrated management tool. *Ocean & Coastal Management* , 727-757.
- Yao, W., Hall, L., Goldof, D., & Müller-Karger, F. (2000). *IEEE Explore*. Recuperado el 28 de Enero de 2009, de <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=00906074>
- Zavala-Hidalgo, J., Gallegos García, A., Martínez López, B., Morey, S. L., & O'Brien, J. J. (2006). Seasonal upwelling on the Western and Southern shelves of the Gulf of Mexico. *Ocean Dynamics* .

Zavala-Hidalgo, J., Morey, S. L., & O'Brien, J. (2003). Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of Mexico using a high resolution numerical model. *Journal of Geophysical Research (Oceans)*, 108 (C12), 3389.

Zavala-Hidalgo, J., Parés-Sierra, A., & Ochoa, J. (2002). Seasonal variability of the temperature and heat fluxes in the Gulf of Mexico. *Atmósfera*, 15, 81-104.